土壤水分对夏玉米农田 CO_2 通量和群体水分利用率的影响*

杨晓光① 于沪宁
(中国农业大学) (中国科学院地理研究所)

摘 要: 利用 CO_2 分析系统, 配合波文比装置, 在夏玉米全生育期连续测定农田冠层瞬时 CO_2 浓度差及农田小气候特征量, 并计算了农田冠层瞬时 CO_2 通量密度、潜热通量和群体水分利用率。结果表明, 群体光饱和点位移是受土壤水分影响的一个辐射能量范围, 充沛的太阳辐射能量只有充足水分条件的耦合, 才能发挥生产力效益; 群体水分利用率与 0～60 cm 土层土壤平均相对含水率呈负相关, 土壤相对含水率在 30.3%～80% 范围内, 水分利用率随相对含水率的增加而降低。

关键词: 夏玉米; 土壤水分; 二氧化碳通量; 群体水分利用率

农田中 CO_2 浓度状况直接影响作物的光合作用、呼吸作用、气孔活动和蒸腾耗水等作物生理过程, 最终制约着群体生产力和水分利用率[1]。随着节水农业的发展, CO_2 与作物生产力和水分利用率之间的联系日益受到学术界的关注。

作物水分利用率分为叶片水平、群体水平和产量水平 3 个水平[2]。叶片水平水分利用率可通过叶室分析仪、光合系统测定仪等仪器直接获得, 并已取得大量的研究成果[3～5], 但由于群体中个体之间的差异, 叶片水平的水分利用率与群体水平和实际应用存在相当的距离; 产量水平的水分利用率仅表征了最终产量与水分之间的关系, 无法体现作物全生育期各阶段水分利用的动态过程, 因此, 测定作物群体水平瞬时的水分利用率, 分析环境因素对其影响具有重要的理论和现实意义。现阶段普遍利用同化箱法测定群体光合速率和水分利用率[6], 由于该方法改变了作物所处的环境条件, 尤其是玉米等高秆作物和有风条件下, 难以获得准确的数据。本文利用国际上通用的 CO_2 红外分析系统[7]、结合波文比- 能量平衡法, 测定近冠层相距一定高度的 CO_2 浓度差、温度、湿度梯度, 在既不损伤作物也不改变环境的条件下, 求得动态的净光合速率、农田蒸散和群体瞬时水分利用率。

1 材料与方法

1.1 试验区位背景

本试验于 1997 年 6 月～10 月在中国科学院河北栾城农业生态系统试验站(北纬 37°53′, 东经 114°40′, 海拔 50.1 m)进行。本站属于暖温带大陆性季风气候, 全年平均降水量 480.7 mm。试验站地势平坦、开阔, 土层深厚, 为轻壤质, 有机质含量 1%～1.2%, 地下水位 24 m 左右。

收稿日期: 1999-05-14
* 国家自然科学基金"八五"重大项目(49391600)
①杨晓光, 博士, 讲师, 北京市海淀区圆明园西路 2 号 中国农业大学(西校区)资环学院农业气象系, 100094

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

1.2 试验设计

试验区面积为 24 m ×200 m, 并与周围农田相联成片, 为大面积均匀一致的夏玉米农田, 主风向有足够长的来流路径, 保证瞬时资料的可靠性。夏玉米品种为冀丰 58, 1997 年 5 月 25 日播种, 按当地常规栽培措施管理。夏玉米生育期实测降水量 160 mm, 灌溉条件下产量为 7 500 kg/hm^2。

采用国际上 CO_2 基本观测站通用的"非色散红外分析"方法连续分析测定冠层上方 0.5 m 和 2.0 m 高度的 CO_2 浓度差。本试验利用标准 CO_2 气体对所使用的 ADC (英国公司生产) CO_2 分析仪主机差动档零点、跨度和终点进行标定, 对主机性能进行复试, 包括灵敏度和稳定性的检验, 以保证数据的准确性。观测时在环境温度变化幅度较大时注意调整零点, 剔除零点漂移造成的误差。

