

土壤含水量对夏玉米蒸发蒸腾量 和光合性能的影响

赵泽欢¹, 范兴科^{2,3}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:采用盆栽控水试验,研究了5种土壤水分条件(分别为土壤田间持水量的50%、60%、70%、80%、90%,记为T1~T5)对夏玉米蒸发蒸腾量(ET)及抽雄期光合性能的影响。结果表明:土壤含水量对夏玉米生长过程中的ET、株高、叶面积和光合性能均有显著影响。与T1处理相比较,T2~T5水分处理下的夏玉米主要生育期内ET依次增加了23.66%、39.17%、43.33%和49.84%,呈线性增大的趋势;在夏玉米耗水强度最旺盛的抽雄期,与T1处理相比较,T2~T5处理下的蒸腾速率(T_r)分别增长了63.74%、75.65%、78.83%和81.77%,气孔导度(G_s)分别增长了71.97%、82.63%、83.91%和84.87%,二者均随着土壤含水量的增大呈指数函数变化,但土壤含水量超过田间持水量的70%后增幅显著减小;光合速率(P_n)分别增长了47.51%、60.65%、57.51%和55.87%, P_n 、株高、叶面积随着土壤含水量的增大呈现抛物线形变化趋势,即先增加后减小的规律,在T3和T4处理水平下达到最大值,依次为28.14 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (T3)、256.5 cm(T4)、628.6 cm^2 (T3)。从提高夏玉米光合效率和水分生产效率、减少无效蒸发蒸腾耗水的角度考虑,夏玉米抽雄期的土壤含水量控制在田间持水率的80%左右为宜。

关键词:夏玉米;土壤含水量;蒸发蒸腾量;光合性能

中图分类号:S513;S152.7⁺5 **文献标志码:**A

Effects of soil moisture content on evapotranspiration and photosynthetic performance of summer maize

ZHAO Zehuan¹, FAN Xingke^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institution of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. Institution of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The effects of five soil moisture conditions (They were respectively 50%, 60%, 70%, 80%, 90% of the field water capacity, recorded as T1~T5) on evapotranspiration (ET) and photosynthetic performance at tasseling stage of summer maize were studied by a potted water control experiment. The results indicated that soil moisture content had significant effects on ET, plant height, leaf area and photosynthetic performance of summer maize. Compared with T1, the ET of summer maize under T2~T5 water treatments increased by 23.66%, 39.17%, 43.33% and 49.84% during the main growth period, presenting a linear trend of increasing. Compared with T1 treatment, transpiration rate (T_r) increased by 63.74%, 75.65%, 78.83% and 81.77%, stomatal conductance (G_s) increased by 71.97%, 82.63%, 83.91% and 84.87%, respectively, in T2~T5 treatments at tasseling stage with the strongest water consumption intensity of summer maize. Both changed exponentially with the increase of soil moisture content, but the increase rate decreased significantly when soil moisture content exceeded 70% of field water capacity. Photosynthetic rate (P_n) increased by 47.51%, 60.65%, 57.51% and 55.87%, respectively. With the increase of soil moisture content, the growth of P_n , plant height and leaf area showed a parabolic trend: increased first and then decreased and reached the maximum under T3 and T4 treatments, they were 28.14 $\mu\text{mol} \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (T3), 256.5 cm (T4) and 628.6 cm^2 (T3) respectively. In conclusion, to improve the photosynthetic efficiency and water production efficiency of summer maize and reduce the water consumption of ineffective evapotranspiration, the soil moisture content should be controlled at about 80% of the water holding rate in the field at tasseling stage of summer maize.

Keywords: summer maize; soil moisture content; evapotranspiration; photosynthetic performance

土壤水分是作物生长的基础环境因子,水分亏缺或过量均会对作物生长造成限制^[1]。土壤水分对玉米生长发育和新陈代谢的影响是多方面的,包括玉米蒸腾速率、光合速率和气孔导度等光合性能^[2]。以叶面蒸腾为主的耗水量消耗了根系吸收的绝大部分土壤水分,土壤水分增加会进一步促进蒸发蒸腾作用。在保证玉米健康生长发育前提下,根据玉米生理特性调控水分代谢过程,并依据玉米对水分的需要进行定量灌溉,是提高农业用水效率的一个重要方面^[3]。因此,研究土壤水分对玉米蒸发蒸腾量及光合性能的影响具有重要意义。

国内外关于玉米土壤水分与蒸发蒸腾量及主要光合性能关系的研究已有大量报道^[4-13]。Farquhar等^[4]认为检验气孔限制是否为光合速率下降的原因,既要看法孔导度的大小,还要考虑胞间 CO_2 浓度的变化。Selmani等^[6]认为干旱影响玉米光合性能,降低作物光合速率。王畅等^[7]认为玉米苗期适度的水分亏缺可以减小叶面积,降低植株的蒸腾量;光合速率下降幅度与水分胁迫强度成正相关^[8]。李素美等^[11]通过试验发现干旱对夏玉米生育后半期的影响强度大于前半期;干旱胁迫在不同生育时期均使光合速率降低,其中孕穗期敏感度最大,苗期敏感度最小^[12]。刘彬彬^[13]认为水分胁迫在较短的时间里能够导致部分气孔的关闭,致使光合、蒸腾速率在胁迫初期就有了较大幅度的降低。为明确不同水分供给对夏玉米耗水规律和光合性能的影响,确定适宜的土壤含水量,为夏玉米节水丰产提供参考依据,本文通过盆栽玉米控水试验,开展了蒸发蒸腾量对水分环境的响应规律和不同水分环境下夏玉米抽雄期叶片蒸腾速率、光合速率和气孔导度的变化特征研究。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2020年6—10月在陕西杨凌西北农林科技大学旱区节水农业研究院移动式遮雨棚(34°17'N, 108°04'E, 海拔521 m, 棚高3 m)内实施,该地区位于关中平原,属于大陆性暖温带季风气候区,多年平均气温13℃~15℃,多年平均降水量630

