

## 水杨酸与植物耐性研究进展

王艳朋, 杨二波, 祝学刚, 胡跃, 刘晓飞, 阮祥经\* (河南隆平高科种业有限公司, 河南济源 454650)

**摘要** 水杨酸(SA)化学名称为邻羟基苯甲酸,已经被证明是一种新型植物激素,是广泛存在于植物体内的重要的内源信号分子。水杨酸不仅能够调节植物的某些生长发育过程,还具有诱导植物提高抗逆性的作用,使植物产生抗逆性,抵抗不良因素造成的伤害。简要综述了水杨酸在高盐、干旱、高温、低温、病虫害等逆境胁迫条件下诱导植物抗逆性的产生及作用机理。

**关键词** 水杨酸;植物抗逆性;逆境胁迫;作用机理

中图分类号 Q945 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)23-0022-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.23.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Research Advance on Salicylic Acid and Resistance Stress in Plants

WANG Yan-peng, YANG Er-bo, ZHU Xue-gang et al (Henan Longping High-Tech Seed Industry Co., Ltd., Jiyuan, Henan 454650)

**Abstract** The chemical name of salicylic acid (SA) is o-hydroxybenzoic acid. It has been proven to be a new type of plant hormone and an important endogenous signal molecule that exists widely in plants. Salicylic acid can not only regulate certain growth and development processes of plants, but also has the effect of inducing plants to improve stress resistance, so that plants can develop stress resistance and resist damage caused by unfavorable factors. The production and mechanism of salicylic acid induced plant resistance under stress conditions such as high salinity, drought, high temperature, low temperature, pests and diseases were briefly reviewed.

**Key words** Salicylic acid (SA); Plant resistance; Adversity stress; Mechanism of action

随着全球气候变化和人口不断增长、生态环境条件不断恶化,自然灾害呈多发、频发的趋势。因此,植物在其生长发育过程中常受到生物胁迫(如病、虫、草害)和非生物胁迫(如高温、低温、干旱、高盐、阴雨、渍涝、重金属超标等)的危害<sup>[1]</sup>。研究表明植物内源激素对植物在逆境中获得抗逆性发挥着重要的作用<sup>[2]</sup>。近年来,有关植物的抗逆性研究越来越受到重视,尤其是水杨酸与植物抗胁迫的关系和诱导抗逆性产生的机理一直是研究的热点<sup>[3]</sup>。

水杨酸(SA),别名邻羟基苯甲酸,是广泛存在于植物体内的一种简单的小分子酚类化合物,属于肉桂酸的衍生<sup>[3]</sup>,外源水杨酸处理可以诱导植物产生抗性,缓解植物的胁迫伤害,提高植物在逆境下的生存能力。近年来,大量研究报道水杨酸提高植物抗逆性的研究,它在植物体内的调节作用不仅表现在对植物生长、发育、成熟、衰老等生理过程的调控<sup>[4-5]</sup>,而且水杨酸是重要的能够激活植物过敏反应和系统获得抗性的内源信号分子<sup>[6-7]</sup>,能诱导植物在耐盐、耐旱、耐热(高温)、耐寒、抗病、抗重金属等方面的抗逆性<sup>[8-12]</sup>。因此,笔者综述了外源SA诱导植物耐盐、耐旱、耐热(高温)、耐寒等逆境胁迫的调节作用,为其在植物逆境环境中提高植物抗胁迫能力以及外源SA的广泛合理的应用提供参考。

#### 1 水杨酸对植物耐盐性的影响

盐胁迫是农业生产中经常遇到的问题,植物在种子萌发阶段和幼苗期是盐胁迫最敏感的阶段之一<sup>[13]</sup>。种子萌发和植物生长抑制的主要原因是盐胁迫诱导活性氧(ROS)的产生和脂质过氧化作用,使细胞膜的选择透性丧失和生理功能遭到破坏。此时,植物体需要启动其抗氧化防御系统和非酶

