

## 水杨酸对不同灌水下限青花菜 生理特性及产量品质的影响

杨 伟, 张国斌, 周德霞, 王丽君, 周亚婷, 郁继华\*

(甘肃农业大学 园艺学院, 兰州 730070)

**摘 要:**以青花菜为试材, 采用大田试验研究了 0.15 mmol/L 水杨酸(SA)对不同灌水下限(75%、60%和 45%土壤相对含水量)青花菜生理特性及产量品质的影响。结果显示:(1)随灌水下限的降低, 青花菜叶片相对含水量、水势及叶绿素含量均呈下降趋势, 而其叶片电解质渗透率以及游离脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)、可溶性蛋白(Pr)含量逐渐升高;青花菜的花球重及维生素 C 含量(Vc)随灌水下限的降低而降低, 相反硝酸盐含量及可溶性固形物含量随之升高。(2)叶面喷施 0.15 mmol/L SA 显著提高了青花菜叶片相对含水量、水势、渗透调节物质含量、产量及品质, 且降低了膜脂过氧化产物 MDA 含量, 其中以 45%灌水下限处理效果最为显著, 60%灌水下限处理次之, 75%灌水下限处理最小。研究认为, 适宜浓度外源 SA 通过改善青花菜叶片水分生理状况, 提高叶片渗透调节物质含量, 降低质膜透性来增强其对干旱胁迫的抗性, 且以 60%灌水下限配合叶面喷施 0.15 mmol/L SA 处理较佳。

**关键词:**青花菜;水杨酸;灌水下限;生理特性;产量品质

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

## Effects of Salicylic Acid on Physiological Characteristics and Yield, Quality of Broccoli under Different Lower Limits of Flood Irrigation

YANG Wei, ZHANG Guobin, ZHOU Dexia, WANG Lijun, ZHOU Yating, YU Jihua\*

(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** With broccoli as test material, a field experiment was carried out to investigate the effects of 0.15 mmol/L salicylic acid (SA) on physiological characteristics, yield and quality of broccoli under different lower limits of flood irrigation. The results showed that: (1) The leaf relative water content and water potential and chlorophyll content decreased, while the blade penetration proline (Pro) and malondialdehyde (MDA) and soluble protein (Pr) content were gradually increased with the lower of irrigation limit; the flower ball weight and vitamin C content (Vc) decreased with the lower of irrigation limit; on the contrary, the nitrate and soluble solids contents were increased. (2) When spraying 0.15 mmol/L SA significantly increased the leaf relative water content and water potential, osmotic adjustment substance content, yield and quality, while reduce the membrane lipid peroxidation product and MDA content, of which 45% irrigation limit is the most obvious, 60% followed, 75% minimum. Thus, the suitable concentration of exogenous SA enhance its resistance to drought stress by improving water in broccoli leaves and leaf osmotic adjustment content and reducing membrane permeability, and the lower limit of 60% with spraying 0.15 mmol/L SA handled better.

**Key words:** broccoli; salicylic acid; lower limit of flood irrigation; physiological characteristics; yield and quality

收稿日期: 2013-12-24; 修改稿收到日期: 2014-03-17

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设资金项目(CARS-25-C-07); 国家自然科学基金项目(31260473)

作者简介: 杨 伟(1986—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培生理及设施作物栽培方面的研究。E-mail: yangwnxy@163.com

\* 通信作者: 郁继华, 博士, 教授, 主要从事蔬菜栽培生理及设施作物生产的教学与科研工作。E-mail: yujihua@gsau.edu.cn

青花菜(*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck)属十字花科芸薹属草本植物,因其花球富含维生素、矿物质、蛋白质及保健抗癌物质而深受消费者的青睐。但由于青花菜生育期需水量较多,而河西走廊地区常年干旱少雨,农业用水紧缺,单位耕地面积平均用水量仅为全国水平 1/7<sup>[1]</sup>,所以水分成为制约该地区青花菜生产的主要因素。灌水下限作为灌水的始点指标,决定生育期内的灌水量和灌溉次数。已有报道,灌水下限过高反而不利于植物生长发育,使水分利用效率降低<sup>[2]</sup>,产量<sup>[3]</sup>和品质<sup>[4]</sup>下降;过低又会造成作物重度干旱胁迫,引起机体生理代谢紊乱,生长发育受阻,最终影响产量品质<sup>[5-7]</sup>。除此而外,干旱胁迫也会造成生态环境的破坏<sup>[8]</sup>。因此,农业生产中如何降低用水量、提高水分利用率,是目前高效节水灌溉领域研究的一个重点。

