

高密度栽培条件下灌水量对河西灌区玉米群体质量及水分利用效率的影响

唐文雪¹, 马忠明², 连彩云¹

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 提高种植密度是玉米产量持续增长的重要措施, 探讨高密度栽培下的合理灌溉定额对保障玉米高产及水资源可持续利用具有重要意义。2023年4—10月在河西灌区张掖节水农业试验站开展田间试验, 研究高密度栽培条件下不同灌水量(270.0、390.0、510.0、630.0 mm)对玉米群体质量、产量和水分利用效率的影响。结果表明, 随着灌水量的增加, 玉米的干物质量、产量呈增加趋势, 高灌水量(630.0 mm)下的干物质量和产量均最高, 中等灌水量(510.0 mm)下干物质量、产量分别高达32 013.36、16 000.31 kg/hm², 仅比高灌水量处理分别低2.89%、3.13%, 而在390.0、270.0 mm灌水量下显著降低。各处理的光合势、生长速率随生育进程的推进先增加后降低, 其中吐丝期后20 d达到最大, 且随灌水量增加而增大; 吐丝期后20 d至灌浆中期, 510.0、390.0 mm灌水量下的光合势下降幅度为0.38%、2.40%, 生长速率下降幅度为26.16%、30.19%, 均低于高灌水量处理和低灌水量(270.0 mm)处理。玉米水分利用效率随灌水量、耗水量增加先上升后下降, 390.0、510.0 mm灌水量处理下水分利用效率分别为26.21、25.14 kg/(hm²·mm), 差异不显著; 而产量最高的高灌水量处理及耗水量最低的低灌水量处理仅为22.77、23.98 kg/(hm²·mm), 均低于390.0、510.0 mm灌水量处理。综合考虑玉米产量与水分利用效率等指标, 在种植密度为11.70万株/hm²条件下, 510.0 mm为玉米生育期适宜灌水量, 可实现增产节水目标。

关键词: 玉米; 高密度栽培; 灌水量; 产量; 水分利用效率; 群体质量

中图分类号: S663.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2024)04-0330-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2024.04.006

Effects of Irrigation Volume on the Quality of Maize Population and Water Use Efficiency Under High-density Cultivation in Hexi Irrigation Area

TANGWenxue¹, MA Zhongming², LIAN Caiyun¹

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China;

2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Increasing planting density is a crucial measure for the sustained growth of maize yield. Exploring reasonable irrigation quotas under high-density cultivation is significant for ensuring high maize yields and sustainable water resource utilization. From April to October 2023, field experiments were conducted at the Zhangye Water-saving Agriculture Experimental Station in the Hexi Irrigation District to study the effects of different irrigation capacities (270.0, 390.0, 510.0, 630.0 mm) on the quality of the maize population, yield, and water use efficiency under high-density cultivation conditions. Results showed that as irrigation volume increased, both dry matter and yield of maize tended to increase. The highest dry matter and yield were observed under high irrigation (630.0 mm), with medium irrigation (510.0 mm) achieving dry matter and yield of 32 013.36 and 16 000.31 kg/ha, respectively, only 2.89% and 3.13% lower than those of high irrigation, while data were significantly decreased under 390.0 and 270.0 mm irrigation. The photosynthetic potential and growth rate of each treatment increased and then decreased as the growth progressed, peaking 20 days after silking, and increased with irrigation volume; from 20 days post-silking to the middle of grain filling, the decline in photosynthetic potential was 0.38% and 2.40% under 510.0 and 390.0 mm irrigation, respectively, with growth rate declines of 26.16% and 30.19%, both lower than those under high and low irrigation (270.0 mm). Water use efficiency of maize first increased and then decreased with rising irrigation and water consumption, with 26.21 and 25.14 kg/(ha·mm) under 390.0 and 510.0 mm irrigation, respectively, no significant differences were detected, whereas the highest yield under high irrigation and the

收稿日期: 2024-01-25; 修订日期: 2024-03-12

基金项目: 甘肃省科技计划(21ZD4NF044-4); 国家重点研发计划项目(2023YFD2301105)。

作者简介: 唐文雪(1967—), 女, 甘肃临夏人, 研究员, 主要从事农业节水高产栽培理论与技术的研究工作。Email: gstwx@163.com。

通信作者: 马忠明(1963—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 主要从事农业节水高产栽培理论与技术研究工作。Email: mazhming@163.com。

lowest water consumption under low irrigation were only 22.77 and 23.98 kg/(ha·mm), respectively which were significantly lower than those under 390.0 and 510.0 mm irrigation. Considering both maize yield and water use efficiency, an irrigation volume of 510.0 mm during the growth period is suitable under a planting density of 117 000 plants/ha, achieving goals of increasing yield and saving water.

