

低压滴灌灌水均匀度试验研究

张 林^{1,2}, 吴普特², 范兴科², 牛文全², 喻黎明^{1,2}

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】**通过对灌水均匀度的研究, 寻求改进和提高低压灌溉系统灌水均匀度的途径和方法。**【方法】**通过试验研究了低压条件下毛管进口压力、铺设长度、铺设坡度及管径等参数对灌水均匀度的影响, 并用 SPSS 统计分析软件对试验数据进行了处理。**【结果】**在其他条件不变时, 灌水均匀度随着毛管管径的增大而增大, 随着毛管铺设长度的增大而减小, 逆坡时, 随着坡度的增大而减小, 顺坡时, 随着坡度的增大呈先增大后减小的趋势; 毛管进口压力对灌水均匀度影响不显著, 毛管铺设长度、管径及铺设坡度对灌水均匀度影响显著, 其中毛管铺设长度影响最大, 毛管管径次之, 毛管铺设坡度最小。**【结论】**可以通过适当增大毛管管径、减小灌水器设计流量及对地形适当分区等措施, 提高低压滴灌系统的灌水均匀度, 保证系统的灌水质量。

【关键词】 低压滴灌; 灌水均匀度; 毛管铺设长度; 毛管管径

【中图分类号】 S274.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)12-0207-06

Experimental research on drip irrigation uniformity at low-pressure

ZHANG Lin^{1,2}, WU Pu-te², FAN Xing-ke², NIU Wen-quan², YU Li-ming^{1,2}

(1 College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** The study was done in order to improve low-pressure drip irrigation uniformity.

【Method】 The experiment was conducted to study the influence of lateral inlet operating pressure, lateral length, terrain slope and lateral diameter on irrigation uniformity at low pressure. The experimental data was analyzed with SPSS. **【Result】** The result shows that, irrigation uniformity increases as lateral diameter increases, decreases as lateral length increases, decreases as terrain slope increases on uphill slope and increases firstly and decreases later as terrain slope increases on downhill slope. There is no significant statistical difference between lateral inlet operating pressure and irrigation uniformity. Lateral length, lateral diameter and terrain slope have a significant influence on irrigation uniformity. The influence of lateral length is more significant than that of lateral diameter, and the influence of lateral diameter is more significant than that of terrain slope. **【Conclusion】** Irrigation uniformity can be improved by increasing lateral diameter, decreasing designed flow rate of emitter and dividing the land into several zones according to terrain elevation.

Key words: low-pressure drip irrigation; irrigation uniformity; lateral length; lateral diameter

低压滴灌是一种高效节能型灌水技术, 采用低压滴灌不仅可以减少灌溉系统的建设成本, 而且可

以降低其运行成本, 因此低压滴灌将是未来滴灌技术发展的重要方向。为了与传统的滴灌系统相

* [收稿日期] 2009-03-31

[基金项目] 国家“863”重点项目“微压滴灌系统与产品”(2006AA100214)

[作者简介] 张 林(1981—), 男, 湖北随州人, 博士, 主要从事节水灌溉理论与设备研究。

E-mail: z10211wy@yahoo.com.cn

[通信作者] 吴普特(1963—), 男, 陕西武功人, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水农业研究。E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

区别,将滴头设计水头取值为 100 kPa 的滴灌系统称之为常规滴灌系统,而将滴头设计水头不大于 50 kPa ,既能满足灌溉要求,又没有能量浪费或闲置的滴灌系统定义为低压滴灌系统^[1]。在低压滴灌系统中,水力环境的变化会对毛管有效铺设长度及系统灌水质量产生重要影响,为了不以牺牲灌水质量来换取成本的降低,对低压滴灌系统灌溉质量的研究显得尤为重要。灌水均匀度是衡量滴灌系统灌水质量的一项重要指标,在低压条件下研究灌水均匀度对低压滴灌系统的研发具有重要的指导意义。影响灌水均匀度的因素很多,如灌水器工作压力的变化、灌水器的堵塞状况、灌水器的制造偏差、灌溉水的温度变化以及地面高低起伏的变化等^[2-5]。Kang^[6]研究了不同坡度条件下压力变化对灌水均匀度的影响;Bralts 等^[7-9]研究了压力变化、制造偏差及滴头堵塞等因素对灌水均匀度的影响;Barragan 等^[10]、Burt^[11]以及 Nakayama 等^[12]分别从不同的角度探讨了微灌灌水均匀度的计算方法;陈渠昌等^[13]通过对农作物产量与水的关系及灌水均匀度与工程造价的关系的分析,建立了工程投入与产出比函数,并据此优化确定了微灌设计灌水均匀度的值;苏德荣^[14]

