

控墒补灌下春玉米光合特性、叶片衰老研究 及最适灌溉量估算

王国栋^{1,2}, 曾胜和^{1,2}, 陈 云¹, 梁 飞¹, 张 磊¹

(1. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 新疆 石河子 832000;
2. 农业部作物高效用水石河子科学观测实验站, 新疆 石河子 832000)

摘 要: 以玉米品种郑单 958 为材料, 于 2014—2015 年在新疆石河子进行大田试验, 设置 5 个控墒补灌栽培模式, 研究了控墒下限对绿洲区滴灌春玉米光合特性、叶片衰老和水分利用效率的影响, 并估算了本区玉米高产栽培的最佳灌溉量。试验结果表明, 大喇叭口、抽雄及吐丝期土壤墒度过低或过高会显著 ($P < 0.05$) 降低玉米株高、叶面积指数 (LAI) 及干物质积累量。灌浆期土壤墒度保持在田间持水量 85% 的栽培模式, 玉米穗位叶净光合速率 (P_n)、实际光化学效率 (Φ_{PSII})、光化学淬灭系数 (qP) 及光合电子传递速率 ($rETR$) 可分别较墒度 70% 栽培模式提高 71.7%、81.8%、71.6% 和 54.9%, 但却会降低单叶的水分利用效率 (WUE_L)。同时, 花后同化物输入量及其对子粒的贡献率分别提高 105.2%、20.3%, 叶片衰老持续期延缓了 8.1 d。二次曲线拟合表明, 最佳灌量为 539.9 mm 时能取得 $14.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的高产, 可同时兼顾产量与灌溉效益的最大化。

关键词: 玉米; 控墒补灌; 滴灌; 光合特性; 叶片衰老; 产量; 水分利用效率
中图分类号: S513; S275.6 **文献标志码:** A

Estimation of photosynthetic characteristics, leaf senescence and optimal irrigation amount for spring maize by drip irrigation under controlled soil moisture and supplementary irrigation

WANG Guo-dong^{1,2}, ZENG Sheng-he^{1,2}, CHEN Yun¹, LIANG Fei¹, ZHANG Lei¹

(1. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil - fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2. Experimental Station for Crop Water Use of Ministry of Agriculture, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: A maize variety of the Zhengdan 958 was planted in Shihezi of Xinjiang, to carry out a field experiment during 2014 to 2015 which set up five cultivated model with controlled soil moisture and supplementary irrigation. The influences of the lower limitation of controlled soil moisture to the photosynthetic characteristics, leaf senescence and water use efficiency of spring maize by drip irrigation in oasis region were researched, and estimated the optimal irrigation amount for high yield maize cultivation. The test results showed that: If the soil moisture too lower or too higher ($P < 0.05$) in the flare opening, tassel and silking periods, the plant height, leaf area index (LAI) and dry matter accumulation will be significantly reduced. The cultivated model of the soil moisture was kept 85% field capacity in filling stage, the net photosynthetic rate (P_n) of ear and leaf, actual photochemical efficiency (Φ_{PSII}), photochemical quenching (qP) and photosynthetic electron transport rate ($rETR$) can be increased by 71.7%, 81.8%, 71.6% and 54.9% respectively, compared with 70% field capacity. But the water use efficiency (WUE_L) of single leaf will be decreased. Meanwhile, the photosynthetic yield and its contribution rate to grain in post-anthesis will be increased by 105.2% and

收稿日期: 2016-07-24 修回日期: 2017-09-07
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31460550); 国家科技支撑计划课题“大规模寒地粮食产能综合性保护技术及装备 (2014BAD06B04); 兵团青年科技创新资金专项 (2014CB010); 兵团现代农业科技攻关与成果转化项目 (2016AC008); 新疆农垦科学院科技引导计划项目 (58YYD201306)
作者简介: 王国栋 (1982—), 男, 山西太谷人, 助理研究员, 主要从事作物灌溉制度研究。E-mail: 664812734@qq.com。
通信作者: 曾胜和 (1962—), 男, 石河子人, 副研究员, 主要从事水肥一体化技术研究。E-mail: Zengsh3217@126.com。

20.3%， respectively, and the leaf senescence duration was delayed about 8.1 days. The fitting result by quadratic curve showed that when the optimal irrigation amount was 539.9 mm, the high yield of $14.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ can be obtained, the maximal yield and irrigation benefit can be taken into account simultaneously.

