

## 滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价

范军亮<sup>1,2</sup>, 张富仓<sup>1,2\*</sup>, 吴立峰<sup>3</sup>, 闫世程<sup>1,2</sup>, 向友珍<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100; 3. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 南昌 330099)

**摘要:** 为优化滴灌压差施肥系统的设计与运行, 通过田间试验综合评价了施肥罐两端压差 (0.05、0.10、0.15、0.20 和 0.25 MPa) 和管道布置方式 (纵向一端、纵向中间、横向一端和横向中间供水) 对系统灌水与施肥均匀性的影响。结果表明, 施肥罐两端压差与管网布置方式对灌水均匀性的影响均不显著, 但管道布置方式对灌水均匀性的影响强于施肥罐两端压差。对于纵向一端和纵向中间供水, 施肥罐两端压差对施肥均匀性的影响达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 而横向一段和横向中间供水时施肥罐两端压差对施肥均匀性影响不显著。总体而言, 滴灌压差施肥系统灌水均匀性优于施肥均匀性, 横向供水方式均匀性高于纵向供水方式。为了同时保证滴灌压差施肥系统灌水与施肥的均匀性, 建议优先采用横向供水管道布置方式, 同时尽量降低施肥罐两端差压, 延长系统施肥时间。

**关键词:** 灌溉; 肥料; 管道系统; 压差式施肥罐; 肥液浓度衰减; 均匀度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.014

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0096-06

范军亮, 张富仓, 吴立峰, 闫世程, 向友珍. 滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 96-101. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.014 http://www.tcsae.org

Fan Junliang, Zhang Fucang, Wu Lifeng, Yan Shicheng, Xiang Youzhen. Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 96-101. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.014 http://www.tcsae.org

### 0 引言

滴灌施肥技术是对作物完成灌水的同时施用水溶性肥料, 实现水和肥一体化的利用和管理, 即水肥一体化技术<sup>[1]</sup>。作为一种高效的节水省肥技术, 滴灌施肥可有效提高中国水肥资源利用率, 对缓解农业水资源短缺及降低农田肥料污染具有重要意义<sup>[2]</sup>。目前, 滴灌施肥技术常见的有压差式施肥罐施肥、文丘里吸肥, 比例式施肥泵注肥等。压差式施肥技术主要是利用施肥罐前后压差将肥料溶液带入滴灌管道, 再通过滴灌带、滴灌管等灌水器, 将肥料以较小流量准确地输送到作物根部附近的土壤表面, 以水滴形式灌入土层中供作物根系直接吸收利用。文丘里吸肥器和比例式注肥泵均可提供较为恒定的肥液浓度, 但是前者水头损失大, 后者需要外加动力和装置, 运行成本高, 使其推广和应用受到了一定限制。压差式施肥罐以其造价低廉, 操作与维修简单等优点, 广泛应用于温室大棚蔬菜和新疆大田棉花, 是目前滴灌系统中应用最普遍的一种滴灌施肥装置, 具有广阔的应

用前景。

灌水与施肥均匀性是评价滴灌施肥系统性能和质量的重要指标, 也是水肥一体化系统设计和运行的重要参数<sup>[3]</sup>。施肥过程中肥液浓度持续衰减是滴灌压差施肥系统的最主要特征<sup>[4-5]</sup>, 施肥罐两端压差是影响施肥罐出口肥液浓度衰减过程和施肥时间的最主要因子。孟一斌等<sup>[6]</sup>指出施肥罐两端压差越大, 肥液浓度衰减速度越快, 施肥时间越短。李久生等<sup>[3]</sup>在田间评估了地下滴灌系统中压差式施肥罐、文丘里吸肥器和比例式注肥泵 3 种施肥装置的性能, 指出肥液浓度不断衰减导致压差式施肥罐的灌水与施肥变差系数高于文丘里吸肥器和比例式注肥泵。然而, 不同压差下肥液衰减过程对滴灌压差施肥系统水肥均匀性的影响还不清楚。对滴灌压差施肥系统而言, 除了施肥罐两端压差, 管道布置方式也是影响系统灌水和施肥均匀性的重要因素。孙梦莹<sup>[7]</sup>比较分析了温室滴灌毛管横向和纵向布置对系统灌水均匀性的影响, 发现毛管纵向布置时, 铺设长度长, 水头损失较大, 滴灌毛管横向布置灌水均匀度大于纵向布置。然而, 有关管道布置方式对系统施肥均匀性影响尚无研究。综上所述, 国内外学者对滴灌系统灌水均匀性的评价已较为成熟<sup>[8-10]</sup>, 但对滴灌系统灌水与施肥均匀性综合评价还较少<sup>[11]</sup>, 特别是对广泛应用的滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性的研究还未见报道。本研究通过田间试验综合评价不同施肥罐两端压差和管道布置方式下系统灌水与施肥均匀性, 为滴灌压差施肥灌溉系统的优化设计和运行管理提供科学依据。

