

直注式变量喷雾机设计与喷雾性能试验*

胡开群¹ 周舟² 祁力钧¹ 王秀³ 冀荣华⁴

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 广州广船国际股份有限公司, 广州 510328;

3. 北京农业信息研究中心, 北京 100097; 4. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

【摘要】 结合 CAN 总线和 ISO11783 协议, 设计了基于处方图的直接注入式变量喷雾机。通过田间常量和变量施药作业试验分析了该直接注入式喷雾机的喷洒均匀性和精准度。试验结果表明: 直接注入式变量喷雾机喷洒均匀, 总体施药变异系数均低于 10%, 适合田间施药作业; 变量作业时, 与预期施药量相差在 15% 以内的作业区大于 86%。

关键词: 直注式变量喷雾机 处方图 喷洒均匀性 精准度 性能分析

中图分类号: S499 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)06-0070-05

Spraying Performance of the Direct Injection Variable-rate Sprayer

Hu Kaiqun¹ Zhou Zhou² Qi Lijun¹ Wang Xiu³ Ji Ronghua⁴

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Guangzhou Shipyard International Company Limited, Guangzhou 510328, China

3. Beijing Agricultural Information Research Center, Beijing 100097, China

4. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

Based on CAN bus and ISO11783 protocol, a direct injection variable-rate sprayer based on the prescription map was developed with the goal of realizing precision pesticide application and improving pesticide application efficiency. The spraying uniformity and accuracy of the direct injection variable-rate sprayer was analyzed through the comparison experiments between constant-rate spraying and variable-rate spraying. The field experiments showed that the spraying variable coefficient was below 10%. On a given field, the area, on which the spray volume difference between the actual spray volume and the volume supposed was less than 15%, was up to 86% of the total.

Key words Direct injection variable-rate sprayer, Prescription map, Spraying uniformity, Precision, Performance analysis

引言

变量施药技术根据变量决策信息来源可分为基于处方图和基于传感器两种变量技术。国内外植保工作者对基于处方图的变量施药技术作了大量研究^[1]。美国 MICRO-TRAK 公司研究生产了 MT 系列自动变量控制系统。邱白晶^[2-3]等研制了一种基

于 GIS 的自动对靶变量施药装置。史万苹^[4]等分析了基于 GPS 和 GIS 的变量喷药控制系统组成及其控制技术。国内外的研究学者对基于传感器的变量施药技术也作了很多研究^[5-7]。变量施药系统根据变量实现原理可以分为药剂注入式控制系统与药剂和水并列注入式控制系统。普渡大学 Ess 等提出药剂注入式控制系统。Rehfeld^[8]设计了定比同轴直

收稿日期: 2009-07-21 修回日期: 2009-11-19

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA100905)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD89B04)

作者简介: 胡开群, 博士生, 主要从事现代农业装备和计算机测控研究, E-mail: hukaiqun@sohu.com

通讯作者: 祁力钧, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备和计算机测控研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

注装置。Womac A R^[9]等设计了药剂和水并列式控制系统。郭宇波^[10]等将静态混合器应用于直注式变量施药系统。周海燕^[11]等提出了一种新型的注入式变比变量施药系统。

我国在变量施药技术方面的研究还处于起步阶段,由于缺乏对农田变量施药系统共性支撑平台技术的研究和开发,应用研究的实用性和整体水平难以提高。本文将基于处方图的变量施药技术和注入式变量施药控制系统结合,设计一套基于处方图的直接注入式变量喷雾机,并通过田间试验检测其性能。

1 直注式变量喷雾机结构设计

1.1 直注式变量喷雾机整体结构

典型的处方图变量施药作业系统包括 DGPS、机载作业控制终端、变量施药控制模块、测速模块以及施药架等主要组成部分。集成上述主要功能模块,结合 CAN 总线和 ISO11783 协议,设计了一台基于处方图的直注式变量喷雾机,其整体结构如图 1 所示。直接注入式喷雾机通过三点悬挂机构与拖拉机相连(拖拉机选用北京弗雷森拖拉机有限公司生产的FS-720 型拖拉机),其喷洒喷杆由 5 段独立的部分组成,每段均由单独的电磁阀进行控制。拖拉

