

DOI: 10.5846/stxb201306101632

于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 赵先丽, 张玉书. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应. 生态学报, 2015, 35(9): 2902-2909.
Yu W Y, Ji R P, Feng R, Zhao X L, Zhang Y S. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2902-2909.

不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应

于文颖, 纪瑞鹏, 冯 锐, 赵先丽, 张玉书*

中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

摘要: 利用大型移动防雨棚开展了玉米水分胁迫及复水试验, 通过分析玉米叶片光合数据, 揭示了不同生育期水分胁迫及复水对玉米光合特性及水分利用效率的影响。结果表明: 水分胁迫导致玉米叶片整体光合速率、蒸腾速率和气孔导度下降以及光合速率日变化的峰值提前; 水分胁迫后的玉米叶片蒸腾速率、光合速率和气孔导度为适应干旱缺水均较对照显著下降, 从而提高了水分利用效率, 缩小了与水分充足条件下玉米叶片的水分利用效率差值; 在中度和重度水分胁迫条件下, 玉米叶片的水分利用效率降幅低于光合速率、蒸腾速率和气孔导度的降幅, 有时甚至高于正常供水条件下的水分利用效率; 适度的水分胁迫能提高玉米叶片的水分利用效率, 从而增强叶片对水分的利用能力, 抵御干旱的逆境; 水分亏缺对玉米光合速率、蒸腾速率及水分利用效率的影响具有较明显滞后效应, 干旱后复水, 光合作用受抑制仍然持续; 水分胁迫时间越长、胁迫程度越重, 叶片的光合作用越呈不可逆性; 拔节-吐丝期水分胁迫对玉米叶片光合作用的逆制比三叶-拔节期更难恢复。

关键词: 玉米; 水分胁迫; 复水; 光合速率; 蒸腾速率; 水分利用效率

Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage

YU Wenying, JI Ruipeng, FENG Rui, ZHAO Xianli, ZHANG Yushu*

Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China

Abstract: The field experiments of water stress and rewatering for maize were carried out using the large moving water-proof shed. The effects of water stress on the photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize in different growth stages were revealed by the photosynthetic data of leaves. The results showed as followed: water stress led to the decrease of the values of photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance and the earlier emergence of peak value of the daily variation of photosynthesis. Compared with the control, the transpiration rate, photosynthesis rate and stomatal conductance of maize leaves were decreased significantly, in order to adapt to the drought under the water stress condition so that the water use efficiency was improved and the difference of water use efficiency between the water stress and normal condition was shrunk. Under moderate or severe water stress condition, the decrease of water use efficiency was less than that of the photosynthesis, transpiration rate and stomatal conductance of maize leaves and the water use efficiency was sometimes even higher than that of the normal environment. The water use efficiency of maize leaves was improved under moderate water stress so that the ability of leaf using water was enhanced and maize better resisted drought environment; the subsequent effects of water stress on photosynthesis and transpiration and water use efficiency was obvious. After water stress

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2013IAE-CMA09); 辽宁省科技厅重大农业攻关项目(2011210002); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106029)

收稿日期: 2013-06-10; 网络出版日期: 2014-05-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yushuzhang@126.com

and rewater treatments, the inhibition of photosynthesis of maize leaves was still continued. Longer time and more severe the water stress was, the more nonreversible the photosynthesis of maize leaves might be. The inhibition of water stress on photosynthesis of maize leaves was more difficult to recovery from the jointing to silk stage than from three leaf to jointing stage.

Key Words: maize; water stress; rewatering; photosynthesis rate; transpiration rate; water use efficiency

干旱是玉米生产的主要非生物限制因素,光合作用是干旱影响玉米生长和代谢的第一环节^[1]。作物的光合作用特性通常以光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度及水分利用效率(WUE)等指标来反映^[2]。叶片蒸腾作用是玉米耗水的主要形式,水分利用效率(WUE)是评价玉米耐旱能力的重要指标之一,反映了作物生产过程中单位水分的能量转化效率,受蒸腾速率和光合速率共同影响^[3]。干旱引起气孔导度下降、 CO_2 反应受阻,导致叶片光合能力降低,作物通过提高叶片水分利用效率(WUE)来适应这种逆境^[4-5],水分胁迫对作物光合作用的严重影响,最终导致作物生物量、经济产量和水分利用效率下降^[6]。研究水分胁迫及水分胁迫后复水对玉米生理机制的影响及补偿效应,有助于从理论上认识水分胁迫对玉米不同生育阶段的水分散失、光合作用及其产物分配的动态影响过程,为利用玉米自身的生理生化特性、调节功能以及补偿机制达到节水增产的目的提供理论依据和技术支撑^[7-9]。

