

混药浓度检测技术研究现状

杨亚飞, 申志铮, 蒋周良, 林彤, 钱志 (江苏农牧科技职业学院, 江苏泰州 225300)

摘要 混药是施药的基本操作环节, 混合药液品质直接决定施药效果, 发展浓度检测技术可以监控混合药液的品质。目前混药浓度的检测方法主要分为两大类: 第一类, 先采集喷雾样品溶液再利用仪器测量浓度, 简称取样检测浓度法; 第二类, 在混合后喷雾前即在线混药时直接测量浓度, 简称在线检测浓度法。重点阐述了这两大类别国内外主流的混药浓度检测技术, 并对其进行总结分析。

关键词 植保机械; 混药浓度在线检测; 在线混药

中图分类号 S126 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)07-0006-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.07.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Status of Mixed Drug Concentration Detection Technology

YANG Ya-fei, SHEN Zhi-zheng, JIANG Zhou-liang et al (Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, Taizhou, Jiangsu 225300)

Abstract Drug mixing is the basic operation link of drug application. The quality of its mixed solution directly determines the application effect. The development of concentration detection technology can monitor the quality of mixed solution. At present, the detection methods of mixed drug concentration can be divided into two main categories: first, collect the spray sample solution first, then use the instrument to measure the concentration. The second type is to measure the concentration directly before mixing, namely on-line concentration. This paper focuses on the two mainstream mixed drug concentration detection technologies at home and abroad, and summarizes and analyzes them.

Key words Plant protection machinery; On-line detection of mixed drug concentration; On-line mixed drug

病虫害的有效防治是农业高产增收的有力保障^[1-2], 利用农药防治病虫害是目前农业植保领域最有效最常用的方法, 据相关统计, 目前从喷雾机械喷洒出去的农药只有 15.00%~20.00% 能沉积在作物叶片上, 而其中真正起到作用的仅有 0.03%^[3-4], 大部分喷洒出去的农药都渗透到土壤里或弥漫在空气中, 污染了土壤与环境, 通过食物链威胁人类的健康^[5-6]。为了提高农药的利用率, 包括变量施药^[7-8]、精确喷雾^[9-10] 等在内的新施药技术正不断发展, 喷雾系统对施药量的精确性要求越来越高, 所以开发小型、低成本、可靠、能够用于喷雾机的混药浓度在线检测装置迫在眉睫。

混药是施药的基本操作环节, 混合药液的品质直接决定施药效果。目前的混合药液方式也从预混式混合药液向在线混药发展。在线混药相对于预混药的优势有^[11-13]: ①可以实现按目标作物的实际需求在线混合药液, 节约用药量, 减少成本 and 环境污染; ②避免人与药液的直接接触, 减少施药人员农药中毒的可能性等。

发展混药浓度在线检测技术能更好地监测混合后药液的浓度, 以便在线混药时能够根据实际需要控制用药量和用水量, 以此减少多余农药用量, 从而提高农药利用率, 并为混药器的设计提供依据。混药浓度在线检测技术还将有利于实现药液浓度的反馈, 从而推进变量喷雾技术、精确喷雾技术的发展。此外, 为了避免人与农药直接接触, 全封闭混药技术也在不断发展^[14-16]。混药浓度在线检测技术将会为全封闭混药发展提供有力的技术支持和安全性保障。

目前对于混药浓度的检测方法主要分为两大类: 第一

类, 先采集喷雾样品溶液再利用仪器测量浓度(简称为取样检测浓度法); 第二类, 在混合后喷雾前即在线混药时直接测量浓度(简称在线检测浓度法)。

1 取样检测浓度法

取样检测浓度法主要包括色谱法、光谱法、生物传感器法、分光光度计法等。

1.1 色谱法 1994 年, Molina 等^[17] 利用乙酸乙酯萃取水中的有机磷农药, 用高效液相色谱法来检测有机磷农药浓度。最小检测浓度为 0.01 $\mu\text{g/L}$ 。

1997 年, Juhler^[18] 用乙酸乙酯与硫酸钠溶液萃取猪肉的有机磷农药, 用高效液相色谱法来检测有机磷农药浓度。

2013 年, 韩莹等^[19] 通过比较选择 390 nm 的检测波长, 选择四硝基苯甲醛为衍生剂, 建立了高效液相色谱测定偏二甲胍的方法。最小分辨浓度为 0.5 $\mu\text{g/L}$, 检测的相对标准偏差并不大于 1.69%。

