

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得河北农业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：晁莉丽 签字日期：2003年5月12日

学 位 论 文 版 权 使用 授 权 书

本学位论文作者完全了解河北农业大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构递交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权河北农业大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：晁莉丽

导师签名：程伍群

签字日期：2003年5月12日

签字日期：2003年5月12日

学位论文作者毕业后去向：河北农业大学城建学院

工作单位：河北农业大学城乡建设学院 电话：13091217669

通讯地址：河北农业大学城乡建设学院水利系 邮编：071000

1 文献综述

水资源是人类社会一切生产、生活的物质基础。没有水资源就没有人类^[1]。随着人类社会的进步和世界经济的飞速发展，对水的需求量不断增加。国际上曾有人预言，20世纪为争能源而发生战争，而21世纪的战争将是因水而起的。在我国，尤其是实行改革开放以后，我国的工农业迅猛发展，人口持续增长，城市规模扩大和人民生活水平的大幅度提高，国民经济各部门对水的需求量急剧增加，水资源供需矛盾日趋严重^{[2][3]}。建国以来，全国总用水量从1949年的1031亿m³，增至1997年的5623亿m³。按现状用水量统计，全国在中等干旱年缺水358亿m³，按国民经济发展“九五”计划目标测算，现状缺水量为778亿m³，到2030年全国将缺水4000~5000亿m³，到2050年全国将缺水6000~7000亿m³^[4]。可见，水资源短缺已经成为制约社会经济的“瓶颈”。

1.1 我国农业水资源现状

据统计，我国多年平均年降水总量61889亿m³，折合年降水深648mm，只相当于全球陆面平均年降水深的81%，亚洲陆面平均年降水深的88%^[5]。1997年，水资源开发利用5623亿m³，占水资源总量的19.9%，其中农业用水量占75.5%，城市用水600亿m³（其中生活用水为100亿m³，其余为工业用水）。中国属于贫水国，水资源总量虽占世界总水量的百分之六，但人均水资源很少，只有世界人均的四分之一，排名第121位，被列为13个人均水资源量最贫乏的国家之一^[6]。我国是一个人口众多的农业大国，农业生产的稳定发展对于确保我国社会经济持续发展具有决定性意义^[6]。1992年联合国环境与发展大会通过的《21世纪议程》和1994年3月中国政府通过的《中国的21世纪议程》，都把农业的可持续发展列为重点内容和优先发展领域。因此，可持续农业将是未来世界农业发展的方向和趋势^[7]。开发利用水资源，对于稳定农业作为国民经济的基础地位具有重要意义。

1.2 河北省农业水资源的现状

河北省地处华北平原中部，是全国水资源最贫乏的省份之一。全省地表水平均年资源量125亿m³，地下水水平均年资源量130亿m³，合计为203亿m³（扣除重复水量52亿m³）。全省人均水资源量311m³，地表水资源量3120m³/hm²，均为全国均值的11%^[8]。我省耕地实灌面积39766.54km²，其中保浇30015km²，抗旱灌溉9751.54km²。平原区耕地约46690km²，尚有旱地17342km²。根据现状分析，1997

1 文献综述

水资源是人类社会一切生产、生活的物质基础。没有水资源就没有人类^[1]。随着人类社会的进步和世界经济的飞速发展，对水的需求量不断增加。国际上曾有人预言，20世纪为争能源而发生战争，而21世纪的战争将是因水而起的。在我国，尤其是实行改革开放以后，我国的工农业迅猛发展，人口持续增长，城市规模扩大和人民生活水平的大幅度提高，国民经济各部门对水的需求量急剧增加，水资源供需矛盾日趋严重^{[2][3]}。建国以来，全国总用水量从1949年的1031亿m³，增至1997年的5623亿m³。按现状用水量统计，全国在中等干旱年缺水358亿m³，按国民经济发展“九五”计划目标测算，现状缺水量为778亿m³，到2030年全国将缺水4000~5000亿m³，到2050年全国将缺水6000~7000亿m³^[4]。可见，水资源短缺已经成为制约社会经济的“瓶颈”。

1.1 我国农业水资源现状

据统计，我国多年平均年降水总量61889亿m³，折合年降水深648mm，只相当于全球陆面平均年降水深的81%，亚洲陆面平均年降水深的88%^[5]。1997年，水资源开发利用5623亿m³，占水资源总量的19.9%，其中农业用水量占75.5%，城市用水600亿m³（其中生活用水为100亿m³，其余为工业用水）。中国属于贫水国，水资源总量虽占世界总水量的百分之六，但人均水资源很少，只有世界人均的四分之一，排名第121位，被列为13个人均水资源量最贫乏的国家之一^[6]。我国是一个人口众多的农业大国，农业生产的稳定发展对于确保我国社会经济持续发展具有决定性意义^[6]。1992年联合国环境与发展大会通过的《21世纪议程》和1994年3月中国政府通过的《中国的21世纪议程》，都把农业的可持续发展列为重点内容和优先发展领域。因此，可持续农业将是未来世界农业发展的方向和趋势^[7]。开发利用水资源，对于稳定农业作为国民经济的基础地位具有重要意义。

1.2 河北省农业水资源的现状

河北省地处华北平原中部，是全国水资源最贫乏的省份之一。全省地表水平均年资源量125亿m³，地下水水平均年资源量130亿m³，合计为203亿m³（扣除重复水量52亿m³）。全省人均水资源量311m³，地表水资源量3120m³/hm²，均为全国均值的11%^[8]。我省耕地实灌面积39766.54km²，其中保浇30015km²，抗旱灌溉9751.54km²。平原区耕地约46690km²，尚有旱地17342km²。根据现状分析，1997

年全省用水量 220 亿 m^3 , 超采地下水 44 亿 m^3 , 预测到 2010 年, 平水年缺水 106.3 亿 m^3 , 偏枯年份缺水 170.1 亿 m^3 ^[9]。

1.3 国内外雨水资源利用研究现状

1.3.1 国外雨水利用发展情况

雨水利用是一项曾被广泛应用的传统技术。据墨西哥的一份报告指出, 雨水利用可追溯到公元前 6000 多年的阿兹特克 (Aztec) 和马雅文化时期, 那时人们已把雨水用于农业生产和生活所需。在墨西哥、秘鲁和南美的安第斯山脉上, 建有大片梯田和数百公里精巧的渠道, 供应印加人的太阳帝国和现已消失的马丘比城, 使数十万人在此生活。在哥伦比亚、厄瓜多尔、苏里南沿海和秘鲁南部高原, 3000 多年前的村居就成功地利用不同地形, 修筑台地种植玉米, 在沟底种植水稻。公元前 2000 多年的中东地区, 典型的中产阶级家庭都有雨水收集系统用于生活和灌溉。阿拉伯人收集雨水, 种植了无花果、橄榄树、葡萄、大麦等。在利比亚的干燥河谷内, 人们用堤坝、涵管把高原上的水引至谷底使用。埃及人用集流槽收集雨水作为生活之用。2000 年前, 阿拉伯闪米特部族的纳巴泰人在降雨仅 100 余毫米的内盖夫 (Negev) 沙漠, 创造了径流收集系统, 利用这样少量的雨水种出了庄稼, 后世称为纳巴泰方法。70 年代从卫星照片上发现了埃及北部的径流收集系统和非洲撒哈拉东南部存在的集水灌溉系统 (Gawan, Caag, Teras)。印度西部的塔尔沙漠, 人们通过水池、石堤、水坝、水窖等多种形式收集雨水, 获得足够的水量来支持世界上人口最稠密的沙漠, 每平方公里达 60 人。几百年前, 在美国亚利桑那州的印地安人用漏斗状的长堤, 把雨水集中到几公顷的土地上, 种植玉米、甜瓜等。500 多年前, 科罗拉多州的阿那萨基人建造数以千计的小坝截留雨水种植玉米、豆子和蔬菜。可以毫不夸张的说, 雨水利用曾经有力的支撑了古代许多地方的灿烂文明。

然而, 从十九世纪末、二十世纪初开始, 随着现代技术的兴起, 先是地下水的开采在许多地方逐渐取代了雨水利用技术。接着, 以控制洪涝灾害、利用河川径流和开采地下水为目标的当代水利工程的修建, 又为社会经济的发展, 特别是农业的持续稳定增长, 发挥了很大的作用, 取得了巨大的效益。雨水利用渐渐被人们遗忘。但是, 人类社会经济的进一步发展, 人口的不断增长, 对有限的水资源提出了越来越高的要求, 水资源的紧缺已成为许多地方制约经济发展的因素, 同时, 大型水利工程引起越来越多的生态环境问题也迫使人们思考和寻找其它出路。20 世纪 60 年代, 日本开始收集利用路面雨水, 70 年代修筑集流面收集雨水。近年来, 世界各地

年全省用水量 220 亿 m^3 , 超采地下水 44 亿 m^3 , 预测到 2010 年, 平水年缺水 106.3 亿 m^3 , 偏枯年份缺水 170.1 亿 m^3 ^[9]。

1.3 国内外雨水资源利用研究现状

1.3.1 国外雨水利用发展情况

雨水利用是一项曾被广泛应用的传统技术。据墨西哥的一份报告指出, 雨水利用可追溯到公元前 6000 多年的阿兹泰克 (Aztec) 和马雅文化时期, 那时人们已把雨水用于农业生产和生活所需。在墨西哥、秘鲁和南美的安第斯山脉上, 建有大片梯田和数百公里精巧的渠道, 供应印加人的太阳帝国和现已消失的马丘比城, 使数十万人在此生活。在哥伦比亚、厄瓜多尔、苏里南沿海和秘鲁南部高原, 3000 多年前的村居就成功地利用不同地形, 修筑台地种植玉米, 在沟底种植水稻。公元前 2000 多年的中东地区, 典型的中产阶级家庭都有雨水收集系统用于生活和灌溉。阿拉伯人收集雨水, 种植了无花果、橄榄树、葡萄、大麦等。在利比亚的干燥河谷内, 人们用堤坝、涵管把高原上的水引至谷底使用。埃及人用集流槽收集雨水作为生活之用。2000 年前, 阿拉伯闪米特部族的纳巴泰人在降雨仅 100 余毫米的内盖夫 (Negev) 沙漠, 创造了径流收集系统, 利用这样少量的雨水种出了庄稼, 后世称为纳巴泰方法。70 年代从卫星照片上发现了埃及北部的径流收集系统和非洲撒哈拉东南部存在的集水灌溉系统 (Gawan, Caag, Teras)。印度西部的塔尔沙漠, 人们通过水池、石堤、水坝、水窖等多种形式收集雨水, 获得足够的水量来支持世界上人口最稠密的沙漠, 每平方公里达 60 人。几百年前, 在美国亚利桑那州的印地安人用漏斗状的长堤, 把雨水集中到几公顷的土地上, 种植玉米、甜瓜等。500 多年前, 科罗拉多州的阿那萨基人建造数以千计的小坝截留雨水种植玉米、豆子和蔬菜。可以毫不夸张的说, 雨水利用曾经有力的支撑了古代许多地方的灿烂文明。

然而, 从十九世纪末、二十世纪初开始, 随着现代技术的兴起, 先是地下水的开采在许多地方逐渐取代了雨水利用技术。接着, 以控制洪涝灾害、利用河川径流和开采地下水为目标的当代水利工程的修建, 又为社会经济的发展, 特别是农业的持续稳定增长, 发挥了很大的作用, 取得了巨大的效益。雨水利用渐渐被人们遗忘。但是, 人类社会经济的进一步发展, 人口的不断增长, 对有限的水资源提出了越来越高的要求, 水资源的紧缺已成为许多地方制约经济发展的因素, 同时, 大型水利工程引起越来越多的生态环境问题也迫使人们思考和寻找其它出路。20 世纪 60 年代, 日本开始收集利用路面雨水, 70 年代修筑集流面收集雨水。近年来, 世界各地

年全省用水量 220 亿 m^3 , 超采地下水 44 亿 m^3 , 预测到 2010 年, 平水年缺水 106.3 亿 m^3 , 偏枯年份缺水 170.1 亿 m^3 ^[9]。

1.3 国内外雨水资源利用研究现状

1.3.1 国外雨水利用发展情况

雨水利用是一项曾被广泛应用的传统技术。据墨西哥的一份报告指出, 雨水利用可追溯到公元前 6000 多年的阿兹泰克 (Aztec) 和马雅文化时期, 那时人们已把雨水用于农业生产和生活所需。在墨西哥、秘鲁和南美的安第斯山脉上, 建有大片梯田和数百公里精巧的渠道, 供应印加人的太阳帝国和现已消失的马丘比城, 使数十万人在此生活。在哥伦比亚、厄瓜多尔、苏里南沿海和秘鲁南部高原, 3000 多年前的村居就成功地利用不同地形, 修筑台地种植玉米, 在沟底种植水稻。公元前 2000 多年的中东地区, 典型的中产阶级家庭都有雨水收集系统用于生活和灌溉。阿拉伯人收集雨水, 种植了无花果、橄榄树、葡萄、大麦等。在利比亚的干燥河谷内, 人们用堤坝、涵管把高原上的水引至谷底使用。埃及人用集流槽收集雨水作为生活之用。2000 年前, 阿拉伯闪米特部族的纳巴泰人在降雨仅 100 余毫米的内盖夫 (Negev) 沙漠, 创造了径流收集系统, 利用这样少量的雨水种出了庄稼, 后世称为纳巴泰方法。70 年代从卫星照片上发现了埃及北部的径流收集系统和非洲撒哈拉东南部存在的集水灌溉系统 (Gawan, Caag, Teras)。印度西部的塔尔沙漠, 人们通过水池、石堤、水坝、水窖等多种形式收集雨水, 获得足够的水量来支持世界上人口最稠密的沙漠, 每平方公里达 60 人。几百年前, 在美国亚利桑那州的印地安人用漏斗状的长堤, 把雨水集中到几公顷的土地上, 种植玉米、甜瓜等。500 多年前, 科罗拉多州的阿那萨基人建造数以千计的小坝截留雨水种植玉米、豆子和蔬菜。可以毫不夸张的说, 雨水利用曾经有力的支撑了古代许多地方的灿烂文明。

然而, 从十九世纪末、二十世纪初开始, 随着现代技术的兴起, 先是地下水的开采在许多地方逐渐取代了雨水利用技术。接着, 以控制洪涝灾害、利用河川径流和开采地下水为目标的当代水利工程的修建, 又为社会经济的发展, 特别是农业的持续稳定增长, 发挥了很大的作用, 取得了巨大的效益。雨水利用渐渐被人们遗忘。但是, 人类社会经济的进一步发展, 人口的不断增长, 对有限的水资源提出了越来越高的要求, 水资源的紧缺已成为许多地方制约经济发展的因素, 同时, 大型水利工程引起越来越多的生态环境问题也迫使人们思考和寻找其它出路。20 世纪 60 年代, 日本开始收集利用路面雨水, 70 年代修筑集流面收集雨水。近年来, 世界各地

悄然掀起了雨水利用的高潮，并成立了国际雨水集流系统协会（IWRA），于1982～1997年对世界各地召开了8次国际雨水收集大会。联合国粮食组织和国际干旱地区农业研究中心，对雨水资源的利用也很重视。目前，以色列在集雨农业灌溉方面成就显著。

1.3.2 国内雨水利用发展情况

我国在秦汉时期就有修建涝池塘坝拦蓄雨水的历史记载，水窖修建历史也有数百年。20世纪50年代开始利用窖水灌溉玉米、蔬菜等，突破了原来只用窖水作为生活饮用水的传统。从80年代末期开始，随着节水灌溉理论、技术、设备的广泛应用，群众将传统的雨水集蓄工程和节水灌溉措施结合起来，实施雨水集蓄工程，发展农业生产，从试点示范到规模发展，大致经历了以下三个阶段：

一是试验研究阶段：通过对相关技术的试验研究，论证了雨水集蓄工程的可行性和可持续性，提出了雨水集蓄工程的理论与方法，取得了《干旱半干旱地区雨水集蓄利用》、《集水农业的理论与实践》、《半干旱丘陵山区集雨节水灌溉工程试验》等一批实用成果，为雨水集蓄工程工作的开展奠定了理论和技术基础。

二是试点示范阶段：甘肃、宁夏、陕西、山西、内蒙、河南、四川等省区在试验研究的基础上，进一步开展试点示范工作，使雨水集蓄工程从单项技术发展为农业综合集成技术；从单一的利用模式走向高效综合利用；从理论探讨、技术攻关走向实用阶段，找出了一条干旱山区农业和社会经济发展的新路子。如1995年，甘肃省在干旱半干旱地区实施了“121雨水集流工程”，几乎在同一时期，宁南山区实施“窑窖农业”，内蒙古自治区进行了“112集雨节灌工程”实验示范研究等，都取得了很好的效果。

三是推广应用阶段：1997～1998两年，财政部、水利部联合组织的雨水集蓄工程试点工作带动了西北、西南、华北地区雨水集蓄工程工作的迅速发展，各级政府和广大群众对雨水集蓄工程的认识进一步提高，工程建设开始从零散型向集中连片型发展，“一园一窖”成为广大群众奋斗的目标。

1.3.3 雨水资源利用研究现状

雨水利用有许多方式，但归纳起来有2个方面：雨水的被动利用和雨水的主动利用^[10]。雨水的被动利用，指通过一定的工程措施增加拦蓄入渗或减少蒸发来利用雨水。它包括就地拦蓄入渗利用和覆盖抑制蒸发利用两种利用方式。黄土高原国土整治28字方略的核心是“全部降雨就地入渗”^[11]。可见，就地拦蓄入渗利用是针对

悄然掀起了雨水利用的高潮，并成立了国际雨水集流系统协会（IWRA），于1982~1997年对世界各地召开了8次国际雨水收集大会。联合国粮食组织和国际干旱地区农业研究中心，对雨水资源的利用也很重视。目前，以色列在集雨农业灌溉方面成就显著。

1.3.2 国内雨水利用发展情况

我国在秦汉时期就有修建涝池塘坝拦蓄雨水的历史记载，水窖修建历史也有数百年。20世纪50年代开始利用窖水灌溉玉米、蔬菜等，突破了原来只用窖水作为生活饮用水的传统。从80年代末期开始，随着节水灌溉理论、技术、设备的广泛应用，群众将传统的雨水集蓄工程和节水灌溉措施结合起来，实施雨水集蓄工程，发展农业生产，从试点示范到规模发展，大致经历了以下三个阶段：

一是试验研究阶段：通过对相关技术的试验研究，论证了雨水集蓄工程的可行性和可持续性，提出了雨水集蓄工程的理论与方法，取得了《干旱半干旱地区雨水集蓄利用》、《集水农业的理论与实践》、《半干旱丘陵山区集雨节水灌溉工程试验》等一批实用成果，为雨水集蓄工程工作的开展奠定了理论和技术基础。

二是试点示范阶段：甘肃、宁夏、陕西、山西、内蒙、河南、四川等省区在试验研究的基础上，进一步开展试点示范工作，使雨水集蓄工程从单项技术发展为农业综合集成技术；从单一的利用模式走向高效综合利用；从理论探讨、技术攻关走向实用阶段，找出了一条干旱山区农业和社会经济发展的新路子。如1995年，甘肃省在干旱半干旱地区实施了“121雨水集流工程”，几乎在同一时期，宁南山区实施“窑窖农业”，内蒙古自治区进行了“112集雨节灌工程”实验示范研究等，都取得了很好的效果。

三是推广应用阶段：1997~1998两年，财政部、水利部联合组织的雨水集蓄工程试点工作带动了西北、西南、华北地区雨水集蓄工程工作的迅速发展，各级政府和广大群众对雨水集蓄工程的认识进一步提高，工程建设开始从零散型向集中连片型发展，“一园一窖”成为广大群众奋斗的目标。

1.3.3 雨水资源利用研究现状

雨水利用有许多方式，但归纳起来有2个方面：雨水的被动利用和雨水的主动利用^[10]。雨水的被动利用，指通过一定的工程措施增加拦蓄入渗或减少蒸发来利用雨水。它包括就地拦蓄入渗利用和覆盖抑制蒸发利用两种利用方式。黄土高原国土整治28字方略的核心是“全部降雨就地入渗”^[11]。可见，就地拦蓄入渗利用是针对

悄然掀起了雨水利用的高潮，并成立了国际雨水集流系统协会（IWRA），于1982～1997年对世界各地召开了8次国际雨水收集大会。联合国粮食组织和国际干旱地区农业研究中心，对雨水资源的利用也很重视。目前，以色列在集雨农业灌溉方面成就显著。

1.3.2 国内雨水利用发展情况

我国在秦汉时期就有修建涝池塘坝拦蓄雨水的历史记载，水窖修建历史也有数百年。20世纪50年代开始利用窖水灌溉玉米、蔬菜等，突破了原来只用窖水作为生活饮用水的传统。从80年代末期开始，随着节水灌溉理论、技术、设备的广泛应用，群众将传统的雨水集蓄工程和节水灌溉措施结合起来，实施雨水集蓄工程，发展农业生产，从试点示范到规模发展，大致经历了以下三个阶段：

一是试验研究阶段：通过对相关技术的试验研究，论证了雨水集蓄工程的可行性和可持续性，提出了雨水集蓄工程的理论与方法，取得了《干旱半干旱地区雨水集蓄利用》、《集水农业的理论与实践》、《半干旱丘陵山区集雨节水灌溉工程试验》等一批实用成果，为雨水集蓄工程工作的开展奠定了理论和技术基础。

二是试点示范阶段：甘肃、宁夏、陕西、山西、内蒙、河南、四川等省区在试验研究的基础上，进一步开展试点示范工作，使雨水集蓄工程从单项技术发展为农业综合集成技术；从单一的利用模式走向高效综合利用；从理论探讨、技术攻关走向实用阶段，找出了一条干旱山区农业和社会经济发展的新路子。如1995年，甘肃省在干旱半干旱地区实施了“121雨水集流工程”，几乎在同一时期，宁南山区实施“窑窖农业”，内蒙古自治区进行了“112集雨节灌工程”实验示范研究等，都取得了很好的效果。

三是推广应用阶段：1997～1998两年，财政部、水利部联合组织的雨水集蓄工程试点工作带动了西北、西南、华北地区雨水集蓄工程工作的迅速发展，各级政府和广大群众对雨水集蓄工程的认识进一步提高，工程建设开始从零散型向集中连片型发展，“一园一窖”成为广大群众奋斗的目标。

1.3.3 雨水资源利用研究现状

雨水利用有许多方式，但归纳起来有2个方面：雨水的被动利用和雨水的主动利用^[10]。雨水的被动利用，指通过一定的工程措施增加拦蓄入渗或减少蒸发来利用雨水。它包括就地拦蓄入渗利用和覆盖抑制蒸发利用两种利用方式。黄土高原国土整治28字方略的核心是“全部降雨就地入渗”^[11]。可见，就地拦蓄入渗利用是针对

黄土高原的水土流失提出的有效措施。目前，就地拦蓄入渗在黄土高原以淤地坝为主的沟谷治理成效尤为显著。针对黄土高原的旱坡地的地面蒸发量占45%~50%的主要特点，张信宝等提出了“地面覆盖+生物篱”的旱坡地生态农业系统^[12]。雨水的主动利用，是指通过一定的汇流面将雨水汇集储存，到作物需水关键期进行补灌^[13]。它仅包括雨水富集叠加利用。

* 就地拦蓄入渗利用 利用水分的重力效应和土壤的水库效应，根据土壤的可渗透性，以及雨水通过下渗被土壤接纳后的可贮性，通过采用营造田间微集水面和改进耕作措施等水保耕作技术，使降雨就地拦蓄入渗，减少雨水径流流失，提高土壤的贮水量，延长土壤水分的有效供应时间，进而提高植物对雨水的利用效率^[14]。就地拦蓄入渗利用技术包括水保工程技术和水保耕作技术。水保工程技术是通过水平梯田、隔坡梯田、水平沟、鱼鳞坑等，对地面进行较大的工程处理，以改变原有的地形特征，使降雨就地集中拦蓄入渗，提高雨水利用率。水保耕作技术是通过耕作措施的改进，来实现降雨的就地拦蓄入渗，达到收集雨水的目的^[15]。常采用的有：带状间作技术、粮草轮作技术、等高耕作技术、起垄耕作技术、水平沟耕作技术、渗水孔耕作技术、蓄水聚肥耕作技术，这些技术的应用在不同程度上起到拦蓄径流、减少土壤冲刷、提高粮食产量的作用。

* 覆盖抑制蒸发利用 雨水被土壤接纳成为土壤水分后，受光、热和风力作用具有可蒸发性。在干旱半干旱区，无效蒸发十分剧烈，研究资料表明：其中70%~80%以径流和蒸发形式损失掉，仅有20%~30%被作物利用^[16]。特别是一年中大部分时间处于裸露和半裸露状态的土地，由于忽略了减少地面蒸发，造成雨水资源的蒸发损失。因此，利用覆盖抑制蒸发，延长水在土壤水库中的集蓄时间，是提高雨水利用率的有效途径之一。目前，覆盖技术主要有6类：白色覆盖技术、黑色覆盖技术、绿色覆盖技术、砾石覆盖技术、化学覆盖技术和土壤覆盖技术。

* 雨水富集叠加利用 干旱半干旱地区降雨偏少，分配不均，供需错位，由于自然降水具有再分配性和可移动性，利用自然和人工创造的集流面进行雨水资源的再叠加，即把多个地块的雨水径流叠加于一个地块上或把多个时段的雨水径流叠加在一个时段上，减少集流面水分的无效消耗，增加水分供应；减少作物非生育期的水分供应，提高雨水资源的利用率^[11]。雨水富集叠加利用技术主要包括集流技术、储水技术和高效集约利用技术三个方面。（1）集流技术。齐广平对甘肃几种常见的人工集流场的应用现状和存在问题作了分析，并提出了集流场发展的新思路：即重

点集中在高效廉价的人工集雨面研究和建设上，并辅之以自然集流场^[17]。沈红鹰等研究发现：天然集雨面所利用的荒坡的坡度以5°~10°为宜^[18]。(2)储水技术。水窖是一种相对较好的储水设施，定西地区水保所测定，用红胶泥水窖储水年均保存率为75.4%，混凝土薄壳水窖储水年均保存率为97.1%^[19]。(3)雨水高效集约利用技术。雨水的高效利用主要包括输水方式、节水灌溉方式和节水灌溉制度3个方面。

1.4 本文的研究意义

◆从水资源开发现状看

首先，我省地表水资源开发率已经很高，海河流域已达90%以上，超过国际上一般认为达到严重水荒的极限值50%，造成河流沿岸生态环境的恶化^[20]。其次，河北省地下水严重超采，据初步调查统计，至2000年底，河北平原形成了众多地下水下降“漏斗”，由此引起地面沉陷、裂缝和海水入侵等一系列环境问题和地质灾害^[21]。总之，河北省传统水资源开发利用已达到极限。这使雨水资源的开发利用成为必要。1995年国际雨水集流系统协会主席霍雨时认为，雨水利用是21世纪水资源开发的方向^[22]

◆从降雨特征上看

河北省降雨偏少，分配不均，无效蒸发严重，供需错位。多年平均降水量在550mm左右，属稳定单向缺水区。且降雨的季节分配不均匀，年内6~9月集中了年降雨量的70%以上。雨后的无效蒸发也很剧烈。由于夏田作物生育期处于低雨量期，雨水供需错位。说明河北省存在对雨水资源进行高效集约利用的需要。

◆从农业生产潜力看

水是农业生产的命脉。河北省属于干旱半干旱地区。通过对干旱半干旱地区的农业自然生产潜力的分析，发现水分亏缺限制了其它因子作用的发挥，是“箍桶效应”中的短板，如果解除水分胁迫，初级生产力是目前的4~5倍^[23]。张国祥等研究发现：旱地的产量为最干旱时段的土壤水分所限制，进而认识到，旱地农业生产力存在二重“箍桶效应”现象，并提出了耕地集雨就地灌溉^[24]。耕地集雨就地灌溉，是立足于旱地上的降雨总量，采取截长补短的技术思路，将高峰期的部分雨水收集并蓄存，在作物最缺水的时段进行灌溉，提高生育期土壤水分下限，从而提高农业生产水平。通过雨水资源的高效利用，减少水分的限制是农业可持续发展的自身需要。

点集中在高效廉价的人工集雨面研究和建设上，并辅之以自然集流场^[17]。沈红鹰等研究发现：天然集雨面所利用的荒坡的坡度以5°~10°为宜^[18]。(2)储水技术。水窖是一种相对较好的储水设施，定西地区水保所测定，用红胶泥水窖储水年均保存率为75.4%，混凝土薄壳水窖储水年均保存率为97.1%^[19]。(3)雨水高效集约利用技术。雨水的高效利用主要包括输水方式、节水灌溉方式和节水灌溉制度3个方面。

1.4 本文的研究意义

◆从水资源开发现状看

首先，我省地表水资源开发率已经很高，海河流域已经达90%以上，超过国际上一般认为达到严重水荒的极限值50%，造成河流沿岸生态环境的恶化^[20]。其次，河北省地下水严重超采，据初步调查统计，至2000年底，河北平原形成了众多地下水下降“漏斗”，由此引起地面沉陷、裂缝和海水入侵等一系列环境问题和地质灾害^[21]。总之，河北省传统水资源开发利用已达到极限。这使雨水资源的开发利用成为必要。1995年国际雨水集流系统协会主席霍雨时认为，雨水利用是21世纪水资源开发的方向^[22]

◆从降雨特征上看

河北省降雨偏少，分配不均，无效蒸发严重，供需错位。多年平均降水量在550mm左右，属稳定单向缺水区。且降雨的季节分配不均匀，年内6~9月集中了年降雨量的70%以上。雨后的无效蒸发也很剧烈。由于夏田作物生育期处于低雨量期，雨水供需错位。说明河北省存在对雨水资源进行高效集约利用的需要。

◆从农业生产潜力看

水是农业生产的命脉。河北省属于干旱半干旱地区。通过对干旱半干旱地区的农业自然生产潜力的分析，发现水分亏缺限制了其它因子作用的发挥，是“箍桶效应”中的短板，如果解除水分胁迫，初级生产力是目前的4~5倍^[23]。张国祥等研究发现：旱地的产量为最干旱时段的土壤水分所限制，进而认识到，旱地农业生产力存在二重“箍桶效应”现象，并提出了耕地集雨就地灌溉^[24]。耕地集雨就地灌溉，是立足于旱地上的降雨总量，采取截长补短的技术思路，将高峰期的部分雨水收集并蓄存，在作物最缺水的时段进行灌溉，提高生育期土壤水分下限，从而提高农业生产水平。通过雨水资源的高效利用，减少水分的限制是农业可持续发展的自身需要。

引言

随着河北省人口的持续增长和国民经济的飞速发展，工农业用水、城镇居民生活用水迅速增加，水资源供求矛盾日益突出。河北省是靠超采地下水和牺牲环境为代价来支持国民经济高速发展的。每年超采约 20~40 亿 m^3 ，自 1975 年至 1990 年，河北平原已消耗 500 亿 m^3 的地下水存量。水资源的过量超采造成了一系列严重的环境生态问题。特别是近年来降雨量偏少，地表水和地下水资源补给量大大减少，供求形势更加严峻。为了缓解水资源的供求矛盾，促进河北省农业生产可持续发展，有必要在总结国内外雨水利用的基础上，深入探讨河北省雨水资源开发利用的途径。本文以保定市为研究对象，在详细分析保定市的近 40 年来降水分布规律、保定市平原区的作物生育期降水规律和近 50 多年来种植结构变化、粮食总产量与自然降水量的关系、主要农作物的需水规律和缺水特点的基础上，结合雨水资源利用方式，探讨了保定市平原区和山区的雨水利用的有效利用方式和途径。这对缓解河北省水资源危机和实现河北省农业的可持续发展具有十分重要的现实意义。