Key words: Maize; High-density cultivation; Irrigation volume; Yield; Water use efficiency; Population quality

玉米是我国主要粮食作物, 近年来玉米产量持续增长贡献最大的是种植密度的提高^[1]。为实现玉米高产稳产目标, 高密度栽培(大于 10 万株/hm²)已成为新疆玉米栽培的主推模式^[2-3]。新疆奇台农场玉米收获穗数达到 12.96 万穗/hm², 产量高达 2.49 万 kg/hm², 较全国纪录产量提高了 8 504 kg/hm²^[3]。唐诚等^[2]在新疆乌兰乌苏气象站的研究结果表明, 在种植密度为 11.20 万株/hm²的条件下, 灌水量为 6 750 m³/hm²时可以保证玉米高产。玉米产量一般与灌水量呈抛物线变化关系^[4-5]。一定种植密度下, 随灌水量的增加, 穗粒数、千粒重亦呈增加趋势^[6]。玉米生育期长, 高密度栽培下耗水量显著增大^[7]。虽然在高密度下玉米可以获得优良的群体结构和最大程度利用太阳辐射^[8], 但高密度种植增加了个体之间对于水分、肥料和光照的竞争, 导致单个植株的产量下降^[9]。在密度种植条件下, 适当增加土壤含水率能有效降低由于高密度种植带来的不利影响, 使玉米稳定增产^[10-11]。因此, 高密度栽培下优化灌溉定额对保障玉米高产及水资源可持续利用具有重要意义。

河西走廊位于我国西北干旱区东部地带, 是我国玉米高产区之一。该区光热资源丰富, 但水资源严重短缺, 水分是影响作物生产的关键限制因子^[12]。李菊等^[13]的研究认为, 在甘肃省武威市凉州区种植密度 6.7 万株/hm²条件下, 生育期适宜灌水量为 3 871 m³/hm²。前人在不同区域中低密度条件下, 灌水量对玉米产量、干物质积累量、单位面积穗数等的影响进行了大量研究, 且受气候、土壤等多种因素的影响, 玉米不同种植地区的灌水量差异较大。中国农业科学院在甘肃省武威市凉州区、张掖市肃州区进行了种植密度研究, 提出玉米最高产对应种植密度为 10.78 万株/hm²^[3]。河西灌区高密度条件下灌水量与玉米产量、生长发育效应尚鲜见报道。本研究旨在探讨该区域不同灌溉定额对高密度玉米群体质量、产量、水分利用效率的影响, 以期为河西灌区玉米高密度栽培

合理灌水量制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023 年 4 月至 10 月在甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站(N 38° 56', E 100° 26')进行。试验站地处甘肃省河西走廊中段, 黑河中上游, 海拔 1 570 m, 属于典型的大陆性草原荒漠气候, 干旱少雨, 年降水量不足 130 mm, 年平均蒸发量 2 075 mm, 干旱指数为 15.96。年均气温 7.38 ℃, ≥10 ℃的积温 2 140~2 870 ℃, 日照时数 2 932~3 085 h, 无霜期 153 d。试验地土壤属轻壤土, 播前 0~20 cm 土层含有有机质 7.9 g/kg、全氮 0.77、全磷 0.14、全钾 13.97g/kg、全盐 1.74g/kg, pH 8.22。

1.2 试验材料

指示玉米品种为先玉 335, 为河西灌区主栽品种。

1.3 试验设计

试验设共 4 个灌水量, 分别为 270.0 mm(W₁)、390.0 mm(W₂)、510.0 mm(W₃)、630.0 mm(W₄)。随机区组排列, 重复 3 次, 小区面积 35 m²(5 m × 7 m)。玉米种植密度均为 11.70 万株/hm², 施肥量为尿素(N 46.4%)300 kg/hm²、磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%)150 kg/hm²。播前结合旋地施入磷酸二铵及 40%尿素作为基肥, 随灌水分别于大喇叭口期及吐丝期各追施尿素 30%。采用小型水肥一体机, 将肥料完全溶解于施肥罐中, 在滴水 30 min 后及滴水结束前 30 min 内完成施肥。玉米全生育期灌溉 8 次, 拔节期灌溉头水, 分别在拔节期、抽雄吐丝期、灌浆期、蜡熟期各滴 2 次, 收获前 20 d 停水。不同生育期灌水量设计见表 1。玉米采用膜

