

# 全球变暖背景下广西物候变化的特征分析

专业：气象学

学位申请人：李世忠

导师：李江南

## 摘 要

气候对地球上动植物生态系统的影响研究受到愈来愈多科学家的关注。包括农作物在内的生物物候期在气候变暖背景下的变化是当今生态学、气候学和农业气象学研究的热点。本文利用 1981-2008 年广西农业气象观测站网所观测的物候资料和气象资料，分析了气候变暖背景下广西物候变化特征，深入研究了气候变暖对广西物候变化的影响，得到了以下几点主要结论：

1、广西椴树春季物候期与秋季物候期异步。春季物候期出现早的地区，秋季物候期出现迟，春季物候期出现迟的地区，秋季物候期出现早。

2、全球变暖背景下，广西大部分地区春季物候期呈提前趋势，芽开放期、展叶期、开花始期和开花盛期 10 年提前 0~21 天；桂南的天等、平果、都安、宜州和融安一带，桂东到桂南，广西椴树叶完全变色期和落叶末期呈现提前趋势，10 年提前 0~30 天，其它地区呈推迟趋势，10 年推迟 0~45 天。

3、研究表明，开花前 2 个月的平均气温是影响广西椴树花期早晚的关键气候因子。1981-2007 年间，南宁、百色 1-2 月份平均气温的升高，导致椴树花期 10 年提前了 4~5 天，1983-2007 年间，桂林 2-3 月份平均气温的升高引起椴树花期 10 年提前了 6~7 天。

4、广西早稻出苗、三叶和拔节期自西南向东北逐渐推迟，而抽穗和成熟期则自东南向西北逐渐推迟。纬度每向北增加  $1^{\circ}$ ，早稻发育期推迟 4~5 天。海拔高度每上升 100 米，早稻抽穗和成熟期推迟 4~5 天。广西晚稻各发育期自北向南均逐渐推迟。纬度每向北增加  $1^{\circ}$ ，广西晚稻各发育期提前 2~5 天。

5、全球变暖背景下,广西大部分地区早稻各发育期呈现出提前趋势,出苗、三叶、拔节、抽穗和成熟期10年提前0~10天。广西绝大部分地区晚稻发育期呈现出推迟趋势,出苗、三叶、拔节、抽穗和成熟期10年推迟0~12天。

6、南宁生长季期间 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温变化倾向率为 $21.96^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,桂林生长季期间 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温变化倾向率为 $34.89^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。气候变暖导致南宁和桂林早稻各发育期每10年分别提前2~9天和0~9天。气候变暖导致南宁和桂林晚稻各发育期每10年分别推迟1~12天和2~6天。

7、近34年来桂林年平均气温呈上升趋势,其中春季增温对增暖贡献最大,增温率为 $0.314^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。3月平均最高气温( $T_{\text{m}}$ )和2~4月平均气温( $T_{2-4}$ )分别是影响青蛙和蟋蟀始鸣期的主导气候生态因子。3月份平均最高气温( $T_{\text{m}}$ )升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,青蛙的始鸣期提前10.6d。2~4月平均气温( $T_{2-4}$ )上升 $1^{\circ}\text{C}$ ,蟋蟀的始鸣期提前约15.4d。

8、广西家燕始见期自西南向东北逐渐推迟,桂西南较早,桂东北较迟,而家燕绝见期自东南向西北逐渐推迟,桂东南较早,桂西北较迟。

9、研究表明,桂林家燕始见期稳定,绝见期以 $21\text{d}/10\text{a}$ 的速率推迟。影响家燕始见期的主要气象因子为1月平均最高气温,1月份平均最高气温升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,家燕始见期提前约1.3d。6月份降水量是影响家燕绝见期的主要气象因子,6月份降水量增多10mm,家燕绝见期推迟约4.8d。

**关键词:** 气候变暖; 物候期; 空间分布; 气温; 倾向率

# **Analysis of the phenophase changes under climatic warming background in Guangxi**

**Major: Meteorology**

**Name: Li Shizhong**

**Supervisor: Li Jiangnan**

## **ABSTRACT**

The study of the response of phenology to climate changes is one of hot issues at present. Based on phenological and meteorological data for the period of 1981-2008 of Guangxi meteorological information center, statistic methods and geographical information system were applied to study the variation characters of the phenophase under climatic background in Guangxi, and to analyze the influence of air temperature on the florescence of Chinaberry. The main conclusions were as follows:

1. It is asynchronous between spring phenological phase and autumn phenological period of Chinaberry. Where the spring phenophase arise early, then the autumn phenophase late, and vice versa. In northern sphere, latitude increases  $1^{\circ}$ , the spring phenological period delays 5-7 days. Elevation raises 100m, the autumn phenological phase advances 3-5 days. The Chinaberry florescence appears advanced trend with 7 days each decade.

2. The seeding period, trefoil stage and jointing stage of early rice delay gradually from southwest to northeast, then heading stage and maturation period delay gradually from southeast to northwest. The early rice developmental phase presents advanced trend with 8 days each decade in large parts of Guangxi. In northern sphere, latitude increases  $1^{\circ}$ , the early rice developmental phases postpone 4-5 days. Elevation raises

100m, the heading stage and maturation period postpone 4-5 days.

3. The whole late rice developmental phases delay gradually from north to south. The every late rice developmental phase emerges postponed trend with 8 days each decade in large parts of Guangxi. Latitude increases 1°, the late rice developmental phases advance 2-5 days.

4. The starting sight date of barn swallow postpones gradually from southwest to northeast, and halting sight date delays gradually from southeast to northwest.

5. The two month air temperature before flowering of Chinaberry is the crucial climate factor which determined the florescence early or late. The findings reveal that the 2-month mean air temperature is negatively correlated with the florescence of Chinaberry.

6. the Frog and Cricket phenology are mainly reflected in generally advance in the start warble date, stable in the halt warble date and notably prolonged in interval dates. The mean annual temperature has presented an markedly increasing trend in the last 34 years in yanshan, and dominated by spring warming. It is the Feb.-Apr. mean temperature ( $T_{2-4}$ ) and the March mean-highest temperature( $T_{M3}$ ), the dominated climatic economical factors which impact the Frog and Cricket start warble date and interval phase. The conclusion shows that the change of animal phenology is the responses of natural animal to climate warming.

7. The Swallow phenology is stable in the start sight date(SSP), notably prolonged in the halting sight phase(HSP) and interval dates in yanshan. The main climate factors which influenced HSP and days between SSP and HSP were the precipitation in june .The increased maximum air temperature in Monday led to advance of the SSP,while the increased precipitation in June led to postpone of the HSP.

**KeyWords:** climatic warming; phonological period ; spatial distribution; air temperature; trend rate

## 论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其它个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名



日期：2020年6月5日

## 学位论文使用授权声明

本人完全了解中山大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆、院系资料室被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，可以采用复印、缩印或其他方法保存学位论文。

学位论文作者签名：李世忠

日期：2010年 6 月 5 日

导师签名：李红菊

日期：2010年 6 月 5 日

# 第一章 引言

## 1. 1 物候研究的的目的和意义

### 1. 1. 1 物候学的概念

物候是自然环境中动植物生命活动的季节现象和在一年中特定时间出现的某些气象、水文现象。主要包括两个方面：1、自然物候：(1) 植物发芽、展叶、开花、果实成熟、叶变色和落叶等；(2) 候鸟、昆虫以及其它动物的初见、初鸣、绝见、终鸣、飞来、离去和冬眠等；(3) 气象水文现象如初霜、终霜、初雪、终雪、结冰、消融、雷声、闪电和虹等。2、作物物候：即包括农作物的播种期、生长期和收获期等发育期。

物候学是研究自然界植物、动物和气象、水文、土壤等环境条件的周期性变化之间相互关系的科学，它的目的是认识自然季节现象变化的规律，以服务于农业生产和科学研究<sup>[1]</sup>。物候学主要通过观测和记录一年中植物的生长荣枯，动物的迁徙繁殖和环境的变化等，比较其时空分布的差异，探索动植物发育和活动过程的周期性规律及其对周围环境条件的依赖关系，进而了解气候的变化规律及其对动植物的影响。它是介于生物学和气象学之间的边缘学科。环境对动植物生长和发育的影响是一个极其复杂的过程，但是，用仪器只能记录当时环境条件的某些个别因素，而物候现象却是过去和现在各种环境因素的综合反映。因此，物候现象既可以用作环境因素影响的指标，也可以用来评价环境因素对动植物影响的总体效果。

中国最早的物候记载见于公元前一千年以前的《诗经·幽风·七月》，其后的《夏小正》、《吕氏春秋·十二纪》、《淮南子·时则训》和《礼记·月令》等，则已经按月记载全年的物候历了。而《逸周书·时训解》更把全年分为七十二候，记有每候五天的物候，成为更加完善的物候历，北魏时

曾附属于历书。在西汉，著名的农学著作《汜胜之书》就有以物候为指标来确定耕种时期的记载，如“杏始华荣，辄耕轻土弱土；望杏花落，复耕。”至南宋末，浙江金华人吕祖谦记载了南宋淳熙七年和八年(1180、1181)金华的物候，有腊梅、桃、李、梅、杏、紫荆、海棠、兰、竹、豆蓼、芙蓉、莲、菊、蜀葵和萱草等 24 种植物开花结果的日期，春莺初到和秋虫初鸣的时间，是世界上最早的实际观测的物候记录。明代，李时珍的《本草纲目》所载的近 2000 种药物中，有着极为丰富的植物物候资料，此书的第四十八、四十九两卷记述了布谷鸟和杜鹃的地域分布、鸣声、音节和出现时间等，是鸟类物候的翔实记载。19 世纪中叶，太平天国颁发的《天历》，其中《萌芽月令》就是以物候指导农时的月历。我国最早有组织的物候观测始如 1934 年，1962 年在竺可桢的推动下得到发展，并建立了物候观测网。文化大革命后，物候观测工作纳入农业气象观测项目，从此开始系统的自然物候和作物物候的观测工作。

在欧洲，古希腊的雅典人就已经编制了农用物候历。英国则从 1736 年起至 20 世纪 40 年代止，对植物、候鸟和昆虫等 27 种动植物进行了长期观测和记录，这是欧洲年代最长的物候记录。18 世纪中叶，瑞典植物学家林奈所著《植物学哲学》一书，概述了物候学的任务，物候的观测和分析方法，并组织了有 18 个点的观测网，他是欧洲物候学的主要倡导者之一。在美国，森林昆虫学家霍普金斯于 1918 年提出了北美温带地区物候现象空间分布的生物气候定律。

20 世纪 50 年代以来，由于各国物候观测网的扩大，物候资料更加丰富了，特别是遥感技术和电子计算机等的应用，物候学的研究和应用得到了更大的发展。

## 1. 1. 2 物候在生产实践中的应用

### (1) 物候在农业上的应用

竺可桢指出现代研究物候的主要目的是认识自然季节现象的变化规律，服务农业生产和科学研究。在农业上，把进行农事活动的时间或指标与物候资料进

行对比分析，找出相应的物候指标，就可以依据物候指标进行农时预报，这就是物候报农时方法。

用物候指标比用温度指标简单、直观，而且可靠。因为任何气象仪器只能测单一的气象要素，根据农业气象指标预报的农时，很难反映作物对环境的综合要求，而物候指标是活指标。每个物候现象的出现都是气候等环境因素综合影响的结果，它既是当时当地气候现象的指标，也是过去一段时期内气象要素的累积指标，还能反映气候的年际变化和地区差异，所以物候指标是活农时。如果把异地的自然物候、作物物候、病虫害发生期与农事活动的多年观测资料进行整理，然后按出现日期的先后排列成表，就是该地区的自然历或物候历。它体现了物候现象出现的顺序性和相关性，是进行农时预报的重要工具和基础材料，可用于指导生产。如毛桃始花与玉米、大豆播种，银杏叶开放与早稻播种，野菊花开花与小麦播种等都是相对应的，因此，物候历是预报农时的重要工具。

人们还利用气候条件对物候期的影响及相互关系进行研究，开展观赏植物花期的预报，服务于旅游业。

## （2）物候在气候变化研究中的应用

动植物物候期变化的主要原因是生态因子的变化。生态因子是指环境中对生物生长、发育、繁殖、行为和分布有直接或间接作用的环境要素，可分为非生物因素和生物因素。非生物因素如气候、土壤、地形等，生物因素如植物、动物和人类活动。非生物因素一般是主导生态因子<sup>[2]</sup>。每种自然生物的生长发育决定于天气各种要素的综合作用，所以自然生物的物候期变化归根结底是气候条件综合作用的表现。历史物候记载是一种间接的气候资料，是气候变化的有力证据。因此自然物候资料可用于研究气候变迁及气候变化。

## （3）物候在生态环境保护中的应用

在林业上，人们参照树木的物候规律确定采种和造林的时期。物候还能进行环境污染的监测。环境污染已成为当前世界引人注目的社会问题，污染造成自然物候的变化，可从污染造成的物候变化以及植物的损害情况来掌握污染的程度。物候观测可以起到监测环境污染的作用，它能够监测与生态系统有关的气候参数。另外，物候在人类健康方面起到很重要的作用。欧洲的科学家和医务人员重视如过敏和痢疾的研究，涉及到花粉的季节变化及预报。气候变化引起的年际差

异在增加，花粉季节也有年际变化，目前花粉季节预报流行于整个欧洲。物候资料、物候模型对改善花粉预报和评价过敏等起了重要作用。在农业病虫害防控、有益物种的保护、花粉释放和花粉对人类健康的影响等方面领域的研究，物候资料也起着关键性的作用。

### 1. 1. 3 气候变化对物候影响研究的目的和意义

IPCC 第一工作组的报告认为，全球平均温度在 20 世纪期间增加了 0.4~0.8℃，气候变暖已成为全球关注的重要问题<sup>[9]</sup>。科学迹象清楚表明由人类活动产生的温室气体的排放是引起气候变化的主要原因。基于 21 世纪温室气体浓度的增加，科学家预测地球上的温度将继续升高 1.4~5.8℃。物候现象与气候等环境要素息息相关，物候对全球变暖的响应研究正在成为物候研究的一个新的热点领域，气候变暖给生态系统、农业生产和动植物带来严重影响。

气候变化及其对陆地生态系统的影响存在着各种规模的时间尺度。就季节和年际变化而言，植物物候如发芽期、展叶期、开花期、叶变色期和落叶期等通常被用来作为植物对气候变化的生物感应器。气候变暖影响了动物的地理分布、动物物候（如初鸣、初见、终鸣、绝见、繁殖、迁徙等）、动物行为以及种群大小。长期的物候记录通常提供一个在特定地点某个生物对气候变化的响应。目前全球气候变化研究的焦点在物种如何响应过去和将来的气候变化。物候是由环境因子驱动的动植物季节性活动的传统科学，与全球气候变化的研究有密切关系。因此，研究气候变化对自然物候的影响以及相关关系是很重要的。

物候研究已经得到了生物学家越来越多的关注<sup>[4][5][6][7]</sup>。由于植物物候客观地描述了陆地植被的季节性生长，它们的出现时间能够决定生长季节的开始和结束。物候已成为全球陆地碳循环模型和净初始生产力模型的重要参数，生长季的长度也是植被冠层光合作用的活跃期，它在陆地原始生产力和全球碳循环方面的研究也是一个主要驱动因素，因此，目前物候模型在区域生态系统模拟模型和生物—大气圈环流模型中起了相当重要的作用。物候在气候变化研究中对全球气候模型、遥感和气候影响评价有重要的影响。随着高速计算机和卫星技术的发展，物候学对气候学和生物学的益处越来越增强，已经成为气候学和生态学研究的重

要焦点。因此，物候研究具有重要的理论意义，同时在生产实践中也具有很大的应用潜力。

## 1. 2 国内外研究进展

### 1. 2. 1 气象因子对植物物候期的影响

控制植物物候变化的内外因素很多，内因有遗传因子和植物激素，外因有温度、日照和水分等。内外因素相互联系，由于外界环境的改变，常引起体内植物激素含量的变化，进而引起物候期的变化。植物激素也是控制植物物候的因子，它对植物器官的形成和生理过程有着明显的调节和控制作用，进而影响物候期的早晚。引起物候期变化的因素中，环境因素是变化的条件，遗传因子和植物激素是变化的根据，环境因素要通过植物激素起作用，这是物候变化的本质。

#### (1) 温度对植物物候期的影响

在影响植物物候期的气象因子中，温度具有特别重要的地位，植物的物候节律是温度季节性变化的反映。植物的生理活动是一系列的生化反应，温度会使酶的活性发生变化，适当的温度变化，可促进酶的活性，加快植物发育进程，反之亦然。植物物候与气温息息相关，特别是在植物生长发育各阶段的前期<sup>[8][9]</sup>。据调查，每个物候期的开始日期与其前 2~3 个月的气温有显著的相关关系<sup>[10]</sup>。在中纬度地区，植物的发芽、展叶、开花主要取决于气温<sup>[11]</sup>。在荒漠地区，春季植物物候期提前幅度相对较大的原因主要是由于气温的抬升<sup>[12]</sup>。在中高纬度地区，上半年植物发育的开始期，主要取决于温度临界值，只有当温度超过某一界限温度后，植物的发芽、开花现象才会出现，通常这个界限温度为 5~10℃。春季气温如低于植物始花的临界温度时，始花便会推迟。但早花植物和山地植物的发芽、开花的界限温度偏低些，而晚花植物较高。不同植物，不同物候期对界限温度的要求也不同<sup>[13]</sup>。0℃：土壤冻结和解冻，越冬作物秋季停止生长、春季开始生长。3~5℃：早春作物播种，多数植物开始生长。10℃：春季喜温作物开始播种与生长；秋季水稻开始停止灌浆，棉花品质与产量开始受到影响。15℃：初日为水稻适宜移栽期，棉花开始生长期，终日为冬小麦适宜播种期。20℃：初日为热带作

物开始生长期，水稻分蘖迅速增长，终日时水稻抽穗开花开始受到影响。植物各物候期的到来，不仅要求界限温度的出现，还要求达到发育的准备阶段，即前一发育阶段完成后，才会引起某物候期的到来。植物发育的准备阶段和快速通过界限温度对物候期的出现有重要意义。植物在进入落叶和休眠期的过程中，温度也起着重要作用。在温带，果树正常落叶是日平均气温降到 15℃ 以下，日长短于 12 小时的情况下开始，昼夜温差大，能促进落叶，而生长后期的高温又会延迟落叶<sup>[14]</sup>。吴瑞芬等发现 20 世纪 80 年代以来内蒙古草本植物始花期有提前趋势，温度变化为增温趋势，春季变暖比冬季明显<sup>[15]</sup>。Fitter 等发现在英国气温每升高 1℃ 开花期提前 4 天<sup>[16]</sup>。而在英国 Isles, Sparks 等发现各种植物开花时间的响应是气温每升高 1℃，开花期提前 2~10 天<sup>[17]</sup>。在匈牙利，温度升高 1℃，使刺槐树开花提前 7 天，在晚冬和早春，高温促进植物展叶和开花提前<sup>[18]</sup>。

植物不仅要求一定的温度强度，而且要满足一定的积温才能完成其生活周期。植物的各个物候期都有一定的积温要求，只有满足了它的要求，该物候期才会出现。不同的植物完成自己的生活周期需要不同的积温，不同的发育期有不同的积温要求。积温常用于农业气象预报，一般用于作物发育期、收获期以及病虫害发生发展的预报。预报作物未来发育期开始日期的公式：

$$D=D_1+A/(t-B) \quad (1-1)$$

式中，D 为所要预报的发育期， $D_1$  为前一发育期出现的日期，A 为由前一发育期到预报发育期之间的有效积温，t 为两发育期间的平均气温，B 为生物学下限温度。冯颖竹等<sup>[19]</sup>对广东省南雄、和平两地银杏的物候进行了观测和分析，发现影响南雄银杏花期的主要气候因子是当年 2 月份的平均气温，影响果实成熟期的主要气候因子是花期至成熟期的积温。张秀英等发现桃花的始花期与花前 2~3 旬的平均积温和平均最高旬积温关系密切<sup>[20]</sup>。张福春等研究了我国近 30 年的物候资料和气候资料，认为春季树木的展叶、开花主要受春季气温影响，果实或种子成熟期主要取决于果实生长期的积温，秋季树木开花和落叶主要是气温下降到一定界限引起的<sup>[21]</sup>。Zhang 等研究表明物候的持续时期与活动积温有显著的相关性，植物完成一定的发育期要求一定量的积温<sup>[22]</sup>。

有些植物在其发育过程中，需要一定的低温环境或低温刺激，否则不能正常开花。如冬小麦必须在秋季播种，出苗后越冬，经受一定的低温刺激，来年夏季

才能抽穗开花，完成由生长向发育的转化。冬季作物在苗期需要经受一段时期的低温，第二年才能和春播作物一样开花结实，这种现象就是春化现象。需要春化的植物种类很多，它们表现出对低温的绝对要求，即没有适当的低温便不能开花。例如冬性小麦春化所需的温度范围是 0~5℃，春化需要 30~70 天，半冬性类小麦春化阶段所需温度范围是 3~15℃，春化需要 20~30 天。低温对木本花卉的花芽形成也有影响，落叶树如果在花卉形成后的某一阶段未遇到低温，就不能正常开花。

## (2) 光对植物物候期的影响

光对植物具有很重要的生态作用，是一切绿色植物生长发育过程中的一个重要的生态因子。光照强弱和光谱成分不同，会影响到植物的生长发育和光合强度等生理活动的变化；日照长度则制约很多植物的开花、落叶、休眠、地下贮藏器官的形成等过程。在北半球，太阳辐射和气温自北向南增加，因而植物发育速度也往往自北向南加快。当温度相同时，强烈的辐射也会加强光合作用和加快植物的生长发育，因而物候期来得较早。太阳辐射随海拔高度的升高而增加，但它对植物的影响已被气温降低所掩盖，因而物候期是随海拔高度的升高而推迟的。

影响物候的气候因素中，温度条件不是唯一重要的条件，日长也是一个重要因素，有时它的影响比温度更重要。自然界中很多植物的开花对日长十分敏感，有的只有在日长超过临界日长时才开花，而且光照时间越长，开花越早，否则停留在营养状态，这类植物称长日照植物。自然界中那些初夏开花的植物多属此类，如冬小麦、大麦、油菜、萝卜、茉莉花等。长日照植物大多数起源于温带或寒带，在这些地方的生长季节有较长的日照时间。特别是生长在北纬 60° 以上地区的植物种类都是长日照植物。长日照植物往北移时，可较早满足它们对长日的需要，因而发育期提前，开花提早；而往南移时，纬度越低，光照越短，植物开花会延迟。另一类植物在发育过程中，有一段时期每天要有一段较长的暗期才能开花，在一定范围内，暗期越长，开花越早，这类植物称短日照植物。短日照植物一般起源于低纬度的热带和亚热带，这里终年的日照长度接近 12 小时。短日照植物往北移时，愈往北日照愈长，因而开花期延迟，生育期增长，有的植物甚至不开花。自然界那些在深秋或早春开花的植物多属此类，如水稻、大豆、玉米、烟草等。还有一些植物属于中日照植物和中间型植物，中日照植物是指当昼夜长短的

比例接近于相等时才能开花的植物，如甘蔗。中间型植物是指开花受日照长短的影响较小，只要其它条件合适，在不同的日照长度下都能开花，如番茄、黄瓜、四季豆等。另外，植物对日照长度的反映随温度而变化，许多长日照植物在温度降低的时候，在比较短的日照长度下也可以开花；有些短日照植物，在较长日长条件下，夜温较低时也会开花，同样条件下，而夜温较高时却不开花。

纬度和季节决定不同地区日长在一年中的变化。各种植物的生长发育对日长都有特殊要求，如果把它向较高或较低纬度引种时，由于日长的改变，可使其各物候期以及各物候期间的日数发生改变。长日照植物北移时，可较早的满足它对长日的需要，发育期会提前，各物候期的间隔日数会减少，全生育期会缩短；长日照植物南移时，发育会延迟，不能开花结果。短日照植物北移时，因日长较长，使发育期延迟；短日照植物南移时，则提前开花。

### (3) 水分对植物物候期的影响

水分是影响植物物候期的另一个重要的生态因子。水分通过光合作用、营养传输和体温调节从而对植物物候产生影响。干旱会延缓植物的生长发育，使物候期推迟。如果干旱，积温再多，植物也不能利用，在这种情况下，水分是影响发育的主要生态因子。干旱也会促使植物叶片脱落，多雨可推迟植物的发育过程。阴雨天，气温低，可延迟展叶、开花和成熟等物候现象。两株同龄相距不远的树木，由于土壤湿度不同，春季展叶、开花也有差别，生长在过湿土壤上的植株，春季的物候期都迟一些，这是由于地温低造成的。

植物发育速度的差异，还依赖于土壤湿度。潮湿的土壤比干燥土壤温度增加慢一些，所以湿度影响土温，而土温影响物候期。土壤湿度影响开花期，水分少则开花不良，花期变短；水分供过于求则会引起落花、落蕾。柑桔的落花和山茶花的落蕾就与土壤水分太多有直接关系。空气湿度也对开花有影响，湿度太低会使花期变短，花色变淡，湿度过高会引起花瓣霉烂，病虫害蔓延。

谢寿昌等以哀牢山中湿性常绿阔叶林 14 个主要树种为材料，研究了树种物候的主要特征，得出：对树林开花的诱导，光照和温度有同等重要的作用，而在萌动、展叶期中，降雨量和光照起主导作用<sup>[23]</sup>。Kramer 等研究认为北方森林物候和温带森林物候主要受温度驱动，温度影响生长季开始时间和持续时间；地中海针叶林物候主要由影响叶面积发育的水分驱动<sup>[24]</sup>。了解驱动植被物候的气候驱

动因子是非常重要的，一年中气候季节可能是由温度和降水引起的，如果温度是驱动因子，将考虑秋霜冻和春霜冻的影响，如果水分是驱动因子，将考虑干旱的影响[25]。

#### (4) CO<sub>2</sub> 浓度升高对植物物候期的影响

CO<sub>2</sub> 浓度的升高会对植物物候产生直接影响。在过去 200 年，大气中 CO<sub>2</sub> 浓度从 280mol·L<sup>-1</sup> 增加到 360 mol·L<sup>-1</sup>，增加了大约 30%，CO<sub>2</sub> 浓度的提升直接影响到植物物候。Roman 等通过对温带成年林 CO<sub>2</sub> 浓度增加实验，发表温度不变的情况下增加 CO<sub>2</sub> 浓度，树木春季物候期将提前 3~6 天，果实或种子成熟期也将提前[26]。不同植被类型对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应不同。水稻、大豆、冬小麦等草本植物会因 CO<sub>2</sub> 浓度升高而延长物候过程，增加干物质的积累；而木本植物对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应规律不一致。CO<sub>2</sub> 浓度升高使得欧洲赤松叶数量增加。Cavender<sup>[26]</sup> 对红橡树的实验表明，暗光下生长的橡树，CO<sub>2</sub> 浓度升高时其叶寿命延长，增强其碳积累能力，但是对展叶的影响不显著。CO<sub>2</sub> 和光对植物生长协同作用的动力学机制目前还不清楚。CO<sub>2</sub> 对植物物候存在明显影响，但是这种影响很复杂，对不同植物的影响效果不同。植物生长季作为一个全球陆地碳循环模型和净初级生产力模型的重要参数，研究并讨论植物物候对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应具有重要意义。

### 1. 2. 2 地理条件对植物物候期的影响

地理纬度、海拔高度和地形等对植物物候也有明显的影响，地理因素通过改变气候、土壤等条件影响物候。

#### (1) 纬度对物候期的影响

一般来说，纬度越高，气温就越低，生长期也就越短。纬度与日长也有一定的关系，即纬度越高，每天日照时数越长。所以同种植物在不同纬度地区有不同的物候期。植物随着纬度的提高，早春萌芽和开花的物候期推迟，秋季开花的植物开花期和冬季落叶期提早。春季和夏季开花的植物，始花自南方开始，向北则逐渐延迟；秋季开花的植物，则先自北方开始，向南则越迟。

#### (2) 经度对物候期的影响

经度对物候的影响主要由于气候的大陆性强弱不同。我国大部分是大陆性气候，冬季严寒而夏季酷暑；东部沿海地区也有海洋性气候性质，冬春较冷，夏季较热。同纬度的地带，春初东面比西面冷，而到初夏，变成东面比西面热。

