

◆ 综述与进展 ◆

矮壮素在农业生产中应用及残留现状

陈思琪¹, 梁 曼^{2,3}, 王晓玉², 卞艳丽², 李 莉^{3*}, 梁 林^{2*}

(1. 农业农村部农药检定所, 北京 100125 2. 山东省农药科学研究院, 济南 250033 3. 山西农业大学植物保护学院, 太原 030031)

摘要:矮壮素作为我国农业上广泛使用的植物生长调节剂,原药毒性为中等毒。文章综述了近年来矮壮素在农业生产中的应用情况及存在问题,重点论述了矮壮素在作物中的残留检测方法和残留行为的研究进展,梳理了矮壮素的登记及残留现状,并对矮壮素的安全使用及推广应用提供建议,为进一步研究矮壮素的残留归趋及开展风险评估提供参考。

关键词:矮壮素;植物生长调节剂;残留检测;残留归趋

中图分类号:S 481.8 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2025.05.002

Application and residue status of chlormequat in agricultural production

CHEN Siqi¹, LIANG Man^{2,3}, WANG Xiaoyu², BIAN Yanli², LI Li^{3*}, LIANG Lin^{2*}

(1. Institute for the Control of Agrochemicals, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 2. Shandong Academy of Pesticide Sciences, Jinan 250033, China; 3. College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Chlormequat, widely used as a plant growth regulator (PRG) in Chinese agriculture, has moderate toxicity. In this paper, the application and existing problems of chlormequat in agricultural production in recent years were reviewed, the research progress on residue detection methods and residual behavior of chlormequat in crops were discussed, the registration and residual status of chlormequat were sorted out, and suggestions on the safe use and popularization of chlormequat were provided. The review could provide references for further research on the residual tendency and the risk assessment of chlormequat.

Key words: chlormequat; plant growth regulator; residue detection; residual tendency

植物生长调节剂(plant growth regulators, PRGs)是指从微生物中提取或人工模仿植物激素化学结构合成的具有植物激素活性的物质^[1]。这类物质能够通过调控细胞分裂与分化等生理过程,或间接作用于花器官发育及果实脱落等生殖过程,从而有效调节作物的产量和品质^[2]。根据其生理效应和作用机制,主要可分为植物生长促进剂、生长抑制剂和生长延缓剂三大类^[3]。植物生长调节剂的应用范围广,显著影响粮食作物、蔬菜、水果和中药材等的生长发育,已成为农业生产中一项重要的技术手段^[4]。

目前,我国登记的植物生长调节剂产品多为低毒或微毒,中等毒性品种较少,主要包括矮壮素、甲哌镆、烯效唑和单氰胺等^[5]。

矮壮素(chlormequat, CCC)作为植物延缓剂被广泛使用,化学名称为2-氯乙基三甲基氯化铵,化学式为C₅H₁₃Cl₂N。该化合物为白色结晶固体,具有明显的鱼腥气味,易溶于水且吸湿性强,常温下其饱和水溶液质量分数可达80%。矮壮素在中性或弱酸性条件下性质稳定,但在碱性环境中受热易发生分解反应。其结构式如图1所示。

收稿日期:2025-03-17

基金项目:山西农业大学高层次人才科研专项(2022XG19);山东省公益性行业(农业)专项(LNZZ2022055)

作者简介:陈思琪(1994—),女,山东莒南人,农艺师,从事农药技术有关综合工作。E-mail:1453696881@qq.com

共同第一作者:梁曼(2001—),女,河北张家口人,硕士研究生。研究方向:农药毒理与农药残留。E-mail:1409955042@qq.com

通信作者:李莉(1981—),山西长治人,研究员,博士,主要从事农药残留分析研究。E-mail:sxaulili@sxau.edu.cn

共同通信作者:梁林(1985—),山东淄博人,副研究员,硕士,主要从事农药残留分析研究。E-mail:119851985@163.com

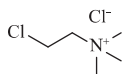


图 1 矮壮素的结构式

矮壮素能够抑制果蔬茎部亚顶端分生组织区细胞分裂与伸长,但对顶端分生组织无影响;它也可使植物茎秆变粗、变短,延缓果蔬生长速率,并提高叶片厚度和叶绿素含量等^[6]。研究表明,矮壮素能有效调控作物抗逆境胁迫,提高小叶楠^[7]和闽楠^[8]等的抗寒能力,增强燕麦^[9]、大豆^[10]和青稞^[11]等作物的抗倒伏性,同时可增加玉米^[12]、紫云英^[13]和冬小麦^[14]等作物产量并提高品质。然而,矮壮素原药具有中等毒性,误食可引发急性中毒,严重时甚至导致死亡^[15]。在我国,矮壮素主要登记用于棉花、小麦、玉米、花生和番茄^[16]。但由于其显著的生长调控效果,在实际农业生产中存在超标使用和超范围应用的现象。近年来监测数据显示,矮壮素在未经登记的作物中频繁检出,果蔬类产品中的残留问题尤为突出。例如,根据国际食品法典委员会(CAC)标准(葡萄中MRL为0.04 mg/kg),我国葡萄样品中矮壮素超标率达2.6%^[16];而欧盟标准(MRL为0.01 mg/kg)更为严格,菜豆中矮壮素平均残留量(0.038 mg/kg)远超此限值^[17]。这些数据表明,当前矮壮素的规范使用和残留监控亟待加强。

