

晋西黄土区水肥调控对苹果-玉米间作系统玉米灌浆期穗位叶光合生理特性的影响

高飞¹ 王若水^{1,2*} 许华森¹ 王冬梅¹ 杨宗儒³

(¹北京林业大学水土保持学院,北京 100083; ²山西吉县森林生态系统国家野外科学观测站,山西临汾 042200; ³山西吉县林业服务中心,山西临汾 042200)

摘要 以晋西黄土区典型的苹果-玉米间作系统为研究对象,设置了双因素三水平水肥耦合试验,分析不同水肥调控措施下玉米灌浆期穗位叶光合生理特性。本试验根据玉米及苹果适宜的水分和养分条件设置 9(3×3) 个处理(W₁F₁、W₂F₁、W₃F₁、W₁F₂、W₂F₂、W₃F₂、W₁F₃、W₂F₃、W₃F₃),设置的 3 个灌溉水平为:田间持水量(Fc)的 50%(W₁)、65%(W₂)和 85%(W₃),3 个施肥量水平为:N 289 kg·hm⁻²+P₂O₅ 118 kg·hm⁻²+K₂O 118 kg·hm⁻²(F₁)、N 412.4 kg·hm⁻²+P₂O₅ 168.8 kg·hm⁻²+K₂O 168.8 kg·hm⁻²(F₂)、N 537 kg·hm⁻²+P₂O₅ 219 kg·hm⁻²+K₂O 219 kg·hm⁻²(F₃),另设一组无水肥补给的空白对照(CK)。结果表明:不同水肥调控方式对光合指标日变化趋势无明显影响,但水肥补给可提高作物净光合速率(P_n)的峰值,降低作物日水分利用效率(WUE)最大值,延长气孔开放时间,影响胞间CO₂浓度(C_i)最低值的出现及维持时间;各处理光合作用的限制因素均为非气孔因素。蒸腾速率(T_r)、气孔导度(g_s)均与距树行距离呈极显著负相关(P<0.01),水分利用效率则与距树行距离呈显著正相关(P<0.05);距树行距离平均每增加 1 m,T_r可减少 0.56~1.41 mmol·m⁻²·s⁻¹,g_s可减少 0.028~0.093 mol·m⁻²·s⁻¹,WUE可增加 0.08~1.00 μmol·mmol⁻¹。灌水施肥可以显著提高净光合速率、蒸腾速率、气孔导度日均值;降低水分利用效率的日均值;W₃F₁拥有最高的净光合速率日均值(10.64 μmol·m⁻²·s⁻¹)、水分利用效率日均值(3.05 μmol·mmol⁻¹)、气孔导度日均值(0.295 mol·m⁻²·s⁻¹)以及较低蒸腾速率日均值(4.32 mmol·m⁻²·s⁻¹)。多元回归分析结果显示,在拔节-灌浆期内,灌水总量为 1300 m³·hm⁻²、施肥总量为 525 kg·hm⁻²时,作物净光合速率最大,理论值为 10.32 μmol·m⁻²·s⁻¹。因此,W₃F₁为最利于间作系统作物光合效率改善的水肥调控模式。

关键词 水肥调控; 果农间作; 穗位叶; 光合效率; 日变化

Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics of maize leaves in ear position at filling stage in an apple-maize intercropping system in Losses Plateau of west Shanxi Province, China. GAO Fei¹, WANG Ruo-shui^{1,2*}, XU Hua-sen¹, WANG Dong-mei¹, YANG Zong-ru³ (¹College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Jixian Forest Ecosystem State Field Science Observatory, Linfen 042200, Shanxi, China; ³Jixian Forestry Service Center, Linfen 042200, Shanxi, China).

Abstract: Taking a typical apple×maize intercropping system in the loess region of Shanxi Province, China as test object, the current study analyzed the photosynthetic characteristics of maize leaves of ear position at filling stage under different irrigation and fertilization regimes. There were three irrigation levels [low (W₁), 50% field capacity (Fc); medium (W₂), 65% Fc; and high (W₃), 85% Fc], three fertilizer levels {F₁ [N (289 kg·hm⁻²) + P₂O₅ (118 kg·hm⁻²) + K₂O (118 kg·hm⁻²); F₂ [N (412.4 kg·hm⁻²) + P₂O₅ (168.8 kg·hm⁻²) + K₂O (168.8 kg·hm⁻²); F₃ [N (537 kg·hm⁻²) + P₂O₅ (219 kg·hm⁻²) + K₂O (219 kg·hm⁻²)]}, and a

本文由国家自然科学基金项目(31300530)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31300530).

2016-01-05 Received, 2016-05-16 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wrsily_2002@163.com

control (CK, no irrigation and fertilization throughout the growing season). The nine irrigation and fertilization treatment combinations were W_1F_1 , W_2F_1 , W_3F_1 , W_1F_2 , W_2F_2 , W_3F_2 , W_1F_3 , W_2F_3 , and W_3F_3 , respectively. The results indicated that different water and fertilizer regimes had no significant effect on the variation in diurnal photosynthetic indexes. However, the application of water and fertilizers considerably increased the peak value of net photosynthetic rate (P_n), extended the stomatal opening period, influenced the lowest value of intercellular CO_2 concentration (C_i), and reduced the maximum value of water use efficiency (WUE) during the day. The limiting factors affecting photosynthesis were nonstomatal factors. Stomatal conductance (g_s) and transpiration rate (T_r) were both significantly negatively correlated with the distance from tree line ($P < 0.01$). WUE were significantly positively correlated with the distance from the tree line ($P < 0.05$). g_s decreased by $0.028-0.093 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, T_r decreased by $0.56-1.41 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, WUE increased by $0.08-1.00 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, as the average distance from the tree line increased by 1 m. Thus, irrigation and fertilizers significantly increased the mean value of P_n , T_r , and g_s , but decreased the mean value of WUE during the day. The W_3F_1 treatment had the highest mean values of P_n ($10.64 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), g_s ($0.295 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), WUE ($3.05 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$), but a lower mean value of T_r ($4.32 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) compared with the other treatment combinations during the day. When the total irrigation rate was $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, the total fertilization rate was $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_n was at its maximum, and the theoretical maximum value was $10.32 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Therefore, the W_3F_1 treatment was the irrigation and fertilizer regime that was most likely to improve the photosynthetic efficiency of the apple-maize intercropping system.

Key words: water and fertilizer regulating; fruit crop intercropping; leaves in ear position; photosynthetic efficiency; diurnal variation.

农林复合系统对控制黄土高原地区水土流失、恢复生态平衡以及提高当地农民经济收入有重要作用,是目前晋西黄土区主要的农业经营模式。苹果和玉米是当地广泛种植的经济树种和粮食作物,由于果树生产周期长、效益滞后,在未坐果的幼龄果树行间间作玉米成为该地区现行较广泛的土地集约利用方式^[1]。但在土壤贫瘠、水肥资源有限的晋西黄土地区,苹果-玉米间作会引起强烈的种间水分和养分竞争^[2-5],这严重限制着玉米产量的稳定,影响果农经济收入,还会引起土地生产力的退化。有效缓解这种竞争的方法是在水肥匮乏的关键时期进行水和肥的补给。但该地区水资源短缺,土壤对肥料承受能力有限,所以在有限灌溉条件下进行水与肥的耦合调控研究有重要的实践指导意义。

光合作用是植物生长发育的基础,是系统产量效益的直接影响因素^[6-7],大量研究表明,玉米灌浆期穗位叶光合特性与产量有着极强的相关性,此时期良好的光合效应是作物稳产高产的保证^[8-9]。然而土壤水肥状况直接影响着作物的光合作用:水分不足会抑制作物气孔开放,影响光合原料的吸收,养分不足会影响植株生长以及叶绿素等光合元素的合成^[10],所以良好的水肥状况是作物光合特性发挥的基础,同时也是系统经济效益的保障。

目前国内外对自然状态下间作系统光效应方面

已进行较多研究^[11-13],但对于不同水肥补给条件下,间作系统的光竞争效应以及光合特性的研究却鲜有报道。本文以晋西黄土区典型的苹果-玉米间作模式为研究对象,探究不同水肥调控措施对玉米灌浆期穗位叶光合生理参数的影响,为该地区苹果-玉米间作系统水肥管理措施的制定以及不同水肥管理条件下间作系统种间互作机制研究提供理论基础,也可为人工控制地上部分光竞争探索新的方法。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于山西吉县国家野外科学试验站石山湾试验基地($36^{\circ}00'-36^{\circ}13' \text{ N}$, $110^{\circ}31'-110^{\circ}56' \text{ E}$),该地属于黄土残垣沟壑区,表层为第四纪风积黄土,呈微碱性反应($\text{pH} = 7.9$),土壤贫瘠,有机质含量在1%以下。气候属温带大陆性气候,年平均降水量 575.9 mm ,主要集中在6—8月,约占全年降水量的80.6%,年平均蒸发量为 1723.9 mm ,4—7月蒸发量占全年蒸发量的54%。年平均无霜期170 d左右,平均气温 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$,平均积温 $3357.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 试验设计