收稿日期: 2015-12-02 修订日期: 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51509208); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2011AA100504)。

作者简介: 范军亮, 男, 陕西宝鸡人, 博士, 讲师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: nwwfjl@163.com

\*通信作者: 张富仓, 男, 陕西武功人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

# 1 材料与方 法

## 1.1 试验布置

试验于 2015 年 5—8 月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室所属的节水灌溉试验站进行。参照常见温室大棚尺寸和大田轮灌施肥面积，选取 72 m×7 m 的平整土地作为试验地块（图 1）。试验采用水泵加压式滴灌系统，灌溉水源采用地下水。供水主管道为直径 50 mm 聚氯乙烯管，支管为直径 32 mm 聚乙烯管。毛管采用内镶贴片式滴灌带（杨凌秦川节水灌溉设备工程有限公司），内径 16 mm，滴头间距 50 cm，滴头流量 1.5 L/h，滴灌工作压力 0.05 MPa。施肥装置为 25 L 压差式施肥罐（河北润田兄弟节水公司），试验肥料选用氯化钾 KCl（K<sub>2</sub>O 质量分数≥65.2%）（中化国际化肥贸易公司）。施肥装置主要由压差式施肥罐、过滤器、调压阀门和水表等组成，其中，叠片式过滤器（直径 32 mm，精度 120 μm）安装在施肥罐后部。将精度为±1% 压力表分别安装于主管道上下游，控制通过施肥罐两端压差和滴灌系统出口压力。主管道同时装有水表和调节阀，以便控制灌水量和辅助调节所需压差。为保证滴灌带在适宜的参数下运行，施肥罐出口压力始终控制为 0.05 MPa。

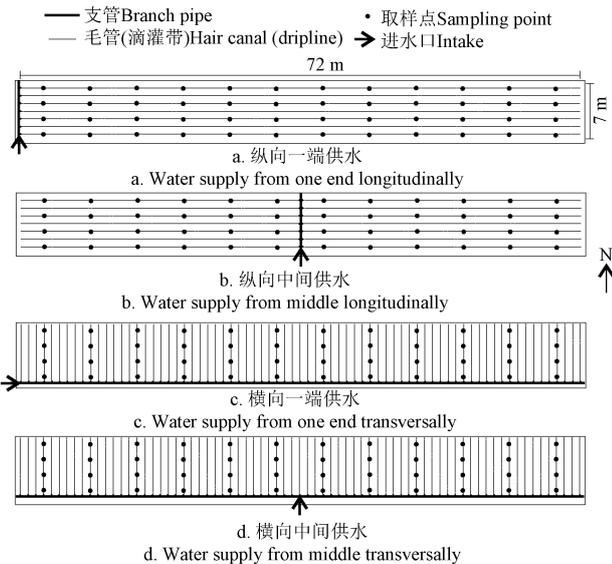


图 1 试验地供水管道及采样点布置图

Fig.1 Schematic layout of water supply lines and sampling points in experimental plots

## 1.2 试验设计

试验考虑施肥罐两端压差和管道布置方式 2 个因素，施肥罐两端压差分为 0.05、0.10、0.15、0.20 和 0.25 MPa 5 个水平，管道布置采用纵向一端、纵向中间、横向一端和横向中间供水 4 种方式（图 1），共进行 20 组施肥罐两端压差和管道布置方式组合的试验，每个组合重复 3 次。对于纵向方式，在试验地块内按 1 m 的滴灌带间距沿地块长度方向（纵向）布设 7 条滴灌带，长度均为 72 m，分别从地块一端（图 1a）和中间位置（图 1b）沿横向布置的支管对滴管带供水；对于横向方式，在试验地内按

1 m 的滴灌带间距沿地块宽度方向（横向）布设 72 条滴灌带，长度均为 7 m，分别从地块一端（图 1c）和中间位置沿纵向布置的支管对滴管带供水（图 1d）。根据 ASAE 标准 EP458<sup>[12]</sup>，置信度取 90%（1.7%~2.4%），试验设定 48 个取样点。为了具有较好的代表性和一致性，试验按照均匀布点的原则取样，其中沿东西方向设置 12 个取样点，取样点间距为 6 m；沿南北方向设置 4 个取样点，取样点间距为 2 m（图 1）。为了收集各滴头灌水总量，在各取样滴头下方挖设小坑并安放容积为 3 L 的量杯，确保量杯表面与地表齐平。