矮壮素在作物中的残留行为研究较少,尚未引

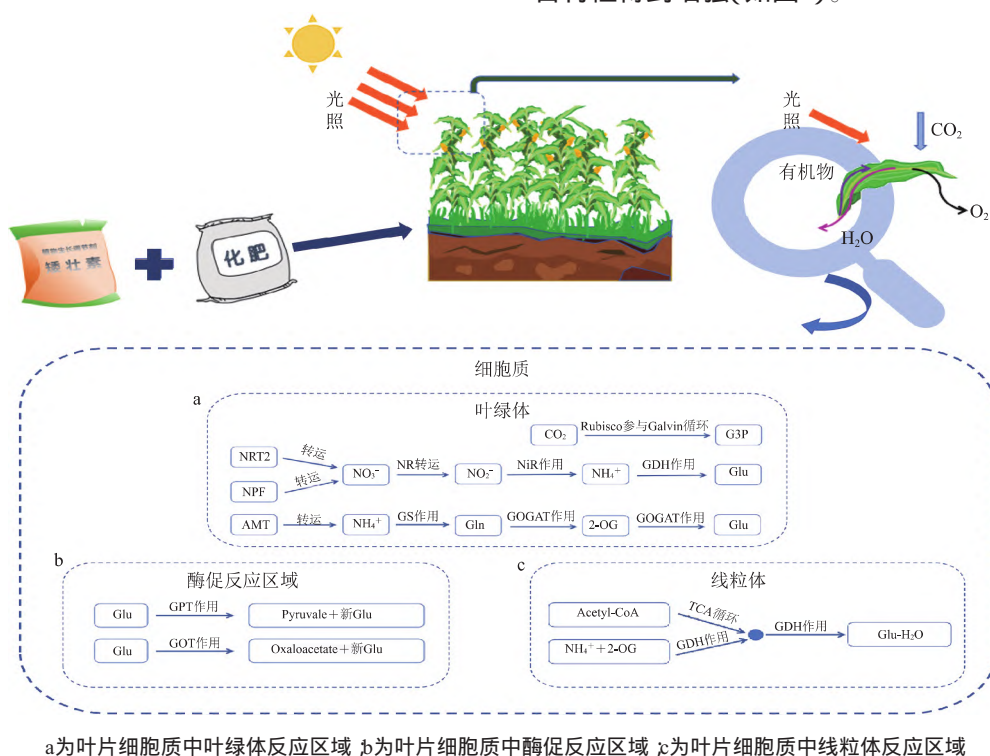
起关注,此文对矮壮素进行系统综述,以期矮壮素的研究和应用提供理论参考。

1 矮壮素在农业生产中的应用

1.1 矮壮素对作物的生长调控

矮壮素是一种季铵盐类植物生长调节剂,同时也是赤霉素生物合成拮抗剂,具有作用迅速、用量低、施用简便等特点^[18]。作为高效的外源生长调控物质,其在农业生产中应用广泛。矮壮素可通过调控植物株高,达到调控生长的作用,还可增强作物抗逆性,防止作物徒长倒伏,改善品质^[19]。

吴美璇等^[20]发现,在低温条件下喷施2 000 mg/L矮壮素,可抑制转化酶和硝酸还原酶的活性,提高谷氨酰胺合成酶活性,从而促进了青花菜的春化进程。张春宇^[10]研究表明,矮壮素与微量元素配合施用能显著提高光合参数,并显著调控叶绿素荧光参数,说明矮壮素与微量元素配合施用能够提高大豆叶片的光合作用。马正波^[21]在低氮(62.5 kg/hm²)和中氮(125 kg/hm²)水平下,使用矮壮素处理了夏玉米2个品种。结果表明,矮壮素拌肥处理增强了叶片硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶和谷丙转氨酶活性及可溶性蛋白含量,促进了玉米对氮素的吸收和利用,改善了氮素代谢过程;此外,玉米生育期内的叶面积指数和叶绿素含量显著提高,光合特性得到增强(如图2)。

图 2 矮壮素影响玉米叶片的氮素代谢和光合作用^[21]

矮壮素还可抑制赤霉素生物合成,从而间接影响植物体内氮代谢^[22]。矮壮素作为赤霉素信号的抑制剂,具有矮化植物的作用。而植物倒伏的性质和程度与茎高密切相关,因此矮壮素使植物具有抗倒伏的能力^[19]。康靛^[23]在冬小麦拔节期,以3~4.5 kg/hm²的剂量滴施矮壮素,实现了提高产量、抗倒伏及节本增效的目的。李志华等^[24]研究表明,矮壮素能有效调控糜子茎秆形态和力学特征,增强糜子抗倒伏能力。上述研究说明,适宜用量的矮壮素对茎秆部分的影响可以增强作物的抗倒伏能力。

