文章编号:1000-7601(2019)04-0066-09 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.04.09

调亏滴灌下菘蓝的品质综合评价

王玉才,李福强,邓浩亮,张恒嘉,康燕霞

(甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘　要:于 2016、2017 年在张掖市民乐县益民灌溉试验站开展了菘蓝不同生育期水分亏缺试验,在菘蓝的营养生长期和肉质根生长期分别进行轻度、中度和重度的调亏灌溉处理,对其品质进行评价。结果表明:重度调亏灌溉(WD3、WD8、WD9)处理的(R,S)-告依春含量较 CK 降低 8.59%~13.23%(P<0.05),而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏(WD4、WD5)有利于 (R,S)-告依春含量的提高,较 CK 增加 5.43%~7.94%;在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏(WD5、WD6、WD7)有利于靛玉红含量的提高,与 CK 差异显著,增幅为 1.7%~5.7%;在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏(WD4、WD5、WD6 和 WD7)有利于靛蓝含量的提高,与 CK 差异显著,增幅 3.6%~9.9%。综合评价表明,综合得分较高的为轻中度连续调亏滴灌(WD4、WD5)。因此,轻中度水分亏缺处理可以提高有效成分靛蓝、靛玉红和告依春的积累,有利于提高菘蓝的品质,重度水分亏缺不利于有效成分的积累。

关键词:调亏滴灌;品质;主成分分析;菘蓝

中图分类号:S274.1;S567.23^{+}9　　**文献标志码**:A

Comprehensive evaluation on *Isatis indigotica* quality under regulated deficit drip-irrigation

WANG Yu-cai, LI Fu-qiang, DENG Hao-liang, ZHANG Heng-jia, KANG Yan-xia

(*College of WaterResources and Hydropower Engineering*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070)

Abstract: The effects of irrigation schedule on photosynthetic characteristics and biological characteristics effect during different growth stages of *Isatis indigotica* were studied in Yimin Irrigation District of Gansu Province in 2016 and 2017. We measured quality of Isatis indigotica for mild, moderate, and severe regulated deficit irrigation in vegetative stages and fleshy root growth stage. The results showed that severe regulated deficit irrigation (WD3, WD8, and WD9) significantly lowered (R, S)-goitrin by 8.59%~13.23% than that of CK (P<0.05). In addition, the content of (R,S)-goitrin was significantly increased in fleshy root growth stage and vegetative stage by water deficit (WD4 and WD5) by 5.43%~7.94%. The effect of light and moderate water deficit treatment (WD5, WD6, and WD7) on indirubin was beneficial to the improvement of indirubin content over that of CK with the increase of 1.7%~5.7%. The light and moderate water deficit treatments (WD4, WD5, WD6, and WD7) significantly increased indigo content by 3.6%~9.9% over CK. The results showed that mild and moderate deficit irrigation (WD4 and WD5) had high comprehensive effects. Therefore, mild-to-moderate water deficit treatments improved the quality of Isatis indigotica by improving the effective components, the indigo, indirubin, and (R, S)-goitrin but severe water deficit was not conducive to the accumulation of active ingredients of Isatis indigotica.

Keywords: regulated deficit irrigation; quality; principal component analysis method; *Isatis indigotica*

近年来,随着人们对中草药的需求不断增加,对其品质的要求也逐渐提高。中药的主要成分通常是次生代谢产物。菘蓝(*Isatis indigotica* Fort.)别名茶蓝、板蓝根,为十字花科的二年生草木植物,具

收稿日期:2018-07-09　　**修回日期**:2018-10-23

基金项目:甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA073);甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金(GSAU-STS-1744);国家自然科学基金(51669001);甘肃农业大学水利水电工程学院青年基金(No.SLSDXY-QN2018-02);甘肃省自然基金(1606BJYA251)

作者简介:王玉才(1985-),男,甘肃景泰人,博士,讲师,主要从事高效节水灌溉与农业生态研究。E-mail:wangyucai118@163.com

通信作者:张恒嘉(1974-),男,甘肃天水人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与农业生态研究。E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn

有清热解毒,预防感冒、利咽之功效。菘蓝的主要成分包括生物碱类、有机酸类及苷类化合物等,其中的主要有效成分有(R,S)-告依春、靛蓝和靛玉红等,还有一些营养成分,如丁酸、脯氨酸、甘氨酸、苏氨酸等十几种氨基酸,这使得菘蓝不仅具有抗炎、抗菌、抗病毒等作用,还有增强免疫力等作用。菘蓝在我国内蒙古、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,产出的菘蓝已成为甘肃著名的道地药材之一。由于当地灌溉不合理等,导致菘蓝产量不高,极大制约了菘蓝产业的可持续发展。