表 1 试验灌水量设计 mm

处理	总灌水量	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	蜡熟期
W ₁	270.0	27.0	67.5	40.5	108.0	27.0
W ₂	390.0	39.0	97.5	58.5	156.0	39.0
W ₃	510.0	51.0	127.5	76.5	204.0	51.0
W ₄	630.0	63.0	157.5	94.5	252.0	63.0

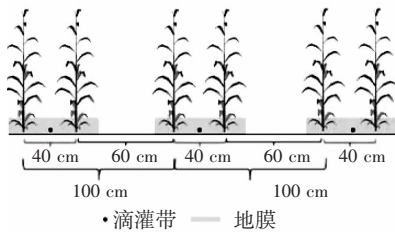


图 1 膜下滴灌宽窄行平作栽培模式

下滴灌栽培，宽窄行种植，宽行 60 cm，窄行 40 cm。窄行覆膜（膜宽 70 cm）铺滴灌带播种，行距 40 cm，株距 17 cm。播深 4 cm（图 1）。4 月 28 日播种，9 月 23 日收获。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤含水量测定 玉米播种前及成熟期，用土钻采集 0~100 cm 土层土壤样品，测定层次为每 20 cm 为 1 层，共 5 层。每小区在滴灌带下、种植行株间、宽行中间取样，相同土层 3 个点土样混合后用烘干法测定土壤水分。

1.4.2 地上部干物质质量及植株叶面积测定 分别于玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、吐丝期后 20 d、灌浆中期、收获期，每小区选取具有代表性的植株 6 株，采用 LI-3100C 型叶面积仪（英国生产）测定叶面积。之后将植株样品放入烘箱，105 °C 高温下杀青 30 min，再将温度调至 80 °C 烘干至恒重，测定干物重。

1.4.3 考种及测产 玉米成熟期调查每小区实际穗数，去除边行，收获中间 3 带 6 行测产。根据重量均值法取有代表性的样穗 10 穗进行室内考种，测量穗长、穗粗、秃尖长、穗粒数、千粒重等指标。

1.5 计算方法

1.5.1 作物耗水量和水分利用效率 作物耗水量采用农田土壤水量平衡方程式进行耗水量计算，作物生长所需水分主要由灌溉水和降水供应，因此，水量平衡方程可简化为作物耗水量，期计算公式如下：

$$ET = P + I - \Delta W$$

式中， ET 为作物耗水量； P 为降水量； I 为灌水量； ΔW 为试验初期和试验末期土壤水分的变化量。

$$\text{水分利用效率} = \text{作物产量} / \text{作物耗水量}$$

1.5.2 叶面积、光合势和作物生长速率 玉米叶面积采用型号 LI-3100C 的叶面积仪（英国生产）测定。

叶面积指数 = (单株叶面积 × 种植密度) / 单位面积

$$\text{光合势} = (L_1 \times 10\,000 + L_2 \times 10\,000) \times (t_2 - t_1) / 2$$

$$\text{作物生长速率} = (W_2 - W_1) / [A \times (t_2 - t_1)]$$

式中， L_1 、 L_2 分别为 t_1 、 t_2 时的群体叶面积指数， W_2 、 W_1 分别为 t_1 、 t_2 时的干物质质量， A 为土地面积 [14]。

2 结果与分析

2.1 灌水量对玉米地上部干物质质量累积的影响

干物质质量累积是作物产量形成的物质基础。从图 2 可以看出，玉米地上部干物质质量累积量随生育期推进不断增加，不同灌水量处理间的差异在拔节期后开始显现，除吐丝期后 20 d 外，总体表现为 $W_4 > W_3 > W_2 > W_1$ 。玉米苗期、拔节期生育前期需水量少，不同灌水量处理均能满足玉米对水分需求，灌水量对干物质累积量影响不明显。拔节

