

不同土壤水分处理对夏玉米叶片 光合等生理特性的影响^[20]

刘祖贵, 陈金平, 段爱旺, 孟兆江, 张寄阳, 刘战东

(中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453003)

摘 要: 通过对防雨棚下测坑中种植的夏玉米设置不同的土壤水分控制下限指标试验, 研究了土壤水分状况对夏玉米生理特性及水分利用效率的影响。结果表明, 各生理指标有着明显的日变化特征, 不同处理气孔导度(G_s)峰值出现的时间早于光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r), 在高分水条件下(T_{-80} 土壤水分控制下限占田间持水量的 80%, 下同) T_r 峰值出现的时间滞后于 P_n , 而 T_{-60} 处理、 T_{-50} 处理的 T_r 峰值出现的时间早于 P_n , 随着土壤水分胁迫程度的增加, G_s 、 T_r 、 P_n 的峰值有提前出现的趋势; 不同处理细胞液浓度(CSC)的峰值及叶水势(LWP)的低谷均在 14:00 左右出现。 P_n 、 T_r 、 G_s 和 LWP 随土壤含水量的增加而增加, 而 CSC 则下降。叶片水分利用效率 LWUE (P_n/T_r) 随光合有效辐射(PAR)的增加而增大, 其峰值在 10:00 左右出现, T_{-70} 处理的 LWUE 最高, T_{-50} 处理的最低。此外, 通过对各处理的产量和产量水平水分利用效率(WUE)的分析得出, 夏玉米节水高产的适宜土壤水分控制下限指标为田间持水量的 70%。

关键词: 夏玉米; 土壤水分; 生理特性; 水分利用效率

中图分类号: S 513.01; S 152.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)01-0090-06

作物产量和水分利用效率的同步提高是当今节水农业所追求的主要目标, 土壤水分状况则是影响作物生长发育及水分利用效率最主要的环境因子。土壤水分胁迫造成作物的蒸腾速率、光合速率、气孔导度、叶水势降低^[1~9], 细胞液浓度、冠气温差、水分胁迫指数增加^[10~11], 最终导致作物的生物量、经济产量和水分利用效率下降。作物水分利用效率分为叶片水平的水分利用效率、群体水平的水分利用效率和产量水平的水分利用效率 3 个层次^[12~17]。产量水平 WUE 是目前研究最多的一个层次, 大量试验结果表明, WUE 与产量——表征作物生产效益的两个最重要的指标, 其最高点并不重合, WUE 先于产量达到最大, 适度的土壤水分胁迫可显著提高作物的水分利用效率^[4, 12, 15, 17, 18]。在作物生长发育期间如何进行土壤水分的调控以提高作物产量和水分利用效率, 乃是目前节水农业领域研究的热点之一。本试验通过对防雨棚下测坑中种植的夏玉米设置不同的土壤水分控制下限指标, 研究了不同的土壤水分环境对夏玉米生理特性、叶片水分利用效率和产量 WUE 的影响, 以期对夏玉米的节水高产灌溉及配套技术提供机理和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料处理

试验于 2003 年 6 月至 2004 年 9 月在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场的有底测坑中进行, 测坑上方有移动式防雨棚。测坑上口面积为 6.66m^2 , 深度为 1.8m, 下部设 20cm 的砂石滤层, 土层深度为 1.5m。坑内土壤为粉砂壤土, 田间持水量 24.0%, 1m 土层平均容重 $1.38\text{g}/\text{cm}^3$, 有机质含量 0.97%。供试作物夏玉米(*Zea mays* L.), 品种为农大 108。前作为冬小麦, 麦收后整地时, 施用二铵 $375\text{kg}/\text{hm}^2$ 、尿素 $225\text{kg}/\text{hm}^2$ 作为底肥。2003 年试验夏玉米于 6 月 8 日播种, 行距 53cm, 株距 30cm, 采用穴播方式, 每穴播 2~3 粒, 6 月 16 日出苗, 在三叶期每穴定苗 1 株, 9 月 23 日收获。2004 年试验夏玉米于 6 月 2 日播种, 9 月 21 日收获。在夏玉米生育期间设置 4 个土壤水分处理, 即土壤水分控制下限分别占田间持水量的 80% (T_{-80})、70% (T_{-70})、60% (T_{-60}) 和 50% (T_{-50}), 每处理重复 3 次, 从玉米出苗后开始进行土壤水分处理, 当各处理的土壤水分降至其下限指标时, 就进行灌水, 灌水量用水表计量。在夏玉米全生育期中, 各处理除土壤水分控制不同外,

