

李建查, 潘志贤, 李义林, 等. 不同株距与灌水量对甜玉米生长及水分利用效率的影响 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (12): 1406–1413.

LI J C, PAN Z X, LI Y L, et al. Effect of Plant-spacing and Water-supply on Growth and Water Use of Sweet Corn Plants [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (12): 1406–1413.

不同株距与灌水量对甜玉米生长及水分利用效率的影响

李建查, 潘志贤, 李义林, 李 坤, 岳学文, 方海东*

(云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南 元谋 651300)

摘 要:【目的】研究不同株距与灌水量对甜玉米生物量、产量、水分利用效率的影响, 探究甜玉米获得高产高效的最佳种植株距与灌水量。【方法】试验设置 3 个种植株距 (20、30、40 cm) 和 3 个灌水量 (215 、 265 、 $365 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理, 对不同株距和灌水量处理的甜玉米个体生物量及其分配、群体经济产量和灌溉水利用效率进行分析。

【结果】株距对甜玉米个体生物量有显著影响, 灌水量对甜玉米个体生物量分配比例有显著影响, 株距与灌水量对甜玉米生物量分配比例有显著交互作用。(1) 随着株距增大, 甜玉米个体生物量明显增加, 株距为 40 cm 时个体生物量最大; 随着灌水量的增加, 个体茎生物量和茎比例显著增加; $365 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} + 40 \text{ cm}$ 组合处理的个体生物量最高, 且主成分综合得分最高。(2) 随着株距、灌水量增加, 叶、茎与地上生物量的异速生长指数先减小后增大, 果穗与地上生物量的异速生长指数先增大后减小, 果穗–地上生物量的异速生长指数最大的株距为 30 cm、灌水量为 $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、组合为 $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} + 30 \text{ cm}$ 。(3) 甜玉米群体经济产量和灌溉水利用效率均随着株距增大呈现降低趋势, 随着灌水量的增加变化均不显著, 以 $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} + 20 \text{ cm}$ 组合处理的群体经济产量和灌溉水利用效率最高。

【结论】 $365 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} + 40 \text{ cm}$ 组合处理的甜玉米个体生物量最大, $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} + 30 \text{ cm}$ 组合处理的甜玉米果穗的生物量分配比例最大, $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} + 20 \text{ cm}$ 组合处理的甜玉米群体经济产量和灌溉水利用效率最高。

关键词: 株距; 灌水量; 个体生物量; 异速生长; 群体经济产量; 灌溉水利用效率

中图分类号: Q 945.79

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 12-1406-08

Effect of Plant-spacing and Water-supply on Growth and Water Use of Sweet Corn Plants

LI Jiancha, PAN Zhixian, LI Yilin, LI Kun, YUE Xuewen, FANG Haidong*

(Institute of Tropical Eco-agricultural Sciences, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou, Yunnan 651300, China)

Abstract: 【Objective】Effects of plant-spacing and water-supply on the biomass, yield, and water use efficiency of sweet corn plants were studied for better irrigation management. 【Method】A field experiment including varied plant-spacing (i.e., 20, 30, and 40 cm) and amount of water supplied for the irrigation (i.e., 215, 265, and $365 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) for sweet corn cultivation was conducted to determine their effects on the biomass, yield, and water use efficiency of the plants. 【Result】The spacing between individual plants significantly affected the biomass accumulation of each plant; the water-supply for the irrigation significantly altered the biomass allocation on a plant; and the interactions between the plant-spacing and irrigation significantly modified the allocation as well as the distribution of biomass on a plant. (1) As the spacing increased, the biomass increased significantly to reach a maximum at 40 cm separation between two plants. When that was combined with water-supply, both quantity and proportion of stem biomass on a plant significantly increased; and the weight of fresh ears became the largest and the principal component comprehensive score greatest on a plant at the irrigation that provided $365 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ of water. (2) The allometric constants of leaf and stem/aboveground biomass rose as the spacing and water-supply decreased and followed by an increase, while that of ear/aboveground biomass being the opposite. Those of ear/aboveground biomass peaked at the combined 30 cm for the spacing and $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ for the water-supply. Meanwhile, the constants of leaf and stem/aboveground biomass lowered but that of ear/aboveground biomass maxed. (3) Increasing spacing significantly decreased

收稿日期: 2021-06-23 初稿; 2021-08-27 修改稿

作者简介: 李建查 (1988–), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事农田生态学研究 (E-mail: 921271713@qq.com)

* 通信作者: 方海东 (1979–), 男, 硕士, 研究员, 主要从事农田生态学研究 (E-mail: rqsfdh@163.com)

基金项目: 云南省科技计划重点研发项目 (2019BC001)

the sweet corn population yield. However, the irrigation did not exert significant effect on either yield or water use efficiency as they were the highest at the $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \times 20 \text{ cm}$ combination. 【Conclusion】 The biomass of a sweet corn plant peaked with the combined treatments of $365 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ on water-supply and 40 cm on plant-spacing. But the greatest population yield and water use efficiency were observed under the combination of $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \times 20 \text{ cm}$. The information would lead to an improved irrigation operation for a high yield and high efficiency sweet corn production in arid hot valley and similar areas.

