

密级：

论文编号：

中国农业科学院 硕士学位论文

EPIC 模型应用于黄淮海平原冬小麦估产的研究
— 以栾城为例

Yield Estimation of Winter Wheat with EPIC Model in Huang-huai-hai Plain
- A Case Study in Luancheng, Hebei

硕 士 研 究 生：余 福 水

指 导 教 师：陈 仲 新 研究员

王 利 民 副研究员

申 请 学 位 类 别：工学硕士

专 业：环 境 工 程

研 究 方 向：农 业 环 境 遥 感

培 养 单 位：中国农业科学院研究生院

农业资源与农业区划研究所

提交日期 2007 年 1 月

Secrecy:

No.

Chinese Academy of Agricultural Sciences
Master Dissertation

Yield Estimation of Winter Wheat with EPIC Model in
Huang-huai-hai Plain

- A Case Study in Luancheng, Hebei

Candidate: Yu Fushui

Advisor: Professor Chen Zhongxin

Associate Professor Wang Limin

Major: Agro-Environmental Engineering

Specialty: Remote Sensing Application on
Agricultural Environment

Chinese Academy of Agricultural Sciences

Jenaury 2007

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，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，也不包含为获得中国农业科学院或其它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了谢意。

研究生签名：

时间： 年 月 日

关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国农业科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国农业科学院有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

论文作者签名：

时间： 年 月 日

导师签名：

时间： 年 月 日

论文评阅人、答辩委员名单

论文题目	EPIC 模型应用于黄淮海平原冬小麦估产的研究 — 以栾城为例				
论文作者	余福水	指导教师	陈仲新 王利民	培养单位	农业资源与农业区划 (研究所)

	姓名	职称职务	导师类别	单位	专业
评阅人	潘耀忠	教授	博导	北京师范大学	遥感
	周国民	研究员	博导	中国农业科学院信息所	农业信息技术
答辩主席	王长耀	研究员	博导	中国科学院遥感所	遥感
答辩委员	诸叶平	研究员	硕导	中国农业科学院信息所	计算机
	潘学标	教授	博导	中国农业大学	农业气象模型
	周清波	研究员	博导	中国农业科学院区划所	农业遥感
	刘佳	副研究员		中国农业科学院区划所	农业遥感
答辩时间、地点		2007 年 2 月 9 号资源区划所南楼二楼会议室 10: 30 分			
会议记录		李志斌			

摘 要

本文针对我国粮食安全中粮食估产问题,选择我国粮食主产区之一的黄淮海平原为研究区域,以提高冬小麦产量估测精度与技术水平为目标,探索利用作物生长模型与空间信息技术结合进行区域作物产量估计的技术方法。

本文首先综述分析各类作物估产方法。综合考虑农业生产的独特性和不同估产方法的优缺点,本文最终选取作物生长模拟模型估产方法。由于 EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator)模型较准确模拟了作物生长的全过程并考虑了其它因素对作物生长的影响,而且其估产具有较高的精度,本文探讨了其应用于黄淮海平原冬小麦产量估计的可行性。其次对研究区域的选择本着单点研究的基础向区域研究拓展的思路,选取具有较好研究基础的河北栾城作为单点模型校准的试验区,选取具有良好空间数据基础的河北石衡邢试验区为区域试验区。在单点模型校准研究中,首先对 EPIC 模型进行模型校正,实现模型的本地化;接着根据实测产量数据,对模型进行了参数校准、部分参数的灵敏度分析等工作;然后对 EPIC 模型进行了空间化,使其能够应用于大区域估产的研究中;在区域模型应用研究中,探讨了 EPIC 模型应用于黄淮海平原冬小麦产量估计的可行性。主要结论如下:

EPIC模型能够很好地模拟栾城生态实验站冬小麦长势和产量。10 年预测平均产量要比 10 年实测平均产量要低 0.05t/ha, 相对误差为 0.74%, 各年的相对误差在-5.8%~2.9%之间变化。预测产量的均方根误差(RMSE)为 0.18t/ha, 达到实测产量平均值(6.72t/ha)的 2.68%, 这个误差范围要低于EPIC模型通常误差范围之内(15%)。模拟产量和实测产量两者之间的决定系数 R^2 为 0.8433。较准确的能量—生物量转换因子、收获指数、潜热等参数或者温度、太阳辐射等输入数据有利于提高模型最终的模拟精度。模型模拟最终精度值受田间管理文件的影响较大。对于区域作物产量估计时最终模拟的决定系数 R^2 , 考虑了田间管理数据存在地区差异时的值要比没有考虑田间管理数据存在地区差异时的值高, 两者分别为 0.4596 和 0.0001。当模型需要的数据均为实测数据的时候, EPIC模型能够很好地应用于黄淮海平原冬小麦产量估计。

本文对作物生长模型本身、作物模型和遥感信息结合等方面进行了探讨,获得了一些初步结论。但是由于本研究涉及的方面较多,限于资料和时间的相对缺乏、方法上不足,还存在一些问题有待于下一步深入探讨。如模型对气象数据的模拟、模型对越冬期作物生长的模拟、遥感数据与作物模型尺度转换和空间匹配、模型中更多参数遥感数据反演等。

关键词: 粮食安全; 黄淮海平原; 冬小麦; 估产; EPIC 模型

Abstract

This paper mainly focuses on the improvement of crop yield estimation technique, one of the critical techniques for regional food security early-warning. Huang-huai-hai Plain, which is one of the main grain crop growing regions in China, was selected as the study area. The main objectives of this research are to improve the final yield estimations precision of winter wheat, to explore the technological method based on the integration of crop growth simulation model and spatial information technology for regional crop yield estimation.

Firstly, the author extensively reviewed different crop yield estimation methods in this paper. Taken the unique characters of agricultural production and the advantages and disadvantages of different methods into account, this paper finally choose the method based on crop growth simulation model to estimate crop's yield. In this paper, EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) model as one of these crop growth simulation models was used to estimate winter wheat's yield in Huang-huai-hai Plain, because EPIC model simulates the whole growth development more accurately and consider the effect by others aspects well. Secondly, the study areas were chose. Luancheng Ecological Experimental Research Station of Chinese Academy of Sciences was select for the local model validation because there are good relevant research work and background iformation. Hebei study area, including Shijiazhuang, Hengshui and Xingtai, embracing Luancheng, was select for regional yield estimation application area because of the availability of many spatial information data and other supporting background data.

For the local model validation, EPIC model firstly was validated based on references so that it can be used locally. Then it was used to estimate winter wheat's yield at Luancheng ecological experimental station. Some parameters were calibrated and sensitivity analysis was done according to observed yield. Lastly, EPIC model was scaled up for regional crop yield estimation. For the regional yield estimation application, the feasibility that spatial EPIC model was used to estimate the regional crop yield was discussed. The main conclusions are as follow:

For the local model validation, EPIC model can well simulate the growth condition and forecast crop's yield at Luancheng ecological experimental station. The yield estimation's RMSE was 0.18t/ha, which equals to 2.68% of mean observed yield. This figure is lower than normal error of EPIC model (15%). The decision coefficient between estimation yield and observation yield was 0.8433. It was useful for final estimation precision to collect more accurate crop parameters data, such as biomass-energy ratio, harvest index, potential heat unit and input files like temperature and sunshine radiation. The final accuracy was sensitive to the precision of the input management operation.

For regional yield estimation application, when the spatial difference of management operation was considered, the decision coefficient between estimation yield and observation yield was 0.4596, which was higher than the decision coefficient without considering the spatial difference. When the input data

of the EPIC model are observation, it could well estimate the winter wheat's yield of the Huang-huai-hai Plain.

Methodology which crop growth、development and yield formation in local area by crop model and regional scale simulation by combining remote sensing information with crop model were studied and some good results were approached. However, because of complex interdisciplinary involving agronomy, geosciences and remote sensing technique, lack of data, and the limitation of methodology, some problems, such as the daily weather data simulation, winter wheat growth simulation in overwintering, match of spatial size in remote sensing data with crop model and more parameters calculation based on remote sensing data were needed to study further.

Keywords: Food security; Huang-huai-hai Plain; Winter Wheat; Yield Estimation; EPIC model

目 录

摘 要	i
Abstract	ii
第一章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 作物产量估计方法简介	1
1.2.1 基于统计模型的估产方法	2
1.2.2 基于遥感信息数据的估产方法	2
1.2.3 基于作物生长模型的估产方法	3
1.2.4 综合估产方法	6
1.3 研究目的与意义	8
1.3.1 黄淮海平原冬小麦估产的研究意义	8
1.3.2 EPIC模型应用于估产的研究意义	8
1.4 国内外研究进展	9
1.4.1 国外研究进展	9
1.4.2 国内研究进展	10
1.5 研究目标、研究内容和研究方法	11
1.5.1 研究目标	11
1.5.2 研究内容	11
1.5.3 研究方法	12
1.6 总体技术路线	12
第二章 研究区域和研究方法简介	14
2.1 研究区域简介	14
2.1.1 河北试验区简介	14
2.1.2 栾城简介	15
2.2 EPIC模型简介	17
2.3 模型检验	21
第三章 EPIC模型的验证和灵敏度分析	22
3.1 数据输入	22
3.1.1 气象数据	22
3.1.2 土壤数据	23
3.1.3 田间管理数据和产量数据	24
3.2 EPIC模型的验证	25
3.2.1 模拟气象数据模块验证	25
3.2.2 参数调整	26
3.2.3 冬小麦产量模拟	26
3.3 灵敏度分析	28
3.3.1 灵敏度分析简介	28
3.3.2 灵敏度分析	28
3.4 情景分析	30
3.4.1 模式分析	30

3.4.2	播种时间, 收获日期对产量的影响	32
3.5	结果与讨论	34
第四章	遥感数据应用于EPIC模型的可行性分析	36
4.1	技术路线	36
4.2	实验布置	37
4.3	数据准备与处理过程	39
4.3.1	气象数据	39
4.3.2	土壤数据	41
4.3.3	田间管理数据	42
4.3.4	产量数据	43
4.4	结果	44
4.4.1	统一田间管理数据下模拟产量	44
4.4.2	不同田间管理数据下模拟产量	46
4.5	讨论	47
第五章	结果与讨论	48
5.1	结论	48
5.2	讨论	49
5.3	展望	49
参考文献	51
致 谢	56
附 录	57
作者简介	67

第一章 绪论

1.1 研究背景

20 世纪以来,随着我国人口的急剧增长,自然资源的不合理利用、气候变化、土地退化、环境污染、水资源短缺等问题的出现,粮食安全和宏观调控政策的实施等一直都是我国一个主要的问题。1994 年 9 月,美国世界观察研究所所长莱斯特·布朗发表了长达 144 页的《谁来养活中国——来自一个小行星的醒世报告》。布朗认为,中国日益严重的水资源短缺、高速的工业化进程对农田的大量侵蚀、破坏,加上每年增长的人口,到 2030 年,中国将达到人口高峰期。为了养活 10 多亿人口,可能得从国外进口大量粮食,这可能引起世界粮食价格的上涨。由于全球经济的一体化,中国的粮食问题可能会对世界的粮食供应产生巨大的影响。这一论断引起了全世界极大震动。虽然布朗的说法有点骇人听闻,但也从一方面反映了我国粮食生产面临的严峻形势。因为粮食生产,对于人类生存至关重要。国以民为本,民以食为天,只有丰衣足食,才能国泰民安,如果人民生活所需食物来源不能保障,就可能会造成社会的不稳定。因此,国家制定合理的粮食政策、宏观调控粮食市场价格对于保障国家的粮食安全和维护社会的长治久安有着重要的意义。

合理的粮食政策要以及时、准确、快速监测农作物长势和预报粮食产量为前提。过去的几十年里,很多种方法应用于农作物长势监测和产量预报的研究中。归纳起来主要有四种方法:基于统计模型的估产方法、基于遥感信息数据的估产方法、基于作物生长模型的估产方法和多种方法相结合的综合估产方法。由于农业生产有生产区域的广泛性、单位面积比较效益低、年际与季节变化波动大等区别与其它产业的特点,因此常规的统计调查与监测方法在时效、经济成本和准确性上难以满足农业生产管理对农情监测信息的需求。作物生长模型具有快速、准确、低成本、精度高等特点,在理解、预测和调控作物的生长与产量等方面具有一定广泛性和较强的机理性。同时,随着遥感技术的发展,作物生长模拟技术和遥感技术相结合应用于农作物长势监测和估产方面取得了显著进步。因此,在过去 20 多年的研究和应用中,作物生长模拟模型在作物产量预测方面表现出良好的发展趋势,受到国内外众多学者的广泛关注,成为估产领域的热点之一。

冬小麦是我国主要的粮食作物之一,其播种面积占粮食播种面积的五分之一。而在北方,尤其是我国最大的小麦产区:黄淮海平原,其地位更加重要。黄淮海平原小麦种植面积占全国小麦总面积的 68%,产量占全国小麦总产的 76%。由于黄淮海平原独特的地理位置,是中国主要粮食产区,在区域及国家食物安全中占有重要地位。因此,对具有 13 亿人口的农业大国,针对农作物进行长势监测和产量早期预报和估算,特别是对冬小麦进行长势监测和产量估计,对国家实现及时、准确地掌握粮食生产状况和在粮食宏观调控、国际农产品贸易中争取到主动权具有重要意义。

1.2 作物产量估计方法简介

在产量估算的研究上,国内外做了相当多的研究。目前对农作物长势监测和估产的方法很多,

归纳起来主要有四种方法：基于统计模型的估产方法、基于遥感信息数据的估产方法、基于作物生长模型的估产方法、各方法相结合的综合估产方法。

1.2.1 基于统计模型的估产方法

统计模型是一种经验回归的方法，它包括两种方法：农学预报方法和气象预测方法。

农学预报方法是通过监测预测产量构成三要素(即有效穗数、每穗粒数、千粒重)来预报冬小麦的产量，即：

$$y=a \times \text{有效穗数} \times \text{每穗粒数} \times \text{千粒重}$$

其中 a 为换算系数。

据研究，对于特定品种、特定的地点，冬小麦的每穗粒数和千粒重主要取决于品种的遗传特性，以有效穗数受环境影响最大，也容易采取相应的栽培技术措施加以改变。农学预测方法已经成功地应用在小麦、棉花、玉米等作物估产上（黄敬峰等，1999；王秀珍，1997），其精度达到业务运行的水平。但是农学预测因子获得较困难，所以不适合大面积估产和推广应用。

气象预测方法是农作物一天气气候模式的一种，是冬小麦产量和自然环境条件之间各种复杂关系的概括，能很好地反映作物对气候条件的反应，也是目前发展最为完善的产量预测评价方法。

一般认为，作物产量 Y 主要是由趋势产量 Y_t 和气象产量 Y_w 两部分构成。趋势产量由农业技术水平、土地条件、农业政策等确定，气象产量则是由当年气象条件所确定的那一部分产量。这样作物产量可以表示成：

$$Y = Y_t + Y_w + \Delta Y$$

式中： Y 代表实际产量， Y_t 代表趋势产量， Y_w 代表气象产量， ΔY 代表随机产量，为不可控制因素，一般可以忽略不计。

气象预测方法主要分为两个步骤：第一步是从作物产量序列中分别提取出趋势产量 Y_t 和气象产量 Y_w ，第二步是对上述提取出来的两类产量进行预报。对趋势产量的预测一般采用直线回归、滑动平均法、指数函数、正交多项式回归等方法（刘可群等，1996；南都国等，1997；史永臣等，2001）。气象产量由作物的实际产量与趋势产量之差获得，再对气象产量进行分析并建立预报模型。预报年的作物产量即为当年趋势产量的预报值和气象产量的预报值之和。

农业气象预测方法预报的作物已经包括小麦、水稻、玉米、棉花等（吉文娟等，2006；黄敬峰等，1999；杨海鹰等，2005；姜丽霞等，2004），建立了比较完善的农业气象作物产量预报系统。但是气象预报系统存在对大范围地区作物面积较难估测、作物产量预报不能动态化等问题，因此还有待进一步研究和完善。

1.2.2 基于遥感信息数据的估产方法

农作物遥感估产是近几十年来发展起来的一种新的方法，它是建立在作物光谱与产量之间联系之上的一种技术。遥感估产一般可以分为八个步骤：遥感估产区划、布设地面采样点、建立背景数据库系统、农作物面积的提取、不同生长期作物长势动态监测、建立遥感估产模型、遥感估

产精度的分析和确认、遥感估产运行系统的建立。

国际上,关于农作物生长状况遥感监测与估产有三个标志性的实验计划,即美国的 LACIE 计划、AGRISTARS 计划和欧盟的 MARS 计划。从 1974 年到 1977 年,美国农业部(USDA)、国家海洋大气管理局(NOAA)、美国宇航局(NASA)和商业部合作主持了“大面积农作物估产实验”(Large Area Crop Inventory Experiment, LACIE 计划),主要作物是小麦,地区范围是美国、加拿大和前苏联;1980 年到 1986 年,执行 LACIE 计划的几个部门又合作开展了“农业和资源的空间遥感调查计划”,即 AGRISTARS 计划,其中包括了世界多种农作物长势评估和产量预报;欧盟所属的联合研究中心遥感应用研究所通过实施“遥感农业监测”(Monitoring Agriculture with Remote Sensing)项目,即 MARS 计划,也成功地建成了欧盟区的农作物估产系统,包括作物长势监测系统(Crop Growth Monitoring System, CGMS),并将结果应用于实施诸如农业补贴与农民申报核查等欧盟的共同农业政策。作物的生长过程是一个极其复杂的生物物理过程,生长状况受多种因素影响,可以用一些能够通过遥感获取、能反映作物生长过程且与该过程密切相关的因子或遥感指标进行表征。反映作物生长状况的相关因子主要包括叶面积指数、植被指数和生物量等。

在我国,利用气象卫星监测作物生长状况始于 20 世纪 80 年代中期。从“六五”计划开始,开展了农作物遥感估产研究,并在区域尺度上开展产量估算试验。1983 年起农业部先后组织北京近郊小麦、浙江杭嘉湖地区水稻及北方 6 省市小麦遥感估产。1984 年开始,国家气象局组织北方 11 省市开展冬小麦气象卫星遥感综合测产技术研究,组建了全国冬小麦遥感综合测产地面监测系统,开展了气象卫星监测冬小麦长势的研究,建立了不同类型的气象卫星遥感面积测算与估产方法。“八五”期间,遥感估产成为国家技术攻关内容,开展小麦、玉米和水稻大面积遥感估产试验研究。在 1993-1996 年的 4 年间分别对 4 省 2 市(河北、山东、河南、安徽北部和北京市、天津市)的冬小麦,湖北、江苏和上海市的水稻,吉林省的玉米种植面积、长势和产量开展监测预报。在此期间,李郁竹(1988, 1990, 1993, 1995)、史定珊(1993)、孟宪钱(1993)、王延颐(1993)、张晓阳(1995)等分别探讨了利用气象卫星对农作物长势进行宏观监测的理论和方法。1997 年开始农业部农业遥感应用中心、中国农业科学院资源区划所开发了冬小麦估产业务化运行系统,该系统包括冬小麦主产区的长势监测。该系统长势监测的主要方法为:利用 NOAA 卫星数据,选取适宜的 NOAA-AVHRR 图像数据,计算同一监测区相邻两年冬小麦的 NDVI 值,并进行差值计算,依差值大小分成 5 类:差、稍差、持平、稍好和好,绘制等级图,分区统计差值,以此来监测冬小麦长势的好坏(吴文斌, 2001)。1999 年杨邦杰用作物的个体与群体定义了作物长势,提出了基于植被指数与植被表面温度的长势遥感监测的评估模型与诊断模型的概念与算法。2000 年吴炳方利用每旬的 AVHRR 最大 NDVI 图像与上年同期对比实现了全国范围的农作物遥感长势监测;辛景峰探讨了作物长势的参照标准和监测指标。

综上所述,国内外对作物长势的遥感监测进步较早,开展了大量工作,取得了很多研究成果。但是遥感估产存在单点估产精度不高的问题。

1.2.3 基于作物生长模型的估产方法

作物生长模拟是一门新兴的边缘技术,它是以系统分析原理和计算机模拟的技术来定量地描述作物的生长、发育、产量形成的过程及其对环境的反应,通过对作物生育和产量的实验数据加

以理论概括和数学抽象,找出作物生育动态及其与环境因素间关系的动态模型,然后模拟给定作物整个生育期的生长情况(Whisler et al., 1986)。

作物生长模型发展至今历经初级模型阶段(1965~1974)、综合模型阶段(1975~1984)、应用模型阶段(1985~1994)和扩展模型阶段(1995~)。在初级阶段开始了作物生理生态过程的数量分析与模拟,并进行植被冠层截光理论研究;在综合模型阶段,模型可以解释作物生长的各个过程,但这类模型通常是庞大的、错综复杂的和不便实际应用,BACROS则是综合模型的一个典型例子,后来建成简单通用作物模型SUCROS;应用模型阶段进一步趋向系统化、机理化,从不同生育过程的模拟到完整的生长模型,作物模拟在深度与广度上同时得到了发展,先后开发出了包括CERES系列模型和棉花模型COSSYM在内的作物专用模型30多个,还开发出了包括WOFOST、EPIC和CROPSYST在内的多作物长时段通用模拟模型10余个

目前已经建立的各种作物生长模拟模型至少100种,从作物生长模型研究逐渐发展的风格看,主要分为三种,即分别以荷兰、前苏联、美国为代表(张宇等,1989)。其中,荷兰侧重于生物学机制和作物共性,前苏联注重于数学物理方面的处理,而美国更加地强调模型建立的实用性、方便性、简洁性和稳定性。目前,日本在作物生长模拟方面则综合了美国和荷兰的特点,以诊断、预测和指导生产相结合为特色。中国学派则以模拟技术与优化原理的完美结合而见长,其代表人物有高亮之、戚昌瀚等。

进入90年代以后,随着社会需求的增多,作物生长模拟模型不仅应用在农业生态区研究、区域产量预测、土地资源管理、环境条件和社会经济变化对农业的影响评价、全球气候变化的影响及其农业生产可持续发展的策略等研究中,还开始与其它信息技术如遥感、地理信息系统、农业专家系统(AES)、网络技术、决策支持系统(DSS)等相结合,应用于农作物的生长模拟与监测中。作物生长模拟模型研究开始侧重于现有模型的完善,而非进行新模型的研制。例如1989—1992年由美国环境保护署资助,进行了题为“气候变化对国际农业的影响:全球粮食生产、贸易和脆弱地区”的项目研究,研究的主要目的是作物生长模型和大气环流模式(GCM)相结合,预测不同气候变化情况下、考虑二氧化碳浓度增加对作物的直接生理作用、以及不同适应对策下,将会对全球作物生产产生的影响,包括主要作物的产量估算、水分利用变化和管理措施变化等。遥感数据与生长模型的整合应用也是重要发展趋势之一,例如Maas利用植被指数NDVI估算了有效光合辐射和叶面积指数,用于作物模型,同时提出了用遥感信息对模拟过程进行重新初始化和参数化的方法,以提高模型模拟精度。

国内作物生长模型研究起步较晚,80年代中期,国内开始吸收荷兰和美国的作物生长模型,而且研究主要集中在模型应用上,但是也取得了相当大的进展。高亮之等在研究了中国不同类型水稻生育期的农业气象生态模型,用播种期、纬度和温度3个因子建立了水稻生育期的温光模型之后,于1989年又提出水稻钟模型,该模型由水稻生育期模型和叶龄模型组成,生育期模型用来模拟逐日温度和日长对水稻发育的影响,其参数可反映不同类型水稻品种的基本营养性、感温性和感光性。戚昌瀚等建立了水稻生长日历模拟模型RICAM,该模型反映品种的库源关系,模拟参数变化对生长的影响以及预测水稻品种的产量潜力。孙忠富等建立了以太阳辐射为基本驱动因子的温室番茄生长发育动态模型,该模型包括太阳辐射、碳平衡分析,植株形态发育,干物质分配等模块。潘学标等考虑了棉花的碳素平衡、发育与形态发生、水分平衡、氮素平衡、磷和钾的吸

收及中国的常规栽培措施,建立了可用于栽培管理的棉花生长发育模拟模型 COTGROW。该模型能较好地模拟棉花的株高、单株主茎节数和果枝数、叶面积指数等。

作物生长模型大多是农田尺度的单点模型,但是当作物模拟从单点研究发展到区域应用时,产生了随空间尺度加大而出现的地表、近地表环境非均匀性问题,导致无法有效的把一些空间变化信息加入到模型中去,即不能解决模型在大范围使用时的初始宏观资料的获取和参数调整问题。例如地表和作物状况的非均匀性导致区域性模拟时初始条件(出苗期、初始生物量、初始土壤水分状况等)难以确定;对计算作物冠层光合作用及干物质积累非常重要的变量叶面积指数,其受品种、气候、土壤等因素影响地域变异很大,精确模拟有一定难度;又如大范围作物表面蒸腾量、土壤水分含量、水分胁迫状况的估算往往会受到区域内土壤条件的复杂性和土壤水文常数、灌溉量等资料获取困难等因素的制约。另外,一些突发性天气灾害造成作物生长的剧烈变化也很难用作物模型准确地模拟出来,而遥感信息在很大程度上可以帮助作物模型克服这些不足。

