

植物生长调节剂在中药材生产中的应用进展

樊建¹, 沈莹¹, 邓代千^{1,2}, 姚杰¹, 孟祥才^{1*}

(1. 黑龙江中医药大学, 哈尔滨 150040;

2. 牡丹江医学院, 黑龙江牡丹江 157011)

[摘要] 植物生长调节剂(PGR)多为一类具有类似植物激素生理活性的化学合成物质,能通过调控光合、呼吸、信号传导、气孔开闭、蒸腾、物质吸收及运转等一系列生理过程,进而促进细胞伸长生长、诱导维管分化或加速组织衰老。PGR具有用量小、效益高、毒性低和残留少等优势,在中药材种植业中被广泛应用。通过查阅近年来发表的相关文献,简要归纳PGR的主要种类,如生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、脱落酸类及乙烯类等;分析总结PGR在中药材生产中的具体应用,如促进种子萌发、诱导扦插生根、提高结实率或坐果率、矮化植株、抑制生殖生长、调控性别分化、催落果实和增强抗逆性等;指出PGR实际应用过程中存在的问题,如不区分特定种类、不合理搭配使用、不注重施用方式、随意增大剂量、缺乏残留限量标准与降低某些药效成分含量等;提出可行性建议,如合理规划选用适宜种类PGR及施用浓度、剂量、时期等,同时还应该关注PGR对植物生长发育和药用器官中有效成分的双重影响,在确保中药材质量基础上提高产量,避免药效成分流失。加强PGR在中药材生产中的登记管理,制定与国情相适应的残留限量标准,为保障中药用药安全提供监测依据。科学应用PGR可促进农业增产和农民增收,使中药材种植业健康发展。

[关键词] 植物生长调节剂; 中药材; 植物激素; 生长发育

[中图分类号] S482.8;S567;R282;R93 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2022)03-0234-07

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20220119

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20211129.1816.003.html>

[网络出版日期] 2021-11-30 12:33

Application Progress of Plant Growth Regulator in Production of Chinese Medicinal Materials

FAN Jian¹, SHEN Ying¹, DENG Dai-qian^{1,2}, YAO Jie¹, MENG Xiang-cai^{1*}

(1. Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin 150040, China;

2. Mudanjiang Medical University, Mudanjiang 157011, China)

[Abstract] Plant growth regulator (PGR) is mostly a class of chemical synthesis substance with physiological activities similar to plant hormones, which can promote cell elongation, induce vascular differentiation or accelerate tissue aging via regulating the physiological processes such as photosynthesis, respiration, transpiration, signal transduction, substance absorption and operation. PGR has the advantages of small dosage, high efficiency, low toxicity and less residue, and it is widely used in the planting of Chinese medicinal herbs. By consulting the relevant literature published in recent years, this paper briefly summarizes the main types of PGR, e.g. auxins, gibberellins, cytokinins, abscisic acid and ethylene, etc. On the other hand, this article analyzes and sums up the specific applications of PGR in the manufacture of Chinese herbal medicine, for instance, promoting seed germination, improving seed setting rate or fruit setting rate, dwarfing plants, inhibiting

[收稿日期] 20210914(009)

[基金项目] 国家自然科学基金项目(81573523);2018年中医药公共卫生服务补助专项“全国中药资源普查项目”(财社[2018]43号);黑龙江中医药大学科研基金项目(2019MS27)

[第一作者] 樊建,在读博士,从事生物技术与生药资源开发研究,E-mail:Fanjian_1994@163.com

[通信作者] *孟祥才,博士,教授,博士生导师,从事药用植物生物学、栽培及质量评价研究,E-mail:Mengxiangcai000@163.com

reproductive growth, regulating gender differentiation, stimulating fruit falling, enhancing resistance and so on. The problems existing in the practical use of PGR are pointed out, non-differentiation of specific species, unreasonable combination, not paying attention to the operation method, arbitrarily increasing the dose, lack of residue limit standard and reducing the content of some effective components, for example. Meanwhile, some feasible suggestions are put forward. Not only the suitable types of PGR should be selected in a reasonable and standardized manner, but also the appropriate concentration, dosage and period of application should be chosen carefully; the dual effects of PGR on plant growth and active ingredients in medicinal organs should be concerned, so as to improve the yield and avoid the loss of effective components on the basis of ensuring the quality of Chinese medicinal materials; it is necessary to strengthen the registration of PGR in the production of Chinese medicinal materials and establish residue limit standards to provide a monitoring basis for ensuring the safety of Chinese medicine in the future. The scientific use of PGR can promote the increase of agricultural yield and farmers' income, and make the healthy development of Chinese herbal medicine planting industry.

