



中国生态系统研究网络丛书

# 农田生态试验研究

李宝庆 马 瑞 龙牧华 编

气象出版社

18.1  
262

# 农田生态试验研究

李宝庆 马 瑞 龙牧华 编

气象出版社

00021

(京)新登字 046 号

### 内 容 简 介

本书是中国科学院禹城综合试验站近年来开放基金资助课题的部分成果选编,包括围绕农田水分循环和水分平衡的基础研究,技术方法、手段的引进和研制,与提高作物产量、农田生态系统优化有关的应用研究等。

中国生态系统研究网络丛书

## 农田生态试验研究

李宝庆 马 瑞 龙牧华 编

责任编辑 潘根娣 终审 纪乃晋

封面设计 王群力 责任技编 李 瑞 责任校对 李建铭

气象出版社出版发行

(北京西郊白石桥路 46 号 邮编: 100081)

北京科地亚印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.875 字数: 355 千字

1996 年 9 月第一版

1996 年 9 月第一次印刷

印数: 1—500

定价: 16.00 元

ISBN 7-5029-2223-7/S · 0288

## 《中国生态系统研究网络丛书》序

中国科学院自 1949 年建院以来,陆续在全国各重要生态区建立了 100 多个以合理利用资源,促进当地农业、林业、牧业和渔业发展,以及观测和研究诸如冰川、冻土、泥土流和滑坡等一些特殊自然现象为目的的定位研究站。在过去几十年中,这些站无论在解决本地区资源、环境和社会经济发展所面临的问题方面,还是在发展生态学方面,都发挥了重大的作用。

自本世纪 80 年代以来,一方面由于地球系统科学的出现与发展,特别是由于国际地圈-生物圈计划(IGBP)的提出与实施;另一方面,由于日益严重的全球性资源、环境问题所造成的压力,使生态学家们提出了以从事长期、大地域尺度生态学监测和研究为目的的国家、区域乃至全球性网络的议题。就是在这种背景下,中国科学院从已有的定位研究站中选出条件较好的农田、森林、草原、湖泊和海洋生态系统定位研究站 29 个(见中国生态系统研究网络生态站分布图),并新建水分、土壤、大气和生物 4 个学科分中心及 1 个综合研究中心,于 1988 年开始了筹建“中国生态系统研究网络(英文名称为 Chinese Ecosystem Research Network,缩写为 CERN)”的工作。目前,中国科学院所属 21 个研究所的千余名科技人员参与了该网络的建设与研究工作。

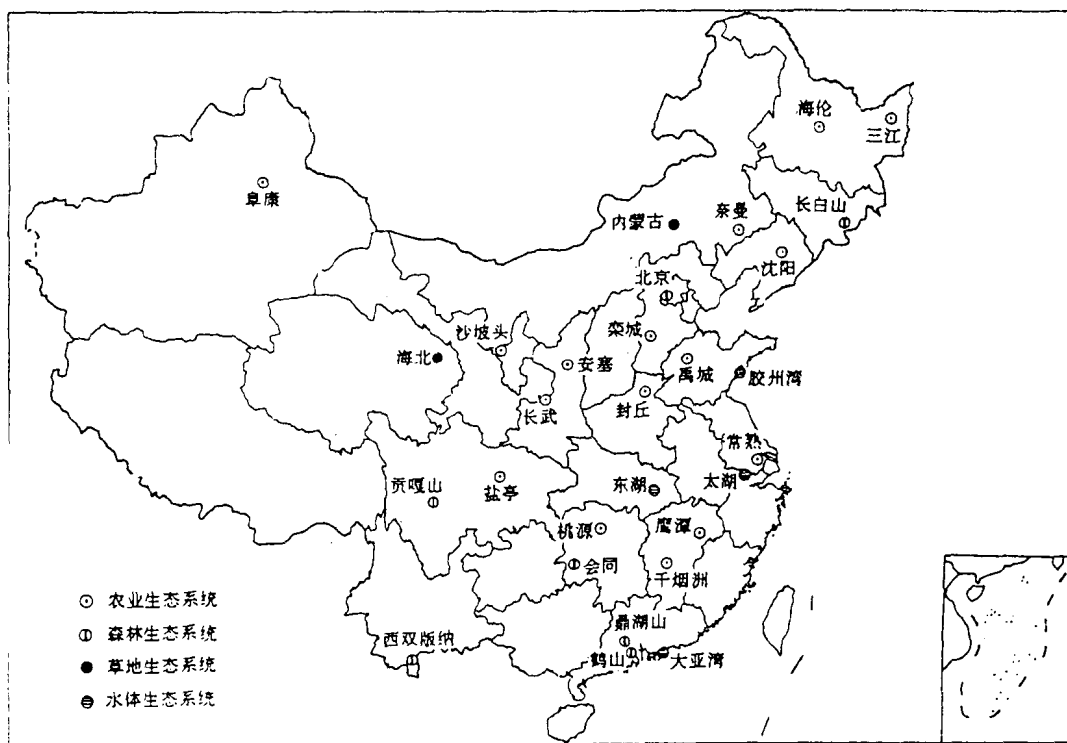
网络筹建阶段的中心任务,是完成 CERN 的总体设计。在 1988~1992 年的 5 年间,在中国科学院、国家计委、财政部和国家科委的领导与支持下,来自我院各有关所的科技人员,详细研究了生态学的最新发展动向,特别着重研究了当代生态对生态系统研究网络所提出的种种新的要求;了解了世界上已有的或正在筹建的各个以长期生态学监测和研究为目标的网络的设计和执行情况,特别是分析了“美国长期生态学研究网络(英文名称为 U. S. Long-Term Ecological Research Network,缩写为 U. S. LTER Network)”的发展过程,注意吸取了它们的经验和教训;同时,结合我国的具体情况,经过反复推敲,集思广益,于 1992 年底完成了网络的设计工作,并开始建设。