光合作用、气孔导度、蒸腾作用等植物气体交换参数指标对水分胁迫的响应是植物生理生态学研究的重要内容^[10]。有关水分胁迫与光合作用的关系,以及作物适应干旱环境的光合生理响应的研究一直是植物生理生态学研究热点之一。国内外关于玉米对水分胁迫与植物光合作用的关系已有较多研究。Farquhar^[11]认为检验气孔限制是否为光合速率下降的原因,除了考虑气孔导度的大小,还需考虑胞间 CO_2 浓度的变化;Bonyor^[12]发现干旱造成叶片气孔关闭并引起光合作用下降;许多学者^[10-15]通过试验研究干旱胁迫对玉米主要生理参数的影响程度;不同水分处理影响各生理指标峰值的高低和出现的早晚^[6,16];水分胁迫对蒸腾作用的影响大于光合作用^[17];赵天宏^[18]、刘庚山^[19]等通过试验研究复水后玉米生长发育以及生理生态参数和水分利用效率的补偿机制;马树庆等^[20]将玉米水分胁迫试验和分期播种试验相结合建立春玉米播种出苗气象指标及模型。

玉米是辽宁省第一大粮食作物,种植面积占粮食播种总面积的 40% 以上,常年播种面积约为 149 万 hm^2 ^[21]。张建平^[22]根据《排放情景特别报告》^[23-25]预测,未来东北地区玉米产量将呈较大幅度增加趋势,因此,需水量将进一步增大。辽宁地区干旱灾害发生频繁,水分已成为辽宁省大田作物高产稳产的主要限制因子^[26],因此,有必要研究水分胁迫对辽宁地区玉米生长发育和生理生态特性的影响以及玉米自身生理特性对水分胁迫的调节过程。本文通过对不同生育期玉米开展水分胁迫及复水试验,揭示不同生育期玉米叶片光合速率、蒸腾速率等气体交换参数以及水分利用效率的变化特征,探讨玉米光合特性和水分利用效率对水分胁迫的响应规律以及适应机理,为玉米抗旱节水生理研究提供参考依据,对维持粮食作物稳产、高产有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2011—2012 年在辽宁省锦州市生态与农业气象中心进行($41^\circ 49' \text{N}$, $121^\circ 12' \text{E}$)。试验区地处亚欧大陆东北部,属温带半湿润季风气候。该区域年均气温 $7.8\text{—}9.0\text{ }^\circ\text{C}$,年极端最高气温 $41.8\text{ }^\circ\text{C}$,年极端最低气温 $-31.3\text{ }^\circ\text{C}$;年无霜期 144—180 d;年均降水量 540—640 mm;主要作物为玉米,多年平均播种日期和成熟日期分别为 4 月 27 日和 9 月 16 日;土壤为典型棕壤,土壤 pH 值为 6.3^[27-28]。

1.2 试验方法

试验在大型活动式防雨棚内进行,利用池栽以避免小区土壤水分的相互渗透,小区面积为 $5\times 15\text{ m}^2$ (每个

池长 5 m、宽 3 m、深 2 m,共 5 个处理),四周用水泥层隔离。池内埋有 TDR,埋深 2 m,每 20 cm 一层,用于测定 10 层土壤含水量,地上安装 4m 高的移动式遮雨棚,降雨时遮挡,其余时间自然光照。用自来水表控制灌水量,灌水方式为均匀漫灌。供试玉米品种为丹玉 39。试验设对照(T1)和水分胁迫(T2、T3、T4、T5)5 个处理,每个处理 3 次重复,对照 T1 在全生育期内保证土壤水分适宜条件,即土壤相对湿度(0—60cm 土壤湿度)控制在 $(75\pm 5)\%$ 之内,田间持水量(0—60cm)为 21.7%;T2、T3、T4、T5 水分胁迫处理分别在不同生育期进行控水:T5 在三叶普遍期—拔节普遍期控水,土壤相对湿度控制在 $(45\pm 5)\%$;T4 在拔节普遍期—吐丝普遍期控水,土壤相对湿度控制在 $(45\pm 5)\%$;T3 在拔节普遍期—吐丝普遍期控水,土壤相对湿度下降至凋萎湿度(29%);T2 在吐丝普遍期—乳熟普遍期控水,土壤水分相对湿度控制在 $(45\pm 5)\%$;其他时段复水到适宜土壤相对湿度(参照对照)。每个处理选 3 株玉米,使用 LI-6400 型光合测定仪在晴天 6:30—18:30 测定叶片光合日动态,每小时观测 1 次。测定参数包括净光合速率(A_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等,并计算叶片水分利用效率($WUE = P_n/T_r$)。

1.3 数据处理

所用数据为 3 次重复的平均值,分析和画图采用 SPSS 12.0 统计软件与 Microsoft Excel 2007。

2 结果分析

2.1 不同生育期玉米叶片水分胁迫及复水后光合蒸腾特性及水分利用效率日动态变化

基于 2011 年观测数据,以拔节普遍期(6 月 25 日)、吐丝普遍期(7 月 31 日)和乳熟普遍期(9 月 5 日)为例,分析不同水分条件下玉米叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度以及水分利用效率的日变化规律。

