

农田生态系统二氧化碳通量与 群体水分利用率研究*

杨晓光

(中国农业大学资环学院, 北京 100094)

于沪宁

(中国科学院地理研究所, 北京 100101)

摘 要 本文利用二氧化碳分析系统, 配合波文比装置, 测定了夏玉米农田群体二氧化碳浓度差及农田小气候特征, 并计算了农田冠层瞬时的二氧化碳通量和群体水分利用率。结果表明, 夏玉米群体二氧化碳通量、二氧化碳浓度差及群体水分利用率存在明显的日、季节变化规律。其中水分利用率呈“L”型曲线, 上午 8 时左右达到一天的峰值。拔节后随着作物生长发育水分利用率逐渐增大, 灌浆后期由于群体光合能力下降、呼吸消耗增强而逐步下降。太阳总辐射、二氧化碳浓度、空气饱和差及土壤水分等环境因素以不同机制及过程影响水分利用率。在生产实际中, 可通过秸秆覆盖、喷灌等措施降低蒸腾驱动力, 提高水分利用率。

关键词 二氧化碳通量 群体水分利用率 蒸腾驱动力

1 前言

农田生态系统中大气与作物冠层之间的二氧化碳交换强度与特点决定了作物碳营养的转化, 直接制约着群体生产力。许多学者相继报导了当外界环境条件适宜, 湍流输送不足以补充作物群体光合作用消耗的 CO_2 , 造成农田 CO_2 亏缺时对作物的影响。这是 CO_2 对农作物的直接影响的反映^[1~3]。当 CO_2 浓度变化时通过对作物生理过程, 如光合、呼吸、气孔活动和蒸腾耗水综合影响作物最终的生产力和水分利用率。随着全球气候变化和水资源的日益匮乏、节水农业的发展, CO_2 对光能利用率、水分利用率的影响日益受到人们的关注。

作物水分利用率可以分为叶片水平、群体水平和产量水平^[4]。叶片水平水分利用率可利用仪器直接测定, 并已取得大量的研究成果^[5~7]。但由于群体中个体之间的差异以及个体本身的特性所决定, 叶片水平的水分利用率与群体水平及农田的实际水分利用状况相去甚远, 所以, 测定群体水平的水分利用过程及其影响因素具有非常重要的意义。测定群体水分利用率国内外普遍采用同化箱法^[8], 亦因改变了环境条件, 尤其是高秆作物和有风条件下, 难以获得准确的数据。本文利用红外 CO_2 分析系统测定农田 CO_2 浓度差与 CO_2 通量密度, 结合波文比- 能量平衡方法, 测定了农田 CO_2 浓度差, 并计算了玉米群体水分利用率, 同时确定和分析了环境因素对水分利用率的影响。无疑比单叶和同化箱法更接近农田实际。

* 国家自然科学基金重大项目“华北平原节水农业应用基础研究”与地球科学部基金项目“二氧化碳和水分耦合机制与作物蒸腾自然抑制”研究内容。试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站进行, 参加试验的有沈彦俊、李俊、刘伟东、王玉林、刘海隆等同志, 在此表示谢忱。

来稿日期: 1998-08

2 试验研究的基本方法

2.1 试验区位背景

本试验于 1997 年 6 月至 10 月在中国科学院栾城农业生态系统试验站进行。本站处于太行山山前平原的高产区, 位于北纬 37°30', 东经 114°40', 海拔 50.1 m, 为暖温带半湿润半干旱大陆性气候。大于 10℃ 积温 4 713℃, 全年平均降水量 480.7 mm, 太阳总辐射 524 KJ/cm²·yr。栾城站地势平坦、开阔, 土层深厚, 为褐土类灰黄土种, 壤质, 有机质含量 1%~1.2%, 田间持水量(容积) 35.4%。耕作制度为冬小麦、夏玉米一年两熟。

