



## 亏缺灌溉对板蓝根叶片光合生理特性及产量的影响

王泽义<sup>1</sup>, 张恒嘉<sup>1\*</sup>, 王玉才<sup>1</sup>, 陈谢田<sup>1</sup>, 巴玉春<sup>2</sup>

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

**摘要** 以板蓝根(*Isatis tinctoria*)为研究对象, 于2018年在河西走廊中部干旱绿洲开展水分控制试验, 设轻、中、重度亏水及充分供水4个控水水平, 通过大田试验探究膜下滴灌条件下亏缺灌溉对板蓝根叶片生理指标、灌水量及产量的影响, 为河西地区板蓝根灌溉策略的制定提供理论依据。结果表明, 板蓝根叶片净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和气孔导度( $G_s$ )因营养和肉质根生长期受到亏缺灌溉影响而显著下降, 降幅随亏水程度的加剧而增大, 轻度亏水处理对叶片光合能力的影响不显著, 且在复水之后存在一定的补偿响应; 轻度亏水处理的产量与对照( $8\,348.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )相比无显著差异, 而其它处理的产量均有不同程度的下降; 灌水量与产量的拟合关系呈二次抛物线, 即产量不随灌水量的增加而升高。因此, 综合分析表明膜下滴灌调亏降低了板蓝根叶片的光合能力, 而营养生长期轻度亏缺灌溉可以节水并提高产量和灌溉效率。

**关键词** 板蓝根, 亏缺灌溉, 光合生理特性, 产量

王泽义, 张恒嘉, 王玉才, 陈谢田, 巴玉春 (2020). 亏缺灌溉对板蓝根叶片光合生理特性及产量的影响. 植物学报 55, 705–714.

板蓝根(*Isatis tinctoria*)是十字花科(Brassicaceae)菘蓝属(*Isatis*)植物, 其根叶皆可入药, 有多种药用功效(王瑞等, 2010)。“上工治未病”的防病策略在《黄帝内经》中早已被先民提出。随着生活水平及保健意识的提高, 人们希望通过提早预防来保持身体健康, 而中医药以其行之有效的中医系统理论, 在改善人类生活质量和提升健康素质方面备受青睐(唐昊, 2018)。此外, 中药“诸药以草为本”丰富易得, 与西药相比副作用小, 更安全, 这也为中药提供了更大的市场空间, 而绝大多数用于预防和治疗感冒的中药方中均有板蓝根配伍(杜宗绪等, 2005)。因此, 在野生中药材资源日益枯竭的情况下, 人工栽培生产中药材市场潜力大且应用广。板蓝根是我国传统的中草药, 在全国多个地区都有种植, 其中甘肃省民乐县凭借其独特的气候和地理条件, 现已成为药用植物板蓝根的理想种植区, 素有板蓝根之乡的美誉(侯格平等, 2015)。但该区地处西北内陆属资源型缺水地区, 与其它环境因子所导致的作物减产相比, 干旱胁迫的影

响最大, 同时由于灌水方式落后造成浪费严重。鉴于此, 亟须开发高效的农业节水技术, 提升灌溉水利用率, 以促进板蓝根生产的持续发展。

土壤水分对作物叶片的光合特性以及产量的形成有调控作用(董浩等, 2014), 而调亏灌溉是以灌溉对象的实际生长发育规律为依据, 适时适度减少灌水, 有效管控土壤水分含量, 使灌溉对象的生理生化过程因水分胁迫而受到影响, 从而重新调整光合产物的分配比例, 减少部分营养器官的生长量而促进生殖生长, 最终提高经济产量(蔡焕杰等, 2000; 孟兆江等, 2016)。国内外大量灌溉试验已证实该技术既能节省灌水又能增产调质(黄兴法等, 2001; 房玉林等, 2013; 寇丹等, 2014; Hooshmand et al., 2019; Trentacoste et al., 2019)。目前, 研究对象已不限于果树(武阳等, 2012; Zhao et al., 2015)、花卉(Selahvarzi et al., 2017)和蔬菜(特别是瓜类)(邵光成等, 2008; 郑健等, 2009; Özmen et al., 2015; Sezen et al., 2019)等经济作物, 在小麦(*Triticum aestivum*)

收稿日期: 2020-04-03; 接受日期: 2020-07-02

基金项目: 甘肃省重点研发计划(No.18YF1NA073)

\* 通讯作者。E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn

(孟兆江等, 2010)、玉米(*Zea mays*) (邹慧等, 2012) 和水稻(*Oryza sativa*) (Zhou et al., 2017)等大田作物中也进行了广泛的应用研究, 在药用植物栽培方面亦有研究, 但大多集中在药材次生代谢产物(刘长利和王文全, 2008; Moradi et al., 2014; 周丽等, 2015; 梁建萍等, 2016), 而有关膜下滴灌条件下药用植物光合生理特性、产量及品质对亏缺灌溉响应的研究则报道较少。本研究在西北旱区开展板蓝根大田试验, 分析膜下滴灌调亏板蓝根叶片光合生理特性及其节水增产效应, 旨在为河西地区膜下滴灌板蓝根栽培管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2018年5–10月在甘肃省河西走廊中段民乐县益民灌溉试验站进行。板蓝根(*Isatis tinctoria* L.)全生育期各月气象因子如表1所示。该站位于张掖市东南约40 km处, 海拔1 900 m, 100°43'E, 38°39'N。该区降雨稀少(多年降雨量平均值约200 mm)、蒸发量大(>2 000 mm), 干旱十分严重, 属于典型的大陆荒漠草原气候。该区地势平缓, 土壤为轻质壤土, 土壤肥力中等, pH值为7.20, 土壤容积密度为1.46 g·cm<sup>-3</sup>, 田间持水量为24% (质量含水率), 耕层(0–20 cm)土壤有机质含量11.3 g·kg<sup>-1</sup>, 速效磷17.6 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾192.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮52.4 mg·kg<sup>-1</sup>。地下水埋深>20 m (其影响可忽略)。