1.2 光谱法 2005 年, 王忠东等^[20] 应用西维因农药溶液受到激发能发出荧光的原理, 设计了一种利用电荷耦合器件与弱信号处理技术的浓度检测装置。并实际测量了西维因溶液浓度, 试验数据表明, 该装置能够检测出浓度在 0~120 $\mu\text{g/L}$ 的西维因溶液。

2008 年, 赵凤芝等^[21] 应用西维因农药受激发能够发出荧光的原理, 设计出一种采用光纤传光、平场光谱仪分光, 以及图像传感等技术获取农药浓度的检测系统。如图 1 所示, 试验表明该系统能够对浓度在 0.004~0.100 mg/L 的西维因农药进行有效检测^[21]。

2011 年, Koller 等^[22] 使用近红外光谱法检测了颗粒流的混合过程, 检测装置如图 2 所示。其使用 FT-NIR 近红外光谱仪与电脑直接连接, 将采集到的信息数据直接进行处理, 得到混合液体的体积浓度。

2010 年, 陈菁菁等^[23] 通过高光谱成像和荧光激发技术,

基金项目 江苏省高校自然科学基金面上项目(21KJB210020); 江苏农牧科技职业学院院级课题(NSF2022ZR11); 泰州市“凤城英才”托举工程(泰科协发[2022]64号)。

作者简介 杨亚飞(1989—), 男, 江苏泰州人, 讲师, 硕士, 从事植保机械、农业电气化研究。

收稿日期 2021-12-28; **修回日期** 2022-06-15

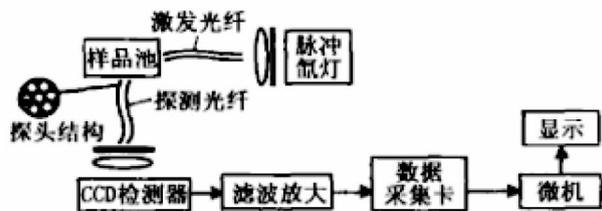


图 1 CCD 荧光检测系统

Fig.1 Block diagram of CCD fluorescence detection system

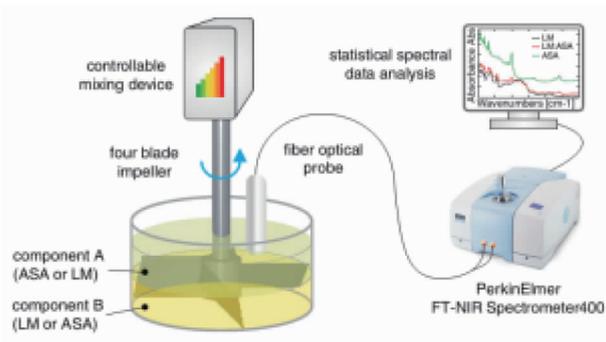


图 2 试验装置原理

Fig.2 Schematic of the experimental setup

设计了高光谱荧光成像农药浓度检测系统(图 3)。研究表明不同浓度的毒死蜱农药具有不同的荧光峰值。

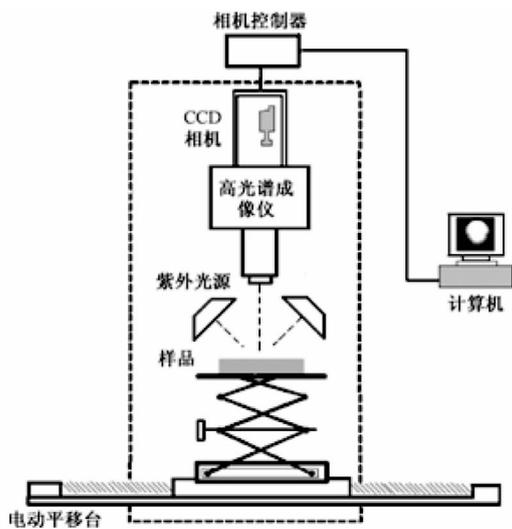


图 3 高光谱荧光浓度检测系统示意

Fig.3 Concentration detection system schematic diagram of Hyperspectral fluorescence