此外,矮壮素可以降低芽部的细胞分裂率和伸长率,抑制植株徒长,从而增加产量和品质。Wang等^[25]研究证实,施用矮壮素可显著减少马铃薯地上部分及匍匐茎的过度生长(如图3),同时增强叶片光合效率,促进同化物向块茎的转运。在草莓穴盘扦插苗上喷洒适宜浓度矮壮素,可培育壮苗并增加产量,提高草莓品质。该操作简单易行,成本较低^[26]。

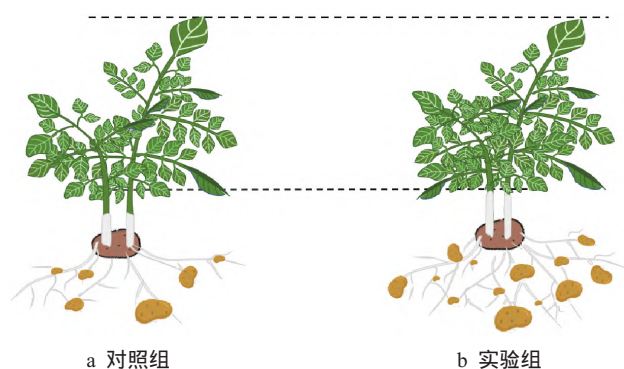


图3 施用矮壮素对马铃薯的影响

1.2 矮壮素对作物抗逆性影响

研究证明,矮壮素可以通过降低植株内钠含量和钠钾比(Na^+/K^+),提高植株 K^+ 和蛋白质含量,改善水稻盐胁迫的毒性效应^[27]。施用矮壮素还可提高小麦中相对含水量(RWC)、叶绿素含量及 K^+ 浓度,增强植株在胁迫条件下的生理稳定性^[28]。Vazayefi等^[29]通过种子预处理试验证实,矮壮素能有效提高油菜光合作用速率,同时显著减轻盐胁迫症状。这些研究结果充分证明,矮壮素作为一种有效的抗盐胁迫调节剂,可通过多途径增强作物对盐碱环境的适应能力。

在逆境条件下,矮壮素还可以促进根系的初始生长,增加气孔阻力,提高植物水势,最终通过提高水分利用效率来提高生产力。Vahid等^[30]研究发现,矮壮素通过调节内源植物激素和抗氧化酶,在生理水平上减轻菊苣植株受水分亏缺胁迫的不利影响。

闫艳^[31]研究证实,矮壮素参与玉米幼苗干旱信号响应网络的调控,同时通过参与细胞渗透调节、内源激素调节和活性氧去除等,促进根部主根伸长和侧根生长,保护光合作用等进程,进而增强玉米幼苗抗旱性。这些研究从生理生化到分子水平系统阐明了矮壮素增强作物抗旱性的作用机制。

1.3 矮壮素的非靶标毒性

植物生长调节剂可以改善作物生长,提高抗逆性,增加产量,因此备受欢迎。然而,随着生长调节剂的广泛应用,也逐渐出现了农产品和环境中的残留问题。欧洲食品安全局(EFSA)评价结果表明,矮壮素在植物中具有良好的内吸性和稳定性,但其具有中等毒性,因此需要更加关注它的使用安全性^[32]。目前,EFSA将矮壮素归类为H302“吞食有害”,以及H311“与皮肤接触有毒”^[33]。在动物实验中发现,雄性大鼠经口染毒0~5 h,出现痉挛、出汗等症状,一般在24 h内死亡,大剂量时于40 min内死亡。人体中毒症状类似于拟胆碱药物中毒,表现出明显的毒蕈碱样症状,并抑制了呼吸和循环中枢^[34]。

矮壮素作为粮食和果蔬作物常用农药,其检出率较高。然而,我国并未批准矮壮素在果蔬中登记,也未制定相应的MRL。陈静等^[35]在90份黄瓜、苦瓜和西葫芦样品中检出矮壮素6次。李晓贝等^[16]在152份葡萄样品中检出矮壮素8次。Temkin等^[36]研究发现,在2017—2022年,美国人尿液样本中检出矮壮素,但2023年的样本中矮壮素检出率明显增加,96份尿液样本中检出77次,约占全部尿样的80%。这一问题与市售的传统燕麦产品有关,其中一款燕麦产品中矮壮素的残留量最高达291 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。检测矮壮素在农产品中的残留量和检出率,可在一定程度上反映农药使用过程中存在的问题。为规避农药残留风险,需要合适的检测方法,以便关注农产品及环境中农药残留情况,以及时调整农药使用方法。

2 检测方法

2.1 前处理方法

农药残留前处理方法在不断地进行优化,以提升农药残留检测的准确性和效率。为避免农药残留对人类健康和环境安全产生不良影响,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至关重要的一环。