2 保定市雨水资源量分析

2.1 保定市的基本情况

保定市位于河北省中部，太行山东麓，北与北京市和本省张家口市接壤，西起太行山，与山西省相连，南与石家庄市、衡水市相邻，东与沧州市、廊坊市交界，市政府所在地位于保定市中部，座标为东经 $113^{\circ} 40'$ 至 $116^{\circ} 20'$ ，北纬 $38^{\circ} 10'$ 至 $40^{\circ} 00'$ 。全市总面积为 22112 平方公里，山地丘陵、平原各占一半。地势自西北向东南倾斜，西部是山区丘陵，中部是山麓平原，东部是低平原和白洋淀，境内山峰一般海拔 800~1500 米，最高山峰歪头山海拔 2286 米，浅山丘陵区海拔 40~800 米左右，平原区海拔 8~40 米左右，白洋淀最低点海拔 4 米。全市 10 公里以上河流 99 条，均属大清河系，分南北两支北支落宝滩村以上，称拒马河，以下分南、北拒马河。自 1958 年开始，在上游修建了王快、西大洋、龙门、安格庄等大中型水库 9 座，涉及总库容 30.5 亿立米。保定山丘区面积 10939 平方公里，涉及易县、阜平、涞源、唐县、曲阳、涞水、顺平、满城和徐水等九个县。保定山区土壤主要有褐土、粗骨土、棕壤土及石质土四个土类，其中褐土覆盖 4776 平方公里，粗骨土覆盖 4265 平方公里，棕壤土覆盖 1447 平方公里，石灰土覆盖 450 平方公里。

保定市属温带大陆性气候，四季分明。其特点：春季干旱多风，夏季炎热多雨，

引言

随着河北省人口的持续增长和国民经济的飞速发展，工农业用水、城镇居民生活用水迅速增加，水资源供求矛盾日益突出。河北省是靠超采地下水和牺牲环境为代价来支持国民经济高速发展的。每年超采约 20~40 亿 m^3 ，自 1975 年至 1990 年，河北平原已消耗 500 亿 m^3 的地下水存量。水资源的过量超采造成了一系列严重的环境生态问题。特别是近年来降雨量偏少，地表水和地下水资源补给量大大减少，供求形势更加严峻。为了缓解水资源的供求矛盾，促进河北省农业生产可持续发展，有必要在总结国内外雨水利用的基础上，深入探讨河北省雨水资源开发利用的途径。本文以保定市为研究对象，在详细分析保定市的近 40 年来降水分布规律、保定市平原区的作物生育期降水规律和近 50 多年来种植结构变化、粮食总产量与自然降水量的关系、主要农作物的需水规律和缺水特点的基础上，结合雨水资源利用方式，探讨了保定市平原区和山区的雨水利用的有效利用方式和途径。这对缓解河北省水资源危机和实现河北省农业的可持续发展具有十分重要的现实意义。

2 保定市雨水资源量分析

2.1 保定市的基本情况

保定市位于河北省中部，太行山东麓，北与北京市和本省张家口市接壤，西起太行山，与山西省相连，南与石家庄市、衡水市相邻，东与沧州市、廊坊市交界，市政府所在地位于保定市中部，座标为东经 $113^{\circ} 40'$ 至 $116^{\circ} 20'$ ，北纬 $38^{\circ} 10'$ 至 $40^{\circ} 00'$ 。全市总面积为 22112 平方公里，山地丘陵、平原各占一半。地势自西北向东南倾斜，西部是山区丘陵，中部是山麓平原，东部是低平原和白洋淀，境内山峰一般海拔 800~1500 米，最高山峰歪头山海拔 2286 米，浅山丘陵区海拔 40~800 米左右，平原区海拔 8~40 米左右，白洋淀最低点海拔 4 米。全市 10 公里以上河流 99 条，均属大清河系，分南北两支北支落宝滩村以上，称拒马河，以下分南、北拒马河。自 1958 年开始，在上游修建了王快、西大洋、龙门、安格庄等大中型水库 9 座，涉及总库容 30.5 亿立米。保定山丘区面积 10939 平方公里，涉及易县、阜平、涞源、唐县、曲阳、涞水、顺平、满城和徐水等九个县。保定山区土壤主要有褐土、粗骨土、棕壤土及石质土四个土类，其中褐土覆盖 4776 平方公里，粗骨土覆盖 4265 平方公里，棕壤土覆盖 1447 平方公里，石灰土覆盖 450 平方公里。

保定市属温带大陆性气候，四季分明。其特点：春季干旱多风，夏季炎热多雨，

秋季时日短促，冬季寒冷干燥。年平均气温在 12℃ 左右，最高气温 43.3℃（1955 年 7 月 23 日），最低气温 -30.6℃（1966 年 2 月 22 日）；年日照时数在 2500~2700 小时，平原略高于山区；太阳总辐射量为 123.56~137.93 千卡/cm²，全年无霜期 132~210 天，水面年蒸发量在 1002~1355mm 之间（蒸发皿 E601）。一年内夏及蒸发量最大，约占全年值得 46%，春季和秋季次之，约占 23% 和 24%，冬季最少约占 7%。

2.2 水文系列的采用

本次采用保定市 1956~2000 年逐月的水文系列，对保定市的雨水资源量进行分析研究。这一系列不仅采用了八十年代海滦河流域规划时计算河北省的水资源总量（包括地表水资源量和地下水资源量）所用的 1956~1984 年代表性较好的系列，而且加入了 1985~2000 年 16 年的资料。

2.3 保定市降水量分析与计算

为了了解保定市降水量年内、年际的分布规律，分析保定市雨水资源利用的潜力，我们选择以整个保定市为研究对象进行降水量的频率分析。

2.3.1 降水量系列频率分析

1 根据保定市各测站的分布情况和水文系列的完整性，选择阜平、涞源、易县、涿州、雄县、高阳、安国、定州、曲阳、唐县、满城、容城十二个测站作为分析对象，各测站缺测资料应根据相应的回归方程进行插补延长。利用数字式求积仪求的各站的面积（按泰森多边形法），并计算各站权重。见表 2-1

表 2-1 整个保定市各测站权重表

站名	阜平	涞源	易县	涿州	雄县	高阳
面积	2203.2	2554.2	2622.2	1012.5	745.2	1301.4
权重	0.127	0.147	0.151	0.058	0.043	0.075
站名	安国	定州	曲阳	唐县	满城	容城
面积	1223.1	734.4	815.4	1304.1	1733.4	1136.7
权重	0.070	0.042	0.047	0.075	0.100	0.065

秋季时日短促，冬季寒冷干燥。年平均气温在 12℃ 左右，最高气温 43.3℃（1955 年 7 月 23 日），最低气温 -30.6℃（1966 年 2 月 22 日）；年日照时数在 2500~2700 小时，平原略高于山区；太阳总辐射量为 123.56~137.93 千卡/cm²，全年无霜期 132~210 天，水面年蒸发量在 1002~1355mm 之间（蒸发皿 E601）。一年内夏及蒸发量最大，约占全年值得 46%，春季和秋季次之，约占 23% 和 24%，冬季最少约占 7%。

2.2 水文系列的采用

本次采用保定市 1956~2000 年逐月的水文系列，对保定市的雨水资源量进行分析研究。这一系列不仅采用了八十年代海滦河流域规划时计算河北省的水资源总量（包括地表水资源量和地下水资源量）所用的 1956~1984 年代表性较好的系列，而且加入了 1985~2000 年 16 年的资料。

2.3 保定市降水量分析与计算

为了了解保定市降水量年内、年际的分布规律，分析保定市雨水资源利用的潜力，我们选择以整个保定市为研究对象进行降水量的频率分析。

2.3.1 降水量系列频率分析

1 根据保定市各测站的分布情况和水文系列的完整性，选择阜平、涞源、易县、涿州、雄县、高阳、安国、定州、曲阳、唐县、满城、容城十二个测站作为分析对象，各测站缺测资料应根据相应的回归方程进行插补延长。利用数字式求积仪求的各站的面积（按泰森多边形法），并计算各站权重。见表 2-1

表 2-1 整个保定市各测站权重表

站名	阜平	涞源	易县	涿州	雄县	高阳
面积	2203.2	2554.2	2622.2	1012.5	745.2	1301.4
权重	0.127	0.147	0.151	0.058	0.043	0.075
站名	安国	定州	曲阳	唐县	满城	容城
面积	1223.1	734.4	815.4	1304.1	1733.4	1136.7
权重	0.070	0.042	0.047	0.075	0.100	0.065

秋季时日短促，冬季寒冷干燥。年平均气温在 12℃ 左右，最高气温 43.3℃（1955 年 7 月 23 日），最低气温 -30.6℃（1966 年 2 月 22 日）；年日照时数在 2500~2700 小时，平原略高于山区；太阳总辐射量为 123.56~137.93 千卡/cm²，全年无霜期 132~210 天，水面年蒸发量在 1002~1355mm 之间（蒸发皿 E601）。一年内夏及蒸发量最大，约占全年值得 46%，春季和秋季次之，约占 23% 和 24%，冬季最少约占 7%。

2.2 水文系列的采用

本次采用保定市 1956~2000 年逐月的水文系列，对保定市的雨水资源量进行分析研究。这一系列不仅采用了八十年代海滦河流域规划时计算河北省的水资源总量（包括地表水资源量和地下水资源量）所用的 1956~1984 年代表性较好的系列，而且加入了 1985~2000 年 16 年的资料。

2.3 保定市降水量分析与计算

为了了解保定市降水量年内、年际的分布规律，分析保定市雨水资源利用的潜力，我们选择以整个保定市为研究对象进行降水量的频率分析。

2.3.1 降水量系列频率分析

1 根据保定市各测站的分布情况和水文系列的完整性，选择阜平、涞源、易县、涿州、雄县、高阳、安国、定州、曲阳、唐县、满城、容城十二个测站作为分析对象，各测站缺测资料应根据相应的回归方程进行插补延长。利用数字式求积仪求的各站的面积（按泰森多边形法），并计算各站权重。见表 2-1

表 2-1 整个保定市各测站权重表

站名	阜平	涞源	易县	涿州	雄县	高阳
面积	2203.2	2554.2	2622.2	1012.5	745.2	1301.4
权重	0.127	0.147	0.151	0.058	0.043	0.075
站名	安国	定州	曲阳	唐县	满城	容城
面积	1223.1	734.4	815.4	1304.1	1733.4	1136.7
权重	0.070	0.042	0.047	0.075	0.100	0.065

2 按照泰森多边形法，计算保定市的各年的平均面雨量系列如表 2-2 所示

表 2-2 面雨量计算表

年份	面雨量	年份	面雨量	年份	面雨量	年份	面雨量
1956	903.7	1968	432.0	1980	404.5	1992	418.6
1957	417.2	1969	616.8	1981	392.0	1993	410.7
1958	595.2	1970	476.8	1982	529.9	1994	709.9
1959	809.4	1971	427.9	1983	429.2	1995	744.7
1960	466.3	1972	365.6	1984	361.4	1996	656.8
1961	591.7	1973	737.8	1985	592.8	1997	392.7
1962	387.0	1974	443.4	1986	433.8	1998	482.7
1963	907.2	1975	337.5	1987	530.7	1999	393.3
1964	824.8	1976	588.6	1988	795.1	2000	420.7
1965	283.3	1977	751.9	1989	476.1		
1966	604.7	1978	596.4	1990	684.1		
1967	641.5	1979	645.4	1991	543.8		

(单位: mm)

3 利用配线法，对 1956~2000 年保定市各年的面雨量进行频率分析，统计参数分别是：均值、变差系数和偏态系数。采用配线法来确定这些统计参数。

配线法是以经验频率点据为基础，给它们选配一条符合较好的理论频率曲线，并以此来估计水文要素总体的统计规律。具体步骤如下：

1) 将保定市 1956~2000 年系列的降水资料由大到小排列，计算各项的经验频率，在频率格纸上点绘经验点据（纵坐标为变量的取值，横坐标为对应的经验频率）。

2) 选定皮尔逊III型为水文频率分布线型。

3) 假定一组参数 X 、 Cv 和 Cs 。为了使假定值大致接近实际，可用矩法、三点法以及权函数发求出 3 个参数的值，作为第一次的 X 、 Cv 和 Cs 的假定值。当用矩法估计时，因为 Cv 的抽样误差太大，一般不计算 Cs ，而是根据经验假定 Cs 为 Cv 的某一倍数。

4) 根据假定的 X 、 Cv 和 Cs ，查《水文水利计算》中的附表 2 或附表 1，计算 X_p 值。以 X_p 为纵坐标， P 为横坐标，即可得到频率曲线。将此线画在绘有经验点据的图上，看与经验点据配合的情况，若不理想，则修改参数再进行计算，主要调整 Cv 和 Cs 。

5) 最后根据频率曲线与经验点距的配合情况，从中选择一条与经验点据配合较好的曲线作为采用曲线，相应于该曲线的参数便看作总体参数的估值。

6) 求指定频率的水文变量设计值。

4 由理论频率曲线查得保定市的 1956~2000 年系列的分析成果表见表 2-3:

为了了解不同水文年的降水量, 我们选用 $P=25\%$ 代表丰水年; $P=50\%$ 代表平水年; $P=75\%$ 代表枯水年。

表 2-3 保定市设计面雨量成果表

水文系列	特征值			频率 (%)	降雨量 (mm)
	均值	Cv	Cs/Cv		
1956~2000	547.9	0.3	3.0	25	630
				50	520
				75	420

2.3.2 降水量年内变化分析

年内变化是指年降水量在年内 12 个月的分配情况, 即月降水量的分布特征。在了解月降水量的分布特征的基础上, 充分利用各月的降水, 对指导农业生产具有重要意义。

保定市降水量的年内分配, 系采用 45 年长系列实测降雨资料 (1956~2000)。本次采用代表站法分析保定市降水量年内分配变化规律。首先, 统计代表站 1956~2000 年月、年降水量, 然后计算月降水量占年降水量的百分比。

由计算可知, 7 月份占年降水量的百分比最大, 为 30.5%; 8 月份次之, 为 29.6%; 其次是 6、9 月份, 分别是 12.3%、8.7%; 1 月、12 月占年降水量百分比最小, 分别是 0.4%、0.5%。保定市降水量年内分配不均, 历年降水主要集中在汛期 (6~9 月), 占年降水量的 81%。如图 2-1 所示:

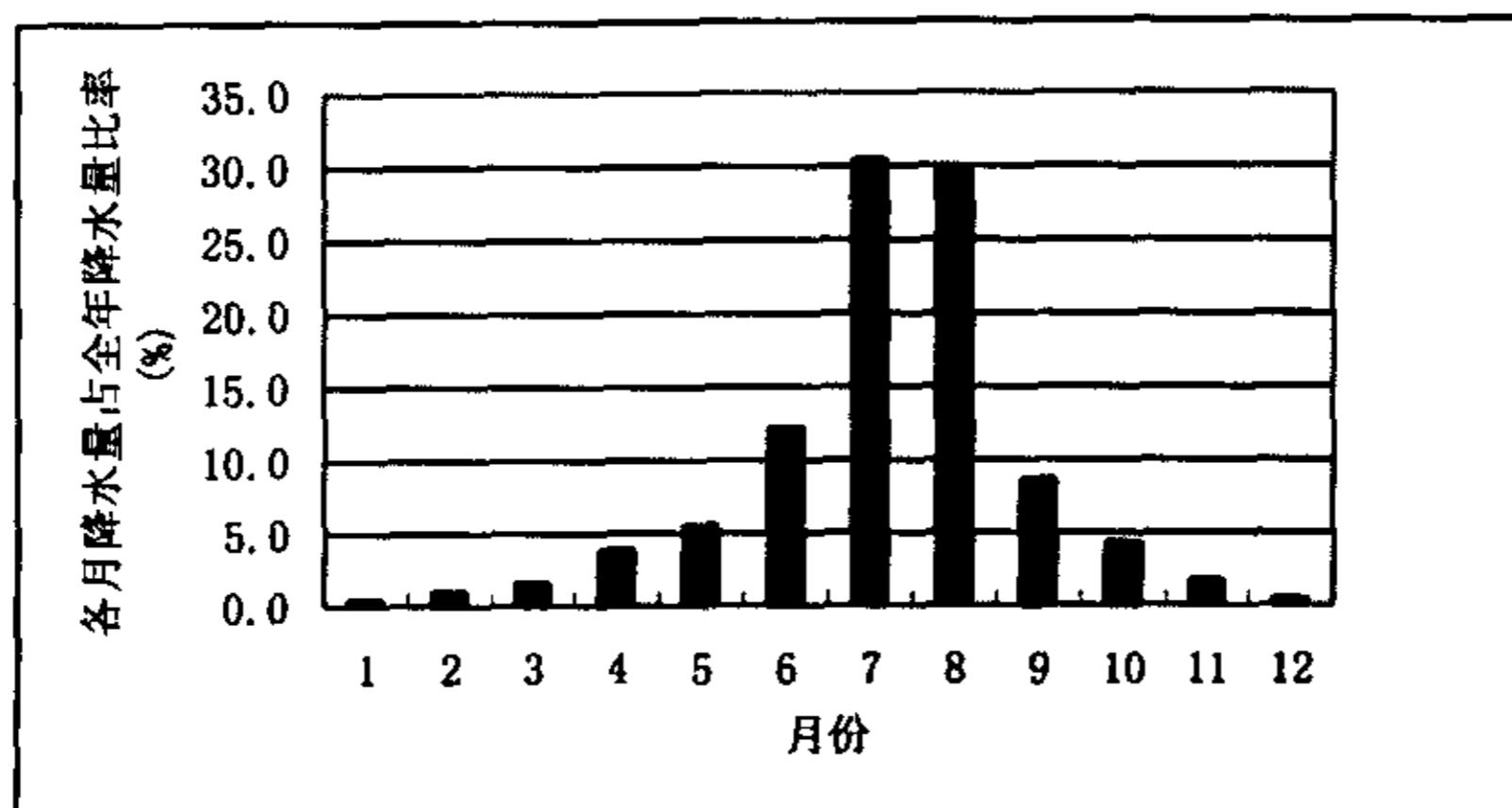


图 2-1 保定市多年平均月降水量分布图

6) 求指定频率的水文变量设计值。

4 由理论频率曲线查得保定市的 1956~2000 年系列的分析成果表见表 2-3:

为了了解不同水文年的降水量, 我们选用 $P=25\%$ 代表丰水年; $P=50\%$ 代表平水年; $P=75\%$ 代表枯水年。

表 2-3 保定市设计面雨量成果表

水文系列	特征值			频率 (%)	降雨量 (mm)
	均值	Cv	Cs/Cv		
1956~2000	547.9	0.3	3.0	25	630
				50	520
				75	420

2.3.2 降水量年内变化分析

年内变化是指年降水量在年内 12 个月的分配情况, 即月降水量的分布特征。在了解月降水量的分布特征的基础上, 充分利用各月的降水, 对指导农业生产具有重要意义。

保定市降水量的年内分配, 系采用 45 年长系列实测降雨资料 (1956~2000)。本次采用代表站法分析保定市降水量年内分配变化规律。首先, 统计代表站 1956~2000 年月、年降水量, 然后计算月降水量占年降水量的百分比。

由计算可知, 7 月份占年降水量的百分比最大, 为 30.5%; 8 月份次之, 为 29.6%; 其次是 6、9 月份, 分别是 12.3%、8.7%; 1 月、12 月占年降水量百分比最小, 分别是 0.4%、0.5%。保定市降水量年内分配不均, 历年降水主要集中在汛期 (6~9 月), 占年降水量的 81%。如图 2-1 所示:

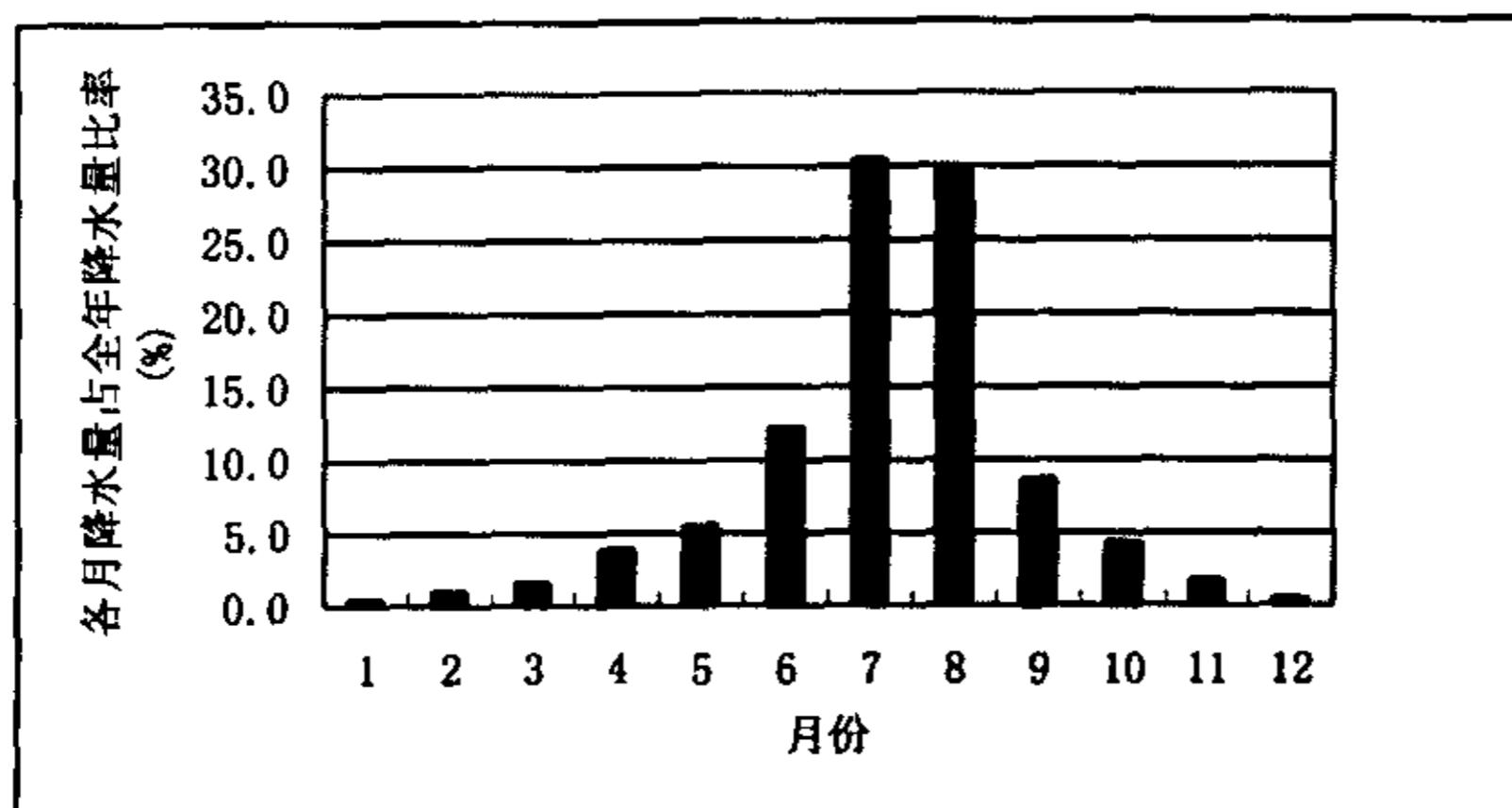


图 2-1 保定市多年平均月降水量分布图

通过比较发现：夏玉米生育期在7~9月，雨热同期，夏玉米生长可以充分利用生育期的天然降水；棉花生育期在4~10月，与汛期6~9月也完全重合，故棉花也可以充分利用汛期的降水量；冬小麦生育期在10月到翌年6月，整个生育期降水量较少，特别是一年中占年降水量百分比最小的1月和12月都包含在冬小麦的生育期内，所以冬小麦生长中直接利用的生育期的降水量很小，但是实际上冬小麦生长在不同程度上也利用了雨季储存在土壤耕层中的水量。总之，保定市降水量的这种年内分配规律有利于夏玉米和棉花的生长，而不利于冬小麦的生长。

为了进一步了解年内各月降水量的多年变化情况，本文选用各月的变差系数来表示这种变化。变差系数 C_v 是衡量不同系列相对离散程度的一个参数。变差系数大的系列，说明该系列降水量相对离散程度大即稳定性较差。变差系数小的系列，说明该系列降水量相对离散程度小即稳定性较强。本文把1956~2000年保定市12个月的降水量分别作为一个单独系列，共12个月降水量系列，分别进行降水量频率分析，分别得出12个系列的变差系数。如图2-2所示：

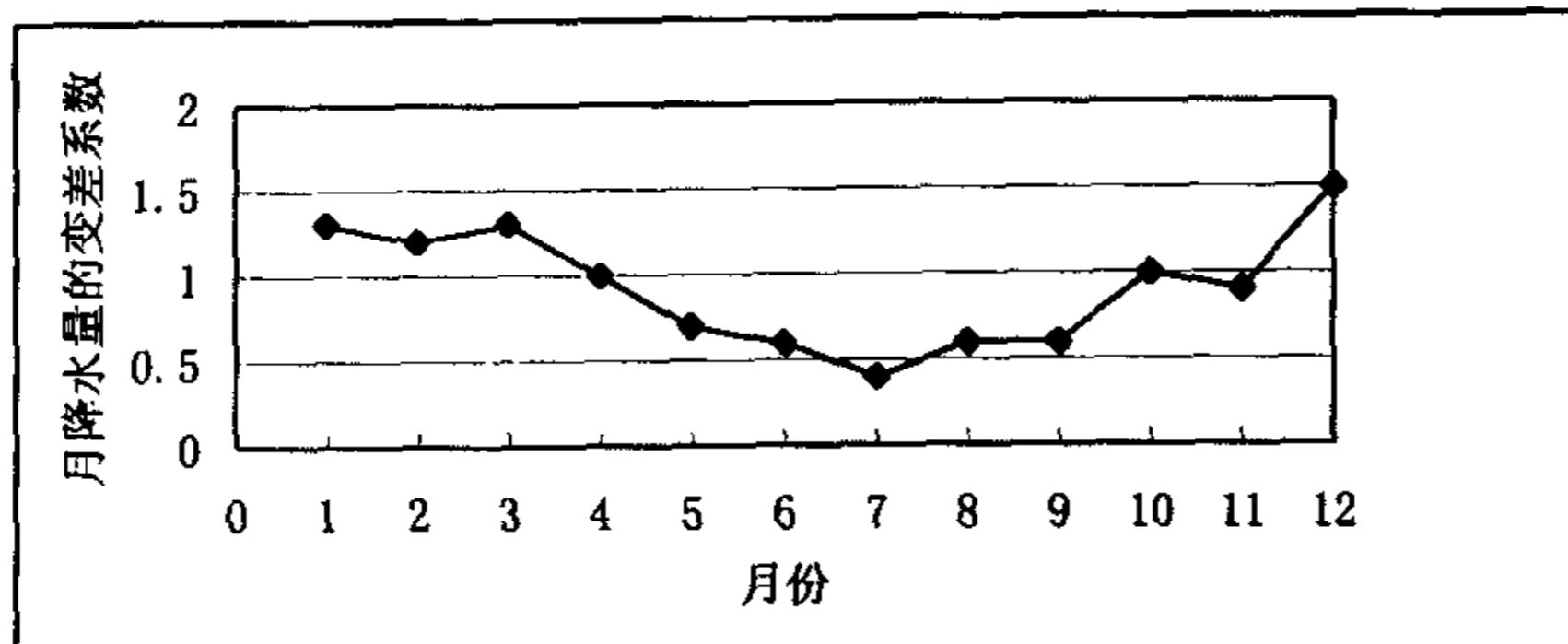


图 2-2 保定市月降水量的变差系数曲线

从图中可以看出：年内12个月的变差系数大致上呈倒立的抛物线型，5~9月的变差系数较小，其中7月份降水量的变差系数最小，其变差系数为0.4；4月和9月、10月的降水量的变差系数适中，其值在1.0左右；1月、2月、3月和12月的降水量的变差系数较大，其中12月份降水量的变差系数为1.5，在12个月降水量变差系数中是最大。5~9月的降水量的稳定性较好，特别是7月份的降水量最稳定。这种降水量的稳定性不仅对于农作物生育期的需水有较好的保证性，而且有利于贮存在土壤耕层中，以被冬小麦在生育期利用。这种较好的稳定性，是保证保定市农

业可持续稳定发展的基础。

2.3.3 降水量多年变化分析

为了了解保定市降水量多年变化规律，需对保定市降水量进行多年变化幅度分析和多年变化的丰、枯时段分析。从降水量多年变化幅度分析中可以得出保定市多年来降水量变化多少的程度；从降水量多年变化的丰、枯时段分析可以得出保定市降水量的丰、枯变化趋势和连丰、连枯的程度，这是研究雨水资源量稳定性基础。

1 降水量多年变化幅度分析

表示降水量多年变化幅度的方法主要有三种：极值比方法、变差系数方法和距平法。为了从不同方面揭示保定市雨水资源量多年变化的情况，我们同时采用三种方法进行分析。

(1) 极值比方法

$$K_m = P_{\max}/P_{\min}$$

式中 K_m ——极值比；

P_{\max} ——保定市降水系列中的最大值 (mm)；

P_{\min} ——保定市降水系列中的最小值 (mm)；

在保定市 1956~2000 年降水系列中，最大值是 1963 年的降水量 907.2mm，最小值是 1965 年的降水量 283.3mm，则该系列的极值比是 3.2。表明雨水资源年际变化比较大。

(2) 变差系数法

通过前面计算得出，保定市降水量的变差系数 $C_v=0.3$ 。 C_v 是衡量不同系列相对离散程度的一个参数，就一个系列来说，则表示此系列离散程度。和全国其它地区比较，保定市的 C_v 值说明保定市年降水量离散程度较大，年际间变化也较大。即保定市年降水量距离多年平均降水量较大。

(3) 距平法

距平百分率的计算方法如下：

$$\Delta_i(\%) = (P_i - \bar{P}) / \bar{P}$$

式中 $\Delta_i(\%)$ ——表示距平百分率；

P_i ——第 i 年的年降水量系列值 (mm) ($i=1, 2, \dots$)；

\bar{P} ——多年降水量平均值 (mm)；

距平符号有正负，正距平 (%) 表示降水量偏多程度，连续正距平表示降水量连续偏多程度。负距平 (%) 表示降水量偏少程度，连续负距平表示降水量连续偏少程度。

业可持续稳定发展的基础。

2.3.3 降水量多年变化分析

为了了解保定市降水量多年变化规律，需对保定市降水量进行多年变化幅度分析和多年变化的丰、枯时段分析。从降水量多年变化幅度分析中可以得出保定市多年来降水量变化多少的程度；从降水量多年变化的丰、枯时段分析可以得出保定市降水量的丰、枯变化趋势和连丰、连枯的程度，这是研究雨水资源量稳定性基础。

1 降水量多年变化幅度分析

表示降水量多年变化幅度的方法主要有三种：极值比方法、变差系数方法和距平法。为了从不同方面揭示保定市雨水资源量多年变化的情况，我们同时采用三种方法进行分析。

(1) 极值比方法

$$K_m = P_{\max}/P_{\min}$$

式中 K_m ——极值比；

P_{\max} ——保定市降水系列中的最大值 (mm)；

P_{\min} ——保定市降水系列中的最小值 (mm)；

在保定市 1956~2000 年降水系列中，最大值是 1963 年的降水量 907.2mm，最小值是 1965 年的降水量 283.3mm，则该系列的极值比是 3.2。表明雨水资源年际变化比较大。

(2) 变差系数法

通过前面计算得出，保定市降水量的变差系数 $C_v=0.3$ 。 C_v 是衡量不同系列相对离散程度的一个参数，就一个系列来说，则表示此系列离散程度。和全国其它地区比较，保定市的 C_v 值说明保定市年降水量离散程度较大，年际间变化也较大。即保定市年降水量距离多年平均降水量较大。

