

生育期连续水分亏缺对秋冬茬辣椒 生长特性和品质的影响

韩金朝^{1,2,3}, 冯俊杰^{1,3*}, 翟国亮¹, 徐洪刚⁴, 王明^{1,2}, 宋蕾^{1,2}, 郝萍萍^{1,2}
(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100082;
3. 淄博数字农业农村研究院, 淄博 255000; 4. 浙江大学, 杭州 310058)

摘要:【目的】探究各生育期水分亏缺对黄河中下游地区辣椒生长、产量和品质的影响。【方法】在日光温室设置辣椒开花坐果期、结果期灌水量两因素裂区滴灌试验, 以辣椒的开花坐果期为主区 K、结果期为副区 J, 各设置 3 种不同水分胁迫处理, 分别为重度水分亏缺 K1、J1 (土壤含水率为田间持水率的 55%~65%)、轻度水分亏缺灌溉 K2、J2 (土壤含水率为田间持水率的 65%~75%)、充分灌溉 K3、J3 (土壤含水率为田间持水率的 75%~85%), 研究水分亏缺对辣椒不同生育期的株高、茎粗、产量和品质影响。【结果】1) 水分亏缺处理会降低辣椒株高、茎粗, 但开花坐果期和结果期轻度亏缺灌溉, 对株高、茎粗的影响均不显著; 2) 开花坐果期轻度亏缺 (K2J3) 能增加秋冬茬辣椒产量, 促进商品果产量的形成, 减少非商品果数量, 比充分灌溉处理 (K3J3) 商品果产量增加了 18.9%; 3) K2J3 处理可溶性糖量最高, K1J1 处理二氢辣椒碱量最高, K2J2 处理辣椒碱、可溶性蛋白, 维生素 C 量最高。【结论】秋冬茬辣椒在开花坐果期的轻度亏缺灌溉 (K2J3), 可实现高产; 在结果期连续轻度亏缺灌溉 (K2J2), 既可实现较高产量, 又能达到较高品质。

关键词: 辣椒; 亏缺灌溉; 生长特性; 产量; 品质

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023320

韩金朝, 冯俊杰, 翟国亮, 等. 连续生育期的水分亏缺对秋冬茬辣椒生长特性和品质的影响[J]. 灌溉排水学报
HAN Jinzhao, FENG Junjie, ZHAI Guoliang, et al. Effects of water deficit in continuous growth period on growth characteristics and quality of pepper in autumn and winter[J]. Journal of Irrigation and Drainage.

0 引言

【研究意义】辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 是全世界广泛种植的一种经济作物^[1-2], 种植面积及产量呈逐年增长趋势, FAO 调查显示, 2020 年全球辣椒种植面积为 1 999 km², 产量为 3 928 万 t。中国是全球辣椒种植面积最多的国家, 2020 年中国辣椒种植面积为 814 km², 产量为 1 960 万 t, 产量占全球的 50% 左右^[3-5]。辣椒作为最重要的调味品蔬菜之一, 富含辣椒碱、维生素、蛋白质、糖、可溶性固形物等多种营养物质, 维生素 C 量高居蔬菜之首^[6]。辣椒碱是辣椒呈现辣味的重要物质, 广泛应用于食品保健、医药、种植业和养殖业等领域^[7-8]。辣椒是浅根系作物, 且具有较高叶面积指数、气孔导度, 对土壤含水率变化较为敏感^[9], 易受旱涝胁迫, 灌水过多或过少都会抑制辣椒生长发育, 导致产量和品质下降^[10]。因此研究辣椒不同生育期适宜灌水量, 提高我国辣椒的产量及品质, 一直是学者研究的重点问题。

【研究进展】水分亏缺均会对辣椒的生长指标、产量及品质产生极显著的影响, 其影响程度与亏缺时期和亏缺程度密切相关^[11-12]。Yahaya 等^[13]认为辣椒是水分胁迫敏感作物, 花期是最敏感的时期。夏桂敏等^[14]研究发现, 连续适度调亏处理, 作物水分利用效率提高, 产量增加。李焯^[15]、李全辉等^[16]研究发现, 辣椒各生育期不同程度水分亏缺处理均会引起其株高、茎粗及叶面积减小, 水分亏缺程度越严重, 各项生长指标越小。Steduto 等^[17]认为辣椒植株对水分胁迫敏感, 严重的水分胁迫可能导致产量大幅下降。张泽宇^[18]研究发现, 结果期不同强度或历时的水分亏缺均显著减少辣椒产量, 而在苗期和花期, 可通过调控亏水程度和历时而提高产量。李若楠等^[19]将辣椒果实分为商品果和非商品果, 研究发现, 全生育期轻度亏缺灌溉能增加辣椒商品果实数, 减少非商品果数量, 促进商品果产量的形成。Colak 等^[20]通过田间试验发现, 亏缺

收稿日期: 2023-07-15

修回日期: 2023-11-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF0711804)

作者简介: 韩金朝 (1998-), 男, 山东泰安人。硕士研究生, 主要从事灌溉决策模型研究。E-mail: hanjinzhao59@163.com

通信作者: 冯俊杰 (1976-), 男, 河南新乡人。研究员, 博士, 主要从事农业节水灌溉理论研究和设备开发、应用。E-mail: fjjd@sina.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

灌溉处理，辣椒可溶性固形物显著升高。王峰等^[21]对温室滴灌辣椒进行研究，发现果实成熟期轻度亏缺可降低辣椒果实的含水率，明显提高辣椒品质。

【切入点】现有水分胁迫的试验设计大多为全生育期统一亏缺灌溉或者某一生育期亏缺灌溉对辣椒的生长影响，对于连续生育期水分调控对辣椒生长的影响研究较少，连续生育期调亏可进一步探究辣椒各生育期需水程度，提高辣椒节水效率。【拟解决的关键问题】为此，以新乡地区滴灌日光温室辣椒为研究对象，研究开花坐果期和结果期水分亏缺对辣椒生长、产量和品质的影响，为黄河中下游地区的日光温室辣椒的节水灌溉制度和最优灌溉决策方案提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2022 年的 9 月—2023 年 1 月在中国农业科学院新乡综合试验基地（N35°9′，E113°47′，海拔 78.7 m）的日光温室中进行。试验区位于河南省新乡县七里营镇，属温带季风气候区，年均降水量 548.3 mm，年均蒸发量 1 909 mm，多年平均气温 14 ℃，日照时间达 2399 h，无霜期 201 d。试验所用温室东西走向、坐北朝南，长 60 m、宽 8.5 m，室顶覆盖 0.2 mm 厚的无滴聚乙烯薄膜，在塑料薄膜上铺设 5 cm 厚的保温棉被，侧墙和后墙的墙体内镶嵌有保温材料。试验区土壤为壤土，0~60 cm 土层土壤平均体积质量为 1.49 g/cm³，田间持水率为 0.30 m³/m³。

1.2 方案设计

试验选取‘赤焰 F1’移栽苗种植，沿南北方向等距单行定植，行距 60 cm，株距 40 cm，每行种植 20 株，每个处理种植 60 株。选取贴片式滴灌带，采用 1 行 1 带的布设方式，滴头流量 2.2 L/h，滴孔间距为 40 cm。试验开始前各处理基施复合肥 750 kg/hm²，施肥深度为 15 cm 左右，各处理开花坐果期和结果期第 1 次灌水进行追肥，采用大量元素水溶肥 45 kg/hm²，另外在开花坐果期喷施 0.2%~0.3%磷酸二氢钾和 0.1%硼砂混合液 2 次，结果期喷施 0.2%~0.4%的尿素和磷酸二氢钾溶液 5 次。试验采用两因素裂区试验设计，在辣椒的开花坐果期（K，主区）、结果期（J，副区）设置 3 种不同的水分胁迫处理，分别为重度（K1、J1，土壤含水率为 55%~65%田间持水率）、轻度（K2、J2，土壤含水率为 65%~75%田间持水率）和充分灌溉（K3、J3，土壤含水率为 75%~85%田间持水率），共计 9 个处理，每个处理 3 次重复，试验控制的土壤含水率土层厚度为 30 cm；另外，为保证移栽辣椒苗的成活率，辣椒苗期采用充分灌溉方式。本次试验期间各生育期温室环境温湿度情况为：苗期（20220906—20220924）温室温度均值为 25.94 ℃，湿度均值 51.65%，开花坐果期（20220925—20221024）温室温度均值为 20.5 ℃，湿度均值 66.93%，结果期（20221025—20230108）温室温度均值 14.48℃，湿度均值 79.51%。所有处理统一按照土壤水分下限灌水至上限（出现低于下限情况，同样灌水至上限）。具体试验设计见表 1，各处理灌水量见表 2。

表 1 试验设计

Tab.1 Experimental design

处理	苗期	开花坐果期	结果期
K1J1	75%~85%	55%~65%	55%~65%
K1J2	75%~85%	55%~65%	65%~75%
K1J3	75%~85%	55%~65%	75%~85%
K2J1	75%~85%	65%~75%	55%~65%
K2J2	75%~85%	65%~75%	65%~75%
K2J3	75%~85%	65%~75%	75%~85%
K3J1	75%~85%	75%~85%	55%~65%
K3J2	75%~85%	75%~85%	65%~75%
K3J3	75%~85%	75%~85%	75%~85%

注 表中各数据为土壤含水率占田间持水率的比例。

表 2 辣椒灌水量

Tab.2 Pepper irrigation amount

生育期	灌溉参数 /mm	处理								
		K1J1	K1J2	K1J3	K2J1	K2J2	K2J3	K3J1	K3J2	K3J3
苗期	灌水量	59.6	58.4	59.1	58.2	59.6	59.1	59.3	59.6	58.7
开花坐果期	灌水量	29.8	29.2	28.9	44.8	43.9	44.3	59.1	59.6	58.9
结果期	灌水量	58.6	81.9	117.5	66.3	74.5	105.3	48.9	76.9	119.2
合计	灌溉定额	148.0	169.5	205.5	169.3	178.0	164.4	167.3	196.1	236.8

1.3 测量指标及方法

1.3.1 株高和茎粗

株高测量：在辣椒植株的基部（离地面约 1cm 处）到植株的最高点之间放置直尺。然后记录直尺上株高的数值，确保垂直测量。

茎粗测量：将卡尺的两侧刀口轻轻夹住辣椒的茎，然后读取卡尺上的数值。每次测量都要确保卡尺平行于地面，以获得准确的茎粗。

1.3.2 产量测量

为消除株间差异，每个处理分为 3 组，每组选择 3 棵植株的平均值作为 1 个重复，每个处理共计 3 个重复，用以计算辣椒单株产量。并将辣椒分为商品果和非商品果分别计算单果质量、辣椒个数。商品果和非商品果主要是通过脐腐病果和畸形果进行区分。畸形果果形较小且弯曲，脐腐病果有灰色水渍状病斑。

1.3.3 品质测量

从每个小区中随机采摘 20 个来自不同的植株的辣椒。使用 ASA 试剂微量法测定维生素 C 量^[22]；使用 BCA 法测定蛋白质量，将辣椒样品与 BCA 试剂混合，测量吸光度以计算可溶性蛋白量^[23-24]；采用蒽酮比色法进行可溶性糖量测定^[25-27]。使用高效液相色谱法（HPLC）测定辣椒碱量、二氢辣椒碱量^[28]。

1.3.4 土壤含水率

在每个小区随机选择 3 个点，每 10 cm 为 1 层，用取土烘干法测量 30 cm 土层土壤含水率，按照气象条件的变化，每隔约 7 d 左右测量 1 次。

1.3.5 气象数据

通过温室内的微型气象站获取气象数据，各传感器采集温室内空气温度（*T_a*）、相对湿度（*R_h*）、光合有效辐射（*PAR*）等环境数据，并通过 GPRS 将采集的信息传输到云服务器数据库中。

1.4 数据处理

使用 Excel 软件处理数据。利用 SPSS 数据处理软件进行方差分析，比较不同处理之间的差异，并使用 Duncan 方法进行显著性检验，以确定差异是否显著。

2 结果与分析

2.1 不同水分亏缺处理对辣椒株高、茎粗的影响

辣椒各生育期各处理株高、茎粗见图 1、图 2（其中开花坐果期采用 2022 年 10 月 23 日数据，结果期采用 2023 年 1 月 7 日数据）。从图 1 可以看出，各处理辣椒株高变化趋势相同，随着生育期的推进各处理辣椒株高逐渐增加，开花坐果期株高增长速度最大，其次为苗期。开花坐果期重度水分亏缺抑制了辣椒株高的增长，导致辣椒株高差异显著（ $P < 0.05$ ），结果期水分亏缺对辣椒株高影响较小，其中 K1J1 处理影响最大，结果期株高仅增长 20.8 cm。结果后期辣椒生长基本完成，株高基本不变，最终表现为 K3J3 处理 > K2J3 处理 > K2J2 处理 > K3J2 处理 > K2J1 处理 > K3J1 处理 > K1J2 处理 > K1J3 处理 > K1J1 处理。其中 K3J3 处理株高最大，为 78.2 cm，K1J1 处理株高最小，为 64.4 cm。

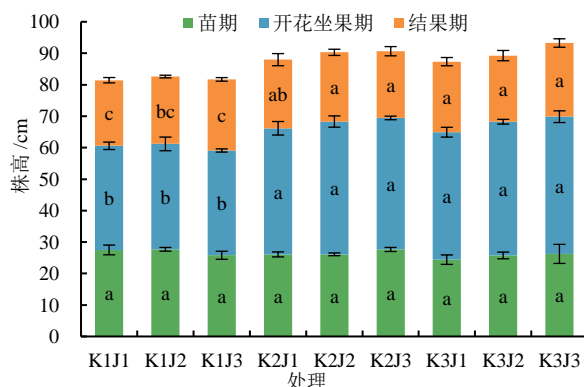


图 1 各处理辣椒株高

Fig.1 Pepper plant height of each treatment.

由图 2 可以看出，各处理辣椒茎粗增长趋势相同。苗期辣椒茎粗增长速率较大，平均增幅为 4.19 mm。

开花坐果期重度亏缺对茎粗增长速率影响显著，但在结果期充分灌水后，对辣椒最终茎粗影响不大，主要是因为辣椒进行补偿式增长。在辣椒各生育期内，K3J3 处理辣椒茎粗最高为 12.5 mm。J1 处理在结果期茎粗增长速率最低，其中 K1J1 处理茎粗最小（10.8 mm）。

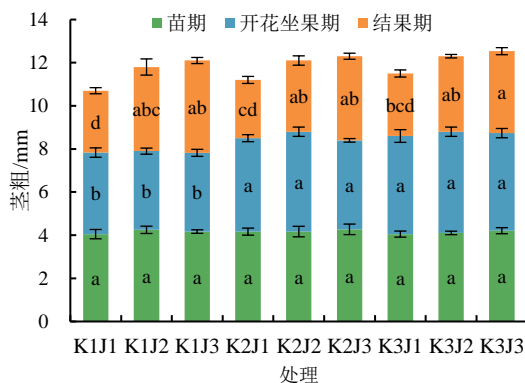


图 2 各处理辣椒茎粗

Fig.2 Pepper stem diameter of each treatment.

2.2 不同水分亏缺处理对辣椒产量的影响

表 3 为不同灌水处理下辣椒产量。与 K3J3 处理相比，K2J3、K2J2、K3J2 处理商品果产量分别增加了 18.9%、3.3%、0.6%。其中 K2J2、K3J2、K3J3 处理商品果产量无显著性差异 ($P>0.05$)，K2J3 处理商品果产量最高，为 857.25 g。K1J1 处理商品果产量最低，为 398.83 g，较 K2J3 处理降低 53.5%。开花坐果期相同水分处理下，随着结果期灌水量增加，商品果数量增加。其中 K3J3 处理商品果数量最高，为 179 个，但与 K2J3、K3J2 处理无显著性差异 ($P>0.05$)；K1J1 处理商品果数量最少，为 93 个，较 K3J3 处理降低 48.0%。K2J1、K2J2、K2J3、K3J1 处理单果质量较高，分别为 5.22、5.14、5.03、5.28 g，且 4 个处理之间无显著性差异 ($P>0.05$)。开花坐果期和结果期水分处理及其交互作用均极显著影响商品果产量、单株果数、单果质量。

K3J3 处理非商品果产量和果数均为最高，分别为 152.15 g 和 82 个；K1J1 处理非商品果产量和果数均为最低，分别为 50.72 g 和 25 个，较 K3J3 处理非商品果产量和果数分别减少 66.7%和 69.5%；K3J3、K1J1 处理非商品果产量和果数与其他处理差异显著 ($P<0.05$)。K2J2 处理非商品果单果质量最高，为 2.26 g，较 K3J3 处理单果质量增加 20.9%，且与 K3J3 处理差异显著 ($P<0.05$)。开花坐果期和结果期水分处理及其交互作用均极显著影响非商品果产量和单株果数。开花坐果期和结果期水分处理对非商品果单果质量无显著影响，但其交互作用对其影响极显著。

表 3 不同灌溉处理下辣椒产量及其构成

Tabl.3 Pepper yield and composition under different irrigation treatments

灌溉水平		商品果 (单株)			非商品果 (单株)		
开花坐果期	结果期	产量/g	个数/个	单果质量/g	产量/g	个数/个	单果质量/g
K1	J1	398.83±10.39e	93±5.51e	4.28±0.2d	50.72±1.48e	25±2.08f	2.06±0.12ab
	J2	429.95±13.76e	106±5.13de	4.07±0.09d	92.84±1.74cd	51±3.79d	1.81±0.1c
	J3	603.83±17.15f	150±8.19b	4.03±0.11d	101.32±8.15bcd	50±8.5d	2.06±0.21ab
K2	J1	656.96±33.94c	126±9.54c	5.22±0.16a	74.73±4.76de	36±3.51e	2.06±0.13ab
	J2	744.98±15.88b	145±5.57b	5.14±0.09a	94.11±0.66cd	42±1.15e	2.26±0.05a
	J3	857.25±12.11a	171±12.29a	5.03±0.28a	116.12±3.56abc	64±5.29c	1.82±0.09c
K3	J1	657.79±23.72e	115±1.73cd	5.28±0.09a	120.81±4.33cd	64±2.08c	1.9±0.01bc
	J2	725.63±15.9b	167±7.55a	4.35±0.1b	136.83±5.22ab	74±5.13b	1.86±0.06bc
	J3	721.00±19.57b	179±5.57a	4.03±0.08d	152.15±2.36a	82±4.51a	1.87±0.08bc
P 值	K	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.149
	J	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.151
	K*J	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注 同列数据后不同小写字母代表各处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同水分亏缺处理对辣椒品质的影响

2.3.1 不同灌水处理对辣椒碱类物质的影响

辣椒碱类物质是辣椒辣味特性的关键成分，同时辣椒碱类物质也是辣椒特有的化合物。不同灌水处理对辣椒碱类物质生成影响不同（图3和图4）。由图3、图4可知，鲜果中辣椒碱量为二氢辣椒碱的2.75~5.9倍。各灌水处理及其交互作用对辣椒碱量和二氢辣椒碱量的影响极显著（ $P<0.01$ ）。由图3可知，K2、J2处理辣椒碱量均为最高，各处理之间均差异显著（ $P<0.05$ ）。由图4可知，K1处理二氢辣椒碱量显著高于K2和K3处理（ $P<0.05$ ），K3处理辣椒碱量大于K2处理，但K2、K3处理差异不显著（ $P<0.05$ ）。结果期不同灌水处理J1、J2、J3处理均有显著性差异（ $P<0.05$ ），二氢辣椒碱量表现为J3处理>J1处理>J2处理。

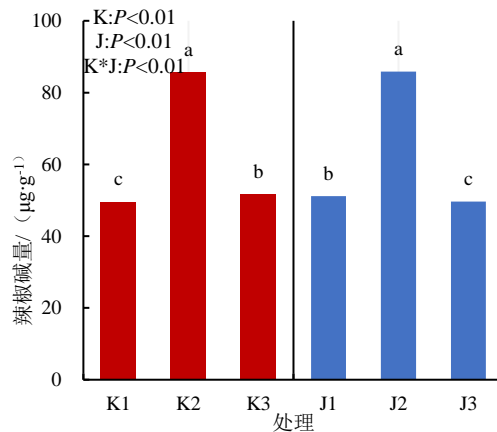


图3 各处理辣椒碱量

Fig 3 The amount of capsaicin in different treatments.

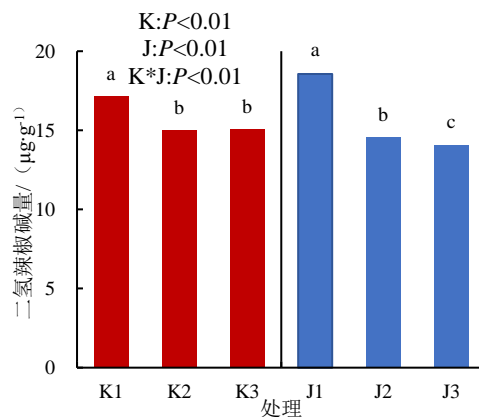


图4 各处理二氢辣椒碱量

Fig.4 The amount of dihydrocapsaicin in different treatments.

2.3.2 不同水分亏缺处理对辣椒其他品质的影响

可溶性糖量、蛋白质量和维生素C量均是蔬菜中最常见的品质指标，表4、表5为各处理可溶性糖量、蛋白质量和维生素C量。由表4可知，在辣椒开花坐果期进行水分亏缺处理（K1、K2）均能显著提高可溶性糖量、可溶性蛋白量、维生素C量（ $P<0.05$ ），其中轻度缺水处理（K2）可溶性糖量、可溶性蛋白量、维生素C量最高。结果期充分灌水（J3）可溶性糖和可溶性蛋白量最高，轻度缺水（J2）维生素C量最高。开花坐果期、结果期水分亏缺处理以及二者交互作用均极显著影响辣椒可溶性糖量、可溶性蛋白量、维生素C量（ $P<0.01$ ）。

表 4 不同处理辣椒品质方差及主效应分析

Tab.4 Analysis of Variance and Main Effects of Pepper Quality for Different Treatments.

因素	水平	可溶性糖量/(mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白质量/(mg·g ⁻¹)	维生素 C 量/mg·g ⁻¹
开花坐果期	K1	26.04±b	31.07±4.95b	1591.01±113.19b
	K2	30.42±a	35.21±0.92a	1650.72±111.25a
	K3	22.59±c	22.68±3.5c	1557.08±162.74c
结果期	J1	25.62±b	26.56±6.55c	1545.16±52.8c
	J2	23.21±c	30.69±6.78b	1643.08±171.65a
	J3	30.22±a	32.72±4.32a	1610.56±137.41b
K		P<0.01	P<0.01	P<0.01
J		P<0.01	P<0.01	P<0.01
K*J		P<0.01	P<0.01	P<0.01

由表 5 可得, K2J3 处理可溶性糖量最高, 为 38.99 mg/g, K2J2 处理可溶性蛋白和维生素 C 量最高, 分别为 36.43、1 795.97 mg/g。K3J2 处理可溶性糖量和维生素 C 量最低, 分别为 21.40、1 419.46 mg/g。K3J1 处理可溶性蛋白量最低, 为 19.83 mg/g。开花坐果期重度水分亏缺处理 (K1) 下, K1J3 处理的可溶性糖量和可溶性蛋白质量最高, 分别为 30.27 mg/g 和 36.23 mg/g。K1J2 处理的维生素 C 量最高, 为 1 713.82 μg/g。开花坐果期轻度亏缺处理 (K2) 下, K2J3 处理的可溶性糖量最高, 为 38.99 mg/g。K2J2 处理的可溶性蛋白质和维生素 C 量最高分别为 36.43 mg/g 和 1 795.97 μg/g。开花坐果期充分灌溉处理 (K3) 下, K3J1 处理可溶性糖量最高, 为 26.23 mg/g。K3J3 处理可溶性蛋白质和维生素 C 量最高, 分别为 27.22 mg/g 和 1 770.91 μg/g。

表 5 不同处理辣椒品质的交互效应分析

Tab.5 Interaction Effects Analysis of Pepper Quality for Different Treatments.

处理	可溶性糖量/(mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白质量/(mg·g ⁻¹)	维生素 C 量/(mg·g ⁻¹)
K1J1	25.00±0.5c	25.13±0.4e	1601.59±8.69c
K1J2	22.85±0.52d	31.65±0.51c	1713.82±9.29b
K1J3	30.27±1.18b	36.23±1.13a	1457.62±40.1e
K2J1	25.63±0.85c	34.72±0.38b	1553.03±1.26d
K2J2	26.66±1.26c	36.43±0.66a	1795.97±9.61a
K2J3	38.99±1.78a	34.71±0.75b	1603.15±7.54c
K3J1	26.23±1.05c	19.83±0.69f	1480.86±1.46e
K3J2	20.13±0.66e	20.99±0.7f	1419.46±10.12f
K3J3	21.40±0.81de	27.22±0.84d	1770.91±10.99a

3 讨论

3.1 连续调亏灌溉对辣椒生长指标的影响辣椒是浅根系作物, 主根较粗、但根量较少, 从而导致辣椒对土壤水分比较敏感。当植株处于水分亏缺状况时, 根与地上生物量之间的光合产物分配也会发生改变, 由于根系的向水性, 根系的发育将会更加发达, 根系将得到更多的光合产物, 生长相对有利, 而作物地上部分的生长则受到抑制^[29-30]。本研究表明, 所有水分亏缺处理的株高、茎粗均低于充分灌水 K3J3 处理。这与赵园园等^[31]研究结果相一致。本试验发现, 在开花坐果期受到严重水分胁迫时, 辣椒生长明显受到抑制, 导致株高显著小于充分灌水 K3J3 处理, 且结果期充分灌水后, 株高仍无法恢复正常高度; 茎粗在结果期充分灌水后, 产生补偿性生长, 这可能与生长习性和生态适应性有关, 辣椒需要在不同的生长部位之间分配有限的养分。如果株高的增长不会带来明显的生存或生殖优势, 辣椒可能会选择将更多的资源分配到茎粗上, 以提高养分输送的效率。此外, 本试验还发现, 生育期连续轻度水分亏缺对植株生长株高、茎粗影响也较小, 表明植物在适度水分亏缺的情况下可以通过自身调节来保持生长, 另外也可能与辣椒品种有关。

3.2 连续调亏灌溉对辣椒产量的影响

不同生育期水分胁迫对辣椒产量影响不同。辣椒在定植—坐果期进行单生育期中度调亏, 对辣椒产量影响不显著, 在结果盛期进行中度和重度单生育期调亏处理可导致辣椒严重减产^[11]。本研究表明, 开花坐果期、结果期轻度水分亏缺均能够提高辣椒商品果产量, 这可能是因为试验环境因素有差别, 本试验结果期环境湿度较大, 水分蒸发较慢, 辣椒对于水分利用较为充分。产量最高处理为 K2J3 处理, 这表明植株生长

是一个连续不断的过程，辣椒开花坐果期的营养分配对于结果期也会产生影响。开花坐果期和结果期严重的水分亏缺，都显著降低了辣椒商品果产量，导致K1J1处理商品果产量最低，这可能是由于严重的水分亏缺导致了辣椒开花量的减少或者产生了花粉败育^[32]。开花坐果期相同处理情况下，结果期随着灌水量增大，辣椒个数增多；这主要是因为水分亏缺同时还会抑制作物光合作用，从而导致作物生长受抑制，并减少了光合产物向生殖器官的供应，阻碍了生殖器官的发育^[33]。

本研究中非商品果较多，且非商品果主要是由脐腐病果和未膨大果实组成，这可能是由于试验在秋冬季节种植，气温较低，蒸腾量减少，抑制了钙向果实的运输，使得结果末期脐腐病果增加。K3J3处理的非商品果数量最高，产量也最大，商品果的单果质量也较小。这是由于在结果后期，环境温度整体较低，光照时间也较短，而整个生育期充足的灌水使得作物生殖器官更加发达，前期开花结果较多，但由于后期光合作用减弱，产生营养物质较少，无法充足供应大量果实的生长发育；另外灌溉量过高形成的涝渍胁迫也可能导致脐腐病发病率提高^[34]。另外，从结果期灌水角度分析，K3J3处理灌水充足，但商品果产量和非商品果产量与K3J2处理差异均不显著，说明在结果期某一阶段可能存在过量灌溉的问题。

3.3 连续调亏灌溉对辣椒品质的影响

本研究表明，辣椒碱量明显比二氢辣椒碱量高，这是由于二氢辣椒碱是辣椒碱的衍生物。轻度干旱处理能使辣椒果实中辣椒碱和二氢辣椒碱量显著增加，一定程度提高辣椒果实的品质^[31]。本研究发现，辣椒碱均随灌水量的增加，表现为先增大后减少的趋势，这与前人^[31]研究一致。故开花坐果期和结果期轻度亏缺灌溉对辣椒碱的生成有明显的促进作用。本研究中开花坐果期K1处理和结果期J1灌水处理二氢辣椒碱量最高，这与李若楠等^[14]研究发现重度亏缺下辣椒二氢辣椒碱量最高的结论一致。这可能是由于辣椒碱类物质是一种溶解于水中的物质，果实含水率的升高可能会导致辣椒碱量相对降低。另外辣椒碱类物质还受辣椒品种、栽培条件、成熟度等影响，还需进一步研究和讨论。

维生素C、可溶性糖和可溶性蛋白都属于植物细胞内的溶解性物质，均随灌水定额的增加呈先增大后减小的趋势^[35-36]。本研究中，果实中维生素C量、可溶性糖量和可溶性蛋白量最高均出现在开花坐果期轻度亏缺的处理（K2）中，这说明开花坐果期轻度亏缺灌溉能提升辣椒的品质。开花坐果期充分灌水处理（K3）各品质显著降低（ $P < 0.05$ ），这表明开花坐果期可能出现过量灌溉的情况，可能影响植物的气体交换和根系呼吸，从而对植物的代谢活动产生不利影响。结果期充分灌水（J3）辣椒的可溶性糖量和可溶性蛋白量最高，在充足的水分条件下，植物能够更有效地进行光合作用，将光能转化为化学能，并促进有机物的合成。K2J2处理可溶性蛋白量最高，说明连续生育期轻度亏缺灌溉，有利于提高可溶性蛋白量。结果期轻度亏缺灌溉（J2）导致辣椒养分和水分亏缺，在这种应激条件下，植物通常会增加抗氧化物质的合成，以对抗氧化应激。维生素C是一种强效的抗氧化剂，在植物中能够减轻氧化应激带来的损害，因此结果期维生素C量有所提升。

4 结论

1) 水分亏缺会降低辣椒株高、茎粗，但开花坐果期和结果期轻度水分亏缺对株高、茎粗的影响均不显著。开花坐果期重度亏缺显著影响了株高和茎粗的生长，茎粗在重度亏缺后，结果期复水会产生补偿性生长。

2) 开花坐果期轻度水分亏缺能增加辣椒产量，促进商品果产量的形成，减少非商品果数量。水分亏缺处理均能不同程度提升辣椒品质，生育期连续重度亏缺灌溉二氢辣椒碱量最高，生育期连续轻度亏缺辣椒碱量、可溶性蛋白量，维生素C量最高。

3) 辣椒开花坐果期可以采用单生育期轻度水分亏缺灌溉，达到高产；在花坐果期和结果期均以65%~75%田间持水率进行连续轻度亏缺灌溉，可兼顾较高产量和高品质。

（作者声明本文无实际或潜在利益冲突）

参考文献：

- [1] 赵策, 田军仓, 欧阳赞, 等. 土壤水肥气热耦合对温室辣椒光合作用和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 31-37.
ZHAO Ce, TIAN Juncang, OUYANG Zan, et al. Impact of water-fertilizer-air-heat coupling on photosynthetic and yield of pepper in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 31-37.

- [2] 江雪梅, 王锋, 周书栋, 等. 不同辣椒品种对发酵剁辣椒品质及风味的影响[J]. 中国调味品, 2023, 48(4): 1-6, 19.
JIANG Xuemei, WANG Feng, ZHOU Shudong, et al. Effects of different chili varieties on the quality and flavor of fermented minced chili[J]. China Condiment, 2023, 48(4): 1-6, 19.
- [3] 赵成志, 符根英, 浦娜, 等. 氯化钠和光照处理对辣椒愈伤形成及辣椒素含量的影响[J]. 分子植物育种, 2023, 21(3): 917-928.
ZHAO Chengzhi, FU Genying, PU Na, et al. Effects of sodium chloride and light treatment on callus formation and capsaicin content in pepper[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(3): 917-928.
- [4] 杨永兴, 连雅丽, 许铭强, 等. 响应面法优化冷榨法提取辣椒籽油工艺研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(4): 148-155.
YANG Yongxing, LIAN Yali, XU Mingqiang, et al. Optimization of cold pressing extraction process of chili seed oil by response surface methodology[J]. China Condiment, 2023, 48(4): 148-155.
- [5] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. 园艺学报, 2020, 47(9): 1 715-1 726.
ZOU Xuexiao, MA Yanqing, DAI Xiongze, et al. Spread and industry development of pepper in China[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(9): 1 715-1 726.
- [6] 王雪, 谢立波, 张慧. 辣椒果实维生素 C 含量的研究进展[J]. 北方园艺, 2019(19): 121-124.
WANG Xue, XIE Libo, ZHANG Hui. Research progress of vitamin C content in pepper fruits[J]. Northern Horticulture, 2019(19): 121-124.
- [7] 朱文婷, 孙兆军, 祁琦, 等. 土壤水分下限对地下渗灌辣椒生长发育及水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2021(5): 51-55.
ZHU Wenting, SUN Zhaojun, QI Qi, et al. Effects of the lower limit of soil moisture on the growth and water use efficiency of pepper under subsurface irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2021(5): 51-55.
- [8] 冯纪年, 付健, 韩明理. 辣椒碱的研究概述[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 84-87.
FENG Jinian, FU Jian, HAN Mingli. Research summarization on capsaicin[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2005, 14(1): 84-87.
- [9] 张泽宇, 曹红霞, 何子建, 等. 基于 AHP-EWM-TOPSIS 的温室辣椒最佳调亏灌溉方案优化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 111-120.
ZHANG Zeyu, CAO Hongxia, HE Zijian, et al. Study on greenhouse pepper optimal regulated deficit irrigation scheme based on AHP-EWM-TOPSIS[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 111-120.
- [10] 雷菲, 潘孝忠, 张治军, 等. 灌溉施肥模式对海南辣椒产量和水肥利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 20-29.
LEI Fei, PAN Xiaozhong, ZHANG Zhijun, et al. The effects of irrigation and fertigation on yield, water-fertilizer utilization of pepper in Hainan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 20-29.
- [11] 黄海霞. 干旱荒漠区辣椒耗水规律及对调亏灌溉的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
HUANG Haixia. Water consumption and responses to regulated deficit irrigation of capsicum annum in arid desert area[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012.
- [12] 周晨莉, 张恒嘉. 辣椒调亏灌溉及施肥技术研究进展综述[J]. 水利规划与设计, 2019(10): 67-70, 77.
- [13] YAHAYA B O, ALAO F, CLETUS O. Yield-Crop water use (Cwu) evaluation for pepper production under irrigated cultivation in Akure, Nigeria[J]. Global Journal of Science Frontier Research Agriculture & Biology, 2012(1): 10-15.
- [14] 夏桂敏, 张柏纶, 胡家齐, 等. 不同生育期连续调亏灌溉对花生生长及耗水过程的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(2): 180-187.
XIA Guimin, ZHANG Bailun, HU Jiaqi, et al. Response of growth and water consumption at different growth stages of peanut to continuous regulated deficit irrigation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(2): 180-187.
- [15] 李焯. 膜下滴灌调亏对河西绿洲辣椒生长特性及产量的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
LI Xuan. Effect of mulched drip irrigation under regulated deficit irrigation on pepper's growth and yield in Hexi oasis region[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [16] 李全辉, 李江, 张广楠, 等. 不同灌水量对青海高原地区线辣椒产量和耗水规律的影响[J]. 北方园艺, 2013(9): 8-11.
LI Quanhui, LI Jiang, ZHANG Guangnan, et al. Effects of different irrigation amounts on yield and water requirement of chili pepper in Qinghai Plateau[J]. Northern Horticulture, 2013(9): 8-11.
- [17] WANI S P. Crop yield response to water[J]. Fao Irrigation & Drainage Paper Rome, 2012(10): 13-18.
- [18] 张泽宇. 不同调亏灌溉方案对温室辣椒生长、产量和品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
ZHANG Zeyu. Effects of different regulated deficit irrigation schemes on growth, yield and quality of pepper in greenhouse[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [19] 李若楠, 胡亚峰, 黄绍文, 等. 滴灌水肥管理对温室冬春茬辣椒产量与风味的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(12): 2 239-2 251.
LI Ruonan, HU Yafeng, HUANG Shaowen, et al. Effects of water and fertilizer management on yield and flavor of drip-irrigated winter-spring pepper in greenhouse production[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(12): 2 239-2 251.
- [20] BOZKURT ÇOLAK Y, YAZAR A, YİLDİZ M, et al. Assessment of crop water stress index and net benefit for surface- and subsurface-drip irrigated bell pepper to various deficit irrigation strategies[J]. The Journal of Agricultural Science, 2023, 161(2): 254-271.
- [21] 王峰, 杜太生, 邱让建, 等. 调亏灌溉对温室辣椒产量、品质及水分利用效率的影响[C]// 现代节水高效农业与生态灌区建设(上), 2010: 466-474.
- [22] 赵琼玲, 韩学琴, 沙毓沧, 等. 21 份余甘子果实品质性状的分析和评价[J]. 中国热带农业, 2021(6): 27-32.
ZHAO Qiongling, HAN Xueqin, SHA Yucang, et al. Analysis and evaluation of the fruit quality characters of 21 phyllanthus emblica L[J]. China Tropical Agriculture, 2021(6): 27-32.
- [23] 王淡兮, 孙秀兰. 蛋白质定量检测方法的探讨[J]. 粮食与食品工业, 2009, 16(4): 49-51, 62.
WANG Danxi, SUN Xiulan. Discussion on protein quantificational determination methods[J]. Cereal & Food Industry, 2009, 16(4): 49-51, 62.
- [24] 宿玮, 常耀光, 薛长湖, 等. 海地瓜多糖中蛋白含量测定方法比较[J]. 食品科学, 2011, 32(2): 201-204.
SU Wei, CHANG Yaoguang, XUE Changhu, et al. Comparison of four methods for determining protein content in crude acaudina molpadioides polysaccharides[J]. Food Science, 2011, 32(2): 201-204.
- [25] 郭玉华, 杨伟华, 郁有祝, 等. 蒽酮比色法测定棉花成熟纤维中水溶性总糖含量[J]. 中国棉花, 2011, 38(12): 23-26.
GUO Yuhua, YANG Weihua, YU Youzhu, et al. Determination of total sugar contents in mature cotton fiber using anthrone colorimetry[J]. China Cotton, 2011, 38(12): 23-26.
- [26] 王宏飞, 李彦彬, 柳腾飞, 等. 基于 CRITIC-TOPSIS 综合评价法优化温室作物灌溉策略[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 52-59.

- WANG Hongfei, LI Yanbin, LIU Tengfei, et al. Optimizing irrigation scheduling for greenhouse crops using the CRITIC-TOPSIS framework[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(2): 52-59.
- [27] 魏雪松, 穆卫谊, 王全九, 等. 活化水灌溉对新疆嘎啦苹果生长、产量及品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(10): 9-14.
WEI Xuesong, MU Weiyi, WANG Quanjiu, et al. Effects of aerated and magnetized irrigation water on growth, yield and fruit quality of gala apple in Xinjiang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(10): 9-14.
- [28] 王旭, 王富华, 钟红舰, 等. 高效液相色谱法测定食品中的辣椒素、二氢辣椒素[J]. *食品科学*, 2008, 29(7): 378-381.
WANG Xu, WANG Fuhua, ZHONG Hongjian, et al. Determination of capsaicin and dihydrocapsaicin in food by high performance liquid chromatography[J]. *Food Science*, 2008, 29(7): 378-381.
- [29] 夏桂敏, 汪千庆, 张峻霄, 等. 生育期连续调亏灌溉对花生光合特性和根冠生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(8): 318-328.
XIA Guimin, WANG Qianqing, ZHANG Junxiao, et al. Effect of continuous regulated deficit irrigation in growth period on photosynthetic characteristics and root and crown growth of peanut[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(8): 318-328.
- [30] WU Qi, XIA Guimin, CHEN Taotao, et al. Impacts of nitrogen and zeolite managements on yield and physicochemical properties of rice grain[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2016, 9(5): 93-100.
- [31] 赵园园, 洪明, 曲俊杉, 等. 灌水定额对和田滴灌日光温室辣椒生长、产量及品质的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(6): 222-228, 235.
ZHAO Yuanyuan, HONG Ming, QU Junshan, et al. Effects of irrigation quota on growth, yield and quality of greenhouse capsicums under drip irrigation in Hetian[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(6): 222-228, 235.
- [32] 胡文海, 闫小红, 陈金德, 等. 油菜素内酯对干旱胁迫下辣椒开花结果的影响[J]. *井冈山大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(5): 46-50.
HU Wenhai, YAN Xiaohong, CHEN Jinde, et al. Effects of brassinolide on flowering and fruiting of pepper in drought stress[J]. *Journal of Jinggangshan University (Natural Science)*, 2011, 32(5): 46-50.
- [33] MCLAUGHLIN J E, BOYER J S. Sugar-responsive gene expression, invertase activity, and senescence in aborting maize ovaries at low water potentials[J]. *Annals of Botany*, 2004, 94(5): 675-689.
- [34] 张泽锦, 王力明, 唐丽, 等. 滴灌水量对设施土壤养分分布和黄瓜养分吸收的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(9): 72-78.
ZHANG Zejin, WANG Liming, TANG Li, et al. Improving nutrient use efficiency in facility production of cucumber by regulating drip irrigation amount[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(9): 72-78.
- [35] 马艳华, 任秀娟, 杨慎骄, 等. 负压供水下水氮耦合对温室辣椒品质及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(5): 17-20.
MA Yanhua, REN Xiujuan, YANG Shenjiao, et al. Effect of fertigation by keeping irrigating water under negative pressure on quality and yield of pepper grown in greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(5): 17-20.
- [36] 彭琼, 童建华, 柏连阳, 等. 干旱胁迫对辣椒果实中辣椒素、二氢辣椒素及 VC 含量的影响[J]. *中国蔬菜*, 2015(12): 44-47.
PENG Qiong, TONG Jianhua, BAI Lianyang, et al. Effect of drought stress on capsaicin contents, dihydrocapsaicin and vitamin C in pepper(*Capsicum frutescens* L.) fruit[J]. *China Vegetables*, 2015(12): 44-47.

Effects of Water Deficit in Continuous Growth Period on Growth Characteristics and Quality of Pepper in Autumn and Winter

HAN Jinzhao^{1,2,3}, FENG Junjie^{1,3*}, ZHAI Guoliang¹, XU Honggang⁴, WANG Ming^{1,2}, SONG Lei^{1,2}, HAO Pingping^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100082, China; 3. Zibo Institute of Digital Agriculture and Rural Research, Zibo 255000, China; 4. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: **【Background】** Peppers are shallow-rooted crops with a high leaf area index (LAI) and stomatal conductivity, making them sensitive to changes in soil moisture content. They are prone to drought and waterlogging stress, and both excessive and insufficient irrigation can inhibit pepper growth and lead to decreased yield and quality. Therefore, studying smaller irrigation amounts at different growth stages and maintaining soil moisture within an appropriate range have been a focal point for researchers aiming to improve both the yield and quality of peppers in China. **【Objective】** This study aims to investigate the effects of water deficit at different reproductive stages on the growth, yield, and quality of chili peppers in the middle and lower reaches of the Yellow River. **【Method】** A split-plot drip irrigation experiment was conducted in a solar greenhouse in Xinxiang. The main plot was the flowering and fruiting stage (K), and the subplot was the fruiting stage (J). Three different water stress treatments were applied: severe deficit in soil moisture content for K1 and J1 (soil moisture content was 55%-65% of field water-holding capacity), mild deficit irrigation for K2 and J2 (soil moisture content was 65%-75% of field water-holding capacity), and sufficient irrigation for K3 and J3 (soil moisture content was 75%-85% of field water-holding capacity). The plant

height, stem diameter, yield, and quality of chili peppers at different water treatments were measured. **【Result】** (1) Water deficit treatments at all reproductive stages reduced the plant height and stem diameter of chili peppers, but the mild deficit irrigation during the flowering and fruiting stage and the fruiting stage did not significantly affect plant height and stem diameter. (2) Moderate deficit irrigation during the flowering and fruiting stage (K2J3) increased the yield of autumn-winter chili peppers, promoted the formation of marketable fruits, and reduced the number of non-marketable fruits. Compared to the sufficient irrigation treatment (K3J3), the yield of marketable fruits increased by 18.9%. (3) In terms of chili pepper quality, the K2J3 treatment had the highest soluble sugar content, the K1J1 treatment had the highest dihydrocapsaicin content, and the K2J2 treatment had the highest capsaicin, soluble protein, and vitamin C content. **【Conclusion】** Overall, moderate deficit irrigation during the flowering and fruiting stage (K2J3) and continuous mild deficit irrigation during the fruiting stage (K2J2) can achieve high yield and high quality for autumn-winter chili peppers.

Key words: chili pepper; deficit irrigation; growth characteristics; yield; quality