

拔节期水分亏缺对沙地农田玉米 光合特性及物质积累的影响

陈其鲜¹, 杨琴², 任书生³

(1. 甘肃省农业技术推广总站, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省农业科学研究院 蔬菜所,
甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省两当县农业技术推广服务中心, 甘肃 陇南 742400)

摘要: [目的] 分析拔节期水分亏缺对玉米光合特性及物质分配规律的影响, 为作物调亏灌溉技术在沙地农田的应用提供理论依据。[方法] 在黑河流域中游边缘绿洲新垦沙地农田进行田间试验。[结果] (1) 玉米拔节期水分亏缺使新垦沙地农田 0—40 cm 土层土壤含水量显著降低, 农田 CO₂ 浓度升高 0.5%, 相对湿度降低 6%, 玉米叶片温度升高了 8%; (2) 水分亏缺处理玉米叶片净光合速率日均值比正常供水处理降低了 74%; 水蒸腾速率日均值比正常供水处理降低了 79%; (3) 水分亏缺处理玉米茎、叶及根系生物量分别比正常供水处理低 63%, 47% 和 51%, 总干物质积累量比正常供水处理减少了 53%。[结论] 在沙地农田, 作物对土壤水分的反映较为敏感, 小幅的土壤含水量降低即造成玉米光合能力的大幅下降, 并最终对光合产物的积累和分配产生不利影响。

关键词: 水分亏缺; 光合特性; 蒸腾速率; 气孔导度; 物质积累

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0091-06

中图分类号: Q938

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.018

Responses of Photosynthesis Characteristic and Matter Accumulation of Maize to Water Deficit at Elongation Stage in a Sandy Farmland

CHEN Qixian¹, YANG Qin², REN Shusheng³

(1. Gansu Agri-technology Extension Center, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730000,

China; 3. Liangdang Agri-technology Extension Service Center, Liangdang, Gansu 742400, China)

Abstract: [Objective] In order to provide the theoretical reference for the practice of deficient irrigation in sandy soil, the responses of photosynthesis characteristic and matter accumulation of maize to water deficit at the elongation stage was studied. [Methods] A field experiment was conducted in a newly reclaimed sandy farmland in middle reaches of Heihe River Basin. [Results] Compared with the SW (sufficient water supply), deficient water supply (DW) at the elongation stage significantly decreased the soil moisture in 0—40 cm soil layer of newly reclaimed sandy farmland, CO₂ concentration increased 0.5%, relative humidity decrease 6%, and leaf temperature increase 8%. The net photosynthetic rate in DW was 74% lower than that in SW. The transpiration rate in DW was 79% lower than that in SW. The dry matters in stem, leaf, and root in maize in DW were 63%, 47% and 51% lower than those in SD, and the total dry matter in DW was 53% lower than that in SW. [Conclusion] Crop was more sensitive to the fluctuation of soil moisture in sandy farmland, and slight decrease in soil moisture could cause substantial decrease of photosynthetic capacity, and thus could cause negative influence on matter accumulation and distribution in maize.

Keywords: water deficit; photosynthetic characteristic; transpiration rate; stomatal conductance; matter accumulation

收稿日期: 2014-04-17

修回日期: 2014-06-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“干旱区绿洲化过程中土壤氮矿化演变特征及机制研究”(41201284); 甘肃省干旱生境作物学重点实验室/省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(GSCS-2012-05)

第一作者: 陈其鲜(1979—), 男(汉族), 甘肃省景泰县人, 硕士, 高级农艺师, 主要从事作物栽培方面的研究。E-mail: cqxwin@126.com。

通信作者: 杨琴(1983—), 女(汉族), 甘肃省皋兰县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业生态学方面的研究。E-mail: gsyangqin06@163.com。