用概率的方法分析了压力变化对出流均匀度的影响,提出用均匀度保证率指标和现行的均匀度指标来共同设计和评价微灌系统。前人的这些研究成果,对于滴灌系统的设计和应用无疑起到了重要作用,但是前人的研究主要集中在常规滴灌系统中,对低压滴灌系统涉及甚少。本研究通过试验探讨了低压条件下毛管进口压力、铺设长度、铺设坡度及管径等因素对灌水均匀度的影响,分析各因素影响灌水均匀度的程度,以期寻求改进和提高低压滴灌系统灌水均匀度的途径和方法,从而为低压滴灌技术的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心节水基地进行。试验采用微管式滴头,滴头内径 1.2 mm,流态指数为 0.685,滴头间距 40 cm,设计流量为 4 L/h。试验重点研究毛管进口压力、铺设长度、铺设坡度及管径等参数对灌水均匀度的影响。试验的因素及水平如表 1 所示。

表 1 滴灌均匀度试验因素与水平表

Table 1 Experimental factors and levels of drip irrigation uniformity

水平 Level	因素 Factor			
	毛管进口压力/kPa Lateral operating pressure	毛管铺设长度/m Lateral length	毛管铺设坡度/‰ Field slope along the lateral	毛管管径/mm Lateral diameter
1	20	40	—5	16
2	40	60	—2	20
3	60	80	0	25
4	80	100	2	32
5	100	—	5	—

注:顺流下坡(顺坡)时,毛管铺设坡度为正值;顺流上坡(逆坡)时,毛管铺设坡度为负值;平坡时,毛管铺设坡度为 0。

Note:Field slopes are uniform. Positive values are for downhill laterals,and negative values are for uphill laterals.

1.2 试验装置

滴灌均匀度试验装置如图 1 所示。该装置主要由水源、水箱、压力调节装置等组成。加压泵为系统提供额定工作压力,通过调节流量调节阀和分流阀获得系统需要的设计工作压力,并保持压力稳定,压力通过精度为 0.2 级的精密压力表读取;毛管铺设面由钢丝连接而成,毛管固定在钢丝上,沿着毛管等距离布设 13 个“T”形调节杆支座,作为钢丝铺设面的调坡控制点,通过调节支座高程来控制 and 调节铺设面坡度,并用自动安平水准仪来进行坡度校核;在每条毛管上的 40,60 及 80 m 处 3 个位置分别安装 1 个控制阀,通过控制阀来调节毛管测试长度;试验时在每条毛管上分别等距选取 8 个滴头,观测并记

录出流量及相应的出流时间,然后用称重法计算流量。

1.3 灌水均匀度的表示方法

按照《微灌工程技术标准》中的规定^[15],滴灌系统的灌水均匀度可用克里斯琴森均匀系数 Cu 来表示,并由下式计算:

$$Cu=1-\frac{\overline{\Delta q}}{q}$$
(1)

式中: Cu 为克里斯琴森均匀系数; $\bar{q}$ 为滴头的平均流量, $\bar{q}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n q_i$,其中 q_i 为第 i 滴头的流量, n 为滴头个数; $\overline{\Delta q}$ 为滴头平均流量与各滴头流量之差的绝对值的平均值, $\overline{\Delta q}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n |q_i-\bar{q}|$ 。