促的抗氧化剂来去除体内活性氧和解决脂质过氧化问题,抗氧化防御系统主要包括抗氧化酶SOD、POD、CAT、APX等;非酶促的抗氧化剂主要有抗坏血酸盐(AsA)、谷胱甘肽(GSH)等。大量的研究表明,施用外源SA可以提高一些抗氧化系统的活性<sup>[14-17]</sup>,清除体内过多的活性氧和减少盐胁迫对植物生物膜的破坏,保持生物膜的稳定性、选择透性和完整性。Baninasab等<sup>[18]</sup>研究表明低浓度SA能够提高幼苗的渗透调节能力,减少生理渗透失水,增加膜的稳定性及对离子的选择性,免除高浓度盐离子对酶和代谢的毒害。

盐胁迫会降低气孔导度和影响光合色素合成进而使光合作用变弱,导致植物生长所需的营养物质含量降低<sup>[19]</sup>,衰老加速<sup>[18]</sup>。El-Tayeb<sup>[12]</sup>研究表明外施SA可抑制盐胁迫下玉米叶片中Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>的积累,增加其N、P、K、Mg、Fe、Mn、Cu等元素的吸收和光合色素的含量,提高光合电子的传递速率,降低盐胁迫对植株的伤害,植物耐盐性提高。

#### 2 水杨酸对植物耐热性的影响

目前,随温室效应日益明显,植物面临着生存和生活威胁,尤其在夏季,高温热害已经成为作物生长的主要灾害之一。高温强光胁迫下,植物叶片不能将过剩光能及时耗散是造成植物体内活性氧含量上升的主要原因<sup>[20]</sup>。大量产生的活性氧氧化并破坏了细胞膜的结构和功能,使细胞内MDA含量和电导率急剧上升<sup>[21]</sup>,造成植物生物膜蛋白质易发生变性、分解,从而破坏膜结构,导致膜丧失选择性。同时高温胁迫也会造成植物体内活性氧代谢的失调、细胞渗透势异常、一些功能蛋白质的合成或降解、基因表达水平的变化等<sup>[20]</sup>。

前人的研究表明,植物细胞膜的稳定性、可溶性蛋白含量与植物的耐热性密切相关<sup>[22]</sup>。孙军利等<sup>[23]</sup>研究表明,随着高温胁迫时间的延长,外源SA可以显著增加葡萄幼苗叶片内可溶性蛋白和游离脯氨酸含量,降低丙二醛含量和电解

**作者简介** 王艳朋(1983—),男,河南洛阳人,农艺师,硕士,从事玉米遗传育种研究。\*通信作者,农艺师,硕士,从事玉米遗传育种研究。

**收稿日期** 2021-04-01; **修回日期** 2021-05-08

质渗透率,同时也显著降低细胞膜质过氧化伤害,增强蛋白激酶活性和蛋白磷酸化的反应,从而提高葡萄的耐热性。尹慧等<sup>[24]</sup>在 45 °C 高温 20 h 处理百合幼苗,低浓度水杨酸(0.5~1.0 mmol/L)处理降低了百合幼苗电解质渗透率,提高了抗氧化酶(SOD、POD、APX、GR)活性,维持活性氧产生与清除间平衡,而高浓度水杨酸(4~8 mmol/L)则增加了电解。

光合作用也是植物对高温最敏感的反应进程之一<sup>[25]</sup>。水杨酸能够平衡叶片内的活性氧代谢,维持一定的 PSII 对光合机构的保护作用<sup>[26]</sup>,并能促进叶片气孔开放,提高光合作用效率。梁本富等<sup>[27]</sup>研究发现,叶面喷施 SA 可促进多花黄精叶片脯氨酸和可溶性蛋白的积累,提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,降低超氧自由基产生速率和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量,使丙二醛(MDA)含量和相对电导率显著下降,增强多花黄精抵御高温强光胁迫伤害的能力;同时,水杨酸还能提高  $F_v/F_m$ 、 $\Phi PSII$  和  $g_p$ ,降低非光化学淬灭系数(NPQ),并能促进气孔开放和 CO<sub>2</sub> 转运,使多花黄精能够在逆境胁迫下维持较高的光学活性和净光合速率,但过高 SA 浓度则会加重多花黄精胁迫伤害。王利军等<sup>[28]</sup>研究表明水杨酸能够保持叶片较高的光合速率而非气孔因素的作用,这可能是由于改善了光合机构的性能,从而缓解高温热害对光合系统的伤害。