2.1.1 拔节普遍期

从播种至三叶普遍期,所有试验区玉米正常播种和出苗;三叶普遍期至拔节普遍期,对 T5 试验区进行控水,T5 农田土壤相对湿度(0—60cm,下同)保持在 45%左右,T2、T3、T4 均未控水,土壤相对湿度与 T1(对照)保持一致,土壤相对湿度保持在 75%左右。T1—T4 四个试验区玉米长势一致,因此,仅将 T5(水分胁迫)与 T1(对照)进行比较。以 6 月 25 日(拔节普遍期)为例,比较两个试验区玉米叶片的光合、蒸腾特性以及水分利用效率的日变化情况(图 1)。

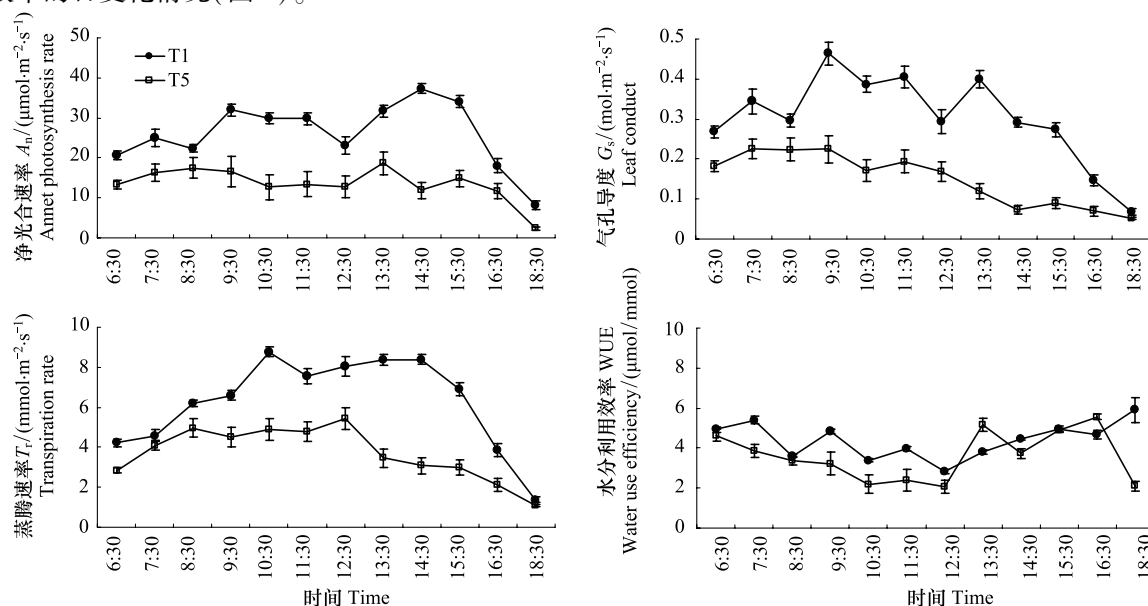


图 1 玉米拔节期叶片光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率日动态

Fig.1 Daily variations of photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance and water use efficiency of maize leaves during jointing stage

拔节期 T1 和 T5 的净光合速率日变化有明显的差异, T5 叶片净光合速率低于 T1 (对照) $4.9\text{--}25.5\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。T1 叶片净光合速率日变化呈早晚和中午低的双峰曲线, 9:30 左右出现第一个峰值, 14:30 左右出现第二个峰值, 12:30 左右由于气孔关闭, 光合作用减弱, 净光合速率下降。T5 叶片净光合速率日变化呈微弱多峰值变化, 早晚和 10:30—12:30 时间段略低, 13:30 左右达到最高值, 其最高值提前于 T1 的出现时间。水分胁迫影响了植物叶片的正常光合作用, 除了导致整体光合速率下降外, 还导致光合速率日变化峰值提前。

T1 和 T5 玉米苗期的蒸腾速率日变化均呈双峰曲线, T1 叶片蒸腾速率在 8:00 以后迅速上升, 11:00 左右出现第一个峰值, 15:00 左右出现第二个峰值, 然后开始直线下降。T5 叶片蒸腾速率在 9:00 左右出现第一个峰值, 13:00 左右出现第二个峰值, 峰值提前于 T1。水分胁迫降低了玉米叶片的蒸腾速率, 为适应植株体水分亏缺状况, 蒸腾速率下降, 低于对照 $0.28\text{--}5.29\text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 并且蒸腾速率日变化峰值提前。

T1 和 T5 气孔导度日变化差异显著, T1 玉米叶片气孔导度呈不显著的双峰曲线, 10:00 左右达到最大值, 在 12:30—13:30 之间气孔导度明显下降, 14:00 左右上升至第二个峰值, 之后下降; T5 玉米叶片气孔导度日变化呈上午高、午后显著下降的趋势, 气孔导度低于对照 $0.02\text{--}0.28\text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 水分胁迫导致气孔导度下降, 同时, 午后气孔导度较弱。