作物生长模型利用遥感信息解决区域化应用问题主要是利用遥感可以观测作物时实变化信息,如作物生长开始、发育进程、成熟收获等。但是作物生长模型运行步长一般为一天,而遥感信息可能一天几次到十几天一次。而且高空间分辨率的遥感信息由于其时间分辨率较低而无法满足作物生长模型的需求;相反,高时间分辨率的遥感信息由于空间分辨率较低而出现混合辐射信号提取作物独立光谱特征的技术问题。因此,两种信息的耦合过程中必然存在时空分辨率匹配问题。

针对上述问题,一些研究者进行了尝试研究。其中一种常用的做法是用仅有的遥感观测值做一模拟曲线,然后用该模拟曲线和遥感数据按照模型要求的时间步长进行内插获得模型需要的变量值(Delecolle et al., 1988)。如对遥感反演 LAI 进行时间内插以满足作物模型需求或重建遥感影像时间序列,解决遥感数据不连续问题。对于混合象元的分解采用空间分解法、时间分解法或采用低分辨率遥感信息的完全建模。Puyou-Lascassies 等(1994)首先假设区域内某种作物的个体光谱特征是固定的,然后通过简单经验统计方法获取区域内作物的平均光谱特征。Faivre 等(1997)认为由于土壤、气候或耕作措施在空间上的不同会引起作物反射率的空间变异,因而建立考虑某单一作物反射率空间变异的模型,除了输出每种作物的平均反射率外,还给出出现反射率偏差的位置和偏差大小,对改善作物模型非常有用。与上述分解混合象元提取给定作物独立光谱特征的方法不同,低分辨率遥感信号的完全建模是指在给定区域内,通过作物模拟模型和作物的经验反射率廓线对不同种植面积的各种作物低分辨率光谱信号进行耦合,最后输出区域内作物综合光谱特征。Moulin 等(1998)利用完全建模法模拟了一个谷物占大部分比例区域的作物光谱特征,模拟值非常符合 NOAA/AVHRR 监测信息的时间变化特征。

作物生长模型与遥感信息结合的真正结合是从作物生长模型的扩展阶段开始,因此,该项研究成果仅有十几年的时间。目前,遥感信息(包括地面的光谱观测和卫星数据)与作物生长模型的结合方式主要有 4 种(赵艳霞等, 2005): (1) 直接将遥感观测的变量值用到作物模型中的驱动模式; (2) 用遥感观测值(如叶面积指数 LAI)更新模型中相应的变量; (3) 重新初始化模型,即通过调整初始条件使得模拟值与遥感观测值一致,进而确定模型的初始值; (4) 重新参数化模型,即通过调整模型参数使得模拟值与遥感观测值一致,进而确定模型的参数值。Wiegand 等对遥感信息与作物模型结合的方法进行讨论和归纳,总的来说可以分为两种:驱动法和初始化/参数

化法, Maas (1998) 在玉米地里进行地面辐射观测, 用光学部分数据反演得出叶面积指数 (LAI), 用近红外和热红外数据反演表面温度以确定水分胁迫指数, 将这些遥感观测值代入作物模型, 结果显示模型对地上生物量的模拟结果得到改善。Delecolle 等 (1988) 使用高空间分辨率卫星数据 (SPOT/HRV) 反演 LAI, 但由于时间分辨率低和天气原因等, 整个生育期从卫星资料只能获得几个 LAI 值。所以, 用仅有的 LAI 遥感观测值, 建立一个 LAI 统计模型, 然后用该统计模型按照作物模型的模拟步长内插得到 LAI, 代入小麦综合决策模型 (ARCWHEAT)。结果是显著地提高了模型的产量预测能力。Karvonen 等 (1991) 利用遥感数据确定作物的 LAI, 作为农业气象模型 CROPWATN 的输入变量模拟地段作物产量。后来, Supit 等 (1994) 进一步将上述模拟产量作为作物生长监测系统 (CGMS) 的输入量估测区域作物最终产量。

通过遥感数据与各种生长和生态过程模型的有机结合, 使模型从单点应用扩大到区域成为可能。但从国外的研究情况看, 虽然遥感信息与作物生长模型结合的研究取得一些成果, 由于开展该类研究的时间较短、研究目的各异以及使用的遥感数据和所用的模型的机理性程度不同等原因, 目前在如何将遥感信息应用于模型所需的多个参数和初始条件, 如何解决遥感信息和农学和生态学信息连接的时空匹配、信息转换问题等方面尚无系统的和成熟的结论, 仍需做进一步的研究和探讨。

1.2.4 综合估产方法

随着科学技术的进步, 人类采集信息和管理信息的能力日益增强。因此, 为了实现作物产量的预测和估计, 利用系统论的观点综合考虑各种因素, 充分利用多源信息, 已成为可能和必然趋势。目前, 农作物估产方法虽然较多, 但单独依靠任何一种方法都不能取得完全满意的效果。因此, 有必要综合考虑影响因素, 整合多种估产模型, 使各种估产方法相互补充、相互完善及集成, 从而发挥各个模型自身的特点和优势, 达到提高作物产量预测精度的目的。其整合模型计算公式表示如下:

$$Y_T = f(MET \text{ and / or } RS \text{ and / or } SIM \text{ and / or } T \text{ and / or } Others) + e$$

其中: Y_T 是某年预测产量; $f(MET)$ 是气象模型估测的产量; $f(RS)$ 是遥感模型估测的产量; $f(SIM)$ 是生长模拟模型估测产量; $f(T)$ 是统计趋势产量; e 残差产量。其流程图如下:

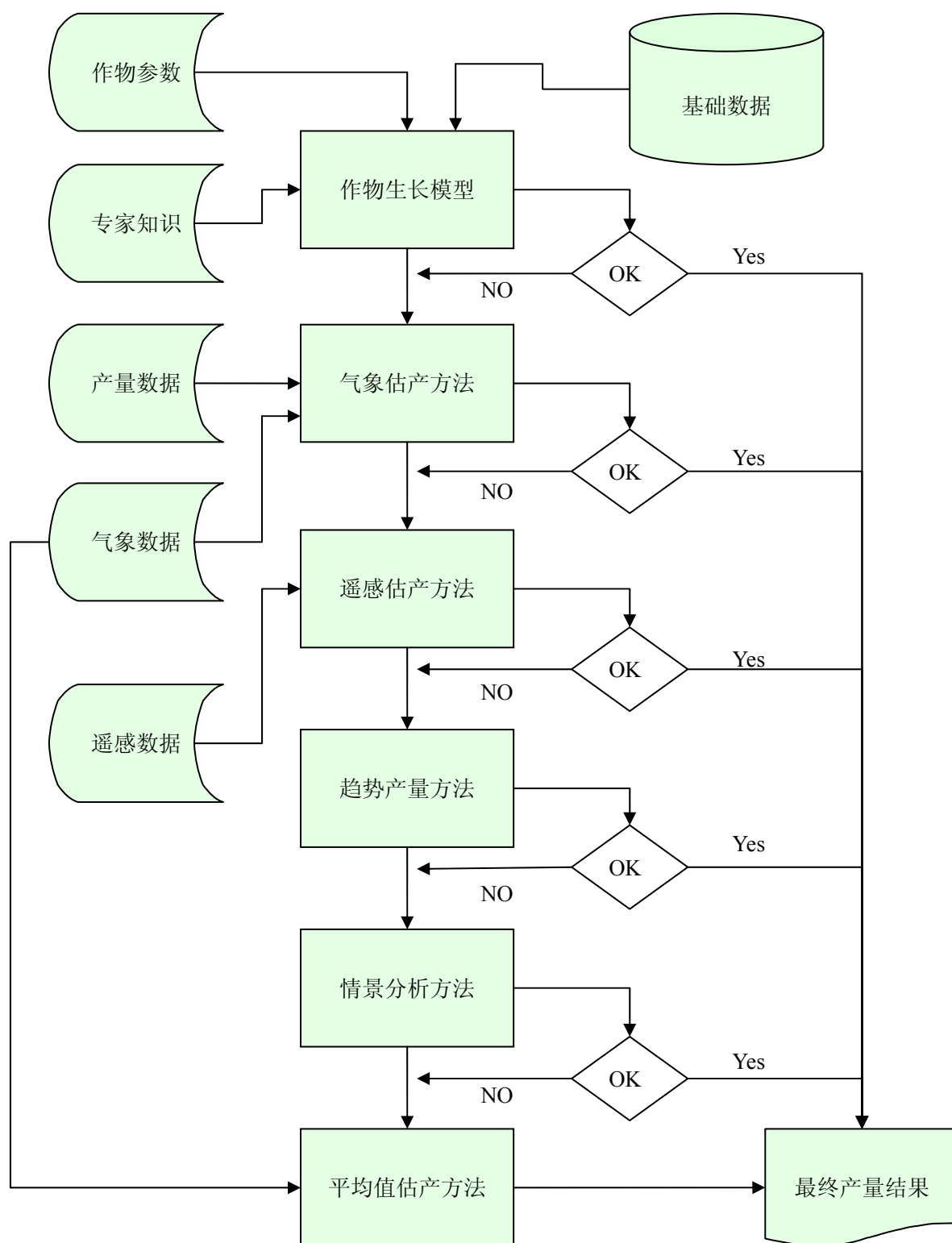


图 1-1 整合估产方法示意图

Fig. 1-1 Integration of different model for yield estimation

1.3 研究目的与意义

1.3.1 黄淮海平原冬小麦估产的研究意义

小麦是我国重要的粮食作物，常年播种面积、产量分别占粮食总量的 25%和 22%左右。1978 年至 2000 年，全国小麦总产量由 5384 万吨增至 9964 万吨，增长 85%，年递增 3%，高于同期全国粮食总产量增幅 1 个百分点；平均亩产由 123 公斤增至 249 公斤，提高 1 倍以上；播种面积则由 4.4 亿亩降至近 4 亿亩，减少 4000 万亩。我国小麦生产分布广泛，除海南省和港澳台地区以外，其他 30 个省（区、市）均有小麦种植。在全国各大产区中，黄淮海麦区所占比重最大。2000 年，黄淮海麦区小麦面积 2.5 亿亩、产量 7149 万吨，分别占全国的 62.2%和 71.7%。特别是河南、山东、河北、江苏、安徽 5 个生产大省，小麦面积达 2.3 亿亩、产量达 6807 万吨，分别占全国的 57.9%和 68.3%。因此，能否及时、准确地了解黄淮海平原冬小麦播种面积、长势及产量，不仅对于加强该区小麦生产管理，进一步发挥其生产潜力，而且对于国家粮食政策的制定、价格的宏观调控、国家的粮食安全和社会的长治久安有着相当重要的意义。

1.3.2 EPIC 模型应用于估产的研究意义

由于作物长势监测和产量预报的重要性，半个多世纪以来，世界上多个国家来自农学、生物学、经济学、统计学等诸多领域的科学家与研究者开发了许多作物产量模拟、预测模型或方法。目前对农作物长势监测和估产的方法主要有基于统计模型的估产方法、基于遥感信息数据的估产方法、基于作物生长模型的估产方法、多种方法相结合的综合估产方法。由于农业生产有生产区域的广泛性、单位面积比较效益低、年际与季节变化波动大等区别与其它产业的特点，因此常规的统计调查与监测方法在时效、经济成本和准确性上难以满足农业生产管理对农情监测信息的需求。作物生长模型具有快速、准确、低成本、精度高等特点，在理解、预测和调控作物的生长与产量等方面具有一定广泛性和较强的机理性。同时，随着遥感技术的发展，作物生长模拟技术和遥感技术相结合应用于农作物长势监测和估产方面取得了显著进步。因此，在过去 20 多年的研究和应用中，作物生长模拟模型在作物产量预测方面表现出良好的发展趋势，受到国内外众多学者的广泛关注，成为估产领域的热点之一。作物生长模拟模型估产优于其它的估产方法在于：1. 快速性，输入模型所需的气候、土壤、田间管理等数据之后，模型会快速、准确地估算出某地某作物的产量，避免了进行田间实测产量，可节省大量的人力、物力、财力；2. 动态性，能实时性地提供作物长势情况，制定合理的粮食政策、保障国家的粮食安全提供了保障。

EPIC 模型作为作物生长模拟模型之一，由于其具有需求参数要比 DSSAT 少、气候变化对产量影响的模拟能力要比其他的模型（CERES、ALMANAC）强（Touré 等, 1995）、处理作物残茬的能力强、对风蚀的估算精度较高（Priya 等；2001）的优点，且 EPIC 模型特别适用于模拟交替的作物轮作、耕作实践、种植日期、灌溉和施肥策略以及作物物候期等（Easterling 等；1995）、EPIC 模型对环境中的 CO_2 浓度、温度和其它气象要素的变化对水分传输和作物生长的影响的模拟精度要比其它模型高（Williams 等，1999），因此，本文在国家 863 估产项目和农业部业务估产系统项目的支持下，旨在 1：研究 EPIC 模型在黄淮海平原冬小麦估产应用的可行性，也为今后 EPIC 模型用于全国作物产量的估算奠定一个基础；2：确定合理的冬小麦生理生态参数，并对其做灵敏度分析，

为指导农业生产提供依据；3：探讨遥感数据用于EPIC模型的可行性，从而改进农情遥感监测系统，以解决由于数据缺乏所带来大面积估产精度不高的问题。

1.4 国内外研究进展

1.4.1 国外研究进展

国外对 EPIC 模型的研究和应用起步早，应用与研究范围广。国外对 EPIC 模型的研究大体上可以分为以下三大部分：模型的优化与验证、单点模型的应用、以及 EPIC 模型与“3S”技术结合在空间上的应用。

模型的优化与验证

EPIC 模型是由水文学、气象、侵蚀、营养循环、土壤温度、作物生长模型、作物与土地的管理、经济 8 个模块组合而成的，模型结构相对比较复杂。这使得评价整个模型的性能表现及优缺点有一定的困难，对整个模型的完整评价就更加困难。因此，很多学者就对模型中的各个模块分别进行评价（Ghimire 等，2004）。例如，Kiniry 等人（1990）和 Martin 等人（1993）对作物生长子模块进行了评价；Edwards 等人（1994）和 Purveen 等人（1997）对水土侵蚀子模块进行了评价；Bullock 等人（1998）对用加拿大阿尔伯塔省南部的数据对风蚀模块进行了评价和改进。

在模型的验证上，Chung 等人（2000）通过对比 EPIC 模型模拟的明尼苏达州三种作物轮作方式下地下水径流量、硝酸盐损失量、产量和实际值之间的差异，来验证和优化模型。Albert 等人用来自内布拉斯加州米德的实测气温、降雨、太阳辐射的数据对 EPIC 模型计算太阳辐射的方程进行了校准；Benson 等人（1995）和 Rao 等人分别对模型中计算土壤水分平衡模块进行了验证和研究。

单点 EPIC 模型的应用

EPIC模型设计的最初的目的是评价土壤侵蚀对土地生产力的影响，经过几十年的发展，EPIC 模型已经在土壤侵蚀、作物估产、环境保护、气候等领域得到了应用。

土壤侵蚀是指地球表面的土壤及其母质受水力、风力、冻融、重力等外力的作用下，在各种自然和人为因素的影响下，发生的各种破坏、分离、沉积等过程导致土壤肥力下降、生产力降低、生态环境恶化的现象。保护性耕作能有效地降低土壤侵蚀强度和侵蚀量，国外有许多学者在这方面做了大量的研究，他们利用EPIC模型计算不同种植方式下和灌溉措施下的产量和水土流失量，以便优化出合理的种植方式，使得水土侵蚀量最少。由于有些影响作物产量的其它因素并没有考虑到或者仅仅进行了统计分析和专家知识推理，还很难对它们实现动态模拟和预测，并且有些涉及到水、氮因子的很多公式仍然是经验统计公式，这些都在一定程度上影响模型在区域上的应用和精度（Benson等，1995；Chung等，1999；Edwards等，1994）。

EPIC 模型对作物产量的估计是建立在积温学说和作物生长分析法之上的。积温学说认为作物需要一定的温度总量才能完成其生活周期，作物生长分析法是以植物干物质增长过程为中心进行研究的。许多国家已经应用 EPIC 模型用于小麦、玉米、向日葵、大豆等作物的估产（Cabelguenne 等，1990；Cavero 等，2001；Cavero 等，2000；Fan 等，2000）。许多结果表明，EPIC 模型模拟长期作物产量的精度较高，短期模拟作物产量的精度还有待提高。这是因为，EPIC 模型本身和其

中有些计算公式有其特定的环境条件, 在应用到具体问题计算的时候也存在很大的不确定性; 其对土壤水平衡方面和其在旱季和生长季的早期对作物的影响估计的精度不够, 这些也影响模型在估产时的精度。而长期模拟时, 系统各部的误差有可能相互抵消, 从而具有比较满意的精度。

由于在农业活动中广泛地使用化肥、农药、除草剂等, 农田、牧场、柑桔园等地下径流、侧流等非点源污染对环境潜在的影响是很大的。预测非点源污染强度是一个很难解决的问题, 有许多研究者使用EPIC模型来估计施用氮、磷肥之后, 从径流中损失量, 评价水体水质, 以优化种植制度, 以使对环境污染较少, 以达到解决农业环境污染问题, 得到比较满意的结果 (Chung等, 2001; Fortin等, 1999)。

EPIC 模型在气候变化对农业生产的影响方面也较多成功应用 (Easterling 等, 1998; Easterling 等, 1997; Rosenberg 等, 1995)。例如, 可以利用气候变化来驱动影响评价模型来评价作物产量和水资源, 然后把水资源和作物需水量联立起来以便鉴别哪个区域水分供给的变化会对作物产量的影响最大。Rosenberg (1995) 应用 EPIC 模型来预测气候变化对作物生产力的影响。

EPIC 模型与“3S”技术相结合在大区域上的应用

EPIC 模型本质上是一个单点模型, 其假设在其所研究的区域内气候、土壤、作物和田间管理都是均一的。当研究区域较大时, 人们可以把研究区域分成多个单独均一地块, 然后, 逐一进行模拟, 最后再行累加, 得到区域的结果。例如, Tan 和 Shibasaki (2003) 通过结合 EPIC、GIS 和 IE (Inference Engine) 把 EPIC 模型扩展到区域至全球。Priya 和 Shibasaki 在 EPIC 模型的基础上发展了空间 EPIC 模型, 可用于区域模拟。利用 EPIC 与 GIS 相结合进行的区域研究工作还很多。这此研究与探索在一定程度上突破了 EPIC 模型要求均一化的单点限制, 拓展了 EPIC 模型的应用范围。但是这种作法也存在着一些问题, 主要包括: 数据准备的工作量过大; 由于没有考虑各均质单元间的空间相互作用过程, 可能带来精确度降低的问题等。针对这些问题, 90 年代以 EPIC 模型为基础, 开发了 APEX (The Agricultural Policy/ Environmental eXtender) 和 SWAT (Soil and Water Assessment Tool), 分别适用于小流域和大区域的作物生长模拟。这些模型的出现都很好地解决了由于研究面积较大而带来的问题。

EPIC 模型进行区域模拟精度受到输入数据精度的影响。成功运行 EPIC 模型需要大量的输入数据, 对于大多数站点来说, 数据的获取有一定的难度。如何利用遥感信息反演地面参数数据, 建立遥感—作物生长复合模型, 成为解决数据短缺的一个有力的方法。宇振荣等人 (1994) 利用遥感信息估算的地面植物冠层温度与大气的温度之间的温差, 进而计算该时间作物实际蒸腾和水分胁迫系数, 将该系数带入作物生长模拟模型中, 实现区域水平上的作物产量差分析、产量估测, 取得了很好的效果。Cocu 等人 (1999) 基于 SAR 一致干涉测量影像与作物高度具有一定的函数关系, 利用 SAR 图像实时反演作物高度来提高 EPIC 模型的精度。遥感与 EPIC 模型及其后继者 (包括 APEX 和 SWAT) 结合, 是未来应用的一个重要发展趋势。

1.4.2 国内研究进展

国内应用 EPIC 模型起步较晚, 大部分的研究也是基于应用方面的研究, 但是也取得了相当大的进展。

王尔大、程序等人 (2003) 在旱作农区轮作和留茬处理方式对风蚀的影响—应用 EPIC 模型

进行模拟和分析的武川案例一文中应用 EPIC 模型来评估其改进轮作和残留秸秆处理方式对风蚀的影响,并且对模型中的一些参数做了相应的修改,取得了很好的效果,为减少风蚀提供了一种很好的方法。

王宗明和梁银丽(2002)在应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试一文中应用 EPIC 模型来估算黄土塬区作物生产潜力,得出 EPIC 模型经过修正后,在正常年份模拟值较为精确,在干旱年份对作物、土壤等参数的修正方法需要进一步的探讨。

黄元仿等人在黄淮海平原农田水、氮优化管理文中利用 EPIC 模型中的土壤水、热、溶质运移动力学方程,结合地理信息系统的方法(ARC/INFO),获得了研究区域内六类主要质地、不同降雨年份、冬小麦-夏玉米轮作条件的较优水、氮处理。

李军等人(1997)在 EPIC 模型中农田水分运移与利用的数字模拟一文中结合现有气象数据、土壤资料和作物参数资料,对 EPIC 模型中农田水分运移和作物水分利用全过程进行系统动力学模拟和预测研究,为数字农业中农田水分精确管理决策提供了依据。

辛晓平等人着眼于当前国家草地建设和退耕还草中牧草种植的需要,应用 EPIC 模型来模拟草地生产过程,进而优化草地种植、收获管理的各个步骤,同时考虑牧草生产和生态,在研究上与国际先进水平同步。

综上所述,EPIC 模型由于自身参数需求相对比较简单、较准确地模拟了作物生长过程,并且很好地考虑了其它因素和气候变化对作物产量的影响,模拟精度也较高,因此被广泛地应用于诸多领域。尤其在农作物产量的估计和水土侵蚀量的计算方面,国外做了大量的研究,取得了很好的成果。这些结果对于国家合理政策的制定提供了有力的依据。

1.5 研究目标、研究内容和研究方法

1.5.1 研究目标

为满足农作物估产业务化运行的要求,特别是对冬小麦单产估计的需要,本文是在国家 863 估产项目和农业部业务估产系统项目的支持下,在冬小麦主产区内的典型区内研究 EPIC 模型用于估计栾城生态实验站冬小麦产量估计的精度,并探讨 EPIC 模型与遥感数据相结合应用于黄淮海平原冬小麦产量估计的可行性,为其它模型应用于产量估计奠定基础。

1.5.2 研究内容

(1) 黄淮海平原冬小麦生理生态参数的确定

本文旨在得出一套适用于黄淮海平原的小麦生理生态参数,在输入多年的气候资料、土壤数据、田间管理数据之后,应用 EPIC 模型不仅可以快速、准确地估算出某地某作物的产量,而且动态地预测作物长势情况。

(2) 优化种植结构和种植决策,更好地指导农业生产

经过本文的研究,确定出对产量影响较大的重要输入数据或参数,并能应用 EPIC 模型对品种、播种期、密度、施肥量等田间管理措施进行优化决策,确定最优的作物栽培方案,更好地指

导农业生产，为达到低投入、高产出提供依据。

(3) 遥感数据与 EPIC 模型相结合应用于黄淮海平原冬小麦产量估计可行性分析

在大面积估产中，由于数据缺乏，使得 EPIC 模型很难真实地模拟农业田间的实际作物产量，在本文中探讨遥感参数用于 EPIC 模型的可能性，以及如何利用遥感信息反演地面参数数据，建立遥感—作物生长复合模型，从而解决由于数据缺乏所带来精度不高的问题。

1.5.3 研究方法

本文首先对 EPIC 模型进行模型校正，实现模型的本地化，并应用于栾城生态实验站冬小麦估产的研究，根据实测产量数据，对模型进行了参数校准、部分参数的灵敏度分析等工作；然后对 EPIC 模型进行了空间化，使其能够应用于大区域估产的研究中；最后探讨了 EPIC 模型应用于黄淮海平原冬小麦产量估计的可行性。

