

中国科学院重大课题
《资源生态环境网络研究》

项目成果之一

作物与水分关系研究

中国科学院台站网络《农作物耗水量研究》课题组

中国科学技术出版社



主 编：谢贤群 于沪宁

副主编：袁小良

编辑委员：(以姓氏笔画为序)

于沪宁 王会肖 袁小良 谢贤群 颜春起

著者：(以姓氏笔画为序)

于沪宁	王会肖	王 宏	王绍仁	王芳玖	王积强
王树森	邓根云	由懋正	卢振民	孙仁华	李建京
李绍良	李宝庆	李海松	刘 萱	阮立山	杜占池
杨宗贵	杨树栋	孟 凯	陈国良	陈有君	陈纪卫
程维新	宋炳煜	张永忠	张兴权	张喜英	林贤超
欧阳竹	赵克学	赵家义	周凌云	周武锋	胡春胜
袁小良	梁春祥	姚贤良	郭宝安	徐学选	费维温
傅抱璞	韩润娥	谢贤群	颜春起	穆兴民	格里森

绘图：甄淑平

中国科学院台站网络《农作物耗水量研究》课题组

组 长：谢贤群 于沪宁

前 言

水是农作物生长发育不可缺少的重要条件之一，几乎作物生长发育的全过程都和水密切相关。水不但是作物吸收各种矿物营养元素的传输载体，而且作物的一切生理生化反应一般都要在水的参与下才能完成。水对作物产量的影响，主要表现在对光合作用和呼吸作用的影响上。如果土壤中有效水分逐渐减少，将会引起作物根部吸水困难和植物体内水分下降，气孔逐渐关闭，从而导致 CO_2 难以进入植物体内，并造成光合作用的减弱，而呼吸作用则有增强的趋势，因而水分不足最终将导致作物产量的下降。事实上，在湿润的土壤中，由于作物生长的某些时段内水分供应不足，作物产量很难达到由太阳辐射和温度所决定的光温生产力。

在作物生长发育过程中，光合作用直接耗用的水分不足农作物耗水量的1%，99%以上的水分是被作物蒸腾和棵间土壤蒸发掉了。前者是经过作物气孔扩散进入大气中，后者是不经过植物体内，直接由土壤和植物体表面扩散进入大气的。因此，农作物的总蒸散（包括作物蒸腾和棵间蒸发）就成为评价作物生长发育过程中用水是否科学、是否经济合算的依据。目前世界上农作物最高水分利用效率的实验结果是：高粱每1kg干物质的耗水量为300kg，小麦550~600kg，玉米350~400kg。虽然以上数据只是小面积的实验结果，一般条件下难以达到，但它为节约用水、合理用水和提高农作物水分利用效率描绘了美好的前景。

作物耗水量的多少是由许多因素决定的。当土壤水分不成为作物生长发育的限制因素时，气象因子、土壤给水性能和作物的生物学特性以及农业技术措施等便成为决定耗水量多少的主要因子。不同种类栽培作物的耗水特性是不同的。在作物生长环境相似条件下，高光合效率的 C_4 作物与低光合效率的 C_3 作物比较，依据实验资料， C_3 作物的蒸腾系数（制造1g干物质所消耗的水分g数）平均比 C_4 作物大一倍左右。因此，由于耗水特性的明显差异，不同作物的水分利用效率和耗水量是不同的。在作物的不同发育阶段耗水量也是不同的。

农作物的总蒸散是在土壤—作物—大气系统内进行的一个连续过程，这个过程与土壤水分运动、作物的水分传递、蒸发面与大气间的水汽交换密切相关，也与太阳辐射到达量、温度和空气湿度以及风等气象因子紧密相联系。只有对这些复杂的运动过程进行综合研究，才能对农作物的总蒸散取得满意的结果。

当前测量和计算农作物总蒸散的方法很多。有水量平衡法、微气象学方法、植物生理学方法等等。这些方法都有各自的特点和优缺点，采用什么方法测量作物耗水量是需要慎重考虑的问题。应该特别指出，采用的测定方法不同，所取得资料一般是难以作对比分析的。此外，观测试验场址的选择应考虑下垫面的均一性，否则所得资料也难以对比。仪器的选择、安装与定标，仪器的结构、性能与精确度，都要有统一标准，同时要考虑联合国

FAO 所采用的各类标准,以便我们的测量结果能进行世界性的对比。总之,取得精确可靠的观测数据,是开展农田作物耗水量研究的基础工作。研究工作伊始,就要给予极大的注意。

