

水杨酸对不同灌水下限青花菜根系生长、根冠比及叶片抗氧化酶活性的影响

杨 伟^{1,2}, 张国斌¹, 肖雪梅¹, 周德霞¹, 郁继华¹

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 武山县蔬菜产业科技示范园区, 甘肃 武山 741300)

摘要: 以青花菜为试材, 采用大田和室内分析相结合的试验方法, 研究了 $0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水杨酸 (SA) 对不同灌水下限 (相对含水量 75%, 60% 和 45%) 青花菜根系生长及叶片抗氧化特性的影响。结果表明: (1) 随着灌水下限的降低, 青花菜主根长、根干鲜重及过氧化氢酶 (CAT) 活性先升高后降低, 根冠比、过氧化氢 (H_2O_2) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 及抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性逐渐升高。 (2) SA 处理改善了青花菜根系生长特性, 降低根冠比, 提高结球期抗氧化酶活性, 其中 60% 灌水下限经 SA 处理后, 根系及酶活性指标均与 75% 灌水下限保持相当水平。由此可知: 以相对含水量 60% 作为灌水下限并配合 $0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理可以为青花菜高效节水灌溉提供理论支撑。

关键词: 水杨酸; 灌水下限; 青花菜; 根系; 酶活性

中图分类号: S635.3; S274.1 **文献标志码:** A

Effects of SA on root growth, root – shoot ratio, and antioxidant activity of leaf enzymes in broccoli under different lower limits of irrigation

YANG Wei^{1,2}, ZHANG Guo-bin¹, XIAO Xue-mei¹, ZHOU De-xia¹, YU Ji-hua¹

(1. College of Horticulture Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Vegetables Industry Science and Technology Demonstration Garden, WuShan County, Wushan, Gansu 741300, China)

Abstract: In this research, broccoli was employed as the experimental material by combining field and laboratory analyses to have studied the effects of $0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ salicylic acid (SA) under different irrigation limits (relative water contents of 75%, 60% and 45%, respectively) on the root system growth and leaf antioxidant characteristics. The results showed that with the decrease of lower limit of irrigation, broccoli root length, root fresh and dry weight and catalase (CAT) activity became increased and then went decreased, while shoot ratio, hydrogen peroxide (H_2O_2) content, activities of super-superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and ascorbate peroxidase (APX) all gradually became increased. In addition, SA treatment improved root growth characteristics of broccoli, reducing shoot ratio and enhancing the antioxidant enzyme activity of cabbage. It was further discovered that the root growth and antioxidant activity by the 60% limit of irrigation after SA treatment reached similar levels to those by the 75% lower limit of irrigation. It could be concluded that the relative water content of 60% as a lower limit and irrigation approach with $0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA treatment could provide theoretical support for the efficient water-saving irrigation on broccoli.

Keywords: salicylic acid; irrigation limit; broccoli; roots; activity

根系作为植物吸收水分、养分等物质的主要器官, 其生长状况和活力水平直接影响着植物地上部生长发育以及生物量的合成^[1]。研究发现, 灌水下

限过低, 易造成植物干旱胁迫, 此时, 植物为了追寻水源而表现出促进根系伸长生长; 下限过高, 土壤容氧量减少又不利于根系活动而限制其生长^[2]。SA

收稿日期: 2014-04-09

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

作者简介: 杨 伟 (1986—), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 研究方向为蔬菜栽培生理及无土栽培技术。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方面的研究。E-mail: yujihua@gsau.edu.cn。

