

圆形喷灌机泵注式施肥装置设计与田间试验*

严海军 马 静 王志鹏

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 圆形喷灌机水肥一体化作业时对喷洒肥液均匀性有较高要求,需要采用比例施肥装置,确保注入喷灌机的肥液流量保持恒定。为此设计了基于柱塞式注肥泵的泵注式施肥装置,并以注射喷嘴的孔口直径、安装位置以及注肥泵的电源频率为变量,进行了圆形喷灌机应用泵注式施肥装置的喷灌施肥均匀性试验。结果表明,圆形喷灌机停止状态下,注肥泵电源频率 50 Hz 运行时,3 种注射喷嘴孔口直径和 3 种安装位置的组合工况下喷灌施肥的均匀系数 C_U 为 99.00% ~ 99.65%,变异系数 C_V 为 0.46% ~ 1.37%,其中当注射喷嘴孔口直径为 2.5 mm、安装在进水管水平段位置的工况时获得的喷灌施肥均匀性最佳。圆形喷灌机行走状态下,测得单列雨量筒喷灌施肥均匀系数 C_{UH}^* 为 88.77% ~ 90.66%,表明圆形喷灌机采用泵注式施肥装置能够获得较高的喷灌施肥均匀性。此外,通过对比注肥泵电源频率在 50 Hz 和 46 Hz 时的喷灌施肥均匀性,发现喷头喷洒肥液的电导率总平均值与电源频率之间具有显著的正相关性,表明改变注肥泵的电源频率是圆形喷灌机实现高均匀度变量喷灌施肥的一种有效途径。

关键词: 圆形喷灌机 泵注式施肥装置 喷灌施肥均匀性 田间试验

中图分类号: S277.9⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0100-07

Design and Field Experiment on Fertilizer Injection Device in Center Pivot Irrigation System

Yan Haijun Ma Jing Wang Zhipeng

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As the center pivot irrigation system requires high fertigation uniformity, a kind of proportional fertilizing device was adopted in order to make the injection flux of fertilizer solution stable. A fertilizer injection device with plunger pump was designed. Based on the orifice size and installation location of injection check valve, and power frequency of plunger pump, field experiments on a center pivot irrigation system with fertilizer injection device were carried out to evaluate fertigation uniformity. The results indicated that when the center pivot irrigation system stopped and the plunger pump worked with power frequency of 50 Hz, the Christiansen uniformity coefficient C_U and variation coefficient C_V of fertigation ranged from 99.00% to 99.65% and from 0.46% to 1.37% respectively under the combination of three orifice diameters and three installation locations. The maximum C_U could be obtained by using the injection check valve with the orifice diameter of 2.5 mm and the installation positioned at the horizontal inlet pipe. And when the center pivot irrigation system ran, the Heermann - Hein uniformity coefficient of fertigation C_{UH}^* with single line catch-cans ranged from 88.77% to 90.66%, which indicated that the center pivot irrigation system can obtain high fertigation uniformity with the fertilizer injection device. In addition, the fertigation uniformity was compared with plunger pump working at power frequency and non-power frequency of 46 Hz. It was found that the average electrical conductivity of fertilizer solution had a significant positive correlation with the power frequency. Thus, changing the power frequency of plunger pump can provide an effective way to achieve high uniformity of

收稿日期: 2015-02-09 修回日期: 2015-03-16

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100506)、国家自然科学基金资助项目(51321001)和北京市科技计划资助项目(D131100000713002)

作者简介: 严海军,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术与装备研究,E-mail: yanhj@cau.edu.cn

variable rate fertigation for the center pivot irrigation system.

Key words: Center pivot irrigation system Fertilizer injection device Fertigation uniformity Field experiment

