

• 综述 •

# 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

张丽霞<sup>1,2</sup>, 牟燕<sup>1</sup>, 杨美华<sup>2</sup>, 俞静<sup>1</sup>, 唐德英<sup>1</sup>, 郭芳<sup>2</sup>, 顾哲<sup>2</sup>,  
罗祖良<sup>2\*</sup>, 马小军<sup>2\*</sup>

(1. 中国医学科学院 药用植物研究所 云南分所 西双版纳州傣药南药重点实验室, 云南 景洪 666100;

2. 中国医学科学院 北京协和医学院 药用植物研究所, 北京 100193)

**[摘要]** 植物生长调节剂是一类具有与植物激素相似生理活性的人工合成农药, 被广泛应用于粮食、蔬菜、水果、花卉等作物中, 已成为作物高产、稳产、优质、高效生产的重要技术保障。近年来, 植物生长调节剂在中药材生产中也广泛应用, 对于调控中药材生长发育、提高产量发挥了一定的作用, 但中药材不同于一般的作物, 使用植物生长调节剂不仅要考虑对中药材产量的影响, 还应特别注意对中药材有效性和安全性的影响。该文综述了植物生长调节剂在中药材中的应用情况、对中药材质量和安全性的影响、以及植物生长调节剂的残留限量标准和检测技术等, 以期今后科学使用植物生长调节剂, 促进中药材规范化种植, 保障中药用药安全提供科学依据。目前中药材生产中盲目使用滥用壮根灵、膨大素等植物生长调节剂现象普遍, 已导致一些中药材的质量显著下降, 同时造成对中药材和栽培环境的双重残留危害, 给人类健康造成严重安全隐患。今后应加强植物生长调节剂在中药材中的登记管理、使用规范和限量标准制定, 规范管理以肥代药规避农药登记等乱象, 为中药材质量及安全性监测提供依据。同时, 鼓励中药材生产中有针对性地减施或不施植物生长调节剂, 特别是对多有效成分的药材。提倡中药材进行有机种植或生态种植。

**[关键词]** 植物生长调节剂; 中药材; 质量影响; 安全性评价

## Application and safety evaluation of plant growth regulators in traditional Chinese medicine

ZHANG Li-xia<sup>1,2</sup>, MOU Yan<sup>1</sup>, YANG Mei-hua<sup>2</sup>, YU Jing<sup>1</sup>, TANG De-ying<sup>1</sup>, GUO Fang<sup>2</sup>, GU Zhe<sup>2</sup>,  
LUO Zu-liang<sup>2\*</sup>, MA Xiao-jun<sup>2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Dai and Southern Medicine in Xishuangbanna, Yunnan Branch Institute of Medicinal Plant Development,

Chinese Academy of Medical Sciences, Jinghong 666100, China; 2. Institute of Medicinal Plant Development,

Chinese Academy of Medical Sciences, Peking Union Medical College, Beijing 100193, China)

**[Abstract]** Plant growth regulator is a kind of synthetic pesticide with similar physiological activity to plant hormones. It has been widely used in grain, vegetables, fruits, flowers and other crops, and become an important technical guarantee for high yield, stable yield, high quality and efficient production of crops. In recent years, plant growth regulator is widely used in Chinese herbal medicine production for regulating the growth and development and increasing production of traditional. However the crop is different from general Chinese medicinal materials, the use of plant growth regulator should not only consider the effect of Chinese herbal medicine production, and also pay special attention to the influence of Chinese traditional medicine efficacy and safety. This paper reviewed the application of plant growth regulator in the traditional Chinese medicine, the impact on the quality and safety of Chinese medicinal materials, as

**[收稿日期]** 2019-11-05

**[基金项目]** 中国医学科学院医学与健康科技创新工程项目(2017-12M-1-013)

**[通信作者]** \* 罗祖良, E-mail: zulianguo@163.com; \* 马小军, 研究员, 博士生导师, E-mail: mayixuan10@163.com

**[作者简介]** 张丽霞, 研究员, E-mail: 87050233@qq.com

well as plant growth regulator of residue limits standards and testing technology , so as to the scientific use of plant growth regulator , to promote Chinese standardization planting , provide the scientific basis to protect the safety of herbal medicine. At present , the indiscriminate use and abuse of plant growth regulators such as Zhuanggenling and bulking element are common in the production of Chinese crude drugs , which has led to a significant decline in the quality of some Chinese crude drugs , and resulted in the dual residual harm to the Chinese crude drugs and the cultivation environment , causing serious safety risks to human health. In the future , it is necessary to strengthen the registration management , use norms and limit standards of plant growth regulators in traditional Chinese medicinal materials , and strengthen the supervision and regulations on the use of fertilizer instead of medicine to avoid pesticide registration and other disorders , so as to provide a basis for the quality and safety monitoring of traditional Chinese medicinal materials. Simultaneously , it is encouraged to reduction or non-application of plant growth regulators in the production of Chinese medicinal materials , especially for traditional Chinese medicine which contains a variety of active ingredients. Therefore , it is actively advocated to cultivate Chinese medicinal materials through organic or ecological method.

