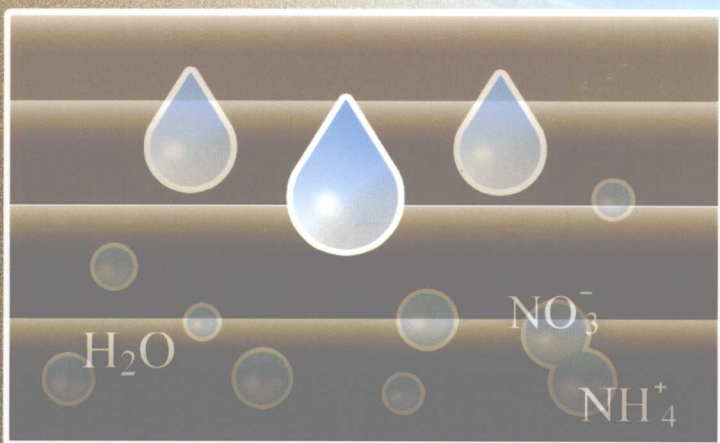


国家自然科学基金研究专著

Principles and Practices of
Water and Fertilizer Management
for Modernized Irrigation Technologies

现代灌溉水肥管理 原理与应用

李久生 王 迪 栗岩峰 著



黄河水利出版社

国家自然科学基金研究专著

现代灌溉水肥管理原理与应用

Principles and Practices of Water and Fertilizer
Management for Modernized Irrigation Technologies

李久生 王 迪 栗岩峰 著



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书依据作者承担的国家自然科学基金项目的研究成果编著而成。全书针对灌溉水肥管理中存在的科学与技术问题,重点研究了喷灌和滴灌条件下水分及氮素的高效利用原理与调控方法。共分十章,第1章探讨了现代灌溉系统中常见施肥装置压差式施肥罐、文丘里施肥器和可调比例式施肥泵的水力性能;第2章对喷灌条件下水分和氮素在土壤中的分布特性以及水分深层渗漏与氮素淋失规律进行了分析;第3~5章基于喷灌 SPAC 系统中能量和水分监测结果,阐述了喷灌作物冠层截留水量及其消耗机制;第6章探讨了滴灌系统性能田间评价方法与标准体系;第7章介绍了层状土壤滴灌水、氮运移分布规律的试验与模拟研究结果;第8~10章在研究土壤水氮动态和作物生长对滴灌水肥管理的响应特征的基础上,提出了水氮优化管理与调控措施。

本书可供从事农田灌溉、水肥管理等专业研究与推广的科技人员和大专院校有关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代灌溉水肥管理原理与应用/李久生,王迪,栗岩峰
著. —郑州:黄河水利出版社,2008.7
ISBN 978-7-80734-471-1

I. 现… II. ①李…②王…③栗… III. ①灌溉管理
②浇水③施肥 IV. S274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 113008 号

组稿编辑:马广州 电话:0371-66023343 E-mail:magz@yahoo.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:18.75

字数:433 千字

印数:1—1 000

版次:2008 年 7 月第 1 版

印次:2008 年 7 月第 1 次印刷

定价:68.00 元

前 言

在水土资源紧缺和环境恶化的沉重压力下,人类进入 21 世纪。灌溉和化肥施用对满足不断增长的食物和纤维需求发挥着重要作用。作为现代灌溉技术的重要标志,喷灌和微灌在世界范围内得到越来越广泛的应用。据国际灌排委员会(ICID)2006 年的统计资料,31 个成员国的喷、微灌面积已超过 2 500 万 hm^2 , 约占这些国家灌溉面积总和的 15%。20 世纪 90 年代以来,我国的喷、微灌技术也得到快速发展,推广应用面积近 750 万 hm^2 。

随着水资源供需矛盾的加剧和不合理灌溉与过量施肥引起的面源污染的日益加重,如何利用现代施肥灌溉技术进一步提高水肥利用率,减轻灌溉和施肥对环境带来的不利影响备受关注。将灌溉与施肥有机结合是现代灌溉技术的发展趋势,这种结合形成了日趋完善的施肥灌溉(Fertigation)技术,并得到广泛应用。近年来,在我们承担的国家自然科学基金项目“滴灌施肥灌溉系统运行特性及氮素运移规律的研究(59979027)”、“喷灌作物冠层截留水量的消耗机制及其对水利用率的影响(50179037)”、“作物对滴灌水氮的动态响应及其人工神经网络调控模型(50379058)”和“创新研究群体基金项目(50721006)”中,相继对相关问题开展了研究工作,主要内容包括:①对现代灌溉系统中常见施肥装置压差式施肥罐、文丘里施肥器和可调比例式施肥泵的水力性能进行了系统测试,研究了施肥装置结构参数和系统运行参数对施肥性能的影响,建立了描述不同施肥装置类型肥液浓度变化规律的数学模型,为施肥装置的选型和运行参数的确定提供了依据;②鉴于喷灌均匀系数对系统设计的重要性,对不同生态区喷灌施肥灌溉条件下水分和氮素在土壤中的分布特性进行了大量田间试验,研究了喷灌均匀系数对水分深层渗漏和氮素淋失的影响,探讨了作物生长对水、氮分布不均匀性和土壤特性空间变异的响应特征,为喷灌均匀系数设计标准的制定提供了科学依据;③喷灌作物冠层截留水量及其消耗机制是准确评价喷灌水利用率的重要依据,采用植物热平衡茎流计、称重式蒸渗仪、波文比能量平衡系统和涡度协方差系统等先进测试手段,对喷灌作物冠层截留水量及作物蒸腾、土壤蒸发、田间小气候的变化规律进行了观测,建立了喷灌水蒸发与作物冠层能量平衡的联合模拟模型,对作物冠层截留水量损失进行了定量评估,使喷灌水利用率的计算和评价更趋科学合理;④针对滴灌系统性能田间评价标准体系不够完善的问题,对地表和地下滴灌系统的灌水与施肥均匀性进行了田间评估,评价了灌水器类型及制造偏差、施肥装置类型、毛管埋深对系统性能的影响,研究了灌水器堵塞程度对系统灌水均匀性的影响特征,建立了不同施肥装置类型的施肥均匀性与灌水均匀性的定量关系,探讨了土壤特性空间变异和系统水力学特性对地下滴灌水、氮分布和作物生长的影响,为滴灌系统性能评价体系 and 标准的完善提供了参考依据;⑤利用室内试验研究了土壤质地、剖面上变化及灌水器流量、灌水量、肥料溶液浓度对水分和氮素在土壤中运移分布的影响,建立了相应的数学模型,为层状结构土壤的滴灌系统设计提出了建议;⑥通过田间试验,系统研究了滴灌系统运行方式和施肥频率、施肥量等水肥(氮)管理措施对土壤水分和氮素的运移、

