

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201610015

干热河谷不同水肥处理玉米(*Zea mays* L.)生殖生长期光合及生长特性*

王春雪¹, 史亮涛¹, 李建查¹, 岳学文¹, 王杰², 潘志贤¹, 张雷², 方海东^{1**}

(1. 云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南元谋 651300;

2. 云南省水利水电科学研究院, 云南昆明 650228)

摘要:【目的】研究干热河谷旱季膜下滴灌灌溉下不同水肥处理对甜脆玉米生殖生长期光合、形态、产量的影响。【方法】以‘正甜 68’为试验材料,设计裂区区组大田种植试验,其中水分处理共3个梯度:低(W1)55%~90%田间持水量;中(W2)70%~90%田间持水量;高(W3)每5 d浇1次,每次2 h(约2.270 5 m³)。施氮肥处理共4个梯度:F1: 75 kg/hm²; F2: 75 kg/hm²+叶面微肥; F3: 150 kg/hm²; F4: 150 kg/hm²+叶面微肥。水分和施肥交叉结合,共12个处理。分析不同水肥组合下玉米的净光合速率(P_n)、胞间CO₂浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)、形态指标、产量等指标。【结果】不同水肥处理在生殖生长期以前光合及生长量都没有显著差异($P>0.05$),在进入生殖生长后期则出现显著差异($P<0.05$),光合速率最高值[35.06 μmol/(m²·s)]出现在高水分处理组。在水分利用效率方面,灌溉水利用率最高值[4.203 2 kg/m³(鲜重)]出现在低水分处理组,而最低值[2.292 8 kg/m³(鲜重)]出现在高水分处理组;在产量方面各处理组差异不显著($P>0.05$)。【结论】研究区高温、干旱、少雨,水分因素是主要的影响因子,玉米的灌溉水利用率随着灌溉量的减少而升高,水分处理对玉米生理效应显著,肥料的处理属于次要因素,对玉米生理有一定的影响。

关键词:甜脆玉米;水肥耦合;光合特性;产量;水分利用效率

中图分类号: S 513.062

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X(2018)01-0017-09

Effect of Water and Nitrogen Coupling on the Characteristics Photosynthesis and Growth in Maize Reproductive Stage in Yuanmou Dry-hot Valleys

WANG Chunxue¹, SHI Liangtao¹, LI Jiancha¹, YUE Xuewen¹, WANG Jie²,
PAN Zhixian¹, ZHANG Lei², FANG Haidong¹

(1. Institute of Tropical Eco-Agricultural Sciences, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou 651300,
China; 2. Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Kunming 650228, China)

Abstract: [Purpose] Jinsha River dry-hot valleys (DHV) of Yuanmou in Yunnan Province Southwest of China have high temperature and drought all the year round. A plot experiment was designed in this area to research the water-fertilizer coupling of sweet corn (*Zea mays* L.). [Method] There were three irrigation levels [low (W1), 55%-90% field capacity (Fc); medium (W2), 70%-90% Fc; and high (W3), watering 2 hours every 5 days (approximate 2.270 5 m³)], four nitrogen fertilizer

收稿日期: 2016-10-17 修回日期: 2017-07-07 网络出版时间: 2018-03-02

*基金项目: 云南省级水资源费项目(2015BB019)。

作者简介: 王春雪(1984—),女,河北涿鹿人,硕士,助理研究员,主要从事生态学研究。E-mail: rouwz@163.com

**通信作者 Corresponding author: 方海东(1979—),男,黑龙江海伦人,硕士,副研究员,主要从事生态学研究。

E-mail: rqsfhd@163.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201610015](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201610015)

levels [F1 (75 kg/hm²); F2 (75 kg/hm²+foliar fertilizer); F3 (150 kg/hm²); F4 (150 kg/hm²+foliar fertilizer)]. The twelve irrigation and fertilization treatments were T1(W1×F1), T2(W1×F2), T3(W1×F3), T4(W1×F4), T5(W2×F1), T6(W2×F2), T7(W2×F3), T8(W2×F4), T9(W3×F1), T10(W3×F2), T11(W3×F3), T12(W3×F4), respectively. Some parameters of maize were determined. They were net photosynthetic (P_n), intercellular CO₂ concentration (C_i), atomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r), water use efficiency (WUE), morphological parameters and yield. [Results] The photosynthesis and morphological parameters were no significant differences ($P>0.05$) in the early reproductive stage of sweet corn in different watering and fertilizing treatments, but there were significant differences ($P>0.05$) in the later reproductive stage, in which stage the high water treatment groups showed a significant advantage in photosynthesis. The P_n was higher in W3 treatment group, compared with other groups, the maximum value was 35.06 μmol/(m²·s). For water use efficiency, the irrigation wa-ter use efficiency (IWUE) was higher in the W1 groups [the maximum value was 4.203 2 kg/m³(FW)], while lower in the W3 groups [the minimum value was 2.292 8 kg/m³(FW)]. There was no significant difference ($P>0.05$) in the yield. [Conclusion] The study area was characterized by high temperat-ure, drought with little rainfall, so water was the main limiting factor. The IWUE increased with the decrease of irrigation quantity. The water treatment significantly effected on the physiological of sweet corn, while the fertilizer treatment was the secondary factor, as it had a little effect on the physiology of sweet corn.