Key words: Plant spacing; irrigation; individual biomass; allometric growth; population yield; water use efficiency

0 引言

【研究意义】甜玉米是我国南方重要的优势高效作物之一^[1]。干热河谷光热资源丰富，水热矛盾突出，甜玉米生产成为干热河谷冬季高产高效农业的重要支柱产业之一。然而，不合理的种植密度与灌水量配置严重影响当地甜玉米产量和水分利用效率的提升。因此，急需研究科学合理的种植密度与灌水量，为干热河谷地区的甜玉米产业发展提供参考。【前人研究进展】种植密度是作物产量提升的主要限制因子之一，合理的株行距是协调个体与群体关系，实现农业密植增产的重要途径之一。有研究表明，现代作物品种产量优势均是在高密度条件下实现的^[2-5]。国内外的相关研究结果表明，作物高产种植密度存在明显的区域差别，在不同国家或地区栽培玉米，其高产种植密度差异很大，如美国玉米高产种植密度为 $10.9 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，而我国玉米高产栽培的最大种植密度为 $7.0 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[6]。水是作物产量提升的另一个限制因子，调控有限灌水量以提高光合产物的产量转化效率和水分利用效率是实现高产高效农业的重要途径之一。Rasool 等^[7]研究认为，充足的水分供应能提高作物生物产量和经济产量，但降低了农业用水效率。一些研究^[8-11]认为，调控有限灌水量在作物生育期内的最优分配，可强化作物的同化能力，提高收获器官生物量及其分配比例，提高光合产物向经济产量的转化效率和水分利用效率，实现高产高效生产。生物量及其分配是作物高产的物质基础。最优分配理论^[12]认为，植物倾向于将自身光合产物优先分配到限制性资源获得能力较强的器官中，有利于植物尽可能多地获得限制性资源。例如，当土壤中的营养和水分不足时，植物将更多同化产物分配到地下器官以促进其对土壤水分和养分的吸收^[13]。异速生长分配理论^[14]认为，生物量的分配受到植物个体大小的制约。例如，植物繁殖器官的生物量受植株个体大小的制约^[15]。【本研究切入点】干热河谷甜玉米生物量分配及灌溉水利用效率对株距和灌水量双因子响应特征的研究少

见报道。【拟解决的关键问题】基于植物最优分配理论和异速生长分配理论，对干热河谷甜玉米进行不同灌水量和株距的生物效应研究，阐明种植株距、灌水量与生物量之间的关系，揭示甜玉米生物量分配的制约因素，探究区域甜玉米生产最佳种植株距和灌水量，为当地以及相似地区甜玉米高产高效节水种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

干热河谷是指高温、低湿河谷地带，大多分布于热带或亚热带地区。区域内光热资源丰富，气候炎热少雨，水土流失严重，生态十分脆弱。本试验在位于元谋县干热河谷的云南省农业科学院热区生态农业研究所灌溉试验基地进行。元谋县干热河谷地处滇中高原北部，位于 $25^{\circ}23' \sim 26^{\circ}06' \text{ N}$ 、 $101^{\circ}35' \sim 102^{\circ}06' \text{ E}$ ，平均海拔 $1\,350 \text{ m}$ 。年平均气温 21.9° C 、降雨量 611.3 mm ，蒸发量是降雨量的 $5 \sim 6$ 倍，年无霜期 $305 \sim 331 \text{ d}$ 。光热资源充足，年平均日照时数 $7.3 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 。试验区土壤为砂壤土，土壤容重 $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，田间持水量 19.42% ，pH 值 6.4 ，含有机质 $6.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.188 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $30.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $7.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $129 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

供试甜玉米品种为正甜 68，于 2020 年 1 月 6 日移栽，4 月 27 日收获。大垄双行种植，垄宽 100 cm ，行距 60 cm 。试验设 3 个株距处理：20、30、40 cm，其中以当地甜玉米种植株距 30 cm 为参考，设置了高密度的 20 cm 株距和低密度的 40 cm 株距；同时，以当地灌水量 $365 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 为高水量（当地农业生产为大水大肥模式），设置了中水量的 $265 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和低水量的 $215 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ，共 3 个灌水量处理。采用完全随机区组设计，共设 9 个组合处理、3 次重复，小区面积 60 m^2 （ $12 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ），每个小区安装一个水表。生育期甜玉米纯氮施用量为 $232 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，以纯氮 55%、 P_2O_5 $128 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 K_2O $128 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为底肥

(用 15-15-15 复合肥), 在抽穗期再随水滴施纯氮(尿素, 含 N 46%) 作追肥。化肥管理、农药管理等其他田间管理措施均一致。

1.3 样品采集与分析

在甜玉米采收期, 每个小区随机取 5 株代表性植株, 按照茎、叶、果穗分类测定鲜重(精确到 0.01 g), 分别装入纸袋, 放入 105 ℃ 烘箱杀青 30 min 后, 于 75 ℃ 恒温烘干至恒重后测定各器官样品的生物量(精确到 0.01 g)。用甜玉米鲜果穗质量计算其经济产量。