### 3 水杨酸对植物耐寒性的影响

低温胁迫条件下,许多植物光合器官结构和性能受到影响或破坏,如叶绿体和类囊体膜的组分、透性和流动性,叶绿体超微结构等,具体表现为光合速率明显下降<sup>[29]</sup>。陈丹等<sup>[30]</sup>研究发现,SA 处理能缓解低温胁迫下蝴蝶兰叶片叶绿素的降解和增强 PSII 活性,在恢复生长过程中可以促进叶片中叶绿素的回升和细胞内光合系统的恢复。同时 SA 通过提高质膜系统的稳定性,降低质膜透性来诱导低温胁迫下水稻幼苗的抗低温能力,从而降低其对植物体内其他生理过程的影响而间接地影响光合作用<sup>[29]</sup>。

细胞膜作为受到低温寒害的原初部位,其完整性和通透性与植株的耐寒性密切相关<sup>[30]</sup>。膜脂过氧化的主要产物是丙二醛,低温胁迫下植物体内的丙二醛含量随胁迫程度的增强不断增加,其含量的高低能够直接反映膜脂过氧化的程度,植物的耐寒性与丙二醛含量呈显著负相关<sup>[31-32]</sup>。辛慧慧等<sup>[33]</sup>研究表明 SA 预处理可以显著降低棉花幼苗叶片丙二醛的积累,从而缓解低温对质膜的过氧化伤害来适应低温环境。

### 4 水杨酸对植物耐旱性的影响

植物长期处于干旱胁迫环境时,其体内产生的活性氧(ROS)就越多,此时它能够合成渗透调节物质以增强其抗旱性,这是植物自身适应环境的一种自我保护性反应<sup>[34]</sup>。水杨酸可以促进植物体内渗透调节,以此来抵御胁迫并维持一定的光合作用,从而避免或减轻自身的光合系统受到破坏。梁本富等<sup>[27]</sup>研究发现,SA 通过减缓膜脂过氧化的发生,降低丙二醛(MDA)含量和细胞膜透性,增强水稻抵御干旱胁迫的能力。郝敬虹等<sup>[35]</sup>研究表明,施用外源 SA 可增强黄瓜幼苗

的渗透调节能力,减少水分的散失,提高水分利用效率,并通过增强 PSII 反应中心活性进而提高了净光合速率( $P_n$ ),有助于增强植株对干旱的适应能力。SA 还能诱导并提高抗氧化酶活性,增强小冠花对干旱环境的适应能力<sup>[27]</sup>。

De Campos 等<sup>[36]</sup>研究认为,干旱胁迫下渗透调节物质脯氨酸含量的增加,有助于清除干旱胁迫下植株体内的 ROS,避免细胞膜质过氧化程度加深。调节系统中 SOD、POD 和 CAT 活性高低也成为控制伤害的决定因素<sup>[37-38]</sup>,而外源水杨酸可以有效控制植物体内超氧阴离子的产生速率,提高抗氧化系统 SOD、POD 和 CAT 的活性,增强植物的抗旱能力<sup>[39-40]</sup>。Singh 等<sup>[41]</sup>研究表明,干旱胁迫下水杨酸可以提高小麦幼苗 SOD 活性和 POD 活性来保护膜稳定性,从而提高植物的抗旱性。但是高浓度的水杨酸不仅不能提高植物体的抗旱能力,反而导致植物电解质泄漏率增加,从而加剧干旱胁迫造成的危害性<sup>[42]</sup>。