Keywords: maize; controlled soil moisture and supplementary irrigation; drip irrigation; photosynthetic characteristics; leaf senescence; yield; water use efficiency

新疆绿洲农业区光热资源充足且昼夜温差大, 农作物的生产潜力可观, 是我国重要的粮棉生产基地^[1]。玉米作为重要的粮食、饲料兼用作物及工业原料, 是本区主要种植作物之一^[2]。近年来曾在奇台等地连续创造了全国玉米高产记录^[3], 但新疆作物生长季内的有效降雨很少, 灌溉水资源又普遍缺乏。如何提高农作物水分利用效率, 缓解作物增产与水资源不足之间的矛盾一直都是绿洲区农业研究的重点。

玉米拔节后开始对土壤墒十分敏感, 灌浆后更是需水关键阶段^[4]。若此时遭遇干旱等逆境会严重降低玉米叶片的功能。王永军等^[5]研究表明, 灌浆后干旱会使玉米叶片提前进入衰老、死亡程序, 叶绿素和 Rubisco 酶含量随之减少, 光合有效期及光合能力显著下降^[6]。于文颖等^[7]认为, 灌浆期轻度干旱就可引起玉米叶片气孔导度、净光合及蒸腾速率的降低, 表现为以气孔限制为主。Zhang 等^[8]发现, 干旱最先影响玉米叶片光系统 I、II 的光化学活性, 阻碍光合电子从 PSII 向 PSI 传递, 进而使功能叶光化学效率下降。这些均显著限制了花后干物质的合成, 而花后干物质产量对玉米高产尤为重要。周英捷等^[9]也认为, 干旱尽管能提高花前营养器官物质向子粒中的转运量, 但玉米高产还是主要依赖花后同化物的输入。

新疆滴灌玉米栽培近年来发展很快, 与之对应

的系统研究却报道较少。已有研究中, 焦点也多集中在灌量、水肥互作等方面^[10]。而农田滴灌中, 作物正常生长主要依赖土壤维持合理的墒度, 为此, 本文通过两年的大田控墒补灌试验, 揭示灌浆期玉米功能叶光合能力、光系统光化学以及同化物转运、花后叶片衰老对不同土壤墒度的响应、变化特征, 并综合考量灌溉量、耗水量与子粒产量、水分利用效率的关系, 提出适宜本区滴灌玉米的最佳灌溉量, 以期绿洲区滴灌春玉米“以水定肥、以肥定产”提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2014—2015 年在农业部作物高效用水石河子科学观测实验站(新疆石河子市, $45^{\circ}38'N$, $86^{\circ}09'E$)进行。区域具典型干旱半干旱大陆性气候, 降水稀少、空气干燥、光热集中, 年均气温 $6.5^{\circ}\text{C} \sim 7.2^{\circ}\text{C}$, 年平均降雨量 115 mm, 蒸发量 1 942 mm 左右。试验田为灌耕灰漠土, 地力均匀, 耕层土壤(0 ~ 20 cm)含有机质 $13.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $18.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $201.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 值 8.4, 土壤容重 $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 田间持水量 21.03%。2014 年及 2015 年玉米生育期内降雨量分别为 59.8 mm 和 111.4 mm; 平均温度分别为 22.7°C 和 22.8°C (图 1)。

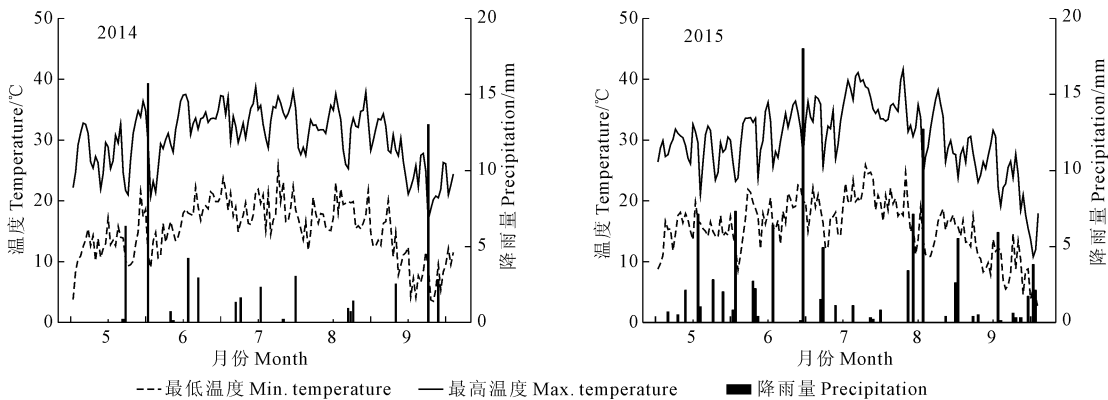


图 1 滴灌春玉米生长季节降雨量和温度的变化

Fig.1 Changes of precipitation and temperature in growing season of spring maize by drip irrigation

试验设置了 5 个土壤墒度控制下限(以田间持水量的%计,见表 1),土壤墒度采用美国产 Watch-dog 土壤水分传感器(Spectrum Technologies, Inc.)实时监测,每小区埋置 3 个,传感器埋置于滴灌带正下

方 25 cm 处。生育期内各处理土壤墒度低于设计下限时即进行滴灌,灌至田间持水量的 100%,计划湿润深度 40 cm。

表 1 不同处理控墒下限设计(以田间持水量的%计)
Table 1 Design of lower limitation controlled soil moisture under different treatments

处理 Treatment	苗期~拔节 VE~V6	小喇叭口~大喇叭口 V6~V12	抽雄~吐丝 VT~R1	灌浆期 R2~R3	蜡熟~完熟 R5~R6
W1	50	60	65	70	50
W2	55	65	70	75	55
W3	60	70	75	80	60
W4	65	75	80	85	65
W5	70	80	85	90	70

Note: VE, emergence; V6, sixth leaf; V12, twelfth leaf; VT, tasseling; R1, silking; R2, blister stage; R3, physiological maturity; R5, ; R6, physio-logical maturity, the same as below.