**[Key words]** plant growth regulator; traditional Chinese medicine; quality influence; safety evaluation

doi: 10.19540/j.cnki.cjmm.20200205.105

随着现代化农业科技的不断创新与发展 植物生长调节剂( plant growth regulator ,简写 PGR) 在全球范围内得到广泛应用 成为 21 世纪农业实现增产的重要措施之一。与传统农业技术相比 植物生长调节剂具有可调控植物基因表达 , 实现作物生长的人为调控等优势 , 在促进作物生长、提高产量和改善品质等方面发挥了巨大的作用。我国是世界上使用植物生长调节剂最广泛的国家之一 , 从大豆、水稻、玉米、小麦、棉花等大宗粮食作物 , 到各类蔬菜、水果、花卉等经济作物都广泛使用植物生长调节剂<sup>[1-3]</sup>。作为一种先进的化学调控技术 植物生长调节剂已成为作物高产、稳产、优质、高效生产的重要技术保障。

20 世纪 80 年代以来 植物生长调节剂开始应用于中药材栽培中 , 对于调控中药材生长发育、提高产量发挥了一定的作用 , 但中药材不同于一般的作物 , 使用植物生长调节剂不仅要考虑对中药材产量的影响 , 还应特别注意对中药材有效性和安全性的影响。本文综述了植物生长调节剂在中药材中的应用情况、对中药材质量和安全性的影响、以及植物生长调节剂的残留限量标准和检测技术等 , 以期期为科学使用植物生长调节剂 , 促进中药材规范化种植 , 保障中药用药安全提供科学依据。

## 1 植物生长调节剂概述

植物生长物质是植物体内的天然植物激素以及由人工合成的具有生理活性、对植物生长发育起调节控制作用的化合物的统称 , 包括植物激素和植物生长调节剂。植物激素又称为植物内源激素 , 是植物体内产生的一种化学物质 , 目前公认的植物激素包括生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、脱落酸、乙烯、芸苔素内酯类、茉莉酸类、水杨酸和独脚金内酯等。植物生长调节剂又称植物外源激素 , 是根据植物激素的结构、功能和作用原理 , 经人工提取、合成的能调节植物的生长发育和生理功能的化学物质<sup>[4]</sup>。

**1.1 植物生长调节剂的分类** 植物生长调节剂种类繁多 , 目前主要有 5 种不同的分类方法 , 如根据与植物激素作用的

相似性分类、根据生理功能分类、根据应用中产生的效果分类、根据来源分类、根据合成前体分类等<sup>[4]</sup> , 各种分类类型及主要功效见表 1。

**1.2 植物生长调节剂的登记** 植物生长调节剂作为农药进行管理 , 在使用前必须取得登记。根据中国农药信息网截止 2019 年 9 月登记数据显示<sup>[5]</sup> , 我国登记的植物生长调节剂类农药品种共有 1 079 个 , 涉及植物生长调节剂 57 种 , 是世界使用调节剂数量最多的国家之一。目前在中药材中登记的植物生长调节剂有赤霉素( 人参) , 吡啶乙酸( 三七) , 氯化胆碱( 山药) 等。在我国取得登记的植物生长调节剂中 , 以常规品种登记居多 , 如矮壮素有 36 个、赤霉酸有 146 个、多效唑有 96 个、复硝酚钠有 78 个、甲哌磺有 72 个、萘乙酸有 57 个、乙烯利有 123 个、芸苔素内酯有 81 个等。目前我国植物生长调节剂的登记产品数量正快速增长 , 但在多数中药材上的应用仍处于缺乏登记阶段。

## 2 植物生长调节剂在中药材中的应用

近年来 , 中药制药行业以每年超过 15% 的平均增速快速增长 , 药用资源的供给压力日益增加。随着中药材种植品种和种植面积不断扩大 , 植物生长调节剂开始频繁应用于中药材生产。植物生长调节剂能对中药材生长发育过程中不同阶段的生理过程( 如发芽、生根、开花、结果和休眠等) 进行调控 , 通过增加单株药材的生物量从而提高最终产量; 同时可调控中药材体内次生代谢过程 , 从而影响中药材有效活性成分的含量。例如 , 赤霉素可打破三七<sup>[6]</sup>、滇重楼<sup>[7]</sup>、黄连<sup>[8]</sup>、人参、西洋参<sup>[9]</sup> 等中药材种子的休眠 , 促进种子萌发 , 提高种子发芽率; 多效唑可抑制当归<sup>[10]</sup>、桔梗<sup>[11]</sup>、法菲亚<sup>[12]</sup>、甘草<sup>[13]</sup>、丹参<sup>[14]</sup>、麦冬<sup>[15-16]</sup> 等药材的地上部分生长 , 促进地下部分根茎生长 , 增加药材产量; 目前生产中许多根茎类药材如麦冬、泽泻、牛膝、党参、地黄、当归等普遍使用壮根灵类植物生长延缓剂( 主要成分为矮壮素) , 可快速促进根茎生长 , 提高药材产量达 20% ~ 200%<sup>[17]</sup> , 但生产中的盲目使用和滥用 , 导致一些中药材的