Keywords: sweet corn; water-fertilizer coupling; photosynthetic characteristics; yield; water use effi-ciency (WUE)

水肥是影响作物生长发育、产量及品质的关键因素^[1]。20世纪80年代提出的水肥耦合是田间水肥管理的新概念，主要是指农业生态系统土壤矿质元素与水分融为一体，互相作用，进而对作物生长发育产生影响。其核心是强调作物生长的水肥环境因素间的有机联系，从而利用其协同效应，进行作物生长过程的水肥环境调控，最终提高作物生产力和水肥利用效率^[2]。前人研究表明^[3-5]：科学的水肥管理有利于提高作物的光合作用和产量。作物间生理过程与生长发育特性的差异，在不同生育期，同一作物最佳水肥耦合模式会有显著差异^[6]。土壤中的水分是作物吸收矿物元素的载体，它决定了土壤中矿质元素的运移速度和转化率；养分是维持作物正常生长的关键因子^[7]，只有合理的水肥配合，才能以水促肥，以肥调水，达到水肥高效利用的目的^[8]。

元谋干热河谷素有“天然温室”之称，全年基本无霜，是云南重要的反季蔬菜产地，甜脆玉米是该区重要的冬早蔬菜品种之一。因其旱季持续时间特别长，为每年11月到第二年5月，因此，水分是限制冬早蔬菜产量的重要因素。该区位于金沙江河谷区，农业面源污染关系到长江水

体的富营养化，水肥耦合是争取作物优质高产，提高水肥利用效率以及防止不合理施肥造成面源污染的重要途径^[9]，因此，在该区域实施水肥耦合是关系农民增收、生态安全的重要举措。

本试验利用“智熵”传感器云智能终端监控大田田间持水量，研究了3种灌溉处理和4种施肥处理下甜脆玉米开花期和成熟期的光合参数及形态、产量等指标，综合探讨了水肥耦合对甜脆玉米产量的影响，为干热区反季节甜脆玉米的节水节肥、高产高效栽培提供了理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

大田试验于云南省农科院热区生态农业研究所后山试验田中进行，该区位于金沙江干热河谷区(E101°35'~102°06'，N25°23'~26°06')，海拔1 000~1 400 m，年均气温21.5 °C，最冷月(1月)均温为14.9 °C，最热月(7月)均温为27.1 °C，年均降水量小于700 mm，6—10月降雨量占年降水量的90%以上，年均蒸发量大于3 000 mm。土壤为燥红土，玉米种植前土壤背景值见表1。

表1 土壤背景值

Tab. 1 Background value of soil

土层深度/cm soil depth	w						
	有机质/(g·kg ⁻¹) organic content	全氮/(g·kg ⁻¹) total nitrogen	全磷/(g·kg ⁻¹) total phosphorus	全钾/(g·kg ⁻¹) total potassium	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) available nitrogen	速效钾/(mg·kg ⁻¹) rapidly available potassium	有效磷/(mg·kg ⁻¹) available phosphorus
0~20	9.58	0.661	0.331	8.47	55	220	92.37
>20~40	7.16	0.531	0.194	9.85	36	130	13.44

1.2 试验材料

供试材料为甜脆玉米, 品种选用‘正甜 68’(由广东省农科集团良种苗木中心、广东省农业科学院作物研究所选育)。2016年1月6日采用幼苗移栽的方式进行定植(苗高7~8 cm, 在苗场培育35 d), 覆黑色塑料膜, 膜下铺设双行滴灌管, 垄间行距80 cm。每个种植小区长12 m, 宽5 m, 用空心砖隔开, 每个小区纵向4垄, 幼苗垄上种植, 每垄2行, 行距35 cm, 株距30 cm。

1.3 试验方法

1.3.1 试验组处理

试验于2016年1—5月进行, 历时4个月。试验采用水肥二因素裂区区组试验, 主区为3个

灌水处理梯度, 副区为4个施肥处理组, 即处理组有12个(表2)。其中每个处理又随机设置3个重复小区, 即共有36个小区, 土施氮肥使用尿素, 叶面微肥使用“博士威”全元素液体复合肥(氮磷钾≥434.32 g/L; 微量元素总含量≥106.7 g/L), 于抽雄期和灌浆期稀释500倍喷施于玉米叶面上。田间持水量采用“智熵”多深度土壤水分、温度、根系智能监测系统, 进行土壤数据实时监控。总灌水量采用水表进行监测, 到玉米收获时W1三个重复小区的灌水量分别为196.73、191.67、190.98 m³/667 m²; W2为235.10、242.53、239.52 m³/667 m²; W3为305.43、299.20、314.62 m³/667 m²。其他栽培管理措施同一般甜脆玉米。

