

# 不同竖管布置方式下的坡地喷灌水滴直径分布

惠 鑫<sup>1</sup>, 陈俊英<sup>1,3</sup>, 张 林<sup>2,3</sup>, 付博阳<sup>1</sup>, 任乃望<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所 陕西 杨凌 712100;  
3.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**以雨鸟 LF1200 型喷头为研究对象,在室内无风条件下,应用视频雨滴谱仪分别监测了竖管铅直和垂直于坡面 2 种布置方式在不同坡度下的水滴直径和速度等信息,对比分析了不同竖管布置方式下水滴平均直径及水滴频率沿射程的分布差异,探讨了水滴速度和水滴直径之间的关系。结果表明:竖管垂直于坡面布置下水滴平均直径沿射程的增大趋势更为稳定,相同测点在不同坡度下的水滴平均直径沿射程的差异变化不明显;竖管垂直于坡面布置时,各坡度下的水滴速度随直径的增大趋势更为接近,且水滴速度与直径的对数相关性更好;竖管垂直于坡面布置不仅能降低喷头附近的水滴蒸发损失,还能在一定程度上改善喷灌质量。研究结果可为坡地喷灌系统设计提供参考。

**关键词:**坡地喷灌;竖管布置方式;水滴直径;水滴速度

中图分类号: S275.4 文献标识码: A

## Droplet Diameter Distribution for Sprinkler Irrigation Under Different Layouts of Standpipe on Sloping Land

HUI Xin<sup>1</sup>, CHEN Jun-ying<sup>1,3</sup>, ZHANG Lin<sup>2,3</sup>, FU Bo-yang<sup>1</sup>, REN Nai-wang<sup>1</sup>

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** In this study, the Rainbird LF1200 sprinkler was selected as the research object. The droplet diameter and velocity of standpipe vertical and perpendicular to the slope on different slopes were measured by Two-dimensional Video Disdrometer under no wind condition. The distribution differences of average droplet diameter and its frequency along spray direction under different layouts of standpipe was compared, respectively. The relationship between the average droplet diameter and velocity was discussed. The results show that: the increasing tendency of the average droplet diameter along spray direction under layout of standpipe perpendicular to the slope is more stable, and at the same measuring point, the difference of droplet diameter along spray direction on different slope is not obvious; when the standpipe is perpendicular to the slope, the increasing tendency of the velocity with the increase of droplet diameter is more similar, and the logarithmic correlation of the droplet diameter and velocity is better; the layout of standpipe perpendicular to the slope can reduce the water evaporation loss of the droplets near the sprinkler, and to some extent, the quality of sprinkler irrigation is also improved. The conclusions of this study can provide useful information for design of sprinkler irrigation system on sloping land.

**Key words:** sprinkler irrigation on sloping land; standpipe layout; droplet diameter; droplet velocity

坡耕地是目前广大丘陵山区群众赖以生存和发展的生产用地<sup>[1]</sup>,但是由于长期以来受地形坡度的影响,我国各处坡耕

地土壤在不同程度上均具有旱、瘠、薄、粗等特点<sup>[2]</sup>,常常使得坡耕地上的作物因需水量不足而导致大幅减产,从而影响经济

收稿日期: 2018-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779246); 陕西省重点研发计划项目(2017NY-118)。

作者简介: 惠 鑫(1992-),男,硕士研究生,从事节水灌溉技术研究。E-mail: xin0821h@163.com。

通讯作者: 陈俊英(1975-),女,副教授,硕士生导师,从事节水农业和水土资源高效利用研究。E-mail: cjoyrose@126.com。

效益。因此,选取合理的灌溉方式对坡地上的作物及时进行灌溉至关重要,而喷灌具有省工、省水、对地形条件适应能力强等优点,是坡地灌溉的常用方法之一<sup>[3,4]</sup>。