水杨酸(SA)作为小分子酚类化合物可以调节植物诸多生理过程,如诱导植物获得抗旱性<sup>[9]</sup>、抗盐性<sup>[10]</sup>、抗热性<sup>[11-13]</sup>、抗病性<sup>[14]</sup>,促进光合作用等。关于 SA 的生理作用,目前已在番茄、黄瓜、辣椒等作物中有所报道,但结合灌水下限在青花菜上的研究尚未见报道。鉴于此,本试验针对青花菜生长习性 & 生产实际问题,通过叶面喷施 SA,探讨了 SA 对不同灌水下限青花菜叶片水分生理、渗透调节物质、膜稳定性及产量品质的影响,初步探明水杨酸对不同灌水下限青花菜的作用机制,为 SA 合理用于青花菜高效节水灌溉提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2013 年 4 月至 7 月在甘肃省永昌县城关镇大坝村进行,该地属河西走廊高海拔冷凉气候区,年均气温 4.8℃,常年干旱少雨,无霜期 130 d,年日照时数 2 933 h,土壤为灌漠土。试验前土壤全氮 0.94 mg/kg,有效磷 16.29 mg/kg,速效钾 226 mg/kg,容重 1.35 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量 28.67%。

### 1.2 试验材料

供试青花菜品种为‘中青九号’,于 2013 年 4 月 3 日育苗,5 月 7 日定植,7 月 12 日开始收获。

### 1.3 试验设计

灌水上限统一设定为相对含水量 95%,下限分别设定为相对含水量 75%(CK)、60%(W<sub>2</sub>)、45%(W<sub>3</sub>),在预备试验基础上选出最佳 SA 浓度为 0.15 mmol/L,用 SA 表示。试验设 6 个处理分别为 CK、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、CK+SA、W<sub>2</sub>+SA、W<sub>3</sub>+SA,随机排列,小

区面积 65.52 m<sup>2</sup>,株距 40 cm,行距 35 cm,每小区 6 垄,重复 3 次,每垄 50 株。各小区通过水表控制灌水量,每 3 d 监测 1 次土壤含水量,临近灌水下限前加测土壤含水量,18:00 定时检测,次日 9:00 补充水量至上限。灌水公式为:

$$M = \frac{S \times r \times h \times \theta_{fc} \times (q^1 - q^2)}{100 \times IE}$$

式中, $M$  为灌水量(m<sup>3</sup>); $S$  为灌溉面积(65.52 m<sup>2</sup>); $r$  为土壤容重(1.35 g/cm<sup>3</sup>); $h$  为湿润层深度(30 cm); $\theta_{fc}$  为田间最大持水量(28.67%); $q^1$ 、 $q^2$  分别为灌水的上下限; $IE$  为灌溉水分利用系数,取 0.95。

处理前各小区统一灌水至上限,分别于幼苗期、团棵期、莲座期、结球期叶面喷施 0.15 mmol/L SA(正反面喷施,以叶面湿润为止),喷施时间为早晨。试验中所用叶片均于 SA 处理后第 2 天采取,各小区采取长势一致的同一部位 10 片叶(不取两端边缘上叶片,排除边际效应),弃去叶脉,剪碎混匀后用锡箔纸包裹少许迅速放入液氮罐中,之后转入-80℃冰箱中保存备用,剩余叶片用于测定水分生理指标,其他农艺管理技术均与当地一致。

### 1.4 测定指标与方法

**1.4.1 叶片生理指标** 于青花菜团棵期、莲座期、结球期分别测定叶片相对含水量、丙二醛、游离脯氨酸含量;于团棵期和结球期测定叶片水势、渗透率、可溶性蛋白含量;叶片叶绿素含量仅结球期测定 1 次。其中叶片叶绿素含量按 Arnon 方法测定<sup>[15]</sup>,叶片丙二醛含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量、相对含水量、水势、电解质渗透率均参考邹琦《植物生理学实验指导》<sup>[16]</sup>进行。

**1.4.2 产量和品质指标** 采收前各小区随机选取 6 棵青花菜测定单球重及品质,同时记录小区产量,再折合公顷产量。品质指标中的维生素 C(Vc)含量采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定<sup>[16]</sup>,硝酸盐含量采用水杨酸法<sup>[16]</sup>测定,可溶性固形物含量采用手持测糖仪测定<sup>[16]</sup>。

### 1.5 数据处理和统计方法

用 Excel 2010 和 SPSS 19 软件进行单因素方差分析,所有数据均重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片叶绿素含量、相对含水量、水势的影响

**2.1.1 叶绿素含量** 图 1 显示,结球期青花菜叶片叶绿素含量随灌水下限的降低而降低,W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处

理分别比 CK 降低 9.95% 和 55.45%, 但仅  $W_3$  达到显著性水平; 经 0.15 mmol/L SA 处理后, CK+SA、 $W_2$ +SA、 $W_3$ +SA 处理叶绿素含量均相应的高于 CK、 $W_2$ 、 $W_3$  处理, 其中  $W_3$ +SA 处理较  $W_3$  处理极显著提高 71.18%, 其余均无显著性差异。说明灌水下限降低会导致青花菜叶片叶绿素含量不同程度降低, 而 0.15 mmol/L SA 处理能不同程度提高叶绿素含量, 且灌水下限越低效果越显著, 并在灌水下限为 45% 土壤含水量时达到显著水平。