1.6 总体技术路线

本篇论文分两个阶段完成：单点 EPIC 模型验证和黄淮海平原冬小麦产量估计可行性分析（图 1—2）。首先要进行相关数据的搜集和整理，这里包括应用 EPIC 模型的站点数据（站点经纬度、高程、土壤类型等）、运行 EPIC 模型所需的气象数据、土壤数据、小麦生理生态数据、作物田间管理数据等和验证 EPIC 模型所需的长期的实际产量数据、水土侵蚀数据等，对原始产量数据进行分析，初步得出产量变异的原因，为以后进行的灵敏度分析做准备；其次，把站点数据、气象、土壤和作物田间管理等数据输入到 EPIC 模型中去，并且针对黄淮海平原，参照有关的文献，对小麦生理生态参数进行参数校准，运行 EPIC 模型，得出模拟产量值；再次，对模拟产量和实际产量做回归分析，评价模型的精度；接着，对模型进行参数验证，使模型的精度达到预定的要求，为空间 EPIC 模型的精度能达到业务运行的水平提供保障，并进行灵敏度分析，得出哪些输入数据或参数对产量的影响较大，一方面能够提高模型最终模拟精度，另一方面为能更好地指导农业生产，达到低投入、高产出提供依据；本文在单点对参数和模块校准的基础之上，对 EPIC 模型进行了修改，使其能够应用于大区域冬小麦产量估计中。对不同数据格式的数据进行处理，转换投影和空间分辨率，使数据具有相同的覆盖区域、格式等。输入运行空间 EPIC 模型所需要的数据，并运行空间 EPIC 模型，对模拟出来的产量结果以县为单位进行统计，把模拟结果和实测结果进行对比分析，以探讨遥感数据应用 EPIC 模型中估计黄淮海平原冬小麦产量可行性。技术路线图如下：

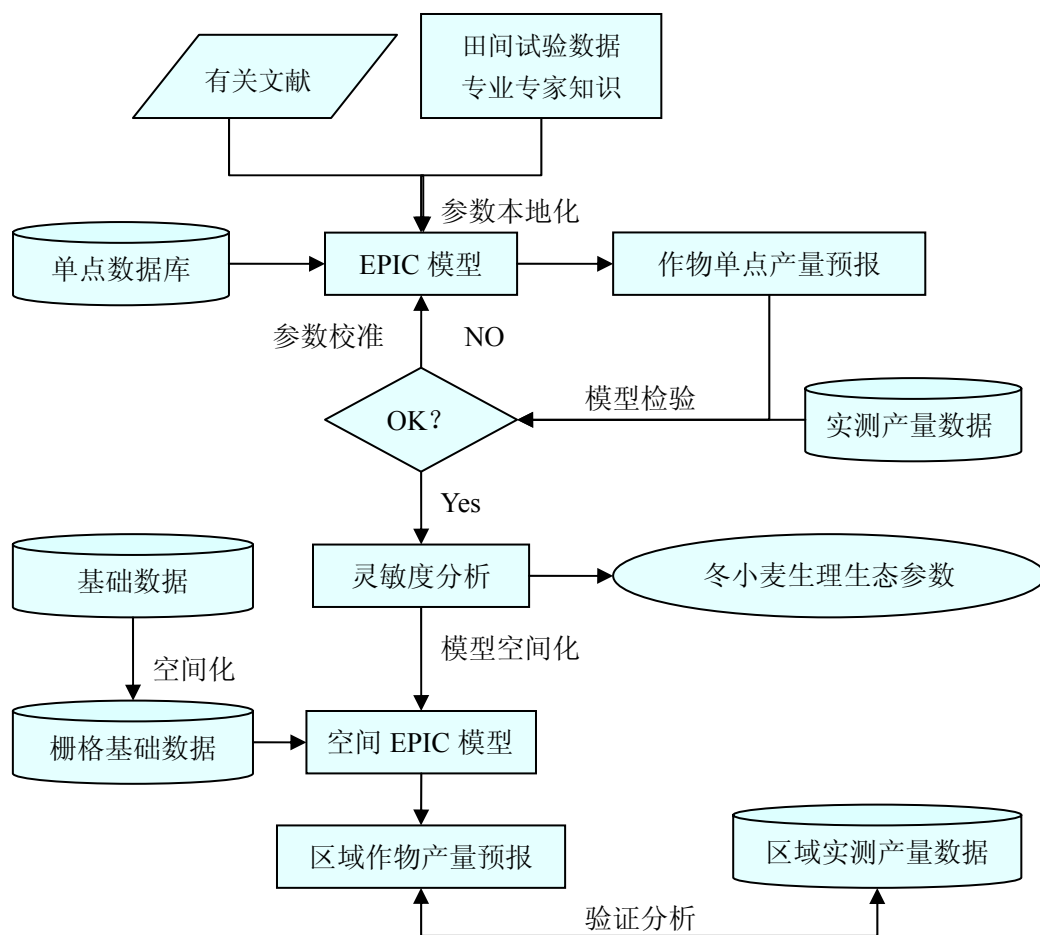


图 1—2 技术路线流程图

Figure 1-2 The Flowchart For the Whole Research

第二章 研究区域和研究方法简介

2.1 研究区域简介

本研究的思路是在单点研究的基础上向区域研究拓展。根据黄淮海地区不同气候生态区冬小麦生长发育特点,选择河北栾城生态实验站(北纬 $37^{\circ}50'$,东经 $114^{\circ}40'$)为代表站点,进行单点作物模型调试研究。区域的研究范围在河北省境内,包括石家庄地区、衡水地区和邢台地区,共计45个县市,土地总面积约为 3.1万km^2 。

2.1.1 河北试验区简介

黄淮海平原位于中国北部 $32^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $113^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 之间,包括河北、河南、山东等省,北京和天津地区也是该地区的一部分(图2-1)。该区为洪冲击平原,土地总面积约为 32万km^2 ,属于温带半湿润季风气候,大于 0°C 年积温为 $4200\sim 5500^{\circ}\text{C}$,平均年降雨量为 $500\sim 900\text{mm}$,年积累辐射量为 $5100\sim 5300\text{MJm}^{-2}$,无霜期为 $170\sim 220$ 天,主要的粮食作物耕作制度为冬小麦-夏玉米一年两熟。区域的研究范围在河北省境内,包括石家庄地区、衡水地区和邢台地区,共计45个县市,土地总面积约为 3.1万km^2 。

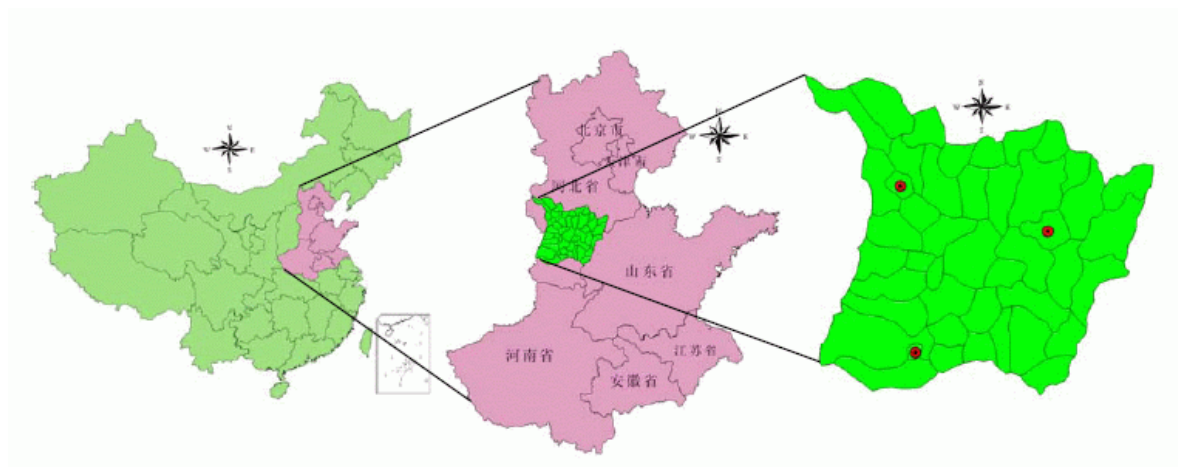


图 2-1 研究区位置图

Fig. 2-1 location of the study area

光照条件

研究区年辐射量为 $5200\sim 5300\text{MJm}^{-2}$,年日照时数约为 $2500\sim 2700$ 小时,并由北向南递减。该区3-5月光照条件好,温度回升快,相对湿度较低,冬小麦光合效率高。

温度条件

研究区年平均温度为 $12\sim 14^{\circ}\text{C}$,最冷月均温 $-4\sim -6.5^{\circ}\text{C}$ 大于 0°C 年积温为 $4800\sim 5200^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温约为 $4400\sim 4600^{\circ}\text{C}$,热量条件可满足冬小麦-夏玉米一年两熟的要求。本区气温温和,无霜期为 $109\sim 205$ 天,冬季温度基本可以保证冬小麦安全越冬的要求。

水分条件

研究区平均年降水量 500~600mm, 且由北向南逐渐增多。小麦生育期期间降水量为 160~210mm, 其中冬季降水 6~20mm, 占全年降水的 2%左右, 春季降水 40~80mm, 约占全年降水的 10%。

气象灾害

研究区内灾害频繁。主要灾害时春旱及干热风等。其中春旱频率最高, 危害范围大。影响冬小麦生育期发育, 影响冬小麦穗粒数。干热风时冬小麦灌浆、乳熟时期出现的一种西南风, 加剧冬小麦植株蒸腾, 造成水分失调, 茎叶凋萎, 籽粒干瘪, 从而影响小麦产量。

总之, 本区的气候资源特点是: 光热资源较丰富, 可满足冬小麦—夏玉米一年两熟作物的需要, 且具增产潜力; 光、温、水同季, 有利于冬小麦生长发育; 降水季节分配不均, 旱涝灾害频繁。

地形/地貌条件

地形/地貌条件对农业生产具有重要的影响, 是从事农业生产的基础条件。随着地貌类型、地貌部位的不同, 水热条件、土壤、植被、土地利方向合农业生产水平等情况都会发生有规律的相应变化。黄淮海地区的主要地貌类型有山地、丘陵、山前洪冲击平原合洪冲低平原及滨海平原。研究区域主要位于太行山山麓平原和海河冲击平原。

太行山山麓

沿太行山山麓下部分布, 地势微倾且平坦, 土层深厚, 排水流畅, 土壤肥沃, 质地多位壤土, 耕性较好, 地下水充足, 具备发展农业生产的优越条件, 是农作物集中分布且高产稳定的地区。

海河冲击平原

在太行山山前平原的下部, 由海河等水系在下游的地上河床多次改道形成, 海拔较低, 地势平缓, 坡度小 (1/5000~1/10000), 地下水位高, 排水困难, 土壤质地过砂或过粘, 旱、涝、盐碱灾害频繁发生, 影响农业生产。虽然作物分布广泛, 但是长势不均匀, 产量过高, 但是通过多次海河治理, 农业生产条件得到改善。

土壤条件

研究区内的土壤类型主要有褐土和潮土。

(1) 褐土: 处于山前平原地带, 土层深厚, 土壤多为壤质, 有机质含量在1%以上, 土壤结构较好, 保水保肥能力强, 是进行农业生产较适宜的土壤类型, 一般为高产土壤。研究区内分布的褐土亚类主要是潮褐土。

(2) 潮土: 分布于低平原区, 土层深厚, 土壤质地和土壤水文状况随地形而异, 岗地多为砂土和砂性土, 二坡地多为轻壤和砂壤, 水分条件较好, 有机质含量一般在1%以下, 近些年地下水位大幅度下降, 耕地主要通过抽取地下水灌溉, 旱情对作物生产影响较大。研究区内的潮土亚类主要是潮土亚类、脱潮土和盐化潮土。其中盐化潮土分布较广, 限制了作物根系对水分、养分的吸收, 是生产能力较差的土壤。近些年, 由于地下水位持续下降, 土壤盐化威胁大大减轻。

2.1.2 栾城简介

栾城实验站位于石家庄市栾城县城东, 北纬37° 50', 东经114° 40'。图2—3为栾城实验站地

理位置图。海拔高度为50.1米，主要土壤类型为潮褐土，属中国东部暖温带半湿润季风气候。主要以冬小麦—夏玉米为轮作方式。栾城独特的地理位置和适宜的气候，华北山前平原的典型代表（隋鹏等，2006）。

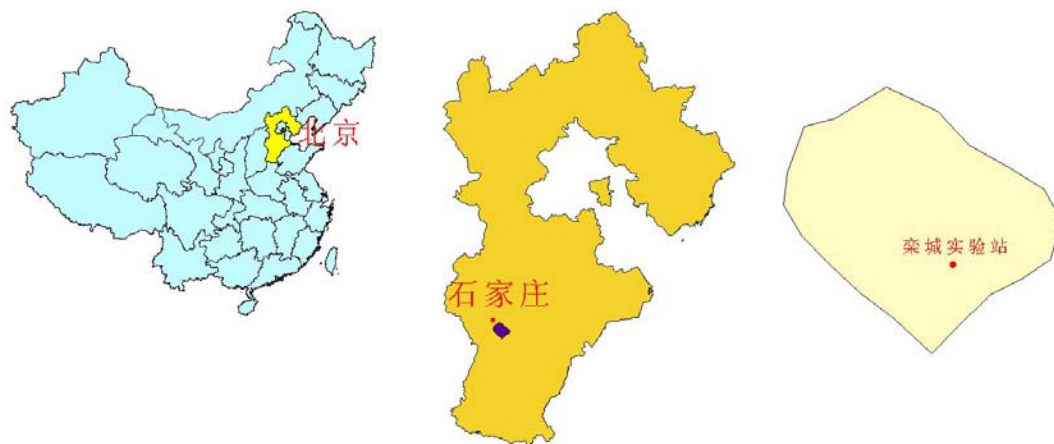


图 2—2 栾城实验站地理位置图

Figure 2-2 Location of Luancheng Ecological Experimental Station

地理位置

栾城县位于冀中平原西部，河北省西南部，省会石家庄东南方，为石家庄郊县。境域介于北纬 $37^{\circ}47'34''\sim 38^{\circ}01'07''$ ，东经 $114^{\circ}28'55''\sim 114^{\circ}47'35''$ 之间。总面积 345 平方公里，石家庄市规划区内占栾城 53 平方公里。县境东邻藁城市，南接赵县，西靠元氏县、鹿泉市，北连石家庄市、正定县。县城距省会石家庄市 20 公里，北距首都北京 280 公里。京广铁路、京深高速公路、107 国道和 308 国道纵贯县境，省会南二环和规划中的南三环路横穿县境北部，省级、县级和乡村公路四通八达，连结成网，交通便利，区位优势。

地质地貌

栾城县属华北地层大区，黄淮海平原分区，冀中地层小区的最南部，境域均由第四纪地层覆盖。大地构造位置属华北地台区的河淮台向斜与山西台隆的过渡地带。太行山前断裂从县境内通过，横跨临城至元氏单斜、柏乡至赵县凹陷两个 III 级构造单元。另有高迁~廿里铺、马村~苏邱、元氏~陈村断裂等，控制了元氏县殷村煤田向东部的延伸、分布与埋藏条件。

栾城晚元古代曾为浅海。晚元古代后期变为陆地。后时为浅海，时为陆地，形成滨海沼泽相含煤地层。二迭纪至三迭纪为陆相冲洪积盆地，接受了巨厚的红色砂泥岩沉积。从侏罗纪开始，造山运动加剧，高邑~藁城断裂形成，西部上升，东部下降，并伴有火山活动，无极县火山爆发，形成近千米厚的火山熔岩，波及栾城。从新第三纪开始，栾城境域全部处于地壳运动沉降区，接受了厚达千米以上的冲洪积地层，形成今日的山前倾斜平原。

栾城属太行山东麓山前倾斜平原的南部，由滹沱河洪积冲积扇南缘、槐沙河洪积冲积扇的北部及其扇间洼地所组成，地势自西北向东南缓缓倾斜，海拔 45~66 米，坡度一般为千分之一，地势平坦。地貌形态可划分为条形波状高地与低地两种，走向西北~东南，相对高差 1~2 米。自东向西有郃马~南高、楼底~小梅、窦姬~西营三条波状高地，冶河、洹河两条波状低地。

水文

栾城属太行山前倾斜平原水文地质区,地下水为第四系孔隙潜水和承压水,底板埋深 4~380 米,有 4 个含水组,15~26 个含水层,含水层厚 2~20 米。地下水岩性以含砾石粗~中粗砂为主,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{Cl-CaMg}$ 为主。

气候

栾城县位于我国东部季风区,属暖温带大陆性半湿润季风气候区。总的气候特征为:四季分明,阳光充足,春季干燥多风;夏季炎热多雨;秋季昼暖夜凉,初秋阴雨稍多;冬季寒冷寡照,雨雪稀少;灾害性天气较多。

栾城县春、夏、秋季以南风为主,位于石家庄的上风向;冬季以偏北风为主,位于石家庄的下风向。全年平均气温 12.3℃,平均年有效积温 556℃,无霜冻期 190 天左右,大于等于 0℃的积温为 4713℃,大于等于 10℃的活动积温为 4220℃,多年平均降雨量 485.7mm,年平均日照百分率 61%,年太阳辐射为 130.5 千卡/平方厘米,全年日照时数为 2850h,区域内雨热同期,最大冻土深度 52cm。

栾城实验站独特的地理位置和适宜的气候,为华北山前平原高产农区的典型代表,本站主要从事资源节约农业生态系统的结构、功能和高产、优质、高效优化模式,提高系统生产力、稳定性、抗逆性等方面的研究,配有气象和遥感观测铁塔、水分蒸散装置、水分观测井、大型土柱、太阳辐射观测仪、土壤原状溶液采集器等先进设备,自 1993 年建站起,已经在其所研究的方面取得了长期的、大量的田间实测资料,这些数据有利于提高 EPIC 模型估产的精度,为能更准确地预报作物生长状况和产量提供了保障。

2.2 EPIC 模型简介

20 世纪 50—60 年代,以美国农业部研究局(USDA-ARS)系统的国家土壤侵蚀研究实验室(NSERL)为首的研究机构开发了世界上第一个土壤侵蚀预报方程—USLE(Universal Soil Loss Equation),该模型在径流计算和土壤侵蚀预报方面发挥了重要的作用。但是因为该模型所用数据主要是来自美国落矶山脉以东地区,仅适用于平缓坡地,其后科学家们在 USLE 的基础上派生出很多模型,其中的一个模型就是 CREAMS 模型(EPIC 模型的前身)。

80 年代美国农业部研究局为了适应国会通过的“水土资源保育法”(Soil and Water Resources Conservation Act, RCA)后的形势需要,决定对全国水土资源保护的现状进行总体评估,而组织了多学科各方面的科学家,由 Williams 和 Sharpley 为首的 22 个知名科学家及工程师在 CREAMS 模型的基础上于 1984 年设计并研发了 EPIC 模型。

EPIC模型的全称是Erosion Productivity Impact Calculator(侵蚀—生产力影响计算模型),后改名为Environmental Policy Integrated Climate(整合气候的环境政策模型),是20世纪80年代中期由以J. R. Williams为首设计和开发出来的。整个程序由FORTRAN语言编写而成,在 DOS环境下运行。EPIC模型是一个整合的模型,图2—4为其系统关系图,计算产量的流程图见图2—5。

EPIC 模型是由水文学、气象、土壤侵蚀、营养物质循环、土壤温度、作物生长模型、作物与土地的管理、经济 8 个模块组合而成的,模型设计最初的目的是用它来评价土壤侵蚀对土地生产力的影响,后经过 20 多年的发展,EPIC 模型已经成为农业政策制定的一个有力的决策支持工具。

除了上述主要模块外，EPIC 模型还为一些过程提供了可选的选项，例如：潜在蒸散量的计算公式就有五个；有六个计算公式是用来计算侵蚀—沉淀的量；对于最大径流率的计算，也有两个可选的计算公式，用户可以根据地域和土壤等情况，选择适合此地域的计算公式，以便更好地提高模型适用性。

EPIC 模型是一个农田尺度的单点模型，该模型假设在模型所模拟的面积内土壤、气候、水文、农业管理等参数在水平方向上是一致的。EPIC 模型能够以每天为时间步长模拟多种作物的产量，还可用于作物生产潜力模拟、作物栽培方案优化、复种与轮作方式的产量模拟及气候变化对作物布局、熟制及产量的影响等方面；EPIC 还能够模拟气候变化、径流与蒸散、水蚀与风蚀、养分循环、农药迁移、植物生长、田间管理、经济效益分析等过程与环节，是选择合理的农业技术、农业生产管理决策等等重要的分析工具。

EPIC 模型是一个多作物通用生长模型，它可以用来模拟大豆、玉米、棉花、花生、向日葵、小麦、水稻等作物（附录 1），以及多种牧草的生长过程和产量。EPIC 模型根据各种植物生理生态过程的共性开发了模型的主体框架，再结合各种植物特定的生长参数和田间管理参数分别进行不同植物的生长模拟。植物与土壤管理模块能够对种植密度、播期、施肥、灌溉、土壤耕作等措施进行模拟与优化，可进行上百年的土壤侵蚀与植物生产力的模拟，评价土地利用方式和种植方式对土壤侵蚀与植物生产力的影响。

在共享应用方面，EPIC 模型，包括编译后的可执行程序 and FORTRAN 源代码、技术文档，都是向全球研究与应用人员开放使用的。研究人员可以根据所研究应用目的不同、区域不同，对 EPIC 模型的参数和子模型进行调整，以提高精度模型的模拟和监测，满足需求。这也是该模型在世界上被广泛应用的原因之一。

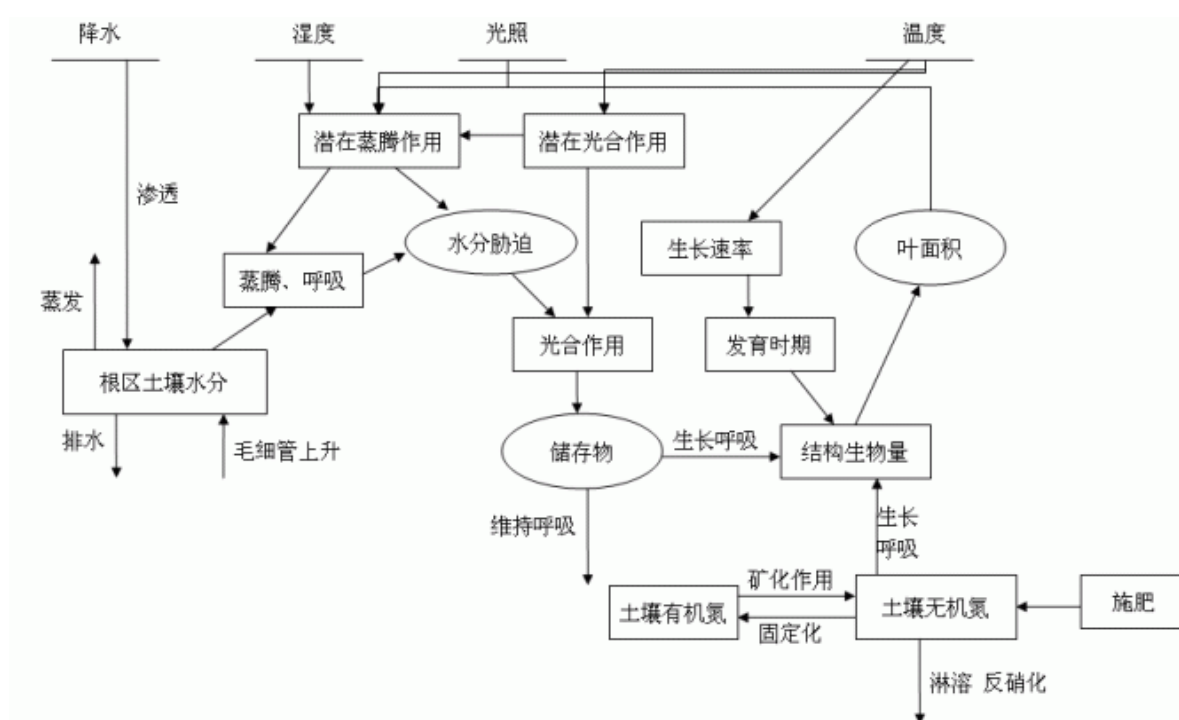


图 2—3 EPIC 模型系统关系图

Figure 2-3 The Construction Figure of EPIC Model

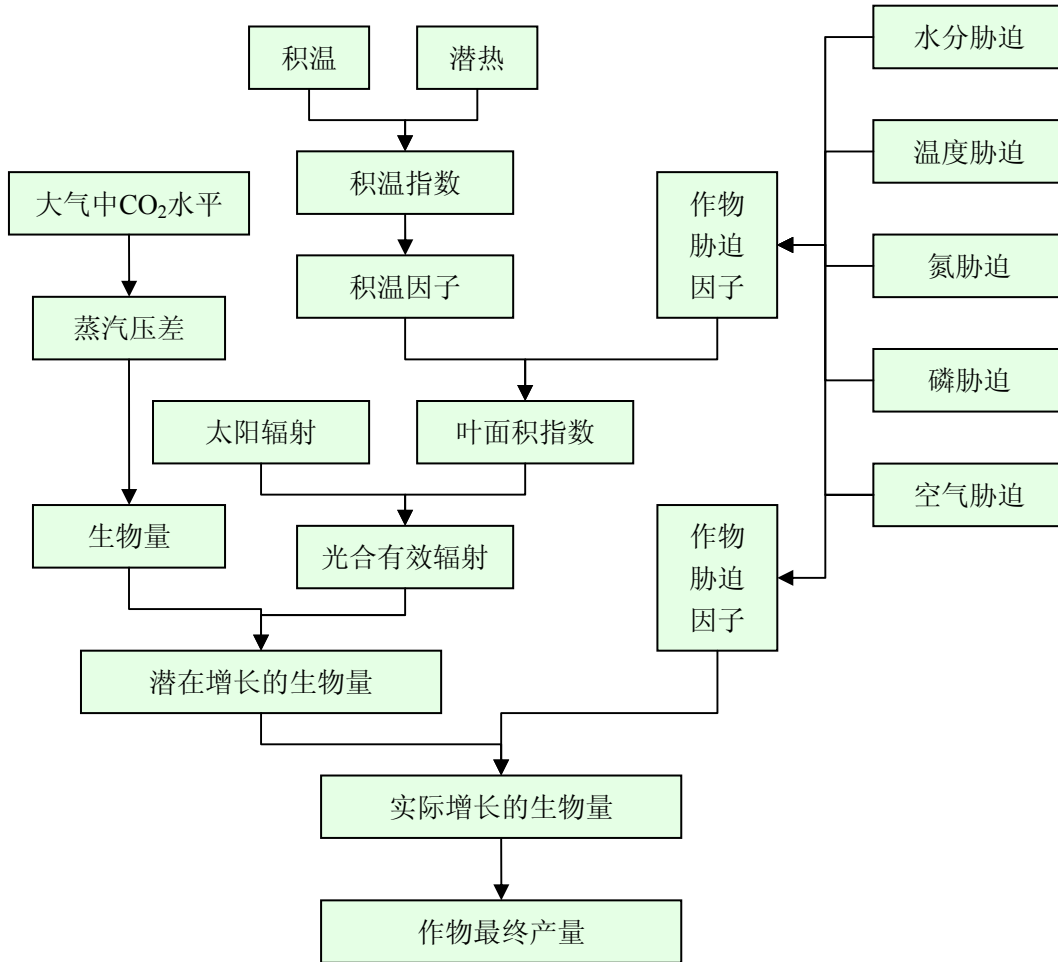


图 2-4 EPIC 模型计算产量流程图

Figure 2-4 The Flow Figure for Yield Estimation of EPIC Model

EPIC 模型是以每天为步长来计算和模拟产量的，其积温是通过 4-1 来计算的。

$$HU_K = \left(\frac{T_{mxk} + T_{mnk}}{2} \right) - T_{bj} \quad HU_K \geq 0 \quad (4-1)$$