### (3) 海拔高度对物候期的影响

海拔高度是影响植物物候期的另一个地理因素，它对树木萌芽和秋季落叶的早迟具有明显的促进或延迟作用。通常海拔越高，温度越低，树木在春季和夏季发芽、开花也越迟，而秋季开花植物的开花期和落叶期比海拔低的地方来得早。山地与平原的物候不同，物候期随海拔高度的增加而推迟。在大气中从地面往上升气温下降，平均每上升 100 米，温度要降低 0.5℃，因此海拔高的地方，物候自然较迟。根据霍普金司定律，物候每向北移动纬度 1° 或海拔上升 400 英尺物候期都要延迟 4 天。在春夏，抽穗、开花等物候现象的出现，越到高处越迟；在秋季，乔木的落叶，冬小麦的播种等，则越到高处越早。

### 1. 2. 3 气象因子对动物物候期的影响

动物物候是自然环境中动物生命活动的季节现象，它包括昆虫、候鸟及其他动物初鸣、初见、终鸣、绝见、迁徙和繁殖等。物候出现的时间与气温、降水、光照、土壤温湿度等气象因子有关，物候现象不仅反映了当时的天气条件，而且反映了过去一段时间气象条件影响的积累情况。鸟类迁徙，温度突变的影响更应值得研究<sup>[27]</sup>。李世忠等<sup>[28]</sup>分析了桂北地区蟋蟀物候期和气候因素的基本特征，认为近 10 年来桂北地区增温较明显，且以春季增温为主，近 10 年来蟋蟀始鸣期呈提前趋势，终鸣期稳定，始终鸣间隔日及生长繁殖季显著延长；2~4 月平均气温是影响蟋蟀始鸣期和始终鸣间隔期的主要气候生态因子。韩小梅等利用河南省驻马店、沈丘和太康的蚱蝉物候观测资料和气象资料，研究了气候变暖对蚱蝉始鸣期的影响。结果表明：在气温升高的气候背景下，蚱蝉始鸣期呈提前趋势；3—6 月平均气温对蚱蝉始鸣期有显著的影响，始鸣期与 1 月 1 日至平均始鸣日期间 >5℃ 有效积温关系最为密切；用积温法以 5℃ 为发育起点温度，>5℃ 初日为起始日期对各站蚱蝉始鸣期进行模拟和预报，其效果优于平均法<sup>[29]</sup>。

#### 1. 2. 4 气候变化对物候的影响

气候变化是气温、降水、日照等气候要素随时间变化的现象。近些年来,对全球气候变化以及当代气候的研究,我国科学家已经做了很多工作<sup>[30][31][32][33][34]</sup>。中国近百年温度上升了 0.5℃~1.0℃,这些都是目前全球变暖及其区域响应的证据<sup>[35]</sup>。19 世纪后期以来全球平均地面温度已经上升了大约 0.6℃,在某些地方,特别是大陆地区,增暖程度比全球平均值要大几倍。根据北半球的最近研究结果表明,20 世纪是最暖的世纪,而 90 年代又是最暖的 10 年,其中 1998 年和 2001 年又是过去 1000 年中最暖的年份<sup>[36]</sup>。IPCC 第三次评估报告给出近百年全球温度平均上升了约 0.5℃,北半球上升趋势更加明显,达 1℃以上。近 50 年来,随着全球变暖,我国北方绝大部分地区,夏季明显增长,平均增长 5.8 天;冬季变短,平均缩短 5.6 天;春夏明显提早,秋冬明显推迟。季节变化势必引起作物生长季和成熟期的变化<sup>[37]</sup>。

竺可桢在“中国近五千年来气候变迁的初步研究”中推算了我国近五千年来气候变化,根据古时候候鸟来去的早迟,确定当时季节的早晚,以植物展叶、开花的早晚确定某历史时期的冷暖,还根据柑橘、荔枝、梅树、竹子的分布和冻害状况推算气候变化。郑景云等<sup>[38]</sup>根据中科院物候观测网络中 6 个观测点的物候资料和气象资料,分析了近 40 年我国木本植物物候变化及其对气候变化的响应,得出结论:(1)物候期的提前与推迟对温度上升与下降的响应是非线性的;(2)温度上升使我国的木本植物春季物候期提前。沈阳城市森林主要树种的春季物候期,在气候偏冷阶段,春季物候期出现较晚,而在偏暖阶段,春季物候期提前发生;同时,物候春季开始日期与结束日期有密切的同步相关性,并与物候季节节奏的长短呈负相关;树木萌动期早晚与冬季和早春气温高低呈显著的负相关,冬春季气温越高,芽萌动越提前;展叶早晚主要受展叶前的春季气温高低的影响,与冬季气温相关性不显著<sup>[39]</sup>。近些年来,我国科技工作者已开展了大量的气候变化对物候的影响研究<sup>[40]-[53]</sup>。

在中纬度地区,春季物候期如植物的发芽、展叶、开花主要依赖于气温,在一年中随着气温升高,春季植物发育开始提早,在最近的十年中,大量的物候研究报道了春季物候的提早<sup>[54]</sup>。在北美,春季物候变化的空间分布已经被研究

<sup>[55]</sup>-<sup>[56]</sup>，这些研究显示在过去40年里北美东北和西北部春季物候期平均提前了4~5天。

在欧洲，物候趋势方面的研究有很多<sup>[57]</sup><sup>[58]</sup>。这些研究显示现在的春季物候比50年前提前了10-20天，变化速率在不同地区和年际之间有差异。在英国关于站点尺度上温度对植物物候期影响的研究已发表了一些论文<sup>[59]</sup><sup>[60]</sup><sup>[61]</sup>，但在区域尺度上的研究还很少。

## 1.3 本文研究内容

### 1.3.1 全球变暖背景下广西自然物候和农作物物候变化的基本特征

本文选取了广西24个站点的物候资料，研究了广西楝树春季和秋季物候期变化的空间分布特征，研究了广西早稻、晚稻主要发育期变化的空间分布特征，研究了广西家燕物候期变化的空间分布下特征。

### 1.3.2 气候变暖对广西自然物候和农作物发育期变化的影响

本文主要研究了气候变暖对楝树花期的影响，研究了气候变暖对蟋蟀、蛙和家燕物候期的影响，研究了气候变暖对农作物物候期的影响。

## 第二章 研究方法与研究资料

### 2.1 物候期的观测方法

物候学的基本研究方法是平行观测法，即一方面观测生物环境的物理要素（包括气象要素、田间土壤湿度等）；另一方面观测生物物候现象，观测作物的发育期进程，生长状况，产量形成。主要包括：（1）建立物候观测网，便于定点开展生物物候现象的周年变化观测；（2）按照统一的观测规范组织物候观测网对物候现象进行观测；（3）按照统一的观测规范平行进行气象观测。

物候期观测主要按照国家气象局编写的“农业气象观测规范”一书进行。

#### 2.1.1 植物物候观测点的选择

观测点的选择必须符合下列两项原则：

1、观测点要考虑地形、土壤、植被的代表性，不宜选在房前屋后，避免小气候的影响。

2、观测点要稳定，可进行多年连续观测，不轻易改动。

观测点选定后，需将地点、位置（距观测场位置、方向、周围主要建筑物、林带、公路的方向和距离）、海拔高度、地形（平、山、洼、坡地、坡向等）、土壤质地、观测植物栽植年代等做详细记载并存档保存。

#### 2.1.2 物候观测对象的选定

1、物候观测对象应以当地常见，分布较广，指示性强，对季节变化反映明显，与农业生产关系密切，群众常用的为主，且是露地栽植或野生者，不能选择盆栽或温室栽培植物。

2、选作观测对象的木本植物应是发育正常，达到开花结实三年以上的中龄树。鸟类和昆虫活动范围较大，不便于固定地点观测，凡在台站附近看见或听见其叫声，均按规定记载。

3、观测对象要经过物种鉴定。植物要采集带有叶、花、果实的标本，请有关科研、院校专家对物种名称进行严格鉴定，取得鉴定证明，归档保存。未经物种鉴定的不能作为共同观测对象。动、植物名称以中名、学名记载，不可以别名或其它俗名记载。

### 2. 1. 3 物候观测时间

物候观测是一项长期而又经常性的工作，观测员必须经常和及时观测，并持之以恒。观测时间根据季节和观测对象灵活掌握。春季和秋季物候现象变化较快时，应隔日进行，动物的物候现象则要随时注意观测。

植物物候观测时间，最好在下午。因为上午未出现的现象，当条件具备后往往在下午出现。

鸟与昆虫惯于早晨或晚间啼叫，宜在早晨或晚间注意听其鸣声。

### 2. 1. 4 植物物候期的观测标准

物候观测是进行物候规律研究和应用的基础，因此，必须掌握观测方法和植物各物候期的外部形态特征，才能获取可靠的物候资料，保证物候研究的质量。

(1) 芽膨大期：是指树木冬季的休眠芽在春季萌动和长大，是芽萌动的前期。

(2) 芽开放期：这是芽萌动的后期。当芽中的幼叶刚露出一部分的时候称为芽开放期。有鳞片的芽当鳞片裂开，芽的上部现出新鲜颜色的尖端或形成新的苞片而伸长。槐树隐蔽芽，当明显看见长出绿色叶芽；榆树形成新的苞片而伸长；刺槐芽裂开后长出绒毛，显出绿色；桃、杏的鳞片裂开，玉兰绒毛状的鳞片裂开见到花蕾顶端，既是花芽开放期，也是花蕾出现期。

(3) 展叶期：植株上顶芽中第一片叶子完全展开时为展叶始期；树上有半

树枝条上的小叶完全平展为展叶盛期。

(4) 花蕾或花序出现期：芽开放露出花蕾、花序顶端。

(5) 开花始期：观测树上有一朵或同时几朵花的花瓣开始完全开放即为开花始期。

(6) 开花盛期：观测树上有一半以上的花蕾都展开花瓣或一半以上的柔荑花序散发出花粉，为开花盛期。

(7) 开花末期：观测树上的花瓣（柔荑花序）凋谢脱落留有极少数的花。

(8) 果实或种子成熟期：当观测树上有一半的果实或种子变为成熟的颜色，即为果实或种子成熟期。

(9) 果实或种子脱落期：

始期：松属种子散布；柏属果实脱落；杨属飞絮；榆属和麻栎属果实或种子脱落，有些荚果成熟后果实裂开。这些现象出现时，记为果实或种子脱落始期。

末期：观测树上果实或种子多已脱落，仅留极少果实或种子。

(10) 叶变色期：叶变色是指正常季节性变化，叶子开始变色，并且有新变色的叶子增多。但不能同夏天因干旱、炎热、病虫害或其它原因引起的叶变色相混淆。

叶变色始期：观测的树木叶子在秋天第一批开始变色。

完全变色期：所有叶子完全变色。

(11) 落叶期：落叶指秋冬季的自然脱落，而不是因干旱或病虫害的危害落叶。

始期：观测的树上秋季开始有脱落变色的叶子。

末期：树上的叶子几乎全部脱落。

#### 2.1.5. 作物物候观测地段的选择和要求

1、观测地段必须具有代表性并保持相对稳定。代表当地一般地形、地势、气候、土壤和产量水平及主要耕作制度。

2、观测地段面积一般为1公顷，不小于0.1公顷。

3、地段距林缘、建筑物、道路（公路和铁路）、水塘等应在20米以上，远

离河流、水库等大型水体，尽量减少小气候的影响。

4、将观测地段按田块形状分成相等的4个区，作4个重复，按顺序编号，各项观测在4个区内进行，并绘制地段分区和各类观测点的分布示意图。

#### 2.1.6. 稻类作物发育期标准

出苗期：从叶鞘中生出第一片不完全叶。

三叶期：从第二片完全叶的叶鞘中，出现了全部展开的第三片完全叶。

移栽期：移栽的日期。

返青期：移栽后叶色转青，心叶重新展开或出现新叶。

分蘖期：叶鞘中露出新生分蘖的叶尖，叶尖露出长约0.5-1.0厘米。

拔节期：茎基部节开始伸长，形成有显著茎秆的茎节为拔节。拔节高度距最高生根节长度早稻为1.0厘米，中稻为1.5厘米，晚稻为2.0厘米。

孕穗期：剑叶全部露出叶鞘。

抽穗期：穗子顶端从剑叶叶鞘中露出。有的稻穗从叶鞘旁呈弯曲状鼓足露出。

乳熟期：穗子顶部的子粒达到正常谷粒的大小，颖壳充满乳浆状内含物，子粒呈绿色。

成熟期：灿稻稻穗上有80%以上，粳稻有90%以上的谷粒呈现该品种固有的颜色。

#### 2.1.7 动物物候期的观测标准

家燕：观测记录春季始见及秋季绝见日期。

蚱蝉：记录始鸣及终鸣的日期。

蟋蟀：记录始鸣及终鸣的日期。

豆雁：记录始鸣和终鸣的日期。

蛙：记录始鸣和终鸣的日期。

## 2.2 研究资料

### 2. 2. 1 物候资料和气象资料的来源

本研究所使用的物候资料和气象资料都来源于广西区气象局档案馆。物候资料共有 24 个农业气象观测站，观测年份从 1981-2008 年。同时还有 24 个站点的同期气象观测资料，从 1981-2008 年的逐日气温、降水、日照等。

### 2. 2. 2 所选择的主要植物和动物的种类

所选择的主要木本植物有楝树 (*Melia azedarach*)、木棉 (*Gossampinus malabarica*)、桃 (*Prunus armeniaca*)、枣 (*Zizyphus jujuba*)；主要农作物有早稻、晚稻、玉米、柑桔；主要动物有家燕 (*Hirundo rustica gutturalis*)、蛙 (*Rananigromaculata*)、蚱蜢 (*Cryptotympana*)、蟋蟀 (*Gryllulus cninensis*)、豆雁 (*Anser fabalis serringrostris*)。

### 2. 2. 3 所使用的物候期

木本植物：芽膨大期，芽开放期，展叶期（展叶始期、展叶盛期），花蕾或花序出现期，开花期（开花始期、开花盛期、开花末期），第二次开花期，果实或种子成熟期，果实或种子脱落期（始期、末期），叶变色期（叶变色始期、叶完全变色期），落叶期（落叶始期，落叶末期）。

水稻：播种期、出苗期、三叶期、移栽期、返青期、分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、乳熟期、成熟期。

动物：始见、绝见、始鸣和终鸣。

## 2. 3 研究方法与技术路线

### 2. 3. 1 广西主要农业气象观测站和物候资料

广西农业气象观测站始建于上世纪 80 年代，全区现有各类农业气象观测站 24 个，它们的地理分布见图 2-1。各站点的物候观测资料年代长度如表 2-1 所示。

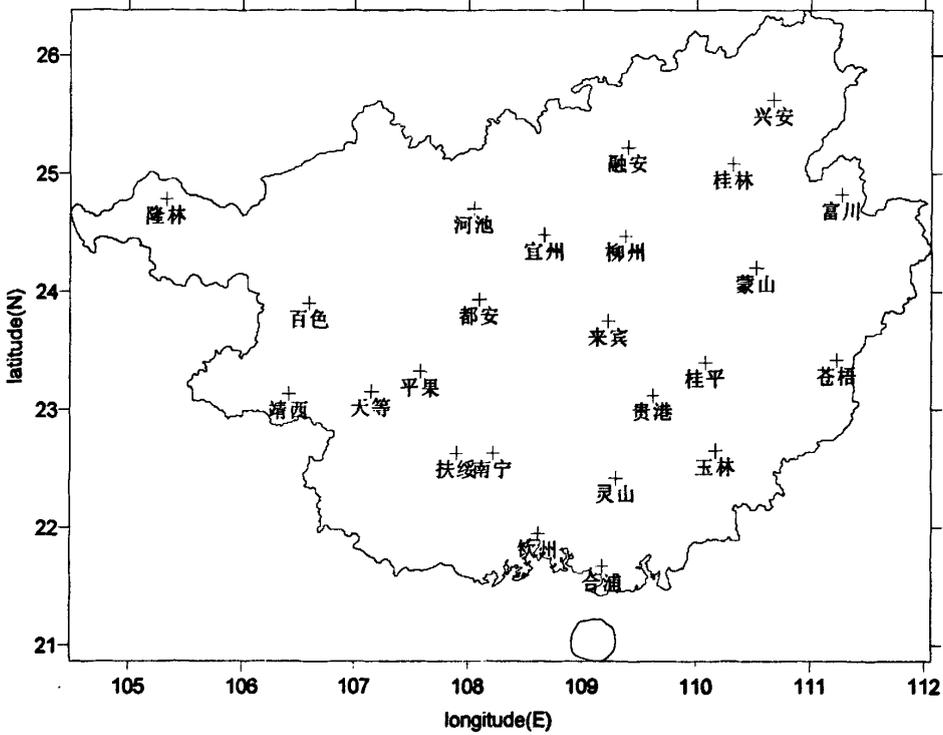


图 2-1 广西农业气象观测站地理分布图

Fig.2-1 Distribution of observational sites of agricultural meteorology in Guangxi

### 2. 3. 2 资料处理方法

1980-2008 年气象资料和物候资料来自广西区气象信息中心。农业气象观测站和气象站双站合一，同步观测获取观测资料。气象资料主要选取温度、降水、日照等要素进行分析。

物候资料主要将各物候期换算成距 1 月 1 日的天数，作为下一步统计分析用。在桂北地区动物物候的分析，对物候资料，先计算出青蛙、蟋蟀物候期距平和始终鸣期间隔期距平。为了能反应出气候变化的情况，在逐月资料基础上，按季度统计了春季（3~5月）、夏季（6~8月）、秋季（9~11月）和冬季（12~2月）平

均气温、雨量资料等。为了突出较长期的变化趋势，分别对季和年的气候要素作5年滑动平均，序列两端的5年滑动平均则通过添加两个序列的平均值得到。经过以上数据的处理，分别得到该站5年滑动平均各季和年的气候要素序列。

表 2-1. 广西各农业气象观测站点物候观测年份表（表中年份取后两位）

	楝树	早稻	晚稻	家燕
兴安	92-07	86-07	86-08	91-08
桂林	83-07	86-07	86-08	83-08
柳州	80-07	86-07	86-08	81-08
来宾	92-07			91-08
融安	92-07	86-07	86-08	
富川	93-07			
苍梧	92-07	86-07	86-08	
蒙山	80-07	89-07	89-08	81-08
钦州	85-07	86-07	86-08	
合浦	90-06	90-07	90-08	
灵山	80-07	86-92, 94-07	86-08	81-86, 88-08
南宁	81-07	86-07	86-08	87-08
天等	81-07	90-07	90-08	81-08
扶绥	92-07			
百色	83-07			83, 86, 87, 82, 93, 97-08
隆林	92, 94-07			
靖西	92-07			92-08
平果	92-07			92-08
贵港	92-07			92-08
玉林	92-07	86-07	86-08	
桂平	92-07	90-07	90-08	95-08
都安	92-07			85-08
河池	87-07	87-07	87-08	91-08
宜州	92-07	86-07	86-08	92, 93, 96-08

### 2. 3. 3 分析软件和统计分析方法

本研究采用 excel 和 surfer 统计分析软件，深入分析木本植物、农作物和动物物候资料并绘制出平均物候期空间分布图和物候期变化倾向率空间分布图，主要分析不同地区楝树物候期与气象要素的变化趋势以及相互关系。对桂北地区

动物物候的研究，物候和气候变化总趋势采用倾向率法，各物候和气候要素的变化趋势采用多项式和一元线性回归拟合求得，气候变化阶段性分析采用5年滑动平均法，各物候期与气候因子的相关性采用 Pearson 相关系数描述，在此基础上建立物候期与主要气候因子的一元线性回归方程。

### 第三章 广西物候变化的基本特征

本章将研究广西区域木本植物、主要农作物和动物物候的基本特征。以全区都有观测的楝树作为木本植物研究对象,以早稻、晚稻作为农作物物候研究对象,以家燕作为动物物候研究对象,探讨广西物候的基本特征以及在气候变暖背景下广西物候对气候变化的响应。

#### 3. 1 植物物候变化的基本特征

##### 3. 1. 1 植物春季物候变化的基本特征

图 3-1 至图 3-4 分别是楝树叶芽开放期、展叶始期、开花始期和开花盛期的空间分布图。

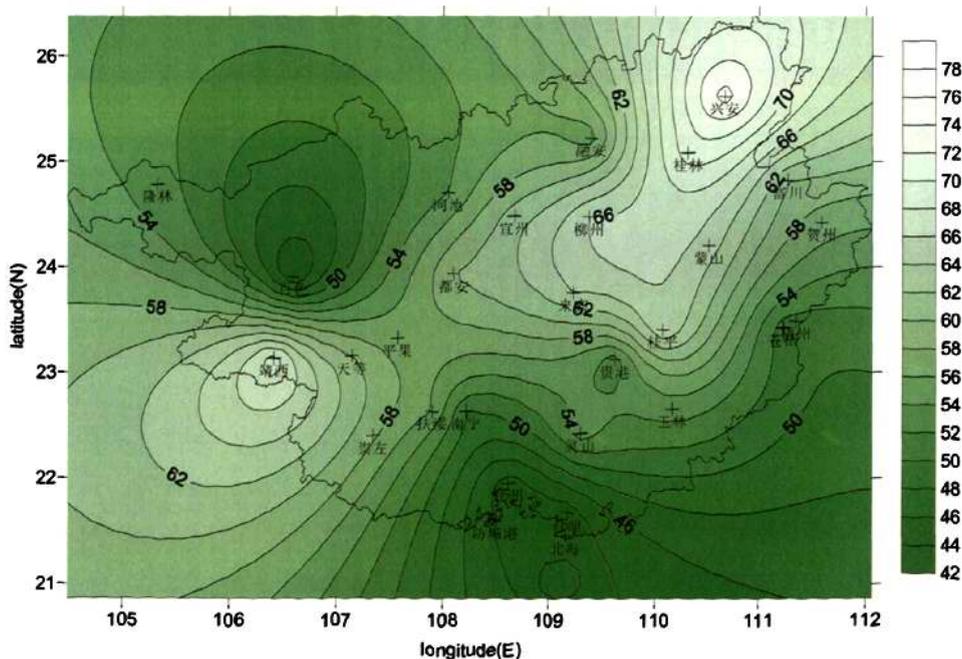


图 3-1 广西楝树平均叶芽开放期空间分布图

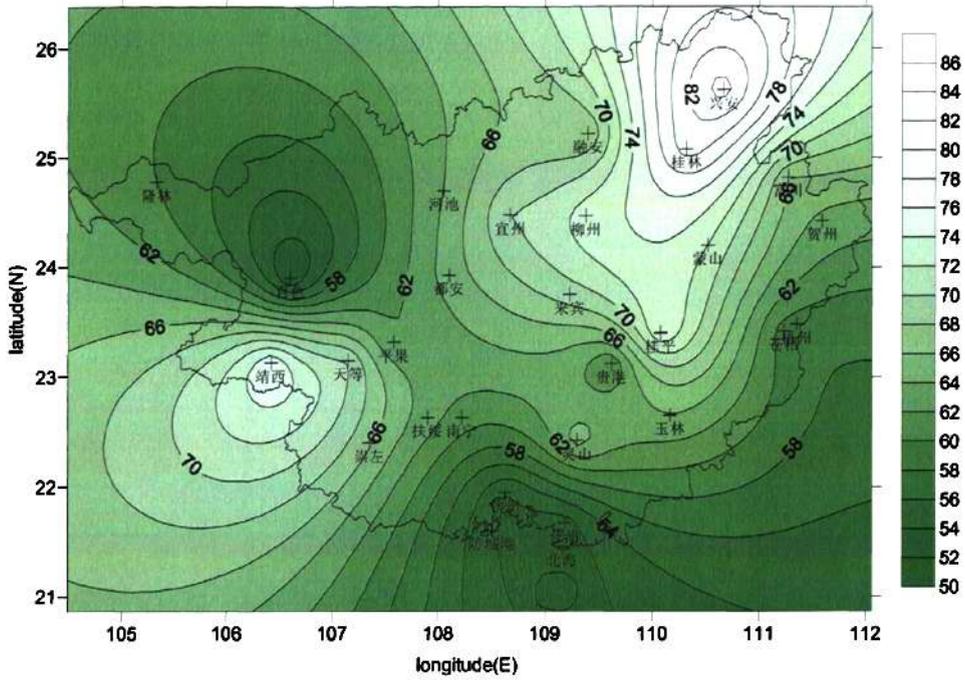


图 3-2 广西楝树平均展叶期空间分布图

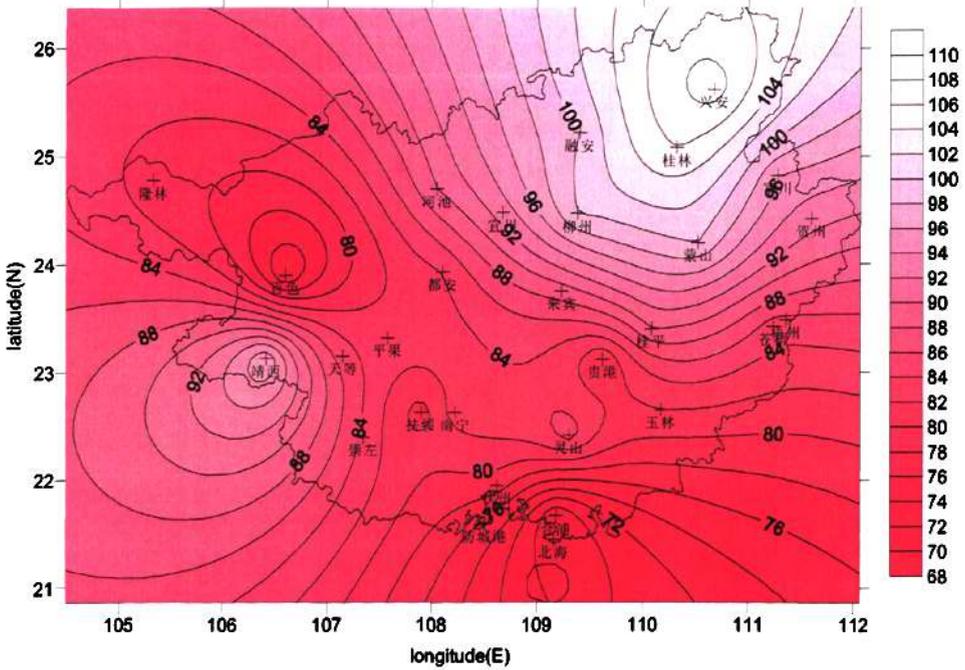


图 3-3 广西楝树平均开花始期空间分布图

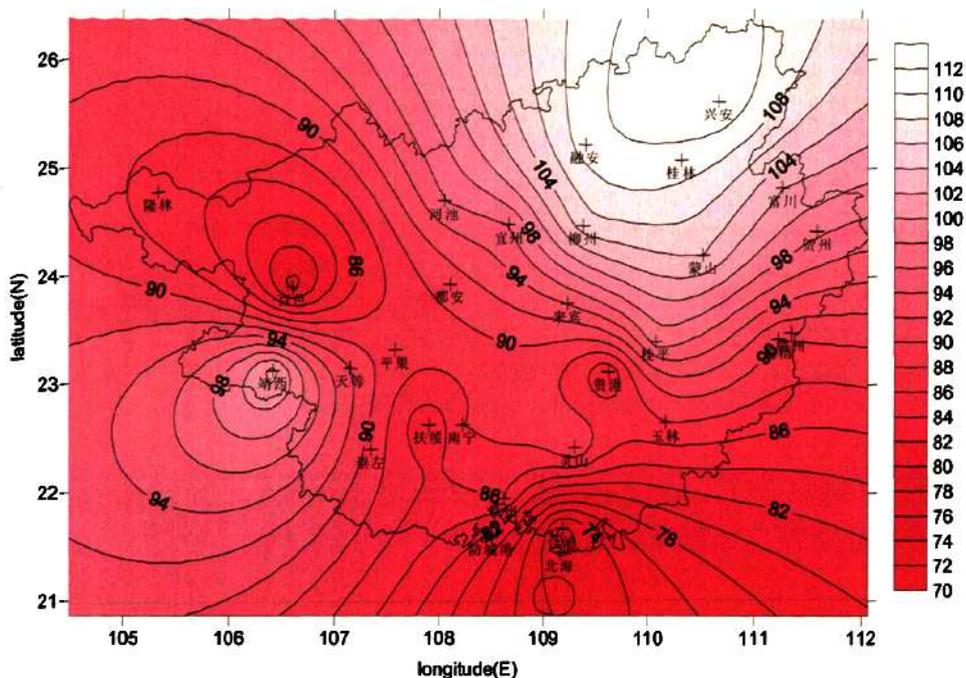


图 3-4 广西楝树平均开花盛期空间分布图

从图中可以看出：楝树叶芽开放期、展叶始期、开花始期和开花盛期的空间分布十分相似，即在桂南、桂西及桂东南为低值区，桂东北、桂西南为高值区，桂中为过渡区。

楝树叶芽开放期桂南、桂西及桂东南三个地区较早，出现在 2 月份，其中钦州、北海、防城港、合浦、百色最早，在 2 月中旬就已出现；桂东北和桂西南两个区域楝树芽开放较迟，出现在 3 月上旬、中旬，兴安、桂林、靖西最迟。