[Keywords] plant growth regulator; Chinese medicinal herbs; plant hormone; growth and development

植物生长物质可分为两类,植物激素和植物生长调节剂(PGR)。植物激素是一些在植株体内合成并对植物生长发育有显著作用的微量有机物质;PGR是通过人工合成或从微生物中提取且具有类似植物激素生理与生物学效应的物质^[1]。植物激素主要有5类,即生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、脱落酸类和乙烯类。近年发现的植物激素还有芸苔素内酯、水杨酸、茉莉酸甲酯、烯效唑与胺鲜酯等^[2]。尽管膨大剂(如膨大素)等个别PGR在中药材生产中会降低药材质量,但绝大部分PGR能够有效调节植物的生长发育过程,具有稳产增产、改善品质及增强抗逆性等作用,如外施赤霉素可使白芷增产30.60%^[3];芸苔素内酯能使青蒿中青蒿素质量分数提高124.32%^[4];茉莉酸甲酯可有效缓解干旱胁迫造成的伤害,使连翘种子发芽率提高81.67%^[5]。

自20世纪80年代以来,随着中药材种植品种与面积的增加,PGR的施用愈加频繁^[6]。但部分药农对PGR缺乏科学系统的学习,使用时存在不区分特定种类、随意增大剂量等盲目滥用现象,使部分地区中药材的生产处于无序状态^[7]。鉴于此,本文以PGR为研究对象,通过查阅近年来发表的相关文献,对主要种类和应用实例进行归纳总结,指出在中药材生产应用过程中存在的问题并提出可行性建议,以期为更好地利用PGR指导生产实践提供理论参考。

1 生长素类

天然生长素类PGR为吲哚乙酸(IAA),外部施用的主要是人工合成且具有类似生长素功能的物质,如吲哚丁酸(IBA),萘乙酸(NAA)及2,4-二氯苯

氧乙酸(2,4-D)等^[8]。生长素类PGR在中药材生产中的应用实例如下。

1.1 促进种子萌发 IAA可通过刺激形成层细胞分裂,增强种子活力,使野生种曼陀罗种子发芽率提高95.12%^[9],使连翘种子发芽率、发芽势和发芽指数分别提高26.32%,53.33%,32.68%^[10]。

1.2 提高产量 NAA能促进细胞分裂进而加速生长发育,提高光合作用继而利于生物量积累,使芡实增产23.59%^[11],使太子参块根干质量、皂苷产量及氨基酸总量分别提高39.88%,60.69%,39.77%^[12]。

1.3 诱导扦插生根 生长素类PGR可能通过调节插穗细胞新陈代谢,增加组织再生能力,进而促进不定根的形成。IAA浓度对沙棘插穗生根数量、根长及枝条长度均有显著影响,随浓度升高作用效果由促进生根转化为抑制生根^[13]。NAA可通过加快山荆子插穗内营养物质(如可溶性蛋白、可溶性糖和淀粉)合成与代谢过程,提高抗氧化酶(如超氧化物歧化酶、过氧化物酶及多酚氧化酶)活性,从而使生根率提高257.51%^[14]。

2 赤霉素类

赤霉素(GA)首提于水稻恶苗病病菌,基本结构是赤霉烷。根据发现时间的先后,分别系统编号为GA₁,GA₂,GA₃……GA₁₂₆等,其中GA₃活性最大,通常泛称为赤霉素或赤霉酸^[15]。赤霉素类PGR在中药材生产中的应用实例如下。

2.1 促进抽薹开花 在中药材生产过程中,一些多年生宿根类植物容易受到GA影响而产生早期抽薹开花现象。抽薹前缓慢上升,抽薹后持续下降,内源植物激素GA₃含量的变化可以作为当归抽薹开花过程中各个时期的指标参数^[16]。外施GA₃可使白

芷抽薹率提高73.42%^[3],使连翘开花率提高157.14%以上^[17]。

2.2 调控性别分化 植物性别形成与动物性别分化截然不同,动物性别在胚胎时期由性染色体决定,而植物性别需要在分化、生长及发育成熟后的某个阶段才能确定^[18]。GA₃对不同植物的性别调控作用存有差异,对于大麻能促进雄性分化^[19];对于麻疯树花序中花枝分叉处和顶端花序中心的雌花位点均可发育为雌花^[20];对于蓖麻性别分化的调控具有“二重性”,即低浓度有利于雌花分化,而高浓度可促进雄花形成^[21]。