1.2.1 灌水量设定 试验于2014年4—9月进行。采用当地典型果农间作模式—苹果-玉米。根据该地区多年月平均降水量及苹果和玉米的月平均耗水

量^[14-17] 在作物需水关键期(6—9月)进行灌水处理,灌溉方式采用小畦灌溉。灌水量根据苹果和玉米适宜的土壤水分范围^[14-17],设定3个灌溉水平,分别为:0~60 cm土层平均质量含水量占田间持水量(F_c)的50%、65%和85%(田间持水量23.4%)并在玉米需水关键的拔节期、抽雄期、灌浆初期进行灌溉。

灌水定额计算公式为:

$$M(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}) = H10000(\theta_w - \theta_0) n$$

式中: M 为灌水量; H 为土壤计划湿润层深度(0.6 m); θ_w 为设定灌溉水平下的土壤质量含水量; θ_0 为当时的土壤质量含水量; n 为 H (0.6 m) 土层内的土壤孔隙率。

试验期间降雨及灌水情况如图1所示。2014年6—10月累计降水量为307.16 mm。

1.2.2 施肥量设定 根据当地的施肥习惯,肥料类型选用N、P、K复合肥,按照当地的经验施肥量设定3个施肥水平,即: N 289 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + P₂O₅ 118 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + K₂O 118 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F_1 , 70%经验施肥

量)、N 412.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + P₂O₅ 168.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + K₂O 168.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F_2 , 100%经验施肥量)、N 537 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + P₂O₅ 219 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + K₂O 219 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F_3 , 130%经验施肥量)。生育期内试验肥随灌溉水均匀施入土壤中,施肥灌溉具体时间及用量如表1所示。

根据双因素三水平试验设置,共设9个处理,另设一组空白对照处理,每个处理重复3次,随机区组设计。试验苹果树为4年生,株高2.2 m,胸径4.2 cm,冠幅1.5 m,冠高1.2 m,尚未开始坐果,株行距为4 m×5 m;玉米株行距为0.5 m×0.6 m,每个小区共4棵果树,小区边缘距离树1 m(图2),小区面积为42 m²。

1.3 光合指标测定

在玉米的灌浆期(8月25、26、27日)选择晴朗无云的天气,利用Li-6400便携式光合仪测定玉米的光合指标。取样线布设于两棵果树之间,垂直于果树行方向(图2)样线上布设样点,取样点分别距离

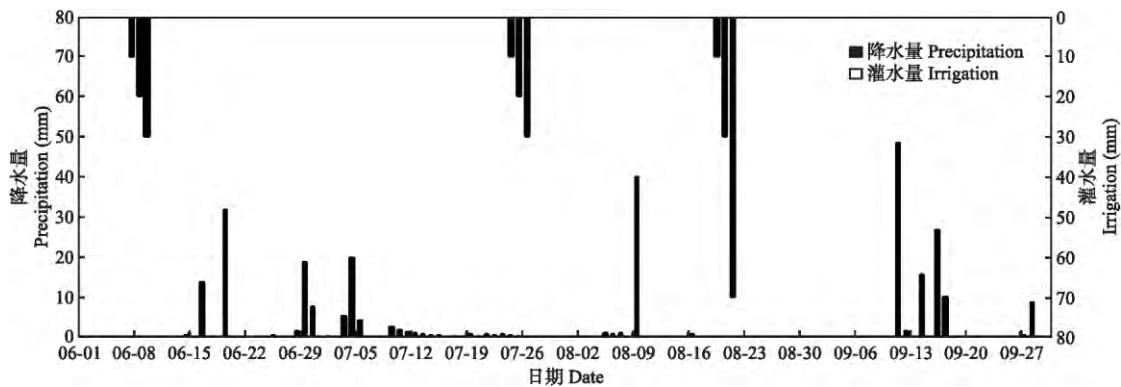


图1 2014年6—10月降水量及灌溉量

Fig.1 Precipitation and irrigation from June to October in 2014.

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage			抽雄期 Tasseling stage			灌浆期 Filling stage					
	灌水量 Irrigation rate ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	施肥量 Fertilizer rate ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			灌水量 Irrigation rate ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	施肥量 Fertilizer rate ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			灌水量 Irrigation rate ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	施肥量 Fertilizer rate ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
W ₁ F ₁	100	0	0	0	100	144.5	59.0	59.0	100	144.5	59.0	59.0
W ₂ F ₁	200	0	0	0	200	144.5	59.0	59.0	300	144.5	59.0	59.0
W ₃ F ₁	300	0	0	0	300	144.5	59.0	59.0	700	144.5	59.0	59.0
W ₁ F ₂	100	82.4	33.8	33.8	100	165.0	67.5	67.5	100	165.0	67.5	67.5
W ₂ F ₂	200	82.4	33.8	33.8	200	165.0	67.5	67.5	300	165.0	67.5	67.5
W ₃ F ₂	300	82.4	33.8	33.8	300	165.0	67.5	67.5	700	165.0	67.5	67.5
W ₁ F ₃	100	107.4	43.8	43.8	100	214.8	87.6	87.6	100	214.8	87.6	87.6
W ₂ F ₃	200	107.4	43.8	43.8	200	214.8	87.6	87.6	300	214.8	87.6	87.6
W ₃ F ₃	300	107.4	43.8	43.8	300	214.8	87.6	87.6	700	214.8	87.6	87.6
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

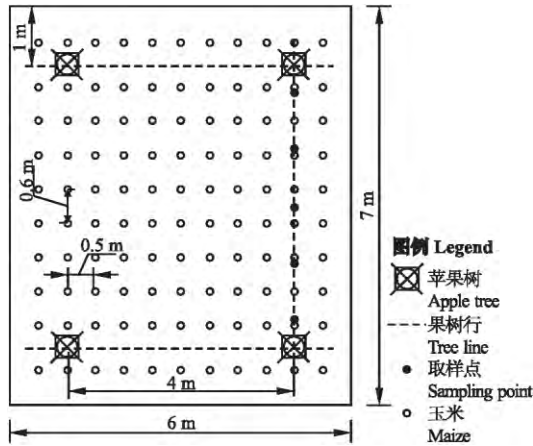


图2 试验小区及光合监测点
Fig.2 Experiment plot and photosynthesis monitoring points.

树行 0.5、1.5、2.5 m.测量指标包括光合有效辐射 (PAR , $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、净光合速率 (P_n , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率 (T_r , $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度 (C_i , $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)、气孔导度 (g_s , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 测定时间为 9:00—17:00 每 2 h 测定 1 次.叶片水分利用效率计算公式: $\text{WUE} = P_n / T_r$.

1.4 数据处理

运用 Excel 2010 软件进行数据统计及图表制作 运用 SPSS 16.0 软件进行方差分析 采用 Duncan 法进行差异显著性检验 运用 Matlab 2012 软件进行多元回归分析.在回归分析中,为了消除量纲以及自变量自身变异大小和数值大小的影响,将各处理水平数据进行标准化^[19],公式如下:

$$x^* = (x - \mu) / \sigma$$

式中: x^* 为编码值; x 为试验设置值; μ 为各因素均值; σ 为各因素标准差,各试验因素各水平标准化后编码值如表 2 所示.

2 结果与分析

2.1 水肥调控对光合指标日变化的影响

2.1.1 光合有效辐射日变化 苹果-玉米间作系统

表 2 玉米试验因素及编码表
Table 2 Factors and coding levels of maize test

灌溉水平编码 Code of irrigation rate (X_1)	施肥水平编码 Code of fertilizer rate (X_2)	全生育期 灌溉定额 Total irrigation rate ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	全生育期 总施肥量 Total fertilizer rate ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
-0.927	-1	300	525
-0.132	0	700	750
1.060	1	1300	975

各处理光合有效辐射平均值日变化为“单峰”曲线 (图 3).峰值出现在 13:00, 达 $1198 \sim 1511 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.一天中光合有效辐射最低值出现在傍晚 17:00, 最低值范围: $461 \sim 613 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.光合有效辐射与距树距离呈显著负相关 ($r = -0.998, P = 0.044$).距树距离平均每增加 1 m, 光合有效辐射减少 $143 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.这可能是由于 4 年生果树植株矮小, 郁闭度低, 灌浆期玉米穗位叶受同种玉米植株的遮阴影响较大的结果.

2.1.2 净光合速率日变化 苹果-玉米间作系统不同水肥调控处理下净光合速率日变化为“单峰”曲线(图 4).峰值均出现在中午 13:00 时, 可达 $7.12 \sim 13.00 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.各试验组光合速率峰值均较对照组高, 增幅可达 $4.4\% \sim 82.6\%$.说明灌水施肥可以提高作物对强光的利用能力, 增加其光合潜能.