T1 和 T5 玉米叶片水分利用效率 (WUE) 日变化均呈上午下午高、中午低的趋势。上午 T1 对照的水分利用效率略高于 T5, 而午后两者之间的差异减小, 变化差异无明显规律。水分胁迫后的玉米叶片蒸腾速率、光合速率和气孔导度为适应干旱缺水均较对照下降明显, 从而提高了水分利用效率, 缩小了与水分充足条件下玉米叶片的水分利用效率差值。

2.1.2 吐丝普遍期

从拔节普遍期—吐丝普遍期, 对 T3 和 T4 试验区进行控水, T5 的 3 个小区复水到适宜土壤相对湿度 (参照对照), T2 不控水。T4 的 3 个小区 0—60cm 农田土壤相对湿度下降到 45% 左右, T3 的 3 个小区 0—60cm 农田土壤相对湿度下降至植株枯萎 (凋萎湿度 29%), T1 和 T2 土壤相对湿度保持在 75% 左右。T2 从播种至吐丝普遍期土壤湿度一直与 T1 (对照) 保持一致, 玉米长势一致, 因此, 将 T1、T3、T4、T5 进行比较, 以 7 月 31 日 (吐丝普遍期) 为例, 比较 4 个试验区玉米叶片的光合、蒸腾特性以及水分利用效率的日变化情况。

吐丝期 4 个处理 (T1、T3、T4、T5) 的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率日变化呈现明显的差异, T3、T4 和 T5 的 4 个参数值均低于对照, 其中, T3 和 T4 的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度普遍低于 T1, 同时低于复水后的 T5; T3 的光合速率、蒸腾速率、气孔导度又略低于 T4 (图 2)。

与 T1 相比, T3 的叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度分别降低了 $1.7\text{--}30.5\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.1\text{--}5.6\text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $0\text{--}0.3\text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, T4 的叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度分别降低了 $4.0\text{--}30.7\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0\text{--}5.2\text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $0\text{--}0.3\text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。在拔节—吐丝期, 水分胁迫导致 T3 与 T4 净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均下降, T3 和 T4 的水分利用效率上午低于 T1 和 T5, 午后略低于 T1, 与 T5 差异不明显, T3 和 T4 的水分利用效率差异不明显, 日变化趋势一致, 说明玉米叶片为适应干旱胁迫, 降低了净光合速率、蒸腾速率和气孔导度, 而使得水分利用效率升高。

T5 复水后, 吐丝期的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度普遍低于 T1, 同时高于 T3 和 T4。与 T1 相比, 复水后 T5 的叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度分别降低了 $0\text{--}20.4\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0\text{--}2.5\text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $0\text{--}0.27\text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。T5 复水后虽有一定的补偿作用, 但未能恢复至正常水平。此时, 水分利用效率也普遍比对照低 $0\text{--}2.8\text{ mmol mol}^{-1}$, T5 在苗期为适应水分胁迫, 水分利用效率提高, 拔节期复水后, 水分利用效率比 T1 反而降低。

2.1.3 乳熟普遍期

从吐丝普遍期—乳熟普遍期, 对 T2 和 T3 试验区进行控水, T2 的 3 个小区 0—60cm 农田土壤相对湿度保持在 45% 左右, T3 的 3 个小区 0—60cm 农田土壤相对湿度仍继续下降到植株枯萎, T1 土壤相对湿度保持在 75% 左右; T4 的 3 个小区复水到适宜土壤湿度 (参照对照), T5 不控水。将 T1、T2 和 T3 相比较, 以 9 月 5 日