(3) 距平法

距平百分率的计算方法如下：

$$\Delta_i(\%) = (P_i - \bar{P}) / \bar{P}$$

式中 $\Delta_i(\%)$ ——表示距平百分率；

P_i ——第 i 年的年降水量系列值 (mm) ($i=1, 2, \dots$)；

\bar{P} ——多年降水量平均值 (mm)；

距平符号有正负，正距平 (%) 表示降水量偏多程度，连续正距平表示降水量连续偏多程度。负距平 (%) 表示降水量偏少程度，连续负距平表示降水量连续偏少程度。

度。保定市历年年降水量距平百分率如图 2-3 所示。

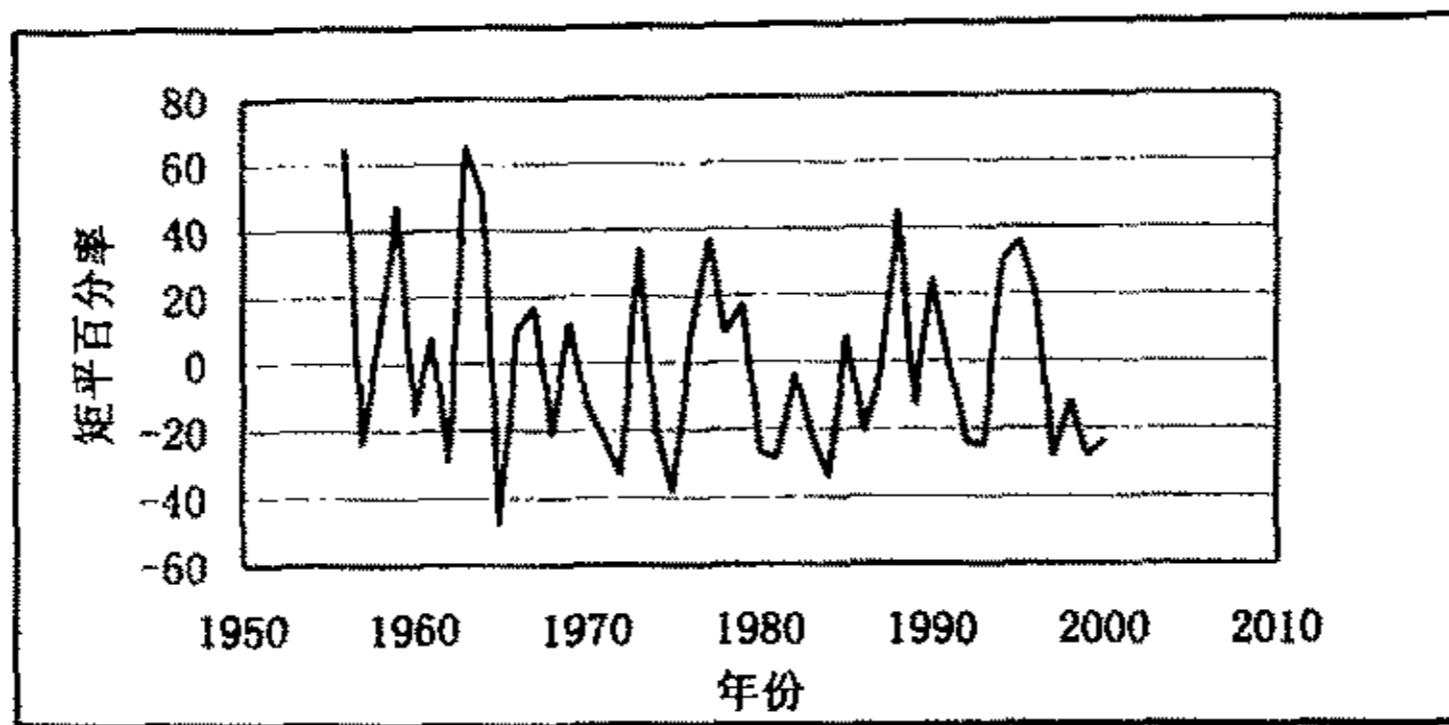


图 2-3 保定市历年年降水量矩平曲线

从图中可以看出：1956~1964 年段年降水量连续偏多，正矩平百分率高达 62%。1965~1972 年段的年降水量连续偏少，负矩平百分率高达-50%。1973~1974 年段年降水量又连续偏多，正矩平百分率最大为 38%，比 1956~1964 年段正矩平百分率幅度要小 24%。1975~1976 年段年降水量又连续偏少。1977~1979 年段年降水量又连续偏多。1980~1987 年段年降水量连续偏少，虽然负矩平百分率最大为 36%，比 1965~1972 年段最大负矩平百分率小，但是从两组整体来比较，可以得出 1980~1987 年段降水量偏少的幅度比较大的结论。进入 1988 年后，降水量变化更加频繁，如 1988~1991 年段为降水量连续偏多，1992~1993 年段年降水量连续偏少，1994~1996 年段年降水量连续偏多，1997~2000 年段年降水量连续偏少。从分析可以得出降水量自从进入 70 年代后就比较小，尽管中间也出现了 4 次连续偏多的年段，但连续偏多的幅度比较少，所以总体来说降水量有减少的趋势，这就在一定程度上形成了保定市水资源的补给量不足，加剧了保定市水资源紧张的状况。

2 降水量多年变化的丰、枯时段分析

(1) 差积曲线分析

所谓差积曲线法即距平累积法，通常采用降水量模比系数距平累积法

$$H_i = \sum_{l=1}^m (K_l - 1) \quad (l=1,2,3,\dots,m)$$

式中 H_i ——第 i 年 $\Sigma (K_l - 1)$ 的累积值；

P_i ——第 i 年年降水量 (mm)；

P ——多年平均年降水量 (mm)；

K_i ——第*i*年的模比系数，且 $K_i = P_i/P$ ；
 差积曲线代表的物理意义如下：差积曲线上升段表示降水量为偏多阶段，差积曲线下降段表示降水量为偏少阶段，差积曲线平稳阶段表示降水量为正常阶段。保定市年降水量模比系数差积曲线如图 2-4 所示：

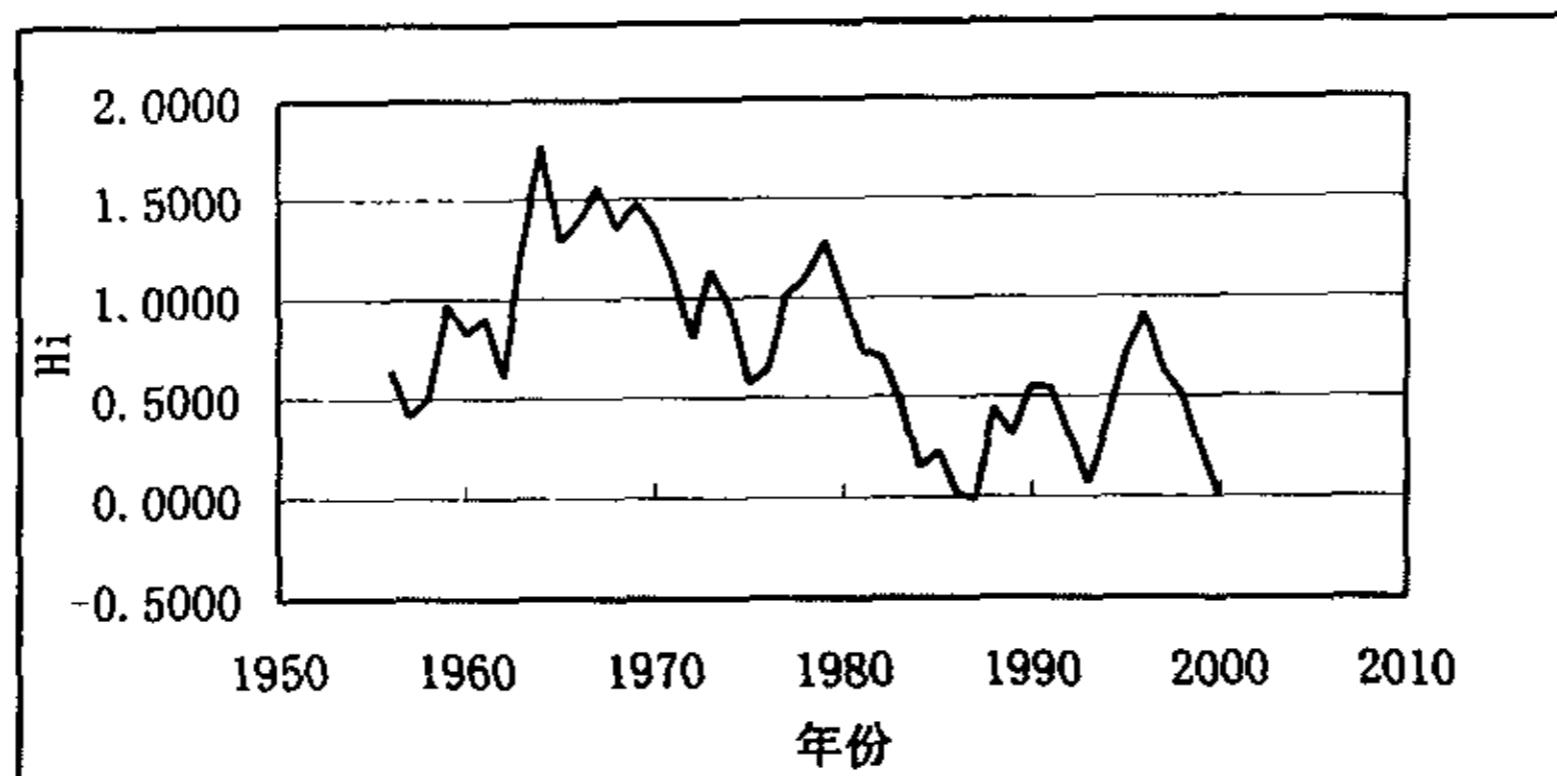


图 2-4 保定市年降水量模比系数差积曲线

从图上可以看出：保定市 1956~1963、1975~1978、1987~1990、1993~1996 为降水量偏多阶段；1963~1974、1979~1987、1991~1992、1997~2000 为降水量偏少阶段。总体上看，保定市降水量没有出现正常阶段，降水量偏多和降水量偏少总是前后相间，不同的是间隔年数不一样。保定市降水量偏少阶段持续时间要比偏多阶段持续时间长，特别是进入 70 年代后降水量明显处于偏少阶段。可想而知，进入 70 年代后降水量直接供给农作物生长的天然降水量会比较少，从而引起农作物向水资源的需求量的增加，这样就会出现农业和工业、生活争水的情况，从很大程度上引起水资源的供求矛盾。

(2) 滑动平均分析

为了阐明保定市年降水量的长期趋势变化，反映丰枯阶段及其演变趋势，剔除特异年份对趋势分析的干扰从而突出主要的变化趋势。在水文系列处理中常用的为直线滑动平均法。本次采取 3 年滑动平均法对 45 年的年降水量资料进行处理。
 取三点滑动平均：

$$P'_i = 1/3 \cdot (P_{i-1} + P_i + P_{i+1}) \quad (i=2, 3, \dots, m-1)$$

$$P'_0 = 1/6 \cdot (5P_0 + 2P_1 - P_2)$$

$$P'_m = 1/6 \cdot (-P_{m-2} + 2P_{m-1} + 5P_m)$$

式中 P_i ——表示保定市第 i 年的年降水量 (mm);
 P_i' ——表示保定市 3 年滑动平均后第 i 年的年降水量 (mm),
 $(i=2, 3, \dots, m-1)$;
 P_0' ——表示保定市 3 年滑动平均后第 1 年的年降水量 (mm);
 P_m' ——表示保定市 3 年滑动平均后第 m 年的年降水量 (mm);

从图 2-5 中可以看出: 丰水年分别出现在 1963、1978、1989 和 1996 年, 存在着 7~15 年丰水周期; 枯水年分别出现在 1961、1971、1975、1983、1993 和 2000 年, 存在 4~10 年的枯水周期。这个规律当然还需要长时间的检验。这个规律意味着干旱年多, 容易形成旱灾; 丰水年容易形成洪灾。不但对农作物生长不利, 而且对水资源的补给也不利。

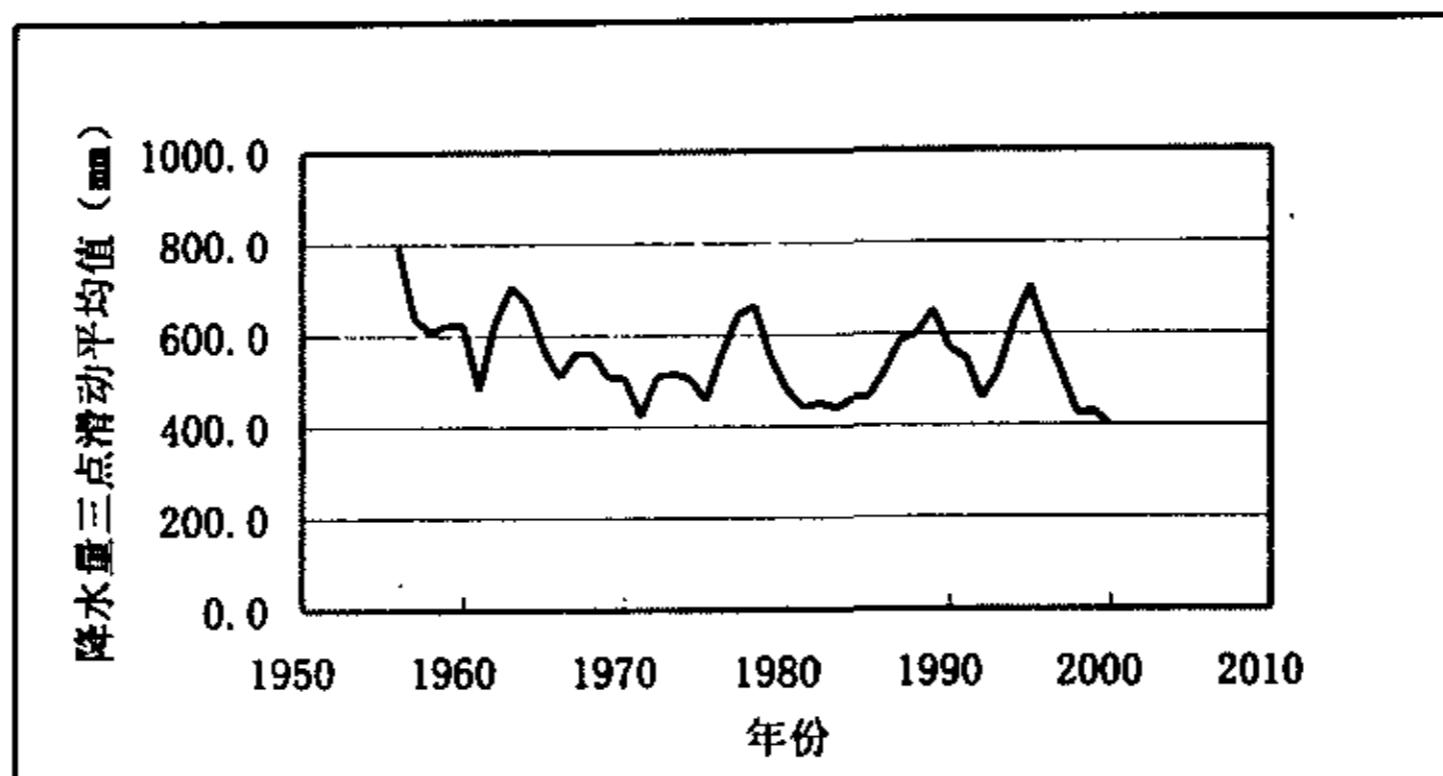


图 2-5 保定市 45 年降水量 3 年滑动平均值变化过程

(3) 连丰、连枯段分析

以上两种方法只能反映大的丰枯变化趋势, 但不能确切地反映连丰、连枯的程度。本文采用的统计分析方法是频次统计分析方法。

首先按下列原则确定统计标准, 即

丰水年的标准:

$$P_i > P + 0.33 \sigma$$

枯水年的标准:

$$P_i < P - 0.33 \sigma$$

式中 P_i ——为保定市第 i 年的年降水量 (mm);

P ——为保定市多年平均年降水量 (mm);

o——为保定市年降水量均方差 (mm);

本次按照这种统计标准, 统计分析了保定市长系列雨量站降水量连丰、连枯年段的发生频次, 所得结果见表 2-4。从统计的频次来说: 连丰年段比连枯年段少, 连丰年段为 9 年, 连枯年段为 15 年; 连丰年段中最长年数比连枯年段中最长年数小, 连丰年段中最长年数为 3 年, 而连枯年段中最长年数为 4 年。这种规律对农业生产和社会利用都不利。因为如果遇到连丰年段, 降水量超过最大土壤蓄水量后, 容易形成洪水灾害, 使大量的降水流入海洋, 而不能为保定市利用。如果遇到连枯年段, 就土壤水库而言, 一方面由降水量补给的土壤水量减少, 一方面供给农作物连年生长的用水量增加, 且土壤的供水量大于降水量的补给量, 从而导致土壤水库有效水量呈现连续减少的趋势, 农业的生产水平也将有所降低, 直到干旱周期结束。如果连枯年段太长, 土壤水资源的平衡得不到及时恢复, 就会遭到破坏, 有可能造成土地沙化, 破坏农业生产。

表 2-4 保定市 1956~2000 年降水量连丰和连枯年段发生频次

资料系列	连丰年段						连枯年段					
	不同历时连丰 发生频次				最长 年 数	K 丰	不同历时连枯 发生频次				最长 年 数	K 枯
年 数	2 年	3 年	4 年	≥5			2 年	3 年	4 年	≥5		
45	3	1	0	0	3	1.10	4	1	1	0	4	0.52
					~						~	
					1.66						0.88	

2.3.4 保定市降水量的年内、年际分布规律

通过上述分析可知: (1) 保定市降水量年际间变化大, 年最高降水量是年最低降水量的 3.2 倍, 年变差系数为 0.3; (2) 同一年内分配不均, 降水主要集中在 6~9 月, 降水量占年降水量的 81%, 且这四个月的月降水量变差系数相对较小。(3) 丰

o——为保定市年降水量均方差 (mm);

本次按照这种统计标准, 统计分析了保定市长系列雨量站降水量连丰、连枯年段的发生频次, 所得结果见表 2-4。从统计的频次来说: 连丰年段比连枯年段少, 连丰年段为 9 年, 连枯年段为 15 年; 连丰年段中最长年数比连枯年段中最长年数小, 连丰年段中最长年数为 3 年, 而连枯年段中最长年数为 4 年。这种规律对农业生产和社会利用都不利。因为如果遇到连丰年段, 降水量超过最大土壤蓄水量后, 容易形成洪水灾害, 使大量的降水流入海洋, 而不能为保定市利用。如果遇到连枯年段, 就土壤水库而言, 一方面由降水量补给的土壤水量减少, 一方面供给农作物连年生长的用水量增加, 且土壤的供水量大于降水量的补给量, 从而导致土壤水库有效水量呈现连续减少的趋势, 农业的生产水平也将有所降低, 直到干旱周期结束。如果连枯年段太长, 土壤水资源的平衡得不到及时恢复, 就会遭到破坏, 有可能造成土地沙化, 破坏农业生产。

表 2-4 保定市 1956~2000 年降水量连丰和连枯年段发生频次

资料系列	连丰年段						连枯年段					
	不同历时连丰 发生频次				最长 年 数	K 丰	不同历时连枯 发生频次				最长 年 数	K 枯
年 数	2 年	3 年	4 年	≥5			2 年	3 年	4 年	≥5		
45	3	1	0	0	3	1.10	4	1	1	0	4	0.52
					~						~	
					1.66						0.88	

2.3.4 保定市降水量的年内、年际分布规律

通过上述分析可知: (1) 保定市降水量年际间变化大, 年最高降水量是年最低降水量的 3.2 倍, 年变差系数为 0.3; (2) 同一年内分配不均, 降水主要集中在 6~9 月, 降水量占年降水量的 81%, 且这四个月的月降水量变差系数相对较小。(3) 丰

水年与枯水年交替发生，且丰水年持续时间短，枯水年持续时间长。

在了解保定市降水量的年内、年际分布规律的基础上，需要进一步对不同农作物生育期的降水量进行分析。因为它是分析农业生产对雨水资源利用的前提和基础，只有在分析了不同农作物生育期降水量和不同农作物的需水规律的基础上，我们才能计算出不同农作物不同生育期的缺水量，最后根据不同作物生育期的降水量和相应的缺水量，进而有针对性的利用雨水资源，促进农业的稳步生产。

3 保定市主要农作物需水量和降水量的供求关系

3.1 保定市历年种植结构、降水量与产量分析

3.1.1 历年农作物的种植结构分析

通过对保定市 1949~2000 年历年作物的种植情况进行分析发现：粮食作物中冬小麦和夏玉米始终是主体，播种面积最大，且变化较为平缓；经济作物棉花播种面积波动较大。冬小麦、夏玉米和棉花的播种面积变化如图 3-1 所示：从图中可以看出，冬小麦和夏玉米的播种面积基本上是呈逐年增长的趋势，特别是从 1963 年后这种趋势更加明显。冬小麦和夏玉米在 1949~1963 经历了由低到高，又由高到低的过程。冬小麦的播种面积要比夏玉米的播种面积稍高。棉花的播种面积从总的来看有减少的趋势。

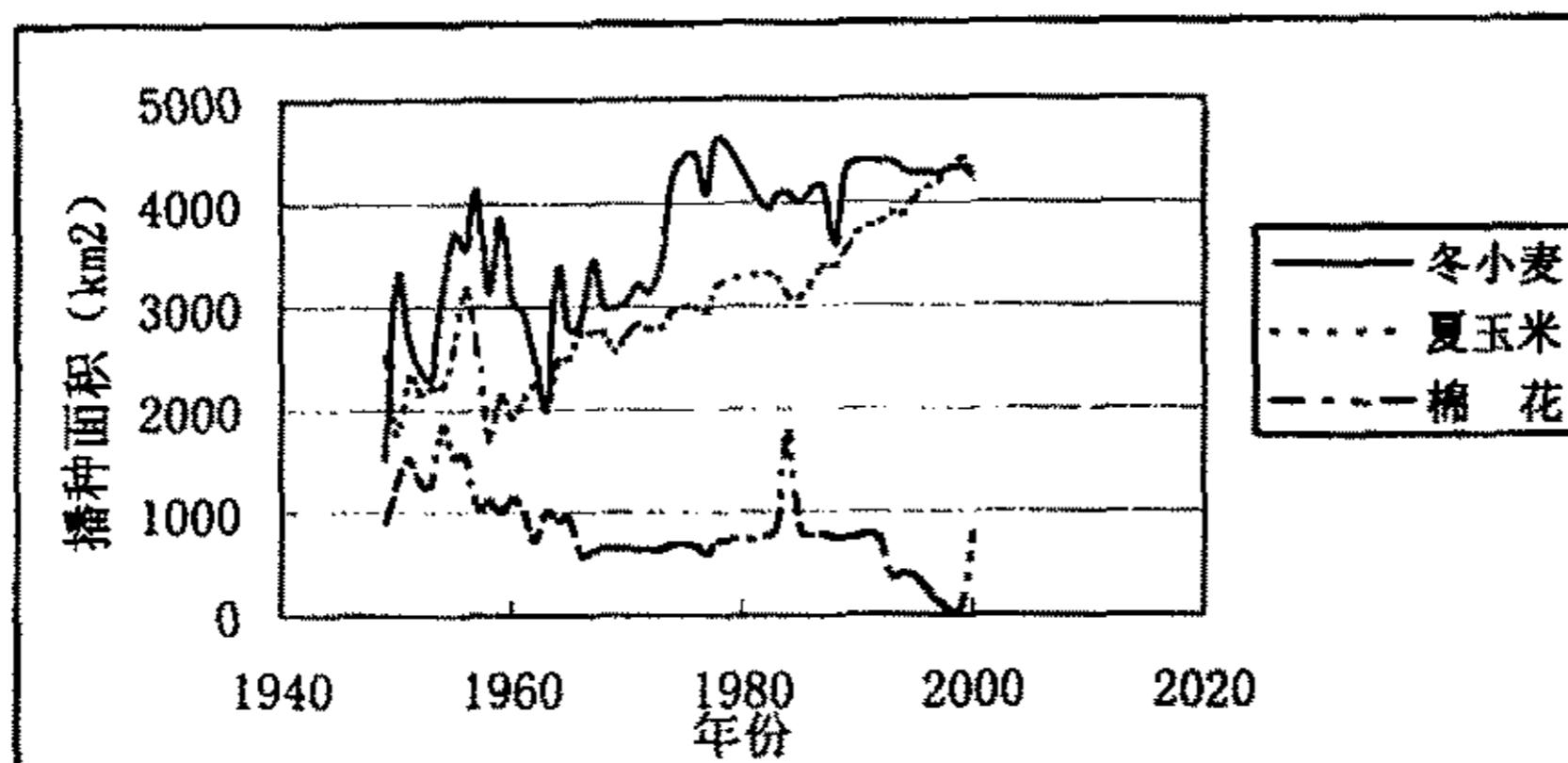


图 3-1 保定市历年种植结构变化图

3.1.2 历年粮食产量与自然降水分析

(1) 历年粮食单产变化分析

水年与枯水年交替发生，且丰水年持续时间短，枯水年持续时间长。

在了解保定市降水量的年内、年际分布规律的基础上，需要进一步对不同农作物生育期的降水量进行分析。因为它是分析农业生产对雨水资源利用的前提和基础，只有在分析了不同农作物生育期降水量和不同农作物的需水规律的基础上，我们才能计算出不同农作物不同生育期的缺水量，最后根据不同作物生育期的降水量和相应的缺水量，进而有针对性的利用雨水资源，促进农业的稳步生产。

3 保定市主要农作物需水量和降水量的供求关系

3.1 保定市历年种植结构、降水量与产量分析

3.1.1 历年农作物的种植结构分析

通过对保定市 1949~2000 年历年作物的种植情况进行分析发现：粮食作物中冬小麦和夏玉米始终是主体，播种面积最大，且变化较为平缓；经济作物棉花播种面积波动较大。冬小麦、夏玉米和棉花的播种面积变化如图 3-1 所示：从图中可以看出，冬小麦和夏玉米的播种面积基本上是呈逐年增长的趋势，特别是从 1963 年后这种趋势更加明显。冬小麦和夏玉米在 1949~1963 经历了由低到高，又由高到低的过程。冬小麦的播种面积要比夏玉米的播种面积稍高。棉花的播种面积从总的来看有减少的趋势。

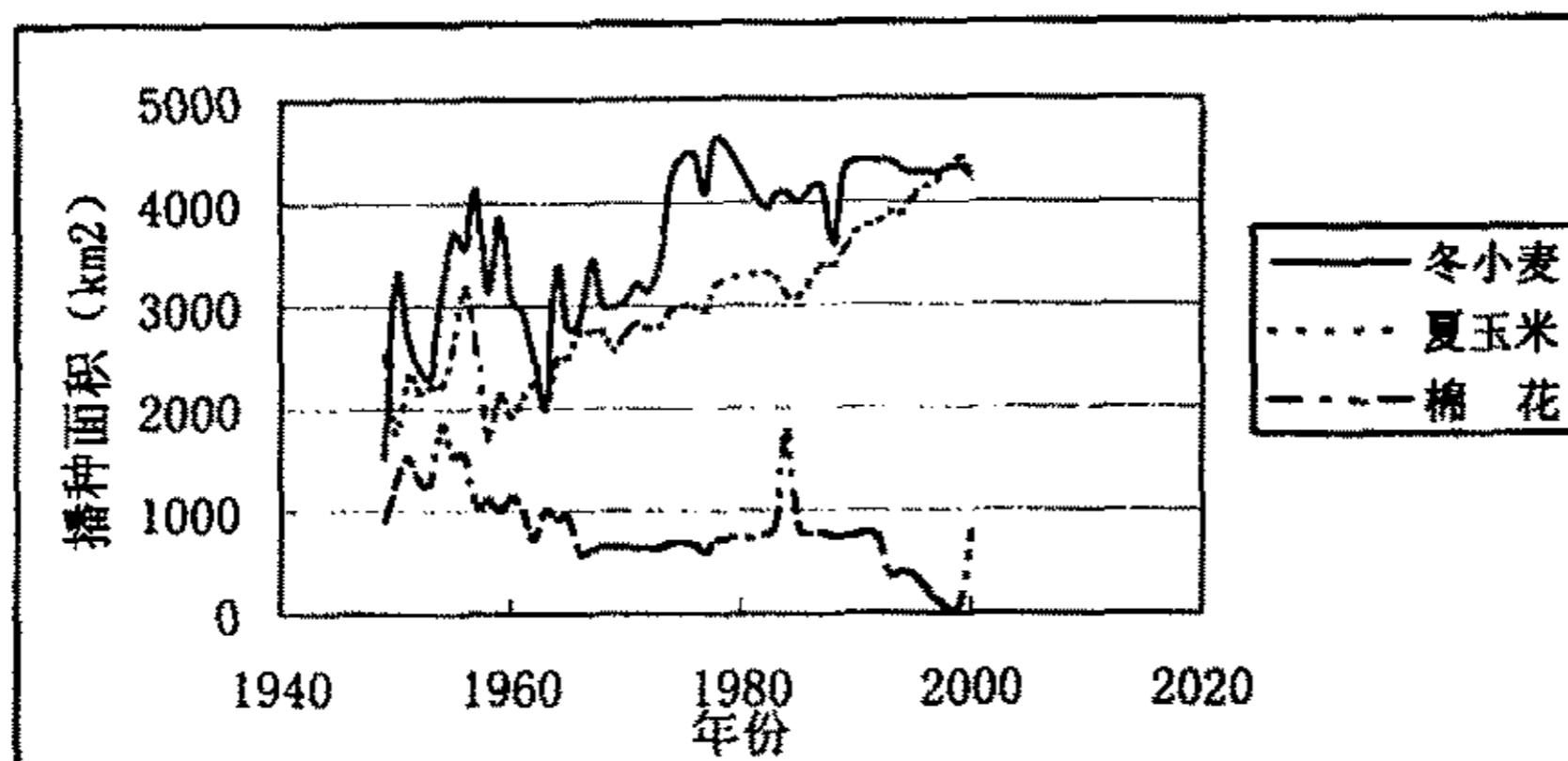


图 3-1 保定市历年种植结构变化图

3.1.2 历年粮食产量与自然降水分析

(1) 历年粮食单产变化分析

水年与枯水年交替发生，且丰水年持续时间短，枯水年持续时间长。

在了解保定市降水量的年内、年际分布规律的基础上，需要进一步对不同农作物生育期的降水量进行分析。因为它是分析农业生产对雨水资源利用的前提和基础，只有在分析了不同农作物生育期降水量和不同农作物的需水规律的基础上，我们才能计算出不同农作物不同生育期的缺水量，最后根据不同作物生育期的降水量和相应的缺水量，进而有针对性的利用雨水资源，促进农业的稳步生产。

3 保定市主要农作物需水量和降水量的供求关系

3.1 保定市历年种植结构、降水量与产量分析

3.1.1 历年农作物的种植结构分析

通过对保定市 1949~2000 年历年作物的种植情况进行分析发现：粮食作物中冬小麦和夏玉米始终是主体，播种面积最大，且变化较为平缓；经济作物棉花播种面积波动较大。冬小麦、夏玉米和棉花的播种面积变化如图 3-1 所示：从图中可以看出，冬小麦和夏玉米的播种面积基本上是呈逐年增长的趋势，特别是从 1963 年后这种趋势更加明显。冬小麦和夏玉米在 1949~1963 经历了由低到高，又由高到低的过程。冬小麦的播种面积要比夏玉米的播种面积稍高。棉花的播种面积从总的来看有减少的趋势。