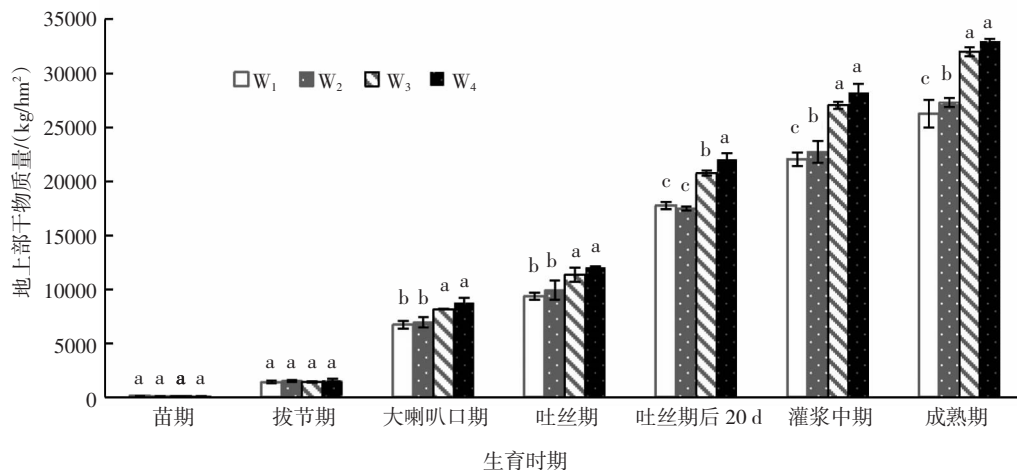


图 2 不同灌水量下玉米的地上部干物质质量

表 2 不同灌水量下玉米不同生育期的叶面积

处理	苗期	拔节期	大喇叭口期	吐丝期	吐丝期后20 d	灌浆中期
W ₁	495.04±2.96 a	1 344.55±17.27 a	4 816.99±114.39 bc	6 895.47±171.69 b	7 590.93±180.65 d	5 877.01±284.81 b
W ₂	497.78±3.75 a	1 442.77±93.93 a	4 988.29±24.74 bc	7 192.10±205.66 b	8 036.98±429.93 c	6 837.05±318.51 ab
W ₃	480.81±5.24 a	1 313.19±35.20 a	5 082.06±123.34 ab	7 114.53±399.21 b	9 401.77±314.19 a	7 234.16±114.87 a
W ₄	490.50±12.67 a	1 418.48±69.26 a	5 266.30±166.77 a	8 424.03±624.12 a	8 939.98±569.38 b	7 216.90±435.04 a

期后玉米需水量增加, 干物质累积量随灌水量的增加显著增大, 大喇叭口期、吐丝期W₄处理干物质质量与W₃差异不显著, 但均显著高于W₂、W₁。玉米吐丝期后20 d, W₄处理累积量最大, 达22 063.52 kg/hm², 比W₃、W₂、W₁分别显著提高6.38%、26.33%、24.27%。进入灌浆中期至成熟期, 由于高灌水量W₄处理的植株相互遮阴形成郁闭, 导致植株下部叶片变黄枯萎, 影响光合作用, 干物质积累变缓, W₃处理干物质积累量32 013.36 kg/hm², 较W₄降低2.89%, 但仍显著高于W₂、W₁处理。

2.2 灌水量对玉米叶面积增长的影响

由表2可知, 苗期玉米叶面积最小, 至拔节期增加迅速, 各处理的增幅171.60%~189.84%, 但差异不显著。拔节期至大喇叭口期、大喇叭口期至吐丝期是玉米叶面积快速增长阶段, 大喇叭口期各处理叶面积比拔节期增加245.74%~287.00%, 吐丝期比大喇叭口期增加39.99%~59.96%。并且在吐丝期W₄处理过量灌溉导致玉米营养生长旺盛, 叶面积显著高于W₃、W₂、W₁处理。吐丝期后20 d各处理的叶面积达到最大, 各处理比吐丝期增加6.12%~32.15%, 且处理间差异显著。由于W₄处理下底部叶片遮阴早衰, 叶面积增幅显著低于W₃处理。吐丝期后20 d到灌浆中期, 各处理

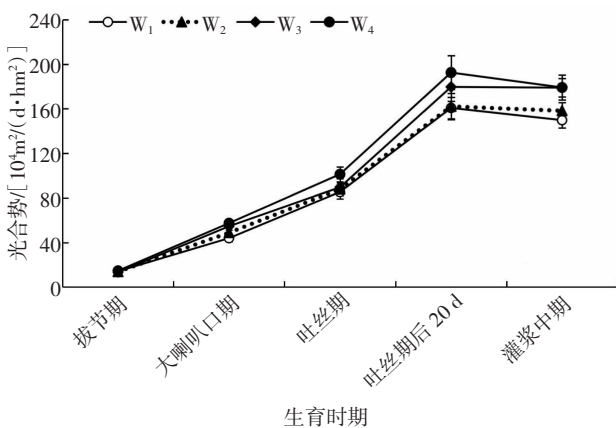


图 3 不同灌水量下玉米的光合势

叶面积开始下降。以上结果说明, 水分供应充足促使叶面积偏大, 生育中后期田间郁闭严重, 而水分供应不足时叶面积增加慢且后期衰退加快。可见, 适宜的水分供应既可提高叶面积, 还可延缓叶面积下降速率, 为后期的物质积累和籽粒灌浆保证了足够的光合叶面积。