2.1.3 蒸腾速率日变化 苹果-玉米间作系统不同水肥调控处理下蒸腾速率日变化为“单峰”曲线(图 5), 最高值出现在 13:00 左右, 可达 $5.92 \sim 8.99 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.且上午的蒸腾速率大于下午, 到 17:00 蒸腾速率达到最低值.这与光合有效辐射和气孔导度的日变化相关, 原因可能是植物蒸腾作用依赖于太阳辐射提供能量, 辐射强, 温度高, 蒸腾作用随之加快^[20], 同时蒸腾作用又要通过气孔实现, 因而与气孔导度日变化有显著的相关性. F_1 组中蒸腾速率峰值均较为明显, 与光合有效辐射的峰值一致, 可能此时光照及温度是作物蒸腾的限制因素. F_2 组中, 蒸腾速率在午时出现明显的“平台期”, 可能此时气孔等生理状况是蒸腾的限制因素. $W_1 F_3$ 及对照组中, 蒸腾速率表现为较早达到峰值后迅速下降, 可能低水-高肥及无灌水条件下, 植物可吸收利用的土壤水分较少, 午时太阳辐射强, 温度高, 植物失水造

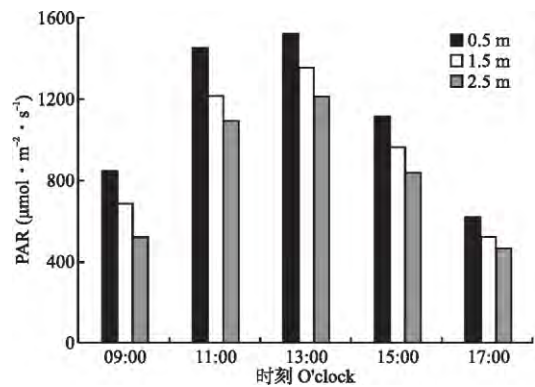


图 3 平均光合有效辐射日变化

Fig.3 Diurnal change of average PAR.

图例表示距树距离 The legend meant the distance from the tree line. 下同 The same below.

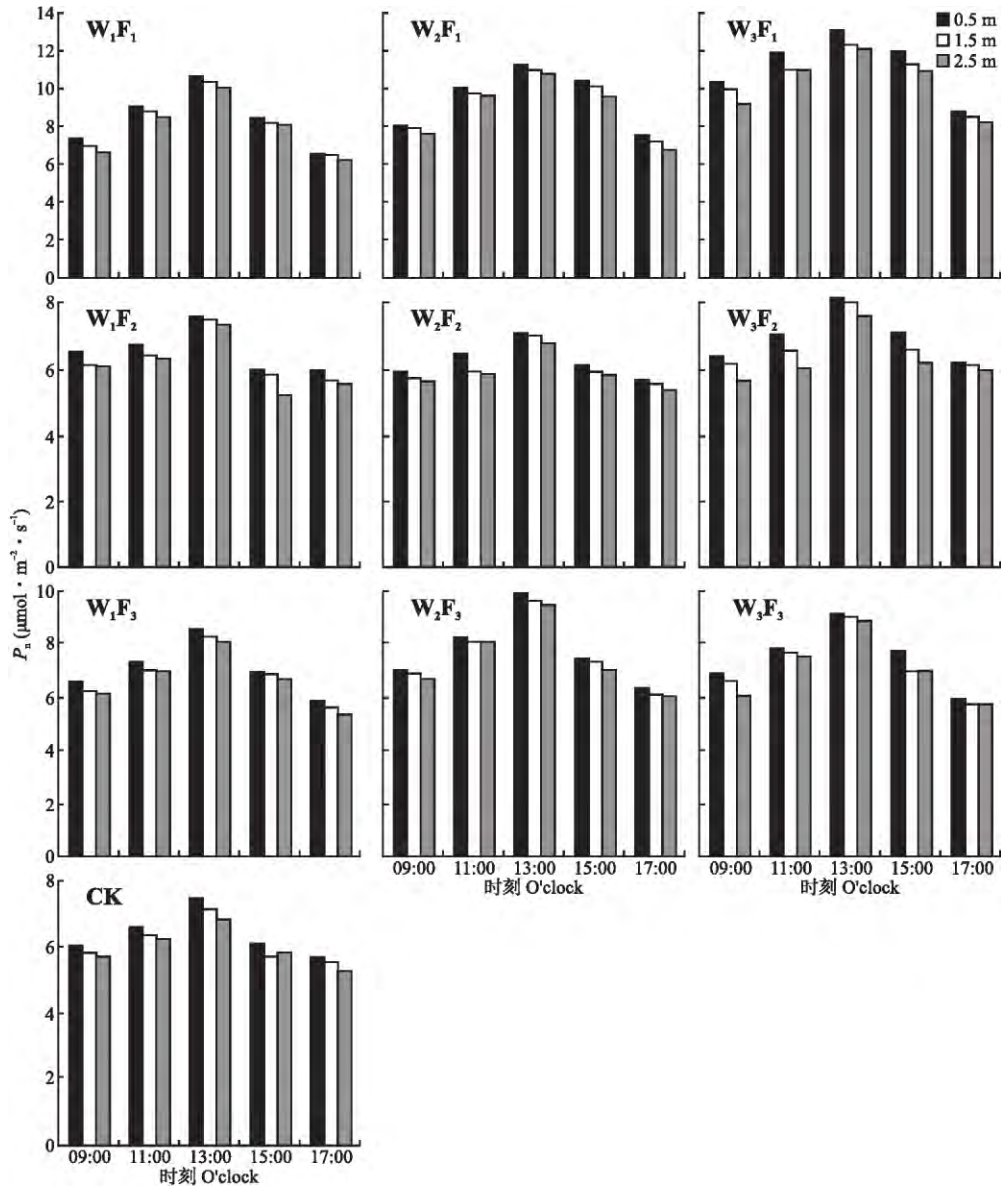


图 4 各处理净光合速率日变化

Fig.4 Diurnal change of average P_n in different water and fertilizer treatments.

成气孔关闭 随后辐射减弱 进一步诱导气孔关闭, 导致蒸腾速率在 11:00 后就呈逐渐减弱的趋势。

2.1.4 水分利用效率日变化 植物水分利用效率能够有效地衡量植物协调碳同化和水分耗散之间的关系^[21] 是反映植物耐旱性的一个有效指标^[22]。苹果-玉米间作系统不同水肥调控处理下水分利用效率日变化为“U”型曲线(图 6),水分利用效率最低值出现在 11:00—13:00 左右,为 1.19 ~ 1.66 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$,17:00 水分利用效率最大,日极差最高可达 2.80 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。这是由光合作用和蒸腾作用两个相互耦合的过程相互影响所致^[23]:早上净光合速率和蒸腾速率都较低 随着光照的增强 蒸腾

速率和净光合速率都逐渐增强 受光照、温度等因素的影响^[24] 蒸腾作用的增速高于净光合速率的增速 所以水分利用效率逐渐减小;午后 随着光照的减弱 蒸腾速率和净光合速率均逐渐减小 但蒸腾速率减小的速度更快 水分利用效率升高^[25]。17:00 时各处理水分利用效率均达到一天中的最大值。一方面原因可能是由于暗诱导使气孔关闭的速度较快,蒸腾作用受到强烈抑制 而胞间仍然存留一些 CO_2 , 可为光合作用提供原料 光合速率滞后下降 所以此时表现出较高的水分利用效率;另一方面原因是随着光照强度的降低 植物为维持自身生长的需求 通过提高叶片自身的水分利用效率来适应环境^[6-26],