引言

圆形喷灌机凭借其自动化水平高、操作简单、劳动强度低,以及对地形、土壤和作物适应性强等优点,近年来在黑龙江省、内蒙古自治区、吉林省、河北省等地得到了快速推广^[1]。据不完全统计,截止 2013 年底,国内已安装的圆形喷灌机保有量超过 1.5 万套,灌溉面积近 40 万 hm²。利用喷灌、微灌系统输配水全管道化的技术优势,将灌溉与施肥有机结合,实现水肥一体化作业是现代精准农业的重要特征^[2-4]。实践证明,圆形喷灌机对作物进行均匀、适量的喷洒肥液,可以提高水肥利用率以及作物的产量和品质,降低劳动强度^[5-6]。目前国内的圆形喷灌机已逐渐推广水肥一体化技术,但选用的施肥装置普遍采用高压清洗机、植保施药机具、管道离心泵等,其性能参数不能满足圆形喷灌机的施肥要求,致使施肥均匀性较差,水肥利用率较低,影响了作物产量和品质^[7-8]。作为一种行喷式喷灌机组,圆形喷灌机喷灌施肥一体化作业时需要采用比例施肥装置,要求注入喷灌机的肥液流量(浓度)保持恒定,以实现高均匀度的施肥效果^[9-10]。根据国内圆形喷灌机喷灌施肥的实际特点,本文设计一种专用的柱塞式注肥泵及其成套的泵注式施肥装置,并应用此施肥装置进行圆形喷灌机喷灌施肥的田间试验,研究施肥装置的运行参数、安装方式以及注肥泵电源频率对喷灌施肥均匀性的影响,为圆形喷灌机水肥一体化技术推广和应用提供技术依据。

1 施肥装置设计

1.1 装置结构组成

圆形喷灌机喷灌施肥时机组处于行走状态,对施肥装置的工作性能要求较高,必须保证注入喷灌机的肥液流量或浓度保持不变,而且不受机组主灌溉管道中水压变化的影响,因此在滴灌系统、微喷灌系统中广泛应用的压差式施肥罐、文丘里施肥器等均不适合用于圆形喷灌机的施肥。本文设计的圆形喷灌机配套专用的泵注式施肥装置由储肥桶、搅拌器、泵流量率定管、注肥泵、注射喷嘴以及连接附件等组成。图 1 和图 2 分别为装置示意图和现场实物图。该施肥装置依靠电力驱动的注肥泵提供动力,抽取储肥桶中搅拌均匀的配置肥液,通过注射喷嘴

将肥液均匀地注入到喷灌机的输水管内,与灌溉清水混合稀释后由悬挂的低压喷头喷洒,实现水肥一体化作业。

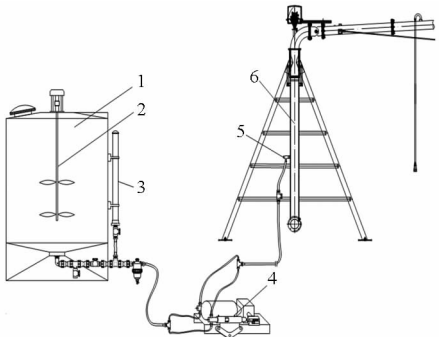


图 1 泵注式施肥装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of fertilizer injection device

1. 储肥桶 2. 搅拌器 3. 泵流量率定管 4. 注肥泵 5. 注射喷嘴 6. 圆形喷灌机组



图 2 泵注式施肥装置实物图

Fig.2 Picture of fertilizer injection device

1.2 关键部件设计

1.2.1 注肥泵

符合施肥装置工作要求的注肥泵应为容积式泵,一般可选择柱塞式、活塞式、隔膜式注肥泵。从降低加工成本、简化维护保养、提高使用可靠性以及与圆形喷灌机方便配套等因素综合考虑,本文选择水平布置的卧式单作用柱塞式注肥泵,有单缸和双缸 2 种形式^[11]。

因受灌溉地块面积、供水机井出水量等影响,目前国内多数圆形喷灌机的有效半径为 200 ~ 330 m,入机流量范围为 80 ~ 160 m³/h,入机压力一般为 0.2 ~ 0.4 MPa;同时,作物对喷洒肥液浓度要求不宜超过 0.3%^[2]。经过计算,注肥泵的设计最大工作压力 1.0 MPa,双缸设计流量 300 L/h 和 600 L/h,即单缸设计流量 150 L/h 和 300 L/h,可以满足国内绝大多数圆形喷灌机的喷灌施肥要求。

1.2.2 储肥桶

储肥桶设计成圆形筒体状,其顶盖加装竖式或斜式电动搅拌器,可以提高肥料的混合效果,桶底宜设计成锥形结构,并用托架支撑,可方便排尽肥液和清洗储肥桶。桶顶设有直径40~50 cm的肥料加入口以及直径5 cm的清水注入口,为方便操作,桶顶距地面不宜超过1.4 m。确定储肥桶容积时需考虑以下因素:完成一次施肥作业所需的肥料配置次数尽量少。与注肥泵工作流量相匹配,使单桶肥液注完时间适宜。与电动搅拌器的合理匹配,提高搅拌混合效果。考虑储肥桶的加工、运输成本和使用方便性。经过计算,储肥桶容积宜设计为2 000 L和3 000 L两种规格。