2.3 提高结实率或坐果率 GA可以通过加强IAA对养分的动员效应,使光合作用得以增强并诱导花粉发芽,进而促进某些植物坐果与结实。如外施GA₃能诱导无花果单性结实并使坐果率提高46.67%^[22],使灰枣坐果率提高2倍左右^[23]。

3 细胞分裂素类

天然细胞分裂素类PGR主要以类异戊二烯型存在,如异戊烯腺苷和玉米素(ZT)等^[24];人工合成细胞分裂素类PGR主要包括6-苄氨基腺嘌呤(6-BA),噻二唑苯基脲及膨大素(CPPU)等^[25]。细胞分裂素类PGR在中药材生产中的应用实例如下。

3.1 诱导形成愈伤组织 愈伤组织具有分化成完整植株的潜能,能在短时间内快速繁殖大量植株个体,可提高某些中药材的繁殖速度。细胞分裂素类PGR是植物组培试验中不可缺少的核心部分,如6-BA能使药桑愈伤组织诱导率提高133.24%以上^[26],使唐古特瑞香愈伤组织诱导率提高233.52%^[27]。

3.2 解除顶端优势 细胞分裂素类PGR可通过解除由生长素类PGR所引起的顶端优势,促进侧芽生长发育。杜鹃兰经打顶或外施生长素运输抑制剂后,侧芽内ZT水平显著升高,使侧芽萌发率提高51.00%^[28]。6-BA与ZT配比能促进腋芽增殖,使牛樟增殖系数提高382.93%,褐化率降低84.62%^[29]。

3.3 提高植物抗逆性 细胞分裂素类PGR在环境胁迫过程中也有独特作用。施用6-BA能通过增加高温干旱复合胁迫下半夏植株内抗氧化酶活性及可溶性糖、还原糖、鸟苷、腺苷含量,减少超氧阴离子和丙二醛积累并抑制光合色素降解,从而缓解环境胁迫对半夏所造成的伤害^[30]。6-BA对于盐胁迫下脯氨酸的累积有抑制作用,故而可增强苦马豆的抗逆性^[31]。

4 脱落酸类

天然脱落酸类PGR存在对映异构体,人工合成脱落酸类PGR多为由发酵制得的左旋体与右旋体组成的混合物,市场上销售的脱落酸类PGR还有矮壮素(CCC),缩节胺(DPC),多效唑(PP₃₃₃)及S-诱抗素等^[32]。脱落酸类PGR在中药材生产中的应用实例如下。

4.1 延长种子休眠期 休眠对处于恶劣环境中的种子保持自身繁衍能力具有重要的生态学意义。脱落酸(ABA)能抑制种子内核酸的正常代谢,阻止蛋白质及有关酶合成,促使种子休眠期得以延长。如外施ABA可使青钱柳种子发芽率和发芽指数分别降低51.48%,51.52%^[33],能显著延长顽拗性三七种子休眠期^[34]。五味子^[35]、肉苁蓉^[36]及紫椴^[37]等深休眠植物种子在层积过程中ABA含量随着层积处理天数的增加呈显著下降趋势,进一步证明ABA是种子萌发的抑制物质。

4.2 促使植株矮化 DPC与PP₃₃₃可抑制植物纵向伸长并促进横向生长,能通过控制植株高度来防止营养生长过盛继而提高中药材产量。肉苁蓉及其寄主梭梭是主要的沙漠植物,通过施用DPC和PP₃₃₃可以有效地使梭梭矮化,进而提高肉苁蓉产量^[38]。CCC能通过矮化植株与增加茎粗,使黄花乌头增产31.12%,倒伏率降低38.59%^[39],使柴胡节间长和株高分别缩短36.37%,33.48%,继而提高柴胡抗倒伏能力和经济效益^[40]。

4.3 提高次生代谢产物含量 在次生代谢过程中,ABA依靠自身合成途径、信号传导及植物激素间的相互作用等多种因素调控合成次生代谢产物。于甘草叶面施加ABA能使甘草酸和甘草苷质量分数分别提高51.50%,392.35%^[41];ABA也可使雷公藤悬浮细胞中雷酚内酯与雷公藤红素质量分数分别提高385.45%,171.43%^[42]。