**2.1.2 相对含水量** 由图 2 可以看出, 随着灌水下限的降低及生育期的推进, 青花菜叶片相对含水量总体呈现下降趋势, 且灌水下限越低, 叶片相对含水量下降越快。于团棵期,  $W_2$  和  $W_3$  处理较 CK 分别升高 8.69% 和 4.86%, 但仅  $W_2$  达显著性水平; 莲座期和结球期三者均无显著性差异。SA 处理能不同程度地减缓其下降趋势, 但各时期各 SA 处理间均与相应对照无显著性差异, 如结球期, 处理  $W_2$  相对含水量为 75.18%,  $W_2$ +SA 处理则为 75.48%, 二者差异不显著。这可能是由于幼苗期干旱处理对叶片含水量影响较大, 但随着干旱的加剧, SA 处理促进根系不断从深层吸收更多水分供给地上部生长发育。因此, 后期造成相对含水量变化甚小。

**2.1.3 叶片水势** 图 3 反映出青花菜叶片水势随着灌水下限的降低而降低, 且下降幅度逐渐增大。

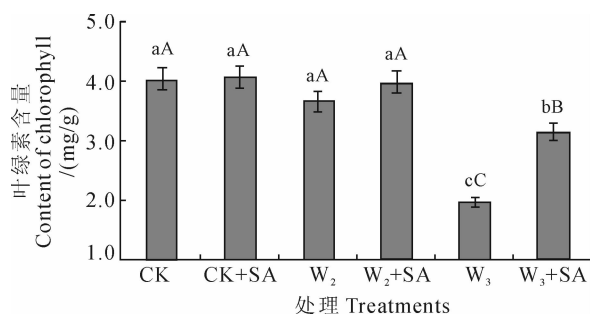


图 1 水杨酸对不同灌水下限结球期青花菜叶绿素含量的影响

CK、 $W_2$ 、 $W_3$  的灌溉下限分别为土壤相对水分含量 75%、60% 和 45%, SA 浓度为 0.15 mmol/L; 不同小写和大写字母分别表示处理间在 0.05 和 0.01 水平存在显著性差异; 下同

Fig. 1 Effect of SA on content of broccoli chlorophyll under different lower limits of flood irrigation during heading stage

The lower limits of flood irrigation of CK,  $W_2$ ,  $W_3$  are 75%, 60%, 45% relative soil water content, the SA concentration is 0.15 mmol/L; The different normal and capital letters indicate significant difference among treatments at 0.05 and 0.01 levels, respectively; The same as below

其中,  $W_2$  和  $W_3$  处理青花菜叶片水势在团棵期较 CK 分别下降 14.29% 和 39.10%, 在结球期较 CK 分别下降 54.30% 和 83.44%, 且均达极显著水平。经 SA 处理后, 与相应的 CK、 $W_2$ 、 $W_3$  相比较, CK+SA 叶片水势在团棵期和结球期略有提高, 但未达到显著水平;  $W_2$ +SA 处理叶片水势分别提高 11.82% 和 11.94%,  $W_3$ +SA 处理分别提高 16.22% 和 24.36%, 且均达极显著水平。这说明在低于 75% 灌水下限时, SA 能显著提高青花菜叶片水势, 而且灌水下限越低, 提高幅度越大。

## 2.2 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片电解质渗透率和 MDA 含量的影响

**2.2.1 电解质渗透率** 图 4 可以看出, 叶片电渗率随着灌水下限的降低而升高, 于团棵期,  $W_2$  和  $W_3$  较 CK 分别升高 14.34% 和 39.29%, 结球期较 CK 分别升高 23.82% 和 83.44%, 且差异均达极显著水平。SA 处理后, CK 无明显变化;  $W_2$ +SA 于两时期分别较  $W_2$  极显著下降 12.94%、14.24%; 而  $W_3$ +SA 处理下降幅度更大, 分别在团棵期和结球期比

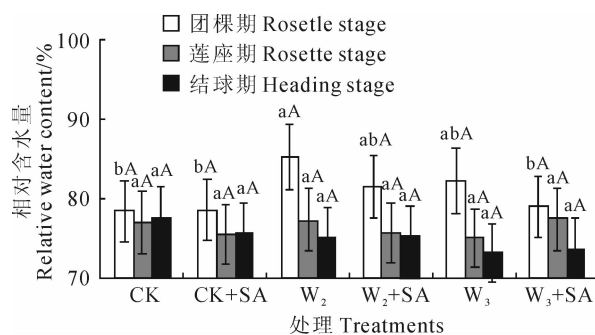


图 2 外源水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片相对含水量的影响

Fig. 2 Effect of SA on leaf relative water content of broccoli under different lower limits of flood irrigation