mm左右,降水量年际分布不均,主要集中在7—10月。土壤为中壤土,pH值8.20,1 m土层的平均田间持水率为35%(体积含水量,下同),平均干容重为1.40 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

用直径70 cm、高70 cm的铁桶进行盆栽试验,为减小外部环境对桶内土壤温度的影响,桶外部用2 cm厚的隔热棉包裹,桶底打15个直径为3 mm的小孔排气排水,均匀分布。供试玉米品种为秦龙406。桶内填充土壤为杨凌壤土,晒干过筛(孔径5 mm),然后分层回填装土,同时在桶内从桶中心向外等距离预埋3根80 cm土壤水分测定管,回填土干容重控制在 $\gamma = 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右。试验在播种前进行一次性基肥配施,中期仅对氮肥分阶段施加,所有处理施肥量相同。

1.2 试验处理

盆栽试验共设5个水分处理,分别为土壤田间持水率的50%±5%(T1)、60%±5%(T2)、70%±5%(T3)、80%±5%(T4)和90%±5%(T5),通过控制土壤水分上限实现;同一水分处理灌水时间和灌水量一致。试验于6月23日播种,苗期5个处理均按正常水分管理,三叶期定苗,每桶随机选择6株生长基本一致的种苗。当夏玉米生长进入拔节后的七叶期开始控水处理,不下雨时移开遮雨棚,露天生长,下雨时关闭遮雨棚,避免降雨影响。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤含水量测定 土壤体积含水量采用时域反射仪TRIME-TDR(TRIME-IPH, IMKO, 德国)测定,垂直方向每隔10 cm为1个取样点,测定间隔为2~4 d,灌溉前后加测。

1.3.2 灌水量测定 根据测定的土壤含水量进行控制灌溉。每次灌水量按公式(1)进行计算确定,即

$$I = \gamma HA(\theta_0 - \theta_{\text{实}}) \quad (1)$$

式中, I 为灌水量, g ; γ 为土壤干容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; H 为计划湿润层深度, cm ; A 为试验桶的横截面积, cm^2 ; θ_0 为土壤含水量上限指标; $\theta_{\text{实}}$ 为灌前土壤实测含水量。在小喇叭口期前以30 cm深土壤平均含水量确定 θ_0 ,在小喇叭口期后以40 cm深土壤平均含水量确定 θ_0 ^[14]。

1.3.3 蒸发蒸腾量测定 蒸发蒸腾量采用农田水量平衡方程式^[15]间接获得。由于试验是在遮雨棚下实施的盆栽试验,因此降雨量、地表径流量和地下水补给量均为 0,深层渗漏量可以忽略不计,则计算时段内的蒸发蒸腾量公式可以简化为

$$ET = I - \Delta S \quad (2)$$

式中, ET 为蒸发蒸腾量, mm ; I 为灌水量, mm ; ΔS 为土壤储水量增量, mm 。

1.3.4 光合性能测定 抽雄期是夏玉米蒸腾蒸发耗水最旺盛的阶段,在抽雄期选择晴朗无风、外界环境因子变化较稳定的一天测定夏玉米光合性能,于 10:00—11:00 使用 LI-6800 光合仪(LI-COR Biotechnology,美国)测定顶部第一片完全展开叶中上部位置的光合性能。每个处理任选 3 个植株,每个植株测定 3 次,取其平均值作为该株的蒸腾速率($T_r, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、光合速率($P_n, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和气孔导度($G_s, \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 对原始数据进行处理;采用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行统计分析,采用最小显著差数法(LSD)进行多重比较分析,其中置信度为 95%($\alpha=0.05$);用 Origin2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 夏玉米主要生育期蒸发蒸腾量变化规律

2.1.1 不同水分处理下夏玉米日蒸发蒸腾量变化过程 蒸发蒸腾量(ET)是农田水分平衡的重要组

成部分,它会受到土壤供水状况的影响,分析 ET 在生育期内的变化能够为作物日需水规律提供理论依据。图 1 为 5 个水分处理下夏玉米在主要生育期(七叶期至成熟期)内的日 ET 变化过程和降雨情况。

由图 1 可以看出:在试验条件下,夏玉米从 7 月中旬的七叶期至 8 月中旬的大喇叭口期,随着时间的推移,尽管株高和叶面积都在快速增加,但日 ET 的增速则较为缓慢。综合分析其原因应该是受 8 月中旬前期持续降雨的影响,空气相对湿度较大,温度较低的结果。8 月中旬以后直到夏玉米进入抽雄期,降雨量减少,日照充足,温度上升,相对湿度降低, ET 迅速增加,并达到最大,之后又开始呈现逐渐下降趋势。

