



华夏英才基金学术文库

于强 等 编著

# 农田生态过程与模型



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

于 强 等 编

# 我国生态过程与模型



华夏英才基金学术文库

# 农田生态过程与模型

于 强 等 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是作者多年科学研究的总结,它概括地反映了作者在地理学、生态学及气象学研究领域的研究方法和学术思想。其内容主要包括作物生理生态、农田微气象、土壤-植物-大气系统水热传输与二氧化碳通量、作物生长与环境因子的关系、农田生态过程与模型五个部分。本书系统地介绍了农田生态过程与模型的开发与应用,包括农田辐射平衡、水热通量、农田碳氮循环、小气候要素特征以及叶片光合、蒸腾、气孔导度和水分、养分的传输等。

本书适用于农业生态学、作物生理生态等方面的专业人员以及相关专业的研究生、教师参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

农田生态过程与模型/于强等编著. —北京:科学出版社, 2007  
(华夏英才基金学术文库)  
ISBN 978-7-03-015598-6

I. 农… II. 于… III. 农田-生态-模型 IV. S181

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第051669号

责任编辑:李悦 / 责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年1月第一次印刷 印张:26 插页:4

印数:1—1 500 字数:510 000

定价:65.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

# 序 言

现代科学研究中,过程模拟和模型研究有助于学科本质属性的阐发和理论建树的深化,并为达到应用目标构建桥梁,因而受到广泛重视。农田生态学是应用基础学科,其进行联系生理生态及环境因素的具有物理学基础的数理解析,是一项具有相当难度的多学科前沿性探索。

该书以农作物及其环境因素交互作用为研究对象,系统地研究了气孔-叶片-冠层以及区域尺度的作物蒸散与光合生产力,同时对于气孔行为的内源与外源节律的控制,光合与蒸腾作用的耦合,作物生产潜力与环境因素的关系,SPAC系统与界面物质能量传输,逆境胁迫特别是水分胁迫下作物生理生态响应及其缓解等问题,均有精深研究。

气孔运动与环境因素作用机制是这类研究肇始的首要科学问题。作者概括了具有生理机制的 Ball-Berry 气孔模型和 Jarvis 气孔模型的特点,构建了从环境变量直接计算气孔导度的方法。提出了光合作用的光抑制模型,并与光合-蒸腾作用-气孔导度的耦合模型结合,对光合作用“午睡”现象进行系统分析。该书还研究了田间条件下华北平原冬小麦光合作用和气孔导度与太阳辐射、CO<sub>2</sub>、温度、土壤水分和水汽压差(VPD)的函数关系。作者的这些方法已经被美国农业部农业研究局(USDA-ARS)的综合性农业系统模型(Root Zone Water Quality Model 和 Simultaneous Heat and Water)采用。

区域尺度上作物种植系统的水分散失和作物生产潜力及与水土资源的可持续利用与全球变化的联系,是现今地理学、生态学、气候学和农学等学科关注的焦点之一。该书以中国科学院禹城试验站和栾城试验站的过程研究为基础,研制了多种模型以供实践应用,并从区域尺度上深入研究了华北平原小麦玉米连作区的作物生产力与气候因子时空变异的关系及耗水规律。

该书数据资料基于严谨的实验和先进精密仪器设备的综合运用。基本数据资料来自于作者多年在中国科学院台站网络基本站禹城站和栾城站的实验。实验研究中运用了涡度相关技术波和波文比-能量平衡观测系统,使用了自动校准的热通量传感器和湿度传感器、三维超声风速仪、土壤热通量传感器,多种太阳辐射与净辐射监测传感器。水分观测有大型 Lysimeter、时域反射仪等,以及多种红外 CO<sub>2</sub> 传感器,能全生育期自动连续工作。同时还应用热成像理论技术对叶片表面进行红外热成像观测,分析玉米叶片表面温度,据此推算有效风速和边界层阻力,与微气象学方法实测资料进行比较,均取得满意结果。而且设置了严谨的控制条件下水分实验和大田试验观测,保证了试验资料的准确性与可靠性。

作物产量与气候关系可谓经久不衰的前沿性热点论题,竺可桢、黄秉维等老

一辈工作者从 20 世纪 60 年代就着力于气候和作物生产力及光能潜力与作物产量的研究。黄秉维先生以阶乘模式研究作物生产力,在国内外具开拓性影响,迄今仍为学术界重视引用。日、美、澳等国亦有大量类似研究,曾任英国皇家气象学会会长的 Monteith 先生离任前发表极具学术价值的论著 *Climate Variation and the Growth of Crops*, 其中提出:自 1889 年以来,每隔一段时间就有一位会长以天气和作物为题发表演讲,至今已历五位。该文除论述气候波动对产量影响之外,侧重叶片的光合与蒸腾作用及其与阻力系统的关系,降水、蒸发和土壤水分对作物产量的影响等,实质上更多涉及到有关的农业生态过程问题。