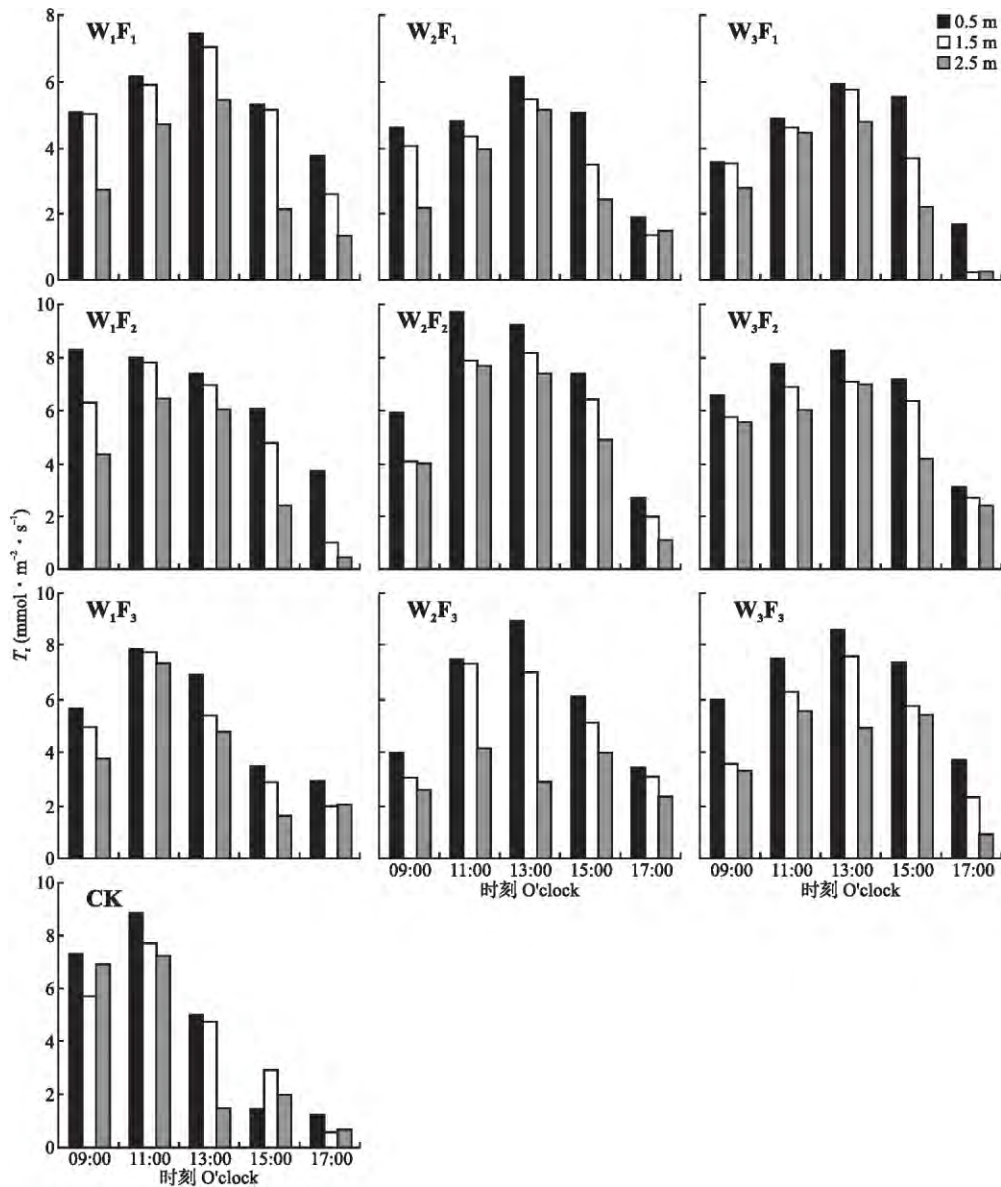


图 5 各处理蒸腾速率日变化

Fig.5 Diurnal change of average T_r in different water and fertilizer treatments.

用同样多的有效气孔水分散失换取更多的 CO_2 同化物积累^[27-29]。而此时对照的水分利用效率也达到一天中最大值 ($5.85 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)，且高于其他试验组，说明灌水、施肥可能会降低作物水分利用效率的提高潜能。适度的水分胁迫则有利于提高作物的水分利用效率，这也体现了植物对逆境的适应性。

2.1.5 气孔导度日变化 植物叶片气孔可以根据植物和外界条件控制 CO_2 和水汽的进出，从而影响植物的光同化^[30]。本试验中，苹果-玉米间作系统不同水肥调控处理下气孔导度日变化均为“单峰”曲线（图 7），峰值多出现在 11:00 左右，可达 $0.373 \sim 0.507 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这与光合有效辐射及净光合速

率日变化相似：上午随着光合作用的增强，胞间 CO_2 消耗快，使得叶片内部 CO_2 分压降低，致使气孔逐渐开放^[7, 26]；中午辐射大，温度高，光合速率最快，气孔导度最大。此外还可能与植物水分状况有关：中午高温强光，玉米气孔周围的表皮细胞失水快于保卫细胞，导致气孔开大^[21, 31-32]。暗诱导气孔关闭的速度极快，所以气孔导度在傍晚迅速降低，达到一天中的最小值^[26]。除 W_1F_2 、 W_1F_3 外，各试验组气孔导度在 11:00 就达到峰值，之后 11:00—13:00 出现一个平稳期，然后迅速下降，这可能是由于 11:00—13:00 温度高，蒸腾作用加剧，细胞失水较多阻碍气孔继续开放。13:00 以后光照强度逐渐减弱，气孔导度迅速降低。而对照组在 11:00 达到峰值后气孔导

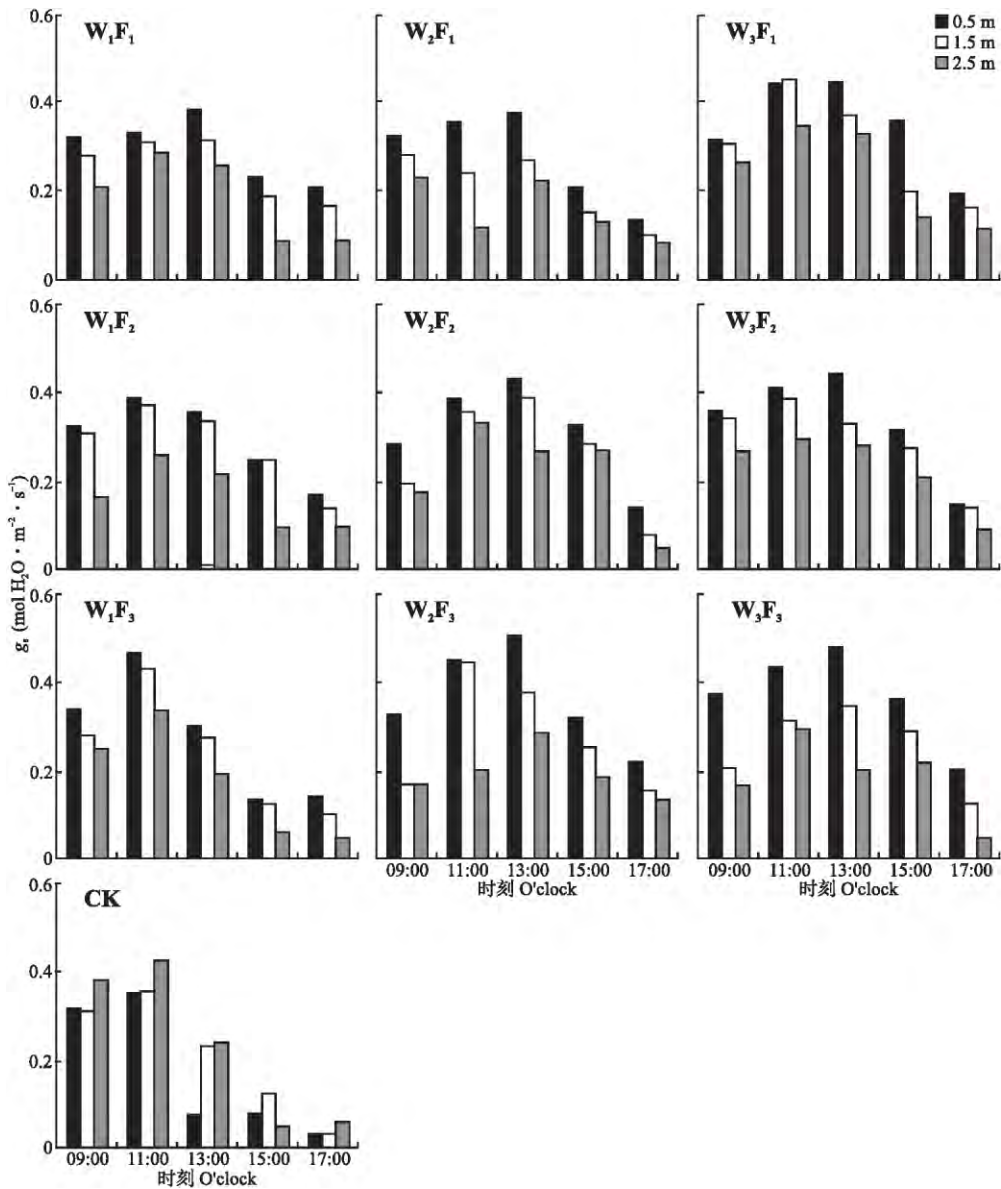


图 6 各处理水分利用效率日变化

Fig.6 Diurnal change of average WUE in different water and fertilizer treatments.

度随即下降,并没有出现平稳期,可能是无水肥补给的条件下,土壤供水状况较差,不足以弥补作物蒸腾散水,导致气孔关闭^[32].而试验组 W_1F_2 、 W_1F_3 虽然也有水肥的补给,但是低水-中肥、低水-高肥的组合使土壤溶液的浓度较高,不利于植物吸收利用,从而无法弥补蒸腾散水的损失.这说明合理的水肥处理可以延长气孔开放时间.