2012年,殷磊等^[24-25]应用光的漫反射特性获取叶片表面药液近红外光谱,对叶面药液浓度进行了检测。对3种不同类型作物叶片进行实际测量,通过偏最小二乘法构建了叶片表面药液浓度与光谱反射率之间的数学模型,试验结果表明不同类型作物叶片对浓度检测的影响较小。

1.3 生物传感器法(酶传感器) 2011年,陈志刚等^[26-27]使用电化学方法,根据农药对酶的抑制原理,设计了一种基于酶传感器的便携式农药浓度检测装置(图 4)。实际测量了西维因溶液浓度,试验结果表明装置能够检测出浓度在 5 ng/mL ~ 2 μg/mL 的西维因溶液,最小检测浓度为

1.7 ng/mL,浓度的检出时间小于 161 s。

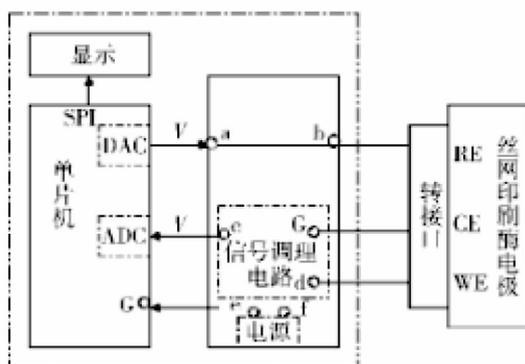


图 4 农药浓度检测装置组成

Fig.4 Device of Pesticide concentration detection

2011年,王冲等^[28]根据酶的抑制原理,设计了基于SOC单片机农药浓度检测装置(图 5)。并对西维因溶液进行了实际测量。将该装置测量结果与电化学工作站测量结果作对比,最高可分辨出 0.01 μA 的微电流,最大误差不大于 0.19 μA。浓度的检出时间小于 3 min。

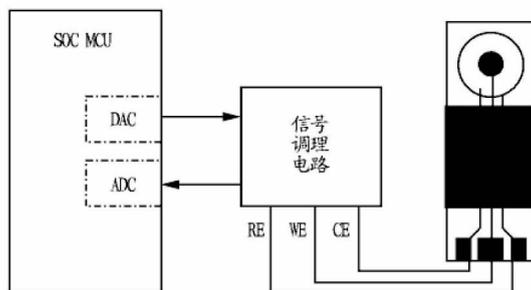


图 5 农药浓度检测装置组成

Fig.5 Device of Pesticide concentration detection

1.4 分光光度计法 2007年,赵燕燕等^[29]用 3UV-2550 型紫外分光光度计,50 μL 的微量比色池测量血液中的百草枯浓度,选择采用 λ = 257 nm 作为检测波长,试验表明血中百草枯溶液浓度在 0.05 ~ 50.00 μg/mL 呈现良好的线性关系,相关系数高达 0.999 9。

2013年,王立伟等^[30]使用 UNICO-UV2102 型紫外分光光度计对胭脂红溶液浓度进行了测量,选择采用 λ = 508 nm 作为测量波长,通过对标准浓度的胭脂红溶液进行吸光度分析,得出浓度曲线,并对其进行线性拟合,其相关系数高达 0.992 9。

2 在线检测浓度法

在线检测浓度法主要包括光散射法、高速摄像机法、电导率法、光纤传感器法、光折射法、透光法等。

2.1 光散射法 1998年,Ozkan等^[31]根据光的散射原理,设计了一种可以通过检测药箱浊度来推断药箱混药均匀程度的装置(图 6)。

2011年,赵四海等^[32]根据乳化液浓度与混浊度的关系,利用散射检测器提出了一种测量乳化液浓度的方法,其检测原理如图 7 所示。对浓度在 2.5% ~ 5.5% 的乳化液进行了试验研究。结果表明,散射检测器输出电压信号与乳化液浓度呈线性关系,可以用于在线检测乳化液浓度。