在提取矮壮素的前处理方法中较为常用的方法有固相萃取法(solid phase extraction, SPE)、分散

固相萃取法(dispersive solid phase extraction, DSPE)和 QuEChERS (quick、easy、cheap、effective、rugged、safe)技术等。固相萃取法简单、快速、处理样品量多、回收率高,因此其成为最常用的方法,广泛用于果蔬中残留农药的预处理和测定^[37]。采用固相萃取法提取水果、蔬菜可食用部分,矮壮素的回收率在80%以上^[38]。相较于固相萃取法,QuEChERS前处理技术更加简便,且分析速度快,可在短时间内完成多个样品的处理,精密度和准确度高,溶剂用量少,成本较低^[39]。因此,近些年使用QuEChERS技术提取矮壮素的研究较多,如用于水果、蔬菜、药材、茶和动物源性食品等农药残留检测^[40-41]。

2.2 分析方法

色谱检测方法是农药残留检测常用方法之一,可以连续对样品进行浓缩、分离、提纯及测定。矮壮素检测方法有薄层色谱法(thin-layer chromatography, TLC)、离子色谱法(ion chromatography, IC)、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)和液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)等^[42]。薄层色谱法易于实现,但平板沉积前纯化耗时长,且溶剂使用成本高,因此近些年的研究很少使用该检测方法^[33]。离子色谱法与气相色谱-质谱或液相色谱-质谱法相比,灵敏度较低,但操作简单、快速、使用成本低,可以满足矮壮素的常规检测^[43]。气相色谱法检测矮壮素时,矮壮素需要衍生化后才可使用,操作步骤较为繁琐,因此目前气相色谱法使用较少。相对于气相色谱法,使用液相色谱的研究较多,但由于矮壮素不含显色基团,普通紫外检测器无法直接检测。目前,矮壮素常用检测方法有液相色谱-质谱法和液相色谱-串联质谱法^[44]。Huang等^[45]采用改进的QuEChERS-HPLC-MS/MS测定绿茶中矮壮素等多种农药残留,Francesquett等^[46]采用改进的LC-MS/MS技术同时测定大麦和小麦中矮壮素残留。

与色谱法相比,光谱快速检测方法具有操作方便、无破坏性、精度高和试样量少等特点。常用于农药残留检测的光谱法有荧光光谱法(fluorescence spectroscopy, FS)、近红外光谱法(near-infrared spectroscopy, NIRS)和拉曼光谱法(Raman spectroscopy)等。邱梦情^[47]采用表面增强拉曼光谱法(surface enhancement of Raman scattering, SERS)快速检测了圣女果表皮、小麦籽粒和土壤中矮壮素残留,SERS结合化学计量学方法既可预测又有速度优势,张雪

艳^[48]采用带电SERS探针结合化学计量学方法检测大米中矮壮素残留。FS和NIRS尚未用于矮壮素残留检测,因此方法的应用还有待开发。

3 矮壮素在作物中的残留现状

3.1 登记及最大残留限量情况

矮壮素已在众多农产品上登记,但值得注意的是,直到2023年,美国环境保护署(EPA)才首次在粮食作物中使用矮壮素。此前,美国只在观赏植物上登记使用矮壮素,农产品上并未登记。而在我国,截至2025年3月,矮壮素原药登记有9个,登记作物5种,分别为小麦、棉花、玉米、番茄和花生。

美国在15种产品中制定了矮壮素的MRL,且多数为动物源食品;英国在至少328种农产品中制定了矮壮素的MRL,登记食品类别较为丰富;韩国在7种产品中制定了MRL,即燕麦、小麦、大麦、大米、小黑麦、葡萄和黑麦;日本在37种产品中制定了MRL,但主要登记在谷物类作物和动物源食品中,只有1种油籽类作物(棉籽)和2种水果(梨和葡萄)。由于矮壮素见效快、用量少、施用简单,也常被应用在未登记作物中。多篇文献报道了未登记作物中矮壮素的残留行为,如茶叶、葡萄、草莓、美人蕉和高山杜鹃等果蔬及观赏植物^[26, 45, 49-50]。GB 2763—2021中涉及动物源食品的限量标准有了突破性增长,新制定了矮壮素在肉、蛋、奶等居民日常消费的动物源食品中的MRL,更新动物源性食品中矮壮素的临时限量,如牛肉中MRL为0.2 mg/kg,牛乳为0.5 mg/kg,蛋类为0.1 mg/kg等。

不同国家与组织制定的矮壮素最大残留限量标准和相关产品种类相差较大,以国内外燕麦、小麦、玉米、大米等4种农产品中矮壮素的最大残留限量标准为例,如表1。总体来看,欧盟与英国限量标准涉及产品较多且规定较为具体,而我国目前的限量标准中所涉及的产品较少。2022年,欧盟(EU)发布2022/1290号条例,重新修订了矮壮素等6种农药在某些产品中的MRL,法规(EC)No 396/2005附件修订如下:矮壮素在玫瑰果中的MRL由0.05 mg/kg变更为0.01 mg/kg,在茶叶中的MRL由0.1 mg/kg变更为0.05 mg/kg,在野生菌中的MRL由0.05 mg/kg变更为0.01 mg/kg。2021年,加拿大卫生部发布确定部分食品中矮壮素的MRL,燕麦麸中MRL为80 mg/kg,牛、山羊、马和绵羊脂肪为0.08 mg/kg,乳为0.4 mg/kg等。此外,英国也在2021年重新评估了平菇在内的栽培菌中的矮壮素MRL。