桂南、桂西及桂东南这三个地区楝树展叶始期较早，出现在 2 月下旬，其中钦州、北海、防城港、合浦、百色最早，出现在 2 月下旬；桂东北和桂西南两个区域楝树展叶始期较迟，一般在 3 月中旬，其中兴安、桂林、柳州、靖西、蒙山最迟。

楝树开花期桂南、桂西及桂东南三个地区较早，开花始期出现在 3 月中旬，其中钦州、北海、防城港、合浦、百色最早；桂东北和桂西南开花始期出现在 4 月上旬、中旬，其中桂林、兴安、柳州、融安、蒙山出现在 4 月中旬。开花盛期桂南、桂西及桂东南较早，其中又以钦州、北海、防城港、合浦和百色最早，出现在 3 月下旬；桂东北和桂西南开花盛期来得较迟，其中又以中桂林、兴安、

柳州、融安、蒙山来得最迟，出现在4月下旬。

图 3-5 至图 3-8 是广西椴树春季物候期变化倾向率 (d/10a) 空间分布图。

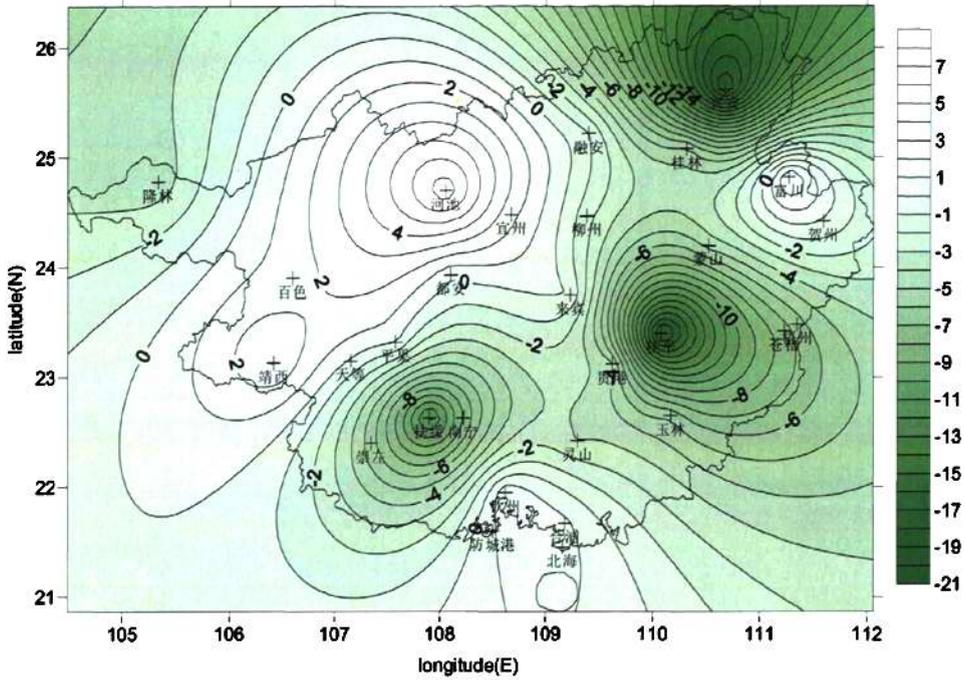


图 3-5 广西椴树叶芽开放期倾向率空间分布图

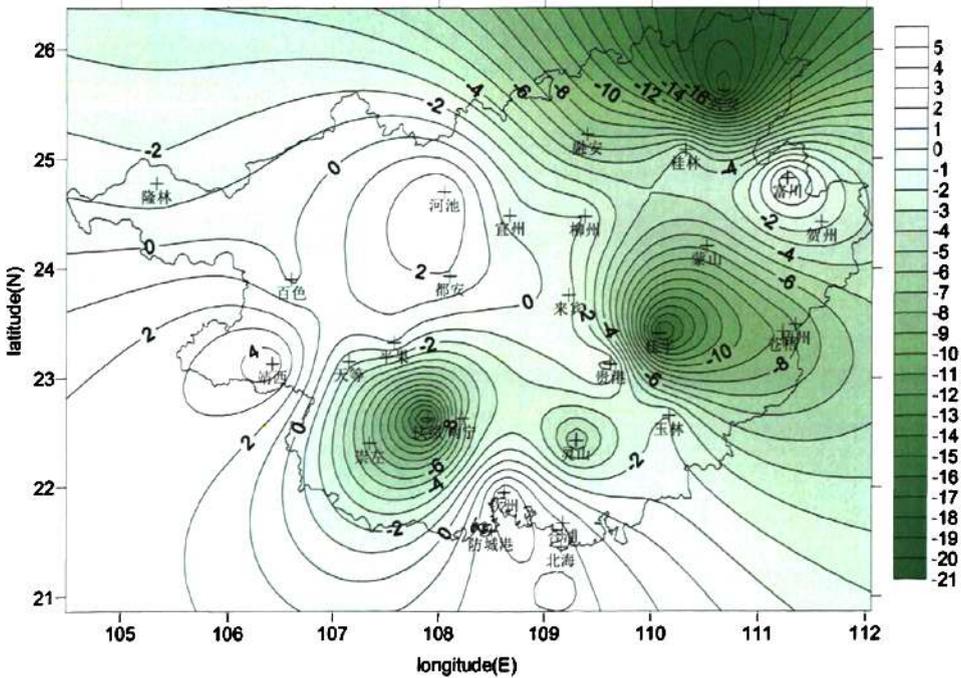


图 3-6 广西椴树展叶始期倾向率空间分布图

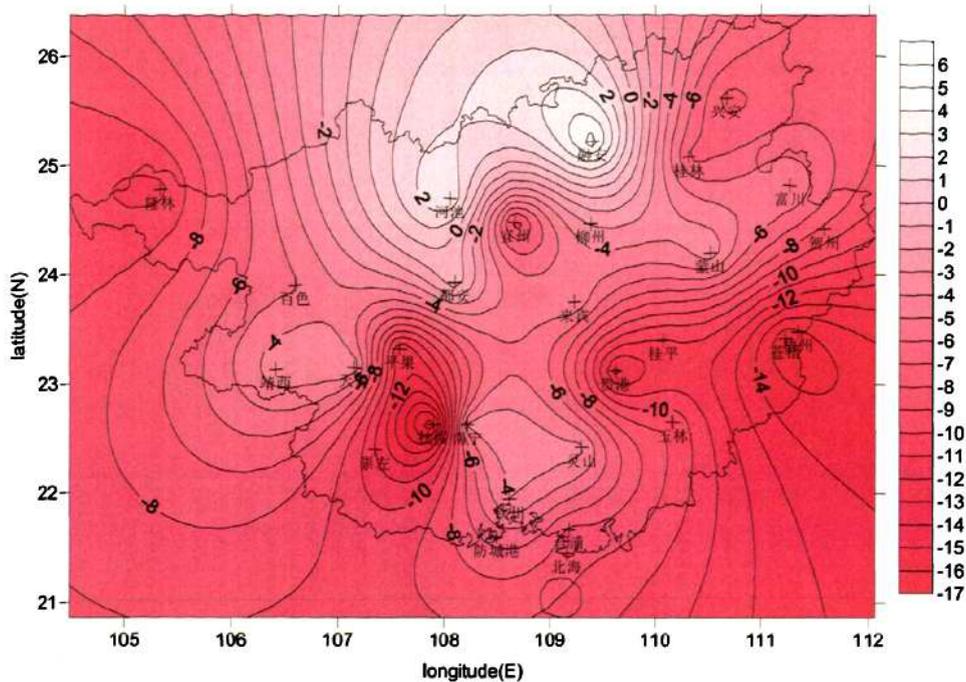


图 3-7 广西楝树开花始期倾向率空间分布图

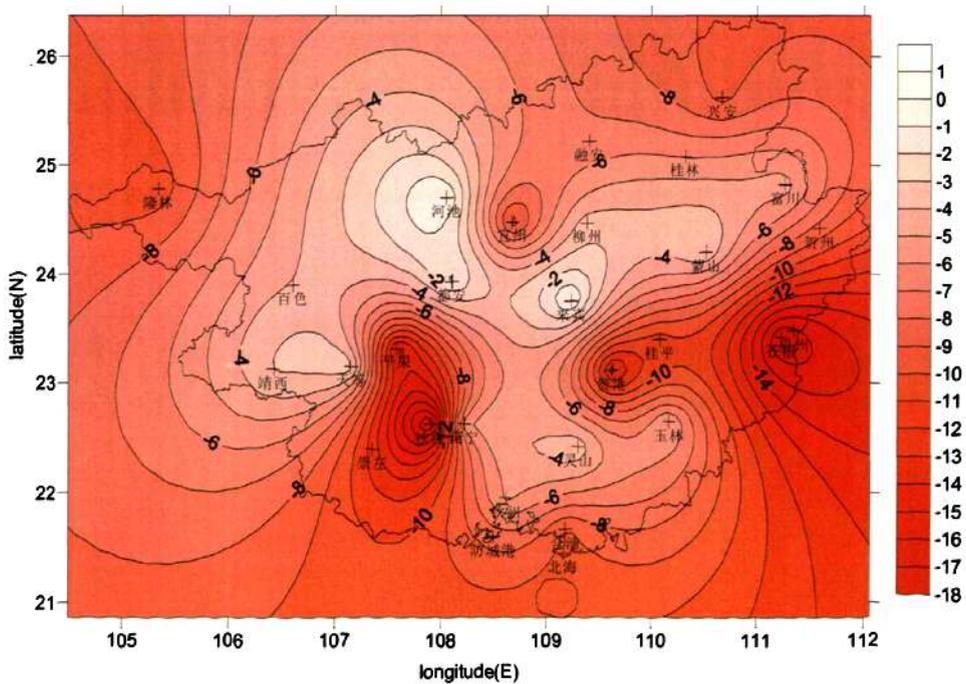


图 3-8 广西楝树开花盛期倾向率空间分布图

图中显示：在气候变暖的背景下，广西楝树春季物候的变化趋势。

图 3-5、图 3-6 表明广西大部分地区椴树芽开放期、展叶始期变化倾向率为负值，其中桂北、贵港、南宁为负值中心，倾向率为负说明椴树芽开放期、展叶始期呈提前趋势，兴安椴树芽开放期、展叶期提前最多，10 年提前 21 天。河池、百色、北海、钦州、防城港和富川椴树芽开放期变化倾向率为正值，为  $0\sim 7.766\text{d}/10\text{a}$ ，表明椴树芽开放期显示出推迟趋势。河池、靖西、北海、钦州、防城港和富川椴树展叶始期变化倾向率为正值，变幅  $0\sim 4.941\text{d}/10\text{a}$ ，说明椴树展叶始期呈现出推迟趋势。

图 3-7 是广西椴树开花始期倾向率空间分布图，从图中可看出：全区除河池、融安小部区域倾向率在  $0\sim 5.632\text{d}/10\text{a}$  间，说明椴树开花始期呈推迟趋势；其他地区倾向率小于 0，变幅在  $0\sim -17.039\text{d}/10\text{a}$  间，扶绥、贵港、梧州、兴安和隆林为负值中心，说明广西绝大部分地区开花始期提前。图 3-8 是广西椴树开花盛期倾向率空间分布图，从图中可看出：除来宾、河池小部区域倾向率为  $0\sim 0.235\text{d}/10\text{a}$ ，但接近于 0，其它地区倾向率均为负值，变幅在  $0\sim -18.341\text{d}/10\text{a}$  间，扶绥、贵港、梧州、兴安、隆林和宜州为负值中心，说明广西绝大部分地区开花盛期亦提前。

### 3. 1. 2 植物秋季物候变化的基本特征

图 3-9 和图 3-10 是广西椴树叶完全变色期和落叶末期空间分布图。从图 3-9 和图 3-10 中可以看出，广西椴树叶完全变色期和落叶末期空间分布图十分相似，桂东北的贺州、桂林、桂北的河池和桂西的靖西叶完全变色期出现较早，广西其它地区相对较迟；桂东北的贺州、桂林、桂北的河池和桂西的靖西落叶末期同样较早，广西其它地区落叶同样相对较迟。

图 3-11 和图 3-12 是广西椴树叶完全变色期和落叶末期倾向率空间分布图。从图 3-11 中看出：桂东到桂南，桂中的平果、都安和宜州一带，倾向率为负值，变化在  $0\sim -26.897\text{d}/10\text{a}$  间，说明这些地区椴树叶完全变色期呈现出提前趋势；其它地区倾向率为正值，其中靖西有正值中心  $44.735\text{d}/10\text{a}$ ，说明这些地区椴树叶完全变色期呈推迟趋势，其中靖西平均每年约推迟 4 天。



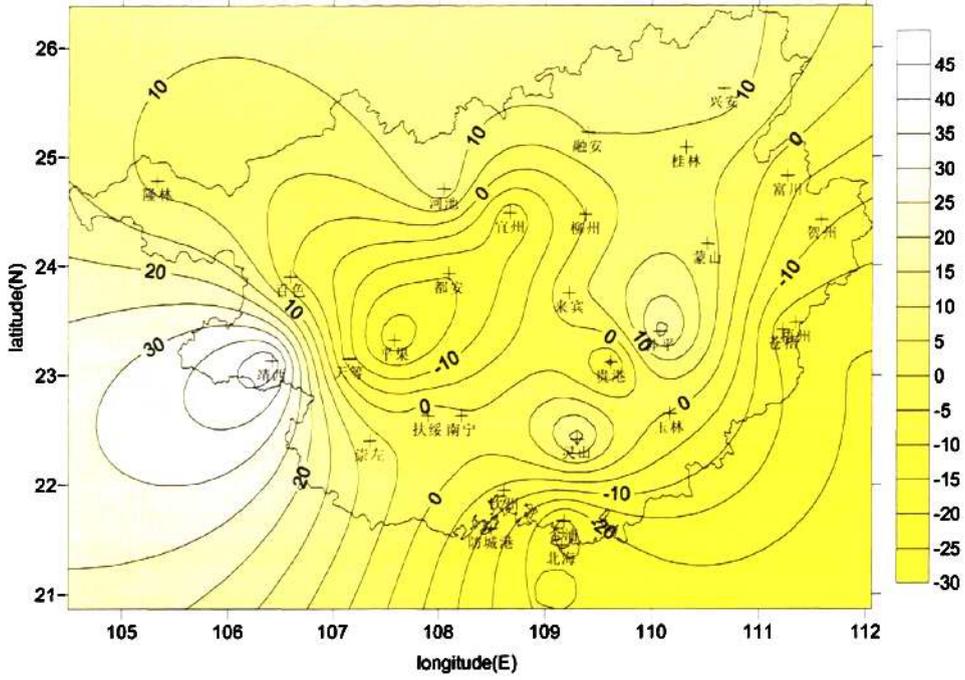


图 3-11 广西椴树叶完全变色期倾向率空间分布图

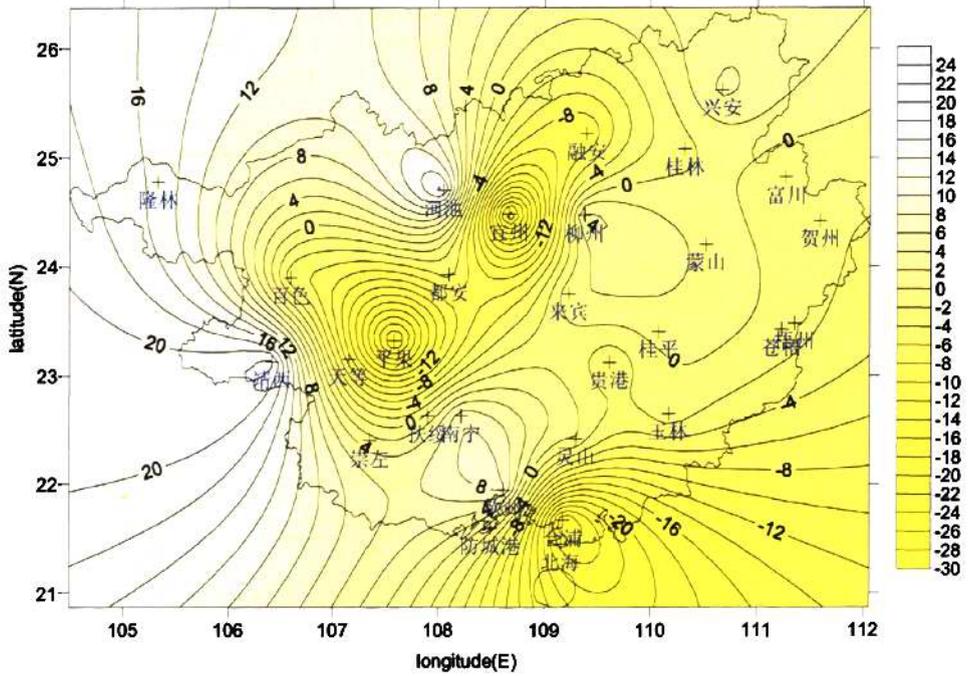


图 3-12 广西椴树叶落叶末期倾向率空间分布图

从图 3-12 中看出：桂南的天等、平果、都安、宜州和融安一带，桂东到桂南，楝树落叶末期倾向率为负值，落叶末期呈提前趋势，其它地区楝树落叶末期倾向率为正值，落叶末期呈推迟趋势。

### 3. 1. 3 地理条件对植物物候的影响

图 3-13 是广西楝树物候期与纬度、经度和海拔高度相关系数图，图 3-14 是广西楝树春季物候期纬向倾向率图。图中表明楝树春季物候期与纬度、经度和

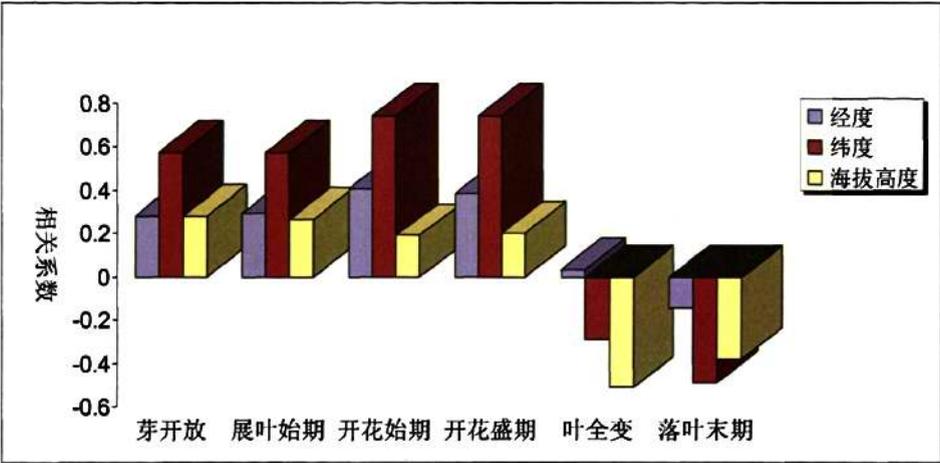


图 3-13 广西楝树物候期与纬度、经度和海拔高度相关系数图

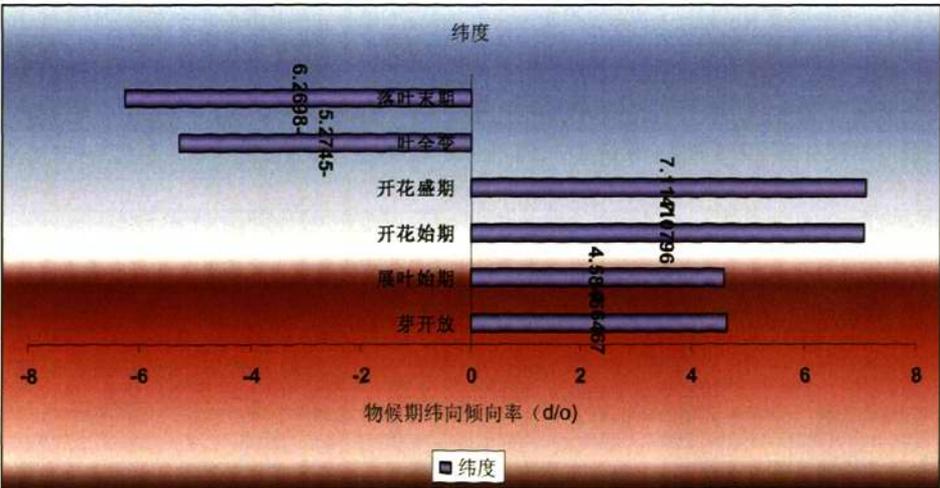


图 3-14 广西楝树物候期纬向倾向率图

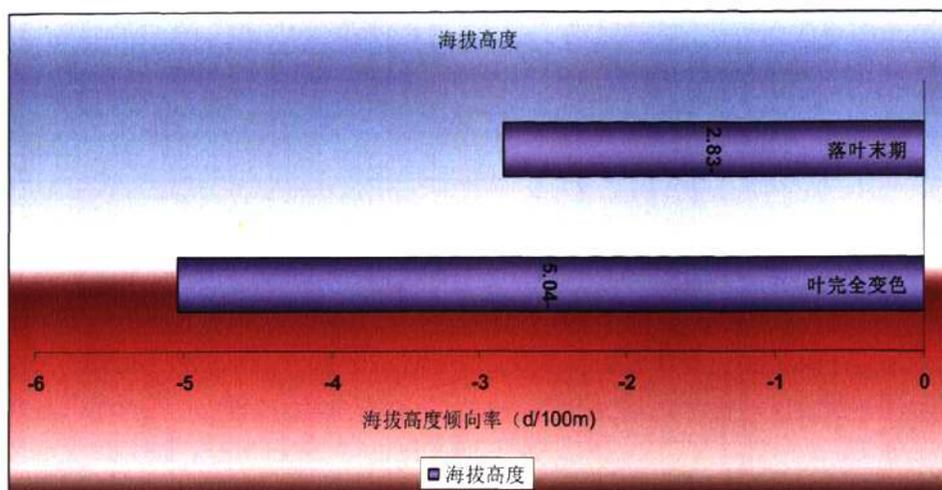


图 3-15 广西栎树秋季物候期随海拔高度变化倾向率图

海拔高度成正相关，表明随着纬度、经度和海拔高度的增加，广西栎树春季物候期推迟，尤以纬度的影响更明显，以春季物候期为例，在北半球，纬度每向北增加  $1^{\circ}$ ，芽开放期、展叶期推迟 5 天，开花期推迟 7 天；栎树秋季物候期与、海拔高度、纬度和经度成负相关，表明随着海拔高度、纬度和经度的增加，广西栎树秋季物候期提前，以海拔高度和纬度的影响更大，以叶完全变色期为例，海拔高度每上升 100 米，叶完全变色期提前 5 天。

## 3. 2 农作物物候变化的基本特征

### 3. 2. 1 早稻发育期变化基本特征

图 3-15 至图 3-17 分别是广西早稻出苗、三叶和拔节期空间分布图，比较三张图，可以看出三张图的空间分布是十分相似的。广西早稻出苗、三叶和拔节期自西南向东北逐渐推迟，桂东南、桂南和桂西较早，分别在 3 月中旬、3 月下旬和 5 月中旬到 5 月下旬初，桂东北较迟，分别在 3 月下旬到 4 月上旬、4 月上旬到中旬、5 月下旬末到 6 月上旬初。