2.1.6 胞间二氧化碳浓度日变化 CO_2 是光合作用的反应底物,叶片气孔内 CO_2 浓度的高低可以作为判断光合作用潜在能力的一项指标^[31],本试验中,苹果-玉米间作系统不同水肥调控处理下胞间 CO_2 浓度日变化呈“U”型曲线(图 8),最低值出现在 11:00—13:00,范围在 $117.70 \sim 142.10 \mu mol \cdot mol^{-1}$.

这主要是由于上午随着光合作用的增加,外界 CO_2 浓度逐渐减小,胞间 CO_2 消耗快,浓度减小,在光合速率达到最大值的 11:00—13:00,胞间 CO_2 浓度达到最低值.下午太阳辐射的降低导致光合速率的大幅降低,叶片光合消耗减小,同时外界 CO_2 浓度增加,胞间 CO_2 浓度也随之增加^[23]. F_1 组中,最低值出现在正午 13:00,上午下降和下午增加的趋势都比较明显,斜率较大.而 F_2 组中,从 11:00 左右就到达最低值,之后变化缓慢,11:00—15:00 出现一个平稳期,随后胞间 CO_2 浓度迅速增加. F_3 组中,因灌溉量的不同,最低值出现时间及变化趋势各异.所以不同的水肥处理可以影响胞间 CO_2 浓度最低值出现及维持的时间.这是由于土壤的水分状况会影响气孔

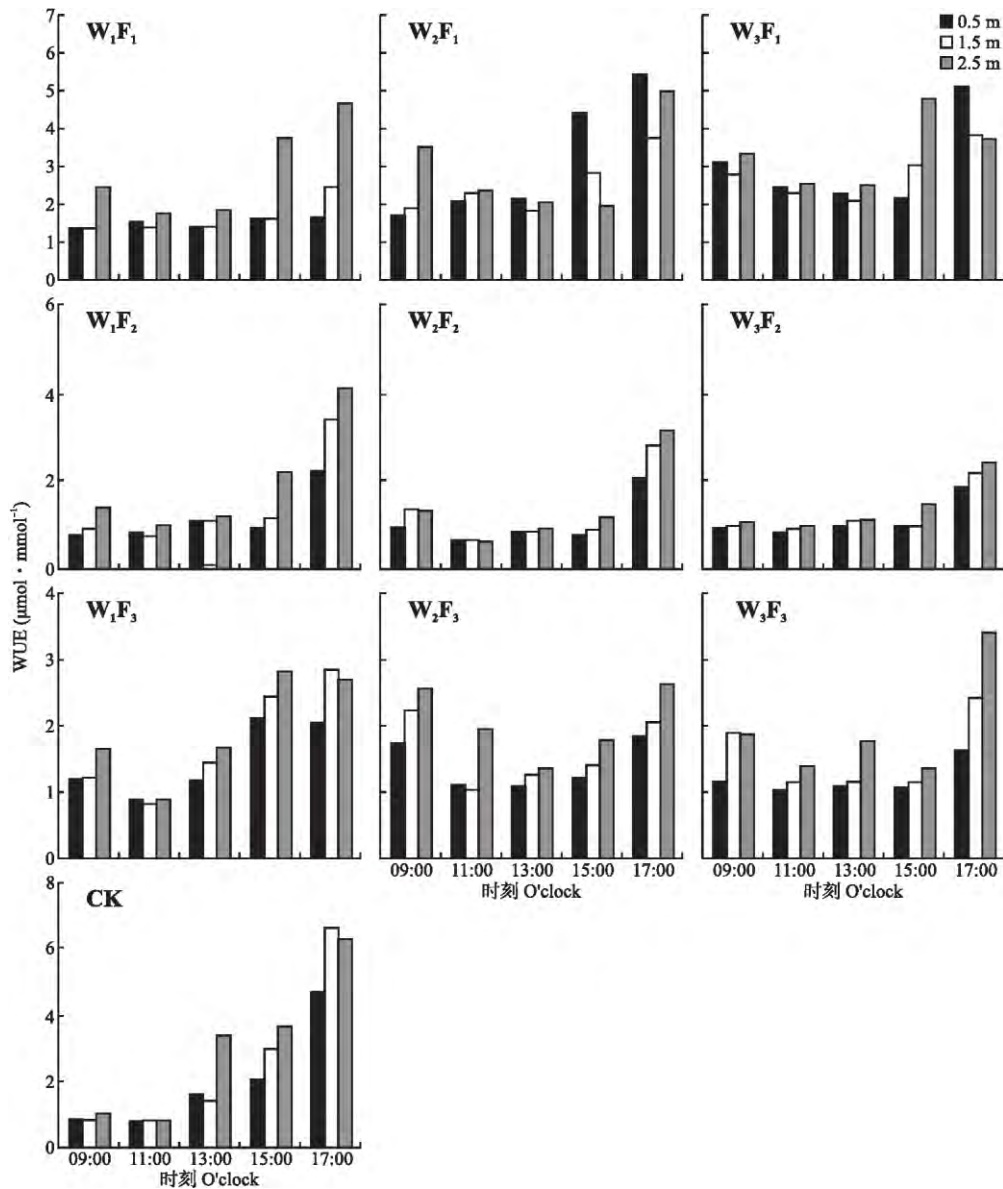


图7 各处理气孔导度日变化

Fig.7 Diurnal change of average g_s in different water and fertilizer treatments.

开放,从而影响 CO_2 的进出,而土壤养分状况会影响叶绿素等光合元素的合成以及光合作用消耗 CO_2 的速度和时间,进一步影响胞间 CO_2 浓度^[10]。各组光合指标日变化规律显示,随着净光合速率的降低,胞间 CO_2 浓度逐渐升高,说明本试验中各试验组及对照组光合作用的限制因素均为非气孔因素^[33]。

2.2 各光合生理指标与距树行距离的关系

通过各光合指标与距树行距离的相关分析(表3)可知, T_r 、 WUE 、 g_s 与距树行距离有着显著的线性相关性。 T_r 与距树行距离呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 距树行距离每增加 1 m, 蒸腾速率减小 0.56 ~ 1.41 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表4), 这是由于植物间遮阴的影响, 离树行越远光照越弱, 温度降低, 湿度升高, 不利

于植物蒸腾散水^[26]; W_2F_3 减小速度最快, 为 1.41 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 且各试验组减小率明显大于对照组 (0.56 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 可能是水肥补给条件下植物生长茂盛, 遮阴、防风作用较大的原因。 WUE 与距树行距离呈显著正相关, 随着距树行距离的增大, 水分利用效率逐渐增大, 这与不同距树距离处小气候的差异性有关^[24], W_1F_1 组增速最快, 距树行距离每增加 1 m, 水分利用效率增加 0.69 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, 各试验组水分利用效率增长速率明显低于对照 (1.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$), 这同样是由于灌水施肥导致植株地上部分光竞争加剧, 植物为适应逆境增加水分利用效率。其中 g_s 与距树行距离呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 即随着距树行距离的增加,