表 1 国内外 4 种农产品中矮壮素最大残留限量
mg/kg

农产品	中国	欧盟	美国	日本	韩国
燕麦	10.00	15.00	40.00		30.00
小麦	5.00	7.00	3.00	10.00	4.00
玉米	5.00	0.01			
大米		0.01			0.05

3.2 国内外残留研究现状

随着人民生活水平的稳步提高和健康意识的不断增强,食品安全已成为社会广泛关注的热点问题。在农产品农药残留抽检中发现,矮壮素存在超量使用,甚至滥用现象。由于该药剂登记作物少,且缺少相应作物中的MRL,从规范用药角度看,存在潜在风险,同时对人类存在膳食摄入风险。

郭春景等^[51]调查发现,草莓中检出22种农药残留,其中检出率最高的是矮壮素,但我国尚未制定草莓中矮壮素的MRL。Hao等^[52]测定了玉米和大豆中矮壮素残留,发现12份样品中河南青豆和成熟大豆中矮壮素残留量为0.012 mg/kg,海南成熟大豆中矮壮素残留量为0.013 mg/kg,其他9份样品中矮壮素残留量均小于0.01 mg/kg(选取欧盟对2种作物的MRL 0.01 mg/kg)。Guo等^[53]研究表明,矮壮素在山东和北京两地棉籽中的平均半衰期为4.47 d,在两地土壤中的平均半衰期为4.34 d;棉籽中矮壮素的最终残留量低于0.5 mg/kg,土壤中未检出矮壮素残留,故在推荐剂量下,该农药可以安全使用。林涛等^[54]发现,矮壮素在马铃薯中的消解半衰期为3.2 d,在3个测定时期(收获期前10 d、收获期和收获期后10 d),各质量浓度处理组的矮壮素残留量均低于最低检测浓度,表明矮壮素在推荐剂量下可以安全使用。杨小兵^[55]研究结果表明,安徽、河南、山东和山西4个省份采集的小麦和玉米样品中矮壮素残留量均低于国家规定的MRL标准5 mg/kg,且均低于方法的最低检测浓度0.01 mg/kg,表明当前国内主产区小麦、玉米中矮壮素残留量较低,可达到食用安全要求。

矮壮素吞食与接触均有害,故在残留量与消解率的研究中应评估其膳食暴露风险。凌淑萍等^[56]研究表明,荸荠田水中矮壮素半衰期小于1 d,膳食暴露风险熵为14.3%,为低风险。付岩等^[57]研究发现,矮壮素在茭白植株中的降解半衰期为2.7 d,对各类人群的膳食暴露风险较低(低于15%),均在可接受范围。叶倩等^[58]测定发现,芥蓝、菜心和普通白菜中矮壮素暴露急性风险熵分别为60.26、62.26和55.14,

100%人群暴露慢性风险熵为3.26~8.11,均小于100,故矮壮素残留膳食暴露风险在可接受范围。兰珊珊等^[59]测得矮壮素在茄子中的残留半衰期为2.5 d,收获期茄子中的残留中值为0.003 mg/kg,残留量较低,且茄子中矮壮素残留对各类人群的短期膳食暴露风险和急性暴露风险均在可接受范围。需要指出的是,目前我国主要参考欧盟MRL标准,由于东、西方饮食结构和人群体质差异,这一做法可能存在偏差,建议加快建立符合我国国情的MRL标准体系。

现有研究多集中于矮壮素残留检测方法优化,对消解动态和残留规律的系统研究仍显不足,这给监管工作带来困难。加之在未登记作物上的违规使用现象,进一步增加了食品安全隐患。未来应加强矮壮素使用指导和残留监控,确保农产品质量安全。

4 未来展望

通过对矮壮素近年研究的系统梳理,揭示了其在作物生长调控和抗逆性提升方面的显著效果,同时也指出了潜在的应用风险。针对当前存在的登记作物有限、MRL标准缺失、用药不规范等问题,本研究提出以下建议。

(1)健全法规标准体系。针对矮壮素登记作物范围有限与MRL标准缺失的关键问题,建议采取三方面措施:首先,应基于作物重要性原则,优先将高风险作物纳入登记范围;其次,参考国际标准,但立足我国膳食结构,建立差异化MRL标准体系;最后,构建“生产-加工-销售”全链条追溯系统,实现用药精准监管。(2)创新监管培训机制。鉴于矮壮素存在的毒性风险,在当前食品安全形势严峻的背景下,建议建立多部门联动的市场监管机制,重点查处违规使用行为;制定科学的用药技术规范,明确安全间隔期等关键参数;开展面向种植户的系统培训,提升规范用药意识;建立用药信息追溯平台,实现全过程监管。