表2 玉米水肥试验各处理灌溉用水量及施肥用量

Tab. 2 Experimental scheme of irrigation and fertilizer treatment

灌溉处理 irrigation treatment	施氮肥处理 nitrogen fertilizer treatment	处理 treatment
W1 上限: 90% 田间持水量 upper limit value: 90% field capacity, 下限: 55% 田间持水量 lower limit value: 55% field capacity	F1: 75 kg/hm ² F1: 75 kg/hm ² F2: 75 kg/hm ² +叶面微肥 F2: 75 kg/hm ² +foliar fertilizer F3: 150 kg/hm ² F3: 150 kg/hm ² F4: 150 kg/hm ² +叶面微肥 F4: 150 kg/hm ² +foliar fertilizer	T1: W1×F1 T2: W1×F2 T3: W1×F3 T4: W1×F4 T5: W2×F1 T6: W2×F2 T7: W2×F3 T8: W2×F4 T9: W3×F1 T10: W3×F2 T11: W3×F3 T12: W3×F4
W2 上限: 90% 田间持水量 upper limit value: 90% field capacity, 下限: 70% 田间持水量 lower limit value: 70% field capacity		
W3 每隔5 d灌水1次, 每次2 h(约2.270 5 m ³) watering 2 hours every 5 days (approximate 2.270 5 m ³)		

玉米种植前不施底肥, 平时进行水溶肥滴灌处理, 水溶肥使用“知马力”(总氮: 33%; 铵态氮6.2%; 腐胺氮: 26.8%; 水溶性磷: 10%; 可溶性钾: 10%; EDTA-铁: 0.1%; EDTA-锰: 0.05%; EDTA-锌: 0.05%; EDTA-铜: 0.05%; 硼: 0.4%; 钼: 0.0005%), 分别在拔节期、抽雄期、雌花期、灌浆期进行水溶肥滴灌处理, 每个主区滴肥4次共2.1 kg, 到玉米收获时, 根部施肥的总量达到梯度设置(即75 kg/hm²或150 kg/hm²)。

1.3.2 形态及光合指标的测定

在玉米开花期和成熟期进行形态和光合生理指标的测定。

每个处理随机取10个样测定株高、叶数、果实时。株高使用卷尺直接测量; 对玉米植株完全展开的叶进行计数, 作为叶数; 对有种子的果实进行计数, 作为果实时数; 对成熟期玉米进行叶片干重测量, 采用烘干称重法; 对玉米整苞重、玉米籽重、玉米籽千粒重的鲜重进行直接称重, 而干重则采用烘干称重法。

每个处理随机取5个样, 使用Li-6400XT型光合仪(美国, Li-COR公司), 采用叶室自带的红蓝光源, 光强设定为1 500 μmol/(m²·s), 对玉米完全展开的健康的功能叶片进行净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾

速率(T_r)的测定；并计算瞬时水分利用效率(WUE_i)，计算公式为 $WUE_i = P_n/T_r$ 。灌溉水利用率在收获后计算得出，公式为 $IWUE = \text{果实产量}/\text{灌溉量, kg/m}^3$ ^[2]。每株植物的叶片位置尽量一致，测定时避开主叶脉。每日取最适时间段上午9:00—11:30进行测定。

1.4 数据处理与分析

采用Excel和SPSS软件分析数据，采用Excel作图。数据均为“平均值±标准差”，不同处理植株叶片光合指标及形态指标各变量之间的显著性检验采用单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 生殖期不同阶段光合及水分指标

如表3所示：抽雄期，12种水肥处理的净光

合速率(P_n)无显著差异；成熟期， P_n 的最小值出现在低水分供给的4个处理中，而高水高肥的T11则表现出最高的 P_n ，同一施肥处理不同水分处理之间比较，高水分处理的 P_n 值较高。

在抽雄期，每个水分处理中的4种处理间叶片气孔导度(G_s)无显著差异，但是不同水分处理则表现出差异性，低水分处理的玉米 G_s 最低，而中高水分处理的 G_s 间没有显著差异。在两个生殖生长期进行比较，每个处理成熟期的 G_s ，除T12外均低于抽雄期(表3)。

抽雄期，低水肥处理的T1、T2的胞间CO₂浓度(C_i)显著低于其他处理，且其他处理之间无显著差异。在成熟期，低水肥处理的T1、T2、T3仍表现出较低的 C_i ，而较高的 C_i 值出现在T6、T10、T11、T12中(表3)。

表3 不同水肥处理对玉米繁殖期不同阶段光合及水分特性的影响 (mean±SD, n=5)

Tab. 3 Effect of photosynthesis and water features under different water and fertilizer conditions