本文集汇集了中国科学院所属各试验站有关农田作物水分利用与耗水量的初步研究成果,今后还将陆续发表这方面的试验研究结果。本文集中不妥之处,请读者不吝赐教。

左大康

目 录

前言	左大康
----	-----

第一部分 作物耗水量与农田灌溉

1. 农田作物群体二氧化碳通量密度与水分利用效率研究	于沪宁 刘 莹 李建京 (1)
2. 冬小麦产量与耗水量的关系	袁小良 王会肖 张喜英 由懋正 (10)
3. 华北平原农业措施的节水效应与发展方向	于沪宁 李海松 李建京 (19)
4. 作物耗水特性与农业节水	程维新 (28)
5. 春玉米耗水量试验研究	赵家义 程维新 谢贤群 张兴权 欧阳竹 (37)
6. 封丘地区小麦低定额灌溉试验研究	周凌云 阮立山 (45)
7. 黄土区旱地春小麦农田水分生态特征与改善途径	穆兴民 陈国良 郭宝安 赵克学 费维温 (52)
8. 夏玉米田机械覆盖小麦秸秆节水效应研究	王绍仁 韩润城 张喜英 胡春胜 (62)
9. 不同土壤水分条件下冬小麦的生理生态效应及干旱程度判别	于沪宁 邓根云 卢振民 李建京 (66)
10. 黄淮海平原农田灌溉率与粮食产量关系的研究	孙仁华 (74)

第二部分 土壤农业水文特征及其调控

11. 冬小麦根系发育及吸水图式的研究	由懋正 王会肖 张喜英 袁小良 (84)
12. 土壤水分动态模拟与调控	王树森 (94)
13. 丘陵红壤饱和导水率的空间变异	梁春祥 姚贤良 (103)
14. 赵光地区耕作黑土农业水文条件研究	颜春起 (119)
15. 农田黑土墒情调控的基本途径和措施	孟 凯 颜春起 (140)
16. 不同灌溉条件下农田水量转化关系研究	李宝庆 张永忠 赵家义 (147)
17. 技术措施对旱作春小麦水分生产率影响效应的综合研究	穆兴民 陈国良 赵克学 郭保安 徐学选 (161)
18. 典型草原栗钙土的水分动态与大针茅群落生物量的关系	陈有君 李绍良 王芳玫 (169)

第三部分 作物水分观测与实验的技术方法

19. 农田蒸发耗水量试验研究	谢贤群 (181)
-----------------	-------------

20. 农作物典型年降雨量的计算与研究.....孙仁华 (193)
21. 农田蒸发量的测定.....王积强 (204)
22. 羊草和无芒雀麦叶片光合和蒸腾作用日进程特性的
初步研究.....杜占池 杨宗贵 (213)
23. 一种测量土壤水势的简易技术—滤纸法.....宋炳煜 格里森 (225)

第四部分 土壤—作物—大气系统 (SPAC) 动态模拟与数学模式

24. 作物水分亏缺诊断研究综述.....王 宏 (229)
25. 作物水分亏缺诊断的研究
 - I. 叶水势与气孔导度.....王 宏 (253)
26. 作物水分亏缺诊断的研究
 - II. 冠层温度和农田蒸散.....王 宏 (271)
27. 土壤—作物—大气系统 (SPAC) 水流动态模拟与实验研究
 - I. 模型的建立与参数的确定.....卢振民 (287)
28. 土壤—作物—大气系统 (SPAC) 水流动态模拟与实验研究
 - II. 系统中水流运动阻力的确定.....卢振民 (304)
29. 土壤—作物—大气系统 (SPAC) 水流动态模拟与实验研究
 - III. 综合模型与模拟研究.....卢振民 林贤超 陈纪卫 (323)
30. 叶片气孔对环境因子的响应与植物群体水分平衡
的现象模拟.....刘 莹 于沪宁 (359)
31. 叶片导度对环境水分状况响应的模拟.....刘 莹 杨树栋 (368)
32. 不同水分条件下冬小麦灌浆过程的数学模型.....王会肖 袁小良 韩润斌 (379)
33. 土壤—植被—大气系统中水分散失的模拟研究.....周武锋 傅抱璞 (386)

Contents

Preface **Zuo Dakang**

Part I

Crop Water Consumption and Field Irrigation.