[20] 收稿日期: 2005-01-18

基金项目: "863" 重大专项(2002AA24071) 资助

作者简介: 刘祖贵(1963—), 男, 四川资阳人, 副研究员, 主要从事作物节水灌溉理论与技术方面的研究。

其它的田间栽培管理措施保持一致。

1.2 测定方法

(1) 土壤水分:采用烘干法和中子仪测定,每周测定一次,测至 1.2m,测定生理指标时进行加测;
(2) 光合速率、蒸腾速率、气孔导度、光合有效辐射:采用 CIRAS-1 光合作用系统(英国 PP Systems 公司生产)测定(用闭路系统);
(3) 叶片细胞液浓度:采用手持糖量计测定^[9];
(4) 叶水势:用美国产 3005 型压力室水势仪直接测定;
(5) 气象因子:采用自动气象站监测(AWS,澳大利亚产)。

植株叶片生理指标的日变化选晴天从早上 7:00 开始测定,至 18:30 结束。在抽雄前测定植株

最上一片完全展开叶,抽雄吐丝后测定穗位叶,每个处理测 3 株,取其平均值。夏玉米成熟时,调查有效果穗数,并取样进行室内考种,测定产量构成因素,各处理实行单打单收单晒测定实际产量。夏玉米的耗水量采用田间水量平衡法求得。

2 结果与分析

2.1 几种主要生理指标的日变化规律

2.1.1 光合速率、蒸腾速率及气孔导度的日变化
夏玉米不同土壤水分条件下叶片光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)的日变化见图 1。图 1(a) 显示,夏玉米

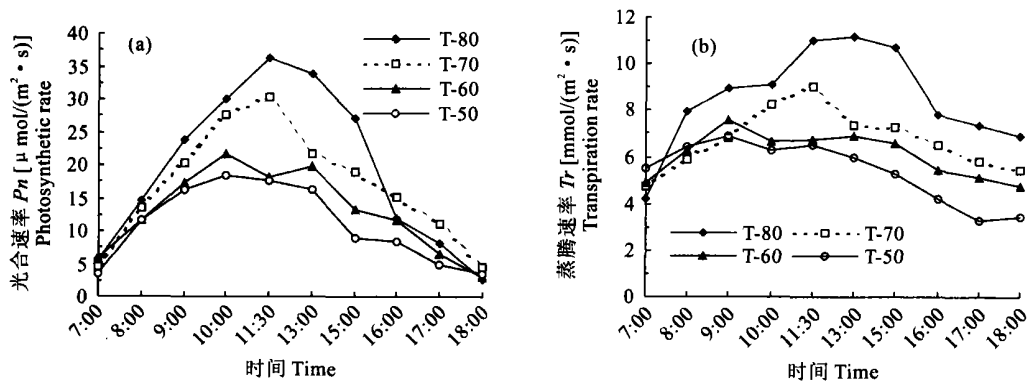


图 1 不同土壤水分处理夏玉米拔节期光合速率及蒸腾速率的日变化
Fig. 1 Diurnal variations of photosynthetic rate and transpiration rate at elongation stage of summer maize under different soil moisture treatments

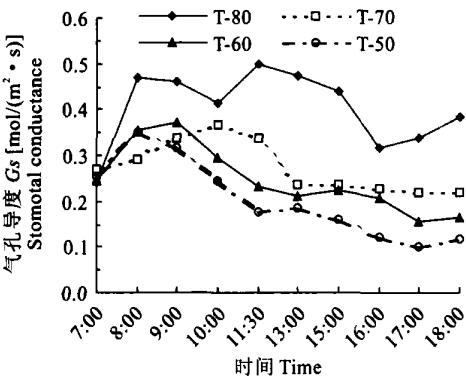


图 2 不同土壤水分处理夏玉米拔节期气孔导度的日变化
Fig. 2 Diurnal variations of stomatal conductance at elongation stage of summer maize under different soil moisture treatments