作为一种小分子酚类化合物,可以调节植物在逆境条件下的诸多生理生化过程^[3-4]。目前,已有文献报道 SA 可以提高黄瓜^[5]、辣椒^[6]、草莓^[7]、玉米^[8]等多种作物的抗旱能力,但对不同灌水下限条件下青花菜根系生长及抗氧化酶活性的影响鲜见报道。鉴于此,我们以青花菜为试材,通过叶面喷施 0.15 mmol·L⁻¹SA,测定水杨酸对不同灌水下限青花菜根系特性及抗氧化酶活性指标,探讨水杨酸提高青花菜抗旱能力及减轻干旱造成的伤害机理,以期 SA 合理用于青花菜高效节水灌溉技术奠定理论和实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013 年 4—9 月在甘肃永昌县城关镇进行。该地区属河西走廊高海拔冷凉气候区,常年干旱少雨,海拔约 1 995 m,年均气温 4.8℃,降雨量 188 mm,无霜期 130 d,年日照时数 2 933 h。土壤为灌漠土,全氮 0.94 g·kg⁻¹,有效磷 16.29 mg·kg⁻¹,速效钾 226 mg·kg⁻¹,容重 1.35 g·cm⁻³,田间持水量 28.67%,pH 7.82,EC 262 μS·cm⁻¹。

1.2 供试材料

供试青花菜 (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck) 种子由甘肃省农业科学院蔬菜研究所提供,品种为‘中青 9 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 试验设计与方法

灌水上限统一设定为相对含水量 95%,在预试验基础上选出 SA 浓度为 0.15 mmol·L⁻¹。灌水下限分别设相对含水量 75% (CK)、60% (W2)、45% (W3),其中 CK、W2、W3 作为 SA 处理对照,即所有试验设 CK、W2、W3、CK+SA、W2+SA、W3+SA 6 个处理,采用随机区组排列,小区面积 65.52 m²,株距 40 cm,行距 35 cm,每小区 6 垄,重复 3 次,每垄 50 株,各小区之间加设 3 垄保护行。灌水量通过水表控制,每 3 d 监测一次土壤含水量,临近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(m³); S 为灌溉面积(65.52 m²); r 为土壤容重(1.35 g·cm⁻³); h 为湿润层深度(30 cm); θ_{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、接球期叶面喷施 0.15 mmol·L⁻¹SA (正反面喷施,以叶面湿润为止),喷施时间为早晨。至结球期,各小区采取长势一致的一部位功能叶 10 片(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℃ 冰箱中保存用于测定 H₂O₂ 含量及抗氧化酶活性,试验其它农艺管理技术均与当地一致。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 根系及地上部性状的测定 采收前各小区随机挖去完整植株 5 株(排除两端边际效应植株),将泥土用流水慢慢冲洗后带回实验室于自来水再次冲洗,至干净为止,从子叶节处将其剪断,分地上、地下两部分,分别对其性状进行测定。

地上部和根鲜重:用吸水纸吸干表面水分后用电子天平(0.01 g)称量。

地上部和根干重:称完鲜重后放于 105℃ 烘箱杀青 15 min 后 80℃ 烘至恒重,用电子天平(0.01 g)称量干重。

根冠比:根冠比 = 地下部干重/地上部干重。

主根长:直尺测量主根在地下的长度。

1.4.2 H₂O₂ 含量及抗氧化酶活性的测定 H₂O₂ 含量参考邹琦《植物生理学实验指导》分光光度法测定^[9];SOD、POD、CAT、APX 活性均参考 Amon 方法测定^[10]。

1.5 数据处理分析

试验数据运用 Excel2010 和 SPSS19 软件进行单因素方差分析,且标注 0.05 水平差异显著性($P < 0.05$),所有数据均为重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 水杨酸对不同灌水下限青花菜根系及地上部生长性状的影响

2.1.1 对根干鲜重和根冠比的影响 由表 1 可以看出,无 SA 处理条件下,随灌水下限降低青花菜地上部、地下部干物质积累量均表现出先升高后降低的趋势,其中根干重 W2 与 W3 之间无显著性差异,W2 最大为 11.62 g,较 CK 增加 37.19%。经 0.15 mmol·L⁻¹ 的 SA 处理后,根干重 W2 降低 23.24%,达显著性水平,其余两处理均无明显变化。正相反 SA 处理却提高了地上部干物质的积累量,即 SA 处理具有减小青花菜根冠比效应。

表 1 不同灌水下限水杨酸对青花菜干鲜重及根冠比的影响

Table 1 Effects of SA on dry and fresh weights and root – shoot ratios of broccoli under different lower limits of irrigation