生殖生长期 reproductive stage	处理 treatment	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_s/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	$T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$WUE_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$
抽雄期 tasseling stage	T1	31.02±3.49 a	0.18±0.04 c	96.20±29.14 d	3.22±0.56 f	9.71±0.63 a
	T2	30.67±6.97 a	0.19±0.08 bc	100.07±46.72 cd	3.65±1.09 f	8.56±0.68 b
	T3	30.72±6.50 a	0.26±0.11 abc	167.66±33.35 ab	4.93±1.39 ef	6.34±0.55 c
	T4	30.09±5.04 a	0.26±0.10 abc	161.98±44.07 ab	5.32±1.39 def	5.79±0.68 cd
	T5	35.73±2.64 a	0.35±0.06 a	179.56±18.67 ab	7.71±0.65 abc	4.65±0.33 def
	T6	34.88±2.49 a	0.37±0.11 a	183.71±36.77 ab	8.09±1.40 ab	4.39±0.58 ef
	T7	32.92±4.28 a	0.33±0.12 ab	169.47±30.24 ab	8.15±1.43 a	4.08±0.44 f
	T8	33.39±8.34 a	0.32±0.14 abc	156.05±42.71 ab	8.26±2.38 a	4.11±0.39 f
	T9	32.44±7.11 a	0.30±0.11 abc	170.72±29.95 ab	6.05±1.53 cde	5.40±0.34 d
	T10	30.92±6.14 a	0.30±0.10 abc	184.48±26.57 a	6.26±1.02 bcd	4.94±0.50 de
	T11	34.31±9.18 a	0.35±0.20 a	158.83±58.13 ab	6.92±2.41 abcd	5.13±0.83 d
	T12	30.83±3.74 a	0.24±0.01 abc	143.44±26.51 abc	6.11±0.22 cde	5.04±0.53 de
成熟期 maturation stage	T1	25.82±1.30 e	0.15±0.01 e	55.96±8.32 h	3.86±0.22 e	6.68±0.19 b
	T2	27.88±3.23 cde	0.17±0.03 de	67.73±15.70 gh	4.54±0.64 cde	6.16±0.22 cde
	T3	27.42±5.60 cde	0.17±0.05 de	64.78±10.51 gh	4.56±0.94 cde	6.02±0.13 def
	T4	26.32±2.16 de	0.17±0.02 de	81.13±17.00 efg	4.62±0.41 cde	5.72±0.48 fg
	T5	31.21±3.81 abcde	0.21±0.04 bcde	104.10±18.04 bcde	5.25±0.70 abcd	5.95±0.11 def
	T6	33.65±3.05 ab	0.27±0.06 ab	129.50±18.21 a	6.22±0.64 a	5.41±0.19 g
	T7	30.93±0.70 abcde	0.21±0.00 bcde	99.89±5.04 cde	5.33±0.07 abc	5.80±0.09 efg
	T8	28.89±3.40 bcde	0.17±0.03 de	73.23±12.89 fgh	4.70±0.58 cde	6.15±0.18 de
	T9	28.02±7.96 bcde	0.19±0.07 cde	99.02±23.32 cde	4.28±1.22 de	6.55±0.20 bc
	T10	30.41±4.15 abcde	0.22±0.06 abcd	117.06±18.74 abcd	5.06±0.79 bcd	6.02±0.18 def
	T11	35.06±5.75 a	0.28±0.08 a	124.86±24.38 ab	5.99±1.06 ab	5.88±0.31 ef
	T12	32.61±9.00 abc	0.25±0.10 abc	119.42±28.16 abc	5.72±1.53 ab	5.68±0.44 fg

注：同列同一生殖期的数据，不同字母表示差异显著($P<0.05$)；下同。 P_n ，净光合速率； G_s ，叶片气孔导度； C_i ，胞间CO₂浓度； T_r ，蒸腾速率；WUE_i，瞬时水分利用效率。

Note: For same columns, different letters show significant difference at $P<0.05$; the same as below. P_n , net photosynthetic rate, G_s , leaf stomatal conductance; C_i , intercellular CO₂ concentration; T_r , transpiration rate, WUE_i, instantaneous water use efficiency.

抽雄期, 低水分处理 (T1~T4) 的叶片蒸腾速率 (T_r) 最低, 高水分处理 (T9~T12) 次之, 中水分处理 (T5~T8) 最高。每个水分处理中的 4 个施肥处理间比较时, 大致趋势为随着施肥量增加 T_r 升高。在成熟期时, T_r 的最低值出现在低水肥处理组, 而中高水肥处理下的 T_r 值都较高 (表 3)。

由表 3 还可知: 抽雄期, 低水分处理组的瞬时水分利用效率 (WUE_i) 最高, 且随着施肥量的增加而降低, 而在中、高水分处理组中 4 种施肥

处理间则无显著差异。在成熟期时, WUE_i 的最大值出现在低水分处理组, 最小值则出现在中水分处理组。

如表 4 所示: 灌溉水利用率 (IWUE) 的最大值出现在低水分处理组, 但各个施肥处理之间没有较大差异。灌溉水利用率居中的为 T5、T6、T7、T8, 即水分处理为 W2 的主区, 其中的各施肥处理间也没有显著差异。灌溉水利用率最低的是灌溉水最高的处理大区, 即 W3 中。

表 4 不同水肥处理玉米灌溉水利用率 IWUE

Tab. 4 Irrigation water use efficiency under different water and fertilizer conditions

kg/m³(Fw)

W1				W2				W3			
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
4.037 6 a	3.925 9 a	4.203 2 a	4.202 5 a	3.572 1 b	3.789 6 b	3.240 0 b	3.387 8 b	2.663 1 c	2.654 4 c	2.292 8 c	2.609 4 c

2.2 生殖生长期不同阶段形态指标

2.2.1 抽雄期形态指标

由图 1 可知: 低水处理组中, 低肥处理 (T1) 的株高显著低于其他 3 个施肥处理; 中水处理组中, 高肥处理 (T8) 的株高显著低于其他 3 个施肥处理; 高水处理组中, 4 种施肥处理的株高无显著差异; 此外, 高水处理组在 3 个处理组之间株高最高。抽雄期, 玉米叶数在 12 个水肥处理之间均无显著差异。