与其他网络相比较,CERN 的设计有如下特征:在整个网络的目的性方面,强调网络的整体性和总体目标,强调直接服务于解决社会、经济发展与资源、环境方面的问题;在观测方面,强调观测仪器、设备和观测方法的标准化,以便取得可以互比的数据;在数据方面,强调数据格式的统一和数据质量的控制、数据共享和数据的综合与分析;在研究方法上,强调包括社会科学在内的多学科参与的综合研究,强调按统一的目标和方法进行的,有多个站参与的网络研究。

几年来,通过国内、外专家的多次评议,肯定了上述设计的先进性和可行性,这为 CERN 的总体目标和各项任务的实现奠定了可靠的基础。

CERN 的长期目标是以地面网络式观测、试验为主,结合遥感、地理信息系统和数学模型等现代生态学研究手段,实现对我国各主要类型生态系统和环境状况的长期、全面的监测和研究,为改善我国的生存环境,保证自然资源的可持续利用及发展生态学做贡献。它的具体任务是:

1. 按统一的规程对我国主要类型农田、森林、草原、湖泊和海洋生态系统的重要生态学过程和水、土壤、大气、生物等生态系统的组分进行长期监测：



中国生态系统研究网络生态站分布图

2. 全面、深入地研究我国主要类型生态系统的结构、功能、动态和持续利用的途径和方法；

3. 为各站所在的地区提供自然资源持续利用和改善生存环境的优化经营样板；
4. 为地区和国家关于资源、环境方面的重大决策提供科学依据；
5. 积极参与国际合作研究，为认识并解决全球性重大资源、环境问题做贡献。

为了及时反映该网络所属各生态站、分中心和综合研究中心的研究成果，CERN 科学委员会决定从 1994 年起设立出版基金，资助出版《中国生态系统研究网络丛书》。我们希望该丛书的问世，将对认识我国主要类型生态系统的基本特征和合理经营的途径，对促进我国自然资源的可持续利用和国家、地区社会经济的可持续发展，以及对提高生态学的研究水平发挥积极作用。

王世杰

## 前 言

地处黄淮海平原河间浅平洼地的禹城综合试验站筹建于 1979 年,经中国科学院批准于 1983 年正式成立。1988 年被批准为中国科学院首批开放的野外试验站之一。禹城站以农田水分循环和水分平衡作为较长期的研究方向,着重对农业生态系统中土壤-作物-大气系的水分交换的基础理论及其在实践上的应用进行研究。

90 年代以来,环境与发展成为国际瞩目的主题。中国生态系统研究网络的建立,促进了我国资源环境事业的发展,禹城站也成为该网络的基本站。1992 年经过站学术委员会的认真讨论,进一步强调了加强农业生态系统研究的重要性,将禹城站的学术研究方向表述为:“以水、土、气候、生物等农业资源的合理利用与黄淮海平原旱、涝、盐碱、风沙的综合治理与农业持续发展为主要服务目标,研究农业生态系统的结构、功能,特别是与水的运动和利用有关的能量与物质转化和迁移规律,以及农业生态系统的优化与管理。禹城站支持对有关过程的机制与理论研究,支持测定方法的革新与仪器改进和研制,鼓励与国民经济建设和区域治理有关的农业生态问题的综合研究”。

几年来站学术委员会共审批开放基金资助课题 36 个,在有关单位和专家的支持下,经过各课题组成员的努力,取得了较好的进展。《农田生态试验研究》是近年来开放基金资助课题的部分成果选编,包括围绕农田水分循环和水分平衡的基础研究,技术方法、手段的引进和研制,与提高作物产量、农田生态系统优化有关的应用研究等。

在小麦冠层水分利用效率的研究中,采用焓和超额热通量流解耦联的方法,得出各层叶片的蒸腾速率,结合光合速率的研究,求得各层叶片的水分利用效率。计算表明中下部叶片水分利用效率高,但每一层叶片水分利用效率有一定的保守性。对冬小麦耗水的试验研究,探讨了冬小麦作物耗水量与产量的关系,并比较作物群体结构与水分利用效率的差异,为黄淮海地区冬小麦合理利用水分提供依据。对我国主要类型地区作物需水、耗水与水分利用效率的网络研究,探讨我国若干地区几种主要作物(小麦、玉米、大豆等)的耗水和需水规律、水分利用效率,它们对各种田间管理措施的响应以及提高水分利用效率的途径。

在土壤水和地下潜水运动规律的研究方面对华北盐碱地在冻结条件下土壤的水、热、盐运动进行模拟、田间试验和验证研究,建立了冻期土壤水盐热运动的数学模型,并提出用热量平衡法确定田间实际气候条件下大气与土壤交界处水热边界条件的方法。以饱和-非饱和流理论为基础,将非饱和土壤水与地下潜水作为一个整体进行研究,以正确描述非饱和土壤水与饱和地下潜水相互影响的情势。对包气带水分转换的实验模拟,建立了土壤水分-地下水联合运动的二维数值模型。