每次试验采用相同的灌水量，均为 2.0 m<sup>3</sup>。每次将 2 kg 氯化钾肥料在施肥罐内配制成 25 L 的肥液，并充分搅拌，使其完全溶解混合均匀，此时测得的肥液浓度即为初始浓度。用相对浓度（取样时刻肥液浓度占初始肥液浓度百分比）来表示施肥罐出口肥液浓度的变化。为了测得肥液浓度的衰减过程，在施肥罐出口处设置取样点。注肥开始前 10 min 每隔 1 min 采集 100 mL 氯化钾溶液测定肥液电导率，此后每隔 5 min 采集 1 次样品，当采集的氯化钾溶液与清水电导率接近时停止采样（肥液相对浓度<1%）。每次试验前 10 min 只灌清水，使系统稳定，然后通过施肥罐开始注入肥液，直至 2 kg 肥料施完，随后用清水冲洗管道，直至额定水量灌完。取样从整个试验开始直至结束，试验结束后用量筒测定每个量杯内肥液的体积，同时用 FE30K 型电导率仪（梅特勒-托利多公司）测定肥液的电导率，测试范围 0~199.9 mS/cm，精度±0.5%。然后用事先率定的肥液浓度与电导率的关系曲线将其转化为肥液浓度，肥液浓度与溶液体积的乘积即为施肥总量。

## 1.3 数据分析

用 Microsoft Excel 2010 进行数据计算；用 SPSS Statistics 16.0 统计软件进行方差分析（Tukey HSD）；用 R 语言和 OriginPro 绘图。

## 1.4 灌水与施肥均匀性评价指标

本文采用以下 3 个指标评价滴灌压差施肥系统灌水与施肥的均匀性：

1) 克里斯琴森均匀系数为<sup>[13]</sup>

$$U_c = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot \bar{x}} \right) \tag{1}$$

式中  $U_c$  为克里斯琴森均匀系数，%； $x_i$  为第  $i$  个（灌水总量或施肥总量）观测值； $\bar{x}$  为样本均值； $n$  为观测值个数（ $n=48$ ）。

2) 分布均匀度<sup>[14]</sup>为

$$DU = 100 \times \frac{\overline{x_{1/4}}}{\bar{x}} \tag{2}$$

式中  $DU$  为分布均匀度（distribution uniformity），%； $\overline{x_{1/4}}$  为样本中较小的 1/4 观测值的均值。

3) 统计均匀度

$$U_s = 100 \times \left( 1 - \frac{s}{\bar{x}} \right) \tag{3}$$

式中  $U_s$  为统计均匀度，%； $s$  为样本观测值的标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同压差条件下施肥罐出口肥液浓度衰减过程

图2描绘了5种不同压差(0.05、0.10、0.15、0.20和0.25 MPa)条件下施肥罐出口肥液相对浓度随时间的衰减过程。从图2可知,肥液浓度随时间呈指数函数急剧递减,主要是由于压差式施肥罐在施肥过程中,在所施压差的作用下,主管道中的水流不断进入施肥罐内稀释原有肥液,造成出流肥液浓度不断减小。压差为0.15、0.20和0.25 MPa时,在初始15 min内肥液浓度下降很快,而0.05和0.10 MPa压差条件下,在初始30 min内肥液浓度下降较快,之后均逐渐趋于平缓,而且肥液浓度也达到较低的水平。压差0.05、0.10、0.15、0.20和0.25 MPa下,施肥时间在75、65、45、30和25 min左右,肥料罐内的相对浓度约降为1%,也就是说,此时施肥罐内仅残留有大约20 g氯化钾肥料,可以认为施肥基本结束。在不同压差条件下肥液相对浓度差异性显著,例如,5和30 min时,0.05、0.15和0.25 MPa压差条件下的肥液相对浓度分别为78%、61%、50%和15%、3%、1%。说明氯化钾肥量一定时,在给定时刻,施肥罐两端的压差越大,肥液相对浓度越小;而且施肥罐两端的压差越大,施肥时间就越短。该结果与前人研究结果<sup>[5,15]</sup>类似,这是因为施肥罐两端压差越大,进入施肥罐中的水流流量就越大,从而促进了水流与原有肥液的快速混合与替换。

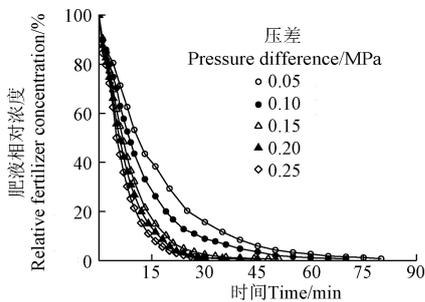


图2 不同压差条件下施肥罐出口肥液相对浓度随时间衰减过程  
Fig.2 Changes of relative fertilizer concentration with time at outlet of fertilizer tank under different pressure differences

