

河西绿洲苕蓝生长、光合特性及品质对膜下滴灌调亏的响应

邓浩亮^{1,3}, 张恒嘉¹, 李福强¹, 王玉才¹, 周宏^{2,3}, 邓展瑞⁴, 浩楠⁴

(1. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 3. 兰州大学生命科学学院干旱农业生态研究所, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000; 4. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070)

摘要: 通过苕蓝的水分控制试验(2016年), 研究了不同生育期不同梯度调亏灌溉对河西绿洲苕蓝生长、光合特性及产量品质的影响。试验以河西走廊中部张掖市水务局国家重点灌溉试验站为平台, 甘肃农业大学中草药系自繁苕蓝种子为供试材料, 采用不同生育期和不同梯度调亏灌溉方式二因素随机区组试验设计, 共9个处理。在每个生育期测定苕蓝光合参数, 收获后测定新鲜板蓝根产量及品质, 为河西绿洲灌区合理种植和提高苕蓝产量品质及可持续发展提供理论依据。结果表明: (1) 营养生长和肉质根生长期水分亏缺显著降低了苕蓝叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度, 且降幅随水分亏缺程度加大而增大。(2) 水分亏缺造成苕蓝产量降低, 调亏处理中肉质根成熟期轻度水分亏缺产量最高(7 342.05 kg/hm²), 较充分灌溉降低5.32% ($P>0.05$)。 (3) 苗期轻度水分亏缺水分利用效率最高(2.14 kg/m³), 肉质根成熟期轻度水分亏缺次之。(4) 肉质根成熟期轻度调亏处理的苕蓝综合品质最优, 其苕蓝靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春含量比生育期充分灌溉提高了0.09, 0.41, 0.007 8 mg/g, 但多糖含量下降3.37 mg/g。因此, 综合考虑苕蓝产量、水分利用效率及品质等指标, 肉质根成熟期进行轻度调亏, 即该时期土壤相对含水率为60%~90%, 可以作为河西走廊绿洲灌区苕蓝最优栽培灌溉的一种方式。

关键词: 调亏灌溉; 生长指标; 光合特性; 品质; 苕蓝

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0321-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.048

Responses of Growth, Photosynthetic Characteristics and Quality of Isatis in Hexi Corridor to Mulched Drip Irrigation Under Water Deficit

DENG Haoliang^{1,3}, ZHANG Hengjia¹, LI Fuqiang¹, WANG Yucai¹,

ZHOU Hong^{2,3}, DENG Zhanrui⁴, HAO Nan⁴

(1. College of Water Resources and Hydropower engineering, Gansu Agricultural University/Gansu

Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070; 2. Northwest Institute of

Eco-Environment and Resources Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 3. The Institute of Arid

Agroecology, School of Life Sciences, Lanzhou University, State Key Laboratory of Grassland Agroecology,

Lanzhou 730000; 4. College of Food Science and Engineering Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: The field experiment was carried out to study the effects of different growing stages and different gradient way of regulated deficit irrigation (RDI) on growth, photosynthetic characteristics, yield and quality in *Isatis indigotica* of the Hexi oasis. Field experiments were conducted from 2016 in the National Key Irrigation Experimental Station of Zhangye Water Resources Bureau in Central Hexi Corridor District, from numerous *Isatis indigotica* seeds, bred by the Department of Chinese herbal medicine of Gansu Agricultural University, were used as tested materials. Two-factor randomized blocks were designed with nine treatments, including different growing periods and different gradient way of RDI. Each treatment had three plots as repeats in a completely random-sized design. In each growth period, the photosynthetic parameters of *Isatis indigotica* were determined, and after the harvest, yield and quality index were measured on fresh *Radix Isatis*. The results would provide a theoretical basis for reasonable planting and sustainable development of *Isatis indigotica* in Hexi oasis. The results showed that: (1) In the periods of vegetative stage and fleshy root growth, the water deficit significantly reduced the *Isatis* leaf net photosynthetic rate, transpiration rate and

stomata conductance, and the declines increased with the raising water deficit regulation (WDR) level. (2) The highest yield was achieved under light WDR ($7\,342.05\text{ kg/hm}^2$) in the mature period of the regressed deficit, which was 5.32% lower than that of the full irrigation ($P > 0.05$). (3) The highest utilization efficiency of WDR (2.14 kg/m^3), was followed by mild WDR in the flesh root maturity stage. (4) The quality of Isatis root was greatly improved especially in maturity period by mild WDR. The indigo, indirubin and (R,S)-goitrin content of Isatis root were improved by 0.09 , 0.41 mg/kg and $0.007\,8\text{ mg/g}$, but content of polysaccharide reduced by 3.37 mg/g , respectively. Therefore, considering the yield, water use efficiency and quality, the fleshy root maturity could be implemented with RDI slightly, i. e., the relative water content of the soil was $60\%\sim 90\%$ during this period, which could be used as the optimum way of cultivating irrigation.