在农田生态系统研究的技术手段和方法的研制和应用方面有了新的进展。根据换位式波文比的观测特点,自行研制了换位式波文比仪,其测量精度达到 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 的水平,为用波文比-能量平衡法计算蒸发提供了一个实用的观测仪器。采用波文比-能量平衡法及气相色谱分析得到玉米拔节期施肥后及灌浆期田间  $\text{N}_2\text{O}$  的垂直输送通量,并探讨其特征

和变化规律。

利用禹城站遥感试验场观测的小麦双向反射数据,验证了 Nilson-Kunsk 模型,提出了切实可行的反演算法,为定量遥感农业生态系统中的重要参数开拓了新方法。通过对田间定位试验,建立了以遥感信息推算叶绿素含量的模型,为大范围监测叶绿素容量提供理论依据及可行途径。

农田生态系统研究的重要目标是提高作物的产量。本文集收编了有关夏大豆品种产量构成的相关与通径分析,探讨夏大豆植株光合产物积累、分配及其与水肥的关系,并对大豆根瘤菌接合重组进行研究。应用花粉通量技术对禹城冬小麦产量进行初步预测取得了可喜的进展。此外,对冬小麦微量元素缺乏症的诊断及微肥施用技术的研究。风沙危害的防治,重盐渍化咸水区农田生态系统稳定优化的研究都为研究地区可持续发展农田生态系统的建设提供了依据和示范。

自然地理野外定位试验研究是地理学传统考察研究的拓展和深入。自然地理工作的发展,要求加大解决问题的深度,野外定位试验研究的作用就显得十分重要。自然地理野外定位试验的目的不是为了探讨一个地点的自然过程,而要求与气象、土壤、植被等有关资料相结合,并应用遥感手段推广到区域尺度上,将点面工作紧密结合起来,否则意义就小得多。

地理学定位试验研究为地理学的深入发展提供了良好的条件,也对定位试验工作提出了更高的要求。对所要研究的自然现象,既要了解其动态过程、机制和规律,揭示它与其他现象的联系;要有可靠的观测手段和方法,周密的设计;又要考虑到在地域尺度上的分析比较和推广应用。所有这些都要求有关专业学科人员的协同配合、精益求精,需要锲而不舍的刻苦钻研和长期的辛勤劳动。

禹城站各开放课题组所取得的成绩和进展是可喜的。在《农田生态试验研究》文集出版之际,希望禹城站的同志们继续努力,在今后的科研工作中,在理论方法上,在与生产实践相结合方面做出新的贡献。

郑 度

1996.6

# 小麦冠层不同层次叶片水分 利用效率的研究

## ——光合速率与蒸腾速率之比( $P/T$ )的模拟

施建忠 王天铎

(中国科学院上海植物生理研究所 上海 200032)

**摘 要** 将小麦冠层分为三层,采用焓和超额热通量流解耦联的方法,解出潜热和感热在群体内的分布,得出各层叶片的蒸腾速率,同时解得各气象要素如气温、叶温、实际水汽压、饱和水汽压差在群体内的分布。另外,根据所解出的各层叶片所处的小环境条件,将气孔导度模型与 Farquhar(1980)等的光合机理模型结合起来,得出各层叶片的光合速率,从而得出各层叶片的水分利用效率,计算结果表明,中下部的叶片比上部的叶片水分利用效率高,但每一层叶片的水分利用效率有一定的保守性。

**关键词** 小麦 光合速率 蒸腾速率 数学模拟

### 一、引言

叶片水平的水分利用效率,即光合速率  $P$  与叶片蒸腾速率  $T$  之比是植物消耗水分形成有机物质的基本效率(Tanner 1983)。由于各层叶片处于水同的微气象条件下,不同层次叶片的光合速率和蒸腾速率都不相同,而且二者之比也不同。如果把冠层当作大叶,而不知道其各层的  $P$ 、 $T$  和  $P/T$ (即  $WUE$ ),这个大叶的行为仍然无法预见,对它仍然只能作经验的处理。

Bierhuizen(1965)通过环境条件对蒸腾作用和净光合作用的效应的临界分析得出,对于大多数的作物来说,环境条件的变化导致  $P/T$  比有较大的变化幅度,而在叶片水平上测定净光合作用速率和蒸腾作用速率时,现有的仪器,如英国 ADC 公司的 LCA,美国的 LI-COR,都会改变叶片(尤其是矮秆作物叶片)之间的相对位置,从而改变它们在辐射方面的相互影响,而且叶室中的叶片的风速、辐射、取向等小气候环境也被改变了,因而对作物不同层次叶片的水分利用效率的研究,特别是小麦这样的矮秆作物,必须进行模拟。

对  $P/T$  的模拟,需要把作物生理特性和农田小气候有机地结合起来,通过模型的敏感性分析,可以了解到哪个生理过程、哪个环境因子对水分利用效率起关键作用。王天铎等(1990)在禹城试验站用 ADC 公司的叶室分析仪(LCA)对小麦的光合速率和蒸腾速率做了测定,由于一天中辐射强度和气温的变化,加上气孔阻力的变化,一天里不同时刻的  $P/T$  比不是恒定的,以多个测量的数据平均表示,小麦的  $P/T$  比为  $4.80\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$  折合到结构物质( $\text{CH}_2\text{O}$ )约  $8.13\text{kg CH}_2\text{O}/\text{m}^3\text{H}_2\text{O}$ 。为了进一步了解不同层次叶片及