2.2 试验设计

选择 24×200 m² 地块为波文比- 能量平衡- CO₂ 通量观测试验区, 除本站的基础设施外, 试验地与周围农田相连成片, 为大面积均匀一致的下垫面, 保证主风向有足够长的来流路径。夏玉米品种为冀丰 58, 6 月 10 日播种, 冬小麦收获时留 20 cm~30 cm 的麦茬。

采用国际上 CO₂ 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 CO₂ 浓度差。本试验利用标准 CO₂ 气体对所使用的 ADC (英国公司) CO₂ 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 5 秒扫描一次, 5 分钟采集一组数据, 除雨天外, 昼夜连续采集数据(CO₂ 分析仪日出前开机, 日落后 2~3 小时关机)。采集器中数据直接传入计算机用于分析计算。

2.3 二氧化碳通量和群体水分利用率的计算方法

根据湍流扩散理论, CO₂ 铅直方向输送通量可表示为:

$$F_{CO_2} = -f \cdot K_c \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1)$$

式中 F_{CO_2} 为二氧化碳通量, 单位 mg/m²·s; $\partial c/\partial z$ 为 CO₂ 浓度铅直方向的梯度; f 为由 ppm 转化为 g/cm³ 的换算系数; K_c 为 CO₂ 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

$$LE = L\rho \frac{\epsilon}{P} K_w \frac{\partial e}{\partial z} \quad (2)$$

$$H = \rho C_p K_h \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

令 $K_w = K_h = K_c$, 得

$$K_c = \frac{R_n - G}{\rho C_p \frac{\partial T}{\partial z} + L\rho \frac{\epsilon}{P} \frac{\partial e}{\partial z}} \quad (4)$$

上式中 K_w 与 K_h 为水汽与热量湍流交换系数; R_n 为净辐射; G 为土壤热通量; H 为显热通量; e 为绝对湿度; ϵ 为水汽分子对干空气分子的重量比; L 为汽化潜热; P 为气压; C_p

为空气定压比热; ρ 为空气密度。

以差分替代微分可根据 (1) 式求得二氧化碳通量表达式:

$$F_{CO_2} = -f \times \frac{(R_n - G)\Delta C}{\rho C_p \Delta T + \frac{L\epsilon}{P} \rho \Delta e} \quad (5)$$

将 ρ 、 C_p 、 L 、 ϵ 、 f 及各常量代入, 并配合观测数据由 (5) 式求得二氧化碳通量 (单位: $mg/m^2 \cdot s$)。

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

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (6)$$

作物群体水分利用率 (WUE) 为二氧化碳通量与水汽通量之比

$$WUE = \frac{F_{CO_2}}{E} \quad (7)$$

3 结果分析

3.1 二氧化碳浓度差及二氧化碳通量的变化规律

已有的研究结果表明, 大气中 CO_2 浓度随作物光合作用的强弱呈明显的年际变化 (Rosenberg, 1974)。

3.1.1 二氧化碳浓度差及二氧化碳通量日通量

图 1 为夏玉米抽雄-吐丝期 (8 月 12 日) 与灌浆中后期 (9 月 4 日) 二个高度的 CO_2 浓度差。由图可知, 两个生长阶段 CO_2 浓度的日变化非常显著。日出后, 随着太阳高度角的增高及太阳辐射的加强, CO_2 浓度差逐渐增大, 在上午 9 时左右达到一日中的最大值, 中午前后, 由于水分供应不足, 气孔的阻抗增大, 使光合作用受阻, CO_2 浓度差并不是处于最高值, 正午后, 14~15 时左右, CO_2 浓度差出现第二个峰值, 17~18 时之间, CO_2 浓度差由正值转为负值, 标志着群体以光合作用为主转为以呼吸作用为主。在抽雄-吐丝期 CO_2 浓度在白天大部分时段内 (6~18 时) 为正值, 群体光合作用占绝对优势, 而在灌浆期, CO_2 浓度差最大值没有大幅度降低, 而 CO_2 浓度差大于零的时段明显缩短, 仅在上午 6~10 时处于群体表观光合作用状态, 其它时段以较强呼吸作用为主 (9 月 4 日)。