1.4 数据分析

器官生物量分配比例=器官生物量/地上总生物量×100%, 即各器官生物量质量分数。茎比例、叶比例和果穗比例分别为茎生物量、叶生物量和果穗生物量占地上总生物量的比例。灌溉水利用效率($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)为甜玉米群体经济产量即果穗鲜重($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)与单位面积灌水量($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)的比值。

采用异速生长指数比较采收期甜玉米个体的茎-地上总生物量、叶-地上总生物量、果穗-地上总生物量的异速生长关系, 其计算公式为 $\lg y=\lg b+a \lg x$, 其中: x 和 y 分别为甜玉米地上生物量和各部分生物量; b 为性状关系的截距; a 为斜率, 即异速生长指数(植株生物量每增加单位质量, 各器官生物量增加的速率)^[16-18]。当 $a=1$ 时, 表示 x 和 y 为等速生长; 当 $a>1$ 时, 表示 y 生长程度大于 x ; 当 $a<1$ 时, 表示 y 生长程度小于 x 。

采用 SPSS 19.0 多元方差分析比较不同处理对甜玉米个体生物量、群体经济产量、灌溉水利用效率的影响; 通过 SPSS 19.0 的因子分析对甜玉米叶鲜重、茎鲜重、果穗鲜重、叶生物量、茎生物量、果穗生物量、总生物量、茎比例、叶比例和果穗比例进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对甜玉米生物量特征值的影响

多元方差分析结果(表 1)表明, 株距对甜玉米个体总生物量、茎生物量、叶生物量、果穗生物量有显著影响; 灌水量对甜玉米个体茎生物量、茎比例和叶比例有显著影响; 株距与灌水量对甜玉米个体茎比例和果穗比例有显著交互效应。这体现了种植株距对甜玉米个体生物量发挥主导作用, 灌水量对甜玉米个体生物量分配比例发挥主导作用, 种植株距与灌水量对甜玉米个体生物量分配比例有交互效应。

表 1 株距、灌水量及其交互作用对甜玉米个体生物量特征值的方差分析(F 值)

Table 1 Variance analysis on effects of plant-spacing, water-supply, and their interactions on biomass of sweet corn plants (F value)

项目 Item	株距 Plant spacing	灌水量 Irrigation amount	株距×灌水量 Plant spacing × irrigation amount
叶生物量 Leaf biomass	4.47*	0.58	1.55
茎生物量 Stem biomass	9.07**	8.00**	2.24
果穗生物量 Corn ear biomass	3.00*	0.10	1.90
总生物量 Total biomass	5.85**	1.64	1.92
叶比例 Fraction of leaf	0.86	2.97*	1.62
茎比例 Fraction of stem	0.24	4.67**	3.12*
果穗比例 Fraction of corn ear	0.02	1.48	2.57*

注: 表中数值后标* 者表示 $P<0.05$, 标**者表示 $P<0.01$ 。
Note: * indicate significant difference at 0.05 level, ** indicate significant difference at 0.01 level.

由表 2 看出, 随着株距增加, 个体叶生物量、茎生物量、果穗生物量、总生物量均呈现明显增加趋势, 叶比例、茎比例和果穗比例差异不显著。株距为 40 cm 时, 甜玉米获得最大个体生物量。随着灌水量增加, 茎生物量和茎比例显著增加, 叶比例先增加后减少, 叶生物量、果穗生物量和果穗比例差异均不显著。灌水量为 $365 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 茎生物量和茎比例均为最大值; 灌水量为 $265 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 叶比例最大; 株距与灌水量对甜玉米个体生物量特征值存在交互作用, $365 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+40 \text{ cm}$ 组合处理的个体叶生物量、茎生物量、果穗生物量和总生物量最大, 其果穗比例较高, 但次于 $215 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+30 \text{ cm}$ 、 $215 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+40 \text{ cm}$ 、 $265 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+20 \text{ cm}$ 处理, 上述 4 个处理的果穗比例均较高、处理间差异不显著。

按照特征根大于 1 的主成分提取原则, 提取得到 3 个主成分, 其主成分 1、主成分 2 和主成分 3 的方差贡献率分别为 56.69%、18.21%、12.22%(表 3), 3 个主成分的累计方差贡献率达到 87.12%, 即这 3 个主成分可以解释全部指标 87.12% 的信息, 可认为 3 个主成分基本反映了 13 个指标所涵盖的大部分信息, 可以用来反映甜玉米植株生物量特征的变异性, 其中主成分 1 表征生物量及果穗比例指标, 主成分 2 表征茎鲜重及茎比例, 主成分 3 表征茎叶含水率。从各主成分的载荷量(表 4)可以看出, 3 个主成分可以解释 90% 以上信息的指标有果穗生物量和总生物量; 解释 80% 以上信息的指标有叶鲜重、果穗鲜重、叶生物量和叶比例; 解释 70% 以上信息