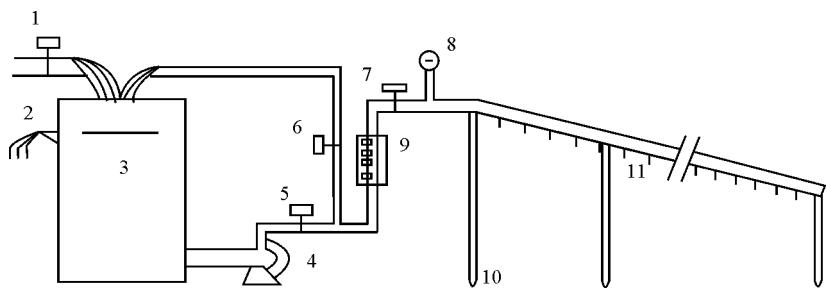


图 1 滴灌均匀度试验装置示意图

1. 进水阀;2. 溢流口;3. 水箱;4. 加压泵;5. 流量调节阀;6. 分流阀;7. 压力调节阀;8. 精密压力表;9. 过滤器;10. “T”形调节杆支座;11. 毛管
- Fig. 1 Sketch map of experiment equipment
1. Inlet valve;2. Overflow hole;3. Water tank;4. Pump;5. Flow regulator;6. Flow dividing valve;
7. Pressure regulator;8. Pressure meter;9. Filtration equipment;10. “T”shaped bracket;11. Lateral

1. 4 试验数据处理

SPSS(Statistical package for Social Science)是国际上最流行并具有权威性的统计分析软件之一,其功能强大,操作简单,能进行多种统计分析。本文利用 SPSS 统计分析软件对 400 组试验数据进行方差分析,分析了毛管进口压力、毛管铺设长度、毛管管径和毛管铺设坡度对灌水均匀度的影响。

2 结果与分析

2. 1 各因素对灌水均匀度的影响

灌水均匀度是衡量滴灌系统灌水质量的一项重要指标^[16],它反映了系统内每个滴头流量偏离平均

流量的程度,所以灌水均匀度问题实质上就是流量偏差的问题。滴灌系统的流量偏差源于灌水器工作水头的偏差,在不考虑地形条件及制造偏差的情况下,灌水器工作水头的偏差则主要来自管道输水过程中产生的沿程水头损失和局部水头损失,因此减小管道水头损失,能有效地缩小流量偏差,提高灌水均匀度。从表 2 可以看出,在其他条件不变时,灌水均匀度随着毛管铺设长度的增大而呈减小趋势,铺设长度越短,灌水均匀度越高。灌水均匀度随着毛管管径的增大呈增大趋势,管径越小,灌水均匀度越低。

表 2 低压条件下灌水均匀度统计表

Table 2 Statistics of irrigation uniformity at low pressure

因素 Factor	水平 Level	Cu 均值/% Average Cu	标准差 Standard deviation	95%置信区间 95% confidence interval	
				下限 Lower bound	上限 Upper bound
毛管进口压力/kPa Lateral operating pressure	20	84.237	12.063	82.657	85.817
	40	85.119	11.245	83.539	86.699
毛管铺设长度/m Lateral length	40	91.602	2.560	89.367	93.836
	60	90.343	3.987	88.108	92.577
	80	82.949	10.101	80.715	85.184
	100	73.819	14.874	71.584	76.053
毛管铺设坡度/‰ Field slope along the lateral	—5	80.543	15.683	78.044	83.041
	—2	84.566	12.088	82.068	87.065
	0	85.513	9.971	83.014	88.011
	2	86.069	9.764	83.57	88.567
	5	86.701	9.099	84.202	89.199
毛管管径/mm Lateral diameter	16	75.393	15.692	73.159	77.628
	20	85.464	6.798	83.229	87.698
	25	87.343	10.477	85.109	89.578
	32	90.512	4.284	88.278	92.747

注:表中数据为毛管进口压力 $H=20$ kPa 和 40 kPa 的低压条件下灌水均匀度的统计值。

Note:The statistical values of irrigation uniformity at $H=20,40$ kPa.

灌水均匀度与毛管铺设坡度的关系比较复杂,在逆坡条件下,灌水均匀度随毛管铺设坡度的增加

而减小,在顺坡条件下,灌水均匀度随毛管铺设坡度的增加而增大。从理论上分析,由于水力偏差与地形偏差的交互作用,逆坡条件下,地形坡度和毛管摩阻损失对滴头工作压力的影响是一致的,随着坡度的增加,每个滴头的实际工作水头偏离设计水头值更大,从而造成灌水均匀度随坡度的增大而减小;但是在顺坡条件下,地形坡度对毛管摩阻损失具有补偿作用,在一定坡度范围内滴头实际工作水头偏离设计水头的幅度随着坡度的增大而逐步减小,灌水均匀度随着坡度的增加而增大,但是当坡度超过一定值后,地形坡度对滴头工作压力偏差的影响将超过毛管摩阻损失的影响而成为主导因素,使得滴头实际工作水头偏离设计水头的幅度随着坡度的增大而逐步增大,灌水均匀度呈现随坡度增大而减小的