2.3 灌水量对玉米光合势变化的影响

不同灌水处理下光合势从苗期至吐丝期后20 d呈直线增加趋势(图3), 该时段的光合势表现为W₄>W₃>W₂>W₁。吐丝期后20 d至灌浆中期呈降低趋势, W₄、W₁处理的降幅分别为6.82%、6.95%; W₂处理降幅2.40%; 而W₃处理保持稳定, 降幅仅为0.38%。说明适宜灌水量可提高吐丝期后20 d以前的光合势, 延缓吐丝期后20 d的降低态势, 增强了作物光合作用, 进而为玉米高产打下了基础。

2.4 灌水量对玉米生长速率的影响

由图4可知, 各处理的玉米生长速率表现为出苗至吐丝期后20 d逐渐升高, 在吐丝期后20 d达到最大, 而后呈下降的趋势。其中苗期至拔节期、大喇叭口期至吐丝期上升速度快, 拔节期至大喇叭口期上升速度较慢, 但均表现为W₄>W₃>W₂>W₁, 说明灌水量可以提高作物生长速率。吐

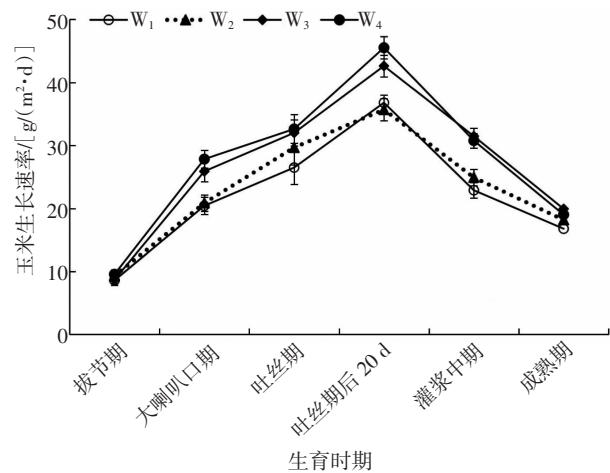


图 4 不同灌水量下玉米的生长速率

丝期后 20 d 至灌浆中期, 不同灌水量下玉米生长速率均下降, 且以灌水量最大的 W₄ 处理和灌水量最小的 W₁ 处理下降幅较大, 分别为 32.41%、37.80%。W₃、W₂ 处理下降幅度分别为 26.16%、30.19%。灌浆中期至成熟期下降规律与前一时期相似。以上结果说明适宜灌水量可延缓玉米生长速率的下降。

2.5 灌水量对玉米产量和产量构成因子的影响

玉米产量由单位面积收获株数、穗粒数、粒重等因子共同决定, 玉米高产要求产量构成因子在较高水平上达到协调统一。从表 3 可以看出, 灌水能显著提高玉米产量, W₄ 处理玉米产量最高, 为 16 517.31 kg/hm²; W₃ 处理次之, 为 16 000.31 kg/hm², 比 W₄ 处理低 3.13%, W₃ 与 W₄ 处理差异不显著; 分别比 W₁ 处理显著提高 57.01%、52.09%。从产量构成因子对产量贡献分析, 灌水量对玉米穗粒数、百粒重这两个重要因子有显著影响。W₄ 处理穗粒数最多, 为 562.43 粒, 与 W₃、W₂ 处理差异不显著, 但比 W₁ 处理显著提高 11.82%; W₃ 处理百粒重最高为 34.02 g, 与 W₄ 处理差异不显著, 但比 W₂、W₁ 处理显著提高了 12.28%、14.58%。灌水量对玉米收获株数影响不明显, 不同处理的收获株数为 11.37 万~11.39 万株/hm², 处理间差异不显著。可见, 灌水量能显著影响玉米产量, 主要原因是灌水量显著影响了玉米穗粒数和百粒重。