Keywords: Regulated deficit irrigation; growth index; photosynthetic characteristics; quality; Isatis (*Isatisindigotica* Fort)

菰蓝 (*Isatisindigotica* Fort.) 又名茶蓝、山蓝等,为十字花科植物,以其干燥根和叶入药,性寒,味苦,清热解毒,凉血利咽^[1]。在我国新疆、内蒙古、甘肃、河北等省份均有栽培,其中甘肃省张掖市以其独特的地理环境和气候条件,产出的菰蓝产量和品质较优,已成为西北著名的道地药材之一。但由于当地灌溉制度不合理,导致菰蓝产量与品质下降,极大制约了菰蓝产业的可持续发展。目前,关于滴灌调亏技术在国内外生产实际中的应用已有大量研究报道,如 Saraiva 等^[2]、Léllis 等^[3]、Greaves 等^[4]、Levin 等^[5]、李昭楠等^[6]、乔延丽等^[7]分别进行了滴灌调亏对西瓜 (*Citrulluslanatus*)、胡萝卜 (*Daucuscarota* L.)、玉米 (*Zea mays* L.)、芒果 (*Mangiferaindica* L.)、葡萄 (*Vitis vinifera* L.)、甜椒 (*Capsicum annuum* var. *grossum*) 等作物生长状况、产量和品质进行研究,证明了合理的滴灌调亏制度具有较好的节水、增产效果,并能有效改善作物品质。在菰蓝栽培种植方面,国内学者先后从栽培方式、追施肥量、灌溉制度等不同角度对菰蓝产量的影响研究^[8-10]。王恩军等^[8]通过研究不同栽培模式、覆膜方式对菰蓝农艺性状指标、产量及品质的影响,表明垄作覆黑膜栽培模式下,菰蓝快速生长持续期最长,根系最发达,产量最高;肖云华等^[9]通过研究不同追施氮肥量对菰蓝的光合参数、外形品质、干物质积累及活性成分含量的影响,表明追施氮肥量为 $675\sim 900\text{ kg/hm}^2$ 时有利于提高菰蓝叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率,同时产量和药用品质最佳。李文明等^[10]通过研究不同灌水定额、灌水次数对菰蓝的耗水特征、产量的影响,发现 2 次灌水时间在 7 月和 8 月上旬、灌溉定额为 $2\,250\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时,产量最大。目前国内外对菰蓝的研究主要集中在对菰蓝药理学活性、含量测定,制剂与工艺等方面^[11-12],对于菰蓝种植方式研究较少且仅集中于对其产量的影响,关于不同生育期和不同梯度膜下滴灌调亏对菰蓝生长状况、生理参数、产量和品质的综合研究更少。

因此,寻求一种合理、高效的灌溉制度,是解决菰蓝产量、水分利用效率和品质下降等问题的关键。本研究以甘肃农业大学中草药系自繁的菰蓝种子为研究对象,借助膜下滴灌技术,通过大田定位试验,综合分析了不同生育期、不同梯度的调亏灌溉对菰蓝生长状况、光合生理参数、产量和品质指标的影响,以期为河西灌区菰蓝高效种植提供技术参考,达到节水增产调质的目的。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 5—10 月在甘肃省张掖市水务局国家重点灌溉试验站 ($100^{\circ}26'\text{ E}$, $38^{\circ}56'\text{ N}$) 进行。该试验区属大陆性干旱气候,海拔约 $1\,482.7\text{ m}$,年均气温 $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年日照时间 $3\,000\text{ h}$,无霜期 128 d 。据 1995—2015 年气象资料显示,该地区年平均降水量为 140 mm ,蒸发量 $2\,000\text{ mm}$,昼夜温差大,干旱频繁。试验地土壤为中壤土,土壤肥力中等, $\text{pH}\,8.4$,耕层土壤田间最大持水量 22.8% ,土壤容重 1.46 g/cm^3 。0—20 cm 耕层土壤有机质含量 13.56 g/kg ,速效磷含量 13.4 mg/kg ,碱解氮含量 61.8 mg/kg ,速效钾含量 190.4 mg/kg 。试验区地下水位埋深较深,盐碱化影响较小。

1.2 试验设计

播前 10 d 对试验小区进行 30 cm 的翻耕处理,人工除去杂草,同时施入尿素 (N 含量 46%) 210 kg/hm^2 ,过磷酸钙 (P_2O_5 含量 12% 、S 含量 10% 、Ca 含量 16%) 340 kg/hm^2 ,氯化钾 (K_2O 含量 60%) 130 kg/hm^2 ,所有肥料都作为基肥在播种时一次施入。供试品种选用甘肃农业大学中草药系自繁的粒大饱满、均匀一致的菰蓝种子,种子纯度 96% 。于 5 月 5 日播种,10 月 21 日收获,播种量为 45.0 kg/hm^2 ,种植密度为 $850\,000\text{ 株/hm}^2$,灌溉方式采用膜下滴灌,每小区面积 55 m^2 ($10\text{ m}\times 5.5\text{ m}$)。试验依不同水分调亏水平和调亏生育期设 8 个水分调控处理 (WD1~WD8),1 个对照 (CK),分别在菰蓝幼苗期、营养生长期、肉质根生长期和根成熟期 4