水分是实现作物品质改善的介质,而调亏灌溉是根据作物对干旱的适应性反应人为施加水分胁迫,在作物某些生育阶段通过调控土壤水分,改善作物代谢,促进光合产物的增加,提高产量并且改善品质[1]。有研究发现,干旱条件下绞股蓝植株生物量减少而叶片中的皂苷含量增加[2];适度干旱有效提高黄芩的光合速率和药用部位根的生物量,且提高黄芩根部黄芩苷的含量[3]。随着中药材规模化种植的发展,土壤水分对药用作物的生长发育、产量和品质的调控逐渐受到重视,但对菘蓝品质的研究较少。李文明等[4]通过研究不同灌水定额、灌水次数对菘蓝的耗水特征、产量的影响,发现灌溉定额为 2 250 $m^3 \cdot hm^{-2}$、灌水时间在 7 月上旬至 8 月中旬时,产量最高,效益显著。谭勇等[5]通过研究不同水分对菘蓝生长发育和主要有效成分的影响,发现当田间最大持水量为 45%~70%时,菘蓝的产量与品质可以兼优。已经有多种综合评价方法可以对作物品质进行分析研究,其中包括层次分析法[6]、模糊数学综合评价法[7]、灰色关联度分析法[8]、主成分分析法[9]和因子分析法等[10]。目前,利用膜下滴灌调亏灌溉对菘蓝生长、产量和品质的综合研究很少,因此,膜下滴灌调亏对菘蓝生长、产量形成、水分利用的影响及改善品质机理已成为当前菘蓝种植的重要问题。

通过研究调亏灌溉对菘蓝根部的主要有效成分靛蓝、靛玉红和(R,S)-告依春的影响规律,结合菘蓝有效成分靛红、靛玉蓝和告依春以及产量构成要素,进行水分亏缺对膜下滴灌菘蓝有效成分影响的综合评价,寻求该地区调亏灌溉下高产优质的菘蓝种植灌溉模式。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2016 年和 2017 年 4-10 月在张掖市民乐县益民灌溉试验站(100°43′E,38°39′N)进行。该试验区属半干旱区,大陆性荒漠草原气候,海拔约为1 970 m,年均气温 6.0℃,≥0℃积温 3 500℃,≥10℃有效积温 2 985℃,极端最高温度 37.8℃,极端最低温度-33.3℃,年平均日照时数 3 000 h,平均无霜期 125 d。据 1995—2015 年降雨资料,该地区年平均降雨量为 215 mm,降水少且变率大,供需矛盾突出,干旱频繁。试验地土壤为轻壤土,pH 7.22,耕层土壤田间最大持水量为 24%,土壤容重 1.4 $g \cdot cm^{-3}$。试验区地下水位埋深较深,盐碱化影响较小。

1.2　供试材料

供试品种选用甘肃农业大学中草药系自繁的菘蓝(*Isatis indigotica* Fort.)种子,种子粒大饱满、均匀一致,纯度 96%,千粒重为 9.873 g,发芽率为 87.6%,发芽势为 46.4%。于 4 月 20 日播种,播种量为 30.0 $kg \cdot hm^{-2}$,播前对试验小区进行 30 cm 的翻耕处理,人工除去杂草,同时施入尿素(N 含量 46%)210 $kg \cdot hm^{-2}$,过磷酸钙(P_2O_5含量 12%、S 含量 10%、Ca 含量 16%)340 $kg \cdot hm^{-2}$,钾(K_2O 含量 25%)270 $kg \cdot hm^{-2}$,所有肥料都作为基肥在播种时一次性施入。灌溉方式采用膜下滴灌。

1.3　试验设计

试验为单因素随机试验,将菘蓝生育期按其生长特点分为 4 个生育期:菘蓝苗期(5 月 3 日—6 月 7 日)、营养生长期(6 月 8 日—7 月 18 日)、肉质根生长期(7 月 19 日—8 月 28 日)和肉质根成熟期(8 月 29 日—10 月 13 日)。土壤水分设 4 个梯度,分别为充分灌水(F,土壤含水量为田间持水量的 75%~85%),轻度水分亏缺(L,土壤含水量为田间持水量的 65%~75%),中度水分亏缺(M,土壤含水量为田间持水量的 55%~65%),重度水分亏缺(H,土壤含水量为田间持水量的 45%~55%)。共 10 个水分调控处理,其中 CK 为对照处理,每个处理设 3 次重复,共 30 个小区,每小区面积 36 m^2(9 m×4 m),采用随机区组设计,有效试验种植面积为 1 080 m^2。灌水方法为膜下滴灌,灌水整个生育期内对土壤湿度控制的土层深度为 100 cm,水分控制上、下限范围与区域实际较为吻合,具体试验设计见表 1。

1.4　测定指标及方法

1.4.1　土壤水分测定　土壤水分的测定采用烘干

法。在每个小区随机选择取样点,在连续两株菘蓝植株连线的中点处用土钻分别钻取小区土壤剖面内,0~20,20~40,40~60,60~80 cm 和 80~100 cm 土层土壤,测定其含水率,因为菘蓝的根系主要分布在 0~50 cm 土层内,取 0~60 cm 土层的土壤水分的平均值作为计划湿润层土壤含水量,而以 0~100 cm 层内土壤水分的变化来计算作物对水分消耗量。在菘蓝栽种前取土测量 1 次,以后每隔 10 d 取土一次,灌水后以及降雨前后各加测 1 次,每次取土深度均为 100 cm。

表 1 不同试验处理的土壤含水量

(占田间持水率的百分数)/%

Table 1 Soil moisture contents of different treatments (percentage of field capacity)

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	营养生长期 Vegetative stage	肉质根生长期 Fleshy root growth stage	肉质根成熟期 Fleshy root maturity
CK	75~85	75~85	75~85	75~85
WD1	75~85	65~75	75~85	75~85
WD2	75~85	55~65	75~85	75~85
WD3	75~85	45~55	75~85	75~85
WD4	75~85	65~75	65~75	75~85
WD5	75~85	65~75	55~65	75~85
WD6	75~85	55~65	65~75	75~85
WD7	75~85	55~65	55~65	75~85
WD8	75~85	45~55	65~75	75~85
WD9	75~85	45~55	55~65	75~85