表 2 株距、灌水量及其配置处理对甜玉米个体生物量特征值的影响

Table 2 Effect of plant-spacing, water-supply, and their combinations on biomass of sweet corn plants

灌水量 Irrigation amount/m ³ ·hm ⁻²	株距 Plant spacing/cm	叶生物量 Leaf biomass/g	茎生物量 Stem biomass/g	果穗生物量 Corn ear biomass/g	总生物量 Total biomass/g	叶比例 Fraction of leaf/%	茎比例 Fraction of stem/%	果穗比例 Fraction of corn ear/%
215	20	36.47±1.85 b	75.13±4.77 c	59.25±8.62 b	170.84±13.73 b	21.45±0.76 a	44.01±1.47 bc	34.54±2.10 abc
	30	38.76±1.85 b	78.54±4.77 bc	80.95±8.62 ab	198.24±13.73 b	19.74±0.76 ab	39.94±1.47 c	40.32±2.10 a
	40	40.94±1.85 ab	91.11±4.77 b	81.32±8.62 ab	213.38±13.73 ab	19.71±0.76 ab	42.91±1.47 bc	37.38±2.10 a
	平均值 Mean value	38.72±1.07 A	81.59±2.75 B	73.84±4.98 A	194.16±7.93 A	20.30±0.44 AB	42.29±0.85 B	37.41±1.21 A
265	20	38.45±1.85 b	79.11±4.77 bc	73.39±8.62 ab	190.94±13.73 b	20.61±0.76 ab	42.27±1.47 bc	37.12±2.10 a
	30	38.27±1.85 b	76.19±4.77 bc	70.55±8.62 b	185.02±13.73 b	21.44±0.76 a	42.44±1.47 bc	36.12±2.10 abc
	40	38.53±1.85 b	80.85±4.77 bc	73.24±8.62 ab	192.63±13.73 b	21.63±0.76 a	44.58±1.47 bc	33.79±2.10 b
	平均值 mean value	38.42±1.07 A	78.72±2.75 B	72.40±4.98 A	189.53±7.93 A	21.23±0.44 A	43.10±0.85 B	35.68±1.21 A
365	20	36.58±1.85 b	79.32±4.77 bc	69.18±8.62 b	185.08±13.73 b	20.15±0.76 ab	43.59±1.47 bc	36.26±2.10 abc
	30	38.13±1.85 b	91.36±4.77 b	61.16±8.62 b	190.65±13.73 b	20.49±0.76 ab	48.94±1.47 a	30.56±2.10 c
	40	45.16±1.85 a	109.55±4.77 a	96.48±8.62 a	251.20±13.73 a	18.56±0.76 b	44.83±1.47 b	36.62±2.10 a
	平均值 Mean value	39.96±1.07 A	93.41±2.75 A	75.61±4.98 A	208.97±7.93 A	19.74±0.44 B	45.79±0.85 A	34.48±1.21 A

注：同列无相同小写字母表示不同株距与灌水量配置处理间差异显著($P<0.05$)，无相同大写字母表示不同灌水量处理间差异显著($P<0.05$)，表7同。

Note: Different lowercase in the same column meant significant difference between different irrigation amount and plant spacing combination treatment at 0.05 level. Different uppercase in the same column meant significant difference between different irrigation amount at 0.05 level. The same as the table 7.

表 3 主成分的特征根及贡献率

Table 3 Eigen values and contributions of two principal components

主成份 Principal component	特征根 Eigen value	贡献率 Contribution/%	累计贡献率 Cumulative contribution/%
1	7.37	56.69	56.69
2	2.37	18.21	74.90
3	1.59	12.22	87.12

的指标有茎鲜重、茎生物量、叶含水率、茎含水率、果穗比例；解释 60% 以上信息的指标有果穗含水率和茎比例，体现了果穗生物量对甜玉米生物量特性的主导作用。由各主成分得分及综合得分（表 5）看出，365 m³·hm⁻²+40 cm 综合得分最高，表明该处理可以获得较好的甜玉米个体生物量特征。根据主成分 1、主成分 2、主成分 3 的得分计算各组试验生物量特征的综合得分 F_i ，计算公式为： $F_i = (0.5669 \times F_1 + 0.1821 \times F_2 + 0.1222 \times F_3) / 0.8712$ （式中 F_1 、 F_2 和 F_3 分别为主成分 1、主成分 2 和主成分 3 的得分）。