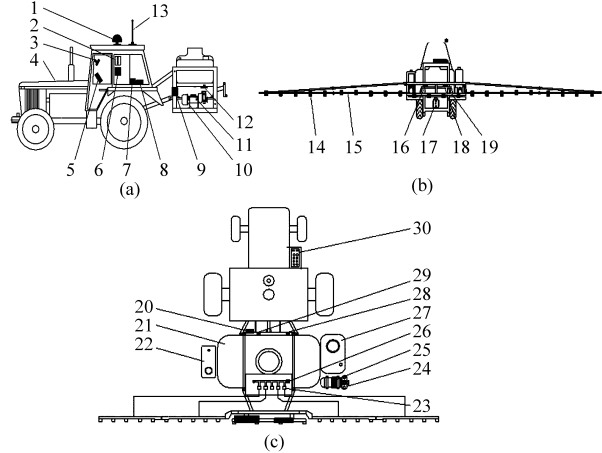


图 1 直接注入式变量喷雾机整体结构图
Fig.1 Whole structure diagram of the direct injection variable-rate sprayer

(a) 左视图 (b) 主视图 (c) 俯视图

- 1. AgGPS 132 接收天线 2. 电磁阀开关控制盒 3. 导航指示控制器 4. 拖拉机 5. 机载作业控制终端 6. 喷杆及速度信号处理器 7. 电源控制盒 8. GPS 接收机 9. 流量/压力信号处理器 10. 流量泵 1 11. 流量泵 1 信号处理器 12. 测速雷达 13. Trimark III 电台及天线 14. 喷头 15. 喷杆 16. 流体混合器 17. 隔膜泵 18. 流量传感器 19. 流量控制阀 20. 一级过滤器(水) 21. 水箱 22. 药箱 1 23. 电磁阀 24. 流量泵 2 25. 流量泵 2 信号处理器 26. 压力传感器 27. 药箱 2 28. 二级过滤器(水) 29. 手动调压阀 30. 蓄电池

机后动力输出轴与喷雾机的隔膜加压泵通过万向联轴器连接在一起,整个喷杆的高度能根据作物情况进行上、下自由调整。在施药作业过程中,机载作业控制终端根据作业处方图、喷雾机前进速度以及 GPS 定位信息分别控制农药(两种不同的农药分别控制)和清水的注入量。其中,清水由隔膜加压泵加压注入,而两种农药则通过各自的注入泵加压注入,最终三者都注入到主管路中,由流体在主管路中的自身运行以及旋转式混药器混合均匀。

1.2 CAN 总线控制结构

直注式变量喷雾系统采用 CAN 总线连接各模块,控制结构如图 2 所示。

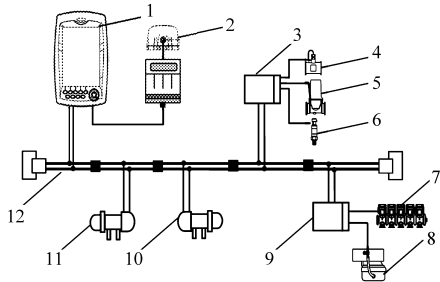


图 2 直接注入式变量喷雾机 CAN 总线控制结构图

Fig.2 CAN bus control structure diagram of the direct injection variable-rate sprayer

- 1. 机载作业控制终端 2. GPS 接收机及天线 3. 控制器 1 4. 流量传感器 5. 流量控制阀 6. 压力传感器 7. 电磁阀 8. 测速雷达 9. 控制器 2 10. 流量泵 2 11. 流量泵 1 12. CAN 总线

其中:控制器 1 控制水的注入量,流量泵 1 和 2 分别控制两种农药的注入量,测速雷达测量喷雾机的前进速度。总线控制系统硬件选用如下:GPS 系统为美国 Trimble 公司生产的 AgGPS 132 接收系统;施药作业控制终端为 Raven viper 2;流量泵为 Raven Injection pump 510 型计量泵;流量传感器为 WL-40 型涡轮传感器;流量控制阀为 RAVEN C-SD (标准控制阀);电磁阀为 Teejet 450FB;压力传感器为压阻式压力传感器;测速雷达为四束多普勒雷达。