其中 HU_K 、 T_{mxk} 和 T_{mnk} 分别代表第 K 天的积温、日最高温度和日最低温度，单位是 $^{\circ}\text{C}$ ， T_{bj} 是对于某种作物 J，作物生长最基本的温度（低于这个温度，作物停止生长），单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。

积温指数(Heat Unit Index)在种植的时候，其值为 0，当作物成熟的时候，其值变成 1，它的计算公式见 4-2。

$$HUI_i = \frac{\sum_{k=1}^i HU_K}{PHU_j} \quad (4-2)$$

其中 HUI_i 是第 i 天的积温指数， PHU 代表的是对于作物 j 从种植到成熟所需要的潜热量。

积温因子（HUF）是使用公式 4-3 来计算的，公式如下：

$$HUF_i = \frac{HUI_i}{HUI_i + \exp[ah_{j,1} - ah_{j,2} * HUI_i]} \quad (4-3)$$

其中 $ah_{j,1}$ 和 $ah_{j,2}$ 是作物 j 的两个参数, HUI_i 是积温指数。

EPIC 模型中使用一个和积温、作物生长胁迫和作物生长阶段有关的函数来计算叶面积指数 (LAI), 从出苗到叶面积开始下降这段时间内, 公式 4-4 和 4-5 被用来计算 LAI 的值。

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI \quad (4-4)$$

$$\Delta LAI = (\Delta HUF)(LAI_{mx})(1 - \exp[5.0(LAI_{i-1} - LAI_{mx})])\sqrt{REG_i} \quad (4-5)$$

其中 LAI 是叶面积指数, HUF 是积温因子, REG 是作物胁迫因子的最小值 (例如: 水分胁迫、温度胁迫、氮素胁迫)。从叶面积开始下降到整个生长季结束, LAI 的计算使用公式 4-6 来计算。

$$LAI_i = LAI_d \left(\frac{1 - HUI_i}{1 - HUI_d} \right)^{ad_i} \quad (4-6)$$

其中 ad_i 是对于作物 j, LAI 值下降的速率, 下标 d 代表某年中 LAI 开始下降的时刻, 单位是天。

光合有效辐射量通常采用比尔定律(Beer law)进行模拟估算, 其计算公式见 4-7。

$$PAR_i = 0.5(RA_i)[1 - \exp(0.65 * LAI_i)] \quad (4-7)$$

其中 PAR 是光合有效辐射, 单位是 MJ/m², RA 是太阳辐射, 单位是 MJ/m², LAI 是叶面积指数, 下标 i 是代表一年的第几天。常数 0.5 被用来转换太阳辐射成光合有效辐射。

某一天增长的生物量可以用公式 4-8 来模拟, 计算公式如下:

$$\Delta B_{pj} = 0.001(BE_j)(PAR_i) \quad (4-8)$$

其中 ΔB_p 是日潜在增长的生物量, 单位是 T/Ha, BE 是能量—生物转换率, 是作物的一个参数, 单位是 Kg*M²/Ha*MJ, 其受到蒸气压差 (VPD) 和大气中 CO₂ 水平的影响。

在作物生长过程中, 如果存在着胁迫 (水分胁迫、温度胁迫、营养物质胁迫、辐射胁迫和空气胁迫) 的话, 潜在生物量的计算公式要修改成公式 4-9, 计算公式如下:

$$\Delta B = (\Delta B_p)(REG) \quad (4-9)$$

在 EPIC 中, 作物最终的产量通过公式 4-10 来计算的, 其计算公式如下:

$$YLD_j = (HI_j)(B_{AG_j}) \quad (4-10)$$

其中 YLD 是最终的产量, 单位是 t/ha, HI 是收获指数, BAG 是地上的生物量。在没有胁迫存在的状态下, 收获指数从种植时候的 0 到收获时候的 HI 期间的增长是非线性的, 其计算公式见 4-11。

$$HIA_i = HI_j \left(\sum_{k=1}^i \Delta HUFH_k \right) \quad (4-11)$$

其中HIA是第i天的收获指数，HUFH是影响收获指数的积温因子。

2.3 模型检验

对模型进行检验，即将其行为与相似条件下真实系统的观测值作比较。可采用如下检验方法：一是将模拟结果与实际结果进行回归分析，检验截距与原点的差距，斜率与1的差距；二是将实际结果与模拟结果按同一时间坐标在图上比较；三是检验模拟与实际值的平均误差。此外，对还没有实际试验结果的模拟值，用一般常识进行主观估测，即专家对模拟结果进行评定的方法（高亮之，1993）。

通过模拟值与实际值的比较进行模拟检验时可通过坐标图比较其随时间进程的差异，但也通常用到统计的方法，如：平均离差，即预测值与实际值之差总和的平均值，反映模型的精度；预测均方差，即预测值与实际值之差平方总和的平均值；标准差，即预测均方差的开平方，反映模拟误差；拟合指数，即1减去预测值与实际值之差的绝对值除以实际值，反映模拟符合程度；偏斜度，即模拟值与实际值无截距回归方程斜率与1的偏差（潘学标，2003）。

如下是比较模拟值与实际值平均偏差的大小的具体方法，这些方法也适用于模型间误差大小的比较（高亮之，1993；Malezieur等，1994）。

- (1) 平均离差（Mean Deviation, MD）是用于模型检验的评判之一：

$$MD = \left(\sum ERR_i \right) / n, n \text{ 为样本数};$$

$$ERR_i = Y_i - X_i, Y_i \text{ 和 } X_i \text{ 为第 } i \text{ 次的模拟值和实测值}。$$

- (2) 平均预测误差（Mean Prediction Error, MPE）用于反映模型的精确度：

$$MPE = \left(\sum |ERR_i| \right) / n$$

- (3) 预测均方差（Mean Square Error of Prediction, MSEP）是比较模型间精确度较好的指标：

$$MSEP = \left(\sum (ERR_i)^2 \right) / n$$

- (4) 标准差（Standard Error, SE）能更直观地反映模拟值与实际值的误差：

$$SE = \sqrt{MSEP}$$

- (5) 直接比较单个模拟值的绝对误差和相对误差：

$$\text{绝对误差: } ERR_i = Y_i - X_i$$

$$\text{相对误差: } RE = ERR_i / X_i$$

第三章 EPIC 模型的验证和灵敏度分析

3.1 数据输入

3.1.1 气象数据

栾城实验站 10 年实测观测气象数据（1993 年—2002 年）包括日最高/最低温度，降水，平均风速，日照时数和日平均相对湿度数据（附录 2）被用来运行 EPIC 模型。对于缺少 EPIC 模型所需要的太阳辐射数据，我们利用日照时数和天文辐射量来计算日太阳辐射值。本文参照翁笃鸣（李克煌，1995）给出的计算太阳辐射公式，具体形式如下：

$$Q = Q_0 * \left(0.130 + 0.625 * \frac{n}{N} \right)$$

华南

$$Q = Q_0 * \left(0.205 + 0.475 * \frac{n}{N} \right)$$

华中

$$Q = Q_0 * \left(0.105 + 0.708 * \frac{n}{N} \right)$$

华北

$$Q = Q_0 * \left(0.344 + 0.390 * \frac{n}{N} \right)$$

西北

图 3—1 太阳辐射计算公式

Fig 3-1 The formula for sunshine radiation

其中 Q_0 —天文辐射量，以每月 15 日的日总量代表

n—每天的日照时数

N—每月平均日昼长度

表 3—1 大气上界辐射月总量

Table 3-1 the monthly solar radiation

（每月 15 日，常数为 1.900，单位为卡/厘米²·日）

月份 纬度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	620	712	806	880	911	916	911	888	834	747	648	595
22	594	691	792	877	917	926	919	889	825	730	624	567
24	567	669	788	874	921	934	926	890	817	712	600	540
26	541	647	764	868	924	941	932	888	806	692	575	512
28	515	626	749	862	926	947	936	886	795	675	550	485
30	488	603	733	855	928	953	940	884	783	654	526	458

32	460	578	715	847	927	958	942	879	770	631	499	430
34	431	552	697	838	926	962	945	875	756	610	473	400
36	404	527	677	827	924	966	947	870	740	588	445	372
37	390	514	668	821	923	967	947	867	732	576	432	358
38	376	501	658	815	922	968	948	864	725	565	419	344
40	349	478	637	804	918	969	947	856	709	543	393	317
42	320	449	615	791	915	970	946	848	692	519	363	288
44	289	422	592	777	909	969	944	839	673	493	334	260
46	262	396	570	763	903	969	942	829	655	469	307	233
48	235	370	547	747	896	969	939	818	635	442	280	207

表 3—2 为栾城实验站 1993 年—2001 年全年和生育期内降水、积温和太阳辐射数据。

Table 3-2 Precipitation、Heat Unit and Radiation data of Luancheng Ecological Experimental Station

a – The whole year; b – the whole growth stage

		降水 (mm)	积温 (°C)	太阳辐射 (J/m ²)
1993	全年 ^a	511.2	1356.7	6056.94
	生育期 ^b	120.6	505.15	3916.09
1994	全年	270.8	1389.75	6050.58
	生育期	150.9	397.7	3778.79
1995	全年	509.7	1143.8	5899.64
	生育期	138.7	434.9	3437.39
1996	全年	774.4	1227.3	5019.48
	生育期	125.5	440.05	3358.86
1997	全年	272.8	1345.2	5420.25
	生育期	139.1	477.9	3374.86
1998	全年	300.4	1482.25	5509.48
	生育期	68.6	483.45	3236.25
1999	全年	366.8	1387.84	4923.46
	生育期	74.8	472.2	3713.86
2000	全年	453.6	1283.2	5764.64
	生育期	100.9	519.84	3548.48
2001	全年	289.8	1379.79	5579.17
	生育期	153.4	416.45	3484.02

3.1.2 土壤数据

EPIC模型需要大量的输入数据来描述土壤属性和质地特性。两类土壤数据是必须的。第一，16 个变量描述被模拟的土壤的一般信息。比如：土壤反射率；初始土壤水分含量；水床最小深度；初始地下水储量等。第二，大约有 20 个参数被用来描述土壤的物理和化学性质。但是其中的一部分在数据缺乏的时候可以使用EPIC模型模拟的值。但是土层厚度 (m)、各层土壤的容重 (t/m³)、土壤剖面中粘粒、粉砂粒和沙粒含量 (%)、土壤PH值、有机碳含量 (%)、CaCO₃含量 (%) 等数据是必须的。本文中栾城生态实验站土壤数据参考中国土壤志 (熊毅等, 1978) 和栾城生态实

验站实测值。表 3—2 为栾城实验站部分土壤数据。

表 3—3 栾城生态实验站部分土壤数据

Table 3-3 A part of soil data of Luancheng Ecological Experimental Station

	PH	CaCO ₃ (%)	有机质 (%)	粘粒 (<0.001mm) (%)	粉砂粒 (<0.01mm) (%)
0~10cm	7.5	7.4	1.06	15.1	31.9
10~40cm	7.7	6.7	0.77	12.5	25.3
40~70cm	7.5	5.4	0.34	13.1	29.8
70~100cm	7.6	2.9	-	17.6	39.0

3.1.3 田间管理数据和产量数据

EPIC 模型需要详细的田间管理数据。这些数据必须具体到各个措施具体的时间、相应的操作措施等。EPIC 模型允许用户模拟复杂的作物轮作，比如：不同作物具有不同时间的播种期、灌溉量、施肥量、除草剂量和收获期等。对于 EPIC 模型，有两种灌溉和施肥措施可以选择：手工设置和自动设置。本文详细的田间管理数据来自于栾城生态实验站。这些数据包括播种期、种植密度、灌溉期、灌溉量、施肥期、施肥量、收获期和收获工具等等。表 3—4 为 2002 年栾城生态实验站田间管理文件。1993 年—2002 年冬小麦实测产量被用来校准和验证 EPIC 模型。表 3—5 为栾城实验站 1993 年—2002 年实测冬小麦产量。

表 3—4 田间管理措施（以 2002 年为例）

Table 3-4 The operation management (take 2002 for example)

耕作日期	管理措施	量
10 月 4 号	灌溉（播种前）	60mm
10 月 6 号	种植	
10 月 12 号	施 N 肥	70kg/ha
10 月 12 号	施 P 肥	60kg/ha
3 月 16 号	施 N 肥	150 kg/ha
3 月 20 号	灌溉	60mm
4 月 15 号	灌溉	60mm
5 月 10 号	灌溉	60mm
6 月 12 号	收获	

表 3—5 栾城实验站 1993 年—2002 年实测冬小麦产量

Table 3-5 the observation yield of winter wheat from 1993 – 2002 at luancheng station

年份	实测产量 (t/ha)
1993	6.2
1994	6.3
1995	6.4
1996	6.6
1997	7

1998	7.1
1999	6.9
2000	6.9
2001	6.9
2002	6.9
平均值	6.72

3.2 EPIC 模型的验证

3.2.1 模拟气象数据模块验证

运行 EPIC 模型需要日气象数据，包括日平均太阳辐射、日平均最高温度、日平均最低温度、日平均风速和日平均湿度。当站点缺少日气象数据的时候，EPIC 模型可以通过输入的月平均气象数据来模拟日气象数据。本文在其他条件相同的情况下（土壤数据、田间管理数据和作物参数数据），对 EPIC 模型模拟日气象数据的精度进行了分析，分析结果如下：

表 3—6 实测气象数据和模拟气象数据下模拟产量对比表

Table 3-6 the observation yield and the estimation yield with simulation climate data

年份	实测产量（t/ha）	实测气象数据下 模拟产量（t/ha）	模拟气象数据下 模拟产量（t/ha）
1993	6.2	6.4	5.4
1994	6.3	7	5.9
1995	6.4	7.1	5.6
1996	6.6	5.2	5.9
1997	7	6.5	6.5
1998	7.1	6.4	6.2
1999	6.9	6.1	5.6
2000	6.9	7.1	5.7
2001	6.9	7.6	7.2
2002	6.9	6.9	5.6
平均值	6.72	6.63	5.96

从上表中我们可以看出，EPIC 模型运用实测气象数据模拟出来的冬小麦产量数据和实测数据较为接近，但是运用月气象数据所得到的模拟产量和实测产量数据有很大的差距，这说明在其他条件相同的情况下，EPIC 模型较低地模拟了气象数据，进一步分析得出，当模型读取日太阳辐射数据时得到的产量结果和读取所有气象数据时模拟结果、实测结果很接近，模型模拟太阳辐射数据时得到的产量结果和运用月平均气象数据时候产量很接近，和实测产量数据差别很大，这说明模型可以比较好地模拟日降水、日最高温度、日最低温度等气象数据，对于太阳辐射数据的模拟要比实测数据偏低。本研究对 EPIC 模型中气象数据模拟模块进行了一些修改，使得 EPIC 模型能够较好地模拟日气象数据。

3.2.2 参数调整

用栾城实验站 1993 年—2002 年的实测产量数据和一些年份的实测冬小麦 LAI 数据对 EPIC 模型进行校准。在参照有关文献的基础上，同时也听取了中国农业科学院和美国 Texas A&M 大学的专家们对作物参数的调整给出的意见。表 3—7 列出了参数校准中的部分主要的参数。作物参数文件各参数的含义见附录 3。

表 3—7 参数校准中部分主要的参数

Table 3-7 A list of some important parameters for parameters calibration

参数名称	参数的意义	参数值
WA	能量—生物量转换因子	35.0
HI	收获指数	0.45
TB	作物生长最适宜温度	15
TG	作物生长最低温度	0
DMLA	最大潜在叶面积指数	6.0
DLP1	作物面积生长曲线参数 1	15.15
DLP2	作物面积生长曲线参数 2	45.95
DLAI	LAI 下降阶段占整个生长季的比例	0.48
RLAD	叶面积指数下降参数	1.0
RDMX	最大根深	2.0

3.2.3 冬小麦产量模拟

表 3—5 列出了栾城实验站 1993 年-2002 年 10 年间实测和模拟的产量数据及相对误差。从表中可以看出 10 年预测平均产量要比 10 年实测平均产量要低，两者之差为 0.05t/ha，相对误差为 -0.74%，各年的相对误差在-5.80%~2.90%之间变化，预测产量的均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）为 0.18t/ha，达到实测产量平均值（6.72t/ha）的 2.68%，这个误差范围要低于 EPIC 模型通常误差范围之内（15%）（Cabelguenne 等，1990）。

表 3—8 模拟产量和实测产量对比表

Table 3-8 The relative error between the estimated and actual yields

年份	实测产量 (t/ha)	模拟产量 (t/ha)	相对误差 (%)
1993	6.2	6.1	-1.61
1994	6.3	6.2	-1.59
1995	6.4	6.1	-4.69
1996	6.6	6.5	-1.52
1997	7	7.1	1.43
1998	7.1	7.3	2.82
1999	6.9	6.5	-5.80
2000	6.9	6.8	-1.45

2001	6.9	7	1.45
2002	6.9	7.1	2.90
平均值	6.72	6.67	-0.74

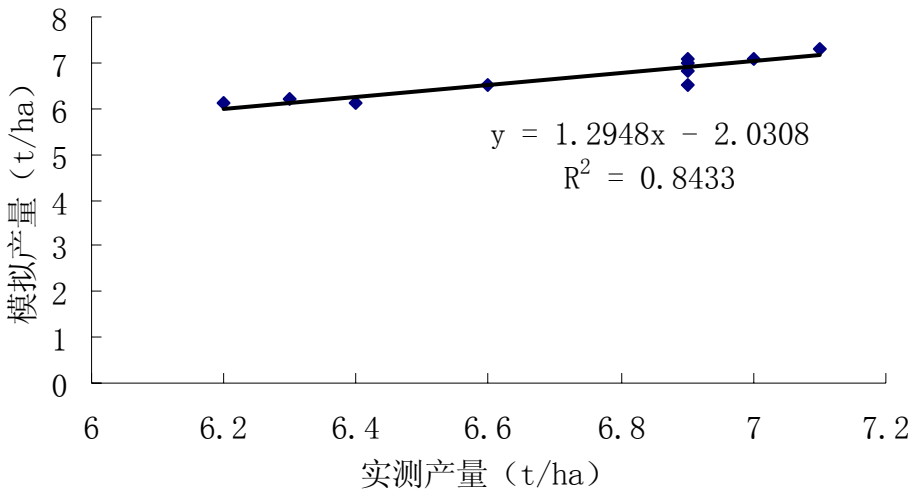


图 3－2 模拟产量和实测产量散点图

Fig 3-2 The scatter figure of estimated yields and actual yields

对模拟结果和实测结果进行线性的回归分析，结果见表 3－9 和表 3－10。

表 3－9 回归分析的 ANOVA

Table 3-9 Liner regression's ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1.536	1	1.536	43.041	.000
Residual	.285	8	.032		
Total	1.821	9			

从上表中可以看出，回归的均方(Regression-Mean Square)为 1.536,剩余的均方(Residual-Mean Square) 为.285, F=43.041, P=0.000, 线性回归分析通过显著水平为 0.05 的F检验，说明模拟产量和实测产量具有线性关系。其相关系数（R）为 0.918，决定系数（R²）为 0.8433。

对回归直线的斜率和截距进行 t 检验，结果如表

表 3－10 直线斜率和截距的 t 检验

Table 3-10 t test of line's slope and intercept					
Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		t	Sig.
B	Std. Error	Beta			
-2.031	1.328			.153	.165
1.295	.197	.918		6.561	.000

从表中可以看出，回归系数为 1.295, 常数项为-2.031, 回归系数 t 检验的 t 值为 6.561, P=0.000<0.05, 说明回归系数有显著意义。得到直线回归方程为：y=1.295*x－2.031。

表 3－8 为不同模型和不同作者估产最终精度值。从表中可以看出，大部分结果的决定系数

R²为 0.7 左右，相对误差范围在 5%~6%之间，略差于本文的结果。这说明EPIC模型应用于栾城生态实验站冬小麦估产是可行的。

表 3-11 不同模型和不同作者估产最终精度值

Table 3-11 the final precision of different model researched by different authors

模型	作者	模拟作物	年份	相对误差范围	R ²
SOYGRO	赵军	大豆	1999		0.65
ALMANAC	高晓云等	冬小麦	2003		0.702
ALMANAC	李军	冬小麦、玉米	1997	±6%	
CERES-Wheat	江敏等	冬小麦	1998		0.77~0.98
CERES-玉米	陈怀亮等	玉米	1997	5.6%	
EPIC	Cabelguenne 等	冬小麦	1990		0.68
EPIC	Priya 等	冬小麦、玉米	1999		0.72
EPIC	Roloff 等	玉米、大豆	1997		0.81

3.3 灵敏度分析

3.3.1 灵敏度分析简介

灵敏度分析是为了更好地理解对于产量那些参数或者输入参数对于产量起着重要的作用。本文中，灵敏度分析采用灵敏率（Sr）来评价，其计算公式如下：

$$S_r = \frac{(P_o - P_c)}{(P_o * F)}$$

式中： P_o—原始参数对应的 10 年平均产量。
P_c—参数变化之后对应的 10 年平均产量。

F 的计算公式如下：

$$F = \frac{(I_o - I_c)}{I_o}$$

式中： I_o—某参数的原始值，
I_c—某参数变化之后的值。

由式中可以得出，当|S_r|=0 时，参数的变化对产量没有任何影响，此参数对产量没有任何的作用，当|S_r|在 0 到 0.5 之间变化时，产量受此参数的变化影响不大，当|S_r

3.3.2 灵敏度分析

本文在参数校准的基础上，参考部分参考文献并听取中国农业科学院和美国 Texas A&M 大学的专家们关于灵敏度分析参数的意见，主要对以下的参数进行了灵敏度分析：作物生理生态参数（WA、HI、DLAI、DMLA、RLAD、RDMX、HMX、TB、PHU）、土壤属性参数（SALB）、气

候输入数据（Tmax、Tmin、PRCP、RAD）。本文中参数的变化量除降水之外都采用相同的变化幅度 10%，对于降水，其变化幅度为 20%。分析结果见表 3—12：

表 3—12 灵敏度分析表

Table 3-12 The table of sensitivity analysis

参数名称	参数的意义	Sr(增加)	Sr（减少）	平均值
WA	能量—生物量转换因子	0.941	0.939	0.94
HI	收获指数	0.992	0.994	0.993
TB	植物生长最适宜温度	0.758	1.511	1.1345
DMLA	潜在最大叶面积指数	0.320	0.368	0.344
DLAI	叶面积衰减占整个生长季的	0.450	1.629	1.0395
百分比				
RLAD	叶面积衰减速率	—0.169	—0.155	—0.162
HMX	最大作物高度	0	0	0
RDMX	最大作物根深	0	0	0
PHU	潜在积温	0.32	8.87	4.595
RAD	太阳辐射	0.88	0.58	0.73
TMAX	最高温度	—1.50	—0.919	—1.2095
PRCP	降水	—0.0085	—0.012	—0.01025
TMIN	最低温度	—0.69	—0.582	—0.636
SALB	土壤反射率	0	0	0