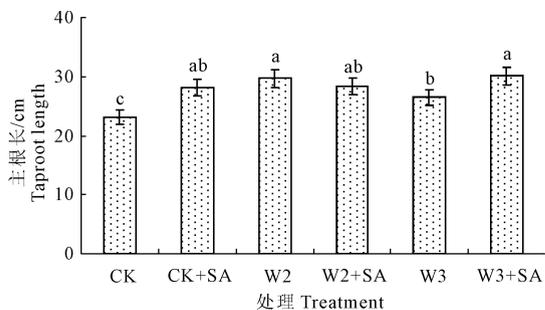
处理 Treatments	地上部 Shoot/g		地下部 Root/g		根冠比 Root-shoot ratio
	鲜重 FW	干重 DW	鲜重 FW	干重 DW	
CK(75%)	1418.10a	107.68b	45.02b	8.47b	0.0788bc
CK + SA	1243.93ab	97.69b	48.69b	8.49b	0.0869bc
W2(60%)	1240.92ab	119.32ab	60.27a	11.62a	0.0974ab
W2 + SA	1457.83a	118.48ab	53.37ab	8.92b	0.0754c
W3(45%)	1068.32b	100.16b	55.00ab	10.52a	0.1061a
W3 + SA	1464.49a	134.46a	59.68a	10.74a	0.0799bc

注:CK(75%):相对含水量 75%; W2(60%):相对含水量 60%; W3(45%):相对含水量 45%;SA 浓度为 $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异。

Note: CK (75%): Relative water content 75%; W2 (60%): Relative water content 60%; W3 (45%): Relative water content 45%; The SA concentration is $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Different small letters in the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

根冠比是指地下部干重与地上部干重之比,能够反映出植物地下部与地上部之间的相关性。本试验结果显示,根冠比随着灌水下限的降低而升高,但 CK 与 W2 之间差异不显著,W3 处理下根冠达最大 0.1061。经 $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 处理后,除 CK 外其余均降低,并且达到显著水平,其中 W2 降低 22.59%,W3 降低 24.69%。以上研究结果表明, $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 能有效地降低 60% 以下灌水下限根冠比。

2.1.2 对主根长的影响 由图 1 分析可知,主根长随灌水下限的降低先升高后降低,其中 W2 和 W3 较 CK 分别提高 28.22% 和 14.30%,相互间均达显著性水平。经 $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 处理后,CK 和 W3 处理分别提高 21.52%、13.91%,差异达显著水平,而 W2 处理无明显差异。这说明 $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA



注:CK(75%):相对含水量 75%; W2(60%):相对含水量 60%; W3(45%):相对含水量 45%;SA 浓度为 $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$;不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异,下同。

Note: CK (75%): Relative water content 75%; W2 (60%): Relative water content 60%; W3 (45%): Relative water content 45%; the SA concentration is $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; Different small letters in the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level, and hereinafter.

图 1 水杨酸对不同灌水下限青花菜主根长的影响

Fig.1 Effects of SA on the taproot length under different lower limits of irrigation

具有诱导 75%、45% 灌水下限青花菜主根伸长生长的效应,而对 60% 灌水下限主根长无显著影响。

2.2 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片抗氧化的影响

2.2.1 对叶片 H_2O_2 含量及 CAT 活性的影响 植物处在逆境条件下时,其体内活性氧代谢加强而会积累 H_2O_2 。从图 2 可以看出, H_2O_2 含量随着灌水下限的降低而升高,W2 和 W3 分别较 CK 升高 58.97%、96.15%,差异显著。经 $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SA 处理后,CK 升高 33.62%,W2 降低 23.08%,W3 降低 28.96%,差异均达显著性水平。这说明 $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 能够显著降低 75% 以下灌水下限 H_2O_2 含量,在某种程度上减轻因 H_2O_2 累积而造成的细胞膜损伤。