直注式变量喷雾机各模块之间通过总线连接,按照 ISO11783 通信协议进行通信。总线系统先进行初始化,初始化完成后进入正常作业过程,执行如下通信流程:①机载作业控制终端解析 GPS 定位信息,运行实时处方图识别程序,得出当前位置的用药和用水量,作为控制指令发送给变量施药控制模块(流量泵和注水控制节点)。②机载作业控制终端等待变量施药控制模块应答。③变量施药控制模块接收来自机载作业控制终端的注药和注水控制指令,同时向测速模块发送速度数据请求信息。④变量施药控制模块得到测速模块当前作业机械速度数据,同时检测到流量泵和流量控制阀反馈信息,运行

控制程序,输出模拟控制信号。⑤变量施药控制模块检测各流量数据,根据标定的用水和用药控制曲线,计算出当前实际用药和用水量,发送到机载作业控制终端。⑥机载作业控制终端保存当前位置、实际用水和用药量数据。⑦系统继续进行下一位置作业控制任务。

2 直注式变量喷雾机田间施药试验

2.1 试验设计

试验包括常量施药试验和变量施药试验。设计较低施药量 0.36 L/hm² 和较高施药量 0.90 L/hm² 两个常量施药试验和一个变量施药试验。变量施药试验参照北京市精准农业示范基地小麦的通常施药情况(敌敌畏 0.75 L/hm²),设定施药量为 0~0.90 L/hm²,按照平均分级原则,分为 0.18、0.36、0.54、0.72 和 0.90 L/hm² 5 个等级。对一个工作中的喷杆喷雾机,单位面积上的施药液量取决于其行驶速度、喷幅宽度及喷头的喷量,它们之间关系为

$$G = \frac{QBv}{600} \tag{1}$$

其中 $G = gn$ $B = dn$
式中 G ——所有喷头的喷量,L/min
 Q ——施药液量,L/hm²
 g ——单个喷头的喷量,L/min
 n ——喷头个数
 B ——喷雾机作业幅宽,m
 d ——相邻喷头间间距,m
 v ——机组作业速度,km/h

常量和变量施药试验过程中喷雾机均保持匀速行驶,设定其行驶速度 v 为 6 km/h,单位面积施药液量为 225 L/hm²(由于注药量远小于注水量,所以忽略不计药量),所有试验过程均保持注水量恒定。

2.2 试验设计

直接注入式喷雾机田间施药试验于 2009 年 3 月 17 日~3 月 20 日,在北京市精准农业示范基地进行,试验步骤如下:

- (1) 对喷雾机的雷达测速传感器和流量泵进行校核,以减小误差,并将施药工作压力调整为常用额定工作压力 276 kPa(试验中采用 teejet XR8003 喷头)。
- (2) 试验以质量浓度为 1 g/L 若丹明 WT 为示踪剂检测各采集样本上的药液沉积量。
- (3) 参照 JB/T 9805.2,喷雾机上的喷头离地高度调整为 0.5 m,并测定施药幅宽。
- (4) 选择一块地面平坦的区域布置采样滤纸,用 Trimble 5700 GPS 接收机测量试验区域的一个基

准点,然后以此为基点在各个采样单元内随机地布置滤纸。根据直接注入式喷雾机机组的结构尺寸(喷雾机喷幅 12 m),以及气象条件(试验时气温为 27.0℃,相对湿度为 67.5%,自然风速为 0.10~0.25 m/s,风向为北风)设计长 100 m,宽 24 m 的采样区域。

试验采样区域分顺风 and 逆风两部分采样区,每个采样区沿作业方向平均划分为 50 个采集单元(间隔 2 m),每个单元内随机布置 3 张直径为 9.0 cm 的滤纸组成该单元的药液采集样本组,均用双面胶粘贴在铁片上以防止被风吹走。顺风采样区采集样本编号为 S01-X~S50-X,逆风采样区为 N50-X~N01-X(X 为每个采样单元内各样点的编号)。各采集样本的布置方案及布置位置如图 3 所示。