个生育阶段进行水分调控(表 1)。

表 1 不同试验处理的土壤含水量
(占田间持水率的百分数) 单位: %

处理	苗期	营养	肉质根	肉质根
		生长期	生长期	成熟期
CK	65~100	65~100	65~100	65~100
WD1	60~90	65~100	65~100	65~100
WD2	65~100	60~90	65~100	65~100
WD3	65~100	65~100	60~90	65~100
WD4	65~100	65~100	65~100	60~90
WD5	55~80	65~100	65~100	65~100
WD6	65~100	55~80	65~100	65~100
WD7	65~100	65~100	55~80	65~100
WD8	65~100	65~100	65~100	55~80

注:CK 表示各生育期正常供水;WD1 表示苗期轻度亏水;WD2 表示营养生长期轻度亏水;WD3 表示肉质根生长期轻度亏水;WD4 表示肉质根成熟期轻度亏水;WD5 表示苗期中度亏水;WD6 表示营养生长期中度亏水;WD7 表示肉质根生长期中度亏水;WD8 表示肉质根成熟期中度亏水。下同。

1.3 测定指标

1.3.1 生长指标 苕蓝进入肉质根成熟期后,每个小区选取长势基本一致的 20 株苕蓝定苗,定苗后用精度 0.1 cm 直尺测定株高,用 LAM-B 活体叶面积测量仪(南京东迈科技仪器有限公司)测定叶面积。

1.3.2 生理参数 每个生育期在水分调亏处理后第 5 天进行测定,选取由里至外第 3 片功能叶片中部作为测定部位,用 LI-6400 便携式光合仪在 1 000 μmol/(m²·s)的光子强度下测定叶片的净光合速率(*P_n*)、气孔导度(*G_s*)和蒸腾速率(*T_r*)等生理参数日变化,各小区测定 5 株,结果取各处理平均值。

1.3.3 产量和根系形态特性测定 待苕蓝成熟后,每个小区单独收获测产计算,3 个重复的平均值为各处理的实际产量。用精度为 0.01 的电子秤进行称量,并换算为标准产量(kg/hm²)。同时各小区将定苗的 20 株苕蓝收获,带回室内冲洗、晾干。将根部从植株上剪下,采用精度为 0.1 cm 直尺测定主根长,采用精度为 0.01 mm 游标卡尺测定主根直径(芦头下 1 cm 处的直径),结果取各处理均值。

1.3.4 水分利用效率^[13]

$$R_{WUE}=Y/E_{Ta}$$
$$I_{WUE}=Y/I$$

式中:*R_{WUE}* 表示苕蓝全生育期水分利用效率(kg/m³);*I_{WUE}* 表示苕蓝全生育期灌溉水利用效率(kg/m³);*Y* 表示苕蓝单位面积产量(kg/hm²);*E_{Ta}* 表示苕蓝全生育期实际单位面积耗水量(m³/hm²);*I* 表示全生育期单位面积灌水量(m³/hm²)。

1.3.5 品质测定 靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春含量均采用高效液相色谱法^[14-15]测定。LC-10AT_{VP} 高效液相色谱仪色谱条件:SPD-10A_{VP}(UV-VIS)检测器,色

谱柱为 Agilent Zorbax SB-C18 (100 mm × 4.6 mm, 3.5 μm),以甲醇-0.1%甲酸溶液为流动相;流速为 1.0 mL/min,自动样器进样,进样量为 20 μL;检测波长为 280 nm,柱温箱柱温为 25 ℃。苕蓝根中多糖的测定方法:采用酚-硫酸比色法^[16]测定。

1.4 数据统计分析

利用 Excel 2010 对所测数据进行计算,利用 SPSS 19.0 软件中 Duncan 多重比较法比较各处理相关数据差异的显著性,Origin 8.0 作图,各表中出现的数据均为平均值。

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌调亏对苕蓝生长指标的影响

由表 2 可知,不同梯度水分调亏对苕蓝各生长指标影响程度不同。与 CK 相比,各处理株高均不同程度的降低,但 WD1、WD4 和 WD8 对株高的影响并不显著,而其他调亏处理对株高的影响则达到显著水平。CK 的平均株高为 31.87 cm,而 WD2、WD6 分别为 26.15、22.61 cm,降低幅度达 17.95%和 29.06%;叶面积指数变化趋势与株高基本一致,CK 的叶面积指数最大,达到 8.30,WD1 次之,WD2 和 WD6 下降幅度最为显著,分别下降 23.61%和 34.58%(*P*<0.05)。说明在苕蓝营养生长期水分亏缺较其他生育期水分亏缺对株高和叶面积指数影响更大,且影响程度随着调亏幅度的增加而增加。水分调亏对苕蓝根系生长影响程度不同,WD1 和 WD5 主根长度较 CK 分别增加 6.58%和 0.48%,其余处理主根长度减少幅度亦不相同,其中 WD3、WD6 和 WD7 减少幅度显著,分别为 9.11%,12.77%,13.56%(*P*<0.05);各处理均造成主根直径不同程度降低,降低幅度为 1.56%~18.75%,其中尤以肉质根生长期轻度和中度水分调亏处理 WD3 和 WD7 最显著,分别为 14.06%和 18.75%(*P*<0.05),其余处理之间无显著差异。说明在苕蓝肉质根生长期水分亏缺较其他生育期水分亏缺对主根长和主根直径影响更大,且中度水分亏缺影响程度大于轻度水分亏缺。

