

国家自然科学基金“八五”重大项目
“华北平原节水农业应用基础研究”

土壤—作物—大气系统 水分运动实验研究

刘昌明 于沪宁 主 编

气象出版社

国家自然科学基金“八五”重大项目
“华北平原节水农业应用基础研究”

AL19

土壤—作物—大气系统 水分运动实验研究

刘昌明 于沪宁 主 编

1956. v6

97-98

气象出版社

内 容 简 介

本书是中国科学院院士刘昌明主持的重大基金项目《土壤—作物—大气连续体水分运行规律及其调控》的内容之一,对土壤—作物—大气连续体水分传输进行深入分析研究。在河北栾城、南皮、山东禹城三个实验站连续4年实验观测,取得大量翔实资料,反映了我国90年代初这一领域研究的新进展。主要内容包括作物冠层各界面水分能量传输,植物体水分运移与根系吸水,土壤水分运动,裸间蒸发与作物蒸腾实验研究;作物需水、耗水,提高水分利用率途径的实验分析和一些新技术的探讨。可供农业水文、农业气象、土壤物理、实验地理、植物生理生态、农学与栽培管理科技工作者阅读,有关大专院校师生参考。

土壤—作物—大气系统水分运动实验研究

刘昌明 于沪宁 主编

责任编辑:潘根娣 终审:纪乃晋

封面设计:于沪宁 责任技编:王 新 责任校对:李 悦

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:12.5 字数:320千字

1997年1月第一版 1997年1月第一次印刷

印数:1—400 定价:18.00元

ISBN 7-5029-2263-6/P·0834

序

华北平原是中国的心腹之区，农业生产在全国亦居于举足轻重的地位。目前水资源十分用于农业，已深感捉襟见肘，挹注技穷，将来其他产业与城市需水日益增多，对农产品的要求逐年增大，农业用水必更困难重重。不能临渴掘井，必须及早绸缪。国家自然科学基金委员会在“八五”期间，提出“华北平原节水农业应用基础研究”作为重大研究任务之一，其主旨在于节水而保证高产，使持续发展成为可能。此项任务经审议之后，决定由石元春、刘昌明两同志主持。他们认为节水农业所涉及的问题很多，有一些技术环节不必一一列入。另有许多措施被认为可以节水增产，而对其内在联系却没有经得起推敲的证明。有限的力量和时间，应当指向研究其中的一些关键。我认为这在大体是适当的。

本报告所列入的文章都是刘昌明同志所主持的工作的结果，在某一意义上，也是以往在栾城、禹城、北京三地试验工作的继续，同时也和国外的目的相似的工作息息相关。我高兴能在付印前看到全部文稿，看到了不少设想开始得到了实验的印证，发现了不少互相关联的特征。正好这几天要做完的事很多，书稿中的附图也有一部分因故未能看到，因而对全书的了解还很不够，但可以肯定其中有好些与节水增产有关的科学概念与知识单元及游离态知识单元，需要及时进一步地工作，构筑通向最后达到应用目的的桥梁。

黄秉维

(中国科学院院士)

11-10-17-06

目 录

序	黄秉维
SPAC 界面水热传输与生态过程的水分耗散	刘昌明 于沪宁 (1)
土壤—植物—大气系统水分运行规律的初步研究	刘昌明 张喜英 尹雁峰 (18)
夏玉米生长期间土壤—植物—大气系统水分传输势能及其阻力的变化规律	张喜英 (33)
WaVES 模型在节水农业中应用的初步研究	王会肖 刘昌明 张 榕 (40)
麦田潜热、平流及冠层温度和阻力特征	莫兴国 (52)
土壤水分与 SWAC 系统中的水热传输	刘苏峡 李 俊 莫兴国 刘伟东 (59)
复杂剖面结构土壤水运动的数值模拟	尹雁峰 刘昌明 (70)
非饱和土壤作物根系吸水的模拟研究	张喜英 (78)
农田土壤水资源评价研究	由懋正 王会肖 (85)
以大型蒸渗仪为相对标准的作物耗水量测定方法的比较	谢贤群 吴 凯 朱治林 (90)
利用大型蒸渗仪分析与模拟作物耗水特性	陈建耀 (98)
利用水力蒸发器测定夏玉米生长期间秸秆覆盖的节水效应	袁小良 张喜英 由懋正 (107)
小麦棵间蒸发 MICRO-LYSIMETER 测定分析	王会肖 刘昌明 袁小良 (111)
玉米、大豆棵间蒸发 MICRO-LYSIMETER 测定分析	王会肖 刘昌明 由懋正 (120)
华北平原禹城地区作物耗水特性与农业水利用率研究	吴 凯 陈建耀 刘士平 谢贤群 (131)
华北平原禹城地区冬小麦的耗水特性及其相关分析	吴 凯 谢贤群 陈建耀 (139)
土壤水分不同调控下冬小麦蒸散量与产量的关系	洪嘉珺 谢贤群 (145)
缺水盐渍区冬小麦耗水规律与水分利用效率的研究	尹雁峰 刘昌明 (153)
提高太行山山前平原高产区灌溉水利用效率的田间试验研究	张喜英 刘昌明 (161)
作物 ¹³ C 的辨识与水分利用的关系	刘孟雨 (167)
Pima 棉系列品种气孔导度差异分析	胡春胜 (181)
TDR 法测定土壤含水量的标定研究	陈志雄 Sobczuk Henryk (188)