本研究的理论价值主要体现在以下几方面:首先,系统梳理了矮壮素的作用机制和应用效果,为其科学合理使用提供了重要参考依据;其次,分析了现有残留检测方法的优缺点,为建立更灵敏、高效的检测技术奠定了理论基础;第三,深入探讨了矮壮素在作物中的代谢途径和残留特性,为后续研究指明了方向。未来研究应着重于:开发基于人工智能的矮壮素风险预警系统,探究其在气候变化背景下的环境行为变异规律;评估其与新型农药的复合生态效应。这些研究将为建立更科学的矮壮素风

险管理体系提供重要支撑 最终实现农业提质增效与生态环境安全的协同发展。

参考文献

- [1] WANG X L, MA Y, JIA L N, et al. Plant growth regulator residues in fruits and vegetables marketed in Yinchuan and exposure risk assessment[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 124: 105661.
- [2] GILL K, KUMAR P, NEGI S, et al. Physiological perspective of plant growth regulators in flowering, fruit setting and ripening process in citrus[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 309: 111628.
- [3] 许艳秋, 王广成, 高立明, 等. 麦冬种植中植物生长调节剂使用情况、残留现状及影响综述[J]. 农药学报, 2021, 23(6): 1073-1084.
- [4] 韦飞扬, 杜伟锋, 吴杭莎, 等. 植物生长调节剂在中药材种植方面的应用现状及其对中药材质量和产量影响的研究进展[J]. 中华中医药杂志, 2022, 37(3): 1587-1590.
- [5] 田磊, 高歆越, 嵇莉莉. 我国植物生长调节剂登记情况及相关政策要求[J]. 农药科学与管理, 2024, 45(1): 11-16.
- [6] 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.
- [7] 费越, 白志波, 牛学舫, 等. 矮壮素对小叶楠抗寒生理的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34(1): 117-123.
- [8] 刘刚, 费永俊, 涂铭, 等. 矮壮素和缩节胺对闽楠幼苗抗寒性的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(6): 1403-1406; 1444.
- [9] 周海涛, 赵孟圆, 张新军, 等. 缩节胺和矮壮素对燕麦生长发育和产量的调控效应[J]. 作物杂志, 2020(5): 188-193.
- [10] 张春宇. 四种生长调节剂配施微量元素在大豆生产中的应用效果研究[D]. 黑龙江大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [11] 陈一西, 汪军成, 姚立蓉, 等. 2种生长延缓剂对青稞抗倒伏、生长及品质的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2019, 36(5): 24-31.
- [12] 仇多传, 张业文, 裴文东, 等. 不同品牌矮壮素对玉米株高和产量的影响[J]. 种子科技, 2022, 40(11): 1-3.
- [13] 郑春风, 刘春增, 李本银, 等. 喷施矮壮素和多效唑对紫云英生长发育及结实性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1917-1922.
- [14] 王志鑫. 春季追氮和矮壮素对冬小麦抗倒的影响及增产机理研究[D]. 山西晋中: 山西农业大学, 2022.
- [15] 张义, 刘云利, 刘子森, 等. 植物生长调节剂的研究及应用进展[J]. 水生生物学报, 2021, 45(3): 700-708.
- [16] 李晓贝, 吴海平, 赵晓燕, 等. 上海地产葡萄和草莓中植物生长调节剂残留及膳食摄入风险评估[J]. 农药学报, 2022, 24(1): 152-160.
- [17] 高宇航, 高明坤, 田明硕, 等. 海南地区菜豆和豇豆中植物生长调节剂残留和风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2020(5): 59-63.
- [18] CHHOKAR R S, KUMAR N, GILL S C, et al. Enhancing wheat productivity through genotypes and growth regulators application under higher fertility conditions in sub-humid climate[J]. International Journal of Plant Production, 2024, 18(1): 85-95.
- [19] ZHANG H, FAN J J, PENG Q, et al. Effects of chlormequat chloride and paclobutrazol on the growth and chlorophyll fluorescence kinetics of *Daphne genkwa*[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2023, 70(5): 110.
- [20] 吴美璇, 郑姗姗, 蒋欣梅, 等. 矮壮素处理对青花菜生长状态及春化关键酶活性的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2014, 41(1): 63-66.
- [21] 马正波. 矮壮素对不同氮肥水平下华北夏玉米生长及氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [22] 耿小丽, 武慧娟, 付萍, 等. 叶面喷施多效唑、矮壮素、缩节胺对燕麦抗倒伏性和种子产量的调节作用[J]. 草业科学, 2023, 40(9): 2340-2347.
- [23] 康靓. 矮壮素滴施量对冬小麦产量及茎秆抗倒伏特性的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
- [24] 李志华, 穆婷婷, 杨金慧, 等. 多效唑和矮壮素对糜子抗倒伏性及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(10): 1219-1225.
- [25] WANG H Q, LI H S, LIU F L, et al. Chlorocholine chloride application effects on photosynthetic capacity and photoassimilates partitioning in potato (*Solanum tuberosum* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 119(2): 113-116.
- [26] 李进, 袁玉娟, 殷琳毅, 等. 矮壮素对草莓穴盘扦插苗及定植后的影响[J]. 中国果树, 2024(2): 63-67.
- [27] GURMANI A R, BANO A, KHAN S U, et al. Alleviation of salt stress by seed treatment with abscisic acid (ABA), 6-benzylamino-purine (BA) and chlormequat chloride (CCC) optimizes ion and organic matter accumulation and increases yield of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(10): 1278-1285.
- [28] SHARIFI R S, KHALIZADEH R, JALILIAN J. Effects of biofertilizers and cycocel on some physiological and biochemical traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(3): 308-318.
- [29] VAZAYEFI M, SHEKARI F, ZANGANI E, et al. Seed treatment with chlormequat chloride improves the physiological and biochemical characteristics of *Brassica napus* L. under salt stress[J]. Plant Stress, 2023, 9: 100175.
- [30] VAHID S, ELHAM A. Exogenous plant growth regulators/plant growth promoting bacteria roles in mitigating water-deficit stress on chicory (*Cichorium pumilum* Jacq.) at a physiological level[J]. Agricultural Water Management, 2020, 245: 106439.
- [31] 闫艳. 矮壮素提高糯玉米抗旱性的转录组学分析[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2023.
- [32] EFSA. Statement on the dietary risk assessment for the proposed temporary maximum residue level for chlormequat in oyster mushrooms[J]. EFSA Journal, 2019, 17(5): 5707.
- [33] NARDIN T, SAVASTANO R, FRANCESCHINI J, et al. Risk of de-novo formation of chlormequat and mepiquat in industrial cocoa products assessed by ion chromatography coupled with high-resolution mass spectrometry[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2023, 58(6): 3006-3013.
- [34] 王琴, 张胜吉, 黄瑰瑶, 等. 误服矮壮素重度中毒1例救治体会[J]. 总装备部医学学报, 2009, 11(3): 184-185.
- [35] 陈静, 王莉丽, 李文希, 等. 云南省主要瓜类蔬菜生产中农药危害因子分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(23): 8018-8023.
- [36] TEMKIN A M, EVANS S, SPYROPOULOS D D, et al. A pilot study of chlormequat in food and urine from adults in the United States from 2017 to 2023[J]. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2024, 34(2): 317-321.
- [37] 谢飞. 几种果蔬农药残留检测前处理方法[J]. 农业工程技术, 2022, 42(29): 89-90.
- [38] 王静静, 鹿毅, 杨涛, 等. HPLC-MS/MS法同时测定果蔬中6种植物生长抑制剂残留[J]. 分析测试学报, 2011, 30(2): 128-134.
- [39] 陈勇, 毛永琼, 薛雨琴, 等. 农药残留QuEChERS前处理方法研究进展及应用探讨[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(9): 111-121.
- [40] 杜梓萱, 曹佳音, 李雯婷, 等. QuPPe-高效液相色谱-串联质谱法