供试玉米品种为郑单 958,30 + 90 cm 宽窄行距播种,株距 14 cm,播种密度 12 万株·hm⁻²。1 管 2 行,铺设 1 条滴管带,滴头流量 2.8 L·h⁻¹。试验小区 60 m²,重复 3 次,随机区组排列。井水滴灌,单独水表计量,施肥量设同一水平(N 240 kg·hm⁻²,P₂O₅ 120 kg·hm⁻²,K₂O 60 kg·hm⁻²)。氮肥尿素(N:46%)和钾肥 KCl(K₂O:63%)全部随水滴施;磷肥为磷酸一铵(N:12%;P₂O₅:60%)基施 30%,滴施 70%。分别于小喇叭口、大喇叭口、抽雄、吐丝、灌浆期按照 10%、20%、20%、30%、20%追施。拔节与大喇叭口期高架喷雾机混合喷施炔螨特、阿维菌素、溴氰菊酯抑制虫害;同时混入 40% 羟烯乙烯利控制株高,其它管理同大田生产。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 株高、干物质积累及叶面积指数 于大喇叭口期(V12)、抽雄期(VT)和吐丝期(R1)每小区连续割取玉米 5 株,测量株高和叶面积指数 LAI(手持式叶面积仪 CI-203, CID, Inc. USA),之后 80℃烘干至恒重,计算各时期干物质积累量。

1.2.2 光合及叶绿素荧光参数 灌浆期正午 13:00 时,在自然光强下采用 Lcpro+ 型便携式光合仪(Bio-Scientific Ltd., UK)测定玉米穗位叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)和光合有效辐射(PAR)等参数,并计算单叶水分利用效率(WUE_L = P_n/Tr)。同时,利用 OS5P 调制型荧光仪(Opti-Scientce Ltd., USA)测定稳态荧光值(F_s)和最大荧光值(F_{ms}),计算实际光化学效率[ΦPS II = (F_{ms} - F_s)/F_{ms}];推上叶片夹(暗适应 30 min),测定初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m),计算光化学猝灭系数[qP = (F_{ms} - F_s)/(F_{ms} - F_o)]和相对电子传递速率[ETR = ΦPS II ×

PAR × 0.84 × 0.5]。

1.2.3 同化物转运及其对子粒的贡献率 吐丝期(VT)和成熟期(R6)每小区选取玉米 5 株,将其分为茎秆、叶鞘、苞叶、穗轴和子粒五部分,105℃杀青 30 min 后,80℃烘干至恒重,按张仁和等^[11]方法计算花前及花后的同化物转运量和转运率:

营养器官花前贮藏同化物转运量(kg·hm⁻²) = 开花期干重 - 成熟期干重 (1)

营养器官花前贮藏同化物转运率(%) = (开花期干重 - 成熟期干重)/开花期干重 × 100 (2)

花后同化物输入子粒量(kg·hm⁻²) = 成熟期子粒干重 - 营养器官花前贮藏同化物转运量 (3)

花前转运量对子粒产量的贡献率(%) = 营养器官花前贮藏同化物转运量/成熟期子粒干重 × 100 (4)

花后同化物对子粒的贡献率(%) = 花后同化物输入子粒量/成熟期子粒干重 × 100 (5)

1.2.4 叶片衰老特征 抽雄吐丝后每隔 10 d 测定一次绿叶面积(手持式叶面积仪 CI-203, CID, Inc. USA),用曲线方程 $y = ae^{b-cx}/(1 + e^{b-cx})$ 描述叶片衰老变化过程,其中 y 为某一时刻的相对绿叶面积(RGLA, %),x 为抽丝后天数,参数 a 为 RGLA 的理论初始值(本试验为 1),b 与叶片衰老的启动有关,c 与叶片衰老的速度有关^[12]。

成熟期相对绿叶面积 RGLAM(%) = 成熟期绿叶面积/吐丝期绿叶面积 (6)

相对绿叶面积最大衰减速率 V_{max}(%) = c/4 (7)

出现最大绿叶衰减速率的时间 T_{max}(d) = b/c^[13] (8)

1.2.5 子粒产量与水分利用效率 成熟期每小区选取一膜两行,果穗全部收获,考种,计产(含水率按14%计)。根据生育期记载的降雨量、灌水量和灌前、灌后土壤含水率,计算有效降雨量 P_o 、玉米耗水量 ET_c 和水分利用效率 $WUE = \text{产量}/ET_c^{[14]}$ 。

产量(kg·hm⁻²) = 有效公顷穗数 × 穗粒数 × 千粒重/1000 × (1 - 含水量)/(1 - 14%) (9)

$$P_o = \begin{cases} 0.5 \times TP - 5 (TP < 50 \text{ mm}) \\ 0.7 \times TP - 15 (TP > 50 \text{ mm}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, P_o 为有效降雨量(mm); TP 为总的降雨量(mm)。