### 5 水杨酸对植物耐重金属性的影响

研究发现水杨酸是一种激活植物重金属抗性的重要信号分子<sup>[41-42]</sup>。据报道,重金属胁迫条件下植物体内源水杨酸水平也升高,且外施水杨酸也诱导内源水杨酸含量升高,增强了植物对重金属的耐性<sup>[43]</sup>。

重金属胁迫能够诱导 ROS 产生,而植物拥有一个复杂的抗氧化网络代谢系统,包括抗坏血酸盐(AsA)、谷胱甘肽(GSH)、脯氨酸、类胡萝卜素等,还有 SOD、CAT、POD 等一系列酶来维护细胞的氧化还原动态平衡在一定范围内<sup>[44-45]</sup>。转录组研究也证实了水杨酸在抗铅胁迫时,植物体编码酶的基因表达量增加及抗氧化剂、脯氨酸代谢和各种次生代谢物的生物合成<sup>[46]</sup>。

大量研究表明,水杨酸能缓解重金属的氧化伤害<sup>[47]</sup>和减少重金属对细胞膜的伤害<sup>[42]</sup>。同时,外源水杨酸的应用增加了脯氨酸含量<sup>[48]</sup>,因此脯氨酸含量的增加也被认为是植物缓解重金属胁迫造成损害的另一个重要机制<sup>[49-50]</sup>。

随着研究的逐步深入,对植物抵抗重金属机制有了初步认识,但对一些能修复重金属污染土壤植物的解毒机制尚需要进一步深入研究,可以通过喷洒外源水杨酸的措施以开发新方法来帮助修复被重金属污染的土壤。

### 6 水杨酸与植物抗病性

White<sup>[51]</sup>研究发现经过水杨酸、阿司匹林或安息香酸处理过的烟草,体内有大量病原相关蛋白的积累,能够抵抗 TMV 侵袭。当植物被病原菌感染或诱导后,水杨酸能够诱导植物体内病程相关蛋白基因(PR)表达以及产生系统获得抗病性<sup>[52]</sup>,且其诱导的抗性可持续几周几个月,甚至是整个生长季节<sup>[53]</sup>。Malamy 等<sup>[7]</sup>研究发现烟草在感染 TMV 后,在病原相关蛋白的作用下,局部或整个植株的内源水杨酸 A 含量均上升。Metraux 等<sup>[54]</sup>研究表明,黄瓜在接种炭疽病病毒或烟草坏死病毒(TNV)后,其韧皮部的水杨酸含量大幅度提高。这进一步证明水杨酸是植物系统获得抗性的一个内源信号分子。

NPR1 蛋白作为水杨酸信号传递途径的一个关键蛋

白<sup>[55]</sup>, NPR1 蛋白的表达水平对植物的抗病性非常重要,它可以协同转录调控因子促进抗病基因(包括 PR 基因)的表达<sup>[56]</sup>。过表达 NPR1 蛋白的基因可以显著提高作物的抗病性<sup>[57-58]</sup>,如果植物体内缺少 NPR1 基因会导致阻断水杨酸诱导产生的转录调控途径而不能获得抗性<sup>[59]</sup>。综上,水杨酸在植物抗病过程的信号传递途径及生理调控作用需要进一步研究。

## 7 展望

随着全球气候的变暖,极端天气呈重发、频发趋势,如何提高逆境条件下作物抗逆性是今后研究的热点。水杨酸作为新型植物激素和对胁迫应答的一种信号传递分子,其抗逆性作用的机制机理研究也越来越深入。水杨酸的推广应用在果实保鲜、作物耐性提高、生理调控、品质改良、组培研究等方面有广阔的应用前景。

首先,在农业生产过程中,水杨酸直接应用于田间生产的技术还不是很成熟。主要是因为外源施用水杨酸时,由于作物在不同生长发育时期对于水杨酸的需求量也不尽相同,当施用浓度过大,超过作物需求时,还会对作物产生一定的毒害作用。其次,研究人员也通过日益成熟的分子生物学手段来调控作物体内的水杨酸代谢途径,增加其表达量;还有就是研究人员从自然界中筛选出能够使水杨酸表达的特定基因,并将其导入目标作物体内,从而用其培育出遗传上稳定且对病虫害及逆境具有抗性的转基因作物,减少逆境胁迫带来的减产,提高作物产量和经济效益。

## 参考文献

[1] 李丽,刘双清,杨远航,等. 热激转录因子在植物抗非生物胁迫中的功能研究进展[J]. 生物技术进展,2018,8(3):214-220.