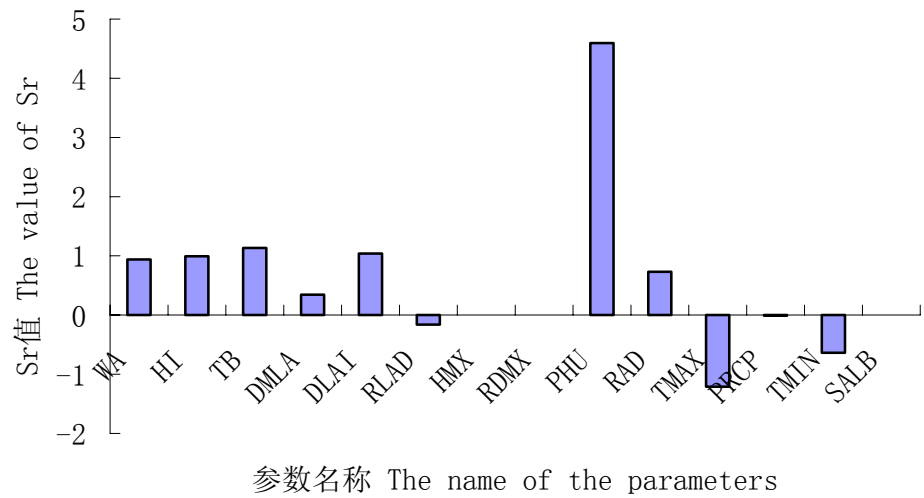


图 3-3 Sr 图

Figure 3-3 The figure of Sr

从上图和上表中可以看出：

1) 对于作物生理生态参数 (WA、HI、DLAI、DMLA、RLAD、RDMX、HMX、TB) 和 PHU 来说, 最终产量随着 PHU、WA、HI、DLAI、DMLA、TB 等参数的变化而同方向变化, 其中 PHU、TB、DLAI、WA、HI 对产量的影响最大, Sr 值分别为 4.595、1.1345 和 1.0395, 说明对于 PHU 来说, 10% 的误差会使产量每年产生 45.95% 左右的误差, 同样对于 TB、DLAI、WA、HI 来说, 10% 的误差会使产量每年产生 11.345%、10.395%、9.41% 和 9.93% 左右的误差, 这些对作物生长敏感的参数需要从田间实验实测而得到。DMLA、RLAD 等参数的 Sr 分别为 0.344 和 -0.162, 其 10% 的误差会使产量每年产生 3.44%、和 -1.62% 左右的误差, 这说明产量受其影响不大, 可以通过模型校准而得到。而对于 RDMX、HMX、SALB 参数, 可以看出其 Sr 为 0, 说明其变化对产量没有影响, 这些参数可以使用模型中的默认值。

2) 对于天气输入参数 (TMAX、TMIN、PRCP) 来说, 最终产量随着其变化而反方向变化, 其 Sr 分别为 -1.2095、-0.636 和 -0.01025。对于 RAD 来说, 最终产量随着 RAD 的变化而同方向变化, 其 Sr 值为 0.73。由于 PRCP 的 Sr 很小, 其 10% 的误差会分别引起产量 -0.1025% 的误差, 其对产量的影响很小, 因此对于大面积区域估产, 可以考虑用遥感数据来反演降水数据, 以解决部分地区数据匮乏的问题。而对于 Tmax、RAD 和 Tmin, 其 Sr 达到了 -1.2095、0.73 和 -0.636, 因此此数据的准确度是影响模型最终模拟结果的精度一个重要的因素。

3.4 情景分析

运行 EPIC 模型需要大量的输入数据, 包括气象数据、土壤数据和田间管理数据等, 但是对于大多数站点来说, 获取这些实测数据存在一定的困难。这就给 EPIC 模型的推广带来了一定的限制。但是运用一些其它的方法可以计算或者反演一些缺少的数据以达到解决数据短缺的问题, 比如: 当缺少太阳辐射数据时, 我们可以用两种方法来计算太阳辐射: 运用日照时数来计算太阳辐射和直接利用 EPIC 模型来模拟太阳辐射。本文对用模拟数据来代替实测数据对产量的影响进行了简单的分析。

3.4.1 模式分析

对 EPIC 模型中一些计算公式和参数进行修改之后, 在栾城进行了四种模式的分析:

实测气象数据、不同田间管理模式下的产量模拟 (模式 A)

实测气象数据、统一田间管理模式下的产量模拟 (模式 B)

模拟气象数据、不同田间管理模式下的产量模拟 (模式 C)

模拟气象数据、统一田间管理模式下的产量模拟 (模式 D)

对这四种模式下模拟产量和实测产量进行了分析和对比, 结果如下表:

表 3-13 不同模式下模型模拟值

Table 3-13 the estimation yield with different input data

年份	实测产量(t/ha)	模式 A (t/ha)	相对误差(%)	模式 B (t/ha)	相对误差(%)	模式 C (t/ha)	相对误差(%)	模式 D (t/ha)	相对误差(%)
1993	6.2	6.1	-1.61	5.2	-16.13	6.8	9.68	5.9	-4.84
1994	6.3	6.2	-1.59	5.6	-11.11	7.5	19.05	6.5	3.17
1995	6.4	6.1	-4.69	6.3	-1.56	7.2	12.50	7	9.37
1996	6.6	6.5	-1.52	5.8	-12.12	4.4	-33.33	7	6.06
1997	7	7.1	1.43	7	0.00	6.4	-8.57	6.7	-4.29
1998	7.1	7.3	2.82	8.4	18.31	6.4	-9.86	7.7	8.45
1999	6.9	6.5	-5.80	7.2	4.35	6.5	-5.80	7.2	4.35
2000	6.9	6.8	-1.45	6.6	-4.35	6.8	-1.45	6.6	-4.35
2001	6.9	7	1.45	7.2	4.35	7	1.45	7.2	4.35
2002	6.9	7.1	2.90	6.6	-4.35	7.1	2.90	6.6	-4.35
平均值	6.72	6.67	-0.74	6.59	-1.93	6.61	-1.64	6.84	1.79

表 3—14 不同模式下线性回归分析表

Table 3-14 the liner regression of different input data

变量	Model	R ²	R ² (adj.)	F	P	RMSE (t/ha)
模式 A 模拟产量	$y=1.295*x-2.031$	0.843	0.824	43.041	0.000	0.19
模式 B 模拟产量	$y=2.568*x-10.665$	0.773	0.745	27.299	0.001	0.47
模式 C 模拟产量	$y=-0.395*x-9.267$	0.022	-0.101	0.178	0.685	0.89
模式 D 模拟产量	$y=0.974*x+0.296$	0.398	0.322	5.283	0.051	0.41

从上表中可以看出：

EPIC模型能够很好地模拟栾城生态实验站冬小麦长势和产量。10 年预测平均产量要比 10 年实测平均产量要低 0.05t/ha，相对误差为 0.74%，各年的相对误差在-5.8%~2.9%之间变化。预测产量的均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）为 0.18t/ha，达到实测产量平均值（6.72t/ha）的 2.68%，这个误差范围要低于EPIC模型通常误差范围之内（15%）。模拟产量和实测产量两者之间的R²为 0.8433，这说明EPIC模型应用于栾城地区进行冬小麦产量估计是可行的。

对于大多数站点数据缺少运行 EPIC 所需数据的情况下，本文分析了运用模拟气候数据和模拟田间管理数据对 EPIC 模型最终模拟精度的影响。从得到的结果来看，模式 B（模拟气候数据，实测田间管理数据）下模型模拟的精度最高，模拟产量和实测产量的相关系数的决定系数达到了 0.7734，10 年模拟产量的平均值为 6.59T/Ha，相对误差为-1.93%，这说明 EPIC 模型能较好地模拟气候数据，当缺少实际日气候数据的情况下，可以考虑用月平均数据来运行 EPIC 模型。但是

由于年模拟产量的相对误差在-16.13%~18.31%之间变化，这说明 EPIC 模型在某些年份对气候数据的模拟过高或过低，这给区域模拟某一年的冬小麦产量时带来了一定的不定因素。

对于运用模拟田间管理数据的模式 C 和模式 D，其模拟的精度不高，线性回归的决定系数分别为 0.0217 和 0.3977，这说明田间管理文件对产量的影响要比气候数据对产量的影响要大，产量模拟最终的精度受田间管理文件的精确度的影响很大。

3.4.2 播种时间，收获日期对产量的影响

1) 播种时间差异对产量的影响

本文为了分析方便，对所有的年份采用了统一的种植制度。分析结果见下表。

表 3—15 不同播种期时模型模拟产量

Table 3-15 the final estimation yield with different sowing date

年份	实测 产量 (t/ha)	615 (t/ha)	715 (t/ha)	815 (t/ha)	915 (t/ha)	1001 (t/ha)	1006 (t/ha)	1015 (t/ha)	1101 (t/ha)
1993	6.2	7.3	7.2	7.9	7.3	6.4	6.2	6	5.9
1994	6.3	7.3	7.4	8.1	7.2	6.5	6.3	6.1	5.9
1995	6.4	7.5	7.4	8	7	6.3	6.3	6.1	5.9
1996	6.6	7.9	8	8.5	7.6	7.1	6.9	6.7	6.4
1997	7	8.2	8	8.4	7.8	7.3	7	6.6	6.4
1998	7.1	7.8	8	9	7.8	7	6.9	6.7	6.6
1999	6.9	7.2	7.3	7.9	7.5	6.7	6.5	6.3	6
2000	6.9	7	7	7.8	7	6.4	6.2	6	5.8
2001	6.9	8.1	8.3	8.9	8.1	7.6	7.2	7	6.7
2002	6.9	7.3	7.3	8.1	7	6.2	6.2	6	5.9
平均 值	6.72	7.56	7.59	8.26	7.43	6.75	6.57	6.35	6.15

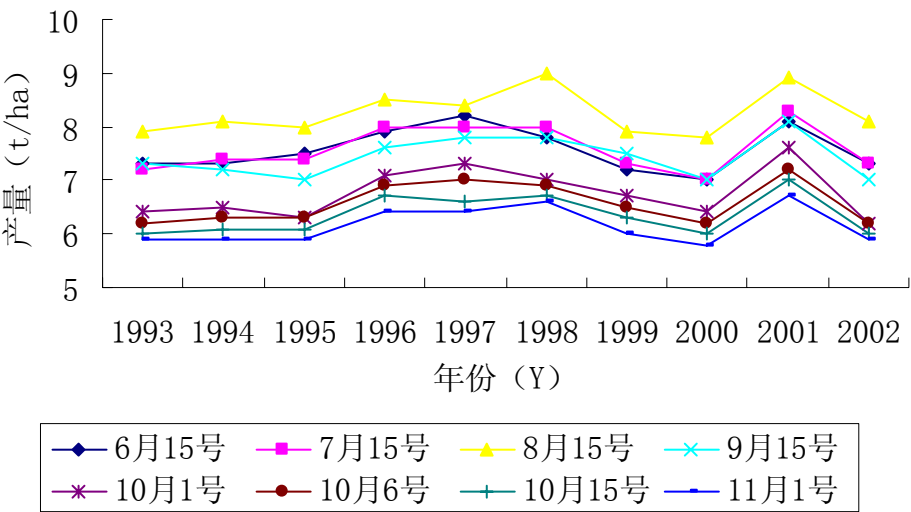


图 3—4 不同播种期时模拟产量图

Fig 3-4 the plot map of estimation yield with different sowing date

从上表和图中可以看出，对于冬小麦来说，当播种日期在 10 月份之后，产量随着播种日期的延迟而减少，这是因为冬小麦在整个生长季中的光、热、水和肥没有达到成熟所需要的数值。当播种日期在 10 月份之前，产量随播种日期的变化是先增大后减小，这与实际情况不符合，这可能是 EPIC 模型中对越冬期冬小麦生长模拟考虑不够，需要进一步改进。

2) 收获日期对产量的影响

表 3—16 不同收获期时模型模拟产量

Table 3-16 the final estimation yield with different harvest time						
年份	615 (t/ha)	601 (t/ha)	630 (t/ha)	730 (t/ha)	715 (t/ha)	515 (t/ha)
1993	6.20	5.22	6.26	6.25	6.25	1.80
1994	5.74	4.08	5.77	5.76	5.74	1.45
1995	5.77	3.83	6.08	6.07	6.08	1.48
1996	5.15	2.39	6.06	6.03	6.04	1.24
1997	6.46	4.70	6.64	6.62	6.64	1.76
1998	6.53	5.35	6.56	6.56	6.56	1.86
1999	6.69	4.94	6.66	6.65	6.66	1.93
2000	6.26	4.51	6.29	6.27	6.28	1.71
2001	5.76	4.71	5.72	5.71	5.76	1.63
2002	6.98	5.90	6.94	6.92	6.94	2.16

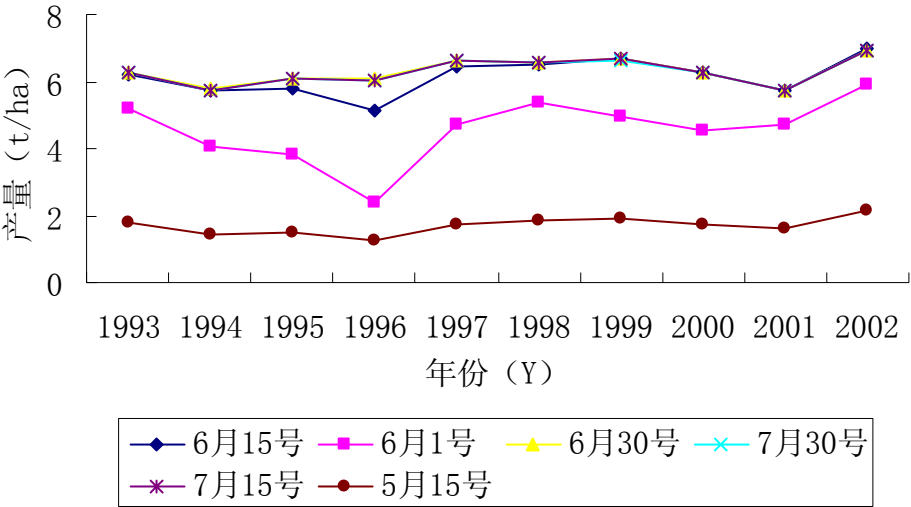


图 3—5 不同收获期时模拟产量图

Fig 3-5 the plot map of estimation yield with different harvest time

从上表中可以看出,收获时间对产量的影响较大,对于冬小麦来说,其最佳的收获时间为6月中旬,过早或者过晚收获对都会造成冬小麦的减产。这些都有利于指导农业进行农业生产,更好地达到高产出。因此,田间管理数据的准确度对于最终冬小麦产量的年际变化影响较大。

3.5 结果与讨论

EPIC模型运用实测气象数据模拟出来的冬小麦产量数据和实测数据较为接近,但是运用月气象数据所得到的模拟产量和实测产量数据有很大的差距,这说明在其他条件相同的情况下,EPIC模型较低地模拟了气象数据,进一步分析得出,当模型读取日太阳辐射数据时得到的产量结果和读取所有气象数据、实测结果很接近,模型模拟太阳辐射数据时得到的产量结果和运用月平均气象数据时候产量很接近,和实测产量数据差别很大,这说明模型可以比较好地模拟日降水、日最高温度、日最低温度等气象数据,对于太阳辐射数据的模拟要比实测数据偏低。本文对EPIC模型中气候模拟模块进行了一点改进。

EPIC模型能够很好地模拟栾城生态实验站冬小麦长势和产量。10年预测平均产量要比10年实测平均产量要低0.05t/ha,相对误差为0.74%,各年的相对误差在-5.8%~2.9%之间变化。预测产量的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为0.18t/ha,达到实测产量平均值(6.72t/ha)的2.68%,这个误差范围要低于EPIC模型通常误差范围之内(15%)。模拟产量和实测产量两者之间的 R^2 为0.8433,这说明EPIC模型应用于栾城地区进行冬小麦产量估计是可行的。

对于作物生理生态参数(WA、HI、DLAI、DMLA、RLAD、RDMX、HMX、TB)和PHU来说,最终产量随着PHU、WA、HI、DLAI、DMLA、TB等参数的变化而同方向变化,其中PHU、TB、DLAI、WA、HI对产量的影响最大,这些对作物生长敏感的参数需要从田间实验实测而得到。而对DMLA、RLAD、RDMX、HMX等参数对产量的影响很小或者几乎没有,这些可以通过模型校准或者专业专家知识而得到。

对于气象输入参数(TMAX、TMIN、PRCP、RAD)来说,由于PRCP的变化对产量的影响比较小,因此对于大面积区域估产,可以考虑用遥感数据来反演降水数据,以解决部分地区数据匮乏的问题。而对于Tmax、RAD和Tmin,其变化对产量的影响较大。因此气象数据的准确度是影响模型最终模拟结果的精度一个重要的因素。

对于大多数站点数据缺少运行EPIC所需数据的情况下,本文分析了运用模拟气候数据和模拟田间管理数据对EPIC模型最终模拟精度的影响。从最后的结果来看,EPIC模型在运用模拟气候数据和实测田间管理数据情况下,产量模拟的精度最高,模拟产量和实测产量的相关系数的决定系数达到了0.7734,10年模拟产量的平均值为6.59T/Ha,相对误差为-1.93%,这说明EPIC模型能较好地模拟气候数据,当缺少实际日气候数据的情况下,可以考虑用月平均数据来运行EPIC模型。但是由于年模拟产量的相对误差在-16.13%~18.31%之间变化,这说明EPIC模型在某些年份对气候数据的模拟过高或过低,这给区域模拟某一年的冬小麦产量时带来了一定的不定因素。

对于运用模拟田间管理数据情况下,其模拟的精度不高,线性回归的决定系数分别为0.0217和0.3977,这说明田间管理文件对产量的影响要比气候数据对产量的影响要大,产量模拟最终的精度受田间管理文件的精确度的影响很大。这些都有利于对品种、播种期、密度、施肥量等田间

管理措施进行优化决策，确定最优的作物栽培方案，更好地指导农业生产，为达到低投入、高产提供依据。

第四章 遥感数据应用于 EPIC 模型的可行性分析

对于食物安全预警系统、农用地管理政策、食品贸易政策和碳循环研究等研究，准确、快速、及时地预测和预报大区域尺度上作物产量是必须的。作物生长模型大多是农田尺度的单点模型，当作物模拟从单点研究发展到区域应用时，会产生随空间尺度加大而出现的地表、近地表环境非均匀性问题，导致无法有效的把一些空间变化信息加入到模型中去，即不能解决模型在大范围使用时的初始宏观资料的获取和参数调整问题。例如地表和作物状况的非均匀性导致区域性模拟时初始条件（出苗期、初始生物量、初始土壤水分状况等）难以确定；对计算作物冠层光合作用及干物质积累非常重要的变量叶面积指数，其受品种、气候、土壤等因素影响地域变异很大，精确模拟有一定难度；又如大范围作物表面蒸腾量、土壤水分含量、水分胁迫状况的估算往往会受到区域内土壤条件的复杂性和土壤水文常数、灌溉量等资料获取困难等因素的制约。另外，一些突发性天气灾害造成作物生长的剧烈变化也很难用作物模型准确地模拟出来，而遥感信息具有监测面积大、实时性较强的特点，在很大程度上可以帮助作物模型克服这些不足。本文将探讨遥感数据应用于 EPIC 模型用于黄淮海平原冬小麦估产的可行性分析。

4.1 技术路线

本文在单点对参数和模块校准的基础之上，对 EPIC 模型进行了修改，使其能够应用于大区域冬小麦产量估计中。对不同数据格式的数据进行处理，转换投影和空间分辨率，使数据具有相同的覆盖区域、格式等。输入运行空间 EPIC 模型所需要的数据，并运行空间 EPIC 模型，对模拟出来的产量结果以县为单位进行统计，把模拟结果和实测结果进行对比分析，以探讨遥感数据应用 EPIC 模型中估计黄淮海平原冬小麦产量可行性。

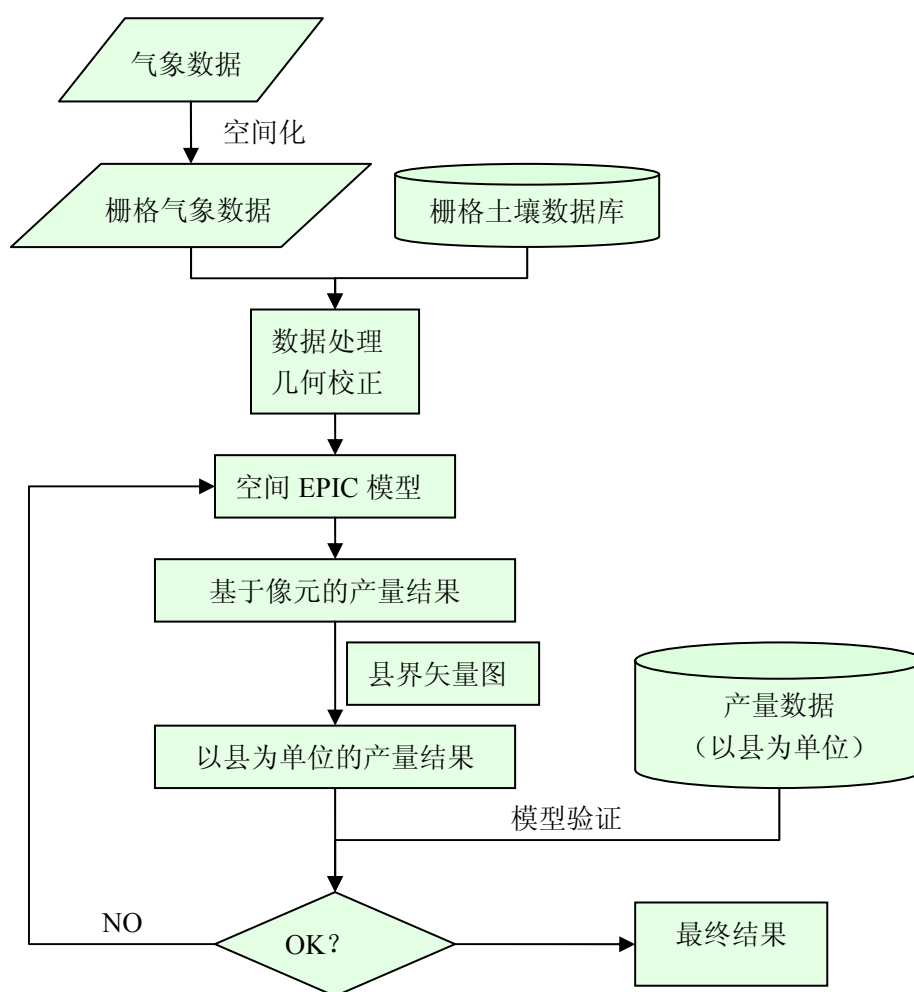


图 4—1 空间 EPIC 模型估产技术路线

Figure 4-1 The Flowchart for yield estimation using spatial EPIC model

4.2 实验布置

为了建立河北试验区（石家庄、衡水、邢台）精确的田间管理、作物长势、作物产量等数据库，共在河北试验区布设 147 个试验点（图 4—2）。针对每个试验点，分别记录 2003 年 10 月—2004 年 7 月各个生育期的灌溉时间、灌溉量、施肥时间、施肥量、株高、叶面积指数等数据。图 4—3 为河北试验区内起身期 LAI 数据图。表 4—1 为衡水市安平县城关镇生育期。以上数据经整理、检查，形成原始数据库。