菘蓝灌溉水量的计算公式如下:

$$M = 10\gamma H_p P(\theta_i - \theta_j)$$

式中,M 为灌水量(mm);γ 为计划湿润层土壤容积密度($g \cdot cm^{-3}$);H_p 为计划湿润层深度(60 cm);θ_i 为设计控制上限含水率(田间持水量乘以设计控制相对含水率上限)(%);θ_j 为灌水前土壤质量含水率(%);P 为滴灌设计湿润比(65%)。

1.4.2 *产量及构成要素测定* 分别在菘蓝不同生育期,从每个小区选取长势一致 5 株菘蓝植株,游标卡尺测定主根长、主根直径等,然后分别将根、茎和叶用剪刀分离后,分别称取鲜重,并记录,然后分别装入纸袋,放入烘箱后,在 105℃杀青 1 h 后,将烘箱温度调为 85℃,烘 8 h 左右,烘干后分别称量干重并记录。

产量:待菘蓝成熟后按小区单独收获,阴干并计产,各处理的实际产量为 3 次重复的平均值。

1.4.3 *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[11]测定。

1.5 数据统计分析

运用主成分分析法[12]对不同亏缺水分处理下菘蓝的品质进行综合评判优选,筛选出较好的水分亏缺灌溉方法。

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,利用 GraphPad Prism 5 做图,各表中出现的数据均为平均值。

2 结果与分析

2.1 不同调亏滴灌处理下菘蓝产量构成要素

从表 2 可以看出,菘蓝产量构成要素侧根数量受水分亏缺程度的影响不显著,而其他构成要素,如主根长、主根直径和根干重等受水分亏缺程度的影响显著($P<0.05$),轻度水分亏缺处理的主根长、主根直径和根干重等与 CK 较为接近,重度水分亏缺处理的主根长、主根直径和根干重比 CK 显著减少。这主要是由于水分严重缺失,导致根系主动吸水作用减弱,影响光合作用进行,最终导致主根长、主根直径和根干重等产量构成要素显著降低。

膜下滴灌菘蓝在水分亏缺条件下,菘蓝产量与其构成要素之间存在相关性(表 3)。可以看出,2016 年菘蓝产量与侧根数量、主根长、主根直径和根干重的相关系数分别是 0.565、0.968、0.964 和 0.944,达到极显著水平;2017 年菘蓝产量与侧根数量、主根长、主根直径和根干重的相关系数分别是 0.587、0.940、0.913 和 0.907,达到极显著水平。主根长、主根直径和根干重为影响菘蓝产量的关键因子。因此,通过水分的适度适时亏缺控制可促进主根长、主根直径和根干重等菘蓝产量构成要素。

2.2 不同调亏滴灌处理对菘蓝中(R,S)-告依春含量的影响

菘蓝不同生育期水分调亏后对菘蓝中 (R,S)-告依春含量产生不同程度的影响(图 1)。2016 年水分调亏处理对(R,S)-告依春含量影响:在营养生长期重度水分调亏处理 WD3 和肉质根生长期连续水分亏缺的 WD8 、WD9 处理的(R,S)-告依春含量较 CK 减少 8.59%、11.97%和13.23%,与 CK(0.236 $mg \cdot g^{-1}$)差异显著($P<0.05$);而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于 (R,S)-告依春含量的提高,处理 WD5、WD4 和 WD6 较 CK 分别增加 7.04%、5.92%和1.55%;WD2 和 WD7 处理与 CK 无显著差异。

表 2　各处理下菘蓝产量及产量构成要素

Table 2　The yield and components of different treatment

年份 Year	处理 Treatment	侧根数量/(个·株$^{-1}$) Lateral root number per plant	主根长/mm Taproot length	主根直径/mm Taproot diameter	根干重/g Root biomass	产量/(kg·hm^{-2}) Yield
2016	CK	11.0a	22.09b	1.69a	11.36b	8315.58a
	WD1	10.7a	22.80ab	1.66a	13.21a	8239.56a
	WD2	9.3abc	19.83c	1.47bc	10.96b	7219.67b
	WD3	7.3c	19.05cd	1.42c	9.57c	6894.60d
	WD4	10.3ab	23.17a	1.72a	13.39a	8215.52a
	WD5	9.7abc	19.29cd	1.50b	10.02c	7164.91bc
	WD6	9.3abc	19.72c	1.41c	10.13c	7083.69c
	WD7	9.7abc	18.59d	1.45c	9.53c	6965.85d
	WD8	8.7abc	16.40e	1.23d	7.50d	5311.57e
	WD9	8.0bc	16.33e	1.18d	7.10c	5228.54e
2017	CK	10.7a	23.21a	1.63b	12.66ab	8322.25a
	WD1	10.7a	23.24a	1.64a	13.55a	8390.80a
	WD2	9.3ab	22.20a	1.55bc	12.02bc	7462.24b
	WD3	7.3b	18.67bc	1.40ef	10.59d	6800.36e
	WD4	10.3ab	23.25a	1.66a	11.08cd	8235.32a
	WD5	9.3ab	20.04b	1.51cd	13.74a	7051.11c
	WD6	8.3ab	19.92b	1.46de	10.77d	6981.71cd
	WD7	9.3ab	19.93b	1.44de	11.01cd	6819.79de
	WD8	7.7ab	17.23cd	1.32f	8.54e	5686.71f
	WD9	7.3b	16.66d	1.31f	8.43e	5539.79f

注:同列数值后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters within each column mean significant difference at $P<0.05$.