- 测定3种根茎类药材中矮壮素和甲哌磺残留量[J]. 中成药, 2024, 46(3): 1035-1040.
- [41] 戴唯, 李巧, 朱明, 等. QuEChERS-同位素内标-高效液相色谱-串联质谱法测定动物源性食品中植物生长调节剂类农药残留[J]. 色谱, 2021, 39(11): 1213-1221.
- [42] 张锦梅, 王敬花, 王珊珊, 等. 离子色谱法分析小麦中的矮壮素和缩节胺[J]. 中国无机分析化学, 2012, 2(3): 76-79.
- [43] MARIE-CHRISTINE P, ISABELLE D, JOZEF C, et al. Simple ion chromatographic method for the determination of chlormequat residues in pears[J]. Journal of Chromatography A, 2001, 920(1/2): 255-259.
- [44] 张曦. 番茄中矮壮素和缩节胺的检测方法及残留研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [45] HUANG Y S, SHI T, LUO X, et al. Determination of multi-pesticide residues in green tea with a modified QuEChERS protocol coupled to HPLC-MS/MS [J]. Food Chemistry, 2019, 275: 255-264.
- [46] FRANCESQUETT J Z, RIZZETTI T M, CADAVAL T R S, et al. Simultaneous determination of the quaternary ammonium pesticides paraquat, diquat, chlormequat, and mepiquat in barley and wheat using a modified quick polar pesticides method, diluted standard addition calibration and hydrophilic interaction liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2019, 1592: 101-111.
- [47] 邱梦倩. 基于SERS的矮壮素残留快速准确检测研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
- [48] 张雪艳. 带电SERS探针结合化学计量学方法检测大米中农药残留[D]. 合肥: 安徽大学, 2021.
- [49] 章晓琴, 欧克芳, 刘超, 等. 不同生长调节剂对盆栽美人蕉矮化效应研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(28): 98-100.
- [50] 解玮佳, 唐毓玮, 李世峰, 等. 矮壮素和多效唑对盆栽高山杜鹃“红粉佳人”的矮化效应[J]. 山东农业科学, 2021, 53(3): 45-49.
- [51] 郭春景, 王雪鑫, 李广, 等. 辽宁省草莓产业现状与膳食风险分析[J]. 辽宁农业科学, 2022(1): 74-76.
- [52] HAO Y, YUE G, SHU L, et al. Determination of underivatized chlormequat, fosetyl-aluminium and phosphonic acid residues in maize and soybean by LC-MS/MS[J]. Analytical Methods, 2024, 16(2): 237-243.
- [53] GUO X L, XU Y J, ZHANG F H, et al. Chlormequat residues and dissipation rates in cotton crops and soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 73(4): 642-646.
- [54] 林涛, 陈兴连, 杨旭昆, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定马铃薯中矮壮素残留及消解动态[J]. 农药, 2014, 53(12): 915-917.
- [55] 杨小兵. 市售小麦和玉米中矮壮素残留现状调查[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(11): 4822-4823.
- [56] 凌淑萍, 付岩, 王全胜, 等. 矮壮素在荸荠田中的残留及质量安全风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(24): 9627-9634.
- [57] 付岩, 张亮, 王全胜, 等. 茭白中矮壮素的残留与急性膳食摄入风险研究[J]. 农产品质量与安全, 2018(5): 18-22.
- [58] 叶倩, 黄健祥, 邓义才, 等. 广州地区芥蓝、菜心和普通白菜中丙环唑和矮壮素残留及膳食暴露风险[J]. 热带作物学报, 2017, 38(4): 752-757.
- [59] 兰珊珊, 林涛, 林听, 等. 矮壮素在茄子中的残留分析与膳食暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(11): 4344-4350.