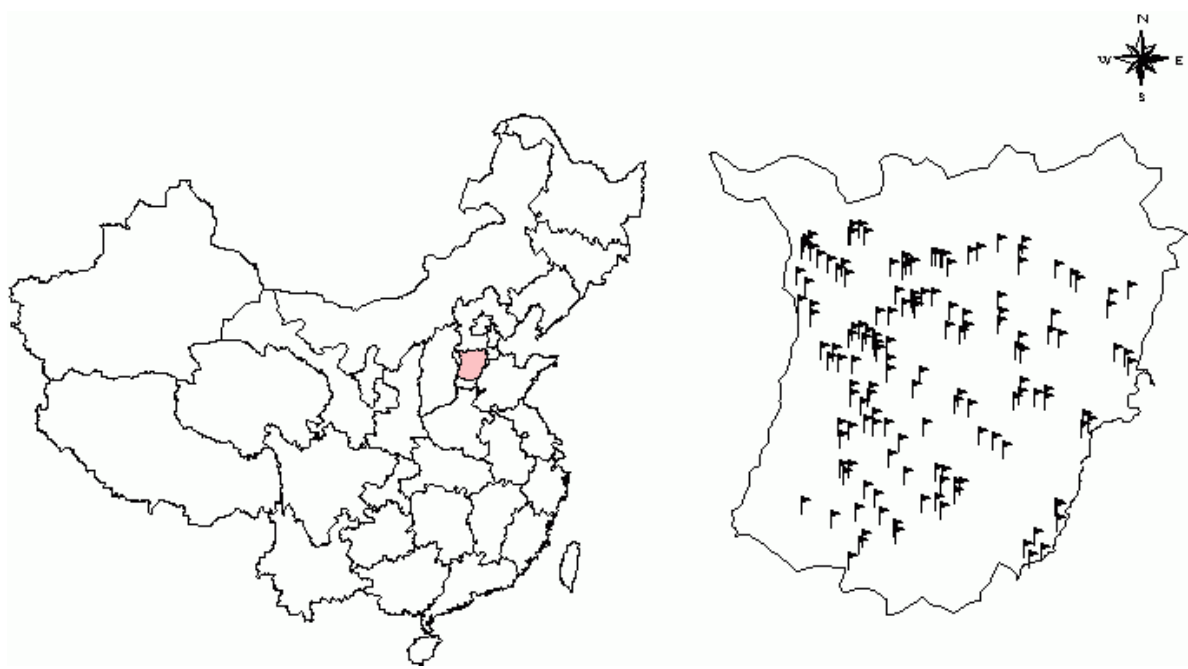


图 4-2 河北试验区站点分布图

Fig 4-2 the distribution map of observation station in Hebei study area

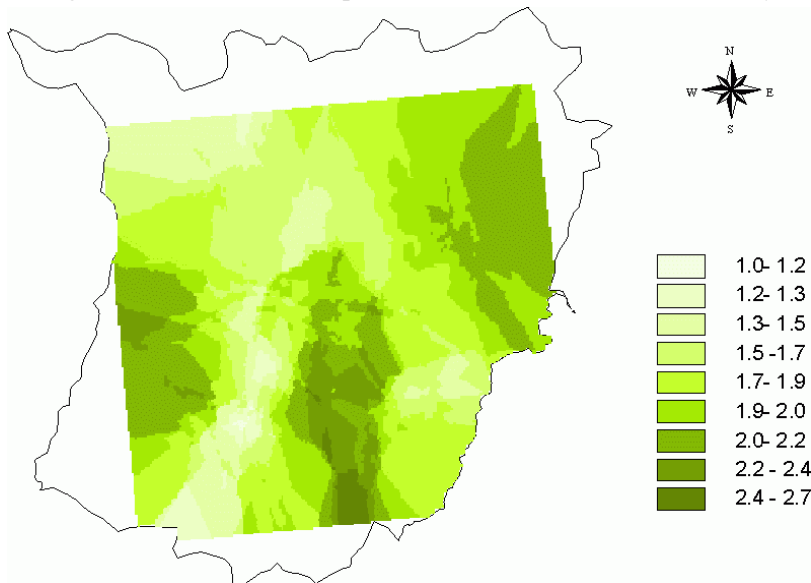


图 4-3 河北试验区 LAI 分布图

Fig 4-2 the distribution map of LAI of Hebei study area

表 4-1 衡水市安平县城关镇生育期

Table 4-1 The development stage of Chengguan town in Anpin county of Hengshui city

生育期	时间
播种期	2003-10-6
出苗期	2003-10-14
分蘖期	2003-11-2
越冬期	2003-11-28

返青期	2004-2-19
起身期	2004-3-18
拔节期	2004-4-3
孕穗期	2004-4-18
抽穗期	2004-4-23
开花期	2004-5-1
乳熟期	2004-5-24
蜡熟期	2004-6-7
完熟期	2004-6-12
收获期	2004-6-13

4.3 数据准备与处理过程

本研究中使用的气象站点数据和分县产量数据的年份均为 2004 年。黄淮海平原上 47 个站点 2004 年旬最高温度、旬最低温度、旬日照时数、旬降水和旬湿度实测数据由中国国家气象中心提供，格式为 txt 文本形式。月最高空气温度标准差、月最低空气温度标准差、月降水标准差等数据从 EPIC 模型开发者提供的一个世界范围内的数据库中下载而得到，这些数据格式为栅格形式，其空间分辨率为 0.0833 度*0.0833 度。对于土壤数据，EPIC 模型所必须的七个参数的数据来自国际地圈生物圈计划（International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP）中数据和信息系统（Data and Information System, DIS）中全球土壤调查数据库。数据以栅格形式储存，其空间分辨率为 0.0833*0.0833 度。实测田间管理文件和产量数据来自于河北试验区 147 个站点实测数据库。

4.3.1 气象数据

EPIC 模型使用一个随机的天气发生器来根据每月的气象参数来生成每天的气象数据。因此，首先，我们要将收集到的旬气象数据转化成月气象数据。为了增加气象数据内插的精度，特别是防止研究区内的气象站点少而导致研究区内气象数据内插的精度不高的问题，本文对黄淮海平原上 47 个站点（图 4—4）2004 年月最高温度（图 4—5）、月最低温度、月日照时数、月降水和月湿度实测数据利用 KRIGING 插值方法得到这些参数的空间栅格数据，其分辨率为 0.0833 度。然后在 Arc/Info 下，对 EPIC 模型所需的所有的气象参数（月最高温度、月最低温度、月日照时数、月降水、月湿度、月最高空气温度标准差（图 4—6）、月最低空气温度标准差、月降水标准差等）进行裁减，裁减出河北试验区的数据。最后数据以 txt 形式存储。



图 4—4 气象站点分布图
Figure 4-2 The distribution map for the meto-stations

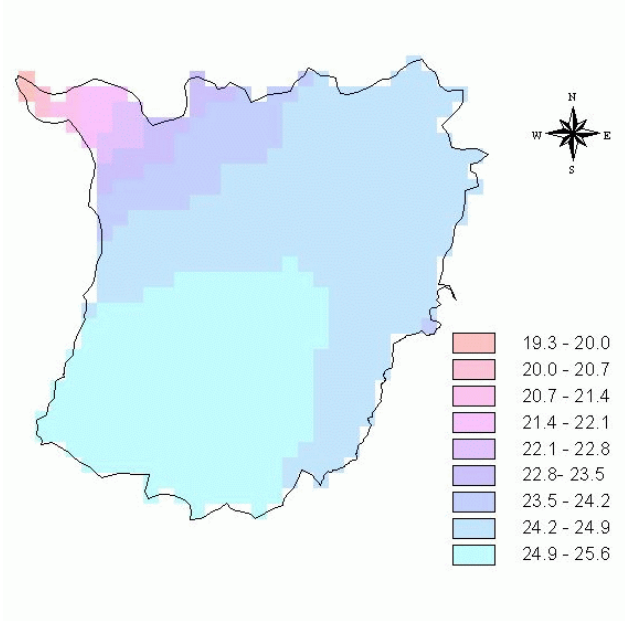


图 4—5 河北试验区月最高温度分布图
Figure 4-5 The distribution map of month maximum temperature of Hebei study area

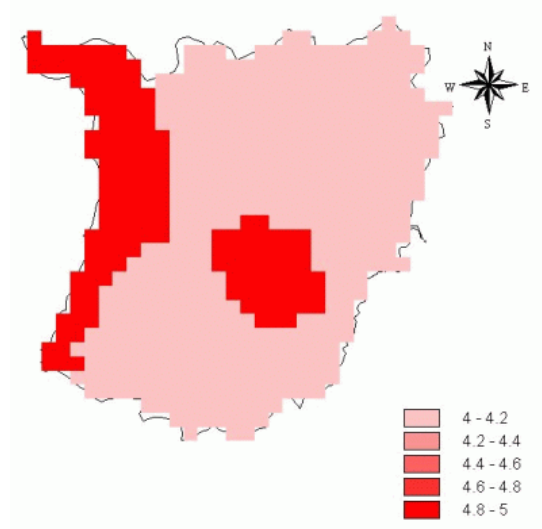


图 4—6 河北日最高温度月标准差分布图

Figure 4-6 the distribution map for the monthly standard deviation of max. daily temperature of Hebei study area

4.3.2 土壤数据

EPIC 模型中多达 20 多个土壤参数用来描述土壤的物理和化学性质。对于大多数参数来说，EPIC 模型可以通过模拟模型模拟而得。但是最少七个参数对于 EPIC 模型来说是必须的：土壤各层的深度、土壤各层的粘粒、粉砂粒和沙粒含量、容重、PH、有机碳含量和碳酸钙含量。本研究中所有的土壤数据来自国际地圈生物圈计划（International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP）中数据和信息系统（Data and Information System, DIS）中全球土壤调查数据库。数据以栅格形式储存，其空间分辨率为 $0.0833^{\circ} \times 0.0833^{\circ}$ 度。在 Arc/Info 下，对各参数的栅格数据进行裁减，裁减出河北试验区的数据。最后数据以 txt 形式存储。

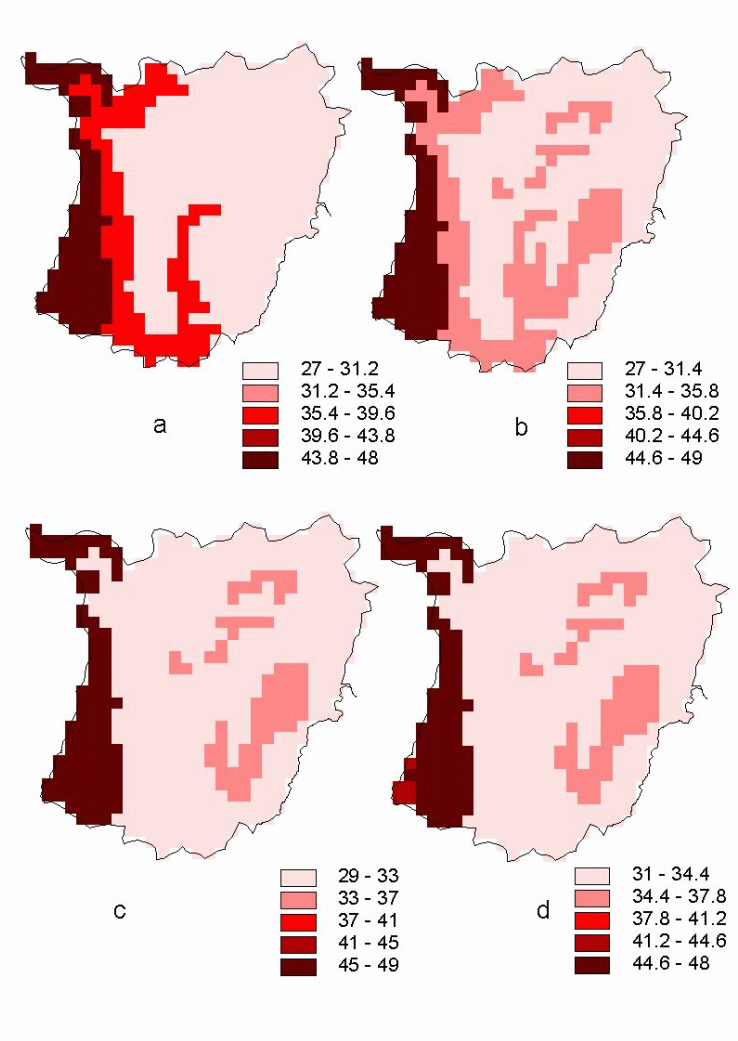


图 4—7 河北试验区砂粒含量分布图
(a—0~1cm 砂粒分布图；b—1~10cm 砂粒分布图；c—10~30cm 砂粒分布图；d—30~100cm 砂粒分布图)

Figure 4-7 the distribution map of sand content of Hebei study area

4.3.3 田间管理数据

EPIC 模型田间管理文件中播种期、种植密度、灌溉期、灌溉量和收获期等参数数据均为河北试验区 147 个站点实测数据。在 Excel 中，以县为单位，对来自相同县市不同站点的上述参数进行均值处理，并将最终处理值作为各个县的田间实测管理数据。数据以 txt 格式存储。考虑到对于某些地区这些数据的收集存在一定的难度，本文在 EPIC 模型应用于黄淮海平原冬小麦产量估产时，分析了统一的田间管理文件（表 4—3）和实测田间管理文件下模型最终的模拟结果。对于实测田间管理数据，本文主要考虑了播种期和收获期（图 4—6）对最终产量的影响。

表 4—2 统一的田间管理措施
Table 4-2 management practices table

日期	管理措施	体积
2003.10.4	灌溉	60mm
2003.10.6	播种	
2003.10.12	施氮肥	70kg/ha
2003.10.12	施磷肥	60kg/ha
2004.3.16	施氮肥	150kg/ha
2004.3.20	灌溉	60mm
2004.4.15	灌溉	60mm
2004.5.10	灌溉	60mm
2004.6.12	收获	

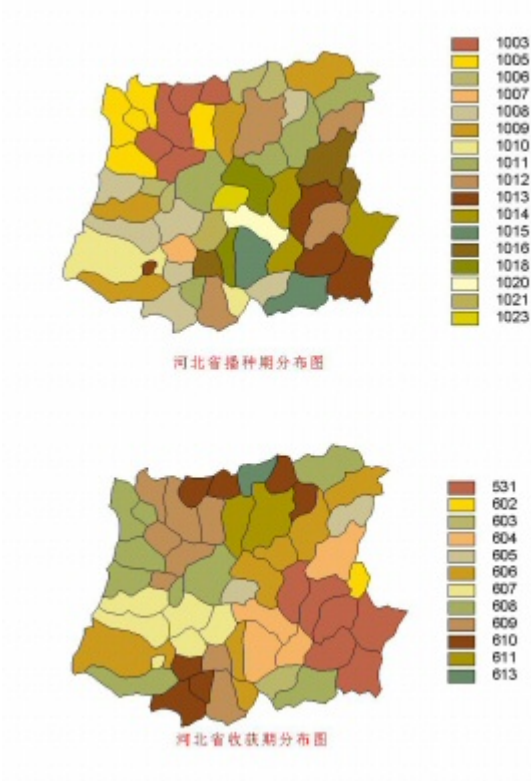


图 4—8 河北试验区播种期和收获期分布图

Fig. 4-8 the distribution map of sowing and harvest date of Hebei study area

4.3.4 产量数据

应用 KRIGING 插值方法对河北试验区 147 个站点实测产量数据进行空间插值。在 ArcMap 下，对插值结果以河北试验区各县为单位进行区域汇总。数据以 dbf 表形式储存。图 4—7 为河北试验区 2004 年以县为单位实测产量分布图。

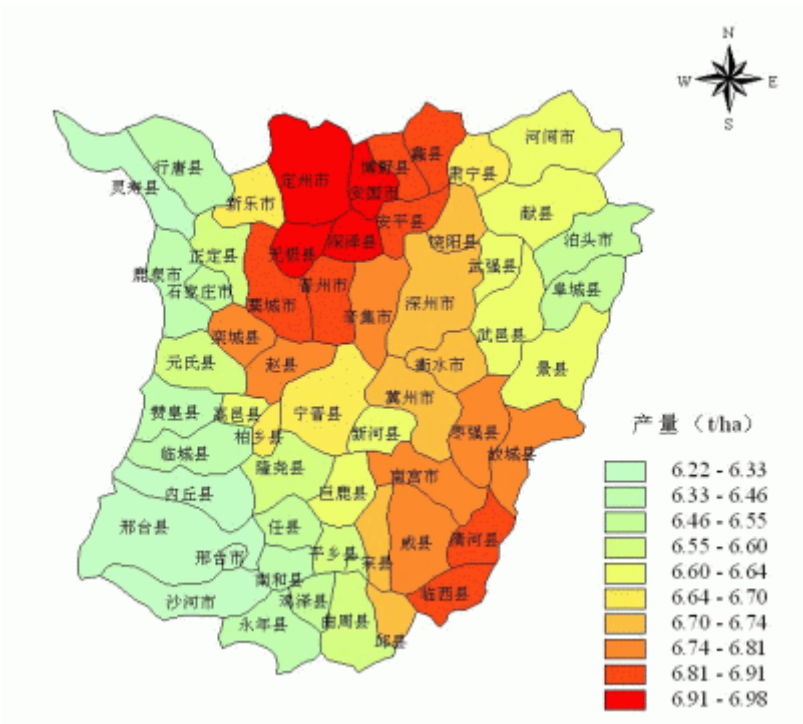


图 4-9 河北试验区 2004 年实测冬小麦单产分布图

Figure 4-9 the yield distribution map of winter wheat in Hebei study area

4.4 结果

4.4.1 统一田间管理数据下模拟产量

下图为空间 EPIC 模型模拟的河北省 2004 年冬小麦单产分布图。模拟产量的变化范围为 6.315t/ha—8.4t/ha，平均单产为 7.13t/ha，超过了实测产量的平均单产值（6.66t/ha）。

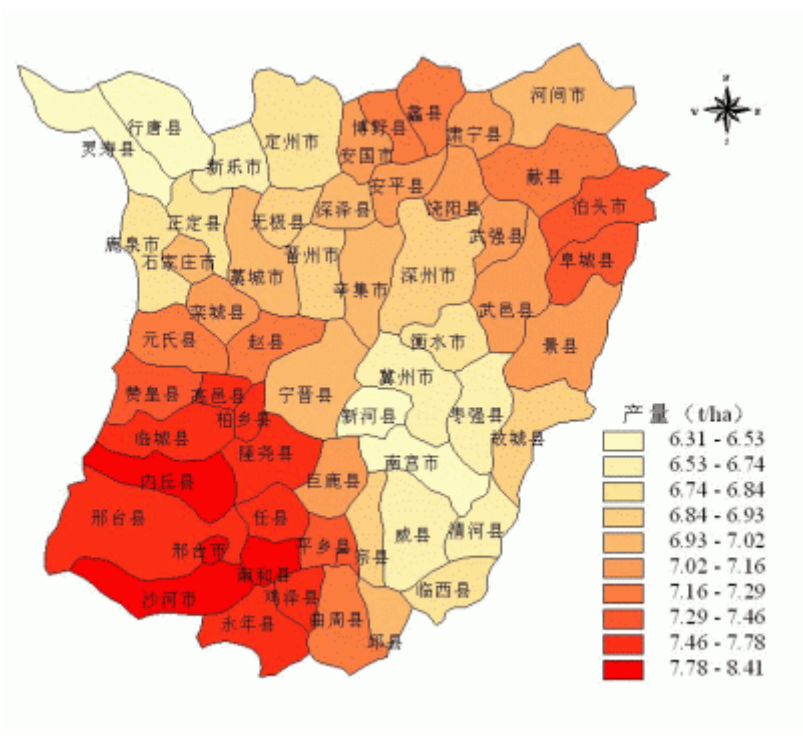


图 4-10 河北试验区 2004 年模拟冬小麦单产分布图

Figure 4-10 the distribution map of estimation yield of winter wheat in Hebei study area

把模拟结果和实测结果进行对比分析，下图为河北试验区产量相对误差分布图。

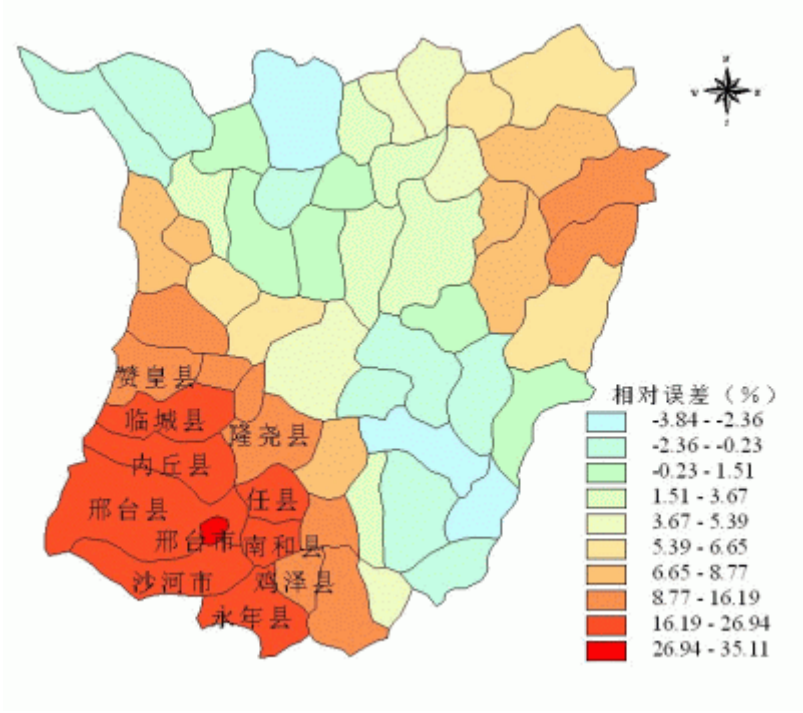


图 4-11 河北试验区产量相对误差分布图

Figure 4-11 the distribution map of relative error of winter wheat's yield in Hebei study area

从图上我们可以看出，模拟产量相对误差 变化范围在-3.82%~35.1%之间变化，其中河北省西南部区域（邢台、沙河、内丘、鸡泽等）过高地模拟了冬小麦的单产值，模拟的相对误差超过

了 15%，超出了 EPIC 模型通常误差范围。

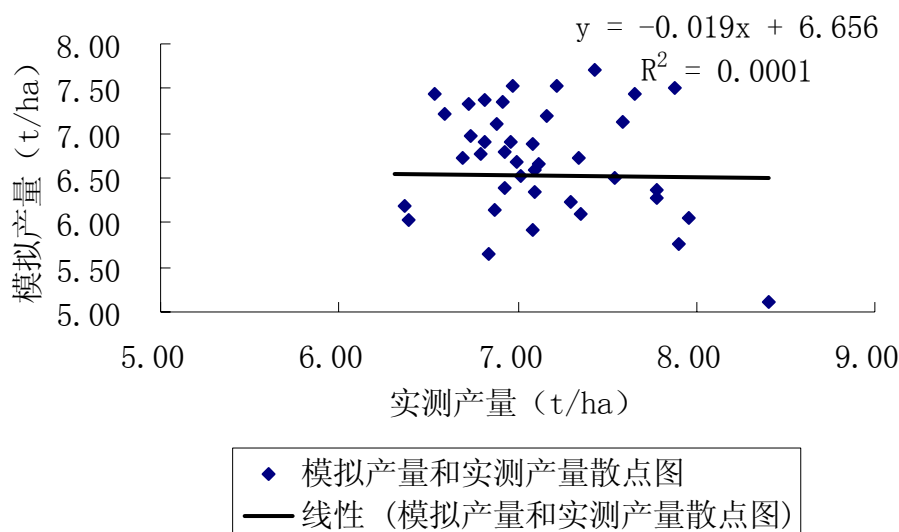


图 4—12 统一田间管理模式下模拟产量和实测产量散点图

Figure 4-12 the plot map between simulation yield and observation yield with homogeneous operation management

从上图中可以看出，模拟产量和实测产量两者之间的决定系数 $R^2=0.0001$ 。这是因为当整个区域内作物参数、田间管理等数据相同的时候，区域产量的变化仅仅是由于气候差异引起的，而气候差异对产量影响要比作物参数、田间管理等数据对产量的影响要小。

4.4.2 不同田间管理数据下模拟产量

用河北省 147 个站点实测的田间管理文件对 EPIC 模型中的田间管理文件进行修正，主要考虑作物的播种期和收获期，模型模拟结果如下：

下图为修改了田间管理文件之后，模拟产量和实测产量散点图。从图上我们可以看出，模拟产量和实测产量的决定系数 R^2 为 0.4596，和运用统一的田间管理文件相比，模拟精度得到大大地提高，这说明产量受田间管理措施的影响较大，较准确的田间管理措施数据会提高模型最终的模拟精度。

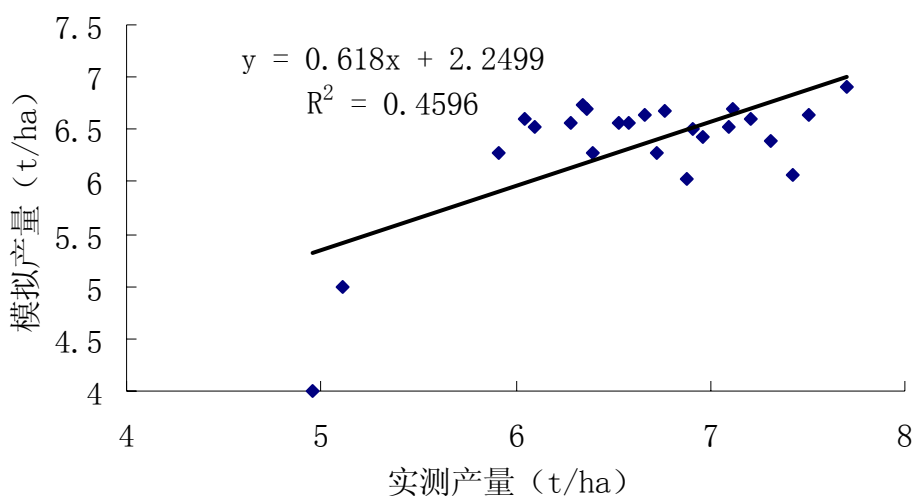


图 4—13 不同田间管理模式下模拟产量和实测产量散点图

Figure 4-13 the plot map between simulation yield and observation yield with inhomogeneous operation management