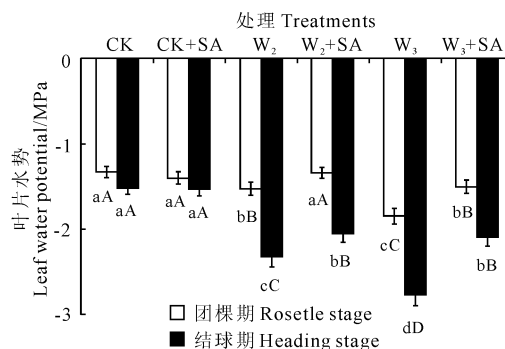


图 3 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片水势的影响

Fig. 3 Effect of SA on leaf water of potential broccoli under different lower limits of flood irrigation

W<sub>3</sub> 极显著下降 14.81%和 20.59%。这说明 SA 处理后,除 CK 外其余两处理青花菜叶片电渗率均有极显著的下降,且灌水下限越低下降幅度越大。

**2.2.2 MDA 含量** 由图 5 分析可见,随着灌水下限的降低青花菜叶片中 MDA 积累逐渐增多,团棵期的 W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处理较 CK 分别显著升高 21.41%、181.55%,莲座期分别显著升高 92.68%、191.47%,结球期分别显著升高 164.40%、347.15%。经 SA 处理后,除 CK 外均减缓了 MDA 的积累,至结球期 W<sub>2</sub>+SA 较 W<sub>2</sub> 极显著降低 25.14%,W<sub>3</sub>+SA 较 W<sub>3</sub> 极显著降低 33.36%。这说明 SA 能有效地抑制青花菜叶片因缺水而造成的 MDA 积累,避免更多的电解质外渗而带来的细胞膜损伤。

**2.3 水杨酸对不同灌水下限青花菜渗透调节物质的影响**

**2.3.1 游离脯氨酸含量** 由图 6 可以看出,青花菜游离脯氨酸含量随灌水下限的降低而升高。青花菜 CK 的游离脯氨酸含量于整个生育期内变化较为平缓,无明显差异;而 W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处理于莲座期开始急剧上升,且差异均达极显著水平。经 SA 处理后,各

处理青花菜游离脯氨酸含量在苗期变化较小,但从莲座期开始除 W<sub>3</sub> 下降外其余有所增加。其中,CK+SA 处理在团棵期比 CK 增加 43.47%,莲座期无明显变化,结球初期增加 79.22%;W<sub>2</sub>+SA 处理在团棵期比 W<sub>2</sub> 增加 17.03%,莲座期增加了 37.42%,接球期反而下降了 23%,这可能是由于结球初期灌水所致;W<sub>3</sub>+SA 处理在团棵期比 W<sub>3</sub> 升高 4.65%,莲座期下降 6.28%,结球期下降 9.66%,差异极显著。可见,在 60%以上灌水下限条件下,青花菜游离脯氨酸含量积累较少,当低于 60%灌水下限时对植物造成重度干旱胁迫,脯氨酸积累迅速增加,而 0.15 mmol/L SA 具有诱导 45%以上灌水下限青花菜脯氨酸含量积累的效应。

**2.3.2 可溶性蛋白含量** 图 7 可以看出,不同灌水下限条件下青花菜苗期叶片中可溶性蛋白含量较低,但随着生育期的推进,至接球初期,其含量迅速增加,以 W<sub>3</sub> 最高,这可能是 45%灌水下限导致青花菜水分胁迫使得叶片可溶性蛋白含量增加的原因<sup>[17]</sup>。

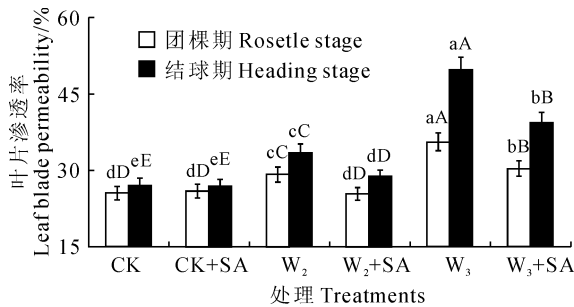


图 4 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片渗透率的影响  
Fig. 4 Effect of SA on leaf blade permeability of broccoli under different lower limits of flood irrigation

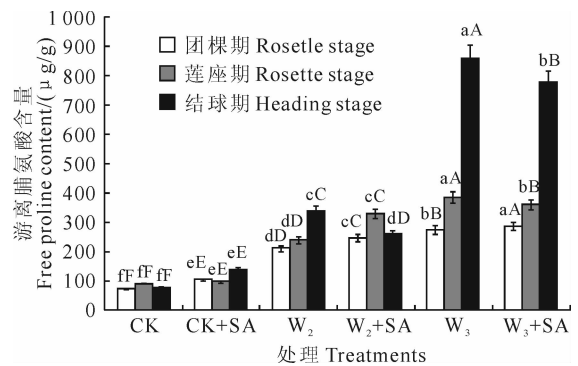


图 6 水杨酸对不同灌水下青花菜叶片游离脯氨酸含量的影响  
Fig. 6 Effect of SA on leaf free proline content of broccoli under different lower limits of flood irrigation