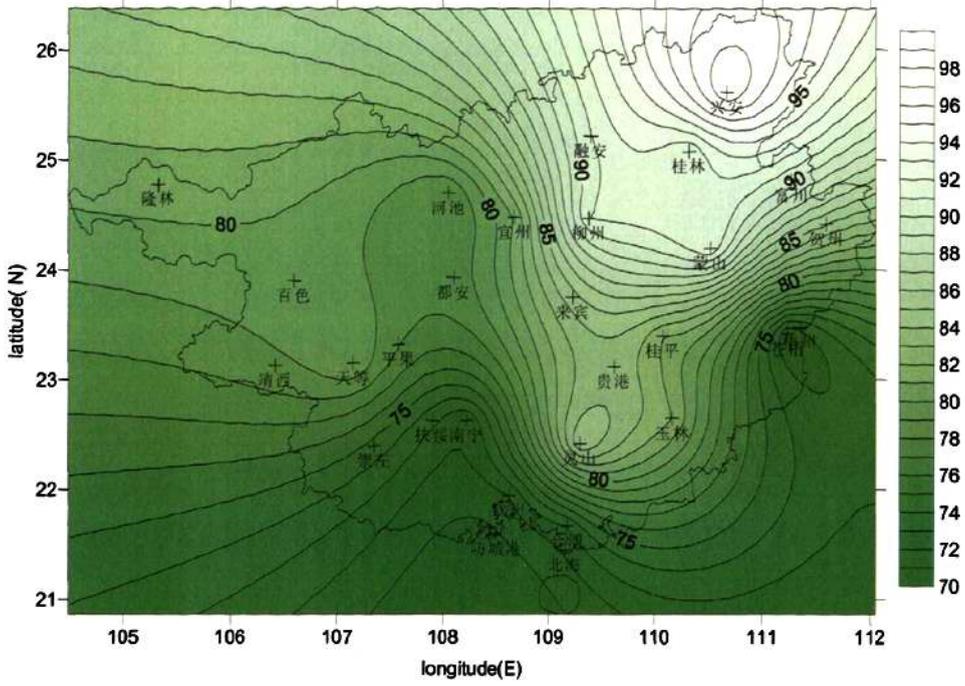


图 3-16 广西早稻平均出苗期空间分布图

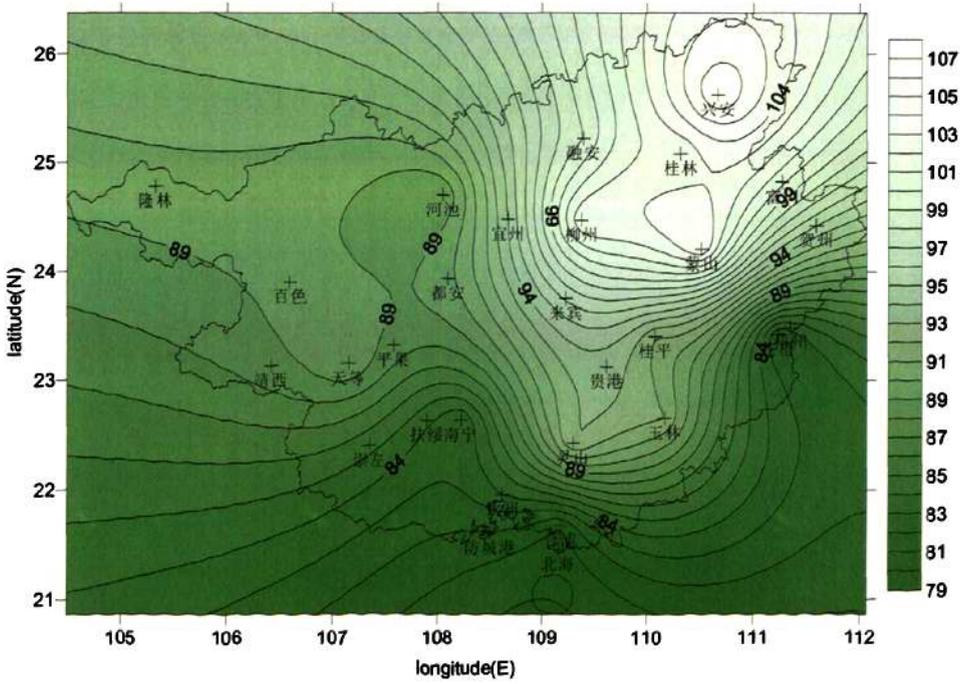


图 3-17 广西早稻平均三叶期空间分布图

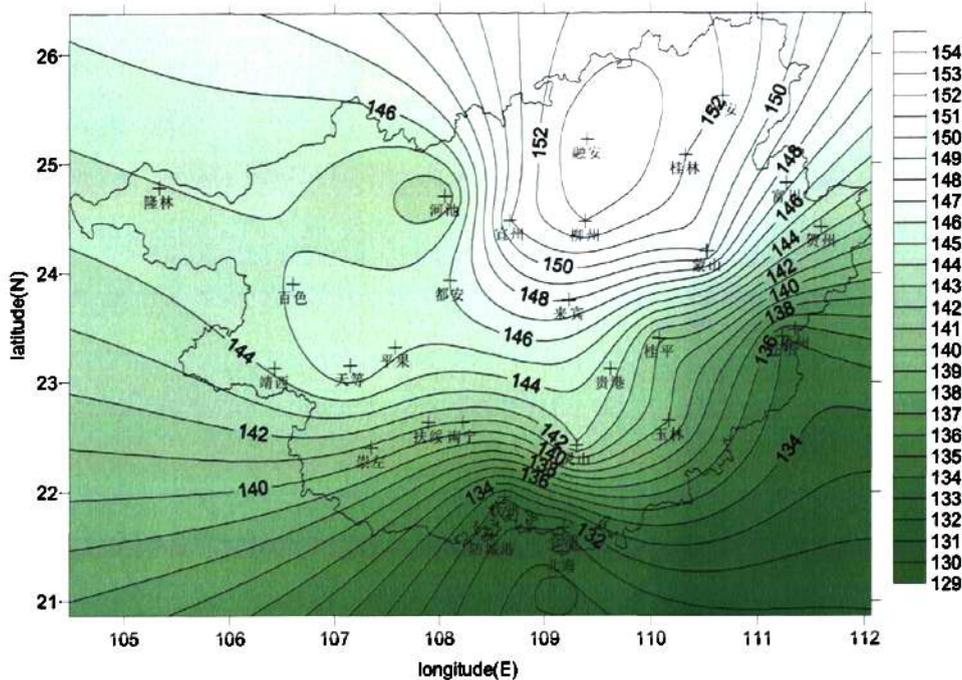


图 3-18 广西早稻平均拔节期空间分布图

图 3-18 至图 3-19 分别是广西早稻抽穗、成熟期空间分布图。

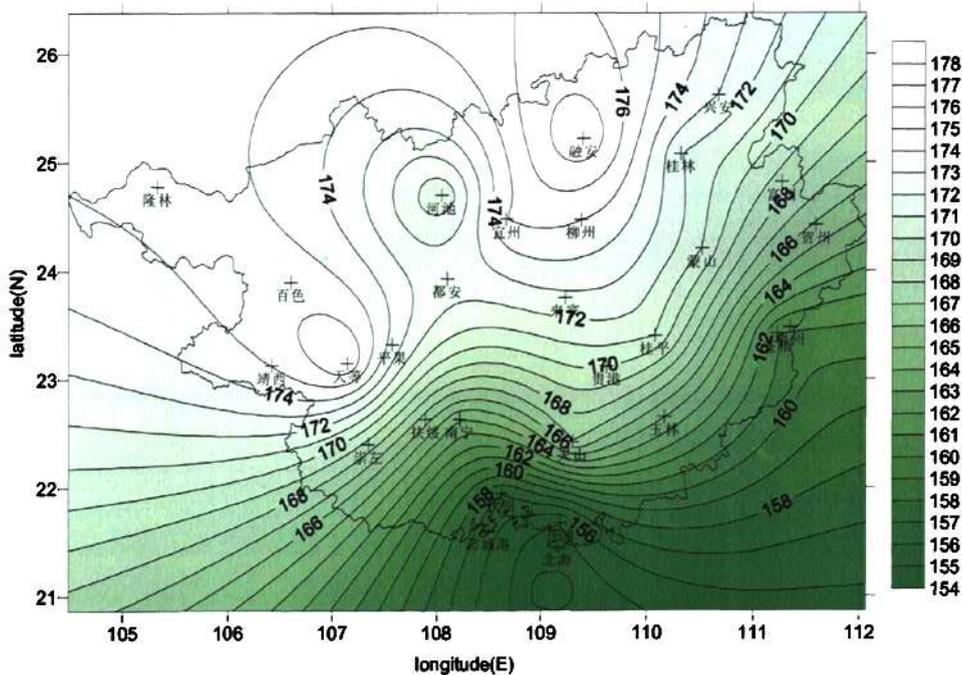


图 3-19 广西早稻平均抽穗期空间分布图

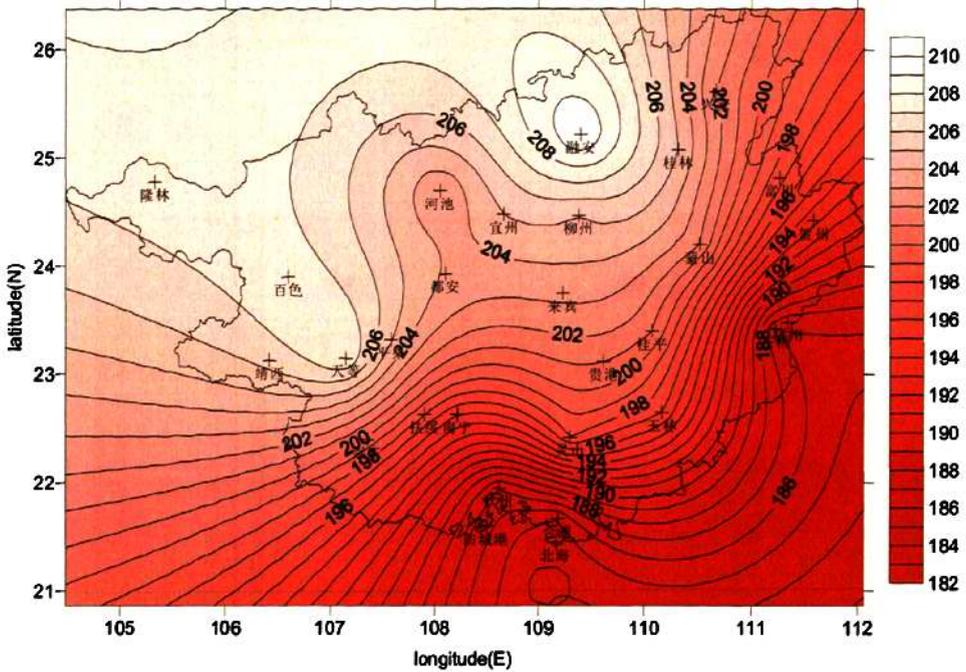


图 3-20 广西早稻平均成熟期空间分布图

两张图的空间分布也很相近，自东南向西北逐渐推迟，桂东南和桂南抽穗期、成熟期较早，分别在 6 月上旬、7 月上旬，桂北、桂西抽穗期、成熟期较迟，分别在 6 月下旬、7 月下旬。

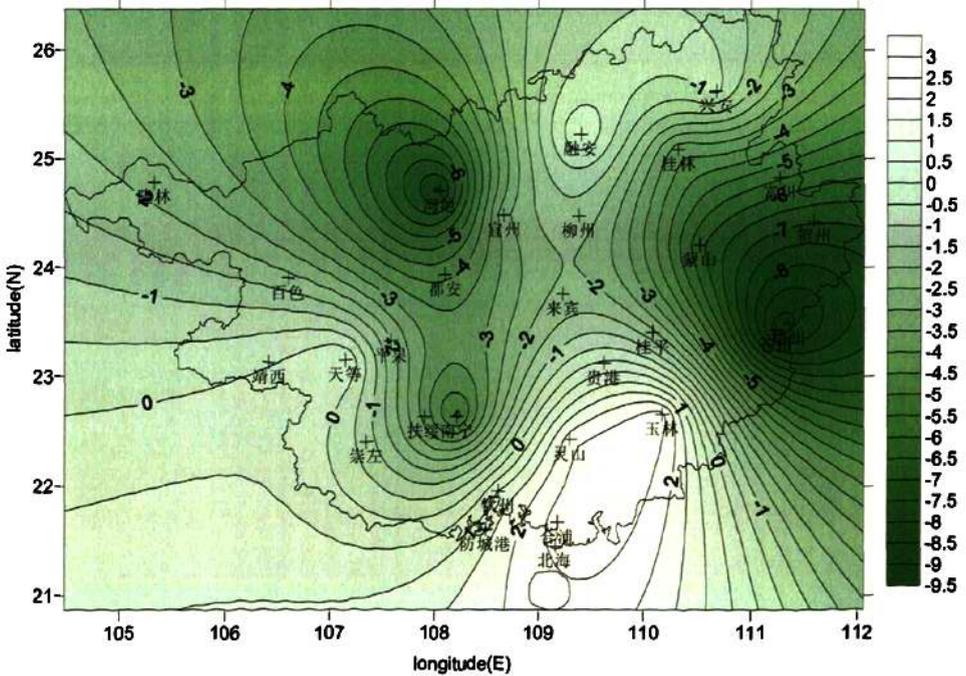


图 3-21 广西早稻出苗期倾向率空间分布图

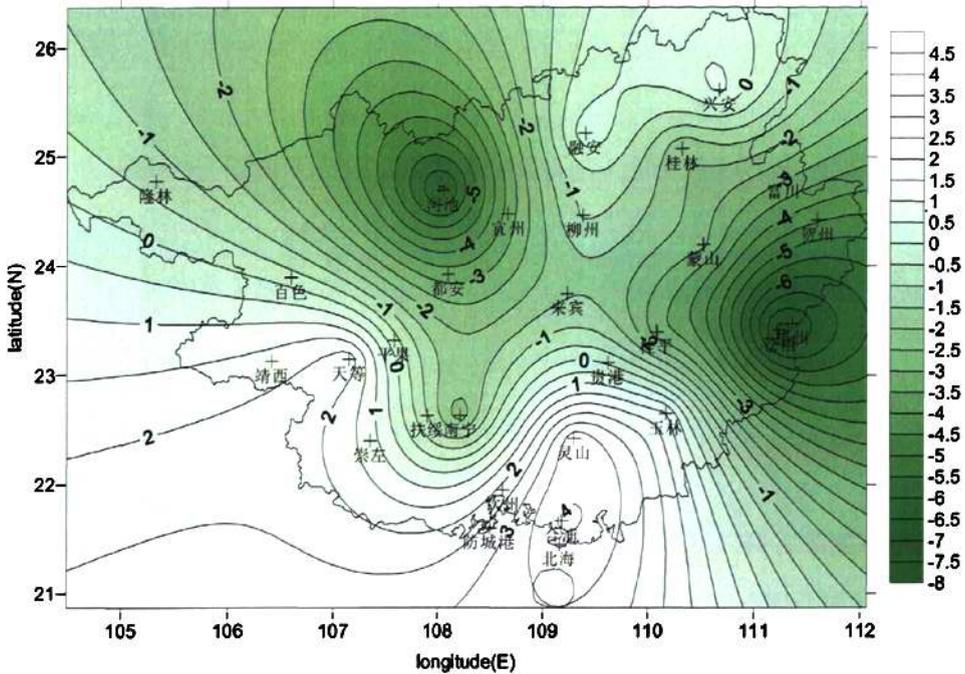


图 3-22 广西早稻三叶期倾向率空间分布图

图 3-20 是广西早稻出苗期倾向率空间分布图。图中可以看出：广西绝大部分地区早稻出苗期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -9.5\text{d}/10\text{a}$  之间，说明早稻出苗期呈现出提前趋势；桂南的钦州、防城港、北海和玉林等早稻出苗期倾向率为正值，变幅在  $0 \sim 3.0\text{d}/10\text{a}$ ，表明这些地区早稻出苗期有推迟趋势。

图 3-21 是广西早稻三叶期倾向率空间分布图。图中现出：广西绝大部分地区早稻三叶期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -8.0\text{d}/10\text{a}$  之间，说明早稻三叶期呈现出提前趋势；桂南的钦州、防城港、北海、灵山、玉林和桂西南的崇左、天等、靖西等早稻三叶期倾向率为正值，变幅在  $0 \sim 4.5\text{d}/10\text{a}$ ，表明这些地区早稻三叶期有推迟趋势。

图 3-22 是广西早稻拔节期倾向率空间分布图。由图 3-22 可知，广西绝大部分地区拔节期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -9.0\text{d}/10\text{a}$  之间，这些区域的早稻拔节期表现出提前的趋势，十年提前  $0 \sim 9$  天；只有桂南的北海、合浦和桂平小部分地区早稻拔节期倾向率为正值，变幅在  $0 \sim 1.0\text{d}/10\text{a}$  之间，拔节期推迟幅度很小，十年不到 1 天。

图 3-23 是广西早稻抽穗期倾向率空间分布图。由图 3-23 可知，广西绝大部分地区抽穗期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -8.0\text{d}/10\text{a}$  之间，这些区域的早稻抽穗

期表现出提前的趋势，十年提前0~8天；只有桂南的北海、合浦、玉林、贵港、灵山和桂平小部分地区早稻抽穗期倾向率为正值，变幅在0~3.0d/10a之间，早稻抽穗期呈推迟趋势，十年推迟0~3天。

图3-24是广西早稻成熟期倾向率空间分布图。由图3-24可知，广西绝大部分地区成熟期倾向率为负值，变幅在0~-6.0d/10a之间，这些区域的早稻成熟期表现出提前的趋势，十年提前0~6天；仅在桂南的北海、合浦等很小部分地区早稻成熟期倾向率为正值，变幅在0~3.0d/10a之间，早稻成熟期呈推迟趋势，十年推迟0~3天。

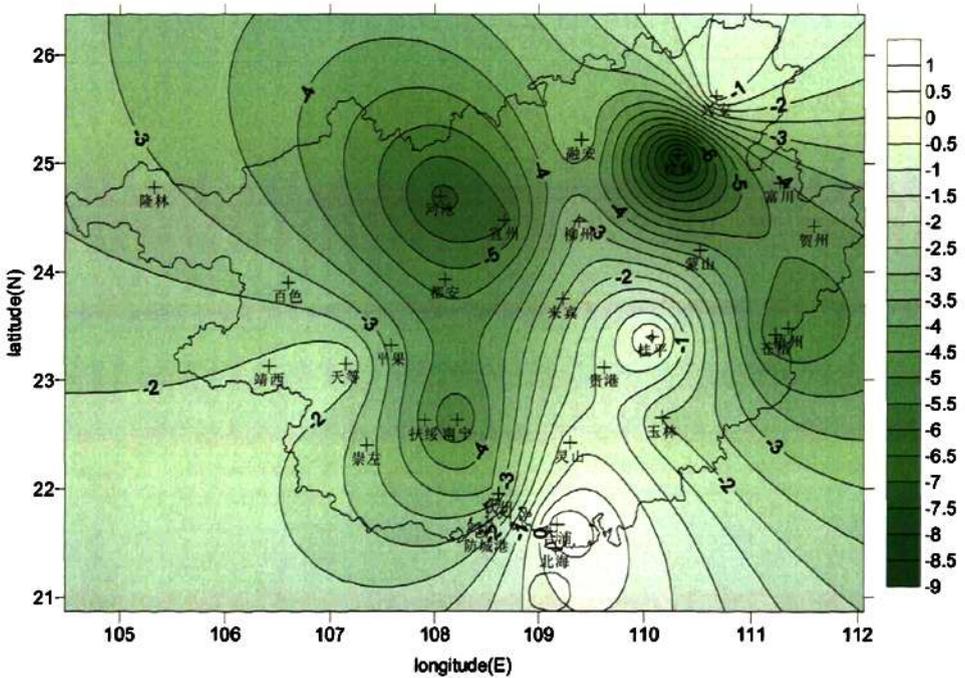


图 3-23 广西早稻拔节期倾向率空间分布图

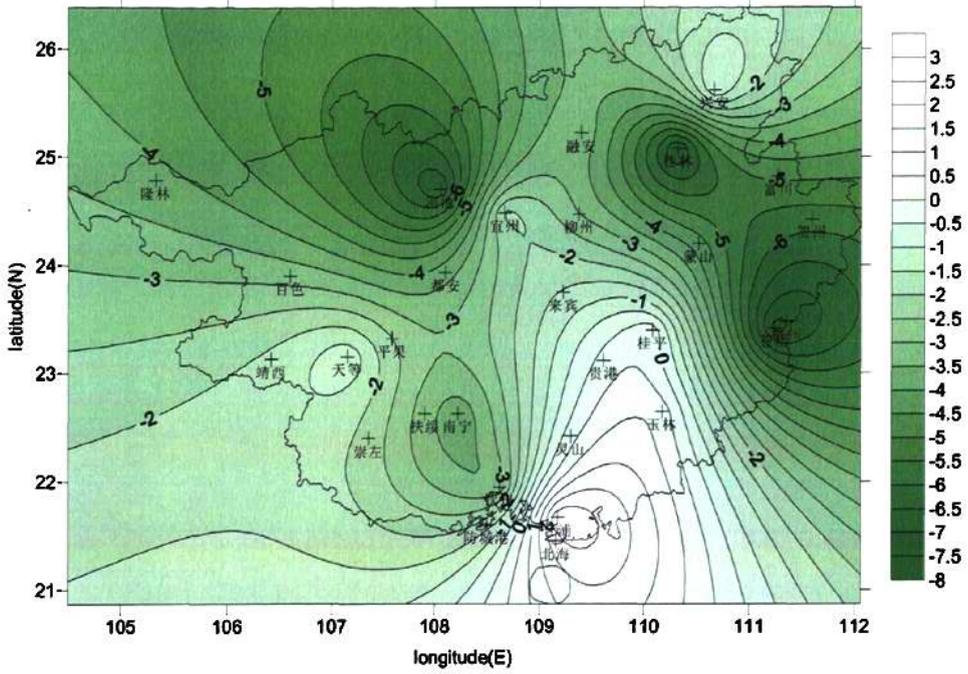


图 3-24 广西早稻抽穗期倾向率空间分布图

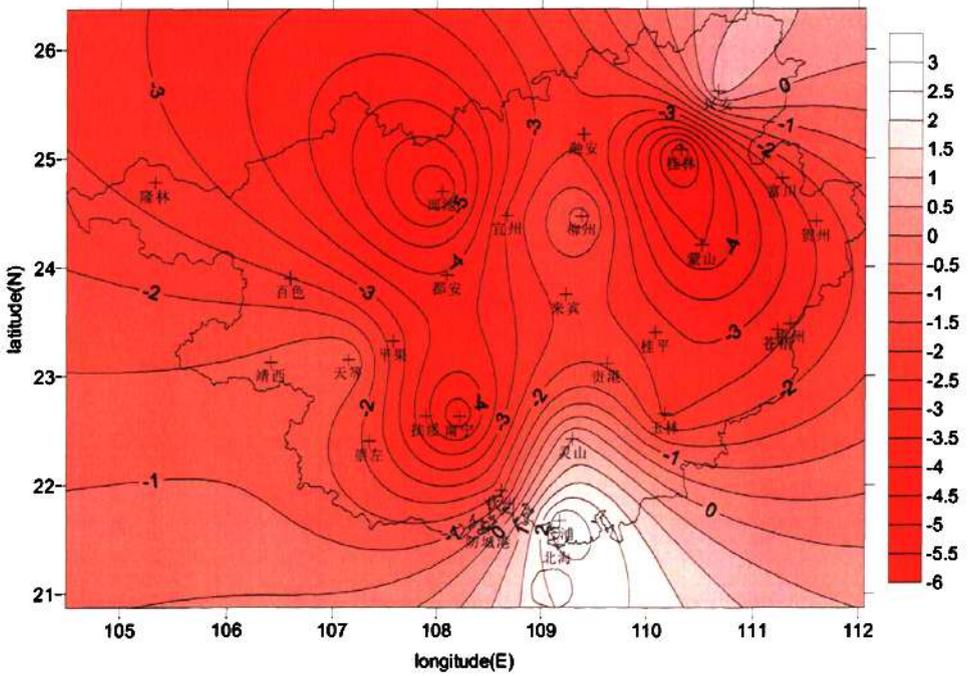


图 3-25 广西早稻成熟期倾向率空间分布图

图 3-25 是广西早稻发育期与纬度、海拔高度和经度的相关系数图。由图 3-25 可知，早稻发育期与纬度关系较大，移栽与纬度相关系数为 0.81，拔节期与纬度相关系数为 0.85；早稻抽穗期、成熟期与海拔高度也有较好的相关关系，相关系数在 0.65 以上。图 3-26 是广西早稻发育期纬向倾向率图，由图可知，纬度每向北增加 1°，广西早稻各发育期推迟 4~5 天。图 3-27 是广西早稻发育期随海拔高度变化倾向率图，图中表明，海拔高度每上升 100 米，广西早稻抽穗期推迟 4 天，早稻成熟期推迟 5 天。

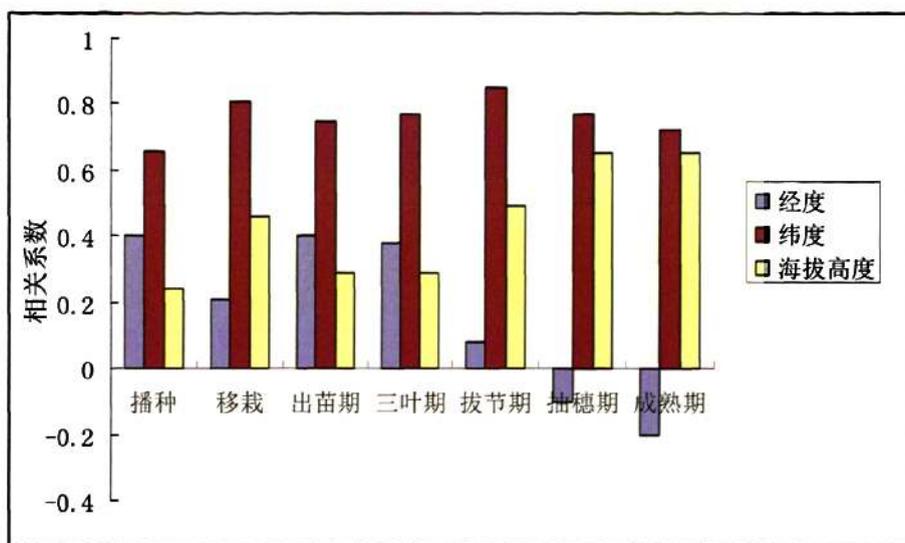


图 3-26 广西早稻发育期与纬度、海拔高度和经度的相关系数图

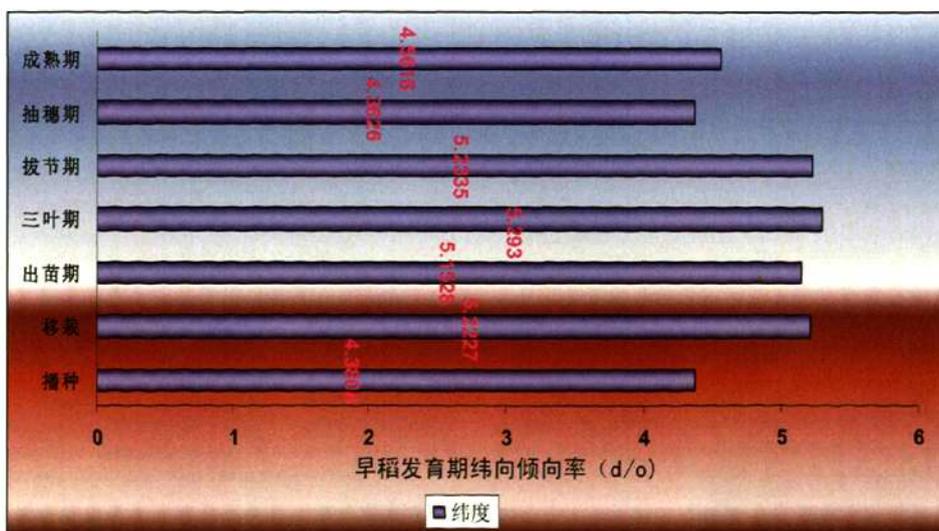


图 3-27 广西早稻发育期纬向倾向率图



图 3-29 广西晚稻平均出苗期空间分布图

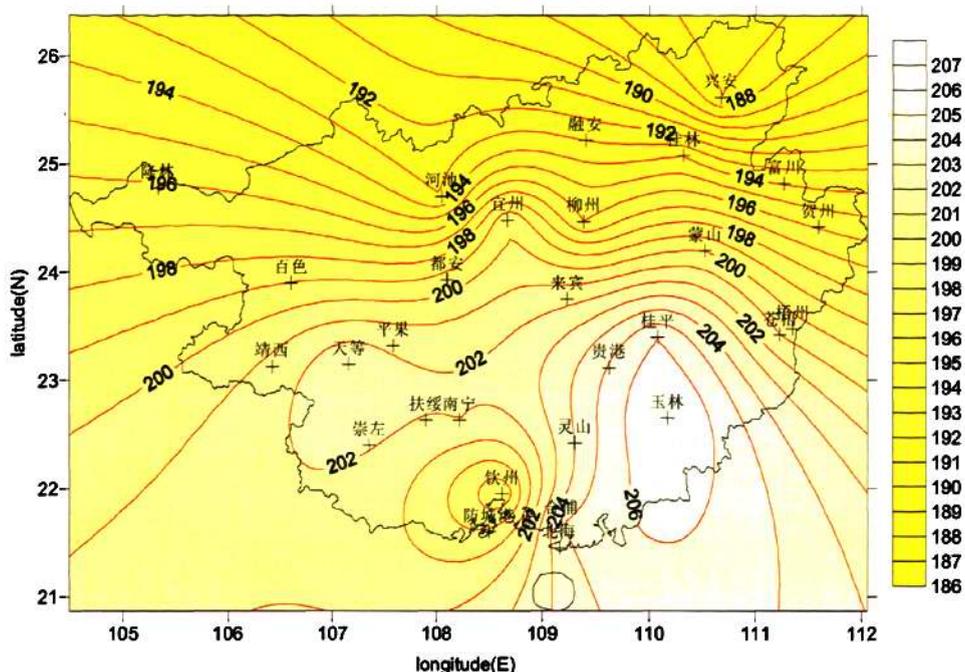


图 3-30 广西晚稻平均三叶期空间分布图

7月中旬。

图 3-30 是广西晚稻拔节期空间分布图。由图 3-30 可知，广西晚稻拔节期桂北较早，在 8 月中旬，而桂南较迟，在 9 月上旬到中旬。由图 3-31 可知，广西晚稻抽穗期桂北较早，在 9 月中旬，而桂南较迟，在 10 月上旬。由图 3-32 可知，广西晚稻成熟期桂北较早，在 10 月中旬，而桂南较迟，在 11 月上旬，南宁更迟一些，在 11 月中旬。

图 3-31 和图 3-32 分别是广西晚稻抽穗期和成熟期空间分布图。比较晚稻各发育期空间分布图可知，广西晚稻各发育期是基本同步的，各发育期自北向南逐渐推迟，桂北较早，桂南较迟。