4.5 讨论

本章在单点产量估计的基础上探讨 EPIC 模型应用于黄淮海平原冬小麦估产可行性的研究，选取了河北试验区为例，从结果我们可以看出：

当对整个研究区域的作物参数、田间管理等数据采用相同的值的时候，模拟的精度很低，模拟结果和实测结果的决定系数仅为 0.0001。这是因为当整个区域内作物参数、田间管理等数据相同的时候，区域产量的变化仅仅是由于气候差异引起的，而气候差异对产量影响要比作物参数、田间管理等数据对产量的影响要小。

当模型中考虑了区域田间管理措施存在差异的时候，模拟精度得到了很大地提高，模拟结果和实测结果的决定系数为 0.4596。当模型所需要的数据均为实测数据的时候，EPIC 模型能够很好地应用于黄淮海平原冬小麦产量估计。

第五章 结果与讨论

5.1 结论

EPIC 模型应用于栾城生态实验站估计冬小麦产量的结论如下：

(1) EPIC模型能够很好地模拟栾城生态实验站冬小麦长势和产量。10 年预测平均产量要比 10 年实测平均产量要低 0.05t/ha，相对误差为 0.74%，各年的相对误差在-5.8%~2.9%之间变化。预测产量的均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）为 0.18t/ha，达到实测产量平均值（6.72t/ha）的 2.68%，这个误差范围要低于EPIC模型通常误差范围之内（15%）。模拟产量和实测产量两者之间的 R^2 为 0.8433，这说明EPIC模型应用于栾城地区进行冬小麦产量估计是可行的。

(2) 对作物生理生态参数做灵敏度分析表明，能量—生物量转换因子、收获指数、潜热等参数对产量的影响较大，这些对作物生长敏感的参数需要从田间实验实测而得到。而对于那些对产量的影响很小或者几乎没有影响的参数，这些可以通过模型校准或者专业专家知识而得到。这样有利于提高模型最终模拟的精度。

(3) 对于气象数据，温度和太阳辐射对产量的影响要比降水对产量影响大。由于降水的变化对产量的影响比较小，因此对于大面积区域估产，可以考虑用遥感数据来反演降水数据，以解决部分地区数据匮乏的问题。而对于温度和太阳辐射，其变化对产量的影响较大。因此气象数据的准确度是影响模型最终模拟结果的精度一个重要的因素。

(4) 对于大多数站点数据缺少运行 EPIC 所需数据的情况下，本文分析了运用模拟气候数据和模拟田间管理数据对 EPIC 模型最终模拟精度的影响。从最后的结果来看，EPIC 模型在运用模拟气候数据和实测田间管理数据情况下，产量模拟的精度最高，模拟产量和实测产量的相关系数的决定系数达到了 0.7734，10 年模拟产量的平均值为 6.59T/Ha，相对误差为-1.93%，这说明 EPIC 模型能较好地模拟气候数据，当缺少实际日气候数据的情况下，可以考虑用月平均数据来运行 EPIC 模型。但是由于年模拟产量的相对误差在-16.13%~18.31%之间变化，这说明 EPIC 模型在某些年份对气候数据的模拟过高或过低，这给区域模拟某一年的冬小麦产量时带来了一定的不定因素。

(5) 对于运用模拟田间管理数据情况下，其模拟的精度不高，线性回归的决定系数分别为 0.0217 和 0.3977，这说明田间管理文件对产量的影响要比气候数据对产量的影响要大，产量模拟最终的精度受田间管理文件的精确度的影响很大。这些都有利于对品种、播种期、密度、施肥量等田间管理措施进行优化决策，确定最优的作物栽培方案，更好地指导农业生产，为达到低投入、高产出提供依据。

本章在单点产量估计的基础上探讨 EPIC 模型应用于黄淮海平原可行性的研究，选取了河北为例，从结果我们可以看出：

(1) 当对整个研究区域的作物参数、田间管理等数据采用相同的值的时候，模拟的精度很低，模拟结果和实测结果的决定系数仅为 0.0001。这是因为当整个区域内作物参数、田间管理等数据相同的时候，区域产量的变化仅仅是由于气候差异引起的，而气候差异对产量影响要比作物参数、

田间管理等数据对产量的影响要小。

(2) 当模型中考虑了区域田间管理措施存在差异的时候, 模拟精度得到了很大地提高, 模拟结果和实测结果的决定系数为 0.4596。当模型需要的数据均为实测数据的时候, EPIC 模型能够很好地应用于黄淮海平原冬小麦产量估计。

5.2 讨论

如前所述, 准确、及时、快速地监测作物长势和预报产量对于保障粮食安全, 促进农业可持续发展具有非常重要的意义。本文对运用作物生长模型应用于黄淮海平原冬小麦产量估计方面进行了探讨和尝试, 获得了一些初步结论。但是也存在着一些问题:

(1) 在本文的研究过程中, 本文所采用的方法是通过对比模拟产量数据和实测产量数据来调整模型中某些参数和模块, 这样势必会导致结果模拟精度较高, 但是本文作为一个方法上的研究和探讨, 其思路和结论还是存在一定的借鉴性和参考性。

(2) 本文在研究在过程中发现, EPIC 模型运用实测气象数据模拟出来的冬小麦产量数据和实测数据较为接近, 但是运用月气象数据所得到的模拟产量和实测产量数据有很大的差距, 这说明在其他条件相同的情况下, EPIC 模型较低地模拟了气象数据, 进一步分析得出, 当模型读取日太阳辐射数据时得到的产量结果和读取所有气象数据、实测结果很接近, 模型模拟太阳辐射数据时得到的产量结果和运用月平均气象数据时候产量很接近, 和实测产量数据差别很大, 这说明模型可以比较好地模拟日降水、日最高温度、日最低温度等气象数据, 对于太阳辐射数据的模拟要比实测数据偏低。因此, EPIC 模型中模拟气候数据模块有待于进一步改进。

(3) 在区域模拟可行性分析研究中, 本文仅仅分析了田间管理措施对最终产量的影响, 并对 EPIC 模型应用于黄淮海平原可行性进行了分析, 虽然结果比运用统一的田间管理制度时有了很大地提高, 但是最终的精度还是很低, 没有达到业务运行的水平。在今后的研究工作中, 将对影响最终产量变异的原因进行进一步分析, 以便更好地模拟大区域冬小麦长势和产量。

5.3 展望

(1) EPIC 模型中模块的优化

EPIC 模型是一个综合作物学、气象学、水力学、土壤动力学等多学科的作物生长模型, 模型中不可能全部过程都采用机理模拟方式, 从系统运行效率及可行性方面考虑, 必须保留一部分经验参数。

EPIC 模型本身和其中有些计算公式有其特定的环境条件, 在应用到具体问题计算的时候存在很大的不确定性, 而对于我国大多数地方与原公式所采用资料的背景差异较大, 因此这影响了模型用于中国对作物估产的精度, 建立一套适合中国不同区域的经验参数或经验公式是一个很好的途径。

(2) 黄淮海平原多作物参数数据库的建立

本研究立足于实际估产工作的需要, 研究区仅是我国冬小麦主产区中典型区域, 而且仅仅只对冬小麦产量估计做了研究, 今后要扩展到更多的作物, 进行更多作物产量监测与预测的研究工

作，建立一个黄淮海平原多作物参数数据库，为今后更多的模型应用于黄淮海平原作物监测提供一个数据支持。

(3) 更大区域尺度上冬小麦产量的估计

本研究在单点冬小麦产量估计的基础上，对 EPIC 模型应用于黄淮海平原冬小麦产量估计的可行性进行了简单的分析，为今后把 EPIC 模型应用于更大区域尺度上冬小麦产量监测与预测研究奠定一个基础，为今后的研究提供一个方向。

(4) 作物生长模型与其他估产模型整合的研究

目前，农作物估产方法虽然较多，但单独依靠任何一种方法都不能取得完全满意的效果。因此，有必要综合考虑影响因素，整合多种估产模型，使各种估产方法相互补充、相互完善及集成，从而发挥各个模型自身的特点和优势，达到提高作物产量预测精度的目的。

(5) EPIC 模型与“3S”技术相结合的研究

EPIC 模型是一个单点模型，用于大面积估产有一定的难度，如何把 EPIC 模型和 GIS 等数据相结合来完成大面积作物估产是当前和以后需解决的问题。运行 EPIC 模型需要大量的输入数据，对于大多数站点来说，数据的获取有一定的难度。遥感数据具有监测面积大、实时性较强的优点，是有效解决数据短缺的一个有力的途径。如何能利用遥感得到的数据来反演作物生长需要的数据是当前和今后需要解决的一个问题。现有的尺度升级后的 EPIC 模型应用于大面积估产的时候，由于有些数据短缺，很难真实地模拟农业田间的实际作物产量，如何利用遥感信息反演地面参数数据，建立遥感—作物生长复合模型，成为解决数据短缺的一个有力的方法。

参考文献

1. 曹卫星.国外小麦生长模拟研究的进展.南京农业大学学报.1995.18(1):10-14
2. 曹永华.美国 CERES 作物模拟模型及其应用.世界农业,1991(9):52-55
3. 陈怀亮,冯定原,毛留喜,张雪芬,付祥健.CERES-玉米模拟模式的数值试验及应用.南京气象学院学报.1997.12.522-528
4. 邓坤枚,李世顺,陈屹松.小麦产量的遥感动态预估研究—以山东禹城县为例.自然资源学报.1994.7.第9卷.第3期.271-279
5. 冯利平,高亮之,金之庆等,小麦发育动态模拟模型的研究.作物学报,1997,23(4):418-424
6. 郭德友,陶红编译.农业遥感(农作物估产的理论与方法).科学出版社出版.1986年7月
7. 黄敬峰,王人潮,王秀珍,刘绍民,张建华.冬小麦遥感估产多种模型研究.浙江大学学报(农业与生命科学版).1999.25(5):519~523
8. 黄元仿,李韵珠,李保国,陈德立.华北平原农田水、氮优化管理.农业工程学报.2001年3月.第17卷第2期.37-41
9. 吉文娟,顾本文.GM(0,N)灰色预测模型在云南小春作物产量预报中的应用.中国农业气象.2006.27(3).229-232
10. 江敏,金之庆,葛道阔,石春林.CERES-Wheat 模型在我国冬小麦主产区的适用性验证及订正.江苏农学院学报.1998.19.64-67
11. 姜丽霞,王育光,孙孟梅,孙玉亭.黑龙江省玉米产量预报模式的研究.中国农业气象.2004.25(1).13-16
12. 李军,邵明安,张兴昌. EPIC模型中农田水分运移与利用的数学模拟. 干旱地区农业研究. 2004年6月. 第22卷第2期.72-75
13. 李军.作物生长模拟模型的开发应用进展.西北农业大学学报.1997.8.102-107
14. 李军.作物生长模型 ALMANAC 的验证与应用初探.干旱地区农业研究.1997.12.99-104
15. 李克煌.气候资源学.气象出版社.pp410-414
16. 廖桂平,官春云,黄璜.作物生长模拟模型技术.湖南农业大学学报.1998.10.417-422
17. 林忠辉,莫兴国,项月琴.作物生长模型研究综述.作物学报.2003.9.750-758
18. 刘布春,王石立,马玉平.国外作物生长模型区域应用升尺度问题的研究. 中国生态农业学报.2003.10.第 11 卷.第 4 期.89-91
19. 马玉平,王石立,张黎.基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及模拟研究.气象学报.2002.4.第 63 卷.第 4 期.204-215
20. 潘学标.作物模型原理.气象出版社.2003.5.
21. 齐昌翰,殷新佑,刘陶菊等.水稻生长日历模拟模型(RICAM)的调控决策系统(RICOS)研究.江西农业大学学报,1994,16(4):323-327
22. 任建强.基于遥感技术的冬小麦区域估产模型的研究.中国农业大学博士论文.2006
23. 石春林,金之庆,高亮之,葛道阔,魏秀芳.CERES-Rice 在水稻氮肥管理中的应用与分析.江苏农业

- 学报.2003.19.1-4
24. 史永臣,刘振忠.农作物产量预报模型研究与实践.生物数学学报.2001.16(2).229-233
 25. 隋鹏,陈源泉,张飞飞,王彬丽,高旺盛.基于超采地下水资源生态代价的农田效益绿色核算——以河北省栾城县为例.农业现代化研究.2006.5.第27卷第3期.218-221
 26. 童成立,张文菊,汤阳,王洪庆.逐日太阳辐射的模拟计算.中国农业气象.2005.26(3):165-169
 27. 王纯枝,宇振荣,辛景峰, P.M. Driessen,刘云慧.基于遥感和作物生长模型的作物产量差估测.农业工程学报.2005.7.第 21 卷第 7 期.84-89
 28. 王尔大,Wyatte Harman,郑大玮,常欣,程序.旱作农区轮作和留茬处理方式对风蚀的影响—应用 EPIC模型进行模拟和分析的武川案例.中国农业科学.2003,35(11):1330-1336.
 29. 王宗明,梁银丽.应用EPIC模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试.自然资源学报.2002.7.481-487
 30. 邬定荣,欧阳竹,赵小敏,于强,罗毅.作物生长模型WOFOST在华北平原的适用性研究.植物生态学报.2003.27(5).594-602
 31. 谢云,James Kiniry,Jimmy R.Williams.陈友民,林而达.作物模型输入变量的敏感性分析.中国农业科学.2002.35(10).1208-1214
 32. 谢云,James Kiniry,刘宝元.不同空间尺度下的 ALMANAC 模型验证.应用生态学报.2003.8.第 14 卷第 8 期.1291-1295
 33. 熊毅,李庆逵.中国土壤(第二版).科学出版社.1978.3
 34. 杨宝祝,赵春江.作物生长发育模拟模型研究进展与存在的问题.北京农业科学
 35. 杨海鹰,付祥建,马振生,白凌霞.河南省夏玉米产量预报方法.河南气象.2005.2.25-26
 36. 于静洁,任鸿遵.华北地区粮食生产与水供应情势分析.自然资源学报.2001.7.360-365
 37. 宇振荣.作物生长模拟模型研究和应用.生态学杂志.1994.13(1):69-73
 38. 张雪芬,毛留喜,陈怀亮.河南省夏玉米农学模式产量预报.河南气象.1996年第1期.22-23
 39. 赵庚星,余松烈.冬小麦遥感估产研究进展.山东农业大学学报.2001.32(1)1.107-111
 40. 赵军.SOYGRO 模型在大豆产量预测中的应用.大豆科学.1999.2.第 18 卷第 1 期.67-72
 41. 赵艳霞,周秀骥,梁顺林.遥感信息与作物生长模式的结合方法和应用研究进展.自然灾害学报,2005.14(1): 103-109
 42. 周羽,危万,冯明.湖北省地市农作物产量预报模式的建立与应用—以襄樊市小麦产量预报为例.湖北气象.1997.2.34-35
 43. Benson, V.W., K.N. Potter. EPIC 中氮淋溶岁蒸发蒸腾和土壤持水量计算的影响.水土保持科技情报.1995.3.24-26
 44. Cabelguenne, M., C.A. Jones, J.R. Marty, P.T. Dyke, J.R. Williams. Calibration and Validation of EPIC for Crop Rotations in Southern France. Agricultural Systems.33(1990):153-171
 45. Cavero, J., E. Playan, N. Zapata, J.M. Faci. Simulation of Maize Grain Yield Variability within a Surface-Irrigated Field.2001. Agron. J. 93:773-782
 46. Cavero, J., I. Farre, P. Debaeke. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphrase and Gropwat models. Agronomy Journal.2000.92:679-690.
 47. Chung, S.W., P.W. Gassman, D.R. Huggins, G.W. Randall. EPIC Tile Flow and Nitrate Loss

- Predictions for Three Minnesota Cropping Systems.2001.J.Environ. Qual.30:822-830
48. Chung, S.W., P.W. Gassman, L.A. Kramer, J.R. Williams, R. Gu. Validation of EPIC for two watersheds in southwest Iowa. Working paper 99-WP215
 49. Chung, S.W., P.W. Gassman. Evaluation of EPIC for three MINNESOTA cropping system.2000
 50. Cocu, X., B. Moeremans, S. Dautrebande. Crop height simulation with EPIC model and radar interferometer of fields in BELGIUM.
 51. Easterling, W.E., A. Weiss, C.J. Hays, L.O. Mearns. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: the case of the US Great Plains. Agricultural and Forest Meteorology.1998.90:51-63
 52. Easterling, W.E., C.J. Hays, M.M. Easterling, J.R. Brandle. Modeling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: An application of the EPIC model.1997. Agriculture, Ecosystems and Environment .61:163-176
 53. Easterling, W.E., N.J. Rosenberg, M.S. Mckenney, C.A. Jones, P.T. Dyke, J.R. Williams.利用侵蚀生产力影响计算者 (EPIC) 模型模拟作物对气候变化和CO₂直接影响的反应.河南气象.1995.2.27-29
 54. Edwards, D.R., V.W. Benson, J.R. Williams, T.C. Daniel, J. Lemunyon, R.G. Gilbert. Use of the EPIC model to predict runoff transport of surface-applied inorganic fertilizer and poultry manure constituents. 1994.Trans. ASAE 37(2):403-409.
 55. Fan, x.m, A. Jintrawet, h.m. chen. Using CERES-maize model to simulate leaves dynamic for quality protein maize cultivars. Southwest China Journal of Agricultural Sciences.2001.14(2).102-110
 56. Forster, D.L. Effects of conservation tillage on the performance of Lake Erie Basin farms. Agron. J. 2000.
 57. Fortin, M.C., D.E. Moon. Errors Associated with the Use of Soil Survey Data for Estimating Plant-Available Water at a Regional Scale.1999. Agron. J. 91:984-990
 58. Ghimire, S.K., M.S. Babel. Evaluation of Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) model for middle mountain region of Nepal. International Journal of Sediment Research.2004.19(2):106-122
 59. Hajek, B.F., J.R.Williams. Measured and simulated productivity of eroded soils. Natural resource economics meeting.2002.
 60. Intarapong, W., D. Hite. Water quality impacts of conservation practices under environmental constrains: the case of the Mississippi Delta. Natural resource economics meeting.2002.May 16-17
 61. Izaurrealde, R.C., J.R. Williams, W.B. McGill, N.J. Rosenberg. Simulating soil carbon dynamics erosion and tillage with EPIC. Web
 62. Izaurrealde, R.C., N.J. Rosenberg, R.A. Brown, D.M. Legler, M.T. LoÁpez, R. Srinivasan. Modeled effects of moderate and strong 'Los NinAos' on crop productivity in North America.1999. Agricultural and Forest Meteorology.94:259-268
 63. Kennethn, P., J.R. Williams, F.J. Larney, M.S. Bullock, Evaluation of EPIC's wind erosion submodel using data from southern A LBERTA.1998.

64. King, K.W., J.C.Balogh. Evaluation of an agricultural water quality model for use in golf course management. ASAE paper 97-2009
65. Kiniry, J.R., R.Blanchet, J.R.Williams, V.Texier. Sunflower simulation using the EPIC and ALMANAC models. Field crops res.1992.30:403-423
66. Kiniry, J.R., R.Blanchet, J.R.Williams, V.Texier.Sunflower simulation using the EPIC and ALMANAC models. Internet Web
67. Kucharik, C.J., K.R. Brye. Integrated Biosphere Simulator (IBIS) Yield and Nitrate Loss Predictions for Wisconsin Maize Receiving Varied Amounts of Nitrogen Fertilizer.2003. J. Environ. Qual. 32:247-268
68. Mckenney, M.S., K.M. Lemmon.作物对气候变化反应的模拟.河南气象.1995.1.34-36
69. Mckenney, M.S., W.E. Easterling, N.J. Roserberg.作物生产模拟及其对 2030 年气候变化的反应.河南气象.1996.1.39-41
70. Moulin, A.P., H.J. Beckie. Evaluation of the CERES and EPIC models for predicting spring wheat grain yield over time. Can. J. Plant Sci. 1993.73:713-719.
71. Pandit, A., J.H Reposa. Inorganic nitrogen, phosphorus, and sediment losses from acitrus grove during stormwater runoff
72. Pierson, S.T., M.L. CabreraG, K. Evanylo, P.D. Schroeder, D.E. Radcliffe, H.A. Kuykendall, V.W. Benson, J.R. Williams, C.S. Hoveland, M.A. McCann. Phosphorus Losses from Grasslands Fertilized with Broiler Litter: EPIC Simulations. J. Environ. Qual. 2001.30:1790-1795
73. Priya, S., R. Shibasaki. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. Ecological Modeling.2001. 135:113-129
74. Ramanarayanan, T.S., J.R. Williams, W.A. Dugas, L.M. Hauck, A.M.S. McFarland. 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. ASAE Paper No. 97-2209, St. Joseph, MI.
75. Roloff G, R.D Jong, M.C.Nolin. Crop yield, soil temperature and sensitivity of EPIC under central-eastern Canadian conditions. 1998. Can. J. Soil Sci. 78: 431-439.
76. Roloff, G., R.D Jong, C.A.Campbell, R.P.Zentner, V.M.Benson. EPIC estimates of soil water, nitrogen and carbon under semiarid temperate conditions. 1998. Can. J. Soil Sci. 78: 551-562.
77. Roloff, G., R.D Jong, R.P.Zentner, C.A.Campbell, V.W.Benson. Estimating spring wheat yield variability with EPIC.1998. Can. J. Soil Sci. 78: 541-549.
78. Rosenberg, N.J., M.S. Mckney, W.E. Eastling, R.M. Lemon. EPIC模式模拟作物对当前气候和 CO₂条件反应的效果.河南气象.1995.3.34-37
79. Sanchez, B.V. Soil erodibility and it's impact on corn productivity under tropical conditions of Mexico.1998.Agrociencia.32:199-207
80. Sanchez, B.V. Soil erodibility and it's impact on corn productivity under tropical conditions of Mexico. 1998. Agrociencia.32:199-207
81. Tan, G.X., R. Shibasaki. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. Ecological Modeling.2003.168:357-370

82. Wang, X., C.T. Mosley, J.R. Frankenberger, E.J. Kladdivko. Subsurface drain flow and crop yield predictions for different drain spacing using DRAINMOD. *Agricultural Water Management*.2005
83. Warner, G.S., J.D. Stake, K. Guillard. Validation of EPIC for soil nitrate prediction in a shallow New England soil. *Water Quality Modeling*,1995.353-360
84. Williams, J., M.Nearing, A.Nicks, E.Skidmore, C.Valentin, K.King, R.Savabi.利用土壤侵蚀模型研究全球变化.水土保持科技情报.1998.2.14-20

致 谢

三年多的紧张的求学即将结束，在此论文完稿之际，谨向指导我的恩师和关心、帮助我的同学、朋友们表示诚挚的谢意。

首先，特别要感谢我的恩师陈仲新博士，是他首次引导我进入科学研究的殿堂。他严谨的治学态度，过硬的治学态度，博学的知识和随和的个性将一直为我所敬重，在两年的论文研究和写作过程中，陈老师就在学习和工作上对我严格要求、耐心指导，并提供了许多参加科研实践活动的机会。在本论文选题、研究、撰写过程中，他始终给予我认真、详细的指导，并经常组织课题组成员相互讨论，传授他的科研心得，指导如何我们更好地解决问题和完成论文，使我获益匪浅。同时，他在我生活上给予我不少的关心和照顾，给我讲了许多做人的道理。所有的这些都将激励我在今后的学习和工作中不断地学习和进步。

在此，我还要特别感谢河北省石家庄市栾城生态实验站的胡春胜站长、陈素英老师和站上其他的工作人员，在论文的写作过程中，他们不仅提供了本论文所需的所有数据，还多次耐心地指导我有关论文方面的问题。美国 Texas A&M 大学的 Jimmy Williams 教授、王尔大教授、Susan Wang 博士和东京大学的杨鹏博士在论文的研究过程中都给过我极大的帮助，多次帮我解决有关模型的结构、机理方面的问题并在模型参数的调整等方面都给过我很多的意见。农科院区划所的刘佳老师提供了大量有关 Arcgis 方面的技术支持，辛晓平老师提供了许多 EPIC 模型的技术支持。在此，对他们的支持和帮助一并表示衷心的感谢！