不同水分处理下的日 ET 变化过程略有差异, T_1 和 T_2 的峰值出现在 8 月 29 日,分别为 $14.68 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $18.50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; T_3 、 T_4 和 T_5 的峰值出现在 8 月 31 日,分别为 23.35 、 $24.32 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $24.82 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。由夏玉米生育期内的日蒸发蒸腾强度大小和变化过程可以看出,夏玉米的日 ET 不仅受环境条件(降雨引起的温度和湿度)的影响,而且受土壤含水量大小的影响。在数值上,5 个处理的日 ET 总体上表现为 $T_5 > T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ 。前期由于夏玉米植株矮小,处理间的日 ET 差异并不显著;随着植株发育从 7 月 18 日开始日 ET 出现显著性差异($P < 0.05$)。5 种土壤水分处理下,主要生育期内日平均 ET 依次为 4.35 、 5.70 、 7.15 、 $7.68 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $8.68 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ($P < 0.05$)。

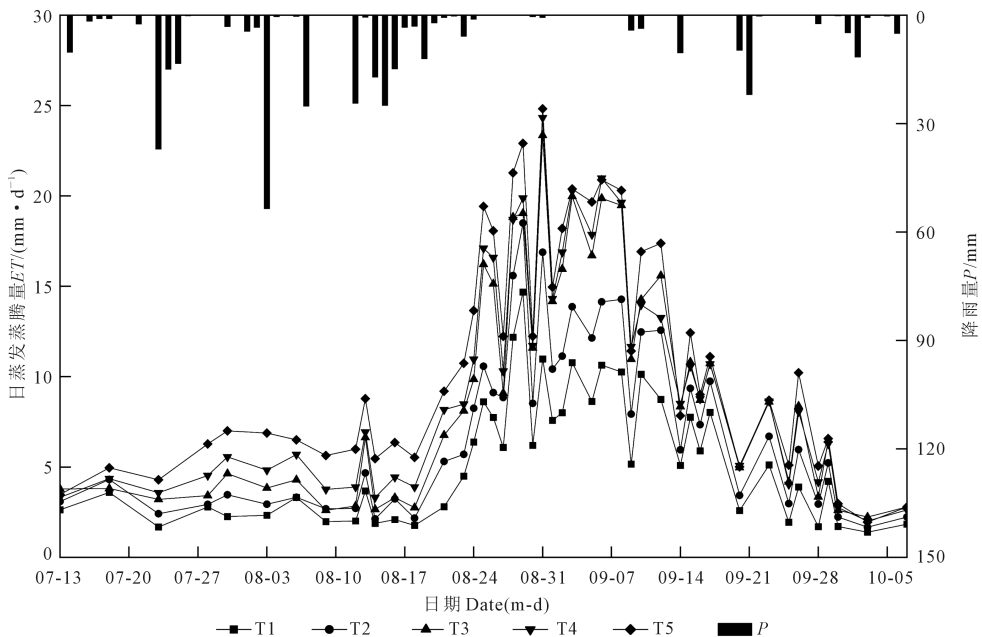


图 1 不同水分处理下夏玉米逐日蒸发蒸腾量变化过程图

Fig.1 Diagram of daily evapotranspiration of summer maize under different water treatments

2.1.2 不同水分处理下夏玉米各生育阶段的蒸发蒸腾量 根据夏玉米生长过程特性不同,将夏玉米生育期划分为以下 3 个阶段:拔节期(七叶期~抽雄期)(7月13日—8月25日)、抽雄扬花期(含吐丝期)(8月25日—9月9日)和灌浆成熟期(9月10日—10月10日)。对 5 个水分处理下的夏玉米各生育阶段内的日 ET 分别进行累加,同时计算各生育阶段对应的 ET 占比,得到 5 个水分处理下夏玉米不同生育阶段的 ET 值及占总 ET 的百分比,见表 1。

从表 1 可以看出,夏玉米七叶期至成熟期各生育阶段 ET 在不同水分处理下的差异均达显著水平 ($P<0.05$)。T1~T5 条件下的总 ET 依次为 391.7、513.0、643.8、691.2 mm 和 780.9 mm,总体表现为随

着土壤含水量的提高蒸发蒸腾量呈逐渐增大的趋势。夏玉米生育期内总的 ET 与土壤含水量可用线性函数表示: $y=2940.2x-148.6$ ($19\%<x<32\%$) ($R^2=0.9738$),即呈线性正相关关系。与 T1 相比,T2~T5 水分处理下的夏玉米总 ET 依次增加了 23.66%、39.17%、43.33%和 49.84%。通过计算,不同水分处理下单株夏玉米主要生育期内总 ET 值依次为 25.12、32.90、41.29、44.33、50.09 kg。

在夏玉米的整个生长过程中,同一土壤水分处理下,不同生育期的 ET 存在明显差异 ($P<0.05$)。尽管抽雄至扬花期的时间只有 15 d,占整个测定时段 90 d 的 16.67%,但该时段的 ET 占比平均达到 37.22%,高于其他两个时段 5.55%和 6.11%,说明这一时期是夏玉米耗水量最大的时期。

表 1 不同水分处理下夏玉米各生育阶段的蒸发蒸腾量及所占比例

Table 1 Evapotranspiration and its proportion in different growth stages of summer maize under different water treatments

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage		抽雄扬花期 Tasseling flowering stage		灌浆成熟期 Grouting maturity stage		合计 Total	
	ET /mm	生育期 ET 占比 Percentage of total ET /%	ET /mm	生育期 ET 占比 Percentage of total ET /%	ET /mm	生育期 ET 占比 Percentage of total ET /%	ET /mm	生育期 ET 占比 Percentage of total ET /%
T1	121.2d	30.95	140.3d	35.83	130.1d	33.21	391.7d	100
T2	155.5c	30.32	189.4c	36.91	168.1c	32.77	513.0c	100
T3	189.1b	29.38	254.0b	39.46	200.7b	31.17	643.8b	100
T4	221.4b	32.03	264.3b	38.24	205.5b	29.73	691.2b	100
T5	278.6a	35.68	278.7a	35.69	223.6a	28.63	780.9a	100

注:同列不同小写字母代表同一生育期不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same growth period at $P<0.05$ level.