1. A Study on the CO₂ Flux Density and Water Use Efficiency of Crop Community at Field
Yu Huning, Liu xuan and Li Jianjing (1)
2. The Relationship between Winter Wheat Yield and Water Consumption
Yuan Xiaoliang, Wang Huixiao, Zhang Xiying and
You Maozheng (10)
3. Developing Trends and Water-saving Effect of Agricultural Measures on North China Plain
Yu Huning, Li Haisong and Li Jianjing..... (19)
4. The Features of Water Consumption of Crops and Water-saving for Agriculture
Cheng Weixin..... (28)
5. A Study on Spring Maize Water Consumption
Zhao Jiayi, Cheng Weixin, Xie Xianqun,
Zhang Xingquan and Ouyang Zhu..... (37)
6. A Research on the Experiment of Low Norm Irrigation for Wheat in Fengqiu Region
Zhou Lingyun and Ruan Lishan (45)
7. Ecological Features and Improving Approaches of Moisture in the Spring Wheat Field on Dryland in the Loess Zone
Mu Xingmin, Chen Quoliang, Guo Baoan, Zhao Kexue and
Fei Weiwen (52)
8. A Study on Water-saving Effect of Corn Field Covered with Wheat Straw by Machine
Wang Shaoren, Han rune, Zhang Xiying and
Hu Chunsheng (62)
9. The Judgement of Physical and Ecological Effects and Dry Degree of Winter Wheat under Different Soil Water Conditions
Yu Huning, Deng Genyun, Lu Zhenmin and
Li Jianjing..... (66)

10. A Study of Relationship between the Percentage of Irrigated Field and the Yield of Grains in Huang-Huai-Hai Plain
Sun Renhua (74)

Part II

- Agro-hydrological Characteristics for Soil and Its Regulation and Control
11. The Study on Winter Wheat Root Development and Soil-water Absorption Patterns of Roots
You Maozheng, Wang Huixiao, Zhang Xiying and
Yuan Xiaoliang..... (84)
 12. Modelling and Management of Soil Water Content
Wang Shusen..... (94)
 13. Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity of Red Soil in Hill Region
Liang Chunxiang and Yao Xianliang (103)
 14. The Research of Agricultural Hydrologic Conditions on Farming Black Soil in Zhaoguang Region
Yan Chunqi (119)
 15. The Basic Pathway and Measurements on the Control and Regulation to the Black Soil Moisture Content in Farmland
Meng kai and Yan Chunqi (140)
 16. A Study on Transformation Relation of Field Soil Moisture in Different Irrigating Conditions
Li Baoqing, Zhang Yongzhong and Zhao Jiayi..... (147)
 17. A Comprehensive Study on the Effects of Agricultural Measures on Water Productive Ratio of the Spring Wheat in Dry Farmland
Mu Xingmin, Chen Guoliang, Zhao Kexue , Gao Baoan and
Xu Xuexuan (161)
 18. The Relationship between Water Dynamic of Chestnut Soil and Biomass of *Stipa Grandis* Community on Typical Grassland
Chen Youjun, Li Shaoliang and Wang Fangjiu (169)

Part III

Methods for Measurement and Experiment of Crop Water

19. The Experimental Study of Field Evapotranspiration Measurement
Xie Xianqun (181)
20. The Calculations and Studies of Typical Annual Rainfall for Crops

- Sun Renhua..... (193)
21. Measurement of farmland Evaporation
Wang Jiqiang..... (204)
22. Preliminary Studies of the Characteristics of Diurnal Courses of Photosynthesis and Transpiration for the Leaves of *Aneurolepidium Chinese* and *Bromus Inermis*
Du Zhanchi and Yang Zonggui (213)
23. A Simple Routine Method for Measuring Content of Soil Water Potential
Song Bingyi and I. Greacen (225)

Part IV

Dynamic Simulation and Mathematical Model in Soil-Plant-Atmosphere Continuum

24. A Review on Methods of Crop Water Stress Determining
Wang Hong (229)
25. Studies on Methods for Determining Crop Water Stress I. Leaf Water Potential and Stomatal Conductance
Wang Hong (253)
26. Studies on Methods for Determining Crop Water Stress II. Canopy Temperature and Evapotranspiration
Wang Hong (271)
27. Simulation and Field Study of Water Transport in Soil-Plant-Atmosphere Continuum
I. Model and Parametric Calculations
Lu Zhenmin (287)
28. Simulation and Field Study of Water Transport in Soil-Plant-Atmosphere Continuum
II. The Resistance in SPAC System
Lu Zhenmin (304)
29. Simulation and Field Study of Water Transport in Soil-Plant-Atmosphere Continuum
III. Model and Simulation
Lu Zhenmin, Lin Xianchao and Chen Jiwei (323)
30. Phenomenal Simulation of the Responses of Stomatal Conductance to Environmental Factors and Water Status in Community
Liu Xuan and Yu Huning (352)
31. The Simulation of Leaf Conductance Responses to Changes in Environmental Water Status