分布、作物吸收及残留的影响,探讨了作物产量、品质及生理生态指标对水氮管理措施的动态响应特征,建立了作物生长条件下滴灌水氮运移动力学模型和人工神经网络预测模型,从而初步揭示了滴灌水肥管理措施调控土壤水氮动态和作物生长发育的内在机理。在上述项目研究成果的基础上,撰写了本专著。

本专著按章节分工执笔撰写,共分十章,第1、2、6章及第7章第1~4节和第6节由李久生执笔,第3~5章由王迪执笔,第7章第5节和第8~10章由栗岩峰执笔。全书由李久生审定统稿。

除了上述编写人员,先后参加研究工作的人员还有中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所(原农业气象研究所)饶敏杰副研究员和王春辉技术员,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所(原土壤肥料研究所)张建君助理研究员,中国农业大学水利与土木工程学院硕士研究生宿梅双、孟一斌、计红燕、杜珍华。本专著也包含了这些科研人员的研究成果。

国家自然科学基金项目的连续支持为研究工作的开展提供了经费保障,研究过程中还得到中国水利水电科学研究院水利所、中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、中国农业大学水利与土木工程学院有关领导和专家的指导及帮助,在此一并表示衷心感谢。

我们深知灌溉水肥管理涉及水利、农学、土壤、气象、植物营养等学科,是极其复杂的系统工程,作者的研究仅是这一庞大工程中的一小部分。同时,尽管尽了最大努力避免出现错误,但文中存在的任何谬误和不当之处,我们当难辞其咎,敬请读者不吝赐教,批评指正。

作 者

2008年5月

目 录

前 言

第 1 章 现代灌溉施肥装置性能	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 压差式施肥罐水力性能	(2)
1.3 文丘里施肥器水力性能	(10)
1.4 可调比例式施肥泵水力性能	(16)
第 2 章 喷灌条件下土壤水氮空间分布特性及其对作物产量的影响	(25)
2.1 概述	(25)
2.2 喷灌条件下土壤水分空间分布特征	(32)
2.3 喷灌条件下土壤氮素空间分布特征	(37)
2.4 喷灌均匀系数对水氮淋失的影响	(52)
2.5 喷灌均匀系数对作物生长和产量的影响	(57)
2.6 土壤及喷灌不均匀性对作物产量的影响	(67)
2.7 基于称重式蒸渗仪的喷灌作物系数估算方法	(76)
第 3 章 喷灌作物冠层截留水量	(89)
3.1 概述	(89)
3.2 冬小麦冠层截留水量与存储能力	(90)
3.3 夏玉米冠层截留水量	(95)
3.4 结论与讨论	(106)
第 4 章 喷灌作物冠层截留水量消耗机制	(109)
4.1 概述	(109)
4.2 试验方法与设计	(110)
4.3 喷灌条件下作物蒸腾蒸散规律及农田能量分配模式	(114)
4.4 喷灌对田间小气候的影响	(123)
4.5 喷灌对作物蒸腾速率的影响	(126)
4.6 冠层截留水量蒸腾抑制效应影响因素分析	(133)
4.7 基于能量平衡的喷灌作物冠层截留损失估算	(134)
4.8 结论与讨论	(136)
第 5 章 喷灌作物冠层截留水量及其消耗的数学模拟	(140)
5.1 概述	(140)
5.2 模型简介	(141)
5.3 模型参数	(146)
5.4 模型验证	(148)

5.5	模型应用	(153)
5.6	结论	(158)
第6章	微灌系统灌水施肥性能的田间试验评价	(161)
6.1	概述	(161)
6.2	地表滴灌系统性能评价	(161)
6.3	地下滴灌系统性能评价	(170)
6.4	滴灌系统灌水器堵塞特性评价	(178)
6.5	土壤特性空间变异对地下滴灌水氮空间分布及作物生长的影响	(185)
第7章	层状土壤滴灌水氮运移分布规律	(199)
7.1	概述	(199)
7.2	试验材料与方法	(200)
7.3	水分运移分布规律	(202)
7.4	氮素分布规律	(209)
7.5	水氮运移的数学模拟	(211)
7.6	结论	(221)
第8章	滴灌水肥管理对水氮动态的调控机理	(224)
8.1	概述	(224)
8.2	试验方法与设计	(227)
8.3	滴灌水肥管理对作物根区水氮动态的影响	(235)
8.4	滴灌水肥管理对根区水氮空间分布的影响	(245)
8.5	滴灌水肥管理对土壤氮素残留和淋失的影响	(251)
8.6	结论	(255)
第9章	滴灌水肥管理对作物生长发育的调控	(258)
9.1	滴灌水肥管理对番茄生理生态指标的影响	(258)
9.2	滴灌水肥管理对植株吸氮量的影响	(267)
9.3	滴灌水肥管理对氮肥的利用效率与回收率的影响	(268)
9.4	滴灌水肥管理对番茄产量与品质的影响	(269)
9.5	滴灌水肥管理调控措施	(273)
第10章	番茄滴灌施肥条件下根区水氮运移模型	(276)
10.1	滴灌施肥条件下番茄根区水氮运移的数学模拟	(276)
10.2	滴灌水氮调控的人工神经网络模型	(288)
10.3	结论	(292)

第1章 现代灌溉施肥装置性能

现代灌溉与施肥的结合形成了日益完善的施肥灌溉(Fertigation)技术。施肥灌溉的质量不仅影响着作物产量和产品品质,而且还会对土壤和地表水及地下水环境产生影响。施肥灌溉质量在很大程度上取决于施肥装置的类型及性能。本章以国内外常用的压差式施肥罐、文丘里施肥器和比例施肥泵为对象,研究了不同滴灌系统运行参数条件下施肥装置的水力性能,在分析施肥装置结构参数对施肥性能影响的基础上,建立了描述不同施肥装置类型肥料溶液浓度变化规律的模型,为滴灌施肥灌溉的设计和运行管理提供了科学依据。