2.2 不同处理对甜玉米个体异速生长关系的影响

甜玉米个体的叶、茎和果穗生物量与地上生物量之间呈极显著的异速生长关系，其中果穗生物量

表 4 生物量特征指标在各主成分中的因子载荷量

Table 4 Factor load of biomass characteristics on individual principal component

项目 Item	主成分 Component		
	1	2	3
叶鲜重 Leaf fresh weight	0.82	0.44	0.18
茎鲜重 Stem fresh weight	0.74	0.61	-0.05
果穗鲜重 Corn ear fresh weight	0.87	0.09	0.00
叶生物量 Leaf biomass	0.87	0.36	-0.21
茎生物量 Stem biomass	0.76	0.45	-0.43
果穗生物量 Corn ear biomass	0.95	-0.25	0.00
总生物量 Total biomass	0.98	0.07	-0.19
叶含水率 Water content of leaf	0.22	0.30	0.78
茎含水率 Water content of stem	0.07	0.45	0.72
果穗含水率 Water content of corn ear	-0.64	0.53	-0.03
叶比例 Fraction of leaf	-0.84	0.34	0.08
茎比例 Fraction of stem	-0.67	0.62	-0.35
果穗比例 Fraction of corn ear	0.78	-0.57	0.22

与地上生物量之间的异速生长指数最高，茎次之，叶最低。随着株距增大，叶-地上生物量异速生长指

表 5 生物量特征指标主成分得分及综合得分
Table 5 Principal components and comprehensive scores on sweet corn biomass characteristics

灌水量+株距 Irrigation amount/(m ³ ·hm ⁻²)+ plant spacing/cm	主成分1得分 Score of principle component 1	主成分2得分 Score of principle component 2	主成分3得分 Score of principle component 3	综合得分 Comprehensive score
215+20	-0.42	-0.23	0.06	-0.31
215+30	0.20	-0.31	0.74	0.17
215+40	0.23	-0.09	-0.39	0.07
265+20	-0.03	-0.12	0.39	0.01
265+30	-0.10	0.11	0.77	0.07
265+40	-0.17	0.08	0.00	-0.09
365+20	-0.23	-0.54	-0.39	-0.32
365+30	-0.21	0.76	-0.22	-0.01
365+40	0.73	0.35	-0.96	0.41

数逐渐减小,株距为 20 cm 时最大,株距为 40 cm 时最小;茎-地上生物量异速生长指数先减小后增大,株距为 20 cm 时最大,株距为 30 cm 时最小;果穗-地上生物量异速生长指数先增大后减小,株距 30 cm 时最大,株距为 40 cm 时次之,株距为 20 cm 时最小。可见,在株距为 30 cm 时,甜玉米植株主要通过减少对茎生物量的分配,将更多的生物量分配到收获器官果穗中;在株距为 40 cm 时,植株通过减少对叶生物量的分配,将更多的生物量分配到收获器官果穗中。

由表 6 看出,随着灌水量增加,叶-地上生物量

和茎-地上生物量的异速生长指数均呈现先减小后增大的变化趋势,灌水量为 265 m³·hm⁻² 时最小;果穗-地上生物量的异速生长指数呈先增大后减小的变化趋势,灌水量为 265 m³·hm⁻² 时果穗-地上生物量异速生长指数最大。可见,灌水量为 265 m³·hm⁻² 时,甜玉米植株通过减少叶和茎生物量的分配,将更多的生物量分配到果穗中。

不同株距与灌水量组合处理,其甜玉米各器官生物量异速生长指数存在差异。265 m³·hm⁻²+30 cm 处理的叶-地上生物量、茎-地上生物量异速生长指数较小,而果穗-地上生物量异速生长指数最大,甜玉米植

表 6 不同处理下甜玉米个体叶、茎、果穗生物量与地上生物量的异速生长关系

Table 6 Allometric scaling relationships among biomasses of leaves, stems, corn ears, and aboveground parts of sweet corn plants under treatments

灌水量 Irrigation amount/ (m ³ ·hm ⁻²)	株距 Plant spacing/cm	叶-地上生物量 Leaf-aboveground biomass		茎-地上生物量 Stem-aboveground biomass		果穗-地上生物量 Corn ear-aboveground biomass	
		<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>R</i> ²
215	20	0.888	0.891	0.963	0.901	1.155	0.784
	30	0.667	0.820	0.720	0.691	1.422	0.845
	40	0.529	0.719	0.905	0.836	1.463	0.863
	平均值 mean value	0.658	0.798	0.865	0.819	1.370	0.839
265	20	0.679	0.895	0.716	0.660	1.454	0.850
	30	0.479	0.793	0.560	0.800	2.00	0.935
	40	0.525	0.949	0.629	0.910	1.852	0.974
	平均值 mean value	0.549	0.870	0.631	0.786	1.799	0.927
365	20	0.724	0.789	0.756	0.736	1.544	0.838
	30	0.709	0.791	0.741	0.887	1.642	0.957
	40	0.404	0.737	0.479	0.628	1.878	0.943
	平均值 mean value	0.654	0.856	0.735	0.780	1.580	0.893

注: *a* 为异速生长指数, *R*² 为决定系数。
Note: *a* was allometric index, *R*² was coefficient of determination.