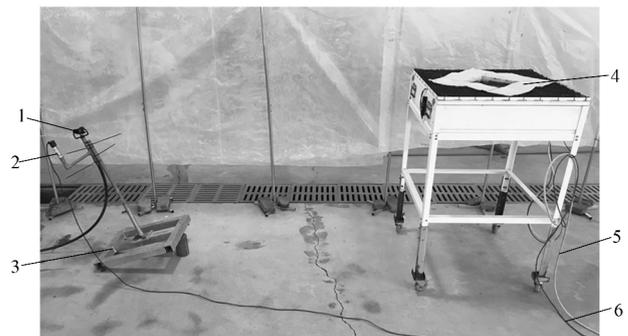
喷洒水滴直径是衡量喷灌系统优劣的重要指标<sup>[5-7]</sup>,其水滴直径大小直接影响到灌溉水分的利用效率和水滴对地面的打击强度,国内外学者对此进行了大量研究。李久生<sup>[8]</sup>研究了水滴平均直径的不同计算方法,认为水重加权平均法的计算结果能更好地反映水滴分布规律,建议采用水重加权平均法计算水滴的平均直径。金兆森等<sup>[9]</sup>进行了不同喷洒水滴对土壤和作物的影响试验,探求出了适宜作物生长的喷洒水滴大小。严海军等<sup>[10]</sup>分析了水滴平均直径和总体水滴直径分布,探讨了水滴直径与喷头转速、喷嘴直径及工作压力的关系。McCreery等<sup>[11]</sup>通过对水滴直径分布规律的研究,揭示了喷洒水滴的形成机理。Montero等<sup>[12]</sup>将试验研究与数值模拟相结合,重点分析了影响水滴直径分布的几种常见因素,得出了工作压力对水滴直径分布影响最大的结论。巩兴晖等<sup>[13]</sup>分析了水滴直径沿射程的变化趋势及水滴速度、水滴角度与水滴直径之间的关系。上述研究以平地喷灌为基础对喷洒水滴直径分布特性做了大量探讨,却忽略了地形坡度对喷灌水滴直径分布特性的影响。如果一味地用平地上的水滴直径分布数据进行坡地喷灌系统设计,势必造成较大误差,因此研究坡地喷灌水滴直径分布意义重大。而由于地形坡度的存在,坡地喷灌较平地喷灌更易产生地表径流,造成土壤侵蚀。有学者发现喷头竖管与坡面保持垂直时可以获得最佳喷洒均匀度,且对土壤侵蚀最小<sup>[14]</sup>,但其研究只对喷灌水量分布和均匀度两个方面进行了分析,并未涉及水滴直径分布特性方面,因此其研究结果有待继续验证。

基于以上问题,该文以雨鸟 LF1200 型喷头为研究对象,在室内无风条件下,应用视频雨滴谱仪分别监测 2 种竖管布置方式(铅直布置和垂直于坡面布置)在不同坡度下的水滴直径和速度等信息,对比分析不同竖管布置方式下水滴平均直径及水滴频率沿射程的分布差异,探讨水滴速度等和水滴直径之间的关系,以期为坡地喷灌系统设计提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉水力学试验厅进行。试验装置由雨鸟 LF1200 型喷头、视频雨滴谱仪、压力传感器、变频恒压供水节能控制柜、加压泵和不锈钢水箱等组成,如图 1 所示。雨鸟 LF1200 型喷头(图 2)为农田灌溉中常用的喷头,其喷嘴直径为 2.18 mm,喷射仰角为 17°,工作压力范围在 170~410 kPa。视频雨滴谱仪<sup>[13]</sup>(Two-dimensional video disdrometer,以下简称 2DVD)由奥地利 Gratz 应用系统研究机构研制,可用其获取喷洒水滴的直径和速度等信息。压力传感器采用西安新敏 CYB 型,量程 0~500 kPa,精度 0.1%,将其安装在喷头进口处并与采集器相连,实时监测喷头工作压力的变化情况。



1-喷头; 2-压力传感器; 3-喷头支架;  
4-视频雨滴谱仪; 5-电源线; 6-数据线

图 1 水滴直径测试装置图

Fig.1 Experimental setup for drop characterization



图 2 试验所用喷头

Fig.2 Sprinkler used in the experiment

### 1.2 试验设计

试验因素为竖管布置方式和地形坡度。竖管布置方式设置 2 个水平,分别为铅直布置和垂直于坡面布置;地形坡度设置 2 个水平,分别为 0.1 和 0.2,为了下文叙述方便,用坡度的正值表示下坡,负值表示上坡,即坡度为 0.1 的上坡和下坡、坡度为 0.2 的上坡和下坡,分别用 -0.1、0.1、-0.2 和 0.2 表示。试验共 8 个处理,每个处理重复 3 次,共进行 24 组试验。每组试验均沿射程方向以 1 m(坡面距离)间距设立测点,并用 2DVD 监测各测点上的水滴直径和速度等信息,控制各测点收集水滴数量不少于 1 000 个,试验过程中喷头工作压力采用额定工作压力 300 kPa(厂家推荐工作压力),试验操作严格遵守标准 GB/T 19795.2-2005<sup>[15]</sup>。考虑到在室内通过人为搭建坡面,并把 2DVD(质量为 80 kg)直接放到坡面上获取水滴信息十分困难。因此,在实际开展试验时,是通过调节喷头安装高度及改变 2DVD 与喷头的水平距离,从而模拟出 2DVD 在坡面上的不同测点位置,大大简化了水滴信息的获取工作。