5 乙烯类

乙烯因在常温条件下呈气态而不便施用,故常以各种乙烯发生剂代替使用,如乙烯利(ETP),环己亚胺、氨基氧乙酸、乙二肼及甲氯硝吡啶等,尤以ETP的应用最为广泛^[43]。乙烯类PGR在中药材生产中的应用实例如下。

5.1 抑制生殖生长 抑制生殖生长可以避免植株因开花消耗大量养分(如光合物质)而影响根系发育,以此提高中药材的产量和质量。喷施ETP可使牛大力花穗枯萎率提高86.70%^[44],使铁皮石斛的所有花蕾逐渐萎蔫脱落且产量、多糖含量与人工除蕾

组一致^[45]。

5.2 催落果实 对于一些果实类中药材采用ETP催落采收,不仅能大量减少采摘用工,而且还能避免因人工击打过程中出现的烂果或裂果现象。喷洒ETP有利于银杏、核桃等核用果及山丁子、甜茶、杜梨等种用果脱落,可使核桃果实催落率提高75.00%^[46]。

5.3 促使果实脱皮 脱皮是某些果实类中药材加工的一项重要工序,对增加外观品质和提升附加值具有重要意义。乙烯在果皮软化、开裂及腐熟进程中起着关键调控作用,如新鲜核桃经乙烯熏蒸后,脱皮率与胡桃醌质量分数分别提高41.67%,84.62%^[47];ETP能使胡椒脱皮率提高110.02%以上,脱皮后的胡椒种子无异臭味且ETP残留量低于食品中农药的残留限量标准^[48]。

6 其他激素类

近些年来,又发现了几种物质符合植物激素的定义,如芸苔素内酯、水杨酸、茉莉酸甲酯、烯效唑与胺鲜酯等。

6.1 芸苔素内酯 芸苔素内酯(BR)亦称油菜素内酯或芸苔素,是一种存在于高等植物体内的天然有机甾体类化合物,生理活性显著强于生长素、细胞分裂素和乙烯等,被誉为第6类植物激素。BR具有多种生理作用,如调控种子萌发、促进维管分化、维持顶端优势、加速组织衰老及增加肥效药效等^[49]。叶片喷施BR既能使甘草株高、地茎、根长、根粗、根鲜质量及根干质量得以提高,亦有利于甘草酸、甘草素、甘草苷、异甘草苷、芹糖甘草苷与芹糖异甘草苷合成,其中甘草苷和异甘草苷质量分数分别提高45.31%,53.56%^[50]。

6.2 水杨酸 水杨酸(SA)属桂皮酸类衍生物,多通过莽草酸途径在植物体内合成,可由韧皮部转运并发挥生理功能,如诱导种子萌发、调控植物花期及影响其他植物激素的生物合成等^[30]。外施SA可以提高桔梗抗旱能力,能缓解因干旱胁迫导致的ABA升高和GA下降等问题^[51]。不同浓度SA可使远志中总黄酮、吡啶Ⅲ与芒果苷质量分数分别提高66.43%,412.00%,64.09%^[52]。

6.3 茉莉酸甲酯 以茉莉酸甲酯(MeJA)为代表的茉莉酸类物质是一种广泛存在于植物体内的新型植物激素,能提高植物对环境胁迫的抵御能力,在植物生长发育过程中发挥重要调节作用。甘草受外源MeJA刺激后,由硬脂酸途径激活防御系统或直接激活防御基因,耐盐性得以提高^[53]。MeJA可

使曼陀罗毛状根中东茛菪碱、茛菪碱及总茛菪碱质量分数在短时间内分别提高42.07%,128.99%,220.21%^[54]。

6.4 烯效唑 烯效唑(S₃₃₀₇)是GA合成抑制剂,具有抑制生殖生长、矮化植株和增强抗逆性等作用^[55]。叶面喷施S₃₃₀₇能使丹参株高降低56.65%,增强抗倒伏能力;同时通过“控上促下”作用,使根冠比增加1.74倍,达到增产效果^[56]。S₃₃₀₇可以提高超氧化物歧化酶、过氧化氢酶与过氧化物酶活性,从而缓解干旱胁迫对薏苡造成的伤害^[57]。