第一部分 作物耗水量与农田灌溉

1. 农田作物群体二氧化碳通量密度 与水分利用效率研究

于沪宁 刘 萱 李建京

(中国科学院 北京农业生态系统试验站)

摘 要

本文介绍了用二氧化碳通量测量系统,通过空气动力学技术,测定农田二氧化碳流,以确定水分利用效率。

计算 CO_2 通量密度的通式表示为:

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

式中, $\frac{\partial c}{\partial z}$ 为 CO_2 浓度的梯度; f 为 CO_2 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 CO_2 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_r):

$$E_r = R_n - G - \rho C_p \frac{T_a - T_s}{r_s}$$

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_s 为冠层温度, r_s 为热量传导的边界层阻力。

水分利用效率 $WUE = F_c / E_r$

根据田间实测冬小麦群体水分利用效率的长期与短期变化趋势分析, WUE 的变化主要是由于群体 CO_2 净同化速率变化所致,尤其反映在长期变化上,因为群体 CO_2 净同化率对于环境因子变化的响应比群体蒸腾速率的响应更为敏感。

作物与水分关系一直为人们所关注。由于水资源日益紧缺和愈来愈成为农业生产的限制因素,因此研究水分利用效率与干物质生产之关系,以期实现提高水分利用效率和节约水资源,亦为本文的研究目的。

作物消耗水分的主要途径是叶片水分的蒸腾散失,与光合作用相偶联,其变化决定了水分利用效率的变化。在一定时段内,单叶片的二氧化碳同化量与水分蒸腾散失量之比,或单叶片的二氧化碳净同化率与水分蒸腾速率之比,常用来表征作物水分利用效率。Bierhuizen 和 Slatyer(1965)^[1] 用叶片光合作用和蒸腾作用来求取水分利用效率, Farqu-

har(1980)^[2]根据控制系统的最适理论,结合实验测定,探讨了叶片最佳水分利用效率问题。Bierhuizen^[3]、Rowson^[4]比较了几种不同种类作物叶片水分利用效率的变化及其与环境 and 生理条件的关系。在生产实践中,群体的水分利用效率比单叶更接近实际,可表征大田水分利用效率。本文根据实测的冬小麦田的群体 CO_2 净同化速率和群体蒸散速率,求取群体水分利用效率,并进一步探讨与环境因子的关系及其随生育期的变化规律。

一、实验研究的基本方法

本试验于1988年在北京大屯农业生态系统试验站试验田进行,场地对于主风向有200米以上的来流路径,基本满足高度为2米以内的空气动力学方法测量的要求。供试冬小麦品种为京花3号。在冬小麦返青后,进行连续系统观测。

我们采用国际上 CO_2 基本观测站通用的“非色散红外分析”方法^[5]的连续分析测定大气中 CO_2 浓度和不同高度的浓度差。红外分析器(NDIR)有多种,我们采用 QGS-08 型红外分析器监测。并建立了气路系统、电路系统,为消除误差设计了翻转测量控制转换器^[6,7]。在野外观测工作室,以高纯度 N_2 调整零点,以两个浓度差小于 50ppm 的标准气调整 $0 \pm 50\text{ppm}$ 挡的零点和跨度。连续工作 32 小时和 78 小时以后进行复核。一般作物冠层附近 CO_2 浓度只差几个 ppm,要准确地检测出两个高度的 CO_2 浓度差,关键是需选择优异的主机并对其性能进行复核。

为此,我们用满足于空气动力学法测量精度(0.01ppm)的 QGS-08 型红外分析器测定 CO_2 浓度差 ΔC 。两高度中最低高度距小麦冠层 30~40cm,另一观测高度距作物冠层 1.30~1.50m,在各发育期随小麦高度增长进行调节。用 DHMZ 型通风干湿表测定 ΔT ,分辨率要求达到 0.1°C ,在两个观测高度上来回观测 6 次,分别取其平均值。用风速表测取两高度风速,各类仪器均经过检验标定。