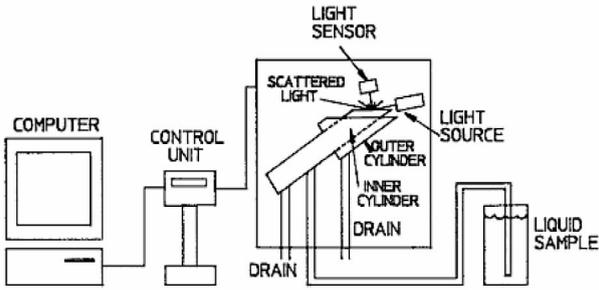


图 6 哈希浊度装置原理

Fig. 6 Diagram of the hach turbidity instrument

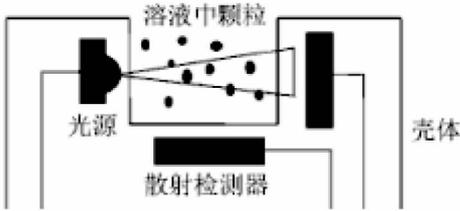
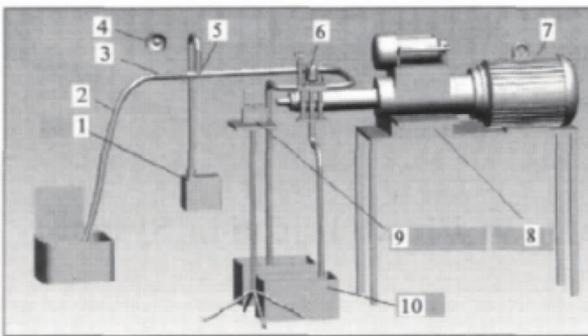


图 7 光学浊度检测原理

Fig. 7 The measurement principle of optical turbidity

2.2 高速摄像机法 2011 年,徐幼林等^[33]使用淡黄色聚苯乙烯颗粒作为示踪粒子,采用 TROUBLE SHOOTER 2000 型高速相机拍摄混药器中药液和水实时混合图像,混药器是用高透光材料制成,检测系统如图 8 所示。通过实时处理拍摄的图像,分析混药均匀性与流体速度矢量的关系。



注:1. 药箱;2. 出水软管;3. 有机玻璃管;4. 辅助光源;5. 混药器;6. 泵;7. 电动机;8. 试验台架;9. 高速摄像机;10. 水箱。

Note: 1. Medicine cabinet; 2. Water outlet hose; 3. Plexiglass tube; 4. Auxiliary light source; 5. Mixer; 6. Pump; 7. Motor; 8. Test bench; 9. High-speed camera; 10. Water tank.

图 8 混合药液图像采集原理

Fig. 8 Principal figure of image collecting of mixing liquids

2018 年,代祥等^[34]使用 4M180-CL 型高速相机,拍摄混合脂溶性农药在线混药实时混合图像,并对混药器的药水混合图像进行处理,定量分析混药均匀性。

2.3 电导率法 2006 年,Downey 等^[35]将电导率传感器装于直接注入喷嘴式喷雾系统,用 NaCl 溶液作为模拟农药,运用电导率原理测量 NaCl 溶液浓度,检测时间小于 67 ms。

2010 年,徐溪超^[36]使用盐水代替农药,然后根据电导率原理测量了经过射流混药器混药后的溶液浓度。其检测方法如图 9 所示,取样装置为注射器,检测装置为电导率仪。

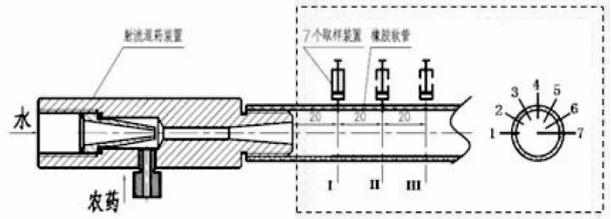


图 9 射流混合器截面浓度测量取样装置分布

Fig. 9 Sampling devices for measuring concentration in cross section

2.4 光纤传感器法 2006 年,张娜等^[37-38]根据不同浓度溶液会对光纤内传输的光进行不同的调制,设计了一种基于 U 型光纤传感器的液体浓度实时在线检测系统(图 10)。对食盐和蔗糖溶液进行测量时,精度高达 0.05%。

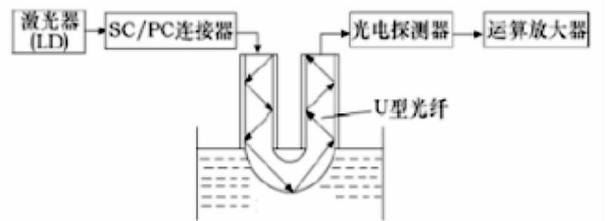


图 10 基于光纤传感器检测系统

Fig. 10 Detection system based on optical fiber sensor

2.5 光折射法 2011 年,田晓华等^[39]依据不同浓度溶液折光率的原理,提出了牛乳乳糖质量含量的快速高准确度测量方法,原理如图 11 所示。试验结果表明,其测量准确度在 0.1% 以内。