水分亏缺是限制作物产量提高的重要非生物胁迫因素,在各种环境胁迫因子中造成的损失最大^[1]。水分亏缺会限制作物叶片的光合能力,而且对光合产物的形成及其在植株各器官的分配和积累产生较大影响^[2]。有研究^[3]认为,在作物生长发育的特定阶段的有益水分亏缺能够促进光合产物向目标收获器官的运输,抑制非目标收获器官对养分的无效损耗,由此产生了调亏灌溉的概念和理论。研究作物在水分亏缺状况下作物光合特性及物质分配规律不仅对了解作物在逆境胁迫下的生理调节机制有重要的意义,同时也为作物调亏灌溉技术的合理实施提供重要的理论依据。有关水分亏缺对作物光合特性影响的研究表明,轻度水分亏缺条件下叶片气孔关闭,胞间 CO₂ 浓度下降,导致光合速率降低^[4];重度水分亏缺则破坏光系统 II (PS II) 光化学活性和光合电子需求间的平衡,损伤作物的光合机构^[5];同时影响光合电子传递^[6]。罗宏海等^[7]的研究表明,水分亏缺导致棉花光合速率降低,但能够增加光合产物的输出和向蕾铃的分配比例。肖俊夫等^[8]研究表明,将土壤水分控制在田间持水量的 50%~70%,不仅有利于棉花光合作用,而且可降低植株的蒸腾、减少土壤水分的无效消耗、提高水分利用效率。不同的环境条件下灌水对作物生长发育的影响不同,同时作物在不同生育阶段对水分反应的敏感性也不同,因而植株对水分亏缺条件的生理生态的响应也存在差异。拔节期是玉米重要的营养生长期,也是玉米对灌溉水需求的第一个关键时期,目前对拔节期水分亏缺对玉米光合特征及物质积累和分配影响的研究较少^[9],尤其在水资源较为缺乏的干旱区绿洲边缘沙质土壤农田尚未见报道。因此,本研究结合黑河流域边缘绿洲区域气候和土壤特点,通过农田定位试验,在拔节期对玉米实施不同的供水方式,探讨在沙质土壤条件下水分亏缺对玉米光合特性、物质积累和分配规律的影响,为沙质土壤农田作物调亏灌溉技术的实施提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验区位于甘肃省河西走廊中部黑河中游临泽县北部边缘绿洲,绿洲外为巴丹吉林沙漠南缘延伸带,研究区气候等背景条件参见相关文献^[10]。试验地位于中国科学院临泽内陆河流域研究站内(39°20'N, 100°07'E,海拔 1 400 m),试验地地下用 1 m 深的防水材料(橡胶板)分隔成 4 m×5 m=20 m² 小区,地上

部 0—20 cm 高度浇筑 15 cm 厚度的混凝土。试验地土壤为灌耕砂质新成土,0—20 cm 土层田间持水量为 8.6%,土壤容重为 1.53 g/cm³,砂粒含量为 84.5%,粉粒含量为 11.4,黏粒含量为 4.1%。试验于 2010 年 4 月下旬开始,供试作物为当地主要种植作物玉米,品种为奥玉 3118。参照该地区地膜覆盖、足墒播种的种植模式,采用 100 cm 地膜覆盖,膜间距 40 cm,覆膜后每膜种植 2 行玉米,行距 45 cm,株距 25 cm,每穴定苗 1 株,种植密度为 6.8×10⁴ 株/hm²。试验设置不同的水分处理,至玉米拔节期,充分供水处理(SW)共灌水两次(6 月 8 日和 6 月 18 日),灌水量分别为 120 和 90 m³/hm²;水分亏缺处理(DW)仅灌水 1 次(6 月 13 日),灌水量为 120 m³/hm²。不同供水方式均设置 3 次重复,用水表严格控制灌水量。

1.2 测定项目与方法

于 6 月 22 日玉米拔节期内,在各小区内均选择 3 株长势均一的健康玉米植株,将每株最上部功能叶进行标记。选择晴朗无云天气条件,利用美国拉哥公司(LI-COR)制造的开放式气体交换 LI-6400 便携式光合作用系统,从 8:00—18:00 时间段内每隔 1 h 活体测定标记叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度等生理指标进行测定,同时得到气温度、叶温、空气 CO₂ 浓度等环境参数。叶片水平水分利用效率(WUE₁)的计算公式为:

$$WUE_1 = P_n / T_r \quad (1)$$

式中: P_n ——净光合速率[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; T_r ——蒸腾速率[$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