表 2 膜下滴灌调亏对苕蓝生长指标的影响

处理	株高/ cm	叶面积 指数	主根长/ cm	主根 直径/cm
CK	31.87±1.15a	8.30±0.42a	22.94±1.14ab	1.92±0.058a
WD1	31.67±2.33ab	7.94±0.35ab	24.45±0.95a	1.89±0.076ab
WD2	26.15±1.47c	6.34±0.39c	21.52±1.37bc	1.76±0.082bcd
WD3	29.60±1.14b	7.69±0.30ab	20.85±1.40bc	1.65±0.077de
WD4	31.07±2.83ab	7.87±0.28ab	22.52±1.65abc	1.86±0.102abc
WD5	29.54±1.05b	7.74±0.44ab	23.05±0.84ab	1.85±0.088abc
WD6	22.61±1.19d	5.43±0.21d	20.01±1.23c	1.69±0.093cde
WD7	28.37±1.22bc	7.04±0.57bc	19.83±1.01c	1.56±0.064e
WD8	30.45±2.10ab	7.38±0.41b	22.22±0.66b	1.79±0.070a

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示差异显著(*P*<0.05)。下同。

2.2 膜下滴灌调亏对苕蓝叶片光合气体交换参数的影响

2.2.1 净光合速率 净光合速率(P_n)的大小可以反映出苕蓝叶片光合作用的强弱。调亏处理下苕蓝叶净光合速率从苗期到肉质根生长期表现上升趋势,肉质根生长期达到最大值,随后开始下降,呈单峰曲线变化(图 1)。苗期,轻度水分调亏 WD1 处理的 P_n 略高于 CK,为 1.14%,而中度水分调亏 WD5 较 CK 降低 1.23%($P>0.05$);营养生长期,WD1 和 WD5 在复水后 P_n 出现补偿效应而超过 CK,分别达 18.32,18.18 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而该生育期轻度和中度水分调亏 WD2、WD6 的 P_n 均呈降低趋势,且 WD6 降低幅度达 10.39%($P<0.05$);肉质根生长期,WD2 和 WD6 在复水后 P_n 均表现出一定程度的补偿效应,但仍低于 CK,分别为 18.43,18.10 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而轻度和中度水分调亏 WD3、WD7 的 P_n 在该生育期内降低幅度最大,均显著小于同期 CK 的 11.75%和 16.55%($P<0.05$);肉质根成熟期,轻度水分调亏 WD4 和中度水分调亏 WD8 较 CK 分别下降 0.20%和 1.69%($P>0.05$),而 WD3 复水后 P_n 略高于 CK,仅为 0.84%。

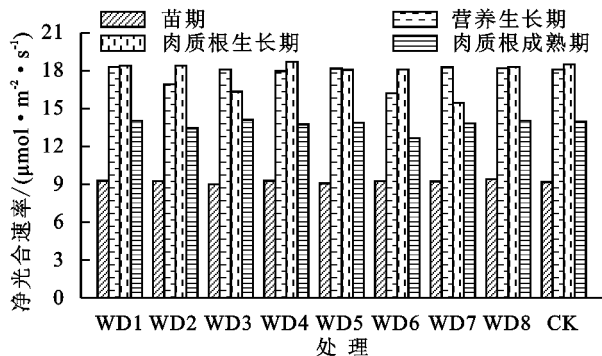


图 1 膜下滴灌调亏对苕蓝净光合速率的影响

2.2.2 气孔导度 由图 2 可知,随着生育期的延长,各处理苕蓝的气孔导度(G_s)逐渐增大,但是不同处理间表现不同。以苗期、营养生长期和肉质根生长期表现尤为突出,而根成熟期调亏处理对 G_s 影响最小。苗期,轻度水分调亏处理 WD1 的 G_s 较同期 CK 降低 16.02%,而同期中度水分调亏处理 WD5 的 G_s 仅为 0.10 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,与 CK 差异显著($P<0.05$);营养生长期,WD1 和 WD5 在复水后 G_s 均表现出一定程度的补偿效应,且 WD1 补偿效应明显,达 0.32 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较同期 CK 提高 12.64%($P<0.05$)。轻度和中度水分调亏处理 WD2、WD6 该时期 G_s 分别为 0.19,0.15 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较同期 CK 降低 30.69%和 48.01%($P<0.05$);肉质根生长期,WD2 复水后 G_s 高于 CK,为 5.65%,但与 CK 无显著差异。同时,该生育期轻度和中度水分调亏处理 WD3、WD7 的 G_s 均显著小于同期 CK 35.44%和 21.74%($P<0.05$);

肉质根成熟期,WD3、WD7 复水后 G_s 有一定程度的补偿效应,但补偿幅度不显著,仍低于同期 CK。轻度和中度水分调亏处理 WD4、WD8 的 G_s 分别为 0.79,0.74 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别较同期 CK 降低 9.37%和 14.95%($P<0.05$)。