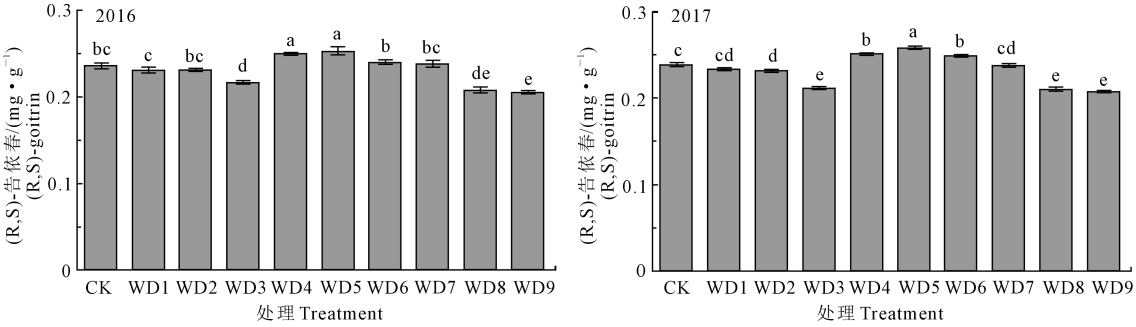
表 3　菘蓝产量构成要素间的相关性分析

Table 3　The correlation analysis between the components of *Isatis indigotica* yield

年份 Year	产量要素 Yield element	侧根数量 Lateral root number	主根长 Main root length	主根直径 Taproot diameter	根干重 Dry weight of root	产量 Yield
2016	侧根数量 Lateral root number	1				
	主根长 Main root length	0.553**	1			
	主根直径 Taproot diameter	0.546**	0.943**	1		
	根干重 Dry weight of root	0.526**	0.955**	0.922**	1	
	产量 Yield	0.565**	0.968**	0.964**	0.944**	1
年份 Year	产量要素 Yield element	侧根数量 Lateral root number	主根长 Main root length	主根直径 Taproot diameter	根干重 Dry weight of root	产量 Yield
2017	侧根数量 Lateral root number	1				
	主根长 Main root length	0.629**	1			
	主根直径 Taproot diameter	0.548**	0.905**	1		
	根干重 Dry weight of root	0.661**	0.920**	0.899**	1	
	产量 Yield	0.587**	0.940**	0.913**	0.907**	1

注:**表示在 0.01 水平上显著相关。

Note: ** indicates significant correlation at 0.01 level.



注:不同字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different letters mean significant difference at P<0.05, the same below.

图 1 调亏滴灌对菘蓝(R,S)-告依春含量的影响

Fig.1 Effect of regulated deficit drip-irrigation on (R,S)-goitrin

2017 年水分调亏处理对(R,S)-告依春含量影响:在营养生长期重度水分调亏处理 WD3 和肉质根生长期连续水分亏缺的 WD8 、WD9 处理的(R,S)-告依春含量较 CK 减少 11.29%、12.13%和12.97%,与 CK(0.239 mg·g^{-1})差异显著(P<0.05);而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于(R,S)-告依春含量的提高,处理 WD5、WD4 和 WD6 较 CK 分别增加 5.43%、7.94%和 4.18%;WD2 和 WD7 处理与 CK 无显著差异。

从两年的试验结果可以看出,营养生长期的重度水分亏缺和肉质根生长期的重度水分亏缺均会严重影响菘蓝有效成分(R,S)-告依春的积累;而这两个生育期的中、轻度水分亏缺可以一定程度提高(R,S)-告依春的积累量。

2.3 不同调亏滴灌处理对菘蓝中靛蓝含量的影响

菘蓝不同生育期水分调亏后对菘蓝中靛蓝含量产生不同程度的影响(图 2)。2016 年水分调亏处理对靛蓝含量影响:在营养生长期重度水分调亏处理 WD3 和肉质根生长期连续水分亏缺的 WD8 、WD9 处理的靛蓝含量较 CK 减少 6.2%、6.3%和 6.6%,与 CK 差异显著(P<0.05);而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于靛蓝含量的提高,处理 WD4、WD5、WD6 和 WD7 与 CK 相比差异显著,增加 5.7%、9.1%、5.3%和 4.8%。

2017 年水分调亏处理对靛蓝含量影响:在营养生长期重度水分调亏处理 WD3 和肉质根生长期连续水分亏缺的 WD8 、WD9 处理的靛蓝含量较 CK 减少 6.5%、6.2%和 6.6%,与 CK 差异显著(P<0.05);而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于靛蓝含量的提高,处理 WD4、WD5、WD6 和 WD7 与 CK 相比差异显著,增加 5.5%、9.9%、4.8%和 3.6%;WD1 和 WD2 处理与 CK 无显著差异。

从两年的试验结果可以看出,营养生长期的重度水分亏缺和肉质根生长期的重度水分亏缺均会严重影响菘蓝有效成分靛蓝的积累;而这两个生育期的中、轻度水分亏缺可以一定程度提高靛蓝的积累量。