气孔限制值(L_s)的计算公式为:

$$L_s = 1 - C_i / C_a \quad (2)$$

式中: C_i ——胞间 CO₂ 浓度($\mu\text{mol}/\text{mol}$); C_a ——胞间 CO₂ 浓度($\mu\text{mol}/\text{mol}$)。

用土钻分层(0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm,40—50 cm,50—60 cm,60—70 cm,70—80 cm,80—90 cm,90—100 cm)取土,用烘干法测定土壤含水量,并于光合速率测定结束后调查地上和地下部生物量。地上部全部剪下后分茎秆和叶片分别称重,地下部整株挖出后用清水洗净后称重。植物样品在鲜重测定后于 105 °C 杀青 15 min,80 °C 恒温烘干至恒重,测定植株各器官干重。植株整株及各器官的含水量计算公式为:

$$\text{含水量} = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{干重} \quad (3)$$

通过 DPS 软件应用 LSD 法进行处理平均值间的方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 拔节期水分亏缺对土壤水分状况的影响

玉米拔节期充分供水处理 0—100 cm 土层土壤含水量平均值介于 4.1%~5.9% 之间(表 1), 水分亏缺处理介于 2.4%~4.6% 之间。水分亏缺处理土壤含水

量明显低于同层次充分供水处理, 0—40 cm 土层差异达显著水平, 水分亏缺处理 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 土层土壤含水量与正常灌水相同土层相差 1.4%~3.4%, 幅度随土层增加而逐渐降低。40 cm 土层以下土壤含水量的差别不显著, 表明水分亏缺对土壤水分影响主要在 0—40 cm 土层。

表 1 不同深度土壤含水量

%

水分处理	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—50 cm	50—60 cm	60—70 cm	70—80 cm	80—90 cm	90—100 cm
水分亏缺 DW	2.5±0.2 ^b	2.6±0.3 ^b	2.4±0.7 ^b	2.7±0.1 ^b	4.0±0.2 ^b	3.5±0.4 ^b	3.8±0.1 ^b	4.6±0.3 ^b	3.9±0.4 ^b	4.3±0.4 ^b
充分供水 SW	5.9±0.6 ^a	6.4±0.6 ^a	5.6±0.7 ^a	4.1±0.4 ^a	4.2±0.4 ^b	4.2±0.3 ^b	5.3±0.3 ^b	5.5±0.1 ^b	4.9±0.3 ^b	4.9±0.3 ^b

2.2 拔节期水分亏缺对农田环境因子的影响

由图 1 可以看出, 玉米田气温日变化呈单峰变化趋势, 充分供水处理和水分亏缺处理变化趋势基本一致, 最高值均出现在北京时间中午 13:00 时, 最低值

均出现在北京时间早上 8:00 时。在 14:00—18:00 时间段内充分供水处理气温略高于水分亏缺处理, 日平均值充分供水处理为 36.89 °C, 水分亏缺处理为 36.57 °C, 充分供水处理比水分亏缺处理高 0.9%。