1.2.3 注射喷嘴

注射喷嘴是泵注式施肥装置的关键设备,其性能优劣对灌溉施肥均匀性和系统的良好运行具有重要作用。设计注射喷嘴时,除要求其水力和机械性能良好、结构简单、工作可靠外,还必须具有以下2个功能:喷射肥液与灌溉水混合均匀效果好;具有单向止回功能,可防止灌溉水倒流。本文设计的注射喷嘴安装示意图如图3所示,注射喷嘴的格林接头与注肥泵缸体出口管道相连,另一端插入圆形喷灌机进水管内,且出口头部周向设置有4个喷嘴孔口,孔口正好位于进水管的中心轴线处。注射喷嘴的孔口直径、孔口数目以及进水管的安装位置都将影响肥液与灌溉水的混合效果。本文设计的注射喷嘴孔口数目为4个,孔口直径和安装位置在试验部分确定。

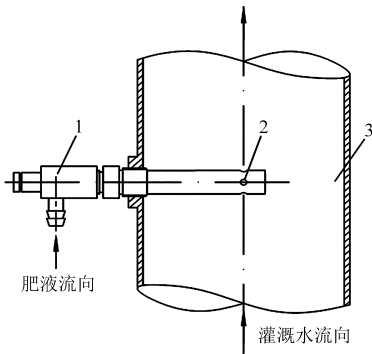


图3 注射喷嘴安装示意图

Fig.3 Schematic installation diagram of injection check valve
1. 喷嘴主体 2. 喷嘴孔口 3. 喷灌机进水管

1.2.4 泵流量率定管

圆形喷灌机喷灌施肥时可根据实际情况,通过调节注肥泵的曲柄连杆机构改变注肥泵的流量,行程调节范围是最大设计流量的10%~100%,因此当调节流量后,需要精确测定注肥泵的实际流量。设计的泵流量率定管与储肥桶构成连通器联合工

作,管外壁附有刻度。测定时,通过观测注肥泵在一定工作时间内率定管内肥液高度的变化,换算出储肥桶内的肥液容积变化量,从而计算得到注肥泵的实际流量。率定管结构简单,操作方便,测量精度较高。本文设计的率定管外径63 mm,壁厚3 mm,长度1 m。

2 施肥装置应用

2.1 试验样机

圆形喷灌机泵注式施肥装置的应用试验在中国农业大学涿州教科基地进行。试验的圆形喷灌机整体机组长度140 m,由37 m、38 m、50 m三跨桁架和15 m悬臂组成,配置美国Nelson公司的R3000型喷头,喷水盘颜色棕色,喷头间距4.2 m,共安装34个喷头,悬臂末端未安装尾枪。为提高喷头水量分布均匀性,每个喷头上部安装了Nelson公司生产的138 kPa压力调节器。试验水源由机井提供,喷头配置的机组总流量为61 m³/h,在喷灌机组入口处的水压达到0.26 MPa,满足试验要求。试验的注肥泵为加工样机,因两缸体尺寸的加工偏差,造成注肥泵的实际流量为230 L/h^[11]。由于储肥桶在试验前未完成加工,所以试验选用圆筒状储肥桶,容积0.3 m³,用人工搅拌溶解肥料,但这些并不会影响泵注式施肥装置的试验结果。

2.2 试验方案

圆形喷灌机的喷灌施肥均匀性可分为整机喷洒均匀性以及单个喷头喷洒肥液浓度的均匀性两部分。本文重点分析圆形喷灌机静止状态时刚离开喷头喷嘴的喷洒肥液浓度和运行状态时测得的田间喷洒肥液浓度,从而评价圆形喷灌机安装泵注式施肥装置后的喷灌施肥效果。

2.2.1 肥液配比与浓度标定

氯化钾属强电解质,其水溶液的导电能力强,因此试验中选择氯化钾肥料,氯化钾肥液质量分数通过电导率求得^[12-13]。肥液的电导率测定采用哈希sensION156型多功能参数测量仪,仪器显示值均为25℃时的标准电导率。预备试验标定得到了氯化钾肥液质量分数和电导率之间的拟合公式为

$$E_c = 22\,441C + 771.48 \quad (R^2 = 0.995) \quad (1)$$

其中 $C = \frac{m}{m + m_w} \times 100\%$

式中 E_c ——电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$
 C ——肥液中氯化钾的质量分数, %
 m ——肥料质量, kg
 m_w ——水质量, kg