CONTENTS

Water and Heat Transport on Spac Interface and Water Dissipation in Ecological Process	Liu Changming Yu Huning(1)
A Study on The Water Transforming Patterns in Soil-Plant-Atmosphere Continuum	Liu Changming Zhang Xiyiing Yin Yanfeng(18)
The Changing of Water Potential and Water Transferring Resistance In Soil-Plant-Atmosphere Continuum For Corn	Zhang Xiyiing(33)
A Study on the Application of WaVES Model in Water-Saving Agriculture	Wang Huixiao Liu Changming Zhang Lu(40)
The Characteristic of Evapotranspiration and Advection in Winter Wheat Field	Mo Xingguo(52)
Soil Moisture Water-Heat Transfer Within Soil-Wheat-Atmosphere Continuum	Liu Suxia Li Jun Mo Xingguo Liu Weidong(59)
Numerical Simulation of the Soil Water Movement in a Complicated Soil Profile	Yin Yanfeng Liu Changming(70)
Modelling of the Unsaturated Soil Water Extraction by Root Systems	Zhang Xiyiing(78)
Study on Assessment of Field Soil Water	You Maozheng Wang Huixiao(85)
Comparison of Some Methods for Estimating Water-Consumption of Crop with Lysimeter	Xie Xianqun Wu Kai Zhu Zhilin(90)
The Analyses and Simulation of Water Consumption for Bean Corn and Wheat by Lysimeter	Chen Jianyao(98)
Measuring the Water-Saving Effects of Straw Mulching by Using Two Floating Lysimeters	Yuan Xiaoliang Zhang xiyiing You Maozheng(107)
Measurement and Analysis of Soil Evaporation Under Wheat Canopy Using Micro-Lysimeter	Wang Huxiao Liu Changming(111)
Measurement and Analysis of Soil Evaporation Under Maize Soybean Canopy and Bare Soil Micro-Lysimeter	Wang Huixiao Liu Changming You Maozheng(120)
The Research on Water-Consumption Characteristics of Crops and Water Use Efficiency in Agriculture in the Yucheng Area, The North China Plain	Wu Kai Chen Jianyao Liu Shiping Xie Xianqun(131)
The Characteristics and Interrelation Analysis of Water-Consumption for Winter Wheat in the Yucheng Area, the North China Plain	Wu Kai Xie Xianqun Chen Jianyao(139)
The Relation Between the Evapotranspiration and Winter Wheat Yield in the Different Soil	

Moisture Regulation Condition	Hong Jialian Xie Xianqun(145)
A Study on Water-Consumption Law and Water Use Efficiency of Winter Wheat in Water Deficit and Salinization Area	Yin Yanfeng Liu Changming(153)
A Research on Increasing Irrigation Water Use Efficiency in the Piedmont of Taihang MT	Zhang Xiyang Liu Changming(161)
Relationship Between Carbon Isotope Discrimination and Water Use Efficiency of Crops	Liu Mengyu(167)
An Analysis on Difference of Stomatal Conductance of Pima Cotton Genetopys	Hu Chunsheng(181)
Study of Calibration on Measurement of Soil Water Content Using Time-Domain-Reflectometry(TDR)	Chen Zhixiong Sobczuk Henryk(188)

SPAC 界面水热传输 与生态过程的水分耗散

刘昌明 于沪宁

中国科学院地理研究所
(国家计划委员会)

摘要 本文从 SPAC 界面水热传输和生态过程水分耗散相耦联的角度,讨论了过程的协同、联系与区分。对界面“结点”的几个关键性问题进行了推论。讨论了建立在梯度扩散理论基础的适用性及其问题。分析了气孔水平上 CO_2 进入阻力与水分耗散的驱动力,指出气孔下腔巨大蒸腾驱动势及其抑制的可能性。提出界面调控原则是分解土壤蒸发和作物蒸腾的驱动力。讨论了作物水分胁迫机制在节水农业中适当应用的可能性。对于农田节水后诱导的水分胁迫,导致 CO_2 补偿点迅速可逆地跃升,可通过农业措施予以缓解。通过秸秆覆盖后有机物质的降解,增施有机肥后土壤呼吸增加,从而增加了株间 CO_2 浓度。利用植被层内稳定层结的维持,有利于减缓 CO_2 的逸散,达到抑制蒸腾,节水而不降低光合效率,从而提高水分利用效率。利用“反冲”机制,促进作物生长。上述问题的深入研究有助于节水农业理论基础的阐发和在实际中的应用。

关键词 SPAC 界面水热传输 水分耗散

引言

在奥地利学者休斯(Suess, 1875)提出的“生物圈”基础上,着眼于广义的农业而引申出“农业生物层”(agricultural biological layer)观念,认为主要由各类农作物、牧草、森林等高等植物与动物组成,狭义指农田栽培作物。农业生物层的基本过程由生态学家和农学家悉力研究,以期为农业持续发展作出贡献。从系统论观点和区域观点看,农田生态系统是农田生物层在具体地域的表征。