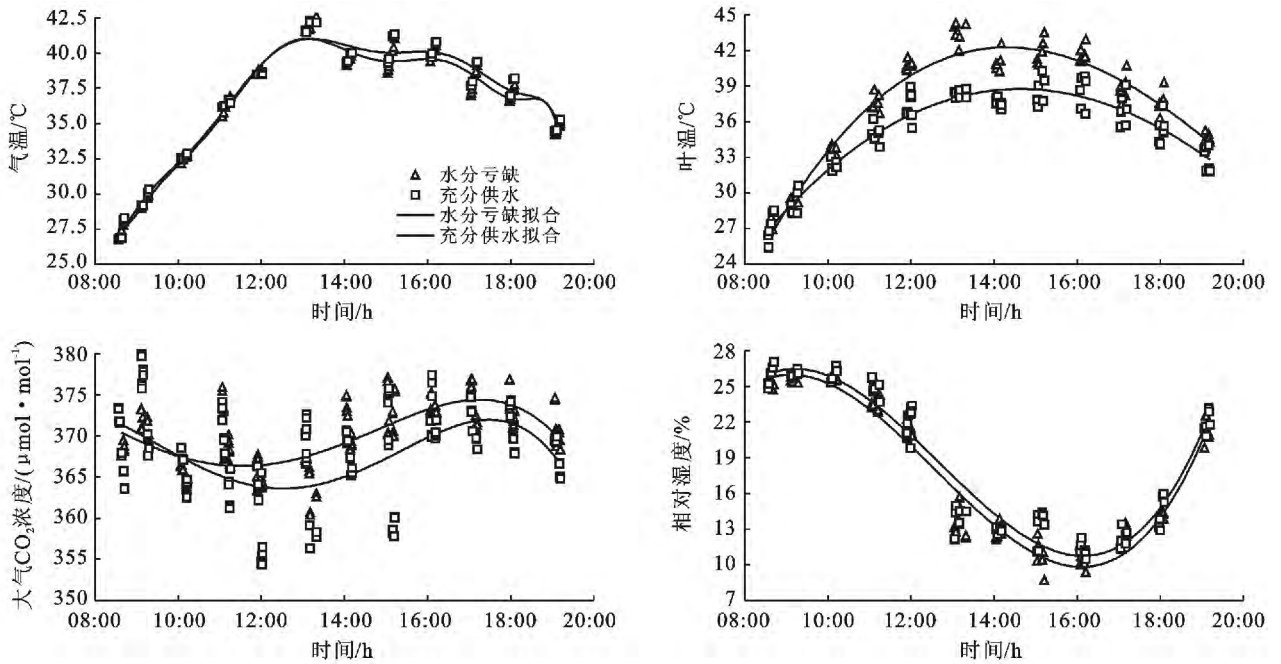


图 1 农田环境因子日变化

玉米叶片温度日变化也呈单峰变化趋势, 拟合曲线的峰值出现在 14:00 时, 最小值在 8:00 时, 水分亏缺处理总体上呈现出叶温高于充分供水处理。水分亏缺处理叶温日均值为 37.6 °C, 充分供水处理为 34.9 °C, 水分亏缺处理比充分供水处理高 8%。

水处理的趋势, 表明充分供水处理玉米群体 CO₂ 同化能力高于水分亏缺处理, 使得农田微环境 CO₂ 浓度降低。水分亏缺处理玉米田 CO₂ 浓度日均值为 369.9 μmol/mol, 充分供水处理为 367.9 μmol/mol, 水分亏缺处理比充分供水处理高 0.5%。

玉米田 CO₂ 浓度呈“波峰—波谷—波峰”交替出现的余弦函数变化趋势。第 1 个波峰出现在 8:00 时, 第 2 个波峰出现在 17:00 时。充分供水处理波谷出现在 13:00 时, 水分亏缺处理波谷出现在 12:00 时。整体来看, 除早上 8:00—10:00 时间段外全天其它时段均表现出水分亏缺处理 CO₂ 浓度高于充分供

玉米田相对湿度变化呈斜“V”型, 充分供水和水分亏缺处理谷值均出现在 16:00 时, 最高值出现在早上 9:00 时。从全天变化的总体趋势来看, 充分供水处理相对湿度高于水分亏缺处理, 充分供水处理相对湿度日均值为 18.7%, 水分亏缺处理为 17.6%, 充分供水处理比水分亏缺处理高出 6%。