2.2 土壤水分对夏玉米抽雄期光合性能的影响

2.2.1 不同土壤水分处理下夏玉米抽雄期株高和叶面积 土壤水分是影响株高和叶面积的重要因子,而株高和叶面积的大小直接影响夏玉米的蒸腾作用和光合作用能力。抽雄期夏玉米的株高和叶面积都将接近最大值,因此对夏玉米不同水分处理下抽雄期株高和叶面积进行测定,结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,抽雄期不同水分处理对夏玉米株高和叶面积的影响程度不同,并且差异显著 ($P<0.05$)。T1 的株高和叶面积均远小于其他处理。与 T1 相比,T2~T5 处理的株高分别增长了 11.66%、12.78%、15.02%和 10.76%(图 2a),叶面积分别增长了 8.91%、13.49%、12.73%和 9.65%。其中 T4 的株高最大,为 256.5 cm;T3 叶面积最大,为 628.6 cm²。由此表明:夏玉米的株高和叶面积并不是随着土壤水分的增加而增大。

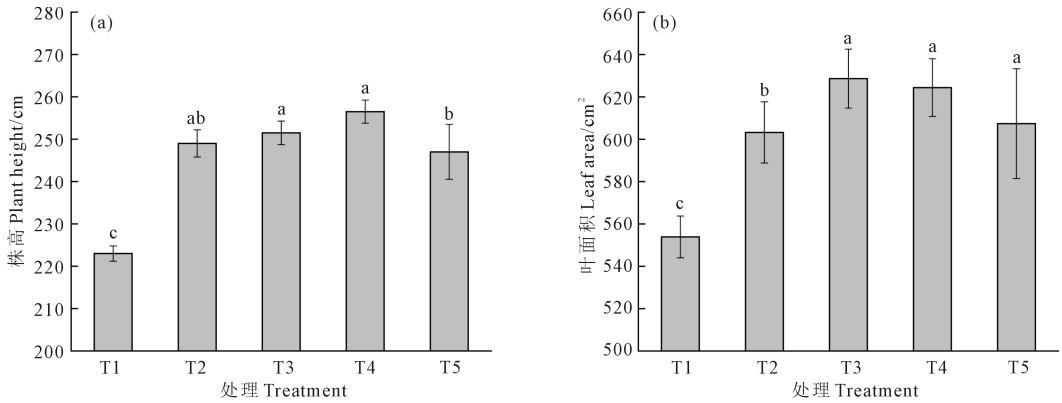
蒸腾和光合作用的主要部位是叶表面,因此夏玉米叶面积的不同会引起 ET 的差异。由图 2b 可以看出:不同水分处理下,夏玉米抽雄期的叶面积

大小次序为:T3>T4>T5>T2>T1,尽管表 1 中抽雄扬花期各处理下的 ET 大小次序为 T5>T4>T3>T2>T1,与土壤含水量的大小次序一致,但是各水分处理下,抽雄扬花期的 ET 占对应处理下总 ET 的比例大小次序则为 T3>T4>T2>T1>T5,即增幅大小不同,由此可见,当夏玉米的叶面积较大时,会由于蒸腾量的增加继而引起对应的 ET 增加。

2.2.2 土壤水分对夏玉米抽雄期蒸腾速率的影响

蒸腾作用对于植物维持体内水分平衡具有重要意义,而土壤含水量是蒸腾速率 (T_r) 重要影响因子之一,同时 T_r 从侧面也可以反映出土壤含水量的大小。通过对不同土壤含水量下叶片 T_r 的测定,结果见图 3a。

由图 3a 可以看出,在试验中蒸腾速率随着土壤含水量的增大而增大,其中 T1 的 T_r 最小,为 1.11 mmol·m⁻²·s⁻¹;T5 的最大,为 6.07 mmol·m⁻²·s⁻¹。与 T1 相比,T2~T5 处理的 T_r 分别增长了 63.74%、75.65%、78.83%和 81.77% ($P<0.05$),其中 T1 与 T2 处理间的 T_r 增幅最大。对叶片 T_r 与土壤



注:图中不同小写字母代表同一生育期不同水分处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different water treatments in the same growth period at $P<0.05$ level, the same below.