6.5 胺鲜酯 胺鲜酯(DA-6)属叔胺类化合物,为一种新型广谱类PGR,主要通过调节核酸、蛋白质含量及抗氧化酶、硝酸还原酶活性促进植物生长发育,具有高效、低毒和低残留等特性^[58]。DA-6能促进碳水化合物代谢与物质积累,使苜蓿种子发芽率和发芽指数分别提高4.90%,17.56%^[59]。采前喷施DA-6可抑制龙眼果皮中脂氧合酶、脂酶及磷脂酶D活性,延缓磷脂酰胆碱、油酸和亚麻酸降解,维持细胞膜区室化功能与结构,进而增强龙眼果实耐贮性^[60]。DA-6也可刺激蛹虫草子座对基质营养的吸收利用而加速细胞生长,以此显著提高蛹虫草子座高度、直径及鲜质量^[61]。

7 现存问题与建议

PGR在中药材生产中的应用较为广泛,国内外学者针对使用效果与作用机制等方面做了大量研究,解决了中药材生产过程中的一些难题,但也存在个别盲目滥用PGR行为,缺乏相应安全性研究数据和具体应用规范,对中药材的质量与用药安全产生巨大影响^[62]。

7.1 规范使用方法 PGR种类繁多,理化性质、作用机制及用途亦各不相同。在搭配使用时需加谨慎,如SA和IBA,GA与CCC等。同一种PGR对不同种植物的影响具有差异,如PP₃₃₃可使太子参中总皂苷质量分数提高20.38%^[63],却使麦冬中总皂苷和总黄酮质量分数降低16.22%,35.40%^[64]。因此在实际应用过程中,应该仔细阅读使用说明书,不能将PGR施用到说明书以外的植物上。

不同生长时期的植株对同一种PGR敏感程度存有差异,如IAA对3叶期大麻促雌效果约为5叶期大麻1.77倍^[19]。不同使用方式所产生的作用效果也有差异,如采用浸根方式施用BR+IAA对黄芩叶面积指数和光合速率的提高幅度均高于叶面喷施法^[65];叶面喷施IAA能更加高效地促进丹参中酚酸类成分(如迷迭香酸、丹酚酸A与丹酚酸B)合成,

而根部浇灌 IAA 则更有利于提高丹参中丹参酮类成分(如隐丹参酮、丹参酮 I 和丹参酮 II_A)含量^[66]。因此在实际应用过程中,应该按需选用适宜的施用时期与方式,避免产生不良作用。

PGR 具有用量小、速度快及效率高等特点,在较低浓度条件下就能有效调控种子发芽、生根、开花、结实、成熟与脱落等一系列植物生命全过程,但过高浓度则会严重干扰植物正常代谢甚至导致死亡。如曼陀罗种子发芽率随 NAA 浓度升高而降低^[9];随 IAA 浓度升高,半夏中总黄酮、蛋白质及可溶性糖含量均呈现先上升后下降的变化趋势^[67]。因此在实际应用过程中,应该选择合适的施用浓度以达相应目的。

7.2 合理调控植物次生代谢 初生代谢为所有生物共同的代谢途径,通过此途径才能实现生命活动;次生代谢可提高植物生存竞争能力,保证物种种族延续。无论初生代谢还是次生代谢,均需要光合物质提供能量。然而光合物质是有限的,初生代谢的增强必然导致次生代谢的减弱,如 CPPU 既能提高麦冬产量(增产 134.76%)亦可降低麦冬总皂苷质量分数(降低 18.18%)^[68];DPC 在使黄芩根鲜质量提高 25.06% 的同时也使黄芩素和汉黄芩素质量分数降低 41.24%, 51.83%^[69]。由此可见, PGR 对某类或某些成分的作用存在“二重性”,既可升高亦可降低。因此在实际应用过程中,一定要同时关注 PGR 对植物生长发育和药用器官中有效成分的双重影响,在确保中药材质量基础上提高产量,避免药效成分流失。

7.3 完善植物生长调节剂残留限量标准 虽然 PGR 多能随着植物新陈代谢逐渐被降解,但绝大多数 PGR 是人工合成且具有低毒或微毒的化学物质,残留量超标仍会影响中药材的疗效与用药安全^[70]。如 ETP 可导致睾丸生殖细胞排列紊乱及生精细胞凋亡增加^[71]; 2,4-D 能通过改变线粒体膜通透性和加速释放凋亡因子进而诱导肝细胞异常凋亡^[72]。

中国在 2001 年修订的《农药管理条例》将 PGR 作为农药进行统一管理,并于 2021 年 9 月正式实施的《食品中农药最大残留限量》(GB 2763—2021)中共涉及 20 种 PGR,粮食作物、蔬菜和瓜果等均规定了最大残留量,但针对中药材尚未建立任何限量标准^[73]。由此可见,应该强化 PGR 对人体危险作用量的基础研究,加快完善与国情相适应的 PGR 残留限量标准,为中药材产业健康发展提供监测依据。