表1 PGR主要类型及分类

Table 1 Main types and classifications of PGR

分类方法	主要类型	种类举例	主要功效
根据与植物激素作用的相似性分类	生长素类物质	吲哚乙酸、吲哚丁酸、萘乙酸等	促进插枝生根,促进果实发育,诱导雌花分化和单性结实,延缓或促进器官脱落等
	赤霉素类物质	GA <sub>3</sub> , GA <sub>4</sub> +GA <sub>7</sub>	促进发芽,促进茎叶生长、茎秆生长、细胞伸长或分裂加速,诱导花芽形成,促进单性结实和坐果等
	细胞分裂素类物质	激动素、6-苄氨基嘌呤[6-苄氨基嘌呤(6-BA)]等	促进细胞分裂和增大,诱导花芽老化,延缓叶片衰老等
	脱落酸类物质	诱抗素	促进植物休眠,促进器官脱落,提高抗逆性,抑制植物胚芽鞘、嫩枝、根、胚轴的生长
	乙烯类物质	乙烯利	破解芽休眠,促进发芽与生根,抑制植物生长及矮化,促进果实发育,促进器官脱落等
	芸苔素内脂类物质	芸苔素内脂	调控植物生长发育,增强抗逆性等
根据生理功能分类	植物生长促进剂	生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、芸苔素内酯类等	促进植物营养器官的生长和生殖器官的发育
	植物生长抑制剂	马来酰肼、三碘苯甲酸、整形素等	阻碍顶端分生组织细胞的核酸和蛋白质的生物合成、抑制顶端分生组织细胞的伸长和分化
	植物生长延缓剂	三唑类化合物(如多效唑、烯效唑)、啉啉醇、丁酰肼(比久)、季铵类化合物(如矮壮素、甲哌鎗等)	抑制茎部亚顶端分生组织区的细胞分裂和扩大,但对顶端分生组织不产生作用
根据应用中产生的效果分类	矮化剂	矮壮素、多效唑、烯效唑、甲哌鎗等	控制株型,矮化植株
	生根剂	吲哚乙酸、萘乙酸、丁酰肼、脱落酸等	促进林木插条生长不定根
	保鲜剂	6-苄氨基嘌呤、2,4-D,1-甲基环丙烯等	防止果品和蔬菜衰老、贮藏保鲜
	抗旱剂	脱落酸、黄腐酸、水杨酸等	使气孔关闭、减少水分蒸发、增强植物抗性
	催熟剂	乙烯利、增甘磷	促进作物产品器官成熟
	脱叶剂	脱叶磷、乙烯利、脱叶脲	加速叶片脱落
	疏花疏果剂	二硝基甲酚、萘乙酸、萘乙酰胺、乙烯利	促进花蕾或幼果脱落
	增糖剂	增甘磷	增加糖分积累
	根据来源分类	天然或生物源调节剂	赤霉素、玉米素、脱落酸
	仿生或半合成调节剂	芸苔素内酯	
	化学合成调节剂	多效唑、矮壮素、甲哌鎗、独脚金内酯类似物(GR24)	
根据合成前体分类	氨基酸类	生长素类、乙烯、赤霉素类	
	多肽类	结瘤素、系统素	
	酯类	芸苔素内脂	
	异戊烯类	赤霉素类、脱落酸、细胞分裂素	

有效成分发生变化,同时造成对中药材和栽培环境的双重残留危害,给人类健康造成了严重的安全隐患。“壮根灵”类植物生长延缓剂的使用已成为中药材生产中出现问题最严重的一类植物生长调节剂<sup>[17]</sup>。植物生长调节剂在中药材中的应用见表2。

### 3 植物生长调节剂对中药材质量及安全性影响

**3.1 植物生长调节剂对中药材质量影响** 中药材活性成分含量的高低是判定其质量优劣的重要指标,部分植物生长调节剂会降低中药材有效成分含量,而生产中盲目、超范围、过量使用植物生长调节剂更易造成中药材有效成分的不达标和药材性状的改变。研究表明,7个不同产地党参施用壮根灵后,党参炔苷含量均明显下降<sup>[24]</sup>;多效唑可降低川麦冬总

皂苷的积累,且随剂量的增加,降低愈明显<sup>[25]</sup>;矮壮素会使黄芩地下部分黄酮类成分的含量显著下降<sup>[26]</sup>;金银花开花前喷施矮壮素、缩节胺和多效唑会明显降低其幼蕾期、三青期、二白期花蕾中绿原酸和总黄酮的含量<sup>[27]</sup>。

同时有研究表明,植物生长调节剂对中药材有效成分积累也有促进作用。如喷施 300 mg·L<sup>-1</sup>赤霉素能显著提高金银花活性成分绿原酸、木犀草素、木犀草苷、异槲皮素和咖啡酸的含量<sup>[28]</sup>;蒙古黄芪愈伤组织培养基中加入 0.02 μmol·L<sup>-1</sup>茉莉酸甲酯(MeJA)后显著提高黄酮积累<sup>[29]</sup>;桔梗在开花盛期和第2年生长旺盛期叶面喷施多效唑,可显著提高其总皂苷含量<sup>[30]</sup>;银杏在生长旺盛期喷施 1 000, 2 000 mg·L<sup>-1</sup>矮壮素,可显著提高其叶片中的银杏内脂 A、银杏内脂 B、白果内

表 2 植物生长调节剂在中药材中的应用<sup>[4,9,18-23]</sup>

Table 2 Application of plant growth regulator in Chinese medicinal materials

应用目的	PGR 种类	中药材应用	
打破种子休眠,促进种子萌发, 提高种子发芽率	赤霉素(GA <sub>3</sub> )	人参、西洋参、北五味子、柴胡、党参、滇重楼、三七、黄连、杜仲、北细辛、元胡、藁香、麦冬、绞股兰、山茱萸、香附子、粉绿铁线莲、野罂粟、香茅、黄瑞香、苦豆子、罗勒、降香黄檀等	
	6-苄氨基嘌呤(6-BA)	知母、降香黄檀、绞股兰	
	萘乙酸(NAA)	决明、绞股兰	
	吲哚丁酸(IBA)	罗勒	
	6-糠氨基嘌呤(6-KT)	滇重楼	
	1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)	滇重楼	
	赤霉素(GA <sub>3</sub> ) + 生根粉(ABT)	高山红景天	
促进扦插生根,提高繁殖速度	萘乙酸(NAA)	钩藤、地石榴、凉粉草、麝香百合、牛至、巴戟天、肉豆蔻	
	吲哚丁酸(IBA)	银杏、金银花、凉粉草、三叶木通、巴戟天	
	吲哚乙酸(IAA)	白木香、地石榴、凉粉草	
	生根粉(ABT)	钩藤、银杏、凉粉草、绞股兰	
	多效唑(PP <sub>333</sub> )	金缨子	
	三十烷醇(TRIA)	巴戟天	
	2,4-滴(2,4-D)	吴茱萸、肉豆蔻	
萘乙酸(NAA) + 吲哚丁酸(IBA)	五味子		
	萘乙酸(NAA) + KT + 吲哚丁酸(IBA)	滇桂艾纳香	
促进幼苗生长,提高移栽成活率	赤霉素(GA <sub>3</sub> )	宁夏枸杞、石椒草	
	萘乙酸(NAA)	决明	
	6-苄氨基嘌呤(6-BA)	降香黄檀	
	生根粉(ABT)	苦参	
	三十烷醇(TRIA)	槟榔	
调控生长发育,提高根类、花类和果实类的产量	多效唑(PP <sub>333</sub> )	麦冬、当归、桔梗、辽藁本、法菲亚、甘草、党参、丹参、泽泻、杭白菊、金银花、款冬花、地黄、黄乌头、西洋参	
	矮壮素(CCC)	山药、半夏、款冬花、黄乌头、淮山药、当归、毛脉酸模	
	赤霉素(GA <sub>3</sub> )	益母草、川白芷、蔓性千斤拔、番红花、黄花菜、补骨脂、贝母	
	三十烷醇(TRIA)	元胡、补骨脂、人参	
	烯效唑(S-3307D)	川泽泻、丹参	
	低聚壳聚糖	黄芪	
	氯化胆碱(CC)	西洋参	
	乙烯利(CEPA)	款冬花	
	6-苄氨基嘌呤(6-BA)	黄花菜、拟巫山淫羊藿	
	丁酰肼(B9)	人参、伊贝母	
	氯化胆碱(CC)	地黄(抗旱)	
	调控性别分化	乙烯合成抑制剂(AVG)	苎麻
		6-苄氨基嘌呤(6-BA)	大麻
		赤霉素(GA <sub>3</sub> )	蓖麻、银杏
		乙烯利(CEPA)	银杏
		吲哚乙酸(IAA)	大麻
		萘乙酸(NAA)	番木瓜
整形素		番木瓜	