### 2.2 各滴头灌水总量与施肥总量空间分布特征

不同施肥罐两端压差与管道布置方式组合下各滴头灌水总量和施肥总量沿地块长度方向(纵向)的空间分布情况分别如图3和图4所示。图中每个点代表试验地块内纵向4条采样线3次重复试验的平均值。由图3可以看出,对于纵向和横向一端供水方式,各滴头灌水总量表现出沿地块纵向逐渐减小的趋势,而对于纵向和横向中间供水方式,各滴头灌水总量则表现出从地块中间向两端递减的趋势。也就是说,各滴头灌水总量随离支管进口和滴灌带进口距离的增大总体呈现降低趋势。该结论与李久生等<sup>[3]</sup>研究结果相似,这现象主要是因为沿水流方向,管道系统会产生一定的水头损失,使得沿管线方向灌水器工作压力变化幅度较大,导致各滴头出流不均匀。

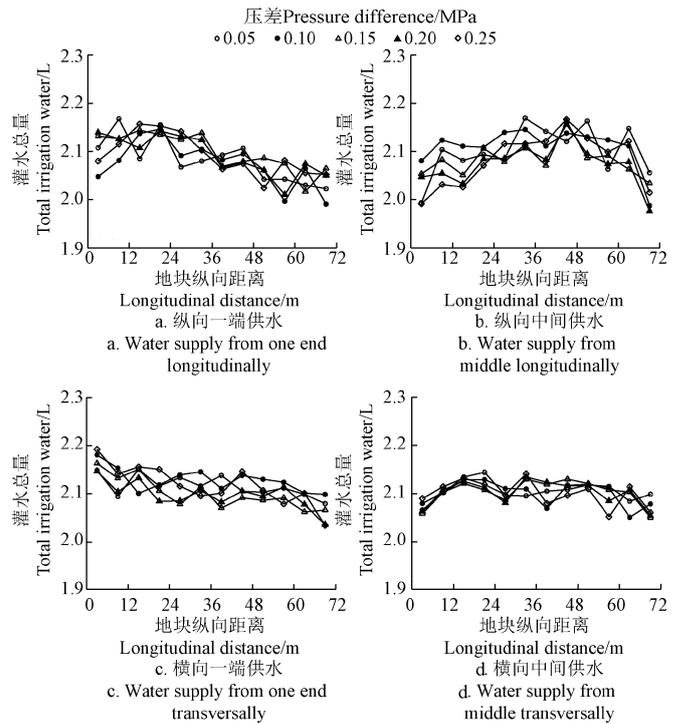


图3 各滴头灌水总量沿地块长度方向(纵向)的空间变化情况

Fig.3 Variations of discharge volume of each emitter along longitudinal direction

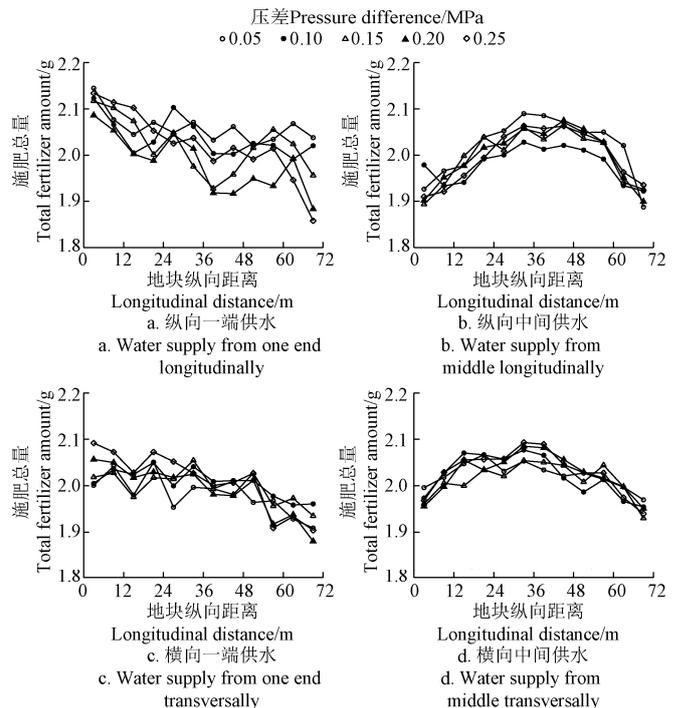


图4 各滴头施肥总量沿地块长度方向(纵向)的空间变化情况

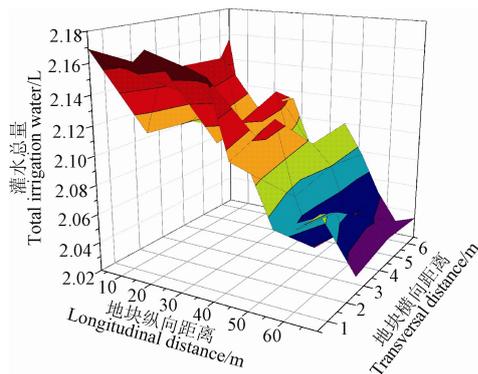
Fig.4 Variations of fertilizer mass of each emitter along longitudinal direction