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P_0 + K \quad (3)$$

式中, ET_{1-2} 为阶段耗水量(mm); i 为土壤层数; n 为总土层数; γ_i 为第 i 层土壤干容重(g·cm⁻³); H_i 为第 i 层土壤厚度(mm); θ_{i1} 和 θ_{i2} 为第 i 层土壤时段初和时段末的含水率; M 为时段内的灌水量(mm); P_0 为有效降雨量(mm); K 为地下水补给量(mm)。

1.3 统计分析

采用 SPSS16.0 对试验数据进行方差分析和差异显著性检验($\alpha = 0.05$),LSD 法比较;图表制作采用 Excel 2007 和 Origin 8.6 共同绘制。

2 结果与分析

2.1 控墒补灌对玉米株高、干物质积累量和叶面积指数的影响

由 2014—2015 年的平均数据可知(表 2),不同土壤墒度下株高随生育进程推进逐渐升高,吐丝期

各处理株高达到最大;各生育时期均为 W4 最高,W1 与其它处理间相比显著降低($P < 0.05$)。干物质的积累趋势与株高一致,大口期以 W4 最高,抽雄、吐丝期则为 W5 最高($P < 0.05$);至吐丝期各处理干物质积累均迅速升高,且 W4、W5 具有更高的积累量。各处理叶面积指数(LAI)均随生育进程推移而升高,各时期随土壤墒度增加先升后降,以 W4 显著最高($P < 0.05$),较 W1 高 52.4%、36.8% 和 26.5%。表明适宜的土壤墒度是保持玉米良好生长状态的关键,土壤墒度过高或过低均不利于玉米正常生长。

2.2 控墒补灌对灌浆期玉米穗位叶光合、叶绿素荧光参数的影响

如图 2 所示,2014—2015 年度玉米穗位叶净光合速率(P_n)均为 W4 显著高于($P < 0.05$)其它处理,W1 最低(图 2A)。蒸腾速率(Tr)2014 年变化趋势与 P_n 相同,W4 显著高于($P < 0.05$)其它处理,W1 最低;2015 年则为 W5 最高($P < 0.05$),W1 最低(图 2B)。单叶水分利用效率(WUE_L)均为 W2 最高,W5 显著最低;且 2015 年 W1、W2 的 WUE_L 高于 2014 年(图 2C)。对叶绿素荧光参数分析表明,2014—2015 年实际光化学效率($\Phi PS II$)、光化学淬灭(qP)和光合电子传递速率($rETR$)均随土壤墒度提高先升后降,均为 W4 最高($P < 0.05$),W1 最低(图 2D、2E、2F)。适宜的土壤墒度是维持灌浆期玉米穗位叶光合性能、提高叶片光能利用与转化效率的重要环境因子。

表 2 控墒补灌下玉米各生育时期株高、干物质积累量和叶面积指数变化(2014—2015)

Table 2 Change of plant height, dry matter accumulation and leaf area index in each growing period of maize under controlled soil moisture irrigation (2014—2015)

处理 Treatment	株高 Plant height/cm			干物质积累量 Dry matter accumulation/($\times 10^3$ kg·hm ⁻²)			叶面积指数 LAI		
	大口期 V12	抽雄期 VT	吐丝期 R1	大口期 V12	抽雄期 VT	吐丝期 R1	大口期 V12	抽雄期 VT	吐丝期 R1
W1	180.2b	190.4c	197.5c	8.4c	11.8b	14.3c	4.87c	6.12c	7.05c
W2	185.4b	197.0c	220.7b	9.8bc	12.4b	16.7b	5.24b	7.08bc	7.84b
W3	201.8a	219.2ab	233.0a	10.4b	13.7b	17.4b	6.23ab	7.53b	8.10ab
W4	203.5a	224.7a	235.4a	12.9a	15.4ab	20.1a	7.42a	8.37a	8.92a
W5	197.6ab	213.0b	223.0ab	12.3ab	17.2a	21.9a	6.58ab	7.68b	8.04ab

注:同一列中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。
Note: In the same column with different letters are expressed significant difference ($P < 0.05$). The same as below.

2.3 控墒补灌对玉米花前及花后同化物转运的影响

由表 3 可知,2014—2015 年土壤墒度的增加显著($P < 0.05$)降低了花前同化物的转运量、转运率及其对子粒的贡献率,均为 W1 最高($P < 0.05$)。花

后同化物输入子粒量及其对子粒的贡献率均随土壤墒度增加先升后降,均为 W4 最高,W1 显著低于其它处理($P < 0.05$)。表明土壤墒度过低虽促进了花前储存碳库的再转运,但总体转运量下降,而高墒则