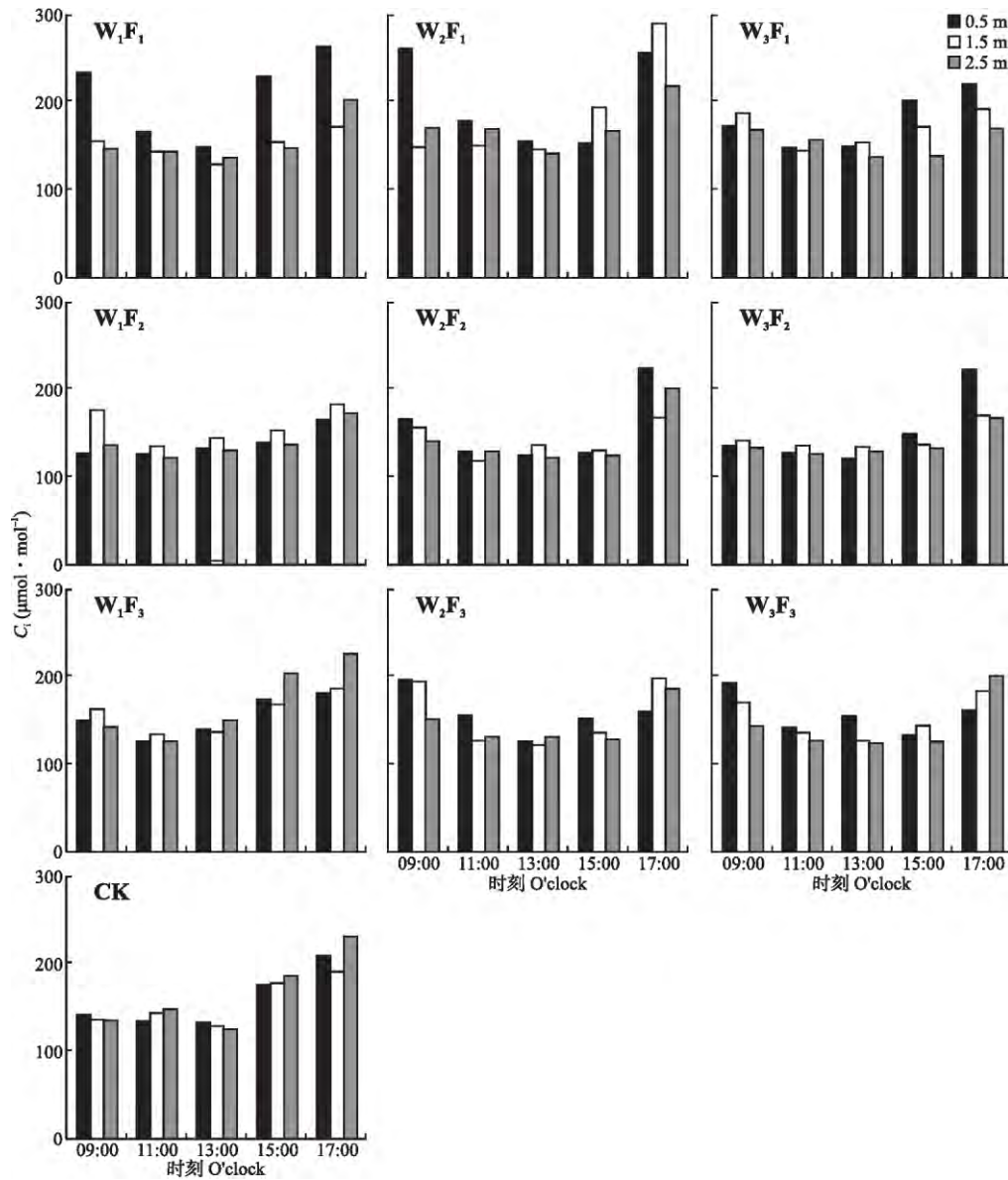


图 8 各处理胞间 CO₂ 浓度日变化

Fig.8 Diurnal change of average C_i in different water and fertilizer treatments.

气孔导度逐渐降低,距树行距离每增加 1 m,气孔导度减少 0.028~0.840 mol · m⁻² · s⁻¹(表 3),这可能是由于玉米受种内遮阴影响较大,距树越远,作物光合作用越弱,造成叶片内 CO₂ 分压高,气孔导度相对较低,此外,也与土壤供水状况、叶片温度等因素

表 3 光合指标与距树行距离的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of photosynthetic index with distance from the tree line

光合指标 Photosynthetic index	P _n	T _r	WUE	g _s	C _i
相关系数 Correlation coefficient	-0.169 ^{ns}	-0.731 ^{**}	0.455 [*]	-0.899 ^{**}	-0.328 ^{ns}

ns: 不显著 No significant; * P<0.05; ** P<0.01. 下同 The same below.

表 4 光合指标与距树行距离的变化率

Table 4 Change rate of photosynthetic index with distance from the tree line

处理 Treatment	T _r (mmol · m ⁻² · s ⁻¹ · m ⁻¹)	WUE (μmol · mmol ⁻¹ · m ⁻¹)	g _s (mol · m ⁻² · s ⁻¹ · m ⁻¹)
W ₁ F ₁	-1.13	0.69	-0.064
W ₂ F ₁	-0.75	0.08	-0.620
W ₃ F ₁	-0.72	0.21	-0.055
W ₁ F ₂	-1.37	0.46	-0.066
W ₂ F ₂	-0.99	0.21	-0.490
W ₃ F ₂	-0.77	0.13	-0.053
W ₁ F ₃	-0.72	0.23	-0.053
W ₂ F ₃	-1.41	0.32	-0.840
W ₃ F ₃	-1.32	0.38	-0.093
CK	-0.56	1	-0.028

有关^[36-37], 试验组 W_2F_3 的减小速率最快, 为 $0.840 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 各试验组的减小率明显高于对照组 ($0.028 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 原因在于水肥补给促进植株地上部分的生长, 导致植株间遮阴加重, 使地上部分光竞争激烈. 其中 W_2F_1 、 W_2F_2 、 W_2F_3 3 个处理的减少速率较其他组高一个数量级, 表明中度灌溉水平下, 种间或种内竞争可显著影响气孔导度.

2.3 各光合指标与灌水和施肥因素的关系

2.3.1 灌水与施肥对各光合指标日均值的影响 双因素方差分析结果表明 (表 5), 施肥处理对各项光合指标都有显著影响, 灌溉处理对蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度无显著影响, 对其他指标有显著影响, 灌水和施肥的交互作用对胞间 CO_2 浓度及水分利用效率影响不显著, 对其他指标有显著影响. 从 F 值可以看出: 试验因素对气孔导度的影响能力表现为灌溉处理 > 施肥处理, 对其他光合指标的影响能力均表现为施肥处理 > 灌溉处理. 原因可能是气孔开关主要受保卫细胞含水量的影响, 而灌水处理会直接影响植物可吸收利用的土壤水分, 从而对气孔导度产生较大的影响^[9]. 其他光合指标对施肥处理的反应较敏感.

各处理光合指标日均值如表 6 所示. 试验组较对照组光合速率的增加幅度最高可达 73.1%, W_3F_1

组平均光合速率最高, 为 $10.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 且施肥水平为 F_1 的试验组净光合速率显著高于其他组, 说明本试验中施肥量较低的处理更利于植物的光合作用. 试验组中仅 W_3F_1 和 W_2F_1 蒸腾速率低于对照, 分别减小 15.9% 和 15.4%, 其余组均高于对照, 说明水肥补给可能会加剧植株蒸腾散水. 试验组 W_3F_1 和 W_2F_1 水分利用效率与对照无显著差异, 而其他试验组显著低于对照组, 减小率达 3.4% ~ 57.4%. 这与植物的生理特性有关, 适度的干旱胁迫可以提高作物水分利用效率, W_3F_1 水分利用效率最高, 为 $3.05 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$. 试验组气孔导度显著高于对照组, 增加幅度达 7.9% ~ 49.4%, W_3F_1 气孔导度最高, 达 $0.295 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 试验组 W_2F_1 、 W_1F_1 胞间 CO_2 浓度显著高于对照组, 分别提高 19.3%、9.0%, 其余处理与对照无显著差异.

本试验中 W_3F_1 较其他组具有较高的净光合速率、气孔导度、水分利用效率以及较低的蒸腾速率, 是最利于作物光合效应的水肥调控模式.

2.3.2 灌水和施肥与各光合指标日均值的定量关系

建立各光合指标与灌水量和追肥量的非线性回归关系, 回归方程如表 7 所示. 由方程可知, 净光合速率与灌水量的关系为开口向下的抛物线, 本试验中随着灌水量的增加净光合速率逐渐增加, 当灌水总

表 5 灌水量与施肥量因素方差分析 (F 值)

Table 5 Variance analysis of irrigation and fertilization rate (F value)

影响因素 Influence factor	光合指标 Photosynthetic index				
	P_n	T_r	WUE	g_s	C_i
灌水量 Irrigation rate	19.005**	0.042 ^{ns}	10.488**	28.787**	2.443 ^{ns}
施肥量 Fertilizer rate	147.721**	113.923**	374.783**	4.356*	31.152**
灌水量×施肥量 Irrigation rate×fertilizer rate	10.431**	10.583**	39.079**	11.219**	2.092 ^{ns}

表 6 不同水肥处理光合指标日均值

Table 6 Daily average of photosynthetic indices of different water and fertilizer treatments (mean±SD)

处理 Treatment	P_n ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	WUE ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)	g_s ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)
W_1F_1	8.06±0.40a	5.17±0.26a	2.03±0.10a	0.238±0.012a	171.01±8.55a
W_2F_1	9.11±0.46b	4.30±0.22b	2.89±0.15b	0.213±0.011bc	187.21±9.36b
W_3F_1	10.64±0.53c	4.32±0.22b	3.05±0.15b	0.295±0.015d	166.93±8.35ac
W_1F_2	6.26±0.31de	6.23±0.31cd	1.51±0.08c	0.247±0.012ae	147.43±7.37d
W_2F_2	6.01±0.30d	6.93±0.35e	1.29±0.06d	0.266±0.132eg	146.50±7.33d
W_3F_2	6.59±0.33def	6.57±0.33ce	1.27±0.06d	0.285±0.142dg	144.67±7.23d
W_1F_3	6.79±0.34df	5.19±0.26a	1.74±0.09e	0.231±0.116ab	160.27±8.01ae
W_2F_3	7.56±0.38ag	5.28±0.26a	1.67±0.08ce	0.280±0.014dfg	153.45±7.67de
W_3F_3	7.19±0.36dfg	5.99±0.30d	1.56±0.08c	0.270±0.014gf	151.08±7.55de
CK	6.14±0.31e	5.10±0.26a	2.99±0.15b	0.197±0.010c	156.91±7.85cde

同列数值后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicated significant difference among treatments at 0.05 level.