表 3 毛管进口压力对灌水均匀度影响的方差分析

Table 3 Analysis of variance between inlet pressure and irrigation uniformity

偏差来源 Source	偏差平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方差 Mean square	F 值 F value	P 值 Prob.	Eta 平方值 Eta squared
毛管进口压力 Lateral operating pressure	44.964	4	11.241	0.227	0.923	0.002
误差 Error	19 102.524	385	49.617			

注: $\alpha=0.05$ 。下表同。
Note: $\alpha=0.05$. The same as it for the following tables.

表 4 的方差分析表明,在 95% 的置信度及低压条件下,毛管管径、毛管铺设长度及铺设坡度对灌水均匀度的影响均呈显著水平,其中毛管铺设长度的影响最大,毛管管径的影响次之,毛管铺设坡度的影响最小。另外,表 4 中毛管铺设坡度对应的 F 值要较毛管铺设长度及管径对应的 F 值小得多,说明在一定的坡度范围内,毛管铺设坡度对灌水均匀度的影响远小于毛管管径及铺设长度的影响,因此,在低压条件下,当滴头设计流量也减小时,影响灌水均匀度的主要因素则为毛管铺设长度及管径。低压滴灌

表 4 低压条件下各因素对灌水均匀度影响的方差分析

Table 4 Analysis of variance between each factor and irrigation uniformity

因素 Factor	偏差平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方差 Mean square	F 值 F value	P 值 Prob.	Eta 平方值 Eta squared
毛管铺设坡度 Field slope along the lateral	762.766	4	190.691	3.728	0.006	0.092
毛管铺设长度 Lateral length	8 037.58	3	2 679.2	52.376	0.000	0.515
毛管管径 Lateral diameter	5 118.68	3	1 706.23	33.355	0.000	0.403
毛管进口压力 Lateral operating pressure	31.135	1	31.135	0.609	0.437	0.004
误差 Error	7 570.64	148	51.153			

由表 5 可以看出,当毛管进口压力为 100 kPa 时,毛管铺设坡度对灌水均匀度的影响不显著,说明

趋势,因此在顺坡条件下存在某一坡度,可使灌水均匀度值达到最大,但由于本试验选择的坡度较小,使灌水均匀度达到峰值的坡度并未出现。

2.2 各因素对灌水均匀度的影响程度

表 3 给出了毛管进口压力对灌水均匀度影响的方差分析结果。从表 3 可以看出,在 95% 的置信度下,当其他条件不变时,毛管进口压力对灌水均匀度的影响不显著。这是因为试验中没有更换滴头,滴头的实际流量是随着毛管进口压力同步降低的,在其他条件相同时,滴头实际流量的降低会使得毛管中的水头损失减小,这样就会抵消压力降低对灌溉质量带来的一部分不利影响,最终表现为压力的降低对灌水均匀度的影响不显著。

系统中,在采用较低的滴头设计工作压力的同时,如果也降低滴头设计流量,那么可以不需增大管径或略微增大管径就能保证系统的灌水均匀度;但是低压滴灌系统中,如果仍要保证滴头流量不变,在这种情况下,要保证灌水质量,必然会造成毛管有效铺设长度变短,支管数量增多,系统成本增加,由于毛管管径对灌水均匀度有显著的影响,且灌水均匀度随毛管管径的增大而提高,因此这种情况下,可以通过适当增大毛管管径来实现既保证毛管有效铺设长度又保证灌水质量的双重目标。

在常规滴灌系统中,在一定的坡度范围内,地形坡度对灌水均匀度的影响很小,有时甚至可以忽略,然而

在低压条件下,由于系统压力的降低,消除了系统适应地形的闲置能量^[17],造成低压滴灌系统对地形的适应能力降低,使得地形坡度对灌水均匀度的影响呈显著水平。同时,从表 6 可以看出,当其他条件一致时,在 95% 的置信度下,毛管铺设坡度从-2% 变

