

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.012

基于弹道理论有风条件下折射式喷头喷灌均匀度研究

张以升¹ 朱德兰^{1,2} 宋博¹ 张林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. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为计算有风条件下折射式喷头水量分布及喷灌均匀度,以弹道轨迹理论为基础,依据风速分布模型,建立有风条件下折射式单喷头水量分布计算方法,采用该方法模拟出有风条件下 Nelson D3000 型喷头倒挂安装方式下水量分布特性,通过与实测资料进行对比,验证了模拟具有较高的准确度,可应用于有风条件下折射式喷头水量分布计算。在此基础上,选用 4.76 mm(24 号)喷嘴直径,模拟出不工况下单喷头水量分布,计算出组合情况下喷灌均匀度,分析了风速、风向、喷头间距、工作压力和安装高度 5 种因素对喷灌均匀度的影响,并对蒸发漂移损失进行了分析。结果表明:95% 的置信区间下,喷头布置间距对喷灌均匀度的影响最显著,其次是安装高度和喷头工作压力,风速和风向对喷灌均匀度影响不显著。风速、喷头工作压力和安装高度都会对蒸发漂移损失产生影响,其中工作压力影响最大。当选用 Nelson D3000 型喷头在风速小于 6 m/s 的环境下喷灌时,应将喷头安装间距固定在 2.13 ~ 3.04 m 范围内。另外,该安装间距范围内,喷头安装高度和喷灌压力增大后,喷灌均匀度增大的效果不明显,因此应采用低压喷灌以降低喷灌系统运行成本;考虑到较高的喷头安装高度会产生较大的蒸发漂移损失,喷灌时还应当适当降低喷头安装高度,以提高喷灌水分利用率。

关键词: 折射式喷头; 喷灌均匀度; 水量分布; 有风条件; 弹道理论

中图分类号: S275.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)02-0091-07

Uniformity of Fixed Spray-plate Sprinkler under Windy Condition Based on Ballistic Simulation

ZHANG Yisheng¹ ZHU Delan^{1,2} SONG Bo¹ ZHANG Lin²

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

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to simulate fixed spray-plate sprinkler water distribution and Christiansen uniformity (CU) under open field conditions, the method for calculating water distribution was proposed by applying droplet size distribution, simulation of droplet distribution utilize droplet trajectory computations and wind-distorted model. The accuracy of water distributions of Nelson D3000 spray sprinkler was validated by comparing simulated with observed patterns, it was found that the software appeared to be an effective predictor of sprinkler performance in wind. Under this premise, the water distribution was simulated at different wind speeds with 4.76 mm nozzle diameters (24#), the factors, including wind speed, wind direction, sprinkler spacing, working pressure and riser height, which may affect CU, the wind drift and evaporation losses (WDEL) under different working conditions were analyzed. The results showed that sprinkler spacing had the most important influence on CU at 95% confidence interval, and it was followed by riser height and working pressure, wind speed and wind direction did not significantly affect CU. Increasing wind speed, working pressure or riser height indicated an increase in the OWDEL, and working pressure can dramatically affect the OWDEL on account of smashing large water droplet to pieces. Using this sprinkler, the lateral moving irrigation system can attain a high uniformity coefficient at 2.13 ~ 3.14 m sprinkler spacing along the lateral when the wind speed was lower than 6 m/s, and with this range of mounting spacing, increasing sprinkler riser height or working pressure cannot promote a

收稿日期: 2016-06-13 修回日期: 2016-07-22

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01-02)

作者简介: 张以升(1988—),男,博士生,主要从事工程水力学研究,E-mail: hnsqzys@163.com

通信作者: 朱德兰(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: dlzhu@126.com

higher CU distinctly, low working pressure was recommended considering little cost in the design of the sprinkler irrigation system. In addition, decreasing the riser height can reduce WDEL effectively, in order to increase water use efficiency, low height cooperated with plant height was reasonable.