续表2

应用目的	PGR 种类	中药材应用
提高抗性	外源玉米赤霉烯酮( ZEN)	大麻
	多效唑( PP <sub>333</sub> ) + 6-苄氨基嘌呤( 6-BA)	山茱萸( 抗寒)
	茉莉酸甲酯( MeJA)	人参( 抗锈腐病)
	水杨酸( SA)	狭叶红景天( 抗寒)
	氯化胆碱( CC)	地黄( 抗旱)
	烯效唑( S3307)	薏苡( 抗寒)
调控次生代谢物积累	茉莉酸甲酯( MeJA)	红豆杉、党参、丹参、甘草、罗汉果、茯苓、青蒿、牛膝、甘西鼠尾草、阳春砂、薄荷、蒙古黄芪
	矮壮素( CCC)	黄花蒿、银杏、贯叶连翘
	多效唑( PP <sub>333</sub> )	辽蒿本、桔梗
	赤霉素( GA <sub>3</sub> )	远志、金钗石斛
	缩节胺( PIX)	金银花
	低聚壳聚糖	丹参、黄芪
	氯吡脞( CPPU)	紫苏
	芸苔素内酯	黄花蒿

脂和总萜内脂含量<sup>[31]</sup>；金钗石斛用 0.5、1.5 mg·L<sup>-1</sup>的赤霉素浸根 2 h 后种植，不仅使石斛总生物碱含量显著增加，还能提高其可溶性总糖的含量<sup>[32]</sup>；芸苔素内酯处理黄花蒿 4 d 后青蒿素含量提升 1 倍多<sup>[33]</sup>；高浓度的脱落酸( ABA) 可显著提高甘草中甘草酸和甘草苷的含量<sup>[34]</sup>。

更多的植物生长调节剂对中药材的有效成分积累表现出一定的浓度效应，即低浓度时表现促进作用而高浓度时则表现出抑制效应。如多效唑质量浓度为 100~300 mg·L<sup>-1</sup>时，有助于辽藁本挥发油的积累，但质量浓度为 400 mg·L<sup>-1</sup>时，其挥发油含量会显著降低<sup>[35]</sup>；喷施低质量浓度 50 mg·L<sup>-1</sup>的矮壮素会使贯叶连翘中的金丝桃素含量随着生长持续增高，但高质量浓度 500 mg·L<sup>-1</sup>却会使其金丝桃素含量随着生长先增加后降低<sup>[36]</sup>等。常见植物生长调节剂对中药材有效成分的变化影响见表 3。

综上所述，植物生长调节剂对中药材的有效成分既有抑制也有促进积累的作用，如抑制有效成分的积累，则药材质量会达不到药典标准，导致临床使用效果不显著或无效。另外大部分中药材含有多种药用活性成分，这些成分之间的比值可能对其药效的发挥起着关键的作用，还需要特别注意植物生长调节剂对中药材不同药用活性成分之间变化的影响。因此，植物生长调节剂在中药材种植中一定不能盲目使用，必须通过系统的科学试验，明确植物生长调节剂对中药材有效成分含量的变化影响，才能针对性使用，对于会降低中药材质量的植物生长调节剂则严禁使用。

**3.2 植物生长调节剂对中药材安全性影响** 植物生长调节剂对中药材安全性的影响主要体现在植物生长调节剂在中药材中的残留危害及对栽培环境的污染上。植物生长调节剂进入植物体后会逐渐代谢降解，药效逐渐消失，其残留量

表 3 PGR 对中药材有效成分变化的影响

Table 3 Effects of PGR on the changes of active components of Chinese medicinal materials