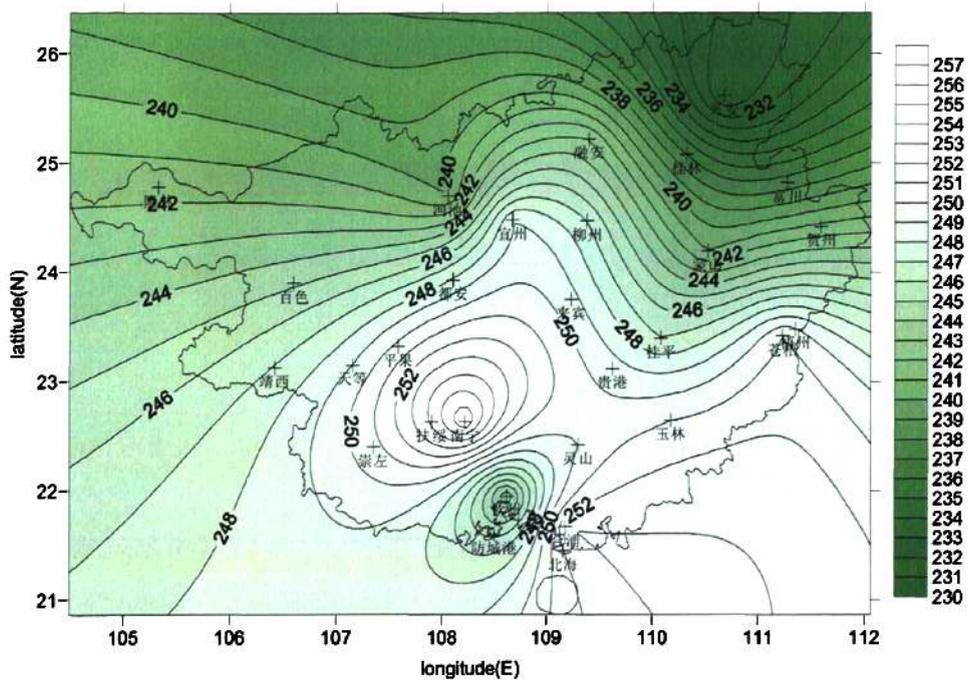


图 3-31 广西晚稻平均拔节期空间分布图

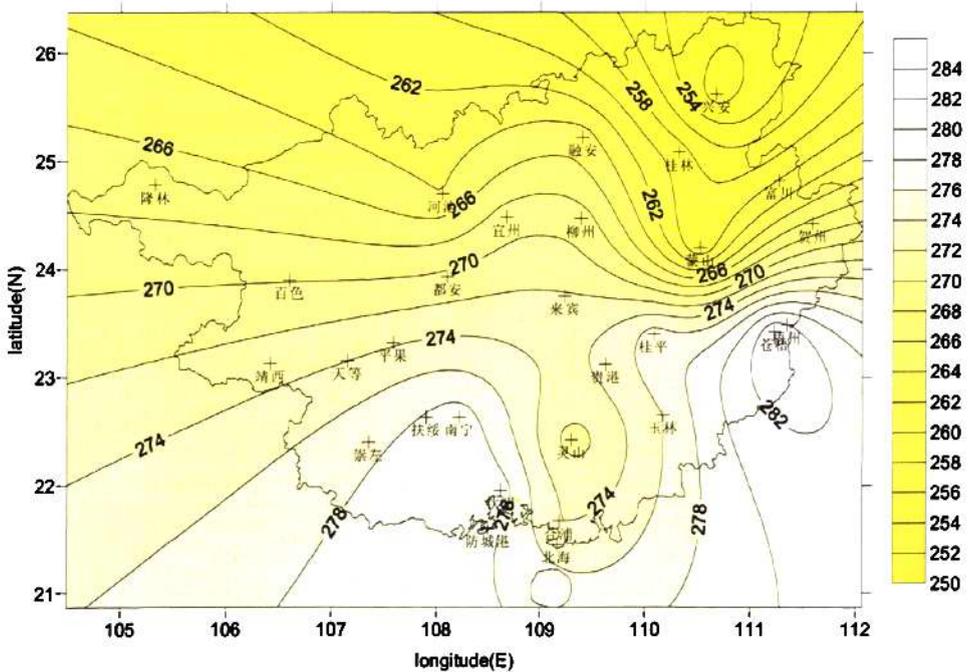


图 3-32 广西晚稻平均抽穗期空间分布图

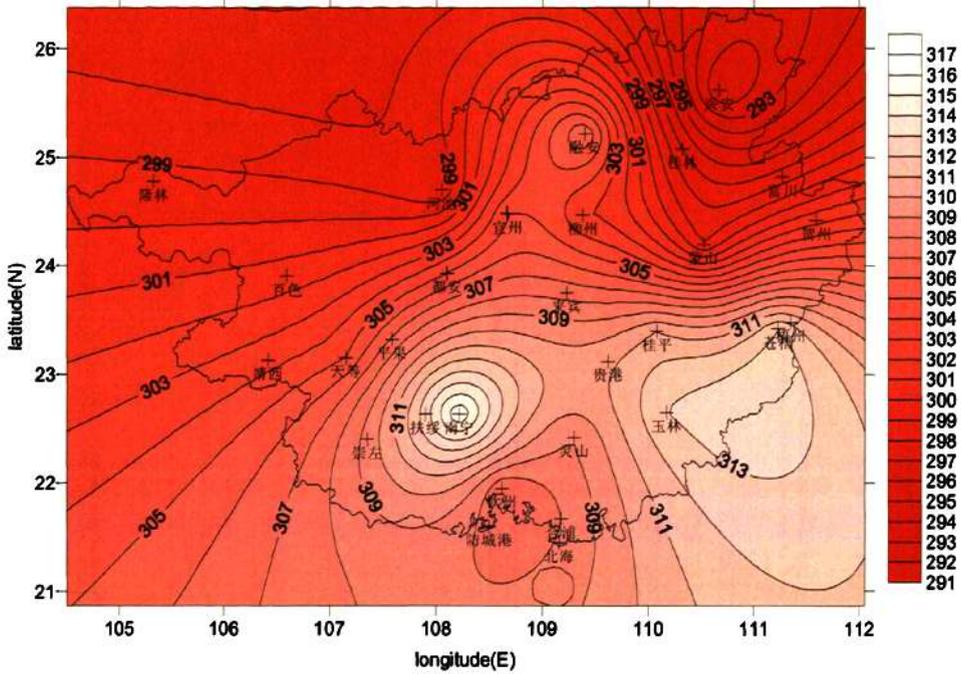


图 3-33 广西晚稻平均成熟期空间分布图

图 3-33 至图 3-37 分别是广西晚稻出苗期、三叶期、拔节期、抽穗期和成熟期变化倾向率空间分布图。由图 3-33 可知，全区仅河池晚稻出苗期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -2.0\text{d}/10\text{a}$  之间，晚稻出苗期稍有提前；其它地区，晚稻出苗期倾向率均为正值，变幅在  $0 \sim 12.0\text{d}/10\text{a}$  之间，表明这些区域晚稻出苗期呈现出推迟趋势，十年推迟  $0 \sim 12$  天。图 3-34 显示，河池地区晚稻三叶期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -2.0\text{d}/10\text{a}$  之间，晚稻三叶期略有提前；广西其它地区晚稻三叶期倾向率均为正值，变幅在  $0 \sim 12.0\text{d}/10\text{a}$  之间，表明这些区域晚稻三叶期呈现出推迟趋势，十年推迟  $0 \sim 12$  天。由图 3-35 可知，河池、柳州北部、桂林北部和钦州晚稻拔节期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -7.0\text{d}/10\text{a}$  之间，表明这些地区晚稻拔节期提前，提前幅度为十年  $0 \sim 7$  天；广西其它地区晚稻拔节期倾向率为正值，变幅在  $0 \sim 4.0\text{d}/10\text{a}$  之间，显示这些地区晚稻拔节期推迟，十年推迟  $0 \sim 4$  天。由图 3-36 可知，梧州、河池和柳州晚稻抽穗期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -7.0\text{d}/10\text{a}$  之间，说明晚稻抽穗期提前，十年提前  $0 \sim 7$  天；广西其它地区晚稻抽穗期倾向率为正值，变幅在  $0 \sim 12.0\text{d}/10\text{a}$  之间，表明这些地区晚稻抽穗期推迟，十年推迟  $0 \sim 12$  天。由图 3-37 可知，河池、柳州、梧州和桂南的钦州、北

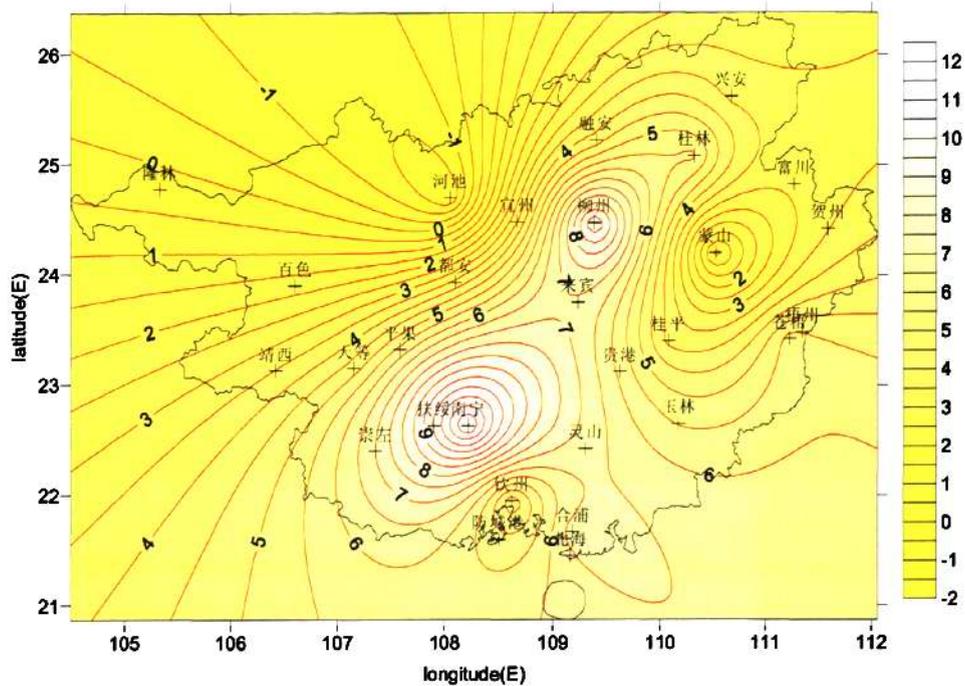


图 3-34 广西晚稻出苗期倾向率空间分布图

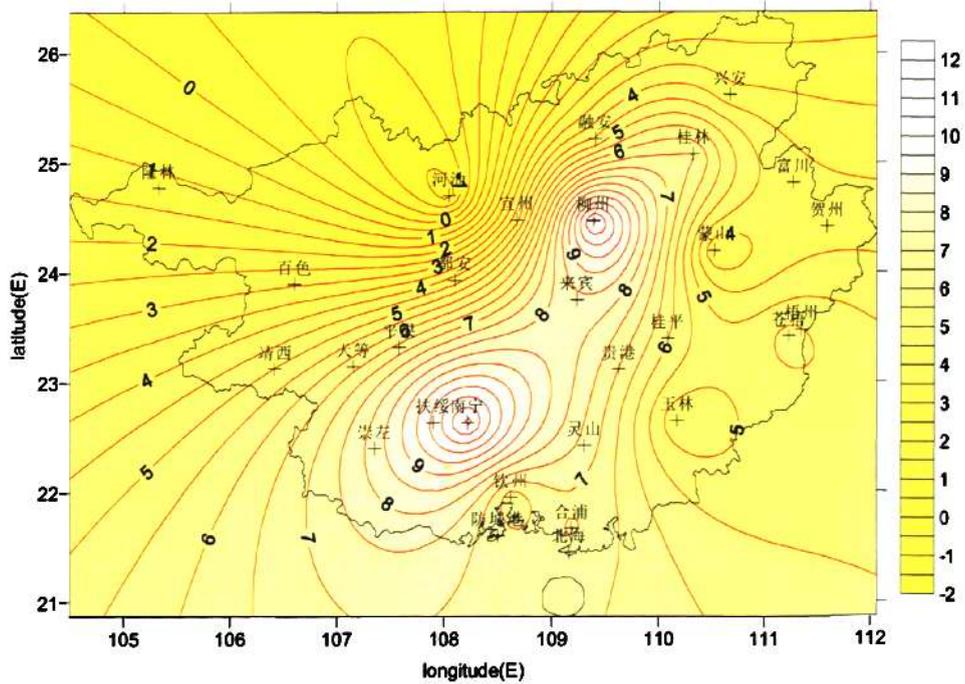


图 3-35 广西晚稻三叶期倾向率空间分布图

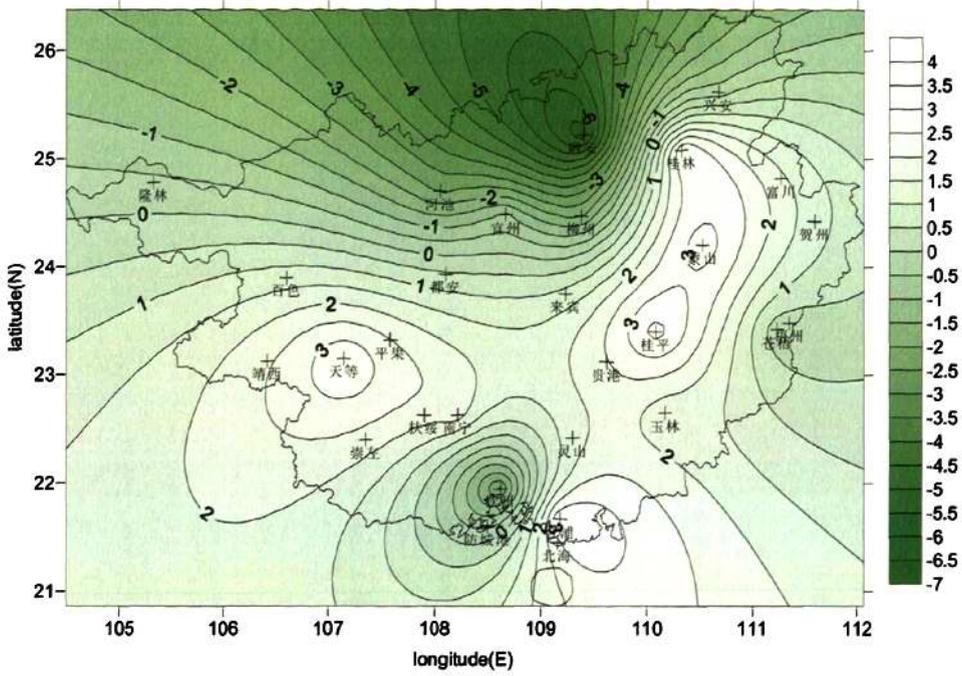


图 3-36 广西晚稻拔节期倾向率空间分布图

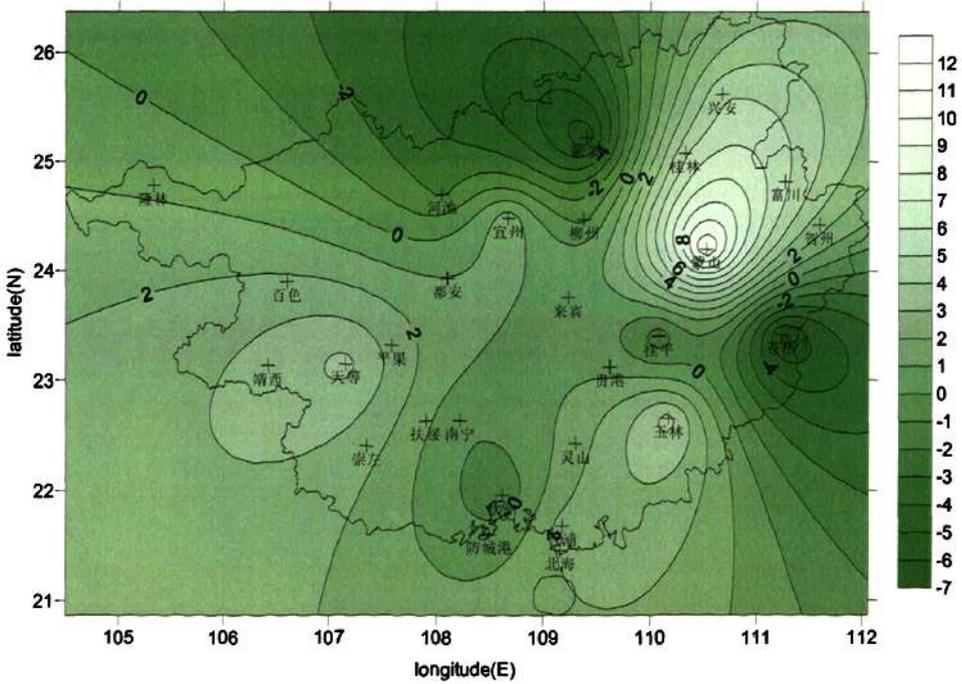


图 3-37 广西晚稻抽穗期倾向率空间分布图

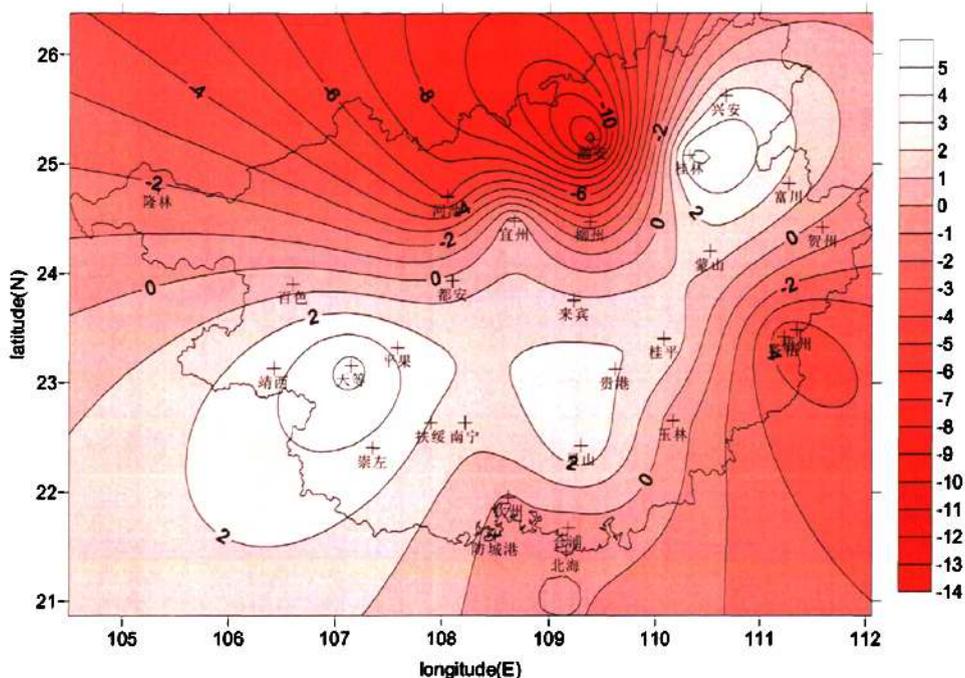


图 3-38 广西晚稻成熟期倾向率空间分布图

海等地区，晚稻成熟期倾向率为负值，变幅在  $0 \sim -14.0 \text{d}/10\text{a}$  之间，说明晚稻成熟期提前，十年提前  $0 \sim 14$  天；其它地区晚稻成熟期倾向率为正值，变幅在  $0 \sim 5.0 \text{d}/10\text{a}$  之间，说明晚稻成熟期推迟，十年推迟  $0 \sim 5$  天。

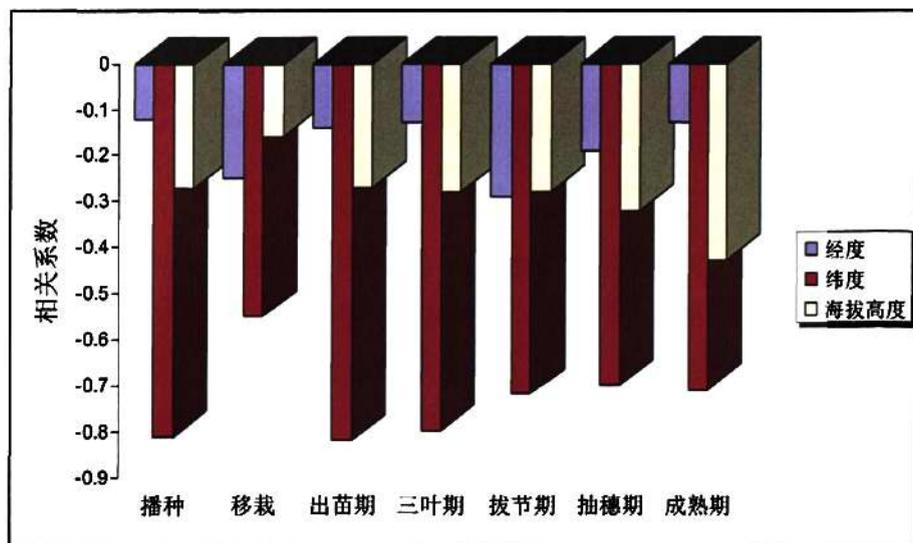


图 3-39 广西晚稻发育期与纬度、海拔高度和经度的相关系数图

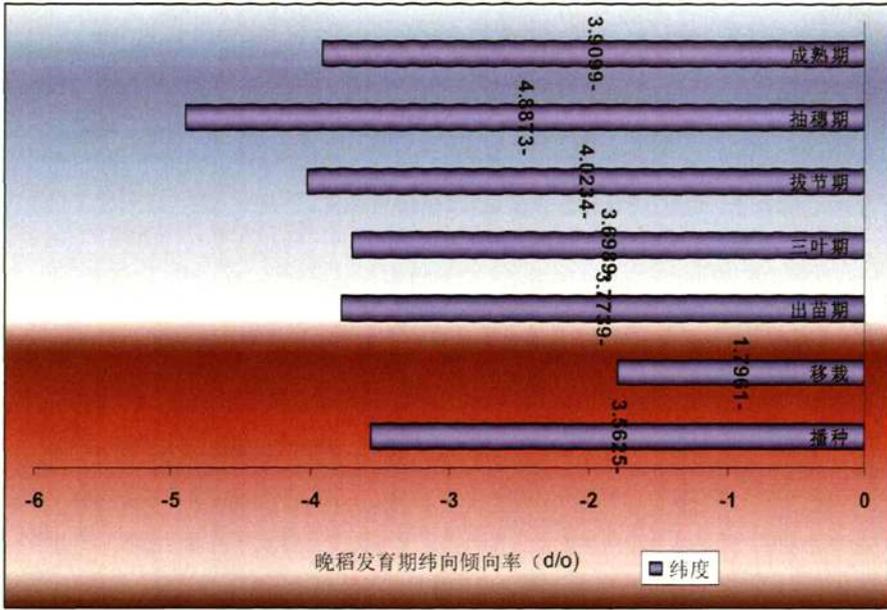


图 3-40 广西晚稻发育期纬向倾向率图

图 3-38 是广西晚稻发育期与纬度、海拔高度和经度的相关系数图，图 3-39 是广西晚稻发育期纬向倾向率图。由图 3-38 可知，广西晚稻发育期与纬度呈负相关，播种、拔节期与纬度相关系数小于  $-0.8$ ，而与海拔高度、经度也呈负相关，但相关小。由图 3-39 可知，纬度向北增加  $1^\circ$ ，广西晚稻各发育期均提前，移栽提前 2 天，播种、出苗、三叶、拔节和成熟期提前 4 天，抽穗期提前 5 天。

### 3. 3 动物物候变化的基本特征

#### 3. 3. 1 广西家燕物候期变化的基本特征

图 3-40、图 3-41 分别是广西家燕始见期空间分布图、广西家燕绝见期空间分布图。由图 3-40 可知，广西家燕始见期自西南向东北逐渐推迟，桂东北较迟，一般在出现在 3 月份，桂西南较早，2 月份就始见家燕。图 3-41 表明，广西家燕绝见期自东南向西北逐渐推迟，桂东南最早的 7 月上旬家燕绝见，桂西北最迟的要到 11 月下旬才出现家燕绝见。

图 3-42、图 3-43 分别是广西家燕始见期倾向率空间分布图、广西家燕绝见期倾向率空间分布图。由图 3-42 可知，桂北的宜州、柳州、桂林以及桂西的百

色、南宁、崇左、钦州、防城港等地家燕始见期倾向率为正值，变幅在 0~24.0d/10a 之间，家燕始见期表现推迟趋势，十年推迟 0~24 天；其它地区家燕始见期倾向率为负值，变幅在 0~-10.0d/10a 之间，家燕始见期表现提前趋势，十年提前 0~10 天。由图 3-43 可知，桂东北、桂西南家燕绝见期倾向率为负值，变幅在 0~-30.0d/10a 之间；其它地区家燕绝见期倾向率为正值，变幅在 0~60.0d/10a 之间。

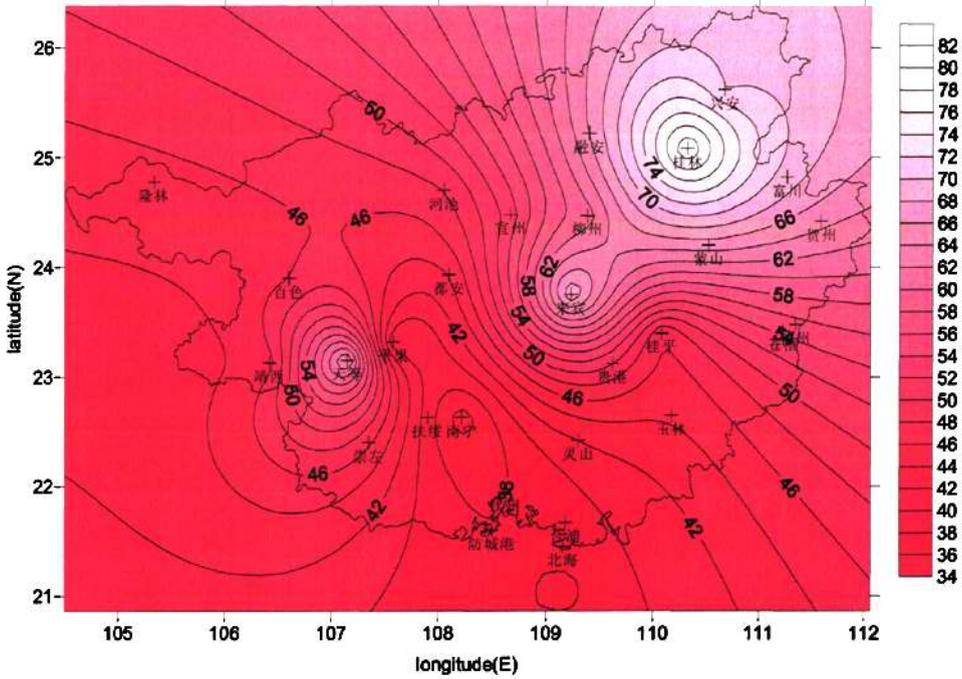


图 3-41 广西家燕平均始见期空间分布图

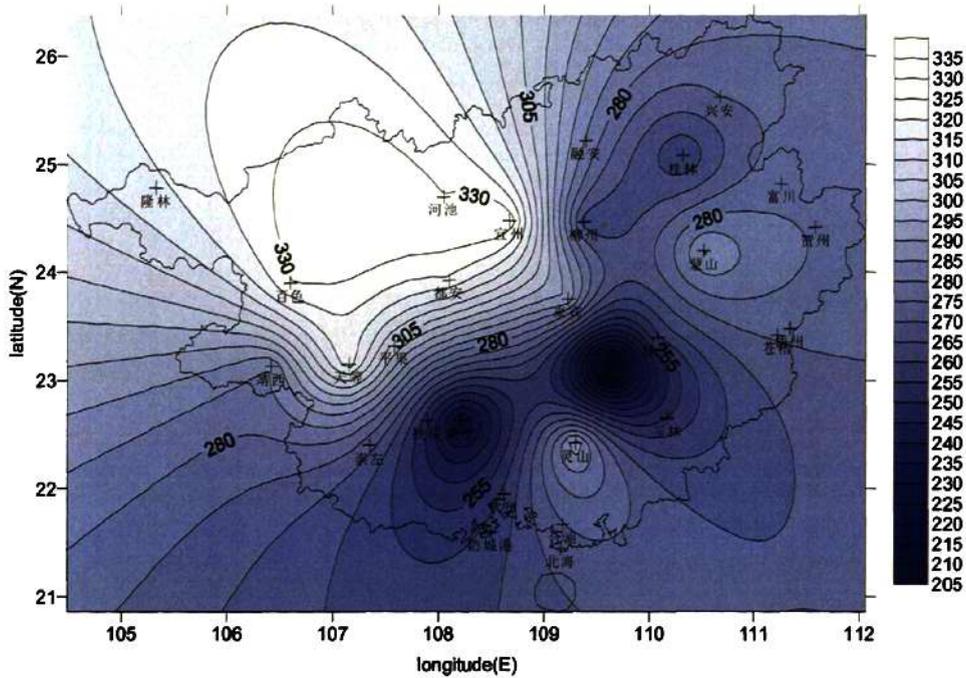


图 3-42 广西家燕平均绝见期空间分布图

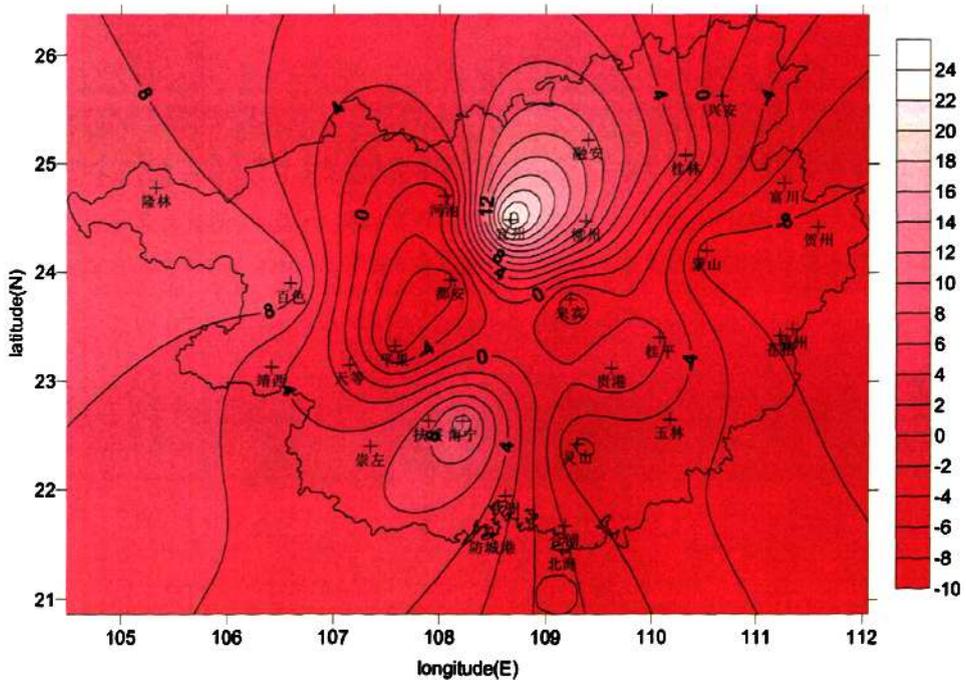


图 3-43 广西家燕始见期倾向率空间分布图

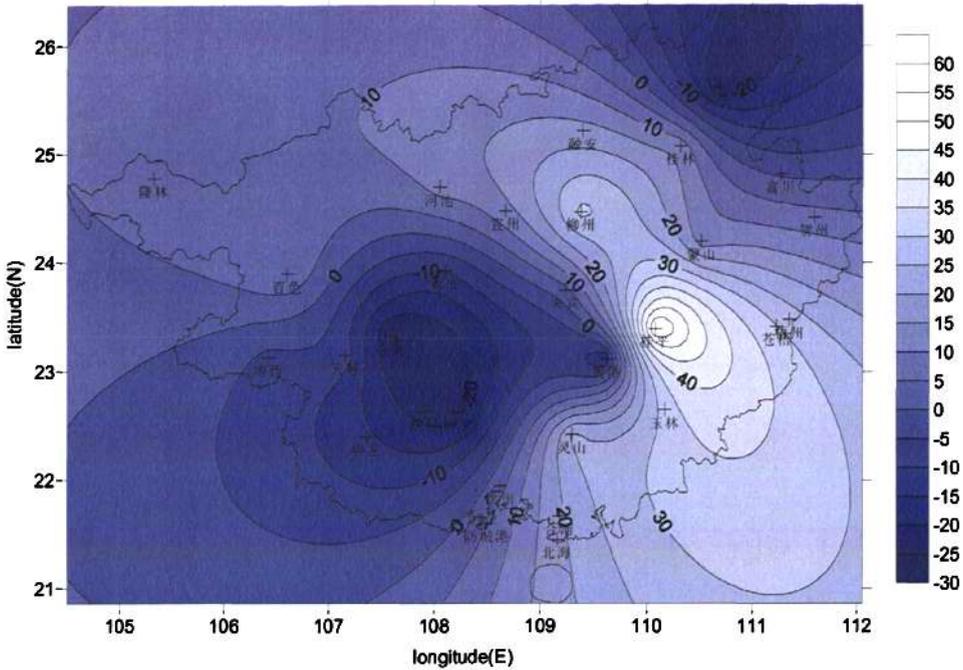


图 3-44 广西家燕绝见期倾向率空间分布图

### 3. 3. 2 地理条件对家燕物候期的影响

图 3-44 和图 3-45 分别是广西家燕物候期与经度、纬度、海拔高度的相关系数图和广西家燕物候期经向、纬向倾向率图。由图 3-44 和图 3-45 可知，经度、纬度的改变，通过影响气候条件而对燕物候期有一定的影响。