化到 5% 时,坡度变化对灌水均匀度的影响不显著,但是坡度从-5% 变化到-2% 或 0,2% 和 5% 4 组坡度时,坡度变化对灌水均匀度有显著影响,因此在低压滴灌系统中必须明确地形坡度范围。

表 5 H=100 kPa 时毛管铺设坡度对灌水均匀度影响的方差分析

Table 5 Analysis of variance between slope and irrigation uniformity at 100 kPa pressure head

偏差来源 Source	偏差平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方差 Mean square	F 值 F value	P 值 Prob.	Eta 平方值 Eta squared
毛管铺设坡度 Field slope along the lateral	184.359	4	46.09	0.799	0.530	0.044
误差 Error	3 980.76	69	57.692			

表 6 低压滴灌下不同坡度条件灌水均匀度
均值的多重比较(S-N-K 法)

Table 6 Multiple comparison of average irrigation uniformity
on different slopes at low pressure by S-N-K method

因素 Factor	水平 Level	均值 Cu Average Cu
毛管铺设坡度/% Field slope along the lateral	-5	80.543 a
	-2	84.566 b
	0	85.513 b
	2	86.069 b
	5	86.701 b

注:相同字母代表差异不显著。
Note:The same letter indicates that there is no obvious difference among every group.

2.3 提高低压滴灌系统灌水均匀度的途径及方法

2.3.1 改善毛管水力学环境 从上述分析可以发现,毛管铺设长度及管径对低压滴灌灌水均匀度有显著影响,毛管铺设长度及管径的轻微变化均会对灌水均匀度产生较大影响,减小毛管有效铺设长度或增大毛管管径都能显著地提高灌水均匀度。但是毛管有效铺设长度决定了系统管网的布局,一般情况下,毛管铺设长度越大,系统的各种成本费用越低,减小毛管有效铺设长度势必会增加支管数量,加大系统投资^[18]。因此,可以通过适当增大毛管管径来提高低压滴灌系统的灌水均匀度。适当增大毛管管径可以显著减小毛管输水过程中的水头损失,平衡毛管首末两端的压力水头偏差,从而减小灌水器的流量偏差,提高灌水均匀度。在低压滴灌系统中,适当增大毛管管径并不意味着系统投资成本的增加,因为低压条件下,随着系统工作压力的降低,各级管道要求的承压能力减小,采用较小的壁厚就能满足承压要求,这在一定程度上可以节省原材料,降低系统投资。但是为了保证管道的安全性及受现有工艺水平的限制,管道壁厚减小的空间还是十分有限的,并不能达到理论壁厚的水平。如果单纯地通

过增大毛管管径来保证系统的灌水质量,就有可能影响低压滴灌系统的廉价性。在增大管径的同时,如果灌水器再采用较小的设计流量,那么只需有限地增加管径就能保证系统的灌水质量。也就是说,可以通过同步降低滴灌系统的工作压力、适当增大管径、适当减小灌水器的设计流量及管道壁厚等 4 种技术途径,实现既降低滴灌系统成本,又保证滴灌系统灌溉质量的双重目标。

2.3.2 对地形进行适当分区 低压条件下,毛管铺设坡度对灌水均匀度的影响较为显著,但远小于毛管管径及铺设长度的影响;但如果能把地形控制在一定的坡度范围内,当其他条件相同时,坡度变化并不会对灌水均匀度产生明显的影响,因此可以通过限制低压滴灌系统灌水小区内的高差范围来减小地形偏差对灌水均匀度的影响。为此,在实际工作中,对拟实施滴灌的地块,可根据地形高差适当分区处理,使得每 1 个灌水单元都相对比较平整,从而减小地形偏差的影响,保证灌水质量。

3 结 论

- 1) 低压条件下,灌水均匀度随着毛管管径的增大而增大,随着毛管铺设长度的增大而减小。在逆坡时,随着坡度的增大而减小,顺坡时,随着坡度的增大呈先增大后减小的趋势。
- 2) 低压条件下,毛管铺设长度、管径及铺设坡度对灌水均匀度的影响均达显著水平,其中以毛管铺设长度的影响最大,毛管管径次之,以毛管铺设坡度最小。毛管铺设长度及管径对灌水均匀度的影响要远大于毛管铺设坡度的影响,并且在一定的坡度范围内,毛管铺设坡度对灌水均匀度的影响不是很明显。
- 3) 低压条件下,可以通过适当增大毛管管径、减小灌水器设计流量及对地形进行适当分区等措施,