式(1)的决定系数为0.995,表明氯化钾肥液电

导率与肥液质量分数之间呈极显著水平。参照氯化钾的溶解特性^[2],储肥桶中肥液按照氯化钾肥料和清水的质量比 0.26:1 进行配置。当注肥泵流量为 230 L/h、喷灌机入机流量为 61 m³/h 时,氯化钾肥液注入喷灌机进水管,混合稀释后的肥液质量分数理论值为 0.098%,由式(1)得到相应的电导率理论值为 2 970 μS/cm。

2.2.2 圆形喷灌机停止状态试验

为了研究注射喷嘴孔口直径和安装位置对喷灌施肥均匀性的影响,试验选取注射喷嘴的孔口直径和安装位置两个因素,采用正交设计。注射喷嘴有 4 个均匀布置的孔口,孔口直径分 1.5、2.5、3.5 mm 3 个水平,分别记为 A₁、A₂、A₃。注射喷嘴的安装位置共有 3 处,分别位于进水管水平段(位置 1)、水平段与垂直段交汇处的弯管段(位置 2)和进水管垂直段(位置 3),分别记为 B₁、B₂、B₃,如图 4 所示。为了分析注肥泵不同工作流量对喷洒肥液均匀性的影响,注肥泵的电源频率选取 50 Hz 和 46 Hz 两个水平,分别记为 C₁、C₂。试验中只测定了注肥泵电源频率 46 Hz、安装注射喷嘴孔口直径 2.5 mm 时的喷洒肥液浓度。试验方案如表 1 所示。

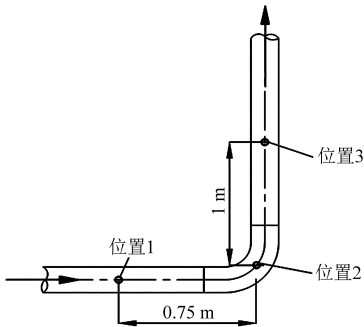


图 4 注射喷嘴的安装位置

Fig. 4 Installation location diagram of injection check valve

表 1 圆形喷灌机喷灌施肥均匀性试验方案设计

Tab.1 Test design for fertigation uniformity of center pivot irrigation system

试验序号	因素		
	孔口直径 A	位置 B	电源频率 C
1	1	1	1
2	1	2	1
3	1	3	1
4	2	1	1
5	2	2	1
6	2	3	1
7	3	1	1
8	3	2	1
9	3	3	1
10	2	1	2
11	2	2	2
12	2	3	2

每个工况试验时先启动圆形喷灌机、再启动注肥泵,待喷灌机最远端的喷头正常喷洒肥液后,再进行喷灌施肥均匀性试验。因受试验条件限制,将圆形喷灌机安装的 34 个喷头分成 5 组,人工使用雨量筒逐个接收每个喷头的喷洒肥液 200 mL 左右,并用多功能参数测量仪测定肥液电导率。

2.2.3 圆形喷灌机行走状态试验

为了准确评价实际喷灌施肥均匀性效果,参照文献[14]进行了圆形喷灌机喷灌施肥均匀性试验。沿喷灌机中心支轴径向布置 A、B 共 2 列雨量筒,雨量筒交错布置间距为 3 m,2 列雨量筒最外侧间距 20 m,如图 5 所示。试验在 A₂B₂C₁ 工况下开展,喷灌机百分率计时器的设定值为 100%,即最快行走速度运行。由于储肥桶容积有限,不能提供喷灌机完整覆盖 2 列雨量筒所需肥液量,因此只对 A 列雨量筒进行了肥液测试。

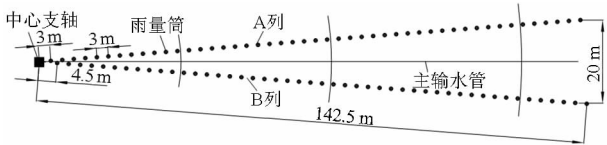


图 5 圆形喷灌机喷灌施肥均匀性测试雨量筒布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of catch-cans layout for fertigation uniformity test of center pivot irrigation system