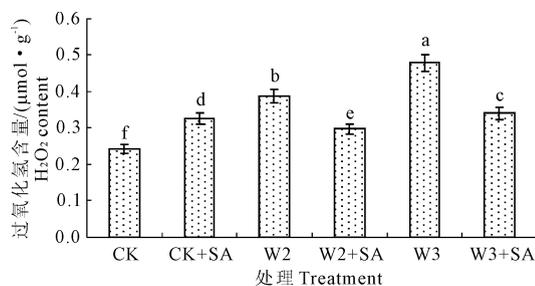


图 2 水杨酸对不同灌水下限下叶片过氧化氢含量的影响

Fig.2 Effects of SA on the H_2O_2 contents of broccoli leaf under different lower limits of irrigation

图 3 可以看出,随着灌水下限降低,青花菜叶片 CAT 活性呈现出先增加后降低趋势,其中 W2 较 CK 提高 37.20%,W3 较 CK 降低 37.56%,这一结果与杜金伟等^[11] 在山杏上的研究结果相似。经 $0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 处理后仅有 W3 显著提高 344.59%,其余两处理无明显变化,这说明 SA 仅提高重度干旱

胁迫下植物 CAT 活性,而对正常及轻度水分胁迫植物无影响。

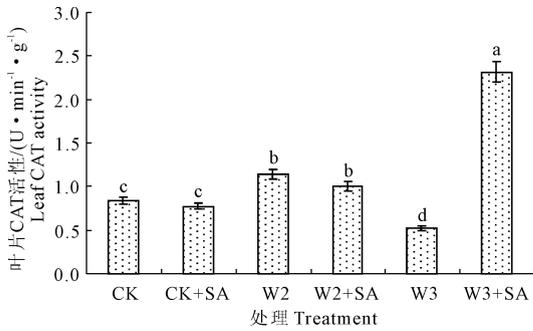


图3 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片 CAT 活性的影响
Fig.3 Effects of SA on the CAT activities of broccoli leaf under different lower limits of irrigation

2.2.2 对叶片 SOD 及 POD 活性的影响 由图 4 分析可知,SOD 活性随着灌水下限的降低而升高,其中 W3 最高为 81.35 U · g⁻¹,分别为 CK、W2 的 6.58 倍和 3.81 倍,相互间差异均达显著性水平。经 0.15 mmol · L⁻¹ 的 SA 处理后,CK 下降 49.09%,W2 升高 20.00%,W3 下降 86.19%,差异均显著。这可能是土壤水分亏缺导致青花菜叶片膜脂过氧化作用增强,从而使得 SOD 活性升高,然而 SA 能不同程度降低 SOD 活性,即减弱青花菜叶片膜脂过氧化的加剧。

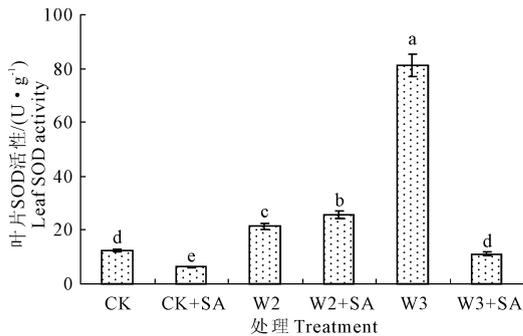


图4 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片 SOD 活性的影响
Fig.4 Effects of SA on the SOD activities of broccoli leaf under different lower limits of irrigation

由图 5 可见,POD 活性随着灌水下限的降低而升高,W3 分别是 CK、W2 的 1.61 倍、1.25 倍,相互间差异均显著。喷施 SA 处理后,W2、W3 分别显著升高 12.05%、34.97%,CK 有所降低。这说明 0.15 mmol · L⁻¹ SA 处理能够诱导 75% 以下灌水下限青花菜叶片 POD 活性增强,且下限越低,幅度愈大。

2.2.3 对叶片 APX 活性的影响 从图 6 可以看出,青花菜叶片 APX 活性随灌水下限降低逐渐升

高,其中 W2 和 W3 分别是 CK 的 2.39 倍、2.89 倍,相互间差异达显著性水平。经 0.15 mmol · L⁻¹ SA 处理后除 CK 无显著差异外其余两处理均显著下降,W3 降低 74%,W2 降低 40.22%。这说明 0.15 mmol · L⁻¹ SA 对 45% 灌水下限处理下 APX 活性影响最大,60% 次之。