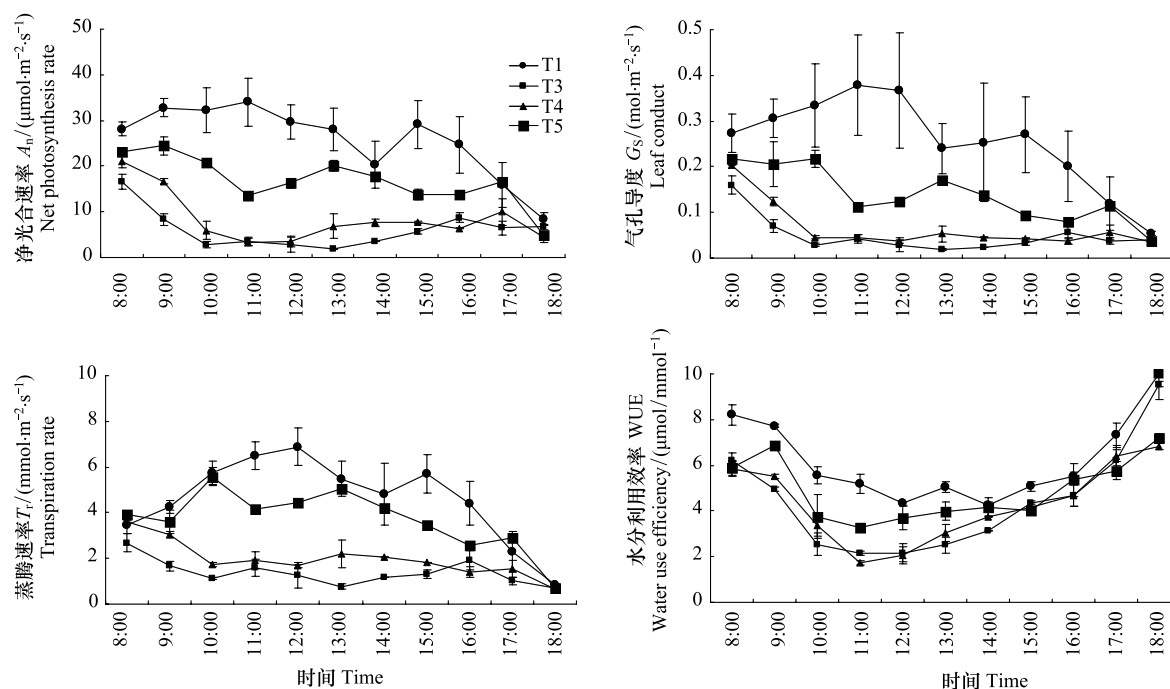


图2 玉米吐丝期叶片光合速率、气孔导度、蒸腾速率及水分利用效率动态

Fig.2 Daily variation of photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance and water use efficiency of maize leaves during silking stage

(乳熟期)为例,比较3个试验区玉米叶片的光合、蒸腾特性以及水分利用效率的日变化情况。

T2和T3的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度日变化值普遍均低于对照,T3的3个参数值普遍低于T2。由于T3处理受到水分胁迫时间较长,因此,3个参数值与T1和T2的差异明显,而同样为了适应水分胁迫,水分利用效率相对提高,T3和T2的水分利用效率上午略低于T1,在10:00以后,T2的水分利用效率几乎与T1持平,T3在10:00—15:00之间明显低于T1和T2,而15:00以后水分利用效率上升,与T1和T2持平(图3)。

2.2 不同水分条件下玉米全生育期光合变化规律

在玉米的生育期间内,选择典型晴天9:00—11:00进行叶片光合测定,以七叶期(2012年5月31日)、拔节期(6月27日)、吐丝期(7月19日)和乳熟期(8月22日)4个不同时期晴天的光合观测结果为例,分析5个处理(T1对照,T2、T3、T4、T5水分胁迫)在全生育期内的光合变化规律(图4)。

三叶—拔节期,T5进行水分胁迫,T1的4个参数(净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率)均高于T5,其中T5的4个参数分别比T1低41.9%、45.3%、31.8%和13.0%,由此可见,前3个参数T5与T1的差异较大,其中气孔导度的差异最大,而水分利用效率的差异最小。

拔节—吐丝期,T2和T1均未进行胁迫处理,T3土壤湿度持续下降、T4保持土壤湿度在45%左右,T5已复水,T2和T1的4个参数(净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率)均高于T3、T4和T5。其中T3的4个参数分别比T1低23.6%、42.7%、18.2%和6.6%;T4的4个参数分别比T1低82.4%、89.6%、79.1%和15.9%;T5的4个参数分别比T1低41.9%、45.3%、31.8%和13.0%。T5的4个参数均高于T4,但低于T3,T4的4个参数均显著低于其他处理。T5复水后,虽有一定的补偿作用,但未恢复至正常水平,仍低于T1,甚至低于T3,T3的土壤湿度由于下降较少,4个参数值高于T4,而T4受到的水分胁迫最严重,4个参数值显著下降。T3、T4和T5的气孔导度与其他3个参数相比,与T1的差异最大,而水分利用效率与其他3个参数相比,与T1的差异最小。说明,为了适应水分亏缺,玉米叶片气孔选择关闭或暂时关闭,导致气孔呼吸微弱,蒸腾速率和光合速率下降,而由于气孔对干旱的适应,水分利用效率虽较正常偏低,但差异较小。

吐丝—乳熟期,T3土壤水分持续下降,T4已复水,T1的4个参数(净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水