### 1.3 计算方法

(1) 平均水滴直径计算。国内外常用的平均水滴直径计算方法大致分为以下 3 种:个数加权平均法、体积加权平均法和中数直径法。李久生研究发现,不同计算方法求得的平均水滴直径分布差异较大,用个数加权平均法和中数直径法计算的平均水滴直径沿射程的分布规律不明显,而用体积加权平均法计算的平均水滴直径沿射程的分布更能反映实际情况<sup>[8]</sup>。因此

该文采用体积加权平均法计算各测点处的平均水滴直径,其计算公式为:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^4}{\sum_{i=1}^n d_i^3} \quad (1)$$

式中:  $\bar{d}$  为测点体积加权平均水滴直径, mm;  $d_i$  为测点对应的水滴直径, mm;  $n$  为测点测得的水滴个数。

(2) 水滴频率计算。水滴频率是指测点某一直径的水滴质量之和占测点所有水滴质量之和的比值,其计算公式为:

$$W = \frac{M_k}{M_n} \quad (2)$$

式中:  $W$  为水滴频率, %;  $M_k$  为测点某一直径的水滴质量之和, g;  $M_n$  为测点所有水滴质量之和, g。

(3) 水滴速度计算。通过 2DVD 可直接测得测点各水滴的垂直速度  $v_c$  及在水平方向上相互垂直的 2 个水平速度  $v_b$  和  $v_a$ , 从而计算出各水滴的合速度  $v$ , 其计算公式为:

$$v = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 不同竖管布置方式下水滴平均直径沿射程的分布

图 3 给出了喷头工作压力为 300 kPa, 坡度为 -0.1、0.1、-0.2 和 0.2 时竖管铅直和垂直于坡面 2 种布置方式下水滴平均

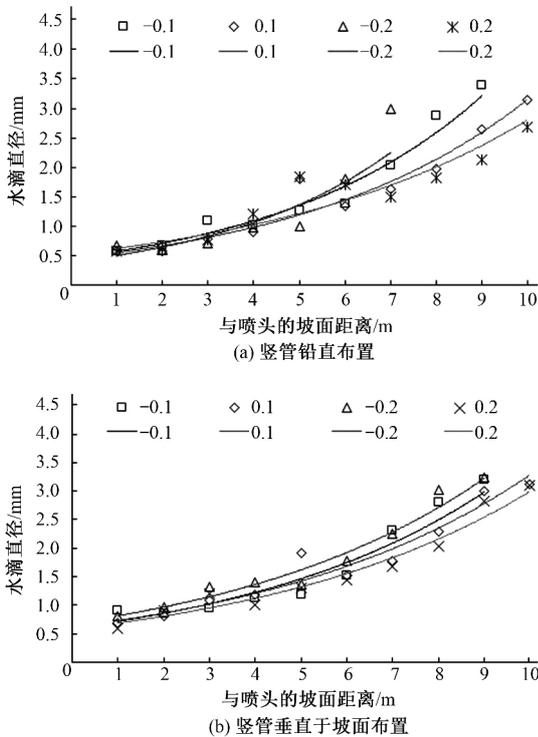


图 3 不同竖管布置方式下水滴平均直径沿射程的分布及回归曲线

Fig.3 Distribution and regression curve of average droplet diameter along spray direction under different layouts of standpipe

直径沿射程的分布情况。从图 3 可以看出, 2 种竖管布置方式在任一坡度条件下的水滴平均直径均随着与喷头坡面距离的增加而呈指数型增大, 并在射程末端达到最大值; 随着坡度的增大, 相同测点在上坡方向时的水滴平均直径逐渐增大, 在下坡方向时逐渐减小。当竖管铅直布置时, 与喷头坡面距离在 6 m 范围以内的水滴平均直径沿射程的增大趋势相对较缓, 且相同测点在不同坡度下的水滴平均直径差异较小, 但是随着与喷头坡面距离的增加, 水滴平均直径沿射程的增大趋势不断加快, 直径差异逐渐变大。而当竖管垂直于坡面布置时, 水滴平均直径沿射程的增大趋势较为稳定, 相同测点在不同坡度下的水滴平均直径沿射程的差异变化不明显。