2.6 灌水量对玉米耗水量和水分利用效率的影响

2.6.1 不同处理下土壤水分的垂直变化 从播前和玉米收获后不同处理 0~100 cm 土层水分的变化见图 5, 从垂直层面看, 各处理 0~20 cm 土层

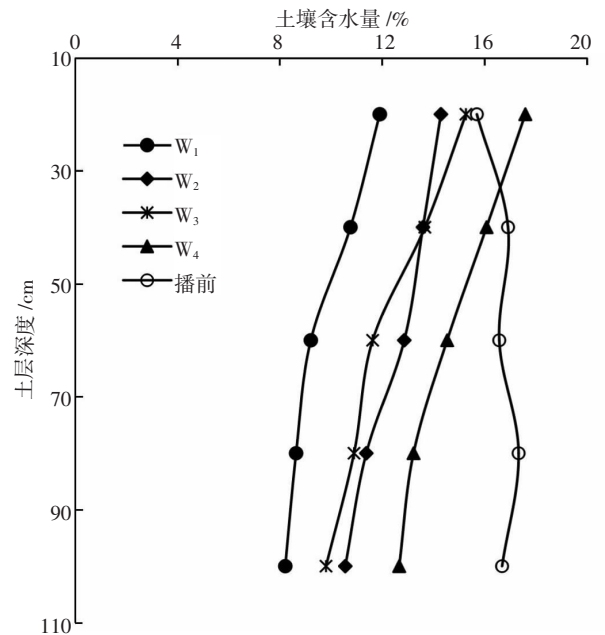


图 5 不同灌水量下 0~100 cm 土层土壤含水量

含水量最大, 随土层加深, 各处理含水量呈降低趋势, 80~100 cm 土层含水量最低。从水平层面看, 20 cm 以下各土层的含水量均低于播前。0~20 cm 土层含水量表现为 W₄>W₃>W₂>W₁, 40 cm 以下土层表现为 W₄>W₃>W₂>W₁, 这与 W₃ 处理玉米生长旺盛、干物质积累多、耗水量大有关。

2.6.2 对玉米耗水量及水分利用效率的影响 由表 4 可知, 灌水量对玉米耗水量及水分利用效率有显著影响。灌水量增加一方面会造成收获后土壤储水量增加, 使休闲季土壤水分的无效蒸发增大, 另一方面使生育期耗水量增加。不同处理下的生育期总耗水量差异显著, 其中 W₄ 耗水量最高, 为 725.48 mm, 比 W₃、W₂、W₁ 显著提高 13.99%、

表 3 不同灌水量下玉米产量及产量构成因子

处理	收获株数 (/株/hm ²)	株高 /cm	穗位高 /cm	穗长 /cm	穗粗 /mm	穗粒数 (/粒/穗)	秃顶 /cm	百粒重 /g	产量 (/kg/hm ²)
W ₁	11.38±0.09 a	268.66±20.37 c	104.18±11.97 b	16.10±0.35 b	44.17±1.05 c	502.96±40.49 b	0.91±0.22 a	29.69±2.12 b	10 519.99±201.36 c
W ₂	11.39±0.01 a	291.83±20.73 b	116.54±10.68 ab	16.32±0.84 b	44.89±1.16 bc	526.31±51.28 ab	0.92±0.10 a	30.30±0.81 b	14 174.74±674.74 b
W ₃	11.37±0.09 a	308.42±16.86 ab	119.60±10.54 ab	16.89±0.25 ab	46.61±0.18 ab	506.91±6.39 ab	1.11±0.1 a	34.02±0.78 a	16 000.31±903.07 a
W ₄	11.39±0.07 a	321.12±13.80 a	125.99±4.88 a	17.80±0.05 a	47.29±0.61 a	562.43±4.73 a	1.09±0.09 a	32.73±0.94 ab	16 517.31±418.29 a

表 4 灌水量对玉米耗水量及水分利用效率的影响

处理	灌水量 /mm	降水量 /mm	播前土壤储水量 /mm	收获后土壤储水量 /mm	耗水量 /mm	产量 (/kg/hm ²)	水分利用效率 /[kg/(hm ² ·mm)]
W ₁	270.0	68.8	240.41	140.57±26.39 c	438.64±26.39 d	10 519.99±201.36 c	23.98±1.81 bc
W ₂	390.0	68.8	240.41	158.47±6.94 bc	540.74±6.94 c	14 174.74±674.74 b	26.21±1.14 a
W ₃	510.0	68.8	240.41	182.76±23.58 ab	636.45±23.58 b	16 000.31±903.07 a	25.14±1.07 ab
W ₄	630.0	68.8	240.41	213.73±7.16 a	725.48±7.16 a	16 517.31±418.29 a	22.77±0.41 c

34.16%、65.39%; W_1 处理最低, 为 438.64 mm, 显著低于其他处理。水分利用效率是一个复合指标, 其高低由玉米产量及耗水量决定。 W_2 处理水分利用效率最高, 为 26.21 kg/(hm²·mm), 与 W_3 处理差异不显著, 但比高灌水量(W_4)、低灌水量(W_1) 处理分别显著提高 15.11%、9.30%。说明高灌水量及低灌水量均显著降低玉米水分利用效率。