2.3 拔节期水分亏缺对玉米叶片光合特性日变化的影响

由图 2 可以看出,玉米叶片净光合速率日变化呈双峰曲线,充分供水处理玉米叶片净光合速率值介于 $9.9 \sim 43.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,从早上 8:00 时开始,净光合速率逐渐升高,到中午 12:00 时略有下降,在 13:00 时达到全天净光合速率最大值,之后开始下降。水分亏缺处理玉米叶片净光合速率值介于 $2.6 \sim 15.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,早上 9:00 时达全天最大值后开始下降,到 13:00 时为全天最小值,之后一直到 18:00 时略有提高。充分供水处理全天光合速率明显高于水分亏缺处理,且没有明显的“光合午休”现象,光强较强的时段光合速率也较高;而水分亏缺处理全天光合速率均较低,光强较强的时候光合速率受到抑制。充分供水处理日均净光合速率为 $27.3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,水分亏缺处理为 $7.2 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,水分亏缺处理玉米叶片净光合速率比充分供水处理低 74%。

充分供水处理玉米叶片蒸腾速率值介于 $2.3 \sim 18.9 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,日均值为 $9.8 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,日变化呈明显的单峰变化趋势,峰值出现在 13:00 时。水分亏缺处理全天蒸腾速率值介于 $1.2 \sim 2.7$

$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,日均值为 $2.1 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,全天值均明显低于充分供水处理,且没有表现出明显的日变化趋势,日均蒸腾速率比充分供水处理低 79%。充分供水处理玉米叶片气孔导度值介于 $0.06 \sim 0.53 \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,日均值为 $0.26 \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,与净光合速率变化趋势相同,日变化也呈双峰曲线,从早上 8:00 时开始,叶片气孔导度逐渐升高,到中午 12:00 时略有下降,在 13:00 时达到全天叶片气孔导度最大值,之后开始下降。水分亏缺处理气孔导度值介于 $0.02 \sim 0.11 \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,日均值为 $0.04 \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,日变化没有明显的趋势,早晨 8:00 时值最大,且高于充分供水处理。其它时段气孔导度值均明显小于正常供水处理,日均气孔导度比充分供水处理低 85%。

充分供水处理叶片水分利用效率介于 $2.1 \sim 6.7 \text{mmol}/\text{mol}$,日均值为 $3.3 \text{mmol}/\text{mol}$,日变化为递减趋势,最大值在早上 8:00 时。水分亏缺处理叶片水分利用效率介于 $1.3 \sim 6.4 \text{mmol}/\text{mol}$,日均值为 $3.4 \text{mmol}/\text{mol}$,比充分供水处理略高,日变化呈 V 形,最大值在早上 9:00 时,最小值在中午 12:00 时。水分亏缺处理早上 8:00,12:00—16:00 时叶片水分利用效率低于充分供水处理,其他时段高于充分供水处理。