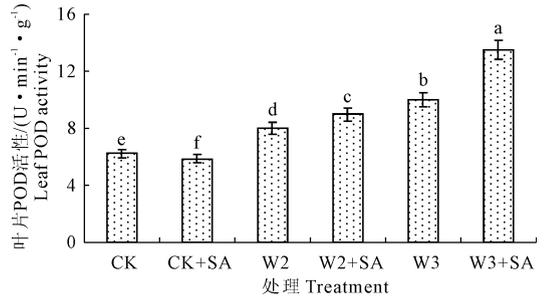


图5 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片 POD 活性的影响
Fig.5 Effects of SA on the POD activities of broccoli leaf under different lower limits of irrigation

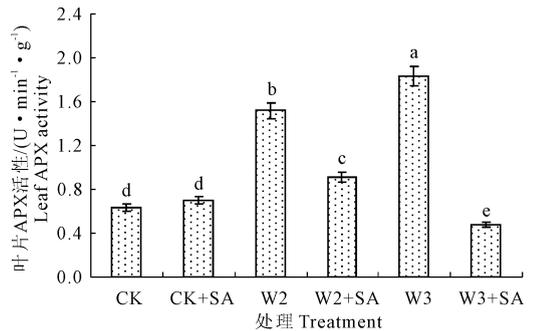


图6 水杨酸对不同灌水下限青花菜叶片 APX 活性的影响
Fig.6 Effects of SA on the APX activities of broccoli leaf under different lower limits of irrigation

3 讨论

3.1 不同灌水下限处理下 SA 对青花菜根系生长性 状变化特征

当植物处于轻度或重度缺水条件下时,侧根细长,毛细根发达,这是因为在干旱条件下根系为了满足地上部植物生长而要尽可能吸收土壤深层水分显现的生长效应,导致根冠比增大。本试验研究结果显示,随灌水下限降低青花菜主根长升高,根冠比逐渐升高,根干重先升高后降低,其中 W2 与 W3 灌水下限无显著性差异,主根长变化与赵青松等^[12]在黄瓜穴盘苗上的研究一致。这说明 75% 灌水下限适宜青花菜正常生长发育,而 W2、W3 两灌水下限已造成青花菜轻度、重度水分胁迫。根系为了吸收深层水分而促进生长,提高根干重,根冠比也有所升

高,因为植株地上部进行蒸腾作用而散失更多水分,因此对地上部影响比地下部影响更大,从而造成根冠比增大。经 SA 处理后,主根长 CK、W3 两处理明显增长;根冠比 W2、W3 均显著降低;根干重仅 W2 显著降低。这可能是一方面 SA 促进了青花菜气孔关闭,叶片卷曲,减少叶片蒸腾作用散失的水分;另一方面促进水分在体内的重新分配,其目的为根系吸收土壤深层水分,供给地上部生长发育所需,其效应最终导致主根长度、重量有所增加,根冠比降低,提高产量。高夕全等^[13]研究认为 50 mg·L⁻¹的 SA 亦能促进水稻幼苗根系的生长发育。

3.2 不同灌水下限处理下 SA 对青花菜叶片抗氧化变化特征

植物细胞在逆境条件下会积累一些 O₂⁻、H₂O₂ 等活性氧,若这些活性氧积累过多而未被清除就会对细胞产生毒害作用^[14],破坏细胞膜,加速细胞解体^[15],同时细胞中 H₂O₂ 的积累也影响植物体对 CO₂ 的固定^[16],进而影响光合作用,导致产量品质下降。因此,植物体为了免遭氧化伤害而启动自身抗氧化防御机制来清除活性氧^[17]。SOD、POD、CAT、APX 四种酶配合其它酶组成清除活性氧酶系统。