同步启动波文比装置测定相同高度的温、湿梯度及冠层上方的总辐射、净辐射和土壤热通量。利用 DT100 型数据采集器 (澳大利亚生产) 每 15 s 扫描一次, 5 min 采集一组数据, 除雨天外, 昼夜连续采集数据 (CO_2 分析仪日出前开机, 日落后 2～3 h 关机)。采集器中数据直接传入计算机用于分析计算。

1.3 CO_2 通量和群体水分利用率的计算方法

作物群体水分利用率 (W_{UE}) 为净光合速率 (CO_2 通量) 与蒸散通量之比

$$W_{UE} = \frac{F_{CO_2}}{E} \tag{1}$$

根据湍流扩散理论, CO_2 铅直方向输送通量可表示为

$$F_{CO_2} = -fK_c\frac{\partial c}{\partial z} \tag{2}$$

式中 F_{CO_2}——CO_2 通量, mg·(m^2·s)$^{-1}$; $\partial c/\partial z$——CO_2 浓度铅直方向的梯度; f——由 ppm 转化为 g·cm^{-3} 的换算系数; K_c——CO_2 湍流交换系数, 即通过介质的特性湍流与该特性的浓度梯度的比值, 量纲为"单位时间的面积"。

根据波文比- 能量平衡方法有

$$LE = L\rho\frac{\epsilon}{P}K_w\frac{\partial e}{\partial z} \tag{3}$$

$$H = \rho C_p K_h\frac{\partial t}{\partial z} \tag{4}$$

在下垫面水平均匀、来流路径足够大, 且非平流情况下 $K_w = K_h = K_c$[8～10]

$$K_c = \frac{R_n - G}{\rho C_p\frac{\partial t}{\partial z} + L\rho\frac{\epsilon}{P}\frac{\partial e}{\partial z}} \tag{5}$$

式中 K_w 与 K_h——水汽与热量湍流交换系数; R_n——净辐射; G——土壤热通量; LE——潜热通量; H——显热通量; e——绝对湿度; t——温度; ϵ——水汽分子对干空气分子的重量比; L——汽化潜热; P——大气压; C_p——空气定压比热; ρ——空气密度。

以差分替代微分可根据 (2) 式求得 CO_2 通量表达式

$$F_{CO_2} = -f\times\frac{(R_n - G)\Delta c}{\rho C_p\Delta T + \frac{L\epsilon}{P}\rho\Delta e} \tag{6}$$

将 ρ、C_p、L、ϵ、f 及各常量代入并配合观测数据由 (6) 式求得 CO_2 通量 (mg·(m^2·s)$^{-1}$)。

利用波文比 (B) - 能量平衡方法测定群体潜热通量 (LE) 及蒸散 (E)

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + B} \tag{7}$$

2　结果分析

2.1　CO_2 通量的变化特征及其与干物质累积的关系

表 1　夏玉米 CO_2 通量变化特征

Tab. 1　The characteristics of CO_2 flux density variation in summer corn

生育期	CO_2 通量/mg·(m²·s)⁻¹							日总量 /mg·(m²·d)⁻¹
	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	
拔节期	0.48	2.31	0.19	0.02	0.02	-0.06	-0.01	21.88
抽雄期	0.74	4.50	0.21	0.21	0.13	0.09	0.05	33.99
吐丝期	0.99	3.37	0.21	0.01	0.01	-0.03	0	38.00
灌浆前期	1.14	6.49	0.23	0.03	0.19	-0.01	-0.12	58.56
灌浆后期	0.17	1.26	0.15	0.01	0.08	-0.56	-1.38	13.65

注: 表中数据为典型晴天土壤水分相近时观测值。

从表中可以看出, 表征净光合速率的 CO_2 通量存在明显的日际和季际变化。一天中, 日出后 CO_2 通量逐渐增大, 9:00 时达到最高值, 日出前和日落后净光合速率为负值, CO_2 通量对时间的积分为光合产物的累积量。净光合产物在全生育期内呈规律性变化, 拔节-灌浆前期 CO_2 通量瞬时最高值和累积值都不断增加, 在灌浆前期达到最大值, 而后迅速下降, 在灌浆后期最高值降低, 一天中负值所占的时间较长, 当 CO_2 通量全天为负值时, 表明群体光合累积不敷呼吸消耗, 为减少后期无谓消耗对产量的影响, 应及时收获。