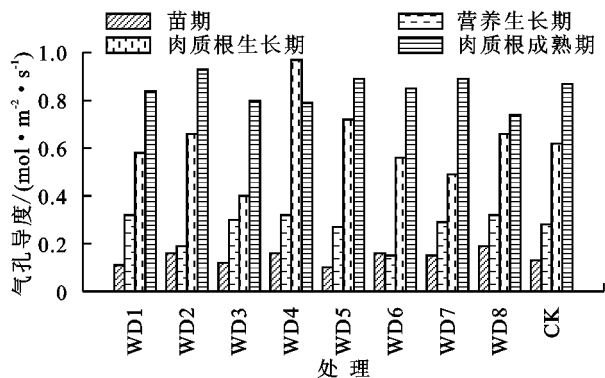


图 2 膜下滴灌调亏对苕蓝气孔导度的影响

2.2.3 蒸腾速率 调亏处理下苕蓝各生育期叶片蒸腾速率(T_r)从苗期到营养生长期表现上升趋势,随后开始下降,在营养生长期达到最大值,呈单峰曲线变化(图 3)。水分调亏对苕蓝整个生育期内叶片蒸腾速率均有影响,肉质根成熟期亏水对苕蓝叶片蒸腾速率影响不显著,而苗期、营养生长期和肉质根生长期对亏水对该生育阶段内 T_r 影响显著,且随着水分调亏程度的增加, T_r 降低幅度增加。

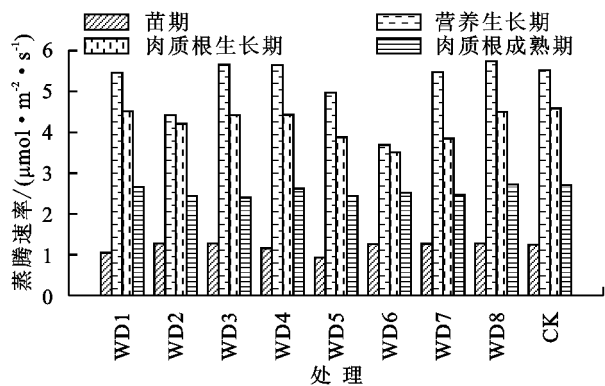


图 3 膜下滴灌调亏对苕蓝蒸腾速率的影响

苗期,轻度和中度水分调亏处理 WD1 和 WD5 分别为 1.05,0.93 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 分别降低 15.27%和 25.40%,且差异显著($P<0.05$);营养生长期,WD1 和 WD5 在复水后 G_s 与同期 CK 无显著差异,表现出一定程度的补偿效应。该时期轻度和中度水分调亏处理 WD2 和 WD6 分别为 4.42,3.69 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 分别降低 19.94%和 33.18%,差异显著($P<0.05$);肉质根生长期,WD2 复水后叶片 G_s 较 CK 低 8.19%,与 CK 无显著差异($P>0.05$),而 WD6 较 CK 低 23.62%,差异显著($P<0.05$)。轻度水分调亏处理 WD3 较 CK 降低 3.71%,与 CK 无显著差异($P>0.05$),而中度水分调亏处理 WD7 为 3.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 降低 16.15%,

差异显著 ($P<0.05$);肉质根成熟期,轻度和中度水分调亏处理 WD4 和 WD8 与 CK 之间无差异显著 ($P>0.05$),为 $2.62, 2.47 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 分别降低 3.50% 和 8.86% 。

2.3 膜下滴灌调亏对苕蓝品质的影响

由表 3 可知,适时适度的水分调亏能够在不影响多糖含量的同时增加苕蓝中靛蓝、靛玉红、(R,S)一告依春含量,从而提高苕蓝品质,且随着水分调亏程度的增加,苕蓝品质越高。苗期轻度和中度水分调亏处理 WD1、WD5 靛蓝含量分别为 $5.82, 5.85 \text{ mg/kg}$,分别较 CK 降低 1.02% 和 0.51% ,但无显著差异 ($P>0.05$),其余生育期进行调亏处理均可增加苕蓝靛蓝含量,增幅为 $0.51\%\sim 2.55\%$,其中尤以肉质根成熟期中度水分调亏处理 WD8 含量最高,达 6.03 mg/kg ;苗期中度水分调亏处理 WD5 造成苕蓝中靛玉红含量降低 1.74% ,其余生育期水分调亏可增加靛玉红含量,增幅为 $0.93\%\sim 5.10\%$ 。其中,肉质根成熟期轻度和中度水分调亏处理 WD4 和 WD8 靛玉红含量增加幅度最高,增幅分别达 $0.41, 0.44 \text{ mg/kg}$;水分调亏处理对(R,S)一告依春影响与靛蓝和靛玉红不同,在苗期轻度和中度水分调亏处理 WD1 和 WD5 (R,S)一告依春含量减少 0.98% 和 2.64% ,与 CK 无显著差异 ($P>0.05$),在营养生长期轻度和中度水分调亏处理 WD2 和 WD6 (R,S)一告依春含量减少幅度较大,分别为 4.43% 和 12.07% ,与 CK 差异显著 ($P<0.05$),而在肉质根生长期和肉质根成熟期进行水分调亏有利于(R,S)一告依春含量的提高,处理 WD3、WD4、WD7 和 WD8 较 CK 分别增加 $6.88\%, 3.49\%, 7.02\%, 7.11\%$;除苗期调亏处理外,其他调亏灌溉处理均使苕蓝中多糖含量下降,降幅为 $2.67\%\sim 17.02\%$,在苗期和肉质根成熟期营养生长期进行轻度水分调亏多糖含量与 CK 无显著差异 ($P>0.05$),但在营养生长期和肉质根生长期则降幅较大。