2.2.2 成熟期形态指标

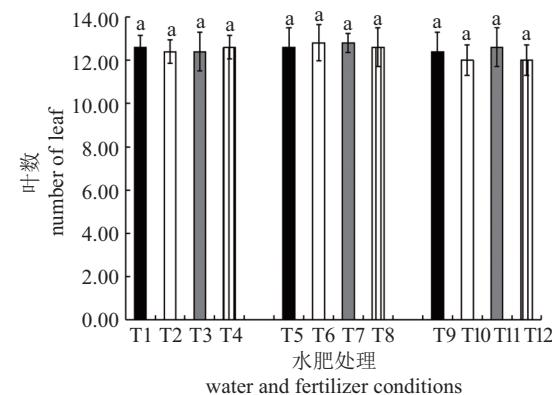
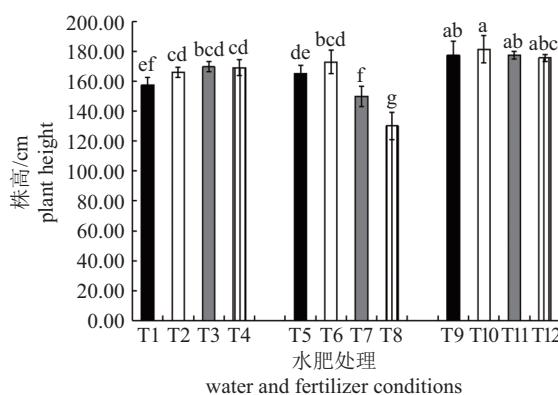
由图 2 可知: 玉米成熟期, 株高在低水分处理组的 4 个施肥处理间无显著差异; 中水分处理组中 2 个低肥处理的株高较高; 高水分处理中, 4 个施肥处理间无显著差异; 此外, 3 个水分梯

度处理间, 高水分处理的株高最高, 这与抽雄期的趋势相似。成熟期的叶干重比较, 低水分处理组的 4 个施肥处理间没有显著差异, 中水分处理组的 4 个施肥处理间也没有显著差异, 高水分处理组中叶干重的最高值出现在 2 个施叶面微肥的处理中 (T10 和 T12), 而最低值则出现在 2 个不施叶面微肥的处理中 (T9 和 T11)。

2.2.3 成熟期产量指标

由图 3 可知: 玉米整苞鲜重和干重分别在低、中水分处理组 4 个施肥处理之间均无显著差异; 高水分处理组中, T11 的整苞鲜重及干重显著低于其他 3 个处理, 其他 3 个处理间无显著差异。

玉米籽鲜重和干重在低水分处理组的 4 个施



注: 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$) ; 下同。

Note: Different letters show significant difference at $P<0.05$; the same as below.

图 1 不同水肥处理玉米抽雄期形态指标

Fig. 1 Morphological indicators in tasseling stage under different water and fertilizer conditions

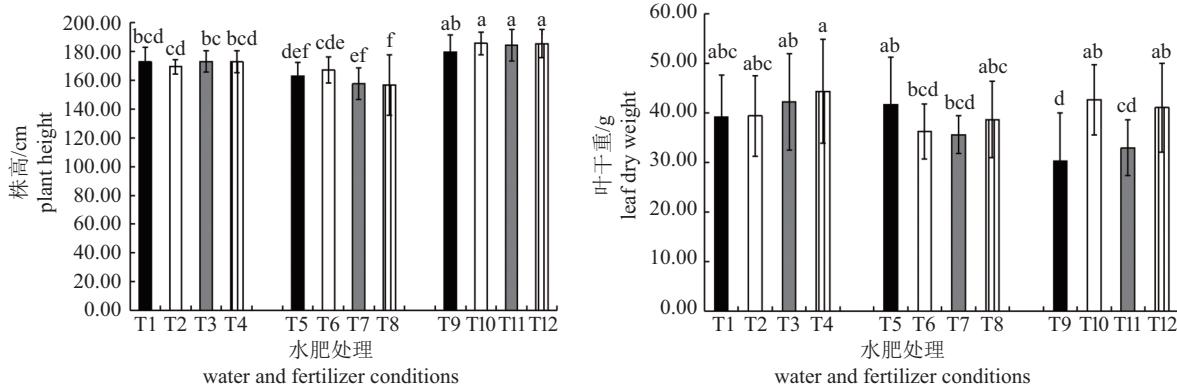


图2 不同水肥处理玉米成熟期形态指标

Fig. 2 Morphological indicators in mature stage under different water and fertilizer conditions

肥处理之间均无显著差异；中水分处理组的4个施肥处理之间，玉米籽鲜重的最高值出现在T6中，其他3个处理间没有显著差异，玉米籽干重则无显著差异；高水分处理组的4个施肥处理之间，玉米籽鲜重的最低值出现在T11，而其他3个处理间无显著差异，玉米籽干重则无显著差异。从12个处理整体比较来看，所有的玉米粒干重间都无显著差异，而干重间的最高值出现在中水分处理中的T6，最低值出现在高水分处理中的T11中（图3）。

玉米籽千粒鲜重和干重分别在低、中水分处理组4个施肥处理之间无显著差异；在高水分处理组的4个施肥处理之间无显著差异，但干重存在显著差异，最高值出现在T10，最低值出现在T9。对12个水肥处理进行综合比较，千粒鲜重最高值出现在T7，最低值出现在T11，千粒干重最高值出现在T4，最低值出现在T9。