Key words: fixed spray-plate sprinkler; sprinkler irrigation uniformity; water distribution; windy condition; ballistic theory

引言

喷灌水量分布是计算喷灌均匀系数及喷洒水利用系数的基础^[1]。为了设计方便,基于弹道理论的单喷头水量分布模拟方法被广泛应用^[2-4],笔者此前依据弹道轨迹理论,针对折射式喷头特有的喷洒形式,建立了折射式喷头水量分布计算模型,可在已知单流道水量分布的前提下,计算出无风条件下折射式喷头水量分布特性^[5]。然而农田喷灌作业一般都在室外进行,大气温湿度和风速等环境因素也会对水量分布和喷洒水利用系数产生影响^[6-9],FACI等^[10]通过室外试验发现风速会影响 Nelson D3000 型喷头平均喷灌强度,并使喷灌区域产生一定程度的偏移,对水量分布形状没有明显影响。TARJUELO等^[11]指出,在干燥多风的环境下实施喷灌作业,易产生较大的蒸发漂移损失,因此采用无风条件下水量分布特性进行喷灌设计会产生一定的误差。

为了进一步拓宽软件应用范围,减小室外试验的工作量,本文以弹道轨迹理论为基础,依据风速分布模型,建立有风条件下折射式单喷头水量分布计算方法,通过与实测资料对比,验证模拟的精准性。在此基础上,分析风速、风向、喷头间距、工作压力和安装高度等因素对 4.76 mm 喷嘴直径 Nelson D3000 型喷头喷灌均匀度的影响,并对有风条件下喷头蒸发漂移损失进行计算,以期有风条件下喷灌提供设计参数。

1 计算模型及数据处理

文中涉及的折射式喷头出射速度、角度模型、水滴三维运动模型和水滴运动蒸发模型,参考文献[5]中所述。

1.1 有风条件下水量分布计算方法

VORIES等^[12-13]指出,在连续的空气环境中,风速随高度的变化为

$$W(z) = W_a \ln \left(\frac{z-d}{Z_0} \right) / \ln \left(\frac{a-d}{Z_0} \right) \quad (1)$$

其中 $\lg d = 0.9793 \lg z - 0.1536$

$$\lg Z_0 = 0.997 \lg z - 0.883$$

式中 $W(z)$ ——水滴下降至高度 z 处的计算风速, m/s
 W_a ——距地面高度 a (本文中 a 为 300 cm) 处的设计风速, m/s

d ——粗糙高度, cm

Z_0 ——粗糙系数, cm

有风条件下水量分布计算如图 1 所示^[14],其中 n 为坐标间隔, A 、 B 、 C 、 D 、 Q 为不同粒径水滴的落点。则水量分布计算方法如下:

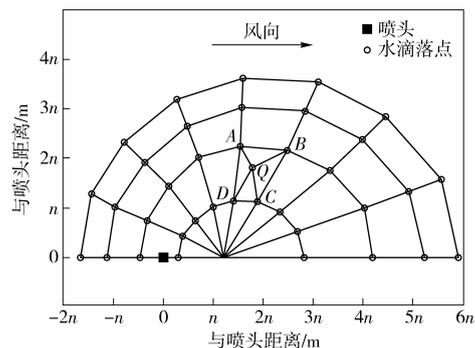


图 1 有风条件下单喷头粒径(水量)分布

Fig. 1 Droplet or water distribution under windy condition

(1) 确定喷洒区域范围。大粒径水滴受风拖拽影响较小,模拟最大粒径水滴在不同方向上的落地点,以此确定喷洒区域(折射式喷头最大水滴直径分布在最末端)。确定喷洒区域后,对喷洒区域进行网格化处理,由于网格化尺寸很大程度上影响到计算的精度和计算效率,李永冲等^[1]设虚拟小网格尺寸为 1 m,基本能够满足计算精度要求,为了提高软件的应用效果,在程序设计过程中,网格尺寸可根据所模拟喷头的喷洒半径进行手动输入,由于所模拟的喷头喷洒半径一般不大于 10 m,根据模拟经验,0.5 m 的网格尺寸基本能够达到较高的模拟精度,因此本文网格化尺寸定为 0.5 m,以便计算有风条件下不同粒径水滴落地点坐标。