有利于花后同化物的合成,同时转运量也更高。

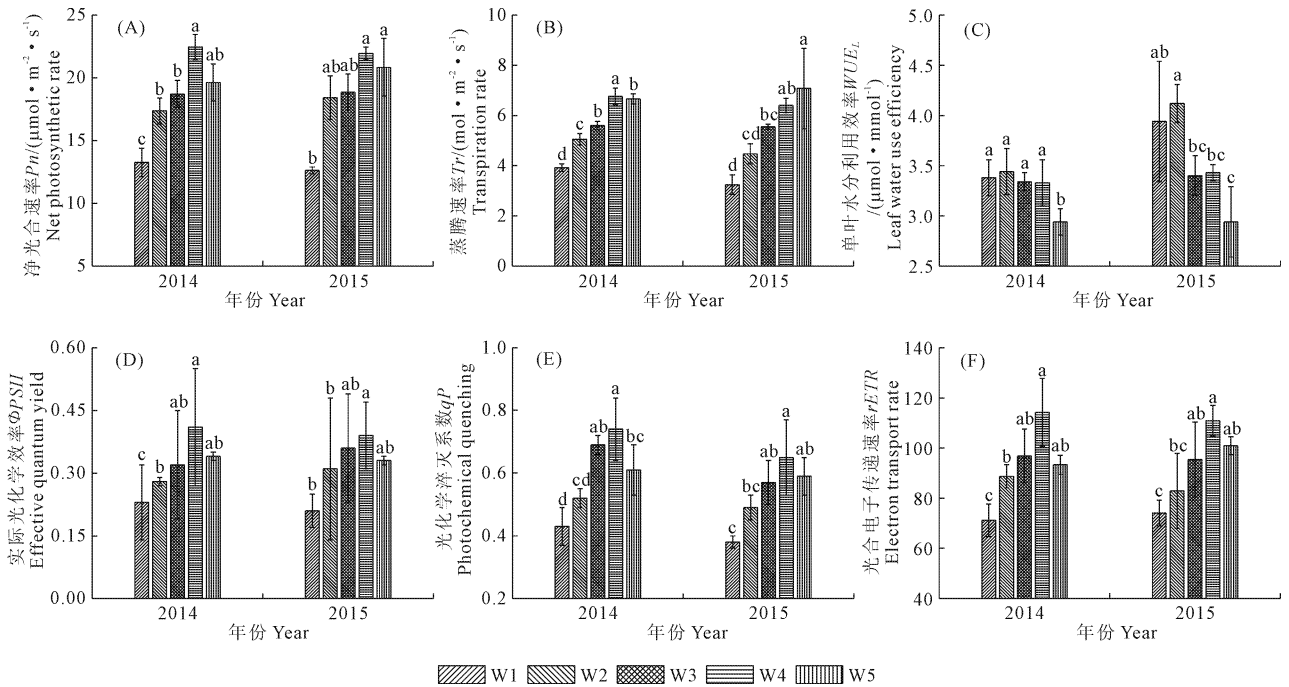
2.4 玉米吐丝期后叶片衰老变化特征

由图 3 可看出,2014—2015 年吐丝期后玉米叶片衰老速率均呈下降趋势,但各处理间土壤墒度越高同时期的相对绿叶面积越大,两年间 W5 分别较 W1 高 50.3%和 40.8%(表 4)。曲线方程拟合得出的最大衰老速率和天数表明,W1 的最大衰老速率显著高于其它处理($P < 0.05$),2014 年,W1 的最大衰老速率比 W3 高 9.46%,2015 年 W1 的值比 W4 高 15.32%。最大绿叶衰减速率出现的天数,2014 年、2015 年 W5 分别较 W1 延长了 10.1 d 和 8.1 d。较高的土壤墒度延缓了叶片衰老的速率与时间,有利

于灌浆后同化物的合成与转运。

2.5 控墒补灌对玉米产量构成、水分利用效率的影响及最佳灌溉量估算

由表 5 可知,2014—2015 年子粒产量均随土壤墒度增加先升后降,W4 为最高,2015 年度产量高于 2014 年。总灌溉量(IA)和耗水量(ET_c)均随控墒下限的提高显著增加($P < 0.05$)。灌溉效益(IB)与水分利用效率(WUE)均随土壤墒度增加先升后降;IB 与 WUE 均为 W3 最高、W5 最低($P < 0.05$)。土壤控墒下限提高,总灌量和玉米耗水量显著增加,但 IB 和 WUE 却显著降低。



注:不同字母表示同一年份差异显著($P < 0.05$)。
Note: In the same column with different letters are expressed significant difference($P < 0.05$).

图 2 灌浆期滴灌春玉米穗位叶光合及叶绿素荧光参数的变化

Fig.2 Changes of ear and leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of spring maize in filling stage by drip irrigation

表 3 控墒补灌下滴灌春玉米干物质转运量、转运率及花前贮藏同化物对子粒贡献率变化

Table 3 The changes of dry matter translocation, transport rate and the contribution rate of storage assimilation before anthesis to spring maize grain by drip irrigation under controlled soil moisture irrigation

处理 Treatment	花前同化物转运量 DMTTA/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		花前同化物转运率 DMTRA/%		花前转运量对 子粒的贡献率 CDMTAATG/%		花后同化物 输入子粒量 DMAAA/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		花后同化物对 子粒的贡献率 CDMAAATG/%	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
W1	2665.1a	2677.1a	35.5a	37.5a	28.9a	30.6a	6548.6d	6066.8d	71.1c	69.4c
W2	2589.4a	2513.3b	27.4b	31.4b	20.5b	21.6b	10053.4c	9129.8c	79.5b	78.4b
W3	2553.8ab	2470.9bc	24.5bc	25.1c	17.6c	18.2c	11974.1b	11136.8b	82.4a	81.8a
W4	2372.6b	2382.4c	18.0d	21.5c	15.2c	16.9c	13237.5a	12651.0a	84.8a	84.2a
W5	2439.8b	2331.0c	21.4c	23.2c	16.2c	17.0c	12652.5b	11405.3b	83.8a	83.0a