株生物量分配到叶和茎中的较少，而分配到果穗中的生物量最多，进而提高了甜玉米个体经济产量；365 m³·hm⁻²+40 cm 处理的叶-地上生物量、茎-地上生物量异速生长指数最小，而果穗-地上生物量异速生长指数最大，植株生物量分配到叶和茎中的较少，而分配到果穗中的生物量较多，从而提高个体经济产量。

2.3 不同处理的甜玉米群体经济产量及灌溉水利用效率

由表 7 看出，随着株距的增大，经济产量明显降低，株距为 20 cm 时，经济产量最高，差异显著；

随着株距的增大，灌溉水利用效率呈现降低趋势，株距为 20 cm 时，灌溉水利用效率最高。但经济产量和灌溉水利用效率随灌水量增加发生变化均不显著。经济产量以灌水量为 265 m³·hm⁻² 处理最高，365 m³·hm⁻² 处理次之；灌溉水利用效率以灌水量为 215 m³·hm⁻² 处理最高，265 m³·hm⁻² 处理次之。不同株距与灌水量组合处理对甜玉米灌溉定额、经济产量和灌溉水利用效率的影响均达显著水平。265 m³·hm⁻²+20 cm 处理的经济产量和灌溉水利用效率均最高。

表 7 不同处理下甜玉米群体经济产量及灌溉水利用效率
Table 7 Population yield and water use efficiency of sweet corn plants under treatments

灌水量 Irrigation amount/ (m ³ ·hm ⁻²)	株距 Plant spacing/cm	种植密度 Density/ (株·hm ⁻²)	灌溉定额 Irrigation quota/ (m ³ ·hm ⁻²)	经济产量 Yield/g	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency/ (kg·m ⁻³)
215	20	79 200	7 382.36±175.66 c	24 096.81±2087.91 ab	3.26±0.25 a
	30	52 800	7 382.36±175.66 c	19 728.30±999.41 bcd	2.68±0.20 abc
	40	39 600	7 382.36±175.66 c	15 550.92±1 074.85 cd	2.11±0.10 bcd
	平均值 mean value		7 382.36±175.66 C	19 792.01±3 914.61 A	2.68±0.53 A
265	20	79 200	8 277.22±519.29 b	29 177.92±4 261.57 a	3.52±0.42 a
	30	52 800	8 277.22±519.29 b	19 324.20±6 821.96 bcd	2.35±0.86 bcd
	40	39 600	8 277.22±519.29 b	14 212.33±6 579.59 cd	1.74±0.83 d
	平均值 mean value		8 277.22±519.29 B	20 904.81±8 390.31 A	2.54±1.01 A
365	20	79 200	8 737.03±259.35 a	25 976.65±3 534.46 ab	2.98±0.50 ab
	30	52 800	8 737.03±259.35 a	18 884.83±4 800.01 bcd	2.17±0.62 bcd
	40	39 600	8 737.03±259.35 a	17 086.24±2 472.09 c	1.96±0.33 cd
	平均值 mean value		8 737.03±259.35 A	20 649.24±5 194.42 A	2.37±0.64 A

3 讨论

生物量及其分配是评价作物生长发育的重要指标之一，较高的收获器官生物量及其分配是作物高产的重要物质基础^[19]。蒋飞等^[20]研究表明，密度越大，个体生物量和收获器官生物量均减少。较低密度下，玉米能够获得较大个体生物量，随着玉米个体增大，会将更多的生物量分配到收获器官中，从而增加果穗生物量^[21]。本研究结果与之相同：株距对甜玉米个体生物量和果穗生物量具有显著影响，株距为 40 cm 时密度较低，甜玉米获得最大个体生物量和较大果穗-地上生物量的异速生长指数，有更多的生物量分配到果穗收获器官。这表明甜玉米个体生物量分配受株距和个体大小制约，40 cm 株距更有利于甜玉米个体的生长和果穗生物量的分配。

植物个体根、茎、叶、果实等不同器官之间存在异速生长现象^[22]。有研究表明，作物成熟期的非繁殖器官与地上生物量之间的异速生长指数在 3/4 与 1 之间，而繁殖生物量与地上生物量之间异速生长指数在 1 到 3/2 之间^[23]，如玉米叶-地上生物量的异速生长指数为 0.647（约 2/3），茎-地上生物量的异速生长指数为 0.802（约 3/4）^[24]。本研究结果与之类似：果穗生物量与地上生物量的异速生长指数最高，茎次之，叶最低。灌水量为 265 m³·hm⁻² 时，叶-地上生物量的异速生长指数小于 2/3，茎-地上生物量的异速生长指数小于 3/4，果穗-地上生物量的异速生长指数为 1.799，呈现为减少生物量向茎、叶分配，将更多生物量分配到果穗的规律。随着灌水量增加，甜玉米个体茎生物量和茎比例显著增加，这与禾本科植物茎对生殖器官物质再分配充分发挥着碳