(2) 不考虑有风条件下水滴碎裂及水滴运动轨迹相互干扰,采用弹道理论,计算折射式喷头有风条件下在 $0 \sim 360^\circ$ 范围内水滴粒径在网格化区域内的分布。模拟过程中,由于水滴在运动过程中产生蒸发损失,计算蒸发时,用单个水滴体积减小百分数与该粒径对应的单位时间内喷灌水量(即喷灌强度)的乘积作为该点单位时间内蒸发的水量,则喷灌时的蒸发损失为所模拟水滴对应的单位时间内总的蒸发水量与单位时间内测得的总落地水量的比值。由于水滴在风的作用下运动轨迹发生了偏移,且水滴直径越小偏移原落点的距离越远,这样就致使一部分小粒径水滴不能落入网格化区域,该部分水滴代

表的水量作为飘移损失不进行水量分布的计算。

(3) 根据水滴粒径分布规律, 结合不同粒径水滴对应的水量, 对有风条件下单喷头水量分布进行计算, 水量分布计算原则如图 1 所示。假设某流道射流出的某一粒径水滴落在 Q 点, 其他流道射流出的不同粒径水滴分别落在 $A、B、C、D$ 点, 通过分别对比 Q 点与 $A、B、C、D$ 点的距离, 判断出 Q 点与 A 点距离最近, 则将 Q 点处水滴粒径对应的水量叠加至 A 点处。

1.2 蒸发飘移损失计算方法

蒸发飘移损失计算包括两方面内容, 首先是水滴运动过程中的蒸发损失率, 计算式为

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{D_{ci}^3 - D_{li}^3}{D_{ci}^3} P_{Di} / \sum_{i=1}^n P_{Di} \times 100\% \quad (2)$$

式中 E ——蒸发损失率, %

n ——模拟的不同粒径水滴序号

D_{ci} ——第 i 个水滴 D 的初始直径, m

D_{li} ——第 i 个水滴 D 的落地直径, m

P_{Di} ——第 i 个水滴 D 对应的喷灌强度, mm/h

同理, 飘移损失率的计算式为

$$W = \sum_{i=1}^m P_{Di} / \sum_{i=1}^n P_{Di} \times 100\% \quad (3)$$

式中 m ——漂移出计算区域的不同粒径水滴序号
 P_{Di} ——第 t 个漂移出计算区域水滴对应的喷灌强度, mm/h

由式(2)和式(3)可得蒸发飘移损失为

$$L = E + W \quad (4)$$

2 有风条件下计算模型验证

单喷头喷洒面积大, 且水量分布试验需要长时间测量, 而自然条件下风速和风向稳定性较差, 测量准确性不能得到保证; 创造大区域风洞试验条件, 其花费又十分昂贵。各种因素限制使得准确获取有风条件下单喷头水量分布数据较为困难, 为验证有风条件下单喷头水量分布模拟的准确性, 根据 FACI 的试验条件设定相应的模拟参数, 其中喷嘴直径为 3.8 mm, 喷头工作压力为 140 kPa, 模拟风速为 2.5 m/s, 模拟了 1 m 和 2.5 m 两种高度下的水量分布, 通过与其试验值对比, 对有风条件下的单喷头水量分布和喷洒射程的模拟值与测量值的差异性进行分析。