图 2 不同水分处理下夏玉米抽雄期株高和叶面积

Fig.2 Plant height and leaf area of summer maize at tasseling stage under different water treatments

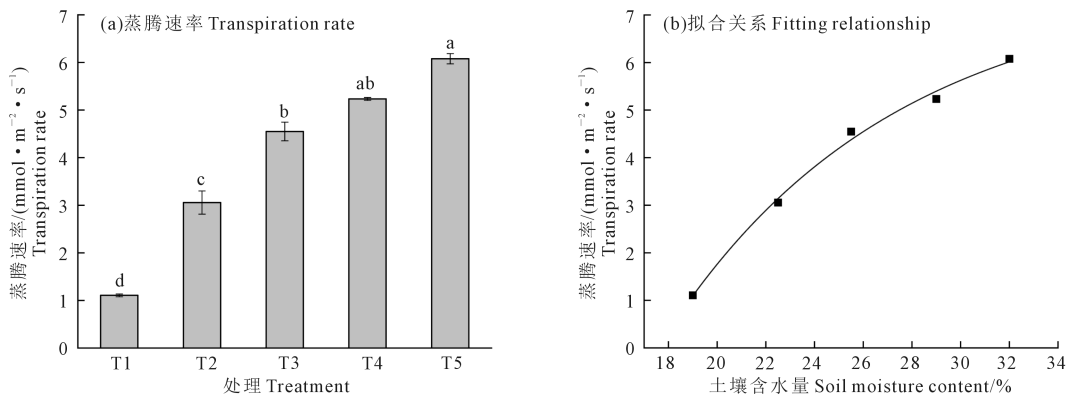


图 3 不同水分处理对夏玉米抽雄期蒸腾速率的影响

Fig.3 Effects of different water treatments on transpiration rate of summer maize at tasseling stage

含水量的相互关系进行拟合,拟合曲线见图 3b。夏玉米叶片 T_r 与土壤含水量进行回归分析得到拟合关系式为: $y = -49.90e^{-10.69x} + 7.65$ ($R^2 = 0.9956$)。由关系式可知 T_r 与土壤含水量呈指数函数正相关,即 T_r 随着土壤含水量的增加而增大,但增加变化幅度呈现减小的趋势。

2.2.3 土壤水分对夏玉米抽雄期气孔导度的影响

气孔导度(G_s)表示的是气孔张开的程度,土壤水分的变化将会使 G_s 做出积极的反应。夏玉米抽雄期的 G_s 响应变化趋势见图 4,其中图 4a、图 4b 分别为水分处理下 G_s 的变化以及 G_s 与土壤含水量的拟合曲线。

由图 4a 可以看出,夏玉米 G_s 在不同水分处理下存在显著性差异($P<0.05$)。T2~T5 处理下的 G_s 较 T1 相比分别增长了 71.97%、82.63%、83.91% 和 84.87%。最小 G_s 出现在 T1,为 $0.04 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;最大 G_s 出现在 T5,为 $0.24 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过拟合回归,得到夏玉米叶片 G_s 与土壤含水量的拟

合关系为: $y = -7.07e^{-17.96x} + 0.26$ ($R^2 = 0.9857$)。 G_s 与土壤含水量呈正相关关系,即 G_s 随着土壤含水量的增加而增大,同样的增加幅度呈减小趋势。在试验条件下, G_s 最高为 $0.25 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。整体上 G_s 的变化趋势与 T_r 相似。

2.2.4 土壤水分对夏玉米抽雄期光合速率的影响

土壤含水量变化会直接影响作物叶片的光合作用,导致 P_n 的变化,进而影响干物质和产量。不同水分处理下,夏玉米抽雄期的 P_n 测定结果见图 5,其中图 5a、图 5b 分别为水分处理下 P_n 的变化以及 P_n 与土壤含水量的拟合关系。

结果分析表明, P_n 在不同水分处理下存在显著性差异($P<0.05$)。随着土壤含水量的增加 P_n 呈先增大后减小的变化趋势(图 5a)。与 T1 相比,T2~T5 水分处理使夏玉米抽雄期的 P_n 依次增长了 47.51%、60.65%、57.51% 和 55.87% ($P<0.05$),其中 T1 的 P_n 最小,为 $11.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;T3 的 P_n 最大,为 $28.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过图 5b 得到夏玉

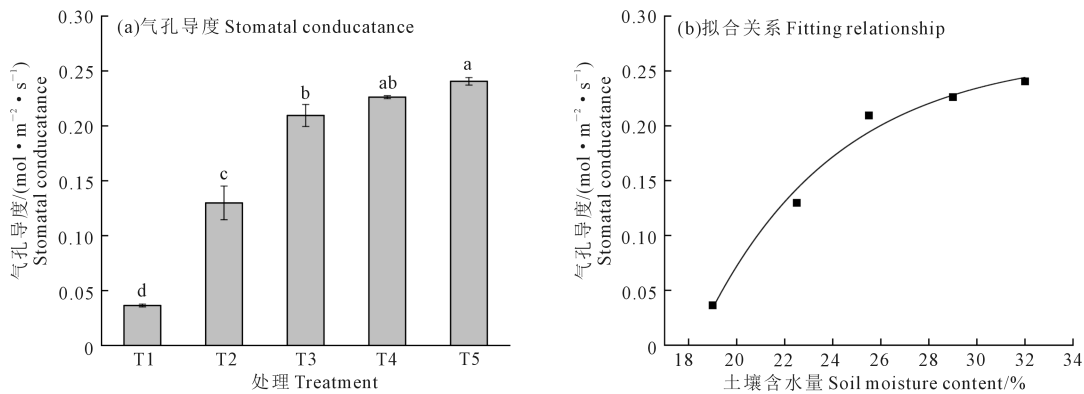


图4 不同水分处理对夏玉米抽雄期气孔导度的影响

Fig.4 Effects of different water treatments on stomatal conductance of summer maize at tasseling stage