2.4 不同调亏滴灌处理对菘蓝中靛玉红含量的影响

调亏灌溉对菘蓝靛玉红含量的影响如图 3。2016 年水分调亏处理对靛玉红含量影响:在营养生长期重度水分调亏处理 WD3 和肉质根生长期连续水分亏缺的 WD8 、WD9 处理的靛玉红含量较对 CK 减少 12.2%、12.6%和 12.4%,与 CK 差异显著(P<0.05);而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于靛玉红含量的提高,处理 WD5、WD6 和 WD7 与 CK 相比差异显著,增加 5.3%、1.6%和 1.5%;WD1 和 WD4 处理与 CK 无显著差异。

2017 年水分调亏处理对靛玉红含量影响:在营养生长期重度水分调亏处理 WD3 和肉质根生长期连续水分亏缺的 WD8 、WD9 处理的靛玉红含量较 CK 减少 12.5%、12.6%和 13.1%,与 CK 差异显著(P<0.05);而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于靛玉红含量的提高,处理 WD4、WD5 和 WD6 与 CK 相比差异显著,增加 1.1%、5.2%、1.7%;WD1 和 WD7 处理与 CK 无显著差异。

从两年的试验结果可以看出,营养生长期的重度水分亏缺和肉质根生长期的重度水分亏缺均会严重影响菘蓝有效成分靛玉红的积累;而这两个生育期的中、轻度水分亏缺能一定程度提高靛玉红的积累量。

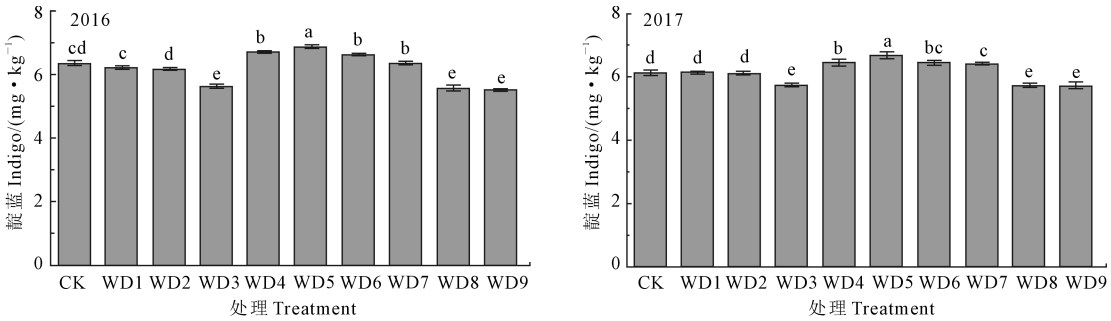


图 2　调亏滴灌对菘蓝靛蓝含量的影响

Fig.2　Effect of regulated deficit drip-irrigation on indigo

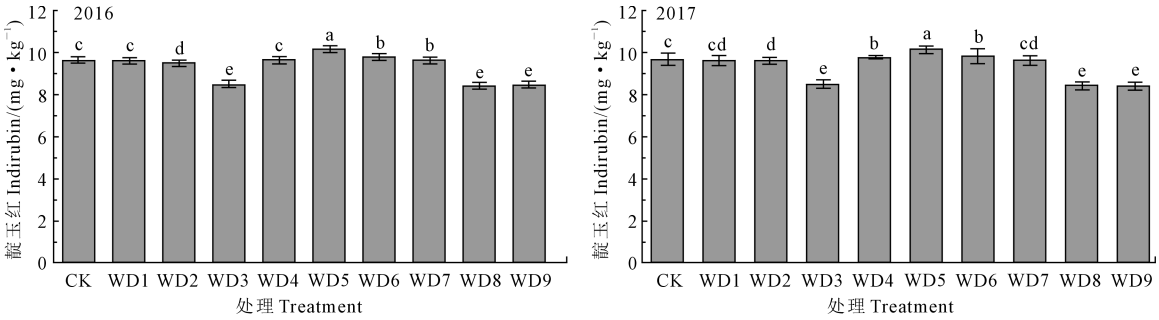


图 3　调亏滴灌对菘蓝靛玉红含量的影响

Fig.3　Effect of regulated deficit drip-irrigation on indirubin

2.5　调亏滴灌条件下菘蓝品质综合评价

菘蓝大小形状和药用有效成分等各项评价指标已成为菘蓝产业可持续发展的主要影响因素,其中药用有效成分是反映菘蓝品质的重要指标。其中靛红、靛玉蓝和告依春等有效成分的积累是形成菘蓝有效成分的主要组成部分,结合产量构成要素,进行水分亏缺对膜下滴灌菘蓝有效成分的综合评价。

2.5.1　*菘蓝品质的相关性分析*　通过菘蓝的根部形态和菘蓝有效成分靛蓝、靛玉红的相关性分析,确立其相关性及相关程度。

相关分析表明(表 4),不同水分亏缺处理下菘蓝有效成分(R,S)-告依春、靛蓝和靛玉红之间呈现出显著正相关性,主根长、主根直径与有效成分靛蓝相关性显著,根干重与(R,S)-告依春、靛蓝和靛玉红显著相关。表明有效成分的积累需要建立根部干物质的持续积累的基础之上,并且由于各个指标之间相关系数较大,信息之间存在重叠,适合采用主成分分析法。