1.2 试验设计

供试材料为上一年度粒大且饱满的优质板蓝根种子, 由甘肃农业大学中草药系选育, 属于药用型北板蓝根。于2018年5月9日播种, 10月12日收获, 种子用量为35.0 kg·hm<sup>-2</sup>, 种植密度为8.0×10<sup>5</sup>株·hm<sup>-2</sup>。全生

育期历时154天, 生育期内总降雨量217.3 mm。本试验在板蓝根营养生长期和肉质根生长期按不同控水梯度设9个处理(V1G0、V1G1、V1G2、V2G0、V2G1、V2G2、V3G0、V3G1和V3G2), 其它生育期保持充分供水, 并设对照组(CK) (表2)。研究表明, 板蓝根的耐旱性较强, 土壤相对含水率为70%–80%属最佳(杜宗绪等, 2005)。依据《灌溉试验规范》并综合考虑当地板蓝根生产实际, 设置土壤水分范围符合试区实况。

1.3 试验方法

采用平作覆膜与滴灌相结合的栽培方式。播种前7天, 机械翻耕20–30 cm, 同时施入基肥(硫酸钾复合肥) 4 500–6 000 kg·hm<sup>-2</sup>, 后期不再追肥。翻耕施肥后整平田地, 人工铺设薄壁式滴灌管(新疆天业集团有限公司生产), 间距60 cm, 滴头为迷宫式流道, 内径16 mm, 滴水器的间距为30 cm, 流量为2.0 L·h<sup>-1</sup>; 用透明塑料膜(宽120 cm, 厚0.008 mm)以搭接方式全膜覆盖并用5 cm厚的土层压盖; 3–5天后, 用穴播盘在每条滴灌带两边双行条播(株距6–8 cm, 行距10–15 cm)。采用单因素随机区组设计, 各处理重复3次。小区面积为40 m<sup>2</sup> (4 m×10 m), 小区间预埋1.2 m深的塑料布, 以防相邻小区间渗水。

1.4 测定方法

1.4.1 叶面积指数

在各生育期末测1次叶面积。每次测量时, 从各小区随机挑取长势一致的板蓝根5株, 用称重法(柏军华等, 2005)测定。叶面积指数(leaf area index, LAI)=(单株叶面积(m<sup>2</sup>)×单位土地面积株数(株))/单位土地面积(m<sup>2</sup>)。

1.4.2 叶片光合生理特性

叶片光合指标净光合速率(photosynthetic rate, *P<sub>n</sub>*)、

表1 试验年度气象因子

Table 1 Meteorological factors in the test year

Month	Maximum temperature (°C)	Minimum temperature (°C)	Ground temperature (°C)	Precipitation (mm)	Daylight hours (h)	Wind speed (m·s <sup>-1</sup> )	Relative humidity (%)
5	19.5	5.8	19.1	20.0	279.3	3.2	41
6	23.1	11.5	23.9	32.8	223.4	3.0	49
7	25.2	12.7	23.2	60.4	238.2	2.8	64
8	22.4	12.3	20.7	53.9	167.7	2.5	72
9	16.8	5.9	14.1	50.2	227.8	2.8	61
10	11.8	-1.1	7.1	4.9	277.8	3.2	47

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

Process number	Process name	Seedling (%)	Vegetative growth (%)	Fleshy root growth (%)	Fleshy root maturity (%)
V1G0	Vegetative growth stages with slight water deficit treatment	75–85	65–75	75–85	75–85
V2G0	Vegetative growth stages with moderate water deficit treatment	75–85	55–65	75–85	75–85
V3G0	Vegetative growth stages with severe water deficit treatment	75–85	45–55	75–85	75–85
V1G1	Vegetative growth stages with slight water deficit treatment, fleshy root growth stages with slight water deficit treatment	75–85	65–75	65–75	75–85
V1G2	Vegetative growth stages with slight water deficit treatment, fleshy root growth stages with moderate water deficit treatment	75–85	65–75	55–65	75–85
V2G1	Vegetative growth stages with moderate water deficit treatment, fleshy root growth stages with slight water deficit treatment	75–85	55–65	65–75	75–85
V2G2	Vegetative growth stages with moderate water deficit treatment, fleshy root growth stages with moderate water deficit treatment	75–85	55–65	55–65	75–85
V3G1	Vegetative growth stages with severe water deficit treatment, fleshy root growth stages with slight water deficit treatment	75–85	45–55	65–75	75–85
V3G2	Vegetative growth stages with severe water deficit treatment, fleshy root growth stages with moderate water deficit treatment	75–85	45–55	55–65	75–85
CK	Control treatment	75–85	75–85	75–85	75–85

表中数值均为相对含水率(田间持水量百分比范围)。

The values in the table are relative water content (percentage range of field water capacity).

蒸腾速率(transpiration rate,  $T_r$ )及气孔导度(stomatal conductance,  $G_s$ )用美国LI-COR公司生产的LI-6400便携式光合仪测定,在亏水处理5–7天后选择晴朗日进行测定,光照强度设为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,各小区分别选取3株,在其由心叶至外第3枚功能叶片中部进行田间活体测定。

#### 1.4.3 土壤水分

在生育期内每7–10天用传统烘干法测定土壤水分,各小区内分别随机选取2株板蓝根植株,在连线的中点处用土钻分6层取样:即0–10 cm,深度每间隔10 cm采样;20–80 cm,深度每间隔20 cm采样;灌水和降雨后加测。由于板蓝根的根系主要分布在50 cm土层内(王玉才, 2018),故以60 cm土层内含水率均值作灌水依据。当土壤含水率的实测值低于设计(表2)中的下限含水率时,立即灌水。

土壤质量含水率及灌水量的计算公式:

$$\theta = (m_a - m_b) / m_b \quad (1)$$

$$M = 10YHP(\theta_i - \theta_j) \quad (2)$$

式(1)中,  $\theta$  为土壤质量含水率(%);  $m_a$ 和 $m_b$ 为鲜土与干土重(g)。式(2)中,  $M$ 为灌水量(mm);  $Y$ 为计划湿润层土壤容重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $H$ 为计划湿润层深度(取60 cm);  $\theta_i$ 和 $\theta_j$ 为设计上限和灌前土壤质量含水率(%);  $P$ 为设计湿润比(65%) (王世杰等, 2018)。