不同时刻的  $P/T$  比,将冠层分为三层(上中下三层的厚度分别为 13cm、13cm、19cm),另外加上土壤,作为第四层,利用陈家麟(1984)的模型,解出各气象因子(叶温、气温、辐射、饱和水汽压差)在群体内的剖面,模拟出不同层次叶片的光合速率和蒸腾速率,从而得出不同层次叶片的水分利用效率。

## 二、试验方法

大田试验在中国科学院禹城综合试验站进行(纬度  $36^{\circ}50'N$ , 经度  $116^{\circ}30'E$ )。测量叶片光合速率的仪器是英国 ADC 公司的叶室分析仪(LCA)。该仪器的数据采集器 DATA-LOG 还可以输出的数据有叶片接受的光合有效辐射、蒸腾作用速率、叶片的气孔导度、叶片温度以及气孔下腔的  $CO_2$  浓度等,试验于 1991 年 4 月 18 日进行,标定 10 株小麦,于不同时刻(8、10、12、14、16、18 点)测定旗叶的光合作用速率,中午则标定 3 株小麦,自上而下测定 3 个叶片的光响应曲线(用纱布遮光获得该叶片在不同光强下的光合速率)。另外,将冠层分为三层,三层顶端的高度分别为 45cm、32cm、19cm(上下三片叶子的位置大致落在不同的三层内),测定每一层的叶面积系数。

另外,各个时刻风速、气温、干湿球温度及地表热通量等气象数据取自该试验站。

## 三、模拟方法及模型结构

研究  $P/T$  比,就要分别研究光合速率  $P$  和蒸腾速率  $T$ 。

### (一) 对蒸腾速率的处理

常用 Bowen 比的技术求出各层的潜热通量  $LE$ 。但是,一方面,我们不知道每一层中的温度和湿度(即它们在冠层内的垂直分布),另一方面,在解能量平衡方程的时候,潜热通量和感热通量是耦联的。为此,陈家麟(1984)引入了解耦联的焓流和超额热通量流。

#### 1. 焓流 $H$ 的定义及其在群体内的分布

$$Hi = \sum_{j=4}^i H_j' \quad (i = 1, 4) \quad (1)$$

其中  $H_j' = S_j - F_j$ ,  $S_j$  为第  $j$  层所吸收的净辐射,  $F_j$  为第  $j$  层由于光合作用所消耗的能量,  $F_j$  相对于  $S_j$  可以忽略不计(Monteith, 1972)。对于土壤表面,  $H_4' = S_4 - G$ , 这里,  $G$  是土表的热通量,  $Hi$  是第  $i$  层的焓流。

#### 2. 超额热通量流 $J$ 的定义及其在群体内的分布

$$Ji = \sum_4^i Ji' = (\rho \cdot Cp / \Delta) \cdot (VPD(i-1) - VPDi) / Ri \quad (2)$$

其中,  $VPDi$  是第  $i$  层的空气饱和水汽压差, 是未知的,  $\rho$  是空气密度,  $Cp$  是空气的定容比热,  $\Delta$  是饱和水汽压随温度变化曲线的斜率,  $Ri$  是空气的涡动扩散阻力, 而每一层的超额热通量流  $Ji'$  又可写成:

$$Ji' = \frac{-\rho \cdot Cp / \Delta \cdot VPDi}{r_{H,i} + \alpha \cdot r_{s,i}} + \frac{Si}{[1 + r_{H,i} / (\alpha \cdot r_{s,i})]} \quad (3)$$

其中,  $r_{H,i}$ ,  $r_{s,i}$  分别是第  $i$  层叶片的边界层阻力和气孔阻力,  $\gamma$  是湿度计常数,  $\Delta$  是饱和水汽压对温度曲线的斜率, 其中  $\alpha = \gamma / (\gamma + \Delta)$  (Goudriaan, 1977)。

令  $ri = r_{H,i} + \alpha \cdot r_{s,i}$ , 并将方程(2)代入求解  $Ji'$  的方程(3)中, 得如下方程组

$$(1 + R1/r1) \cdot J1 - J2 = b1$$

$$(R1/r2) \cdot J1 + (1 + R2/r2) \cdot J2 - J3 = b2$$

$$(R1/r3) \cdot J1 + (R2/r2) \cdot J2 + (1 + R3/r3) \cdot J3 - J4 = b3$$

$$(R1/r4) \cdot J1 + (R2/r4) \cdot J2 + (R3/r4) \cdot J3 + (1 + R4/r4) \cdot J4 = b4$$

其中,  $bi = ((-\rho \cdot Cp/\Delta) \cdot VPD0 + \alpha \cdot r_{s,i} \cdot Si) / ri$ , 求解该方程组, 可以得到第  $i$  层的超额热通量流  $Ji$ , 而  $Ji' = Ji - J(i+1)$ 。