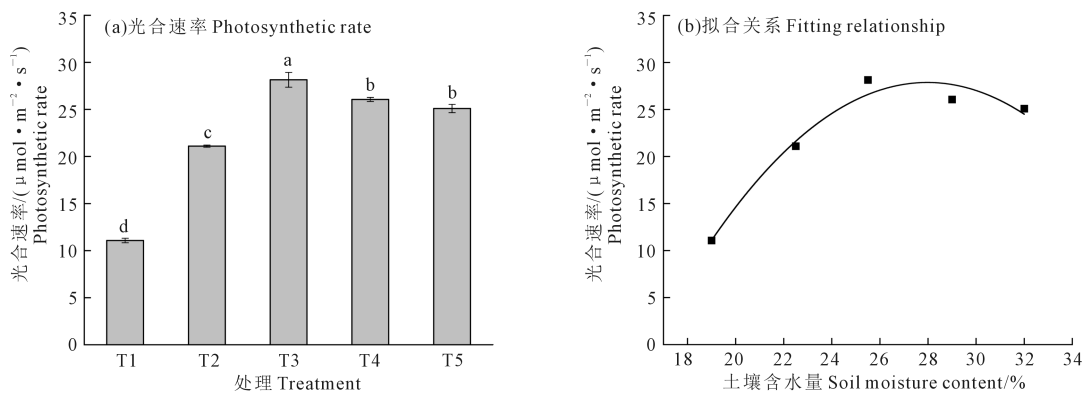


图5 不同水分处理对夏玉米抽雄期光合速率的影响

Fig.5 Effects of different water treatments on photosynthetic rate of summer maize at tasseling stage

米叶片 P_n 与土壤含水量的拟合关系式: $y = -2082.5x^2 + 1165.2x - 135.12$ ($R^2 = 0.9697$)。 P_n 与土壤含水量呈抛物线变化;当土壤含水量低于 28.0% (相当于试验土壤田间持水率的 80%) 时, P_n 与土壤含水量呈正相关关系,最高 P_n 可达 $27.87 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;当土壤含水量高于 28.0% 时 P_n 与土壤含水量呈负相关关系,即当土壤含水量超过 28.0% 以后 P_n 呈下降趋势。

2.3 夏玉米光合性能与蒸发蒸腾量的关系

根据测定结果和分析可以知道,在整个生育期内,夏玉米的 ET 与土壤含水量(田间持水率范围内)基本上呈线性正相关关系,也就是说,在田间持水率范围内,土壤的田间含水量越高,夏玉米生长期内的实际耗水量越大。但从夏玉米单日耗水强度最大的抽雄期光合性能测定结果来看,决定蒸腾耗水量大小的叶片 T_r 和 G_s 与土壤含水量的相关性也表现为正相关关系,即随着土壤含水量的增大而增大,但增幅则逐渐减小。在土壤含水量相对较低时, T_r 和 G_s 对土壤含水量变化的响应较为敏感;当土壤含水量较高,接近土壤的田间持水率时, T_r 和 G_s 对土壤含水量的变化响应较为迟钝。反映在 P_n

方面,则表现为随着土壤含水量的增大, P_n 先增大后减小,在田间持水率 80% 左右时达到最大,这说明土壤含水量过高会影响夏玉米的生理过程,并产生无效的蒸发蒸腾,降低水分利用效率。这一点也可以从夏玉米的株高和叶面积生长结果得到验证,当土壤含水量介于田间持水量的 70%~80% 时,夏玉米的总叶面积相对较大,株高也相对较高,即生物量较大。从而也说明过多的土壤含水量除部分用于蒸腾降温和帮助水分和矿物质在植物体内的运输及吸收外,更多的只会增加夏玉米的无效蒸发和蒸腾,甚至还会抑制夏玉米的生长发育,影响总干物质和产量的形成。

3 讨论

从本研究来看,土壤水分环境在一定程度上影响作物的 ET ,5 个水分处理无论是主要生育期内总 ET 还是日 ET 都存在显著性差异,各个观测值均随着土壤含水量的增加而增大。日 ET 约从 7 月 18 日(夏玉米进入拔节期)开始出现显著性差异,这是由于前期夏玉米叶面积较小,田间覆盖率低, ET 主要以土壤蒸发为主;随着株高和叶面积的增加,覆盖

度逐渐增大,夏玉米的植株蒸腾量越来越大,当叶面积达到最大值,植株蒸腾成为耗水的主要组成成分^[16]。T2~T5 处理的 ET 分别是 T1 的 1.31、1.64、1.76、1.99 倍,T2~T5 的土壤含水量分别是 T1 的 1.20、1.40、1.60、1.80 倍,表明土壤水分增加引起的 ET 增幅大于相应的土壤水分增幅,控制夏玉米生长适宜的土壤水分环境可以更好地控制 ET ,从而有效地控制蒸散消耗的水分。