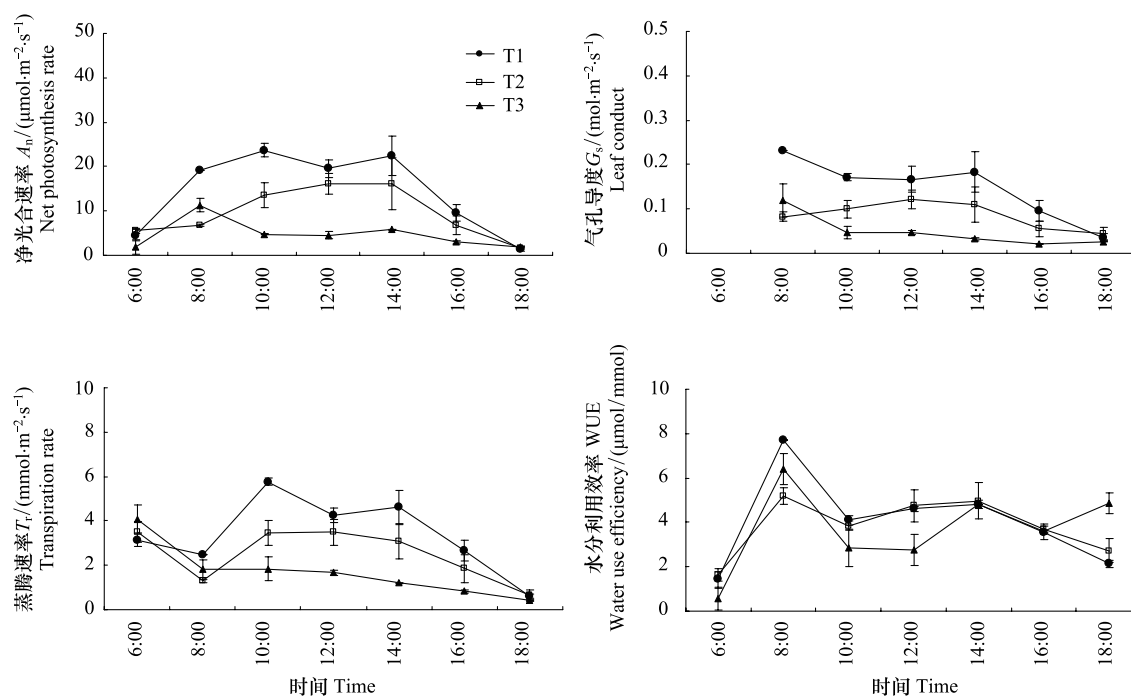


图3 玉米乳熟期叶片光合速率、气孔导度、蒸腾速率及水分利用效率日动态

Fig.3 Daily variations of photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance and water use efficiency of maize leaves during milk stage

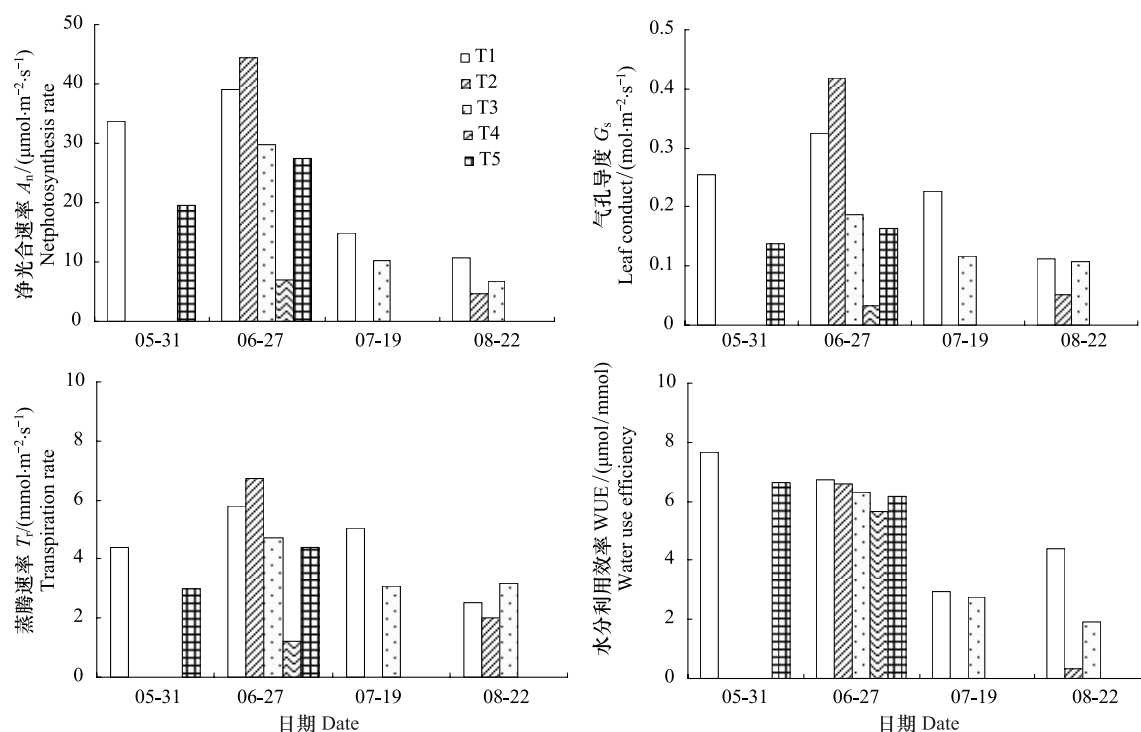


图4 玉米全生育期叶片光合速率、气孔导度、蒸腾速率及水分利用效率

Fig.4 Daily variations of photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance and water use efficiency of maize leaves during the whole growing period