1.1 概述

施肥灌溉是指通过灌溉系统直接将各种营养成分输送到作物根区,以满足作物的生长需要。广义地讲,施肥灌溉属于施化灌溉(Chemigation)的一种,即除了施营养物质外,还可以通过灌溉系统施除草剂、杀虫剂以及系统维护需要的其他制剂,如为了防止系统生物和化学堵塞而注入酸或氯等。当然,最常见的还是施肥灌溉。大约在20世纪上半叶,随着喷灌技术的推广应用,开始施肥灌溉,可以检索到的最早与施肥灌溉有关的文献是1958年Bryan和Thomas对喷灌肥料均匀性的研究。随着现代灌溉的发展,施肥灌溉技术也日趋完善,并得到广泛应用。早在1983年美国35个州就有大约430万 hm^2 在灌溉季节内至少进行了一次施肥灌溉(Threadgill, 1985),1998年3500多个农场采用施肥灌溉,面积约400万 hm^2 (NASS, 1998)。

在我国施肥灌溉主要应用于微灌系统。截至2005年底,全国微灌面积近70万 hm^2 ,其中新疆棉花膜下滴灌占50%以上。在这些微灌工程中大都采用了施肥灌溉^①。随着微灌面积的持续增加,施肥灌溉的应用面积也将稳步增长。

国内外实践都表明,施肥灌溉至少具有以下优点(Burt等,1995;李久生等,2003):

- (1)减轻劳动强度,降低施肥成本。
- (2)可以按需及时施肥,即使在操作人员无法进入田间时也能进行施肥。
- (3)减轻由于施肥造成的土壤压实和结构破坏。
- (4)减少肥料用量,提高肥料利用率,减轻面源污染。
- (5)提高产量,改善品质。

微灌施肥灌溉优势的发挥依赖于施肥灌溉质量的好坏,而施肥灌溉质量在很大程度上取决于施肥装置的类型和性能。施肥灌溉装置可分为两大类:一类是施肥过程中肥料

^① 龚时宏,王建东.我国微灌技术发展现状及存在的问题分析.第七届全国微灌大会会议论文集,p8-14,2007年7月。

溶液浓度保持恒定;另一类是施肥过程中肥料溶液浓度逐渐减小。目前常用的文丘里施肥器、比例施肥泵等属于第一类,而压差式施肥罐属于第二类。本章的目的是通过对我国常用的压差式施肥罐、文丘里施肥器和比例施肥泵的水力性能的研究,为微灌施肥灌溉系统的设计和运行管理提出建议。

1.2 压差式施肥罐水力性能

压差式施肥罐是应用最多、操作最简便的一种施肥装置。压差式施肥罐的进口接在主管道的上游而出口接在下游,通过适度关闭安装在上下游之间的节制阀形成压力差。在压力差的作用下,水流通过进水管直达罐底,掺混肥液,再由排液管注入节制阀后的主管道。随着水连续不断地进入施肥罐,罐内的肥料溶液逐渐被稀释,因此施肥罐输出的肥料溶液浓度随施肥的进行逐渐减小。对微灌系统的设计者和用户来说,了解肥料浓度随时间持续减小的规律十分重要,因为肥料浓度的变化模式将对养分在土壤中的运移和分布产生重要影响(Gardenas 等,2005;Li 等,2005)。尽管对施肥罐肥料浓度随时间变化规律的重要性有了充分认识,但有关施肥罐肥料溶液浓度影响因素和变化规律的研究十分缺乏,还未能形成压差式施肥罐的运行操作规程。封俊等(1991)假定所有加入施肥罐的肥料在施肥开始前已完全溶解,建立了压差式施肥罐的肥液浓度变化模型:

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{qt}{V}} \quad (1-1)$$

式中: $C(t)$ 为施肥时间 t 时的肥液浓度; C_0 为施肥罐内肥液的初始浓度; t 为施肥时间; V 为施肥罐容积; q 为进入施肥罐的流量。

实际上,在大多数情况下肥料是随着施肥的进行逐渐溶解的,因此式(1-1)有其局限性。本节的目的是通过对不同容积的施肥罐在不同施肥量和压差条件下肥料溶液浓度变化规律的测定,建立肥料溶液浓度随时间变化规律的通用模型,为压差式施肥罐的设计和运行提供依据。

1.2.1 试验设计与方法

试验在水利部灌排设备检测中心实验大厅内进行,试验装置及其布置如图 1-1 所示。试验水源采自地下水库,水库出水口接离心水泵(流量 $10\text{m}^3/\text{h}$,扬程 60m),以供给试验所需的流量和压力。水体经离心水泵加压后进入主管道($\Phi 50\text{mm}$ 钢管),通过设在首部的阀门 2 调节进入主管道的流量。分别在主管道和施肥管道($\Phi 25\text{mm}$ 钢管)上安装精度为 $\pm 1\%$ 的流量计 3(LWGY-50)和 11(LWGY-25),用以测试主管道和通过施肥罐的流量。在施肥罐上、下游分别安装压力表 4、6(量程 0.6MPa , 0.4 级),用以监测通过施肥罐的压差。试验所需的压差通过调节主控阀 5 和控制阀 7 来获得。试验选用 10、30L 和 65L 三种规格的施肥罐(北京通捷机电有限责任公司制造),其进出口管道直径分别为 10、21.5mm 和 23.5mm。肥料选用中化国际化肥贸易公司代理的智利产硫酸钾(K_2SO_4 , K_2O 含量 $\geq 50\%$)。

为了获得施肥罐肥液浓度的变化规律,在施肥罐出口处设取样点 13。从取样口取出的肥液,用哈希公司产 Sension 156 型便携式电导率计(测试范围: $0 \sim 1\,999\text{dS/m}$;测试精