[2] 戴蓉. 油菜品种耐低温发芽能力评价及生理机制研究[D]. 南京:南京农业大学,2017.

[3] 黄水文,葛淑芳. 水杨酸对逆境胁迫下植物生理生化影响的研究进展[J]. 安徽农业科学,2013,41(10):4248-4249,4301.

[4] BOATWRIGHT J L, PAJEROWSKA-MUKHTAR K. Salicylic acid: An old hormone up to new tricks[J]. Molecular plant pathology, 2013, 14(6): 623-634.

[5] VLOT A C, DEMPSEY D M A, KLESSIG D F. Salicylic acid, a multifaceted hormone to combat disease[J]. Annual review of phytopathology, 2009, 47: 177-206.

[6] 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.

[7] MALAMY J, CARR J P, KLESSIG D F, et al. Salicylic acid: A likely endogenous signal in the resistance response of tobacco to viral infection[J]. Science, 1990, 250(4983): 1002-1004.

[8] 刘小阳,徐礼生,李红侠. Pb 和 Cd 胁迫下外源激素水杨酸(SA)对大蒜生理特性的影响[J]. 宿州学院学报, 2012, 27(8): 17-20.

[9] HORVÁTH E, SZALAI G, JANDA T. Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling[J]. Journal of plant growth regulation, 2007, 26(3): 290-300.

[10] RIVAS-SAN VICENTE M, PLASENCIA J. Salicylic acid beyond defence: Its role in plant growth and development[J]. Journal of experimental botany, 2011, 62(10): 3321-3338.

[11] ALI E A, MAHMOUD A M. Effect of foliar spray by different salicylic acid and zinc concentrations on seed yield and yield components of mungbean in sandy soil[J]. Asian journal of crop science, 2012, 5(1): 33-40.

[12] EL-TAYEB M A. Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid[J]. Plant growth regulation, 2005, 45(3): 215-224.

[13] 王宝山,赵可夫,邹琦. 作物耐盐机理研究进展及提高作物抗盐性的对策[J]. 植物学通报, 1997, 14(S1): 25-30.

[14] GUNES A, INAL A, ALPASLAN M, et al. Effects of exogenously applied

salicylic acid on the induction of multiple stress tolerance and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.)[J]. Archives of agronomy and soil science, 2005, 51(6): 687-695.

[15] STEVENS J, SENARATNA T, SIVASITHAMPARAM K. Salicylic acid induces salinity tolerance in tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. Roma): Associated changes in gas exchange, water relations and membrane stabilisation[J]. Plant growth regulation, 2006, 49(1): 77-83.

[16] BAI T H, LI C Y, MA F W, et al. Exogenous salicylic acid alleviates growth inhibition and oxidative stress induced by hypoxia stress in *Malus robusta* Rehd[J]. Journal of plant growth regulation, 2009, 28(4): 358-366.

[17] YUSUF M, HASAN S A, ALI B, et al. Effect of salicylic acid on salinity-induced changes in *Brassica juncea*[J]. Integrative plant biology, 2008, 50(9): 1096-1102.

[18] BANINASAB B, BAGHBANHA M R. Influence of salicylic acid pre-treatment on emergence and early seedling growth of cucumber (*Cucumis sativus*) under salt stress[J]. International journal of plant production, 2013, 7(2): 187-206.

[19] 王弯弯. 外源 NO 与 SA 对冬小麦盐胁迫的缓解效应及其机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.