每隔一定时段测取冬小麦群体的叶面积指数,用分段法,将叶片分为矩形与三角形两部分,测其长、宽、高求得平均单株叶面积,然后推算群体叶面积指数。

二、麦田群体二氧化碳通量的计算方法

在中性条件下,对于植株均匀的粗糙表面,风速的对数廓线可以表示为:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z+d}{z_0} \right) \quad (1)$$

式中, $\bar{u}$ 为平均速度; u_* 为摩擦速度; k 为卡门常数; d 为零平面位移; z_0 为粗糙高度; z 为距地面高度。 d 和 z_0 为任意的独立常数, $z \geq d + z_0$ 方程才有意义。 d 可由风速随高度分布廓线求取。本文用(1)式并结合经验计算法确定各项参数。经验表明, d 和 z_0 与植被高度 H 有关。Monteith(1973)^[8]提出下列线性关系,即 $d = 0.69H$ 。 z_0 常被假设为 H 的 1/10。当 d 和 z_0 为已知时,冠层上面的整个廓线可由一个高度上的 $\bar{u}$ 值构成,其它高度上的值可由下式导出。

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z+d}{z_0} \right) \quad (2)$$

$$u_* = \frac{ku(z)}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} = C_u \bar{u}(z) \quad (3)$$

C_u 称为曳力系数。

计算二氧化碳通量密度(F_c)的通式可以表示为:

$$F_c = f k^2 (z-d)^2 \frac{\partial u_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} (\phi_m)^{-1} \frac{k_0}{k_m} \quad (4)$$

式中, $\frac{\partial c}{\partial z}$ 为二氧化碳浓度的梯度, f 为二氧化碳从体积浓度(ppm)转换到不同温度下单位体积重量的系数, ϕ_m 为稳定度订正函数, k_0/k_m 为二氧化碳交换系数(k_{c0})与动量交换系数(k_m)之比, 均为 Ri (Richardson 数) 与 L (Monin-Obukhov 长度) 的函数。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \cdot \phi_m = \frac{C_u \bar{u}(z) \phi_m}{kz} \quad (5)$$

(5) 式中, ϕ_m 为动量稳定度函数, 与 ϕ_v 、 ϕ_H 、 ϕ_c 即水汽、热量、二氧化碳的稳定度函数有所差异, 因水汽、热量、动量交换系数数值上是否相等长期以来有争议。

根据 Monin-Obukhov 理论, ϕ 由下式确定:

$$\phi = \left(1 - a \frac{z-d}{L}\right)^{-n} \quad (6)$$

其中 L 为 Monin-Obukhov 长度, 许多推导均指出, $\frac{z-d}{L}$ 与 Ri 是等价的^[9, 10]。

一些学者推导出 ϕ 的许多形式^[9-12]。Dyer 和 Hicks (1970) 断定^[10], 虽然在不稳定条件下, 但在 ϕ_v 和 ϕ_H 之间几乎无差异。

根据 W.O. Pruitt (1973)^[13] 的模式提出, 不稳定层结下 $\phi_m = (1 - 16R_i)^{-1/3}$, 稳定层结下 $\phi_m = (1 + 16R_i)^{1/3}$ 。不稳定层结 $k_v/k_m = 1.13(1 - 60R_i)^{0.074}$, 稳定层结 $k_v/k_m = 1.13(1 + 95R_i)^{-0.11}$, 假设 $k_w = k_0$ 。本文以此计算冬小麦冠层 CO_2 通量密度 F_c 。

三、群体蒸腾速率的计算

用 Brown-Rosenberg 模式估算群体蒸腾速率(E_T)^[14], 即:

$$E_T = R_n - G - \rho C_p (T_a - T_s) / r_s \quad (7)$$

式中 R_n 为净辐射, 用澳大利亚 CN-1 型净辐射表测定, 观测高度距冠层 1.5m, 每次读 4 个数取其平均值。G 是土壤热通量, 可以认为数值上等于漏过冠层的净辐射, 随叶面积指数(F)的增大而减小, 其减小的程度大体符合比耳-朗伯定律, 即 $G = R_n \exp(-K \cdot F)$ ^[15], (此处 K 为消光系数)。 ρ 为干空气密度, 取 $\rho = 1283 + 3.9T_a$ ($g \cdot m^{-3}$)。 C_p 为空气定压比热, 取 $C_p = 1.0101T$ ($g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)。 T_s 为冠层温度, 在一定高度(距地面约 1m)与水平面成 45° 角测取, 需向光或逆光方向多次读数取其平均。 T_a 为一定高度上的气温。 r_s 为热量传输的边界层阻力, 一般分为两部分求算, 即 $r_s = r_{sm} + r_s$, r_{sm} 为植被的动量传输