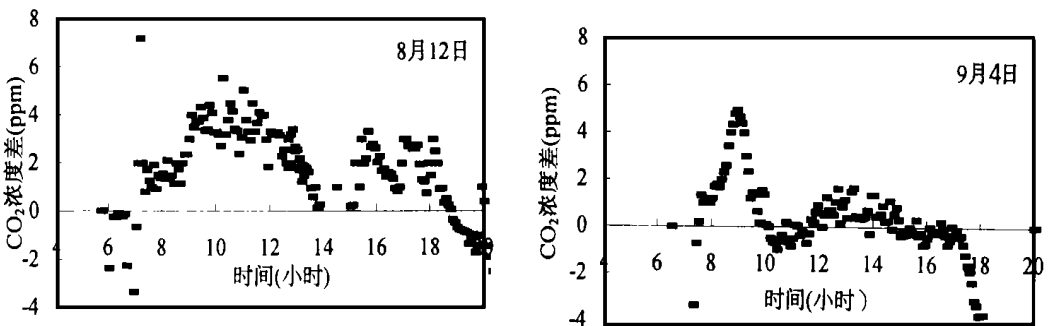


图 1 夏玉米冠层 CO_2 浓度差的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of difference of CO_2 concentration in summer corn field

二氧化碳通量日变化趋势见图 2, 白天二氧化碳通量大于 0, 表明二氧化碳流由大气指向作物冠层, 从上午 9~ 13 时维持较大的二氧化碳通量密度, 最大值出现在 10 时前后, 9 月 4 日(灌浆期)二氧化碳通量曲线下积分的面积少于 8 月 12 日的积分面积, 光合速率对时间的积分为光合产物的累积量, 积分面积减少, 表明累积量减少, 但最大光合速率反而增加, 这与 9 月 4 日的土壤含水量较高, 气孔阻力较少有直接关系。

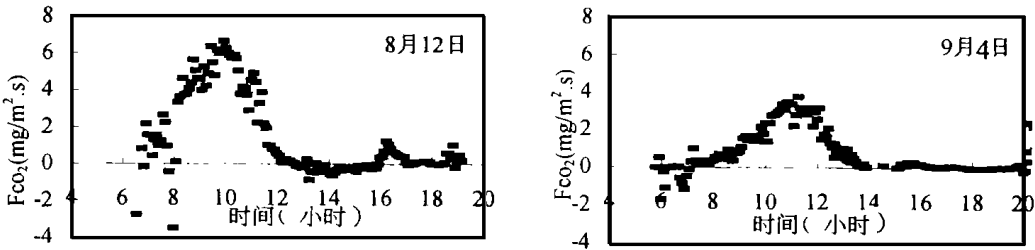


图 2 二氧化碳通量日变化
Fig. 2 Diurnal variation of CO₂ flux density

3.1.2 二氧化碳浓度差及二氧化碳通量季节变化

一日中不同时刻 CO₂ 浓度差的季节变化趋势非常一致, 见图 3。9 时、12 时和 14 时都随着生育期而逐渐下降, 但在 8 月 30 日, 农田灌溉后 CO₂ 浓度差升高, 这是由于灌溉后, 土壤含水量增加, 而土壤含水量是气孔开启程度的决定因素。据王宏和于沪宁 (1993)^[9]研究结果, 当土壤水分能够满足根系供水时, 其它因素对气孔开启程度的影响相对小的多; 而当土壤水分不能够满足根系供水需求时, 气孔才对其它环境因素影响反映十分敏感。气孔在土壤充分供给根系水分时, 阻力较小, CO₂ 和 H₂O 通过气孔进入叶片的机会最多, 最后导致冠层两个高度间 CO₂ 浓度差加大。CO₂ 浓度差随作物发育而降低的原因是由于后期叶面积指数下降, 群体光合能力降低所致。夏玉米农田二氧化碳通量资料列于表 1。