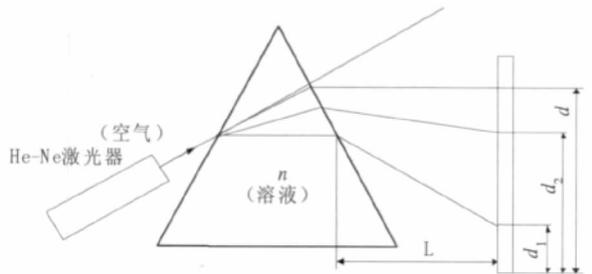


图 11 光折射法实验原理

Fig. 11 Schematic of Light refraction method

2014 年,邱白晶等^[40]根据不同浓度溶液折光率不同的原理,设计了一种混药浓度在线检测装置,如图 12 所示。试验时,在 3 种喷雾流量下,在线检测了模拟农药胭脂红溶液,最大检测偏差为 0.075 1 g/L。

2.6 透光法 2009 年,Vondricka 等^[41]在 Hloben^[15]的基础上根据光穿过不同浓度溶液透射光光强不同的原理,设计一种光透率传感器来在线测量混药浓度(图 13)。

2013 年,贾卫东等^[42]利用农药光透性原理设计了药液混合比检测单元,其结构如图 14 所示,主要由 2 个高亮发光二极管、透明检测流道和硅光电池等组成,为防止外界光强对检测单元的干扰,在外检测单元外部用避光材料进行整体包裹。对百草枯农药进行了实际检测,能够检测出 1:10~1:270 混药比的百草枯溶液。

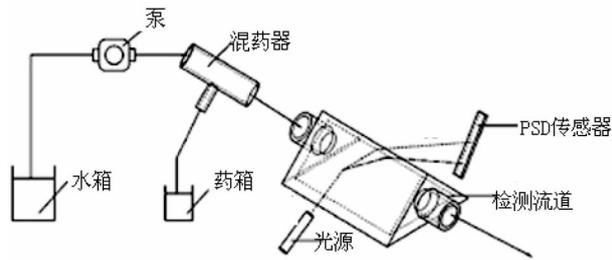


图 12 混药浓度在线检测系统

Fig. 12 Mixing concentration online detection system

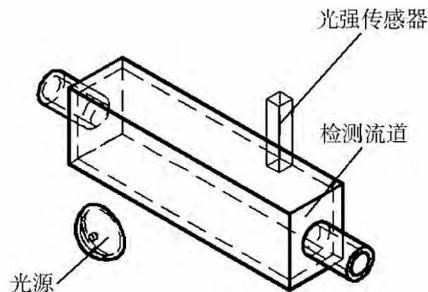


图 15 基于 CCD 混药浓度在线检测装置

Fig. 15 The device of online detection concentration based on linear CCD

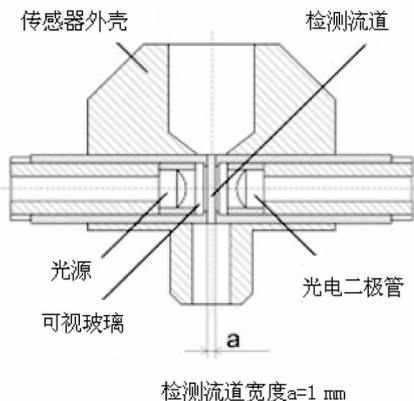


图 13 光透率传感器

Fig. 13 Transmittance sensor

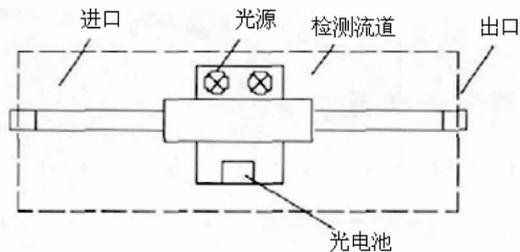


图 14 混合药液比检测装置结构示意图

Fig. 14 Structure of mixing ratio detection device

2014年董晓娅等^[43]选用线性 CCD 传感器作为光强接收装置(图 15),利用光透性设计混药浓度检测装置,使用线性 CCD 像素点的平均灰度值来表示浓度,检测精度小于 7.237%,2019年杨亚飞等^[44-45]在董晓娅等^[43]的基础上,选用灰度值数据变异系数小于 5%的第 32~120 号像素点作为有效像素点,用有效灰度值表示浓度,其检测精度小于 3.081%。