最后我还要感谢区划所的苏胜娣、张佩芳老师和区划所 2003 级的同学对我的支持和帮助，使我愉快地度过了攻读硕士期间的学习、生活时光。

本文的完稿凝聚的不仅仅是我个人的心血和汗水，还包括了许多恩师、益友和同学们的指导和帮助，再一次向你们致以我最诚挚的谢意。

余福水

2006 年 10 月

附录

附录 1 EPIC 模型中作物名称和代码

1. SOYB 大豆
2. CORN 玉米
3. GRSG 高粱
4. COTS 机摘棉花
5. COTP 人摘棉花
6. PNUT 花生
7. SUNF 向日葵
8. CSUN 加拿大向日葵
9. 没有使用
10. WWHT 冬小麦
11. SWHT 春小麦
12. CSWH 加拿大春小麦
13. DWHT 达拉谟(英国地名)小麦
14. BARL 大麦
15. CBAR 加拿大大麦
16. OATS 燕麦
17. COAT 加拿大燕麦
18. RICE 大米
19. RYE 裸麦或黑麦
20. WPEA 冬豌豆
21. LEN1 小扁豆
22. LENT 小扁豆
23. CAN1 油菜
24. CAN2 油菜
25. FLAX 亚麻
26. FPEA 野豌豆
27. MUNG 夏季绿豆
28. SESB 田菁
29. 没有使用
30. SGHY 高粱干草
31. ALFA 紫花苜蓿
32. CLVA 三叶草, 苜蓿
33. CLVR 红三叶草, 红苜蓿

34. CLVS 甜三叶草, 甜苜蓿
35. TIMO 猫尾草属, 猫尾草, 梯牧草
36. RNGE 牧场
37. SPAS 夏季牧场
38. WPAS 冬季牧场
39. RYEA 阿尔泰野黑麦
40. RYER 俄国野黑麦
41. RYEG 一年生野黑麦草
42. WWGR 西部冰草
43. NWGR 北部冰草
44. SWGR 细长冰草
45. CWGR 有冠冰草
46. BROM 雀麦草
47. BROS 平滑雀麦草
48. CWPS 加拿大冬季牧场
49. BERM 百慕大群岛(北大西洋西部群岛)BERMUDA
50. POTA 马铃薯
51. POT2 马铃薯
52. ASPR 芦笋
53. BROC 椰菜
54. CABG 甘蓝, 卷心菜
55. CAUF 花椰菜
56. CELR 旱芹, 芹菜
57. LETT 莴苣, 生菜, 苦菜类
58. OLET 叶子莴苣
59. SPIN 菠菜
60. CRRT 胡萝卜
61. ONIO 洋葱
62. SGBT 甜菜
63. GRBN 绿豆
64. LIMA 利马豆
65. PEAS 豌豆
66. CUCM 黄瓜
67. EGGP 茄子
68. CANT 罗马甜瓜, 香瓜
69. HMEL 哈密瓜
70. WMEL 西瓜
71. PEPR 胡椒粉

- 72. STRW 草莓
- 73. TOMA 西红柿
- 74. SPOT 甜马铃薯
- 75. SCRN 甜玉米
- 76. TOBC 烟草
- 77. SUGC 甘蔗, 糖蔗
- 78. FESC 牛毛草, 酥油草
- 79. PMIL 珍珠粟
- 80. PINE 松树
- 81. MESQ 豆科灌木
- 82. APPL 苹果树

附表 2 EPIC 模型中气象数据

1) 创建一个包含日常气象信息的 FORTRAN 语言格式的文件（将其置于 ASCII 型式，以便 FORTRAN 可以读它）(I6, I4, I4, 6F6.2)

例如：

年	月	日	RAD	TMAX	TMIN	RAIN	RHD
I6	I4	I4	(太阳辐射)	(最大温度)	(最小温度)	(降水量)	(相对湿度)
			F6.2	F6.2	F6.2	F6.2	F6.2
			0	0	0	0	0
			3 45	25.3	14.02	20.5	0.65
			“	“	“	“	“
			兰利	摄氏度	摄氏度	毫米	纯小数
(单位面积上太阳辐射的能通量单位)							
(往下 365 或 366 行)							

EPIC 模型读取前 14 列作为日期数据，接下来的六列数字就可以进入气象数据值。如果你没有特定变量的数据（例如 RAD, WV 等等），就使用适当的 NGN-气象输入代码。参见下面的第二部分。使用如下的代码填充数据组中的空缺数据：

RAD	TMAX	TMIN	RAIN	RHD	WV
(太阳辐射)	(最大温度)	(最小温度)	(降水量)	(相对湿度)	(风速)
0	0	0	999	0	0
“	“	“	“	“	“

EPIC 模型将为你估算出空缺的数值。不要留下任何空白。每一个单元格都应该要么是一个真正的数值，要么就是一个估算代码。当为 TMAX 和 TMIN 输入数值时，你必须要么都输入真正的数值，要么都输入 0。你不能只填其中的一个，否则 EPIC 模型无论如何都会为你把两个值都估算出来。降水量必须输入合法数据或者输入 999 来估计出当天的降水量。

习惯上每年一个文件，但实际上一个文件可以包含许多年的数据。你也可以只包含一年中的

部分数据来进行重点研究。详情见第 D.8 节（气象数据高级应用）。

这个文件可以任意改名。通常我们使用区域，年加上“.WTH”的后缀来命名。例如，英国伦敦 1991 年的气象数据就可以命名如下：

ENLOND91.WTH

上面的数值都是以米制为单位的。如果你的数据库是英制单位，请与 Georgie Mitchell 联系以获得该程序的转化版本。

2) NGN 参数必须大于零，以便 EPIC 模型能够读出日常气象文件。

[0]产生所有数据

[1]降雨量

[12]最高-最低温度（和降水量）

[3]仅包括太阳辐射（和降水量）

[4]仅包括风速（和降水量）

[5]仅包括相对湿度（和降水量）

[123]读出降水量，最高温度和最低温度以及太阳辐射

[234]输入降水量，最高温度和最低温度以及太阳辐射和风速

[2345]读出所有数据

注意，这个代码其实就是告诉 EPIC 模型需要打印输出哪些信息。实际上，EPIC 模型阅读所有字段并且决定使用哪一个，估算哪一个或者生成哪一个（对于降水量来说是 0 值或 999）。也要注意每一个代码都包括降水量。这是因为要用它来生成其它数据。

3) 用户可以在一个单一模型执行中使用一个或多个气象文件。使用到的气象文件的名字一定要在最后一次耕作后插入在 EPIC 模型数据组的末尾。在最后一次操作和气象文件名字下面有一个空白行。如果将气象文件作为数据组放置在同一个目录下，这个目录的名字是不必要的，但是，如果气象文件被放置在不同的目录中，那么该目录的名字就一定要包含进去。当 EPIC 模型读到一个文件的末尾时，它会检查寻找另一个气象文件的名字。这些文件应该包含多于一年的气象数据。记住，当 LPYR 代码（闰年）的值为零时，EPIC 模型就会认为一个闰年的气象文件中会有 366 行数据（闰年从开始年份 IYR 计算）。

附录 3 作物参数文件

1、WA---潜能转化为生物量的转化因子或者潜在的辐射利用效率，即光合作用所吸收的每单位辐射的潜在生长率（包括根）。这个参数应该放到最后再调整，并且应该基于研究结果进行调整。这个参数对生长率、季节中的压力发生率和最后产量都会有很大的影响。注意在调整这些参数的时候，只能基于无干旱、营养或者温度压力下产生的数据（见 FBMD 和 WAVP）。

2、HI---正常的收割指数（作物产量/地上生物量）。该项作物参数应当基于这样的实验数据：即作物的生长压力被减至最小，使其可以获得它的潜能。如果经济产量在增长时受到了水压的限制，这时候 EPIC 模型就会向下调整 HI 指数（在糖类作物中则应向上调整）。

3、TB---植物生长的最佳温度（摄氏度）

4、TG---植物生长的最低温度（摄氏度）。尽管栽培变种为适应不同的气候极度条件会有所不同，但是 TB 和 TG 参数对于一种作物的大多数栽培变种来讲都是非常稳定的。若结果显示出不合理的温度压力量，那么在试图调整 TB 或 TG 参数前应该先行检查气象数据。

5、DMLA---最大潜在叶面积指数。位于 CLASCROP 数据组中的此项参数是基于旱地农业的平均植物密度而言的。在有干旱化倾向的地区，不管原有的植物密度是多么小或者原来灌溉区的植物密度是多么的大，DMLA 参数都需要调整。

6、DLAI---生长季中的峰值点（以作物成熟需要的热量单位总值为分母，将该参数表示为一个分数）。此后，由于叶子开始老化，叶子面积开始减少。在大多数谷类作物中，谷壳开始填充后不久，叶子面积就开始下降了。对于大多数谷类作物，该参数取值 0.5 到 0.8 之间较好。对于草料作物，它们在叶子面积取得高值时就被收割了，我们采用接近 1.0 的值（例如 0.99）。该变量结合 RLAD 和 RBMD 参数，一起在作物的物理成熟期到来后控制着作物生长情况的下降。

7/8、DLP1 和 DLP2---这两个参数在作物无生长压力条件下控制着叶子面积的生长。每一个参数都包含两个百分数（从 0 到 99），用小数点分开。这个小数点左边的分数以生长季为基数（以积温来表示），在小数点右边的分数以叶子的最大生长面积为基数。DLP1 和 DLP2 参数用来确定指示最大叶子面积和生长季之间相互关系的 S 形曲线的具体形状。

9、RLAD---叶面指数下降率参数。对于大多数的谷类作物，当作物到达物理成熟期时，由于叶子老化，叶子面积开始下降。在大多数实例中，叶子的老化开始于植物体较低部分的黄叶，然后不断向上老化，直到所有的叶子老化，植物死掉。例如，玉米，小麦和大豆都是这样。在许多谷类作物中，叶子面积指数的下降与果实开始填充谷壳后的时间成线性关系。老化叶子中的营养物和碳水化合物经常输送给谷子本身。在 EPIC 模型中，作物参数 DLAI（前面已述）控制着生长季中叶子面积开始下降的转折点。作物参数 RLAD 控制着下降的速率。如果 RLAD 设置为 1.0，那么下降的速率就是线性的。如果 $RLAD < 1.0$ ，那么下降率开始时很慢，随后下降率加快，直到所有的植物叶子在成熟期死掉。如果 $RLAD > 1.0$ ，那么老化速率刚开始会很快，随后在成熟期变慢。在任何情况下，EPIC 模型都假定当生长季中的某一点等于 DLAI 值的时候，叶子的面积就开始下降，并且在成熟期时叶面指数接近为零。下图显示了 DLAI 和 RLAD 参数是如何相互作用控制叶子面积的下降的。

10、RBMD---生物量下降参数。在 EPIC 模型中，作物参数 WA 控制着作物将太阳能转化为生物量的最大效率。对于大多数的作物，这个效率在生长期是不变的，此时，象纤维素一样的碳水结构化合物是作物成长的主要产品。然而，当谷类作物开始形成种子时，尤其是那些富含蛋白质或油类的作物，转化的速率就会下降。这就是说，所吸收的每单位的太阳能形成的干物质将减少。

另外，当叶子开始变黄老化时，转化的效率将下降得更快。在作物达到成熟期时（此时生长期---the fraction of the growing season 要大于 DLAI），EPIC 模型使用 RBMD 参数来降低将太阳能转化为生物量的转化速率。从计算上来讲，RBMD 降低 WA，就象 RLAD 降低叶面指数（参见上面的图形）一样。例如，RBMD=1.0 就会使得 WA 在作物从 DLAI 峰点到物理成熟期的这一时间里呈现线性下降。

11、ALT---指示作物对铝饱和溶液的承受度（1-5：1=敏感，5=毫不敏感）

12、GSI---该作物参数指示在高太阳辐射、低气压区的最大气孔度。Korner et al.(1979)的报告指出了 246 种栽培作物的最大气孔度。(Korner,C.H.,J.A. Scheel,and h.Bauer,1979 年.Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants,Photosynthetica13(1):45-82。)

13、CAF---关键通风因子，以土壤孔隙度为分母的一个分数。此时，很差的通气状况开始限

制植物的生长。对大多数作物来说，它的值设置为 0.85，玉米较为例外，它的值设置为 1.0。

14、SDW---正常种植率 (kg ha⁻¹)。这个变量仅用来计算种子的花费情况。

15、HMX---最大作物高度 (米)。

16、RDMX---最大根深度 (米)。这个变量会影响土壤的湿度扩展情况。

17、WAC2---在 EPIC 模型中，辐射利用效率与大气中二氧化碳的浓度息息相关。WAC2 是一个“S”形参数，用来描述二氧化碳的浓度对作物参数 WA 的影响。在小数点左边的数值就是二氧化碳的浓度，比周围环境的浓度要高。在小数点右边的数值则是相应的 WA 参数值。WA 数值的提高可以从短期作物生长的实验数据中获得，这个实验应该在增高的二氧化碳浓度水平下进行。计算出在增高的二氧化碳浓度下的作物生长率与在大约 350 $\mu\text{l-l}$ 二氧化碳条件下作物生长率的比例。用在 350 $\mu\text{l-l}$ 条件下的 WA 参数值乘以该比例，从而获得在小数点右边的那个数值。该比例的典型数值对于以 C4 方式进行光合作用的作物来说一般为 1.1-1.2，对于 C3 类作物来说，一般取值 1.3-1.4。(Kimball,B.A. 1983, Carbon dioxide and agricultural yield:an assemblage and analysis of 770 prior observations. Water Conservation Laboratory Report 14. USDA/ARS. Phoenix, Arizona) .

18、CVM---水蚀因子的最小值。此项参数的调整应该结合间作种植或无耕种耕地的模拟过程来进行，以便反映添加的覆盖层。

19、CNY---正常情况下产量中的含 N 比例。此项参数可以由 Morrison 的 Feeds and Feeding 中估算出。N 在 Morrison 中的比例可通过除以干物质占总产量的比例来调整成干重。

20、CPY---正常情况下产量中的含 P 比例。此项参数可以参见 CNY 得出。

21、WSYF---收割指数的下限。该数值介于 0 和 HI 之间，它代表着因水的限制而所期望的最低的收割指数。

22、PST---害虫损害因子 (昆虫，杂草，疾病)。损害后剩余产量的比例。EPIC 模型的 3438 版本和更早的版本一般将其数值定为 0.95。1599 版本和后来的版本输入了最小可能的因子。1599 版本和后来的版本添加了一个调整的过程，通过湿度、温度和残留物来实现。目前这是一个合理的估计，不过将来的版本会包括更多详细的过程。你可以在已经发生大片损害的区域中来调整这个参数。

23、COSD---种子花费

24、PRY---产量价格

25、WCY---产量中的含水量。大多数谷物都有标准的含水量，然而，有时在某些情况用干重更合适，这时 WCY=0。

26、BN1---生长初期作物生物量中的正常含氮量。此项参数基于已经发表的研究结果或相似的作物。

27、BN2---生长中期作物生物量中的正常含氮量。参数的确定与 BN1 相同。

28、BN3---成熟期作物生物量中的正常含氮量。

29、BP1---生长初期作物生物量中的正常含磷量。参数的确定与 BN1 相同。

30、BP2---生长中期作物生物量中的正常含磷量。参数的确定与 BN1 相同。

31、BP3---成熟期作物生物量中的正常含磷量。参数的确定与 BN1 相同。

32、BW1---直立活生物量的风蚀因子。基于 Manhattan 的风力损害方程或在 Manhattan 的风力损害方程中使用的类似作物。

33、BW2---已死亡的直立作物残留的风蚀因子，参数的确定与 BW1 相同。

34、BW3---倒伏的作物残留的风蚀因子。参数的确定与 BW1 相同。

35、IDC---作物分类号（整数）

1 暖季一年生豆类

2 冷季一年生豆类

3 多年生豆类

4 暖季一年生作物

5 冷季一年生作物

6 多年生作物

7 树类作物

注意：其它的作物参数（TB，TG，FRST1，FRST2）在冷暖气候作物之间也是有所不同的。

36/37、FRST1 和 FRST2---霜冻损害曲线的两个峰值点。小数点前面的数字是最低温度，小数点后面的数字是每天损失的生物量比例（是在该最低温度发生的情况下的比例）。注意：10.20 意味着当温度达到零下 10 度时，每天损失的生物量为 20%。负号是由 EPIC 模型自动添加上的，这是由于在 0 度以上很显然不会发生霜冻。应用于田地的精确数据会受到横跨陆地的宏观气候波动的影响。当前的参数是比较合理的估计，然而，它们更可能低估霜冻的损害，而不是高估。

38、WAVP---在 EPIC 模型中，辐射利用效率（WA）对气压差值（VPD）是很敏感的。当 VPD 增大时，WA 就下降。作物参数 WAVP 就是 WA 下降的速率，对大多数作物而言，此项参数建议取值 6 到 8 之间。

39、VPTH---在 EPIC 模型中，叶子（leaf conductance）导率开始时对 VPD 参数并不敏感，直到 VPD 参数（以小时计算）超过了 VPTH 这个阈值（通常为 0.5 到 1.0kPa 之间）之后，它才开始起作用。参见 WA 和 WAVP。

40、VPD2---在 EPIC 模型中，当 VPD 超过 VPTH 后继续增大，它跟叶子（leaf conductance）导率的下降便呈现线性关系。VPD2 是一个双参数，在小数点左边的数字是 VPD 超过 VPTH 的数值（例如：4.0kPa）。在小数点右边的数字是一个小数，它表示在 VPD 取得该值时占最大（leaf conductance）叶子导率的比例（例如：0.7）。

41、SM42---作物号码（见下页列表）

42、RWPC1---生长初期的根重量比例。区分参数将生物量分为地上部分和地下根部分。RWPC1 是生长初期的区分数，RWPC2 则是成熟期的区分数。在这两点之间按照线性关系插入与积温有关的区分点。

43、RWPC2---成熟期时根重量的比例。区分参数将生物量分为地上部分和地下根部。RWPC1 是刚生长时的区分点，RWPC2 则是成熟期时的区分点。在这两点之间按照线性关系插入与积温有关的区分点。

44、CONV---米制度量单位至英制单位的转化因子。当用户选择英制单位输出选项时，所有作物的产量就被转化为每英亩多少英磅。因此，这个转化因子就是每测量单位的英磅数。例如：每蒲式耳(容量单位，等于八加仑)多少英磅，每吨多少英磅，每英担多少英磅等等。例如：玉米就是每蒲式耳 56 英磅。见下面的 UNTC 表格。

45、UNTC---该参数指示在用英制单位输出时为作物产量选用哪一种标签。标签号码如下：

标签号	转化因子	标签缩写	标签
1	随作物而变	BU/ac	蒲式耳/英亩
2	1	LB/ac	英磅/英亩
3	机摘棉花: 3.7 人摘棉花: 2.8	LBL/ac	英磅皮棉/英亩
4	100	CWT/ac	英担/英亩
5	600	AUM/ac	每月放牧牲畜头数/英亩
6	2000	T/ac	吨/英亩

46、CONV2---水分在草料或干草作物生物量中的比例。

47、GMHU----发芽所需要的积温。

注：EPIC 作物模型适用于各类不同的作物。美国大多数的主要作物的参数值已经通过研究确定下来。遍布于美国几百个地方的作物生长过程的模拟都是通过 EPIC 模型实现的。还有一些其他国家也是这样。当包括土壤、气象和管理的输入数据经过仔细的准备后，结果通常都是符合实际的。当 EPIC 模型估算产量与实际有很大差异时，用户应该认真检查输入数据，找到错误，尤其是那些可以影响到水和氮的供应的错误。同时建议检查播种和收割的日期是否正确。许多缺乏经验的用户企图通过调整作物参数来校正谷类产量预测方面的错误，这是不明智的。因为：

- (1) 估计产量和实际产量之间大的差异可能是由误报的或者不实际的参数值所导致。
- (2) 由于问题的真实来源没有查明，错误或误导性的结果肯定会发生。
- (3) 只有在作物生长研究中具有专家知识的有经验的用户才可以调整作物参数。

对于一种新作物的初始参数估计可以参照在作物参数文件中已经有的相似的作物来进行，并根据需要进行调整。这就给出一个与其它作物的估计参数相协调的起始点。然后，对特定区域内不同的作物类型作出参数调整。这个调整应该基于对作物生长和发展知识的了解，而不是仅仅企图解释产量的差异。在 EPIC 模型模拟中产生的无法解释的产量差异，可能是由于输入数据过少或者是有些过程在模型中尚未建立而导致的。单纯依靠一个实验或者一个环境得到数据，然后对模型进行调整以提高其作物产量或其它变量的预测精度，会增加在其它条件下应用此模型发生的错误。

附录 4 复合参数文件

这些复合参数目前正处于测试期，以便估计出在交替性的作物-土壤-气候情况下的参数值，也可用来开发一些更为精确的关系，而这些关系将加在 EPIC 或 ALMANAC 模型的未来版本中。用户应该注意，这些实验数据只是为这个特别的版本而设计的。由于在先前的 EPIC 模型中的一些复合参数将变为这个模型输入数据的一部分，因此新版本将有一套新的实验性参数集。

PARM 1---用来调整在 PENMAN-MONTEITH PET 方程中的作物棚防护力因子。

PARM 2---土壤容重（作物根生长的限制因子）。当土壤容重大于 PARM 2 的值时，在低沙含量的土壤中，作物根的生长会降低。当沙含量上升时，根生长的所受限制就减少。设置该参数为 2 到 1.5 可以将土壤紧实度对根生长的限制降到最低，设置其值为 1.2 到 1.3 表示根生长对土壤紧实度的敏感程度为中等。

PARM 3---该参数是一个以生长季为基数的分数，该分数表明环境限制因素影响着收割指数。例如，0.5 到 0.6 对许多即将处于开花期的作物来说就表明环境限制因素开始影响收割指数了。

PARM 4---氮淋溶因子。在没有咨询 Jimmy Williams 的情况下，不要调整该参数。

PARM 5---土壤表层 0.5 米深度内水含量的下限，表示作物在萎蔫点的水含量。

PARM 6---控制冬季生长作物冬季休眠的因子。休眠期以天数计算。该参数以小时为单位，表示在作物生长前，从年最短白昼起，每日必须增加的小时数。

PARM 7---氮固定因子。EPIC 模型的氮固定形式的发展是模拟了一年生豆类植物的固氮情况，即氮的固定情况很容易受到早期的根瘤发展情况，生长晚期的根瘤老化情况，表层 30 厘米以内的土壤水情况以及根部区域土壤的矿物氮情况的影响。常年生豆类作物有着很深的根系和更为稳定的活跃根瘤，从这一点可以想象，它受生物气候和土壤水等因素的影响要小一些。PARM 7 就是用来模拟这些常年生豆类固氮情况的。将它的数值设置为 1.0，表示大豆和其它的一年生植物。将其值设置为介于 0.0 和 1.0 之间来减少它受环境限制因素的影响。对于紫花苜蓿来说，则可以将它的值设置为 0.25。

PARM 8---风引起的土壤侵蚀度。在没有咨询 Jimmy Williams 的情况下，不要调整该参数。

PARM 9---前 30 天的降水量减去径流量水平的差值，如果超过此值，那么由于微气候中的高湿度，很容易导致害虫危害作物事件的发生。

PARM 10---以 $t \times ha^{-1}$ 为单位表示的地表作物残留量，此量是作物虫害开始所必需的。例如象 0.5 这样很小的数值可以引起很大的虫害事件。这是一个新参数，还没有经过完全测试，以表明虫害和作物残留量的关系。仅当用户关于作物残留量和虫害之间关系的知识能够充分验证这种关系的敏感性，并且对此参数进行了很好的模拟时，才可以修改此参数。

PARM 11---作物发芽所需的犁沟深度（毫米）处的最小土壤水含量。当前设置为 0.00，表示没有限制。用户具备土壤和作物关系之间的知识后才可以调整此项参数，以便获得作物发芽的正常土壤湿度水平。

PARM 12---控制土壤表层 0.2 米深度内蒸发的速度。建议取值 2.5。

PARM 13---控制融雪速度。在没有咨询 Jimmy Williams 的情况下，不要调整该参数。

PARM 14---表层径流量中硝酸盐的浓度与土壤过滤后硝酸盐的浓度的比例。

PARM 15---土壤温度滞后因子。例如，基于昨天土壤温度的比例。

PARM 16---施肥限制。如果根部区域不稳定的磷的浓度（ppm）超过了 PARM 16 时，则不能施肥。

PARM 17---雪或植被对土壤温度的绝缘效果的上限。在没有咨询 Jimmy Williams 的情况下，不要调整该参数。

PARM 18---表层径流量中农药的浓度与经土壤过滤后农药浓度的比例。在没有咨询 Jimmy Williams 的情况下，不要调整该参数。

PARM 19---秋季播种春季生长的作物的潜在热量系数。

PARM 20---施肥限制。如果根部区域不稳定的氮的浓度（ppm）超过了 PARM 20 时，则不能施肥。

PARM 21---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 22---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 23---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 24---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 25---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 26---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 27---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 28---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 29---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

PARM 30---EPIC 模型 5125 版本新加入的参数。

作者简历

姓名：余福水

性别：男

民族：汉 族

教育经历：

2003.9-2006.7

中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所 攻读工学硕士