#### 1.4.4 产量测定

收获时按单个小区实收测产,以3次重复的平均值为各处理的实际产量值。

#### 1.4.5 灌溉水利用效率

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

式中,  $I_{WUE}$ 为全生育期灌溉水利用效率( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ );  $Y$ 为单位面积产量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );  $I$ 为全生育期灌水量(mm)。

#### 1.5 数据分析

用Microsoft Office Excel 2010软件计算所测数据并作图。用SPSS 20.0软件中Duncan多重比较法进行

差异显著性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 板蓝根生长季气象因子特征

表1为2018年北板蓝根全生长季气象因子。全生长季最低月平均气温为5.8℃,在苗期出现;最高月平均气温为25.2℃,在肉质根生长期出现。总体来看,最高和最低气温变化均呈现先上升后下降趋势,7月气温最高,为25.2℃,这说明7月板蓝根生长处于高温强光时期。2018年该区降雨主要集中在7–9月,即在肉质根生长期和成熟期,降雨量分别为60.4、53.9和50.2 mm,全生育期降雨量为222.2 mm,7–9月的降雨量分别占全生育期降雨量的27.18%、24.26%和22.59%。整个生育期内日照时数为1 412.4小时。

### 2.2 亏缺灌溉对叶面积指数的影响

随着生育期的推移,各处理叶面积指数均表现为上升趋势(图1A)。苗期因供水充足,各处理LAI基本接近,均值为0.146;到肉质根成熟期LAI均值为1.619,达到最大值,而进行亏缺灌溉的营养生长期和肉质根生长期,控水处理的LAI与CK差异显著。其中,营养生长期,轻度亏水处理(V1G0、V1G1和V1G2)的LAI与CK相比均有不同幅度的下降,降幅为1.39%–3.48%,但差异不显著;其余处理下降范围为14.62%–39.68%,差异显著( $P<0.05$ )。同时,亏水越剧烈降幅越大。肉质根生长期,重度亏水处理(V3G0、V3G1和V3G2)的LAI较CK显著降低(26.28%–27.69%),其它处理降幅介于0.47%–9.41%之间,但处理V1G0与V1G1之间差异不显著。肉质根成熟期,前期水分胁迫的影响亦形成,重度亏水处理V3G2的LAI最小,与CK相比差异显著,而CK的LAI则最大(1.943),V1G0次之。综上,板蓝根LAI呈S形曲线增长,其中营养生长期和肉质根生长期是快速增长阶段,该阶段亏水处理对LAI影响显著。

### 2.3 亏缺灌溉对叶片生理指标的影响

#### 2.3.1 光合速率

亏缺灌溉对板蓝根营养生长期和肉质根生长期叶片净光合速率( $P_n$ )均有影响(图1B)。营养生长期和肉质根生长期,亏缺灌溉板蓝根叶片 $P_n$ 均降低,且亏水程

度越高,降幅越大。营养生长期,与CK相比,受亏缺灌溉影响,重度亏水处理(V3G0、V3G1和V3G2)的 $P_n$ 分别下降15.8%、11.5%和18.8%;中度亏水处理V2G0和V2G1的 $P_n$ 均比CK降低约12.0%;其余处理的 $P_n$ 均有所降低,除处理V1G2外降幅在4.2%–9.7%之间。肉质根生长期,复水处理V3G0的 $P_n$ 为15.95  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,与前生育阶段相比虽有所增加但增幅较小,且较CK下降14.5%;复水处理V1G0和V1G1的 $P_n$ 分别达19.52和19.84  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,均高于CK,表现出复水补偿效应;其余连续亏水处理的 $P_n$ 较CK低4.5%–14.3%,其中肉质根生长期中度和轻度亏水处理V1G2和V2G1的 $P_n$ 分别降低10.1%和7.3%。但进入肉质根成熟期,恢复供水后,处理V1G2和V2G1的 $P_n$ 分别为11.45和11.31  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,略低于CK但有一定回升。由此表明,板蓝根营养生长期和肉质根生长期叶片 $P_n$ 尽管受到亏缺灌溉的影响,但在下一阶段恢复供水后,其 $P_n$ 均有所回升,即表现为相应的复水补偿效应。

#### 2.3.2 蒸腾速率

亏缺灌溉对板蓝根营养生长期和肉质根生长期叶片 $T_r$ 亦有较大影响(图1C)。板蓝根叶片 $T_r$ 随亏水程度的加剧呈降低趋势,在营养生长期表现得较为突出,其叶片日均 $T_r$ 明显大于肉质根生长期。营养生长期,轻度亏水处理V1G1的 $T_r$ 与CK相近,处理V1G0则略高,均无显著差异;其余处理的 $T_r$ 较CK均有不同幅度的下降,其中中度亏水处理V2G1和V2G2的 $T_r$ 下降约11.00%,重度亏水处理V3G0、V3G1和V3G2比CK分别降低11.96%、25.29%和31.66%。肉质根生长期,各处理 $T_r$ 较CK均有下降,其中该阶段充分供水的处理V1G0较CK下降幅度较小,差异不显著,而轻度亏水处理(V1G1、V2G1和V3G1)的 $T_r$ 较CK均显著下降,降幅介于6.90%–28.95%之间,中度亏水处理(V1G2、V2G2和V3G2)的 $T_r$ 降幅在11.86%–32.29%之间。由此表明,板蓝根营养生长期和肉质根生长期重、中度亏缺灌溉均会显著影响 $T_r$ ,降低光合能力。

#### 2.3.3 气孔导度

如图1D所示,营养生长期各亏水处理的 $G_s$ 与CK相比,除处理V1G0和V1G1略有升高外,其余处理均有所下降,其中重度亏水处理(V3G0、V3G1和V3G2)的