的边界层阻力, $r_{a,m} = \left(\ln \frac{z-d}{z_0} \right)^2 / k u(z)$ [16], 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 [17], $r_a = 6.266 \left(\frac{u(z)}{r_{a,m}} \right)^{-1/3}$; 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 (7) 式的适用性讨论, 详见文献 [18]。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:

$$WUE = F_n / E_t \quad (8)$$

水分利用效率在数值上等于同时段同面积上农田小麦群的二氧化碳通量密度与水汽通量密度(仅蒸腾水汽通量密度)之比; 用生理学观点看则是净同化速率与蒸腾速率之比。这里农田土壤棵间蒸发量与土壤中二氧化碳逸失进入近地层空气暂不予考虑。

四、结果分析

(一) 群体水分利用效率的变化

冬小麦群体水分利用效率(WUE)从拔节期(4月下旬)到乳熟期(6月上旬)随生育期的变化表示于图 1-1。由图可知, 10:00 时和 14:00 时观测值一般逐日变化都很大, 可从趋近于零增至 0.05。在各个生育阶段中, 群体水分利用效率虽有高有低, 但没有突出的变化, 显然, WUE 随生育的长期变化主要并非生育期差异的影响, 而是由于环境条件的变化, 导致群体 CO_2 净同化率和群体蒸腾速率变化的结果。从 6 月初开始, 冬小麦进

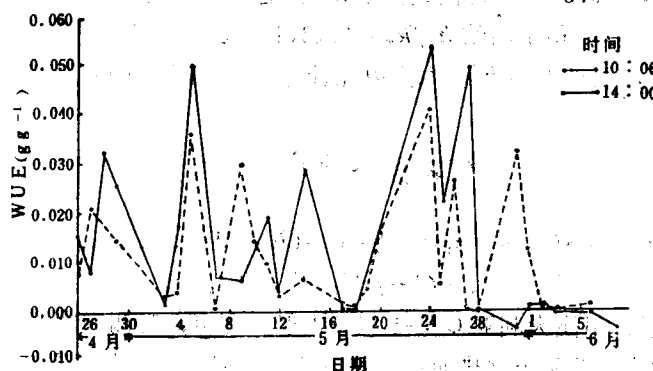


图 1-1 冬小麦田群体水分利用效率(WUE)的长期变化

入乳熟期, WUE 明显下降, 数值都很低, 由于群体净同化率为负, 即 CO_2 通量方向由冠层流向大气, 这时 WUE 小于零, 变化幅度也很小。这表明乳熟期是 WUE 的低值期, 在此期间环境因子的变化与 WUE 关系不大, 作物生理因素影响往往起主导作用。

冬小麦群体水分利用效率在一日之间存在着明显日变化,见图1-2。比较灌浆期5月份两天的观测数值可以发现,灌浆后期水分利用效率日趋降低,至6月初开始进入乳熟期, WUE 明显下降,数值都很低,而且有时小于零,这是由于 CO_2 流指向大气净同化率为负值所致。灌浆期一日之间变幅变化较大,从早晨7时开始,随着时间的推移, WUE 有不断降低趋势,至日落前后为零逐渐转为负值。这和太阳辐射、根系水分供应、气孔活动等均有密切关系。

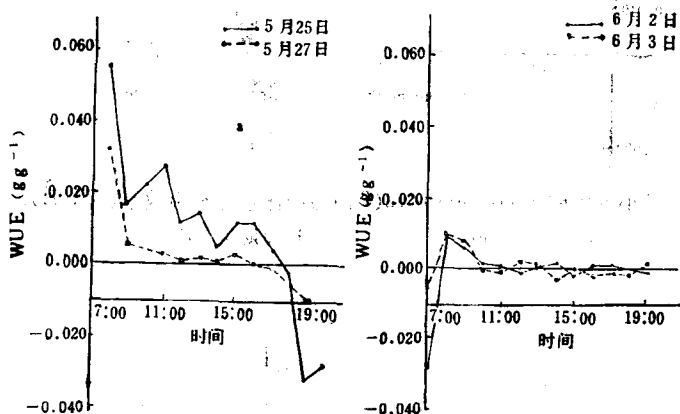


图 1-2 冬小麦田群体水分利用效率(WUE)的日变化

上述曲线变化由于一天中群体的 CO_2 同化速率和蒸腾速率所制约。一般白昼蒸腾速率保持正值,即水分由植株逸向大气,向净同化速率愈到生长后期愈小,甚至为负值, CO_2 流也由植株指向大气,因此 WUE 即使在白天也可表现为负值。