生物圈或农业生物层以至于农田生态系统,其核心部分必然有一些精巧的机制,维系于三相界面的物质能量循环转换的界面活动带,这样才能有一个活跃存在于三度空间多种物质共存相互渗透与多样性相联系稳定的生产力层次。60年代中期 Philip 提出了较完善的关于 SPAC 概念,认为尽管介质不同,界面不一,但在物理上却是一个统一的连续体;而系统中水流过程就犹如链环一样,互相衔接,可以用物理学定义来进行类比研究。这无疑物质能量通量在农业生物层研究又一关键性突破,特别是水分传输具有多学科意义;而实质上 SPAC 的水热传输是与生态过程密切相关,而这方面尚未开展深入的研究,如能进行两者耦联机制过程研究,才能揭示内在机制,阐发创意性的认识,也为农业生产实践

问题的解决提供科学依据。

近年来,我们多次聆听黄秉维先生的学术教诲,他谈到作物与水分关系时说,散热需要多少水分?维持膨压需要多少水分?负载养分需要多少水分,即多少水分可以负载作物所需要的养分,这些问题都不清楚。这些启示触及了水分利用效率的根本性机制问题。联系到黄秉维先生 60 年代初就提出研究植物及其地上部分与地下部分所能达到的气圈与岩石圈所组成的物质体系,并称之为“作用层”而不规定其上下限,综合研究这些物质能量和转换过程,以及交换过程的条件、因素强度和结果^[1]。其实已阐发了农田生态系统和 SPAC 系统理论的实质,这些远见卓识当时无疑领先于国际学术潮流,迄今仍有指导意义。只有着眼于农业生物层或农业生态系统,具有规模性生产力意义的界面和层次,深入到水热输送及与之相联系的生态过程;对有不同尺度的众多过程的叠加复合,生态学上具有种群结构的开放的远离平衡态的生态过程分析,才能得出可靠的有益的结论。本文针对上述问题试作讨论。

一、SPAC 的界面和层次构成与传输理论基础

SPAC 界面中存在着多种过程的复合,往往表现为复合过程,即物理的、化学的、生物的过程,交错联系地运动发展。

刘昌明(1993)分析论述了自然地理界面过程及水文界面^[2],指出界面(interface)的研究实践上应注重系统“接口”的研究,各子系统组装的结合部件,必然导致跨学科的渗透研究。单一过程包括自然地理单一要素的研究与学科门类的研究,已有相当基础;而复合过程则难度很大,研究很薄弱。这与农业生物层中界面过程有很好的类比性,因而“接口”可类比于景观生态学中的“结点”(node),即作为廊道(corridor)的交接区和流动物质的源或汇之交接点^[3]。不论是自然地理学或是生态学复合过程的研究都是相当薄弱的;水文地理过程的界面研究实质上也集中于这些层次^[4]。

上述这些界面和过程表叙是切合实际的,SPAC 系统可以简化为二个层次和二个界面,即土壤层的作物层;作物与大气和土壤与作物二个交接面;每个层可分为若干亚层,而且相互交错相互渗透的。土壤层内本身就是三相交错的层次。作物生理生态研究中曾将作物层分为光合层(冠层)、支架层(茎秆)、根层等^[5]。存在着许多过程,水热传输过程和生态过程是主导的,制约性的。对于这些过程的深入分析,可以揭示物质传输和水分利用规律。

界面和层次的主要特点,是通过“接口”或“结点”进行物质和能量的交换。推动地理过程,生态过程或环境过程的基本动因是能量和物质的传输交换。进一步的疑问究竟是什么样的机制制约着物质能量转换呢?地理学认为可以从地理梯度的分析中找到答案,环境学家则认为存在着环境梯度(P. H. Whittaker),生态学则认为存在着生态场和生态梯度。所谓梯度,是一种广义的非均衡,其存在为一些运动和过程提供了基础,是与过程伴随的速率、强度、方向的基础。就地理系统而言,所以能不停地运转,而且表显的行为又如此复杂多样,地理梯度的存在及其作用,不能不视为维系系统存在的动力^[6]。此理论在地表三相体系中应有普适性。近代充分发展的湍流理论实质上引用了扩散梯度理论,但认为这是经验性的唯象理论,意味着假定扩散是梯度型的,因而传递特性的通量可用平均特性的局

部梯度来表示,隐含着理论上的不足。

按照这一理论,梯度是物质运动的直接动力。根据分子扩散原理,沿一定的方向,通过单位面积质点的扩散速率与质点的浓度梯度成正比,但符号相反。

令质量通量为 F_s , 扩散物质的质点浓度为 C , x 为距离, D 为扩散系数, 则

$$F_s = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

上式称为斐克定律(Fick's law)。这是个经验定律。严格地说,导致物质扩散的主要原因是化学势梯度,而浓度梯度则为化学势梯度的近似。

由于 $\frac{\partial F_s}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial t} = 0$, 因而

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

上式中 t 为时间,这就是最简单的扩散方程。可以有多种解析。通过量纲分析得到三维的扩散方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(\partial^2 C/\partial x^2 + \partial^2 C/\partial y^2 + \partial^2 C/\partial z^2) \quad (3)$$