2.3 喷灌施肥均匀性评价模型

圆形喷灌机静止状态时刚离开喷头喷嘴的喷洒肥液浓度均匀性测定可用克里斯琴森均匀系数 C_U 和变异系数 C_V 表示。

(1) 克里斯琴森均匀系数 C_U: 参照表征喷灌水量分布均匀性的克里斯琴森均匀系数^[15], 即

$$C_U = \left(1 - \frac{|\Delta E_c|}{E_c}\right) \times 100\%$$
 (2)

式中 C_U——克里斯琴森均匀系数, %

ΔE_c——所有雨量筒中肥液电导率(或肥液浓度)的平均偏差, μS/cm

E_c——所有雨量筒中肥液电导率(或肥液浓度)的算术平均值, μS/cm

(2) 变异系数 C_V: 用于表示各雨量筒电导率(或肥液浓度)的标准偏差与算术平均值的比值。喷灌施肥均匀性越高,测得的变异系数越小。计算公式为

$$C_V = \frac{S}{E_c} \times 100\%$$
 (3)

式中 C_V——变异系数, %

S——所有雨量筒中肥液电导率(或肥液浓度)的标准偏差, μS/cm

圆形喷灌机运行状态时测得的田间喷洒肥液浓度均匀性测定可用施肥量 m_s 和喷灌施肥均匀系数 C_{UH}^* 表示。

(3) 施肥量 m_s : 圆形喷灌机喷洒在田间单位面积内的肥料质量, 试验中以雨量筒面积计算, 即

$$m_s = \frac{m_a C_s}{A_s} \tag{4}$$

式中 m_s ——施肥量, kg/m^2
 C_s ——喷洒肥液质量分数, %
 m_a ——雨量筒收集的肥液质量, kg
 A_s ——雨量筒的开口面积, m^2

(4) 喷灌施肥均匀系数 C_{UH}^* : 综合考虑了喷灌机的水量分布均匀性和肥液浓度分布均匀性, 并参考喷灌均匀系数 C_{UH} 的计算公式^[14], C_{UH}^* 计算公式为

$$C_{UH}^* = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |m_{si} - \overline{m}_{sw}| S_i}{\sum_{i=1}^n m_{si} S_i} \right) \times 100\% \tag{5}$$

其中 $\overline{m}_{sw} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{si} S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$

式中 C_{UH}^* ——喷灌施肥均匀系数, %
 n ——用于数据分析的雨量筒总数
 i ——雨量筒标识变量, 从距离中心支轴最近的雨量筒($i=1$)开始, 到距中心支轴最远的雨量筒($i=n$)结束
 m_{si} ——第 i 个雨量筒的施肥量, kg
 S_i ——第 i 个雨量筒距中心支轴的距离, m
 $\overline{m}_{sw}$ ——施肥量的加权平均值, kg

2.4 结果与分析

2.4.1 注射喷嘴孔口直径和安装位置对喷灌施肥均匀性的影响

圆形喷灌机在停止状态下, 安装孔口直径为 2.5 mm 的注射喷嘴在不同位置的试验结果如图 6 所示。可以看出, 不同安装位置雨量筒接收的每个喷头喷洒肥液的电导率分布规律较为接近, 总体波动较小, 只是悬臂最外侧的喷头电导率偏小, 分析其

原因可能是最外侧的喷头并非安装在主输水管的最末端, 其与主输水管末端之间清水稀释后降低了肥液浓度; 也可能是注入主输水管的肥液与清水混合后流向最外侧喷头需要足够时间, 试验中等待时间不够长, 致使最外侧喷头的喷洒肥液浓度还未完全稳定。

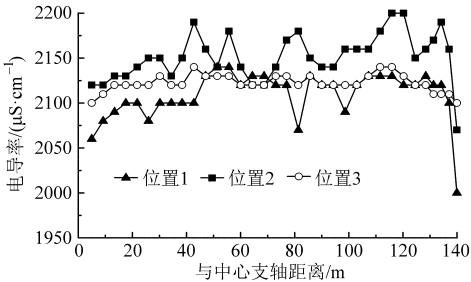


图6 圆形喷灌机停止状态下, 注肥泵电源频率 50 Hz、孔口直径 2.5 mm、不同位置时各喷头喷洒肥液电导率变化曲线

Fig.6 Variation of electrical conductivity from each sprinkler under plunger pump with supply frequency of 50 Hz, orifice diameter of 2.5 mm at different locations when center pivot irrigation system is stopping