2.4 膜下滴灌调亏对苕蓝产量和水分利用效率的影响

由表 4 可知,不同生育期水分调亏对苕蓝全生育期耗水量、产量、灌溉水利用效率和水分利用效率影

响不同。苗期中度水分调亏处理 WD5 全生育期耗水量最少,分别为 $3\ 237.3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,较 CK 降低 15.97% ,苗期轻度水分调亏处理 WD1 次之,较 CK 降低 11.09% ($P<0.05$),其余处理全生育期耗水量与 CK 无显著差异;水分调亏均造成苕蓝产量降低,调亏处理中,肉质根成熟期轻度水分调亏处理 WD4 产量最高,达 $7\ 342.05 \text{ kg}/\text{hm}^2$,较 CK 降低 5.32% ($P>0.05$),肉质根生长期中度水分调亏处理 WD7 最低,仅为 $5\ 075.77 \text{ kg}/\text{hm}^2$,较 CK 降低 34.55% ($P>0.05$)。WD1 产量较 CK 降低 5.37% ($P>0.05$),其余生育期水分调亏处理后产量均显著下降,且中度水分调亏处理产量降幅大于轻度水分调亏处理;苗期轻度和中度水分调亏处理 WD1、WD5 灌溉水利用效率最高,分别比 CK 提高 27.52% 和 29.19% ,营养生长期轻度水分调亏处理 WD2 次之,较 CK 提高 10.17% ($P<0.05$),而 WD3、WD7、WD8 较 CK 分别降低 $8.46\%, 23.82\%, 8.82\%$,且差异显著 ($P<0.05$);WD1 可显著提高苕蓝水分利用效率,较 CK 增加 6.59% ($P<0.05$),尽管 WD2、WD4 水分利用效率较 CK 有一定幅度的提高,但增加幅度较小 ($P>0.05$),而 WD3、WD5、WD6、WD7、WD8 均造成水分利用效率降低,降幅为 $1.17\%\sim 30.40\%$,其中 WD7 降幅最为显著。表明,苗期、营养生长期和肉质根成熟期轻度水分调亏可提高灌溉水利用效率和水分利用效率,但随着水分调亏程度的增加,灌溉水利用效率和水分利用效率呈递减趋势。

表 3 膜下滴灌调亏对苕蓝品质的影响

处理	靛蓝/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	靛玉红/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	(R,S)一告依春/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	多糖/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
CK	$5.88\pm 0.03\text{b}$	$8.62\pm 0.13\text{bc}$	$0.2237\pm 0.0053\text{c}$	$126.05\pm 2.60\text{a}$
WD1	$5.82\pm 0.09\text{b}$	$8.70\pm 0.09\text{b}$	$0.2311\pm 0.0024\text{bd}$	$72.82\pm 3.77\text{a}$
WD2	$5.91\pm 0.08\text{ab}$	$8.82\pm 0.14\text{ab}$	$0.2138\pm 0.0045\text{d}$	$120.54\pm 1.04\text{b}$
WD3	$5.93\pm 0.01\text{ab}$	$8.89\pm 0.07\text{a}$	$0.2391\pm 0.0036\text{a}$	$119.42\pm 2.63\text{b}$
WD4	$5.97\pm 0.05\text{a}$	$9.03\pm 0.11\text{a}$	$0.2315\pm 0.0042\text{bd}$	$22.68\pm 3.58\text{ab}$
WD5	$5.85\pm 0.05\text{b}$	$8.47\pm 0.05\text{c}$	$0.2178\pm 0.0063\text{cd}$	$20.85\pm 3.19\text{b}$
WD6	$5.94\pm 0.07\text{ab}$	$8.84\pm 0.10\text{ab}$	$0.1967\pm 0.0070\text{e}$	$111.37\pm 2.35\text{c}$
WD7	$6.00\pm 0.04\text{a}$	$8.99\pm 0.12\text{a}$	$0.2394\pm 0.0027\text{a}$	$104.59\pm 2.27\text{d}$
WD8	$6.03\pm 0.04\text{a}$	$9.06\pm 0.15\text{a}$	$0.2396\pm 0.0033\text{a}$	$115.17\pm 4.52\text{bc}$