2.1 单喷头水量分布

图 2 为工作压力为 140 kPa、喷嘴型号为 3.8 mm、风速为 2.5 m/s 水量分布模拟结果与 FACI

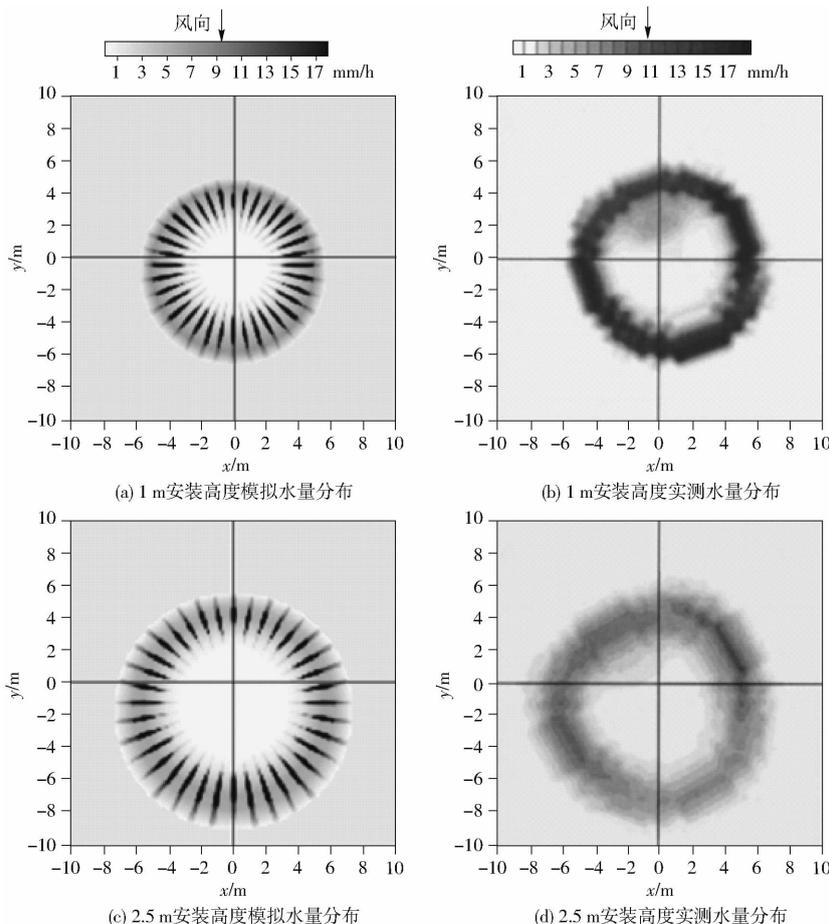


图 2 水量分布模拟与测量值对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated water distributions

测量结果的对比,坐标点(0,0)为喷头安装位置,风向为平行于 y 轴方向。水量分布图显示,有风条件下模拟与实测的水量分布与无风条件下类似,均呈现圆形分布,与测量值相比,模拟值边界较为规则,另外,模拟水量分布在周向上呈条带形分布,这是由于该喷盘具有36个流道,喷头在固定风速下工作时,理想状况下各射流水束相互无干扰;实测水量分布在周向上水量分布相对较为均匀,漏喷区域不明显,这是因为测量时风速与风向都无法固定(测量风速变化范围为0~2.5 m/s),当风速和风向发生变化时,其射流水束落地位置发生了变化,水束偏移后一定程度上补充了漏喷区的水量。从图中还可以看出,水量在迎风射程上(y 轴正方向)水舌条带较短,安装高度越高,效果越明显,这是由于水束在迎风向喷射时,大粒径水滴影响较小,迎风继续飞行,小粒径水滴受风的作用飞向顺风向区域,

表1 喷洒射程模拟值与FACI计算值的对比

Tab.1 Comparison of simulated and FACI calculated sprinkler range

安装高度/m	x轴方向射程			y轴负方向射程			y轴正方向射程		
	模拟值/m	FACI测量值/m	相对偏差/%	模拟值/m	FACI测量值/m	相对偏差/%	模拟值/m	FACI测量值/m	相对偏差/%
1	5.72	5.87	2.60	6.48	6.36	1.90	4.95	5.52	-10.30
2.5	7.31	7.32	0.10	9.04	8.66	4.40	5.98	5.97	0.20

3 喷灌均匀度

3.1 喷灌均匀度影响因素分析

以Nelson D3000喷头为研究对象,采用该计算程序,模拟出喷嘴直径4.76 mm、倒挂安装方式、不同工作压力和安装高度下,风速为2、4、6 m/s时单喷头水量分布,模拟的因素水平如表2所示,根据单喷头水量分布数据,采用克里斯琴森均匀度计算公式^[15],进行多喷头组合叠加计算组合喷灌均匀度,均匀度计算式为

$$C = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

式中 n ——总测点个数

x_i ——第 i 个测点相对水深

\bar{x} —— n 个雨量筒平均水深

不考虑各因素间的交互作用,采用SPSS软件分析风速 W_s 、风向 W_d 、工作压力 p 、喷头间距 l 以及喷头安装高度 H 等因素对平移式喷灌均匀度的影响,结果如表3所示。分析结果显示,在95%的置信度下,工作压力、喷头间距和喷头安装高度 P 值均小