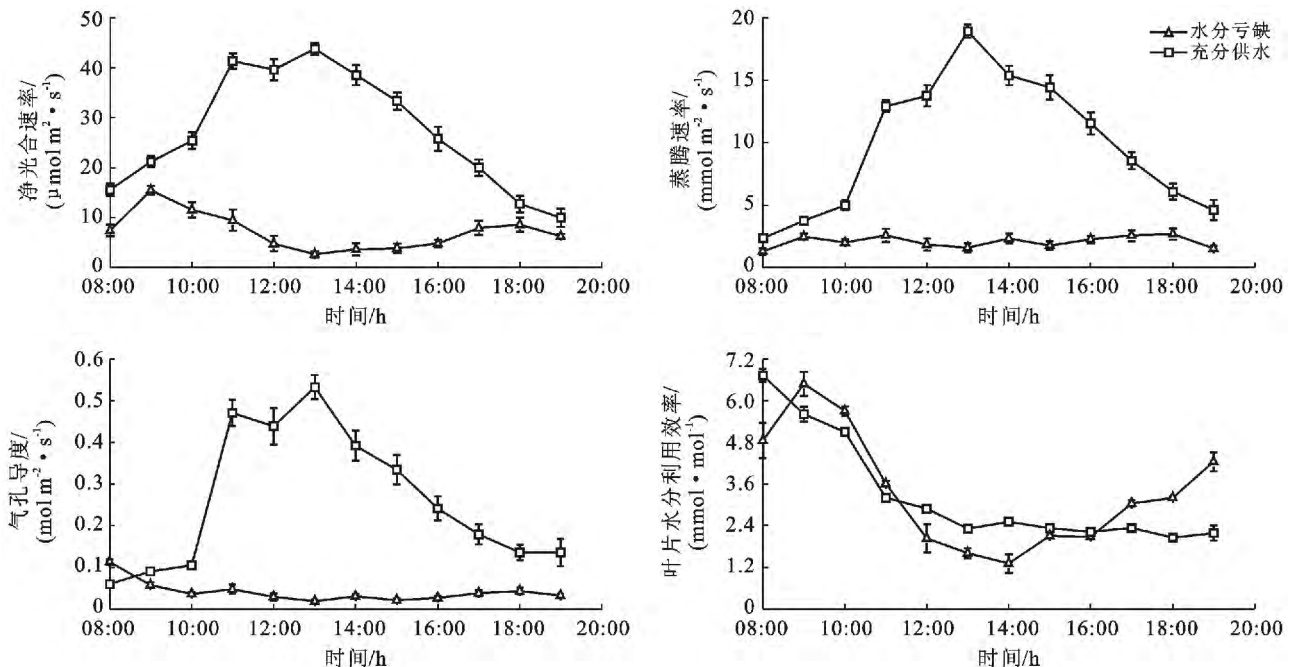


图 2 不同水分处理玉米叶片光合特性日变化

2.4 拔节期水分亏缺对物质积累和植株水分状况的影响

作物光合速率和蒸腾速率的不同变化规律影响到物质在作物体内的积累和分配,对不同水分状况玉米拔节期物质积累与分配规律的测定结果表明

(表 2),水分亏缺处理玉米整株、根、茎、叶干重及根冠比分别比充分供水处理低 53%,63%,47%,51%和 28%,各指标间的差异均显著。水分亏缺处理整株及根、茎含水量显著低于充分供水处理,叶含水量与充分供水处理无显著差异。

表2 不同水分处理玉米拔节期物质积累和植株水分状况

处理	干物质(g/株)				根冠比	水分状况/(g·g ⁻¹)			
	整株	根	茎	叶		整株	根	茎	叶
水分亏缺(DW)	35.1±1.0 ^b	6.1±0.1 ^b	13.3±0.6 ^b	15.7±0.3 ^b	0.21±0.01 ^b	4.29±0.12 ^b	2.31±0.01 ^b	6.96±0.36 ^b	2.73±0.04 ^a
充分供水(SW)	74.1±1.4 ^a	16.5±0.6 ^a	25.3±0.1 ^a	32.3±0.7 ^a	0.29±0.01 ^a	5.22±0.03 ^a	2.67±0.03 ^a	10.05±0.12 ^a	2.84±0.05 ^a

3 讨论

按中国土壤质地分类方案,砂粒含量大于70%为粗砂土^[11],本研究土壤砂粒含量为84.5%,为典型的粗砂土农田。粗砂土农田由于对土壤水分的吸附力较小,因而其凋萎系数也较小(粗砂土约为0.96%~1.11%),既可供植物利用的土壤有效水的下限较低^[11]。在本研究中,尽管水分亏缺处理土壤含水量水平较低(0—40 cm土层介于2.4%~4.6%之间),但仍高于粗砂土的凋萎系数,因此,仍然在可以保证作物正常生长的范围内。但另一方面,粗砂土农田质地疏松,有机质含量低,保水能力差,其土壤有效水的范围也较小,本研究中充分供水处理灌水后的土壤水分也仅有4.1%~5.9%之间,与水分亏缺处理相应土层含水量仅相差1.4%~3.4%。可以看出,过量的农田灌溉并不能使沙地农田土壤含水量有较大幅度的提高,相反容易通过渗漏和蒸发造成水资源的浪费。