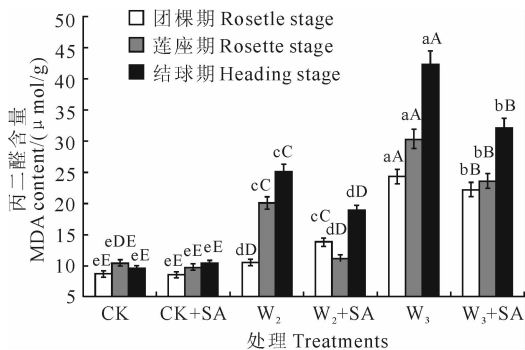


图 5 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片丙二醛含量的影响

Fig. 5 Effect of SA on leaf blade malondialdehyde content of broccoli different lower limits of flood irrigation

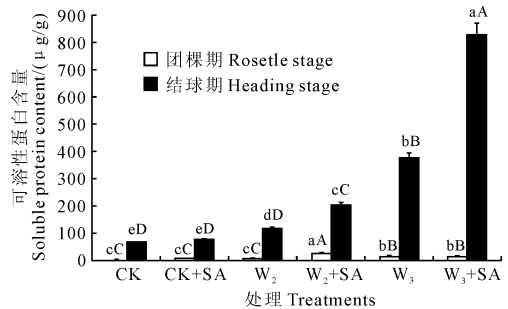


图 7 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片可溶性蛋白含量的影响

Fig. 7 Effect of SA on leaf soluble protein content of broccoli under different lower limits of flood irrigation

表 1 水杨酸对不同灌水下限青花菜产量和品质的影响

Table 1 Effect of SA on yield and quality of broccoli under different lower limits of flood irrigation

处理 Treatment	花球重 Ball-flower /g	小区产量 Plot yield /kg	公顷产量 Hectare yield /kg	Vc 含量 Vc content /(mg/g)	硝酸盐 Nitrate /(μg/g)	可溶性固形物 Soluble solid /%
CK	522.17aA	146.21aA	22 315.32aA	1.30aA	474.48cC	7.00cBC
CK+SA	518.23aA	145.11aA	22 147.44aA	1.27aA	476.82cC	6.67cC
W <sub>2</sub>	433.63bB	121.42bB	18 531.75bB	0.79cC	480.51cC	7.93abA
W <sub>2</sub> +SA	518.10aA	145.07aA	22 141.33aA	0.98bB	462.28cC	7.13cBC
W <sub>3</sub>	336.60cC	94.25cC	14 384.92cC	0.48dD	768.72aA	8.27aA
W <sub>3</sub> +SA	436.07bB	122.10bB	18 635.53bB	0.96bB	616.38bB	7.63bAB

注:不同小写和大写字母分别表示处理间在 0.05 和 0.01 水平存在显著性差异。  
Note: The different normal and capital letters indicate significant difference among treatments at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

经 SA 处理后 CK 无明显变化, W<sub>2</sub> 增加 74.16%, W<sub>3</sub> 增加最多为 120.26%, 且差异达极显著水平。这说明在 60% 以下灌水下限条件下 SA 可以诱导青花菜叶片中可溶性蛋白的积累, 下限越低, 越易积累。

2.4 水杨酸对不同灌水下限青花菜产量和品质的影响

2.4.1 青花菜产量 由表 1 可知, 青花菜花球重随着灌水下限的下降而降低, W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处理分别较 CK 极显著降低 16.96%、35.54%。整个生育期经 SA 处理后, CK+SA 处理较 CK 变化不显著, W<sub>2</sub>+SA 处理较 W<sub>2</sub> 极显著增产 19.48%, 与 CK 基本持平; W<sub>3</sub>+SA 较 W<sub>3</sub> 极显著增产 29.55%, 与 W<sub>2</sub> 相当。小区产量与亩产量呈现的规律与花球重基本一致。结果说明 SA 对不同灌水下限青花菜产量均有不同程度的影响, 灌水下限越低, 增产幅度越大。

2.4.2 青花菜品质 由表 1 还可知, 随着灌水下限的降低, W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处理花球中 Vc 含量较 CK 极显著降低 39.23%、63.08%; 其硝酸盐含量较 CK 分别升高 1.27%、62.01%, 仅 W<sub>3</sub> 达显著性水平; 其可溶性固形物含量较 CK 分别极显著升高 13.29%、18.14%。经 SA 处理后, CK+SA 处理花球中 Vc 含量较 CK 无明显变化, W<sub>2</sub>+SA 处理较 W<sub>2</sub> 极显著增加 24.05%, W<sub>3</sub>+SA 处理较 W<sub>3</sub> 翻倍且达到极显著水平, 但 W<sub>2</sub>+SA 和 W<sub>3</sub>+SA 处理仍极显著低于 CK+SA 处理和 CK; CK+SA 和 W<sub>2</sub>+SA 处理花球中硝酸盐含量与 CK 和 W<sub>2</sub> 均无显著差异, 而 W<sub>3</sub>+SA 处理较 W<sub>3</sub> 极显著降低 19.82%, 但仍极显著高于其余处理和对照水平; CK+SA、W<sub>2</sub>+SA、W<sub>3</sub>+SA 处理花球中可溶性固形物含量分别比相应对照 CK、W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 依次降低 4.71%、10.09%、7.3%, 且后两者均达显著性水平。可见, 灌水下限的降低致使青花菜花球中的 Vc 含量极显著降低,