### 2.2 不同竖管布置方式下水滴直径沿射程的频率分布

为了更好地反映水滴直径沿射程的变化规律, 图 4 和图 5 分别给出了喷头工作压力为 300 kPa, 坡度为 -0.1、0.1、-0.2 和 0.2 时竖管铅直和垂直于坡面 2 种布置方式下水滴直径沿射程的频率分布情况。从图 4 和图 5 可以看出, 2 种竖管布置方式下水滴直径沿射程的频率分布具有一定的相似性, 即在喷头附近, 水滴主要以小粒径为主, 随着与喷头坡面距离的增加, 水滴直径分布范围不断扩大, 并在射程末端达到最大。

当竖管铅直布置时, 如图 4 所示, 距喷头 3 m 以内的水滴直径基本处于 1.0 mm 以下, 不同坡度 (-0.1、0.1、-0.2 和 0.2) 下的水滴频率占比均在 96.0% 以上, 说明当竖管铅直布置时, 喷头附近的水滴主要以小粒径为主, 且地形坡度对近处水滴直径的影响较小, 水滴蒸发较大。随着与喷头坡面距离的增加, 水滴直径分布范围开始扩大, 直径在 1.0~3.0 mm 范围内的适宜喷洒水滴<sup>[16]</sup> 数量在射程的中后段不断增多, 以距喷头 4 m 和 7 m 处的测点为例, 前者在坡度为 -0.1、0.1、-0.2 和 0.2 下对应的水滴频率分别为 10.6%、7.4%、6.4% 和 12.8%, 而后者相比前者水滴频率分别增大了 51.0%、53.7%、13.7% 和 48.0%。不难发现, 坡度为 -0.1 和 0.1 下的水滴频率增幅相差较小, 而坡度为 -0.2 和 0.2 下的水滴频率增幅相差较大, 从而说明距喷头较远处的水滴直径受坡度的影响较大, 且随着坡度的增大, 上、下坡方向的水滴直径分布差异越发明显。随着与喷头坡面距离的继续增加, 水滴直径分布范围进一步扩大, 当与喷头的坡面距离增至射程末端时, 水滴直径分布范围扩大到 3.0 mm 以上。当竖管垂直于坡面布置时, 如图 5 所示, 不同坡度下距喷头 3 m 以内的小水滴 (直径小于 1.0 mm) 频率均在 89.0% 以上, 随着与喷头坡面距离的增加, 坡度为 -0.1、0.1、-0.2 和 0.2 下距喷头 7 m 处的适宜喷洒水滴 (直径在 1.0~3.0 mm) 频率相较于距喷头 4 m 处分别增大了 57.4%、51.2%、62.1% 和 51.8%。由此可见, 与竖管铅直布置相比, 竖管垂直于坡面布置时喷头附近的小水滴数量减少, 且射程中后段的适宜喷洒水滴数量增多。因此, 竖管垂直于坡面布置不仅能降低喷头附近的水滴蒸发损失, 还能在一定程度上改善喷灌质量。