表 2　CO_2 通量与干物质累积比较

Tab. 2　The Comparison of CO_2 flux density and dry matter

日期 /日·月	CO_2 通量		干物质累积		CO_2 日平均与干物质日增长量之差/g·(m²·d)⁻¹	相对误差 /%
	时段累积值 /g·m⁻²	时段内日平均值 /g·(m²·d)⁻¹	时段增长量 /g·m⁻²	日增长量 /g·(m²·d)⁻¹		
11·8～16·8	148.71	24.79	150.00	25.00	-0.21	0.84
17·8～21·8	288.06	57.61	303.94	60.78	-3.18	5.20
22·8～26·8	253.06	50.72	260.68	52.14	-1.42	2.70
27·8～2·9	347.36	49.23	347.68	49.67	-0.04	0.08
3·9～9·9	222.05	31.74	222.27	31.75	-0.03	0.09

夏玉米生长季内连续 30 d 瞬时 CO_2 通量测定净光合方法与作物生长分析方法测定时段干物质累积量结果见表 2。说明, 两者的结果非常趋近, CO_2 通量日平均与干物质日增量之差为 -0.03～-3.18 g·(m²·d)⁻¹, 日瞬时值较时段生长分析数值偏小的原因, 是由于瞬时法测定的是群体的平均状况, 而生长分析法存在着取样的误差, 两者的相对误差小于 5.2%, 表明 CO_2 观测系统是精确有效的, 作物干物质阶段累积量应为该时段内瞬时净光合速率的总和。

2.2　土壤水分对 CO_2 通量的作用

由图 1 可知, 夏玉米群体 CO_2 通量(净光合速率) 与总辐射通量呈抛物线关系, 并存在最大值, 最高点以后, 净光合速率随总辐射增加而下降, 净光合速率最高点对应的总辐射为辐射

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

能量范围, 这一范围即是普通意义上的光饱和点。8 月 14 日、8 月 18 日和 8 月 22 日的光饱和点分别为 320～350 W/m^2、450～550 W·m^{-2}和 380～420 W/m^2。这 3 天恰好都处于夏玉米的灌浆前期, 作物本身的净光合速率基本接近。日际间光饱和点存在着差异的主要原因是每天的土壤水分有较大的差异, 8 月 14 日、8 月 18 日和 8 月 22 日 0～60 cm 土层平均土壤相对含水率分别为 40%、75% 和 58%, 表明强光只有在充沛的土壤水分条件耦合下, 才能发挥最大的光合效率。在最适土壤水分状态(75%)群体光饱和点为 450～550W/m^{2}仅相当与自然状态下总辐射的 50%～60%, 超过光饱和点以上的光照强度对作物的光合作用不再起作用, 反而增加农田蒸散, 可以认为, 田间状态下, 作物群体处于中等辐射强度下, 不仅光合没有影响, 而且可提高水分利用率。

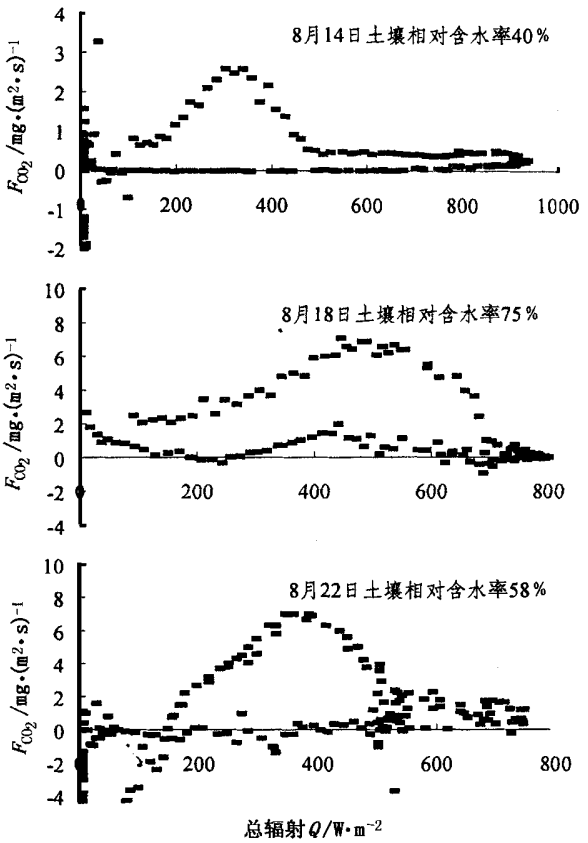

图 1 夏玉米 CO_2 通量与总辐射的关系

Fig. 1 The relationship between the CO_2 flux density and the total radiation in summer corn