源功能^[25]有关。张恒嘉等^[26]对甘肃河西走廊中段临泽县玉米进行研究,发现,膜下灌溉量为 $8\,974\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时甜玉米地上部生物量最高。本研究结果与之相近似:单次灌水量 $365\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时(田间灌溉量 $8\,737\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$),甜玉米个体果穗、地上生物量均较大。表明甜玉米个体生物量分配受灌水量和个体大小的制约,充足的灌水量($365\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)有利于甜玉米个体的生长,适当减少灌水量($265\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)有利于甜玉米生物量向果穗分配。株距和灌水量对甜玉米生物量及产量的影响存在交互作用,以 $365\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+40\text{ cm}$ 处理的甜玉米个体生物量特征值最高,叶、茎-地上生物量异速生长指数均最小,果穗-地上生物量异速生长指数较大,且该处理主成分分析综合得分最高。这表明, $365\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+40\text{ cm}$ 组合处理可减少生物量向茎、叶分配,将更多的生物量分配到果穗中,获得最大个体生物量和个体产量。株距过大,植株间无效水分蒸发较为强烈,水分利用效率较低;株距过小,作物对水分、养分等资源竞争激烈,导致群体产量下降,水分利用效率降低;适当提高种植密度能提高玉米产量和水分利用效率。有研究表明,玉米产量和水分利用效率均达到最高的适宜密度为 $7.50\text{ 万}\sim 8.25\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[27],本研究结果与之一致,种植株距为 20 cm (田间种植密度 $7.92\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$)时,甜玉米群体经济产量和灌溉水利用效率均最高。Braunworth等^[28]研究表明,在不低于最大灌水量的50%时,甜玉米的产量和品质通常无明显下降。本研究中的中等灌水量加高密度组合($265\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+20\text{ cm}$)处理的甜玉米群体经济产量和灌溉水利用效率均最高。

4 结论

甜玉米个体生物量分配受株距、灌水量、株距与灌水量交互作用和个体大小的制约,种植株距 40 cm 有利于甜玉米个体生物量积累和果穗生物量分配;充足灌水量 $365\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 有利于个体生物量积累, $265\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 灌水量有利于植株生物量向果穗生物量分配; $365\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+40\text{ cm}$ 组合处理的个体生物量最大,并通过减少茎、叶生物量分配,将更多的生物量分配到果穗中; $265\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}+20\text{ cm}$ (田间灌溉量 $8\,277\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、种植密度 $7.92\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$)组合处理的群体经济产量和灌溉水利用效率均最高。

参考文献:

- [1] 罗军,万忠,谭俊,等. 2013年广东甜玉米产业发展形势与对策建议[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(5): 42-45.
- LUO J, WAN Z, TAN J, et al. Development situation and

- countermeasures of Guangdong sweet corn industry in 2013 [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(5): 42-45. (in Chinese)
- [2] DUVICK D N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.) [M]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2005: 83-145.
- [3] AHMAD M, AHMAD R, IQBALQBAL J, et al. Potassium application reduces bareness in different maize hybrids under crowding stress conditions [J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 48(1): 41-48.
- [4] 白彩云,李少昆,张厚宝,等. 郑单958在东北春玉米区生态适应性研究[J]. *作物学报*, 2010, 36(2): 296-302.
- BAI C Y, LI S K, ZHANG H B, et al. Ecological adaptability of Zhengdan 958 hybrid in northeast of China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(2): 296-302. (in Chinese)
- [5] 戴明宏,赵久然,杨国航,等. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1585-1595.
- DAI M H, ZHAO J R, YANG G H, et al. Source-sink relationship and carbon-nitrogen metabolism of maize in different ecological regions and varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1585-1595. (in Chinese)
- [6] 李淑华,许明学,张亚辉,等. 2012年美国玉米高产竞赛简介[J]. *玉米科学*, 2013, 21(3): 154-156.
- LI S H, XU M X, ZHANG Y H, et al. Brief introduction of America national maize yield contest in 2012 [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(3): 154-156. (in Chinese)
- [7] RASOOL R, KUKAL S S, HIRA G S. Root growth and soil water dynamics in relation to inorganic and organic fertilization in maize-wheat [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(20): 2478-2490.
- [8] 李建查,孙毅,赵广,等. 干热河谷不同土壤水分下甜玉米灌浆期光合作用光响应特征[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(11): 2169-2175.
- LI J C, SUN Y, ZHAO G, et al. Light response characteristics of photosynthesis of sweet corn under different soil moisture at the filling stage in dry-hot valley [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(11): 2169-2175. (in Chinese)
- [9] 庞秀明,康绍忠,王密侠. 作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 141-146.
- PANG X M, KANG S Z, WANG M X, et al. Theory and technology research development and prospect of regulated deficit irrigation on crops [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry(Natural Science Edition)*, 2005, 33(6): 141-146. (in Chinese)
- [10] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(4): 88-93.
- KANG S Z, SHI W J, HU X T, et al. Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1998, 14(4): 88-93. (in Chinese)