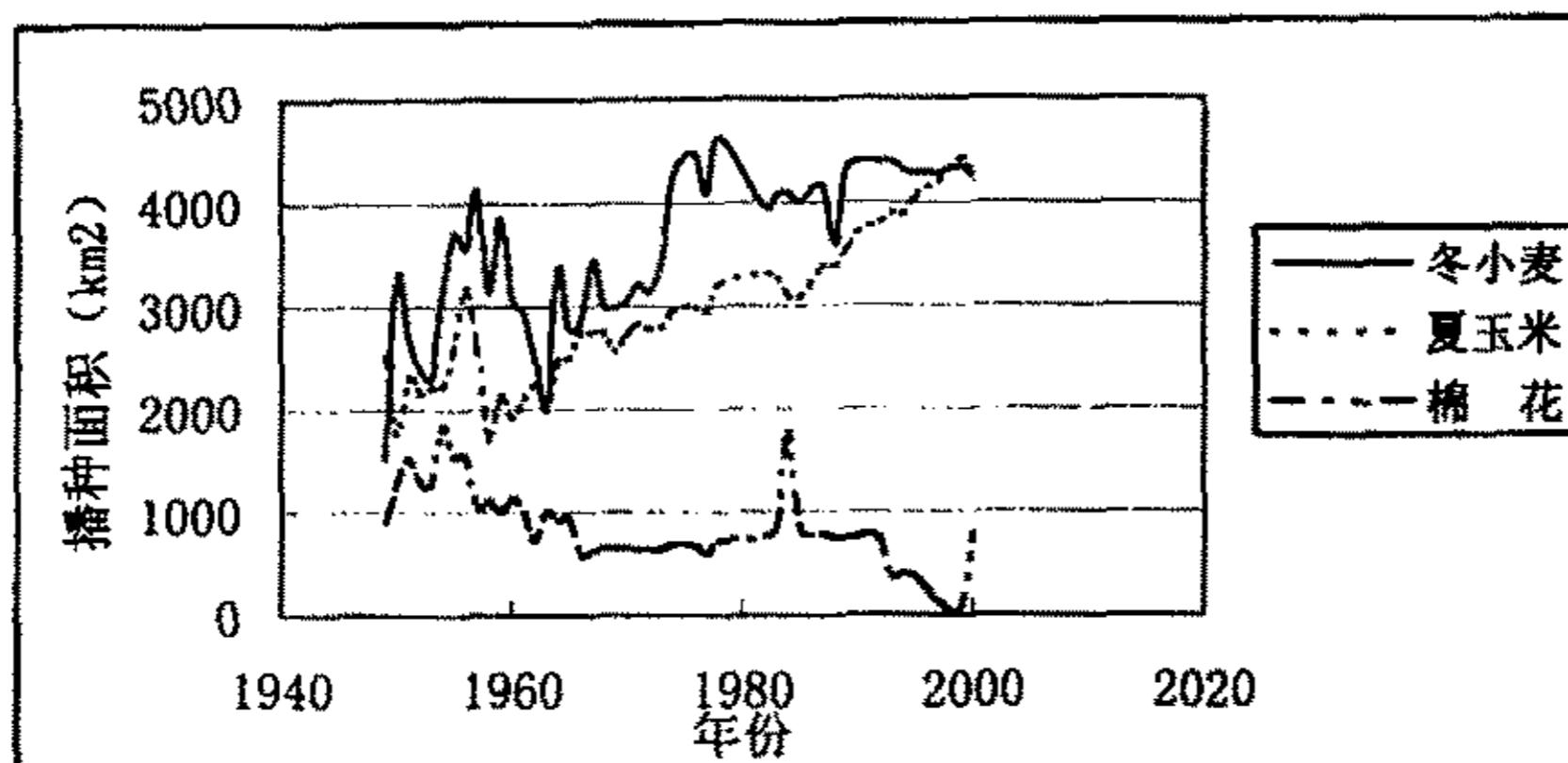


图 3-1 保定市历年种植结构变化图

3.1.2 历年粮食产量与自然降水分析

(1) 历年粮食单产变化分析

通过对 1949~2000 年的冬小麦、夏玉米和棉花的单产量变化分析，可以看出：

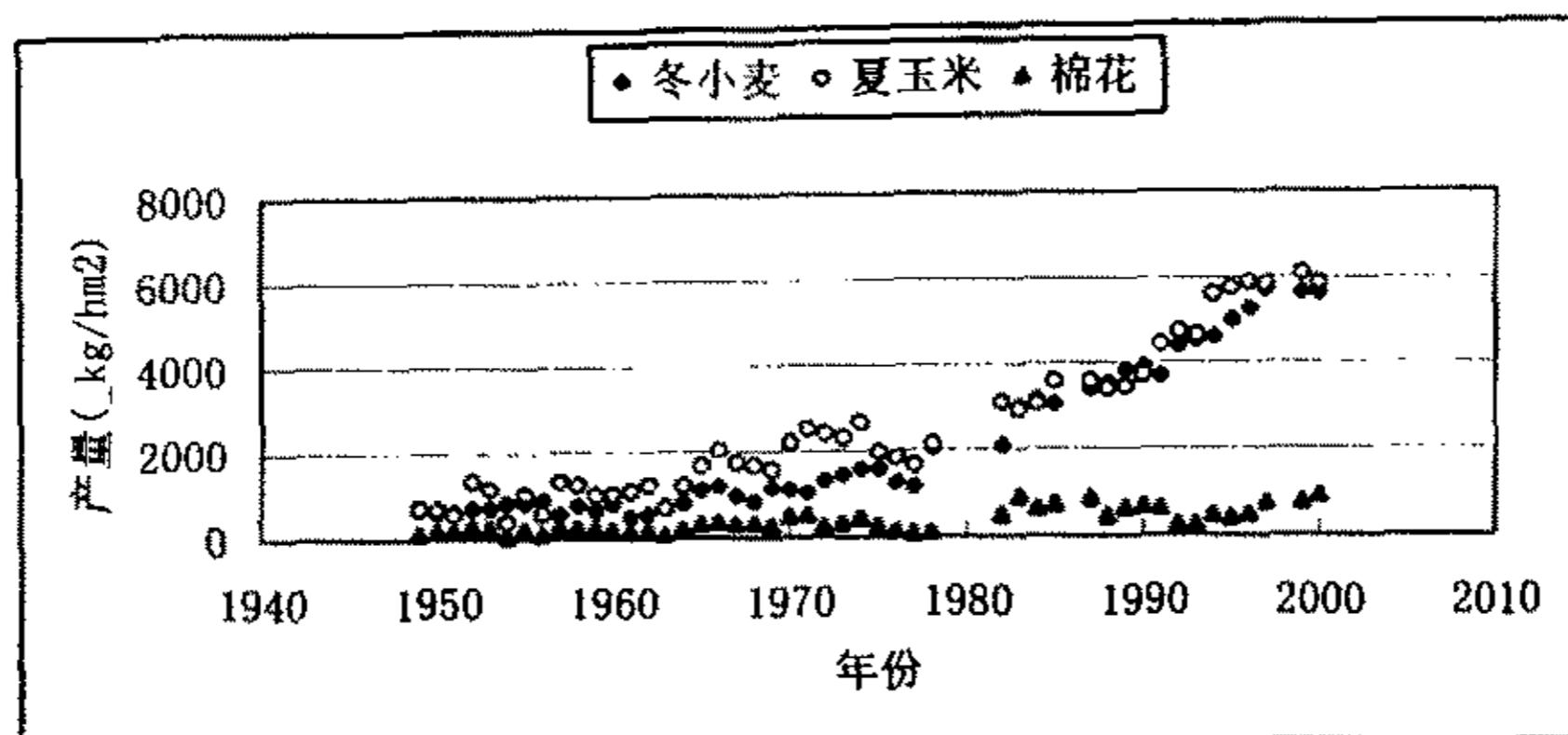


图 3-2 1949~2000 年产量变化

无论冬小麦、夏玉米还是棉花，它们的单产量都逐年逐步增加。棉花单产增长一直比较缓慢。而冬小麦和夏玉米单产增长幅度较大，尤其是 1982 年后单产量增加更为明显。

(2) 历年粮食总产量与自然降水的关系

根据历年冬小麦、夏玉米和棉花的单产量和历年种植面积可以求出粮食的总产量，图 3-3 所示：

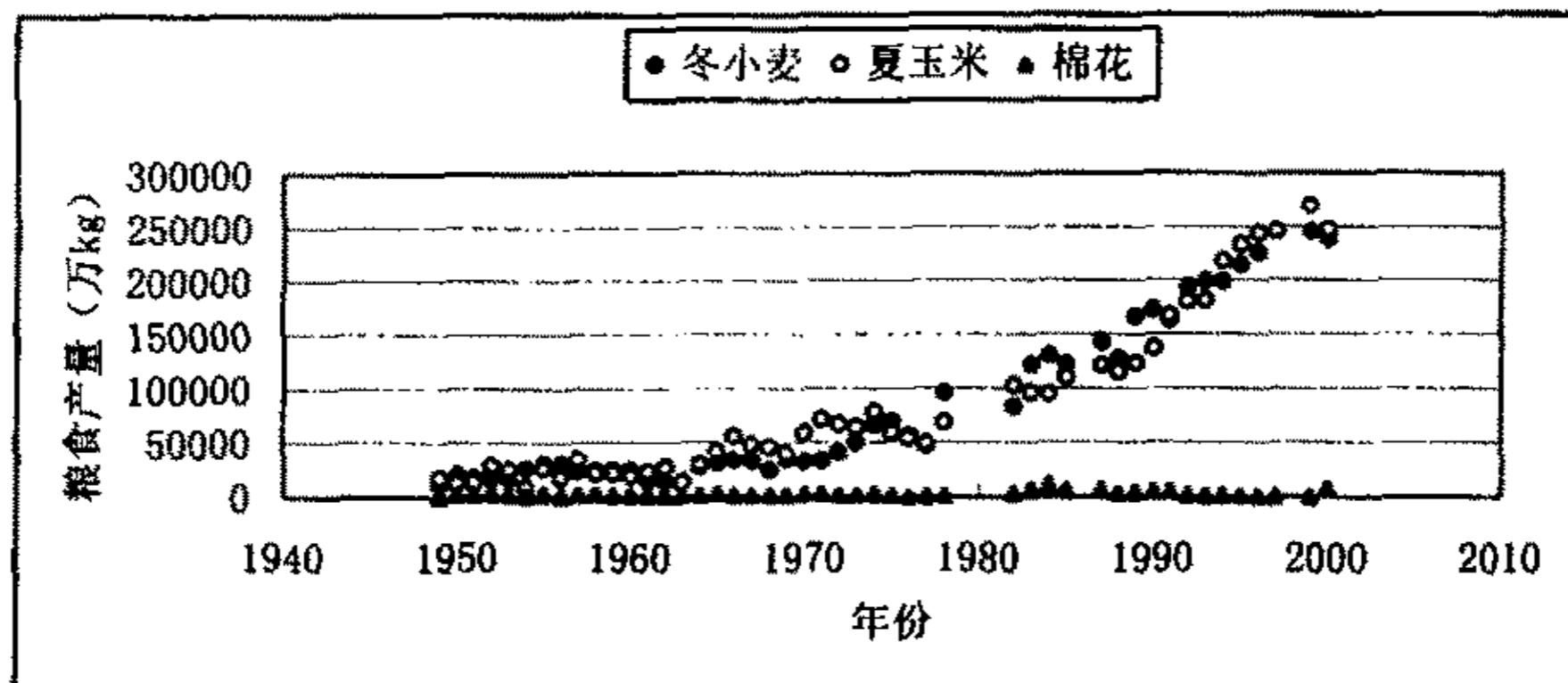


图 3-3 历年的粮食总产量

从图上大概可以看出从 20 世纪 70 年代后期粮食总产量增加幅度较快。通过对大量相关资料分析表明历年的水分生产效率变化不大。历年粮食总产量的增加意味着生产粮食的总耗水量也相应增加。满足粮食生产过程中总耗水量主要是有两部分

提供：一部分来自作物生长期自然降雨量；另一部分是通过灌溉方式所利用的地表水或地下水资源。而前面降水量分析表明，年降水量的变化趋势是减少的。在这种情况下，用于农作物灌溉的水资源量是逐渐增大的。

为了更清楚了解历年用于农作物灌溉的水资源量的变化情况，下面将用定量的方法来进行分析。通过望都和藁城实验站的资料计算得出：冬小麦的水分生产效率为 0.79 Kg/m^3 ，夏玉米的水分生产效率为 2 Kg/m^3 ，棉花的水分生产效率为 0.60 Kg/m^3 ^[32-34]。通过计算可以得出历年所生产的粮食（冬小麦、夏玉米和棉花）所消耗的总水量。如图 3-4 所示：

根据保定市历年的降水量和耕地面积可以计算出耕地面积上的总的降水量，根据保定市的具体情况，采用耕地上的降水有效利用系数为 0.8，可以计算出保定市耕地上的有效雨水量，如图 3-4 所示。根据两条曲线的相互关系情况，明显分为三段。第一段：1956~1982 年，这一时段有效降水量明显高于粮食总耗水量。因为此年内有效降水量不仅满足粮食生产，而且降水量还有剩余。第二段：1982~1989 年，这一时段总的来说粮食总耗水量略大于有效降水，基本呈现为缺水趋势，但缺水量不大。

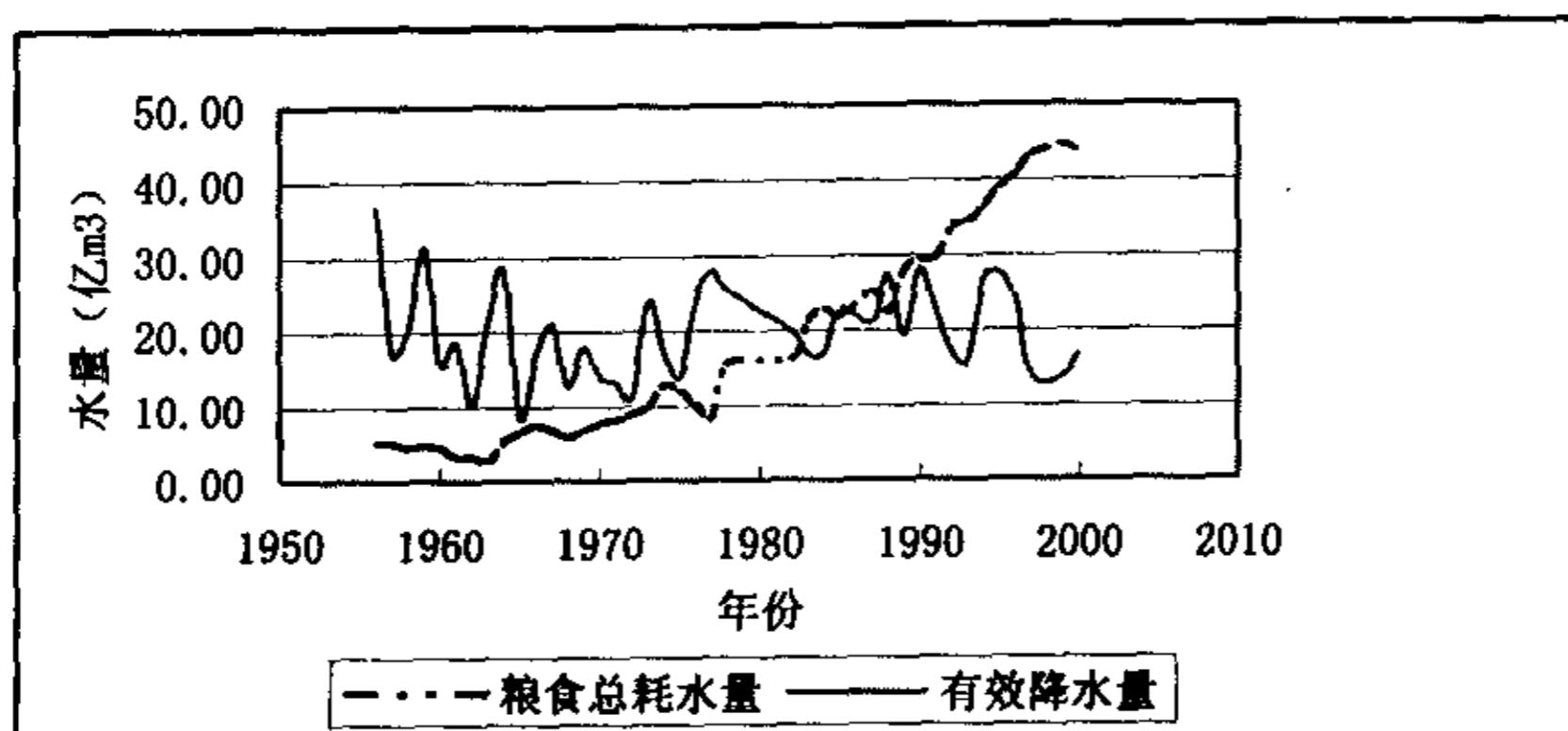


图 3-4 历年的粮食总耗水量与历年有效降水量相互关系

因为有效降水量大于粮食总耗水量年份少，粮食总耗水量大于有效降水量的年份多。第三段：1989~2000 年，这一时段粮食的总耗水量明显大于有效降水量。因为此年内有效降水量不足提供粮食生产的需要，必须靠保定市的一部分水资源量来满足粮食的生产。即农业用水量。我们把通过灌溉的方式输送到田间里的，用于农业生产这部分净用水量定义为农业用水量。历史上不同年的农业用水量是根据历史上

不同年的粮食总耗水量减去对当年耕地上的有效降水量计算的。计算结果如图 3-5。农业用水量包括正值和负值。正的农业用水量表示当年生产粮食所需要的农业用水量。即当年的有效降雨量因不能满足当年粮食总耗水量，而需要的灌溉用水量。负的农业用水量表示当年的有效降雨量除了满足当年粮食总耗水量外，所剩余的降水量。即从粮食总耗水量分析来看，20世纪 80 年代以前，农作物不需要灌水。

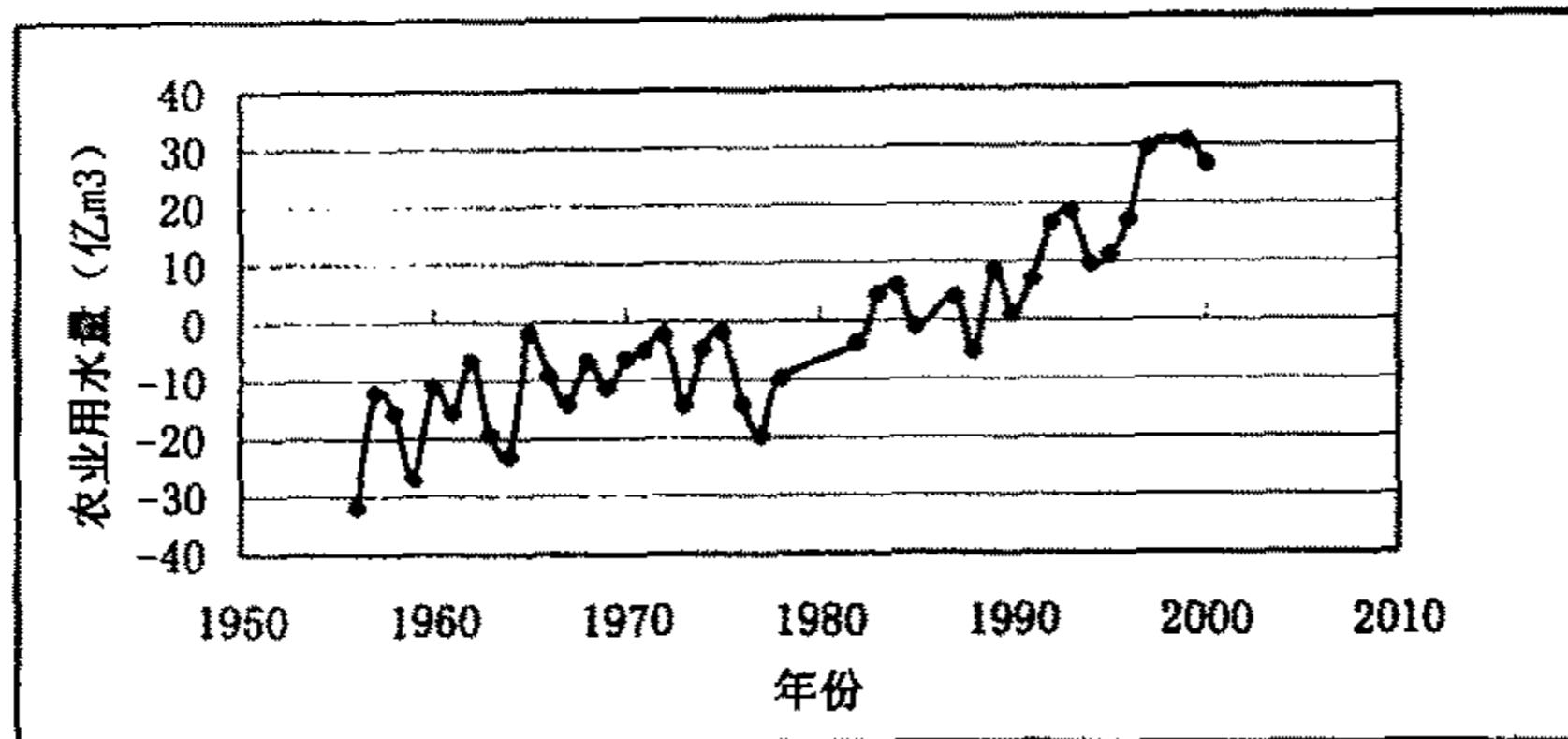


图 3-5 保定市 1956~2000 年的农业用水量

从图 3-5 中可以得出这样的结论：在 20 世纪 80 年代以前，保定市的水资源丰富，水环境良好，具体表现在地下水丰富、水位埋深浅、存在大面积的湿地、并有泉水从地下涌出，地表水资源也相当丰富，河北平原河网密布，河内常年河水清澈，华北明珠白洋淀区内蓄水充足，生态好。20 世纪 80 年代以后，随着农业用水的不断增加，自然降水不能满足粮食生产的需要，靠发展灌溉和打井开采地下水来满足粮食生产的需要。这就使保定市的水资源开采量逐渐增多，当达到一定程度时，水环境就开始走向恶化。特别是进入 90 年代以来，除 96 年为丰水年外，其他年份降水较少，连年干旱，灌区有效灌溉面积逐步萎缩，农业用水量急剧增加，使保定市水资源的开采量超过了水资源的承载能力，造成生态环境的进一步恶化，表现为：泉水基本枯竭，河道无水皆干，有水皆污，形成大面积漏斗区，白洋淀的生态环境遭到严重破坏，几次靠王快水库调水才摆脱干涸的危机。

3.2 主要农作物需水量和需水规律

3.2.1 作物需水量及其计算方法

作物需水量 (Crop water requirement) 系指作物在最适宜的土壤水分和肥力条件下，经过正常生长发育，获得高产时的植株蒸腾、棵间蒸发以及构成植株体的水量

不同年的粮食总耗水量减去对当年耕地上的有效降水量计算的。计算结果如图 3-5。农业用水量包括正值和负值。正的农业用水量表示当年生产粮食所需要的农业用水量。即当年的有效降雨量因不能满足当年粮食总耗水量，而需要的灌溉用水量。负的农业用水量表示当年的有效降雨量除了满足当年粮食总耗水量外，所剩余的降水量。即从粮食总耗水量分析来看，20世纪 80 年代以前，农作物不需要灌水。

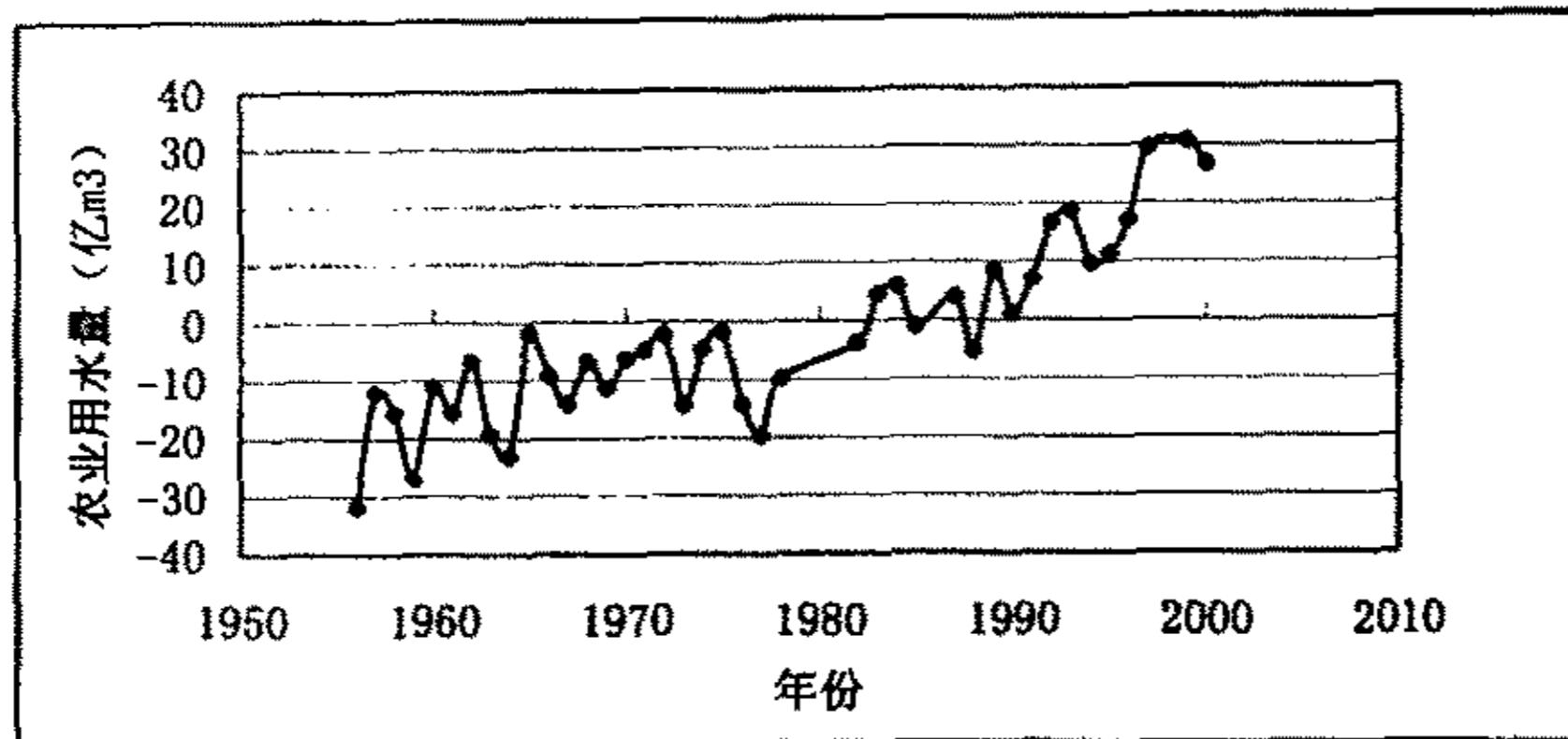


图 3-5 保定市 1956~2000 年的农业用水量

从图 3-5 中可以得出这样的结论：在 20 世纪 80 年代以前，保定市的水资源丰富，水环境良好，具体表现在地下水丰富、水位埋深浅、存在大面积的湿地、并有泉水从地下涌出，地表水资源也相当丰富，河北平原河网密布，河内常年河水清澈，华北明珠白洋淀区内蓄水充足，生态好。20 世纪 80 年代以后，随着农业用水的不断增加，自然降水不能满足粮食生产的需要，靠发展灌溉和打井开采地下水来满足粮食生产的需要。这就使保定市的水资源开采量逐渐增多，当达到一定程度时，水环境就开始走向恶化。特别是进入 90 年代以来，除 96 年为丰水年外，其他年份降水较少，连年干旱，灌区有效灌溉面积逐步萎缩，农业用水量急剧增加，使保定市水资源的开采量超过了水资源的承载能力，造成生态环境的进一步恶化，表现为：泉水基本枯竭，河道无水皆干，有水皆污，形成大面积漏斗区，白洋淀的生态环境遭到严重破坏，几次靠王快水库调水才摆脱干涸的危机。

3.2 主要农作物需水量和需水规律

3.2.1 作物需水量及其计算方法

作物需水量 (Crop water requirement) 系指作物在最适宜的土壤水分和肥力条件下，经过正常生长发育，获得高产时的植株蒸腾、棵间蒸发以及构成植株体的水量

不同年的粮食总耗水量减去对当年耕地上的有效降水量计算的。计算结果如图 3-5。农业用水量包括正值和负值。正的农业用水量表示当年生产粮食所需要的农业用水量。即当年的有效降雨量因不能满足当年粮食总耗水量，而需要的灌溉用水量。负的农业用水量表示当年的有效降雨量除了满足当年粮食总耗水量外，所剩余的降水量。即从粮食总耗水量分析来看，20世纪 80 年代以前，农作物不需要灌水。

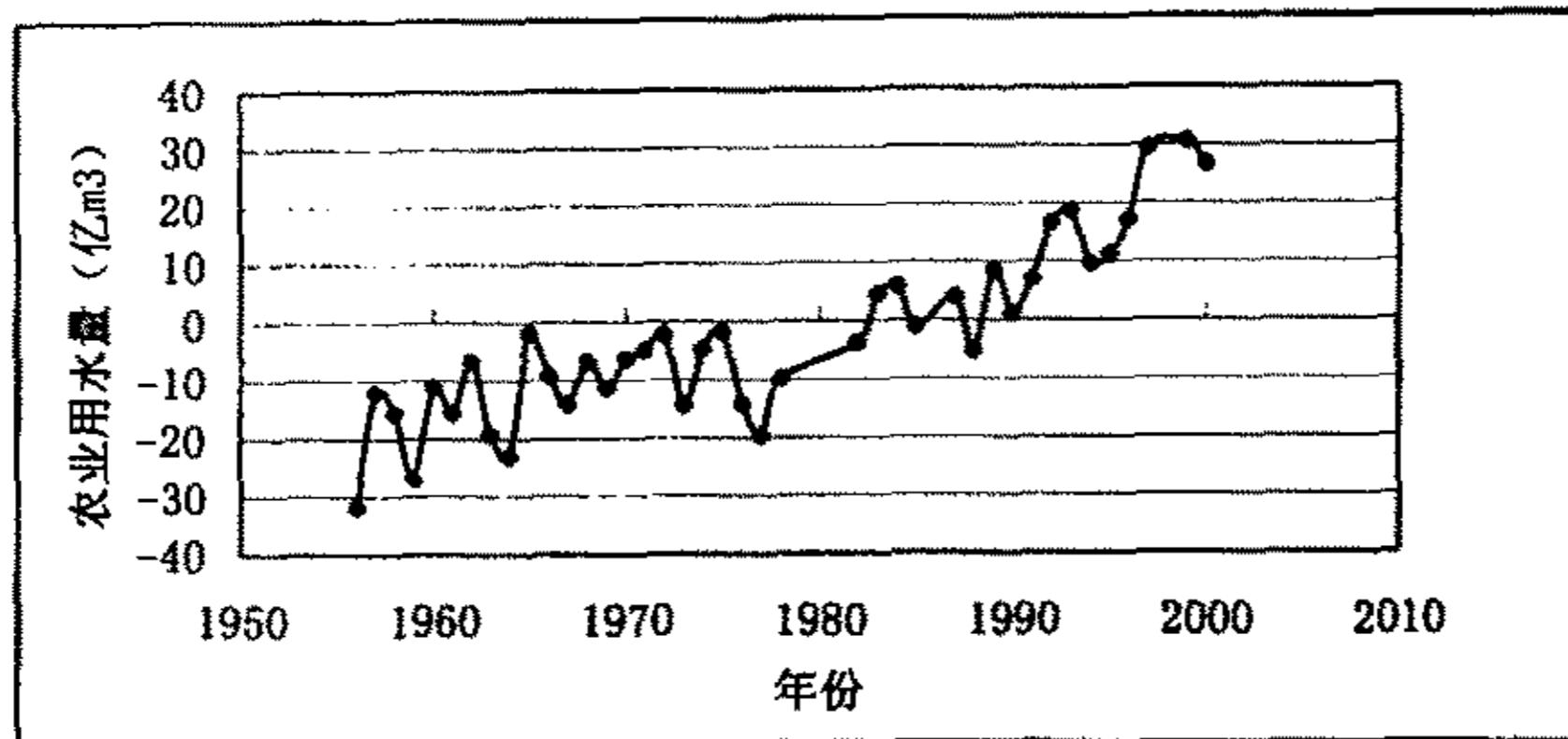


图 3-5 保定市 1956~2000 年的农业用水量

从图 3-5 中可以得出这样的结论：在 20 世纪 80 年代以前，保定市的水资源丰富，水环境良好，具体表现在地下水丰富、水位埋深浅、存在大面积的湿地、并有泉水从地下涌出，地表水资源也相当丰富，河北平原河网密布，河内常年河水清澈，华北明珠白洋淀区内蓄水充足，生态好。20 世纪 80 年代以后，随着农业用水的不断增加，自然降水不能满足粮食生产的需要，靠发展灌溉和打井开采地下水来满足粮食生产的需要。这就使保定市的水资源开采量逐渐增多，当达到一定程度时，水环境就开始走向恶化。特别是进入 90 年代以来，除 96 年为丰水年外，其他年份降水较少，连年干旱，灌区有效灌溉面积逐步萎缩，农业用水量急剧增加，使保定市水资源的开采量超过了水资源的承载能力，造成生态环境的进一步恶化，表现为：泉水基本枯竭，河道无水皆干，有水皆污，形成大面积漏斗区，白洋淀的生态环境遭到严重破坏，几次靠王快水库调水才摆脱干涸的危机。