然而,各滴头灌水总量纵向空间变化存在一定起伏性,这可能是由于试验地块微地形起伏引起水压波动<sup>[3]</sup>或滴灌带滴头制造偏差<sup>[16]</sup>所造成的。但是,对于纵向一端和横向中间供水而言,各滴头灌水总量沿地块纵向变幅缩小,这可能是由于采用纵向供水方式时,长度较短的

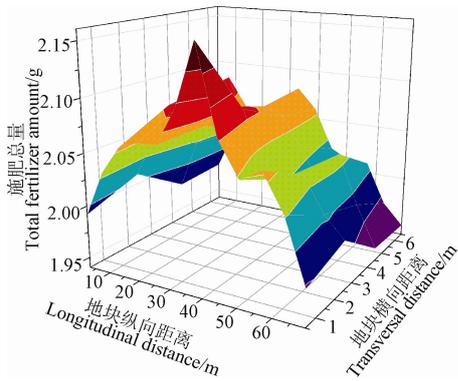
滴灌带沿地块宽度方向（横向）布置，水流先沿纵向进入管径较粗的支管，从而减小了滴灌带中的水头损失。

与各滴头灌水总量空间分布特征相似，对于纵向和横向一端供水方式，各滴头施肥总量表现出沿地块纵向明显降低的趋势，而对于纵向和横向中间供水方式，各滴头施肥总量则表现出从中间向两侧逐渐较小的趋势。也就是说，各滴头施肥总量随离支管进口和滴灌带进口距离的增大呈现明显降低趋势，这种现象主要是由于肥液浓度急剧衰减，引起流至滴灌带尾端滴头的肥液浓度减小<sup>[11]</sup>和管道水头损失增大共同造成的。但是，滴头施肥总量纵向空间变化也存在一定起伏性，产生起伏的原因可能是氯化钾肥料随水压波动或灌水器产生堵塞。但是，对于横向一端和横向中间供水而言，各滴头施肥总量由东到西变幅减小，这主要是因为水流先进入沿纵向布置管径较粗的支管，一方面减小了滴灌带中的水头损失，另一方面缩小了肥液浓度沿纵向的时空变异性。

进一步对不同施肥罐两端压差与管道布置方式组合下各滴头灌水总量和施肥总量沿地块纵向和横向的三维空间分布情况（图 5）分析可知，灌水总量和施肥总量沿纵向和横向均表现出衰减趋势。



a. 纵向一端供水  
a. Water supply from one end longitudinally



b. 横向中间供水  
b. Water supply from middle transversally

图 5 施肥罐压差为 0.15 MPa 时纵向一端供水灌水总量和横向中间供水施肥总量的三维图

Fig.5 Three-dimensional plots of total irrigation amount with water supply from one end longitudinally and fertilizer amount with water supply from middle transversally under differential pressure of 0.15 MPa

以 0.15 MP 施肥罐两端压差情况下，纵向一端供水时灌水总量和横向中间供水时施肥总量的三维空间分布为例，可以发现，对于纵向一端供水方式，各滴头灌水总量总体表现出沿地块纵向减小的趋势，同时灌水总量沿横向也有一定的衰减变化（图 5a）。对于横向中间供水，各滴头施肥总量表现出从地块中间向两端递减的趋势，其沿横向同样有较小程度的衰减（图 5b）。不同组合下灌水总量和施肥总量沿地块横向方向递减主要是由水流在支管及滴灌带中的水头损失所造成的，但由于地块横向宽度较短，与纵向水头损失相比，其衰减程度相对较弱。

### 2.3 不同施肥罐两端压差和管道布置方式组合下灌水与施肥均匀性评价

滴灌压差施肥系统在不同组合下灌水总量和施肥总量均匀性评价指标如表 1 所示。由表 1 可知，不同组合下灌水总量的均匀性都较好，克里斯琴森均匀系数为 93%~97%，分布均匀度为 91%~96%，统计均匀度为 92%~96%。该结果比李久生等<sup>[3]</sup>所得地下滴灌压差施肥系统在不同滴灌带埋深下灌水均匀性（克里斯琴森均匀系数为 92%~95%，分布均匀度为 89%~92%，统计均匀度为 89%~91%）稍高。究其原因，一方面是因为地下滴灌系统影响灌水均匀性的因素更多，如土壤特性空间变异性、土壤颗粒堵塞灌水器等，这些往往导致地下滴灌系统灌水均匀性更差；另一方面李久生等<sup>[3]</sup>采用纵向一端供水方式对 3 种滴灌带埋深进行了评估，从而灌水均匀性整体偏低。方差分析表明，施肥罐两端压差和管道布置方式对灌水总量均匀性的影响均不显著，但管道布置方式对灌水总量均匀性的影响强于施肥罐两端压差。