3 讨论

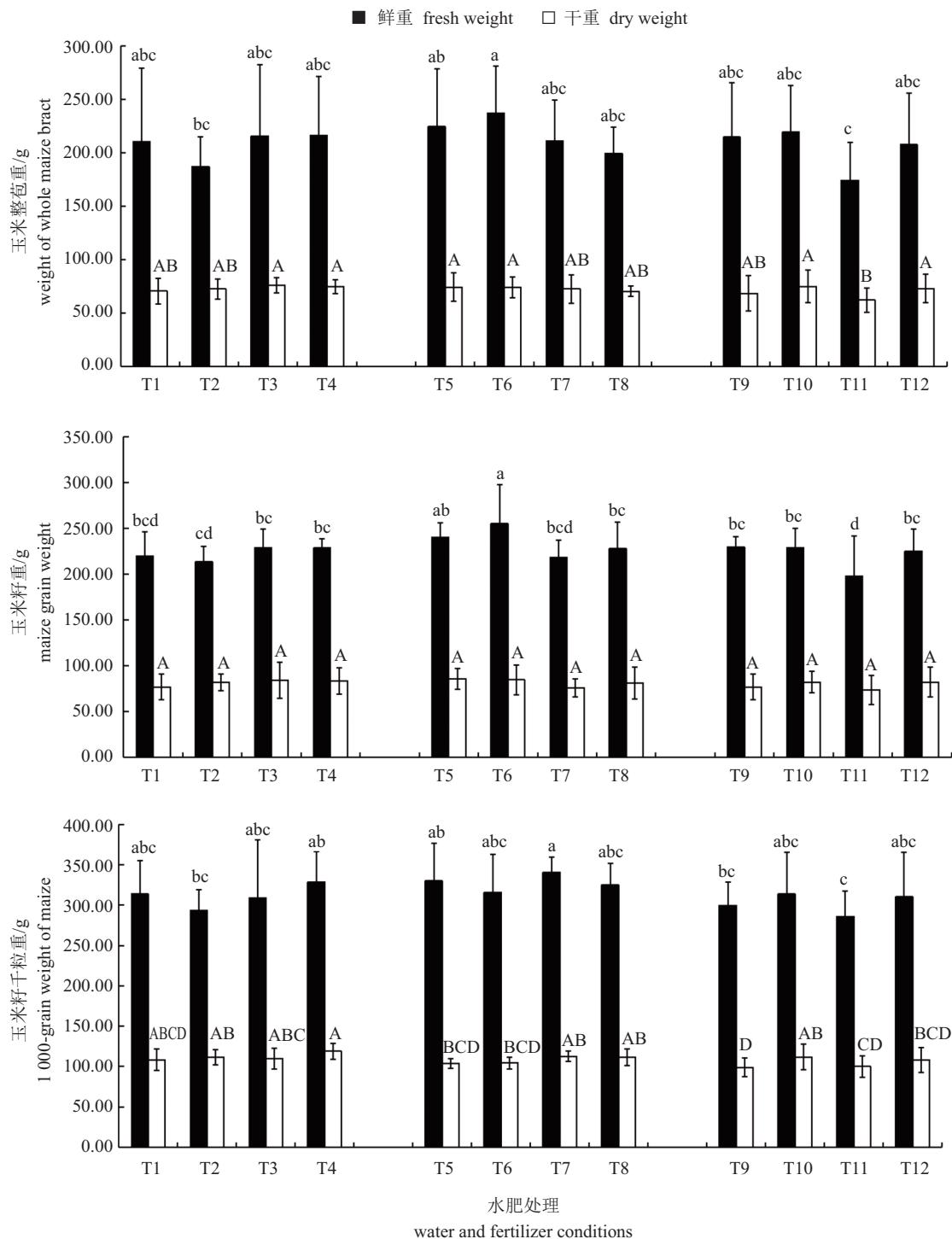
在复杂的农业生产体系中，水肥是农业生产的重要资源。目前农业生产上存在的突出问题就是水分的缺乏和施肥技术的不当^[9]。水肥耦合通过影响叶片色素含量^[10]、气孔或非气孔因素^[11]、叶片中的酶活性^[12]等多种因素，对植物的光合作用造成影响，进而对其产量及水分利用效率造成影响^[4]。近年来，在水肥耦合对植物生长发育的影响及其机理方面的研究较多，研究揭示了在作物生长中，水肥耦合存在一定的阈值，低于此阈值时，增加水肥投入能显著增产；而高于此阈值时，增产效果不显著^[13]。黄红荣等^[1]研究表明：

水分对番茄的光合作用的影响大于肥料的影响。水分缺乏比其他任何环境因子更能限制植物生长和产量。

光合作用是物质积累的生理基础，光合速率是其重要体现，较高的光合速率是作物获得高产的前提^[14]。普遍认为玉米产量的60%以上来自于抽穗以后的光合产物^[15-17]，光合物质产量基本取决于花后叶片的光合效率和绿叶持续时间^[18-19]。本研究表明：在抽雄期前的营养生长阶段，水肥处理对玉米的光合作用没有产生很大的影响，而抽雄期以后的生殖生长阶段，加强水肥供应是提高光合、增产增收的关键。左振朋等^[14]的研究也表明：不同类型玉米叶片光合作用的差异表现在生育后期的中部以上叶片。