3.2 主要农作物需水量和需水规律

3.2.1 作物需水量及其计算方法

作物需水量 (Crop water requirement) 系指作物在最适宜的土壤水分和肥力条件下，经过正常生长发育，获得高产时的植株蒸腾、棵间蒸发以及构成植株体的水量

之和。由于构成植株体的水量与蒸腾及棵间蒸发相比其量很小，可忽略不计，即在实际计算中认为作物需水量在数量上就等于高产水平条件下的植株蒸腾量和棵见蒸蒸发量之和。作物需水量除受气象条件的影响外，还受作物条件的影响。

在生产实践中，一方面是通过田间实验的方法直接测定作物需水量；另一方面常采用某些计算方法确定作物需水量。现有计算作物需水量的方法，大致可归纳为两类，一类是直接计算作物需水量，另一类是通过计算参照作物需水量来计算实际作物需水量。常用的是 1979 年联合国世界粮农组织修改后的彭曼公式。所谓参照作物需水量 ET₀(reference crop evapotranspiration)是指土壤水分供应充足，地面完全覆盖、生长正常、高矮整齐的开阔（地块的长度和宽度都大于 200m）矮草地（草高 8~15cm）上的蒸发量，一般是指在这种条件下的苜蓿草的需水量而言。参照作物需水量主要受当地的气象条件的影响。本文采用河北省灌溉中心实验站的实验结果来反映冬小麦、夏玉米和棉花的需水量和需水规律。

3.2.2 主要农作物需水量和需水规律

1 冬小麦

(1) 冬小麦日需水量过程线

冬小麦日需水量在全生育期间的变化过程是其本身生物学特性与环境条件（主要是气象条件）综合作用的反应，也是冬小麦需水规律的具体体现。冬小麦是跨年

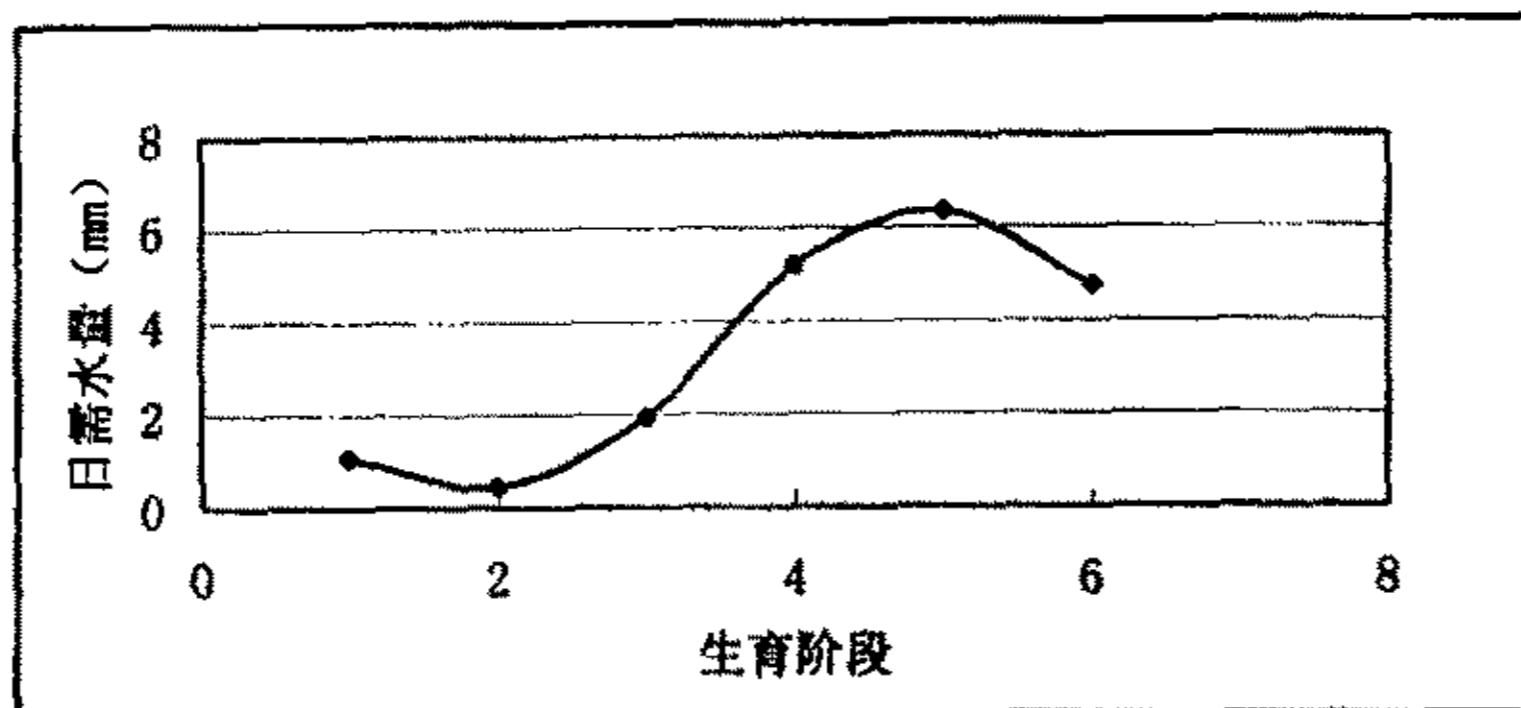


图 3-6 冬小麦日需水量过程线

注：1——代表播种-分蘖；2——代表分蘖-返青；3——代表返青-拔节
4——代表拔节-抽穗；5——代表抽穗-灌浆；6——代表灌浆-成熟

度生长的作物，生物量日增长有两个峰值期，日需水量过程线也表现出两个峰值。根据河北省望都试验站的资料绘制的单产 3750~4500kg/hm² 冬小麦日需水量的过程线，如图 3-6 所示。可以看出冬前日需水量小而平缓，在 1~2 毫米之间；越冬 0.5~

之和。由于构成植株体的水量与蒸腾及棵间蒸发相比其量很小，可忽略不计，即在实际计算中认为作物需水量在数量上就等于高产水平条件下的植株蒸腾量和棵见蒸蒸发量之和。作物需水量除受气象条件的影响外，还受作物条件的影响。

在生产实践中，一方面是通过田间实验的方法直接测定作物需水量；另一方面常采用某些计算方法确定作物需水量。现有计算作物需水量的方法，大致可归纳为两类，一类是直接计算作物需水量，另一类是通过计算参照作物需水量来计算实际作物需水量。常用的是 1979 年联合国世界粮农组织修改后的彭曼公式。所谓参照作物需水量 ET₀(reference crop evapotranspiration)是指土壤水分供应充足，地面完全覆盖、生长正常、高矮整齐的开阔（地块的长度和宽度都大于 200m）矮草地（草高 8~15cm）上的蒸发量，一般是指在这种条件下的苜蓿草的需水量而言。参照作物需水量主要受当地的气象条件的影响。本文采用河北省灌溉中心实验站的实验结果来反映冬小麦、夏玉米和棉花的需水量和需水规律。

3.2.2 主要农作物需水量和需水规律

1 冬小麦

(1) 冬小麦日需水量过程线

冬小麦日需水量在全生育期间的变化过程是其本身生物学特性与环境条件（主要是气象条件）综合作用的反应，也是冬小麦需水规律的具体体现。冬小麦是跨年

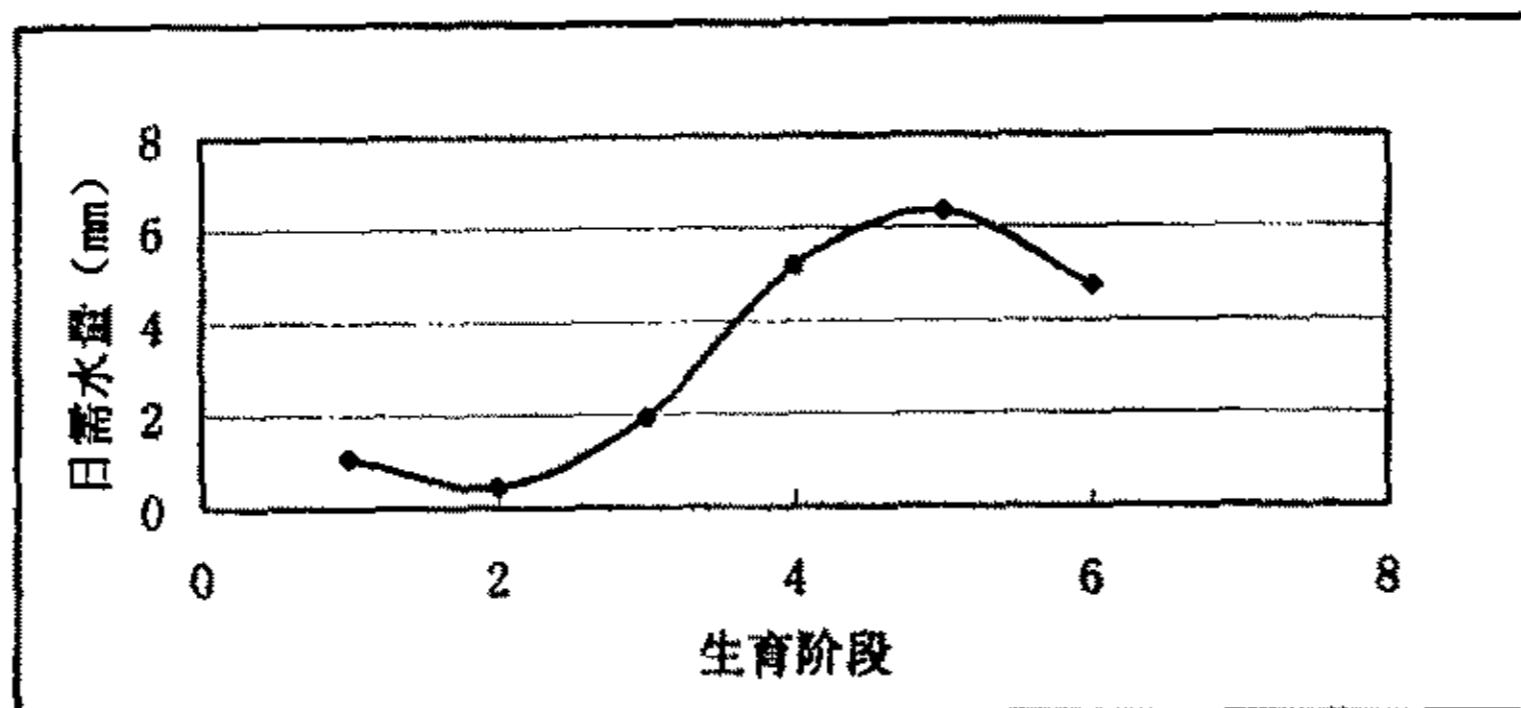


图 3-6 冬小麦日需水量过程线

注：1——代表播种-分蘖；2——代表分蘖-返青；3——代表返青-拔节
4——代表拔节-抽穗；5——代表抽穗-灌浆；6——代表灌浆-成熟

度生长的作物，生物量日增长有两个峰值期，日需水量过程线也表现出两个峰值。根据河北省望都试验站的资料绘制的单产 3750~4500kg/hm² 冬小麦日需水量的过程线，如图 3-6 所示。可以看出冬前日需水量小而平缓，在 1~2 毫米之间；越冬 0.5~

1.0 毫米；返青期开始为 1.0 毫米，最后升高到 2.5 毫米；拔节期上升更快，从 2.5 毫米上升到 4~5 毫米以上；到灌浆初期达到顶峰，日需水量在 6 毫米以上，灌浆中后期开始降低。整个曲线呈一马鞍形分布。

(2) 冬小麦阶段需水量与模系数

冬小麦各生育期需水量的多少，取决于其生育期的长短和需水强度。阶段需水量是指某一生育阶段的需水量，而模系数指各生育阶段需水量占全生育期总需水量的百分数。它可以反映冬小麦需水量在各生育期阶段的分配状况。冬小麦阶段需水量在不同地区、不同年份由于生育期早晚与长短不同而不同，因此模系数也不相同。但就一个地区来说，阶段需水模系数是相同的。河北省保定市冬小麦阶段需水量与模系数如表 3-1 所示

表 3-1 保定市冬小麦阶段需水量与模系数

项目	播种-	分蘖-	返青-	拔节-	抽穗-	灌浆-	全生 育期
	分蘖	返青	拔节	抽穗	灌浆	成熟	
日期	10:1 -10:24	10:25 -3:14	3:15 -4:17	4:8 -5:8	5:9 -5:23	5:24 -6:14	10:1 -6:14
天数 (d)	24	141	34	21	15	22	257
阶段需水量 (mm)	25.80	64.95	67.20	109.20	95.25	109.65	472.05
模系数(%)	5.47	13.76	14.24	23.13	20.18	23.23	100.00
日需水量 (mm)	1.08	0.46	1.98	5.20	6.35	4.57	1.77

注：本数据采用望都实验站平水年产量水平为 3750~4500kg/hm² 条件下的冬小麦的需水规律。

(3) 冬小麦不同生育阶段棵间蒸发与叶面蒸腾的变化

农作物不同生育阶段棵间蒸发与叶面蒸腾的变化规律，是确定覆盖抑制蒸发雨水利用方式的重要依据。特别是不同生育阶段的棵间蒸发的变化规律。

冬小麦需水量主要是由叶面蒸腾量与棵间蒸发两部分水量组成的。前者为生理需水，而后者为生态需水。蒸腾量的大小除与大气条件和土壤水分条件有关外，也受植株本身的生理作用的制约。植株的生长条件，如叶面积大小等因素也影响着蒸腾量的大小。冬小麦生长初期，棵间蒸发量较大。如播种-越冬期，由于叶面积覆盖少，可见蒸发量占需水量的 60% 以上。以后，随着小麦植株群体的逐渐增大、棵间蒸发量逐渐降低，至拔节以后减到最小值，这是一般不足 10%。因为这时正是冬小麦叶面积系数最高的阶段，棵间土壤覆盖程度大。而叶面及蒸腾量的变化与棵间蒸

发量的变化正好相反，由初期较少的蒸腾量逐渐增大，至拔节以后达到最大值。

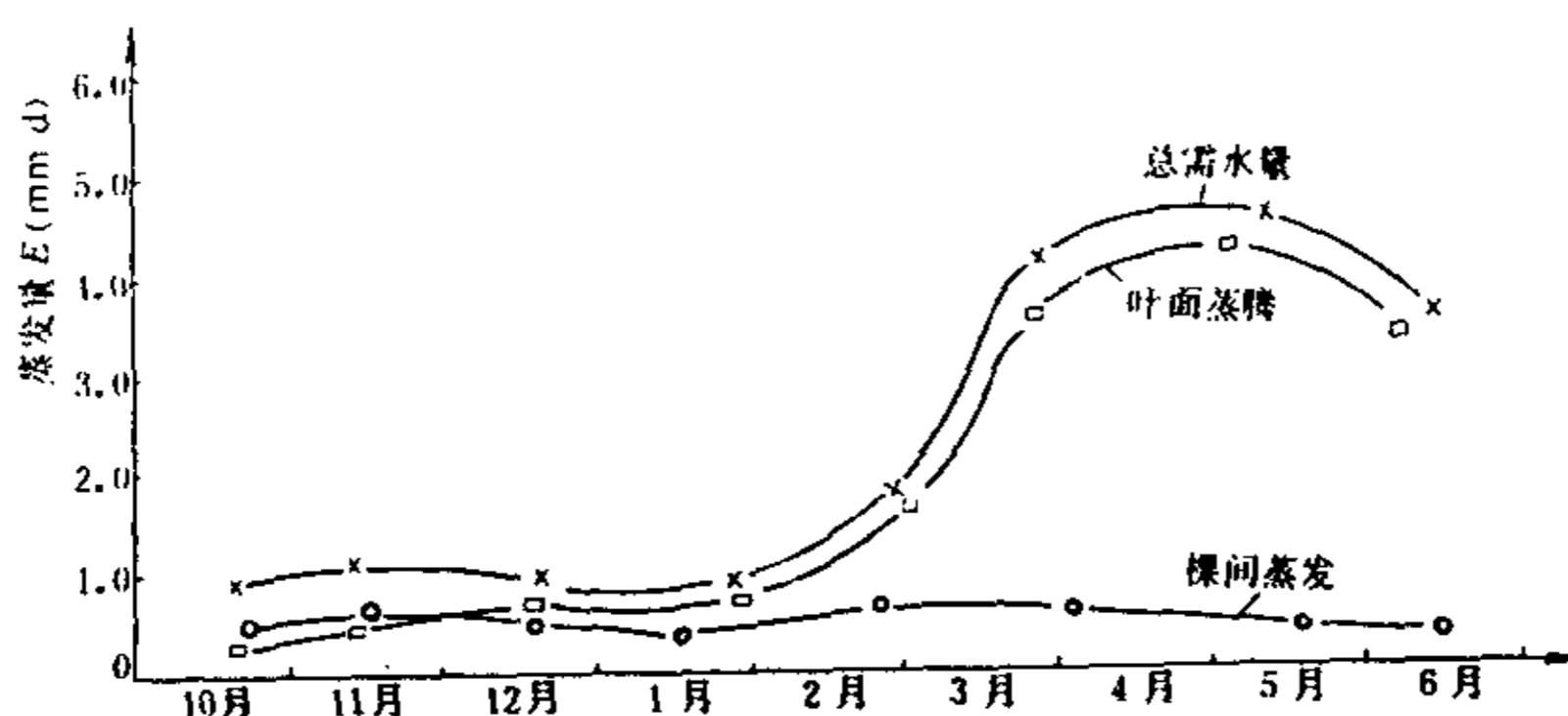


图 3-7 冬小麦生长期棵间蒸发与叶面蒸腾量的变化过程图

从中可以看出冬小麦的叶面蒸腾过程与总需水量的变化过程相似，为一单峰曲线，因而可以认为需水量的变化受制于叶面蒸腾量的变化。而棵间蒸发量的变化过程则很平缓，没有明显的峰值。由于棵间蒸发是一物理过程，主要受气象条件与地面覆盖状况所左右。在冬小麦生长前期地面裸露较大时，气温比较低，因而棵间蒸发量不大；而在冬小麦生长的中后期虽然气温比较高，但此间地面覆盖大又抑制了棵间蒸发来量，因而形成了平缓的棵间蒸发过程线。

2 夏玉米

(1) 夏玉米日需水量过程线

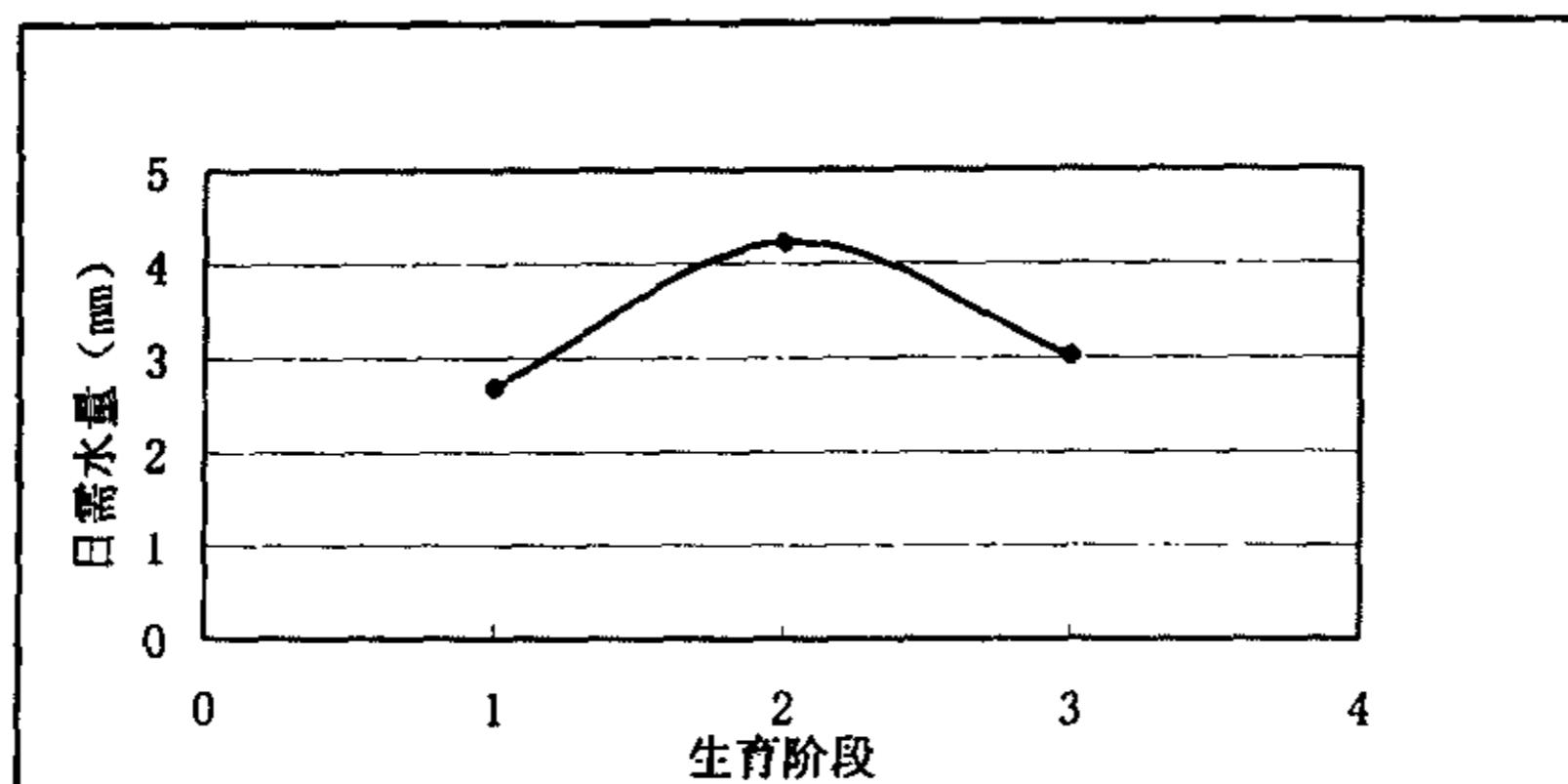


图 3-8 夏玉米日需水量过程线

注：1——代表播种-拔节；2——代表拔节-抽穗；3——代表抽穗-成熟

夏玉米的日需水量是指单位面积上一昼夜内株体蒸腾和棵间蒸发的总量。日需水量及其过程线是反映夏玉米全生育期需水特点和需水规律的重要标志。从图 3-8 可以看出播种-拔节期日需水量较低,一般在 2~3 毫米之间,拔节-抽穗期最高为 3.0~4.7 毫米,抽穗-成熟期略低,约 3.0~3.5 毫米,基本上成一钟形分布。拔节-抽穗期是营养生长最旺盛的时期,群体叶面积已达最大,所以日需水最多。

(2) 夏玉米阶段需水量与模系数

夏玉米的植株高大,生长期需要制造大量的有机物,全生育期的需水量是比较大的,河北省夏玉米为 280~355 毫米。全生育期为 91~112 天。夏玉米在不同的生育阶段,对水分的需求量和对缺水的反映是不同的。河北省保定市夏玉米阶段需水量与模系数如表 3-2。

表 3-2 保定市夏玉米阶段需水量与模系数

项目	播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟	全生育期
日期	6:20-7:12	7:13-8:8	8:9-9:20	6:20-9:20
天数 (d)	23	27	43	93
阶段需水量 (mm)	61.54	114.25	129.93	305.72
模系数(%)	20.13	37.37	42.50	100.00
日需水量 (mm)	2.70	4.23	3.02	3.29

说明:本数据采用藁城实验站干旱年产量为 6000kg/hm²条件下夏玉米的需水规律。

(3) 夏玉米不同生育阶段棵间蒸发与叶面蒸腾的变化

由于玉米是高秆稀植作物,同冬小麦等密植作物相比,后期地表遮盖都较低,仍有较强的棵间蒸发。从夏玉米播种到拔节,恰处于 6 月中、下旬至 7 月上旬,气温高,大气干燥。此时植株矮小,叶面积系数小,叶面蒸腾量低,棵间蒸发量比例却高达 60%以上,但在高产地块要低一些,这主要与叶面覆盖大小有关。抽雄期叶面积系数达最大值,枝叶繁茂、生理活性旺盛,因而此间叶面蒸腾量所占比例大。这个时期是棵间蒸发占比例最小的时期,一般为 21%~40%。从全生长期看,玉米棵间土壤蒸发量占总需水量的比例为 40%~50%。一般随着产量水平提高,棵间土壤蒸发的比例逐渐减少。可见土壤蒸发量对产量形成基本上无意义,应采取适当的栽培措施,尽量降低它所占的比例。

3 棉花

(1) 棉花日需水量过程线

棉花日需水量过程线显示了棉花全生长期的需水特点见图 3-9 棉花日蓄水量过程线。从图 3-9 可以看出：播种-现蕾日需水量为 1.2~2.4 毫米、现蕾-开花 2.5~4.0 毫米、开花-吐絮 3.76~4.77 毫米、吐絮-成熟 1.27~4.4 毫米，可见日需水高峰处在开花-吐絮阶段。此阶段正是营养生长和生殖生长最旺盛的时期，叶面积最大，气温也最高，故日需水最多。

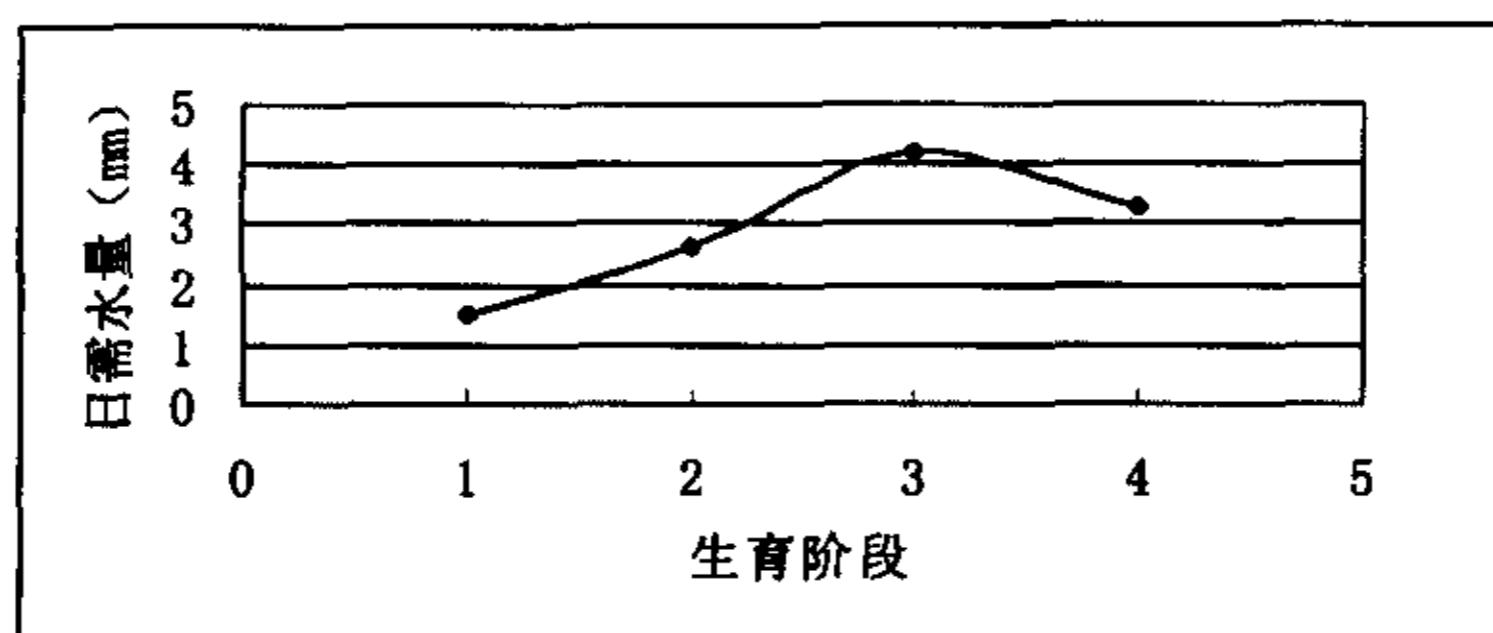


图 3-9 棉花日需水量过程线

注：1——代表播种-现蕾； 2——代表现蕾-开花
3——代表开花-吐絮； 4——代表吐絮-成熟

(2) 棉花阶段需水量与模系数

由于棉花不同生育期的长短、生长状况、环境气候条件不同，各生育阶段需水量和需水强度明显不同。模系数最大的阶段为开花-吐絮，占 52%，吐絮-成熟与播种-现蕾的模系数相近，在 17% 左右。棉花阶段需水量与模系数如表 3-3

表 3-3 棉花阶段需水量与模系数

项目	播种- 现蕾	现蕾- 开花	开花- 吐絮	吐絮- 成熟	全生 育期
日期	4:16 -6:11	6:12 -7:4	7:5 -9:3	7:5 -10:20	4:16 -10:20
天数 (d)	57	23	61	47	188
阶段需水量 (mm)	85.67	60.71	257.92	98.24	502.54
模系数(%)	17.38	12.32	52.35	17.98	100.00
日需水量 (mm)	1.50	2.64	4.23	3.27	2.93

说明：本数据采用藁城干旱年产量为籽棉 3375kg/hm²条件下棉花的需水规律

3.3 保定平原区主要农作物生育期的降水量

为了进一步了解农作物生育期的降水量特点,由于保定市的山区和平原各占一半和平原区与山区对雨水资源利用的方法和途径不同,把保定市划分为山区和平原区两个部分,分别对其降水量进行频率分析。考虑到保定市平原区是粮食主产区,所以本文将主要分析保定平原区主要农作物生育期的降水量。

3.3.1 保定平原区降水量频率分析

根据传统的方法,以京广铁路线为界,铁路以西为山区,以东为平原,进行农作物生育期的降水量分析。利用数字式求积仪求得保定平原区各站的面积(按泰森多边形法),计算各站权重。然后按照泰森多边形法,计算保定平原区的各月的平均面雨量系列。最后用配线法对保定平原区主要农作物生育期内的面雨量进行频率分析,由理论频率曲线查得平原区降雨系列分析成果。平原区测站权重如表3-4所示:

表3-4 保定平原区各测站权重

站名	高阳	容城	涿州	雄县
面积	1301.4	970.8	612.6	745.2
权重	0.224	0.167	0.105	0.128
站名	安国	定州	唐县	满城
面积	1223.1	548.7	118.6	295.9
权重	0.210	0.094	0.020	0.051

3.3.2 保定平原区主要农作物生育期的降水量

保定平原农作物以冬小麦、夏玉米和棉花为主。本文按平水年、丰水年、枯水年对冬小麦、夏玉米和棉花生育期的降水量、生育期不同生育阶段的降水量进行分析,分析结果见表3-5:可以看出,保定平原区冬小麦生育期的降水量最少:在丰

表3-5 保定平原区冬小麦、夏玉米、棉花生育期的降水量

代表年	冬小麦	夏玉米	棉花
丰水年($p=25\%$)	160.0	431.0	580.0
平水年($p=50\%$)	115.0	325.0	454.0
枯水年($p=75\%$)	87.0	247.0	354.0

(单位: mm)

3.3 保定平原区主要农作物生育期的降水量

为了进一步了解农作物生育期的降水量特点,由于保定市的山区和平原各占一半和平原区与山区对雨水资源利用的方法和途径不同,把保定市划分为山区和平原区两个部分,分别对其降水量进行频率分析。考虑到保定市平原区是粮食主产区,所以本文将主要分析保定平原区主要农作物生育期的降水量。

3.3.1 保定平原区降水量频率分析

根据传统的方法,以京广铁路线为界,铁路以西为山区,以东为平原,进行农作物生育期的降水量分析。利用数字式求积仪求得保定平原区各站的面积(按泰森多边形法),计算各站权重。然后按照泰森多边形法,计算保定平原区的各月的平均面雨量系列。最后用配线法对保定平原区主要农作物生育期内的面雨量进行频率分析,由理论频率曲线查得平原区降雨系列分析成果。平原区测站权重如表3-4所示:

表3-4 保定平原区各测站权重

站名	高阳	容城	涿州	雄县
面积	1301.4	970.8	612.6	745.2
权重	0.224	0.167	0.105	0.128
站名	安国	定州	唐县	满城
面积	1223.1	548.7	118.6	295.9
权重	0.210	0.094	0.020	0.051