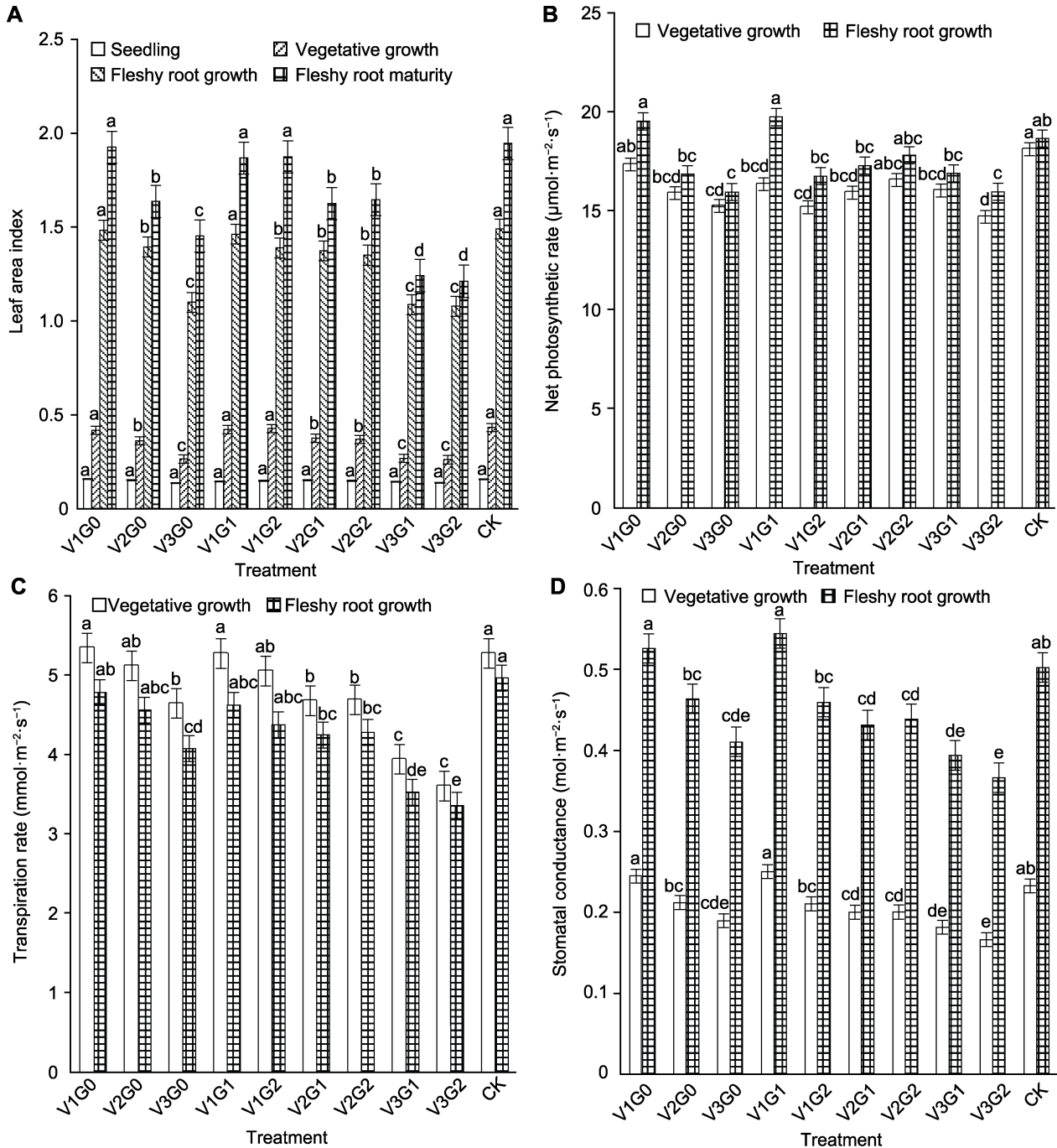


图1 亏缺灌溉对板蓝根叶片光合特性的影响

(A) 叶面积指数; (B) 净光合速率; (C) 蒸腾速率; (D) 气孔导度。V1G0、V2G0、V3G0、V1G1、V1G2、V2G1、V2G2、V3G1、V3G2及CK同表2。不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Figure 1 Effects of deficit irrigation on photosynthetic characteristics of *Isatis tinctoria* leaves

(A) Leaf area index; (B) Net photosynthetic rate; (C) Transpiration rate; (D) Stomatal conductance. V1G0, V2G0, V3G0, V1G1, V1G2, V2G1, V2G2, V3G1, V3G2, and CK are the same as Table 2. Different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ).

$G_s$ 分别降低18.57%、21.98%和28.59%, 且差异显著, 中度亏水处理V2G0、V2G1和V2G2分别降低8.96%、

14.07%和13.95%; 说明亏缺灌溉引起叶片 $G_s$ 变小, 且亏水程度越高,  $G_s$ 越小。在肉质根生长期, 复水处

理V2G0的 $G_s$ 较前期有所增加, 处理V3G0基本保持不变, 轻度亏水处理V1G0和V1G1的 $P_n$ 在复水后呈现补偿响应, 其 $G_s$ 亦变大, 其它重、中度亏水处理(V1G2、V2G1、V2G2、V3G1和V3G2)的 $G_s$ 分别较CK降低8.56%、14.17%、12.67%、21.60%和27.09%, 说明肉质根生长期连续的中、轻度亏水, 板蓝根叶片气孔导度亦表现大幅降低。可见, 板蓝根叶片 $G_s$ 会因营养生长期和肉质根生长期中度和重度亏水而降低。

## 2.4 亏缺灌溉板蓝根的节水增产效应

### 2.4.1 节水增产效应

亏缺灌溉下的板蓝根(图2)表现节水增产效应。研究结

果(表3)表明, 以CK的产量( $8\ 348.91\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )为标准, 轻度亏水处理V1G0和V1G1的产量与CK基本接近, 无显著差异, 增产率分别为1.51%和-0.48%, 表明营养生长期轻度亏水不仅不会显著降低板蓝根经济产量, 反而有利于最终产量的形成。重度连续亏水处理, V3G1和V3G2的产量均较CK显著降低, 增产率均达-30.00%, 而处理V3G0在肉质根生长期充分灌水后有一定的补偿效应, 但干旱胁迫的影响已经形成, 其最终较CK增产-16.32%。中度亏水处理V2G0增产率为-8.51%; 其余中轻度亏水处理(V1G2、V2G1、V2G2)增产率介于-14.39%—-17.07%, 差异显著, 表明中度和重度亏水处理对板蓝根经济产量影响显著。