土壤-植物-大气连续体(SPAC)水热传输与生态过程相耦联的协同研究,是近年发展的趋势,有助于促进多学科の融汇与交叉。经典的生态学理论曾指出:生态系统之内涵不仅包含生物自身的生物过程,而且包容与其紧密联系的环境过程。反映在农田生态系统过程中,就是农田生态过程与 SPAC 系统水热传输过程的既相互联系又相互区分。从地理学观点看,亦是对自然地理过程和机制的一种阐述。

自然地理过程、农田生态过程及 SPAC 水热传输过程综合而协同地研究是多学科融汇交叉研究的表征。该书较好地综合运用各类过程和方法对上述方面进行了综合研究。如果说微气象学方法侧重于湍流扩散为基本理论的数理模式方法,生态学方法则侧重于种群的生长分析、生产力发展模式,有代表性的则是 Logistic 方程为基础的各种模式。该书作者具有驾驭多种学科进行交叉综合研究的能力,因此能博采各学科精华而融于一炉,显示了其厚实的数理基础和对农田生态学、微气象学与农业气象学、作物生理生态学、实验地理学不断探求,“如切如磋,如琢如磨”和锲而不舍的精神。

中国地理学大师黄秉维先生在 20 世纪 60~70 年代对如何以现代科学基础解析农田生态系统中的生态过程颇费踌躇,最终选择了用气象学、生态学与实验地理学相结合的方法定量地诠释农田生态学问题,以开展具有应用价值的基础性研究,为中国农业生态开拓了研究方向。这一学术抉择曾被国外著名学者 Monteith、Rosenberg 等喻为“睿智的选择”。这一指导方向始终体现在我国农业生态研究工作中,该书尤其深刻地体现这一点,证明了黄秉维先生高瞻远瞩的学术引导作用。

当时黄秉维先生环顾海内外,看到的农业生态研究只是一些“零金碎玉”,切冀后学能“剖璞呈玉,集腋成裘”。该书终于不负厚望,呈献给读者的是一本学术力著。盼能继续精益求精,不断取得新进展。

刘昌明

(中国科学院院士)

于沪宁

(中国科学院地理科学与资源研究所研究员)

2006 年 9 月

# 前 言

科学研究不外乎观察、实验、分析、推理与数学模型等方法。自从限制因子定律提出以来，作物生长与环境因子的关系常常通过单因子胁迫实验获得。尽管在农学和农业生态学中各种因子组合的大田试验连年不断，在 100 多年以后的今天，试验处理数以亿计，但是人们对农业生产力的机理和流程的认识远远不如对工业产品的投入产出的认识。在大田条件下，作物生长与光照、温度、土壤水分和养分等环境因子之间有复杂的交互作用，因而难以准确定量地描述发生在农田生态系统中不同时间尺度上的生理性、物理性和化学性过程。作物产量的计算或预报仍然是农学、生态学和地理学中的一个热点和难点。

生态过程模型需要尽可能做到对过程的描述明晰和周全，体现生态系统的复杂性，同时，数学模型又是对真实世界的简化。为了洞察起主导作用的控制过程或者因素，需要对生态过程进行抽象和概括的表达。通过对各因素测定与计算所造成的误差有约略的估计，生态学模型研究者往往需要根据不同目的，寻求模型在对不同时间尺度(如逐时、逐日或逐月)和空间尺度(如叶片、冠层或区域)上的简洁性与复杂性的平衡。

太阳辐射是驱动农田生态过程最基本的因素，它提供了光合作用的能源，还推动植物-大气间的能量物质交换，带动植物-土壤-大气中的水分运动。这些过程都涉及生态、农业、地理和气象等领域。黄秉维先生曾经提出从能量平衡、水热循环和物质循环的角度研究农田生态系统生产力的形成机制，并倡导建立农业生态系统定位试验站。他从作物生长的决定因子出发，根据人类对它们调节和控制的难易程度，把作物生长潜力划分成光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力等。荷兰 Wageningen 大学的科学家们也把作物产量划分成气候因素所允许的潜在产量(potential yield)、被不同土壤水肥供应限制的可获得产量(attainable yield)和病虫害造成减产后的实际产量(actual yield)等产量水平，从而可以根据产量潜力的差异及其决定因子的变化确定水肥资源的管理方法和优化运用。本书是在上述思路基础上的探讨和深化。

感谢我的老师对我的多年教诲。他们是南京大学大气科学系傅抱璞教授，安徽农业大学李倬、贺龄萱教授，中国科学院上海植物生理生态研究所王天铎研究员，中国科学院大气物理研究所孙荻芬研究员和吴国雄院士。

我的工作得益于国际合作伙伴，他们让我感受到工作的快乐。我特别感谢荷兰 Wageningen 大学 Jan Goudriaan 教授、美国耶鲁大学李旭辉(Xuhui Lee)教授、

美国农业部农业研究局农业系统研究所 Laj Ahuja 所长, 美国农学会会士(Fellow)、SSSAJ 副主编马立望(Liwang Ma)博士, 西北流域研究中心、Trans ASABE 土壤和水分部原主编 Gerald N. Flerchinger 博士, 美国土壤学会主席 Gary W. Peterson 教授, 加拿大 Alberta 大学 Robert Grant 教授, 澳大利亚科工组织土地和水资源研究所(CSIRO Land and Water)王恩利(Enli Wang)博士等。