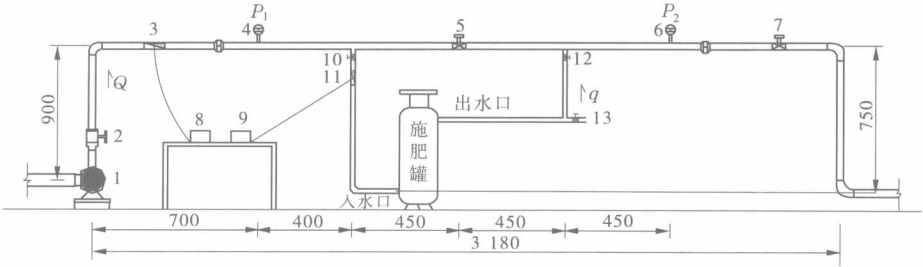


图 1-1 压差式施肥罐试验装置示意图 (尺寸单位:mm)

- 1—水泵;2—阀门(Φ50mm);3—主管道流量计;4—压力表;5—主控阀(Φ50mm);6—压力表;
7—控制阀(Φ50mm);8—主管道流量显示仪;9—施肥管道流量显示仪;10—入水阀门(Φ25mm);
11—施肥管道流量计(Φ25mm);12—出水阀门(Φ25mm);13—取样点

度: ±0.5%)测定其电导率,然后用试验当日标定的肥液浓度与电导率的关系式(1-2)将电导率转换为浓度:

$$C = aEC - b \tag{1-2}$$

式中: C 为肥液浓度, g/L; EC 为肥液电导率, dS/m; a 、 b 分别为系数。

为了提高肥液的测试精度,按 $C > 1\text{g/L}$ 和 $C \leq 1\text{g/L}$ 分别对式(1-2)中的系数进行了拟合,参数变化范围见表 1-1。由表 1-1 中的 r^2 值可以看出,浓度与电导率之间的线性相关程度很高。

表 1-1 肥液浓度与电导率关系标定参数及确定系数(r^2)变化范围

$C(\text{g/L})$	a	b	r^2
1 ~ 100	0.084 4 ~ 0.094 2	0.066 3 ~ 0.185 7	0.994 ~ 0.999
0 ~ 1	0.056 3 ~ 0.083 2	0.031 0 ~ 0.047 7	0.949 ~ 0.999

本研究考虑了施肥量和压差两个因素,试验中保持施肥罐出口主管道上压力 P_2 恒定为 0.10MPa,三种规格下的试验因素变化范围见表 1-2,每个施肥量与压差的组合重复 3 次。

表 1-2 试验因素变化范围及式(1-11)的拟合参数和确定系数(r^2)

规格	进口压力 P_1 (MPa)	压差 ΔP (MPa)	施肥量 M (kg)	β	r^2
10L	0.15	0.05	2	0.19	0.950
	0.20	0.10	2	0.27	0.981
	0.25	0.15	2	0.32	0.978
	0.20	0.10	4	0.18	0.888
	0.25	0.15	4	0.21	0.874
30L	0.15	0.05	6	0.57	0.989
	0.20	0.10	6	0.89	0.989
	0.25	0.15	6	0.97	0.972
	0.15	0.05	12	0.41	0.928
	0.20	0.10	12	0.52	0.925
	0.25	0.15	12	0.74	0.939

续表 1-2

规格	进口压力 P_1 (MPa)	压差 ΔP (MPa)	施肥量 M (kg)	β	r^2
65L	0.15	0.05	13	0.37	0.995
	0.20	0.10	13	0.45	0.995
	0.25	0.15	13	0.55	0.998
	0.15	0.05	26	0.20	0.959
	0.20	0.10	26	0.24	0.955
	0.25	0.15	26	0.30	0.984
	0.30	0.20	26	0.46	0.995
	0.35	0.25	26	0.53	0.995
	0.40	0.30	26	0.52	0.993

试验开始前将拟施肥料(K_2SO_4)量加入施肥罐,把施肥罐充满水,充分搅拌,尽最大可能使其溶解,此时测得的肥液浓度即为初始浓度。系统开始运行后,按不同间隔(施肥最初的10min 每1~2min 取一次肥液样,之后每5~10min 取一次;根据施肥罐规格的不同,取样时刻也不同)取肥液样,测定其电导率。当取得的肥液电导率值近似等于纯水的电导率时,试验结束。

1.2.2 通过施肥罐的流量与压差的关系

通过施肥罐的流量 q (m^3/h) 与压差的关系绘于图 1-2,回归分析得出:

$$10L \text{ 施肥罐} \quad q = 1.05\Delta P^{0.52} \quad (r^2 = 0.999) \quad (1-3)$$

$$30L \text{ 施肥罐} \quad q = 9.81\Delta P^{0.51} \quad (r^2 = 0.999) \quad (1-4)$$

$$65L \text{ 施肥罐} \quad q = 12.20\Delta P^{0.49} \quad (r^2 = 0.999) \quad (1-5)$$

$$q = 1.17 \times 10^{-3} \Delta P^{0.50} D^{2.94} \quad (r^2 = 0.999) \quad (1-6)$$

式中: q 为通过施肥罐的流量, m^3/h ; ΔP 为压差, MPa; D 为施肥罐进口直径, mm; r 为相关系数。

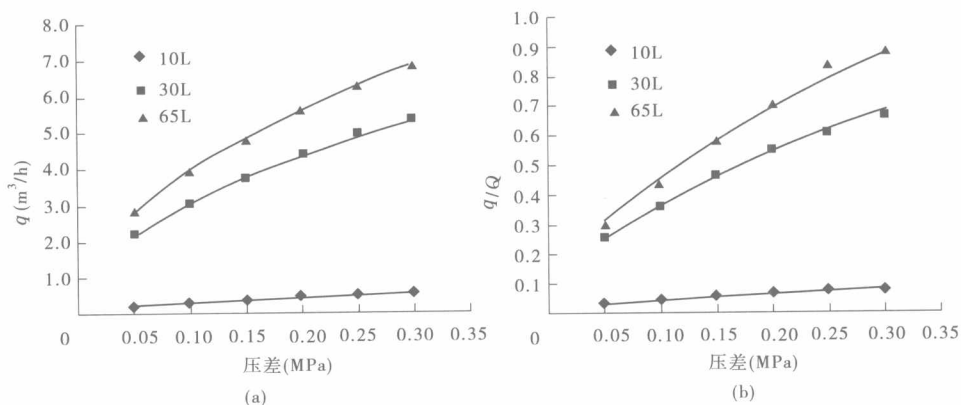
由式(1-3)~式(1-6)可以看出,通过施肥罐的流量与压差的平方根成正比,与施肥罐的进口直径的三次方成正比,进口直径越大,通过施肥罐的流量也越大,例如当压差为0.15MPa 时,进口直径10、21.5、23.5mm 施肥罐的流量分别为0.4、3.8 m^3/h 和4.8 m^3/h 。