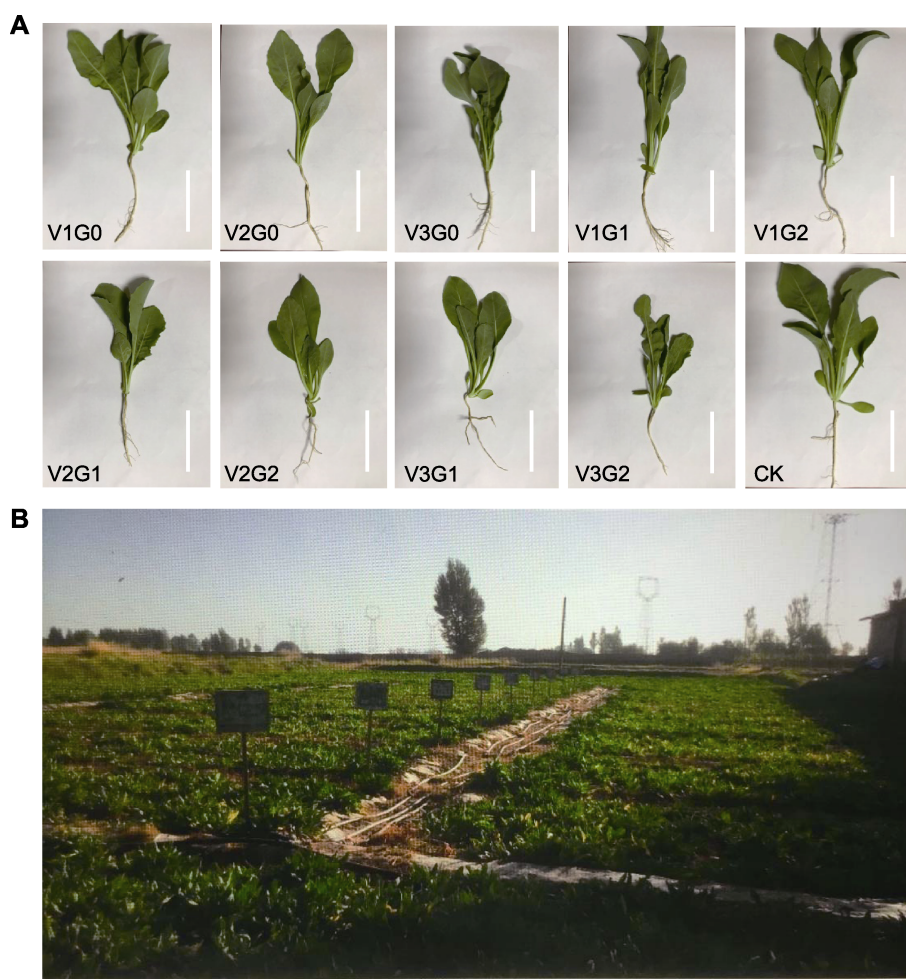


图2 亏缺灌溉下的板蓝根

(A) 不同控水条件下的板蓝根植株(bars=8 cm); (B) 板蓝根试验田。V1G0、V2G0、V3G0、V1G1、V1G2、V2G1、V2G2、V3G1、V3G2及CK同表2。

Figure 2 Phenotype of *Isatis tinctoria* under deficit irrigation

(A) *Isatis tinctoria* plants with different water control treatment (bars=8 cm); (B) *Isatis tinctoria* experimental field. V1G0, V2G0, V3G0, V1G1, V1G2, V2G1, V2G2, V3G1, V3G2, and CK are the same as Table 2.



表3 亏缺灌溉下板蓝根的产量

Table 3 Yield of *Isatis tinctoria* under deficit irrigation

Treatments	Irrigation amount (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	Total biomass (kg·hm <sup>-2</sup> )	Economic yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	Water saving rate (%)	Increasing yield rate (%)
V1G0	153.02	12577.33	8475.38 a	7.96	1.51
V2G0	150.87	11116.52	7638.14 b	9.26	-8.51
V3G0	133.16	10487.87	6986.12 d	19.91	-16.32
V1G1	151.81	12185.38	8308.44 a	8.69	-0.48
V1G2	147.04	10603.39	7147.23 bc	11.56	-14.39
V2G1	143.74	10577.01	7029.39 c	13.55	-15.80
V2G2	137.64	10212.44	6923.72 d	17.21	-17.07
V3G1	119.63	8988.38	5895.17 e	28.05	-29.39
V3G2	116.08	8798.07	5784.38 e	30.18	-30.72
CK	166.26	12591.06	8348.91 a	-	-

V1G0、V2G0、V3G0、V1G1、V1G2、V2G1、V2G2、V3G1、V3G2及CK同表2。同列数值后不同小写字母表示各处理在0.05水平差异显著。

V1G0, V2G0, V3G0, V1G1, V1G2, V2G1, V2G2, V3G1, V3G2, and CK are the same as Table 2. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level.