中国科学院地理科学与资源研究所的领导给予我多年的支持, 党群办胡淑文老师热情推荐申报出版基金。由于农田生态过程涉及的内容非常广泛, 在研究工作中我常常感到实践和理论知识的不足, 幸亏得到老一辈科学家, 如禹城站唐登银、谢贤群、张仁华、程维新、张兴权先生以及栾城站于沪宁、项月琴等先生的指点和帮助。同时我也从欧阳竹、孙晓敏、罗毅、李运生、张国梁等同事那里学到许多有益的知识。然而本书仍然不够全面, 错误和问题在所难免, 祈望读者不吝赐教。

本书部分工作是与许多同事共同完成的, 主要有孙晓敏(2.1 节)、陆佩玲(1.7 节, 1.9 节, 2.5 节)、姜朝阳(2.6 节, 2.7 节)、肖薇(2.8 节)、王靖(3.1 节)、任巍(4.3 节)、房全孝(4.4 节)、李俊(5.3 节, 5.5 节)、叶欣(5.6 节)、陈述悦(5.10 节)、王兴武(5.11 节)、刘建栋(5.12 节)和邬定荣(5.14 节)等。

科学出版社李悦老师做了大量的编辑工作, 我的助手许守华在内容编排和修改等方面给予了很大的帮助, 对他们致以诚挚的谢意。我还要感谢刘昌明院士、于沪宁先生热情为本书作序。

于强

2006 年 9 月 1 日

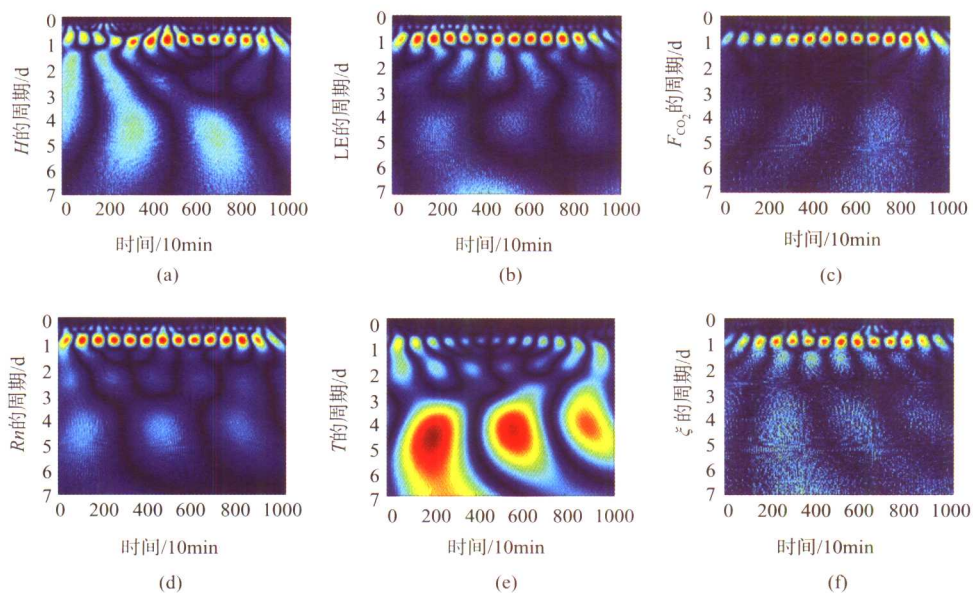


图2.18 观测数据的Morlet连续小波变换(CWT)

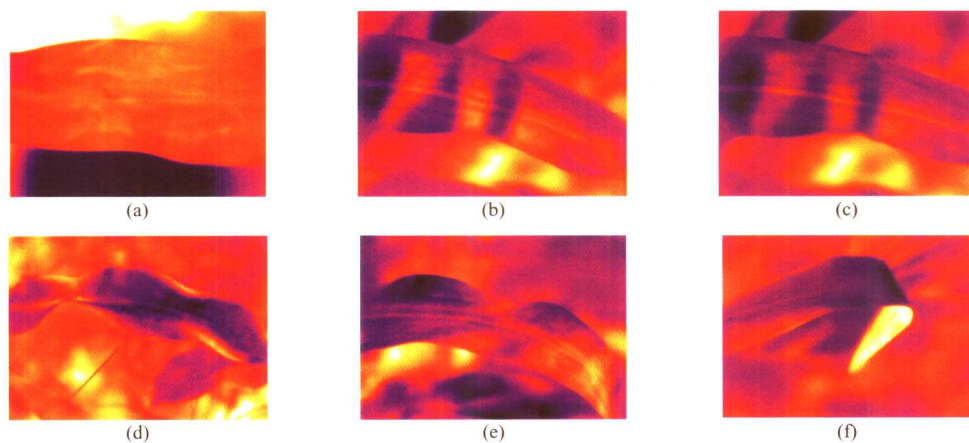
(a)  $H$ ; (b)  $LE$ ; (c)  $F_{CO_2}$ ; (d)  $Rn$ ; (e)  $T$ ; (f)  $\xi$ 