农田环境因子的变化常被指出是作物水分诊断中的重要方法^[12],袁国富等^[13]通过冠层表面温度的测定进行冬小麦水分亏缺诊断。但有关水分亏缺对农田环境因子影响的研究却很少,本试验的结果表明,水分亏缺对农田气温的影响幅度不大,但导致空气相对湿度降低6%。这一方面与水分亏缺处理较低的土壤含水量和玉米叶片蒸腾速率有关,另一方面相比较充分供水处理叶片舒展田间密闭度高减少了空气水分的挥发,水分亏缺处理叶片蜷缩导致空气流通速率高、水分挥发快也会导致空气相对湿度的降低。本试验结果还表明,水分亏缺使玉米环境CO₂浓度和叶片温度升高。环境CO₂浓度的升高与光合能力受到抑制有关,而叶温的较高则可能是由于充分供水处理蒸腾作用较强,吸热导致叶温降低。综合上述分析,空气相对湿度、叶片温度及农田CO₂浓度均可以作为作物水分状况的诊断指标,可以根据其大小对作物的水分状况进行判断。

谭国波等^[9]研究表明,在土壤含水量相差20%~30%的条件下,水分亏缺使玉米净光合速率降低21%、蒸腾速率降低32%、气孔导度降低32%、叶片水分利用效率提高16%。本研究中尽管水分亏缺处理与正常供水土壤含水量相差仅1.4%~3.4%,但使玉米光合能力大幅降低,表现为净光合速率降低了

74%,蒸腾速率降低了79%,气孔导度降低了85%。表明在沙地农田,轻微的土壤含水量波动就会对作物生理状况造成很大程度的抑制。干旱条件下作物光合速率的降低并不是由于水和原料的供应不足,而是由于水分胁迫导致气孔或非气孔因素的限制^[14]。谢婷婷等^[15]研究认为,水分亏缺条件下棉花光合速率的下降主要是非气孔因素引起的,即棉花通过一系列光保护机制耗散过剩的光能,从而降低净光合速率。而付秋实等^[16]研究表明,水分胁迫下辣椒光合速率的下降主要是气孔限制引起的。通常可以根据气孔阻力和胞间CO₂含量的变化来判定光合速率的下降是非气孔因素还是气孔因素引起的^[17],胞间CO₂浓度降低和气孔限制值升高表明气孔导度降低是主要原因,而胞间CO₂浓度增高和气孔限制值降低则表明主要是非气孔因素^[18]。本试验水分亏缺和正常供水处理胞间CO₂浓度日均值分别为75.6和118.9 μmol/(m²·s),气孔限制值分别为0.80和0.68,因此可以判断水分亏缺对沙地农田玉米光合速率的下降主要是由于气孔限制引起的。进一步比较两处理表观叶肉导度(净光合速率和胞间CO₂浓度的比值,即表示叶肉细胞对CO₂同化的限制程度)^[18],正常供水处理(0.23)高于水分亏缺处理(0.10),表明水分亏缺处理对玉米叶片内部的光合活性有一定的抑制作用^[19]。可以推测,随着水分亏缺程度的加剧,光合能力的下降应该有一个从气孔限制主导到非气孔限制主导的变化过程。研究结果表明,水分亏缺处理与正常供水处理水分利用效率差异不大,主要是由于玉米叶片在水分亏缺条件下的气孔限制除抑制作物光合能力外,还能大幅度降低由气孔开放引起的大幅度蒸腾作用,有利于作物适应水分胁迫的环境条件,保持叶片对水分的有效利用。此外,有研究^[20]表明,水分亏缺减少玉米根冠干物质总量和根系长度,但增加根冠比和根系总长度。这一结论与本项研究的结果并不一致,拔节期水分亏缺在显著降低沙地农田玉米根、茎和叶干物量的同时并没有使增加玉米的根冠比值。这可能是沙地农田物质积累对水分亏缺表现出的特殊反应规律,同时,也可能与作物在不同生育期对水分亏缺的反应差异有关^[21],但这尚需进一步研究明确。说明在水分供应不断减少的情况下,作