2.5.2　*菘蓝品质综合评价方案*　由主成分特征根和贡献率可知(表 5),2016 年特征根 $\lambda_1 = 5.482$,特征根 $\lambda_2 = 1.089$,前两个主成分的累计方差贡献率达 93.874%,即涵盖了大部分信息;2017 年特征根 $\lambda_1 = 5.593$,特征根 $\lambda_2 = 1.006$,前两个主成分的累计方差贡献率达 94.264%,即涵盖了大部分信息。这表明前两个主成分能够代表最初的 7 个指标来分析该地区菘蓝的品质综合水平,故提取前两个指标作为主成分,分别记作 F_1、F_2。

主成分矩阵不是主成分的特征向量,主成分 1 和主成分 2 的系数分别是其向量(主成分矩阵)除以对应的主成分方差。可以求得 2016 年主成分 1、2 的函数表达式:

$$F_1 = 0.389 \times Z_{告依春} + 0.350 \times Z_{靛蓝} + 0.384 \times Z_{靛玉红} + 0.379 \times Z_{主根长} + 0.393 \times Z_{主根直径} + 0.380 \times Z_{根干重} + 0.369 \times Z_{侧根数量}$$

$$F_2 = 0.349 \times Z_{告依春} + 0.534 \times Z_{靛蓝} + 0.383 \times Z_{靛玉红} - 0.423 \times Z_{主根长} - 0.336 \times Z_{主根直径} - 0.384 \times Z_{根干重} - 0.084 \times Z_{侧根数量}$$

同理可以求得 2017 年主成分 1、2 的函数表达式:

$$F_1 = 0.381 \times Z_{告依春} + 0.352 \times Z_{靛蓝} + 0.399 \times Z_{靛玉红} + 0.376 \times Z_{主根长} + 0.386 \times Z_{主根直径} + 0.370 \times Z_{根干重} + 0.381 \times Z_{侧根数量}$$

$$F_2 = 0.410 \times Z_{告依春} + 0.544 \times Z_{靛蓝} + 0.302 \times Z_{靛玉红} - 0.423 \times Z_{主根长} - 0.373 \times Z_{主根直径} - 0.092 \times Z_{根干重} - 0.343 \times Z_{侧根数量}$$

表 4 菘蓝根部形态和有效成分的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of root morphology and active components of *Isatis indigotica*

年份 Year	指标 Index	(R,S)-告依春 (R,S)-goitrin	靛蓝 Indigo	靛玉红 Indirubin	主根长 Main root length	主根直径 Taproot diameter	根干重 Dry weight of root	侧根数量 Lateral root number
2016	(R,S)-告依春 (R,S)-goitrin	1						
	靛蓝 Indigo	0.959**	1					
	靛玉红 Indirubin	0.938*	0.944**	1				
	主根长 Main root length	0.659*	0.491	0.616	1			
	主根直径 Taproot diameter	0.732*	0.556	0.678*	0.972**	1		
	根干重 Dry weight of root	0.674*	0.525	0.637*	0.980**	0.947**	1	
	侧根数量 Lateral root number	0.681*	0.617	0.770**	0.757*	0.798**	0.731*	1
年份 Year	指标 Index	(R,S)-告依春 (R,S)-goitrin	靛蓝 Indigo	靛玉红 Indirubin	主根长 Main root length	主根直径 Taproot diameter	根干重 Dry weight of root	侧根数量 Lateral root number
2017	(R,S)-告依春 (R,S)-goitrin	1						
	靛蓝 Indigo	0.976**	1					
	靛玉红 Indirubin	0.968**	0.942**	1				
	主根长 Main root length	0.641*	0.509	0.716*	1			
	主根直径 Taproot diameter	0.687*	0.561	0.735*	0.986**	1		
	根干重 Dry weight of root	0.700*	0.655*	0.792**	0.765**	0.789**	1	
	侧根数量 Lateral root number	0.666*	0.573	0.750*	0.932**	0.935**	0.771**	1

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关；* * 表示在 0.01 水平上显著相关。

Note: * means correlation is significant at the 0.05 level; * * means correlation is significant at the 0.01 level.

表 5 菘蓝品质的主成分特征根和贡献率

Table 5 Contribution rate of the principal components of *Isatis indigotica* quality

成分 Component	2016 年初始特征值及贡献率 Initial eigenvalues and contribution rates in 2016			2017 年初始特征值及贡献率 Initial eigenvalues and contribution rates in 2017		
	合计 Summation	方差/% Variance	累积/% Accumulation	合计 Summation	方差/% Variance	累积/% Accumulation
1	5.482	78.310	78.310	5.593	79.894	79.894
2	1.089	15.564	93.874	1.006	14.369	94.264
3	0.316	4.510	98.384	0.271	3.868	98.132
4	0.063	0.904	99.288	0.088	1.254	99.386
5	0.033	0.467	99.756	0.034	0.480	99.866
6	0.011	0.163	99.918	0.007	0.106	99.971
7	0.006	0.082	100.000	0.002	0.029	100.000

利用以上计算公式，可以通过主成分分析法进行不同水分亏缺处理的综合得分的计算。表 6 为采用主成分分析法对不同水分亏缺处理进行综合评分对比，从表中可以看出，2016 年考虑根部形态和菘蓝有效成分的基础上进行综合评价得分由高到低的顺序为 WD4、WD5、WD1、CK、WD6、WD7、WD2、WD3、WD8 和 WD9；2017 年考虑根部形态和菘蓝有效成分的基础上进行综合评价得分的由高到低依次顺序为 WD5、WD4、WD1、CK、WD6、WD2、WD7、WD3、WD8 和 WD9。