对注射喷嘴 3 种孔口直径、3 个安装位置组成的 9 种试验工况进行了测定分析, 得到了各工况下电导率平均值 $\overline{E}_c$ 以及相应的 C_U 和 C_V , 如表 2 所示。结果表明, 在 9 种试验工况下, 表征喷灌施肥均匀性的变异系数 C_V 的最大值仅为 1.37%, 而克里斯琴森均匀系数 C_U 均超过 99%, 表明每种工况下, 喷头喷洒肥液浓度高度一致。当注射喷嘴的孔口直径相同时, 安装位置 1 的喷灌施肥均匀性相对更高一些; 而相同安装位置时, 3 种注射喷嘴的孔口直径对 C_U 和 C_V 值影响差异不显著。以 9 种工况下测得的 C_U 值进行比较分析, 推荐采用注射喷嘴的孔口直径 2.5 mm、安装位置 1 的施肥方案。

由表 2 给出的电导率可知, 9 种试验工况测得的电导率平均值存在细微差异, 电导率的最小值为 2 109 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、最大值为 2 365 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 而电导率总平均值为 2 231 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。9 种试验工况肥液配置的方法和浓度均相同, 圆形喷灌机主输水管内的肥液质量分数理论值为 0.098%, 相应电导率为

表 2 圆形喷灌机停止状态下, 注肥泵电源频率 50 Hz 时不同位置电导率分析结果

Tab.2 Statistical results of electrical conductivity at different locations under plunger pump with supply frequency of 50 Hz when center pivot irrigation system is stopping

孔口 直径/mm	$\overline{E}_c/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$				$C_U/\%$			$C_V/\%$		
	位置 1	位置 2	位置 3	总平均值	位置 1	位置 2	位置 3	位置 1	位置 2	位置 3
1.5	2 220	2 219	2 190	2 231	99.44	99.00	99.09	1.06	1.37	1.22
2.5	2 109	2 151	2 122		99.65	99.05	99.03	0.46	1.25	1.32
3.5	2 340	2 365	2 359		99.51	99.23	99.33	0.65	1.31	0.88

2 970 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。不同试验工况下电导率实测值均小于理论值,造成这种差异的原因较多,如试验的固体氯化钾存在细微不溶物、溶液存在电解质、氯化钾溶液分层现象以及地下井水电导率变化等。但这些差异对相同工况下测得的各喷头电导率分布均匀性不会产生影响。

2.4.2 注肥泵非工频运行时喷灌施肥均匀性分析

圆形喷灌机在停止状态下,将注肥泵的电源频率由工频 50 Hz 降为 46 Hz 运行,注射喷嘴孔口直径 2.5 mm、不同安装位置时各喷头喷洒肥液的电导率分布规律如图 7 所示。可以看出,沿主输水管方向各喷头喷洒肥液分布较均匀,与工频 50 Hz 运行时的各喷头喷洒肥液的电导率变化规律总体一致。计算分析注肥泵在变频 46 Hz 运行时各工况电导率平均值 $\bar{E}_c$ 、总平均值,以及 C_U 和 C_V 值,并与工频 50 Hz 的结果进行对比,如表 3 所示。可以看到,注肥泵在变频 46 Hz 运行时,测得电导率总平均值小于 50 Hz 运行时电导率,主要是因为电源频率降低时,注肥泵的工作流量相应减小,而当圆形喷灌机入机流量不变时,注入喷灌机后的喷洒肥液得到稀释,导致各喷头喷洒肥液浓度降低,测得的电导率就变小。从理论上讲,当电源频率降为零时,注肥泵处于停止状态,此时圆形喷灌机实际上是清水灌溉,电导率与式(1)中当 $C = 0$ 时的 $E_c = 771.48 \mu\text{S}/\text{cm}$ 相

同。将此值与电源频率 50 Hz、46 Hz 下的电导率总平均值进行线性拟合,得到公式

$$\bar{E}_{sc} = 27.52f + 773.44 \quad (R^2 = 0.999) \quad (6)$$

式中 $\bar{E}_{sc}$ ——电导率总平均值, $\mu\text{S}/\text{cm}$
 f ——电源频率, Hz

式(6)的决定系数 R^2 达到了 0.999,表明电导率的总平均值与电源频率之间具有显著的正相关性关系,这与文献[11]的结论一致,说明注肥泵在非工频运行时工作流量具有较高的稳定性,这对于圆形喷灌机的变量喷灌施肥运行非常重要。