而硝酸盐和可溶性固形物含量不同程度升高, 喷施 SA 能极显著缓解 Vc 含量降低趋势, 不同程度缓解硝酸盐和可溶性固形物升高的趋势, 且灌水下限越低缓解效应越明显。

3 讨论

3.1 不同灌水下限处理下水杨酸对青花菜生长指标变化特征

相对含水量作为比较植物保水能力及推算需水程度、反映植物组织器官水分状况的重要指标, 直接影响着植物的正常生长发育、光合作用、气孔状况以及作物产量, 同时也决定蔬菜品质的高低; 而水势、土壤及空气水分三者决定植物对水分的吸收、运输和散失<sup>[18]</sup>。王晓黎等<sup>[19]</sup>认为, 适宜浓度 SA 能够促进黄瓜叶片气孔关闭, 且作用随处理时间延长而增强。本试验结果表明, 随着灌水下限及生育期的推进, 青花菜叶片相对含水量和水势均呈下降趋势, 且下限越低, 下降幅度愈大。这可能是一方面随着生育期进行青花菜根系木质化程度加大, 导致根吸收水分能力下降; 另一方面较低的灌水下限引起青花菜水分胁迫, 根系弱小, 活力下降, 即吸收水分能力下降。经 SA 处理后叶片相对含水量、水势均有所提高, 这是因为 SA 使得叶片气孔开度减小, 导致蒸腾作用散失水分减少, 同时对地下部水分吸收能力影响较小, 但随着水分胁迫加剧, SA 很难再维持叶片气孔开张度而打破光合作用与蒸腾作用平衡。

3.2 不同灌水下限处理下水杨酸对青花菜渗透调节物质含量变化特征

植物受到逆境胁迫后, 机体会启动一系列反应来抵御胁迫而降低渗透势。脯氨酸作为一种高亲水物质可防止细胞在干旱时脱水, 其含量增加对调节体内渗透势, 提高幼苗抗旱能力具有一定的作

用<sup>[20]</sup>;另一方面高含量可溶性蛋白亦通过降低细胞渗透势和防止细胞脱水来提高植物抗旱性<sup>[21-23]</sup>。本试验结果显示,SA 具有诱导较高灌水下限处理青花菜叶片脯氨酸含量的积累效应,同时减缓较低灌水下限处理(45%)脯氨酸的积累,也能诱导青花菜叶片可溶性蛋白的增加,且下限越低,增幅越大。这说明在 45%以上灌水下限条件下,SA 处理积累的脯氨酸和蛋白质结合减少了可溶性蛋白的积累,而 45%灌水下限条件下 SA 可能启动一些逆境基因来诱导蛋白酶的合成,这些合成酶一方面加速氮素同化,合成可溶性蛋白,另一方面积累的脯氨酸用于可溶性蛋白的合成原料,从而降低脯氨酸的积累,这或许是植物为适应逆境而表现的一种适应性反应。

### 3.3 不同灌水下限处理下水杨酸对青花菜叶片膜稳定性变化特征

植物组织在逆境下往往遭受膜伤害而生成膜脂过氧化物 MDA,其大量积累会导致膜透性增大,电解质外渗,最终造成细胞膜严重受损。据报道,SA 能有效降低水分胁迫条件下植物叶片 MDA 含量<sup>[24]</sup>。本试验研究发现,0.15 mmol/L SA 处理能不同程度地抑制青花菜叶片中 MDA 含量的累积,并以 45%灌水下限条件下效果最为明显,其次是 60%灌水下限处理;而叶片电解质渗透率的变化趋势基本与 MDA 相同,这与李同根等<sup>[25]</sup>在逆境胁迫下皖贝母上的研究结果一致。说明 45%灌水下限导致青花菜严重干旱胁迫,促使膜脂过氧化加重,而 SA 通过响应一系列反应来降低膜脂过氧化加剧,有效降低膜透性,减少了渗透调节物质的外渗,从而减轻细胞膜损伤程度。