3.3.2 保定平原区主要农作物生育期的降水量

保定平原农作物以冬小麦、夏玉米和棉花为主。本文按平水年、丰水年、枯水年对冬小麦、夏玉米和棉花生育期的降水量、生育期不同生育阶段的降水量进行分析,分析结果见表3-5:可以看出,保定平原区冬小麦生育期的降水量最少:在丰

表3-5 保定平原区冬小麦、夏玉米、棉花生育期的降水量

代表年	冬小麦	夏玉米	棉花
丰水年($p=25\%$)	160.0	431.0	580.0
平水年($p=50\%$)	115.0	325.0	454.0
枯水年($p=75\%$)	87.0	247.0	354.0

(单位: mm)

水年降水量有 160 mm, 占冬小麦需水量 34%, 平水年降水量 115mm, 占冬小麦需水量的 25%。干旱年降水量只有 87mm, 占冬小麦需水量的 19%。夏玉米生育期的降水量比较充足: 丰水年平水年和干旱年的降水量分别是夏玉米需水量的百分数为: 141%、107%、80.9%。棉花生育期的降水量比较适中: 丰水年、平水年和干旱年的降水量分别是棉花需水量的百分数为: 116%、90.8%、70.8%。

保定平原区冬小麦、夏玉米、棉花在不同生育阶段的降水量见表 3-6。

表 3-6 保定平原区冬小麦、夏玉米、棉花在不同生育阶段的降水量

冬小麦 生育阶段	播种-	分蘖-	返青-	拔节-	抽穗-	灌浆-
	分蘖	返青	拔节	抽穗	灌浆	成熟
丰水年降水量 (mm)	32.0	31.5	20.5	27.7	12.7	50.7
平水年降水量 (mm)	17.9	23.0	9.5	15.5	8.0	33.0
干旱年降水量 (mm)	10.3	15.5	3.5	7.0	4.0	21.0
夏玉米生育阶段	播种-拔节		拔节-抽穗		抽穗-成熟	
丰水年降水量 (mm)	90.3		194.0		158.0	
平水年降水量 (mm)	66.0		144.0		94.0	
干旱年降水量 (mm)	44.0		94.0		85.0	
棉 花 生育阶段	播种-	现蕾-	开花-	吐絮-		
	现蕾	开花	吐絮	成熟		
丰水年降水量 (mm)	78.0	115.0	415.0	80.0		
平水年降水量 (mm)	51.0	82.0	340.0	54.0		
干旱年降水量 (mm)	34.0	56.0	177.0	35.0		

由上表分析得出: 冬小麦在不同生育期中降水量都很少, 特别是在耗水量最大的返青-灌浆阶段降水量最小。必须通过灌溉方式来保证作物此需水关键期需水的要求, 否则冬小麦的产量将受到最大的影响。夏玉米和棉花不同生育阶段的降水明显比冬小麦不同生育阶段降水多, 而且在夏玉米和棉花的营养生长和生殖生长的并进期—拔节-抽穗期和开花-吐絮期降水量最多, 这有利于夏玉米和棉花的生长。

3.4 保定市平原区主要农作物生育期水分的盈亏分析

根据水量平衡方程的变化公式, 对不同农作物在各自的生育期和生育阶段的水

水年降水量有 160 mm, 占冬小麦需水量 34%, 平水年降水量 115mm, 占冬小麦需水量的 25%。干旱年降水量只有 87mm, 占冬小麦需水量的 19%。夏玉米生育期的降水量比较充足: 丰水年平水年和干旱年的降水量分别是夏玉米需水量的百分数为: 141%、107%、80.9%。棉花生育期的降水量比较适中: 丰水年、平水年和干旱年的降水量分别是棉花需水量的百分数为: 116%、90.8%、70.8%。

保定平原区冬小麦、夏玉米、棉花在不同生育阶段的降水量见表 3-6。

表 3-6 保定平原区冬小麦、夏玉米、棉花在不同生育阶段的降水量

冬小麦 生育阶段	播种-	分蘖-	返青-	拔节-	抽穗-	灌浆-
	分蘖	返青	拔节	抽穗	灌浆	成熟
丰水年降水量 (mm)	32.0	31.5	20.5	27.7	12.7	50.7
平水年降水量 (mm)	17.9	23.0	9.5	15.5	8.0	33.0
干旱年降水量 (mm)	10.3	15.5	3.5	7.0	4.0	21.0
夏玉米生育阶段	播种-拔节		拔节-抽穗		抽穗-成熟	
丰水年降水量 (mm)	90.3		194.0		158.0	
平水年降水量 (mm)	66.0		144.0		94.0	
干旱年降水量 (mm)	44.0		94.0		85.0	
棉 花 生育阶段	播种-	现蕾-	开花-	吐絮-		
	现蕾	开花	吐絮	成熟		
丰水年降水量 (mm)	78.0	115.0	415.0	80.0		
平水年降水量 (mm)	51.0	82.0	340.0	54.0		
干旱年降水量 (mm)	34.0	56.0	177.0	35.0		

由上表分析得出: 冬小麦在不同生育期中降水量都很少, 特别是在耗水量最大的返青-灌浆阶段降水量最小。必须通过灌溉方式来保证作物此需水关键期需水的要求, 否则冬小麦的产量将受到最大的影响。夏玉米和棉花不同生育阶段的降水明显比冬小麦不同生育阶段降水多, 而且在夏玉米和棉花的营养生长和生殖生长的并进期—拔节-抽穗期和开花-吐絮期降水量最多, 这有利于夏玉米和棉花的生长。

3.4 保定市平原区主要农作物生育期水分的盈亏分析

根据水量平衡方程的变化公式, 对不同农作物在各自的生育期和生育阶段的水

分盈亏进行分析:

水量平衡方程如下所示:

$$W_0 + P - R_s - R_g + K + M - ET = W_t$$

式中: W_0 —时段初的土壤计划湿润层内的储水量 (mm);

W_t —任一时间 t 时的土壤计划湿润层内的储水量 (mm);

P —时段 t 内的降水量 (mm);

R_s —时段 t 内的地表径流量 (mm);

R_g —时段 t 内的深层渗漏量 (mm);

K —时段 t 内的地下水补给量, 即 $K=kt$, k 为 t 时段内平均每昼夜地下水补给量 (mm);

M —时段 t 内的灌溉水量 (mm);

ET —时段 t 内的作物田间需水量, 即 $ET=et_e$ 为 t 时段内平均每昼夜的作物田间需水量 (mm)。

为了清楚的看出作物的田间需水量由几部分提供, 把公式变型为:

$$ET = (W_0 - W_t) + (P - R_s - R_g) + K + M$$

从公式中可以看出作物的田间需水量由四部分组成:

- (1) 时段 t 内土壤的储水量 ($W_0 - W_t$);
- (2) 时段 t 内有效降水量 ($P - R_s - R_g$);
- (3) 时段 t 内地下水补给量 K ;
- (4) 时段 t 内灌溉补给量 M ;

保定市地下水位较低, 地下水补给量则忽略不计。有效降水量是指降雨入渗量, 当降水量超过土壤层最大田间持水量后才产生地表径流或渗层渗漏。本文需要研究农作物需水量和降水量的供求关系, 故不考虑土壤的储水量的影响, 因此公式简化为 $ET=P+M$, 则作物生育期的缺水量在数值上应等于灌水量: 即用作物生育期的需水量减去生育期的有效降水量。通过对水量平衡的分析, 可以看出耕地上作物生育期的有效降水量就是耕地上的雨水资源量。雨水资源量是指在耕地上可被农作物(植物)直接吸收利用形成产量或用来维持环境生态的雨水量和非耕地上利用集流系统收集到的雨水量之和。

3.4.1 冬小麦生育阶段水分盈亏分析

经进行盈亏分析得出, 只有在丰水年, 小麦播种-分蘖期才出现不亏缺现象, 而其它各个生育期都出现亏缺量。这是因为小麦本身耗水量大, 生育期又处在降水偏少的月份。见表 3-7

分盈亏进行分析:

水量平衡方程如下所示:

$$W_0 + P - R_s - R_g + K + M - ET = W_t$$

式中: W_0 —时段初的土壤计划湿润层内的储水量 (mm);

W_t —任一时间 t 时的土壤计划湿润层内的储水量 (mm);

P —时段 t 内的降水量 (mm);

R_s —时段 t 内的地表径流量 (mm);

R_g —时段 t 内的深层渗漏量 (mm);

K —时段 t 内的地下水补给量, 即 $K=kt$, k 为 t 时段内平均每昼夜地下水补给量 (mm);

M —时段 t 内的灌溉水量 (mm);

ET —时段 t 内的作物田间需水量, 即 $ET=et_e$ 为 t 时段内平均每昼夜的作物田间需水量 (mm)。

为了清楚的看出作物的田间需水量由几部分提供, 把公式变型为:

$$ET = (W_0 - W_t) + (P - R_s - R_g) + K + M$$

从公式中可以看出作物的田间需水量由四部分组成:

- (1) 时段 t 内土壤的储水量 ($W_0 - W_t$);
- (2) 时段 t 内有效降水量 ($P - R_s - R_g$);
- (3) 时段 t 内地下水补给量 K ;
- (4) 时段 t 内灌溉补给量 M ;

保定市地下水位较低, 地下水补给量则忽略不计。有效降水量是指降雨入渗量, 当降水量超过土壤层最大田间持水量后才产生地表径流或渗层渗漏。本文需要研究农作物需水量和降水量的供求关系, 故不考虑土壤的储水量的影响, 因此公式简化为 $ET=P+M$, 则作物生育期的缺水量在数值上应等于灌水量: 即用作物生育期的需水量减去生育期的有效降水量。通过对水量平衡的分析, 可以看出耕地上作物生育期的有效降水量就是耕地上的雨水资源量。雨水资源量是指在耕地上可被农作物(植物)直接吸收利用形成产量或用来维持环境生态的雨水量和非耕地上利用集流系统收集到的雨水量之和。

3.4.1 冬小麦生育阶段水分盈亏分析

经进行盈亏分析得出, 只有在丰水年, 小麦播种-分蘖期才出现不亏缺现象, 而其它各个生育期都出现亏缺量。这是因为小麦本身耗水量大, 生育期又处在降水偏少的月份。见表 3-7

表 3-7 冬小麦生育阶段水分盈亏分析表

冬小麦 生育阶段	播种- 分蘖	分蘖- 返青	返青- 拔节	拔节- 抽穗	抽穗- 灌浆	灌浆- 成熟
丰水年降水量 (mm)	32.0	31.5	20.5	27.7	12.7	50.7
有效降水量 (mm)	28.8	28.35	18.45	24.93	11.43	45.63
需水亏缺量 Dw (mm)	-3.0	36.6	48.75	84.27	83.82	64.02
平水年降水量 (mm)	17.9	23.0	9.5	15.5	8.0	33.0
有效降水量 (mm)	16.11	20.7	8.55	13.95	7.2	29.7
需水亏缺量 Dw (mm)	9.69	44.25	58.65	95.25	88.05	79.95
干旱年降水量 (mm)	10.3	15.5	3.5	7.0	4.0	21.0
有效降水量 (mm)	9.27	13.95	0	6.3	0	18.9
需水亏缺量 Dw (mm)	16.53	51.0	67.20	102.9	95.25	90.75

注：一般认为一次降雨量小于 5mm 时，有效利用系数为 0；当一次降雨量在 5~50mm 时，有效利用系数为 1.0~0.8，本文取 0.9；当次降雨量大于 50mm 时，有效利用系数取 0.7~0.8。

3.4.2 夏玉米生育阶段水分盈亏分析

经进行盈亏分析得出，玉米生育期与雨水偏多月份相吻合，在丰水年的整个生育期和平水年的前两个生育期，降水基本上能满足玉米生长的需要，只有在平水年抽穗-成熟期和枯水年各个生育期才出现亏缺量。见表 3-8

表 3-8 夏玉米生育阶段水分盈亏分析表

夏玉米 生育阶段	播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟
丰水年降水量 (mm)	90.3	194.0	158.0
有效降水量 (mm)	72.24	155.2	126.4
需水亏缺量 Dw (mm)	-10.7	-40.95	3.53
平水年降水量 (mm)	66.0	144.0	94.0
有效降水量 (mm)	52.8	115.2	75.2
需水亏缺量 Dw (mm)	8.74	-0.95	54.73
干旱年降水量 (mm)	44.0	94.0	85.0
有效降水量 (mm)	35.2	75.2	68.0
需水亏缺量 Dw (mm)	26.34	39.05	61.93

注：夏玉米生育期的降水量的有效利用系数取 0.8^[49]

表 3-7 冬小麦生育阶段水分盈亏分析表

冬小麦 生育阶段	播种- 分蘖	分蘖- 返青	返青- 拔节	拔节- 抽穗	抽穗- 灌浆	灌浆- 成熟
丰水年降水量 (mm)	32.0	31.5	20.5	27.7	12.7	50.7
有效降水量 (mm)	28.8	28.35	18.45	24.93	11.43	45.63
需水亏缺量 Dw (mm)	-3.0	36.6	48.75	84.27	83.82	64.02
平水年降水量 (mm)	17.9	23.0	9.5	15.5	8.0	33.0
有效降水量 (mm)	16.11	20.7	8.55	13.95	7.2	29.7
需水亏缺量 Dw (mm)	9.69	44.25	58.65	95.25	88.05	79.95
干旱年降水量 (mm)	10.3	15.5	3.5	7.0	4.0	21.0
有效降水量 (mm)	9.27	13.95	0	6.3	0	18.9
需水亏缺量 Dw (mm)	16.53	51.0	67.20	102.9	95.25	90.75

注：一般认为一次降雨量小于 5mm 时，有效利用系数为 0；当一次降雨量在 5~50mm 时，有效利用系数为 1.0~0.8，本文取 0.9；当次降雨量大于 50mm 时，有效利用系数取 0.7~0.8。

3.4.2 夏玉米生育阶段水分盈亏分析

经进行盈亏分析得出，玉米生育期与雨水偏多月份相吻合，在丰水年的整个生育期和平水年的前两个生育期，降水基本上能满足玉米生长的需要，只有在平水年抽穗-成熟期和枯水年各个生育期才出现亏缺量。见表 3-8

表 3-8 夏玉米生育阶段水分盈亏分析表

夏玉米 生育阶段	播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟
丰水年降水量 (mm)	90.3	194.0	158.0
有效降水量 (mm)	72.24	155.2	126.4
需水亏缺量 Dw (mm)	-10.7	-40.95	3.53
平水年降水量 (mm)	66.0	144.0	94.0
有效降水量 (mm)	52.8	115.2	75.2
需水亏缺量 Dw (mm)	8.74	-0.95	54.73
干旱年降水量 (mm)	44.0	94.0	85.0
有效降水量 (mm)	35.2	75.2	68.0
需水亏缺量 Dw (mm)	26.34	39.05	61.93

注：夏玉米生育期的降水量的有效利用系数取 0.8^[49]

3.4.3 棉花生育阶段水分盈亏分析

经进行盈亏分析得出，在丰水年，棉花播种-现蕾期和吐絮-成熟期出现亏缺，其它两个生育期降水能满足作物生长的需要。平水年现蕾-开花期和开花-吐絮期基本不出现亏缺现象，但枯水年各生育阶段均会出现亏缺。见表 3-9：

表 3-9 棉花生育阶段水分盈亏分析表

棉 花 生育阶段	播种- 现蕾	现蕾- 开花	开花- 吐絮	吐絮- 成熟
丰水年降水量 (mm)	78.0	115.0	415.0	80.0
有效降水量 (mm)	58.5	86.25	311.25	60.0
需水亏缺量 Dw (mm)	27.17	-19.54	-53.33	38.24
平水年降水量 (mm)	51.0	82.0	340.0	54.0
有效降水量 (mm)	38.25	61.5	255.0	40.5
需水亏缺量 Dw (mm)	47.42	-0.79	2.92	57.74
干旱年降水量 (mm)	34.0	56.0	177.0	35.0
有效降水量 (mm)	25.5	42.0	132.75	26.25
需水亏缺量 Dw (mm)	60.17	18.17	125.17	71.99

注：棉花生育期的降水量有效利用系数取 0.75^[49]

3.4.4 冬小麦、夏玉米、棉花整个生育期水分盈亏分析

经进行盈亏分析得出，作物生育期水分的盈亏，除受蒸发外，主要受降水的支

表 3-10 主要农作物整个生育期水分盈亏分析

作物	冬小麦	夏玉米	棉花
丰水年降水量 (mm)	160.0	431.0	580.0
有效降水量 (mm)	144.0	344.8	435.0
需水亏缺量 Dw (mm)	328.0	-39.08	67.54
平水年降水量 (mm)	115.0	325.0	454.0
有效降水量 (mm)	103.5	260.0	340.5
需水亏缺量 Dw (mm)	368.5	45.72	162.04
干旱年降水量 (mm)	87.0	247.0	354.0
有效降水量 (mm)	78.3	197.6	265.5
需水亏缺量 Dw (mm)	393.75	108.12	236.94

3.4.3 棉花生育阶段水分盈亏分析

经进行盈亏分析得出，在丰水年，棉花播种-现蕾期和吐絮-成熟期出现亏缺，其它两个生育期降水能满足作物生长的需要。平水年现蕾-开花期和开花-吐絮期基本不出现亏缺现象，但枯水年各生育阶段均会出现亏缺。见表 3-9：

表 3-9 棉花生育阶段水分盈亏分析表

棉 花 生育阶段	播种- 现蕾	现蕾- 开花	开花- 吐絮	吐絮- 成熟
丰水年降水量 (mm)	78.0	115.0	415.0	80.0
有效降水量 (mm)	58.5	86.25	311.25	60.0
需水亏缺量 Dw (mm)	27.17	-19.54	-53.33	38.24
平水年降水量 (mm)	51.0	82.0	340.0	54.0
有效降水量 (mm)	38.25	61.5	255.0	40.5
需水亏缺量 Dw (mm)	47.42	-0.79	2.92	57.74
干旱年降水量 (mm)	34.0	56.0	177.0	35.0
有效降水量 (mm)	25.5	42.0	132.75	26.25
需水亏缺量 Dw (mm)	60.17	18.17	125.17	71.99

注：棉花生育期的降水量有效利用系数取 0.75^[49]

3.4.4 冬小麦、夏玉米、棉花整个生育期水分盈亏分析

经进行盈亏分析得出，作物生育期水分的盈亏，除受蒸发外，主要受降水的支

表 3-10 主要农作物整个生育期水分盈亏分析

作物	冬小麦	夏玉米	棉花
丰水年降水量 (mm)	160.0	431.0	580.0
有效降水量 (mm)	144.0	344.8	435.0
需水亏缺量 Dw (mm)	328.0	-39.08	67.54
平水年降水量 (mm)	115.0	325.0	454.0
有效降水量 (mm)	103.5	260.0	340.5
需水亏缺量 Dw (mm)	368.5	45.72	162.04
干旱年降水量 (mm)	87.0	247.0	354.0
有效降水量 (mm)	78.3	197.6	265.5
需水亏缺量 Dw (mm)	393.75	108.12	236.94

配。冬小麦、夏玉米和棉花相比，需水量相差并不悬殊，但冬小麦生长在旱季，而玉米和棉花生长在雨季，其缺水量却相差悬殊。夏玉米亏缺量在枯水年较少，丰水年和平水年不缺水，基本上属于不缺水；棉花缺水量比较适中，在丰水年缺水量少，在平水年和枯水年缺水量比较多；冬小麦缺水量最多，在丰水年、平水年和枯水年都缺水较多，且缺水量相差不多。见表 3-10

3.5 保定市雨水资源的生产效率研究

雨水资源是农业生产可直接利用的水源，但降水量的多少直接影响其生产效率。为了提高雨水资源的生产效率，针对保定市典型年的降雨情况，实测了冬小麦 1m、夏玉米 2m 土体不同生育阶段分层的土壤含水量。

3.5.1 冬小麦各生育期 1 米土体土壤水分的变化

在田间对冬小麦进行不同次数灌水，夏玉米不灌水，测得不同时期土壤不同层次土壤含水量状况（每 10cm 为一层）。处理分灌四水（返青、拔节、抽穗、灌浆）、分灌三水（拔节、抽穗、灌浆）、分灌二水（拔节、灌浆）和不灌水，夏玉米不灌水（夏玉米全生育期降水 269.1mm）。冬小麦不灌水从返青到成熟时 1m 土体贮水情况如表 3-11 所示。

表 3-11 不灌水冬小麦返青-成熟 1m 内土体贮水量表

土层(cm)	质地	容重	3月29日	4月5日	4月12日	4月20日	4月27日
0~10	中壤	1.16	20.67	12.66	7.695	6.24	17.76
11~20	中壤	1.30	28.91	19.10	11.37	10.29	19.10
21~30	中壤	1.47	35.22	26.87	22.04	22.62	24.21
31~40	砂壤	1.43	27.53	27.23	31.13	13.19	19.62
41~50	砂壤	1.41	27.00	23.73	15.42	12.75	18.90
51~60	中壤	1.37	28.97	17.30	14.12	12.45	17.48
61~70	中壤	1.37	30.48	36.81	26.03	29.24	45.56
71~80	重壤	1.27	43.88	40.20	45.30	36.42	36.21
81~90	重壤	1.30	47.91	59.85	56.39	50.09	55.20
91~100	重壤	1.30	49.37	59.33	55.26	58.25	54.81
9~100			336.87	323.06	284.73	252.20	308.39

(单位：mm)

配。冬小麦、夏玉米和棉花相比，需水量相差并不悬殊，但冬小麦生长在旱季，而玉米和棉花生长在雨季，其缺水量却相差悬殊。夏玉米亏缺量在枯水年较少，丰水年和平水年不缺水，基本上属于不缺水；棉花缺水量比较适中，在丰水年缺水量少，在平水年和枯水年缺水量比较多；冬小麦缺水量最多，在丰水年、平水年和枯水年都缺水较多，且缺水量相差不多。见表 3-10

3.5 保定市雨水资源的生产效率研究

雨水资源是农业生产可直接利用的水源，但降水量的多少直接影响其生产效率。为了提高雨水资源的生产效率，针对保定市典型年的降雨情况，实测了冬小麦 1m、夏玉米 2m 土体不同生育阶段分层的土壤含水量。

3.5.1 冬小麦各生育期 1 米土体土壤水分的变化

在田间对冬小麦进行不同次数灌水，夏玉米不灌水，测得不同时期土壤不同层次土壤含水量状况（每 10cm 为一层）。处理分灌四水（返青、拔节、抽穗、灌浆）、分灌三水（拔节、抽穗、灌浆）、分灌二水（拔节、灌浆）和不灌水，夏玉米不灌水（夏玉米全生育期降水 269.1mm）。冬小麦不灌水从返青到成熟时 1m 土体贮水情况如表 3-11 所示。

表 3-11 不灌水冬小麦返青-成熟 1m 内土体贮水量表

土层(cm)	质地	容重	3月29日	4月5日	4月12日	4月20日	4月27日
0~10	中壤	1.16	20.67	12.66	7.695	6.24	17.76
11~20	中壤	1.30	28.91	19.10	11.37	10.29	19.10
21~30	中壤	1.47	35.22	26.87	22.04	22.62	24.21
31~40	砂壤	1.43	27.53	27.23	31.13	13.19	19.62
41~50	砂壤	1.41	27.00	23.73	15.42	12.75	18.90
51~60	中壤	1.37	28.97	17.30	14.12	12.45	17.48
61~70	中壤	1.37	30.48	36.81	26.03	29.24	45.56
71~80	重壤	1.27	43.88	40.20	45.30	36.42	36.21
81~90	重壤	1.30	47.91	59.85	56.39	50.09	55.20
91~100	重壤	1.30	49.37	59.33	55.26	58.25	54.81
9~100			336.87	323.06	284.73	252.20	308.39

(单位：mm)

配。冬小麦、夏玉米和棉花相比，需水量相差并不悬殊，但冬小麦生长在旱季，而玉米和棉花生长在雨季，其缺水量却相差悬殊。夏玉米亏缺量在枯水年较少，丰水年和平水年不缺水，基本上属于不缺水；棉花缺水量比较适中，在丰水年缺水量少，在平水年和枯水年缺水量比较多；冬小麦缺水量最多，在丰水年、平水年和枯水年都缺水较多，且缺水量相差不多。见表 3-10

3.5 保定市雨水资源的生产效率研究

雨水资源是农业生产可直接利用的水源，但降水量的多少直接影响其生产效率。为了提高雨水资源的生产效率，针对保定市典型年的降雨情况，实测了冬小麦 1m、夏玉米 2m 土体不同生育阶段分层的土壤含水量。

3.5.1 冬小麦各生育期 1 米土体土壤水分的变化

在田间对冬小麦进行不同次数灌水，夏玉米不灌水，测得不同时期土壤不同层次土壤含水量状况（每 10cm 为一层）。处理分灌四水（返青、拔节、抽穗、灌浆）、分灌三水（拔节、抽穗、灌浆）、分灌二水（拔节、灌浆）和不灌水，夏玉米不灌水（夏玉米全生育期降水 269.1mm）。冬小麦不灌水从返青到成熟时 1m 土体贮水情况如表 3-11 所示。

表 3-11 不灌水冬小麦返青-成熟 1m 内土体贮水量表

土层(cm)	质地	容重	3月29日	4月5日	4月12日	4月20日	4月27日
0~10	中壤	1.16	20.67	12.66	7.695	6.24	17.76
11~20	中壤	1.30	28.91	19.10	11.37	10.29	19.10
21~30	中壤	1.47	35.22	26.87	22.04	22.62	24.21
31~40	砂壤	1.43	27.53	27.23	31.13	13.19	19.62
41~50	砂壤	1.41	27.00	23.73	15.42	12.75	18.90
51~60	中壤	1.37	28.97	17.30	14.12	12.45	17.48
61~70	中壤	1.37	30.48	36.81	26.03	29.24	45.56
71~80	重壤	1.27	43.88	40.20	45.30	36.42	36.21
81~90	重壤	1.30	47.91	59.85	56.39	50.09	55.20
91~100	重壤	1.30	49.37	59.33	55.26	58.25	54.81
9~100			336.87	323.06	284.73	252.20	308.39

(单位：mm)

续表 3-11 不灌水冬小麦返青-成熟 1m 内土体贮水量表

土层(cm)	质地	容重	5月3日	5月10日	5月17日	5月24日	5月31日	6月8日
0~10	中壤	1.16	8.43	5.76	4.05	10.94	7.17	25.49
11~20	中壤	1.30	8.88	10.05	4.89	9.69	7.86	25.43
21~30	中壤	1.47	20.28	21.63	12.84	21.65	10.76	16.47
31~40	砂壤	1.43	12.30	18.41	15.32	17.49	6.27	13.85
41~50	砂壤	1.41	28.22	19.94	8.27	11.90	12.02	6.32
51~60	中壤	1.37	29.30	10.46	9.75	10.86	24.59	8.28
61~70	中壤	1.37	43.65	35.82	35.46	29.39	22.25	21.78
71~80	重壤	1.27	55.38	40.70	38.97	41.10	34.38	37.13
81~90	重壤	1.30	48.02	50.34	59.97	66.08	49.37	58.50
91~100	重壤	1.30	54.65	58.37	62.57	54.84	58.85	67.34
9~100			297.11	271.46	252.08	273.92	233.49	280.56

(单位: mm)

通过对实验结果分析, 可以得到如下结论:

(1) 不灌水麦田, 在小麦生育期降水 124.6mm 条件下, 1m 土体土壤贮水量都超过中壤土无效水(99~112mm)的水平。除 5 月 31 日, 测定 1m 土体土壤贮水 233.49mm 外, 其余各期都超过中壤土 1m 土体贮水 240mm 有效水水平。在这种处理情况下, 小麦产量低, 雨水资源生产效率低, 表明任何一个生育阶段受到水分限制, 就会影响冬小麦的产量, 因而应注意尽量满足各个生育阶段的需水要求。

(2) 中壤土 1m 土体蓄墒能力为 300~322.5mm, 不灌水麦田在 11 次水分观测中, 有 3 次达到 300 mm, 其余都在 300 mm 以下。可知冬小麦生育期的降水太少, 不能满足 1m 土体的需水能力, 为提高小麦产量和雨水资源的生产效率必须结合灌溉措施。

(3) 麦田灌水的处理除二水处理个别时期外, 1m 土体贮水都超过无效水、有效水和贮水力的水平, 并以麦田灌四水处理为高。由于通过灌溉补充了土壤水的不足, 使土壤水分能被作物利用, 这样就提高了水分生产效率, 从而也大幅度提高了雨水资源的生产效率。

(4) 夏玉米在生育期降水 269.1mm 情况下, 1 米土体土壤贮水量都超过有效水 240mm 的水平; 前茬小麦灌四水、玉米不灌水, 除玉米收获外, 其余各期土壤水都达到中壤土贮水力 300mm 以上; 全年不灌水也仅 3 次低于 300mm, 其中 2 次仍贮水 285mm 以上。可见夏玉米的生育期的土壤水分状况比较对有利于作物的生长。

(5) 冬小麦灌四水, 根系强烈吸水层在 30~40cm 处; 灌三水及灌二水根细吸水层为 40~50cm; 不灌水根吸强烈吸水层在 50~60cm, 随着灌水减少, 根系可以利

用下层土壤水。夏玉米在全年不灌水时，根系强烈吸水层达 50~60cm 处；前茬灌四水多为 40~50cm。可以得出：凡是能促进根系下扎的措施，就能提高作物对深层土壤水的利用的利用率，进而提高雨水资源的生产效率。

(6) 小麦不灌水田拔节后，有 0~60cm 土层各层次连片集中水分减少倾向，表明拔节后期表层根的吸水力增强，从而表明拔节后需水的重要意义。夏玉米籽粒形成期，0~100cm 土层土壤水分同期减少，并有向深层发展趋势，说明夏玉米后期可充分利用深层土壤水。保证冬小麦拔节后期和夏玉米的籽粒形成期的需水要求对其产量有重要意义。

3.5.2 对雨水资源的生产效率的研究

保定市农民习惯了冬小麦-夏玉米两茬平播的耕作方式。为了充分利用雨水资源，进一步了解雨水资源的生产效率及其影响因素，系统总结和分析了雄县杨西楼试验区进行的田间试验，针对不同的灌水情况和施肥情况试验分了 10 个处理。表 3-12、表 3-13 是基于实验结果对冬小麦和夏玉米雨水资源的生产效率的计算结果。

表 3-12 冬小麦耗水量、产量及雨水资源生产效率关系表

处 理	0~100cm 播前土壤 含水量 (mm)	0~100cm 收后土壤 含水量 (mm)	作物总 耗水量 (mm)	作物单位 产量 (kg/hm ²)	施肥 增产 (%)	雨水资源 生产效率 (kg/m ³)
F麦玉米0	269.88	218.45	144.13	998.355	26.826	0.6930
N麦玉米0	269.88	239.64	122.94	787.245	0.000	0.6405
F麦2玉米0	269.88	206.37	276.21	3540.780	156.935	1.2825
N麦2玉米0	269.88	231.45	251.13	1378.080	0.000	0.5490
F麦3玉米0	269.88	221.48	321.10	4269.600	137.2	1.3305
N麦3玉米0	269.88	216.46	326.12	1950.000	0.000	0.5520
F麦4玉米0	269.88	241.77	360.81	4549.200	175.183	1.2615
N麦4玉米0	269.88	222.70	380.33	1653.150	0.000	0.4350
F麦5玉米0	269.88	216.00	446.58	4239.225	65.586	0.9495
N麦5玉米0	269.88	246.62	415.96	2560.125	0.000	0.5100

说明： 年度为 1991~1992；0——代表不灌水；2——代表灌 2 水；3——代表灌 3 水；

4——代表灌 4 水；5——代表灌 5 水；F——代表施肥；N——代表不施肥

用下层土壤水。夏玉米在全年不灌水时，根系强烈吸水层达 50~60cm 处；前茬灌四水多为 40~50cm。可以得出：凡是能促进根系下扎的措施，就能提高作物对深层土壤水的利用的利用率，进而提高雨水资源的生产效率。

(6) 小麦不灌水田拔节后，有 0~60cm 土层各层次连片集中水分减少倾向，表明拔节后期表层根的吸水力增强，从而表明拔节后需水的重要意义。夏玉米籽粒形成期，0~100cm 土层土壤水分同期减少，并有向深层发展趋势，说明夏玉米后期可充分利用深层土壤水。保证冬小麦拔节后期和夏玉米的籽粒形成期的需水要求对其产量有重要意义。