(编辑: 顾林玲)

(上接第7页)

- [51] NACHMAN R J, STREY A, ISAAC E, et al. Enhanced in vivo activity of peptidase-resistant analogs of the insect kinin neuropeptide family[J]. Peptides, 2002, 23(4): 735-745.
- [52] PINHEIRO A M, CARREIRA A, FERREIRA R B, et al. Fusion proteins towards fungi and bacteria in plant protection[J]. Microbiology, 164(1): 11-19.
- [53] MUTTENTHALER M, KING G E, ADAMS D J, et al. Trends in peptide drug discovery[J]. Nature Reviews Drug Discovery, 2021, 20(4): 309-325.
- [54] OGUI S G K, GILDING E K, JACKSON M A, et al. Butterfly pea (*Clitoria ternatea*), a cyclotide-bearing plant with applications in agriculture and medicine[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 645.
- [55] YAO J F, YANG H, ZHAO Y Z, et al. Metabolism of peptide drugs and strategies to improve their metabolic stability[J]. Current Drug Metabolism, 2018, 19(11): 892-901.
- [56] SCHWINGES P, PARIYAR S, JAKOB F, et al. A bifunctional dermaseptin-thaumatococcus dipeptide functionalizes the crop surface for sustainable pest management[J]. Green Chemistry, 2019, 21(9): 2316-2325.
- [57] GONZALEZ C, PROVIN E, ZHU L, et al. Independent and synergistic activity of synthetic peptides against thiabendazole-resistant *Fusarium sambucinum*[J]. Phytopathology, 2002, 92: 917-924.
- [58] LOPEZ-GARCIA B, VEYRAT A, PEREZ-PAYA E, et al. Comparison of the activity of antifungal hexapeptides and the fungicides thiabendazole and imazalil against postharvest fungal pathogens[J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 89 (2/3): 163-170.
- [59] MARTIN-SERRANO A, GOMEZ R, ORTEGA P, et al. Nanosystems as vehicles for the delivery of antimicrobial peptides (AMPs)[J]. Pharmaceutics, 2019, 11(9): 448.
- [60] NORDSTROM R, MALMSTEN M. Delivery systems for antimicrobial peptides[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 242: 17-34.
- [61] NAKASU E Y T, EDWARDS M G, FITCHES E, et al. Transgenic plants expressing ω -ACTX-Hv1a and snowdrop lectin (GNA) fusion protein show enhanced resistance to aphids[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 673.
- [62] HERZIG V, BENDE N S, ALAM MD S, et al. Chapter eight-methods for deployment of spider venom peptides as bioinsecticides [J]. Advances in Insect Physiology, 2014, 47: 389-411.
- [63] AKBARIAN M, KHANI A, EGHBALPOUR S, et al. bioactive peptides: synthesis, sources, applications, and proposed mechanisms of action[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(3): 1445.
- [64] NARAYANI M, BABU R, CHADHA A, et al. Production of bioactive cyclotides: a comprehensive overview[J]. Phytochemistry Reviews, 2020, 19(4): 787-825.
- [65] PARACHIN N S, MULDER K C, VIANA A A B, et al. Expression systems for heterologous production of antimicrobial peptides[J]. Peptides, 2012, 38(2): 446-456.

(编辑: 顾林玲)