3 讨论与结论

合理的群体结构是实现高产的前提, 群体结构特性通过光合有效辐射的截获、吸收和透射影响作物群体光分布与光合特性, 最终影响作物光合作用、干物质积累和产量^[15-17]。光合势是量化作物群体光合速率的重要指标, 同时也是反映作物长势与预测作物产量的重要农学参数^[18]。作物生育进程中, 后期保持较大的有效叶面积是保证作物高产的基础^[14, 19]。本研究发现, 随生育进程推进, 光合势呈先增加后降低趋势。光合势在吐丝期后 20 d 达到最大, 随灌水量增加光合势增加, 表现为灌水量 630.0 mm > 灌水量 510.0 mm > 灌水量 390.0 mm > 灌水量 270.0 mm; 吐丝期后 20 d 至灌浆中期, 灌水量 630.0 mm、灌水量 270.0 mm 处理光合势降幅为 6.82%、6.95%, 而灌水量 570.0 mm、灌水量 390.0 mm 处理降幅仅为 0.38%、2.40%, 并且灌水量 510.0 mm 处理光合势与灌水量 630.0 mm 处理相近。以上结果表明, 灌水量过高或过低均会加快光合势降低速率, 适宜灌水量延缓吐丝期后光合势降低, 提高作物光合作用, 进而提高玉米产量。

干物质积累量与玉米产量呈正相关, 灌水量影响玉米的生长发育过程, 进而影响其干物质的累积及产量形成^[20-22]。单位面积穗数、穗粒数、千粒重为影响玉米产量的关键要素, 在一定灌水定额范围内, 灌水量增加, 穗粒数和千粒重也随之增加^[23]。在单位面积穗数不变的情况下, 穗粒数和千粒重对玉米产量的贡献最大, 可达 99% 以上^[2]。本研究中, 拔节期后玉米干物质质量随灌水量增加呈增加趋势, 收获期干物质累积量由大到小为灌水量 630.0 mm、灌水量 510.0 mm、灌水量 390.0 mm、灌水量 270.0 mm, 与产量表现一致。灌水量对玉米穗粒数和百粒重有显著影响, 玉米穗粒数和百粒重是影响玉米产量的重要因子。灌

水量为 270.0 ~ 510.0 mm 时, 玉米产量与灌水量呈显著正相关关系, 但 630.0 mm 灌水量水平与 510.0 mm 相比灌水量增加 20%, 而产量仅增加 3.23%, 未有显著提升, 说明单纯追求高产会造成水资源浪费。灌水量为 510.0 mm 时, 产量可以保证 $\geq 16\ 000$ kg/hm², 继续提高灌水量对产量提升无显著影响, 而灌水量降低 1/5 则显著降低产量。

提高作物水分利用效率是干旱灌区实现节水增产的关键^[24-25]。作物水分利用效率高值往往是中等供水条件下实现的^[26-27], 适度缺水在不减产或略有增产的前提下, 耗水量大幅减少, 水分利用效率明显提高^[28-29]。本研究发现, 灌水量 390.0 mm 下水分利用效率最大, 但与灌水量 510.0 mm 差异不显著。灌水量 630.0 mm 处理产量最高, 但耗水量也最大, 导致水分利用效率最低, 比灌水量 510.0 mm、灌水量 390.0 mm 显著降低 9.30%、12.90%。灌水从 630.0 mm 减少到 510.0 mm 时, 水分利用效率达 25.16 kg/(hm²·mm), 产量达 16 000.31 kg/hm², 与最高值差异均不显著。本试验中, 水分利用效率最大的处理与产量最高的处理并不一致, 产量最高时的耗水量高于水分利用效率最大时的耗水量, 这与其他学者的研究结果相同^[4, 30-31]。综合考虑产量与水分利用效率, 在本试验条件下, 玉米灌水量为 510.0 mm, 比最高产灌水量减少 20% 时可实现玉米高产与节水同步。

通过灌水量对高密度栽培条件下玉米干物质质量积累、叶面积与光合势变化、产量及水分利用效率影响的研究, 综合考虑玉米产量与水分利用效率等指标, 认为在河西绿洲灌区玉米种植密度为 11.70 万株/hm² 条件下, 生育期灌水量为 510 mm, 既可高产还可实现水资源高效利用, 可作为河西走廊灌区玉米高密度栽培适宜灌水量。