水分亏缺程度越小，作物消耗的水量就相对较少。同样以CK的灌溉水量作为标准，重度亏水处理(V3G0、V3G1和V3G2)的节水率介于19.91%–30.18%之间，中度和中轻度连续亏水处理(V2G0、V2G1和V2G2)的节水率为9.26%–17.21%，但其灌溉水利用效率均较CK显著下降；而轻度和轻中度连续亏水处理的节水率则相对较低，其中处理V1G0与V1G1的节水率约为8.00%，但综合其经济产量与灌溉水利用效率，二者在节水的前提下产量并未显著降低且提高了灌溉水的利用效率。

2.4.2 灌水量与产量的关系

我们分别对板蓝根产量和灌溉水利用效率与灌水量均值进行拟合，均呈现出二次曲线(图3)，拟合方程分别为： $y_1=-0.1739x^2+105.77x-4217.6$  ( $R^2=0.8771$ )， $y_2=-0.0013x^2+0.412x+19.122$  ( $R^2=0.1192$ )，其中， $y_1$ 和 $y_2$ 分别为板蓝根产量(kg·hm<sup>-2</sup>)和灌溉水利用效率(kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)； $x$ 是灌水量均值(mm)。由拟合方程的 $R^2$ 可知，灌溉水利用效率与灌水量均值不相关，而产量与灌水量显著相关，表明板蓝根产量随全生育期灌水量的增加而升高，达到临界值后逐步下降。在板蓝根的生产实践中，可以以此来指导灌溉。因此，充分供水虽然能确保板蓝根的最终产量，但其灌溉效益较低，还有可能造成灌水浪费。

2.5 讨论

2.5.1 亏缺灌溉对板蓝根叶片光合特性的影响

光合作用主要在植物的叶片部位进行，因此叶片的 $P_n$ 、 $T_r$ 和 $G_s$ 是表征植株光合能力的关键生理指标，同时也能反映出植株的水分状况。武阳等(2012)研究表明，香梨(*Pyrus sinkiangensis*)树叶片 $P_n$ 、 $T_r$ 和 $G_s$ 均因干旱胁迫而显著降低，胁迫解除后均有所恢复，各指标在轻度胁迫下与对照相近，而重度胁迫下均小于对

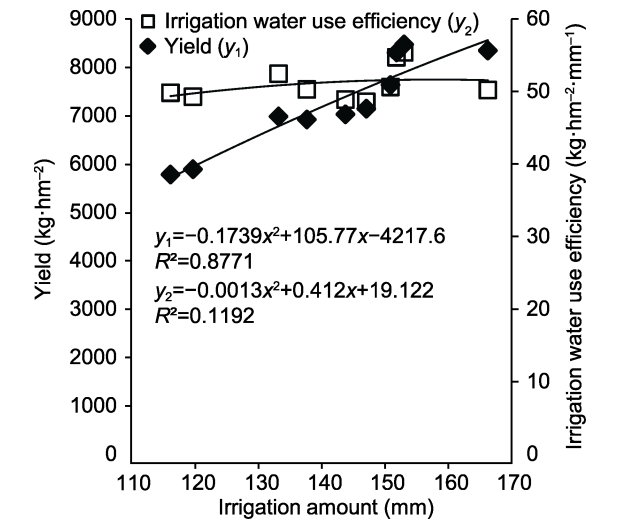


图3 板蓝根灌水量与产量和灌溉水利用效率的关系

Figure 3 Relationship between irrigation amount and yield and irrigation water use efficiency of *Isatis tinctoria*

照。此外,干旱胁迫能够提高叶片的水分利用效率。刘小飞等(2019)的隔沟调亏灌溉实验表明,尽管水分亏缺在一定程度上降低了冬小麦旗叶光合作用,但叶片水分利用效率的提升能最大限度地保证灌浆,减轻产量的降幅。张凯等(2015)的亏缺灌溉番茄(*Lycopersicon esculentum*)实验表明,在轻度亏水条件下叶片气体交换特性与对照无显著差异,而中度亏水则显著降低了叶片 $P_n$ 、 $T_r$ 和 $G_s$ 。张恒嘉和李晶(2013)对马铃薯(*Solanum tuberosum*)的滴灌调亏实验表明,不同生育阶段调亏均会造成叶片 $P_n$ 、 $T_r$ 和 $G_s$ 下降,且在复水后 $P_n$ 和 $G_s$ 有所增加,但 $T_r$ 基本不变。本研究表明,营养生长期重度亏水(V3G0、V3G1和V3G2)显著降低板蓝根叶片 $P_n$ 、 $T_r$ 和 $G_s$ ,其次是中度亏水(V2G0和V2G1)。这与孟兆江等(2011)以及刘译锴等(2015)的研究结果相符。他们的研究表明,中度水分调亏显著抑制冬小麦和黑麦草(*Lolium perenn*)叶片 $P_n$ ,而重度亏水则会造成叶片光合系统无法逆转的损坏,即作物的光合作用及生长受到阻碍,且在恢复供水后各指标均未能恢复正常。然而本研究发现,营养生长期轻度亏水(V1G0)和肉质根生长期轻中度连续亏水(V1G1和V1G2)对板蓝根光合能力无显著影响,同时在恢复供水后,板蓝根叶片 $P_n$ 、 $T_r$ 和 $G_s$ 均有一定程度的提高,这主要是由于轻度亏水后又及时恢复供水对叶片光合速率等生理指标具有补偿效应。本研究通过对板蓝根营养生长期和肉质根生长期进行不同水平(轻、中和重度)的亏缺灌溉,结果表明,中、重度亏水使板蓝根叶片光合作用受到抑制,这可能是由于水分胁迫程度超过了植株的承受范围且持续时间较长,其细胞壁变得坚固,即便充分供水亦无法恢复到正常状态,最终造成减产。这与王玉才等(2015)的研究结论基本一致。

### 2.5.2 亏缺灌溉板蓝根的节水增产效应

韩占江等(2009)和袁淑芬等(2014)分别对小麦和春玉米的水分调亏实验表明,及时适度的亏水可在减少作物生育期耗水量和提高作物对土壤水分利用效率的同时节省灌溉用水,且不影响产量。亏缺灌溉不仅对小麦和玉米等大田作物有节水增产效应,而且本研究发现对药用植物板蓝根也具有同样的效果。轻度亏水处理(V1G0和V1G1)的产量与对照相比无显著差异,其余亏水处理则均有不同程度的降低,其中中度亏水