### 2.3 不同竖管布置方式下水滴直径与速度的关系

图 6 和图 7 分别给出了喷头工作压力为 300 kPa, 坡度为 -0.1、0.1、-0.2 和 0.2 时竖管铅直和垂直于坡面 2 种布置方式

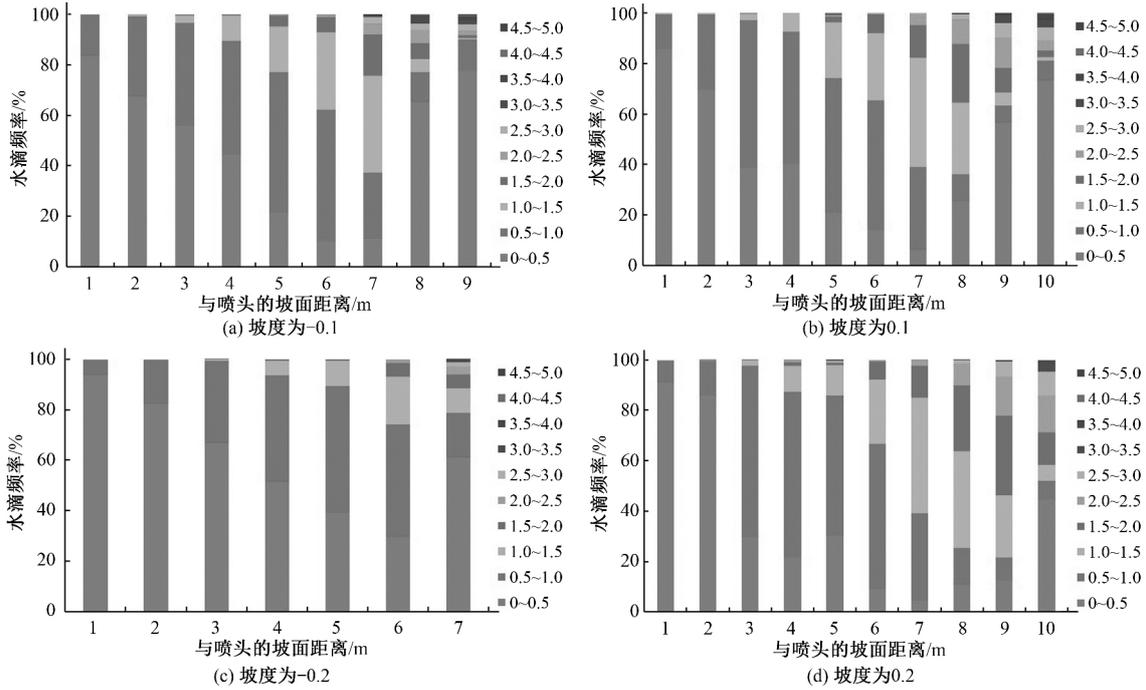


图 4 竖管铅直布置下水滴直径沿射程的频率分布

Fig.4 Frequency distribution of droplet diameter along spray direction with layout of standpipe vertical

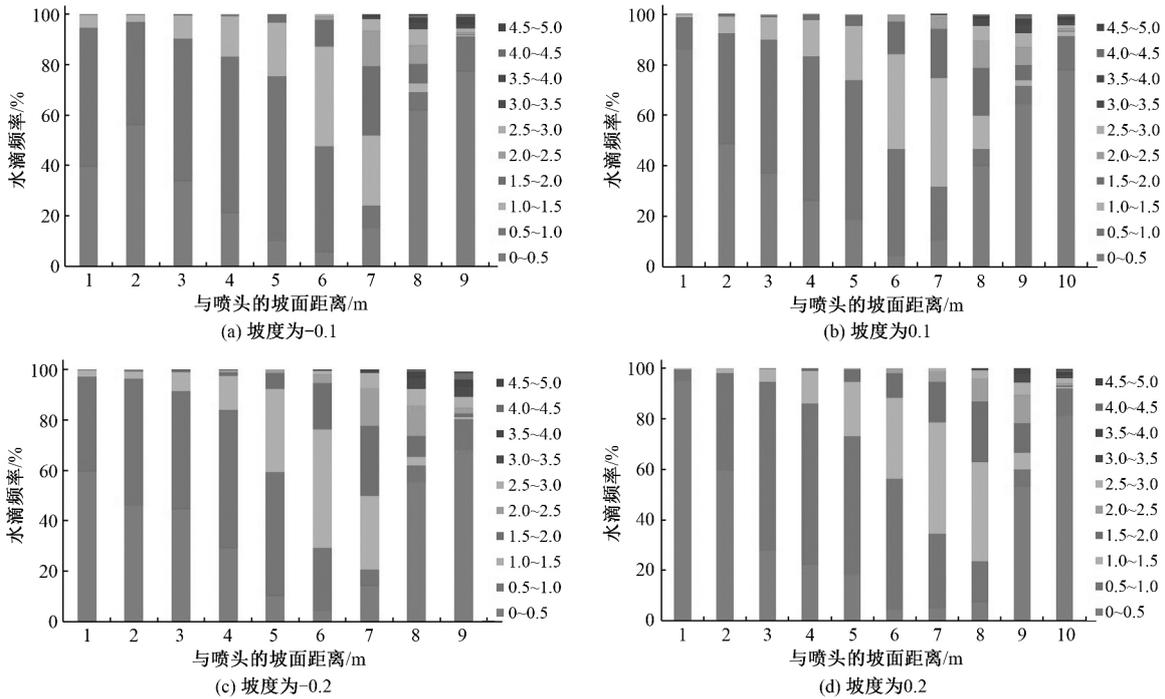


图 5 竖管垂直于坡面布置下水滴直径沿射程的频率分布

Fig.5 Frequency distribution of droplet diameter along spray direction with layout of standpipe perpendicular to the slope

下水滴直径与速度的关系。从图 6 和图 7 可以看出, 2 种竖管布置方式在不同坡度下其水滴速度均随着直径的增大而逐渐递增, 且通过回归分析发现, 水滴速度与直径之间存在一定的对数函数关系。