图2.27 玉米叶片表面温度的热像照片(2001年8月25日15:00)

(a) 置于水面完全照光的叶片; (b)、(c) 玉米叶片表面温度对光照变化的响应;

(d)、(e)、(f) 玉米冠层内三个高度(0.65m、1.25m、1.85m)叶片

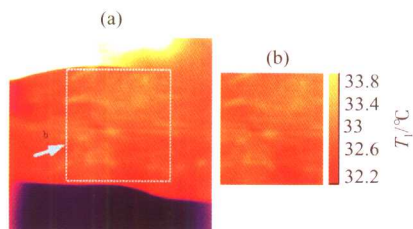


图2.29 用于估算叶片表面边界层阻力的热像照片的区域

(a) 玉米叶片, 其中虚线包围的部分(包含 $140 \times 140$ 个像素)用于提取叶片表面温度并计算叶片表面边界层阻力(rb); (b) 计算区域

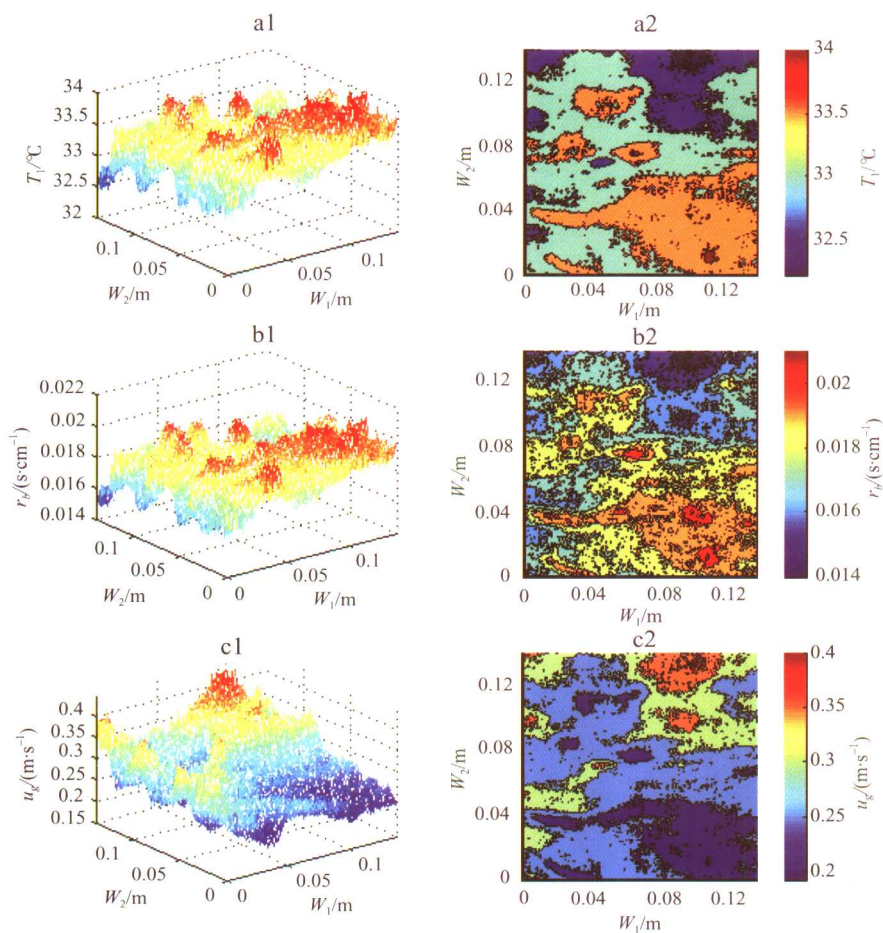


图2.30 叶片表面温度( $T_l$ )、边界层阻力( $r_g$ )以及有效风速( $u_g$ )的三维分布(a1、b1和c1)和等值线(a2、b2和c2)