夏玉米生长季二氧化碳通量日出后逐渐增大, 9 时形成高值区, 日出前和日落后, 二氧化碳通量为负值, 二氧化碳流方向由作物指向大气。灌浆后期通量的最高值降低, 负值所占的时间较长, 当二氧化碳通量全天为负值时, 表明群体总体为呼吸作用, 为减少呼吸消耗, 生产中应及时收获。

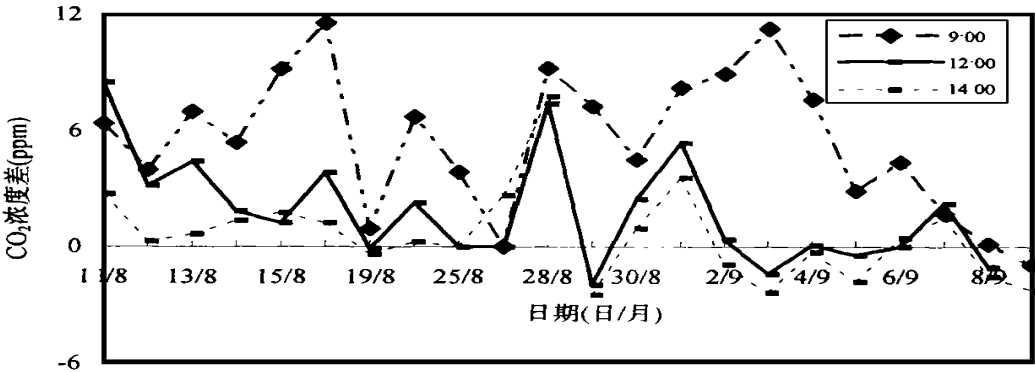


图 3 夏玉米冠层 CO₂ 浓度差的季节变化
Fig. 3 Seasonal variation of difference of CO₂ concentrations

表 1 夏玉米不同发育期的二氧化碳通量 (栾城, 1997)

Tab. 1 The CO ₂ concentration in different growth stages of sumercorn (Luancheng, China, 1997)									
日期 (日/月)	生育期	二氧化碳通量密度 (mg/m ² · s)							总辐射 (MJ/m ²)
		7: 00	9: 00	11: 00	13: 00	15: 00	17: 00	19: 00	
5/8	拔节期	1.48	2.31	0.69	0.02	0.02	- 0.06	- 0.01	18.70
10/8	抽雄期	0.74	4.50	0.12	0.21	0.13	0.09	0.05	27.13
11/8	抽雄期	0.46	1.18	0.48	0.47	0.11	- 0.03	- 0.02	22.02
15/8	吐丝期	1.14	3.37	0.03	0.01	0.01	- 0.01	0.00	13.52
18/8	灌浆前期	0.99	6.49	0.23	0.03	0.19	0.00	0.12	15.83
29/8	灌浆中期	- 0.43	4.74	4.47	2.70	2.29	0.43	0.46	6.43
6/9	灌浆后期	0.81	2.17	0.05	0.2	- 0.07	- 0.02	- 6.07	16.60
8/9	灌浆后期	0.17	1.26	1.21	1.00	0.28	- 0.56	- 1.38	17.29

3.2 群体水分利用率的变化特征

如图 4 所示, 夏玉米群体水分利用率的日变化趋势呈“L”型曲线。水分利用率全天变幅较大, 尤其在上午由 0 到 0.09 之间, 日出后随着辐射的增强, 水分利用率迅速下降由 8 时的 0.09 迅速降到 10 时的 0.004 后, 10 时到 12 时缓慢下降至 0.001, 并持续在该水平, 直到 17 时以后水分利用率小于零, 表明光合速率或二氧化碳通量为零。