气孔是植物叶片与环境间进行水分、CO₂交换的通道，其开启程度直接影响植株的水分平衡、光合作用以及作物的生产^[20]。气孔导度(G_s)通常是影响光合作用的初始因素^[21]，气孔的关闭程度直接影响叶片的P_n和T_r，叶片G_s能表征气体和水分的交换水平^[22]。本研究表明：抽雄期气孔导度在低水低肥处理(T1、T2)中最低，这说明低水低肥使玉米的气孔更大程度地关闭，以减小蒸腾作用，提高水分利用效率。而在成熟期，低水处理(W1)的4个施肥梯度都表现出气孔导度最低，这说明生殖后期水分对于气孔导度的影响是主要因素，而肥料则影响不显著。

胞间CO₂对叶肉细胞羧化效率有较高的影响^[21]。CECHIN^[23]研究发现：正常供水和水分胁迫条件下，施氮均可增加植物的光合速率及蒸腾速率，更能增加胞间CO₂浓度(C_i)。姜琳琳等^[21]



注: 不同小写字母表示鲜重之间差异显著 ($P<0.05$, 单因素方差分析); 不同大写字母表示干重之间差异显著 ($P<0.05$, 单因素方差分析)。

Note: Different lowercase letters mean significant difference among different fresh weights ($P<0.05$, one-way ANOVA); different capital letters mean extremely significant difference among different dry weights ($P<0.05$, one-way ANOVA).

图3 不同水肥处理玉米成熟期产量指标

Fig. 3 Yield indicators in mature stage under different water and fertilizer conditions

测定了玉米生育后期施肥后的光合速率及其气体交换参数, 结果发现随着生育期的推迟两品种的光合速率和气孔导度降低, 而 C_i 升高。本研究表

明: 低水低肥在生殖前期使 C_i 显著降低, 而在生殖后期, 低水低肥和低水高肥均使 C_i 显著低于其他处理。这说明在玉米生殖期水分对 C_i 的影响要

大于化肥。

叶片的蒸腾作用在一定程度上反映了根系对无机元素和水分的吸收及上运效率，对维持叶片的光合生理具有重要作用^[14]。本研究结果表明：水分供给最低组(W1)的蒸腾速率(T_v)在抽雄期和成熟期都最低，这说明在W1供给的水分水平上玉米已经开始通过控制蒸腾作用来控制水分，即通过降低蒸腾速率来提高水分利用效率，而W2和W3处理中玉米则没有控制蒸腾速率，在此现象中，施肥梯度没有表现出显著差异，这说明施肥在该研究所设定的范围内对玉米没有显著影响。

水分利用效率(WUE)是指植物消耗单位水所产生的同化物的量，反映了植物的物质生产与水分之间的关系^[24]，它是反映玉米植株水分利用状况的综合指标^[15]。本研究表明：玉米的瞬时水分利用效率(WUE_i)在抽雄期和成熟期都表现为低水分处理组较高，而灌溉水分利用率(IWUE)的结果则表明灌溉水使用越多IWUE反而越低，这说明在满足玉米正常生理需水量的基础上，再投入更高的水虽然对于玉米生长无害，但是却降低了水分利用效率，这对于节水农业无益，在生产上可以适当降低灌溉水用量。前人研究也表明：适度的亏水灌溉可以提高作物水分利用效率。王甫等^[2]研究发现：高肥水平下中水和高水处理，冬草莓产量与对照相比并未降低，而IWUE却提高了7.6%~11.8%；白伟等^[25]研究发现：重度水分亏缺降低了大豆地上部分和根的质量，最终造成减产；中度亏缺对产量影响不显著，但水分利用效率却得到显著提高。

玉米叶片的光合产物是保证产量和品质的重要物质基础。前人的研究认为光合作用存在品种差异，且主要表现在生育后期，抽丝期以后光合产物的积累是籽粒产量形成主要来源^[26]。对于糯、甜玉米，从大口期尤其是授粉后18 d内开始，加强田间的水肥管理，可使授粉后的叶片具有较强的光合能力、较高的叶绿素含量，以保证在这一关键时期具有较多的光合产物，从而产出较高的鲜籽粒^[14]。本研究表明：玉米整苞重在W1组内和W2组内差异不显著，但是在W3组内最低值出现在T11中，而结合玉米籽重可以看出在各组间干重的差异都不显著，这说明光合产物分配到籽粒中的总量没有因为水肥处理的差异

而表现出显著差异。千粒重的最小值出现在W3处理组，而综合3个产量指标可以得出中水(W2)处理的产品质量(即籽粒含水量和千粒重)略高，而群体产量在12个水肥处理间差异不显著。本结果同时也说明了光合作用差异决定了籽粒最终产量的差异，但光合速率与籽粒鲜重并不同步，因为籽粒的灌浆还受物质运输、转化、地温^[27]及籽粒内源理化调控等其他因素的综合影响^[14]。

玉米是一种高光效高产的C4植物，其产量干物质的90%以上是由光合作用生产的^[28]，玉米群体的光合性能直接影响着品种的高产潜力能否得以发挥^[29]，应以玉米群体的光合生理及群体生长发育为研究玉米生产的切入点^[30]。本研究中与光合密切相关的营养体群体指标表明高水处理有助于玉米株高的生长，但叶数上各个水肥处理间均没有显著差异，叶干重方面高水处理不占优势，而低水处理组的叶干重反而较高，高水处理中增施叶面微肥有助于叶干重的积累。