由 2016、2017 年以上结果可以看出，考虑根部形态和菘蓝有效成分的基础上，对不同水分亏缺处理的情况进行综合评价，综合得分较高的为 WD4 和 WD5，WD1 和 CK 次之。计算结果表明，轻度水分亏

表 6　菘蓝产量及品质综合评价

Table 6　Comprehensive evaluation of yield and quality of *Isatis indigotica*

年份 Year	处理 Treatment	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor2	主成分 1 得分 Principal component 1 score	主成分 2 得分 Principal component 2 score	综合得分 Comprehensive score
2016	CK	0.7812	−0.8557	1.828	−0.890	1.377
	WD1	0.8486	−1.3221	1.986	−1.375	1.429
	WD2	0.0532	−0.1367	0.125	−0.142	0.080
	WD3	−0.9893	−0.9416	−2.315	−0.979	−2.094
	WD4	1.2424	−0.5916	2.907	−0.615	2.323
	WD5	0.6632	1.7166	1.552	1.785	1.591
	WD6	0.2439	1.0089	0.571	1.049	0.650
	WD7	0.1861	1.1356	0.435	1.181	0.559
	WD8	−1.4096	−0.0780	−3.298	−0.081	−2.765
	WD9	−1.6198	0.0647	−3.790	0.067	−3.151
2017	CK	0.800	−1.152	1.888	−1.154	1.426
	WD1	0.836	−1.349	1.972	−1.352	1.467
	WD2	0.316	−0.573	0.746	−0.574	0.545
	WD3	−1.099	−0.514	−2.595	−0.515	−2.279
	WD4	0.944	−0.194	2.227	−0.195	1.859
	WD5	0.927	1.667	2.188	1.671	2.109
	WD6	0.176	1.384	0.415	1.386	0.562
	WD7	0.117	0.722	0.275	0.723	0.343
	WD8	−1.433	−0.058	−3.382	−0.058	−2.877
	WD9	−1.583	0.068	−3.735	0.068	−3.157

缺处理的 WD4、WD5 和 WD1 不仅可以获得较高的产量和水分利用效率,同时其有效成分靛蓝、靛玉红和告依春的含量不会出现降低;相反,重度水分亏缺处理的 WD3、WD8 和 WD9 的综合得分都较低,即重度水分亏缺降低了菘蓝有效成分的积累。

3　讨　论

中药材品质受多因素影响,如产地、品种、土壤生态环境及栽培措施等,其中次生代谢产物是药材中有效成分,次生代谢不同于初生代谢需要良好的生长环境。有研究表明,植物在逆境胁迫如干旱、低温条件下次生代谢产物积累旺盛[13],通过积累大量的次生代谢产物来提高抗逆性[14]。谭勇等[5]研究证实板蓝根对水分需求最大期在 7 月份,并且中度水分胁迫条件下板蓝根中靛玉红含量最高。本试验中通过利用水分亏缺研究水分对菘蓝品质的影响,结果表明轻中度水分亏缺均可提高菘蓝中靛蓝和靛玉红含量,且亏缺程度越高,有效成分积累越多,尤其是处理 WD5 比 CK 显著提高了靛蓝、靛玉红和(R,S)-告依春的含量。这主要是因为在可耐受干旱胁迫条件下,体内积累大量的光合产物,植物利用这些“过剩”的光合产物合成含碳次生代谢物,使组织中次生代谢物的含量增加,这与段飞等[15]的研究结果基本一致。也有研究认为菘蓝品质因收获大青叶、分解等原因降低,菘蓝中靛玉红含量收获一次、两次及三次大青叶处理比未收获大青叶处理分别降低 79.73%、43.24%、72.97%[16]。本试验在 10 月初收获菘蓝,对大青叶未收获,因此靛蓝和靛玉红含量与收获时间也有关。

水分调亏处理对(R,S)-告依春含量影响:在营养生长期重度水分调亏处理 WD3 和肉质根生长期连续水分亏缺的 WD8、WD9 处理的(R,S)-告依春含量较 CK 降低 8.59%~13.23%,与 CK 差异显著($P<0.05$);而在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于 (R,S)-告依春含量的提高,处理 WD4 和 WD5 较 CK 显著增加 5.43%~7.94%。水分调亏处理对靛玉红影响:在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于靛玉红含量的提高,处理 WD5、WD6 和 WD7 与 CK 相比差异显著,增幅1.7%~5.7%。水分调亏处理对靛蓝含量影响:在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏有利于靛蓝含量的提高,处理 WD4、WD5、WD6 和 WD7 与 CK 相比差异显著,增幅 3.6%~9.9%。

白羿雄等[17]研究表明水分轻度亏缺有助于促进青稞根系生长,不利于青稞穗部的生长发育,导致其产量显著降低,却有利于籽粒中蛋白质及其组分含量的提高。张永丽[18]研究发现济麦 20 在灌水 180 mm 和 240 mm 的处理比不灌水和灌水 300 mm 的处理显著提高了小麦籽粒谷蛋白含量等,有效提高品质。本研究得出相近结论,不同水分亏缺处理对菘蓝的(R,S)-告依春含量影响不同,且轻中度水分亏缺均可以增加菘蓝中有效成分(R,S)-告依春的含量,提高菘