### 3. 冠层内各要素的分布

利用焓流和超额热通量流解耦合的特性, 可以方便地求出冠层内的潜热和感热分布廓线。

$$Ci = \alpha \cdot Hi + (1 - \alpha) \cdot Ji \quad (4)$$

$$LEi = (1 - \alpha) \cdot (Hi - Ji) \quad (5)$$

潜热通量和蒸腾量之间有严格的关系, 水的汽化热为 2390J/g, 因而可以从第  $i$  层的潜热通量折算得出第  $i$  层叶片的蒸腾速率。另外

群体内不同层次内的气温  $Ta$  分布为:

$$Tai = Ta(i - 1) + Cp \cdot Ri / (\rho \cdot Cp) \quad (6)$$

饱和水汽压差  $VPD$  分布为:

$$VPDi = VPD(i - 1) + Ji \cdot Ri / (\rho \cdot Cp/\Delta) \quad (7)$$

实际水汽压  $E$  分布为:

$$Ei = E(i - 1) + LE \cdot Ri / (\rho \cdot Cp/\Delta) \quad (8)$$

叶温  $T1$  分布为:

$$T1i = Ti + (Ci - C(i + 1)) \cdot rH, i / (\rho \cdot Cp) \quad (9)$$

上述计算过程用 FORTRAN 写成, 编成 RB. EXE 文件执行, 其中要计算不同层次叶片吸收的净辐射、各层叶片的边界层阻力和各层间的涡动扩散阻力, 另外需要一个气孔阻力在群体内的初始分布, 虽然已有很多的模型来描述气孔对环境因子的响应 (Jarvis, 1976, Ball 等, 1987), 但由于各层叶片的小气候条件是未知的, 故不能采用, 这里首先假设一个气孔阻力的初始分布, 由 QQ. EXE 来完成, 土壤表面可以看成是一个假想的叶片, 其气孔阻力的经验公式为:

$$r_{s,4} = a1 \cdot (\theta_{sat}/\theta_{sur})^{a2} + a3 \quad (10)$$

其中,  $a1, a2, a3$  为经验常数,  $\theta_{sat}$  为土壤饱和含水量,  $\theta_{sur}$  为土壤表面处的实际含水量, 进一步的气孔阻力的模拟。

## (二) 对光合速率的处理

Farquhar(1980)提出了一个  $C_3$  作物叶片光合作用的生化模型。考虑了光合作用由不同因素限制( $CO_2$  与  $O_2$  的竞争性抑制, RuBP 酶活性和 RuBP 再生的限制)的机制, 该模型能有效地预测叶片在不同环境条件下的光合作用速率, 现在已被广泛地采用 (Grant,

1989, Joon 等 1991)。使用该模型时, 关键的参数是 RuBP 饱和时的最大羧化速率  $V_{cmax}$  和光饱和时电子传递所允许的最大羧化速率  $J_{max}$  (Farquhar, 1980), 则光合作用速率可表示为:

$$P_n = (1 - C_c/C_i) \cdot \min(W_c, J') - R_d \quad (11)$$

其中,  $W_c = V_{cmax} \cdot C_i / (C_i + K_c \cdot (1 + C_o/K_o))$

$$C_c = 0.50 \frac{V_{cmax} \cdot K_c}{V_{omax} \cdot K_o}$$

式中,  $C_i$  是叶肉细胞间的  $CO_2$  浓度,  $C_c$  是没有暗呼吸时的  $CO_2$  补偿点,  $C_o$  是叶肉细胞间的  $O_2$  的浓度,  $K_c$  和  $K_o$  分别是  $CO_2$  和  $O_2$  的米氏常数。  $R_d$  是暗呼吸速率,  $V_{cmax}$ ,  $K_c$ ,  $K_o$ ,  $R_d$  等参数(Parameter)与温度的关系可以用 Arrhenius 函数来表示。

$$Parameter = parameter(25) \cdot \exp[E \cdot (T_1 - 25) / 298 \cdot R \cdot T_1] \quad (12)$$

其中,  $E$  是有关反应的活化能,  $R$  是气体常数,  $T_1$  是叶温(用 K 氏温度表示)。

$$J' = \frac{I \cdot J_{max}}{2.1 \cdot I + J_{max}} \cdot \frac{C_i}{4.5 \cdot C_i + 10.5 \cdot C_c} \quad (13)$$

而  $J_{max} = b \cdot \exp[(T_1/298 - 1) \cdot E / (R \cdot T_1)] / \{1 + \exp[(S \cdot T_1 - Hd) / (R \cdot T_1)]\}$ 。这里,  $b$  是参数,  $E$  是反应的活化能,  $S$  是反应的熵值,  $Hd$  是反应的激活能。

为了模拟在不同环境条件下的叶片光合作用速率, 必须将该模型与气孔导度的模型结合起来(Tenhunen, 1988), 其关系式可用下式来表示。

$$1/G_s = R_s = (C_a - C_i) / (1.6 \cdot P_n) - 1.37 \cdot rH, i/1.6 \quad (14)$$

其中  $C_a$  是大气的  $CO_2$  浓度。

计算叶片光合速率时所用的变量的说明及参数取值见附录 1。

具体的计算步骤见附录 2。

## 四、模拟结果与讨论

下面是对禹城站 1991 年 4 月 18 日的小麦冠层的模拟的结果。

### 1. 叶片的小环境条件

图 1、图 2、图 3、图 4 和图 5 分别是不同层次的叶片在不同时刻的光合有效辐射。叶温、气温、水汽压和饱和水汽压差的变化情况, 由图 1 可以看出, 冠层中各叶片接受到的光合有效辐射随穿过的叶面积增加呈负指数减少, 在中午下降更为急剧, 即消光系数更大。由图 2 可以看出, 叶片周围的气温自上而下递增, 中午时变化幅度大, 而叶温(图 3)与气温相比, 中午时上部叶片叶温可比气温高  $1 \sim 2^\circ C$ , 下部的叶片叶温与气温相近。由图 4 可以看出, 自上而下, 水汽压总是升高的, 由图 5 可以看出, 日出后, VPD 逐渐增大, 至 14 点 VPD 达最大值, 随后又降低; 上层叶片周围空气的 VPD 比下层的要高一些, 但变化不规则, 这些模拟结果是符合农田小气候实际情况的(Gates, 1964; Jones, 1983)。