4 结论

(1) 不同水肥处理在生殖生长期以前光合及生长量都没有显著差异，在进入生殖后期则出现显著差异，水分高的处理组在光合作用方面表现出显著的优势。

(2) 研究区高温、干旱、少雨，水分因素是主要的影响因子，玉米的灌溉水利用率随着灌溉量的减少而升高，水分处理对玉米生理效应显著，肥料的处理属于次要因素，对玉米生理有一定的影响。

[参考文献]

- [1] 黄红荣, 李建明, 张军, 等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄光合、产量和干物质分配的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 6. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2015.07.002](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2015.07.002).
- [2] 王甫, 崔宁博, 王龙, 等. 苗期水肥耦合对温室冬草莓光合特性、产量及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(1): 103. DOI: [10.7606/j.issn.1004-1389.2015.01.018](https://doi.org/10.7606/j.issn.1004-1389.2015.01.018).
- [3] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6819.2014.10.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.10.010).
- [4] 刘宇峰, 李伏生. 灌溉方式与施肥水平对超级稻光合生理的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(4): 416. DOI: [10.3724/SP.J.1011.2013.00416](https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2013.00416).
- [5] 郑睿, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 水氮处理对荒漠绿洲区酿酒

- 葡萄光合特性与产量的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 133. DOI: [10.3968/j.issn.1002-6819.2013.04.017](https://doi.org/10.3968/j.issn.1002-6819.2013.04.017).
- [6] 山仑, 张岁岐. 节水农业及其生物学基础[J]. 水土保持研究, 1999, 6(1): 2.
- [7] 贺冬梅, 张崇玉, 王丹妮, 等. 玉米拔节期水肥耦合效应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 164.
- [8] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦产量的水肥耦合模型[J]. 中国工程科学, 2002, 4(9): 69.
- [9] 温立玉, 宋希云, 刘树堂. 水肥耦合对夏玉米不同生育期叶面积指数和生物量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(21): 89.
- [10] 沈玉芳, 李世清, 邵明安. 水肥空间组合对冬小麦光合特性及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2256. DOI: [10.13287/j.1001-9331.2007.0368](https://doi.org/10.13287/j.1001-9331.2007.0368).
- [11] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(6): 317. DOI: [10.1146/annurev.pp.33.060182.001533](https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.001533).
- [12] 张国红, 眭晓蕾, 郭英华, 等. 施肥水平对日光温室番茄光合生理的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 317.
- [13] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 376.
- [14] 左振朋, 孙庆泉, 董鲁浩, 等. 爆、甜、糯玉米生育后期叶片光合特性的比较[J]. 作物学报, 2009, 35(10): 1930. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2009.01930](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2009.01930).
- [15] 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. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2013.01619](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2013.01619).
- [16] 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. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2012.01884](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2012.01884).
- [17] 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. DOI: [10.1023/A:1024347918199](https://doi.org/10.1023/A:1024347918199).
- [18] 戴明宏, 陶洪斌, 王利纳, 等. 不同氮肥管理对春玉米干物质生产、分配及转运的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(1): 154.
- [19] 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. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2009.01916](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2009.01916).
- [20] 左应梅, 陈秋波, 邓权权, 等. 土壤水分、光照和空气湿度对木薯气孔导度的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(4): 689. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2011.0097](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2011.0097).
- [21] 姜琳琳, 韩晓日, 杨劲风, 等. 施肥对不同密度型高产玉米品种光合生理特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(3): 265.
- [22] 王景燕, 龚伟, 包秀兰, 等. 水肥耦合对汉源花椒幼苗叶片光合作用的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1321. DOI: [10.5846/stxb201407051382](https://doi.org/10.5846/stxb201407051382).
- [23] CECHIN I. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence in two hybrids of sorghum under different nitrogen and water regimes[J]. Photosynthetica, 1998, 35(2): 233. DOI: [10.1023/A:1006910823378](https://doi.org/10.1023/A:1006910823378).
- [24] 吴炯, 施翠仙, 祖艳群, 等. 辣椒/玉米间作条件下土壤持水能力和作物水分利用特征研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(1): 153. DOI: [10.16211/j.issn.1004-390X\(n\).2016.01.024](https://doi.org/10.16211/j.issn.1004-390X(n).2016.01.024).
- [25] 白伟, 孙占祥, 刘晓晨, 等. 苗期调亏灌溉对大豆生长发育和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 50.
- [26] SIMMONS S R, JONES R J. Contributions of presilking assimilate to grain yield on maize[J]. Crop Science, 1985, 25(6): 1004. DOI: [10.2135/cropsci1985.0011183X_002500060025x](https://doi.org/10.2135/cropsci1985.0011183X_002500060025x).
- [27] 张吉旺, 董树亭, 王空军, 等. 大田增温对夏玉米光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 81. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2008.0027](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2008.0027).
- [28] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 密度与氮肥对关中灌区夏玉米(*Zea mays* L.)群体光合生理指标的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 661.
- [29] 王庆成, 刘开昌, 张秀清, 等. 玉米的群体光合作用[J]. 玉米科学, 2001, 9(4): 57. DOI: [10.13597/j.cnki.maize.science.2001.04.019](https://doi.org/10.13597/j.cnki.maize.science.2001.04.019).
- [30] 李潮海, 栾丽敏, 尹飞, 等. 弱光胁迫对不同基因型玉米生长发育和产量的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 824.