[20] ASADA K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions[J]. Plant physiology, 2006, 141(2): 391-396.

[21] XU S, LI J L, ZHANG X Q, et al. Effects of heat acclimation pretreatment on changes of membrane lipid peroxidation, antioxidant metabolites, and ultrastructure of chloroplasts in two cool-season turfgrass species under heat stress[J]. Environmental and experimental botany, 2006, 56(3): 274-285.

[22] 汪新文. 茉莉酸参与植物逆境胁迫的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(6): 29-35, 24.

[23] 孙军利,赵宝龙,郁松林. 外源水杨酸(SA)对高温胁迫下葡萄幼苗耐热性诱导研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 290-294, 299.

[24] 尹慧,周剑,苑智华,等. 高温胁迫下水杨酸对百合植株抗氧化酶活性影响的初探[C]//中国园艺学会球根花卉分会. 中国园艺学会球根花卉分会 2018 年会暨球根花卉产业发展研讨会论文集. 北京: 中国农业出版社, 2018.

[25] BERRY J, BJORKMAN O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants[J]. Annual review of plant physiology, 1980, 31(1): 491-543.

[26] 王辉,刘国顺,云菲,等. 逆境条件下外源水杨酸对植物光合特性的影响研究进展[J]. 河南农业科学, 2014, 43(3): 1-4, 11.

[27] 梁永富,王康才,薛启,等. 高温强光胁迫下水杨酸对多花黄精生理及光合特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(5): 839-847.

[28] 王利军,李家承,刘允芬,等. 高温干旱胁迫下水杨酸和钙对柑橘光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. 中国农学通报, 2003, 19(6): 185-189.

[29] 张蕊,龚守富,李可凡,等. 低温下外源水杨酸对水稻幼苗光合作用的影响[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(5): 883-886.

[30] 陈丹,王丹,孙丽,等. 外源水杨酸对低温胁迫下蝴蝶兰的缓解效应及其抗氧化生理特征变化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2014, 40(3): 266-274.

[31] 王华,王飞,陈登文,等. 低温胁迫对杏花 SOD 活性和膜脂过氧化的影响[J]. 果树科学, 2000, 17(3): 197-201.

[32] 冯献宾,董倩,王洁,等. 低温胁迫对黄连木抗寒生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(8): 23-26.

[33] 辛慧慧,李防洲,侯振安,等. 低温胁迫下棉花幼苗对外源水杨酸的生理响应[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 660-664.

[34] BABITA M, MAHESWARI M, RAO L M, et al. Osmotic adjustment, drought tolerance and yield in castor (*Ricinus communis* L.) hybrids[J]. Environmental and experimental botany, 2010, 69(3): 243-249.

[35] 郝敬虹,易易,尚庆茂,等. 干旱胁迫下外源水杨酸对黄瓜幼苗膜脂过氧化和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 717-723.

[36] DE CAMPOS M K F, DE CARVALHO K, DE SOUZA F S, et al. Drought tolerance and antioxidant enzymatic activity in transgenic 'Swingle' citrus plants over-accumulating proline[J]. Environmental and experimental botany, 2011, 72(2): 242-250.

[37] JIANG Y W, HUANG B R. Drought and heat stress injury to two cool-season turfgrasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation[J]. Crop science, 2001, 41(2): 436-442.

[38] 张智猛,戴良香,宋文武,等. 干旱处理对花生品种叶片保护酶活性和渗透物质含量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 133-141.