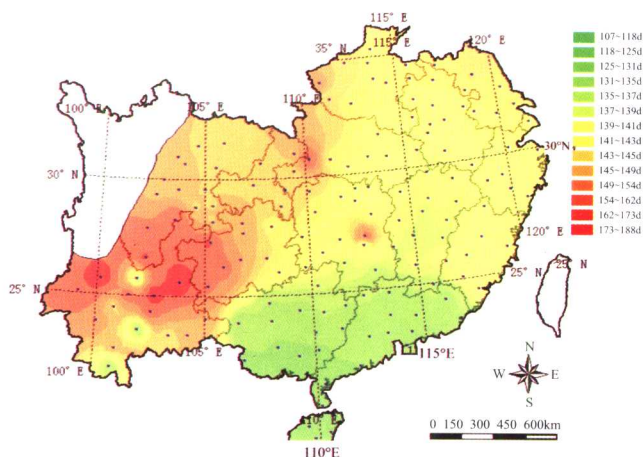


图4.21 1961~2000年中国南方地区水稻平均生育期

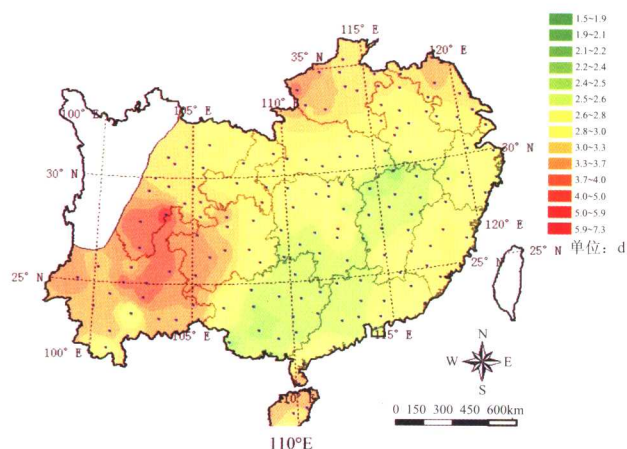


图4.22 1961~2000年模拟生育期的标准差

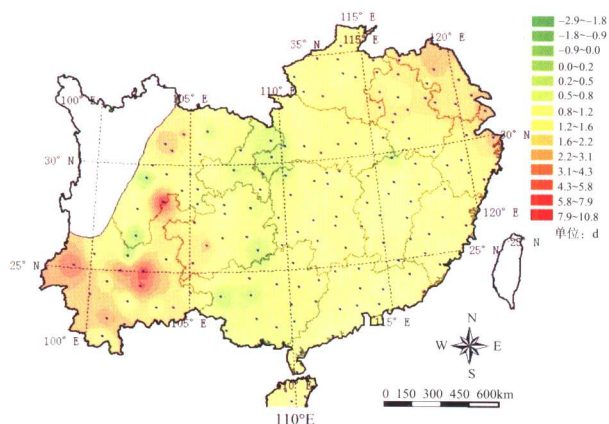


图4.23 1961~1990年生长期长度变化

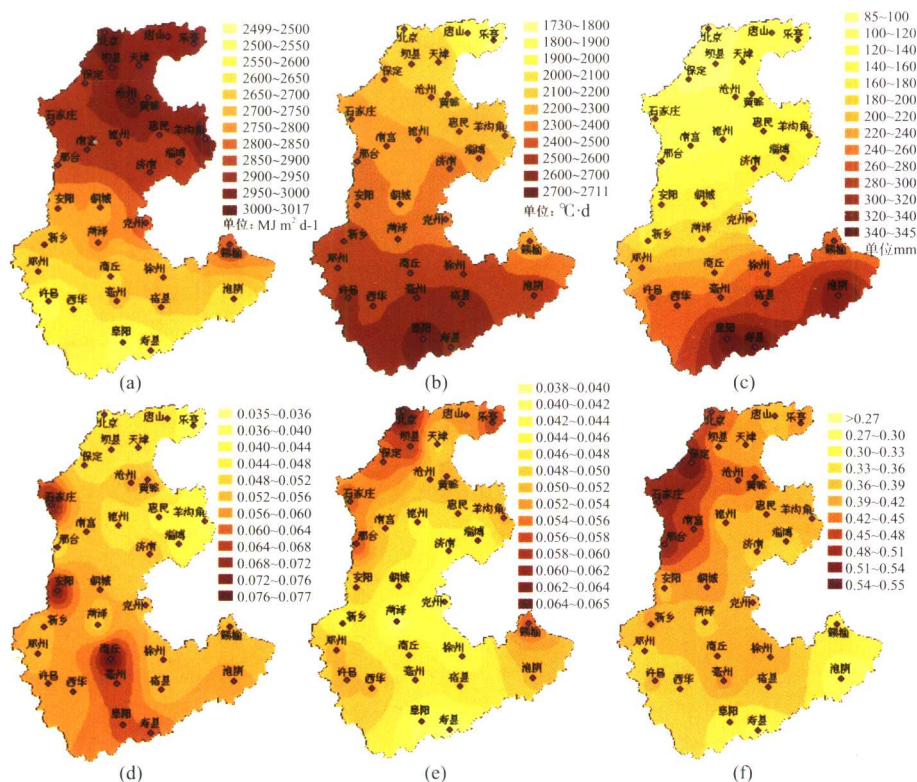
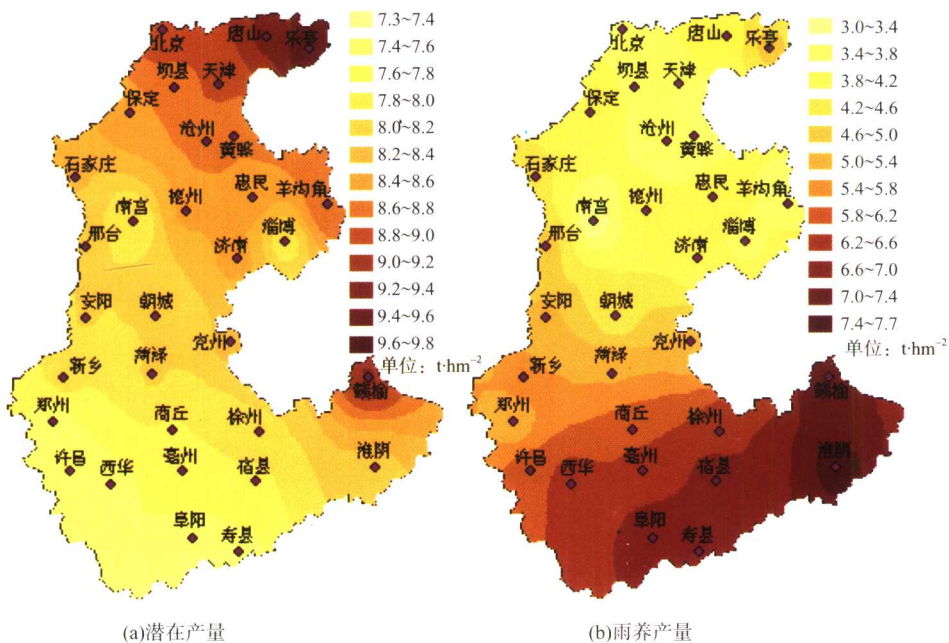