2022年胡静涛等^[46]在使用透光法进行药液浓度在线检测时,采用卡尔曼滤波技术处理实际作业可能引起的误差后表征浓度,并对浓度检测装置进行震动试验,试验结果表明:震动试验中采用卡尔曼滤波技术滤波可使相对误差降低到 $\pm 0.2\% \sim \pm 2.0\%$ 。

3 总结

综合浓度检测技术的国内外研究现状,可以看出混药浓度检测技术已经引起了国内外专家学者的广泛关注,并对一些混药浓度的测量方法进行了试验研究。

色谱法、光谱法、生物传感器法和分光光度计法都需要对待测液取样后再进行浓度检测;其中色谱法与生物传感器法需要对样品进行预处理,处理过程比较烦琐;生物传感器法检测出浓度时间较长,总体来说这几种方法都属于取样测量,无法实现混药浓度的在线检测。

光散射法需要混合的药液具有颗粒物,不具有一般性;高速摄像机法需要设备较复杂且昂贵,体积庞大不易于产品化且目前仅能表征混药均匀性;电导率法需要所检测的溶液具有导电性,同样不具有一般性;折射法与光纤传感器法能够实现混药浓度在线检测,但其对光源的聚光要求很高,且其单个光线的偏折受流动液体影响较大,影响测量的稳定性;透光法是分光光度计法的简化,相对于光折射法与光纤传感器法,其受液体流动的影响更小,对光源的要求相对较低、且测量更加精准,测量时再采用一定的误差处理方法,最终浓度测量结果将更加准确。

参考文献

- [1] 张波,翟长远,李瀚哲,等. 精准施药技术与装备发展现状分析[J]. 农机化研究,2016,38(4):1-5,28.
- [2] 杨敏丽,白人朴,刘敏,等. 建设现代农业与农业机械化发展研究[J]. 农业机械学报,2005,36(7):68-72.
- [3] 邱白晶,闰润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2015,46(3):59-72.
- [4] 刘雪美,刘兴华,崔慧媛,等. 作物冠层雾滴沉积研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(11):1-20.
- [5] 张红珍. 农药化肥使用不当的危害及提高农产品质量安全的方法[J]. 现代农业科技,2022(2):203-204.
- [6] 吴虹,赵青霞. 农药使用中存在的问题及科学安全使用[J]. 农业灾害研究,2021,11(11):32-33.
- [7] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等. 基于高频电磁阀的脉宽调制变量喷头喷雾特性[J]. 农业工程学报,2016,32(1):97-103.
- [8] 闫成功,徐丽明,袁全春,等. 基于双目视觉的葡萄园变量喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(11):13-22.
- [9] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文),2020,2(1):133-146.
- [10] DERKSEN R C, ZHU H, OZKAN H E, et al. Determining the influence of spray quality, nozzle type, spray volume, and air-assisted application strategies on deposition of pesticides in soybean canopy[J]. Trans ASABE, 2008, 51(5):1529-1537.
- [11] 代祥,徐幼林,陈骏阳,等. 射流混药器改进提高混药均匀性及动态浓度一致性[J]. 农业工程学报,2019,35(8):65-74.
- [12] GHATE S R, PHATAK S C. A compressed air direct injection pesticide sprayer[J]. Appl Eng Agric, 1991, 7(2):158-162.
- [13] 汪福杰,蒋蕪,石毅新,等. 植保机在线混药系统的设计及混药性能试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(2):236-242.
- [14] 迟明梅,宋坚利,曾爱军,等. 施药条件对施药者体表污染的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(5):276-282.