表 1 给出了不同竖管布置方式下水滴速度与直径的对数函数关系式, 从表 1 可以看出, 所有对数函数关系式均可用  $v =$

$a \ln d + b$  的形式来表示, 其中  $v$  和  $d$  分别为水滴的速度和直径,  $a$  和  $b$  分别为相应系数。从公式的组成来看, 系数  $a$  越大时, 水滴速度随直径的增大趋势越明显。当竖管铅直布置时, 坡度为  $-0.1$ 、 $0.1$ 、 $-0.2$  和  $0.2$  下的系数  $a$  分别为  $1.524$ 、 $1.808$ 、 $1.380$  和  $1.853$ , 按其数值大小对各坡度进行排序如下:  $0.2 > 0.1 > -0.1 > -0.2$ , 说明当竖管铅直布置时, 随着坡度的增大, 上坡方向水滴

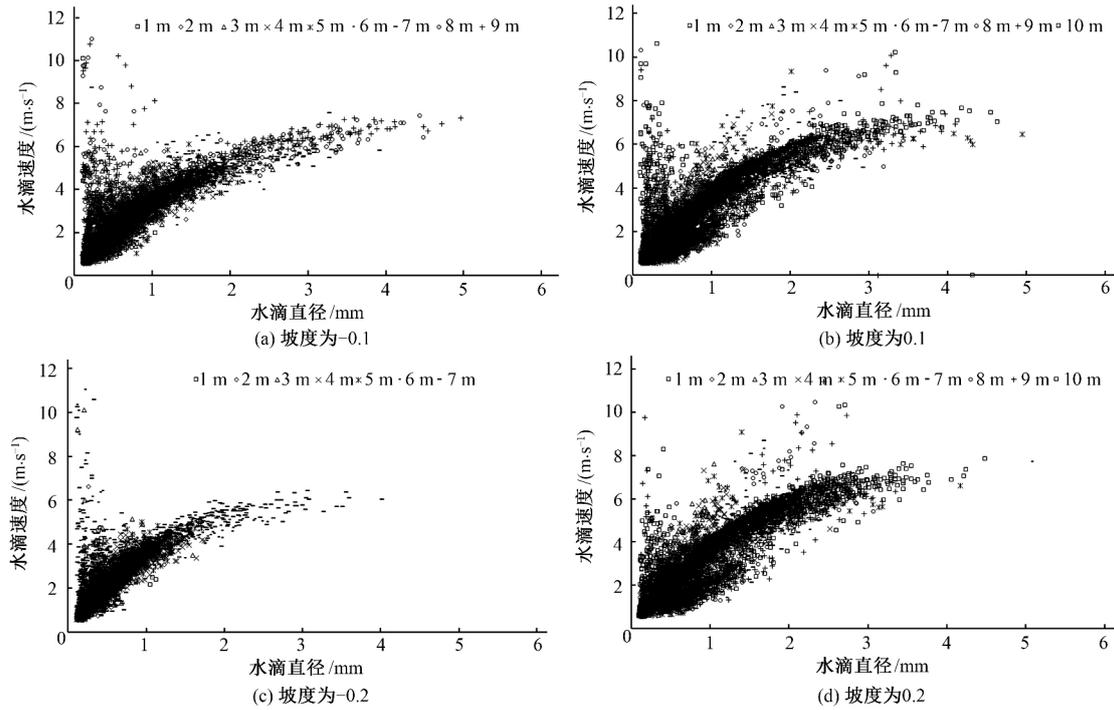


图 6 竖管铅直布置下水滴速度与直径的关系

Fig.6 Relationship between droplet velocity and diameter with layout of standpipe vertical