其解也可以为:

$$C(x, y, z, t) = \frac{M}{8(\pi Dt)^{3/2}} \left[-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4DL} \right] \quad (4)$$

式中 C 为浓度(重量/体积), M 为质量(重量/时间)。

流体的湍流物质质体不是单分子运动,运动性质是非线性的。物质在湍流扩散中远比分子扩散复杂。通常均假定在均匀、稳定湍流场进行模拟。分子扩散方程解还可用来解决湍流扩散问题,但需将分子扩散系数 D 换为湍流扩散系数 K 。因此上述研究是近代地表热量、大气、水分、动量物质(CO_2 、 N_2O 等)交换传输机制和规律及其计算方法的基础,也由此导出 SPAC 物质传输的基本方程。

80年代初英国气象学家 Pasquill 评价过去 20 年微气象学进展时曾指出,其主要贡献就在于建立了近地层能量与物质输送的通量—梯度关系。长期以来,这些输送通量的计算均建立于梯度—扩散理论基础。将(1)式进行类比推导可得到物质能量铅直输送的基本方程:

$$F_s = -ku_* (z-d) \frac{\partial C_s}{\partial z} (\Phi_s)^{-1} \quad (5)$$

式中 F_s 为某物理属性的质量传输通量; $K_s = ku_* (z-d)$ 为属性物理量的扩散交换系数, dc_s/dz 为 s 随高度 z 的浓度梯度, k 为 Von karman 常数, u_* 为空气摩擦速度, d 为地表粗糙高度的零平面位移, Φ_s 为 s 的普遍稳定度函数,可以有各种表达式。

在近地层大气中,如果尺度较大就需要考虑重力与浮力作功等。如果植被层较高,场地不开阔,就可以采用高阶闭合模式逼近。但这种模式需进行复杂的转换和参量化,难以得到应用⁽⁷⁾。用涡旋相关技术直接测定动量、热量和水汽及其他物质的传输,也是有效的方法,但需灵敏度很高的传感器和记录仪,有许多应用的限制性⁽⁸⁾。

80年代以来,在黄秉维先生指导下,北京农业生态系统试验站进行了通量观测和生态过程研究,山东禹城综合试验站的通量—梯度理论作了许多工作。栾城农业生态站也进行类似工作,并以 Lysimeter 作为相对标准确定蒸散。

70年代以来,对梯度扩散理论成立条件进行了探讨。因为从宏观上看,传输过程的应是一种连续过程;从根本上说,所有梯度扩散理论都认为传输现象在微观上也是连续的。研究证明,梯度扩散理论成立必须满足以下条件: $|S_z/S_{zz}| \gg 1$, S_z 和 S_{zz} 相应为某物理属性 S 的一阶和二阶导数。此条件具有明显的物理意义,证明只有当湍流旋涡尺度比其梯度变率的空间尺度小得多时,梯度扩散理论才有应用价值。实质上要求传输交换过程是一种局地性的,与分子传输过程一样。然而在实际上,冠层及其附近气层传输交换过程是一种湍流旋涡的混合过程。湍流旋涡尺度比冠层高度和梯度变率的空间尺度要大得多,梯度扩散理论成立条件往往难以满足。这就是以混合长 L (Mixed Length) 理论为基础的梯度扩散模式问题的症结所在。但这一理论的实践应用仍然是有效的, J. O. Hinze 肯定了这一点^[9]。栾城站有比较均一的大面积植被,平坦因子 (Flattening (flatness) factor) 有利于这些方程的应用而取得满意结果。

二、界面水热输送与生态过程的耦联

(一) 界面水热输送

界面的各种传输模式,我们不想详述,按照相似理论所建立的基本方程:

近地气层运动方程:

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{u'w'} = K \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6)$$

式中 τ 为应力, ρ 为空气密度, u' 和 w' 分别为水平和垂直方向的脉动速度。

湍流热通量方程:

$$P = -\rho C_p \overline{T'w'} = -\rho C_p K_T \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (7)$$

式中 P 为湍流热通量, C_p 为定压比热, T' 为温度脉动值。

湍流水汽扩散方程:

$$E = -\rho \overline{Q'w'} = -\rho K_q \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (8)$$

式中 E 表示蒸发速率, Q' 表示湿度脉动值。

近地层湍流能量平衡方程:

$$C = K \left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{K^3}{L^3} - \alpha \frac{g}{\theta} k \frac{d\theta}{dz} \quad (9)$$

K 为湍流交换系数, L 为混合长度, k 为卡门常数。一些常用水热输送方程可视为上述方程的特殊型式, 涡旋相关技术实际上用上述各式直接确定各物质量。

用波文比方法计算水热通量, 设计了自动观测系统, 由翻转系统控制翻转, 连续测量两个高度上的干、湿球温度差。为便于提高测量精度和计算机采集, 采用增加二个高度差和信号输出量以提高测量的精确性。这套测算系统的误差来源有下列方面: 净辐射和土壤热通量的测量误差, 波文比 β 的相对误差, 假设 $k_n/k_w = 1$ ^[10~15] 的误差, 观测点来流路径 (fetch) 的影响等方面。观测点的来流路径是指代表观测点周围迎风方向水平均匀范围的长度, 来流路径与传感器翻转最大高度的比应大于 $100:1$ ^[16], 否则测算结果缺乏代表性。