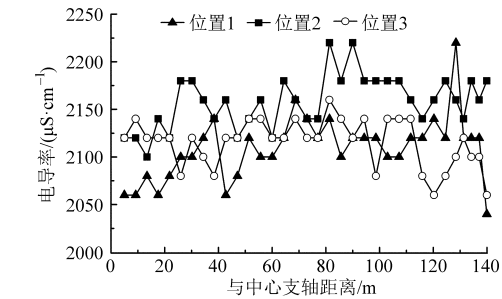


图7 圆形喷灌机停止状态下,注肥泵电源频率 46 Hz、孔口直径 2.5 mm、不同位置时各喷头喷洒肥液电导率变化曲线
Fig. 7 Variation of electrical conductivity from each sprinkler under plunger pump with supply frequency of 46 Hz and orifice diameter of 2.5 mm at different locations when center pivot irrigation system is stopping

表3 圆形喷灌机停止状态、注肥泵不同电源频率时各工况电导率分析结果

Tab.3 Statistical results of electrical conductivity under plunger pump with different power frequencies when center pivot irrigation system is stopping

电源频率/ Hz	$\bar{E}_c/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$				$C_U/\%$			$C_V/\%$		
	位置 1	位置 2	位置 3	总平均值	位置 1	位置 2	位置 3	位置 1	位置 2	位置 3
46	2 054	2 079	2 057	2 064	99.40	99.47	99.51	0.82	0.67	0.61
50	2 109	2 151	2 122	2 127	99.65	99.05	99.03	0.46	1.25	1.32

2.4.3 行走状态下喷灌施肥均匀性分析

圆形喷灌机以最快的行走速度运行时,按图 5 测得各雨量筒电导率和肥液质量,并计算得到单列雨量筒的施肥量 m_i 。图 8 为施肥量沿主输水管路的分布情况,可以看出,沿主输水管路的大部分范围内施肥量分布比较均匀;在距离中心支轴 0 ~ 39 m 范围内(约占圆形喷灌机有效半径的 27.4%,占圆形喷灌机总控制面积的 7.49%),施肥量明显偏小,这主要是与雨量筒布置方案以及储肥桶的容积偏小有关。圆形喷灌机喷灌施肥试验面积不够大,中心支轴近处的雨量筒不能完整地接收喷头组合喷洒肥液,导致测得的施肥量偏小。

表 4 给出了 A 列雨量筒接收肥液的相关计算分析结果。雨量筒平均施肥量 $\bar{m}_i$ 为 306.91 g/m^2 、喷灌

施肥均匀系数 C_{UH}^* 为 88.77%,而喷灌水均匀系数 C_{UH} 为 89.64%,两者相差 0.87%,如果不考虑前 39 m 的雨量筒数据,喷灌施肥均匀系数为 90.66%,表明

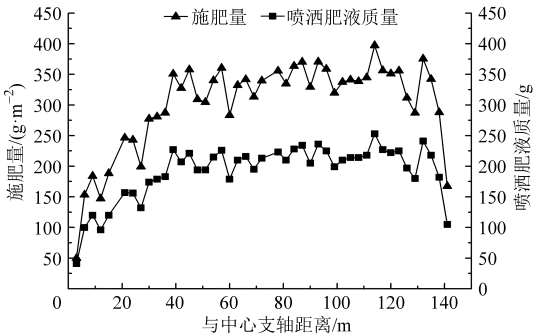


图8 施肥量与喷洒肥液质量沿主输水管的分布情况
Fig. 8 Distributions of fertilizer per area and fertilizer solution mass along the main water pipeline

圆形喷灌机安装泵注式施肥装置可获得较高的喷灌施肥均匀度。

表 4 A 列喷灌施肥均匀系数

Tab.4 Fertiligation uniformity coefficient of line A

数据来源	电导率平 均值 $\bar{E}_c/$ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	施肥量平 均值 $\bar{m}_s/$ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	喷灌施肥 均匀系数 $C_{UH}^*/\%$	喷灌均匀 系数 $C_{UH}/\%$
所有雨量筒	2 050	306.91	88.77	89.64
剔除前 39 m 雨量筒	2 063	337.93	90.66	89.84