对谷子生育时期的观测是判断谷子环境适应性的重要途径。在宁夏扬黄灌区(中部干旱带移民搬迁点)引进的 10 个谷子品种中,张杂谷 16 号和张杂谷 18 号不能成熟,其余成熟的 8 个谷子品种均可在该区种植,但谷子不同品种在农艺性状、产量上表现出差异。谷子品种的环境适应性充分体现在器官生物量的分配规律上,尤其是在谷子发育的关键生育期如抽穗期、灌浆期或收获期,叶片、茎秆生物量分配的生育期差异是籽粒产量形成的生物学差异的根本来源^[17]。豫谷 18 号、张青谷 2 号籽粒产量较高,分别为 3 626.85 和 3 513.45 kg/hm²。以养殖业饲草为主要目标,可选择草谷 2 号(饲草型)、张青谷 2 号(饲草型)。综合表现以晋谷 21 号、草谷 2 号(饲草型)较优,更适合在宁夏扬黄灌区(中部干旱带移民搬迁点)种植。

参考文献

- [1] 张艾英,郭二虎,刁现民,等. 2005—2015 年西北春谷中晚熟区谷子育成品种评价[J]. 中国农业科学,2017,50(23):4486—4505.
- [2] 李顺国,刘猛,赵宇,等. 河北省谷子生产现状和技术需求及发展对策[J]. 农业现代化研究,2012,33(3):286—289.
- [3] 赵芳,魏玮,张晓磊,等. 224 个谷子品种农艺性状聚类和相关性分析[J]. 种子,2022,41(1):74—83.
- [4] 刘斌,李书田,王显瑞,等. 谷子主要农艺性状的分析[J]. 种子,2014,33

(5):88—90.

- [5] 刘斐,刘猛,赵宇,等. 河北省山区县域谷子产业发展分析:以武安和蔚县为例[J]. 安徽农业科学,2016,44(5):239—242.
- [6] 朱学海,赵治海. 谷子的生产前景[J]. 张家口农专学报,2000,16(2):52.
- [7] 智慧,李伟,陈宝珠,等. 饲草专用谷子饲草产量和品质性状鉴定研究初报[C]//首届全国谷子产业大会文集. [出版地不详]:[出版者不详],2009:159—165.
- [8] 刁现民. 中国谷子产业与未来发展[M]//刁现民. 中国谷子产业与产业技术体系. 北京:中国农业科学技术出版社,2011:20—30.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [10] 王丹丹,希日格乐,孙宇燕,等. 谷子农艺性状相关性与食味品质分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2015,36(4):29—37.
- [11] 丁瑞霞,贾志宽,韩清芳,等. 宁南旱区微集水种植条件下谷子边际效应和生理特性的响应[J]. 中国农业科学,2006,39(3):494—501.
- [12] 刘正理,程汝宏,张凤莲,等. 不同密度条件下 3 种类型谷子品种产量及其构成要素变化特征研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(5):135—138.
- [13] 杨成元. 春谷产量与其相关性状的关联度分析[J]. 杂粮作物,2002,22(5):259—261.
- [14] 黄英杰,张岩. 谷子品种产量及主要产量构成因素稳定性的分析[J]. 作物杂志,2002(5):43—44.
- [15] 赵禹凯,王显瑞,陈高勋,等. 谷子主要农艺性状的相关和通径分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2014,35(2):35—38.
- [16] 张丽娜,李阳,郭志利,等. 不同品种谷子生长发育及光合水分特性研究[J]. 山西农业科学,2013,41(9):911—913.
- [17] 马天乐,章建新. 不同复种方式麦茬夏大豆的干物质积累、产量及经济效益比较[J]. 作物杂志,2018(1):156—159.

(上接第 9 页)