### 3.4 不同灌水下限处理下水杨酸对青花菜品质和生物量的变化特征

随着人民生活水平的提高,人们对蔬菜品质提出了更高要求。Vc 作为小分子物质,一方面清除植物体内代谢及逆境胁迫产生的活性氧,另一方面能间接清除过氧化氢( $H_2O_2$ ),从而保护机体免遭氧化伤害。本试验证明 0.15 mmol/L SA 能提高不同灌水下限处理青花菜的 Vc 含量,且下限越低,提高幅度越大。这说明低灌水下限导致青花菜直接产生氧化胁迫,而 Vc 间接清除  $H_2O_2$ ,这是 SA 通过提高抗氧化酶活性而提高 Vc 含量,也是植物体保护机体

免受氧化伤害的一种机制,这与吴锦城等<sup>[26]</sup>对枇杷冷藏效果的研究一致。蔬菜体内硝态氮含量直接影响人的身体健康,且普遍认为蔬菜体内硝酸盐累积主要是本身吸收硝态氮能力强于同化能力造成的<sup>[27]</sup>。本试验中 SA 能不同程度降低青花菜硝酸盐含量,曹岩坡等<sup>[27]</sup>在韭菜上的研究亦是如此。郝敬虹等<sup>[28]</sup>研究认为,0.1 mmol/L SA 能提高黄瓜叶片内的硝酸还原酶(NR)活性,而 NR 作为植物体吸收和转化硝态氮( $NO_3-N$ )的一种诱导酶,协同光合作用促进硝态氮转化为游离氨基酸和可溶性蛋白<sup>[29]</sup>,这是外源 SA 降低硝酸盐累积的主要原因。可溶性固形物主要是由可溶性糖构成,可溶性糖由多糖转化而来,即可溶性固形物含量越高,多糖转化越多<sup>[30]</sup>。本试验中青花菜可溶性固形物含量随灌水下限降低而升高,而 SA 处理后其含量均有不同程度的降低,其中以 45%灌水下限条件下效果最为明显,其次是 60%灌水下限处理。说明 60%以下灌水下限处理下,水解酶活性大于合成酶活性进而促使大分子碳水化合物降解为可溶性糖,而 SA 处理通过降低水解酶活性来减少大分子化合物的降解。

另外,植物产量主要由光合产物的供应、营养体中贮存物质的利用及物质运转三方面因素共同决定。本试验结果说明:在青花菜生育期叶面喷施 SA 后,其产量均有不同程度提高,以 45%灌水下限条件下效果最为显著。这是因为 SA 处理改善了叶片水分状况,提高了水分利用效率,减轻因干旱而造成的渗透胁迫,同时降低膜透性,促进根系生长发育而降低根冠比;另一方面提高了叶绿素含量、调节气孔开张度而增强光合作用效率。这些效应的累积最终促进青花菜生长发育,提高产量。

综上所述,本实验条件下,叶面喷施 0.15 mmol/L SA 提高 75%以下灌水下限青花菜叶片保水能力,降低了渗透调节物质含量及膜脂过氧化物 MDA 含量,从而缓解干旱胁迫带来的伤害。另外,就青花菜的产量和品质而言,60%灌水下限处理喷施 SA 较对照无显著差异,且生育期内减少灌溉量和灌溉次数,应为最佳节水处理。因此建议当地青花菜生产中以相对含水量 60%作为灌水下限,并于相应物候期喷施 0.15 mmol/L SA,兼顾经济效益和生态效益。

### 参考文献:

- [1] WANG H Y(王洪源),LI G Y(李光永). Effect of drip irrigation model and irrigation start point on water consumption and yield of sweet melon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*(农业机械学报),2010,41(5):47—51(in Chinese).