图5.52 冬小麦生育期内辐射、积温和降水量的总量及变异

(a)、(b)、(c)分别是辐射、积温和降水量的总量；(d)、(e)、(f)分别是辐射、积温和降水量的变异



(a)潜在产量

(b)雨养产量

图5.53 华北平原模拟的潜在产量及雨养产量

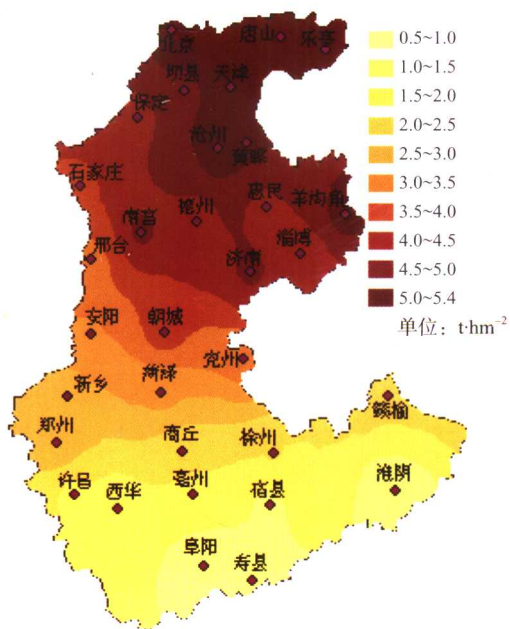


图5.54 潜在产量与雨养产量的差

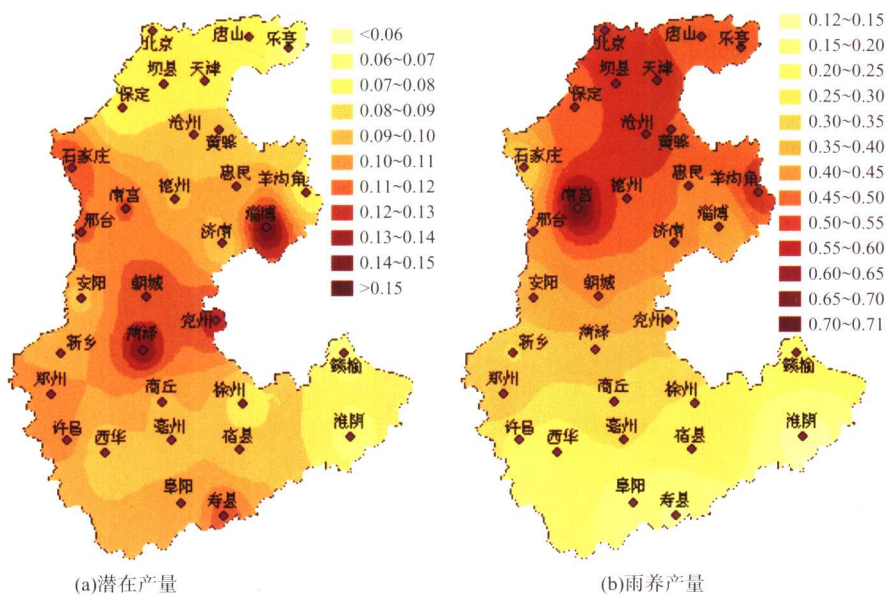


图5.57 华北平原潜在产量与雨养产量的变异系数

# 目 录

## 序言

## 前言

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第一章 作物生理生态</b> .....                                    | 1   |
| 1.1 气孔导度对光强、温度和 $\text{CO}_2$ 变化的响应及模型 .....               | 1   |
| 1.2 几个气孔模型在自然条件下的适用性 .....                                 | 10  |
| 1.3 作物水汽扩散阻力与光合作用关系由叶片向冠层的扩展 .....                         | 14  |
| 1.4 光合作用-蒸腾作用-气孔导度的耦合模型及 $\text{C}_3$ 植物叶片对环境因子的生理响应 ..... | 19  |
| 1.5 $\text{C}_3$ 植物叶片光合“午睡”现象与模拟 .....                     | 33  |
| 1.6 光合作用的光抑制与光合日变化的气孔因素和非气孔因素的模拟 .....                     | 45  |
| 1.7 冬小麦光合作用光响应曲线的拟合和特征参数 .....                             | 57  |
| 1.8 冬小麦光合作用和蒸腾作用对环境因子的响应特征 .....                           | 64  |
| 1.9 夏玉米生理因子对气象要素响应模拟 .....                                 | 70  |
| 1.10 青藏高原和华北平原冬小麦叶片光合作用特征与模拟 .....                         | 76  |
| <b>第二章 农田微气象</b> .....                                     | 89  |
| 2.1 作物冠层微气象仪的研制与应用 .....                                   | 89  |
| 2.2 太阳辐射与温度日变化的插值方法 .....                                  | 93  |
| 2.3 辐射日总量的最热坡度解析模式及其全球分布规律 .....                           | 99  |
| 2.4 冬小麦田辐射过程和热量过程的基本特征 .....                               | 106 |
| 2.5 玉米冠层凝露的观测与模拟 .....                                     | 111 |
| 2.6 陆面通量与大气稳定度变化的小波分析 .....                                | 118 |
| 2.7 应用红外成像法估算玉米冠层内叶片边界层阻力 .....                            | 133 |
| 2.8 农田辐射平衡、水热通量和小气候要素的特征与模拟 .....                          | 141 |
| <b>第三章 土壤-植物-大气系统水热传输与二氧化碳通量</b> .....                     | 157 |
| 3.1 农田生态系统水热与 $\text{CO}_2$ 通量的日变化模拟模型 .....               | 157 |
| 3.2 用 SHAW 模型和光合作用耦合模型模拟小麦冠层上方的 $\text{CO}_2$ 通量 .....     | 180 |
| <b>第四章 作物生长与环境因子的关系</b> .....                              | 196 |
| 4.1 叶面积指数增长模式 .....                                        | 196 |
| 4.2 包容环境因子的 Logistic 扩展模型模拟水稻干物质积累过程 .....                 | 202 |

|             |                                                       |            |
|-------------|-------------------------------------------------------|------------|
| 4.3         | 水分调控对冬小麦同化物分配与水分利用效率的影响研究                             | 212        |