(二)水分利用效率与 F_n 和 E_t 的关系

由前分析结果表明,在田间自然条件下,冬小麦群体在不同生长期,水分利用效率有明显的长期与短期变化;这表明不同发育期的 CO_2 净同化率和水分蒸腾速率会有较大的差异。按水分利用效率的概念与计算通式,若蒸腾速率(E_t)恒定时,则 CO_2 的净同化速率(F_n)的增大将使 WUE 直线上升;反之, WUE 则直线下降。设若 F_n 不变,则 E_t 与 WUE 呈反比。但在自然条件下,外界环境和生理因子,如光强、温度、湿度、叶片水分状态,叶龄等改变时,既会影响 F_n ,也会影响 E_t ,两者不可能处于单调变化状态。而且, WUE 数值较高时,并不一定 F_n 就高, E_t 就低;所以,在实际情况下,田间小麦群体的 F_n 与 E_t 复杂变化综合影响着 WUE 。

为探讨农田自然条件下 F_n 与 E_t 对 WUE 变化的影响程度,将 WUE 长期与短期变化与相应的 F_n 、 E_t 变化分别绘于图1-3、图1-4。

从长期的逐日变化看,除少数点子外,10:00时和14:00时 WUE 值均随 F_n 的增加而呈明显增加的趋势,见图3a。而 WUE 随 E_t 的增加并非表现为下降趋势,即 WUE 与 E_t 的实际变化没有一定的联系,见图4a。10:00时 E_t 值大多在 $8.0m \cdot mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 左右的范围内变化,14:00时的 E_t 虽然比10:00时的变化范围要大,但大多数值在 $15m \cdot mol \cdot$