处理(V2G0、V1G2、V2G1和V2G2)的增产率介于-8.51%—-17.07%之间。重度亏水处理(V3G1和V3G2)增产率达-30.0%,且存在显著差异,其原因主要是中度或重度干旱胁迫导致植物细胞壁变坚固,且在复水后难以复原,进而使干物质积累受阻,产量下降。这与时学双等(2015)得出水分亏缺对春青稞(*Hordeum vulgare* var. *nudum*)产量影响的结论相似。以CK为基准,轻度亏水处理(V1G0和V1G1)的节水率相对较小,分别为7.96%和8.69%,而中度(V2G0、V1G2、V2G1和V2G2)和重度(V3G0、V3G1和V3G2)亏水处理的节水率分别为9.26%—17.21%和19.91%—30.18%,但其产量和水分利用效率显著降低,这与王玉才等(2018)的研究结论相近。板蓝根营养生长和肉质根生长阶段细胞增殖速度快,生长旺盛,对水分最为敏感,此阶段实施重或中度水分胁迫将影响植株体内相关的生理生化过程,引起植物叶片气孔关闭、蒸腾作用下降、气体交换及矿质营养吸取和输送减缓,从而抑制植物正常的生长发育;而且由于淀粉水解,呼吸基质增加,使呼吸加强而光合受阻,即表现为有机物的消耗大于累积,使生物量下降(郭巧生, 2009)。此外,根茎类药用植物大多为中、旱生植物,土壤水分条件会显著影响根系生长。土壤干旱条件下,植物根系下扎,木质化程度加深,亦对根系生长不利,最终造成减产。因此,综合考虑板蓝根的产量和节水率,营养生长期轻度亏水不仅不会减产,反而会增产且节水效果较好。

## 3 结论

综合分析板蓝根光合生理特性及节水增产效应,可知营养生长期和肉质根生长期轻度连续亏水为最优控水策略。综上,在板蓝根种植过程中适宜的亏缺滴灌既可提高叶片的光合能力,又可实现节水增产目的,对河西地区药用植物的种植具有重要意义。然而,我们仅对板蓝根营养生长期和肉质根生长期进行了连续亏缺灌溉研究,生育期初期和末期调亏以及水肥双因素对板蓝根产量和品质的影响是否更具有优势有待进一步研究。

## 参考文献

柏军华, 王克如, 初振东, 陈兵, 李少昆 (2005). 叶面积测定



- 方法的比较研究. 石河子大学学报(自然科学版) **23**, 216–218.
- 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 柴红敏, 胡笑涛, 王健 (2000). 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究. 农业工程学报 **16**(3), 24–27.
- 董浩, 毕军, 夏光利, 周勋波, 陈雨海 (2014). 灌溉和种植方式对冬小麦生育后期旗叶光合特性及产量的影响. 应用生态学报 **25**, 2259–2266.
- 杜宗绪, 刘英, 高嗣慧 (2005). 板蓝根栽培与贮藏加工新技术. 北京: 中国农业出版社. pp. 7–10.
- 房玉林, 孙伟, 万力, 惠竹梅, 刘旭, 张振文 (2013). 调亏灌溉对酿酒葡萄生长及果实品质的影响. 中国农业科学 **46**, 2730–2738.
- 郭巧生 (2009). 药用植物栽培学. 北京: 高等教育出版社. pp. 26–33.
- 韩占江, 于振文, 王东, 王西芝, 许振柱 (2009). 调亏灌溉对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响. 应用生态学报 **20**, 2671–2677.
- 侯格平, 甄东升, 姜青龙, 焦阳 (2015). 民乐县板蓝根高产优质栽培试验研究. 农业科技通讯 (9), 132–134.
- 黄兴法, 李光永, 王小伟, 曾德超, 孙乃健 (2001). 充分灌与调亏灌溉条件下苹果树微喷灌的耗水量研究. 农业工程学报 **17**(5), 43–47.
- 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 李岩 (2014). 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响. 农业工程学报 **30**, 116–123.
- 梁建萍, 贾小云, 刘亚令, 吴云, 周然, 冯前进 (2016). 干旱胁迫对蒙古黄芪生长及根部次生代谢物含量的影响. 生态学报 **36**, 4415–4422.
- 刘长利, 王文全 (2008). 干旱胁迫对甘草酸积累影响的物质组分分配研究. 中国中药杂志 **33**, 2852–2853.
- 刘小飞, 李彪, 孟兆江, 刘祖贵, 张寄阳 (2019). 隔沟调亏灌溉对冬小麦旗叶生理特性与产量形成的影响. 农业机械学报 **50**, 320–328.
- 刘译锴, 郑明珠, 马莉, 刘铁军, 杨有俊, 刘金荣 (2015). 调亏灌溉对多年生黑麦草光合特性的影响及阈值的确定. 草业科学 **32**, 570–580.
- 孟兆江, 段爱旺, 王晓森, 高阳, 申孝军 (2016). 调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响. 农业机械学报 **47**(4), 99–104.
- 孟兆江, 孙景生, 段爱旺, 刘祖贵, 王和洲 (2010). 调亏灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆特征及其模拟模型. 农业工程学报 **26**, 18–23.
- 孟兆江, 孙景生, 刘祖贵, 王晓森, 王景雷, 高阳, 段爱旺 (2011). 调亏灌溉对冬小麦不同生育阶段光合速率的影响. 麦类作物学报 **31**, 1130–1135.
- 邵光成, 刘娜, 陈磊 (2008). 温室辣椒时空亏缺灌溉需水特性与产量的试验. 农业机械学报 **39**(4), 117–121.
- 时学双, 李法虎, 闫宝莹, 何东, 普布多吉, 曲珍 (2015). 不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响. 农业机械学报 **46**(10), 144–151, 265.
- 唐昊 (2018). 中医药与养生保健探讨. 养生保健指南 (49), 282.
- 王瑞, 杨海英, 杨琪伟, 黄山君, 王峥涛 (2010). 板蓝根的质量标准研究. 中草药 **41**, 478–480.
- 王世杰, 张恒嘉, 巴玉春, 王玉才, 黄彩霞, 薛道信, 李福强 (2018). 调亏灌溉对膜下滴灌辣椒生长及水分利用的影响. 干旱地区农业研究 **36**(3), 31–38.
- 王玉才 (2018). 河西绿洲苜蓿水分高效利用及调亏灌溉模式优化研究. 博士论文. 兰州: 甘肃农业大学. pp. 59–63.
- 王玉才, 邓浩亮, 李福强, 王泽义, 张万恒, 黄彩霞, 张恒嘉 (2015). 调亏灌溉对苜蓿光合特性及品质的影响. 水土保持学报 **31**(6), 291–295, 325.
- 王玉才, 张恒嘉, 邓浩亮, 王世杰, 巴玉春 (2018). 调亏灌溉对苜蓿水分利用及产量的影响. 植物学报 **53**, 322–333.
- 武阳, 王伟, 赵智, 黄兴法, 范云涛, 苏柳芸 (2012). 调亏灌溉对香梨叶片光合速率及水分利用效率的影响. 农业机械学报 **43**(11), 80–86.
- 袁淑芬, 陈源泉, 闫鹏, 陶志强, 崔吉晓, 李超, 隋鹏 (2014). 水分胁迫对华北春玉米生育进程及物质生产力的影响. 中国农业大学学报 **19**(5), 22–28.
- 张恒嘉, 李晶 (2013). 绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用. 农业机械学报 **44**(10), 143–151.
- 张凯, 陈年来, 韩国君, 张正 (2015). 调亏灌溉下番茄叶片气体交换日变化和光响应特性. 中国沙漠 **35**, 923–929.
- 郑健, 蔡焕杰, 陈新明, 王健 (2009). 调亏灌溉对温室小型西瓜水分利用效率及品质的影响. 核农学报 **23**, 159–164.
- 周丽, 王永明, 周达, 罗延丽, 张新慧 (2015). 干旱胁迫对银柴胡药材活性成分含量的影响研究. 时珍国医国药 **26**, 1463–1465.
- 邹慧, 黄兴法, 龚时宏 (2012). 水分调亏对地下滴灌夏玉米田水热动态的影响. 农业机械学报 **43**(9), 72–77.
- Hooshmand M, Albaji M, Nasab SB, Ansari NA (2019). The effect of deficit irrigation on yield and yield components of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*) in hydroponic culture in Ahvaz region, Iran. *Sci Hortic* **254**, 84–90.
- Moradi P, Ford-Lloyd B, Pritchard J (2014). Plant-water