通过施肥罐的流量 q 与主管道流量 Q 之比与压差的关系也示于图 1-2 中,回归分析得出3种规格施肥罐的 q/Q 与压差的关系为:

$$10L \text{ 施肥罐} \quad \frac{q}{Q} = 0.17\Delta P^{0.58} \quad (r^2 = 0.997) \quad (1-7)$$

$$30L \text{ 施肥罐} \quad \frac{q}{Q} = 1.30\Delta P^{0.55} \quad (r^2 = 0.998) \quad (1-8)$$

$$65L \text{ 施肥罐} \quad \frac{q}{Q} = 1.94\Delta P^{0.63} \quad (r^2 = 0.995) \quad (1-9)$$

图 1-2 通过施肥罐的流量 q 及 q 与主管道流量 Q 之比和压差的关系

$$\frac{q}{Q} = 3.42 \times 10^{-4} \Delta P^{0.59} D^{2.71} \quad (r^2 = 0.999) \quad (1-10)$$

式(1-6)和式(1-10)可用于估算通过施肥罐的流量和进入微灌系统的肥料溶液浓度。

1.2.3 肥料溶液浓度随时间的变化规律

用相对浓度(取样时刻 t 的肥液浓度除以 $t=0$ 时的初始肥液浓度)来表示施肥罐出口肥液浓度的变化。图 1-3 ~ 图 1-5 分别绘出了三种容积施肥罐在不同压差时施肥罐出口肥液浓度随时间的变化过程。从图中可以看出,对于三种施肥罐,肥液浓度随时间持续递减,尤其在初始的 10min 内,肥液浓度下降很快,之后逐渐趋于平缓。以罐体积 65L 为例,当施肥量 $M=26\text{kg}$, $t=2$ 、10min 和 30min 时,压差 0.05MPa 的肥液相对浓度值分别为 90%、10% 和 2.2%。从图中还可以看出,施肥量无论是 13kg 还是 26kg,在给定时刻,压差越大,肥液相对浓度越低,这是因为压差越大,通过施肥罐的水体流量越大(图 1-2),从而加快了肥料的溶解和水对肥液的置换。仍以施肥量 26kg 为例, $t=2\text{min}$ 时,压差 0.05MPa 和 0.30MPa 的肥液相对浓度分别为 90% 和 40%。

由图 1-3 ~ 图 1-5 还可以看出,同一压差时,相同时刻施肥量较大的肥液相对浓度也较大,即肥液相对浓度变化曲线较缓,施肥时间持续较长。例如,对 65L 施肥罐来说,当压差为 0.05MPa, $t=10\text{min}$ 时,施肥量 13kg 和 26kg 的肥液相对浓度分别为 7.9% 和 9.9%。

由图 1-5 还可以看出,在试验采用的压差和施肥量范围内, $t=30\text{min}$ 时,肥液的相对浓度为 0 ~ 2.2%,可认为施肥基本结束。

对不同条件下施肥罐出口肥液浓度随时间变化过程按下式进行拟合:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\beta t} \quad (1-11)$$

式中: C 为 t 时刻肥液浓度, g/L ; C_0 为肥液的初始浓度, g/L ; β 为拟合参数。

拟合参数 β 和式(1-11)的确定系数(r^2)列入表 1-2。从表 1-2 可以看出,对同一容积的施肥罐来说过, β 随压差的增大而增大。对 β 与压差、施肥量、施肥罐进口直径、罐容积之间的关系进行多元回归分析后得:

$$\beta = 2.911 \times 10^{-3} M^{-0.644} \Delta P^{0.516} D^{3.228} V^{-0.552} \quad (r^2 = 0.970) \quad (1-12)$$

式中： M 为施肥量，变化范围为 2 ~ 26kg； ΔP 为压差，变化范围为 0.05 ~ 0.30MPa； D 为施肥罐进口直径，变化范围为 10 ~ 25mm； V 为施肥罐容积，变化范围为 10 ~ 65L。

式(1-11)和式(1-12)的预测值与实测值的比较也绘于图 1-3 ~ 图 1-5。从图中可以看出，预测的肥料溶液浓度随时间的变化过程与实测值吻合很好，预测值与实测值之间的剩余标准差为 2% ~ 8%。因此，式(1-11)和式(1-12)可用来估算不同容积、不同进口直径施肥罐在不同压差和施肥量时施肥罐出口处的肥液浓度随时间的变化过程。