从试验可知土壤水分增加会促进株高和叶片的生长,但当土壤含水量超过一定限度时,株高和叶面积的生长增速会减小,说明水分过多会抑制夏玉米的生长,其原因主要是由于土壤是由气-液-固三相组成,过多的水分迫使土壤空气比例降低,使土壤含氧量不足,影响根系呼吸和吸水过程^[17]。土壤水分对 T_r 、 P_n 和 G_s 作用显著且变化存在差异。从拟合曲线可以看出 T_r 峰值对应的土壤含水量显著大于 P_n 峰值所对应的土壤含水量,这可能是由于光合作用除了水分还受到 CO_2 的影响。 T_r 虽不能准确地反映植株整体(整株或群落)的水分消耗量,但仍是一个重要的植物散失水分指标,可以反映植物潜在耗水能力的大小^[18],光合作用是植物将光能转化为化学能合成有机质的生物过程,而土壤含水量的变化直接影响植物叶片的蒸腾作用和光合作用,进而影响植物的耗水量和生物量^[19]。与 T1 相比,同样的土壤水分变化下夏玉米抽雄期 T_r 的变化幅度大于 P_n ,也就是说当水分降低时蒸腾失水相比光合作用的累积产出大量减少,因此以不牺牲作物光合积累而达到最大节水的目的是可行的^[20]。土壤水分同样直接影响 G_s 的变化,同时 T_r 和 P_n 的变化与 G_s 也息息相关。土壤水分较低时叶片为了适应缺水,气孔选择关闭或暂时关闭,导致气孔呼吸微弱^[21],同时也阻碍了光合底物 CO_2 的吸收^[22],导致 T_r 和 P_n 下降。而土壤水分过多时尽管 G_s 增加,但其增长幅度趋于平缓;而 P_n 相较 T_r 影响程度不同,此时细胞内水分随之增加,导致进入的 CO_2 有所减少,进而使叶片光合作用受抑制^[23]。综合来看株高和叶面积的增幅均随着土壤含水量的增加呈现先增加后减少的趋势,这也是 P_n 加大、干物质积累增加的结果^[24],符合了水分处理下 P_n 的变化趋势。土壤水分供应不足时 T_r 降低,这是因为夏玉米为了减少水分散失, G_s 降低导致的。

T_r 和 G_s 的大小反映了在测定条件下测定对象蒸腾强度的大小, P_n 则反映了同样水平下光合能力的大小。通过夏玉米光合性能与蒸发蒸腾量的相关性分析,可以知道 T_r 和 G_s 与 ET 均为正相关关

系, P_n 则与 ET 成抛物线关系,表明在较高的土壤含水量下光合作用积累生物量减小的同时还使无效蒸发增大。结合图 4(b) 的拟合关系式可知土壤含水量在 28.0% 时 P_n 达到峰值,也就是田间持水率的 80%,因此可以大致判断适宜夏玉米抽雄期进行蒸腾作用、光合作用的土壤含水量为田间持水率的 80% 左右。这也间接证明了夏玉米的高产点并不在土壤含水量的最高值。

4 结 论

基于盆栽试验,在不同土壤水分控制条件下,对夏玉米从拔节期至成熟期的 ET 以及抽雄期光合性能进行测定,得出如下结论:

(1) 夏玉米的 ET 强度(或日 ET) 在整个拔节期内随着时间的推移和植株生长量的增大逐渐增大,并在抽雄扬花期达到最大,此后开始减小。5 个水分处理下,夏玉米的总 ET 与土壤含水量的关系成线性正相关关系,土壤含水量越高, ET 越大。

(2) 夏玉米抽雄期的 T_r 和 G_s 对土壤水分的响应表现为指数函数关系,均随着土壤含水量的增大而增大,但当土壤含水量超过田间持水量的 70% 后增幅显著减小。 P_n 对土壤水分的响应表现为先增后减,呈抛物线形相关关系,以 T3 处理下的 P_n 最大。说明过高的土壤含水量并不利于夏玉米的光合反应,从而产生无效的蒸腾耗水。

(3) 综合夏玉米抽雄期的 P_n 对土壤水分响应规律以及不同土壤含水量条件下夏玉米的株高和叶面积生长情况,从提高夏玉米光合效率和水分生产效率、减少无效蒸发蒸腾耗水的角度考虑,夏玉米抽雄期适宜的土壤含水量以控制在田间持水率的 80% 左右为宜。

参 考 文 献:

- [1] 石磊,吕宁,陈云,等.不同灌溉措施下春玉米干物质和养分积累分配特征及其与产量建成的相关性[J].玉米科学,2021,29(2):103-108,116.
SHI L, LV N, CHEN Y, et al. Traits of different irrigation strategies on accumulation and distribution of dry matter and nutrient and their correlation with maize yield development [J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(2): 103-108, 116.
- [2] 姚全胜,雷新涛,王一承,等.不同土壤水分含量对芒果盆栽幼苗光合作用、蒸腾和气孔导度的影响[J].果树学报,2006,23(2):223-226.
YAO Q S, LEI X T, WANG Y C, et al. Effects of different water moisture on photosynthesis, transpiration and stoma conductance of potted mango seedlings [J]. Journal of Fruit Science, 2006, 23(2): 223-226.
- [3] 陈倩倩,范阳阳,郝影宾,等.不同土壤水分含量对玉米气孔发育过