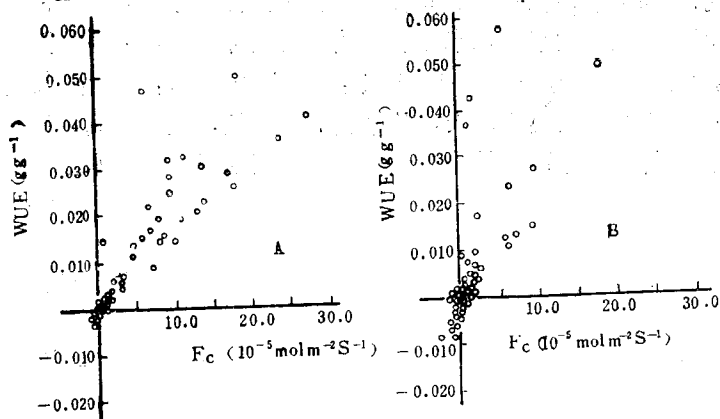


图 1-3 冬小麦田群体 CO_2 净同化率(F_c)与群体水分利用效率(WUE)的关系
a. 长期变化值 b. 短期变化值

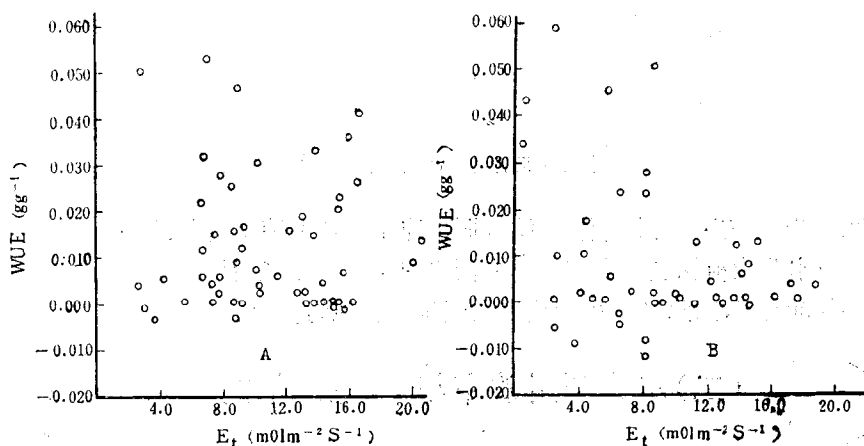


图 1-4 冬小麦田群体蒸腾速率(E_t)与群体水分利用效率的关系
a. 长期变化值 b. 短期变化值

$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右变化。在这两个时刻 F_c 的变化范围很大，但总的来说呈增加趋势，因此 WUE 的变化范围大，且随 F_c 的增加就有如图 3a 中所出现的直线上升趋势。又因上午的 E_t 值相应要低，则 WUE 随 F_c 直线增加的斜率就相应要大些。在不同生长期中，逐日观测时刻(10:00 和 14:00 时)各对应的 E_t 大多数的变化幅度没有 F_c 的大，在 E_t 高时， F_c 可以很高，也可以很低，没有 E_t 那么有规律可循。田间条件下，白天某一时刻的 WUE 变化，在很大程度上取决于 F_c 的变化。而 F_c 的变化，与 E_t 一样是受生理生态因子变化影响的结果，只不过两者的过程、机制不相同，各按不同的方式对环境因子变化作出响应。由于 CO_2 同化过程极为复杂，涉及到叶片叶绿体的活性， CO_2 同化部位的 CO_2 和 O_2 的浓度等。根据上述这些观测得到的结果，进一步分析环境因子对 E_t 与 F_c 的限制作用，这将是调节不同环境条件下的 F_c 与 E_t ，为有效地提高农田作物水分利用效率，提供科学依据。

从短期变化看,从清晨到傍晚, WUE 随 F_s 的增加也有增加的趋势,见图3b。尤其以灌浆期更为明显。而对应的 WUE 与 E_s 在5月25日随 E_s 的上升有一定的下降趋势,见图4b。这主要是一天中 F_s 的变化幅度不大,而 E_s 的变化范围大,则 E_s 对 WUE 的控制程度就大。其余三天的观测值, E_s 的变化对 WUE 的影响无一定规律性趋势,见图4b。特别是乳熟期,在 E_s 变化的很大范围内, WUE 的数值都很低,这主要是由于 F_s 的值低所致。表明在小麦灌浆后期,光合作用明显降低,但营养物质由茎秆和叶片中仍向籽粒输送,此时蒸腾耗水量明显减少,减少田间水分供应有利于节水。

讨 论

用非色散红外分析器作主机,设计类似波文比式翻转观测采集分析系统,观测农田冠层以上2个高度 CO_2 浓度变化及其通量密度,可取得较为满意的结果。据此可以分析通量密度变化与净同化率,估算水分利用效率。

本文就实测与计算结果,对麦田群体不同发育期水分利用效率作了一些初步分析,认为麦田 WUE 的变化,随生育期变化的长期趋势主要依赖于 CO_2 净同化速率的变化,短期的逐日变化主要受 F_s 制约,也可能 E_s 起重大影响。要提高水分利用效率,必须从环境生理生态过程的角度深入分析,对相互偶联的 F_s 与 E_s 结合环境诸因子作综合研究,才能进一步揭示水分利用规律及提高水分利用效率的途径。

参 考 文 献

- [1] Bierhuizen J F, Slayter R O. Effects of atmospheric concentration of water vapor and CO_2 in determining transpiration photosynthesis relationships of cotton leaves. Agric Meteorol, 1965, 2: 259~270.
- [2] Farquhar G D, Schulze E D, Koppers M. Aust J Plant Physiol, 1980, 7: 315~327.
- [3] Bierhuizen J F. In: Lange O L, Kappen, Schulz E D, ed. Water and plant life. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1976, 421~431.
- [4] Rawson H W, Begg J F, Wood R G. Planta. 1977, 134: 5~10.
- [5] WMO. Project on research and monitoring of atmospheric CO_2 , Report No. 3.
- [6] Yu Huning, Liu Xuan. A study of the CO_2 flow in a crop field. Proceedings of International Symposium on Agricultural Meteorology, China Meteorological Press, 1989.
- [7] 刘萱, 于沪宁. 近冠层上大气 CO_2 浓度梯度的监测技术. 植物生理学通讯, 1986 (2).
- [8] Monteith J L. Principles of environmental physics. London, Edward Arnold, 1973.
- [9] Haugen D A. Workshop on micrometeorology. The American Meteorological Society, 1963.