表 1 不同施肥罐两端压差和管道布置方式下灌水总量与施肥总量均匀性比较

Table 1 Comparison of fertigation uniformity under various combinations of pressure difference and piping layout

管道布置 Piping layout	压差 Pressure difference/ MPa	灌水总量 Total irrigation water				施肥总量 Total fertilizer amount			
		Cu/%	DU/%	Us/%	U/%	Cu/%	DU/%	Us/%	U/%
纵向一端供水 Water supply from one end longitudinally	0.05	95	95	94	95	90	89	90	90
	0.10	93	92	91	92	92	90	86	89
	0.15	93	92	93	93	88	84	85	86
	0.20	94	92	91	92	85	83	81	83
横向一端供水 Water supply from one end transversally	0.25	93	92	93	93	80	75	73	76
	0.05	96	94	95	95	92	90	88	90
	0.10	95	94	94	94	91	88	87	89
	0.15	94	93	93	93	91	89	85	88
横向中间供水 Water supply from middle transversally	0.20	94	93	93	93	89	86	85	87
	0.25	94	91	92	92	83	80	79	81
	0.05	96	94	94	95	94	93	92	93
	0.10	95	95	92	94	93	94	94	94
纵向中间供水 Water supply from middle longitudinally	0.15	94	94	95	94	94	93	93	93
	0.20	96	95	94	95	93	91	90	91
	0.25	95	93	92	93	93	90	89	91
	0.05	96	96	96	96	96	95	94	95
纵向一端供水 Water supply from one end longitudinally	0.10	97	96	95	96	95	95	93	94
	0.15	95	96	95	95	94	93	93	93
	0.20	96	94	94	95	96	94	94	95
	0.25	96	95	94	95	95	93	92	93

注：Cu、DU、Us 和 U 分别代表克里斯琴森均匀系数、分布均匀度、统计均匀度和平均统计度（以上三者均匀度平均值）。  
Note: Cu, DU, Us and U represent Christiansen's uniformity coefficient, distribution uniformity, statistical uniformity and average uniformity (average of above three indices), respectively.

然而,不同组合下施肥总量的均匀性差异则较大,克里斯琴森均匀系数为80%~96%,分布均匀度为75%~95%,统计均匀度为73%~94%。该结果比李久生<sup>[3]</sup>等所得地下滴灌压差施肥系统在不同滴灌带埋深下施肥均匀性(克里斯琴森均匀系数为89%~93%,分布均匀度为82%~89%,统计均匀度为80%~89%)稍高,其原因与灌水均匀性相似。施肥罐两端压差0.05 MPa与横向中间供水方式组合的施肥均匀性最好,而施肥罐两端压差0.25 MPa与纵向一端供水方式组合的施肥均匀性最差。方差分析表明,对于纵向一端和中间供水,压差对施肥总量均匀性的影响达显著水平( $P<0.05$ ),而横向一端和中间供水条件下,压差对施肥总量均匀性的影响不显著,此时可按实际需要选择灌水与施肥时间,降低或增加压差并不会对施肥均匀性产生很大影响。

纵向一端供水时压差在0.05~0.25 MPa之间以0.05 MPa增大时,平均施肥均匀度分别减小了1%、4%、7%和14%;纵向中间供水时压差在0.05~0.25 MPa之间以0.05 MPa增大时,平均施肥均匀度分别减小了1%、2%、3%和9%,说明纵向一端供水方式下压差对施肥均匀度的影响稍大于纵向中间供水方式。因此,对于纵向一端和纵向中间供水方式,选择较低的施肥罐压差(如0.05和0.10 MPa)施肥均匀度波动范围较小,施肥比较均匀(>88%)。