表 4 膜下滴灌调亏对苕蓝产量和全生育期水分利用状况的影响

处理	降水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	全生育期灌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	全生育期耗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌溉水利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	1874	1898	3852.7a	7754.70a	4.09c	2.01b
WD1	1874	1407	3425.3bc	7338.41ab	5.22a	2.14a
WD2	1874	1565	3498.2ab	7051.61b	4.51b	2.02ab
WD3	1874	1683	3653.6ab	6301.39c	3.74d	1.72c
WD4	1874	1660	3608.2ab	7342.05ab	4.42b	2.03ab
WD5	1874	1217	3237.3c	6430.52c	5.28a	1.99b
WD6	1874	1592	3611.7ab	6112.56c	3.84cd	1.69c
WD7	1874	1629	3628.1ab	5075.77e	3.12e	1.40d
WD8	1874	1511	3473.8abc	5634.90d	3.73d	1.62c

3 讨论

相关研究^[17]证明,植物在生长过程中受到干旱胁迫时,其体内生理代谢会发生变化,导致生长状况也随之变化。膜下滴灌调亏技术对菘蓝生长有重要影响^[15]。本试验中,在菘蓝不同生育期进行轻度和中度水分亏缺对其地上生长产生抑制,株高和叶面积指数均不同程度的降低。与 CK 相比,菘蓝营养生长期水分亏缺处理 WD2、WD6 对菘蓝的株高和叶面积指数分别降低 17.95%、23.61%和 29.06%、34.58%,且影响程度随着调亏幅度的增加而增加。相关研究^[18]表明,适时适度的水分亏缺对作物根系生长有明显促进效应,且复水后对根系有不同程度的补偿生长效应。本研究表明,在菘蓝苗期水分亏缺处理 WD1、WD5 可增加主根长,增加幅度分别为 6.58%、0.48%,这是由于苗期是菘蓝扎根生长的基础生育期,适度干旱胁迫使根系向下深入而获取足量的水分,从而提高其抗旱能力。而在菘蓝肉质根生长期水分亏缺不利于主根的生长,这是由于该生育期内根系细胞处于快速增殖时期,此时水分亏缺抑制细胞分裂而造成根系生长缓慢,且复水后产生的补偿效应不足以弥补亏水对根系生长产生的影响。

水分亏缺可造成植物叶绿素含量下降、气孔关闭,限制 CO_2 的吸收,叶绿体片层膜体系结构改变,光合系统 II 活性减弱,甚至丧失,光合磷酸化解偶联,已合成的叶绿素分解,叶绿素合成速度减慢,光合酶活性降低,进而影响光合产物积累^[19-20]。李翠等^[19]研究发现,不同生育期水分调亏均可引起作物叶片净光合速率降低,且随着胁迫程度的加剧,降低幅度增大,但恢复供水后,作物叶面积会受激发而继续增大,其净光合速率会逐渐恢复正常。于文颖等^[20]研究发现,水分胁迫导致作物叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度下降以及光合速率日变化的峰值提前,且该响应具有明显的滞后性。本研究表明,菘蓝营养生长期和肉质根生长期内进行水分亏缺(WD2、WD6、WD3、WD7)可显著降低 P_n (6.48%~16.55%)、 G_s (21.74%~48.01%)和 T_r (3.71%~33.18%),且影响程度随着调亏幅度的增加而增加。气孔在植物光合和蒸腾作用中有重要作用,气孔开闭直接影响植物光合和蒸腾,在菘蓝某一时期缺水时,气孔导度下降,复水后出现一定的补偿作用,与净光合速率变化趋势基本一致,这是由于在土壤缺水时气孔通过部分或全部关闭使蒸腾速率降低,减少水分散失的同时,也减少了 CO_2 的进入,从而导致光合速率的下降^[21-22]。作物不同生育期进行水分亏缺对产量和水分利用效

率的影响不同。申孝军等^[23]研究表明,适时适度的水分亏缺有利于作物产量、灌溉水利用效率和水分利用效率的提高。本试验表明,苗期和肉质根成熟期轻度水分亏缺处理 WD1、WD4 对产量影响不显著,与 CK 相比,灌溉水利用效率和水分利用效率分别提高 27.52%、8.41%和 6.59%、1.23%,而肉质根生长期水分调亏 WD3、WD7 产量和水分利用效率显著降低 18.74%、34.55%和 14.19%、30.40%。肉质根生长期是菘蓝需水的关键生育期,在该时期水分亏缺不利于产量形成和水分的高效利用,因此在该生育阶段内不适宜调亏灌溉。

中药材品质受多因素影响,如气候因素、土壤因素、地形因素和生物因素等,其中水分和温度是对药用植物生长影响较为突出的环境因素。药用植物人工栽培时其产量取决于初生代谢产物的积累,而质量则取决于次生代谢产物的积累,次生代谢产物在植物抗旱机制中发挥着重要作用,同时也是中药材发挥临床疗效的物质基础^[24]。本研究表明,作为药用植物,板蓝根其有效成分靛蓝、靛玉红、告依春均为次生代谢产物,在肉质根成熟期水分亏缺处理 WD7、WD8 可显著提高菘蓝中靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春含量,且随着水分亏缺程度越高,有效成分积累越多。而在苗期水分亏缺 WD1、WD5 不利于菘蓝有效成分的积累,且随着水分亏缺程度增加,品质影响越大,这与谭勇等^[25]的研究结果基本一致。而多糖为初生代谢产物,其含量积累需要良好的环境条件,水分亏缺直接影响多糖积累,尤其在轻度水分亏缺处理中多糖含量较 CK 降幅较大,直接影响板蓝根品质。因此,确定既能促进次生代谢又不影响初生代谢产物积累的干旱胁迫阈值以及最佳调亏时期,能够为菘蓝规范化种植过程中合理控制水分提供依据。