叶片的 P_n 从早上 7:00 开始迅速增加,高水分处理(T-80和T-70)的 P_n 呈单峰曲线,其峰值在 11:30 左右出现,轻度胁迫处理(T-60)的 P_n 呈双峰曲线,出现光合午休现象,其第一峰值出现在上午 10:00

左右,第二峰值于 13:00 左右出现,重度胁迫处理(T-50)的 P_n 也呈单峰曲线,其峰值出现在上午 10:00 左右,随后开始逐渐下降。由图 1(b) 可以看出, T_r 与 P_n 有相似的变化趋势,高水分处理的 T_r 峰值出现的时间滞后于 P_n ,大约在 13:00 左右,T-70 处理的 T_r 峰值与 P_n 的峰值同时出现;轻度胁迫和重度胁迫处理的 T_r 出现不太明显的双峰曲线,其值在 9:00~12:00 变化不大,在 13:00 以后才出现缓慢下降, T_r 第一峰值出现的时间早于其 P_n 峰值出现的时间,说明夏玉米 T_r 对土壤水分亏缺的敏感性要大于 P_n 。

图 2 表明,气孔导度(G_s)的日变化也有一个由低到高,再到低的变化过程,相对于 P_n 和 T_r , G_s 峰值出现的时间要早些,T-80 处理的 G_s 波动性较大,其余处理的 G_s 从 10:00 以后逐渐降低。在一定土壤水分范围内,随着土壤水分的下降, P_n 、 T_r 和 G_s 峰值都呈现提前出现的趋势,并且随着土壤水分胁迫程度的加重, P_n 、 T_r 和 G_s 峰值均降低。当土壤水分由田间持水量的 80% 降到 60% 时, P_n 、 T_r 和 G_s 下降

较多,此后土壤水分再下降, P_n 、 Tr 和 G_s 变化不大 (图 1、图 3)。

2 1 2 叶水势、细胞液浓度的日变化 已有的研究表明,叶水势和细胞液浓度都能较好地反映作物的水分状况^[9]。由图 3可知,夏玉米叶水势(LWP) 与细胞液浓度(CSC) 有着相反的日变化规律,各处理的

叶水势从早上 7: 00起逐渐降低,到 14: 00左右 LWP 降至低谷,随后开始逐渐回升;而CSC 则从早上 7: 00起逐渐升高,至 14: 00左右各处理的CSC 都达到峰值,此后开始快速下降。在日变化中的不同时刻,LWP 均随着土壤水分的降低而降低,CSC 则随着土壤水分的降低而升高。

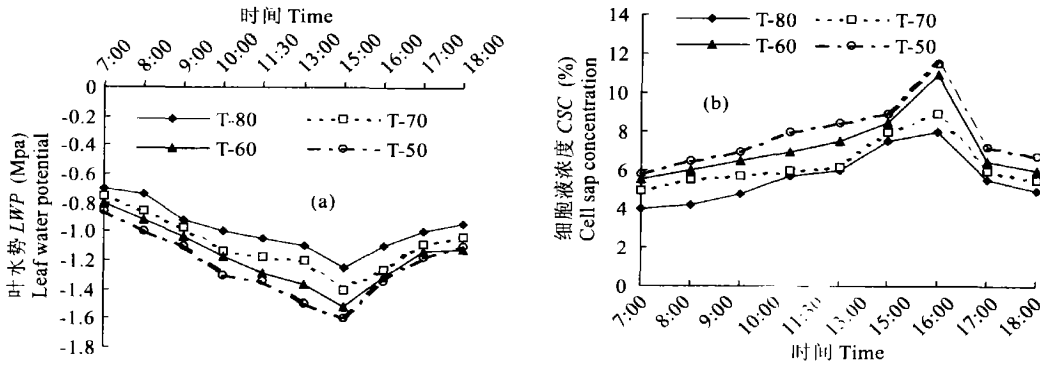


图 3 不同土壤水分下夏玉米拔节期叶水势和细胞液浓度的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of leaf water potential and cell sap concentration at elongation stage of summer maize under different soil moisture treatments