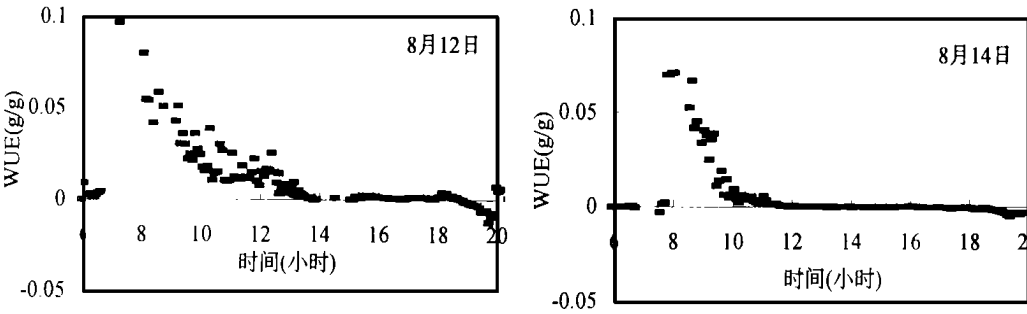


图 4 夏玉米群体水分利用率日变化

Fig. 4 Diurnal variation of canopy water use efficiency in summer corn field

夏玉米作物群体的水分利用率从拔节到灌浆期随生育期的变化特征如图 5 所示。图中为每日上午 9 时和 15 时两个时刻的瞬时值。

群体的水分利用率 9 时和 15 时瞬时值每日之间变化很大, 从 0 到 0.08。在每个生育阶段, 群体水分利用率的趋势不尽相同, 8 月 10 日至 8 月 26 日玉米处于抽雄吐丝至灌浆前期两个时刻的水分利用率都呈逐渐增高的趋势, 究其主要原因, 由于 8 月中旬气温逐渐有所降低, 处于光合作用的适宜范围 25 左右, 旺盛生长的群体光合速率的增长速率较之农田蒸散的增长速率高; 尤其是随着叶面积系数的增加, 土壤蒸发的比例及绝对值相对降低。虽然灌浆初期下部叶片开始衰老, 叶面积指数稍有下降, 但玉米上部叶片仍处于功能旺盛状态, 同时玉米的苞叶可进行光合作用, 补充了下部衰老叶片的损失。灌浆中期玉米绿叶面积迅速减少, 光合功能降低, 光合速率下降, 呼吸消耗增强, 导致群体水分利用率下降。

在灌浆以前随着夏玉米的生长发育水分利用率逐渐增高, 此后, 迅速下降。我们了解群体瞬时水分变化动态, 适时地进行田间调控, 便可达到提高水分利用率的目的。

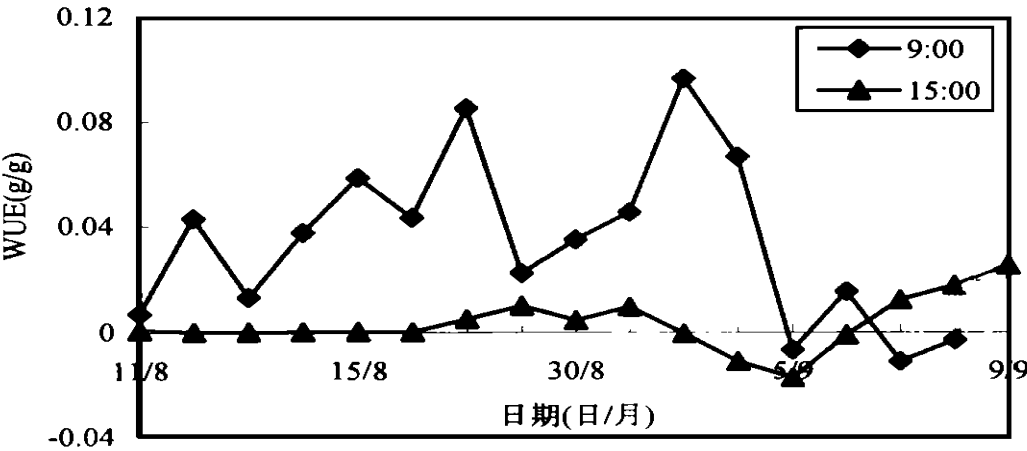


图 5 夏玉米群体水分利用率的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of canopy water use efficiency in summer corn field