8 结论和展望

PGR 的使用是现代农业的重要特征,在保障中药材有效供应方面起到一定作用,但也存在过量或不合理使用现象且 PGR 对中药材质量的影响很复杂,尚缺乏相关基础研究。当下,应从多个方面入手,如通过科学实验手段确定 PGR 作用效果与机制,并不断完善使用规范,切实解决 PGR 在中药材生产中的应用问题;加紧制定中药材中 PGR 残留限量标准,同时开发残留检测的新技术和新方法,为中药用药安全提供保障。

虽然 PGR 具有一定的局限性,但不能因此否定 PGR 在调控植物生长发育方面的优越性,如促进种子萌发、调控性别分化、增加产量、提高次生代谢产物含量与增强抗逆性等。故而在中药材生产时需要合理选取 PGR 种类及施用方式、浓度、剂量、时期等,以此保证中药材的品质和产量,促进农业增产与农民增收,保障人民群众用药安全,以期更好地实现中药材种植业健康发展。

[参考文献]

- [1] 张丽霞,牟燕,杨美华,等. 植物生长调节剂在中药材中的应用及安全性评价研究进展[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(8): 1824-1832.
- [2] 戴忠华,朱华,笪舫芳,等. 植物生长物质在铁皮石斛生长中的作用[J]. 中华中医药学刊, 2017, 35(1): 109-111.
- [3] 侯凯,陈郡雯,翟娟园,等. 植物生长调节剂对川白芷生长发育及其产量品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(13): 2082-2085.
- [4] 池剑亭,申亚琳,舒位恒,等. 油菜素内酯促进药用植物青蒿中青蒿素的生物合成[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(4): 476-481.
- [5] 赵英力,李冬杰,崔旭盛,等. 干旱胁迫下连翘种苗对外源茉莉酸甲酯的生理生化响应[J]. 中药材, 2020, 43(8): 1830-1834.
- [6] 谷小红,郭宝林,田景,等. 植物生长调节剂在药用植物生长发育和栽培中的应用[J]. 中国现代中药, 2017, 19(2): 295-305, 310.
- [7] 翟宇瑶,郭宝林,黄文华. “壮根灵”类药剂检测及植物生长延缓剂在根及根茎类道地药材栽培中使用情况调查[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(3): 414-420.
- [8] 吉训志,秦晓威,胡丽松,等. 木本植物组织培养[J]. 热带农业科学, 2019, 39(4): 33-40.
- [9] 闫艳华. 不同外源激素处理对曼陀罗种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2020(23): 115-122.
- [10] 李莉,韩瑜霞,苏文娟,等. 不同预处理方法对连翘种