### 2. 气孔导度、光合速率的模拟结果

图 6 是不同层次叶片在不同时刻的气孔导度模拟值, 各层叶片气孔导度的日变化是早晨逐渐上升, 至中午后达最大值, 尔后又逐渐下降。另外, 上部叶片由于其光合有效辐射高, 气孔导度及光合速率都比下部的叶片高, 见图 6 和图 7。

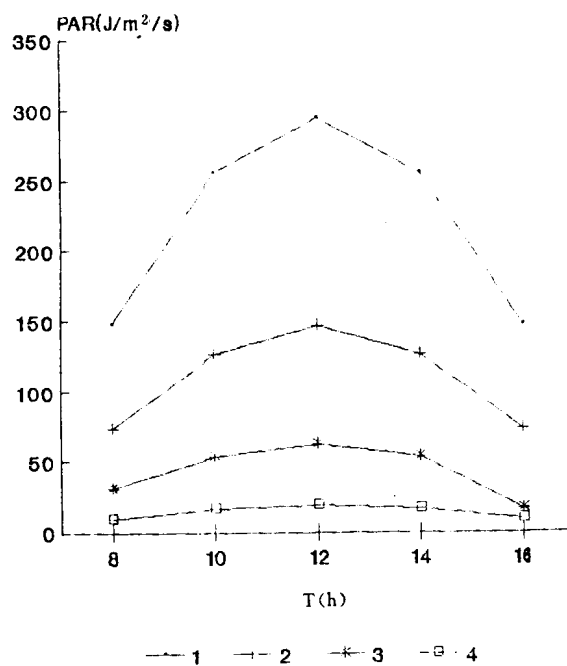


图 1 光合有效辐射在冠层内分布的日变化

Fig. 1 Simulated diurnal change of PAR inside the canopy

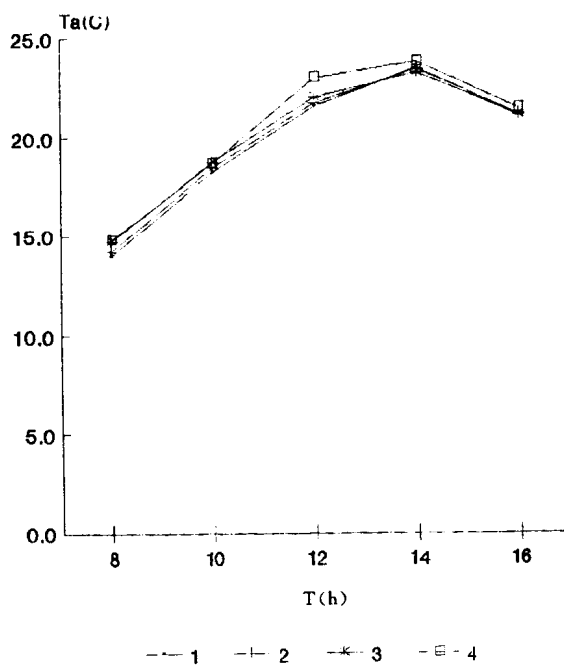


图 2 气温在冠层内分布的日变化

Fig. 2 Simulated diurnal change of air temperature inside the canopy

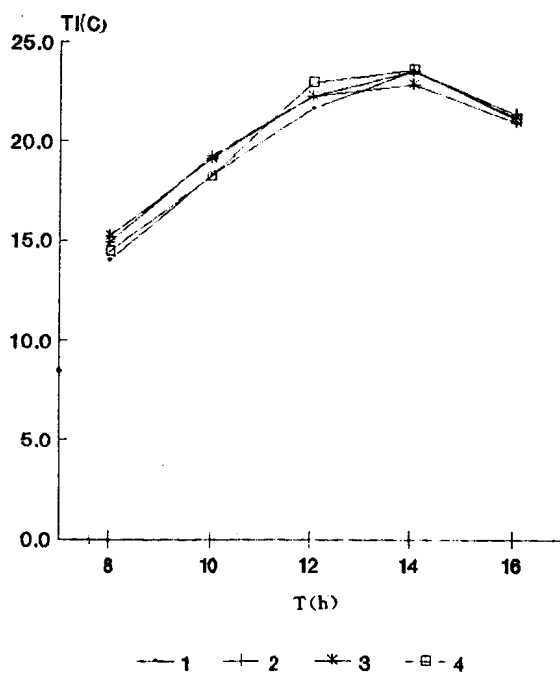


图 3 叶温在冠层内分布的日变化

Fig. 3 Simulated diurnal change of leaf temperature inside the canopy

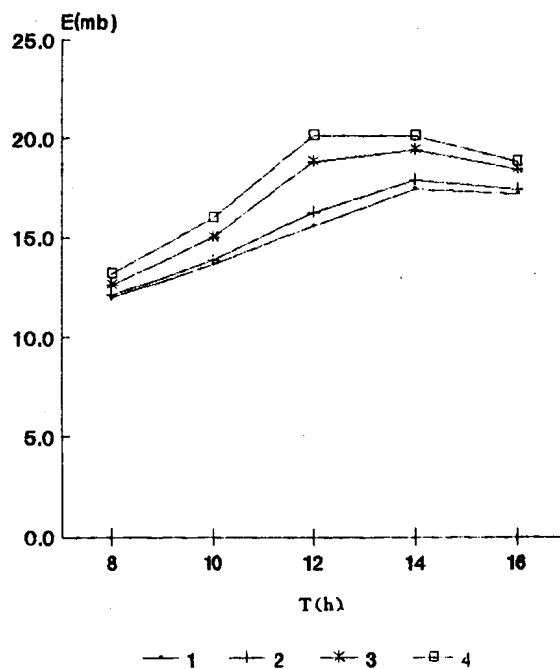


图 4 空气水汽压在冠层内分布的日变化

Fig. 4 Simulated diurnal change of air vapor pressure inside the canopy