导致迎风向水量减少,落地条带的长度变短。从图中还可以看出,喷头安装高度增大至2.5 m后,平均喷灌强度减小。通过对比分析可知,模拟出的有风条件下水量分布规律基本能够反映真实情况。

2.2 单喷头喷洒射程

有风条件下,喷头安装高度不同,水量偏离喷头中心点的距离也有差异,表1给出了有风条件下喷头安装高度为1 m和2.5 m时喷洒射程的模拟值与测量值的对比结果,数据显示,安装高度为1 m时,喷头在 x 轴方向、顺风向、迎风向的射程模拟值分别为5.72、6.48、4.95 m,测量值分别为5.87、6.36、5.52 m,对应的相对偏差分别为2.60%、1.90%、-10.30%,安装高度为2.5 m时对应的相对偏差为0.10%、4.40%、0.20%,总体而言,射程模拟与实测值的偏差相对较小,模拟准确性有一定的保证。

表2 均匀度计算因素与水平

Tab.2 Experimental factors and levels for calculation of CU

水平	风速 $W_s / (m \cdot s^{-1})$	风向 $W_d / (^\circ)$	工作压力 p / kPa	喷头间距 l / m	安装高度 H / m
1	2	30	100	2	1.0
2	4	60	150	3	1.5
3	6	90	200	4	2.0
4				5	
5				6	

表3 各因素对均匀度影响的方差分析

Tab.3 Analysis of variance between each factor and CU

因素	III型平方和	自由度	均方差	F	P
风速	0.012	2	0.006	2.618	0.074
风向	0.011	2	0.005	2.341	0.098
工作压力	0.060	2	0.030	13.084	0.000
喷头间距	3.126	4	0.781	342.517	0.000
安装高度	0.100	2	0.009	21.827	0.000

于0.05,说明这3个因素对组合均匀度的影响呈显著水平,风速及风向 P 值分别为0.074和0.098,说明风速和风向对均匀度的影响不显著,与文献[10]分析结果一致。另外,从影响喷灌均匀的3个因素对应的 F 值来看,喷头间距 F 值最大,说明相比喷头安装高度和工作压力,喷头间距对喷灌均匀度的

影响效果最明显。

3.2 不同风速和风向向下喷头间距对均匀度影响

图 3 为喷头安装高度为 2.0 m,工作压力分别为 100 kPa 和 200 kPa,不同风速和风向向下喷头间距对喷灌均匀度的影响。从图 3 中可以看出,不同风速和风向向下,随着喷头布置间距的增大,喷灌均匀度均呈现降低的趋势。2~5 m 喷头间距下均匀度下降幅度较小,当喷头安装间距增大至 6 m 时,喷灌均匀度降低较为迅速。当喷头压力为 100 kPa 时,喷头间距为 2~5 m 时,2、4、6 m/s 风速下,均匀度最大降幅分别为 7.29%、8.21% 和 5.30%,增大至 6 m

后均匀度分别降低了 25.89%、17.08% 和 26.26% (图 3a),降低幅度较大;喷头间距由 2 m 增大至 5 m 后,30° 和 60° 风向下,喷灌均匀度最大降幅分别为 8.72% 和 6.38%,增大至 6 m 后均匀度分别降低了 30.73% 和 33.23% (图 3b)。当压力增大至 200 kPa,喷头间距在 2~5 m 范围内,任意风速下和风向向下喷灌均匀度在 86.26% 以上,喷头间距增大至 6 m 后,喷灌均匀度迅速下降至 78% 以下(图 3c、3d)。从图中还可以看出,风速和风向对喷灌均匀度影响均无显著性规律,这与 SPSS 方差分析得出的结论一致。