- 子萌发的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(3): 33-36.
- [11] 李友星, 丁广礼, 侯家生. 萘乙酸在芡实上的应用技术研究[J]. 现代农业科技, 2017(12): 83, 86.
- [12] 马迎莉, 时蕾, 张雨峰, 等. 萘乙酸对太子参生长及其块根有效成分的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(3): 123-130.
- [13] 彭炳兰. 吲哚乙酸不同处理对沙棘硬枝扦插苗生长的影响[J]. 陕西林业科技, 2014(3): 14-17.
- [14] 喻振宇, 范俊俊, 马敬泽, 等. 外施植物生长调节剂对山荆子扦插生根的影响[J]. 中国野生植物资源, 2021, 40(6): 25-30.
- [15] CAMARA M C, VANDENBERGHE L PS, RODRIGUES C, et al. Current advances in gibberellic acid (GA_3) production, patented technologies and potential applications[J]. *Planta*, 2018, 248(5): 1049-1062.
- [16] 黄珊. 当归早期抽茎分化和内源性激素变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [17] 郭彩云, 许凌霞. 赤霉素对连翘花期调控的影响研究[J]. 现代农业科技, 2014(9): 176-178.
- [18] ARYAL R, MING R. Sex determination in flowering plants: papaya as a model system[J]. *Plant Sci*, 2014, 217(218): 56-62.
- [19] 强晓霞. 大麻性别分化的生理学研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [20] 惠文凯, 杨舒怡, 陈涵斌, 等. 赤霉素诱导麻疯树雌雄花分化的研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(6): 174-180.
- [21] 何晓琳, 施玉珍, 殷学贵, 等. 蓖麻镶嵌系与雌性系间的生理差异研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(4): 8-14.
- [22] 张旭, 柴丽娟, 李艳美, 等. GA_3 对无花果秋果内源激素水平的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 65-72.
- [23] 宋亚伟, 陈虹, 胡安鸿, 等. 赤霉素对灰枣光合特性日变化及坐果的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(15): 208-211.
- [24] 樊彪, 赵江哲. 细胞分裂素研究进展及其在作物生产中的应用[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(8): 1411-1414.
- [25] SHOURBALAL S, SOLEYMANI A, JAVANMARD H R. Shortening vernalization in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using plant growth regulators and cold stratification[J]. *J Clean Prod*, 2019, 219: 443-450.
- [26] 李镇刚, 刘淑娟, 杜伟, 等. 药桑用离体冬芽组织培养和用枝条扦插繁殖的试验[J]. 蚕业科学, 2018, 44(3): 367-375.
- [27] 季元祖, 雷颖, 李晓玲, 等. 唐古特瑞香愈伤组织培养与再生体系建立[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 94-99.
- [28] 吕享, 叶睿华, 田海露, 等. 生长素介导细胞分裂素(玉米素)调控杜鹃侧芽萌发[J]. 农业生物技术学报, 2018, 26(11): 1872-1879.
- [29] 邢文婷, 陈培, 董晓娜, 等. 细胞分裂素对台湾牛樟腋芽增殖培养的影响[J]. 热带农业科学, 2018, 38(5): 39-42, 48.
- [30] 徐封丰. 外源6-苄基嘌呤、水杨酸对高温干旱复合胁迫下半夏植株抗逆性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [31] 王若梦, 董宽虎, 李钰莹, 等. 外源植物激素对NaCl胁迫下苦马豆苗期脯氨酸代谢的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 189-195.
- [32] 刘蕾. 浅析植物生长调节剂在现代农业上的应用[J]. 现代农村科技, 2020(3): 28.
- [33] 陈永顺. 不同激素处理对青钱柳种子萌发的影响[J]. 现代农业科技, 2016(14): 144-145, 149.
- [34] 葛娜, 杨玲, 陈军文. 不同浓度赤霉素和脱落酸对顽拗性三七种子后熟种胚发育和内源激素的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 574-581.
- [35] 李阳, 于锡宏, 蒋欣梅, 等. 不同温度层积处理对北五味子种子休眠过程中种胚后熟的影响[J]. 北方园艺, 2017(20): 140-144.
- [36] 陈庆亮, 王华磊, 王志芬, 等. 低温层积与外源 GA_3 对肉苁蓉种子萌发及其内源 GA 和 ABA 含量的影响[J]. 植物生理学通讯, 2009, 45(3): 270-272.
- [37] 朱红波, 杨军元, 王梓默, 等. NaOH处理打破紫椴种子休眠过程中内源激素的动态变化[J]. 防护林科技, 2020(11): 19-20.
- [38] 赵永华, 郭玉海, 贺春红. 生长调节剂对肉苁蓉寄主植物梭梭的矮化作用[J]. 医学理论与实践, 2010, 23(12): 1539-1540.
- [39] 冯雪, 李赫男, 肖凤艳. 植物生长调节物质对黄花乌头性状及产量影响的研究[J]. 吉林农业科技学院学报, 2011, 20(2): 7-10.
- [40] 曹爱农. 影响柴胡质量与产量的关键因素研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [41] 项好, 刘春生, 刘勇, 等. 脱落酸对甘草化学成分含量和颜色的影响[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(9): 1688-1692.
- [42] 张睿, 吴晓毅, 马宝伟, 等. 不同浓度脱落酸对雷公藤悬浮细胞蒴类次生代谢产物累积的影响[J]. 世界中医药, 2018, 13(2): 264-270.
- [43] 高强. 豆芽中多组分植物生长调节剂残留的质谱检测[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.