- 程和蒸腾耗水量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 75-79, 95.
- CHEN Q Q, FAN Y Y, HAO Y B, et al. Effects of different soil water content on stomata development and water consumption of maize [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(3): 75-79, 95.
- [4] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [5] BOYER J S. Plant productivity and environment [J]. Science, 1982, 218(4571): 443-448.
- [6] SELMANI A, WASSOM C E. Daytime chlorophyll fluorescence measurement in field-grown maize and its genetic variability under well-watered and water-stressed conditions [J]. Field Crops Research, 1993, 31(1/2): 173-184.
- [7] 王畅, 林秋萍, 贡冬花, 等. 夏玉米的干旱适应性及其生理机制的研究[J]. 华北农学报, 1990, 5(4): 54-60.
- WANG C, LIN Q P, GONG D H, et al. A study on drought adaptability and its physiological mechanism of summer maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1990, 5(4): 54-60.
- [8] 张维强, 沈秀璞. 水分胁迫和复水对玉米叶片光合速率的影响[J]. 华北农学报, 1994, 9(3): 44-47.
- ZHANG W Q, SHEN X Y. Effects of water stress and rewating on photosynthetic rate of maize leaf [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1994, 9(3): 44-47.
- [9] 关义新, 戴俊英, 林艳. 水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J]. 植物生理学通讯, 1995, (4): 293-297.
- GUAN Y X, DAI J Y, LIN Y. The photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation of plant leaves under water stress [J]. Plant Physiology Communications, 1995, (4): 293-297.
- [10] 徐世昌, 戴俊英, 沈秀璞, 等. 水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J]. 作物学报, 1995, 21(3): 356-363.
- XU S C, DAI J Y, SHEN X Y, et al. The effect of water stress on maize photosynthetic characters and yield [J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(3): 356-363.
- [11] 李素美, 东先旺, 陈建华. 不同土壤目标含水量对夏玉米光合性能及产量的影响[J]. 华北农学报, 1999, 14(3): 55-59.
- LI S M, DONG X W, CHEN J H. Effect of different target water content in soil on photosynthetic property and yield of summer-sowing corn [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1999, 14(3): 55-59.
- [12] 李秋祝, 赵宏伟, 魏霞, 等. 春玉米不同生育时期干旱对主要生理参数的影响[J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(1): 8-11.
- LI Q Z, ZHAO H W, WEI Y X, et al. Effect of the physiological parameters in different growth stages of spring maize by drought [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006, 37(1): 8-11.
- [13] 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[D]. 咸阳: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2008.
- LIU B B. Effects of water stress on morphogenesis, physiological metabolism and root water uptake of corn seedlings [D]. Xianyang: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Eco-Environment, Ministry of Education), 2008.
- [14] 袁宏伟, 蒋尚明, 汤广民, 等. 夏玉米蒸发蒸腾与土壤含水量、叶面积指数关系研究[J]. 节水灌溉, 2015, (7): 40-42.
- YUAN H W, JIANG S M, TANG G M, et al. Summer corn evapotranspiration and its relation with soil water moisture content and LAI in Huabei plain [J]. Water Saving Irrigation, 2015, (7): 40-42.
- [15] 信迺诠. 计算农田蒸发的水量平衡法[J]. 干旱地区农业研究, 1986, (2): 33-39.
- XIN N Q. An equilibrium method for the calculation of farmland evaporation capacity [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1986, (2): 33-39.
- [16] 许高平, 王璞, 薛绪掌, 等. 负压控水下不同株型玉米水分利用效率和产量的盆栽试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 148-156.
- XU G P, WANG P, XUE X Z, et al. Experiment on water use efficiency and yield of different plant type of potted maize under negative pressure water control [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 148-156.
- [17] 周伟, 徐宝山. 不同水分处理对玉米生理生长指标及产量的影响[J]. 甘肃水利水电技术, 2016, 52(3): 11-14.
- ZHOU W, XU B S. Effects of different water treatments on physiological growth index and yield of maize [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2016, 52(3): 11-14.
- [18] 张国盛. 干旱、半干旱地区乔灌木树种耐旱性及林地水分动态研究进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 363-368.
- ZHANG G S. Research progress on trees and shrub drought-resistance and woodland water activity in arid and semi-arid region [J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 363-368.
- [19] 刘英, 雷少刚, 程林森, 等. 采煤塌陷影响下土壤含水量变化对柠条气孔导度、蒸腾与光合作用速率的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3069-3077.
- LIU Y, LEI S G, CHENG L S, et al. Effects of soil water content on stomatal conductance, transpiration, and photosynthetic rate of *Caragana korshinskii* under the influence of coal mining subsidence [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3069-3077.
- [20] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 等. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验[J]. 水利学报, 2001, (11): 80-86.
- KANG S Z, PAN Y H, SHI P Z, et al. Controlled root-divided alternative irrigation—theory and experiments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (11): 80-86.
- [21] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 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[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902-2909.
- YU W Y, JI R P, FENG R, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2902-2909.
- [22] NAYYAR H, GUPTA D. Differential sensitivity of C3 and C4 plants to water deficit stress: Association with oxidative stress and antioxidants [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 58(1/3): 106-113.
- [23] YANG X H, CHEN X Y, GE Q Y, et al. Tolerance of photosynthesis to photoinhibition, high temperature and drought stress in flag leaves of wheat: a comparison between a hybridization line and its parents grown under field conditions [J]. Plant Science, 2006, 171(3): 389-397.
- [24] 康绍忠, 蔡焕杰, 刘晓明, 等. 大气 CO₂ 浓度增加对农田蒸发蒸腾和作物水分利用的影响[J]. 水利学报, 1996, (4): 18-26.
- KANG S Z, CAI H J, LIU X M, et al. The effect of climate changes in the future on crop evapotranspiration and water use efficiency [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (4): 18-26.