- responses of different medicinal plant thyme (*Thymus* spp.) species to drought stress condition. *Aust J Crop Sci* **8**, 666–673.
- Özmen S, Kanber R, Sarı N, Ünlü M (2015). The effects of deficit irrigation on nitrogen consumption, yield, and quality in drip irrigated grafted and ungrafted watermelon. *J Integr Agric* **14**, 966–976.
- Selahvarzi Y, Zamani Z, Fatahi R, Talaei AR (2017). Effect of deficit irrigation on flowering and fruit properties of pomegranate (*Punica granatum* cv. Shahvar). *Agric Water Manage* **192**, 189–197.
- Sezen SM, Yazar A, Tekin S (2019). Physiological response of red pepper to different irrigation regimes under drip irrigation in the Mediterranean region of Turkey. *Sci Hortic* **245**, 280–288.
- Trentacoste ER, Calderón FJ, Contreras-Zanessi O, Galarza W, Banco AP, Puertas CM (2019). Effect of regulated deficit irrigation during the vegetative growth period on shoot elongation and oil yield components in olive hedgerows (cv. Arbosana) pruned annually on alternate sides in San Juan, Argentina. *Irrigation Sci* **37**, 533–546.
- Zhao Z, Wang W, Wu Y, Xu MX, Huang XF, Ma YJ, Ren DX (2015). Leaf physiological responses of mature pear trees to regulated deficit irrigation in field conditions under desert climate. *Sci Hortic* **187**, 122–130.
- Zhou Q, Ju CX, Wang ZQ, Zhang H, Liu LJ, Yang JC, Zhang JH (2017). Grain yield and water use efficiency of super rice under soil water deficit and alternate wetting and drying irrigation. *J Integr Agric* **16**, 1028–1043.

## Effects of Deficit Irrigation on the Photosynthetic and Physiological Characteristics of Leaves and Yield of *Isatis tinctoria*

Zeyi Wang<sup>1</sup>, Hengjia Zhang<sup>1\*</sup>, Yucai Wang<sup>1</sup>, Xietian Chen<sup>1</sup>, Yuchun Ba<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

<sup>2</sup>Administration of Hongshuihe River, Minle County, Minle 734500, China

**Abstract** Taking the *Isatis tinctoria* as research crop, the field water control experiment was carried out in an arid oasis of the middle of the Hexi Corridor in 2018, and deficit levels included slight, moderate, severe water deficit (WD) and suitable irrigation, the influences of WD on physiological parameters, irrigation volume, yield and quality of *Isatis tinctoria* were studied with drip irrigation and plastic mulch, which would provide the theoretical basis for the establishment of irrigation management strategy of *I. tinctoria* in Hexi area. The results showed that WD treatment during the vegetative and fleshy root growth stages reduced the leaf photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), and stomatal conductance ( $G_s$ ), and with the higher degree of WD, the greater the decrease. Slight WD treatment had no significant effects on leaf photosynthetic capacity, and yield as compared with control, but the rest of treatment led to varying degrees of decrease in leaf photosynthetic capacity and yield. Fitting the relationship between the irrigation amount and the yield showed a quadratic parabola, which demonstrated that the yield did not enhance along with the increase of the irrigation amount. In conclusion, under-mulched drip irrigation WD reduces photosynthetic capacity of *I. tinctoria* leaves, while slight WD irrigation applied during the vegetative growth period saves irrigation water and improves yield and irrigation water use efficiency.

**Key words** *Isatis tinctoria*, deficit irrigation, photosynthetic physiological characteristics, yield

Wang ZY, Zhang HJ, Wang YC, Chen XT, Ba YC (2020). Effects of deficit irrigation on the photosynthetic and physiological characteristics of leaves and yield of *Isatis tinctoria*. *Chin Bull Bot* **55**, 705–714.

\* Author for correspondence. E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn

(责任编辑: 白羽红)