分利用效率)均高于T3,T3的4个参数分别比T1低32.0%,48.6%,39.2%和6.2%,气孔导度与T1的差异最大,水分利用效率与T1的差异最小。

乳熟—成熟期, T2 进行水分胁迫, 保持土壤湿度在 45% 左右, 其余均已复水, T1 的 4 个参数(净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率)均高于 T2, T2 的 4 个参数分别比 T1 低 56.4%, 54.6%, 20.3% 和 92%, 其中 T2 的水分利用效率与 T1 的差异最大, 在乳熟—成熟期玉米受到水分胁迫严重影响了水分利用效率。T3 的 3 个参数(净光合速率、气孔导度和水分利用效率)分别比 T1 低 36.7%, 4.7% 和 56.4%, 而 T3 的蒸腾速率高于 T1 的 26.8%, T3 复水后, 净光合速率和气孔导度仍与 T1 的差异较大, 但蒸腾速率显著提升, 导致水分利用效率下降, 与 T1 的差异增大。玉米叶片在乳熟—成熟期受到水分胁迫与其他时间受到胁迫的规律不完全一致, 相同点是玉米叶片的光合作用受到严重影响, 不同点是玉米叶片的水分利用效率不再为适应水分亏缺而调整。

从全生育期来看, 玉米叶片光合和蒸腾在拔节—吐丝期受到水分胁迫的影响最大, 吐丝—乳熟期, 水分胁迫后气孔导度下降最明显, 水分利用效率下降最少, 体现玉米为适应水分亏缺而自身调节的机理, 而乳熟—成熟期玉米叶片受水分胁迫后自身的调节减弱, 水分利用效率下降最明显。

3 讨论

(1) 水分胁迫对玉米叶片光合速率、气孔导度、蒸腾速率以及水分利用效率的影响

水分胁迫影响了玉米叶片的正常光合作用, 除了导致整体光合速率、蒸腾速率和气孔导度下降, 还促使了光合速率日变化的峰值提前。不同水分处理下的玉米叶片水分利用效率(WUE)日变化均呈现上午和下午高、中午低的趋势, 水分胁迫后玉米叶片的蒸腾速率、光合速率和气孔导度为适应干旱缺水均较对照显著下降, 从而提高了水分利用效率, 缩小了与水分充足条件下玉米叶片的水分利用效率差值。这与前人的研究基本一致, 如刘祖贵等^[6]认为土壤水分状况影响了各生理指标峰值的高低和出现的早晚, 随着土壤含水量的降低, 光合速率、蒸腾速率和气孔导度的峰值出现的时间提前。

从全生育期来看, 玉米叶片光合和蒸腾在拔节—吐丝期受到水分胁迫的影响最大, 在吐丝—乳熟期, 水分胁迫后的气孔导度下降最明显, 水分利用效率下降最少。为了适应水分亏缺, 玉米叶片气孔选择关闭或暂时关闭, 导致气孔呼吸微弱, 蒸腾速率和光合速率下降, 而由于气孔对干旱的适应, 水分利用效率虽较正常偏低, 但差异较小, 体现了玉米为适应水分亏缺而自身调节机制, 而乳熟—成熟期玉米叶片受到水分胁迫后自身的调节减弱, 水分利用效率下降最明显。

中度和重度水分胁迫条件下, 玉米叶片水分利用效率的降幅低于光合、蒸腾速率和气孔导度的降幅, 甚至有时会高于正常供水条件下的水分利用效率, 水分胁迫能使玉米叶片的水分利用效率提高, 从而增强叶片对水分的利用能力, 抵御干旱的逆境。

(2) 复水后玉米叶片光合、蒸腾特性以及水分利用效率的响应规律

水分亏缺对玉米叶片光合速率、气孔导度、蒸腾速率以及水分利用效率的影响, 滞后效应较明显, 干旱后的复水试验表明, 光合作用受抑制不仅在水分胁迫控制过程中, 当复水后仍持续受到抑制, 其抑制程度与干旱的持续时间、胁迫程度和发育期均有关。水分胁迫时间越长、胁迫程度越重, 叶片的光合作用越呈现不可逆性; 拔节—吐丝期玉米受到水分胁迫比三叶—拔节期更难以恢复。三叶—拔节期的适度控水对玉米叶片光合特性影响较小, 此生育期可适度控水以节约用水; 拔节—吐丝期的控水对玉米叶片光合的影响较大, 此时叶片蒸腾耗水量最大, 因此, 该时期应保证一定量的土壤水分供应。

参考文献(References):

- [1] 卜令铎, 张仁和, 常宇, 薛吉全, 韩苗苗. 苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应. 生态学报, 2010, 30(5): 1184-1191.
- [2] 郑盛华. 水分胁迫对玉米生理生态特性影响的研究. 北京: 中国农业科学院, 2007: 2-10.
- [3] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞, 王旭刚. 土壤干旱条件下外源锌、锰对夏玉米光合特性的影响. 作物学报, 2005, 31(8): 1101-1104.
- [4] 高玉红, 牛俊义, 徐锐, 王彦, 李长江, 祁迪. 不同覆膜方式对玉米叶片光合、蒸腾及水分利用效率的影响. 草业学报, 2012, 21(5): 178-184.