药材名称	PGR	有效成分	参考文献
党参	壮根灵	党参炔苷 <sup>2)</sup>	[24]
麦冬	多效唑	总皂苷 <sup>2)</sup>	[25]
黄芩	矮壮素	黄酮类 <sup>2)</sup> 、木素类 <sup>1)</sup>	[26]
	赤霉素	黄酮类、木素类 <sup>3)</sup>	[26]
金银花	缩节胺	黄酮类、黄芩苷 <sup>1)</sup> 、黄芩素、汉黄芩素 <sup>2)</sup>	[37]
	多效唑	绿原酸、总黄酮 <sup>2)</sup>	[27]
蒙古黄芪	矮壮素	绿原酸、总黄酮 <sup>2)</sup>	[27]
	缩节胺	绿原酸、总黄酮 <sup>2)</sup>	[27]
桔梗	茉莉酸甲酯	黄酮 <sup>1)</sup>	[29]
银杏	多效唑	总皂苷 <sup>1)</sup>	[30]
金钗石斛	矮壮素	银杏内酯 A、银杏内酯 B、白果内酯和总萜内酯 <sup>1)</sup>	[31]
	赤霉素	总生物碱、可溶性总糖 <sup>1)</sup>	[32]
青蒿	芸苔素内酯	青蒿素 <sup>1)</sup>	[33]
甘草	脱落酸	甘草酸、甘草苷 <sup>1)</sup>	[34]
辽藁本	多效唑( 低)	挥发油 <sup>1)</sup>	[35]
	多效唑( 高)	挥发油 <sup>2)</sup>	[35]
贯叶连翘	矮壮素( 低)	金丝桃素 <sup>1)</sup>	[36]
	矮壮素( 高)	金丝桃素 <sup>2)</sup>	[36]
泽泻	烯效唑	泽泻醇 <sup>1)</sup>	[38]
柴胡	矮壮素	皂苷 <sup>1)</sup>	[39]
川白芷	赤霉素( 低)	欧前胡素、异欧前胡素 <sup>3)</sup>	[40]
	赤霉素( 高)	欧前胡素、异欧前胡素 <sup>2)</sup>	[40]

注：<sup>1)</sup> 成分升高；<sup>2)</sup> 成分降低；<sup>3)</sup> 成分无显著变化。

与药剂的使用量、药物的降解速度有关，通常的残留时间是几天或数十天，因药剂不同而异，如乙烯利的残留时间仅几

天,而丁酰肼(比久)的残留时间长达约1年。丁酰肼因怀疑其存在致癌、致畸、致突变毒性“三致效应”,部分国家已禁用,我国仅允许在观赏菊花上使用<sup>[41]</sup>,但目前仍有大量的中药材中会检出丁酰肼<sup>[41]</sup>。复硝酚钠的商品名为“爱多收”,是含有多种硝基苯酚钠盐(2-硝基苯酚钠、4-硝基苯酚钠、5-硝基愈创木酚钠等)的复合型植物生长调节剂,具有致癌、致畸、致突变毒性,2002年农业部235号公告将其列为“在动物性食品中不得检出的药物”。本课题组对34种480批次中药材的残留检测,复硝酚钠的检测率高达73.75%<sup>[42]</sup>;魏赫等对8种63批次根茎类药材的检测结果,4-硝基苯酚钠的检出率也高达50%,其中党参、白术和丹参几乎全部检出<sup>[41]</sup>。多效唑是我国应用面积最大的植物生长调节剂,已有研究表明,高浓度的多效唑会导致肝脏损伤、降低妊娠率<sup>[43]</sup>,也有研究发现多效唑经假单胞菌作用96h后,降解产物具有致突变性<sup>[44]</sup>,而且多效唑施用后在土壤中的残留可长达3年以上<sup>[45]</sup>,土壤表层的多效唑残留有明显的二次调控作用<sup>[46]</sup>,甚至能影响第三茬作物的生长<sup>[47]</sup>。多效唑被普遍应用于川麦冬、丹参、白芍、牛膝等中药材种植中,其中麦冬使用最为严重。课题组通过对多批次川麦冬样品进

行检测,多效唑的检出率为100%,且残留量较高,部分样品检出高于我国农产品规定残留限量(最大残留限量 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的2~3倍<sup>[42]</sup>。2,4-D高浓度是广谱的除草剂,低浓度可作植物生长调节剂,质量浓度在每升几十毫克以上对棉花、瓜类、葡萄等作物就会造成灾害性后果<sup>[41]</sup>。2,4-D被国际癌症研究机构列为“可能对人类致癌”(2B组)的化合物<sup>[48]</sup>,流行病学研究表明,接触2,4-D可能会增加患非霍奇金淋巴瘤、霍奇金氏病、白血病和软组织肉瘤的风险<sup>[49]</sup>。本课题组对34种480批次中药材的残留检测结果,2,4-D在当归和川芎根部的检出率达100%,且残留浓度较高。以上研究表明,部分植物生长调节剂在中药材中的盲目使用,已对人类健康造成严重的安全隐患。

#### 4 植物生长调节剂的残留限量标准和检测技术

**4.1 残留限量标准** 我国国家卫生健康委、农业农村部及国家市场监督管理总局联合发布的GB 2763-2019版《食品中农药最大残留限量》<sup>[50]</sup>对其中20种植物生长调节剂在不同食品中的最大残留限量作了规定,其中2,4-D/2,4-D钠盐,国标中将其归类为除草剂,但因其本身在实际中一直也作为植物生长调节剂使用,见表4。

表4 国内常用PRG限量标准

Table 4 PRG limit standards commonly used in China

No.	PRG名称	规定的农产品	最大残留限量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
1	矮壮素	谷物、油料和油脂、蔬菜、哺乳动物肉类、哺乳动物内脏、禽肉类、禽肉内脏、蛋类、生乳 9 大类 33 小类	0.04~10
2	胺鲜脂	谷物、油料和油脂、蔬菜 3 大类 6 小类	0.05~0.2
3	单氰胺	水果 1 大类 1 小类	0.05
4	丁酰肼	油料和油脂 1 大类 1 小类	0.05
5	多效唑	谷物、油料和油脂、蔬菜、水果 4 大类 10 小类	0.05~0.5
6	氟节胺	油料和油脂 1 大类 1 小类	1
7	复硝酚钠	谷物、油料和油脂、蔬菜、水果 4 大类 7 小类	0.10~0.2
8	甲哌鎓	谷物、油料和油脂、蔬菜、3 大类 5 小类	0.05~5
9	抗倒酯	谷物、油料和油脂、糖类 3 大类 6 小类	0.05~3
10	氯苯胺灵	蔬菜、哺乳动物肉类、哺乳动物内脏、生乳、乳脂肪 5 大类 5 小类	0.01~30
11	氯吡啶	蔬菜、水果 2 大类 7 小类	0.05~0.1
12	萘乙酸/萘乙酸钠	谷物、油料和油脂、蔬菜、水果 4 大类 20 小类	0.05~0.1
13	噻苯隆	油料和油脂、蔬菜 2 大类 5 小类	0.05~0.1
14	噻节因	油料和油脂、蔬菜、哺乳动物肉类、哺乳动物内脏、禽肉类、禽肉内脏、蛋类、生乳 8 大类 12 小类	0.05~1
15	四氯硝基苯	蔬菜 1 大类 1 小类	20
16	调环酸钙	谷物 1 大类 2 小类	0.05
17	烯效唑	谷物、油料和油脂 2 大类 4 小类	0.05~0.1
18	乙烯利	谷物、油料和油脂、蔬菜、水果、干制水果、坚果、调味料 7 大类 24 小类	0.2~50
19	抑芽丹	蔬菜 1 大类 4 小类	15~20
20	2,4-D	谷物、油料和油脂、水果、坚果、糖类、食用菌、哺乳动物肉类、哺乳动物内脏、禽肉类、禽肉内脏、蛋类、生乳 12 大类 33 小类	0.01~5