波文比由于其物理概念明确,观测方便,已作为一种较成熟的方法而被国内外实验研究广泛采用。该方法中假设热量和水汽交换系数相等是有条件的,只有在近中性和下垫面均一情况下才是正确的。而在很干燥的条件下,波文比值很大且为正值;在能量平流较强时,波文比为负值,误差较大。波文比法用于计算高秆作物表面的感热和潜热通量时,能量平衡中的热贮存项不能忽略但又难以精确测定,而使波文比法的使用受到限制。在以上条件时,空气动力学方法仍然可以使用。而在风速小的条件下,波文比方法可以取得满意结果,而空气动力学法和廓线梯度迭代法在风速小的条件下误差较大。

实验观测中用空气动力学方法进行比较观测,只需增加二个高度的风速观测。空气动力学方法是通过近地层气流的空气动力学特征,来解析其控制各种能量和物质输送的物理过程。而能量和物质的输送过程是受风速、温度、水汽含量和 CO₂ 浓度等的垂直梯度大小所制约。根据空气动力学理论,在近地层内空气动力学粗糙表面上,风速、温度和湿度的垂直梯度可表示为^[17,18]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u \cdot \varphi_m}{k(z-d)} \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{-H_s \varphi_h}{\rho_a C_p k u_s (z-d)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{-\gamma H_L \varphi_w}{\rho_w C_p k u_s (z-d)} \quad (12)$$

由(10)、(11)和(12)式可得:

$$H_s = -\rho_a C_p k^2 (z-d)^2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} (\varphi_m \varphi_h)^{-1} \quad (13)$$

$$\text{或 } H_s = -\rho_a C_p u_s^2 \frac{\partial T}{\partial u} (\varphi_m \varphi_h)^{-1} \quad (14)$$

$$H_L = -\rho_a C_p k^2 (z-d) \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial e}{\partial z} (\gamma \varphi_m \varphi_w)^{-1} \quad (15)$$

$$\text{或 } H_L = -\rho_a C_p u_s^2 \frac{\partial e}{\partial u} \varphi_m (\gamma \varphi_w)^{-1} \quad (16)$$

至此,只要确定出风速,温度和湿度梯度函数 φ_m 、 φ_h 和 φ_w ,即可由温、湿、风梯度资料从(13)~(16)式中计算出感热和潜热通量。但是不同作者试验中场地条件和使用仪器不同,所得 φ_m 、 φ_h 和 φ_w 的形式各异。目前 φ_m 、 φ_h 和 φ_w 的表达形式有多种,做了大量的野外观测研究^[19~22]。上述方法都具有一定的物理基础,然而又带有某些局限性。涡度相关法可直接观测动量、感热和潜热通量。这种方法简便而且精度高,但需昂贵的探头、数据采集及计算机系统,而且还会由于超声脉动仪探头及其支架对气流的扰动引起严重的观测误差。但是在很粗糙的表面,如森林、高秆作物上,其垂直扩散率较大时,温度和湿度的垂直梯度极小,相对应的垂直速度的变化又相当快,这时应用涡度相关法远比空气动力学方法、廓线梯度迭代法等一些依靠要素梯度来决定通量的方法准确。而在比较平坦的表面上,如开阔的水面上,使用涡度相关法时对测量仪器的精度要求会更高。

(二) 水热传输与生态过程

1. 两个过程的异同

① 都遵循耗散结构的发展模式进行能量流动和物质传输,某些过程均可用扩散梯度法描述解析。

② 广义地看生态过程应指生态系统生物有机体及其相联系的环境因素的演化过程,可以从生态系统的定义演绎而来。其特点是负熵流固定能量引起熵减,进行生物有序性自组织发展生物个体和种群,主要描述方程为生长分析、生产力发展模式,营养动力学模式等,乃至包括异速生长(Allometry)方程,表述器官间的按比例生长的同伸关系。以及作物生长发育的可塑性调节,N. C. Turner(1979)指出对水分敏感反应的可塑性具有重要意义,如小麦的分蘖,籽粒干物质来自预先贮藏于茎、根中的同化物。由于耦联于生态过程中生理过程的发展,形成了作物产量,因此生态过程带有生产力色彩,而使 SPAC 系统具有水分利用效益。

③ 严格意义上说来,两个过程蕴含有不同的理论机制,目前水热传输主要基于梯度扩散理论;而生态过程中许多过程则与生理机制相联系,由遗传因素和生物学规律所驱动。

④ 两个过程既相互联系,又相互区别。从一定意义上来说,SPAC 的水热输送过程是重要的生态过程,而 SPAC 系统又将负载和形成生态过程的植被视为连续体的界质,具有层次和结构,处于土壤和大气间关键部位使水热传输有双重意义。

2. 两个过程的联系

正是由于以一些物质能量的耗散为代价,而达到物质能量的聚集而形成生产力。生态过程与水热传输及其控制的水热环境的联系是非常明显的和必然的,表现为宏观、微观多层次上的联系。