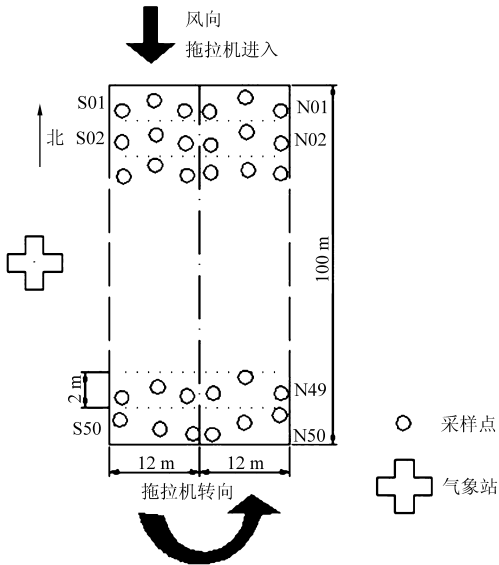


图 3 直接注入式变量喷雾机田间施药试验
采样布置图
Fig.3 Sampling layout of field application experiment
of the direct injection variable-rate sprayer

- (5) 根据选定的采样区域分别制作常量施药处方图和变量施药处方图。①常量施药:以北京小汤山国家精准农业示范基地的基础地理信息图层为底图图层,在 ArcMap 中创建一个 100 m×24 m 的施药区域图层(采样区域),设置施药量为 0.36 L/hm²。并将底图图层和施药区图层分别导入 Viper 2 系统创建的工程文件中,形成一个常量施药作业工程,所有的空间数据均为 WGS-84 坐标。以同样的方法制作施药量为 0.90 L/hm² 的常量施药处方图。②变量施药:与常量施药类似,只是将施药区域图层划分成多个矩形小区块,不同区块施药量各异。

图 4 为直接注入式喷雾机的常量施药和变量施药试验处方图,常量和变量施药试验的试验区域相

同,均为图 4a 所示“试验区域”,只是作业处方图中的施药量不同。图 4b 为变量施药试验处方图,不同颜色区块按照不同的施药量进行喷施,分别为 0.18、0.36、0.54、0.72 和 0.90 L/hm²。

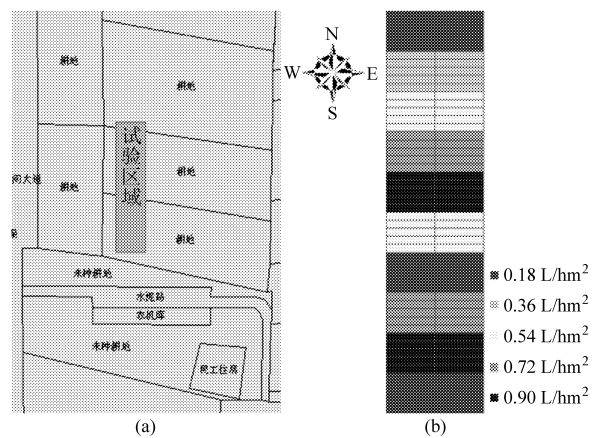


图 4 直接注入式变量喷雾机田间施药处方图
Fig. 4 Field application prescription map of the direct injection variable-rate sprayer
(a) 常量施药试验处方图及试验区域 (b) 变量施药试验处方图

(6) 试验测得直接注入式喷雾机在匀速行驶情况下其延时时间为 11.3 ~ 12.1 s; 另外, 根据 Anglund E A^[12] 等的研究成果得出了 GPS 判断位置的信号延时是 0.5 s, 所以在控制器中设定 12.2 s 的时间提前量, 并将处方图导入控制器生成作业工程。