在我国已登记的57种植物生长调节剂中,有20种已制定限量标准,11种因不存在安全风险,按照国际惯例,不需要制定残留标准,其他26种植物生长调节剂的标准还有待进

一步研究制定。20种植物生长调节剂的限量标准大多集中在谷物、油料和油脂、蔬菜和水果等几大类植物源农产品,但在2019版的《食品中农药最大残留限量》中,2,4-D/2,4-D

钠盐、矮壮素、氯苯铵灵、噻节因 4 种植物生长调节剂开始新增规定了在哺乳动物肉类(内脏类)、禽肉类(内脏类)、蛋类、生乳类等动物源食品的限量标准,但是遗憾的是针对中药材,目前尚未建立任何限量标准。鉴于中药材生产中日益凸显的植物生长调节剂残留危害和安全性隐患,植物生长调节剂在中药材中的限量标准制定迫在眉睫。

**4.2 残留检测技术** 为避免植物生长调节剂残留对人体造成的健康隐患,打破发达国家和地区对我国出口农产品中植物生长调节剂残留的贸易技术壁垒,残留检测技术的研究和提高是非常重要的。目前,常用于植物生长调节剂检测的方法主要有酶联免疫吸附试验(ELISA)<sup>[51-52]</sup>、气相色谱分析(GC)<sup>[53-54]</sup>、高效液相色谱(HPLC)<sup>[55]</sup>、气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)<sup>[56-57]</sup>和液相色谱-串联质谱联用技术(LC-MS/MS)<sup>[58-61]</sup>。其中,ELISA 易受外界条件影响,GC 对较难气化或易分解的 PGR 应用受限,而 HPLC 虽然操作相对简单但灵敏度相对较低,为了更加高效地进行植物生长调节剂等有机分子的定性定量分析,在实际应用中通常会结合色谱的定量优势和质谱的定性优势。近年来,基于色谱-质谱联用的方法由于其高灵敏度和高准确度已经成为植物生长调节剂检测的主流方法<sup>[62-63]</sup>。

利用色谱-质谱技术可以实现多种植物生长调节剂的快速定量分析,该方法已应用于中药材中植物生长调节剂的残留检测,如魏赫等利用超高效液相色谱-串联质谱法(UP-LC-MS/MS)同时测定了当归、党参、白术等中药材中 23 种植物生长调节剂残留量<sup>[41]</sup>,赵祥生等利用该法测定了麦冬及其土壤样品中 11 种植物生长调节剂的残留<sup>[64]</sup>;翟宇瑶等运用高效液相色谱-串联质谱法(HPLC-MS/MS)测定了根茎类药材中多效唑、丁酰肼、矮壮素和缩节胺 4 种植物生长延缓剂的残留量<sup>[65]</sup>;本课题组建立了采用高效液相色谱-串联质谱联用(HPLC-MS/MS)同时测定中药材中 24 种植物生长调节剂和 11 种常用杀虫杀菌剂的方法<sup>[42]</sup>。该方法基于多种植物生长调节剂和杀虫、杀菌剂等农残一起分析检测,相比 GC-MS、LC-MS/MS 具有目标范围更广、灵敏度更高、选择性更好的优点。以上检测方法的研究为植物生长调节剂在中药材上残留的快速分析和限量标准制定提供了重要参考。

除上述检测方法外,近年来也有研究对其他检测方法在植物生长调节剂中的应用进行了探索。例如,基于高分辨质谱和聚类分析的代谢组学方法也开始应用于植物生长调节剂测定,用于同时测定植物体内植物激素的游离态、结合态及植物激素衍生物,并解析与其他植物激素间的相互作用。毛细管电泳和化学发光等方法亦被用于植物生长调节剂的测定,但目前可以实现的灵敏度一般在微克级,离植物生长调节剂检测的实际要求还有一定差距。此外,集成了单细胞毛细管电泳、纳米技术和原子力显微镜等多种先进方法的单细胞分析技术,能对特定细胞中的代谢物进行分析和动态监测。这些新技术的探索为建立植物生长调节剂的测定新方

法提供了新的思路。

## 5 展望

近年来,植物生长调节剂在中药材种植中已广泛应用,它在促进中药材生长发育和提高产量方面发挥了一定的作用,但是植物生长调节剂使用过量或不当可能给中药材的安全性和有效性造成严重损害,也会对产区土壤、水体产生不良影响。研究人员应就植物生长调节剂对人体有害作用量、作用机制以及环境释放的危害性等方面开展相关研究。对于有效成分单一的药材相对简单,例如研究发现,芸苔素内酯可通过促进青蒿素生物合成关键酶基因的表达使青蒿素含量提升 1 倍以上<sup>[33]</sup>。但对于多有效成分的品种,植物生长调节剂的使用可能改变各成分的比例,从而影响疗效,此类药材在生产中应慎用植物生长调节剂。同一植物生长调节剂在不同药材中可能产生不同效果,如多效唑在桔梗中可同时提高产量和有效成分总皂苷含量<sup>[30]</sup>;而在麦冬中虽可增产,却使麦冬总皂苷显著下降<sup>[25]</sup>。因此,植物生长调节剂在中药材中并没有通用的方法,需要一个药材、一个 PGR 地进行系统研究,为制订各种中药材合理使用 PGR 的技术规程提供科学依据。