2.3 土壤水分与群体水分利用率的关系

群体水分利用率日变化趋势呈“L”型曲线, 上午 8:30 左右达到最高值, 在灌浆以前, 随夏玉米的生长发育水分利用率逐渐增高, 并受 CO_2 浓度差、光辐射、净辐射和空气饱和差的影响[11]。土壤水分是农田蒸散的水分来源, 据杜宝华研究表明, 当土壤湿度在田间持水量的 70%～80% 时, 叶片光合速率最高[12]。根据实测资料我们建立了群体水分利用率每日上午 9 时瞬时值与土壤含水率的关系方程, 结果见表 3。

表 3 夏玉米群体水分利用率(W_{UE})与土壤相对含水率(θ)的关系(土壤相对含水率 30%～80%)

Tab. 3 The relationship between the group water use efficiency and relative soil water content

土壤深度/cm	复相关系数	回归方程
10	0.939 8	W_{UE}= - 0.096 7θ+ 0.016 4
20	0.939 1	W_{UE}= - 0.073 3θ+ 0.023 2
40	0.897 1	W_{UE}= - 0.078 5θ+ 0.034 1
60	0.892 7	W_{UE}= - 0.094 4θ+ 0.045 5
0～60 平均	0.980 1	W_{UE}= - 0.084 3θ+ 0.025 5
0～100 平均	0.650 9	W_{UE}= - 0.089 7θ+ 0.046 7

由表中数据可知, 群体水分利用率与 0～60 cm 土层平均相对含水率相关性最好, 复相关系数达到 0.980 1。当 0～60 cm 土层平均含水率为 30.3% 时, W_{UE}等于 0。80% 可以认为是有

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

效供水的上限[13], 大于 30.3% 且小于 80% 时, W_{UE} 随着相对含水率的增加而降低。主要原因是决定根系吸水量的因子是根量及根长密度。夏玉米根系主要集中在 0～60 cm 土层[13], 所以用于蒸散的土壤水分是 0～60 cm 的水分, W_{UE} 与单层土壤与 10 cm、20 cm 土壤含水率负相关系数较大, 土壤含水率越高, 水分利用率越低, 这与土壤蒸发主要发生于 0～20 cm 表层有关。对作物而言, 光合、蒸腾作用节点是气孔。在晴天上午气孔阻力与 0～70 cm 土壤水分相对含水率呈明显负相关[14], 在土壤相对含水率 70% 以下, 随含水率的增加, 气孔阻力迅速下降。

综上分析, 土壤相对含水率通过对蒸发和蒸腾的影响, 间接地影响水分利用率, 鉴于夏玉米根系分布以及土壤深层(60 cm 以下) 含水率变化较小的特点, 利用人工措施促使其扎根, 以利用深层土壤水分, 便可在不增加用水的同时达到提高水分利用率的目的。

3　结　论

1) 比较瞬时 CO_2 通量与同时段干物质累积, 发现两者的结果非常一致, 表明 CO_2 观测系统是精确有效的, 可以作为群体水分利用率监测的先进方法。精细的田间管理达到瞬时状态下优化水分利用率, 有利与干物质的有效积累。

2) 发现群体光饱和点位移是受土壤水分影响的一个辐射能量范围, 群体净光合速率与总辐射通量密度呈抛物线关系, 辐射能量达到光饱和点时, 净光合速率不再增加; 而土壤水分状况影响光饱和点的范围。群体光饱和点的振动和位移表明, 饱和点是环境因素和作物因素的相应性的反映, 是群体中单叶处于不同辐射强度状态下的综合。