- [2] JIANG L(姜立), ZHANG G B(张国斌), ZHANG J(张晶), *et al.* Effects of water and nitrogen treatment on yield, water and soil nutrition use efficiency of broccoli[J]. *China Vegetables* (中国蔬菜), 2013, (16): 66–71(in Chinese).
- [3] YANG W B(杨文斌), HAO ZH Y(郝仲勇), *et al.* Effect of different irrigation thresholds on growth and yield of garland chrysanthemum (*Chrysanthemum coronarium* L.) in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE* (农业工程学报), 2011, **27**(1): 94–98(in Chinese).
- [4] TIAN Y(田义), ZHANG Y L(张玉龙), *et al.* Effect of different low irrigation limit on growth, quality and yield of tomato under sub-surface drip irrigation in greenhouse[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2006, **24**(5): 88–92(in Chinese).
- [5] NIU Y(牛勇), LIU H L(刘洪禄), WU W Y(吴文勇), *et al.* Effect of different irrigation limit on greenhouse cucumber growth index[J]. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2009, **28**(3): 81–84(in Chinese).
- [6] TIAN Q L(田巧玲), WANG J Q(王吉庆), SHAO X L(邵秀丽), *et al.* Effect of different irrigation limit on greenhouse tomato hole tray seedling growth of autumn and winter[J]. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2012, (21): 39–41(in Chinese).
- [7] LI K(李琨), YU J H(郁继华), *et al.* Effects of different lower limit of drip irrigation quantity on growth of green pepper under ecological organic soilless culture in greenhouse[J]. *Journal of Gansu Agricultural University* (甘肃农业大学学报), 2011, **46**(2): 41–44(in Chinese).
- [8] 康绍忠. 西北地区农业节水与水资源持续利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 2–3.
- [9] HAYAT S, HASAN S A, FARIDUDDIN Q. Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress[J]. *Plant Int.*, 2008, **3**: 297–304.
- [10] GUNES A, INAL A, ALPASLAN M. Salicylic acid induced changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity[J]. *Plant Physiol.*, 2007, **164**: 728–736.
- [11] XU Y ZH(许耀照), ZENG X C(曾秀存), *et al.* The variation of chlorophyll fluorescence parameters of cucumber seedlings leaves with salicylic acid treatment under high temperature stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2007, **27**(2): 267–271(in Chinese).
- [12] CAO Y, FAN X R, SUN S B. Effect of nitrate on activities and transcript levels of nitrate reductase and glutamine synthetase in rice[J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(5): 664–673.
- [13] CAO S F, HU Z C, ZHENG Y H. Synergistic effect of heat treatment and salicylic acid on alleviating internal browning in cold-stored peach fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, **58**: 93–97.
- [14] CHEN N L(陈年来), HU M(胡敏), DAI CH Y(代春艳), *et al.* The effects of inducing treatments on phenolic metabolism of melon leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2010, **37**(11): 1 759–1 766(in Chinese).
- [15] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Betavulgaris* [J]. *Plant Physiol.*, 1949, **24**: 1.
- [16] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] ZHAO Q S(赵青松), LI P P(李萍萍), WANG J ZH(王纪章), *et al.* Effects of irrigation threshold on growth and physiological characteristics of cucumber plug seedlings[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, **27**(6): 31–35(in Chinese).
- [18] JIANG ZH ZH(姜中珠), CHEN X W(陈祥伟). Effect of salicylic acid on drought resistance of three kinds of shrub seedlings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(2): 166–169(in Chinese).
- [19] WANG X L(王晓黎), CUI SH M(崔世茂), ZHANG ZH G(张志刚), *et al.* Regulation of salicylic acid on stomata aperture of epidermis in cucumber cotyledon[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2011, **31**(2): 305–314(in Chinese).
- [20] RONG SH Y(荣少英), GUO SH G(郭蜀光), ZHANG T(张彤). Effects of drought stress on osmoregulation substances in sweet sorghum seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences* (河南农业科学), 2011, **40**(4): 56–59(in Chinese).
- [21] JONE M M, OSMOND C B, TURNER N C. Accumulation of solutes in leaves of sorghum and sunflower in response to water deficit[J]. *AUS. J. Plant Physiol.*, 1980, **7**(2): 193–205.
- [22] FENG C P(冯彩平), XUE S(薛蕊), ZHANG D ZH(张殿忠). Relationship between water stress and plant nitrogen metabolism[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 1995, **13**(2): 88–93(in Chinese).
- [23] ZHANG H(张慧), WANG P H(汪沛洪). A tracer study of protein synthesis and degradation in wheat leaves during osmotic stress[J]. *Plant Physiology Journal* (植物生理学报), 1991, **17**(3): 259–266(in Chinese).
- [24] LI K Y(李柯莹), LI J R(李家儒). The effects of salicylic acid on lateral roots formation in rape seedlings[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 2004, **22**(4): 345–348(in Chinese).
- [25] LI T G(李同根), WANG K C(王康才), *et al.* Physiological effects and chronology for exogenous salicylic acid on *Fritillaria anhuiensis* seedling under high temperature stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2012, **32**(6): 1 179–1 184(in Chinese).
- [26] WU J CH(吴锦城), HUANG X Z(黄晓尊). Effect of salicylic acid on cold-stored loquat fruits[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University* (云南农业大学学报), 2005, **20**(6): 813–818(in Chinese).
- [27] CAO Y P(曹岩坡), GAO ZH K(高志奎), HE J P(何俊萍), *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on nitrate accumulation and reduction and assimilation in the leaves of Chinese chive[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2009, **36**(3): 415–420(in Chinese).
- [28] HAO J H(郝敬虹), YI Y(易畅), SHANG Q M(尚庆茂), *et al.* Effect of exogenous salicylic acid on nitrogen assimilation of cucumber seedling under drought stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2012, **39**(1): 81–90(in Chinese).
- [29] GAO X Q(高夕全), LIU A R(刘爱荣), YE M R(叶梅荣), *et al.* Effects of salicylic acid on roots growth and NRA in rice[J]. *Journal of Anhui Agrotechnical Teachers College* (安徽农业技术师范学院学报), 2000, **14**(1): 13–15(in Chinese).
- [30] CAI H(蔡慧), WANG M(王铭), LI Y D(李亚东), *et al.* Study on the effect of salicylic acid on physiological indicators of *Actinidia arguta* planch[J]. *Science and Technology of Food Industry* (食品工业科技), 2012, (2): 376–379(in Chinese).