植物生长调节剂滥用和过度使用问题已引起业界高度关注,《中药材生产质量管理规范》(中药材 GAP)明确规定,禁用壮根灵、膨大素等生长调节剂调节收获器官生长。但是在市场上,含 PGR 成分的壮根灵等农用化学品常以农肥形式销售而不加标注,亟待监管部门拿出应对办法。目前还没有对中药材 PGR 残留专门的限量标准,应参照农作物相关标准,制定中药材 PGR 限量标准。同时,应鼓励生产中有针对性地减施或不施植物生长调节剂,特别是多有效成分中药材。提倡中药材有机种植或生态种植。

## [参考文献]

- [1] 苏明明,杨春光,李一尘,等.植物生长调节剂对粮食作物、瓜果的影响及其残毒研究综述[J].食品安全质量检测学报,2014,5(8):2575.
- [2] 史晓梅,金芬,黄玉婷,等.水果中常用植物生长调节剂的研究进展[J].食品工业科技,2012,33(4):417.
- [3] 徐爱东.我国蔬菜中常用植物生长调节剂的毒性及残留问题研究进展[J].中国蔬菜,2009(8):1.
- [4] 李玲,肖浪涛,谭伟明.现代植物生长调节剂技术手册[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [5] 中华人民共和国农业部农药检定所.中国农药信息网[EB/OL].[2019-11-05].http://www.icama.org.cn/hysj/index.jhtml.
- [6] 崔秀明.植物激素及生长调节剂对三七种子的效应[J].栽培,1994,17(2):3.
- [7] 徐文娟.滇重楼种子发育与种子休眠解除机理研究[D].北京:北京协和医学院,2013.
- [8] 蒋德勋.赤霉素对黄连种子萌发及植株生长的影响[J].植物生理学通讯,1982(11):21.
- [9] 田长恩.植物生长调节剂在中药材生产中的应用[J].时珍国

- 医研究, 1993, 4(3): 34.
- [10] 田长恩, 刘金龙, 周光来. pp333 在一年生当归上应用的初步研究[J]. 中草药, 1996, 27(11): 684.
- [11] 张小斌. 摘蕾打顶与多效唑处理对桔梗生长性状及总皂苷含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4558.
- [12] 凌征柱, 赵维合, 覃文流, 等. 多效唑对珙菲亚基部节间生长及干物质积累的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2010, 24(3): 11.
- [13] 谢建军, 蔺海明, 王瑞芳, 等. 五种植物生长调节剂对甘草生长的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(3): 85.
- [14] 李先恩, 张晓阳. 植物生长调节剂对丹参药材产量和品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(11): 1992.
- [15] 余翠翠, 王晖, 隋春, 等. 四川三台麦冬产区生长调节剂使用情况调研及残留研究[J]. 中国现代中药, 2019, 21(12): 1669.
- [16] 林秋霞, 李敏, 周海玉, 等. 植物生长调节剂对川麦冬总皂苷和总多糖含量的影响研究[J]. 中国现代中药, 2014, 16(5): 399.
- [17] 翟宇瑶, 郭宝林, 黄文华, 等. “壮根灵”类药剂检测及植物生长延缓剂在根及根茎类地道药材栽培中使用情况调查[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(3): 414.
- [18] 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.
- [19] 翟宇瑶, 郭宝林, 程明. 植物生长延缓剂在药用植物栽培中的应用[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(17): 2739.
- [20] 祁春苗. 氯化胆碱对地黄耐旱性的诱导效应[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.
- [21] 黄玉兰, 赵蕊, 向君亮, 等. 外源烯效唑对低温胁迫下蕙苡幼苗的缓解效应的研究[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(11): 2213.
- [22] 田景, 金华, 姜志海, 等. 植物生长调节剂及氮素处理对拟巫山淫羊藿采后再萌发的影响[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(11): 2236.
- [23] 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.
- [24] 李成义, 魏学明, 李硕, 等. 植物生长调节剂壮根灵对党参药材中党参块苷含量的影响[J]. 北京中医药大学学报, 2011, 34(11): 766.
- [25] 占妮, 陶诗顺. 多效唑处理对麦冬有效成分的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(1): 52.
- [26] 蔡葛平, 郭燕红, 姚辉, 等. 矮壮素和赤霉素对黄芩生物量及根中黄酮类成分产量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 213.
- [27] 韩树, 常蓬勃, 张云, 等. 几种植物生长调节剂对金银花产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8): 3469.
- [28] 朱艳霞, 秦双双, 蒋超, 等. GA<sub>3</sub>和 DPC 对金银花活性成分的影响及其作用机制研究[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(24): 4817.
- [29] 刘雅静, 邢菊展, 张宇婷, 等. 茉莉酸甲酯、蔗糖和氮源对蒙古黄芪愈伤组织生长和黄酮含量的影响[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2012, 43(1): 65.
- [30] 张小斌. 摘蕾打顶与多效唑处理对桔梗生长性状及总皂苷含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4558.
- [31] 许锋, 张威威, 孙楠楠, 等. 矮壮素和对银杏叶片光合代谢与萜内酯生物合成[J]. 园艺学, 2011, 38(12): 2253.
- [32] 陈仕江, 张明, 李泉森, 等. 植物生长调节剂对金钗石斛药用化学成分的影响[J]. 重庆中草药研究, 2001, 32(1): 884.
- [33] 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.
- [34] 项婷, 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.
- [35] 武晓林, 赵伟, 王大伟, 等. 不同浓度多效唑对辽藁本生长、产量和挥发油含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17837.
- [36] 姜波, 叶节, 周章章, 等. 矮壮素对贯叶连翘生长和金丝桃素含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(28): 15636.
- [37] 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.
- [38] 廖强, 杨文钰, 陈兴福, 等. 烯效唑对川泽泻产量及主要药用成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(24): 2901.
- [39] 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.
- [40] 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): 2081.
- [41] 魏赫, 金红宇, 王莹, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定中药材中 23 种植物生长调节剂残留量[J]. 中草药, 2017, 48(8): 1653.
- [42] LUO Z L, ZHANG L X, MOU Y, et al. Multi-residue analysis of plant growth regulators and pesticides in traditional Chinese medicines by high-performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry[J]. Anal Bioanal Chem, 2019, 411: 2447.
- [43] 茅积余, 李惠君, 夏月娥, 等. 多效唑毒性研究——大鼠 90 天喂养与繁殖[J]. 浙江化工, 1990, 21(2): 4.
- [44] 刘征涛, 周风帆, 马文漪. 生长调节剂多效唑代谢产物的致突变研究[J]. 癌变·畸变·突变, 1993, 5(6): 39.
- [45] 曹尚银. 果树组织及土壤中 PP(333) 残留量的毛细管气相色谱测定法[J]. 植物生理学报, 1989(4): 50.
- [46] 陶龙兴, 王熹, 俞美玉. 烯效唑和多效唑在土壤中的残留的比较研究[J]. 农药, 1995, 34(3): 19.
- [47] 于凤义, 张萍扬. C-PP333 在土壤及作物中的残留[J]. 核农学报, 1996, 10(3): 173.
- [48] GUHA N, ROOS A D, KOGEVINAS M, et al. O04-3 IARC working group meta-analysis of 2,4-D exposure and the risk of NHL[J]. Occup Environ Med, 2016, 73(Suppl1): A8.
- [49] VON S K A. Systematic review of carcinogenic outcomes and potential mechanisms from exposure to 2,4-D and MCPA in the environment[J]. J Toxicol, 2013, 2013(1): 371610.
- [50] GB2763-2019. 食品安全国家标准 食品中农药最大残留量限量[S]. 2019.
- [51] QIAN G, WANG L, WU Y, et al. A monoclonal antibody-based sensitive enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) for the