3.3 群体水分利用率的影响因素

如前所述, 群体水分利用率存在明显的日变化和季节变化特征; 根据计算公式的推论水分利用率既涉及二氧化碳通量, 又与蒸散密切联系, 所以二氧化碳通量与蒸散不同的变化趋势决定了 WUE 的变化。

图 6 中所点绘的为逐日 9 时、12 时、14 时、15 时、17 时和 19 时所对应的瞬时值。以此长期的变化可以看出各环境因素与 WUE 的关系。

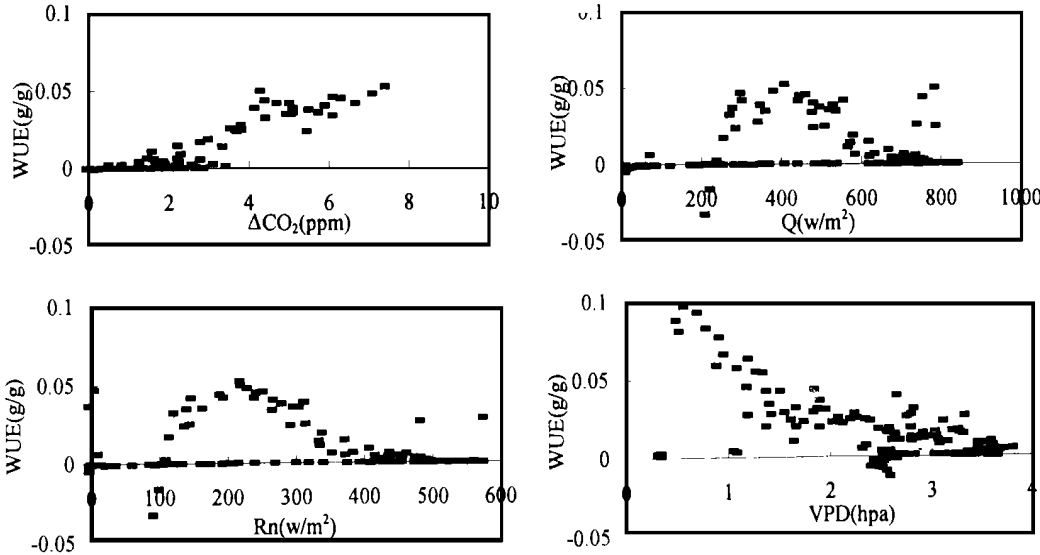


图 6 环境因素与夏玉米群体 WUE 的关系

Fig. 6 Correlationship between canopy water use efficiency of summer corn and environmental factors

无论是光合作用还是蒸散能量同样来源于太阳总辐射 (Q) 或农田所获得的净辐射 (R_n), 当总辐射增加时, 净辐射也随之相应增加。从图中可以看出总辐射和净辐射对 WUE 的影响趋势非常一致, 在总辐射 $300 \text{ w/m}^2 \sim 500 \text{ w/m}^2$, 净辐射为 $150 \text{ w/m}^2 \sim 300 \text{ w/m}^2$ 之间, WUE 都达到最高值, 表明在此数值范围内, 能量对光合速率的影响是正效应并且大于其对蒸散的影响而使 WUE 到达峰值。作物光能利用率研究表明, 弱光下光能利用率可以很高, 但积累干物质总量不多; 强光下干物质积累量较多, 但光能利用率不高; 中等光强下, 既有一定的干物质积累, 又有较高的光能利用率。田间状态下叶丛处于中等辐射强度下, 光合作用强度虽达不到最高且略下降, 但能量利用效率较高, 水分耗散并不太多, 因而可以提高水分利用率; 人为地改变并建成合理的种植结构, 改善群体光照条件, 是提高水分利用率的重要措施。