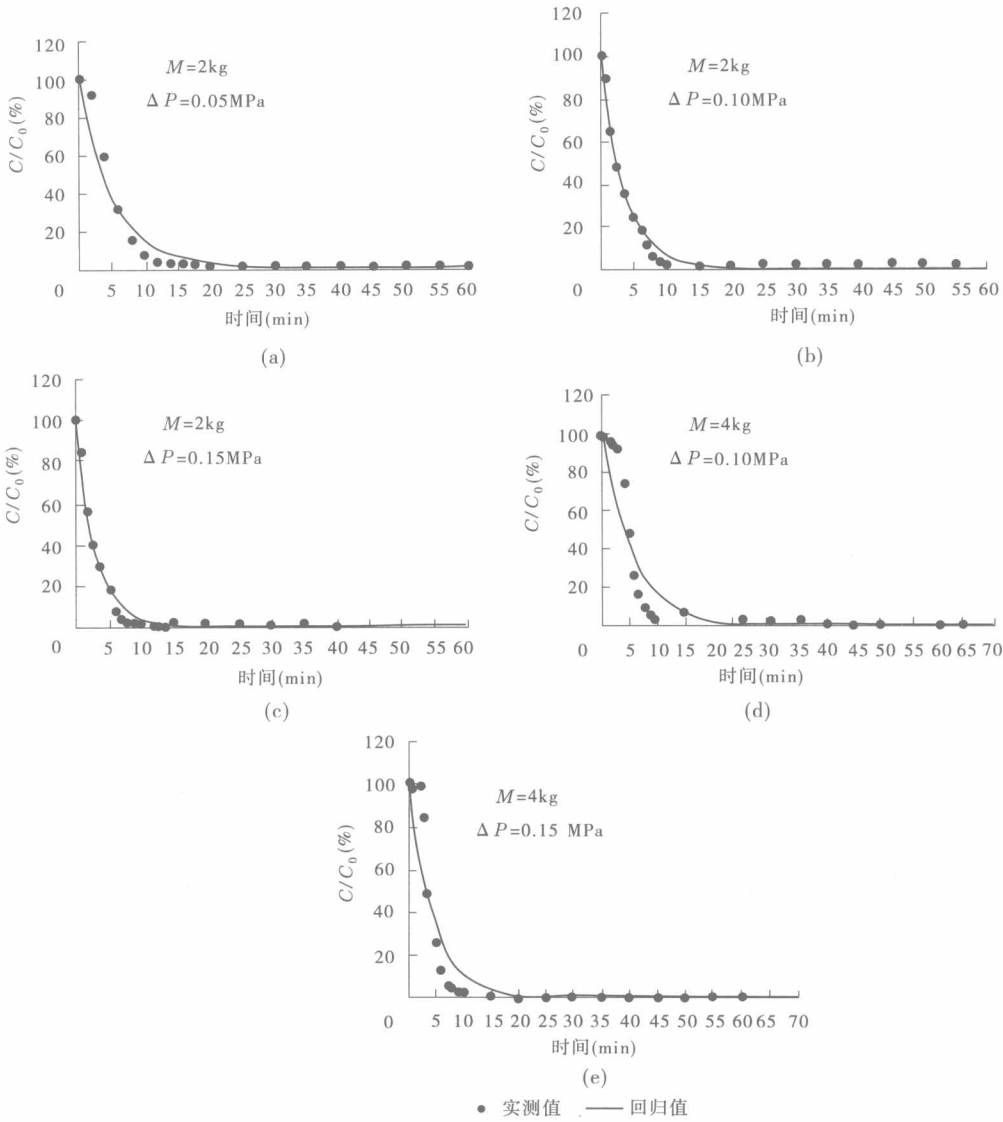


图 1-3 容积 10L 施肥罐出口肥液相对浓度随时间的变化过程

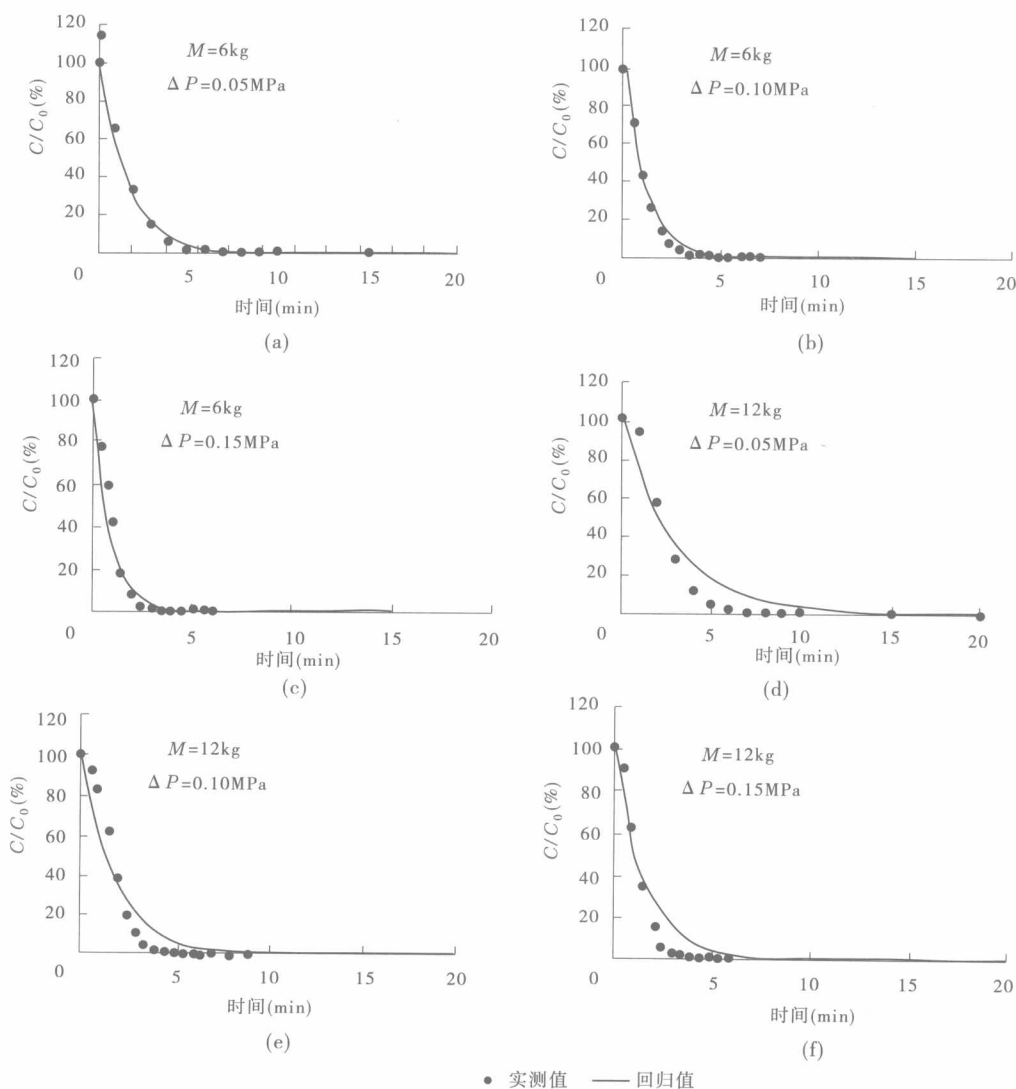


图 1-4 容积 30L 施肥罐出口肥液相对浓度随时间的变化过程

施肥罐肥液浓度衰减为零(施肥结束)的时间是微灌施肥灌溉系统运行管理的重要指标,因为系统冲洗时间的确定与这一指标密切相关。因此,利用试验数据建立了施肥结束时间 $T_{C=0}$ (min) (肥液浓度小于等于 0.01g/L 时认为施肥结束)与施肥量、压差、施肥罐容积、施肥罐进口直径之间的多元回归关系:

$$T_{C=0} = 1.384 \times 10^5 M^{0.434} \Delta P^{-0.873} D^{-7.335} V^{2.905} \quad (r^2 = 0.980) \quad (1-13)$$