表 7 各光合指标与灌水、施肥量的多元非线性回归分析

Table 7 Regression analysis of photosynthetic indices with irrigation and fertilization rate

回归方程 Regression equation	R^2	最优灌水量(编码值) Optimum irrigation rate (Code)	最优施肥量(编码值) Optimum fertilizer rate (Code)	最大值 Maximum
$P_n = 6.34 + 0.56x_1 - 1.05x_2 - 0.09x_1^2 + 1.94x_2^2 - 0.57x_1x_2$	0.9609	1300 (1.060)	525.0 (-1)	10.43
$T_r = 6.53 + 0.04x_1 + 0.45x_2 + 0.07x_1^2 - 1.53x_2^2 + 0.41x_1x_2$	0.9378	1300 (1.060)	783.8 (0.15)	6.75
$WUE = 1.44 + 0.12x_1 - 0.50x_2 - 0.12x_1^2 + 0.80x_2^2 - 0.29x_1x_2$	0.9296	1018.3 (0.5)	525.0 (-1)	2.92
$g_s = 0.263 + 0.022x_1 + 0.006x_2 + 0.004x_1^2 - 0.012x_2^2 - 0.007x_1x_2$	0.6296	1300 (1.060)	806.3 (0.25)	0.29
$C_i = 149.70 - 1.99x_1 - 10.06x_2 - 5.23x_1^2 + 18.79x_2^2 - 0.59x_1x_2$	0.8902	671 (-0.19)	525.0 (-1)	178.63

量为 $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时净光合速率可取最大值; 净光合速率随施肥量的增加先减少后增大, 呈开口向上的抛物线, 施肥总量为 $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时可取得最大值, 净光合速率最大可达 $10.43 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其他各光合指标取得极值时的灌水、施肥量如表 6 所示。在拔节-灌浆期内总灌水量为 1018.3、1149.2 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 总施肥量为 $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 可获得最大的水分利用效率, 为 $2.92 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。所以, 试验组 W_3F_1 的水肥调控模式最有利于作物光合效应的发挥。

3 讨 论

通过对各处理光合指标日变化的分析发现, 不同水肥调控方式对光合指标日变化趋势无明显影响。间作系统净光合速率日变化呈“单峰”曲线。大量水肥调控研究结果显示, 玉米在干旱胁迫或水分过饱和条件下都会出现光合午休现象^[38-39], 说明玉米的光合“午休”现象与水分状况有很大关系, 而本试验中各处理净光合速率日变化均未出现光合午休现象。一方面可能是因为复合系统中林木的遮阴及水力提升等作用, 显著提高了干旱期表层土壤的含水量, 为作物生长提供水分; 另一方面, 复合农林系统的降温、增湿等小气候效应也避免了光合午休的出现, 这与彭晓邦等^[40]的研究结果类似。此外, 本试验对土壤进行水肥补给, 不但缓解了正午时分的土壤水分亏缺状况, 还能够改善植物的生理结构, 增强植物的抗逆性。张岁岐等^[41]的研究认为, 合理水肥条件可以改善作物的水分状况, 提高作物的渗透调节和气孔调节能力, 提高光合速率^[42]。本研究结果显示, 水肥补给显著提高了作物净光合速率的峰值, 提高幅度达 $4.4\% \sim 82.6\%$ 。本研究中光合速率和气孔导度变化与胞间 CO_2 浓度变化趋势相反, 说明光合速率下降是受非气孔因素限制^[43], 所以灌水施肥显著增大玉米光合速率的原因是由于灌水和施肥处理降低了非气孔因素对光合作用的限制。丁从慧等^[44]

和陆文娟等^[45]的研究表明, 适当的水分胁迫可提高玉米的水分利用效率。本试验结果显示, 灌水和施肥降低了作物最大水分利用效率及水分利用效率日均值, 减小率达 $3.4\% \sim 57.4\%$ 。本研究结果显示, 灌水和施肥可使气孔导度日均值较对照组提高 $7.9\% \sim 49.4\%$, 这与罗红海等^[46]的研究结果类似。

通过对光合指标与距树行距离的相关分析发现, T_r 、 WUE 、 g_s 与距树行距离有着显著的线性相关性。 T_r 和 g_s 与距树行距离呈极显著负相关, WUE 与距树行距离呈显著正相关; 各试验组 T_r 、 g_s 减小率明显大于对照, WUE 增加率明显小于对照, 这是由于水肥补给促进了作物的营养生长, 导致植株间遮荫较严重, 使地上部分光竞争更为激烈。张珂珂等^[47]对减氮补水条件下小麦冠层结构的研究发现, 合理的水肥配比明显改善群体光照环境, 优化了群体冠层结构; 岳俊芹等^[48]的研究也表明, 合理的水肥配施可以明显增加冠层截获的光合有效辐射 (IPAR), 光能利用率大大提高。本研究中水肥补给较对照加重了植物地上部分的光竞争, 从而影响了气体交换性能的水平变异。

试验组 W_3F_1 组拥有最高的净光合速率日均值 ($10.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度日均值 ($0.295 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、水分利用效率日均值 ($3.05 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) 以及较低蒸腾速率日均值 ($4.32 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。多元回归分析结果显示, 在不同水肥调控模式下, 植物各光合生理指标无法同时达到最大, 而各指标对施肥量来说有一个比较一致的范围, 即低施肥量 (经验施肥量的 70%: $\text{N } 289 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + \text{P}_2\text{O}_5 118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + \text{K}_2\text{O } 118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。在拔节-灌浆期内, 灌水总量为 $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 施肥总量为 $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 净光合速率日均值最大, 为 $10.43 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 而当灌水总量为 1018.3 和 1149.2 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 施肥总量为 $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 作物水分利用效率日均值最大, 为 $2.92 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。杨丽等^[49]的研究表明, 当土壤水分有限的条件下过量施

肥会使各光合生理指标下降,所以在本试验中,施肥水平可能已经超出了其最适投入量,因而导致低肥处理下作物的光合效率最高。

合理的施肥和灌溉有利于苹果×玉米间作系统作物光合性能的发挥,提高系统的生态和经济效益。本试验结果显示,拔节期灌水 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,抽雄期灌水 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,灌浆期灌水 $700 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,拔节期不施肥,抽雄期施肥 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,灌浆期施肥 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,可使间作系统具有较好的光合效率。

参考文献

- [1] Yun L (云雷). Research on Interspecific Relationship in Economic Tree and Crop Intercropping System on Loess Region of Western Shanxi Province. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2011 (in Chinese)
- [2] Miller AW, Pallardy SG. Resource competition across the crop-tree interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agroforestry Systems*, 2011, **53**: 247-259
- [3] Jose S, Gillespie AR, Seifert JR. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the mid-western USA. *Agroforestry Systems*, 2000, **48**: 41-59
- [4] Casper BB, Jakson RB. Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, **28**: 545-570
- [5] Bazie JHR, Bayala G, Zombre J, et al. Separating competition-related factors limiting crop performance in an agroforestry parkland system in Burkina Faso. *Agroforestry Systems*, 2012, **84**: 377-388
- [6] Peng X-B (彭晓邦), Cai J (蔡靖), Jiang Z-M (姜在民), et al. Effects of light competition on crop productivity in an intercropping agroforestry ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(1): 545-552 (in Chinese)
- [7] Zhang J-S (张继澍). Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press, 2006: 54-58 (in Chinese)
- [8] Zhao K-F (赵可夫). Effect of the leaves of different positions in maize on the corn yield and the photosynthetic properties of those leaves after the growing out of the female flowers. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1981, **7**(4): 259-266 (in Chinese)
- [9] Li C-H (李潮海), Liu K (刘奎), Zhou S-M (周苏玫), et al. Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2002, **28**(2): 265-269 (in Chinese)
- [10] Tan F-W (谭凤梧). Studies on maize leaf growth and development rhythm and its function. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 1989, **20**(1): 30-34 (in Chinese)
- [11] He M-R (贺明荣), Leng S-C (冷寿慈). Effect of peach tree-crop intercropping on soil nutrients conditions and soil biological activity. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 1994, **25**(4): 188-189 (in Chinese)
- [12] Zhao Y (赵英), Zhang B (张斌), Wang M-Z (王明珠). Assessment of competition for water, fertilizer and light between components in the alley cropping system. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(6): 1792-1801 (in Chinese)
- [13] Soto-Pinto L, Perfecto I, Castillo-Hernandez J, et al. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, **80**: 61-69
- [14] Sun W-T (孙文涛), Sun Z-X (孙占祥), Wang C-X (王聪翔), et al. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(3): 563-568 (in Chinese)
- [15] Zhong S (仲爽), Li Y-K (李严坤), Ren A (任安), et al. Effects of different water and fertilizer combinations on yield and water consumption of maize. *Journal of Northeast Agricultural University* (东北农业大学学报), 2009, **40**(2): 44-47 (in Chinese)
- [16] Zhou Z-M (周振民). Water and fertilizer coupling experiment on the apple orchard in Loess Plateau Region. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2009, **28**(2): 109-111 (in Chinese)
- [17] Zhu D-L (朱德兰), Wang W-E (王文娥), Chu J (楚杰). Study on the coupling effect of water and fertilizer on apple in hilly area of Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2004, **22**(1): 152-155 (in Chinese)
- [18] Li P (李平), Zhang Y-J (张永江). Effects of water stress on water utilization and leaf photosynthetic characteristics in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings. *Cotton Science* (棉花学报), 2014, **26**(2): 113-121 (in Chinese)
- [19] Xue L (薛亮). Effect of Water and Nitrogen Coupling under Alternating Furrow Irrigation and N Placement on Summer Corn. Master Thesis. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2008 (in Chinese)
- [20] Peng S-Z (彭世彰), Xu J-Z (徐俊增), Ding J-L (丁加丽). Variations of stomatal conductance of rice under controlled irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2005, **21**(3): 1-5 (in Chinese)
- [21] Steduto P, Katerji N, Puertos-Molina H, et al. Water-use efficiency of sweet sorghum under water stress conditions: Gas-exchange investigations at leaf and canopy scales. *Field Crops Research*, 1997, **54**: 221-234
- [22] Sobrado MA. Relation of water transport to leaf gas exchange properties in three mangrove species. *Trees*, 2000, **14**: 258-262
- [23] Wang J-L (王建林), Yu G-R (于贵瑞), Fang Q-X (房全孝), et al. Responses of water use efficiency of nine plant species to light and CO₂ and its modeling. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(2): 525-533 (in Chinese)