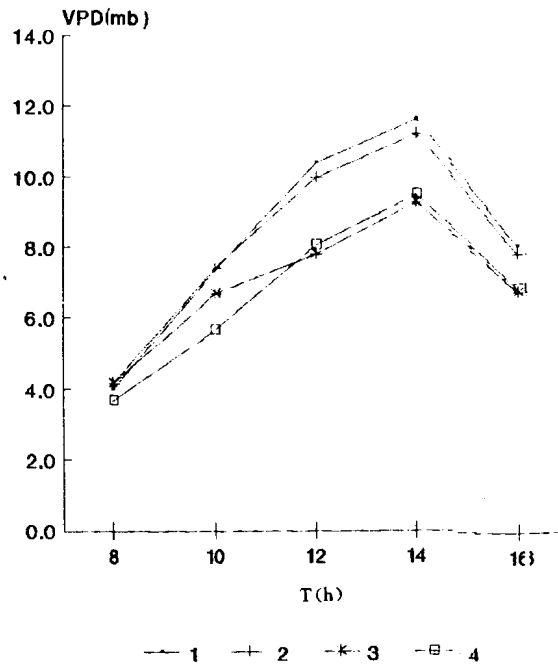


图 5 空气饱和和水汽压差在冠层内分布的日变化

Fig. 5 Simulated diurnal change of saturated water vapor pressure inside the canopy

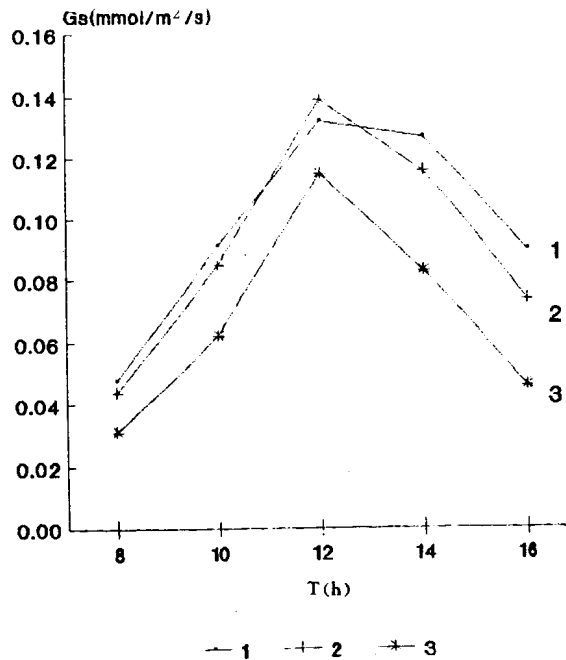


图 6 不同层次叶片气孔导度的模拟值

Fig. 6 Simulated diurnal change of stomatal conductance for leaves of different layers

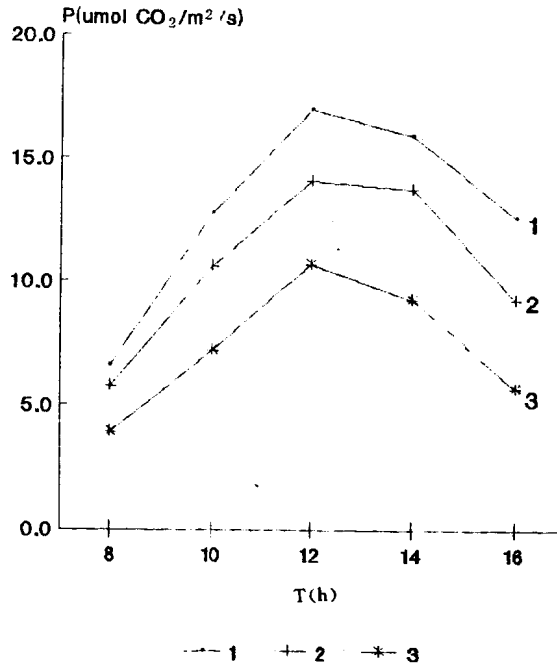


图 7 不同层次叶片的光合作用速率的日变化

Fig. 7 Simulated diurnal change of leaf photosynthesis for leaves of different layers

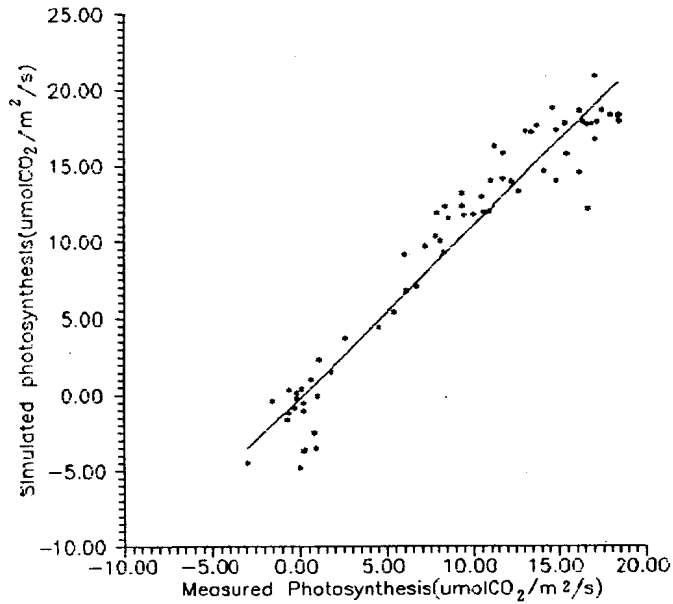


图 8 遮光处理下实测的光合作用速率与模拟值的比较

Fig. 8 Comparison of simulated and measured leaf photosynthesis of different layers