二氧化碳浓度是光合作用和水分利用不可缺少的物质源, 尽管 CO_2 同化过程极为复杂, 涉及叶片叶绿体的特性及其内部环境的影响, 但对 WUE 的影响非常显著, 呈明显的非线性关系, 随着 CO_2 浓度差 (ΔCO_2) 的增高, WUE 随之增加。其物理机制表现为气孔部分关闭, 导度下降, 阻力增加并限制了 H_2O 和 CO_2 的扩散, 但降低的蒸腾量大于所减低的光合作用, 同时加大 CO_2 的浓度梯度, 形成指向冠丛较大的 CO_2 浓度差, 促进光合作用增益效应的同时抑制了水分消耗。

在气孔水平上研究水分与光合效率, 利用气孔下腔和空气 CO_2 和水蒸汽的浓度梯度分析气孔尺度的 H_2O 和 CO_2 耦联机制成为深入探讨某些机制的关键。

图 6 中 WUE 与空气饱和差 (VPD) 之间呈负相关关系。随着饱和差的增加, WUE 迅速降低, 增至 3~4 百帕时, WUE 变化比较平缓并维持在一定水平。宏观上而言, 空气饱和差增大, 表明空气干燥, 相对湿度较少, 有利于作物的蒸腾和土壤的蒸发。从微观上讨论, 生理学将气孔的蒸腾作用划分为二个阶段, 第一阶段是气孔腔内的细胞间隙内部, 湿润的细胞壁表面进行水分蒸发, 而这个阶段有充裕的能量用于水由液态转为气态。第二阶段是水蒸气由气孔逸出。形成气孔腔内外水蒸气压差, 在实际中可以用饱和水汽压差替代, 则气孔水分蒸腾的驱动力便可表示为饱和水汽压差。降低驱动力或者将驱动力分解作用于其它方面, 从机理上寻找抑制蒸腾作用的方法。实际生产中可以通过塑料薄膜覆盖、喷灌增加空气湿度, 降低饱和差的方法, 提高水分利用率。同时结合 CO_2 的调控, 可望进一步提高水分利用效益。Mantins (1983)^[10]指出提高冠层 CO_2 浓度水平, 以达到减少水分逸失的同时提高光合作用效率, 是不以降低光合效率为前提的抗御蒸腾的有效措施, 称之为“自然产生的抗御蒸腾机制”。于沪宁 (1995)^[11]进一步提出结合秸秆覆盖和增施有机肥, 增加土壤 CO_2 的释放, 以提高冠层 CO_2 浓度水平。实测表明, 增加了 CO_2 浓度有利于增加指向叶丛的 CO_2 驱动力, 结合适度的水分胁迫, 可以提高水分利用率。

4 讨论

本试验采用二氧化碳浓度梯度法直接测定夏玉米群体二氧化碳浓度差, 配合波文比-能量平衡方法获得的温、湿梯度及净辐射、总辐射和土壤热通量, 可计算群体瞬时的二氧化碳通量及群体水分利用率, 取得满意的结果。结论如下:

(1) 冠层附近二氧化碳浓度差及二氧化碳通量具有明显的日变化和季节变化规律, 二

氧化碳通量日出后逐渐增大, 9 时达到最高值; 日出前与日落后, 二氧化碳通量为负值。灌浆后期 CO_2 通量和 CO_2 浓度差的最高值降低, 通量为负值所占的时间较长, 当二氧化碳通量全天为负值时, 表明群体为呼吸作用, 为减少呼吸消耗, 应及时收获。

(2) 夏玉米群体水分利用率日变化趋势呈“L”型曲线, 且在一天中变幅较大, 早晨 8 时至 8 时半达到最高值, 中午以后维持在较低水平。在灌浆以前随着夏玉米的生长发育水分利用率逐渐增高, 灌浆中期以后随着叶面积迅速降低, 群体光合作用功能下降, 呼吸消耗增强, 导致群体水分利用率下降。