- [44] 潘颖南,张向军,庾韦花,等. 牛大力植株生长特性及化学去蓄研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29(3): 678-682.
- [45] 史骥清,李娟,赵锋,等. 乙烯利对铁皮石斛除蕾及其品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 228-229.
- [46] 张鹤华,薛进军,侯延杰,等. 乙烯利和萘乙酸输液滴干对核桃青皮开裂率及果实品质的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(6): 1058-1062.
- [47] 魏芳,陈庆敏,傅茂润,等. 脱皮方式对核桃青皮成分和功能活性的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(12): 259-265.
- [48] 李影,李从发,刘四新,等. 乙烯利对胡椒固态发酵脱皮的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 187-190, 242.
- [49] 宋伟丰,韦庆慧,刘凯,等. 天然植物生长调节剂芸苔素的生物活性及应用浅析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(24): 97-101.
- [50] 乔磊,胡峻,李妍芃,等. 油菜素内酯对甘草性状及7种化学成分含量的影响[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(2): 197-204.
- [51] 孙晓春,黄文静,李铂,等. 外源水杨酸对干旱胁迫下桔梗幼苗生理生化指标的影响[J]. 北方园艺, 2019(16): 121-125.
- [52] 赵洁. 水杨酸对远志生理生化及主要药效成分的影响[D]. 西安:西北大学, 2016.
- [53] 余霞霞. MeJA提高甘草种子萌发及幼苗耐盐性的机理研究[D]. 银川:宁夏医科大学, 2019.
- [54] 孙际薇. 茉莉酸甲酯对曼陀罗毛状根的生长及次生代谢产物产生的影响[D]. 重庆:西南大学, 2014.
- [55] 李琬,项洪涛,何宁,等. 烯效唑(S₃₃₀₇)提高作物抗逆性研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20): 101-106.
- [56] 郝舒蕊,赵志刚,侯俊玲,等. 植物生长延缓剂烯效唑对丹参植株形态及生物量分配的影响[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(10): 1925-1929.
- [57] 向君亮,黄玉兰,殷奎德,等. 烯效唑对干旱胁迫下薏苡抗氧化酶活性及DNA甲基化水平的影响[J]. 中国生物制品学杂志, 2017, 30(3): 264-270.
- [58] 王铎,田雨龙,张鸿建,等. 胺鲜酯对铬胁迫下白三叶种子萌发特性的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(10): 1986-1997.
- [59] 陆艳,吉高,王显国,等. 以胺鲜酯、黄腐酸、微肥为主要成分的苜蓿种衣剂配方的研究[J]. 草业科学, 2019, 36(8): 2168-2175.
- [60] 林毅雄,林河通,陈艺晖,等. 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 203-210.
- [61] 房海珍. 植物生长调节剂对蛹虫草生长发育的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [62] 张丽霞. 植物生长调节剂在中药材中的残留检测及对麦冬、三七质量的影响研究[D]. 北京:北京协和医学院, 2020.
- [63] 李龙进. 播种量及多效唑浸种对3个太子参品种(系)农艺性状与质量的影响[D]. 贵阳:贵州大学, 2018.
- [64] 陶玲,李红彦,陈华林,等. 基于药材性状、产量及有效成分含量综合评价多效唑对麦冬质量的影响[J]. 中药材, 2019, 42(10): 2231-2234.
- [65] 李小玲,华智锐,王怡. 油菜素内酯和吲哚乙酸对黄芩生长及品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(7): 121-125.
- [66] 邹海燕,刘丽芬,杨春洪,等. 外源施加生长素吲哚-3-乙酸对丹参根系形态和有效成分积累的影响[J]. 中草药, 2021, 52(10): 3097-3103.
- [67] 张以忠,卯光耀,吴巧,等. 遮荫条件下吲哚乙酸处理对半夏农艺性状及品质性状的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2018(10): 149-152.
- [68] 林秋霞,李敏,黄潇,等. 膨大素对川麦冬生长发育及其产量和质量的影响[J]. 华西药学杂志, 2015, 30(2): 207-209.
- [69] 胡国强,张学文,李旻辉,等. 植物生长调节剂缩节胺对黄芩活性成分含量的影响[J]. 中国中药杂志, 2012, 37(21): 3215-3218.
- [70] 刘佳铭,李雯婷,陈铭,等. 高效液相色谱-串联质谱法测定中药材麦冬中74种农药残留[J]. 分析试验室, 2020, 39(7): 826-833.
- [71] 田旭生,宋翠萍,张海洋,等. 乙烯利对子代雄鼠睾丸病理结构及生精细胞凋亡的影响[J]. 中华实用儿科临床杂志, 2019(10): 777-780.
- [72] 黄立利,张梦云,刘科亮,等. 2,4-二氯苯氧乙酸对幼龄SD大鼠肝毒性的研究[J]. 癌变·畸变·突变, 2021, 33(1): 22-27.
- [73] 国家卫生健康委员会,农业农村部,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量:GB 2763—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.

[责任编辑 顾雪竹]