蓝品质,各处理有效成分含量均达到药典标准[11]。在营养生长期和肉质根生长期轻中度连续调亏的处理 WD4、WD5 和 WD6 较 CK 均有所增加,其中以处理 WD5 的(R,S)-告依春的含量最高,WD4 次之并与之接近。因此,在营养生长期和肉质根生长期连续轻度水分亏缺有利于菘蓝中(R,S)-告依春含量的积累,但可能还与自身遗传因素、生态环境等有关。菘蓝中(R,S)-告依春含量除与水分有关外,还与自身遗传因素、生态环境等有关。可见,土壤水分含量对作物生长、品质及产量均产生影响,且影响程度及作物对水分亏缺的响应与作物生育时期和水分亏缺程度有关。

水分调亏处理能够增加菘蓝中有效成分含量,提高菘蓝品质,各处理有效成分含量均达到药典标准,且随着连续生育期的中轻度水分调亏程度的增加,菘蓝品质有所提高,但是重度水分亏缺不利于有效成分(R,S)-告依春含量的积累。营养生长期的重度水分亏缺和肉质根生长期的重度水分亏缺均会严重影响菘蓝有效成分(R,S)-告依春、靛蓝和靛玉红的积累;而这两个生育期的中、轻度水分亏缺能一定程度提高有效成分的积累量。

考虑根部形态和菘蓝有效成分的基础上,对不同水分亏缺处理的情况进行综合评价,综合得分较高的为 WD4 和 WD5,WD1 和 CK 次之。计算结果表明,轻度水分亏缺处理的 WD4、WD5 和 WD1 不仅可以获得较高的产量和水分利用效率,同时其有效成分靛蓝、靛玉红和告依春的含量不会出现降低;但是重度水分亏缺处理的 WD3、WD8 和 WD9 的综合得分较低,水分严重减少使得菘蓝有效成分的积累均有所降低。

4 结 论

通过调亏灌溉对菘蓝的主要有效成分靛蓝、靛玉红和(R,S)-告依春的影响规律研究,得出以下结论:

1)不同处理的有效成分受到水分亏缺的影响显著。轻中度水分亏缺均可提高菘蓝中靛蓝和靛玉红含量,且亏缺程度越高,有效成分积累越多;轻中度水分亏缺有利于菘蓝中(R,S)-告依春含量的积累,提高菘蓝品质,各处理有效成分含量均达到药典标准,但是重度水分亏缺不利于有效成分(R,S)-告依春含量的积累。

2)考虑根部形态和菘蓝有效成分的基础上,通过主成分分析法对不同水分亏缺处理的情况进行综合评价,综合得分较高的为 WD4 和 WD5,WD1 和 CK 次之,发现轻度水分亏缺处理不仅可以获得较高的产量和水分利用效率,同时可提高有效成分靛蓝、靛玉红和告依春的积累,有利于提高菘蓝的品质。

参 考 文 献:

[1] ZENG Chunzhi, BIE Zhilong, YUAN Baozhong. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumismelo* L.) in plastic greenhouse[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(4):595-602.

[2] 龙云, 杨睿, 钟章成, 等. 不同水分和氮素条件对栽培绞股蓝生物量和皂苷量的影响[J]. 中草药, 2008,39(12):1872-1876.

[3] 邵玺文, 韩梅, 韩忠明, 等. 水分供给量对黄芩生长与光合特性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(10):3214-3220.

[4] 李文明, 施坰林, 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.

[5] 谭勇, 梁宗锁, 董娟娥, 等. 水分胁迫对菘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.

[6] 王民敬, 裴海生,孙君社, 等. 基于改进层次分析法的灵芝品质安全综合评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(04):302-308.

[7] 王子芳, 秦建成, 罗云云, 等. 基于模糊数学方法的烟叶品质评价[J]. 土壤通报, 2008,(02):349-353.

[8] 王永士, 郭瑞林, 贺德先, 等. 灰色关联度分析法在安阳市强筋小麦适宜品种筛选中的应用[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(02):271-274.

[9] 白沙沙, 毕金峰, 王沛, 等.基于主成分分析的苹果品质综合评价研究[J]. 食品科技, 2012, 37(01):54-57.

[10] 朱麟, 凌建刚, 尚海涛, 等. 因子分析法综合评价冰温结合 1-MCP 处理对“玉露”水蜜桃贮藏品质的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(09):1164-1172.

[11] 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, 2015:204-205.

[12] 刘科鹏, 黄春辉, 冷建华, 等. “金魁”猕猴桃果实品质的主成分分析与综合评价[J]. 果树学报,2012,29(05):867-871.

[13] 黄学春. 调亏灌溉对酿酒葡萄光合作用及果实生长发育的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.

[14] 杜丽娜, 张存莉, 朱玮, 等. 植物次生代谢合成途径及生物学意义[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(03): 150-155.

[15] 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(03):111-114.

[16] 唐文文, 张欣旸, 何尤,等. 陇中半干旱地区大青叶采收次数对药材产量品质的影响[J].中国中药杂志,2011,36(08): 955-958.

[17] 白羿雄,姚晓华,姚有华,等.适度水分亏缺管理提高青稞营养品质和环境效益[J].植物营养与肥料学报,2018,24(02):499-506.

[18] 张永丽,于振文.灌水量对不同小麦品种籽粒品质、产量及土壤硝态氮含量的影响[J].水土保持学报,2007,21(05):155-158.