- [15] HLOBEN P. Study on the response time of direct injection systems for variable rate application of herbicides [D]. Bonn: University of Bonn, 2007.
- [16] FROST A R. A pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines[J]. J Agric Eng Res, 1990,46:55—70.
- [17] MOLINA C, HONING M, BARCELO D. Determination of organophosphorus pesticides in water by solid-phase extraction followed by liquid chromatography/high-flow pneumatically assisted electrospray mass spectrometry[J]. Anal Chem, 1994,66(24):4444—4449.
- [18] JUHLER K R. Optimized method for the determination of organophosphorus pesticides in meat and fatty matrices[J]. J Chromatography A, 1997, 786:145—153.
- [19] 韩莹,陈忠林,沈吉敏,等. 高效液相色谱法测定水中痕量偏二甲肼[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(8):34—38.
- [20] 王忠东,关晓晶,王玉田,等. 基于 CCD 器件的农药荧光检测系统的研究[J]. 光学技术,2005,31(5):653—654,658.
- [21] 赵凤芝,王忠东,郑亚娟. 农药荧光光谱检测与分析系统研究[J]. 光学技术,2008,34(1):82—84.
- [22] KOLLER D M, POSCH A, HÖRL G, et al. Continuous quantitative monitoring of powder mixing dynamics by near-infrared spectroscopy[J]. Power Technol, 2011,205(1/2/3):87—96.
- [23] 陈菁菁,彭彦昆,李永玉,等. 基于高光谱荧光技术的叶菜农药残留快速检测[J]. 农业工程学报,2010,26(S2):1—5.
- [24] 殷磊,邱白晶,邓斌,等. 基于漫反射光谱的叶面药液浓度检测方法[J]. 农业工程学报,2012,28(23):154—159.
- [25] 邱白晶,殷磊. 基于近红外光谱技术的叶面药液浓度检测[J]. 农业机械学报,2012,43(9):197—201,208.
- [26] 陈志刚,张启甲,邱白晶,等. 基于酶传感器的农药浓度快速检测装置研究[J]. 农机化研究,2011,33(12):82—85.
- [27] 陈志刚,张启甲,邱白晶,等. 基于酶传感器的农药浓度便携式实时测量装置[J]. 农业机械学报,2011,42(11):178—182.
- [28] 王冲,陈荣. 基于 SOC 单片机的农药浓度快速检测装置研制[J]. 安徽农业科学,2011,39(29):18274—18275,18289.
- [29] 赵燕燕,刘会芳,许鸣华,等. 百草枯中毒的急救与影响预后的因素分析[J]. 中国急救医学,2007,27(8):733—735.

- [30] 王立伟,蔡东林,吴建浩,等. 小型无人直升机喷雾沉积试验研究[J]. 农机化研究,2013,35(5):183—185.
- [31] OZKAN H E, ACKERMAN K D. Instrumentation for measuring mixture variability in sprayer tanks[J]. Appl Eng Agric, 1999,15(1):19—24.
- [32] 赵四海,李文昌,李明,等. 采用检测光学混浊度确定乳化液浓度方法的研究[J]. 煤炭学报,2011,36(1):157—160.
- [33] 徐幼林,郭敬坤,郑加强. 农药在线混合均匀度高速摄影分析[J]. 农业机械学报,2011,42(8):75—79.
- [34] 代祥,徐幼林,宋海潮,等. 混药器混合均匀性分析方法与在线混合变工况试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):172—179.
- [35] DOWNEY D, CROWE T G, GILES D K, et al. Direct nozzle injection of pesticide concentrate into continuous flow for intermittent spray applications[J]. Trans ASABE, 2006,49(4):865—873.
- [36] 徐溪超. 射流混药装置在线混药性能数值模拟与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2010.
- [37] 张娜,李炳炎. 基于激光技术实现液体浓度测量的新方法[J]. 压电与声光,2006,28(2):240—242,245.
- [38] 张娜,李秀媛. 基于 8031 单片机的智能化液体浓度测量系统的研究[J]. 电子器件,2006,29(1):227—230.
- [39] 田晓华,常彦琴,沈涛,等. 基于光折射法的牛乳乳糖测试技术研究[J]. 科技信息,2011(5):466—467.
- [40] 邱白晶,贾方闻,邓斌,等. 混药质量浓度在线检测装置[J]. 农业机械学报,2014,45(2):99—104.
- [41] VONDRICKA J, LAMMERS P S. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems[J]. Transactions of the ASABE, 2009,52(1):61—66.
- [42] 贾卫东,陈志刚,赵鑫,等. 基于农药光透性的混药比反馈在线混药装置[J]. 农业机械学报,2013,44(8):90—93,164.
- [43] 董晓娅,杨亚飞,邱白晶,等. 便携式混药浓度在线检测装置的设计[J]. 中国农机化学报,2014,35(6):94—98.
- [44] 杨亚飞,崔勇,陶德清,等. 混药浓度在线检测装置的设计与实验研究[J]. 中国农机化学报,2015,36(6):112—115.
- [45] 杨亚飞,王国强,翟旭军,等. 基于线性 CCD 混药浓度在线检测装置性能试验研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(10):142—146.
- [46] 胡静涛,韦飞,时佳,等. 基于光透射法的药液浓度在线检测装置研制[J]. 农机化研究,2022,44(11):31—36.