(7) 田间施药试验, 拖拉机由顺风方向进入采样区, 然后再从采样区末端转弯逆风进入另一半采

样区进行试验, 拖拉机在行进过程中尽量保持恒定的作业速度。

(8) 每次施药后 10 min 左右, 将所有滤纸快速收集起来分别装入事先编好号的采样瓶中, 在每个采样瓶中加入 25 mL 自来水轻摇 15 s, 然后密闭保存 4 h 后用荧光仪进行测量。经测量得到各采样点的样本洗取液浓度, 然后计算出采样点所在区域单位面积的实际喷量

$$G_A = \frac{C_2 V}{ARC_1} \tag{2}$$

式中 G_A ——单位面积的喷量, L/hm²
 C_1 ——原液质量浓度, g/L
 C_2 ——洗取液质量浓度, g/L
 V ——洗取液体积, L
 A ——滤纸面积, hm²
 R ——回收率, %

试验测得: 阴天无遮盖条件下, 施药后 10 min 左右进行滤纸回收, 若丹明 WT 沉积于滤纸的回收率最佳, 其值为 99.45%。因此, 本试验选择在阴天无遮盖条件下进行, 且施药后 10 min 左右进行滤纸回收。

2.3 试验结果及分析

2.3.1 常量施药分布均匀性分析

将施药量 0.36 L/hm² 和 0.90 L/hm² 在采样区内各进行一次试验, 分别对每个采样单元内的 3 片滤纸采集到的数据进行平均, 统计结果如表 1 所示。

表 1 直接注入式变量喷雾机田间常量施药试验统计结果

Tab. 1 Statistical results of field constant application experiment of the direct injection variable-rate sprayer						
目标施药量/L·hm ⁻²	目标质量浓度/μg·L ⁻¹	最大值/μg·L ⁻¹	最小值/μg·L ⁻¹	均值/μg·L ⁻¹	标准差/μg·L ⁻¹	变异系数/%
0.36(顺风)	9.16	10.54	7.60	9.11	0.89	9.81
0.36(逆风)	9.16	10.75	7.52	9.13	0.87	9.51
0.90(顺风)	22.90	26.87	18.98	22.14	2.21	9.98
0.90(逆风)	22.90	26.36	18.64	22.32	2.18	9.78

加拿大普拉雷农业机械研究所的研究报告认为: 变异系数小于 10%, 其施药分布是非常一致的; 变异系数为 10% ~ 15% 的施药分布可以接受或能用; 而变异系数大于 15% 时分布模型将无法在田间使用^[13]。

由表 1 可以看出, 两次常量施药试验的变异系数均小于 10%, 说明直接注入式喷雾机的施药分布均匀性很好, 适合进行田间作业。顺风和逆风两种条件下试验结果差异较小, 主要是由于试验时风力较小, 对喷雾作业的影响不大。两种不同的施药量, 总体施药变异系数几乎相同, 说明施药量对施药均匀性影响很小。

2.3.2 变量施药精准度分析

实际施药量与预期喷量进行比较如表 2 所示。由表可知: 逆风作业方向的误差比顺风作业方向的小, 可能原因是拖拉机对风有一定的阻碍作用, 减小了飘移; 施药误差在 15% 以上的采样区较小, 如果在实际田间作业时将施药量进行适当的修正, 可以使其作业效果得到较大改善(比如设置修正系数为 1.15)。

目前, 变量施药技术施药精准度还没有一个统一的标准, 本文参考常规喷雾分布均匀性应在 10% 以内的要求, 并根据变量喷雾的特点, 设定实际施药量与预期施药量相差在 15% 以内的采样点都认为

是施药认可量,则该喷雾机变量施药靶标精准度大于 86%。

表 2 直接注入式变量喷雾机变量喷洒误差分析

Tab.2 Error analysis of variable-rate application of the direct injection variable-rate sprayer

风向	误差范围	采样点数	采样比例/%
顺风	0 ~ 5%	14	28
	5% ~ 10%	14	28
	10% ~ 15%	19	38
	15% 以上	3	6
逆风	0 ~ 5%	16	32
	5% ~ 10%	18	36
	10% ~ 15%	9	18
	15% 以上	7	14