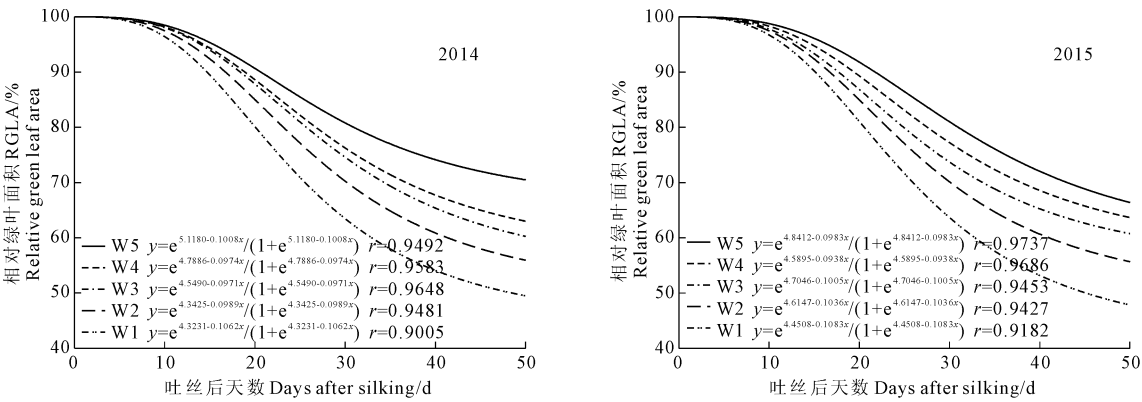


图 3 不同处理玉米相对绿叶面积动态变化

Fig.3 Dynamic changes of relative green leaf area of maize under different treatments

表 4 不同处理滴灌春玉米叶片衰老特征

Table 4 Leaf senescence feature of spring maize by drip irrigation under different treatments

处理 Treatment	成熟期相对绿叶面积 RGLAM/%		最大衰老速率 $V_{\max}/\%$		天数 $T_{\max}/d$	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015
W1	43.5d	40.7d	2.66a	2.71a	40.7d	41.1d
W2	49.2c	48.9c	2.47bc	2.59b	43.9c	44.5c
W3	52.9bc	54.5ab	2.43c	2.51b	46.8b	46.8b
W4	56.3ba	56.5a	2.44c	2.35c	49.2ab	48.9a
W5	65.4a	57.3a	2.52b	2.46bc	50.8a	49.2a

Note; RGLAM: Relative green leaf area at maturity; $V_{\max}$: The maximum reduction rate of RGLA; $T_{\max}$: The day of $V_{\max}$.

表 5 控墒补灌对玉米子粒产量、灌溉效益和水分利用效率的影响

Table 5 Effects of controlled soil moisture irrigation to grain yield of maize, irrigation benefit and water use efficiency

年份 Year	处理 Treatment	子粒产量 Yield $/(t \cdot hm^{-2})$	总灌量 IA $/mm$	灌溉效益 IB $/(kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1})$	耗水量 ET_c $/mm$	水分利用效率 WUE $/(kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1})$
2014	W1	9.2d	403.1e	22.8b	462.9e	19.3b
	W2	12.6c	445.1d	28.4a	505.2d	25.0a
	W3	14.5b	505.2c	28.6a	565.4c	25.6a
	W4	15.6a	583.2b	26.7a	643.8b	24.2a
	W5	15.0ab	684.1a	21.9b	744.9a	20.1b
2015	W1	8.7d	406.1e	20.7b	465.7e	18.1b
	W2	11.6c	447.2d	26.0a	507.1d	22.9a
	W3	13.6b	497.1c	27.4a	557.4c	24.4a
	W4	15.0a	577.3b	26.0a	637.5b	23.5a
	W5	13.7b	663.2a	21.4b	723.8a	19.0b

产量、灌溉效益、水分利用效率分别与灌溉量、耗水量符合一元二次方程 $y = ax^2 + bx + c$ 的抛物线关系(图 4),将 2014—2015 年两年数据进行拟合,公式如下:

$$Y_{GY} = -45.5920 + 0.2056x - 0.0002x^2$$

($r = 0.9253 > 0.403, n = 40, P < 0.01$) (12)

$$Y_{IE} = -61.6160 + 0.3395x - 0.0003x^2$$

($r = 0.7968 > 0.403, n = 40, P < 0.01$) (13)

$$Y_{GY} = -61.2300 + 0.2347x - 0.0002x^2$$

($r = 0.9291 > 0.403, n = 40, P < 0.01$) (14)

$$Y_{WUE} = 85.3430 + 0.3699x - 0.0003x^2$$

($r = 0.8044 > 0.403, n = 40, P < 0.01$) (15)