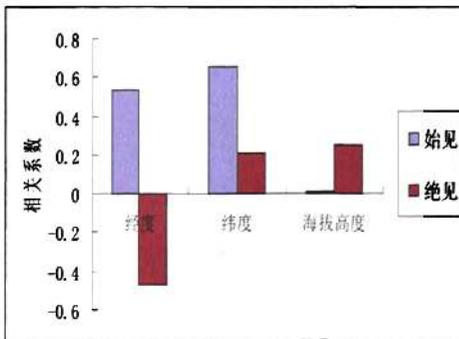


图 3-45 广西家燕物候期与经度、纬度、海拔高度的相关系数图

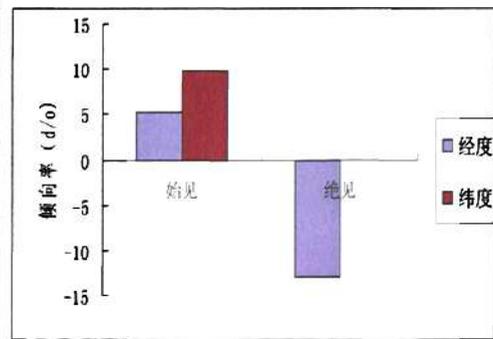


图 3-46 广西家燕物候期经向、纬向倾向率图

### 3.4 小结

本章利用广西 1981—2007 年楝树、水稻和家燕等动植物和作物的物候资料，利用统计学方法，深入分析了广西自然物候和作物物候变化的基本特征，主要得到以下几点结论：

1) 广西楝树春季物候期与秋季物候期异步。春季物候期出现较早的地区，秋季物候期出现较迟，而春季物候期出现较迟的地区，秋季物候期出现反而较早。

2) 广西楝树春季芽开放期、展叶始期、开花始期和开花盛期的空间分布十分相似，即对春季物候期而言，桂南、桂西及桂东南出现较早，桂东北、桂西南出现较迟。广西楝树秋季叶完全变色期和落叶末期空间分布图十分相似，桂东北的贺州、桂林、桂北的河池和桂西的靖西叶完全变色期和落叶末期出现较早，广西其它地区相对较迟。

3) 广西楝树春季芽开放期、展叶始期、开花始期和开花盛期年际变化是同步的。广西大部分地区楝树芽开放期、展叶始期变化倾向率为负值，其中桂北、贵港、南宁为负值中心，楝树芽开放期和展叶始期 10 年约提前 0~21 天；河池、百色、北海、钦州、防城港和富川等区域楝树芽开放期、展叶始期变化倾向率为正值，芽开放期 10 年约推迟 0~8 天，展叶始期 10 年约推迟 0~5 天。广西大部分地区楝树开花始期和开花盛期提前，10 年约提前 0~18 天，而河池、融安小部区域楝树开花始期和开花盛期推迟，10 年约推迟 0~7 天。

4) 广西楝树叶完全变色期和落叶末期的年际变化是基本同步的。桂南的天等、平果、都安、宜州和融安一带，桂东到桂南，楝树叶完全变色期和落叶末期呈现提前趋势，其它地区呈推迟趋势。

5) 随着纬度、经度和海拔高度的增加，广西楝树春季物候期推迟，尤以纬度的影响更明显。在北半球，纬度每向北增加  $1^{\circ}$ ，楝树芽开放、展叶期推迟 5 天，开花期推迟 7 天。随着海拔高度、纬度和经度的增加，广西楝树秋季物候期提前，以海拔高度和纬度的影响更大。海拔高度每上升 100 米，叶完全变色期提前 5 天。

6) 广西早稻出苗、三叶期和拔节期是同步的，自西南向东北逐渐推迟，桂东南、桂南和桂西较早，分别在 3 月中旬、3 月下旬和 5 月中旬到 5 月下旬初，

而桂北较迟，分别在3月下旬到4月上旬、4月上旬到中旬、5月下旬末到6月上旬初。

7) 广西早稻抽穗期、成熟期也是同步的，自东南向西北逐渐推迟，桂东南和桂南抽穗期、成熟期较早，分别在6月上旬、7月上旬，桂北、桂西抽穗期、成熟期较迟，分别在6月下旬、7月下旬。

8) 广西绝大部分地区早稻出苗期呈现出提前趋势，10年提前0~10天；只有桂南的钦州、防城港、北海和玉林等早稻出苗期有推迟趋势，10年推迟0~3天。

广西绝大部分地区早稻三叶期呈现出提前趋势，10年提前0~8天；仅桂南的钦州、防城港、北海、灵山、玉林和桂西南的崇左、天等、靖西等早稻三叶期有推迟趋势，10年推迟0~5天。

广西绝大部分地区早稻拔节期表现出提前的趋势，十年提前0~9天；桂南的北海、合浦和桂平小部分地区早稻拔节期推迟幅度也很小，十年推迟不到1天。

广西绝大部分地区早稻抽穗期表现出提前的趋势，十年提前0~8天；只有桂南的北海、合浦、玉林、贵港、灵山和桂平小部分地区早稻抽穗期呈推迟趋势，十年推迟0~3天。

广西绝大部分地区早稻成熟期表现出提前的趋势，十年提前0~6天；仅在桂南的北海、合浦等很小部分地区早稻成熟期呈推迟趋势，十年推迟0~3天。

9) 早稻发育期与纬度关系较大，纬度每向北增加 $1^{\circ}$ ，广西早稻各发育期推迟4~5天。早稻抽穗期、成熟期与海拔高度也有较好的相关关系，海拔高度每上升100米，广西早稻抽穗期推迟4天，成熟期推迟5天。

10) 广西晚稻各发育期是基本同步的，各发育期自北向南逐渐推迟，桂北较早，桂南较迟。

11) 广西绝大部分地区晚稻发育期呈现出推迟趋势，出苗期、三叶期十年推迟0~12天，拔节期十年推迟0~4天，抽穗期十年推迟0~12天，成熟期十年推迟0~5天。仅河池地区出苗期、三叶期10年提前0~2天，河池、柳州北部、桂林北部和钦州拔节期十年提前0~7天，梧州、河池和柳州晚稻抽穗期十年提前0~7天，河池、柳州、梧州和桂南的钦州、北海等地区，晚稻成熟期晚稻成

熟期十年提前 0~14 天。

12) 广西晚稻发育期与纬度呈负相关, 其中播种和拔节期与纬度相关系数小于-0.8。晚稻发育期与海拔高度、经度也呈负相关, 但相关小。纬度每向北增加 1°, 广西晚稻各发育期均提前, 移栽提前 2 天, 抽穗期提前 5 天, 播种、出苗、三叶、拔节和成熟期均提前 4 天。

13) 广西家燕始见期和绝见期在空间分布上是不同步的。家燕始见期自西南向东北逐渐推迟, 桂西南较早, 2 月份就始见家燕, 桂东北较迟, 一般出现在 3 月份。家燕绝见期自东南向西北逐渐推迟, 桂东南最早, 7 月上旬家燕就已迁移, 桂西北最迟, 要到 11 月下旬才出现家燕迁移。

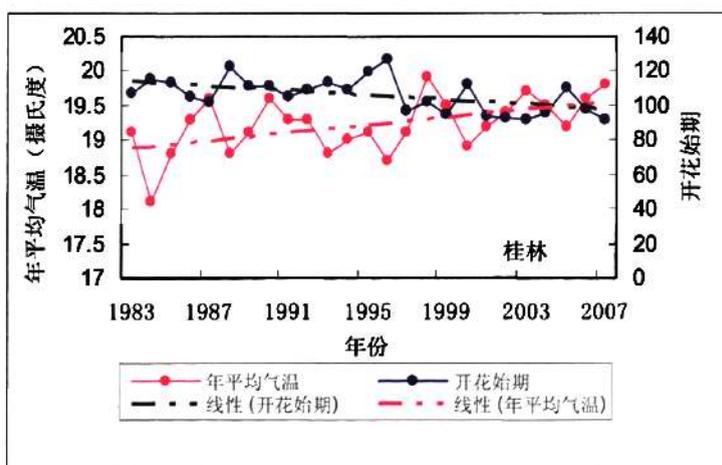
14) 桂北的柳州、桂林、宜州以及桂西的百色、南宁、崇左、钦州、防城港等地家燕始见期表现出推迟趋势, 十年推迟 0~24 天, 其它地区家燕始见期表现提前趋势, 十年提前 0~10 天。桂东北和桂西南家燕绝见期表现出提前趋势, 10 年提前 0~30 天, 其它地区家燕绝见期表现出推迟趋势, 10 年推迟 0~60 天。

## 第四章 气候变暖对广西物候变化的影响

### 4.1 气候变暖对广西楝树花期的影响

#### 4.1.1 气象要素对楝树花期的影响

影响植物花期的主要气象因素是气温、降水和日照，但不同的气候带，三者所起的作用是不同的。以桂林为例分析各主要气象要素对楝树花期的影响，考虑到降水、日照的逐日、逐月变化都很大，年变化小一些，所以用年平均气温、年降水量和年日照时数来分析气温、降水和日照对楝树花期的影响，判断影响花期的主要气象因子。图 4-1 是桂林气温、降水、日照与楝树花期的年变化图，由图可知，气温与楝树花期有较好的负相关关系，降水、日照与楝树花期没有好的相



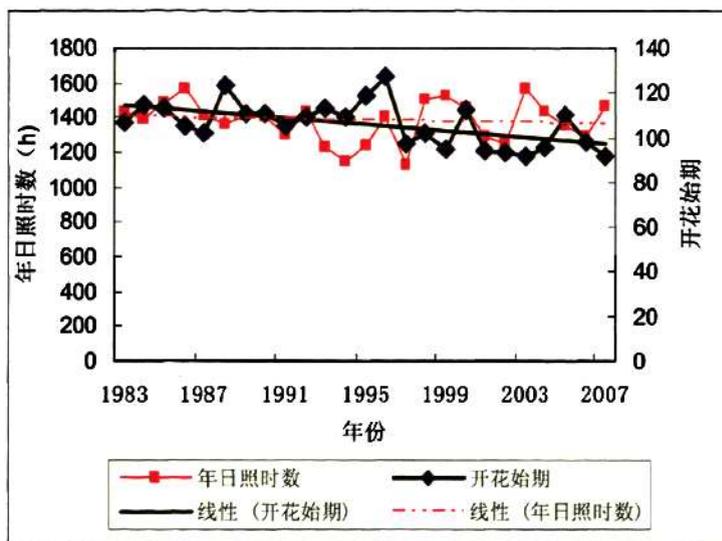
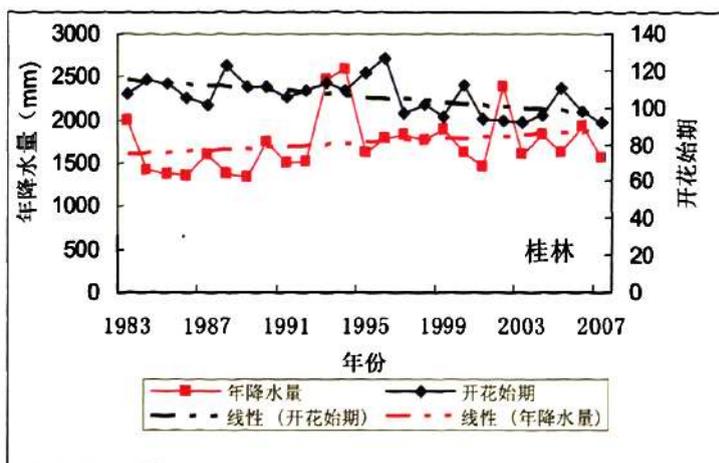


图 4-1 桂林气温、降水、日照与椴树花期的年变化

关系。这说明，在亚热带气候区，降水、日照已能满足植物花期对降水、日照的要求，气温是决定植物花期早晚的关键气候因子。

#### 4. 1. 2 气温对不同地区椴树花期的影响

图 4-2 是南宁椴树花期与 1-2 月平均气温年变化图。由图 4-2 可知，椴树花期与花期前的 1-2 月平均气温有很好的负相关关系；1-2 月平均气温呈上升趋势

(气候倾向率  $0.568^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )，10 年平均气温升高  $0.568^{\circ}\text{C}$ ，椴树花期呈现出提前趋势，其中始花期变化倾向率为  $-3.767\text{d}/10\text{a}$ ，10 年椴树始花期提前约 4 天，盛花期变化倾向率为  $-5.311/10\text{a}$ ，10 年椴树盛花期提前约 5 天。图 4-2 表明，南宁 1981-2007 年间 1-2 月气温升高，导致椴树花期提前，10 年提前约 4~5 天。

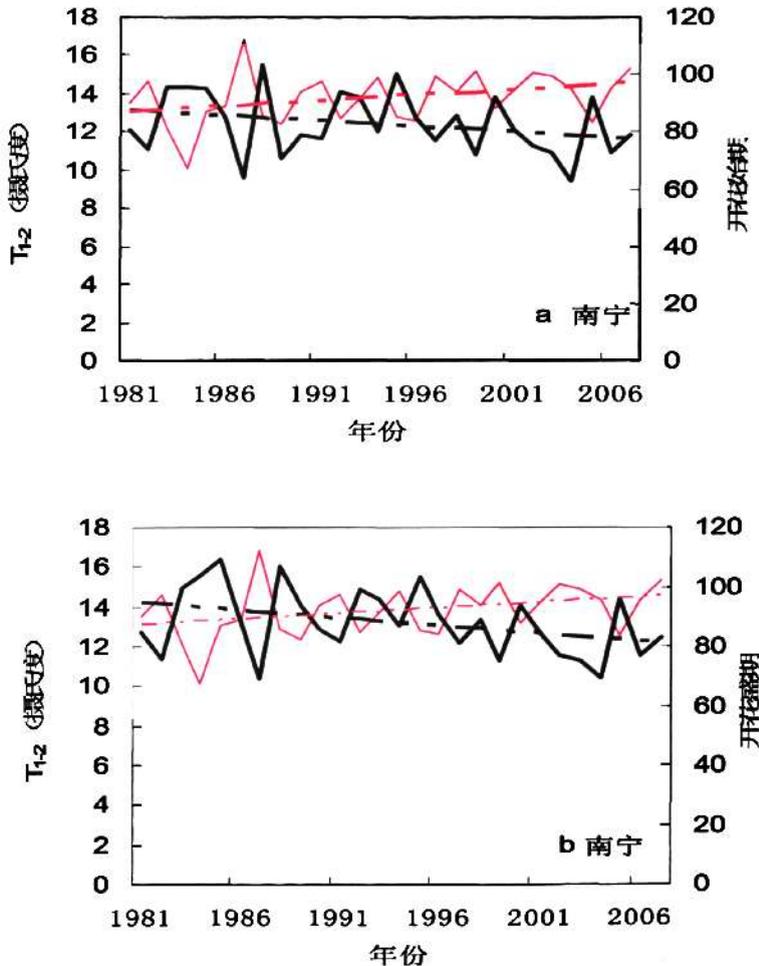


图 4-2 南宁椴树花期与 1-2 月平均气温年变化  
粉红细实线是 1-2 月平均气温，黑色粗实线是花期，虚线是趋势线。

图 4-3 是桂林椴树花期与 2-3 月平均气温年变化图。由图可知，椴树花期与花期前的 2-3 月平均气温有很好的负相关关系，1983-2007 年，桂林 2-3 月平均气温呈现出升温趋势（气候倾向率  $1.085^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ），椴树花期呈现出提前趋势，

每 10 年始花期提前约 7 天 (倾向率 $-7.231\text{d}/10\text{a}$ )，盛花期提前约 6 天 (倾向率 $-6.062\text{d}/10\text{a}$ )。图 4-3 表明，1983-2007 年间，桂林 2-3 月气温升高，引起楝树花期提前，10 年提前约 6~7 天。

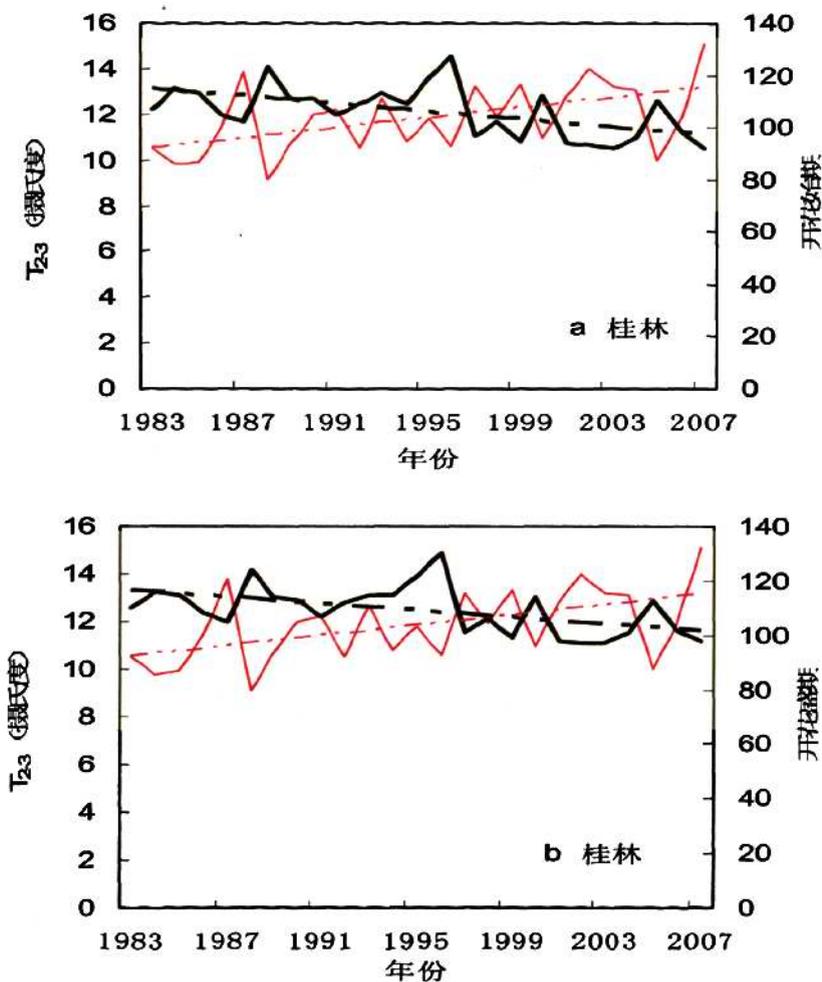


图 4-3 桂林楝树花期与 2-3 月平均气温年变化  
粉红细实线是 2-3 月平均气温，黑色粗实线是花期，虚线是趋势线。

图 4-4 是桂林楝树花期与 1-3 月平均气温年变化图。由图 4-4 可知，楝树花期与花期前 1-3 月平均气温有很好的负相关关系。

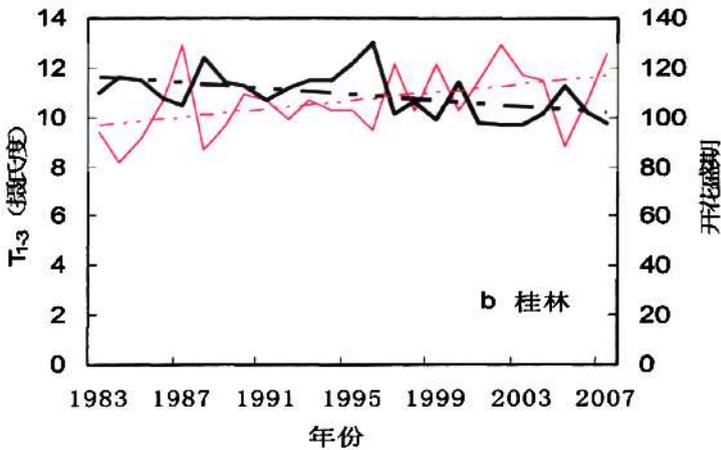
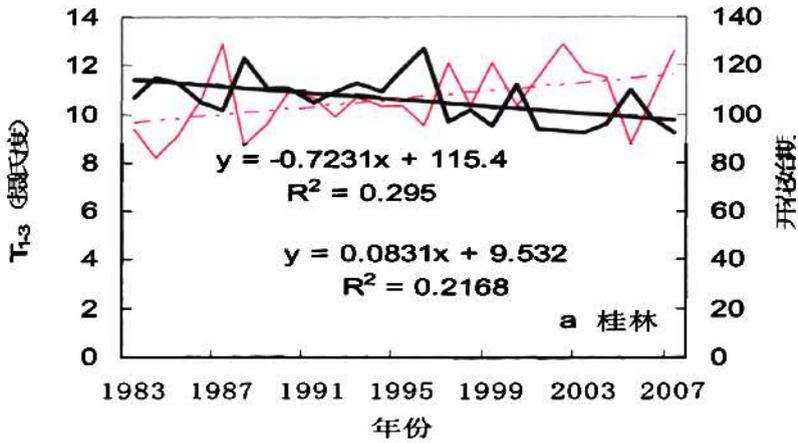


图 4-4 桂林栎树花期与 1-3 月平均气温年变化  
 粉红细实线是 1-3 月平均气温，黑色粗实线是花期，虚线是趋势线。

图 4-5 是百色栎树花期与 1-2 月平均气温年变化图。由图 4-5 可知，栎树花期与花期前的 1-2 月平均气温有很好的负相关关系，1983-2007 年，百色 1-2 月平均气温呈现出升温趋势（气候倾向率  $0.868^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ），栎树花期呈现出提前趋势，每 10 年始花期提前约 5 天（倾向率  $-5.115\text{d}/10\text{a}$ ），盛花期提前约 4 天（倾向率  $-3.946\text{d}/10\text{a}$ ）。图 4-5 表明，1983-2007 年间，百色 1-2 月气温升高，引起栎树花期提前，10 年提前约 4~5 天。

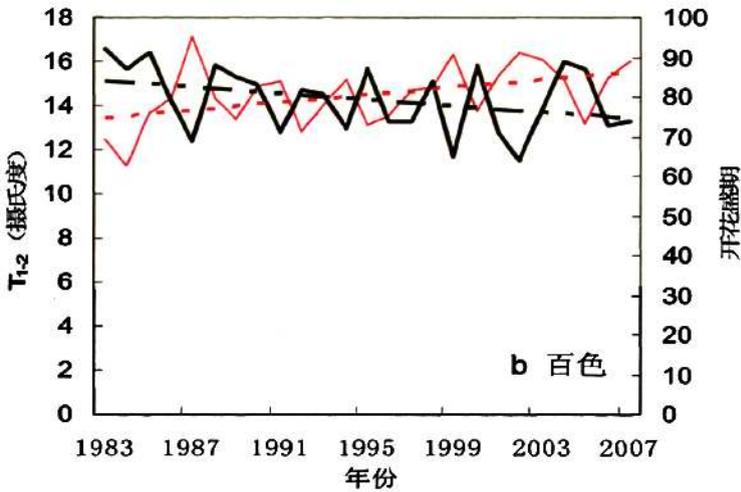
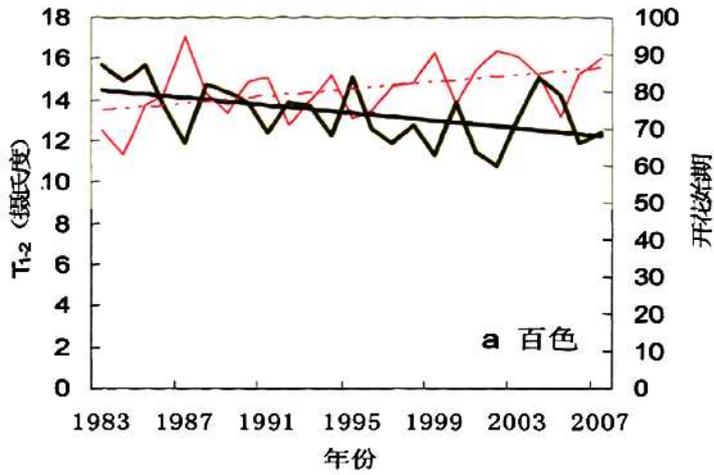