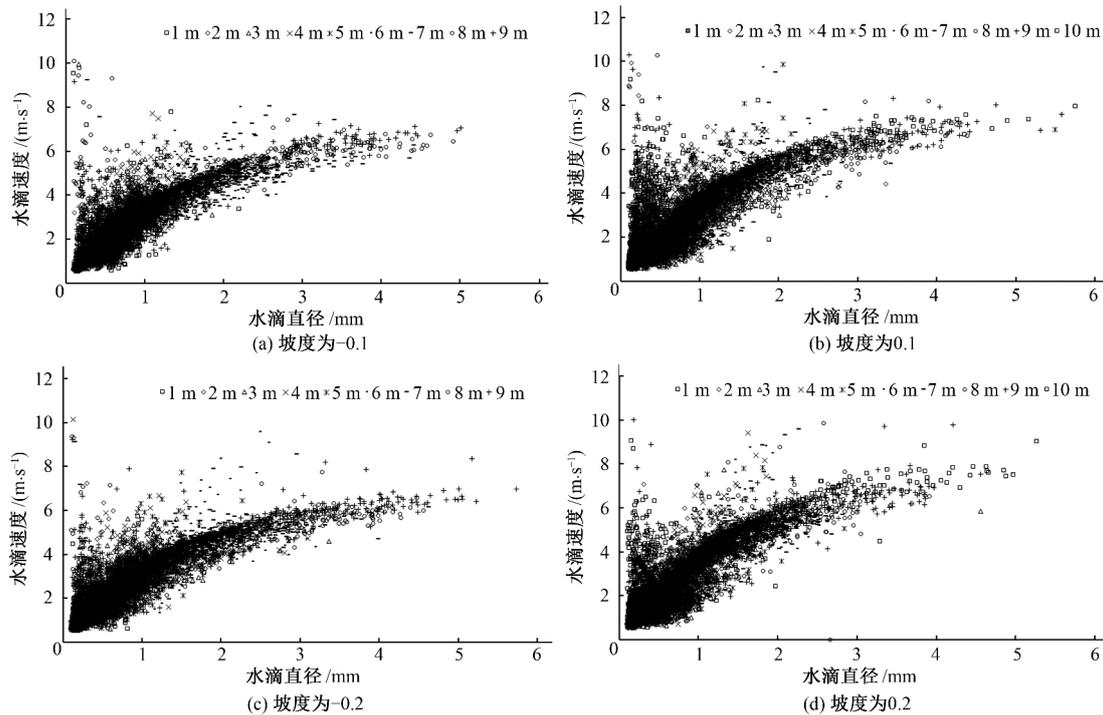


图 7 竖管垂直于坡面布置下水滴速度与直径的关系

Fig.7 Relationship between droplet velocity and diameter with layout of standpipe perpendicular to the slope

速度随直径的增大趋势变慢,下坡方向水滴速度随直径的增大趋势加快。而当竖管垂直于坡面布置时,坡度为-0.1、0.1、-0.2和0.2下的系数  $a$  分别为 1.569、1.674、1.528 和 1.746,与竖管铅直布置相比,坡度为-0.1和-0.2下的系数  $a$  均有所增大,坡度为0.1和0.2下的系数  $a$  均有所减小,因此各坡度下的水滴速度随直径的增大趋势接近。另外从表 1 还可看出,竖管垂直

于坡面布置下水滴速度与直径的对数相关性更好,其各坡度下的  $R^2$  均在 0.70 以上,普遍高于竖管铅直布置下的。

### 3 结 语

(1) 与竖管铅直布置相比,竖管垂直于坡面布置下水滴平均直径沿射程的增大趋势更为稳定,相同测点在不同坡度下的

表1 不同竖管布置方式下水滴速度与直径的对数函数关系式  
Tab.1 Logarithmic function relationship between droplet velocity and diameter under different layouts of standpipe

竖管布置方式	坡度	对数关系式	$R^2$
铅直布置	-0.1	$v=1.524 \ln d+4.006$	0.36
	0.1	$v=1.808 \ln d+3.900$	0.69
	-0.2	$v=1.380 \ln d+3.781$	0.49
	0.2	$v=1.853 \ln d+4.239$	0.75
垂直于坡面	-0.1	$v=1.569 \ln d+3.822$	0.71
	0.1	$v=1.674 \ln d+4.112$	0.70
	-0.2	$v=1.528 \ln d+3.721$	0.71
	0.2	$v=1.746 \ln d+4.144$	0.75

水滴平均直径沿射程的差异变化不明显。

(2) 竖管垂直于坡面布置时,喷头附近的小水滴数量减少,射程中后段的适宜喷洒水滴数量增多。由此可见,竖管垂直于坡面布置不仅能降低喷头附近的水滴蒸发损失,还能在一定程度上改善喷灌质量。

(3) 竖管垂直于坡面布置时,各坡度下的水滴速度随直径的增大趋势更为接近,且竖管垂直于坡面布置下水滴速度与直径的对数相关性更好,其各坡度下的  $R^2$  均在 0.70 以上,普遍高于竖管铅直布置下的。

#### 参考文献:

- [1] 国家发展改革委 水利部联合印发《全国坡耕地水土流失综合治理“十三五”专项建设方案》[J]. 中国水土保持, 2017 (4): 14.  
[2] 杨瑞珍. 我国坡耕地资源及其利用模式[J]. 资源科学, 1994, 16 (1): 1-7.