- [24] Cao S-K (曹生奎), Feng Q (冯起), Si J-H (司建华), *et al.* Summary on the plant water use efficiency at leaf level. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(7): 3882-3892 (in Chinese)
- [25] Xu J-Z (徐俊增), Peng S-Z (彭世彰), Wei Z (魏征), *et al.* Intercellular CO₂ concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(7): 76-80 (in Chinese)
- [26] Cheng X-F (成雪峰), Zhang F-Y (张凤云), Chai S-X (柴守玺). Stomatal response of spring wheat and related affecting factors under different irrigation treatments. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(1): 36-40 (in Chinese)
- [27] Liu G-S (刘庚山), Guo A-H (郭安红), Ren S-X (任三学), *et al.* Effects of different mulching methods on diurnal variation of leaf photosynthesis and water use efficiency for summer maize. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(2): 152-156 (in Chinese)
- [28] Gao Y-H (高玉红), Niu J-Y (牛俊义), Xu R (徐锐), *et al.* Effects of different film mulching on photosynthesis, transpiration rate and leaf water use efficiency of maize. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2012, **21**(5): 178-184 (in Chinese)
- [29] Yu X-F (于晓芳), Gao J-L (高聚林), Song G-D (宋国栋), *et al.* The study on water use efficiency and concerned traits of maize inbred lines leaves. *Maize Science* (玉米科学), 2008, **16**(3): 64-69 (in Chinese)
- [30] Zhao P (赵平), Zeng X-P (曾小平), Peng S-L (彭少麟). Daily variation of gas exchange, stomatal conductance and water use efficiency in summer leaves of *Ormosia pinnata*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2000, **8**(1): 35-42 (in Chinese)
- [31] Li H-Z (李焕忠), Zhang J-L (张吉立). Effect of spray application on *Cotinus coggygia* Atropurpureus leaf changes of transpiration rate and intercellular carbon dioxide concentration. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2011(5): 94-97 (in Chinese)
- [32] Yan J-W (闫建文), Shi H-B (史海滨), Li X-Y (李仙岳), *et al.* Effect of water and nitrogen conditions on the photosynthetic characteristics and yield of maize in slightly salted soil. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2014, **28**(3): 277-284, 289 (in Chinese)
- [33] Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, **33**: 317-345
- [34] Lu X-L (卢训令), Hu N (胡楠), Ding S-Y (丁圣彦), *et al.* Study on photosynthetic ecophysiological characteristics of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in the Funiu Mountain Nature Reserve. *Journal of Henan University* (Natural Science) (河南大学学报: 自然科学版), 2010, **40**(6): 617-621 (in Chinese)
- [35] Xu D-Q (许大全), Xu B-J (徐宝基), Shen Y-G (沈允刚). Diurnal variation of photosynthetic efficiency in C3 plant. *Acta Phytophysiologica Sinica* (植物生理学报), 1997, **23**(4): 410 (in Chinese)
- [36] Gao Z-Q (高照全), Zou Y-J (邹养军), Wang X-W (王小伟), *et al.* Advance of influence factors for water transport in plants. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2004, **22**(2): 200-204 (in Chinese)
- [37] Guo J-H (郭江红), Wang B-T (王百田), Tian J-H (田晶会), *et al.* Influence of soil moisture on exchange between water and gas of oriental arborvitae at semi-arid region of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(2): 157-160 (in Chinese)
- [38] Green DS, Erickson JE, Kruger EL. Foliar morphology and canopy nitrogen as predictors of light-use efficiency in terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **115**: 163-171
- [39] Dang H-K (党红凯), Cao C-Y (曹彩云), Zheng C-L (郑春莲), *et al.* Effect of pre-sowing irrigation advancement of winter wheat on photosynthesis and yield of summer maize at later growth stage. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2015, **46**(10): 127-135 (in Chinese)
- [40] Peng X-B (彭晓邦), Zhong C-G (钟崇高), Shen P (沈平), *et al.* Photosynthetic response of maize and soybean to the microclimatic in an agroforestry system. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(3): 710-716 (in Chinese)
- [41] Zhang S-Q (张岁岐), Shan L (山仑). Research progress on water use efficiency of plant. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2002, **20**(4): 1-5 (in Chinese)
- [42] Wang X-J (王晓娟), Jia Z-K (贾志宽), Liang L-Y (梁连友), *et al.* Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dry land maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(2): 419-425 (in Chinese)
- [43] Winter K, Schramm MJ. Analysis of stomatal and non-stomatal component in the environment control of CO₂ exchange in leaves of *Welwitschia mirabilis*. *Plant Physiology*, 1986, **82**: 173-178
- [44] Ding C-H (丁从慧), Shen S-H (申双和), Tao S-L (陶苏林), *et al.* The response of maize root-canopy and leaf water use efficiency to the soil moisture. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2015, **43**(10): 108-111 (in Chinese)
- [45] Lu W-J (陆文娟), Li F-S (李伏生), Nong M-L (农梦玲). Effects of alternate partial root-zone irrigation on physiological characteristics and water use of maize under different water and fertilizer conditions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(18): 5257-5265 (in Chinese)
- [46] Luo H-H (罗宏海), Zhang H-Z (张宏芝), Tao X-P (陶先萍), *et al.* Effects of water and nitrogen management modes on the leaf photosynthetic characters and

- yield formation of cotton with under-mulch drip irrigation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(2): 407-415 (in Chinese)
- [47] Zhang K-K (张珂珂), Zhou S-M (周苏玫), Zhang M (张嫒), *et al.* Effects of reduced nitrogen application and supplemental irrigation on photosynthetic characteristics and grain yield in high-yield populations of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(3): 863-872 (in Chinese)
- [48] Yue J-Q (岳俊芹), Zhang D-Q (张德奇), Li X-D (李向东), *et al.* Effects of phosphorus on winter wheat population characteristics, canopy intercepted photosynthetically active radiation and yield under certain nitrogen-potassium rates. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2016, **49**(5): 840-851 (in Chinese)
- [49] Yang L (杨丽), Jia Z-K (贾志宽), Han Q-F (韩清芳). Effects of water-fertilizer coupling on biomass and photosynthetic characteristics of flag leaf of winter wheat. *Journal of Northwest A&F University* (西北农林科技大学学报), 2015, **43**(2): 83-90 (in Chinese)

作者简介 高飞,女,1991年生,硕士研究生.主要从事复合农林生态系统研究. E-mail: 15201443407@163.com

责任编辑 张凤丽

高飞,王若水,许华森,等. 晋西黄土区水肥调控对苹果-玉米间作系统玉米灌浆期穗位叶光合生理特性的影响. *应用生态学报*, 2016, **27**(8): 2477-2490

Gao F, Wang R-S, Xu H-S, *et al.* Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics of maize leaves in ear position at filling stage in an apple-maize intercropping system in Losses Plateau of west Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(8): 2477-2490 (in Chinese)