图 4-5 百色椴树花期与 1-2 月平均气温年变化  
粉红细实线是 1-2 月平均气温，黑色粗实线是花期，虚线是趋势线。

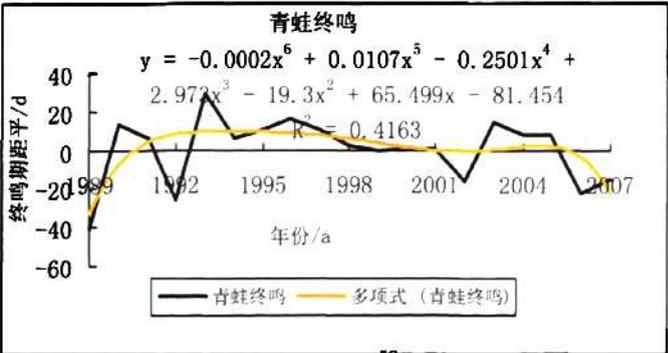
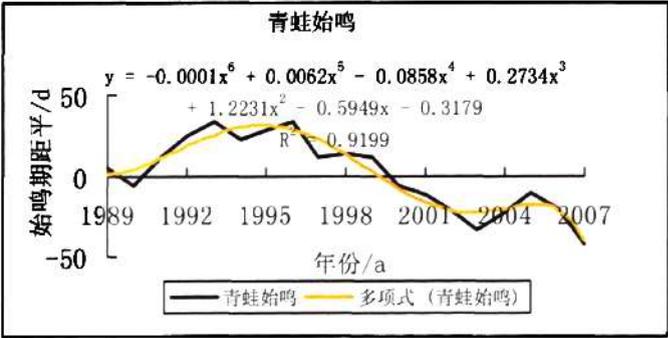
## 4. 2 气候变暖对桂北地区动物物候的影响

### 4. 2. 1 动物物候变化趋势

对 1989~2007 年青蛙、蟋蟀物候期资料统计分析表明，青蛙始鸣期最早出

现在2月13日(2007年),最晚出现在4月29日(1993、1996年),相差75天,平均出现在3月27日;终鸣期最早出现在8月29日(1989年),最晚出现在11月7日(1993年),相差70天,平均出现在10月10日;始、终鸣间隔期最短为144天(1992年),最长为244天(2003年),相差100天,平均为196天。蟋蟀始鸣期最早出现在2月8日(2003年),最晚出现在5月14日(1997年),相差95d,平均出现在3月26日;终鸣期最早出现在10月26日(2001年),最晚出现在12月12日(1991年),相差47天,平均出现在11月15日;始终鸣间隔期最短为179d(1996年),最长为280天(2003年),相差101天,平均为234天。

图4-6为1989~2007年青蛙始鸣期、终鸣期及始终鸣间隔期变化图,图4-7为1989~2007年蟋蟀始鸣期、终鸣期及始终鸣期间隔期变化图。从图4-6和图4-7可以看出,1997年之前青蛙和蟋蟀始鸣期距平基本呈增大趋势,之后呈减少趋势。而青蛙、蟋蟀终鸣期无明显突变。在2000年以前,青蛙、蟋蟀始鸣期基本处于正距平,2000年后处于负距平,而且距平绝对值呈扩大趋势。而青蛙、蟋蟀终鸣期变化不明显。青蛙、蟋蟀始终鸣间隔期在2000年以前基本处于负距平,2000年后处于正距平,而且距平绝对值也呈扩大趋势。



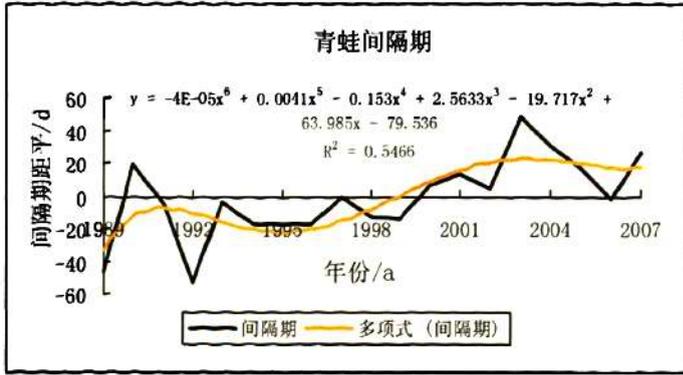


图 4-6 青蛙物候期及其间隔期距平变化趋势

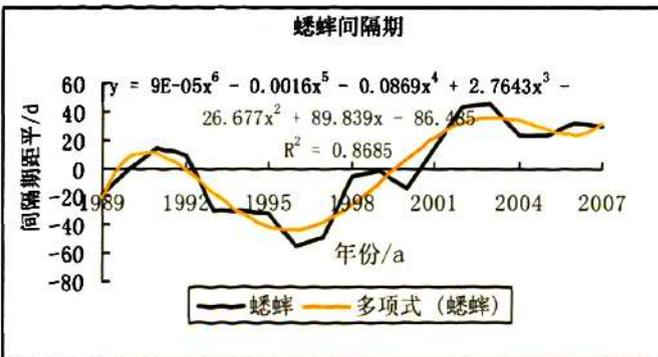
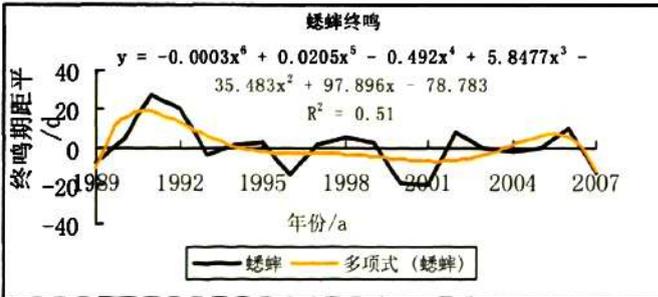
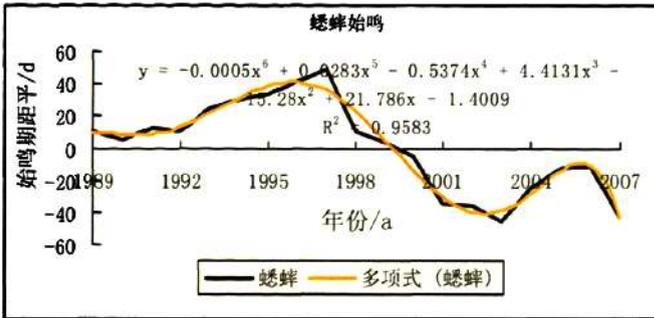


图 4-7 蟋蟀物候期及其间隔期距平变化趋势

## 4. 2. 2 气候变化特征

### 1) 平均气温变化

从图 4-8 变化曲线可以看出, 桂林雁山近 34 年来年平均气温呈峰谷波动逐渐上升趋势, 1997 年之后, 年平均气温呈持续增高趋势, 因此可把近 34 年分为 2 个时期。第 1 个时期 (1975~1996 年) 为偏冷期, 平均值 19.0℃, 低于历年平均值 0.2℃, 增温线性趋势为 0.099℃/10a; 第 2 个时期 (1997~2007 年) 为偏暖期, 平均值 19.4℃, 高于历年平均值 0.2℃, 增温线性趋势为 0.255℃/10a ( $R^2=0.5521$ ), 增温更显著。

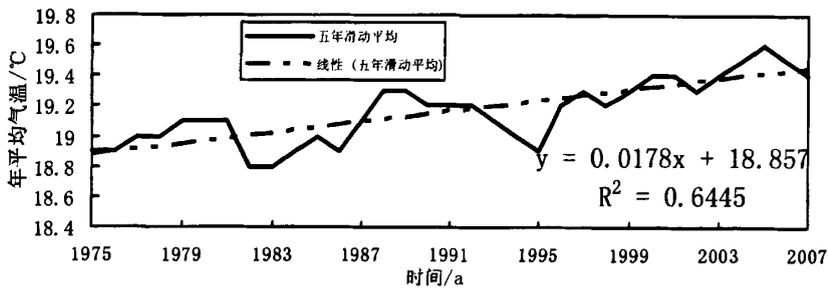
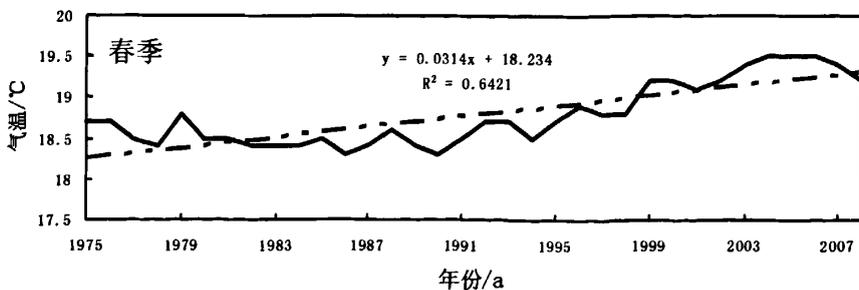


图 4-8 年平均气温变化曲线

从近 34 年来温度季节变化分析可以看出 (图 4-9), 春季增温最明显, 增温幅度达 0.314℃/10a。从春季气温变化曲线看, 雁山近 34 年春季气温遵循年平均气温变化规律, 1975~1996 年为偏冷期, 平均值为 18.5℃, 比常年偏低 0.3℃, 气候倾向率为 -0.046℃/10a, 1997 年之后为偏暖期, 平均值为 19.4℃, 比常年偏高 0.6℃, 增温线性趋势率达 0.517℃/10a ( $R^2=0.5744$ ), 增温特明显。冬季气温的变化同春季基本一样, 也有类似的规律, 近 34 年的增温率也达到 0.179℃/10a。秋季气温也呈增温趋势, 近 34 年来的气候倾向率为 0.212℃/10a。夏季气温较稳定, 近 34 年呈现弱下降趋势, 下降速率 0.047℃/10a。



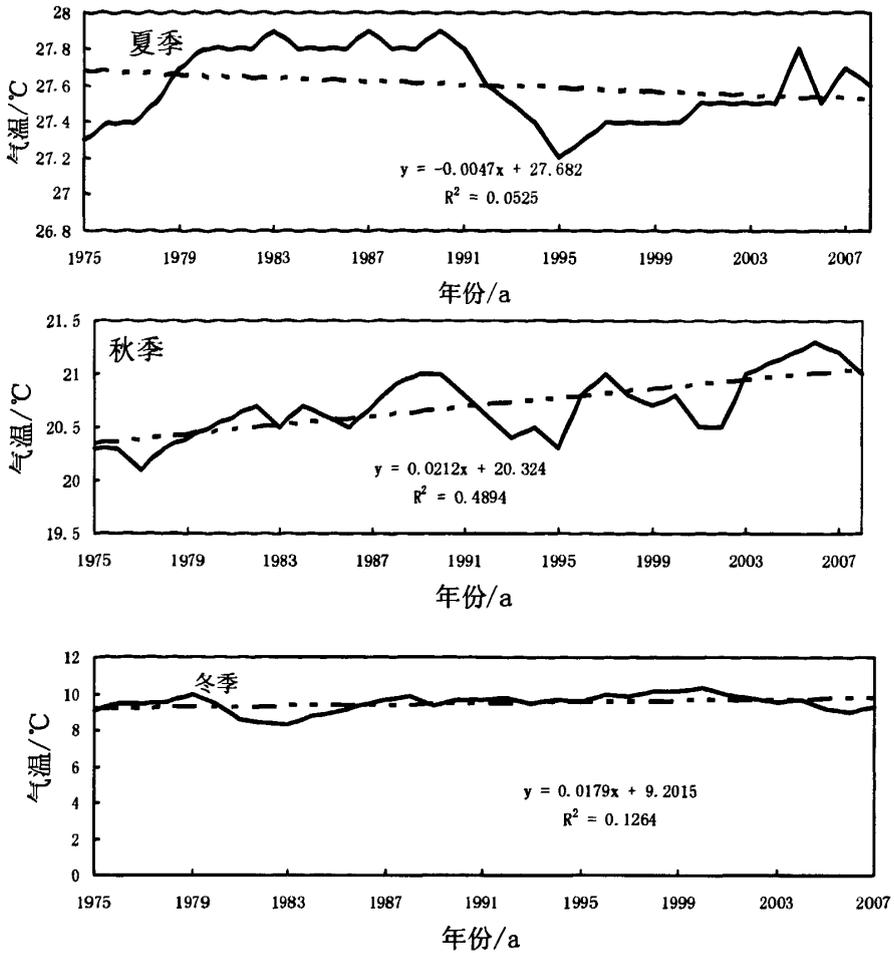


图 4-9 雁山各季平均气温变化曲线

## 2) 降水变化

从图 4-10 可以看出，桂林雁山 1975~2007 年的近 34 年来总体降水趋势平稳，变化不明显，气候倾向率为 24.623mm/10a，大致分为 2 个时期：第 1 个时期（1980~1991 年）为少雨期，第 2 个时期 1992 年至今为相对多雨期。从降水季节来看，春季和秋季降水有弱减少趋势，夏季和冬季呈弱增加趋势。

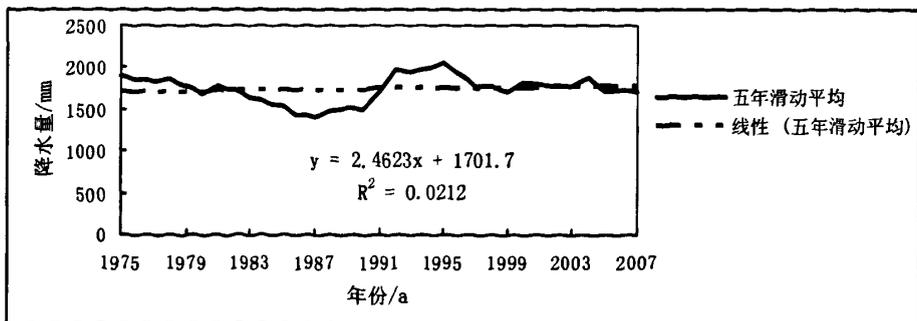


图 4-10 雁山年降水量变化曲线

#### 4. 2. 3 气候变暖对动物物候变化的影响

导致青蛙、蟋蟀物候期发生变化的原因是生态因子的变化。生态因子是指环境中对生物生长、发育、生殖、行为和分布有直接或间接作用的环境要素，可分为非生物因素如气候、土壤、地形，生物因素如植物、动物、人类活动。由于广西桂林雁山镇位于桂林市区南端，距市中心24公里，总面积96平方公里，总人口2.6万人。雁山农业气象试验站位于110° 19' E, 25° 05' N, 海拔高度为170.2m, 位于雁山镇旷野，是广西区内为数不多、持续保持建站时原有的大气观测环境的气象台站之一。因此，人类活动、土壤、地形等因素对桂北地区青蛙、蟋蟀等物候期影响不大，桂北地区青蛙、蟋蟀等物候期的变化应是动物对气候变暖响应的结果。

事实上，比较分析青蛙和蟋蟀物候期变化与同期气候变化特征，可以看出，1989~1996年处于偏冷期，春季和冬季也偏冷，使青蛙和蟋蟀始鸣期偏迟，分别比常年平均偏迟18d和24d，使青蛙和蟋蟀始终鸣间隔期偏短，分别比常年缩短17d和21d；1997年以来处于偏暖期，春季和冬季也偏暖，使青蛙和蟋蟀始鸣期提早，分别比常年平均提早12d和22d，使青蛙和蟋蟀始终鸣间隔期延长，分别比常年平均延长11d和19d。青蛙和蟋蟀物候期变化是对气候变暖的反应，这种反应还表现出一定的延迟性，从表4-1可看出，1997年气温由偏冷期突变为偏暖期的头2年，青蛙和蟋蟀始鸣期逐渐提早，到2000年开始由正常到偏早，这表明生物对环境的适应过程。青蛙是冷血动物，它的体温会受到气温的影响。随着气温的变冷，青蛙的体温也会逐渐下降，当气温下降到一定程度时，体内分泌出“防冻液”，以降低体内液体的冰点，使自己处于一种假死状态，以此来躲避严寒，等到第二年春天气温升高后再出来活动并繁殖生长。气候变暖，特别是春季变暖，一方面，青蛙冬眠结束提前，始鸣期提早，繁殖生长季延长，另一方面，气候变暖正在创造一个更适合壶菌的环境，壶菌会引起一种传染性壶菌病。在温暖的气候中壶菌生长得特别快，而壶菌引发的疾病是杀害青蛙的子弹<sup>[21]</sup>，而气候变暖则是扣动扳机的黑手。气候变暖，蟋蟀若虫在土穴中越冬时间缩短，始鸣期提前，始终鸣间隔期延长，因此生长繁殖季延长。

表 4-1 特殊年份青蛙、蟋蟀始鸣期与气温、地温对照

年份	气温/°C			10cm 地温/°C			青蛙始鸣 期 (月.日)	蟋蟀始鸣 期 (月.日)
	年均	春季	2月	2月	3月	4月		
1993	18.8	18.5	11.4	12.9	14.7	19.3	4.29	4.20
1994	19.0	19.3	9.2	10.7	13.4	21.0	4.19	4.25
1995	19.1	19.0	10.1	11.4	14.0	19.9	/	4.29
1996	18.7	17.1	9.4	10.9	13.0	16.9	4.29	5.6
1997	19.1	19.6	10.8	11.7	16.3	19.5	4.7	5.14
1998	19.9	19.6	10.9	11.9	14.2	22.6	4.10	4.5
1999	19.5	18.9	12.8	13.8	15.2	20.7	4.7	3.30
2000	18.9	18.9	8.0	9.8	14.5	19.5	3.21	3.21
2001	19.2	19.0	10.5	11.9	16.1	19.3	3.15	2.19
2002	19.4	19.5	12.7	13.7	16.1	20.6	3.6	2.18
2003	19.7	19.3	12.4	13.3	15.0	20.6	2.21	2.8
2007	19.8	19.4	15.1	15.7	15.6	19.5	2.13	2.11

对青蛙和蟋蟀物候期与气候因子的相关关系的进一步分析(表 4-2),表明,青蛙和蟋蟀始鸣期与 2~3 月均温 ( $T_{2-3}$ )、2~4 月均温 ( $T_{2-4}$ )、3 月均温 ( $T_3$ ) 及 3 月平均最高气温 ( $T_{m3}$ ) 的负相关关系显著;终鸣期与温度、降水相关关系都不显著;青蛙和蟋蟀始终鸣间隔期与 2~4 月均温 ( $T_{2-4}$ )、3 月平均最高气温 ( $T_{m3}$ ) 的正相关关系显著。说明桂北地区青蛙和蟋蟀始鸣日期和始终鸣间隔期的变化主要受当年春季气温的影响。另外,青蛙和蟋蟀始鸣期与年均温负相关显著,蟋蟀始终鸣间隔期与年均温正相关显著,说明青蛙和蟋蟀始鸣期的变化对年平均气温也有指示作用。

从表 4-2 可得出,青蛙和蟋蟀始鸣日期分别与 3 月平均最高气温( $T_{m3}$ )及 2~4 月均温 ( $T_{2-4}$ ) 负相关系数最大,说明两者分别是影响青蛙和蟋蟀始鸣日期的主导气候生态因子。青蛙和蟋蟀始终鸣间隔期分别与 3 月平均最高气温( $T_{m3}$ )及 2~4 月均温 ( $T_{2-4}$ ) 正相关系数最大,说明两者分别是影响青蛙和蟋蟀始终鸣间隔期的主导气候生态因子。

表 4-2 青蛙、蟋蟀始终鸣日期与气候要素的 Pearson 相关系数

因子	青 蛙			蟋 蟀		
	始鸣	终鸣	间隔期	始鸣	终鸣	间隔期
T <sub>1</sub>	-0.18	-0.34	-0.05	-0.01	0.05	0.06
T <sub>2</sub>	-0.39	-0.12	0.30	-0.42	0.02	0.36
T <sub>3</sub>	-0.60*	-0.02	0.59*	-0.42	0.01	0.26
T <sub>4</sub>	-0.11	-0.31	-0.24	-0.15	0.07	0.39
T <sub>5</sub>	-0.34	-0.06	0.32	0.01	0.03	0.04
T <sub>6</sub>	-0.17	-0.13	0.20	0.01	0.04	0.04
T <sub>7</sub>	-0.43	-0.18	0.44	0.01	0.05	0.06
T <sub>8</sub>	-0.04	-0.15	-0.02	0.01	0.19	0.05
T <sub>9</sub>	0.14	0.07	-0.05	0.01	0.13	0.05
T <sub>10</sub>	-0.30	-0.30	0.15	0.001	-0.19	0.05
T <sub>11</sub>	-0.06	-0.01	0.38	0.01	0.30	0.05
T <sub>12</sub>	0.37	-0.25	-0.54*	0.04	0.06	0.02
T <sub>2-3</sub>	-0.55*	-0.08	0.49*	-0.49*	0.03	0.29
T <sub>2-4</sub>	-0.57*	-0.33	0.41	-0.54*	0.05	0.55*
T <sub>13</sub>	-0.63**	0.04	0.66**	-0.53*	0.01	0.40
T <sub>12</sub>	-0.28	0.03	0.29	-0.35	0.02	0.24
T <sub>11</sub>	-0.22	-0.29	0.03	-0.16	0.04	0.06
T <sub>年</sub>	-0.62**	-0.42	0.35	-0.59*	0.04	0.70**
R <sub>年</sub>	0.31	0.18	-0.20	0.24	0.05	-0.50*
S <sub>年</sub>	-0.30	-0.10	0.23	-0.03	0.03	0.38
R <sub>1</sub>	0.13	0.37	0.12	0.30	0.00	-0.32
R <sub>2</sub>	0.08	-0.24	-0.24	0.07	0.34	0.07
R <sub>3</sub>	0.45	0.46	-0.16	0.45	-0.24	-0.43
R <sub>4</sub>	0.10	0.40	0.16	0.33	-0.44	-0.53*
R <sub>5</sub>	-0.01	0.08	0.06	-0.15	0.13	0.26
R <sub>6</sub>	0.02	-0.04	-0.11	-0.04	-0.02	0.04
R <sub>7</sub>	0.17	0.05	-0.14	0.06	0.18	0.01
R <sub>8</sub>	0.10	0.29	-0.36	0.33	-0.02	-0.41
R <sub>9</sub>	-0.16	0.25	0.32	0.30	-0.21	0.02
R <sub>10</sub>	0.03	0.08	-0.05	0.01	-0.04	-0.06
R <sub>11</sub>	-0.14	-0.12	-0.07	-0.07	0.42	0.29
R <sub>12</sub>	-0.08	-0.25	-0.07	-0.04	0.27	0.13

\*表示通过 Pearson 5%检验，\*\*表示通过 Pearson 1%检验，T 表示平均气温，T<sub>n</sub>表示平均最高气温，R 表示降雨量，S 表示日照时数，下标数字表示月份。

通过分析青蛙和蟋蟀物候期及其主导气候生态因子的关系，建立起线性相关关系。青蛙始鸣期距平 ( $B$ ) 与3月平均最高气温 ( $T_{13}$ ):  $B = -10.5663T_{13} + 184.5239$ 。

青蛙始终鸣间隔期距平 ( $J$ ) 与3月平均最高气温 ( $T_M$ ):  $J=11.1712T_M-193.3813$ 。  
 蟋蟀始鸣期距平 ( $B$ ) 与2~4月平均气温 ( $T_{2-4}$ ):  $B=-15.4107T_{2-4}+226.3253$ 。蟋蟀  
 始终鸣间隔期距平 ( $J$ ) 与2~4月平均气温 ( $T_{2-4}$ ):  $J=11.2983T_{2-4}-248.5532$ 。表  
 明在全球气候变暖的大背景下,桂北地区青蛙和蟋蟀的物候期为适应气候变暖会  
 作出生态响应。3月份平均最高气温 ( $T_M$ ) 升高1℃,青蛙的始鸣期提前约10.6d,  
 始终鸣间隔期延长约11.2d。2~4月平均气温 ( $T_{2-4}$ ) 上升1℃,蟋蟀的始鸣期提  
 前约15.4d,始终鸣间隔期延长约11.3d。

### 4.3 气候变暖对家燕物候期变化的影响

#### 4.3.1 家燕始见、绝见期的变化趋势

表 4-3 家燕平均始见、绝见期 (月.日) 及平均间隔期

站名	始见	绝见	间隔日数(d)
雁山	3.23	9.22	184

桂林市雁山区迁徙经过家燕始见期最早出现在 1993 年 3 月 7 日,最晚出现  
 在 1998 年 4 月 11 日,相差 35d,平均出现在 3 月 23 日;绝见期最早出现在 1993  
 年 8 月 15 日,最晚出现在 2002 年 10 月 28 日,相差 74d,平均出现在 9 月 22  
 日;始、绝见期间隔日数最短为 155d,最长为 240d,相差 85d,平均为 184d。  
 由图 4-11 可见,家燕始见期以约 1d/10a 的速率提早,绝见期以 21d/10a 的速率  
 推迟,而间隔日数以 22d/10a 的速率延长。

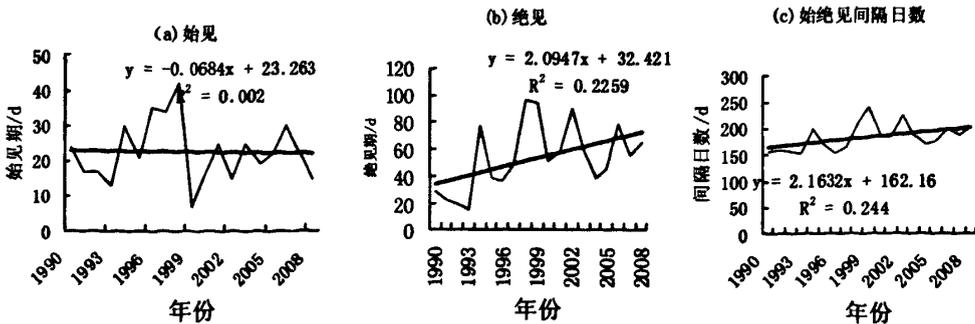


图 4-11 家燕始见、绝见期及间隔期变化趋势

#### 4. 3. 2 家燕始见、绝见期的年际波动特征

本文采用下列标准来确定家燕物候期年际波动特征是否异常：

$$|X_i - \bar{X}| \geq S_i \text{ 或 } |X_i - \bar{X}| < S_i \quad (4-1)$$

式中， $X_i$ 表示某年家燕始绝见日期， $\bar{X}$ 是家燕多年平均始绝见日期， $S_i$ 表示家燕始绝见日期的标准差。如果 $|X_i - \bar{X}| = 0$ ，说明该年家燕始、绝见期没有波动。当 $|X_i - \bar{X}| < S_i$ 时，表示该年家燕始绝见期属于正常年型，其中 $-S_i < (X - \bar{X}) < 0$ 表示该年家燕始绝见期正常偏早， $0 < (X - \bar{X}) < S_i$ 表示该年家燕始绝见期正常偏晚。当 $|X_i - \bar{X}| \geq S_i$ 时，表示该年家燕始绝见期属于异常年型，其中 $(X - \bar{X}) < -S_i$ 表示该年家燕始绝见期异常偏早， $(X - \bar{X}) \geq S_i$ 表示家燕始绝见期异常偏晚。

运用以上判据对家燕始绝见期迟早年型进行划分（表4-4）。从表4-4可以得出，桂林雁山区1990—2008年家燕始绝见期呈同步变化即同步提前或同步推迟的年份有1991，1992，1993，1994，1995，1998，2000，2001，2003，2004和2006年共11a，占有年份的57.9%，说明家燕始见期提前的年份，家燕绝见期也同步提前的可能性较大，反之亦然。

但是值得关注的是少数年份出现了家燕始绝见日期波动明显不同步，其中家燕始见期提前而绝见期推迟的年份有1999，2002，2008年，占15.7%，这些年份家燕始绝见间隔日数明显延长；家燕始见期推迟而绝见期提前的年份有1990，1996，1997年，占15.7%，这些年份家燕始绝见间隔日数明显缩短。

表 4-4 家燕始、绝见期迟早年

	始见	包含年份	绝见	包含年份
家燕	正常偏早	1991, 1992, 1995, 2000, 2002, 2004, 2008	正常偏早	1995, 1996, 1997, 2000
	正常偏晚	1990, 1994, 2001, 2003, 2006	正常偏晚	1994, 2001, 2003, 2007, 2008
	异常偏早	1993, 1999	异常偏早	1990, 1991, 1992, 1993, 2004, 2005
	异常偏晚	1996, 1997, 1998	异常偏晚	1998, 1999, 2002, 2006
	无变化	2005, 2007	无变化	

#### 4. 3. 3. 影响家燕始见、绝见期变化的气候因子

通过对桂林市雁山区家燕始、绝见期及间隔日数与上年 10 月至当年 8 月各月气候因子相关性分析, 可以看出各因子的影响程度明显不同(统计表略), 限于篇幅, 表 4-5 仅列出通过 0.1 水平显著性检验的因子。从表 4-5 看出, 降水量、日照时数与家燕始见期的相关性不显著, 气温与家燕绝见期相关性不显著, 间隔日数与降水量、日照时数相关性不显著。

1 月份平均最高气温对家燕始见期变化有一定影响, 呈负相关, 6 月份降水量与家燕绝见期呈显著正相关关系, 5 月份日照与家燕绝见期呈正相关关系, 6 月份降水与间隔日数呈正相关关系。