知,与CK相比,T处理的还原糖和淀粉含量有所下降,总植物碱和钾含量略有升高,其他化学成分含量基本维持不变。

表 11 不同处理对烟叶化学成分比例的影响

Table 11 Effects of different treatments on the chemical component proportions of tobacco leaves

处理编号 Treatment code	还原糖 Reducing sugar	总糖 Total carbohydrate	总植物碱 Total vegetable alkaloid	总氮 Total N	钾 K	氯 Cl	淀粉 Starch
CK	22.8	27.6	2.08	1.67	1.91	0.40	10.60
T	19.0	27.6	2.46	1.65	2.00	0.37	7.49

### 3 结论与讨论

在该试验条件下,两段式育苗在推迟 12 d 移栽的情况下,团棵期仅推迟 5 d 左右,其他生育期仅推迟 1 d 左右,表明两段式育苗处理对主要生育期的影响不大,但大田生育期会缩短 11 d 左右,这是由于两段式育苗移栽的还苗比膜下小苗移栽更快。两段式育苗处理团棵期农艺性状数据较对照小,但后期具有生长优势,农艺性状反而增加;方差分析表明,2 个处理之间差异不明显。两段式育苗处理和对照均有花叶病发生,病情指数分别为 2.44 和 5.37,表明两段式育苗处理花叶病发生略轻一些,这与李安等<sup>[10]</sup>研究结论类似,说明两段式育苗移栽能在一定程度上降低病虫害的发生,后期生长发育劲头更足的优势。与膜下小苗移栽相比,两段式育苗移栽的产量与产值更优、烤后烟叶外观质量更好,说明两段式育苗移栽方式经济性优势更大。与膜下小苗移栽相比,两段式育苗移栽处理的还原糖和淀粉含量下降,总植物碱和钾含量略有升高,化学成分含量基本维持不变,说明两段式育苗移栽烤后烟叶内在质量优势不