① 蒸散过程与光合过程的耦联。这是植物生理的两个重要过程,内在机制非常复杂,本文仅从气孔 CO_2 和水分过程的联系进行讨论。

② 生长发育过程与水热传输的联系,表现为二方面。首先作物生长速率依赖于环境条件,水热传输达到一定强度后,生长发育等生理过程才能启动,如“积温”、“生物学界限温度”等理论,反映了区域水热状态和生理生态过程发展的联系。其次,由作物生长发育所形成的层次,茎叶的数量及其空间分布,又制约着水热转送的规模和尺度。

③ 宏观的环境梯度所决定的作物种类区域分布的联系。

3. 过程与水分利用效率

由于生态过程时间尺度长,包括作物从种到收,作物苗期叶面积未充分发展,光能利用率很低,又与 SPAC 水热传输相联系,因此维系生态过程需大量水分,有些过程并非与生产力相互联系,而且消耗相当多的水分,这是水分利用率较低的原因。只有将水热传输与生态过程联系起来,才能在实质上研讨提高水分利用效率问题。

三、几个关键问题的分析

1. 爱因斯坦光化学定律与量子效率对水分利用的限制性

光合作用效率受到建立在爱因斯坦光化学定律为基础的“量子效率”的最终限制,国

内的许多学者已作了研究^(23~26)。认为光能利用效率不能超过量子效率,即光合作用反应中心的能量效率。光能利用率的期望不能过高,约在光量子进入反应中心的 24%~25% 间,与 CO₂ 是充分耦合的,CO₂ 饱和点与反应中心 CO₂ 转化速率密切联系。不管水分如何充分供应,而光合生产过程的效率却是有限的,这就决定了水分利用的低效率。近年来高光效筛选等研究表明,很难有实质性的进展。

由经典热力学方程所导出的量子效率方程,可以类比用于水分利用效率,确定各项限制性因素,以及最终可能的水分潜力。

2. 水分和 CO₂ 传输群体水平的测定分析

计算 CO₂ 通量密度的通式表示为:

$$F_c = f k^2 (z - d)^2 \frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} (\varphi_m)^{-2} \frac{k_c}{k_m} \quad (17)$$

式中, $\frac{\partial c}{\partial z}$ 为 CO₂ 浓度的梯度; f 为 CO₂ 从体积浓度 (ppm) 转换到不同温度下单位体积重量的系数; φ_m 为稳定度函数; k_c 为 CO₂ 交换系数; k_m 为动量交换系数。

用 Brown-Rosenberg 模式估算群体蒸散 (E_T)⁽²⁷⁾:

$$E_T = R_n - G - \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a} \quad (18)$$

式中 R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, ρ 为干空气密度, C_p 为定压比热, T_a 为气温, T_c 为冠层温度, r_a 为热量传导的边界层阻力。一般分为两部分求算: 即 $r_a = r_{am} + r_a$, r_{am} 为植被的动量传输的边界层阻力, $r_{am} = \left(\ln \frac{z-d}{z_0} \right)^2 / k u(z)$ ⁽²⁸⁾; r_a 为热量从平均源面到动量平均汇面的额外传输阻力, 据 Thom⁽²⁹⁾, $r_a = 6.266 \left(\frac{u(z)}{r_{am}} \right)^{-\frac{1}{3}}$; 为尽量减去空气稳定度影响, 取接近冠层顶部高度的测值, 这一高度在整个观测期取为 1.05 到 1.20m 间。

关于(18)式的适用性讨论, 详见我们在北京的工作⁽³⁰⁾。对作物群体郁闭的农田, 用该式能较好地估算作物蒸散(主要是群体的蒸腾)速率。

作物群体水分利用效率(WUE)为:

$$WUE = F_c / F_T \quad (19)$$

WUE 在数值上等同于同时段同面积上农田小麦群体的 CO₂ 通量密度与水汽通量密度之比。用生理学观点看则是净同化速率与蒸腾速率之比。用波文比和空气动力学方法(13~16)式和用(18)式确定群体蒸散, 用(17)式确定 CO₂ 通量密度, 用(19)式确定群体水分利用效率。测定结果见图 1。

由于 CO₂ 同化过程极为复杂, 涉及叶片叶绿体的活性, CO₂ 同化部位的 CO₂ 和 O₂ 的浓度等。深入分析环境因子对 E_T 与 F_c 的限制作用, 调控界面微环境, 是提高作物水分利用效率的有效途径。

3. 水分和 CO₂ 输送的阻尼作用比较

气孔是大气和作物水分和 CO₂ 交换的通道, 是一个关键性界面的“结点”, 从这关键点, 可以解析水分利用效率。Fick 定律由 P. Gaastra 所导出的形式, 用于植物中的气体