(3) 环境因素直接影响群体的水分利用率。群体水分利用率在总辐射为 $300 \text{ w/m}^2 \sim 500 \text{ w/m}^2$ 、净辐射为 $150 \text{ w/m}^2 \sim 300 \text{ w/m}^2$ 数值范围内达到最高值, 表明实际生产中, 中等强度的光照条件对作物水分利用最有利。可以通过农艺与农技措施调控作物群体结构, 使叶丛处于中等光强下, 有利于提高光能与水分利用率。

(4) 从 CO_2 和水分传输看, 适当保持株间较高 CO_2 浓度水平是唯一的抑制蒸腾而不降低光合效率的自然抑制蒸腾的机制。可通过增施有机肥和秸秆覆盖增加 CO_2 的释放, 提高株间 CO_2 浓度, 抑制气孔开度, 提高水分利用率。水分利用率与空气饱和差呈负相关关系, 作物蒸腾的驱动力取决于气孔下腔水汽压与空气饱和差。降低驱动力便可在机理上抑制蒸腾作用, 提高水分利用率; 而在生产实际中, 尚需探索适宜的措施, 降低由叶丛指向邻近气层的水汽压梯度从而有利于水分有效利用。

参 考 文 献

- 1 Carlson R W, bazzaz F A. The effect of elevated CO_2 concentrations on growth, photosynthesis, transpiration and water use efficiency of plants In: Singh J J, Deepak A (eds). Environmental and Climatic Impact of Coal Utilization. Academic Press, New York, 1980
- 2 Havelka U D et al. CO_2 -enrichment effects on soybean physiology I Effects of Long-Term CO_2 Exposure. *Crop Sci*, 1984, 124: 1146~1150
- 3 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
- 4 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. 湖南: 湖南科学技术出版社, 1995
- 5 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
- 6 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, 1990, 16(1): 1~5
- 7 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: 李宝庆编. 农田生态系统试验研究. 北京: 气象出版社, 1996
- 8 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: 胡朝炳编. 中国科学院禹城综合试验站年报 1988-1990. 北京: 气象出版社, 1991. 4~13
- 9 Wang Hong, Yu Huning. Effects of water stress on different wheat development stages and drought diagnostic method. *Acta Agr. Boreal-sinica*, 1993, 8(suppl): 64~68
- 10 Mantins E S. Stomata. In: Annold E (ed) Limited 41 Bedford Square London, 1983. 48~50
- 11 于沪宁. 作物水分胁迫反应机制及其在节水农业中的应用. 见: 石元春, 刘昌明, 龚元石编. 节水农业应用基础研究进展. 北京: 中国农业出版社, 1995. 89~99

A STUDY ON THE CO₂ FLUX DENSITY AND THE WATER USE EFFICIENCY OF CROP COMMUNITY IN A FIELD ECOSYSTEM

Yang Xiaoguang

(China Agricultural University, Beijing 100094)

Yu Huning

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

The CO₂ flux concentration gradient and microclimate characteristics of a summer corn community were measured with an infrared CO₂ analysis system and a Bowen ratio device. The instantaneous CO₂ flux density and the water use efficiency of the corn canopy were calculated. The result showed that the CO₂ flux and CO₂ concentration gradient as well as the water use efficiency of the summer corn community had distinct daily and seasonal change patterns. The daily change of the water use efficiency was described in a 'L' type curve with a peak value around 8 a.m. in the morning. Before grain filling, the water use efficiency increased as the corn grew, while it decreased after grain filling because of the decrease of photosynthetic ability of the corn community and the increase of respiration consumption. The water use efficiency was affected by the factors such as global radiation and CO₂ concentration and air saturation deficit etc. Therefore, in agricultural practice, the water use efficiency of the corn community could be raised by means of straw cover and sprinkling irrigation to reduce drive potential of transpiration.

Key words CO₂ flux density, water use efficiency of crop community, forcing functions of evapotranspiration

作者简介

杨晓光, 女, 中国农业大学资环学院讲师, 在职博士生。主要从事农田光能利用和水分利用等方面的研究。