2 2 土壤水分对水分利用效率的影响

2 2 1 土壤水分对叶片水分利用效率的影响 叶片水分利用效率(LWUE) 为叶片光合速率与蒸腾速率的比值,不同土壤水分处理下的 LWUE 都有一个由低到高,再到低的变化过程 (图 4)。不同处理 LWUE 峰值出现的时间均在 10: 00左右,T -80处理和 T -70处理的 LWUE 呈单峰曲线,其值在 10: 00~ 11: 30之间变化不大,它们间的差异很小,而轻度胁迫(T -60)和重旱处理(T -50)的LWUE 从 10: 00后就开始呈波动性下降。从日间各处理的 LWUE 日均值可以看出,T -70处理的最高,T -80处理的次之,T -50处理的最低 (见表 1)。

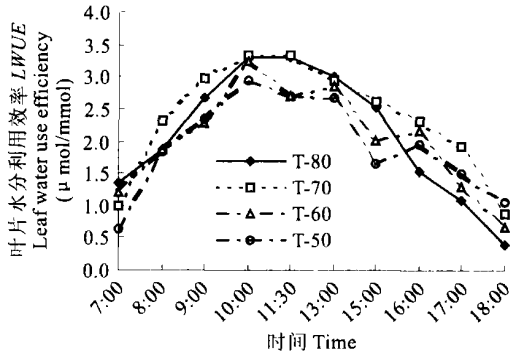


图 4 不同处理夏玉米拔节期LWUE 的日变化

Fig. 4 Diurnal variations of LWUE at elongation stage of summer maize under different treatments

表 1 不同土壤水分处理下的夏玉米叶片水分利用效率LWUE (μmol/mmol)

Table 1 The leaf water use efficiency (LWUE) at elongation stage of summer maize under different moisture treatments

处理 Treatment	测定时间 Time										平均 Average
	7: 00	8: 00	9: 00	10: 00	11: 30	13: 00	15: 00	16: 00	17: 00	18: 00	
T -80	1.34	1.85	2.67	3.31	3.30	3.01	2.52	1.53	1.10	0.38	2.10
T -70	0.98	2.30	2.96	3.34	3.33	2.94	2.62	2.32	1.91	0.87	2.36
T -60	1.20	1.86	2.28	3.26	2.70	2.85	2.01	2.17	1.29	0.65	2.03
T -50	0.62	1.83	2.36	2.94	2.70	2.68	1.67	1.95	1.50	1.04	1.93

2 2 2 叶片水分利用效率与气象因子间的关系 作物的光合速率和蒸腾速率除受土壤水分的制约

外,也受气象因子的影响,气象因子的作用使得 P_n 和 Tr 呈现规律性的日变化特征,因此,LWUE 也受

气象因子的影响。由表 2可知,不同的气象因子对 LWUE 的影响程度不一样,不论在何种土壤水分条件下LWUE 与光合有效辐射呈极显著正相关,而与其它气象因子(T 、 RH 、 V)的相关性都很差。可见,

光合有效辐射是影响叶片水分利用效率的主导因子,随着土壤水分胁迫程度的增加,LWUE 与PAR 的相关性出现降低的趋势。

表 2 不同处理夏玉米叶片水分利用效率与气象因子间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between leaf water use efficiency of summer maize and meteorological factors

处理 Treatment	光合有效辐射 PAR [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气温 T Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	相对湿度 RH Relative humidity (%)	风速 V Wind speed (m/s)
T -80	0.9391**	-0.0539	0.0220	0.0582
T -70	0.9128**	0.1450	-0.1854	0.2683
T -60	0.8519**	0.0627	-0.0972	0.1489
T -50	0.8494**	0.1931	-0.2288	0.2889

注:表中**表示 0.01的显著水平。Note: ** indicates significant at 0.01probability level.