| 4.4         | 冬小麦水分利用效率及其环境影响因素分析                                   | 216        |
| 4.5         | 气候变暖对我国南方水稻发育期的影响                                     | 225        |
| 4.6         | 作物产量与气候关系分析方法                                         | 238        |
| <b>第五章</b>  | <b>农田生态过程与模型</b>                                      | <b>246</b> |
| 5.1         | 植物光合生产力与冠层蒸散模拟研究进展                                    | 246        |
| 5.2         | 农田生态系统模型与农业资源高效利用                                     | 259        |
| 5.3         | 不饱和土壤 $\text{CH}_4$ 的吸收与氧化                            | 267        |
| 5.4         | 农业土壤排放氧化亚氮的影响因素分析                                     | 273        |
| 5.5         | 农田 $\text{N}_2\text{O}$ 通量测定方法分析                      | 276        |
| 5.6         | 华北平原典型农田土壤氧化亚氮排放特征                                    | 286        |
| 5.7         | 玉米株型与冠层光合作用 I: 数学模型                                   | 293        |
| 5.8         | 玉米株型与冠层光合作用 II: 数值分析                                  | 304        |
| 5.9         | 作物光温生产力模型及南方水稻适宜生长期的数值分析                              | 312        |
| 5.10        | 华北平原冬小麦田土壤呼吸特征                                        | 321        |
| 5.11        | 水-氮耦合作用对农田硝态氮淋失的影响                                    | 332        |
| 5.12        | 长江三角洲稻田生态系统综合增温潜势源汇交替的数值分析                            | 344        |
| 5.13        | 用 RZWQM 模型和 RZWQM-CERES 集成模型模拟华北平原冬小麦-夏玉米轮作的作物生长与水分利用 | 353        |
| 5.14        | 华北平原太阳辐射、温度和降水的时空分布对冬小麦潜在产量和雨养产量的影响                   | 369        |
| <b>参考文献</b> |                                                       | <b>381</b> |
| <b>彩图</b>   |                                                       |            |

# 第一章 作物生理生态

## 1.1 气孔导度对光强、温度和 $\text{CO}_2$ 变化的响应及模型

### 1.1.1 前言

气孔是生态系统水分循环和  $\text{CO}_2$  交换的重要通道,受生理和环境等因素的控制。通过叶片气孔,空气中的  $\text{CO}_2$  扩散进入光合组织的细胞间隙, $\text{CO}_2$  溶解于液相中,在阳光的作用下发生了光合作用,同时大量水汽也通过气孔经蒸腾作用耗散于大气中。因此,植物光合作用下  $\text{CO}_2$  的吸收与蒸腾作用下水分的散失几乎是协同的,气孔开闭运动及其行为节律是调节水分的利用效率和能量平衡中感热和潜热分配比例的制约性因素。单位叶面积气孔多寡及其孔径是影响  $\text{CO}_2$  同化和蒸腾失水之间平衡,这可以通过气孔导度来表征,气孔导度涉及光合作用和蒸腾作用两个方面(Cowan, 1965)。气孔的开放通过影响胞间  $\text{CO}_2$  浓度而影响光合作用和叶绿体内的生化过程(Yu et al. 2001)。气孔的开放程度由光强和气孔保卫细胞间的水分平衡共同决定。当  $\text{CO}_2$  浓度低时,光强通过影响光受体驱动  $\text{CO}_2$  固定,保卫细胞由在微气孔中  $\text{CO}_2$  浓度和叶组织水分平衡共同决定。因此,在农业生态系统中,气孔导度参数的确定是模拟作物生产力和水分利用效率的关键。