图 5 为变量作业施药量变化曲线。由图可以得出:实际喷药量能够及时响应处方变化量(期望喷药量);在实际作业时,虽响应及时,但相对来说,与预期喷药量的偏差要较其他的时间段大一些,由此也说明如果喷药量变化频繁将会影响施药的精

准度。

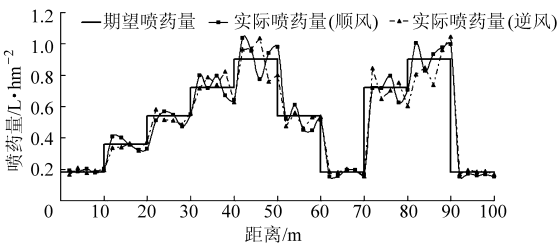


图 5 直接注入式变量喷雾机变量施药时喷量变化曲线
Fig.5 Application rate change curve of the variable-rate application of the direct injection variable-rate sprayer

3 结束语

设计了基于处方图的直接注入式变量喷雾机,并通过两个常量(0.36 L/hm²和 0.90 L/hm²)和一个变量田间施药试验(0~0.9 L/hm²),分析了直接注入式变量喷雾机的施药均匀性和变量精准度;两个常量施药试验得出总体施药变异系数均低于 10%;变量田间施药试验得出直注式变量喷雾机在不同误差范围内的对靶率,其中达到设定的 15%误差范围内的作业区域大于 86%。

参 考 文 献

1 Rockwell A D, Ayers P D. Variable rate sprayer development and evaluation[J]. Applied Engineering in Agriculture,1994, 10(3):327~333.

2 邱白晶,李会芳,吴春笃,等. 变量喷雾装置及关键技术的探讨[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2004,25(2):97~100.
Qiu Baijing, Li Huifang, Wu Chundu, et al. On variable-rate spraying equipment and its key technology[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2004,25(2):97~100. (in Chinese)

3 李会芳,邱白晶,刘保玲,等. 对精确农业中变量喷雾控制的研究[J]. 中国农机化,2004(3):25~27.
Li Huifang, Qiu Baijing, Liu Baoling, et al. Study on the control of variable-rate spraying in precision agriculture[J]. Chinese Agricultural Mechanization,2004(3):25~27. (in Chinese)

4 史万苹,王熙,王新忠,等. 基于 GPS 和 GIS 的变量喷药技术研究[J]. 农机化研究,2007,29(2):19~21.
Shi Wanping, Wang Xi, Wang Xinzhong, et al. Variable rate spraying technology on the basis of GPS and GIS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(2):19~21. (in Chinese)

5 邓巍,何雄奎,张录达,等. 自动对靶喷雾靶标红外探测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(10):2 285~2 289.
Deng Wei, He Xiongkui, Zhang Luda, et al. Target infrared detection in target spray[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10):2 285~2 289. (in Chinese)

6 冀荣华,祁力钧,傅泽田. 自动对靶施药系统中植物病害识别技术的研究[J]. 农业机械学报,2007,38(6):190~192.
Ji Ronghua, Qi Lijun, Fu Zetian. Research of recognition technology to plant disease in automatic target spraying system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6):190~192. (in Chinese)

7 Gil E, Escola A, Rosell J R, et al. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors [J]. Crop Protection, 2007, 26(8):1 287~1 297.

8 Rehfeld F L. Fluid motor metering device:USA,4832071[P]. 1987-12-28.

9 Womac A R, Valcore D L, Maynard II R A. Variable-concentration direct injection from fixed-ratio diluent-driven pumps [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(6): 121~128.