- analysis of the organophosphorous pesticides chlorpyrifos-methyl in real samples [J]. *Food Chem* 2009, 117(2): 364.
- [52] JIANG X X, SHI H Y, WU N. Development of an enzyme-linked immunosorbent assay for diniconazole in agricultural samples [J]. *Food Chem* 2011, 125(4): 138.
- [53] BRINKMAN J H W, DIJK A G V, WAGENAAR R, et al. Determination of daminozide residues in apples using gas chromatography with nitrogen-phosphorus detection [J]. *J Chromatogr A*, 1996, 723(2): 355.
- [54] XU R, WU J, LIU Y, et al. Analysis of pesticide residues using the quick easy cheap effective rugged and safe (QuEChERS) pesticide multiresidue method in traditional Chinese medicine by gas chromatography with electron capture detection [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(7): 908.
- [55] DAS A K, PRASAD K. Extraction of plant growth regulators present in *Kappaphycus alvarezii* sap using imidazolium based ionic liquids; detection and quantification by using HPLC-DAD technique [J]. *Anal Methods*, 2015, 7(21): 9064.
- [56] MULLER A, DUCHTING P, WEILER E W. A multiplex GC-MS/MS technique for the sensitive and quantitative single-run analysis of acidic phytohormones and related compounds, and its application to *Arabidopsis thaliana* [J]. *Planta*, 2002, 216(1): 44.
- [57] DU G, SONG Y, WANG Y. Rapid simultaneous determination of multiple pesticide residues in traditional Chinese medicines using programmed temperature vaporizer injection-fast gas chromatography coupled with mass spectrometry [J]. *J Sep Sci*, 2015, 34(23): 3372.
- [58] RIEDIKER S, OBRIST H, VARGA N, et al. Determination of chlormequat and mepiquat in pear, tomato, and wheat flour using on-line solid-phase extraction (Prospekt) coupled with liquid chromatography-electro spray ionization tandem mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A* 2002, 966(1): 15.
- [59] MA L, ZHANG H, XU W, et al. Simultaneous determination of 15 plant growth regulators in bean sprout and tomato with liquid chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry [J]. *Food Anal Methods*, 2013, 6(3): 941.
- [60] KIM K G, PARK D W, KANG G R, et al. Simultaneous determination of plant growth regulator and pesticides in bean sprouts by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2016, 208(7): 239.
- [61] 吕盼, 张飞, 侯俊杰, 等. GC-MS/MS 检测陈皮药材中 179 种农药残留 [J]. *中国实验方剂学杂志* 2018, 24(16): 34.
- [62] 罗君, 赵琳璐, 包江平, 等. UPLC-Q-TOF-MS 分析苗族药红花龙胆化学成分 [J]. *中国实验方剂学杂志* 2018, 24(24): 89.
- [63] 谢艳香, 姜二岗, 戴天明, 等. LC-MS/MS 同时测定鸡矢藤提取物中 4 个主要有效成分的含量 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2018, 24(18): 57.
- [64] ZHAO X S, MOU Y, YANG M H. A simple multi-residue method for determination of plant growth retardants in *Ophiopogon japonicus*, and soil using ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Chemosphere*, 2018, 8(1): 329.
- [65] 翟宇瑶, 郭宝林. 高效液相色谱-串联质谱测定 4 种植物生长延缓剂在 6 种根及根茎类药材中残留量 [J]. *中国中药杂志*, 2017, 42(11): 2110.
- [66] 赵敏, 邵凤赞, 周淑新, 等. 植物生长调节剂对农作物和环境的安全性 [J]. *环境与健康杂志* 2007, 24(5): 370.

[责任编辑 吕冬梅]