然而,LWUE 与PAR 间的关系并不是简单的直线关系,利用不同处理日间测得的LWUE 与PAR 进行拟合,得到的曲线关系于图 5和表 3中。

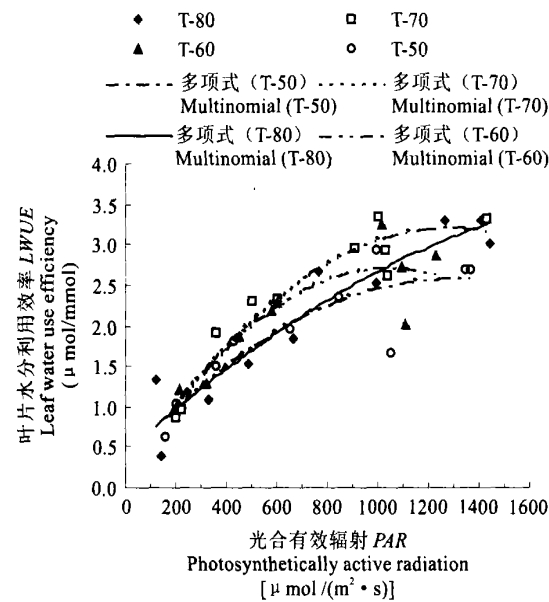


图 5 不同土壤水分条件下夏玉米叶片水分利用效率与光合有效辐射的关系

Fig. 5 Relationship between leaf water use efficiency of summer maize and photosynthetic active radiation

图 5显示,当PAR 低于 $1\,400\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,T -70 处理的 LWUE 最高,当 PAR 低于 $700\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,T -80处理与T -50处理的LWUE 相当,均很低;当PAR 低于 $600\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,T -70处理与T -60处理间的LWUE 差异不大,其值均高于其它处理;当PAR 高于 $1\,400\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,T -80处理的LWUE 最高,且有随着PAR 的增加而呈继续增加的趋势。土壤水分状况对夏玉米

LWUE 与PAR 的相关性有着强烈的影响,由表 3可以看出,随着土壤水分的降低,夏玉米 LWUE 与PAR 的相关系数有一个由低到高再到低的变化过程,当土壤水分由适宜水分(T -70)到轻度胁迫(T -60)时,其相关系数迅速降低,T -60处理、T -50处理的 LWUE 与 PAR 的相关程度差异不大,但其 LWUE 达到最大时的 PAR 差异较大;土壤水分过高或过低时,其LWUE 达到最大值时要求PAR 值都很高[$\geq 1\,700\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],在绝大多数情况下,这样的PAR 往往达不到,至于适宜水分和轻度胁迫的处理,其LWUE 达到最大时的PAR 在 $1\,200\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右,在晴朗的天气下都能出现这样的PAR 值。因此,在适宜水分条件下,夏玉米能高效地利用光能和水分,使得其LWUE 最高。

2.2.3 产量水平的水分利用效率 产量水平的水分利用效率指的是每消耗 1m^3 水所能生产的经济产量,即在获得较高产量的条件下,尽量减少耗水量,以提高产量水平的水分利用效率是节水灌溉追求的最终目标。不同处理的夏玉米耗水量采用田间水量平衡方程计算求得(表 4)。由表 4可知,T -70处理的产量最高,T -80处理的耗水量最大,T -60处理的 WUE 最高,T -80处理的 WUE 最低;用 Duncan 新复极差法(SSR) 检验可以看出,T -80处理与T -70处理间的产量差异不显著,但它们与其它处理间的产量差异均达到了显著或极显著水平;各处理间的耗水量差异也达到了显著或极显著水平;2003年T -70处理、T -60处理、T -50处理之间的WUE 差异不显著,2004年T -70处理与T -60处理、T -50处理间WUE 的差异达到了显著水平,T -70、T -60、T -50与T -80处理间的差异均达到了极显著水平;高水分处理(T -80)虽然产量很高,但其WUE 最低,这对于