3.5.2 对雨水资源的生产效率的研究

保定市农民习惯了冬小麦-夏玉米两茬平播的耕作方式。为了充分利用雨水资源，进一步了解雨水资源的生产效率及其影响因素，系统总结和分析了雄县杨西楼试验区进行的田间试验，针对不同的灌水情况和施肥情况试验分了 10 个处理。表 3-12、表 3-13 是基于实验结果对冬小麦和夏玉米雨水资源的生产效率的计算结果。

表 3-12 冬小麦耗水量、产量及雨水资源生产效率关系表

处 理	0~100cm 播前土壤 含水量 (mm)	0~100cm 收后土壤 含水量 (mm)	作物总 耗水量 (mm)	作物单位 产量 (kg/hm ²)	施肥 增产 (%)	雨水资源 生产效率 (kg/m ³)
F麦玉米0	269.88	218.45	144.13	998.355	26.826	0.6930
N麦玉米0	269.88	239.64	122.94	787.245	0.000	0.6405
F麦2玉米0	269.88	206.37	276.21	3540.780	156.935	1.2825
N麦2玉米0	269.88	231.45	251.13	1378.080	0.000	0.5490
F麦3玉米0	269.88	221.48	321.10	4269.600	137.2	1.3305
N麦3玉米0	269.88	216.46	326.12	1950.000	0.000	0.5520
F麦4玉米0	269.88	241.77	360.81	4549.200	175.183	1.2615
N麦4玉米0	269.88	222.70	380.33	1653.150	0.000	0.4350
F麦5玉米0	269.88	216.00	446.58	4239.225	65.586	0.9495
N麦5玉米0	269.88	246.62	415.96	2560.125	0.000	0.5100

说明： 年度为 1991~1992；0——代表不灌水；2——代表灌 2 水；3——代表灌 3 水；

4——代表灌 4 水；5——代表灌 5 水；F——代表施肥；N——代表不施肥

表 3-13 夏玉米耗水量、产量及雨水资源生产效率关系表

处 理	0~200cm 播前土壤 含水量 (mm)	0~200cm 收后土壤 含水量 (mm)	作物总 耗水量 (mm)	作物单位 产量 (kg/hm ²)	施肥 增产 (%)	雨水资源 生产效率 (kg/m ³)
F麦玉米0	566.115	555.294	388.721	7845.90	6.856	2.0175
N麦玉米0	581.582	529.040	430.442	7342.50	0.000	1.8195
F麦2玉米0	502.614	515.843	364.671	7924.50	9.148	2.1735
N麦2玉米0	451.787	444.501	385.185	7260.30	0.000	1.8855
F麦3玉米0	533.525	565.050	346.374	9539.85	7.033	2.7540
N麦3玉米0	521.226	512.667	386.459	8913.00	0.000	2.3055
F麦4玉米0	577.962	576.414	379.448	8379.15	-1.540	2.2080
N麦4玉米0	518.142	547.973	348.069	8510.40	0.000	2.4450
F麦5玉米0	548.745	528.308	398.337	8475.75	-2.510	2.1285
N麦5玉米0	613.044	559.580	431.364	8693.55	0.000	2.0145

说明： 年度为 1991~1992；1992年夏玉米播前灌水、抽雄灌水：0——代表不灌水；

2——代表灌 2 水；3——代表灌按 3 水；4——代表灌 4 水；

5——代表灌 5 水； F——代表施肥； N——代表不施肥

研究结果表明：

冬小麦生育期雨水资源的生产效率是随着灌水次数和施肥情况的变化而变化的。可以看出雨水资源生产效率受灌水因素和施肥因素的影响。就施肥因素来说，施肥和不施肥的雨水资源生产效率效果不同，一般情况下，施肥的雨水资源生产效率比不施肥的高。其差值是随灌水次数变化而变化的：冬小麦灌水 2~5 次时，施肥后的雨水资源生产效率提高了 0.5~0.8kg/m³，冬小麦不灌水时，施肥后的雨水资源生产效率提高了 0.04kg/m³，变化不明显；就灌水次数来说，灌水次数的不同，水分生产效率也不相同。一般情况下，中等供水情况下，雨水资源生产效率最大。而随灌水次数变化的雨水资源生产效率与施肥与否关系密切：施肥处理的，水分生产效率随着灌水次数的增加呈类似的抛物线变化，不施肥的雨水资源生产效率随着灌水次数的变化曲线如图 3-10 所示。

通过上述分析可以得出：提高雨水资源生产效率的方法，其一为根据水资源状况确定冬小麦的灌水次数，使其雨水资源生产效率尽可能达到较高水平；其二在相同的灌水次数处理下，可以利用施肥处理来实现以肥调水，达到提高雨水资源生产

效率的效果。就冬小麦来说，以灌3水~4水雨水资源生产效率最佳，且作施肥处理。就夏玉米来说，平水年份不必灌水，干旱年需在播前或抽雄期灌关键水，且作施肥处理。

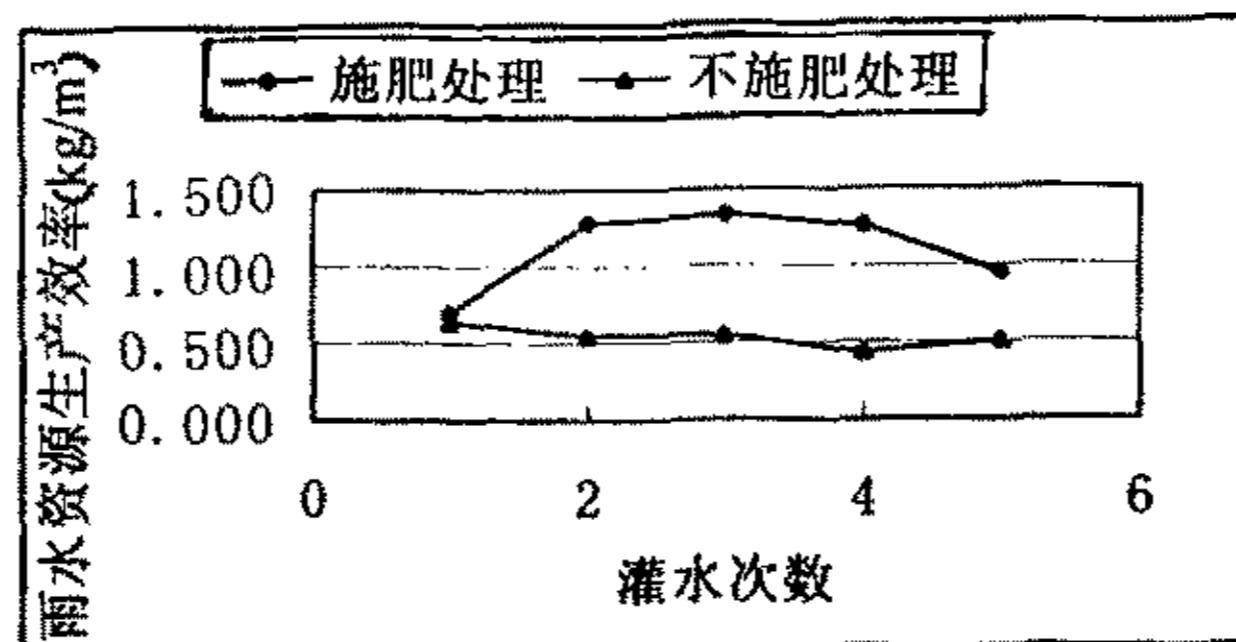


图 3-10 冬小麦雨水资源生产效率变化图

注：1——不灌水；2——灌两水；3——灌三水；
4——灌四水；5——灌五水

4 保定市雨水资源高效利用措施方案

4.1 缺水量分级

根据缺水量的多少，本文初步按照下面标准，将保定市主要农作物缺水情况划分为四个等级：I、II、III和IV。

I——负缺水

II——轻微缺水

III——一般缺水

IV——严重缺水

I： $D_w \leq 0\text{mm}$

II： $0\text{mm} < D_w \leq 100\text{mm}$

III： $100\text{mm} < D_w \leq 200\text{mm}$

IV： $D_w > 200\text{mm}$

从农作物整个生育期的缺水量等级上看，冬小麦属于严重缺水；棉花在枯水年属于一般缺水，在平水年属于轻微缺水；夏玉米在丰水年为负缺水，在平水年和枯水年为轻微缺水。

效率的效果。就冬小麦来说，以灌3水~4水雨水资源生产效率最佳，且作施肥处理。就夏玉米来说，平水年份不必灌水，干旱年需在播前或抽雄期灌关键水，且作施肥处理。

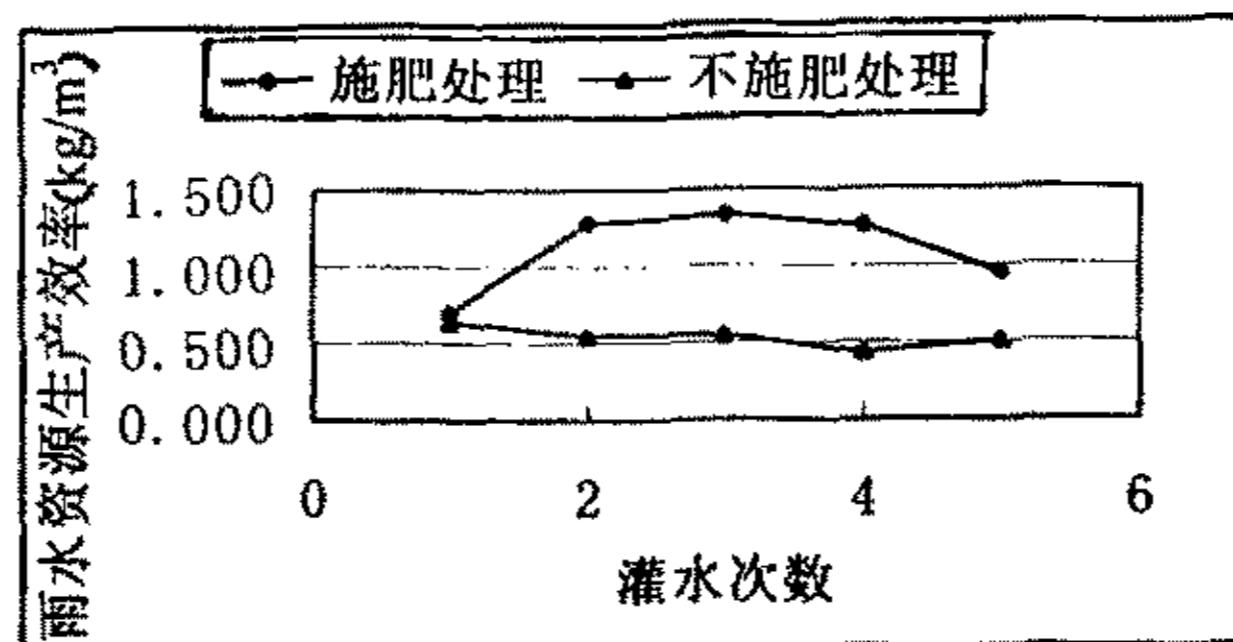


图 3-10 冬小麦雨水资源生产效率变化图

注：1——不灌水；2——灌两水；3——灌三水；
4——灌四水；5——灌五水

4 保定市雨水资源高效利用措施方案

4.1 缺水量分级

根据缺水量的多少，本文初步按照下面标准，将保定市主要农作物缺水情况划分为四个等级：I、II、III和IV。

I——负缺水

II——轻微缺水

III——一般缺水

IV——严重缺水

I： $D_w \leq 0\text{mm}$

II： $0\text{mm} < D_w \leq 100\text{mm}$

III： $100\text{mm} < D_w \leq 200\text{mm}$

IV： $D_w > 200\text{mm}$

从农作物整个生育期的缺水量等级上看，冬小麦属于严重缺水；棉花在枯水年属于一般缺水，在平水年属于轻微缺水；夏玉米在丰水年为负缺水，在平水年和枯水年为轻微缺水。

4.2 雨水利用方案技术思路

方案 1：对于 I 和 II 这两种情况，采取雨水利用的两种被动方式：就地拦蓄入渗利用技术和覆盖抑制蒸发利用技术结合起来。其原因是对于情况 I，有多余的雨水，可以通过就地拦蓄入渗利用技术和覆盖抑制蒸发利用技术将多余的雨水有效储存在土壤水库中以被下一季作物利用，而对于情况 II，缺水量比较少，通过覆盖抑制蒸发这种方式来减少无效蒸发可以满足作物需水量的要求。

方案 2：对于 III 情况，需要采用雨水利用的被动方式和主动利用相结合，但应以雨水的被动为主，以雨水的主动利用为辅。其原因是缺水量超过了通过被动利用方式而节省的水量，单靠这种方式不能满足作物需水要求，而必须在作物的需水关键期通过雨水的主动利用技术，进行集雨节灌。

方案 3：对于严重缺水的 IV，必须同时采用雨水利用的主动方式和雨水利用的被动方式：就地拦蓄入渗利用技术、覆盖抑制蒸发利用技术和雨水富集叠加利用技术。尤其以雨水的主动利用为主。其原因是缺水量较多，作物的需水要求受到严重威胁，除了采用雨水被动利用技术作为辅助手段外，必须同时采用雨水的主动利用方式，保证受旱作物在其需水关键期进行节水灌溉。考虑到粮食安全，如果遇到连续干旱年，在作物的需水临界期通过雨水的主动和被动利用仍不能保证必需的水量时，可以靠地下水资源来进行节水灌溉。

4.3 保定市平原区农作物雨水利用具体措施

保定市是农业大市，冬小麦、夏玉米、棉花种植面积占有绝对的比重，而且作物的需水量在农业用水量中占主导地位。根据丰水年、平水年、枯水年三种作物不同生育阶段和保定市降水的特点，因地制宜地选用雨水利用技术形式，使雨水发挥最大的生产效率，减少保定市农业用水量，使农业生产走上可持续发展的道路上来，是非常必要的，也是可行的。

4.3.1 冬小麦雨水利用方式

保定市冬小麦的播种面积占全市耕地面积的一半以上，近几年，随着农业结构的调整，种植面积有所减少，但仍保持在 4232km^2 左右。冬小麦生长期 6 个阶段正处在保定市降水偏少的月份，无论是丰水年还是枯水年，每个阶段降水都不能满足作物生长的需要，针对这种情况，结合冬小麦播种特点，采用雨水利用的被动方式和主动方式相结合。

播种-分蘖期：首先可采用土壤覆盖技术，将农田土壤表层，人为地创造一层松紧适度的土壤覆盖层，切断土壤层的毛细管，起到减少蒸发、保蓄水分的作用。它

投资少、见效快、易操作，是我国干旱半干旱作物栽培的重要技术之一。其次可采用黑色覆盖技术。夏玉米一般在9月下旬成熟，可以利用玉米秸秆，或干草、枯草等植物残余以及各种物质燃烧后的灰分、畜禽粪便沤制的厩肥直接覆盖于土壤表面，这样可以降低土壤水分蒸发速率，保蓄水分，避免板结，供给营养。

以上两种雨水利用方式，投资少，效果很好，应得到大面积的推广和利用。

分蘖-返青期：从10月25日到翌年的3月14日，小麦营养体小，叶面积系数小，且降水量和蒸发也较小，不必采用单独的雨水利用技术方式。

返青-成熟期：从3月15日到6月14日，小麦营养体逐渐增大，叶面积系数也逐渐增大，并掩盖地面，同时气温也逐步升高，蒸发量加大，作物需水量增长很快，并且这个时期正是保定市旱灾易发季节，针对这个阶段，除采用土壤覆盖技术外，必须采用主动利用方式，即雨水富集叠加利用技术，把多个地块的雨水径流叠加于一个地块上或把多个时段的雨水径流叠加在一个时段上，提高雨水资源的利用率。

雨水富集叠加利用技术主要包括集水、贮水、高效利用3个方面。

(1) 集流技术 利用自然和人工营造局地集流面，如村庄、道路、庭院、荒坡等，把降雨径流收集到特定场所。目前采用村庄庭院集雨，硬化路面集雨，荒坡集水面集雨，塑料大棚棚面集雨等形式。集水面材料有塑料大棚、混凝土、混合土夯实、素土夯实、瓦屋面、砖瓦面、喷沥青夯实地面等。据定西地区水保所测定，用塑料薄膜覆盖，混凝土覆盖，混合土夯实和素土夯实等方法处理的集流面，单位面积年集流量分别为 $0.259\text{ m}^3/\text{m}^2$, $0.256\text{ m}^3/\text{m}^2$, $0.055\text{ m}^3/\text{m}^2$, $0.038\text{ m}^3/\text{m}^2$ ，均高于自然状态下的集流量。

(2) 储水技术 储水技术是通过修建水池、水柜、水窖等工程设施，将集流面所集径流拦蓄储存起来，以备利用。储水工程设施的容积根据集流面积和年降水量以及作物需水量来定，一般采用胶泥防渗和混凝土防渗。定西地区水保所测定，用红胶泥水窖年损 9.35 m^3 ，保存率为75.4%，投资少，贮水成本 $0.23\text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ ，但寿命短。混凝土薄壳水窖，年损 1.08 m^3 ，保存率为97.1%，随一次投资高，但寿命长，贮水成本 $0.41\text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ 。

(3) 雨水高效集约利用技术 雨水高效利用是一项复杂的系统工程，主要包括输水方法、节水灌溉方式、节水灌溉制度及先进的集水农业技术4个方面：

①为了提高输水的利用率，现采用管道输水，其输水利用率可达到97%~99%，比土渠输水节水35%左右，比硬化渠道节水5%~15%。

②节水灌溉方式是雨水资源利用的最重要环节。主要有喷灌、滴灌、地下滴灌、

微喷灌、雾灌、渗灌、管灌等几种形式。以上几种节水灌溉方式，结合冬小麦作物特点，采用喷灌比较合理。喷灌是利用加压设备或利用高处水源的自然水头，将水流通过管道，经过喷头喷射到空中并散成水滴来进行灌溉的。喷灌分为固定式、半固定式和移动式。喷灌有灌水均匀（均匀度 $0.8\sim0.9$ ），自动化程度高，可以控制灌水量，不宜产生深层渗漏和地面径流，不破坏土壤结构，可调节田间小气候等优点，具有明显的增产效果。据测定：喷灌水资源利用系数可达 $0.72\sim0.93$ ，可以使雨水得到高效利用，但喷灌的投入比较高，只能在经济比较发达的地区推广。

③按照冬小麦需水规律，应用水对作物生产力影响的研究成果，确定每种作物最佳灌溉时期、灌溉定额等，制定科学合理的节水灌溉制度，使有限的雨水资源用于作物生长最关键时期，达到对雨水资源的最有效利用。

④应用保水剂、抗旱剂为作物集水。可减少冬小麦灌水量，促进作物增产。

4.3.2 夏玉米雨水利用方式

玉米也是保定市的主要粮食作物，种植面积仅少于小麦的播种面积，由于玉米生育期正处在保定市降水较多的6~9月份，所以，丰水年其降雨量能够充分满足作物的需水要求。在平水年出现轻微的缺水，在枯水年夏玉米出现缺水量达到120mm。

播种-成熟，由于玉米是高秆稀植作物，遮盖较小麦低，生育期的温度比较高，因此有较强的棵间蒸发。对于丰水年，可采用黑色覆盖技术。采用黑色覆盖技术时，除可以干草、枯草等植物残余以及各种物质燃烧后的灰分、畜禽粪便沤制的厩肥外，要充分利用冬小麦的秸秆，这样不仅可以为冬小麦的生长提供水份，又可以秸秆还田，保护环境。对于平水年的抽穗-成熟阶段和枯水年整个生育期，除了采用被动雨水利用方式外，有必要采用主动利用方式。因为保定市的种植方式是，冬小麦和夏玉米轮作，集流面、储水设施和灌溉设备可以通用。

4.3.3 棉花雨水利用方式

棉花是保定市的主要经济作物，种植面积占有相当大的比重。据统计，2000年，保定市的棉花种植面积达 $787km^2$ ，在我市水资源严重不足的条件下，棉花需水量占有举足轻重的地位。棉花生育期开花-吐絮阶段是整个生长期需水最大的阶段，占需水量的51.3%，且处在保定市降水最多的7~9月份，因而，做好棉花生育期的雨水利用，对缓解保定市农业用水意义重大。结合棉花生长特点和较高的经济价值，根据不同的水文年，采取不同的雨水利用形式。

播种前，首先应采用雨水利用方式为起垄耕作技术。起垄耕作技术是在作物行距间起垄，使垄上的降水顺坡流入作物的耕作层中，来满足作物需水量的不足。

微喷灌、雾灌、渗灌、管灌等几种形式。以上几种节水灌溉方式，结合冬小麦作物特点，采用喷灌比较合理。喷灌是利用加压设备或利用高处水源的自然水头，将水流通过管道，经过喷头喷射到空中并散成水滴来进行灌溉的。喷灌分为固定式、半固定式和移动式。喷灌有灌水均匀（均匀度 $0.8\sim0.9$ ），自动化程度高，可以控制灌水量，不宜产生深层渗漏和地面径流，不破坏土壤结构，可调节田间小气候等优点，具有明显的增产效果。据测定：喷灌水资源利用系数可达 $0.72\sim0.93$ ，可以使雨水得到高效利用，但喷灌的投入比较高，只能在经济比较发达的地区推广。

③按照冬小麦需水规律，应用水对作物生产力影响的研究成果，确定每种作物最佳灌溉时期、灌溉定额等，制定科学合理的节水灌溉制度，使有限的雨水资源用于作物生长最关键时期，达到对雨水资源的最有效利用。

④应用保水剂、抗旱剂为作物集水。可减少冬小麦灌水量，促进作物增产。

4.3.2 夏玉米雨水利用方式

玉米也是保定市的主要粮食作物，种植面积仅少于小麦的播种面积，由于玉米生育期正处在保定市降水较多的6~9月份，所以，丰水年其降雨量能够充分满足作物的需水要求。在平水年出现轻微的缺水，在枯水年夏玉米出现缺水量达到120mm。

播种-成熟，由于玉米是高秆稀植作物，遮盖较小麦低，生育期的温度比较高，因此有较强的棵间蒸发。对于丰水年，可采用黑色覆盖技术。采用黑色覆盖技术时，除可以干草、枯草等植物残余以及各种物质燃烧后的灰分、畜禽粪便沤制的厩肥外，要充分利用冬小麦的秸秆，这样不仅可以为冬小麦的生长提供水份，又可以秸秆还田，保护环境。对于平水年的抽穗-成熟阶段和枯水年整个生育期，除了采用被动雨水利用方式外，有必要采用主动利用方式。因为保定市的种植方式是，冬小麦和夏玉米轮作，集流面、储水设施和灌溉设备可以通用。

4.3.3 棉花雨水利用方式

棉花是保定市的主要经济作物，种植面积占有相当大的比重。据统计，2000年，保定市的棉花种植面积达 $787km^2$ ，在我市水资源严重不足的条件下，棉花需水量占有举足轻重的地位。棉花生育期开花-吐絮阶段是整个生长期需水最大的阶段，占需水量的51.3%，且处在保定市降水最多的7~9月份，因而，做好棉花生育期的雨水利用，对缓解保定市农业用水意义重大。结合棉花生长特点和较高的经济价值，根据不同的水文年，采取不同的雨水利用形式。

播种前，首先应采用雨水利用方式为起垄耕作技术。起垄耕作技术是在作物行距间起垄，使垄上的降水顺坡流入作物的耕作层中，来满足作物需水量的不足。

微喷灌、雾灌、渗灌、管灌等几种形式。以上几种节水灌溉方式，结合冬小麦作物特点，采用喷灌比较合理。喷灌是利用加压设备或利用高处水源的自然水头，将水流通过管道，经过喷头喷射到空中并散成水滴来进行灌溉的。喷灌分为固定式、半固定式和移动式。喷灌有灌水均匀（均匀度 $0.8\sim0.9$ ），自动化程度高，可以控制灌水量，不宜产生深层渗漏和地面径流，不破坏土壤结构，可调节田间小气候等优点，具有明显的增产效果。据测定：喷灌水资源利用系数可达 $0.72\sim0.93$ ，可以使雨水得到高效利用，但喷灌的投入比较高，只能在经济比较发达的地区推广。

③按照冬小麦需水规律，应用水对作物生产力影响的研究成果，确定每种作物最佳灌溉时期、灌溉定额等，制定科学合理的节水灌溉制度，使有限的雨水资源用于作物生长最关键时期，达到对雨水资源的最有效利用。

④应用保水剂、抗旱剂为作物集水。可减少冬小麦灌水量，促进作物增产。

4.3.2 夏玉米雨水利用方式

玉米也是保定市的主要粮食作物，种植面积仅少于小麦的播种面积，由于玉米生育期正处在保定市降水较多的6~9月份，所以，丰水年其降雨量能够充分满足作物的需水要求。在平水年出现轻微的缺水，在枯水年夏玉米出现缺水量达到120mm。

播种-成熟，由于玉米是高秆稀植作物，遮盖较小麦低，生育期的温度比较高，因此有较强的棵间蒸发。对于丰水年，可采用黑色覆盖技术。采用黑色覆盖技术时，除可以干草、枯草等植物残余以及各种物质燃烧后的灰分、畜禽粪便沤制的厩肥外，要充分利用冬小麦的秸秆，这样不仅可以为冬小麦的生长提供水份，又可以秸秆还田，保护环境。对于平水年的抽穗-成熟阶段和枯水年整个生育期，除了采用被动雨水利用方式外，有必要采用主动利用方式。因为保定市的种植方式是，冬小麦和夏玉米轮作，集流面、储水设施和灌溉设备可以通用。

4.3.3 棉花雨水利用方式

棉花是保定市的主要经济作物，种植面积占有相当大的比重。据统计，2000年，保定市的棉花种植面积达 $787km^2$ ，在我市水资源严重不足的条件下，棉花需水量占有举足轻重的地位。棉花生育期开花-吐絮阶段是整个生长期需水最大的阶段，占需水量的51.3%，且处在保定市降水最多的7~9月份，因而，做好棉花生育期的雨水利用，对缓解保定市农业用水意义重大。结合棉花生长特点和较高的经济价值，根据不同的水文年，采取不同的雨水利用形式。

播种前，首先应采用雨水利用方式为起垄耕作技术。起垄耕作技术是在作物行距间起垄，使垄上的降水顺坡流入作物的耕作层中，来满足作物需水量的不足。

播种-现蕾阶段，叶面积系数小，无效蒸发比例大，需通过覆盖抑制蒸发的措施来抑制棵间的无效蒸发。其中，白色覆盖技术是首选的雨水利用形式。用工业生产的塑料薄膜覆盖地面，其透光性好、导热性差和不透气等特性，改善土壤生态环境，既提高种子的出芽率，又提高水分利用率。据陈国良等研究表明：黄土高原地区的半干旱区的春麦地，采用塑料薄膜覆盖可减少土壤蒸发 30.8mm，提高表土(0~20cm)水分 10~12mm^[43]。其次选用化学覆盖技术。化学覆盖是利用化学方法，施用在土面后，形成一种连续性薄膜，切断土壤毛细管，阻止土壤水分通过，抑制水分蒸发，提高水分利用率。这种技术使用于经济发达的地区。

开花-吐絮：此阶段是棉花需水临界期，必须保证此阶段的供水量，采用雨水利用的主动方式。即雨水富集叠加利用技术。利用此技术时，根据棉花的自身特点，在节水灌溉方式上，可以选用喷灌技术，使收集到的有限雨水高效利用。

棉花雨水利用措施中，应注意的问题是当采用白色覆盖时需要在作物根部必须留有一定的渗水孔，这样才能使雨水渗入作物耕作层供作物利用。

4.4 保定市山区雨水利用措施

保定市山区面积为 10869km²，占保定市总面积的 49%。一方面，保定市山区人均占有土地面积大，集流场空闲较多，便于集蓄雨水；荒山荒坡面积大，是收集雨水的理想场地；针对保定市山区的特点，最好采用主动利用方式即雨水富集叠加利用措施，此技术在平原区冬小麦雨水利用方式中已做过详细介绍。另一方面，保定市山区为暴雨集中地区，易发生洪水暴发和泥石流等地质灾害，水土流失严重，对农作物的生长极为不利。针对这种情况，应对保定市山区耕作区采用以下雨水利用技术：

(1) 水保工程技术。通过水平梯田、隔坡梯田、水平沟、鱼鳞坑等，对地面进行较大的工程处理，以改变原有的地形特征，使降雨就地集中拦蓄入渗，提高雨水利用率。在坡度较大的地方，可修建梯田。修建梯田是半干旱丘陵区变跑水、跑土、跑肥的三跑田为保水、保土、保肥的三保田的重要措施。梯田分为水平梯田、坡式梯田和隔坡梯田。根据陕西省绥德县韭园沟对特大暴雨时的实测调查，梯田比农耕地减少的冲刷量，水平梯田为 98.5%、隔坡梯田为 50%、坡式梯田为 24.6%，可见保持水土能力以水平梯田最高。

(2) 水保耕作技术①等高耕作，是在斜坡上沿等高线方向耕种，使坡地形成许多等高犁沟。据天水保试验站观测，等高耕作可拦蓄径流 19.2%~39%，减少冲刷 31.2%~67%。②起垄耕作，是先在坡地下面沿等高线耕一犁，接着在犁沟内施肥播

播种-现蕾阶段，叶面积系数小，无效蒸发比例大，需通过覆盖抑制蒸发的措施来抑制棵间的无效蒸发。其中，白色覆盖技术是首选的雨水利用形式。用工业生产的塑料薄膜覆盖地面，其透光性好、导热性差和不透气等特性，改善土壤生态环境，既提高种子的出芽率，又提高水分利用率。据陈国良等研究表明：黄土高原地区的半干旱区的春麦地，采用塑料薄膜覆盖可减少土壤蒸发 30.8mm，提高表土(0~20cm)水分 10~12mm^[43]。其次选用化学覆盖技术。化学覆盖是利用化学方法，施用在土面后，形成一种连续性薄膜，切断土壤毛细管，阻止土壤水分通过，抑制水分蒸发，提高水分利用率。这种技术使用于经济发达的地区。

开花-吐絮：此阶段是棉花需水临界期，必须保证此阶段的供水量，采用雨水利用的主动方式。即雨水富集叠加利用技术。利用此技术时，根据棉花的自身特点，在节水灌溉方式上，可以选用喷灌技术，使收集到的有限雨水高效利用。

棉花雨水利用措施中，应注意的问题是当采用白色覆盖时需要在作物根部必须留有一定的渗水孔，这样才能使雨水渗入作物耕作层供作物利用。

4.4 保定市山区雨水利用措施

保定市山区面积为 10869km²，占保定市总面积的 49%。一方面，保定市山区人均占有土地面积大，集流场空闲较多，便于集蓄雨水；荒山荒坡面积大，是收集雨水的理想场地；针对保定市山区的特点，最好采用主动利用方式即雨水富集叠加利用措施，此技术在平原区冬小麦雨水利用方式中已做过详细介绍。另一方面，保定市山区为暴雨集中地区，易发生洪水暴发和泥石流等地质灾害，水土流失严重，对农作物的生长极为不利。针对这种情况，应对保定市山区耕作区采用以下雨水利用技术：

(1) 水保工程技术。通过水平梯田、隔坡梯田、水平沟、鱼鳞坑等，对地面进行较大的工程处理，以改变原有的地形特征，使降雨就地集中拦蓄入渗，提高雨水利用率。在坡度较大的地方，可修建梯田。修建梯田是半干旱丘陵区变跑水、跑土、跑肥的三跑田为保水、保土、保肥的三保田的重要措施。梯田分为水平梯田、坡式梯田和隔坡梯田。根据陕西省绥德县韭园沟对特大暴雨时的实测调查，梯田比农耕地减少的冲刷量，水平梯田为 98.5%、隔坡梯田为 50%、坡式梯田为 24.6%，可见保持水土能力以水平梯田最高。

(2) 水保耕作技术①等高耕作，是在斜坡上沿等高线方向耕种，使坡地形成许多等高犁沟。据天水保试验站观测，等高耕作可拦蓄径流 19.2%~39%，减少冲刷 31.2%~67%。②起垄耕作，是先在坡地下面沿等高线耕一犁，接着在犁沟内施肥播