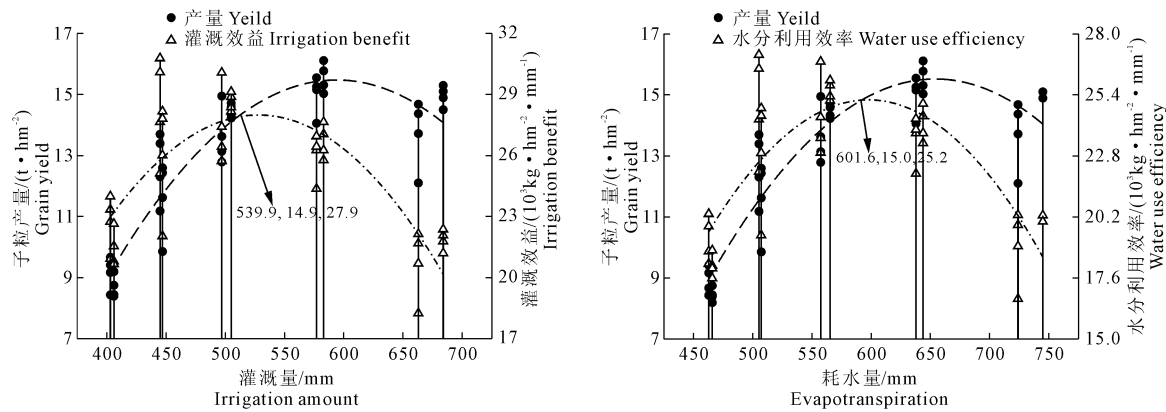


图 4 不同处理玉米的产量、灌溉效益、水分利用效率与灌量、耗水量间的关系

Fig.4 Relationships between yield, irrigation benefit, WUE and irrigation amount, ET of maize under different treatments

方差分析表明,灌溉量与产量、灌溉效益,耗水量与产量和 WUE 间均呈极显著 ($P < 0.01$) 的抛物线关系,但变化趋势并不同步,分别在 539.9 mm、 $14.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $27.9 \text{ mm} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 601.6 mm 、 $15.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $25.2 \text{ mm} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处交汇,理论上为最佳结合点,可同时取得最高的经济产量和最大的水分利用效率。

3 讨论与结论

玉米作为公认的高耗水作物,对土壤墒度变化的响应比其它环境因子更为敏感、复杂^[11,15],干旱显著影响着植株的形态发育、生理作用及最终产量等等。通常拔节期前干旱对玉米的生长影响较小^[16];大喇叭口期后玉米开始对水分亏缺十分敏感,轻度干旱即可导致生长明显受阻^[17-18]。本研究中,大喇叭口、抽雄及吐丝期各处理玉米株高、LAI 均随控墒下限的提高逐渐升高,各时期均以 W4 最高、W1 显著最低,墒度高于 W4 后株高、LAI 出现下降;大喇叭口期前干物质积累与株高、LAI 变化规律相同,但抽雄吐丝后呈显著的增加趋势,这可能与渍水危害主要表现在大喇叭口期前有关^[19]。

普遍认为玉米子粒产量 60% 以上来自开花吐丝后的光合产物^[12,20],而干旱、渍水等逆境均会显著降低叶片的光合效率^[21-23]。如张仁和等^[11]认为吐丝期干旱会降低玉米的净光合速率 (P_n),同时最大光化学效率 (F_v/F_m)、实际量子产额 ($\Phi PS \text{ II}$) 和光化学淬灭系数 (qP) 显著降低;进一步的研究表明,PS II 放氧复合体 (OEC) 不稳定,供体侧受到伤害 ($K - \text{band} > 0$),受体侧电子传递受到抑制 (Ψ_0 下降) 是光合下降的主因^[22,24]。任佰朝等^[23]研究则表明,吐丝后渍水 3 d 玉米叶片光合活力即受抑制,

P_n 、 F_v/F_m 、 $\Phi PS \text{ II}$ 降低显著^[25]。本研究中,灌浆期穗位叶 P_n 、 Tr 均随控墒下限的提高显著增加,但大于田持的 85% 后 P_n 有明显下降;单叶水分利用效率 $WUE_L >$ 田持 75% 后随土壤墒度增加显著降低。叶绿素荧光参数的测定表明,实际光化学效率 $\Phi PS \text{ II}$ 、光化学淬灭系数 qP 及光合电子传递速率 $rETR$ 下降,导致了玉米穗叶的光合速率和性能降低,这与前人研究结果基本一致^[11,22-25]。

玉米干物质积累量是形成子粒产量的物质基础,花前营养器官贮藏同化物的转运和花后光合产物多寡共同决定着产量的高低^[26]。前者受环境胁迫的影响较大,如干旱可显著增加花前同化物向子粒转运量;而后者取决于花后绿叶的持续期长短和光合效率高低^[11-12]。本研究表明,与 W1(灌浆期,田持 70%) 相比,其余处理土壤墒度提高虽降低了花前同化物向子粒转运量,但花后同化物产量更多并转移至子粒(贡献率更高);同时,叶片最大衰老速率 (V_{max}) 更低,绿叶持续期 (T_{max}) 更长,有利于灌浆后玉米穗叶保持较强的光合性能,为子粒提供充足的光合同化物,这是玉米高产与水分高效协同的生理基础^[27]。