节水是不利的。因此,从产量水平和WUE 来综合考虑,夏玉米节水高产的适宜土壤水分控制下限指标应为田间持水量的 70%。

表 3 不同土壤水分条件下夏玉米叶片水分利用效率与光合有效辐射的关系

处 理 Treatment	回归关系式 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	LWUE 最大时的 PAR PAR as LWUE is maximum [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
T -80	$LWUE = -6.0 \times 10^{-7} PAR^2 + 0.0029 PAR + 0.4187$	0.9457**	2416.7
T -70	$LWUE = -2.0 \times 10^{-6} PAR^2 + 0.0047 PAR + 0.1674$	0.9612**	1175.0
T -60	$LWUE = -2.0 \times 10^{-6} PAR^2 + 0.003 PAR + 0.1218$	0.8761**	1250.0
T -50	$LWUE = -1.0 \times 10^{-6} PAR^2 + 0.0034 PAR + 0.3581$	0.8876**	1700.0

注:表中**表示 0.01 的显著水平。Note: ** indicates significant at 0.01 probability level.

表 4 不同土壤水分处理夏玉米的产量、耗水量和水分利用效率

年份 Year	处 理 Treatment	产量 Y Yield (kg/hm^2)	耗水量 ET Water consumption (m^3/hm^2)	水分利用效率 WUE Water use efficiency (kg/m^3)
2003	T -80	7074.0 ^{ab} A	4159.4 ^a A	1.70 ^b A
	T -70	7394.6 ^a A	3677.4 ^{ab} AB	2.04 ^{ab} A
	T -60	6341.0 ^b AB	2492.5 ^c B	2.54 ^a A
	T -50	4930.6 ^c B	2176.3 ^c B	2.27 ^{ab} A
2004	T -80	7687.0 ^{ab} A	4291.3 ^q A	1.79 ^c B
	T -70	8058.4 ^{2a} A	3714.2 ^{3b} B	2.17 ^{ab} AB
	T -60	6546.4 ^{3b} B	2642.0 ^{4c} C	2.48 ^a A
	T -50	5461.5 ^{2c} C	2241.1 ^{4d} D	2.45 ^{ab} A

注:表中小写、大写字母分别表示 0.05 和 0.01 的显著水平。
Note: The small and capital letters indicate significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 结论与讨论

土壤水分是影响作物生长发育最重要的环境因子,当土壤水分出现胁迫时,作物体内水分含量降低,叶水势下降,气孔阻力加大,蒸腾减小,光合速率降低,细胞液浓度升高^[2~4]。

本试验结果表明,土壤水分状况影响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、气孔导度的峰值出现的时间提前,而不同处理叶水势的低谷以及细胞液浓度的峰值出现的时间一致,与土壤水分的高低关系不大。夏玉米是大田作物中比较不耐旱的作物,当土壤水分胁迫出现时,其正午前后的光合速率、蒸腾速率、气孔导度下降较快,为了适应干旱环境,叶片的气孔进行调节出现不均匀关闭或关闭现象,CO₂通过量减少,作物的光合速率下降,导致光合午休^[5~7],而适宜水分和高水分处理的光合速率却继续升高。

夏玉米叶片水分利用效率的日变化呈单峰曲线,在上午 10:00 左右达到最大值,以土壤相对含水量 70%(T -70) 的处理最高,重旱处理(T -50) 的最

低。当土壤水分出现胁迫时,由于光合速率下降的速度大于蒸腾,使得 LWUE 下降,当土壤水分过高时,光合速率升高的速度小于蒸腾,也使得 LWUE 下降。除土壤水分外,光合有效辐射是影响叶片水分利用效率最主要的气象因子,其它气象因子,如气温、相对湿度、风速与叶片水分利用效率的相关性不大。因此,晴朗的天气是作物进行光合作用积累有机物,提高水分利用效率的重要保证。在生产实际中,如何实施优化供水及配套技术措施以提高产量及水分利用效率 WUE,是节水农业追求的最终目标。本试验结果显示,轻度胁迫处理(T -60) 的 WUE 最高,高水分处理(T -80) 的最低,选用适宜的土壤水分控制下限(T -70),可使得产量最高,其 WUE 也较高,与最高的 WUE 无显著差异。通过对各种指标的综合评价,夏玉米节水高产的土壤水分控制下限应为田间持水量的 70%,这样既可获得高产,又能取得较高的水分生产效益。

参 考 文 献:

[1] 黄占斌,山 仑. 春小麦水分利用效率日变化及其生理生态基

(c)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

础的研究[J].应用生态学报, 1997, 8(3): 263- 269.