参考文献:

- [1] TOLLENAAR M, W DEEN, L ECHARTE, et al. Effect of crowding stress on dry matter accumulation and harvest index in maize[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 930-937.
- [2] 唐 诚, 高 慧, 褚贵新. 高密度栽培下滴灌量对春玉米干物质积累、穗部性状、产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(11): 26-30.
- [3] 李少坤, 王克如, 谢瑞芝, 等. 玉米密植高产精准调控技术(西北灌溉玉米区)[M]. 第一版. 北京: 中国

- 农业科学技术出版社, 2021.
- [4] 刘战东, 肖俊夫, 刘祖贵, 等. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 60-64.
- [5] 孙景生, 肖俊夫, 张寄阳. 夏玉米产量与水分关系及其高効用水灌溉制度[J]. 灌溉排水学报, 1998, 17(3): 17-21.
- [6] 张国强, 王克如, 肖春华, 等. 滴灌量对新疆高产春玉米产量和水分利用效率的影响研究[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 117-123.
- [7] JIANG X L, KANG S Z, TONG L, et al. Crop coefficient and evapotranspiration of grain maize modified by planting density in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014(142): 135-143.
- [8] SANGOI L, GRACIETTI M A, RAMPAZZO C, et al. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant Density[J]. Field Crops Research, 2002, 79(1): 39-51.
- [9] 徐宗贵, 孙磊, 王浩, 等. 种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2463-2475.
- [10] 陈志君, 张琳琳, 姜浩, 等. 东北雨养区黑色地膜和种植密度对玉米田间地温和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2169-2176.
- [11] 任新茂, 孙东宝, 王庆锁. 覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 206-211.
- [12] 张立勤, 崔云玲, 崔增团, 等. 灌水对水肥一体化制种玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(2): 124-129.
- [13] 李菊, 张富仓, 王艳丽, 等. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 8-20.
- [14] 王云奇, 李金鹏, 王志敏, 等. 一穴多株种植对夏玉米群体质量和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 173-182.
- [15] CASAL J J. Canopy light signals and crop yield in sickness and in health[J]. ISRN Agronomy, 2013, 2013: 650439
- [16] 温日宇, 陈永欣, 张魏斌, 等. 种植密度对晋糯 20 号玉米产量和商品性的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(3): 234-238.
- [17] 宣丽霞. 种植密度对绿洲灌区不同品种青贮玉米生长和产量的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(1): 63-68.
- [18] 张晓艳, 杜吉到, 郑殿峰, 等. 密度对大豆群体叶面积指数及干物质积累分配的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(1): 96-100.
- [19] 李向岭, 李从锋, 侯玉虹, 等. 不同播期夏玉米产量性能动态指标及其生态效应[J]. 中国农业科学, 2012, 45: 1074-1083.
- [20] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 等. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 315-323.
- [21] ZHANG J X, CHENG Z Y, ZHANG R. Regulated deficit drip irrigation influences on seed maize growth and yield under film[J]. Procedia engineering, 2012, 28: 464-468.
- [22] 李媛媛, 杨恒山, 张瑞富, 等. 浅埋滴灌条件下不同灌水量对春玉米干物质积累与转运的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(8): 1234-1242.
- [23] 张国强, 王克如, 肖春华, 等. 滴灌量对新疆高产春玉米产量和水分利用效率的影响研究[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 117-123.
- [24] 胡化广, 张振铭, 吴生才, 等. 植物水分利用效率及其机理研究进展[J]. 节水灌溉, 2013(3): 11-15.
- [25] 张岁岐, 山仑. 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): 1-5.
- [26] 孟兆将, 贾大林, 刘安能. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 7(4): 66-69.
- [27] 张立勤, 杨思存, 崔云玲, 等. 不同水氮条件下垄膜沟灌玉米的产量及水分利用效应[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(11): 34-40.
- [28] 张永玲, 肖让, 成自勇. 膜上灌对河西绿洲灌区玉米水分利用效率和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2010(5): 13-15.
- [29] 连彩云, 马忠明. 滴水量和滴水频率对膜下滴灌制种玉米产量及种子活力的影响[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(11): 28-33.
- [30] 李文惠, 尹光华, 谷健, 等. 膜下滴灌水氮耦合对春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 生态学, 2015, 34(12): 3397-3401.
- [31] IRMAKS, DJAMAN K, RUDNICK D R. Effect of full land limited irrigation amount and frequency on subsurface drip irrigated maize evapotranspiration, yield water use efficiency and yield response factors[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 271-286.