明显。总体来看,两段式育苗移栽技术略优于膜下小苗移栽技术。

### 参考文献

- [1] 聂新柏,胡日生,张大伟. 烤烟漂浮育苗技术的研究[J]. 湖南烟草,2002(6):33-35.
- [2] 刘建利. 我国烤烟育苗新技术及发展方向[J]. 中国烟草科学,2000,21(2):45-46.
- [3] 杨茹芬. 烟叶膜下小苗移栽技术研究[J]. 南方农机,2020,51(12):59,95.
- [4] 李建芬,李丽华,马君红,等. 膜下小苗移栽对烤烟生长发育及产质量的影响[J]. 安徽农业科学,2017,45(32):14-16.
- [5] 方腾. 烤烟二段式漂浮育苗炼苗方式研究[J]. 安徽农业科学,2015,43(15):47-48.
- [6] 王可,李安,姜宝迪,等. 油菜壳覆盖烟垄在烟草水旱两段式育苗上的应用研究[J]. 安徽农业科学,2020,48(10):21-23,26.
- [7] 张义志,孔凡玉,黄建,等. 水旱两段式育苗技术对烤烟成苗素质的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):67-69.
- [8] 曾淑华,熊成文,胡永龙,等. 烤烟二段式少基质漂浮育苗对烟苗素质的影响[J]. 贵州农业科学,2012,40(10):36-37,40.
- [9] 田金云,李世金,杨悦章. 施用烟草专用复混肥及增施有机肥对烤烟生长的影响[J]. 安徽农学通报,2020,26(6):124-125,172.
- [10] 李安,王可,姜宝迪,等. 水旱两段式育苗与漂浮育苗在烟草上的应用效果研究[J]. 现代农业科技,2020(3):23-24.
- [39] 蒋明敏,徐晟,夏冰,等. 干旱胁迫下外源氯化钙、水杨酸和一氧化氮对大蒜抗旱性的影响[J]. 植物生理学报,2012,48(9):909-916.
- [40] 刘杰,杨絮茹,周蕴薇. 水杨酸浸种处理对黑麦草种子萌发及幼苗抗旱性的影响[J]. 草业科学,2011,28(4):582-585.
- [41] SINGH B, USHA K. Salicylic acid induced physiological and biochemical changes in wheat seedlings under water stress[J]. Plant growth regulation, 2003,39(2):137-141.
- [42] NÉMETH M, JANDA T, HORVÁTK E, et al. Exogenous salicylic acid increases polyamine content but may decrease drought tolerance in maize[J]. Plant science, 2002,162(4):569-574.
- [43] ZAWOZNIK M S, GROPPA M D, TOMARO M L, et al. Endogenous salicylic acid potentiates cadmium-induced oxidative stress in *Arabidopsis thaliana*[J]. Plant science, 2007,173(2):190-197.
- [44] NOCTOR G, FOYER C H. ASCORBATE AND GLUTATHIONE: Keeping active oxygen under control[J]. Annual review of plant biology & plant molecular biology, 1998,49(1):249-279.
- [45] MITTLER R, VANDERAUWERA S, GOLLERY M, et al. Reactive oxygen gene network of plants[J]. Trends in plant science, 2004,9(10):490-498.
- [46] LIU T, LIU S Y, GUAN H, et al. Transcriptional profiling of *Arabidopsis* seedlings in response to heavy metal lead (Pb)[J]. Environmental and experimental botany, 2009,67(2):377-386.
- [47] DRAZIC G, MIHAILOVIC N. Modification of cadmium toxicity in soybean seedlings by salicylic acid[J]. Plant science, 2005,168(2):511-517.
- [48] LÓPEZ-ORENAS A, MARTÍNEZ-MORENO J M, CALDERÓN A A, et al. Changes in phenolic metabolism in salicylic acid-treated shoots of *Cistus heterophyllus*[J]. Plant cell, tissue and organ culture, 2013,113(3):417-427.
- [49] LEFÈVRE I, VOGEL-MIKUŠ K, JEROMEL L, et al. Differential cadmium and zinc distribution in relation to their physiological impact in the leaves of the accumulating *Zygophyllum fabago* L. [J]. Plant, cell & environment, 2014,37(6):1299-1320.
- [50] PARRAGA-AGUADO I, GONZALEZ-ALCARAZ M N, ALVAREZ-ROGEL J, et al. The importance of edaphic niches and pioneer plant species succession for the phytomanagement of mine tailings[J]. Environmental pollution, 2013,176:134-143.
- [51] WHITE R F. Acetylsalicylic acid (aspirin) induces resistance to tobacco mosaic virus in tobacco[J]. Virology, 1979,99(2):410-412.
- [52] RASKIN I. Role of salicylic acid in plants[J]. Annual review of plant biology, 1992,43(1):439-463.
- [53] DURRANT W E, DONG X. Systemic acquired resistance[J]. Annual review of phytopathology, 2004,42:185-209.
- [54] METRAUX J P, AHLGOY P, STAUB T H, et al. Induced systemic resistance in cucumber in response to 2,6-dichloro-isonicotinic acid and pathogens[M]//HENNECKE H, VARMA D P S. Advances in molecular genetics of plant-microbe interactions. Dordrecht; Springer, 1991:432-439.
- [55] CAO H, GLAZEBROOK J, CLARKE J D, et al. The *Arabidopsis* NPR1 gene that controls systemic acquired resistance encodes a novel protein containing ankyrin repeats[J]. Cell, 1997,88(1):57-63.
- [56] KINKEMA M, FAN W H, DONG X N. Nuclear localization of NPR1 is required for activation of PR gene expression[J]. The plant cell, 2000,12(12):2339-2350.
- [57] WALLY O, JAYARAJ J, PUNJA Z K. Broad-spectrum disease resistance to necrotrophic and biotrophic pathogens in transgenic carrots (*Daucus carota* L.) expressing an *Arabidopsis* NPR1 gene[J]. The Planta, 2009,231(1):131-141.
- [58] SRINIVASAN T, KUMAR K R R, MEUR G, et al. Heterologous expression of *Arabidopsis* NPR1 (*AtNPR1*) enhances oxidative stress tolerance in transgenic tobacco plants[J]. Biotechnology letters, 2009,31(9):1343-1351.
- [59] CAO H, BOWLING S A, GORDON A S, et al. Characterization of an *Arabidopsis* mutant that is nonresponsive to inducers of systemic acquired resistance[J]. The plant cell, 1994,6(11):1583-1592.

(上接第 24 页)