- [11] 李建查, 李坤, 方海东, 等. 不同滴灌模式对干热河谷甜玉米生物量分配、产量和水分利用效率的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35 (7): 947–952.
- LI J C, LI K, FANG H D, et al. Effects of drip irrigation modes on biomass allocation, yield and water use efficiency of sweet corn in a dry hot valley [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35 (7): 947–952. (in Chinese)
- [12] MCCARTHY M C, ENQUIST B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation [J]. *Functional Ecology*, 2007, 21 (4): 713–720.
- [13] GLEESON S K, TILMAN D. Allocation and the transient dynamics of succession on poor soils [J]. *Ecology*, 1990, 71 (3): 1144–1155.
- [14] BROWN J H, GEOFFREY B W, ENQUIST B J. Yes, west, brown and enquist's model of allometric scaling is both mathematically correct and biologically relevant [J]. *Functional Ecology*, 2005, 19 (4): 1365–2435.
- [15] 牛克昌, 赵志刚, 罗燕江, 等. 施肥对高寒草甸植物群落组分种繁殖分配的影响 [J]. *植物生态学报*, 2006, 30 (5): 817–826.
- NIU K C, ZHAO Z G, LUO Y J, et al. Fertilization effects on species reproductive allocation in an alpine meadow plant community [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (5): 817–826. (in Chinese)
- [16] CYR H, PACE M L. Allometric theory: extrapolations from individuals to communities [J]. *Ecology*, 1993, 74 (4): 1234–1245.
- [17] 范高华, 张金伟, 黄迎新, 等. 种群密度对大果虫实形态特征与异速生长的影响 [J]. 生态学报, 2018, 38 (11): 3931–3942.
- FAN G H, ZHANG J W, HUANG Y X, et al. Influence of population density on morphological traits and allometric growth of *Corispermum macrocarpum* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (11): 3931–3942. (in Chinese)
- [18] WARTONARTON D I, DUURSM AUURSMA R A, FALSTERALSTER D S, et al. SMATR 3 - an R package for estimation and inference about allometric lines [J]. *Methods In Ecology & Evolution*, 2012, 3 (2): 257–259.
- [19] 李向岭, 赵明, 李从锋, 等. 播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立 [J]. 作物学报, 2010, 36 (12): 2143–2153.
- LI X L, ZHAO M, LI C F, et al. Effect of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamic and establishment of its simulated model in maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36 (12): 2143–2153. (in Chinese)
- [20] 蒋飞, 曾苏明, 高园园. 不同种植密度对玉米产量的影响 [J]. *现代农业科技*, 2011 (5): 46–47.
- JIANG F, ZENG S M, GAO Y Y. Effects of different planting densities on maize yield [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011 (5): 46–47. (in Chinese)
- [21] 张凤霞. 密度、个体大小和种子大小对作物生物量分配的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- ZHANG F X. Effect of density, individual and seed size on distribution of biomass[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [22] 徐高福, 徐高翔, 李秀平, 等. 柏木异速生长现象研究 [J]. 中南林业调查规划, 1998 (3): 21–22.
- XU G F, XU G X, LI X P, et al. Study on allometric growth of Cypress [J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 1998 (3): 21–22. (in Chinese)
- [23] PRICE C A, ENQUIST B J, SAVAGE V M. A general model for allometric covariation in botanical form and function [J]. *Proceedings of the National Academy of sciences of the United States of America*, 2007, 104 (32): 13204–13209.
- [24] 董传聪. 不同植物物种在不同密度条件下的正、负相互作用及其物质能量代谢[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- DONG C C. Variation of intraspecific interaction and metabolism of energy substances of different crops in different density gradients[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. (in Chinese)
- [25] 段留生, 韩碧文, 何钟佩. 器官间关系对叶片衰老的影响 [J]. 植物学通报, 1998, 15 (1): 43–49.
- DUAN L S, HAN B W, HE Z P. The effects of corelation between leaf and other organs on leaf senescence [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15 (1): 43–49. (in Chinese)
- [26] 张恒嘉, 黄彩霞. 不同灌水量对绿洲春玉米地上部生物量及群体光合性能的影响 [J]. *中国农村水利水电*, 2017 (1): 4–8.
- ZHANG H J, HUANG C X. Effect of different irrigation amounts on above-ground biomass and population photosynthetic performance of spring maize (*Zea mays*) in Hexi Oasis Regions [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017 (1): 4–8. (in Chinese)
- [27] 高繁. 品种、密度及水肥用量对小麦-玉米产量及水分养分吸收利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- GAO F. Effect of Variety, density, water and fertilizer amount on yield, the absorption and utilization of water and nutrient of wheat-maize[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [28] BRAUNWORTH JR W S, MACK H J, 李会民. 亏水灌溉对甜玉米产量及品质的影响 [J]. 国外农学: 杂粮作物, 1988 (2): 23–25.
- BRAUNWORTH JR W S, MACK H J, LI H M. Effects of deficient irrigation on yield and quality of sweet maize [J]. *Rain Fed Crops*, 1988 (2): 23–25. (in Chinese)

(责任编辑: 杨小萍)