[2] 康绍忠,史文娟,胡笑涛. 调亏灌溉对玉米生理指标及水分生产效率的研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 88- 92

[3] 房全孝, 陈雨海. 冬小麦节水灌溉的生理生态基础研究[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 21- 24

[4] 杨德光, 沈秀瑛, 赵天宏, 等. 玉米旱害生理研究进展[J]. 作物杂志, 2001, (5): 1- 4

[5] 张树源, 武海, 沈振西, 等. 青海高原小麦叶片净光合速率日变化的中午降低现象对环境生态因素的响应[J]. 西北植物学报, 1995, 15(3): 212- 218

[6] 张喜英, 裴冬, 由懋正. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 280- 283

[7] Hirasawa T. and Hsiao T. C. Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field [J]. Field Crops Research, 1999, 62: 53- 62

[8] 张永强, 姜杰. 水分胁迫对冬小麦叶片水分生理生态过程的影响[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 57- 61

[9] 山东农学院, 西北农学院. 植物生理学实验指导[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1980. 152- 161.

[10] 蔡焕杰, 康绍忠. 棉花冠层温度的变化规律及其用于缺水诊断研究[J]. 灌溉排水, 1997, 16(1): 1- 5

[11] Alderfasi A A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat [J]. Agricultural Water Management, 2001, 46(3): 241- 251

[12] 胡顺军, 宋郁东, 周宏飞, 等. 塔里木盆地棉花水分利用效率试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(3): 66- 70

[13] 杨晓光, 沈彦俊, 于沪宁. 夏玉米群体水分利用效率影响因素分析[J]. 西北植物学报, 1999, 19(6): 148- 153

[14] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99- 104

[15] 梁宗锁, 康绍忠. 植物水分利用率及其提高途径[J]. 西北植物学报, 1996, 16(6): 79- 84

[16] 张岁岐, 山仓. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1- 4

[17] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34- 39

[18] 吕金印, 山仓, 高俊凤. 非充分灌溉及其生理基础[J]. 西北植物学报, 2002, 22(6): 1512- 1517.

Effects of different soil moisture treatments on physiological characteristics of summer maize leaves

LIU Zu gui, CHEN Jin ping, Duan Ai wang, MENG Zhao jiang, ZHANG Ji yang, LIU Zhan dong
(Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: By imposing different lower limits of soil moisture on summer maize(*Zea mays* L.) grown in non weighting lysimeters under a rain shelter, the effects of soil water status on physiological characteristics and water use efficiency of summer maize were studied. The results showed that all the physiological parameters had obviously diurnal change characteristics; the time when the maximum of stomatal conductance (*G*_s) appeared was earlier than that of photosynthetic rate (*P*_n) and transpiration rate (*T*_r). Under high soil water condition (T⁻⁸⁰), the time when the peak value of *T*_r emerged was later than that of *P*_n, but the time when the peak value of *T*_r in both T⁻⁶⁰ and T⁻⁵⁰ treatments emerged was earlier than that of *P*_n. The maximum of *G*_s, *T*_r and *P*_n appeared to become earlier with soil moisture decreasing, and the peak values of leaf water potential (LWP) and cell sap concentration (CSC) were all appeared at about 14: 00pm. *G*_s, *T*_r, *P*_n and LWP increased with the improvement of soil water, but the CSC declined. Leaf water use efficiency (LWUE) increased with the augmentation of photosynthetic active radiation (PAR) and reached the maximum at about 10: 00am. The LWUE of T⁻⁷⁰ treatment was the highest and that of T⁻⁵⁰ was the smallest. In addition, according to the results of yield and water use efficiency in different treatments, the proper lower limit of soil moisture for water saving and high yield in summer maize was 70% of field water capacity.

Key words: summer maize; soil moisture; physiological characteristics; water use efficiency