本试验结果表明,随灌水下限降低,H₂O₂ 含量逐渐升高,SOD、POD、APX 活性逐渐升高,而 CAT 活性先升高后降低。这表明 45% 灌水下限致使青花菜叶片细胞膜结构受到严重破坏,过氧化氢酶 (CAT) 体系受到严重破坏。经 SA 处理后,H₂O₂ 含量均显著降低,其中 CK 处理 SOD、POD 活性降低,CAT、APX 活性无显著变化;W2 处理 SOD、POD 活性升高,APX 降低,CAT 无显著变化;W3 处理 CAT、POD 活性升高,SOD、APX 活性降低,H₂O₂ 含量降低,这说明只有当植物处于严重干旱胁迫条件下时施用 SA,CAT、POD 活性首先被激活用于降低 H₂O₂ 等活性氧含量,表明 SA 处理诱导相关酶活性上升而清除 H₂O₂ 含量,笔者认为在清除 H₂O₂ 时四种酶协同配合共同作用使得细胞自由基维持较低水平。

4 结 论

外源 SA 总体能够改善青花菜根系生长状况,提高叶片抗氧化水平,从而为地上部生长发育起到积极促进作用。特别地,当以相对含水量 60% 作为灌水下限并喷施 SA 处理后,地上部干鲜重、根干鲜重及根冠比均与 CK 无显著性差异,且根长及叶片

抗氧化酶活性也能与 CK 保持相当水平,即 0.15 mmol·L⁻¹SA 处理在一定程度上提高青花菜对干旱胁迫的抗性。综上所述,我们认为以相对含水量 60% 作为当地灌水下限并配合 0.15 mmol·L⁻¹SA 能为当地青花菜生产提供节水保障。

参 考 文 献:

- [1] 冯 焯,郭 峰,李宝龙,等.单粒精播对花生根系生长、根冠比和产量的影响[J].作物学报,2013,39(12):2228-2237.
- [2] 康绍忠.西北地区农业节水与水资源持续利用[J].北京:中国农业出版社,1999:44-49.
- [3] 周贺芳,邹志荣,孟长军,等.外源 ALA、CaCl₂ 和水杨酸对盐胁迫下甜瓜幼苗一些生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):212-215.
- [4] 严 寒,许本波,赵福永,等.脱落酸和水杨酸对干旱胁迫下芝麻幼苗生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):163-166.
- [5] 郝敬虹,易 吻,尚庆茂,等.水杨酸处理对干旱胁迫下黄瓜幼苗氮素同化及其关键酶活性的影响[J].园艺学报,2012,39(1):81-90.
- [6] 曾长立,陈禅友.外源水杨酸降低辣椒幼苗盐害的生理效应[J].东北农业大学学报,2010,41(11):32-36.
- [7] 刘 艳,陈贵林,李晓燕,等.水杨酸对水分胁迫下草莓幼苗膜脂过氧化物的影响[J].华北农学报,2010,25(5):127-131.
- [8] 曹翠玲,刘林丽,田强兵.水杨酸对玉米幼苗抗旱性的影响[J].玉米科学,2004,12(增刊):103-104.
- [9] 邹 琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [10] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant physiology, 1949,24(1):1-2.
- [11] 杜金伟,崔世茂,金丽萍,等.水分胁迫对山杏渗透调节物质积累及保护酶活性的影响[J].内蒙古农业大学学报,2009,30(2):88-93.
- [12] 赵青松,李萍萍,王纪章,等.不同灌水下限对黄瓜穴盘苗生长及生理指标的影响[J].农业工程学报,2011,27(6):31-35.
- [13] 高夕全,刘爱荣,叶梅荣,等.水杨酸对水稻幼苗硝酸还原酶活性和根系生长的影响[J].安徽农业技术师范学院学报,2000,14(1):13-15.
- [14] 苗雨晨,董发才,宋纯鹏.过氧化氢—植物体内的一种信号分子[J].生物学杂志,2001,18(2):4-6.
- [15] Hodgson R A J, Raison J K. Superoxide production by thylakoids during chilling and its implication in the susceptibility of plants to chilling-induced photoinhibition[J]. Plant, 1991, 183:222-228.
- [16] 王利军,战吉成,黄卫东.水杨酸与植物抗逆性[J].植物生理学通讯,2002,38(6):619-624.
- [17] 罗明华,罗 英,王 璞.水杨酸处理对干旱胁迫下丹参幼苗抗氧化能力的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):102-105.