上式显示出,肥液浓度变为零的时间 $T_{C=0}$ 随施肥量和施肥罐容积的增大而增大,随压差和施肥罐进口直径的增大而减小。式(1-13)的预测值与实测值的比较绘于图 1-6。由预测值(y)与实测值(x)之间的相关分析得出 $y = 0.96x$, 确定系数为 $r^2 = 0.935$, 它们之间的相对误差为 3% ~ 19%, 平均相对误差为 12%, 因此式(1-13)具有较高的精度, 可用来估算不同容积施肥罐的施肥结束时间。

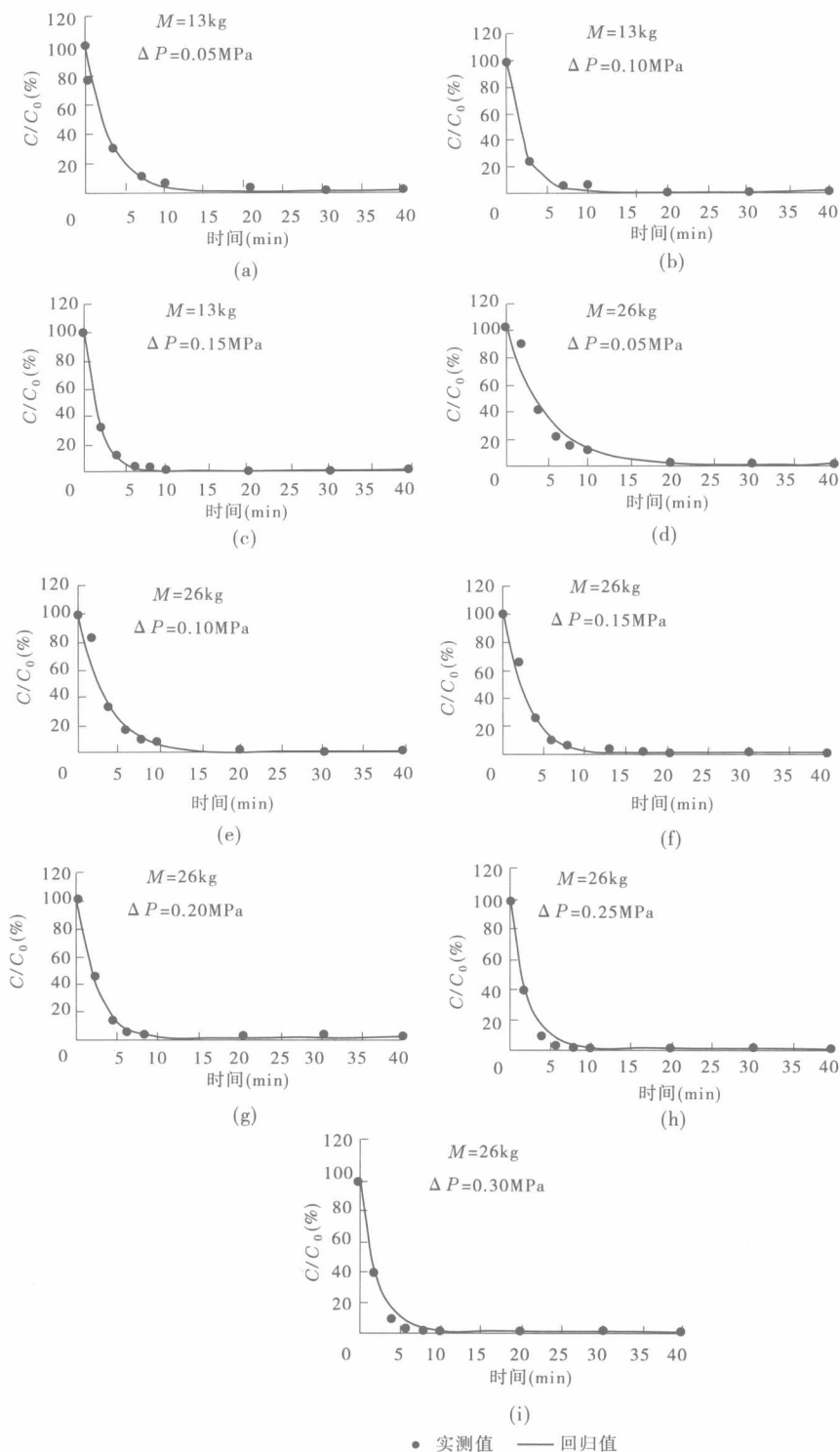


图 1-5 容积 65L 施肥罐出口肥液相对浓度随时间的变化过程

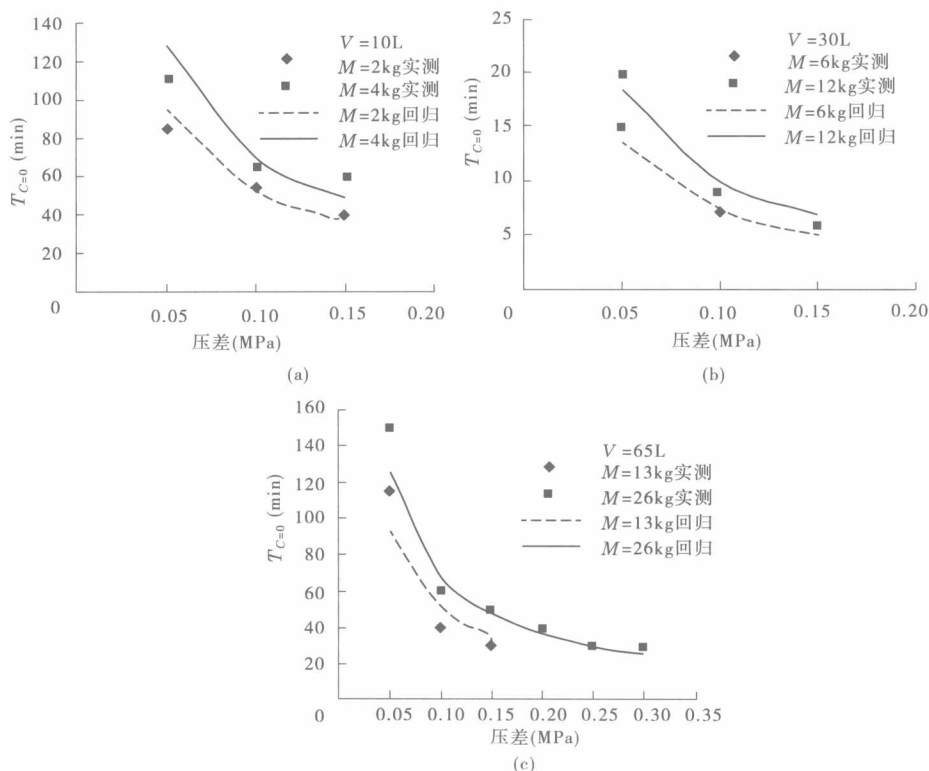


图 1-6 施肥罐出口肥液浓度变为零的时间与压差的关系

为了了解施肥罐设计和运行参数对施肥性能影响的相对重要性,依据式(1-13)进行了敏感性分析。敏感性分析的基准值选为 $V = 30L$, $D = 20mm$, $\Delta P = 0.15MPa$, $M = 8kg$, $T = 10min$, $T_{C=0}$ 对各参数的敏感性可近似表示为:

$$\Delta T_{C=0} = 2.98 \Delta V \quad (r^2 = 0.921) \quad (1-14)$$

$$\Delta T_{C=0} = -43.7 \Delta D \quad (r^2 = 0.704) \quad (1-15)$$

$$\Delta T_{C=0} = -0.98 \Delta(\Delta P) \quad (r^2 = 0.932) \quad (1-16)$$

$$\Delta T_{C=0} = 0.44 \Delta M \quad (r^2 = 0.991) \quad (1-17)$$

从式(1-14)~式(1-17)可以看出,对施肥罐结构参数而言, $T_{C=0}$ 对进口直径最敏感,其次是容积;对施肥罐的运行参数而言, $T_{C=0}$ 对压差比对施肥质量更敏感。例如,当 D 和 V 变化 20% 时, $T_{C=0}$ 分别变化 874% 和 60%; 而当 ΔP 和 M 变化 20% 时, $T_{C=0}$ 仅分别变化 20% 和 9%。类似地,也依据式(1-12)进行了敏感性分析,结果表明,施肥罐输出肥液浓度的衰减对进口直径最敏感。因此,增大施肥罐进口直径和压差将显著缩短施肥历时,而增大施肥罐容积可以使肥液浓度随时间的衰减过程变缓。期望的肥液浓度变化模式可以通过选择合适的施肥罐出口直径和罐容积或适宜的压差来实现。

1.2.4 结论

对不同压差式施肥罐的水力性能和肥液浓度变化规律进行了系统测试。试验中施肥

罐容积变化范围为 10 ~ 65L, 施肥罐进口直径变化范围为 10 ~ 23.5mm, 压差变化范围为 0.05 ~ 0.30MPa。主要结论如下:

(1) 通过施肥罐的流量随施肥罐进口直径和压差的增大而增大, 流量与压差的 0.5 次方成正比。

(2) 施肥罐出口肥液浓度随时间呈幂函数关系持续减少, 尤其在施肥的初始阶段 (10min), 肥液浓度减小很快; 压差是影响肥液浓度衰减过程的主要因子。因此, 为了在微灌系统内获得均匀的肥料分布, 保证施肥开始后和施肥过程中压差稳定至关重要。

(3) 施肥罐进口直径、罐容积是影响出口处肥液浓度变化的两个重要设计参数, 而压差是影响肥液变化的关键运行参数。在试验资料基础上建立的描述肥液浓度变化和估算施肥结束时间的多元回归模型可以用来估算不同施肥罐进口直径、容积、施肥量和压差条件下的肥液浓度变化规律。

1.3 文丘里施肥器水力性能

文丘里施肥器是微灌施肥灌溉系统中常见的一种施肥装置, 主要应用于小型微灌系统的施肥。当进口流量和压差保持恒定时, 肥液吸入量也保持恒定; 但实际运行中, 由于系统运行参数不稳定, 肥液吸入量随时间发生波动 (李久生等, 2003; 戈德堡, 1984)。Hanson (2002) 通过试验研究分析了小型文丘里施肥器的施肥过程, 当压差达到 0.04MPa 时, 施肥器开始吸肥; 当压差达到 0.16MPa 时, 肥液吸取量达到最大。Yuan 等 (2000) 分析了 5 种不同液体情况下温度和黏滞性对文丘里施肥器中流速的影响, 除水的变化不明显外, 其他 4 种液体的流速均随黏滞性的增加而降低, 而温度升高会导致流速增加。Larry (2001) 分析了文丘里施肥器的工作效率和水头损失, 指出文丘里施肥器的水头损失一般占微灌系统总水头的 10% ~ 30%。封俊等 (1992) 应用水力学的基本原理建立了文丘里施肥器临界流量和肥液吸入量的理论模型, 该模型虽然考虑了影响文丘里施肥器吸肥性能的主要因素, 但忽略了水头损失的影响, 进而导致模型精度较差。沙毅等 (1995) 依据上述结论, 通过试验研究对肥液吸入量模型进行了修正, 此后, 侯素娟 (1995) 应用流体力学基本理论, 对并联式文丘里施肥器的设计方法进行了探讨, 得出计算文丘里管最大流量的公式。李百军等 (2001) 依据伯努利方程和连续性方程得到并联文丘里管流量和支管管路局部水头损失的计算公式。在文丘里施肥器结构参数改进方面国内外学者也做了一些工作, 如 Neto 和 Porto (2004) 通过优化射流装置的结构参数, 使注射效率提高了 1 ~ 2 倍; 王森等 (2006) 采用计算流体力学模型对文丘里施肥器的结构参数进行了优化选择。

尽管国内外已对文丘里施肥器进行了大量研究, 但尚未建立起完整的文丘里施肥器正常工作参数的值域, 也缺乏对不同类型文丘里施肥器施肥性能的对比试验研究, 这在一定程度上影响了利用文丘里施肥器施肥的效果。

1.3.1 试验装置

试验在水利部灌排设备检测中心实验大厅内进行, 试验装置布置如图 1-7 所示, 采用与压差式施肥罐试验相同的主管道布置。试验水源采自地下水库, 水库出水口接离心水