- [5] 于晓芳,高聚林,宋国栋,冯勇,赵瑞霞,孙峰成,王志刚,李丽君. 玉米叶片水分利用效率及其相关性状的研究. 玉米科学, 2008, 16(3): 64-69.
- [6] 刘祖贵,陈金平,段爱旺,孟兆江,张寄阳,刘战东. 不同土壤水分处理对夏玉米叶片光合等生理特性的影响. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 90-95.
- [7] 常敬礼,杨德光,谭巍巍,陆月赏. 水分胁迫对玉米叶片光合作用的影响. 东北农业大学学报, 2008, 39(11): 1-5.
- [8] 郝树荣,郭相平,张展羽. 作物干旱胁迫及复水的补偿效应研究进展. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 81-84.
- [9] 郑灵祥,王密侠,寇明蕾,赵春明,张廉祥. 水分胁迫对夏玉米生理指标的影响. 中国农村水利水电, 2010, (4): 43-46.
- [10] 刘帆,申双和,李永秀,李丽,邹学智. 不同生育期水分胁迫对玉米光合特性的影响. 气象科学, 2013, 33(4): 378-383.
- [11] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [12] Bonyor J S. Plant productivity and environment. Science, 1982, 218(4571): 443-448.
- [13] 李秋祝,赵宏伟,魏永霞,王洪预,杨亮. 春玉米不同生育时期干旱对主要生理参数的影响. 东北农业大学学报, 2006, 37(1): 8-11.
- [14] 刘彬彬. 水分胁迫对玉米幼苗形态建成、生理代谢及根系吸水的影响. 北京: 中国科学院, 2008.
- [15] 贾金生,刘昌明,王会肖. 夏玉米水分胁迫效应的试验研究. 中国农业生态学报, 2002, 10(2): 97-101.
- [16] 张玉书,米娜,陈鹏狮,纪瑞鹏. 土壤水分胁迫对玉米生长发育的影响研究进展. 中国农学通报, 2012, 28(3): 1-7.
- [17] 杨涛,梁宗锁,薛吉全,康绍忠,马均政. 土壤干旱不同玉米品种水分利用效率差异的生理学原因. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 68-71.
- [18] 赵天宏,沈秀瑛,杨德光,马秀芳. 水分胁迫及复水对玉米叶片叶绿素含量和光合作用的影响. 杂粮作物, 2003, 23(1): 33-35.
- [19] 刘庚山,郭安红,任三学,安顺清,赵花荣. 夏玉米苗期有限水分胁迫拔节期复水的补偿效应. 生态学杂志, 2004, 23(3): 24-29.
- [20] 马树庆,王琪,吕厚荃,徐丽萍,于海,张铁林. 水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响. 生态学报, 2012, 32(11): 3378-3385.
- [21] 赵先丽,张玉书,纪瑞鹏,李丽光,冯锐,张淑杰,米娜,蔡福,范师宏. 辽宁苗期玉米根叶对水分胁迫的响应. 中国农学通报, 2011, 27(30): 21-26.
- [22] 张建平,王春乙,杨晓光,赵艳霞,刘志娟,王靖,陈艳英. 未来气候变化对中国东北三省玉米需水量的影响预测. 农业工程学报, 2009, 25(7): 50-55.
- [23] IPCC. 2001: Climate Change 2001: the Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University.
- [24] 熊伟,居辉,许吟隆,林而达. 两种气候变化情景下中国未来的粮食供给. 气象, 2006, 32(11): 36-41.
- [25] 熊伟,许吟隆,林而达,卢志光. IPCC SRES A2 和 B2 情景下我国玉米产量变化模拟. 中国农业气象, 2005, 26(1): 11-15.
- [26] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,刘庆葵. 水分胁迫对玉米生长发育及产量形成的影响研究. 中国农学通报, 2011, 27(12): 68-72.
- [27] 李荣平,周广胜,刘景利,史奎桥,梁涛. 基于水热因子的玉米物候模拟. 气象与环境学报, 2009, 25(3): 19-23.
- [28] 赵先丽,张玉书,纪瑞鹏,冯锐,张淑杰,米娜,蔡福,王宏博. 辽宁春玉米出苗期水分胁迫试验初探. 气象与环境学报, 2010, 26(4): 35-39.