物通过气孔的调节保持作物水分状况在可以忍受的限度。在本研究中的水分胁迫条件下,作物的水分状况受到显著的影响。

4 结论

在黑河中游边缘绿洲,拔节期水分亏缺导致沙地农田 0—40 cm 土层土壤含水量显著降低;尽管与正常供水处理土壤含水量仅相差 1.4%~3.4%,但水分亏缺导致玉米光合能力的大幅度降低,表现为使光合速率下降了 74%,蒸腾速率下降了 79%;根据对水分亏缺处理和正常供水处理气孔导度、胞间 CO₂ 浓度及气孔限制值的分析表明,沙地农田玉米拔节期水分亏缺条件下叶片光合速率的下降主要是由气孔限制引起的,内部的光合活性受到抑制也对光合能力产生了影响;拔节期水分亏缺尽管没有影响玉米叶片的水分利用效率,但由于光合能力的下降导致总体的光合产物积累量显著减少,因而对物质积累和分配产生不利影响。

[参 考 文 献]

- [1] 罗宏海,张亚黎,张旺峰,等.新疆滴灌棉花花铃期干旱复水对叶片光合特性及产量的影响[J].作物学报,2008,34(1):171-174.
- [2] 孟兆江,卞新民,刘安能,等.调亏灌溉对夏玉米光合生理特性的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):182-186.
- [3] 庞秀明,康绍忠,王密侠.作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(6):141-146.
- [4] Cornic G. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture-not by affecting ATP synthesis[J]. Trends in Plant Science, 2005,5(5):187-188.
- [5] Long S P, Humphries S. Photoinhibition of photosynthesis in nature[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1994,45(1):624-662.
- [6] 张其德,刘合芹,张建华,等.限水灌溉对冬小麦旗叶某些光合特性的影响[J].作物学报,2000,26(6):869-873.
- [7] 罗宏海,李俊华,勾玲,等.膜下滴灌对不同土壤水分棉花花铃期光合生产、分配及籽棉产量的调节[J].中国农业科学,2008,41(7):1955-1962.
- [8] 肖俊夫,刘祖贵,孙景生,等.不同生育期干旱对棉花生长发育及产量的影响[J].灌溉排水,1999,8(1):23-27.
- [9] 谭国波,赵立群,张丽华.玉米拔节期水分胁迫对植株性状、光合生理及产量的影响[J].玉米科学,2010,18(1):96-98.
- [10] 杨荣,苏永中.水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J].生态学报,2009,29(3):1459-1469.
- [11] 林大仪,谢英荷.土壤学[M].北京:中国林业出版社,2005.
- [12] 张瑞美,彭世彰,徐俊增,等.作物水分亏缺诊断研究进展[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):205-210.
- [13] 袁国富,罗毅,孙晓敏,等.作物冠层表面温度诊断冬小麦水分胁迫的试验研究[J].农业工程学报,2002,18(5):13-17.
- [14] Winter K, Schramm M J. Analysis of stomatal and nonstomatal component in the environmental control of CO₂ exchanges in leaves of *Welwitschia mirabilis*[J]. Plant Physiology, 1986, 82(1):173-178.
- [15] 谢婷婷,苏培玺,张岭梅,等.黑河中游边缘绿洲湿润和干旱条件下棉花叶片光合特性比较[J].西北植物学报,2009,29(1):0128-0135.
- [16] 付秋实,李红岭,崔健,等.水分胁迫对辣椒光合作用及相关生理特性的影响[J].中国农业科学,2009,42(5):1859-1866.
- [17] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982,33(1): 317-345.
- [18] 许大全.光合作用气孔限制分析中的一些问题[J].植物生理学通讯,1997,33(4):241-244.
- [19] Koc M, Barutcular C, Genc I. Photosynthesis and productivity of old and modern durum wheats in a Mediterranean environment [J]. Crop Science, 2003, 43(6): 2089-2098.
- [20] 石喜,王密侠,姚雅琴,等.水分亏缺对玉米植株干物质积累、水分利用效率及生理指标的影响[J].干旱区研究,2009,26(3):396-400.
- [21] 郭相平,康绍忠,索丽生.苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J].灌溉排水,2001,20(1):25-27.