总体而言,横向供水方式的施肥均匀性高于纵向供水方式,其中中间供水方式又优于一端供水方式。横向供水时肥液先沿纵向进入较粗的支管,再向各横向布置的滴灌带分配肥液,使时间滞后性在纵向所造成的肥液浓度不均匀性降到最低,特别是横向中间供水方式,肥液沿纵向对称分布,施肥均匀性更好。对于纵向布置方式,肥液直接流入较长的滴灌带,肥液在管道传输中有一定的延时性,当肥液输送到靠后的滴头时,肥液浓度已经显著降低,特别是在高压差条件下,肥液浓度的衰减过程更快,其滞后和延时差距会更大,从而导致施肥均匀性显著降低。低压差条件下灌水与施肥均匀性总体优于高压差,特别是对于纵向一端和中间供水方式尤为显著,其在0.05和0.25 MPa压差下灌水总量均匀度分别是施肥总量均匀度的1.06和1.22倍,1.06和1.14倍;而横向一端和中间供水方式的灌水总量和施肥总量均匀度相近(1.02和1.03倍,1.01和1.02倍)。

### 3 结论与讨论

压差施肥是目前滴灌系统中应用最普遍的一种滴灌施肥技术,本文综合评价了施肥罐两端压差和管道布置方式2个主要因素对滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性的影响,主要结论如下:

1) 使用压差式施肥罐施肥时,施肥罐出口肥液相对浓度随时间呈指数函数持续快速减小,中高压差(0.15、0.20和0.25 MPa)条件下,在初始15 min内肥液浓度下降很快,而低压差(0.05和0.10 MPa)条件下,在初始30 min内则下降较快;在特定时刻,压差越大,肥液相对浓度越低。

2) 对于纵向一端和中间供水,压差对施肥总量均匀性的影响达显著水平( $P<0.05$ ),而横向一端和中间供水条件下,压差对施肥总量均匀性的影响不显著。

3) 滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性和施肥罐两端压差及管道布置方式密切相关。对于纵向一端和纵向中间供水方式,0.05和0.25 MPa压差下灌水均匀度分别是施肥均匀度的1.06和1.22倍,1.06和1.14倍;而横向一端和纵向中间供水方式下灌水与施肥均匀度相近。为同时保证滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性,建议优先选用横向供水方式,同时选择肥液浓度衰减较缓的低施肥压差。

### [参 考 文 献]

- [1] 余剑东,倪吾钟,杨肖娥. 肥水管理新技术—肥灌[J]. 土壤通报, 2003, 34(2): 148—153.  
Yu Jiandong, Ni Wuzhong, Yang Xiaoe. A new technique for the management of fertilizers and water-fertigation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(2): 148—153. (in Chinese with English abstract)
- [2] 韩启彪,冯绍元,黄修桥,等. 滴灌压差施肥技术研究概况与发展趋势[J]. 中国农村水利水电, 2014(9): 1—4.  
Han Qibiao, Feng Shaoyuan, Huang Xiuqiao, et al. Research on the pressure differential fertilization of drip irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(9): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李久生,杜珍华,栗岩峰. 地下滴灌系统施肥灌溉均匀性的田间试验评估[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 83—87.  
Li Jiusheng, Du Zhenhua, Li Yanfeng. Field evaluation of fertigation uniformity for subsurface drip irrigation systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 83—87. (in Chinese with English abstract)
- [4] 封俊,沈雪民,刘春和,等. 压差式喷灌施肥装置的研究[J]. 农业工程学报, 1991, 7(2): 107—113.  
Feng Jun, Shen Xuemin, Liu Chunhe, et al. A study on the pressure differential fertilizer injection unit in sprinkler irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 1991, 7(2): 107—113. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈剑,吕新. 滴灌棉田压差式施肥罐注肥均匀度研究与分析[J]. 节水灌溉, 2011(1): 62—64.  
Chen Jian, Lü Xin. Study on fertilization uniformity of pressure differential tank in drip irrigation cotton field[J]. Water Saving Irrigation, 2011(1): 62—64. (in Chinese with English abstract)
- [6] 孟一斌,李久生,李蓓. 微灌系统压差式施肥罐施肥性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 41—45.  
Meng Yibin, Li Jiusheng, Li Bei. Fertilization performance of the pressure differential tank in micro-irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 41—45. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孙梦莹. 温室滴灌应用现状与滴灌设计参数研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.  
Sun Mengying. The Research of Application Situation and Technical Parameters of Drip Irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [8] 范兴科,吴普特,牛文全,等. 低压滴灌条件下提高系统灌水均匀度的途径探讨[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 18—20.  
Fan Xingke, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. The methods of improving system's irrigation uniformity under low-pressure

- drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1): 18—20. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张林, 吴普特, 范兴科, 等. 低压滴灌灌水均匀度试验研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(12): 207—212.  
Zhang Lin, Wu Pute, Fan Xingke, et al. Experimental research on drip irrigation uniformity at low-pressure[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2009, 37(12): 207—212. (in Chinese with English abstract)
- [10] 黄凯, 蔡德所, 潘伟, 等. 广西赤红壤甘蔗田间滴灌带合理布置参数确定[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 136—137.  
Huang Kai, Cai Desuo, Pan Wei, et al. Determination of drip tapes layout parameters for irrigation of sugarcane in latosolic red soil in Guangxi Autonomous Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(11): 136—137. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周舟, 傅泽田, 王秀, 等. 滴灌施肥机灌水与施肥均匀性试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 7—13.  
Zhou Zhou, Fu Zetian, Wang Xiu, et al. Experiment of fertigation uniformity of drip fertigation machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 7—13. (in Chinese with English abstract)
- [12] ASAE. Field evaluation of micro-irrigation systems: EP458 [S]. St Joseph, Mich: ASAE, 1999.
- [13] Christiansen J E. Hydraulics of sprinkling systems for irrigation[J]. Amer Soc Civ Eng, 1942, 107: 221—239.
- [14] Kruse E G. Describing irrigation efficiency and uniformity[J]. J Irrig Drain Div, 1978, 104(1): 35—41.
- [15] 邓兰生, 张承林, 郭彦彪. 压差施肥罐施肥时间解析[J]. 节水灌溉, 2007(3): 26—28.  
Deng Lansheng, Zhang Chenglin, Guo Yanbiao. Fertilization time of pressure differential tank[J]. Water Saving Irrigation, 2007(3): 26—28. (in Chinese with English abstract)
- [16] 朱德兰, 吴普特, 王剑. 滴头制造偏差对灌水均匀度及毛管造价的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 175—179.  
Zhu Delan, Wu Pute, Wang Jian. Effect of emitters manufacturing variation of micro-irrigation on uniformity and lateral cost [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 29(2): 175—179. (in Chinese with English abstract)

## Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank

Fan Junliang<sup>1,2</sup>, Zhang Fucang<sup>1,2\*</sup>, Wu Lifeng<sup>3</sup>, Yan Shicheng<sup>1,2</sup>, Xiang Youzhen<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Chinese Arid Area Research Institute of Water-saving Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. School of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** Fertigation with drip irrigation systems have become increasingly popular in agricultural and horticultural production. Irrigation and fertilization uniformity are important parameters to quantify and evaluate the quality of water and fertilizer distributions in the fertigation system. To optimize the design and operation of the drip irrigation system with pressure differential tank, the effects of various differential pressures and piping arrangements on the irrigation and fertilization uniformity were comprehensively evaluated through field experiments. The field experiments were carried out at the Water-saving Station of the Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas sponsored by Ministry of Education, at the Northwest A&F University. A sampling tap was installed at the outlet of the fertilizer injector to measure the fertilizer solution changes with time. Treatments were 5 differential pressure levels (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 and 0.25 MPa) and 4 piping arrangement types (water supply from one end longitudinally, from the middle longitudinally, from one end transversally, and from the middle transversally). Three replications were conducted for each combination. There were 12 sampling points at spacing of 6 m along the longitudinal direction, and 4 sampling points at spacing of 2 m along the transversal direction. The fertigation uniformity was evaluated with 3 indexes, i.e., Christiansen's uniformity coefficient, distribution uniformity and statistical uniformity. The results showed that: 1) the relative fertilizer concentration rapidly decreased in the form of power function, especially in the beginning 15 min under moderate and high differential pressures (0.15, 0.20 and 0.25 MPa) and in the beginning 30 min under low differential pressures (0.05 and 0.10 MPa). At given time, the higher the differential pressure was, the lower the fertilizer concentration was; 2) For water supply from one end and from the middle longitudinally, differential pressure significantly ( $P < 0.05$ ) affected the fertilization uniformity of the fertigation system. However, for water supply from one end and from the middle transversally, the effects of differential pressure on the fertilization uniformity were not significant, when the increase or decrease in pressure differences would not obviously affect the fertilization uniformity and the fertigation time could be adjusted as needed in practice; and 3) For water supply from one end and from the middle longitudinally, the irrigation uniformity under 0.05 and 0.25 MPa was 1.06 and 1.22, 1.06 and 1.14 times higher than the fertilization uniformity, respectively. Overall, the irrigation uniformity of the fertigation system was better than its fertilization uniformity, both of which decreased as the pressure difference increased. Besides, the irrigation and fertilization uniformity of the fertigation system with transversal water supply was better than that with longitudinal water supply, in which the water supply from the middle was further better than that the water supply from one end. To ensure both high irrigation and fertilization uniformity, the piping arrangement with transversal water supply was highly recommended, and the differential pressure of the fertilizer tank should be minimized to extend the fertilization time of the fertigation system. The research provides a scientific guidance for the design optimization and operational management of the drip irrigation system with pressure differential tank in China.

**Keywords:** irrigation; fertilizers; piping systems; pressure differential tank; attenuation in fertilizer concentration; uniformity