种，再在下面浅犁一道，覆土盖种，空一犁后，依次重复进行。这样使坡地表面沟垄相间。为防止所拦的横向水流冲毁垄台，在沟内每隔 1~2m 做一个略低于垄的土档，隔成的小区即垄作区田。据天水保试验站观测定可拦蓄径流 71%~98%，可减少径流 60.8%，减少土壤流失 84%~99%，增产 10%~25%。③粮草轮作，是在轮歇地上种植豆科牧草，一方面覆盖休闲地，减少雨水流失，另一方面又增加土壤有机质和氮素，恢复地力，待牧草一个生长周期结束后，改为粮食作物。据天水、隴县等水保试验站测定，减少土壤流失 65%~68%，增产 30%~100%。④带状间作，是在坡耕地上沿等高线耕作，种植时密生作物与疏生作物、高杆作物与低杆作物，农作物与牧草成带状交互间种。据隴县等水保试验站测定可拦蓄径流 60.5%，减少冲刷 65.7%，增产 50%~100%。⑤渗水孔耕作，是用 20cm 的孔钻在坡地上垂直打钻 70cm 深的渗水孔，并以渗水孔为圆心聚垄两道 15cm 高的导流埂，形成一个扇形集流面，把雨水径流集蓄于渗水孔为作物利用。每 hm^2 地以打钻 3000 个渗水孔为宜。据定西地区水保研究所试验，可减少径流 70.51%，减少泥沙 84.68%，增产 64.40%，水分利用效率提高 111.885%。⑥蓄水聚肥耕作，是把阴土上捻、阳土回填，经水平深翻后，在沟内种植农作物，土垄上种植豆科绿肥。据试验可减少径流 88.9%~92.5%，减少土壤流失 95.2%~99.8%，增产 40%~100%。

4.5 采用雨水利用技术应注意的问题

雨水利用是一个复杂的系统工程，因而应该从全方位的角度去考虑，进而采取最佳的方案措施。因为每项雨水利用技术均有各自的适用范围和使用条件，而且受到自然地理条件和社会经济条件、国家法律法规的影响和制约。

1 雨水利用，要因地制宜

雨水利用在我国尤其是在水资源矛盾日益突出的河北省更具有生命力，一种适合当地农业生产特点的雨水利用方式，对提高产量，保持当地的农业可持续发展具有举足轻重的地位。但发展雨水利用技术，要根据当地的自然地理特点、社会经济发展水平、农民的文化素质、经济承受能力以及水资源紧缺程度等条件来定。目前，雨水利用方式很多，如覆盖抑制蒸发利用，它包括白色覆盖技术、黑色覆盖技术、化学覆盖技术等。黑色覆盖技术中用秸秆覆盖在冬小麦、夏玉米地等水分利用率提高 15.3%~57.6%，即节水效果是很显著的，而且不需要增加多大的投资，群众易于接受，可大面积推广；白色覆盖技术是随着塑料工业的发展而发展起来的，它具有透光性好、导热性差和不透气等优点，但投资较大，白色覆盖较适合在地势平坦的地区用于蔬菜、瓜果等经济价值较高的作物。总之，采用雨水利用方式，不仅要坚

种，再在下面浅犁一道，覆土盖种，空一犁后，依次重复进行。这样使坡地表面沟垄相间。为防止所拦的横向水流冲毁垄台，在沟内每隔 1~2m 做一个略低于垄的土档，隔成的小区即垄作区田。据天水保试验站观测定可拦蓄径流 71%~98%，可减少径流 60.8%，减少土壤流失 84%~99%，增产 10%~25%。③粮草轮作，是在轮歇地上种植豆科牧草，一方面覆盖休闲地，减少雨水流失，另一方面又增加土壤有机质和氮素，恢复地力，待牧草一个生长周期结束后，改为粮食作物。据天水、隴县等水保试验站测定，减少土壤流失 65%~68%，增产 30%~100%。④带状间作，是在坡耕地上沿等高线耕作，种植时密生作物与疏生作物、高杆作物与低杆作物，农作物与牧草成带状交互间种。据隴县等水保试验站测定可拦蓄径流 60.5%，减少冲刷 65.7%，增产 50%~100%。⑤渗水孔耕作，是用 20cm 的孔钻在坡地上垂直打钻 70cm 深的渗水孔，并以渗水孔为圆心聚垄两道 15cm 高的导流埂，形成一个扇形集流面，把雨水径流集蓄于渗水孔为作物利用。每 hm^2 地以打钻 3000 个渗水孔为宜。据定西地区水保研究所试验，可减少径流 70.51%，减少泥沙 84.68%，增产 64.40%，水分利用效率提高 111.885%。⑥蓄水聚肥耕作，是把阴土上捻、阳土回填，经水平深翻后，在沟内种植农作物，土垄上种植豆科绿肥。据试验可减少径流 88.9%~92.5%，减少土壤流失 95.2%~99.8%，增产 40%~100%。

4.5 采用雨水利用技术应注意的问题

雨水利用是一个复杂的系统工程，因而应该从全方位的角度去考虑，进而采取最佳的方案措施。因为每项雨水利用技术均有各自的适用范围和使用条件，而且受到自然地理条件和社会经济条件、国家法律法规的影响和制约。

1 雨水利用，要因地制宜

雨水利用在我国尤其是在水资源矛盾日益突出的河北省更具有生命力，一种适合当地农业生产特点的雨水利用方式，对提高产量，保持当地的农业可持续发展具有举足轻重的地位。但发展雨水利用技术，要根据当地的自然地理特点、社会经济发展水平、农民的文化素质、经济承受能力以及水资源紧缺程度等条件来定。目前，雨水利用方式很多，如覆盖抑制蒸发利用，它包括白色覆盖技术、黑色覆盖技术、化学覆盖技术等。黑色覆盖技术中用秸秆覆盖在冬小麦、夏玉米地等水分利用率提高 15.3%~57.6%，即节水效果是很显著的，而且不需要增加多大的投资，群众易于接受，可大面积推广；白色覆盖技术是随着塑料工业的发展而发展起来的，它具有透光性好、导热性差和不透气等优点，但投资较大，白色覆盖较适合在地势平坦的地区用于蔬菜、瓜果等经济价值较高的作物。总之，采用雨水利用方式，不仅要坚

3 持高标准、高起点、高质量，还要讲求经济效益和实际效果，要因地制宜，合理确定雨水利用发展技术方案，走出一条具有当地特色的雨水利用模式。

2 雨水利用，要注重效益

雨水利用的目的是提高水分的利用效率。一种适用于当地的雨水利用模式，不应仅仅是体现在充分利用雨水上，而且还要体现在让农民得以实实在在的增收上，农业的增产增效最终目的是农民增收。雨水利用要在市场经济条件下健康发展，就必须按着价值规律办事，以效益促发展雨水利用，以雨水利用增效益，探索一条雨水产业化的路子。

3 雨水利用，要理论联系实际

雨水利用的发展，离不开广大科研人员辛勤劳动的成果，科研成果转化成生产力，就必然会带动雨水利用技术的发展。目前，我国农业市场由于农业收入还很低，而且远不成熟，加上用于雨水利用的建设投入总体水平较低，一些科研成果不可能一下子推广到整个农业市场，只能在部分地区或示范区里进行示范，因而要加快科学技术转化问题，要结合我市当前农村生产力水平，把就地拦蓄入渗利用、覆盖抑制蒸发利用、雨水富集叠加利用技术有机结合起来，研究符合国情民情的雨水利用技术，研制不同地区不同作物具有不同特色的高效节水器材，使雨水利用需要研究解决的问题在生产实际中用高新的节水技术得到解决，直到雨水利用的发展，反之，雨水利用发展能促进高新节水技术的进一步完善和提高，两者相辅相成，相得益彰。

4 雨水利用，要抓好素质教育

发展雨水利用，最终离不开“人”这一生产要素，因此人的素质高低直接影响到雨水利用的发展水平。首先县、乡两级水利技术人员素质。对于占主导产业的农业，离不开水利这一基础产业，也离不开基层的水利专业人才，因此在提高现有技术人才再教育的同时，关键是国家要采取一些鼓励政策发展相关专业的高中等教育，克服因基层水利工作环境差，收入待遇低而招生分配难的问题；其次，对农民进行雨水利用知识培训和水患意识教育，因为农民是直接的执行者，要引导农民针对不同作物在不同生育期适时适量进行补灌，实现由粗放用水向集约节水转变。另外，有些基层领导对如何因地制宜的大面积推广雨水利用模式，宣传发展雨水利用对农业的意义及农民进行技术培训重视不够，甚至自己就没有水危机意识。

5 雨水利用，要建立科学高效的资产运营机制

发展雨水利用，需要建立一整套新的雨水高效利用的管理机制和运行机制，它包括建设与管理、投入与运营等方面。雨水利用工程实行统一规划设计、服务、从

设计安装、使用维修到灌溉管理实行一条龙服务；以市场手段探索多种资金筹措形势和资产运营机制。

5 结论

通过对保定市降水量分析、主要农作物需水量和降水量的供求关系分析、及保定市雨水资源利用方案措施的制定，现结论如下：

1 本文选取保定市（1956-2000）45年降水资料系列，来分析保定市雨水资源，即具有代表性，又具有可靠性。

2 本文在分析保定市降水量的基础上，得出了保定市降水量年内、年际的详细变化规律：保定市降水量年际间变化大，年最高降水量是年最低降水量的3.2倍，年变差系数为0.3；同一年内分配不均，降水量主要集中在6-9月，降水量占年降水量的81%；保定市降水量年际间变化大，丰水年和枯水年交替发生，70年代以前以丰水年段为主；70年代到80年代前期降水量丰枯交替频繁，总的接近于枯水年段；80年代后期至今以枯水年段为主，并且得出了总体上保定市降水量减少是保定市水资源补给量不足的原因之一。

3 本文探索性的分析了保定市历年的种植结构变化、粮食产量与自然降水量的关系，得出了保定市农业用水量不断增加是保定市水环境恶化的主要原因之一。进一步分析保定市平原区主要农作物生育期的降水量，在以往研究冬小麦、夏玉米和棉花的需水规律的基础上，计算出了保定市平原主要农作物生育期、不同生育阶段在不同水文年（丰水年、平水年和干旱年）的缺水量。通过对典型年实测资料的分析，指出了不同作物对雨水资源的生产效率及其影响因素。

4 本文在以上分析的基础上，根据由缺水量等级所决定的雨水利用方案技术思路，因地制宜的提出了保定市的雨水利用具体措施：保定市平原区以覆盖抑制蒸发利用和雨水富集叠加利用为主的雨水资源高效利用措施，保定山区以就地拦蓄入渗利用和雨水富集叠加利用为主的雨水资源高效利用措施。

5 本文对保定市雨水资源和雨水资源的应用进行研究，不仅对于缓解保定市水资源供求矛盾、改善保定市已经恶化的水环境、实现保定市农业可持续发展具有现实意义，而且对于缓解河北省水资源的供求矛盾，促进河北省的农业生产可持续发展具有重要意义。

6 本文应进一步详细分析保定山区的降水量，针对山区的作物（如果树、草）进行需水量分析和缺水量分析，进而制定出山区作物雨水利用具体措施方案。

设计安装、使用维修到灌溉管理实行一条龙服务；以市场手段探索多种资金筹措形势和资产运营机制。

5 结论

通过对保定市降水量分析、主要农作物需水量和降水量的供求关系分析、及保定市雨水资源利用方案措施的制定，现结论如下：

1 本文选取保定市（1956-2000）45年降水资料系列，来分析保定市雨水资源，即具有代表性，又具有可靠性。

2 本文在分析保定市降水量的基础上，得出了保定市降水量年内、年际的详细变化规律：保定市降水量年际间变化大，年最高降水量是年最低降水量的3.2倍，年变差系数为0.3；同一年内分配不均，降水量主要集中在6-9月，降水量占年降水量的81%；保定市降水量年际间变化大，丰水年和枯水年交替发生，70年代以前以丰水年段为主；70年代到80年代前期降水量丰枯交替频繁，总的接近于枯水年段；80年代后期至今以枯水年段为主，并且得出了总体上保定市降水量减少是保定市水资源补给量不足的原因之一。

3 本文探索性的分析了保定市历年的种植结构变化、粮食产量与自然降水量的关系，得出了保定市农业用水量不断增加是保定市水环境恶化的主要原因之一。进一步分析保定市平原区主要农作物生育期的降水量，在以往研究冬小麦、夏玉米和棉花的需水规律的基础上，计算出了保定市平原主要农作物生育期、不同生育阶段在不同水文年（丰水年、平水年和干旱年）的缺水量。通过对典型年实测资料的分析，指出了不同作物对雨水资源的生产效率及其影响因素。

4 本文在以上分析的基础上，根据由缺水量等级所决定的雨水利用方案技术思路，因地制宜的提出了保定市的雨水利用具体措施：保定市平原区以覆盖抑制蒸发利用和雨水富集叠加利用为主的雨水资源高效利用措施，保定山区以就地拦蓄入渗利用和雨水富集叠加利用为主的雨水资源高效利用措施。

5 本文对保定市雨水资源和雨水资源的应用进行研究，不仅对于缓解保定市水资源供求矛盾、改善保定市已经恶化的水环境、实现保定市农业可持续发展具有现实意义，而且对于缓解河北省水资源的供求矛盾，促进河北省的农业生产可持续发展具有重要意义。

6 本文应进一步详细分析保定山区的降水量，针对山区的作物（如果树、草）进行需水量分析和缺水量分析，进而制定出山区作物雨水利用具体措施方案。

参考文献

- [1]陈传友, 王春元等编著. 水资源与可持续发展[M].北京: 中国科学技术出版社 1999 .
- [2]胡毓骐, 李英能等编著. 华北地区节水型农业技术[M].北京: 中国农业科技出版社, 1995.
- [3]刘昌明, 何希吾等编著. 中国 21 世纪水问题研究[M].北京: 科学出版社, 1996 .
- [4]上官周平, 邵明安. 21 世纪农业高效用水技术展望[J].农业工程学报, 1999, (3) :7~21.
- [5]水利电力部水文局, 中国水资源评价.北京水利电力出版社, 1987.
- [6]石元春, 刘昌明, 龚元石主编. 节水农业应用基础研究进展[M].北京: 中国农业出版社, 1995.
- [7]陈家琦, 刘昌明. 水与可持续发展[J].水科学进展, 1997, (12) :377~384.
- [8]河北省水资源状况分析报告.1999,12.
- [9]王流权. 南水北调中线工程是解决河北省水资源危机的根本措施[J].河北水利水电技术, 1996, (3) :8~10.
- [10]绳莉丽, 安秀荣, 赵敏涛. 河北省雨水资源开发利用方式与途径的初步探讨[J]. 海河水利, 2003 (1): 23~25.
- [11]朱显谟. 再论黄土高原国土整治“28 字方略”, [J].土壤侵蚀与水土保持学报 1998 (4): 20~23.
- [12]张信宝 安芷生 . 减少地面蒸发, 充分利用降水资源, [J].水土保持通报, 1997, 17 (1) 57~62.
- [13]刘小勇, 吴普特 . 雨水资源集蓄利用研究综述, [J].自然资源学报, 2000, 15 (2): 189~193 .
- [14]任杨俊, 李建牢, 赵俊侠. 国内外雨水资源利用研究综述[J].水土保持学报, 2000, 14 (1): 88~92.
- [15]崔灵周, 魏丙臣, 李占斌等. 黄土高原地区雨水集蓄利用技术发展评述[J].灌溉排水, 2000, (4): 75~78.
- [16]朱兴平, 王永红. 雨水利用的理论与实践[J].水土保持通报, 1997, 17 (4): 32~36.
- [17]齐广平. 几种常见的人工集流场的应用现状及存在问题分析[J].甘肃农业科技, 2000 (2): 27~29.
- [18]沈红鹰, 贺永生. 浅谈内蒙古干旱半干旱山丘区雨水利用技术[J].内蒙古水利, 2000, (4): 25~28.
- [19]王健, 朱兴平. 半干旱区雨水资源高效利用技术研究[J].中国水土保持, 1996 (7): 32~35.
- [20]康绍忠, 马孝义. 立足国情, 积极发展节水农业.科技导报, 1999, (7) .
- [21]程伍群. 河北平原水资源及水环境状况调查研究[J].海河水利, 2001 增刊: 64~67.
- [22]雨水利用. 21 世纪水资源开发方向. 中国科学报, 1995,07-07.
- [23]赵松岭. 集水农业引论. [M].西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
- [24]张国祥 尉永平 冯民权. 耕地集雨就地灌溉[J].农业工程学报, 1997 (3): 84~88.
- [25]叶守泽. 水文水利计算. [M]北京: 水利水电出版社, 1991 .
- [26]沈振荣, 张瑜芳, 杨诗秀等. 水资源科学试验与研究[M].北京: 中国科学技术出版社 1992 .
- [27]样金深, 孙丽敏. 河北省 1949~1998 年种植制度演变分析,[J] 华北农学报 2000, 15 (4): 126~130.

- [28] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京: 中国水利水电出版社 1997, 29~53.
- [29] 简毓峰. 庆阳地区旱作冬小麦生产与降水有效利用分析[J]. 甘肃农业科技, 2000, (4): 22~24.
- [30] 张正斌, 山仑, 王德轩. 降水因子与小麦产量最优回归模型的探讨[J]. 水土保持通报, 1996, 16 (4): 31~34.
- [31] 龙牧华, 陈阜. 半干旱地区春小麦产量与自然降水关系[J]. 干旱地区农业研究 1996, 14 (3): 91~95.
- [32] 华佑亭, 李会昌, 华杰. 河北省冬小麦需水量的试验研究与缺水量的计算[J]. 海河科技, 1985, (1): 70~88.
- [33] 华佑亭, 李会昌. 河北省夏玉米需水量的试验研究与缺水量的计算[J]. 海河科技, 1988 (3) 45~60.
- [34] 华佑亭, 李会昌. 河北省棉花需水量的试验研究与缺水量的计算[J]. 海河科技, 1989 (2) 37~47.
- [35] 陈玉民, 郭国双, 王广兴等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.
- [36] 钟兆站, 赵聚宝, 郁小川等. 中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析[J]. 中国农业气象, 2000, 24 (2): 1~4.
- [37] 谢礼贵, 李会昌. 主要农作物的节水灌溉制度及其应用推广[J]. 水利水电技术 1992, (5): 54~60.
- [38] 王文元. 雨水利用、微灌技术与庭院经济[J]. 节水灌溉, 1997, (2): 13~15.
- [39] 范逢源. 试论河北省水环境与水利可持续发展[J]. 河北水利水电技术, 1999, (4): 11~12.
- [40] 程伍群, 郭志宏. 河北省农用水资源可持续利用若干问题的讨论[J]. 农业工程学报, 2001, 17 (4): 34~38.
- [41] CHENG WU-QUN, AN XIU-RONG, LI TIE-WANG, et al. The preliminary study of water environment in Hebei Plain [J]. 河北农业大学学报, 2002, 25 (3): 110~116.
- [42] 张祖新. 我国北方雨水集蓄与节水灌溉技术[J]. 节水灌溉, 2000, (3): 13~14.
- [43] 陈国良, 徐学选. 黄土高原地区的雨水利用技术和发展[J]. 水土保持通报, 1995, 15 (5): 6~9.
- [44] 贾大林, 姜文来. 试论提高农业用水效率[J]. 节水灌溉, 2000 (5): 18~21.
- [45] 王文龙, 穆兴民. 黄土高原雨水资源化与农业持续发展[J]. 水土保持通报, 1998, 18 (1): 59~62.
- [46] 黄占斌, 山仑, 张岁岐等. 雨水利用与水土保持和农业持续发展[J]. 水土保持通报, 1997, 17 (1): 54~56.
- [47] 郑宝宿. 甘肃省雨水资源化利用与旱地农业发展[J]. 中国水土保持 SWCC, 1997, (9): 1~4.
- [48] 李发东, 李隆海, 张秋英等. 我国农业水资源可持续利用面临的问题和对策[J]. 节水灌溉, 2001, (4): 1~3.
- [49] 董玉云. 唐河灌区水资源优化调度[D]. 河北农业大学硕士学位(毕业)论文, 2002, 6, 23~25.
- [50] 刘昌明, 牟海省. 雨水资源以及在农业生态中的应用[J]. 生态农业研究, 1993, 1 (3): 20~26.
- [51] 何久安. 干旱地区雨水利用及发展方向[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3): 85~88.
- [52] 刘昌明, 有懋正. 南水北调与华北平原农业可持续发展[J]. 生态农业研究, 1993, 1 (1): 45~50.
- [53] 张正斌, 黄占斌, 山仑. 雨水资源合理利用及其宏观调控生态农业研究, 1999, 19 (2): 52~

56.

- [54] 刘昌明. 论雨水利用及其农业供水的意义[J]. 生态农业研究, 1996, 4 (4): 9~12.
- [55] 马孝义, 娄宗科, 李援农等. 陕西省集雨节灌工程发展模式与对策[J]. 水土保持通报, 2000, 20 (5): 42~45.
- [56] 姚建民, 张宝林, 殷海善. 渗水地膜利用旱地小雨量资源研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18 (3): 24~29.
- [57] 山西省. 水资源开发利用的进展及趋势[J]. 水文, 1994, (1): 57~60.
- [58] 樊廷录, 宋尚有, 罗俊杰等. 陇东旱塬集雨节灌农业技术研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16 (1): 18~23.
- [59] 迟久鉴, 赵和玉. “丰产沟”有效利用雨水的机理[J]. 农业工程学报, 1996, 12 (1): 30~34.
- [60] 张光辉, 陈致汉. 雨水集流用水窖的主要类型以其效益[J]. 水土保持通报, 1997, 17 (6): 58~60.
- [61] 朱光. 我国北方旱农生产技术的发展与降水资源产业化开发的途径[J]. 甘肃农业科技, 1997 (10): 2~5.
- [62] 司宗信, 王月梅. 旱作农业技术发展与降水资源开发途径[J]. 土壤肥料, 1999 (5): 36~38.
- [63] 韩靖国. 旱区降水资源全方位开发的技术方略[J]. 甘肃农业科技, 1998, (10): 48~50.
- [64] 张希彪, 上官周平. 黄土高原粮食生产潜势及可持续发展途径探讨[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20 (1), 102~106.
- [65] 段喜明, 王治国, 胡振华. 晋西黄土残塬区旱井集雨技术研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5 (3).
- [66] 张富. 集流节灌是雨养农业持续发展的主要支柱[J]. 中国水土保 SWCC, 1997, (2): 25~28.
- [67] 山西省, 刘昌明. 雨水资源与雨水资源的评价[J]. 资源开发和保护, 1993, 9 (3): 163~165.
- [68] 卢增兰, 钮溥. 加强雨养农业建设, 促进旱区农业发展[J]. 干旱地区农业研究, 1996, 14 (4): 79~82.
- [69] 杜延珍. 集雨接灌在干旱地区水土保持中的作用[J]. 甘肃水利水电技术, 1998, (4): 68~69.
- [70] 高世铭, 朱润身. 旱农研究进展及集水高效农业的发展[J]. 甘肃农业科技, 1998, (10): 45~47.
- [71] 刘广才. 水保型农业与集雨农业的有机结合是发展旱作农业的根本途径[J]. 甘肃农业科技, 2001, (11): 24~25.
- [72] 李秧秧, 黄占斌. 节水农业中化控技术的应用研究[J]. 节水灌溉, 2001, (3): 4~6.
- [73] 王慧清, 郭中小, 张炜等. 水资源及其可持续利用问题的研究[J]. 内蒙古水利, 2001, (1): 45~47.
- [74] 许一飞. 对节水农业的新认识[J]. 节水灌溉, 2000, (2): 13~15.
- [75] 李援农, 刘惹梅, 尚碧云等. 降雨聚集与水的高效利用研究[J]. 西北水资源雨水工程, 1999, 10 (3): 14~17.
- [76] 贾大林. 发展节水农业的若干问题[J]. 水利发展研究, 2001 (1): 9~12.
- [77] Srivastava R C. Methodology for design of water harvesting system for high rainfall areas[J]. Agricultural Water Management, 2001, 47(1): 37~53.

- [78]Xiao-Yan Li,Jia-Dong Gong,Qian-Zhao Gao,et al.Incorporation of ridge and furrow method of harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions, [J]Agricultural Water Management ,2001,50(3):173~183.
- [79]Majed Abu-Zreig,Mousa Attom,Nisreen Hamasha.Rainfall harvesting using sand ditches in Jordan [J]Agricultural Water Management ,2000,46(3):183~192.
- [80]Mounira Zammouri.Case Study of Water Table Evaporation at Ichkeul Marshes(Tunisia) [J]Journal Of Irrigation and Drainage Engineering,September/October2001/265~271.
- [81] R.L.Snyder,K.Bali,F.Ventura,H.Gomez-Macpherson.Estimating Evaporation from Bare or nearly Bare Soil[J]Journal Of Irrigation and Drainage Engineering,November/December2000/399~403
- [82]Changmingliu.Rainwater Utilization as sustainable development in China's Water resources[C]International Symposium &2ND Chinese national Conference on Rainwater Utilization,1998,september8-12,1~9.
- [83]Luo YunQi ,Song GuanChuan.Precipitation Distribution Pattern and Rainwater Utilization in Xuzhou City [C]International Symposium &2ND Chinese national Conference on Rainwater Utilization,1998,september8-12,159~166.
- [84] Arnon Medzini Towards the 21st Century:Uncertainty, and Water Policy in Israel as an Industrialised,Semiarid Country[C]International Symposium &2ND Chinese national Conference on Rainwater Utilization, 1998,September8-12,30~33.
- [85]Yang Luhua,Wang Wenyuan.Increasing the Rainfall Effective Utilization by Making Full Use of the Forecast on Meteorology and Soil Moisture Content.[C]The international Rainwater Catchment Systems Conference June21-25,1995,BeiJing,China,Rainwater Utilization for the World's people,(6):100~104.
- [86] Cao Jianru,Zhang Guansheng.Soil Water conservation practices and their research advances in Northern China.[C]The international Rainwater Catchment Systems Conference June21-25,1995,BeiJing,China,Rainwater Utilization for the World's people,(6):48~54.
- [87]Qu shengli.Practices on the Rain Fed Land Agricultural Development in Heilonggang Area of HeBei Province.[C]The international Rainwater Catchment Systems Conference June21-25,1995,BeiJing,China,Rainwater Utilization for the World's people,(6):109~112.
- [88] zhang Zitai,Guo songniang.The Exploitation of Rainfed Agriculture Region .[C]The international Rainwater Catchment Systems Conference June21~25,1995,BeiJing .China,Rainwater Utilization for the World's people,(6):105~108.
- [89]Tang ChaoShuang,Zu ZhengHua.The Utilization of Rainfall Water in xuzhou City and its Contribution to the Sustainable Development of Agriculture [C]International Symposium &2ND Chinese national Conference on Rainwater Utilization, 1998, September8-12,16~21.
- [90] Wang YingJun,Zhang LiXia.The Development of Water-Saving Agriculture~on the utilization of rainfall and the sustainable development in agriculture[C]International Symposium &2ND Chinese national Conference on Rainwater Utilization, 1998,September8-12,147~154.
- [91]徐学选, 穆兴民, 王文龙黄土高原雨水资源化潜力初步分析[J].资源科学, 2000, 22 (1): 31~

- 34.
- [92]蔡焕杰, 王健, 王刘栓. 降雨聚集条件下节水高效农业综合技术[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16 (3): 78~83.
- [93]孔四新. 我国的集水农业及其发展前景[J]. 山西水土保持科技, 1996, (3): 1~3.
- [94]刘小勇, 吴普特. 对渭北地区集雨灌溉的思考[J]. 水土保持通报, 2000, 20 (4): 46~50.
- [95]马香玲. 节水农业发展之我见[J]. 河北水利科技, 2000, 21 (84): 48~51.
- [96]李素丽. 河北平原节水农业分区[J]. 河北水利科技, 2000, 21 (84): 33~36.
- [97]徐振辞, 齐卫芳. 河北省节水现状分析与综合节水技术体系[J]. 河北水利科技, 2000, 21 (84): 22~29.
- [98]林耀明, 任鸿遵, 于静洁等. 华北平原的水土资源平衡研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15 (3): 252~258.
- [99]张凤林. 河北省地下水超采状况甚忧南水北调势在必行[J]. 中国水利, 2001, (10): 53~55.
- [100]张岁歧, 山仑. 提高渭北旱塬雨水利用潜力的技术途径分析[J]. 水土保持通报, 1999, 6 (1): 47~50.
- [101]毕远山, 王海宁. 河北省降水量分析[J]. 河北水利科技, 2001, 22 (87): 4~7.

Research on Rainwater Resources and Its Effective Utilization in Baoding Area

Water Resources and Hydropower Engineering SHENG Li-li

Abstract

The agricultural production holds an important position in Baoding area,winter wheat and summer corn are the main grain crops and cotton is the main cash crop.The water resources used in agriculture include rainwater resources used directly by crops and surface water resources or underground water resources which is used through irrigation.There have been lots of rainwater waste because of lacking in research on rainwater resources utilization and in perfect engineering technology in Baoding area.To make full use of rainwater is important to alleviate the water resources crisis and improve the ecological environment,the main objectives can make more rainwater turn into soilwater that can be utilized by crops directly and decrease the crops requirements for the surface and ground water resources.

The precipitation frequencies is analysed according to 1956~2000 years of rainfall record series in Baoding area.The features of distribution of rainfall are detailed evaluated.Firstly,the distribution of monthly precipitation is not even,for instance,the annual rainfall amount is about 548mm in whole year,about 80% of them in summer season.secondly,yearly variation of rainfall is greater.Thirdly,the abundant years usually are followed by short years, but the important changes have taken place in the last decades.Before 70's the abundant years took the dominant position,from the 70's to the middle of 80's the short years took place more frequently than ever,after the later of 80's,the short years hold the main position.The above knowledge is instructive for guiding the rainwater resources effective utilization.

Based on the analysis of crop structure and crop yield according to the statistic data in 1949~2000 year,the total water consumption of main crops and the amount of rainwater utilized have been calculated.The rapid increase in water demand for crops production after the late eighties is the one of main reasons of the water resources crisis in Baoding area.The efficient precipitation,the water demand and the deficiencies of main crops in different typical years and in different growth period in Baoding plain have been studied in detail.The factors of water use efficiency of different crops have been put forward through the analysis of test data in typical year.

Based on the above studies,the different programs on how to use the rainwater resources efficiently is developed ,which is decided by the water deficiency amount for

agricultural production. A series of measures have been put forward. First, different geological region should take different methods. Second, the rainwater utilization through collection and storage projects or through reduction in evapotranspiration and increase in infiltration should be combined organically. Third, the high efficiency of rainwater's utilization should be attained. Therefore, water resources crisis can be alleviated efficiently and the agriculture sustainable development can be improved in Baoding Area.

Key words: water resources; rainwater resources; utilization of rainwater;
water demand; Baoding Area.

致 谢

在导师程伍群老师的悉心指导和帮助下，我终于完成了“保定市雨水资源及其应用研究”的撰写工作。在论文的撰写过程中所走的每一步都凝聚着导师的心血和汗水。在三年的研究生生活当中，导师不但在学习上给予我悉心的教导，在生活上也给予我无微不至的关怀和帮助。在此致以最诚挚的谢意！

在论文的完成的过程中，保定市水利局赵敏涛先生提供了宝贵的资料，对于论文的完成给予了大量的帮助，在此表示衷心的感谢；城建院的王文元老师、韩会玲老师、李书全老师、杨路华、郗志红等老师在我研究生的学习生活中给予我莫大的帮助，在此特向他们表示由衷的感谢。同一届的夏辉、王苏芳、宫攀、唐秀丽、冯志华同学在生活中给予我关心和帮助，在此向她们表示感谢。感谢我们的班长燕新征程。感谢我的爱人和我的亲人们，他们对于我的学习给予了莫大的支持和鼓励！

最后，感谢在座的每一位老师和同学！感谢所有关心和爱护我的人们！

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得河北农业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：晁莉丽 签字日期：2003年5月12日

学 位 论 文 版 权 使用 授 权 书

本学位论文作者完全了解河北农业大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构递交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权河北农业大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：晁莉丽

导师签名：程伍群

签字日期：2003年5月12日

签字日期：2003年5月12日

学位论文作者毕业后去向：河北农业大学城建学院

工作单位：河北农业大学城乡建设学院 电话：13091217669

通讯地址：河北农业大学城乡建设学院水利系 邮编：071000