在气孔导度的模拟中, Jarvis(1976)模型被广泛应用到农田蒸散、陆面过程和生物地球化学循环(McMurtrie, 1992; Hanan et al., 1997; Cox et al., 1998),这是一个典型阶乘型的经验模型,它是一连串单因子的校正系数的函数。它没有生理学意义,光合作用和蒸腾作用变化由气孔活动控制。基于大量的实验, Ball 等(1987)提出了一个半经验模型(Ball-Berry 模型),认为光合作用和气孔导度之间有线性关系。但是,光合作用和气孔导度之间的相互作用需要反复计算。本研究综合经验模型和半经验模型,提出了一个通过太阳辐射、温度、湿度、空气  $\text{CO}_2$  浓度和土壤水势直接计算气孔导度的方法,与 Ball-Berry 模型有相似的生理学关系。

本研究的目的是构建一个基于 Ball-Berry 模型并具有生理机制的 Jarvis 型气孔模型,以致能利用该模型从环境变量直接计算导度,且有生理学意义。

### 1.1.2 方法

实验在华北平原中国科学院禹城综合试验站进行,观测了冬小麦光合作用、

蒸腾作用和气孔导度对光和  $\text{CO}_2$  的响应曲线。在冬小麦灌浆期(从 2003 年 4 月 16 日至 5 月 6 日),在叶室里进行旗叶光和  $\text{CO}_2$  的响应曲线的测量,每次测量均在短时间内完成。在自然温度湿度条件下,每 2 小时测量一次光和  $\text{CO}_2$  的响应,光波长 400~700nm,光强范围 0~2000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  浓度范围 0~1400  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。因为环境条件的光、温度和  $\text{CO}_2$  浓度是随时间而变化的。

用红外  $\text{CO}_2$  分析系统 LI-COR 6400(LI-COR Inc., Lincoln)进行光合作用、蒸腾作用的观测,并在观测前进行校正。在小麦返青以后,依照土壤含水量分 3 次均匀灌水 70~100mm;中耕区域超过 20hm<sup>2</sup>。详细的管理措施和自然条件见 Yu 等(2002)。

### 1.1.3 模型

在自然条件下影响气孔导度的主要环境因子有 5 个,分别是太阳辐射、气温、湿度、 $\text{CO}_2$  浓度和土壤水势。在适当的条件下,实际气孔导度( $g_s$ )可以通过最大导度( $g_{\max}$ )和环境因素的校正系数得到(Jarvis, 1976)。

$$g_s = g_{\max} f(I) f(T_a) f(C_a) f(\text{VPD}) f(\psi) \quad (1.1)$$

式中,  $I$  是吸收的光通量密度,  $T_a$  为气温,  $C_a$  为大气  $\text{CO}_2$  浓度, VPD 是水汽压差,  $\psi$  是土壤水势。

Ball 等(1987)提出了一个半经验的气孔模型,它是叶面相对湿度( $h_s$ ),  $\text{CO}_2$  浓度( $C_s$ )和光合作用速率( $A_n$ )的函数,在充足供水的条件下有:

$$g_s = a \frac{A_n h_s}{C_s} + g_0 \quad (1.2)$$

式中,  $a$  是常数,  $h_s$  和  $C_s$  分别是叶面相对湿度和  $\text{CO}_2$  浓度,  $g_s$  是气孔导度,  $g_0$  是参数。由于气孔到叶面的水汽压差( $\text{VPD}_s$ )是蒸腾作用的驱动力, Leuning(1995)用  $\text{VPD}_s$  代替  $h_s$  修正了 Ball-Berry 模型。这里,用 VPD 取代  $\text{VPD}_s$ , 因为 VPD 是气象学变量且容易得到。公式(1.2)可表示为:

$$g_s = a \frac{A_n}{(C_s - \Gamma)(1 + \text{VPD}/\text{VPD}_0)} + g_0 \quad (1.3)$$

式中,  $\Gamma$  是  $\text{CO}_2$  补偿点,  $\text{VPD}_0$  是反映气孔对大气水汽压差 VPD 响应的特征参数(Pa),它决定气孔导度对湿度响应曲线的弯曲程度。

即使在光补偿点以下,当光强增加时气孔导度开始迅速增加。Yu 等(2001)提出用总同化速率代替净同化速率,用  $C_s$  代替公式(1.3)中的  $(C_s - \Gamma)$  有: