

板蓝根耗水特性和其产量及品质对膜下滴灌调亏的响应

王泽义¹, 张恒嘉¹, 王玉才¹, 张万恒¹, 高佳¹, 巴玉春²

(1.甘肃农业大学水利水电工程学院,兰州 730070;2.民乐县洪水河管理处,甘肃 民乐 734500)

摘要: 研究旨在通过大田试验了解水分调亏对膜下滴灌板蓝根生长、耗水规律、产量、水分利用效率及品质的影响。于2018年在甘肃河西中部的民乐县益民灌溉试验站开展板蓝根水分控制试验,在板蓝根苗期和肉质根生长期保持充分灌水,营养生长期和肉质根生长期分别进行不同梯度(轻度、中度和重度)的水分调亏处理,并测定各项生长指标、产量、水分利用效率和品质。结果表明:(1)营养生长期和肉质根生长期中度和重度水分调亏显著降低了板蓝根株高、叶片数、主根长和主根直径,且降幅随调亏程度的加剧而增大,而轻度水分调亏与对照组无显著差异。(2)板蓝根在营养生长期和肉质根生长期各处理的耗水量呈现出随着水分调亏程度的加重而逐渐降低趋势,与对照相比降低显著($P<0.05$);耗水强度变化次序为营养生长期和肉质根生长期(约3.0 mm/d)>肉质根成熟(约1.5 mm/d)>苗期(约1.0 mm/d)。(3)营养生长期轻度水分调亏处理的板蓝根产量与水分利用效率最高,分别达到8 475.38 kg/hm²和23.33 kg/(hm²·mm),营养生长期和肉质根生长期连续轻度水分调亏处理次之,其余水分调亏处理产量和水分利用效率均有所下降,且与对照组之间差异显著($P<0.05$)。(4)在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续水分调亏有利于靛蓝、靛玉红、(R,S)-一告依春、多糖含量的提高,且与对照组差异显著($P<0.05$),重度水分调亏处理各项指标均最低。因此,综合分析板蓝根产量、水分利用效率和品质可知,最优控水处理为营养生长期和肉质根生长期连续轻度水分调亏,即该阶段土壤相对含水率为65%~75%,可作为河西冷凉灌区板蓝根种植的最佳灌水策略。

关键词: 水分调亏; 板蓝根; 耗水特性; 品质; 产量; 水分利用效率

中图分类号:S274.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0318-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2020.03.046

Responses of Water Consumption Characteristics, Yield, and Quality of *Isatis tinctoria* to Mulched Drip Irrigation Under Water Deficit

WANG Zeyi¹, ZHANG Hengjia¹, WANG Yucai¹, ZHANG Wanheng¹, GAO Jia¹, BA Yuchun²

(1.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2.Administration of Hongshuihe River, Minle, Gansu 734500)

Abstract: The effects of water deficit (WD) on the growth, water consumption, yield, water use efficiency, and quality of *Isatis tinctoria* under-mulched drip irrigation were studied by a field experiment. In 2018, the *I. tinctoria* water control experiment was carried out at the Yimin Irrigation Experimental Station in Minle County, Gansu Province. The seedling stage and the fleshy root growth period were fully flooded, and different gradients (mild, moderate and severe) WD treatment were carried out in the vegetative growth period and the fleshy root growth stage, and various growth indicators, yield, water use efficiency and quality were determined. The results showed that: (1) In the period of vegetative stage and fleshy root growth, the moderate and severe water deficit significantly reduced the plant height, leaf number, main root length, and main root diameter, and the declines increased with the raising WD level, While the mild WD treatment showed no significant difference compared with control group. (2) The water consumption of *I. tinctoria* in the period of vegetative and the fleshy root growth decreased gradually with the increasing of WD regulation, which was significantly lower than the control group ($P<0.05$). The order of water consumption intensity change was that: the vegetative and the fleshy root growth (about 3.0 mm/d) > the fleshy root maturity (about 1.5 mm/d) > the seedling (about 1.0 mm/d). (3) In the vegetative period, the mild WD treatment (V_1G_0) had the highest yield and water use efficiency, reaching 8 475.38 kg/hm² and 23.33 kg/(hm²·mm), respectively, and the treatment of V_1G_1 followed, and yield and water use efficiency of the remaining treatments decreased significantly ($P<0.05$).

收稿日期:2019-10-30

资助项目:甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA073);国家自然科学基金项目(51669001)

第一作者:王泽义(1994—),男,甘肃武威人,博士研究生,主要从事高效节水技术与灌溉理论研究。E-mail:949097163@qq.com

通信作者:张恒嘉(1974—),男,甘肃天水人,博士,教授,博士生导师,主要从事作物水分高效利用与节水机理研究。E-mail:1573874508@qq.com

(4) In the vegetative stage and the fleshy root growth stage, mild and moderate continuous WD was beneficial to the indigo, indirubin, (R, S)-goitrin, and the polysaccharide content was significantly different from the control group ($P < 0.05$). The indicators of severe WD treatment were the lowest. Therefore, comprehensive analysis of *I. tinctoria* yield, water use efficiency and quality, the optimal water-control treatment is the continuous slight WD in the vegetative growth period and the fleshy root growth period (V_1G_1). That is to say, the relative water content of the soil during this period is 65%~75%, which can be used as the optimal irrigation strategy for the planting of *I. tinctoria* in the cool irrigation area of Hexi.

Keywords: water deficit; *Isatis tinctoria*; water consumption characteristics; quality; yield; water use efficiency

土壤水分是限制药用作物生长发育的主要逆境因子之一。然而,作物在适时适度的干旱胁迫下,其生长会对逆境胁迫表现正向响应,即能够在不显著减产的前提下,促进作物生长,提高水分利用效率,有效改善品质^[1-2]。不科学的灌水和无节制的水资源开发会造成农业用水大量浪费,生态环境日益恶化。因此,为解决农业用水供需矛盾,节约灌溉总量,保证作物生长及保护生态环境,亟需改进灌溉技术,提升水分利用水平。膜下滴灌技术是将覆膜栽培措施与先进灌水技术相结合,与传统的沟灌、畦灌和淹灌等地面灌水技术相比,不仅能够保水增温、减小蒸发、改善农田微环境,还能节约灌水、增加产量^[3-5]。基于上述因素的考虑,将水分调亏技术与膜下滴灌技术结合研究对于生物节水意义重大。

关于膜下滴灌调亏技术,前人已有大量的报道,如 Zhang 等^[6]、杜嘉等^[7]、郑建华等^[8]、张芮等^[9]、申孝军等^[10]分别进行了膜下滴灌调亏番茄(*Lycopersicon esculentum* M.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)、洋葱(*Allium cepa* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、棉花(*Gossypium spp*)等作物生长、产量及品质的试验研究,证明了科学的覆膜滴灌调亏灌溉制度具有较好的节水、增产和调质效应。在板蓝根种植培育方面,国内学者^[11-14]从肥盐胁迫、品种选育、灌溉制度等不同角度,对板蓝根生长和产量开展了研究。曹艺雯等^[11]研究表明,减少氮肥用量不利于板蓝根生长和外形品质形成,但有利于提高其有效经济产量和活性成分的含量,并建议栽培过程中可依据产地实况将施氮量控制在 169~338 kg/hm²;米永伟等^[12]对板蓝根幼苗 NaCl 胁迫试验显示,胁迫抑制了幼苗株高和根系生长,同时也显著影响了根叶的物质积累,影响结果呈现随浓度的增大而降低;王恩军等^[13]通过测定不同品种板蓝根的 11 个农艺性状指标,并采用通径分析研究主要农艺性状间的关系,结果表明板蓝根的根长和根鲜重为高产品种特征;李文明等^[14]灌溉试验发现,板蓝根 2 次灌水时间在 7、8 月初且灌溉定额为 225 m³/hm²时,产量最高。目前,国内外对板蓝根的研究大都集中在其药理活性、制剂及工艺方面^[15-16],但关于不同生育期和不同亏水程度对膜下滴灌板蓝根生长、耗水特性、

产量及品质影响的综合研究鲜有报道。

本试验在素有“板蓝根之乡”美称的甘肃民乐县开展。当前,该区板蓝根主要为井水漫灌,灌溉水利用效率极低;地下水也因严重超采而水位急剧下降,地区农业和生态需水要求,在现有水资源条件下已然无法满足。因此,唯有发展高效农业节水灌溉技术,寻求科学合理的灌溉制度是解决该区用水矛盾及板蓝根产量、水分利用效率和品质下降问题的关键。本试验是在板蓝根营养生长期和肉质根生长期进行水分调亏灌溉试验,分析水分调控条件下板蓝根生长、耗水特性、品质及节水增产效应,旨在为指导河西绿洲区药用作物高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2018 年 5—10 月在甘肃省民乐县三堡镇益民灌溉试验站(100°43'E, 38°39'N)进行。该地区属大陆性荒漠草原气候,平均海拔 2 000 m 左右,年平均气温 6℃,极端最高和最低温度分别为 37.8、-33.3℃,年均日照时间 2 592~2 997 h,平均无霜期 105 天。据近 20 年气象资料显示,该试验区年均降水量为 200 mm 左右,蒸发量 1 680~2 270 mm,降水稀少,干旱频繁。试验地为轻质壤土,土壤肥力偏中等,pH 为 7.2,耕层土壤田间最大持水量为 23%~24%,土壤容重密度 1.46 g/cm³,耕层(0—20 cm)土壤有机质含量 11.3 g/kg,速效磷 17.6 mg/kg,速效钾 192.0 mg/kg,碱解氮 52.4 mg/kg。试区地下水位埋深较深,可忽略盐碱化影响。

1.2 试验设计及栽培方式

本试验采用平作栽培模式,并全膜覆盖以减小降雨的影响。播种前 1 周对试验地机械进行 20~30 cm 深翻耕,人工去除杂草,同时施入硫酸钾复合肥 4 500~6 000 kg/hm²,作为基肥一次性施入。供试用种选用试验区上一年度优质的板蓝根种子,纯度达 96%。于 5 月 9 日人工用穴播盘在每条滴灌管两侧,按株行距(6~8) cm×(10~15) cm 双行条播,10 月 12 日采叶挖根,用种量为 35.0 kg/hm²,栽种密度为 80 万株/hm²,灌水方式为膜下滴灌,滴灌管间距 60 cm,滴头为迷

宫式流道,内径 16 mm,滴头间距为 30 cm,滴头的平均流量为 2.0 L/h,抗堵塞能力强。试验小区面积为 40 m²(10 m×4 m),采用小区分支法控制滴灌管,由各自支管入口处装有的闸阀与水表来控制灌水,小区间预埋 1.2 m 深的塑料布,以防小区间的侧向渗漏。根据经验,本试验土壤湿润比取 65%^[17]。

本试验为单因素随机区组试验,依据《灌溉试验规范》并结合当地板蓝根的实际生长进程,将其整个生育期划分为 4 个阶段,依次是苗期(5 月 9 日至 6 月 11 日)、营养生长期(6 月 12 日至 7 月 22 日)、肉质根生长期(7 月 23 日至 9 月 2 日)、肉质根成熟期(9 月 3 日至 10 月 11 日),其中苗期和肉质根生长期保持充分供水,营养生长期和肉质根生长期实施不同程度亏水灌溉,共设 9 个控水处理(V₁G₀~V₃G₂),1 个对照处理(CK),每个处理 3 次重复,具体试验设计见表 1。相关研究^[18]表明,板蓝根有较强的耐旱性,土壤相对含水率为 70%~80%属最佳。由于本试验区地处西北内陆干旱区,蒸发量较大且降雨量小,相对含水率 75%~85%为充分供水,65%~75%为轻度亏水,55%~65%为中度亏水,水分控制上、下限范围与区域实际较为吻合。

表 1 试验设计		单位: %			
处理 编号	处理 名称	苗期	营养 生长期(V)	肉质根 生长期(G)	肉质根 成熟期
V ₁ G ₀	营养生长期轻度	75~85	65~75	75~85	75~85
V ₂ G ₀	营养生长期中度	75~85	55~65	75~85	75~85
V ₃ G ₀	营养生长期重度	75~85	45~55	75~85	75~85
V ₁ G ₁	营养生长期轻度 肉质根生长期轻度	75~85	65~75	65~75	75~85
V ₁ G ₂	营养生长期轻度 肉质根生长期轻度	75~85	65~75	55~65	75~85
V ₂ G ₁	营养生长期轻度 肉质根生长期轻度	75~85	55~65	65~75	75~85
V ₂ G ₂	营养生长期轻度 肉质根生长期轻度	75~85	55~65	55~65	75~85
V ₃ G ₁	营养生长期轻度 肉质根生长期轻度	75~85	45~55	65~75	75~85
V ₃ G ₂	营养生长期轻度 肉质根生长期轻度	75~85	45~55	55~65	75~85
CK	对照处理	75~85	75~85	75~85	75~85

注: V 为板蓝根营养生长期; G 为板蓝根肉质根生长期; 角标 0, 1, 2, 3 依次为该阶段充分供水、轻度亏水、中度亏水、重度亏水。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 生长指标 板蓝根生育期推进到肉质根成熟期初,各小区挑取生长状况一致的 15 株植株定苗,用精度为 1 mm 钢卷尺每 10 天测定 1 次株高;挖根收获时,先将定苗的 15 株单独收回室内,冲洗并晾干。从各株上剪下根部,用精度为 1 mm 直尺测量主根长,用精度 0.02 mm 游标卡尺测量主根直径(芦头

下 0.04 m 处),各处理的均值作为最终结果。

1.3.2 土壤水分 采用传统烘干法测定。板蓝根生育期内每隔 7 天,随机在各小区内用土钻在两株板蓝根植株连线的中点处,采集 0—80 cm 土层的土壤样品,分 6 层取土,即 0—10 cm 采样 1 次,20—80 cm,深度每间隔 20 cm 采样 1 次,测算其土壤含水率。因板蓝根的根系基本分布于 0—50 cm 土层内,取 0—60 cm 土层水分的均值作为计划湿润层土壤水分,而作物对土壤水分消耗量的计算依据于 0—80 cm 内土壤水分变化。

1.3.3 产量 按单个小区实收测产,以 3 次重复的均值为各处理的实际产量值。

1.3.4 耗水量 用水量平衡法计算,公式为:

$$ET_{1-2}=10\sum_{i=1}^n\gamma_iH_i(W_{i1}-W_{i2})+M+P+K-C$$

(1)

式中:ET₁₋₂为板蓝根的阶段耗水量(mm);i 和 n 分别为土层次号和总数目;γ_i为第 i 层土壤容积密度,1.46 g/cm³;H_i为第 i 层土层厚度(cm);W_{i1}、W_{i2}为第 i 层土壤在某时段始末的含水量(%);M、P、K 和 C 分别为该时段内的灌水量、降水量、深层土壤水的补充量和排水量(mm)。

试验区地下水埋深大于 20 m,无需考虑深层水补充,故 K 取 0;试验区为旱区且滴灌未能使土壤含水率达到饱和值,不会产生渗漏,故 C 取 0。

1.3.5 水分利用率 板蓝根水分利用效率的计算公式为:

$$R_{WUE}=Y/ET_a$$

(2)

$$I_{WUE}=Y/I$$

(3)

式中:R_{WUE}为板蓝根水分利用效率(kg/(hm²·mm));I_{WUE}为板蓝根灌溉水利用效率(kg/(hm²·mm));Y 为单位面积板蓝根产量(kg/hm²);ET_a为单位面积板蓝根耗水量(mm);I 为单位面积板蓝根灌溉水量(mm)。

1.3.6 品质 采用高效液相色谱仪(LC-10AT_{VP})^[19]来测定板蓝根(R,S)一告依春、靛蓝和靛玉红含量。色谱条件:SPD-10A_{VP}(UV-VIS)检测器,色谱柱为 Agilent Zorbax SB-C18(100 mm×4.6 mm,3.5 μm),流动相为甲醇—0.1%甲酸溶液;流速设为 1.0 mL/min,自动样器来进样,进样量、检测波长和柱温箱柱温分别为 20 μL、280 nm 和 25 ℃;采用酚—硫酸比色法^[20]来测定板蓝根中多糖含量。

1.4 数据的分析与处理

采用 Excel 2010 对所测数据进行计算并作图,Spass 20.0 软件中 Duncan 多重比较法比较各处理数据差异的显著性。

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌亏水对板蓝根生长指标的影响

板蓝根各生长指标对不同水分调亏处理的响应见表 2。对照 CK 的平均株高最大(29.07 cm),各处理株高与 CK 相比均有不同幅度的下降,但处理 V₁G₀、V₂G₀、V₁G₁ 差异不显著($P>0.05$),而其余处理差异显著($P<0.05$),其中处理 V₃G₀、V₃G₁、V₃G₂ 分别为 24.22,21.90,21.28 cm,降低幅度达 16.68%,24.66%,26.88%;单株叶片数变化同株高变化基本相近,处理 V₁G₀ 叶片数最多(37 片),CK 次之,重度水分调亏处理 V₃G₁ 和 V₃G₂ 较 CK 降幅最显著,分别下降 27.78%和 30.56%。表明板蓝根营养生长期亏水处理对其株高和叶片数有较大的影响,且亏水程度越大影响越大;亏水同样对板蓝根主根长存在影响,处理 V₁G₀ 和 V₁G₁ 主根长度较 CK 分别增加 4.87%和 5.09%,其他处理比 CK 均有不同幅度的下降,降幅为 0.26%~24.74%,其中重度水分调亏处理 V₃G₁、V₃G₂ 下降最显著,分别降低 20.99%和 24.74%;处理 V₁G₀ 和 V₁G₁ 主根直径较 CK 有所增加,但不显著,剩余处理均有一定程度的降低,下降幅度为 9.09%~26.06%,其中尤其以重度亏水处理 V₃G₁ 和 V₃G₂ 差异最显著,分别降低 25.45%和 26.06%。表明轻度亏水不会显著降低板蓝根主根的长度和直径,反而有益于根系的生长,但重度亏水严重影响板蓝根地上与地下部分的生长。

表 2 膜下滴灌亏水对板蓝根生长指标的影响

处理	株高/ cm	单株叶片 数/个	主根长/ cm	主根 直径/cm
V ₁ G ₀	28.81a	37a	24.33a	1.66a
V ₂ G ₀	27.85ab	35ab	23.26a	1.47bc
V ₃ G ₀	24.22c	29de	19.77c	1.42ef
V ₁ G ₁	27.72ab	33bc	24.38a	1.71a
V ₁ G ₂	26.93b	31cd	21.13b	1.52cd
V ₂ G ₁	24.53c	29de	20.82b	1.41de
V ₂ G ₂	24.98c	28de	20.78b	1.46de
V ₃ G ₁	21.90d	26e	18.33cd	1.22f
V ₃ G ₂	21.28d	25e	17.46d	1.19f
CK	29.07a	36ab	23.20a	1.65b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 膜下滴灌亏水对板蓝根耗水规律的影响

2.2.1 生育期耗水量 由图 1 和表 3 可知,苗期,板蓝根耗水量占总耗水量的 9.42%~10.46%,除了处理 V₂G₁ 和 V₂G₂ 外,其余处理的耗水量与 CK 均无显著差异($P>0.05$),这主要是在苗期,板蓝根植株小,蒸腾作用最弱,且大气温度偏低,蒸发损失相对较少,所以,该时期内板蓝根消耗的水量最少;在营养生长期和肉质根生长期,茎叶快速生长,逐渐遮盖地表,

一定程度上减弱了地表蒸发,但该时期植株叶片蒸腾作用逐渐增强,同时大气温度较高,蒸发量大,所以该生长阶段消耗的水量较多,且在整个生育期耗水量的占比达 68.28%~73.39%。在营养生长期,对照 CK 的耗水量最高,达到 142.09 mm,其次是轻度和中度亏水处理 V₁G₁ 和 V₂G₀,重度亏水处理 V₃G₁ 和 V₃G₂ 的耗水量最低,较 CK 分别显著($P<0.05$)降低 15.66%和 14.83%;在肉质根生长期,耗水量仍以 CK 最高(129.68 mm),耗水量最小的是重度亏水处理 V₃G₂(110.51 mm);进入肉质根成熟期后,气温逐渐降低,蒸腾作用也逐渐减弱,植株主要进行有效成分的积累,耗水量便表现下降趋势,其中处理 V₂G₁ 的耗水量最高(79.41 mm),而 V₁G₀ 最低(59.33 mm),比 CK 显著降低 23.97%。因此,在板蓝根营养和肉质根生长期各处理的耗水量随亏水程度的加剧,表现为逐渐降低的变化规律,而板蓝根全生育期耗水量受到同样的亏水影响结果。

2.2.2 日耗水强度 板蓝根各控水处理的日耗水强度变化特征见表 3。苗期,各处理日耗水强度相差不大,约为 1.00 mm/d,除处理 V₂G₁ 和 V₂G₂ 外,其余处理与 CK 差异不显著($P>0.05$);进入营养生长期,气温逐渐回升,植株长速加快,日耗水强度明显高于苗期,为 2.73~3.88 mm/d,其中日耗水强度最高的是对照 CK(3.88 mm/d),其次是轻中度亏水处理(V₁G₀、V₂G₀、V₁G₁ 和 V₁G₂),重度亏水处理 V₃G₀ 日耗水强度最小(2.73 mm/d),比 CK 显著($P<0.05$)下降 19.26%;在肉质根生长期气温大幅升高,植株仍保持较高的生长速度,耗水量较大,日耗水强度为 2.76~3.24 mm/d,CK 仍为最高(3.24 mm/d),处理 V₁G₀、V₂G₀ 和 V₁G₁ 日耗水强度与其差异不显著,而重度亏水处理 V₃G₂ 日耗水强度最低(2.76 mm/d),比 CK 显著减小 14.81%;进入肉质根成熟期,气温逐渐降低,日耗水强度降为 1.52~2.04 mm/d,其中日耗水强度最高的是处理 V₂G₁(2.04 mm/d),与 CK 相比无显著差异,而日耗水强度最小的是处理 V₁G₀(1.52 mm/d),比 CK 显著下降 23.97%。总体来看,板蓝根营养生长期和肉质根生长期日耗水强度最高,均在 3.0 mm/d 以上,这主要是由于板蓝根在该生长阶段,是营养生长的关键时期,长势旺盛,需水较多,单位时间的耗水量自然也愈多,而肉质根成熟期次之,约 1.5 mm/d,苗期则最低,约 1.0 mm/d。

2.2.3 耗水模数 由表 3 可知,苗期,处理 V₃G₁ 和 V₃G₂ 的耗水模数与 CK 相比差异显著($P<0.05$),剩余各处理则无显著差异($P>0.05$);营养生长期,耗水模数最高的是处理 V₁G₀,为 38.19%,与 CK 差异显著,其次为对照;肉质根生长期,耗水模数最高的

是处理 V_3G_0 , 处理 V_1G_0 和 V_1G_1 次之, 均与 CK 差异显著; 在肉质根成熟期, 处理 V_1G_0 的耗水模数最低, 而 V_2G_1 的耗水模数最高, 且与 CK 无显著差异。板蓝根各处理耗水模数表现较为相似的变化规律, 即营养生长期和肉质根生长期耗水模数较大, 耗水模数均值分别为 35.36% 和 34.40%, 这主要是由于该生育

阶段气温较高, 板蓝根生长旺盛, 日耗水强度大且持续时间较长, 其次为肉质根成熟期, 该时期气温降低, 板蓝根营养生长基本停止, 植株耗水逐渐减少, 平均耗水模数为 20.38%, 而苗期平均耗水模数最小, 仅为 9.86%。由此表明, 营养生长期和肉质根生长期为板蓝根需水高峰期, 应在该时期保证供水。

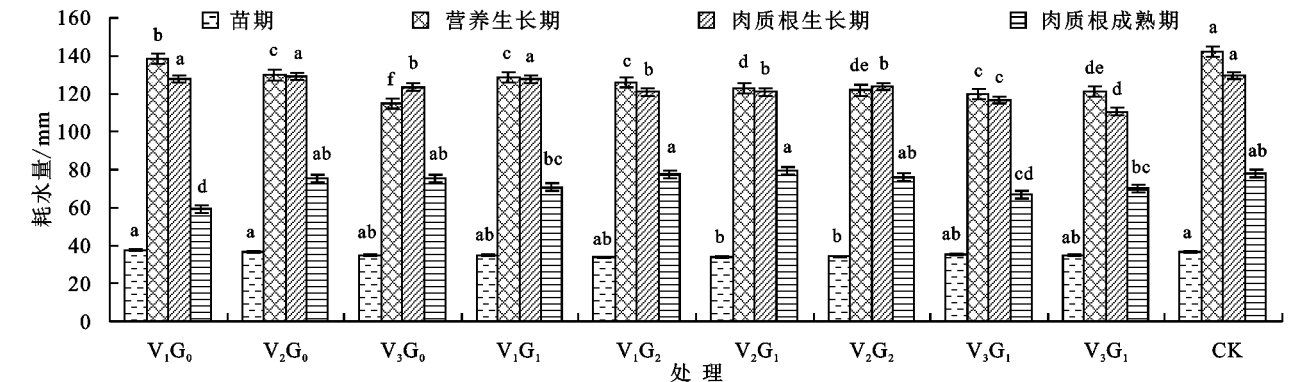


图 1 不同生育阶段板蓝根耗水量

表 3 各生育阶段板蓝根耗水特征

处理	苗期		营养生长期		肉质根生长期		肉质根成熟期	
	CD	CP	CD	CP	CD	CP	CD	CP
V_1G_0	1.13a	10.29ab	3.30b	38.19a	3.20a	35.20ab	1.52d	16.33c
V_2G_0	1.11a	9.90abc	3.09c	34.98de	3.23a	34.79abc	1.93ab	20.33ab
V_3G_0	1.05ab	9.98abc	2.73f	32.92f	3.09b	35.46a	1.93ab	21.64ab
V_1G_1	1.06ab	9.61c	3.07c	35.60cd	3.19a	35.26ab	1.81abc	19.52b
V_1G_2	1.02ab	9.42abc	3.00c	35.14de	3.03b	33.77cd	1.99a	21.67ab
V_2G_1	1.03b	9.48c	2.93d	34.41e	3.02b	33.87bcd	2.04a	22.24a
V_2G_2	1.04b	9.61c	2.90de	34.22e	3.10b	34.80abc	1.95ab	21.37ab
V_3G_1	1.07ab	10.46a	2.85e	35.36cd	2.92e	34.43abc	1.72cd	19.75b
V_3G_2	1.06ab	10.38a	2.88de	35.98bc	2.76d	32.85d	1.79bc	20.79ab
CK	1.11a	9.51bc	3.88a	36.76b	3.24a	33.55cd	2.00ab	20.19ab

注:CD 为日耗水强度 (mm/d);CP 为耗水模数 (%)。

2.3 膜下滴灌亏水对板蓝根品质的影响

由表 4 可知,水分调亏对板蓝根中靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春和多糖的含量均有影响。在板蓝根营养生长期和肉质根生长期轻中度连续亏水 (V_1G_1 、 V_1G_2 、 V_2G_1 、 V_2G_2),有益于靛蓝含量的增加,较对照 CK 增幅为 3.26%~9.62%,差异显著 ($P<0.05$),其中处理 V_1G_2 靛蓝含量最高 (6.72 mg/kg),较 CK 显著增加 9.62%,同时亦显著高于其他处理,而营养生长期轻度和中度亏水处理 V_1G_0 、 V_2G_0 靛蓝含量与 CK 相差较小,差异不显著 ($P>0.05$),重度亏水处理 V_3G_0 、 V_3G_1 和 V_3G_2 靛蓝含量分别较 CK 显著下降 6.85%、6.53%、7.18%;营养生长期重度水分处理 V_3G_0 、 V_3G_1 、 V_3G_2 靛玉红含量分别较 CK 显著下降 12.80%、12.80%、13.42%,处理 V_1G_0 和 V_2G_2 靛玉红含量与 CK 基本接近,无显著差异,而轻中度连续亏水处理 V_1G_1 、 V_1G_2 和 V_2G_1 靛玉红含量则分别较 CK 显著增加 1.03%、4.95%、1.34%,其中处理 V_1G_2 靛玉红仍为最高 (10.17 mg/kg)。由此表明,在营养和肉质根生长期

轻中度连续亏水,有利于板蓝根靛蓝和靛玉红含量的提高;水分调亏对板蓝根中(R,S)-告依春含量的影响与靛蓝、靛玉红的结果基本一致,其中重度亏水处理 V_3G_0 、 V_3G_1 和 V_3G_2 (R,S)-告依春含量分别较 CK 显著下降 11.25%、12.92%、13.75%,而处理 V_1G_1 、 V_1G_2 和 V_2G_1 分别增加 4.58%、7.92%、4.17%,且差异显著,处理 V_1G_0 和 V_2G_2 则与 CK 差异不显著;处理 V_1G_2 板蓝根多糖含量最高 (128.67 mg/g),与 CK 无显著差异,而除处理 V_1G_0 、 V_1G_1 、 V_1G_2 、 V_2G_1 外,剩余处理较 CK 均有不同程度的下降,降幅为 1.43%~17.72%且差异显著。因此,适宜水分调亏能够增加板蓝根有效成分的含量,从而改善其品质,如处理 V_1G_1 、 V_1G_2 和 V_2G_1 有效成分含量均达到药典标准,且随着中轻度连续亏水程度的增加,板蓝根品质提升,但重度亏水处理对品质的形成不利。

2.4 膜下滴灌亏水对板蓝根产量及水分利用效率的影响

2.4.1 产量和总耗水量 由表 5 可知,营养生长期轻

度亏水处理 V_1G_0 产量最高,达到 8 475.38 kg/hm²,其次是对照 CK,剩余各控水处理均降低了板蓝根的产量,且除处理 V_1G_1 外,均与 CK 存在显著差异($P<0.05$);中度和重度亏水处理 V_3G_0 、 V_2G_2 和 V_3G_1 、 V_3G_2 产量较 CK 分别下降 16.32%,17.08%,29.39%,30.71%,差异均显著。全生育期充分灌水 CK 总耗水量最大,为 386.56 mm,各调亏处理总耗水量均显著低于 CK,其中处理 V_1G_0 、 V_1G_1 和 V_2G_0 的总耗水量处于同一水平,分别较 CK 显著减小 6.01%,6.33%,3.98%,处理 V_1G_2 、 V_2G_1 和 V_2G_2 的总耗水量分别比 CK 减小 7.30%,7.64%,7.92%,而重度亏水处理 V_3G_0 、 V_3G_1 和 V_3G_2 的总耗水量处于最低水平,分别较 CK 显著减小 9.86%,12.32%,12.98%。说明亏水处理对板蓝根总耗水量的影响大小与亏水的阶段和程度有关。

2.4.2 灌溉水利用效率 由表 5 可知,营养生长期轻度亏水处理 V_1G_0 的灌溉水利用效率(IWUE)最高,为 55.39 kg/(hm²·mm),处理 V_1G_1 次之,分别比 CK 提高 10.29%和 8.98%,差异显著,重度亏水处理 V_3G_1 IWUE 最低,为 48.35 kg/(hm²·mm),显著低于 CK,营养生长期中度亏水处理 V_2G_0 和肉质根生长期轻度连续亏水处理 V_1G_2 、 V_2G_1 、 V_2G_2 IWUE 处于同一水平,均与 CK 无显著差异($P>0.05$)。说明轻度亏水能在不显著

减产的前提下,显著提高板蓝根 IWUE,而重度和中轻度连续亏水则均会显著减小其 IWUE。

表 4 膜下滴灌亏水对板蓝根品质的影响

处理	靛蓝/ (mg·kg ⁻¹)	靛玉红/ (mg·kg ⁻¹)	(R,S)-告依春/ (mg·g ⁻¹)	多糖/ (mg·g ⁻¹)
V_1G_0	6.14d	9.61cd	0.232cd	126.05ab
V_2G_0	6.10d	9.58d	0.234d	119.86c
V_3G_0	5.71e	8.45e	0.213e	115.17d
V_1G_1	6.46b	9.79b	0.251b	128.32a
V_1G_2	6.72a	10.17a	0.259a	128.67a
V_2G_1	6.41bc	9.82b	0.250b	126.05ab
V_2G_2	6.33c	9.63cd	0.236cd	123.57b
V_3G_1	5.73e	8.45e	0.209e	104.59e
V_3G_1	5.69e	8.39e	0.207e	103.14e
CK	6.13d	9.69c	0.240c	125.36ab

2.4.3 水分利用效率 由表 5 可知,亏缺灌溉能显著提升板蓝根的水分利用效率。营养生长期轻度亏水处理 V_1G_0 的水分利用效率(WUE)最高(33 kg/(hm²·mm)),肉质根生长期轻度连续亏水处理 V_1G_1 次之,WUE 分别比对照显著提高 8.87%和 7.05%,而其他处理 WUE 较对照均有不同程度的下降,下降幅度为 3.97%~19.74%,其中重度亏水的 V_3G_1 、 V_3G_2 处理分别较对照显著降低 18.85%,19.74%。因此,轻度亏水提高了板蓝根的 WUE,而重度亏水处理(V_3G_1 、 V_3G_2)的 WUE 则显著下降。

表 5 膜下滴灌亏水对板蓝根产量和水分利用状况的影响

处理	降雨量/ mm	全生育期 灌水量/mm	全生育期 耗水量/mm	产量/ (kg·hm ⁻²)	灌溉水利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
V_1G_0	210.3	153.02	363.32bc	8475.38a	55.39a	23.33a
V_2G_0	210.3	150.87	371.17b	7638.14b	50.63c	20.58c
V_3G_0	210.3	133.16	348.46cd	6986.12d	52.46b	20.05d
V_1G_1	210.3	151.81	362.11bc	8308.44a	54.73a	22.94a
V_1G_2	210.3	147.04	358.34c	7147.23bc	49.28c	19.95d
V_2G_1	210.3	143.74	357.04c	7029.39c	49.83c	19.69cd
V_2G_2	210.3	137.64	355.94c	6923.72d	50.30bc	19.45d
V_3G_1	210.3	119.63	338.93d	5895.17e	48.35d	17.39e
V_3G_1	210.3	116.08	336.38d	5784.38e	48.41d	17.20e
CK	210.3	166.26	386.56a	8348.91a	50.22bc	21.43b

3 讨论

崔婷茹等^[21]试验结果表明,植物体内的生理代谢会因水分胁迫而受到影响,进而会使植物的生长也受到影响。膜下滴灌亏缺灌溉对板蓝根的生长有重要影响^[22]。在本试验中,板蓝根营养生长期和肉质根生长期进行重度和中度水分调亏会抑制其生长,株高和叶片数均有不同程度的降低,尤其是重度亏水对板蓝根生长影响显著,如处理 V_3G_0 、 V_3G_1 和 V_3G_2 株高和叶片数相比 CK 分别下降 16.88%,24.66%和 27.70%,30.56%,而轻度水分调亏的影响则不显著。孟兆江等^[23]研究表明,在作物生长过程中,适宜的水分胁迫对根系发育的促进作用较为明显,同时在恢复

供水后对根系生长会有不同幅度的补偿。本试验发现,在营养生长期轻度亏水处理 V_1G_0 和 V_1G_1 ,增加了板蓝根的主根长,增幅分别为 4.87%和 5.09%。这是因为营养生长期是板蓝根扎根生长的关键时期,适度水分胁迫会促使根系为获取自身正常生长所需水分而深入地下扎根,进而提升了对干旱胁迫的抵抗能力。而中度和重度亏水则会抑制主根的生长,这主要是因为细胞快速增殖的营养生长期,重度干旱胁迫会阻碍根系细胞的分裂,在恢复供水后,前期干旱胁迫对根部生长产生负面结果已形成同时也未能因复水而得到足够补偿,从而导致根系生长受到抑制。

作物各生育阶段耗水情况能表示其各生育期需水要求,亦能反映出各时期作物对水分的敏感性。王

龙^[24]对大豆调亏试验表明,生育期初大豆耗水量较小而后期较大,即表现为播种到出苗期最小,结荚到鼓粒期最大;邱新强等^[25]研究发现,夏玉米总耗水量因不同生育期不同水平亏水均有所降低,且随亏水程度的加剧而增大,而对照组总耗水量始终最高。本研究发现,膜下滴灌水分调亏会对板蓝根全生育期耗水量产生不同程度的影响,其中对照 CK 全生育期耗水量最高,为 386.56 mm,其他各处理的全生育期耗水量较 CK 均显著降低,降幅为 3.98%~12.98%,且随着亏水程度的逐渐加重,总耗水量逐渐下降,即呈现轻度亏水处理>中度亏水处理>重度亏水处理的规律。在营养生长期,对照 CK 耗水量最高,其他处理与其差异显著,其次是轻中度亏水处理,耗水量显著减少 2.35%~19.26%,重度亏水处理的耗水量最低(V_3G_1 和 V_3G_2),较 CK 显著降低 14.82%~15.65%;在肉质根生长期,处理 V_1G_0 耗水量最高,但与 CK 无显著差异,重度亏水处理的耗水量最低(V_3G_1 和 V_3G_2)。

板蓝根从苗期到肉质根成熟期各处理耗水模数均值分别为 9.86%,35.36%,34.40%,20.38%,在营养生长期,处理 V_1G_0 耗水模数最大,对照 CK 次之,除处理 V_3G_2 外其余处理均与 CK 差异显著,降幅为 3.15%~10.44%;在肉质根生长期,处理 V_1G_0 耗水模数最大,与 CK 相比差异不显著,而重度亏水处理 V_3G_1 和 V_3G_2 耗水模数最小,由此可知,营养生长期和肉质根生长期为板蓝根需水高峰期,应保证供水充足,其次为肉质根成熟期和苗期,这与王玉才等^[26]和王贺辉等^[27]研究结论基本一致。板蓝根日耗水强度变化规律为苗期最小,肉质根成熟期次之,营养生长期和肉质根生长期最大。在亏水阶段,对照 CK 日耗水强度始终最高,其他处理与其差异显著,轻度亏水次之,重度亏水处理日耗水强度较 CK 显著降低。张步舫^[28]对春小麦亏水灌溉试验亦得到相近结论,即小麦生长旺盛的抽穗—灌浆期,日耗水强度达到最大,该期属于水分较敏感时期。

影响中药材质量的因素有内因和外因,内因主要是指遗传因素,外因则是指产地因素、栽培技术和环境因素等,其中影响较为突出的环境因素包括水分、温度和土壤等^[29]。有研究^[30]表明,人工种植中药材的初生和次生代谢产物的积累,分别决定了药材的产量和品质,而干旱胁迫对药用植物的生长发育和次生代谢具有显著的影响,它虽能抑制药用植物的正常生长,但亦会促进其次生代谢产物的分泌,从而有效提高药材品质^[31]。本试验发现,在板蓝根营养和肉质根生长期中轻度连续亏水能够提升其次生代谢产物:靛蓝、靛玉红和(R,S)-一告依春和多糖的含量,如中度亏水处理 V_1G_2 的有效成分依次较 CK 显著提升 8.78%,4.95%,7.92%,2.64%。这与段飞等^[32]和何玉杰^[33]的试验结论基本相同。原因是板蓝根在可承受的水分胁迫限度内,大量光合产

物在植株体内合成并积存,而在水分胁迫影响下,“过多”积存物会转化为相应的次生代谢产物并积累,进而增加了药材有效成分的含量。

不同生育期不同程度的亏水对作物产量和水分利用率的影响不同。张恒嘉等^[34]研究结果表明,膜下滴灌马铃薯块茎形成期轻度亏水,在不会减产前提下,能够有效提高马铃薯的水分利用效率。魏永霞等^[35]试验结论显示,滴灌玉米在苗期或拔节期适度亏水有利于提高其水分利用效率,同时也益于籽粒产量增加。本研究发现,板蓝根营养生长期和肉质根生长期轻度亏水处理 V_1G_0 和 V_1G_1 产量与 CK 相比,差异不显著,但其灌溉水利用效率和水分利用效率分别显著提高 10.29%,8.98%和 8.87%,7.05%,而在板蓝根营养生长期重度水分亏缺及肉质根生长期轻中度连续亏水的处理 V_3G_0 、 V_2G_2 、 V_3G_1 和 V_3G_2 产量和水分利用效率分别比 CK 下降 16.32%,17.07%,29.39%,30.72%和 6.04%,9.24%,18.85%,19.74%,差异显著。说明板蓝根营养生长期和肉质根生长期轻度亏水不会降低其产量,而营养生长期重度亏水和肉质根生长期轻中度亏水则会显著降低板蓝根产量,即较合理的亏水处理为营养生长期和肉质根生长期轻度亏水。这主要是因为较重的水分胁迫会致使植株细胞壁变硬,且在恢复供水后较难复原,进而造成作物产量下降。另外,作物根系土壤水分过多,土壤温度降低且透气性变差,这会促进侧根数增加但会影响主根的伸长,药用价值便随之降低。

4 结论

(1)营养和肉质根生长期水分调亏均会引起板蓝根生长指标下降,且下降幅度与亏水水平有关。其中,轻度亏水处理对生长无显著影响,而中度和重度亏水处理则会显著影响板蓝根的生长,如株高和根系形态等。

(2)营养生长期与肉质根生长期耗水量和耗水强度均较大,肉质根成熟期次之,苗期最小,耗水模数依次在 32.92%,32.85%,16.33%,9.42%以上。不同生育期亏水处理均显著降低板蓝根耗水量,且耗水量随亏水程度的增大而减少。

(3)板蓝根营养生长期、肉质根生长期轻中度连续亏水(V_1G_1 、 V_1G_2 和 V_2G_1)的靛蓝、靛玉红、(R,S)-一告依春含量分别比对照 CK 显著增加 3.26%~9.62%,1.03%~4.95%。4.58%~7.92%,而重度亏水处理的的有效成分含量则有所降低。表明重度亏水处理对板蓝根有效成分的积累不利,而轻度和中度水分亏缺均可提升其含量,且亏水水平越高含量越高,特别是处理 V_1G_2 。

(4)营养生长期轻度亏水不会显著降低板蓝根产量,同时能提升其水分利用效率,而中度和重度亏水则会导致产量和水分利用效率显著下降。

综合分析可知,在板蓝根营养生长期和肉质根生长期轻度连续亏水处理,即营养生长期和肉质根生长期土壤相对含水率为65%~75%,其余生育期土壤相对含水率为75%~85%,不但能获得较高的产量和水分利用效率,且有效改善了品质,是河西冷凉灌区板蓝根种植的最佳灌水策略。然而,本试验仅对板蓝根营养和肉质根生育期2个阶段实施亏水灌溉进行了研究,而对苗期和营养生长期亏水、交替亏水及水肥共同作用下板蓝根产量和品质的影响还有待更进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘小飞,费良军,段爱旺,等.调亏灌溉对冬小麦产量和品质及其关系的调控效应[J].水土保持学报,2019,33(3):276-282,291.
- [2] 薛洁.崂山豆科药用植物资源调查与决明栽培过程中水分胁迫对其品质的调控研究[D].山东 青岛:青岛大学,2016.
- [3] 王泽义,张恒嘉,王玉才,等.马铃薯膜下滴灌水肥一体化研究进展[J].农业工程,2018,8(10):86-89.
- [4] Li X B, Kang Y H, Wang X M. Response of soil properties and vegetation to reclamation period using drip irrigation in coastal saline soils of the Bohai Gulf [J]. Paddy and Water Environment, 2019, 17(4): 803-812.
- [5] 黄兴法,李光永.地下滴灌技术的研究现状与发展[J].农业工程学报,2002,35(2):176-181.
- [6] Zhang H M, Xiong Y W, Huang G H, et al. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District [J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 205-214.
- [7] 杜嘉,张恒嘉,张明,等.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯水分生产函数及灌溉制度优化[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):158-164,177.
- [8] 郑建华,王军,黄冠华,等.膜下滴灌条件下调亏灌溉对洋葱产量和水分利用效率的影响[C]//中国农业工程学会.现代节水高效农业与生态灌区建设(上).昆明:云南大学出版社,2010:481-489.
- [9] 张芮,成自勇.调亏对膜下滴灌制种玉米产量及水分利用效率的影响[J].华南农业大学学报,2009,30(4):98-101.
- [10] 申孝军,陈红梅,孙景生,等.调亏灌溉对膜下滴灌棉花生长、产量及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2010,29(1):40-43.
- [11] 曹艺雯,屈仁军,王磊,等.减量施氮对菘蓝生长及药材质量的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):765-772.
- [12] 米永伟,王国祥,龚成文,等.盐胁迫对菘蓝幼苗生长和抗性生理的影响[J].草业学报,2018,27(6):43-51.
- [13] 王恩军,陈垣,韩多红,等.菘蓝农艺性状与药材产量的相关和通径分析[J].核农学报,2018,32(2):399-406.
- [14] 李文明,施炯林,韩辉生,等.节水灌溉制度对板蓝根耗水特征及产量的影响[J].灌溉排水学报,2007,26(6):106-109.
- [15] 许会芹,何立巍,侯宪邦.板蓝根乙酸乙酯部位抗病毒活性组分及相关化学成分研究[J].南京中医药大学学报,2019,35(4):465-470.
- [16] Li J P, Yuan Y, Zhang W Y, et al. Effect of Radix isatidis polysaccharide on alleviating insulin resistance in type 2 diabetes mellitus cells and rats [J]. The Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2019, 71(2): 220-229.
- [17] 王世杰,张恒嘉,巴玉春,等.调亏灌溉对膜下滴灌辣椒生长及水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):31-38.
- [18] 杜宗绪,刘英,高嗣慧.板蓝根栽培与贮藏加工新技术[M].1版.北京:中国农业出版社,2005:7-10.
- [19] 国家药典委员会.中华人民共和国药典(一部)[S].北京:中国医药科技出版社,2010:20-21.
- [20] 鲁建江,王莉,顾承志,等.板蓝根多糖的提取及含量测定[J].广东药学,2001(4):16-18.
- [21] 崔婷茹,于慧敏,李会彬,等.干旱胁迫及复水对狼尾草幼苗生理特性的影响[J].草业科学,2017,34(4):788-793.
- [22] 王玉才,张恒嘉,邓浩亮,等.调亏灌溉对菘蓝水分利用及产量的影响[J].植物学报,2018,52(3):322-333.
- [23] 孟兆江,段爱旺,王晓森,等.调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):99-104.
- [24] 王龙.调亏灌溉条件下大豆耗水规律与水分利用效率的试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.
- [25] 邱新强,路振广,张玉顺,等.不同生育时期干旱对夏玉米耗水及水分利用效率的影响[J].中国农学通报,2013,29(27):68-75.
- [26] 王玉才,张恒嘉,邓浩亮,等.调亏灌溉下菘蓝耗水量变化特征[J].水土保持通报,2019,39(2):167-171.
- [27] 王贺辉,赵恒,高强,等.温室番茄滴灌灌水指标试验研究[J].节水灌溉,2005(4):22-23,25.
- [28] 张步舛.河西绿洲灌区春小麦调亏灌溉试验研究[J].中国生态农业学报,2008,16(1):35-40.
- [29] 邓浩亮,张恒嘉,李福强,等.河西绿洲菘蓝生长、光合特性及品质对膜下滴灌调亏的响应[J].水土保持学报,2018,32(3):321-327.
- [30] 司灿,张君毅,徐护朝.药用植物在干旱胁迫下生长代谢变化规律及应答机制的研究进展[J].中国中药杂志,2014,39(13):2432-2437.
- [31] 于浩滢,徐志超,闵伟红,等.干旱胁迫影响药用植物品质的分子机制研究[J].世界科学技术—中医药现代化,2018,20(9):1650-1658.
- [32] 段飞,杨建雄,周西坤,等.逆境胁迫对菘蓝幼苗靛玉红含量的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):111-114,120.
- [33] 何玉杰.菘蓝规范化栽培技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [34] 张恒嘉,李晶.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J].农业机械学报,2013,44(10):143-151.
- [35] 魏永霞,马瑛瑛,刘慧,等.调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J].农业机械学报,2018,49(3):252-260.