合理灌溉定额确定是制定灌溉制度的重要指标,本试验基于灌溉效益与水分利用效率的综合考量,估算了本地区滴灌春玉米的最佳灌溉量和耗水量。王碧胜等^[28]认为玉米子粒产量与耗水量间呈显著的幂方程关系。但本研究发现,子粒产量、灌溉效益、WUE 分别与灌溉量、耗水量更符合二次抛物线关系,分别在 539.9 mm、 $14.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $27.9 \text{ mm} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 601.6 mm 、 $15.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $25.2 \text{ mm} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处交汇,是最佳灌量的结合点,能同时取得较高的经济产量和水分利用效率。

参 考 文 献:

- [1] 施志国,勾玲,姚敏娜,等.新疆不同耐密型玉米品种光合性能及产量构成特征的研究[J].新疆农业科学,2012,49(6):981-989.
- [2] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴 2015[M].北京:中国统计出版社,2015.
- [3] 中华人民共和国农业部.玉米单产突破 1500 公斤再创全国高产纪录[EB/OL].(2013-10-09)[2014-01-13],http://www.moa.gov.cn/zwillm/zwdt/201310/t20131009_3624336.html.
- [4] 刘祖贵,陈金平,段爱旺,等.不同土壤水分处理对夏玉米叶片光合等生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(1):90-95.
- [5] 王永军,杨今胜,袁翠平,等.超高产夏玉米花粒期不同部位叶片衰老与抗氧化酶特性[J].作物学报,2013,39(12):2183-2191.
- [6] 范雅君,吕志远,田德龙,等.河套灌区玉米膜下滴灌灌溉制度研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):123-129.
- [7] 于文颖,纪瑞鹏,冯摇锐,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.
- [8] Zhang R H, Zhang X H, Camberato J J, et al. Photosynthetic performance of maize hybrids to drought stress[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2015,62(6):788-796.
- [9] 周英捷,傅丰贝,李伏生.水肥调控下糯玉米生长、产量和水分利用效率研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):114-126.
- [10] 郭丙玉,高慧,唐诚,等.水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3679-3686.
- [11] 张仁和,郭东伟,张兴华,等.吐丝期干旱胁迫对玉米生理特性和物质生产的影响[J].作物学报,2012,38(10):1884-1890.
- [12] 张仁和,胡富亮,杨晓钦,等.不同栽培模式对旱地春玉米光合特性和水分利用率的影响[J].作物学报,2013,39(9):1619-1627.
- [13] Chen X C, Chen F J, Chen Y L, et al. Modern maize hybrids in Northeast China exhibit increased yield potential and resource use efficacy despite adverse climate change[J]. Globe Change Biology, 2013,19(3):923-936.
- [14] 李远华,崔远来,高峰,等.SL 13-2015 灌溉试验规范[S].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [15] 张卫星,赵致,柏光晓,等.不同玉米杂交种对水分和氮胁迫的响应及其抗逆性[J].中国农业科学,2007,40(7):1361-1370.
- [16] 纪瑞鹏,车宇胜,朱永宁,等.干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(11):3021-3026.
- [17] Cakir R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn[J]. Field Crops Research, 2004,89(1):1-16.
- [18] 白莉萍,隋方功,孙朝晖,等.土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J].生态学报,2004,24(7):1556-1560.
- [19] 余卫东,冯利平,盛绍学,等.黄淮地区涝渍胁迫影响夏玉米生长及产量[J].农业工程学报,2014,30(13):127-136.
- [20] He P, Osaki M, Takebe M, et al. Changes of photosynthetic characteristics in relation to leaf senescence in two maize hybrids with different senescent appearance[J]. Photosynthetica, 2002, 40(4): 547-552.
- [21] 田琳,谢晓金,包云轩,等.不同生育期水分胁迫对夏玉米叶片光合生理特性的影响[J].中国农业气象,2013,34(6):655-660.
- [22] 李耕,高辉远,赵斌,等.灌浆期干旱胁迫对玉米叶片光系统活性的影响[J].作物学报,2009,35(10):1916-1922.
- [23] 任佰朝,朱玉玲,李霞,等.大田淹水对夏玉米光合特性的影响[J].作物学报,2015,41(2):329-338.
- [24] 高杰,张仁和,王文斌,等.干旱胁迫对玉米苗期叶片光系统 II 性能的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1391-1396.
- [25] Irfan M, Hayat S, Hayat Q, et al. Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging[J]. Protoplasma, 2010, 241(1):3-17.
- [26] 王丽梅,李世清,邵明安.水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J].中国农业科学,2010,43(13):2697-2705.
- [27] 邵国庆,李增嘉,宁堂原,等.灌溉与尿素类型对玉米花后穗位叶衰老、产量和效益的影响[J].中国农业科学,2009,43(10):3459-3466.
- [28] 王碧胜,蔡典雄,武雪萍,等.长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1455-1464.