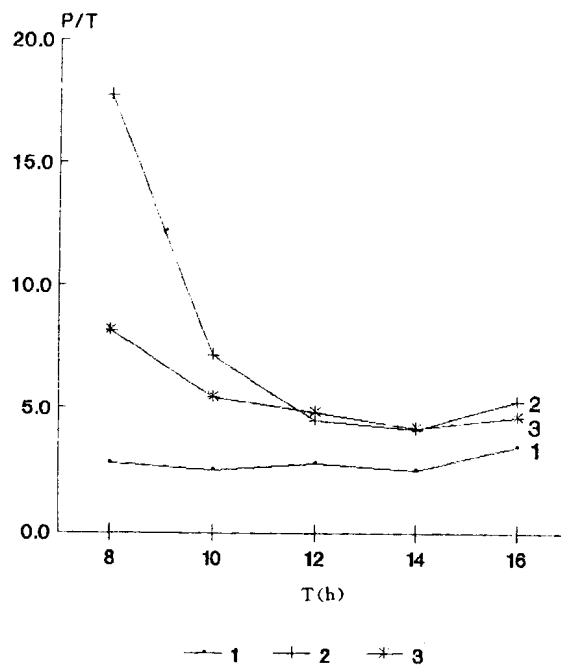


图 9 不同层次叶片水分利用效率的日变化

Fig. 9 Simulated daily water use efficiency for leaves of different layers

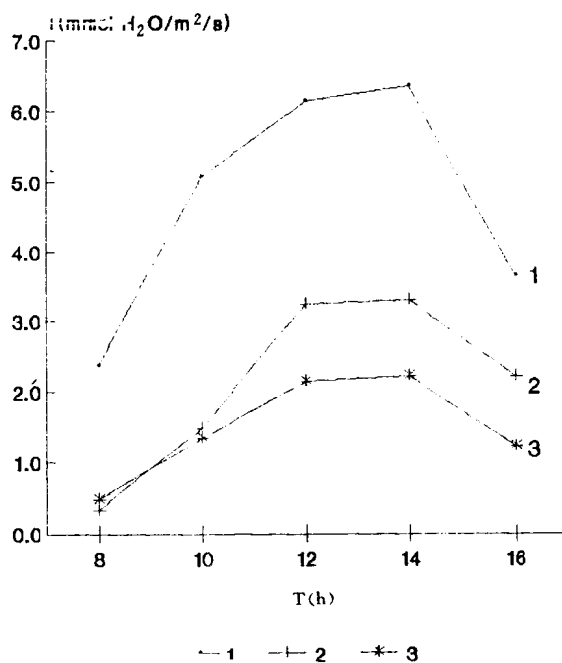


图 10 不同层次叶片蒸腾速率的日变化

Fig. 10 Simulated daily leaf transpiration for leaves of different layers



图 8 是在中午时对叶片进行遮光处理后得到的不同光强下叶片的光合速率与采用 Farquhar 模型计算所得到的光合速率的比较,可以看出模拟结果较好。

### 3. 不同层次叶片的水分利用效率

图 9 是不同层次叶片在不同时刻的水分利用效率,可以看出,除了第一层叶片的水分利用效率日变化不大外,第二和第三层叶片水分利用效率的日变化是早上较高,然后逐渐降低,至 14 点前后达到最小值,尔后又有所上升。这是因为光合有效辐射的最大值在正午,但至 14 点前后,气温达最大值,叶片周围的 VPD 也急剧上升到最大值,蒸腾速率上升得更快(图 10),造成水分利用效率的下降。

另外,从图 9 可以看出,中下部叶片的水分利用效率比上部叶片的高。这是因为,冠层中部叶片的光合速率还维持一个较高的水平(叶片光响应曲线是凸的),而穿透到该层叶片的辐射能是负指数下降的。另外,由于群体内风速的衰减,湍流强度变小,涡动扩散阻力和叶片表面的边界层阻力增大,由于  $\text{CO}_2$  的传输阻力比  $\text{H}_2\text{O}$  的传输阻力多一个叶肉细胞阻力,因而蒸腾速率的下降幅度大于光合速率的下降,造成水分利用效率的增高。至于冠层下部的叶片,其吸收的光合有效辐射很少,在低光强下,由于补偿点的影响,光合速率下降的比例大于光强下降的比例,水分利用效率不再升高。

这个结论表明,每一层的叶片的水分利用效率日变化不大,只有形成一个合理的冠层结构,使得较多的光透到中下部,才是提高作物群体水分利用效率的关键。

为了更准确的模拟  $P/T$  比,今后的工作可以从考虑群体内  $\text{CO}_2$  的分布及得到一些光合作用关键酶活性的动力学参数着手。

**致谢:**本工作的试验得到傅伟和贺东祥的合作。