10 郭宇波,何雄奎,宋坚利,等. 静态混合器在自动混药装置中的应用[J]. 农机化研究, 2008,30(2): 147~149.
Guo Yubo, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Application of static state blender in auto mix pesticide equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(2):147~149. (in Chinese)

- 8 Torri S I, Lavado R S. Dynamics of Cd, Cu and Pb added to soil through different kinds of sewage sludge[J]. Waste Management, 2008, 28(5): 821 ~ 832.
- 9 孙西宁, 张增强, 张永涛, 等. 陕西杨凌污水处理厂污泥成分月际变化及其土地利用探讨[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(9): 215 ~ 220.
Sun Xining, Zhang Zengqiang, Zhang Yongtao, et al. Components change of sewage sludge by month and land application in Shaanxi Yangling sewage treatment plant[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science, 2007, 35(9): 215 ~ 220. (in Chinese)
- 10 曾现来, 张增强, 张永涛, 等. 城市生活垃圾堆肥试验装置的设计[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(10): 109 ~ 112.
Zeng Xianlai, Zhang Zengqiang, Zhang Yongtao, et al. Design of a composting reactor for municipal solid waste composting[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(10): 109 ~ 112. (in Chinese)
- 11 Soumia A, Mohamed H, Georges M, et al. Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge[J]. Chemosphere, 2005, 59(6): 801 ~ 810.
- 12 GB 18918—2002. 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
GB 18918—2002. Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant[S]. (in Chinese)
- 13 GB 4284—84. 农用污泥中污染物控制标准[S].
GB 4284—84. Control standards for pollutants in sludges from agricultural use[S]. (in Chinese)
- 14 孙西宁, 李艳霞, 张增强, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态变化[J]. 环境科学学报, 2009, 29(9): 1 836 ~ 1 841.
Sun Xining, Li Yanxia, Zhang Zengqiang, et al. Extractable forms of heavy metals produced during municipal sludge composting[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(9): 1 836 ~ 1 841. (in Chinese)
- 15 孟昭福, 张增强, 薛澄泽, 等. 替代黑麦幼苗测定土壤中重金属生物有效性的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 337 ~ 340.
Meng ZhaoFu, Zhang Zengqiang, Xue Chengze, et al. Determination of bioavailability of heavy metals in soil by wheat young seedlings in stead of rye[J]. Agro-environmental Protection, 2001, 20(5): 337 ~ 340. (in Chinese)
- 16 殷宪强, 张增强, 孙慧敏, 等. 施用污泥堆肥对土壤中 Cu Zn 形态分布的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 448 ~ 451.
Yin Xianqiang, Zhang Zengqiang, Sun Huimin, et al. Fractional distribution of copper and zinc in a soil amended with composted sludge[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(3): 448 ~ 451. (in Chinese)
- 17 陈同斌, 杭世珩, 徐云, 等. 对《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》的思考[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 101 ~ 108.
Chen Tongbin, Hang Shijun, Xu Yun, et al. Thinking on disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant the quality of sludge used in agriculture[J]. China Water & Waste Water, 2009, 25(9): 101 ~ 108. (in Chinese)
- 18 GB 15618—1995. 土壤环境质量标准[S].
GB 15618—1995. Environmental quality standard for soils[S]. (in Chinese)
- 19 李健, 郑春江, 郭希利, 等. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- 20 Muller G. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971[J]. Umschau, 1979, 79: 778 ~ 783.
- 21 任福民, 周玉松, 牛牧晨, 等. 污泥中的重金属特性分析和生态风险评价[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(1): 102 ~ 105.
Ren Fumin, Zhou Yusong, Niu Muchen, et al. Characteristics analysis and environmental assessment on heavy metals in the sludge of sewage[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(1): 102 ~ 105. (in Chinese)

(上接第 74 页)

- 11 周海燕, 杨学军, 严荷荣, 等. 注入式变比变量施药系统[C] // 中国农业机械学会 2008 年学术年会论文集, 2008: 123 ~ 125.
- 12 Anglund E A, Ayers P D. Field evaluation of response times for a variable rate liquid chemical applicator[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(3): 273 ~ 282.
- 13 Prairie Agricultural Machinery Institute. Flexi-coil mode 1562 field sprayer, evaluation report 527 [R]. Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1987.
- 14 刘志壮, 徐汉虹, 洪添胜, 等. 在线混药式变量喷雾系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 93 ~ 96, 129.
Liu Zhizhuang, Xu Hanhong, Hong Tiansheng, et al. Key technology of variable-rate spraying system of online mixing pesticide[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 93 ~ 96, 129. (in Chinese)