3 结论

(1)设计了圆形喷灌机配套专用的泵注式施肥装置,使得注入喷灌机的肥液流量或浓度均匀、恒定。建立了圆形喷灌机在停止、行走状态下评价喷洒肥液浓度均匀性的数学模型。

(2)圆形喷灌机在停止状态、注肥泵频率 50 Hz 时,对注射喷嘴的孔口直径、安装位置构成的 9 种组

合工况进行了各喷头喷洒肥液浓度测定,测得喷灌施肥均匀系数 C_U 为 99.00% ~ 99.65%,变异系数 C_V 为 0.46% ~ 1.37%,其中注射喷嘴孔口直径 2.5 mm,安装在进水管水平段位置时获得的喷灌施肥均匀性最佳。

(3)圆形喷灌机停止状态、将注肥泵电源频率由 50 Hz 减至 46 Hz 时,发现喷灌机各喷头喷洒肥液的电导率总平均值与电源频率之间呈正相关性,且喷灌施肥均匀系数超过 99%。表明改变注肥泵电源频率可以实现圆形喷灌机的高均匀度变量喷灌施肥。

(4)圆形喷灌机行走状态时,单位面积的施肥量与喷洒肥液质量沿主输水管路的分布规律相同,计算单列雨量筒数据得到的喷灌施肥均匀系数 C_{UH}^* 为 88.77%;剔除靠近喷灌机中心支轴前 39 m 内的数据后, C_{UH}^* 达到 90.66%。表明圆形喷灌机采用泵注式施肥装置进行喷灌施肥作业能够获得较高的喷灌施肥均匀性,可以满足作物施肥需求。

参 考 文 献

1 严海军,朱勇,白更,等. 对内蒙古推广使用大型喷灌机的思考[J]. 节水灌溉, 2009(1):18-21.
Yan Haijun, Zhu Yong, Bai Geng, et al. Discussion on application of large-sized sprinkler irrigation machines in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Water Saving Irrigation, 2009(1):18-21. (in Chinese)

2 张承林, 邓兰生. 水肥一体化技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.

3 Rhine M D, Stevens G, Heiser J W, et al. Nitrogen fertilization on center pivot sprinkler irrigated rice[J]. Crop Management, 2011, 10(1):doi:10.1094/CM-2011-1021-01-RS.

4 Sabillón G N, Merkley G P. Fertigation guidelines for furrow irrigation[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2004, 2(4):576-587.

5 Threadgill E D. Chemigation via sprinkler irrigation: current status and future development[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(1):16-23.

6 Tanskovik V, Cukaliev O, Romic D, et al. The influence of drip fertigation on water use efficiency in tomato crop production[J]. Agriculturae Conspectus Scientificus, 2011, 76(1):57-63.

7 Eisenhauer E D, Bockstadter L T. Injection pump flow considerations for center pivots with corner watering systems[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(1):162-166.

8 韩启彪, 吴文勇, 刘洪禄, 等. 三种水力驱动比例式施肥泵吸肥性能试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2):43-47.
Han Qibiao, Wu Wenyong, Liu Honglu, et al. Experiment on fertilizer suction performance of three hydraulic driven pumps[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2):43-47. (in Chinese)

9 Bracy R P, Parish R L, Rosendale R M. Fertigation uniformity affected by injector type[J]. Hort Technology, 2003, 13(1):103-105.

10 King B A, Wall R W, Taberna J P Jr. Spatially distributed control network for flow proportional chemical injection with center pivot sprinkler irrigation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(5):677-683.

11 严海军, 王志鹏, 马开. 圆形喷灌机注肥泵的设计与试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(5):456-460.
Yan Haijun, Wang Zhipeng, Ma Kai. Design and experiment on fertigation plunger pump in center pivot irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5):456-460. (in Chinese)

12 王凤花, 裴正军, 介邓飞, 等. 农田土壤 pH 值和电导率采集仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6):164-168.
Wang Fenghua, Qiu Zhengjun, Jie Dengfei, et al. Design and experiment on the field information pH value and electrical conductivity acquisition instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):164-168. (in Chinese)

13 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16):22-30.
Li Jianian, Hong Tiansheng, Feng Ruijue, et al. Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16):22-30. (in Chinese)

14 GB/T 19797—2012 农业灌溉设备 中心支轴式和平移式喷灌机 水量分布均匀度的测定[S]. 2012.

15 GB/T 276712.3—2011 农业灌溉设备 喷头 第 3 部分:水量分布特性和试验方法[S]. 2011.