(上接第 19 页) 高灌溉水水温的措施有建造专门用来提升灌溉水水温的升温设施。

(3) 本文研究成果对于越冬期间日光温室灌溉水水温的升高和保持具有重要的理论意义,可以为越冬期间灌溉水管理提供技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 刘珊,张林华,张峰. 日光温室热湿环境影响机理研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2009, 24(6): 587-593.  
[2] 于江海,周和平. 农业灌溉水温研究[J]. 现代农业科技, 2008, (8): 123-127.  
[3] 赵玉荣,李影,姚百超. 关于三江平原地区提高灌溉水温的思考[J]. 黑龙江科技信息, 2012 (17): 238-249.

(上接第 24 页)

- [10] Ibarra-Caballero J, Villanueva-Verduzco C, Molina-Galín J, et al. Proline accumulation as a symptom of drought stress in maize: a tissue differentiation requirement[J]. Journal of Experimental Botany, 1988, 39(204): 889-897.  
[11] 张群,成自勇,张芮. 膜上调亏灌溉对制种玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 141-142.  
[12] 刘一龙. 黑龙江省西部半干旱区玉米膜下滴灌节水增产增效

- [3] 陈学敏. 坡地喷灌的研究动态[J]. 喷灌技术, 1990 (3): 56-58.  
[4] 张丽敏. 坡地土壤水量分布及其对喷灌的影响初探[J]. 节水灌溉, 1991 (4): 38-39.  
[5] 李久生. 喷洒水滴分布规律的研究[J]. 水利学报, 1988 (10): 38-45.  
[6] 徐红,龚时宏,贾瑞卿,等. 新型ZY系列摇臂旋转式喷头水滴直径分布规律的试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1416-1422.  
[7] 朱兴业,刘兴发,刘俊萍,等. 基于LPM的摇臂式喷头水滴分布试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(10): 908-914.  
[8] 李久生. 谈平均水滴直径的计算方法[J]. 喷灌技术, 1987 (4): 21-23.  
[9] 金兆森,蒋定生,田虎旗,等. 喷洒水滴大小对土壤结构及作物的影响[J]. 节水灌溉, 1981 (2): 31-35.  
[10] 严海军,肖建伟,李文颖,等. 圆形喷灌机低压阻尼喷头水滴直径分布规律的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 467-473.  
[11] McCreery G E, Stoots C M. Drop formation mechanism and size distributions for spray plate orifices[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(2): 431-452.  
[12] Montero J, Tarjuelo J M, Carrión P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectrophluviometer[J]. Irrigation Science, 2003, 22(2): 47-56.  
[13] 巩兴晖,朱德兰,张林,等. 基于2DVD的非旋转折射式喷头水滴直径分布规律[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 128-133.  
[14] Soares A A, Willardson L S, Keller J. Surface-slope effects on sprinkler uniformity[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1991, 117(6): 870-880.  
[15] GB/T 19795.1-2005, 农业灌溉设备 旋转式喷头 第1部分: 结构和运行要求[S].  
[16] 金兆森. 适宜喷洒水滴和我国喷头的基本参数[J]. 节水灌溉, 1980 (1): 42-47.

- [4] 高洋,周明. 井灌区水田区推进末级沟道为晒水池的意义及措施[J]. 黑龙江水利科技, 2011 (6): 275-276.  
[5] 魏宏刚. 关于提高井灌水稻入池水温措施的初步探讨[J]. 中国科技财富, 2009 (2): 122.  
[6] 曹印龙,付强. 井灌稻区晒水池增温及其影响因素关系试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008 (2): 28-30.  
[7] 于江海,周和平. 农业灌溉水温研究[J]. 现代农业科技, 2008, (8): 123-127.  
[8] 鲁纯养,施正香,曲萍. 农业生物环境原理[M]. 北京: 农业出版社, 1994.  
[9] 高艳娟,樊贵盛,胡娟娟. 越冬期浅层潜水井水温问题研究[J]. 节水灌溉, 2014 (8): 22-24.

应试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.

- [13] 邱新强,路振广,张玉顺,等. 不同生育时期干旱对夏玉米耗水及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2013 (27): 68-75.  
[14] 董平国,王增丽,温广贵,等. 不同灌溉制度对制种玉米产量和阶段耗水量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014 (9): 822-828.  
[15] 胡铁民,王增丽,董平国. 西北旱区制种玉米不同灌溉制度对土壤水分及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2014 (1): 27-31.