以提高系统的灌水均匀度,保证系统的灌水质量。

[参考文献]

[1] 牛文全,吴普特,范兴科. 低压滴灌系统研究 [J]. 节水灌溉, 2005(2):29-32.
Niu W Q, Wu P T, Fan X K. Study on low-pressure drip irrigation system [J]. Journal of Water Saving Irrigation, 2005(2): 29-32. (in Chinese)

[2] 牛文全,吴普特,范兴科. 微灌系统综合流量偏差率的计算方法 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 85-88.
Niu W Q, Wu P T, Fan X K. Method for calculating integrated flux deviation rate of micro-irrigation system [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 85-88. (in Chinese)

[3] 朱德兰,吴普特,张青峰,等. 微地形影响下滴灌均匀度设计指标研究 [J]. 排灌机械, 2006, 24(1): 22-26.
Zhu D L, Wu P T, Zhang Q F, et al. Study on the emission uniformity for the emitter under the condition of farmland micro-terrain action [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24 (1): 22-26. (in Chinese)

[4] 郑耀泉,陈渠昌. 微灌均匀度参数之间的关系及其应用 [J]. 灌溉排水, 1994, 13(2): 7-10.
Zhen Y Q, Chen Q C. The relation among uniformity parameters of micro-irrigation and their use [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1994, 13(2): 7-10. (in Chinese)

[5] 张国祥. 考虑三偏差因素的滴灌系统流量总偏差率 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 27-29.
Zhang G X. Calculating the total flow deviation rate of drip-irrigation system based on three deviation rates [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 27-29. (in Chinese)

[6] Kang Y H. Effect of operating pressures on microirrigation uniformity [J]. Irrigation Science, 2000, 20: 23-27.

[7] Bralts V F, Wu I P, Gitlin H M. Manufacturing variation and drip uniformity [J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24: 113-119.

[8] Bralts V F, Wu I P, Gitlin H M. Drip irrigation uniformity considering emitter plugging [J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24: 1234-1240.

[9] Bralts V F, Edwards D M, Kesner C D. Field evaluation of drip/trickle irrigation submain units [C]. Drip/Trickle Irrigation in Action: Proceedings of the Third International Drip/Trickle Irrigation Congress. Fresno, California, USA: ASAE, 1985: 274-280.

[10] Barragan J, Bralts V F, Wu I P. Assessment of emission uniformity for micro-irrigation design [J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(1): 89-97.

[11] Burt C M. Rapid field evaluation of drip and microspray distribution uniformity [J]. Irrigation and Drainage System, 2004 (18): 275-297.

[12] Nakayama F S, Bucks D A, Clemmens A J. Assessing trickle emitter application uniformity [J]. Transactions of the ASAE, 1979, 22: 816-821.

[13] 陈渠昌,郑耀泉. 微灌工程设计灌水均匀度的选定 [J]. 农业工程学报, 1995, 11(2): 128-132.
Chen Q C, Zhen Y Q. Optimizing determination of irrigation uniformity in the design of micro-irrigation system [J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(2): 128-132. (in Chinese)

[14] 苏德荣. 微灌系统压力变化对出流均匀度影响的概率分析 [J]. 水利学报, 1991, 22(12): 31-35.
Su D R. Probability analysis of the effect of pressure change on application uniformity for micro-irrigation system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22 (12): 31-35. (in Chinese)

[15] 中华人民共和国水利部. 微灌工程技术标准 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical Standard of Micro-irrigation Project [S]. Beijing, China Water Power Press, 1995. (in Chinese)

[16] 蔡小超,刘焕芳,李 强,等. 微灌自压软管毛管灌水均匀度的试验研究 [J]. 节水灌溉, 2005(5): 8-10.
Cai X C, Liu H F, Li Q, et al. Experimental research on capillary irrigation uniformity of micro-irrigation gravitational flexible hose [J]. Journal of Water Saving Irrigation, 2005 (5): 8-10. (in Chinese)

[17] 张国祥,吴普特. 滴灌系统滴头设计水头的取值依据 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 20-22.
Zhang G X, Wu P T. Determination of the design working head of emitter [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 20-22. (in Chinese)

[18] 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 X K, Wu P T, Niu W Q, 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)