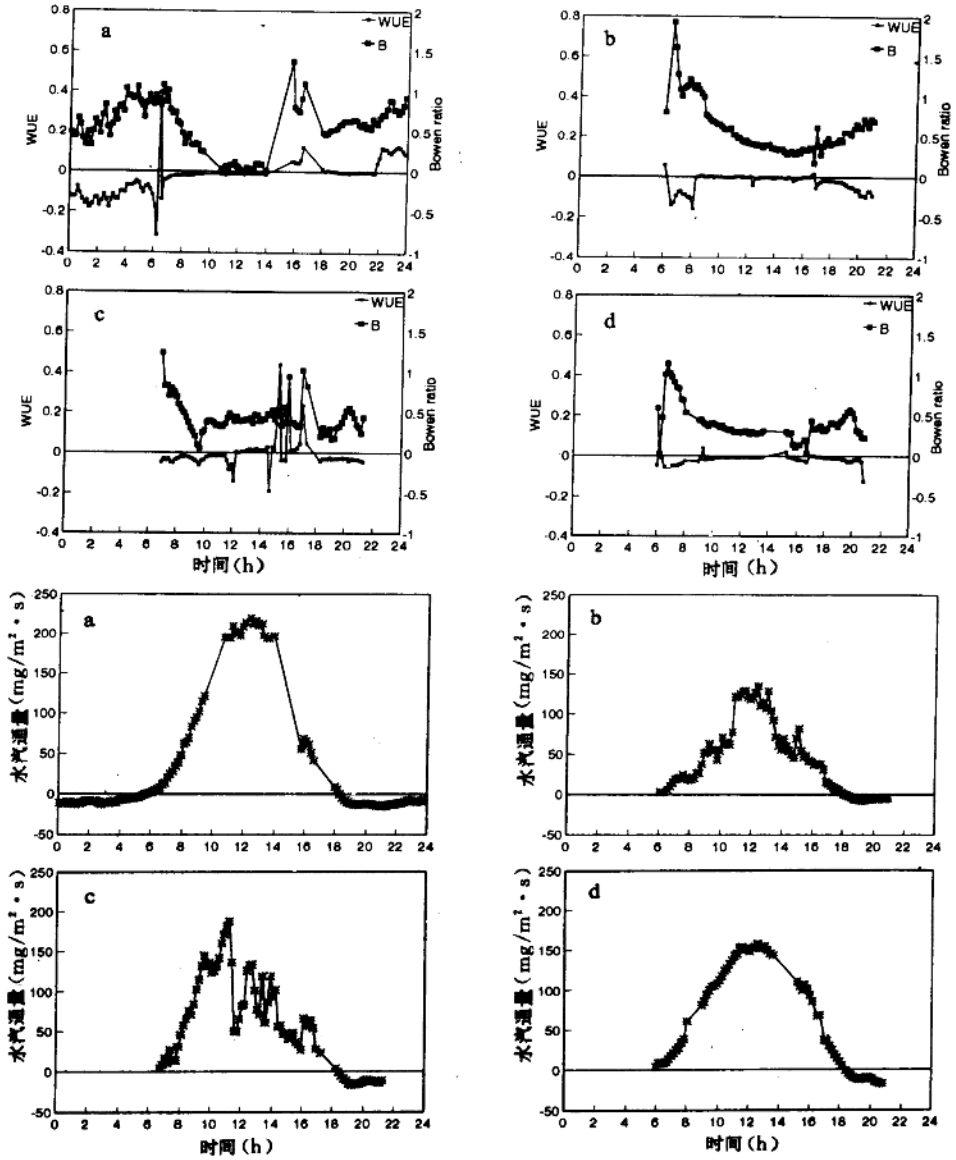


图1 冬小麦田群体蒸腾速率与群体水分利用效率
 (1996.a. 5月21日;b. 5月22日;c. 5月23日;d. 5月24日。河北栾城)

交换:

$$\Phi = \frac{\Delta C}{\Sigma r} \quad (20)$$

式中 Φ 是扩散物质的流(单位面积单位时间分子数), ΔC 是外界空气与细胞反应场所之间的浓度差, Σr 是扩散阻力之和, 可转换为光合作用表达式:

$$P = k \frac{\Delta \text{CO}_2}{r_a} + r_i + r_m \quad (11)$$

式中 P 为 CO_2 净吸收率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); ΔCO_2 浓度梯度; r 为 CO_2 扩散阻力, r_a 为边界层阻力, r_i 为气孔阻力, $r_m = r_i + r_w + r_p$ 代表叶肉阻力。

CO_2 和水汽进入气孔通道, 我们表示于图 2 中。

根据微气象学原理, 扩散速度与分子量的平方根成反比, 水汽的扩散速率是 CO_2 的 1.5 倍; 反之 CO_2 的扩散系数是水汽的 0.64 倍。 CO_2 通过叶肉细胞表面及各反应位点之间的阻力非常显著。但对于水汽而言非常微弱甚至可忽略不计; 特别在水分充分的农田内, 植株体阻力趋近于零。相当于导电性能良好的金属对于电流的阻力一样。因此水分的传输相应表达式:

$$W = k' \frac{\Delta \text{H}_2\text{O}}{r_a + r_s} \quad (22)$$

上式中总阻力 $r_m \rightarrow 0$ 。由于分子扩散系数的倍数联系, 水分利用效率的简化方程表述为:

$$P/W = \frac{0.64 \Delta \text{CO}_2 (r_a + r_i)}{\Delta \text{H}_2\text{O} (r_a + r_i + r_m)} \quad (23)$$

r_m 的数值由各类作物发育期、植株体水热状况而异。一些作者提出 $r_m > (r_a + r_i)$ 。因此气孔部分关闭所降低的蒸腾量就大于所减低的光合作用, 因此处于轻度水分胁迫, 部分气孔关闭, 使植株体内水分扩散也得到一定阻力 $r_m \text{H}_2\text{O}$ 。同时加大 CO_2 梯度, 形成指向冠丛的较大 CO_2 浓度差, 形成光合作用的增益效应而抑制水分消耗。这就是与内在生理机制相联系的自然抗御蒸腾的物理基础。