3) 群体水分利用率与 0～60 cm 土层土壤平均相对含水率呈负相关, 土壤相对含水率在 30.3%～80% 范围内, 水分利用率随相对含水率的增加而降低。利用人工栽培措施, 促进根系吸收深层土壤水分, 可在不增加用水的同时提高群体水分利用率。

致谢: 本文在完成过程中得到中国农业大学刘巽浩教授的指导, 谨表谢忱。

[参　考　文　献]

[1] Havelka U D, et al. CO_2-Enrichment effects on soybean physiology I. Effects of long-term CO_2 exposure. Crop Sci, 1984, l24: 1146～1150

[2] 娄成后, 王天铎. 绿色工厂- 主要作物高产高效抗逆的生理基础研究. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1995

[3] 许大全, 徐宝基, 沈允钢. C_3 植物光合效率的日变化. 植物生理学报, 1995, 16(1): 1～5

[4] 许大全, 丁　勇. 田间小麦叶片光合效率日变化与光合"午睡"现象的生态、生理与生化. 植物生理学通讯, 1992, 6: 5～10

[5] 施建忠, 王天铎. 小麦冠层不同层次叶片水分利用率的研究- 光合速率与蒸腾速率之比(P/T) 的模拟. 见: 李宝庆. 农田生态系统试验研究. 北京: 气象出版社, 1996. 1～13

[6] 王天铎, 马立望, 贺东祥. 小麦对水的利用效率的实验研究- 单叶与群体测定结果的对比分析. 见: 胡朝炳. 中国科学院禹城综合试验站年报(1988～1990). 北京: 气象出版社, 1993. 4～13

[7] WMO. Project on Research and Monitoring of Atmospheric CO_2, Report No. 3.

[8] Swinbank W C, Dyer A J. An experiment study in micrometeorology, Quart. J Roy Metror Soc, 1967, 93: 494～500

[9] Demead O T, Mcilroy I C. Measurements of nonpotential evaporation from wheat. Agr Meteorol, 1970, 7: 285～302

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

[10] Thom A S. Momentum, mass and heat exchange in plant communities. Monteith J L eds. Vegetation and Atmosphere, 1. Calif: Principles, Academic Press, San Diego, 1975

[11] 杨晓光, 于沪宁. 农田生态系统 CO_2 通量与群体水分利用率研究. 地理科学进展, 1998, 17(4): 16～24

[12] 杜宝华, 吕学都. 土壤水分对冬小麦光合速率的影响. 中国农业气象, 1992, 13(4): 8～11

[13] 张喜英. 非饱和土壤作物根系吸水的模拟研究. 见: 刘昌明, 于沪宁. 土壤- 作物- 大气系统水分运动实验研究. 北京: 气象出版社, 1997. 78～84

[14] Wang Hong, Yu Huning. Effects of water stress on different wheat development stages and drought diagnostic method. Acta, Agri, Boreali-sinica, 1993(8): 64～68

Influence of Soil Water on CO_2 Flux Density and Group Water Use Efficiency in Summer Corn Field

YANG Xiao-guang

(*China Agricultural University, Beijing* 100094)

YU Hu-ning

(*Geographical Institute, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract: The instantaneous CO_2 flux concentration gradient 0.5m and 2.0m higher above the canopy was measured with an infrared CO_2 analysis system during the growing season of summer corn. The field microclimatic factors such as radiation, temperature and moisture were measured simultaneously using the Bowen ration device, and the CO_2 flux density, latent heat flux and water use efficiency were also calculated. The results showed that the CO_2 analysis system was effective as the CO_2 flux density had the same variation trend as dry matter, and it proved useful as an advanced method to calculate the water use efficiency. The relationship between net photosynthesis rate and global radiation can be expressed as parabolic equation. When radiation reaches the light saturation point, the net photosynthesis rate will not increase any more. The light saturation point was affected by soil water content, and the radiation energy can make productive effect only with the affluent soil water. There was negative correlation between group water use efficiency and the relative water content in 0～60 cm soil. When the relative water content was in the range of 30.3%～80%, the water use efficiency decreased with the increase of soil water content. Some measures can be taken to develop the root to absorb the deep soil water and can increase the water use efficiency while the water supply did not increase.

Key words: summer corn; soil water; CO_2 flux density; group water use efficiency

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.