表 4-5 家燕始、绝见期及间隔期与气候要素的 Pearson 相关系数

	1 月平均最高气温	6 月降水量	5 月日照时数
始见期	-0.40		
绝见期		0.50*	0.43
间隔日数		0.45	

注: \*表示通过 0.05 水平的显著性检验

#### 4. 3. 4. 主要气候因子的变化及其影响

综合表 4-5 和表 4-6 可见, 影响家燕始见期的主要气象条件为 1 月平均最高气温, 历年 1 月平均最高气温在 7.1~17℃, 平均为 12.2℃。相关分析显示, 1 月份平均最高气温升高 1℃, 家燕始见期提前约 1.3d。

表 4-6 家燕始、绝见期及间隔期对主要气候因子的相关方程

	气温	降水量	日照时数
始见期	$Y = -1.35T_m + 38.79$		
绝见期		$Y = 0.08R_6 + 23.60$	$Y = 0.40H_5 + 10.70$
间隔日数		$Y = 0.07R_6 + 157.04$	

影响家燕绝见期的主要气象条件为 6 月份降水量、5 月份日照时数。历年 6

月份降水量在 134.9~735mm，平均为 392.6mm，且以 87.3mm/10a 速率增加，这种变化趋势会使家燕绝见期推迟，进一步相关分析显示，当 6 月份降水量增多 10mm，家燕绝见期推迟约 0.8d。历年 5 月份日照时数在 47.7~155.1h，平均为 105.8h，且以 16.6h/10a 速率增加，而相关分析显示，当 5 月份日照时数增加 10h，家燕绝见期推迟约 4d。6 月份降水量增多 10mm，5 月份日照时数增加 10h，两者共同影响，会使家燕绝见期推迟约 4.8d。

影响家燕始绝见期间隔日数的主要气象条件为 6 月份降水量。相关分析显示，当 6 月份降水量增多 10mm，家燕始绝见期间隔日数延长约 0.7d。

#### 4. 4 气候变暖对农作物物候期变化的影响

##### 4. 4. 1 广西南宁、桂林气候变化基本特征

图 4-12 是南宁年平均气温和生长季平均气温变化趋势图，图 4-13 是桂林生长季平均气温变化趋势图。

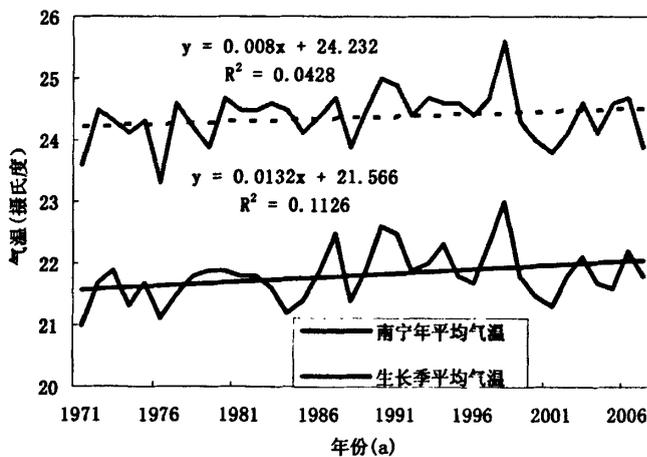


图 4-12 南宁年平均气温和生长季平均气温变化趋势图

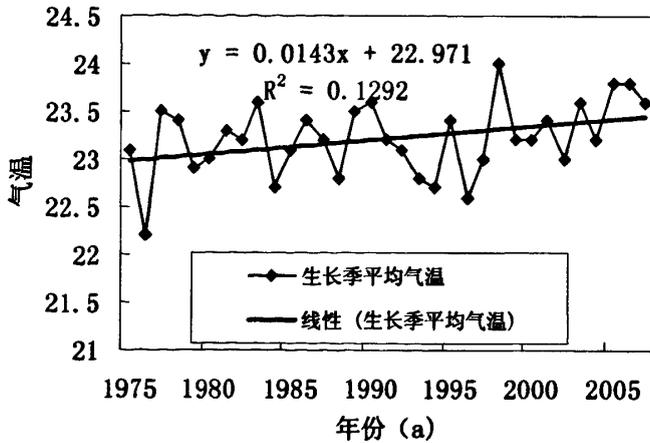


图 4-13 桂林生长季（3-10 月）平均气温变化趋势图

由图 4-12 和图 4-13 可知，近 40 年来，南宁、桂林两地年平均气温呈上升趋势，南宁年平均气温变化倾向率为  $0.132^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，生长季平均气温变化倾向率为  $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ；桂林年平均气温变化倾向率为  $0.178^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，生长季平均气温变化倾向率为  $0.143^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ；据统计，桂林地区生长季期间  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温变化倾向率为  $34.89^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，南宁地区生长季期间  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温变化倾向率为  $21.96^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

分析表明，南宁、桂林两地区近 40 年来年平均气温是上升的，生长季平均气温也是上升的，生长季期间  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温是增加的。

据统计，1971—2000 年南宁年平均降水量  $1309.7\text{mm}$ ，其中生长季平均降水量为  $1249\text{mm}$ ；桂林雁山年平均降水量为  $1761.5\text{mm}$ ，其中生长季平均降水量为  $1551\text{mm}$ ，近 30 年来降水变化趋势平稳，变化不明显，气候倾向率为  $24.6\text{mm}/10\text{a}$ 。

#### 4. 4. 2 气候变暖对广西水稻物候期的影响

由表 4-7 可知，与 20 世纪 80 年代比较，21 世纪广西两代表区南宁、桂林的早稻全生育期提前了 3-6 天，播种期提前了 6-10 天，出苗期提前了 6-10 天，成熟期提前了 4-10 天；对晚稻而言，南宁地区晚稻全生育期提前了 2 天，桂林地区晚稻全生育期推迟了 1 天，南宁、桂林的晚稻播种期推迟了 5-8 天，出苗期

推迟了 4-9 天，成熟期推迟了 6 天。

表 4-7 21 世纪（2000—2007 年）与 20 世纪 80 年代末相比的水稻发育期变化

	桂林						南宁					
	早稻			晚稻			早稻			晚稻		
	80 年代	21 世纪	差异									
	(日/月)	(日/月)	d									
播种期	2/4	28/3	5	4/7	9/7	-5	10/3	3/3	7	10/7	18/7	-8
出苗期	10/4	31/3	10	6/7	10/7	-4	13/3	7/3	6	12/7	21/7	-9
成熟期	23/7	19/7	4	21/10	27/10	-6	20/7	10/7	10	8/11	14/11	-6
生育期 (d)	119	113	6	109	110	-1	132	129	3	121	119	2

表 4-8 列出了南宁、桂林早稻各发育期变化倾向率，由表 4-8 可知，南宁、桂林早稻各发育期变化倾向率均为负值，说明两地早稻各发育期均为提前趋势。

表 4-8 南宁、桂林早稻各发育期变化倾向率

倾向率	播种期	出苗期	三叶期	移栽期	拔节期	抽穗期	成熟期
	倾向率 (d/10a)						
区域							
南宁	-4.777	-4.727	-2.325	-9.492	-5.02	-3.851	-4.958
桂林	-0.384	-3.845	-1.999	-9.097	-8.82	-7.109	-5.946

在南宁，每 10 年早稻播种期、出苗期提前 4.7 天，三叶期提前 2 天，移栽期提前 9 天，拔节期提前 5 天，抽穗期提前 4 天，成熟期提前 5 天；在桂林，每 10 年早稻播种期稳定，出苗期提前 4 天，三叶期提前 2 天，移栽期提前 9 天，拔节期提前 9 天，抽穗期提前 7 天，成熟期提前 6 天。这主要是气候变暖背景下南宁、桂林两地生长季气温上升， $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温增加所致。

表 4-9 列出了南宁、桂林晚稻各发育期变化倾向率，由表 4-9 可知，南宁、桂林晚稻各发育期变化倾向率为正值（桂林移栽期例外），说明两地晚稻各发育期均为推迟趋势。

在南宁，每 10 年晚稻播种期、出苗期推迟 11 天，三叶期推迟到 12 天，移

栽期推迟 1 天，拔节期推迟 2 天，抽穗期稳定，成熟期推迟 1 天；在桂林，每 10 年晚稻播种期、出苗期推迟 6 天，三叶期推迟 2 天，移栽期提前 9 天，拔节

表 4-9 南宁、桂林晚早稻各发育期变化倾向率

倾向率 区域	播种期	出苗期	三叶期	移栽期	拔节期	抽穗期	成熟期
	倾向率 (d/10a)						
南宁	10.949	11.68	11.739	0.573	2.253	0.247	1.235
桂林	5.573	5.603	6.551	-1.571	3.014	4.852	4.229

期推迟 3 天，抽穗期推迟 5 天，成熟期推迟 4 天。

这主要是气候变暖背景下南宁、桂林两地生长季气温上升， $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温增加，影响晚稻生产的主要气象灾害寒露风出现呈推迟趋势。

#### 4. 5 小结

本章在前一章的基础上，利用广西 1971—2007 年的气象资料和 1981—2007 年的物候资料，运用统计学方法，进一步分析了全球变暖背景下，广西区域气候变暖对广西物候变化的影响，主要研究结果有以下几点：

- 1、椴树开花前 2 个月的平均气温是影响椴树花期早晚的关键气候因子。
- 2、1981—2007 年间，南宁、百色 1-2 月份平均气温的升高，导致椴树花期提前，10 年提前约 4~5 天。
- 3、1983—2007 年间，桂林 2-3 月份平均气温的升高，引起椴树花期提前，10 年提前约 6~7 天。
- 4、桂林近 10 年来青蛙和蟋蟀始鸣期提前，终鸣期稳定，始终鸣间隔期显著延长。
- 5、近 34 年来桂林降水变化平缓，气温呈上升趋势，年平均气温气候倾向率为  $0.178^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，特别是近 10 年来增温特明显，增温线性趋势率达  $0.255^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。在增温过程中，春季增温对增暖贡献最大，增温率为  $0.314^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，尤其 1997

年以来增温特明显，增温线性趋势率达  $0.517^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。冬季气温的变化也有类似春季的变化规律，近 34 年的气候倾向率也达  $0.179^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

6、动物物候变化是动物对气候变暖响应的结果。桂林雁山 1989~1996 年属于偏冷期，青蛙和蟋蟀始鸣期分别比常年平均偏迟 18 天和 24 天，始终鸣间隔期分别比常年缩短 17 天和 21 天；1997 年以来偏暖期，青蛙和蟋蟀始鸣期分别比常年平均提早 12 天和 22 天，始终鸣间隔期分别比常年平均延长 11 天和 19 天。

7、3 月平均最高气温 ( $T_{\text{m}}$ ) 和 2~4 月均温 ( $T_{2-4}$ ) 分别是青蛙和蟋蟀始鸣日期及始终鸣间隔期的主导气候生态因子。3 月份平均最高气温 ( $T_{\text{m}}$ ) 升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，青蛙的始鸣期提前约 10.6 天，始终鸣间隔期延长约 11.2 天。2~4 月平均气温 ( $T_{2-4}$ ) 上升  $1^{\circ}\text{C}$ ，蟋蟀的始鸣期提前约 15.4 天，始终鸣间隔期延长约 11.3 天。

8、气候变暖一方面延长了青蛙的生长繁殖季，但另一方面却又营造了更适合壶菌的生存环境，两者的综合作用对青蛙种群的生存发展是利还是弊呢？有待进一步研究。对昆虫蟋蟀而言，气候变暖也延长了其生长繁殖季，有利于蟋蟀的生长发育。因此，气候变暖对农作物病虫害的防治可能带来更大的挑战，相关部门必须做好相应的管理对策，合理调整种植结构，加强病虫害防治，促进粮食等主要农作物持续稳定增产。

9、桂林家燕始见期稳定，而绝见期有明显推迟的趋势，以  $21\text{d}/10\text{a}$  的速率推迟，从而使家燕始见和绝见期间隔期以  $22\text{d}/10\text{a}$  的速率显著延长。

10、对家燕始见、绝见期年际波动的分析表明多数年份家燕始见期提前的年份，家燕绝见期也同步提前，反之亦然。但是值得关注的是少数年份家燕始见期和绝见期波动明显不同步，约有 15.7% 的年份家燕始见期提前而绝见期推迟，始见和绝见期间隔日数明显延长；而另有 15.7% 的年份家燕始见期推迟而绝见期提前，始见和绝见期间隔日数明显缩短。

11、影响家燕始见期的主要气象条件为 1 月平均最高气温，呈负相关，1 月份平均最高气温升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，家燕始见期提前约 1.3 天。6 月份降水量是影响家燕绝见期和家燕始见和绝见期间隔日数的主要气象条件，6 月份降水量增多 10mm，家燕绝见期推迟约 4.8 天，家燕始见和绝见期间隔日数延长约 0.7 天。

12、近 40 年来，南宁、桂林两地年平均气温和生长季平均气温均呈上升趋势，南宁和桂林年平均气温变化倾向率分别为  $0.132^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.178^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，生

长季平均气温变化倾向率分别为  $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.143^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，南宁生长季期间  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温变化倾向率为  $21.96^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，桂林生长季期间  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温变化倾向率为  $34.89^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

气候变暖导致南宁早稻各发育期每 10 年提前 2—9 天，导致桂林早稻各发育期每 10 年提前 0—9 天。气候变暖导致南宁晚稻各发育期每 10 年推迟 1—12 天，导致桂林晚稻各发育期每 10 年推迟 2—6 天。

## 第五章 结语

本文使用 1981-2008 年广西农业气象观测站网所观测的物候资料和当地气象资料,分析研究了 1981-2008 年间广西植物、农作物和动物物候期变化的基本特征,深入分析了气候变暖对广西物候变化的影响,得到了以下几点主要结论:

### 5.1 气候变暖对广西楝树物候期变化的影响

1、广西楝树春季物候期与秋季物候期异步。春季物候期出现早的地区,秋季物候期出现迟,春季物候期出现迟的地区,秋季物候期出现早。纬度每向北增加  $1^{\circ}$ ,春季物候期推迟 5~7 天。海拔高度每上升 100 米,秋季物候期提前 3~5 天。

2、全球变暖背景下,广西区域气候也呈增暖趋势,广西楝树芽开放期、展叶始期、开花始期、开花盛期年际变化是同步的,广西大部分地区楝树芽开放期、展叶始期、开花始期和开花盛期呈提前趋势,芽开放期和展叶始期 10 年提前 0~21 天,开花始期和开花盛期 10 年提前 0~18 天。广西楝树秋季叶完全变色期和落叶末期的年际变化是基本同步的,桂南的天等、平果、都安、宜州和融安一带,桂东到桂南,楝树叶完全变色期和落叶末期呈现提前趋势,10 年提前 0~30 天,其它地区呈推迟趋势,10 年推迟 0~45 天。

3、进一步对广西楝树花期的研究表明,开花前 2 个月的平均气温是影响广西楝树花期早晚的关键气候因子。1981-2007 年间,南宁、百色 1-2 月份平均气温的升高,导致楝树花期提前,10 年提前 4~5 天,1983-2007 年间,桂林 2-3 月份平均气温的升高,引起楝树花期提前,10 年提前 6~7 天。

### 5.2 气候变暖对广西农作物物候期变化的影响

1、广西早稻出苗期、三叶期和拔节期自西南向东北逐渐推迟，桂东南、桂南和桂西较早，桂北较迟，而抽穗期、成熟期则自东南向西北逐渐推迟，桂东南和桂南较早，桂北、桂西较迟。纬度每向北增加 $1^{\circ}$ ，早稻发育期推迟4~5天。海拔高度每上升100米，早稻抽穗期、成熟期推迟4~5天。广西晚稻各发育期是基本同步的，各发育期自北向南逐渐推迟，桂北较早，桂南较迟。纬度每向北增加 $1^{\circ}$ ，广西晚稻各发育期均提前，移栽期提前2天，抽穗期提前5天，播种、出苗、三叶、拔节和成熟期均提前4天。

2、广西区域气候变暖情况下，广西大部分地区早稻发育期呈现出提前趋势，出苗期10年提前0~10天，三叶期10年提前0~8天，拔节期10年提前0~9天，抽穗期10年提前0~8天，成熟期10年提前0~6天。广西绝大部分地区晚稻发育期呈现出推迟趋势，出苗期、三叶期10年推迟0~12天，拔节期10年推迟0~4天，抽穗期10年推迟0~12天，成熟期10年推迟0~5天。

3、近40年来，南宁、桂林两地年平均气温和生长季平均气温均呈上升趋势，南宁和桂林生长季平均气温变化倾向率分别为 $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.143^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，南宁生长季期间 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温变化倾向率为 $21.96^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，桂林生长季期间 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温变化倾向率为 $34.89^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。气候变暖导致南宁早稻各发育期每10年提前2~9天，导致桂林早稻各发育期每10年提前0~9天。气候变暖导致南宁晚稻各发育期每10年推迟1~12天，导致桂林晚稻各发育期每10年推迟2~6天。

### 5.3 气候变暖对桂北地区动物物候变化的影响

1、近34年来桂林雁山年平均气温呈上升趋势，其中春季增温对增暖贡献最大，增温率为 $0.314^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。3月平均最高气温( $T_{\text{M}}$ )和2~4月平均气温( $T_{2-4}$ )分别是影响青蛙和蟋蟀始鸣期的主导气候生态因子。3月份平均最高气温( $T_{\text{M}}$ )升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，青蛙的始鸣期提前10.6d。2~4月平均气温( $T_{2-4}$ )上升 $1^{\circ}\text{C}$ ，蟋蟀的始鸣期提前约15.4d。

2、桂林雁山家燕始见期稳定，绝见期以 $21\text{d}/10\text{a}$ 的速率推迟。影响家燕始见期的主要气象因子为1月平均最高气温，1月份平均最高气温升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，家燕

始见期提前约 1.3d。6 月份降水量是影响家燕绝见期的主要气象因子，6 月份降水量增多 10mm，家燕绝见期推迟约 4.8d。

#### 5. 4 不足之处

由于全区统一观测的物种较少，时间序列也不长，因此论文选取的研究对象较少，主要分析了几个站点的气象要素场与动植物物候期的关系，能够从一定程度上反应广西地区的动植物物候期的分布特点。但是广西全省各地各物候期的分布其实并不完全一致，可进一步对全区进行一个系统的分析，以获得更为完整的分布特点。动植物生长的影响因素很多，论文还未考虑更复杂的生长因子和气候变化的影响关系。另外，论文对于物候期预测模型的建立还有待进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report[EB/OL]. (2007-08—28)[2008-04-01]
- [4] Running and Hunt. Generalization of a forest ecosystem process model For other biomes BIOME-BGC and an application for global-scale models. 1993, 141-158
- [5] Sellers, Bounoua, Collatz et al. comparison of radiative and physiological effects of double atmospheric CO<sub>2</sub> on climate. science, 1996, 271:1402-1406
- [6] Myneni, Keeling, Tucker et al. Increase plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. Nature, 1997, 386:698-702
- [7] Schwartz and Reed. Surface phenology and satellite sensor-derived onset of greenness: An initial comparison. International Journal of Remote Sensing. 1999, 20(17):3451-3457
- [8] Snyder, Spano, Duce et al. Temperature data for phenological models. Int. J. Biometeorol, 2001, 45:178-183
- [9] Richard, Spano. Temperature data for phenological models. Int. J. Biometeorol, 2001, 45:178-183
- [10] Ahas, Jaagus, Aasa. The phenological calendar of Estonia and its Correlation with mean air temperature. Int. J. Biometeorol, 2000, 44: 159:166
- [11] Frank et al. Response of tree phenology to climate change across Europe. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108:101-112
- [12] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年. 甘肃民勤荒漠区18种乔木物候与气温的关系.

植物生态学报, 2009, 33(2):311-319

- [13] 农业气象学. 南京气象学院农业气象系编.
- [14] 张福春, 物候. 北京:气象出版社, 1985.
- [15] 吴瑞芬, 霍治国, 曹艳芳等. 内蒙古典型草本植物春季物候变化及其对气候变暖的响应. 生态学杂志, 2009, 28(8):1470-1474
- [16] Fitter AH, Fitter RSR, Harris ITB. Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central England. *Funct Ecol*, 1995, 9:55-60
- [17] Sparks TH, Jeffree EP, Jeffree CE. An examination of the relationship Between flowering times and temperature at the national scale using Long-term phenological records from the UK. *Int. J. Biometeorol*, 2000, 44:82-87
- [18] Walkovszky A. Changes in phenology of the Locust tree in Hungary. *Int. J. Biometeorol*, 1998, 41. 155-160
- [19] 冯颖竹, 梁红等. 广东省南雄、和平银杏的物候特征及其与气候因子的关系. 植物资料与环境, 1999, 8(3):34-38
- [20] 张秀英, 胡东燕. 桃花花期预报的探讨. 北京林业大学学报, 1995, 17(4):88-92
- [21] 张福春. 北京春季的树木物候与气象因子的统计分析. 地理研究, 1983, 2(2):55-64
- [22] Zhang Xinbo, Ren Jianru, Zhang Daner. Phenological observations on *Larix principis-rupprechtii* Mayr In primary seed orchard. *Journal of Forestry Research*, 2001, 12(3):201-204
- [23] 谢寿昌等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林主要树种的物候研究, 生态学报, 1997, 17(1):51-60
- [24] Kramer K, Leinonen I, Loustau D. The importance of phenology for the Evaluation of impact of climate change on growth of boreal temperature and Mediterranean forests ecosystems:an overview. *Int. J. Biometeorol*, 2000, 44:67-75

- [25] Hakkinen R, Linkosalo T, Hari P. Effect of dormancy and environmental factors on timing of bud burst in *Betula pendula*. *Tree physiol*, 1998, 18:707-712
- [26] Cavender-Bares J, Ports M, Zacharias E. Consequences of CO<sub>2</sub> and light Interactions for leaf phenology, growth and senescence in *Quercus rubra*. *Glob Chang Biol*, 2000, 6(8):877-887
- [27] Alison Donnelly, et al. Response of birds to climatic variability; evidence from the western fringe of Europe. *Int J Biometeorol*, 2009, 53:211 - 220
- [28] 李世忠, 唐欣 桂北地区蟋蟀物候对气候变暖的响应. *安徽农业科学*, 2009, 37 (17): 8017-8019
- [29] 韩小梅, 申双和, 刘荣花. 气候变暖对河南省蚱蝉始鸣期的影响. *气候变化研究进展*, 2008, 4 (6) : 342-346
- [30] 叶笃正. 当代气候研究. 北京:气象出版社, 1991.
- [31] 叶笃正, 符宗斌. 人类活动与生存环境. *地球科学进展*, 2001, 16 (4) : 453-460
- [32] 叶笃正, 符宗斌. 全球变化和我国未来的生存环境. 中国十大基础科学研究-攀登计划首批项目. 上海科学技术出版社, 1995.
- [33] 叶笃正, 吕建华. 对全球变化影响的适应和可持续发展. *中国科学院院刊*, 2000, (3) : 183-187
- [34] 符宗斌. 全球变化的区域响应和适应. *气象学报*, 2003, 61 (2) : 245-250
- [35] 王绍武. 近百年全球气候变暖的分析. *大气科学*, 1995, 19 (5) : 545-553
- [36] 李巧萍, 丁一汇. 气候变化的检测与成因. *气候变化通讯*, 2004, 3 (2) : 21-23
- [37] 姜允迪, 叶笃正, 董文杰. 从季节角度看中国区域气候变化. *气候变化通讯*, 2004, 3 (2) : 8-9
- [38] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候增暖对我国近40年植物物候变化的影响. *科学通报*, 2002, 47 (20) : 1582-1587
- [39] 徐文铎, 何兴元, 陈玮等. 近40年沈阳城市森林春季物候与全球气候变暖的

- 关系. 生态学杂志, 2008, 27 (9) : 1461-1468
- [40] 丁一汇. 气候变化对生态系统和农业的影响. 气象, 1989, 15(4) :3-8
- [41] 王植, 刘世荣. 全球环境变化对植物物候的影响. 沈阳农业大学报(社会科学版), 2007-06, 9(3) :350-353
- [42] 纪瑞鹏, 陈鹏狮, 张玉书等. 气候变化对辽宁农业的影响和减轻自然灾害的对策建议. 环境保护与循环经济, 2009, 52-54
- [43] 祁如英, 王启兰, 申红艳. 青海草本植物物候期变化与气象条件分析. 气象科技, 2006, 34(3) :306-310
- [44] 李荣平, 周广胜, 郭春明等. 1981-2005年中国东北榆树物候变化特征及模拟研究. 气象与环境学报, 2008, 24(5) :20-24
- [45] 陈效述, 韩建伟. 我国东部温带植物群落的季相及其时空变化特征. 植物生态学报, 2008, 32(2) :336-346
- [46] 马鹏里, 郭江勇. 气候变暖对西峰黄土高原物候期的影响. 干旱区研究, 2007, 24(5) :675-678
- [47] 蒲金涌, 姚小英, 姚晓红等. 气候变暖对甘肃黄土高原苹果物候期及生长的影响. 中国农业气象, 2008, 29(2) :181-183
- [48] 郑景云, 葛全胜, 赵会霞. 近40年中国植物物候对气候变化的响应. 中国农业气象, 2003, 24(1) :28-32
- [49] 张学霞, 葛全胜, 郑景云等. 近150年北京春季物候对气候变化的响应. 中国农业气象, 2005, 26(3) :262-267
- [50] 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 气候变化对植物物候影响的研究进展. 资源科学, 2004, 26(1) :129-136
- [51] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候增暖对我国近40年植物物候变化的影响. 科学通报, 2002, 47(20) :1582-1587
- [52] 李荣平, 周广胜, 刘景利等. 基于水热因子的玉米物候模拟. 气象与环境学报, 2009, 25(3) :19-23
- [53] 李荣平, 周广胜, 张慧玲. 植物物候研究进展. 应用生态学报, 2006, 17(3) : 541:544
- [54] Schwartz. Advancing to full bloom:planning phonological research

- For the 21st century. *Int. J. Biometeorol*, 1999, 42:113-118
- [55] Beaubien and Freeland. Spring phenology trends in Alberta. Canada: Links to ocean temperature. *Int. J. Biometeorol*, 2000, 44:53-59
- [56] Schwartz, Reiter. Changes in North American spring. *International Journal of climatology*, 2000, 20(8):929-932
- [57] Wielgolaski, Klaveness. Norwegian plant phenology. a brief review of Historical data and a comparison of some mean first flowering dates For this and last century. *International Journal of Biometeorology*, 1997, 14(2):208-213
- [58] Ahas. Long-term phyto-ornitho-and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *Int. J. Biometeorol*, 1999, 44:119-123
- [59] Fitter. Relationship between first flowering date and temperature In the flora of a locality in central England. *Journal of Ecology*, 1995, 9: 55-60
- [60] Sparks, Carey. The responses of species to climate over two centuries : an analysis of the marsham phenological record. 1736-1947. *Journal of Ecology*, 1995, 83:321-329
- [61] Sparks, Carey. First leafing dates of trees in Surrey between 1947 and 1996. *Lond. Nat*, 1997, 76:15-20

## 获得成果目录清单

(攻读硕士学位期间发表的论文)

### 第 1 作者核心刊物 4 篇:

1. 李世忠, 唐欣. 桂北地区蟋蟀物候对气候变暖的响应. 安徽农业科学, 2009, 37 (17): 8017—8019, 8041.
2. 李世忠, 唐欣. 桂林优质梨生产的气象条件分析. 安徽农业科学, 2009, 37(18): 8435-8437.
3. 李世忠, 唐伍斌, 唐欣. 气候条件对家燕物候期变化的影响. 安徽农业科学, 2009, 37 (18): 8531-8532, 8640.

## 致 谢

本文是在李江南导师的认真指导和严格要求下独立完成的。从论文的选题到写作无不体现了导师的点拨和指导。在此，谨向李江南老师致以诚挚的谢意！

李江南老师科学严谨的治学态度、慎密的思维能力、敏锐的洞察力以及谦虚和蔼的为人风格，给了我深刻的印象，对我今后的学习、科研和为人做事产生了积极的影响。

感谢中山大学环境科学与工程学院简茂球教授、温之平教授、林文实副教授、王宝民博士和王同美博士等老师给我提出了宝贵的意见和建议。

感谢中山大学 2005 级研究生班全体同学的帮助和支持！

感谢父母的关心，妻子的支持和鼓励，是他们的支持才使我顺利地完成了学业。