图 2(a)、(b) 表示了气孔尺度 CO_2 和水分传输的阻力和调控机制。光合作用进行对叶片中 CO_2 浓度梯度和传输阻力^[31]。

VE 为上表皮; PP 为栅状薄壁细胞; SP 为海绵薄壁细胞; LE 为下表皮; NPC 为不含叶绿素无光合活性的细胞; BL 为叶面境界层。

在进行光合作用时, 从外界空气(C_a)经由细胞间空气(C_i)到最低浓度的进行羧化作用场所, 形成 CO_2 的浓度梯度。在叶片的胞间系统中, CO_2 并非仅来自外界, 也来自细胞; 后者是作为线粒体呼吸(C_{RM})和光呼吸(C_{RL})的结果而产生的。所指的运输阻力是边界层阻力 r_a , 气孔阻力 r_i , 在胞间系统的扩散阻力 r_i , 和与 CO_2 在细胞壁和原生质中液相的溶解和运转过程相伴随的阻力(r_w)(r_p)。 r_x 代表“羧化(激发)阻力”。显然 CO_2 分子克服的阻力比水分子逸出阻力大得多。

气孔对水和 CO_2 的协调是非常有效的, 图 2(b) 为气孔对于 CO_2 进入和水分逸出的调控机制。代谢调控(metabolic regulation)也包括内源节律的影响; 也接受组织水势(tissue φ)和 CO_2 浓度感应(CO_2 Sensor)的反应, 而作用于保卫细胞, 大气直接作用效应包括温、湿度效应, 透过大气的光效应等。

气孔水平上研究水分与光合效率,需考虑气孔下腔和空气(叶面境界层附近)CO₂ 和水蒸汽的浓度梯度;气孔开放,界面阻力和叶肉阻力需要复杂的方程式处理。Fischer 和 Tuner(1978),Nober(1980)和 Osmond 等(1980),以及其他许多研究设计了不同类型的模式,目前尚无较完善形式。我们希望在水分研究中能注意到气孔尺度的 H₂O 和 CO₂ 的耦合机制,用 CO₂ 分析仪和 LCA-4 System、LI6-200、气孔计等同步观测,有助于初步阐发某些机制,解析这些关节位点机制问题。

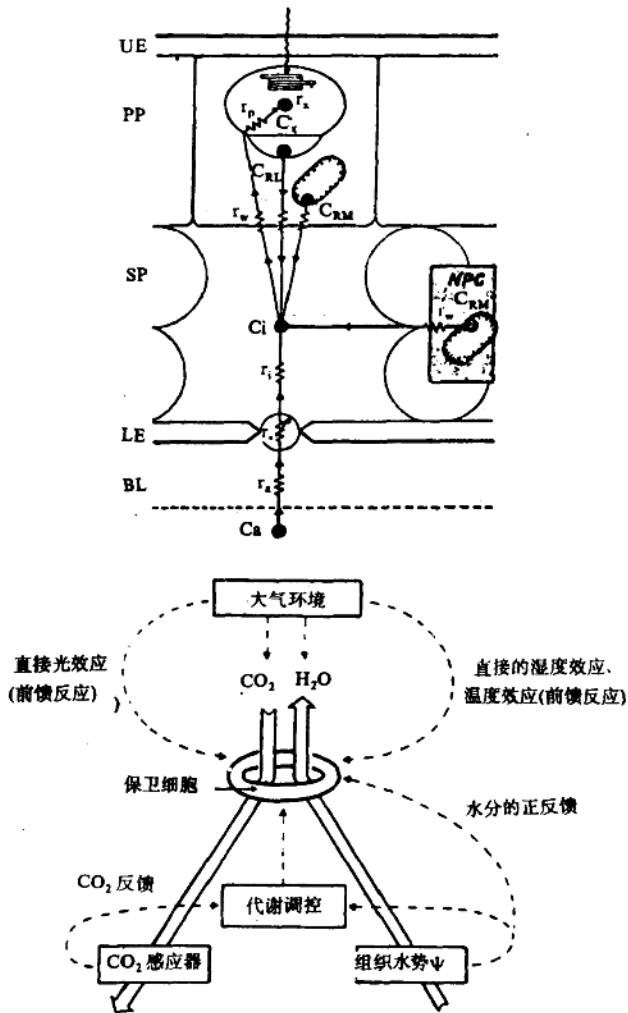


图2 光合作用和蒸腾作用进行时气孔对水分和 CO₂ 传输的反应机制