4 结论

(1)不同生育期水分调亏均可引起菘蓝叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度降低,且降低程度与水分亏缺程度和生育阶段有关。其中,营养生长期和肉质根生长期水分亏缺对菘蓝叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度降低程度最为显著,且水分亏缺程度越高,降幅越大。

(2)苗期和肉质根成熟期轻度水分调亏不会显著降低菘蓝产量,而营养生长期和肉质根生长期轻度和中度水分调亏显著降低菘蓝产量。苗期、营养生长期和肉质根成熟期轻度水分调亏能够提高菘蓝水分利用效率,而肉质根生长期轻度和中度水分调亏、营养生长期和肉质根成熟期中度水分调亏显著降低菘蓝

水分利用效率。

(3)水分调亏能够显著提高苕蓝品质,且亏缺程度越高,综合品质越好。肉质根成熟期进行水分调亏后苕蓝品质显著高于其他生育期水分调亏。

在苕蓝肉质根成熟期轻度水分胁迫的调亏灌溉方法,即在肉质根成熟期保持土壤相对含水率为60%~65%、其余生育期土壤相对含水率为65%~70%,既能平衡苕蓝的营养生长与生殖生长,又能提高灌溉水利用效率和水分利用效率,在稳产的同时,还能获得较好的品质。因此,综合考虑苕蓝生长、产量、水分生产效率及品质等指标,苕蓝肉质根成熟期轻度水分胁迫的调亏灌溉方式是河西走廊苕蓝栽培灌溉方式中的首选。

参考文献:

- [1] 唐晓清,肖云华,赵雪玲,等.不同氮素形态及其比例对苕蓝生物学特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):129-138.
- [2] Saraiva K R, Bezerra F M L, Costa S C, et al. Regulated deficit irrigation and different mulch types on fruit quality and yield of watermelon [J]. Revista Caatinga, 2017, 30(2): 437-446.
- [3] Lellis B C, Carvalho D F, Martínez-Romero A, et al. Effective management of irrigation water for carrot under constant and optimized regulated deficit irrigation in Brazil [J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 294-305.
- [4] Greaves G E, Wang Y M. Effect of regulated deficit irrigation scheduling on water use of corn in southern Taiwan tropical environment [J]. Agricultural Water Management, 2017, 188: 115-125.
- [5] Levin A G, Peres M, Noy M, et al. The response of field-grown mango (cv. Keitt) trees to regulated deficit irrigation at three phenological stages [J]. Irrigation Science, 2017, 35: 1-11.
- [6] 李昭楠,李唯,姜有虎,等.西北干旱区戈壁葡萄膜下滴灌需水量和灌溉制度[J].水土保持学报,2011,25(5):247-251.
- [7] 乔延丽,安进强,张芮,等.膜下滴灌水分调控对甜椒生长和产量的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):237-241.
- [8] 王恩军,陈垣,韩多红,等.栽培方式对苕蓝农艺性状及产量和品质的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(11):1661-1670.
- [9] 肖云华,吕婷婷,唐晓清,等.追施氮肥量对苕蓝根的外形品质、干物质积累及活性成分含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):437-444.
- [10] 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.
- [11] 马毅敏,李娜,刘承伟,等.板蓝根不同提取部位抗炎镇痛活性比较研究[J].中草药,2014,45(17):2517-2521.
- [12] 胡彦君,王雅琪,李冰涛,等.板蓝根制剂制备过程中成分变化及其药效相关性研究[J].中草药,2016,47(9):1515-1519.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王玉才,张恒嘉,邓浩亮.不同生育期调亏滴灌对苕蓝光合特性及品质的影响[J].核农学报,2017,31(9):1847-1855.
- [16] 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,2001,11(4):16-18.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李翠,赵伟洁,张大爱,等.水分胁迫对糜子物质生产及光合特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(1):89-95.
- [20] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9):2902-2909.
- [21] 安玉艳,梁宗锁.植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J].应用生态学报,2012,23(10):2907-2915.
- [22] Wang Y Y, Zhou R, Zhou X. Endogenous levels of ABA and cytokinins and their relation to stomatal behavior in dayflower (*Commelina communis* L.) [J]. Journal of Plant Physiology, 1994, 144: 45-48.
- [23] 申孝军,孙景生,张寄阳,等.水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2014,45(6):150-160.
- [24] 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.
- [25] 谭勇,梁宗锁,董娟娥,等.水分胁迫对苕蓝生长发育和有效成分积累的影响[J].中国中药杂志,2008,33(1):19-22.