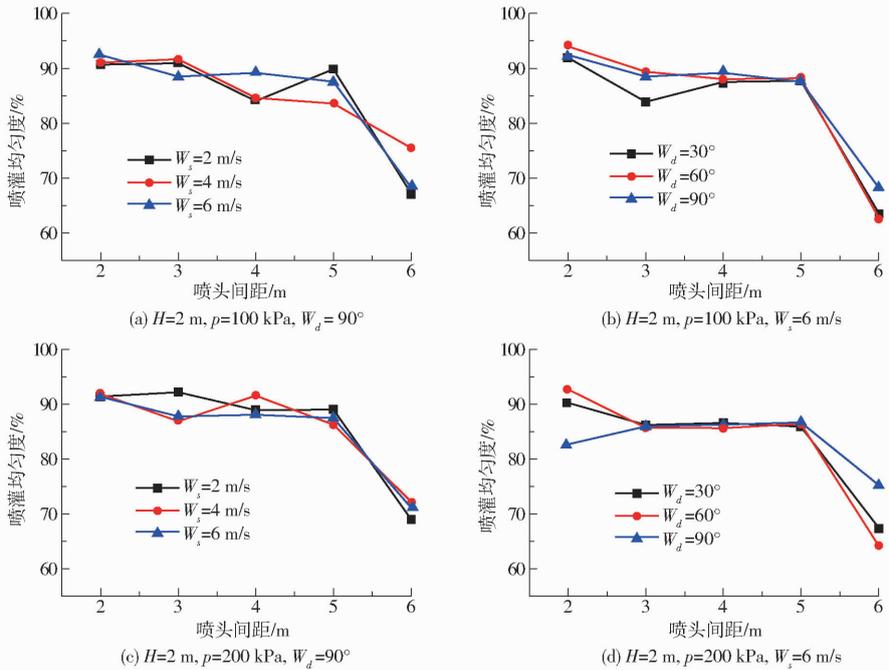


图 3 不同风速、风向向下喷头间距对喷灌均匀度的影响

Fig. 3 Effect of sprinkler spacing on CU under different wind speeds and directions

采用最小二乘法原理对不同喷头间距下的均匀度进行回归分析,结果显示采用二次多项式回归系数较高,关系式为

$$C = aL^2 + bL + c \quad (6)$$

式中 L ——喷头间距, m

a, b, c ——待定系数

采用回归出的经验模型,以均匀度最高为目标,对模型求导计算出最佳喷头间距,不同安装高度及工作压力下的回归参数、最佳喷头间距及最佳喷头间距下喷灌均匀度如表 4 所示。从表中可以得出,喷头安装高度较低时,应尽量缩小喷头间距,考虑风速和风向时,不同喷头安装高度及工作压力下最佳喷头安装间距变化范围为 2.13~3.04 m。

3.3 不同风速和风向向下安装高度对喷灌均匀度影响

由以上分析得出喷头最佳安装间距为 2.13~3.04 m,因此重点分析该间距下喷头安装高度对喷灌

表 4 考虑风速风向条件下喷灌均匀度随喷头间距变化的回归模型及最佳喷头间距

Tab. 4 Optimum spacing calculated by predictive equations for estimation of CU under windy condition

安装高度 H/m	工作压力 p/kPa	拟合参数				最佳间距	
		a	b	c	R^2	L/m	$C/\%$
1.0	100	-2.1	9.7	78.2	0.854	2.31	89.2
	150	-1.5	6.4	83.2	0.794	2.13	89.8
	200	-3.0	17.4	67.6	0.817	2.90	92.8
1.5	100	-0.3	-4.1	102.9	0.781		
	150	-1.7	9.1	74.9	0.807	2.64	86.8
	200	-1.6	8.4	79.9	0.668	2.63	90.9
2.0	100	-2.1	12.2	73.8	0.749	2.86	90.9
	150	-1.6	8.8	77.3	0.557	2.75	89.4
	200	-2.3	14.1	70.1	0.788	3.04	91.4

均匀度的影响,图 4 为喷头工作压力为 100 kPa,喷头布置间距为 2 m 和 3 m 时,不同风速和风向向下喷头安装高度对喷灌均匀度影响柱状图。总体来说,喷

头间距一定时,喷灌均匀度随着喷头安装高度的增大有增高的趋势,然而这种趋势并不特别明显,由此可知,安装高度的提升对喷灌均匀度的提高效果不大,因此在有风条件下,安装间距为2~3 m时,不必

为提高喷灌均匀度而刻意增大喷头安装高度,增大安装高度一定程度上还会造成较大的蒸发飘移损失,因此在实际喷灌应用中应结合喷灌作物植株高度,尽可能降低喷头安装高度。

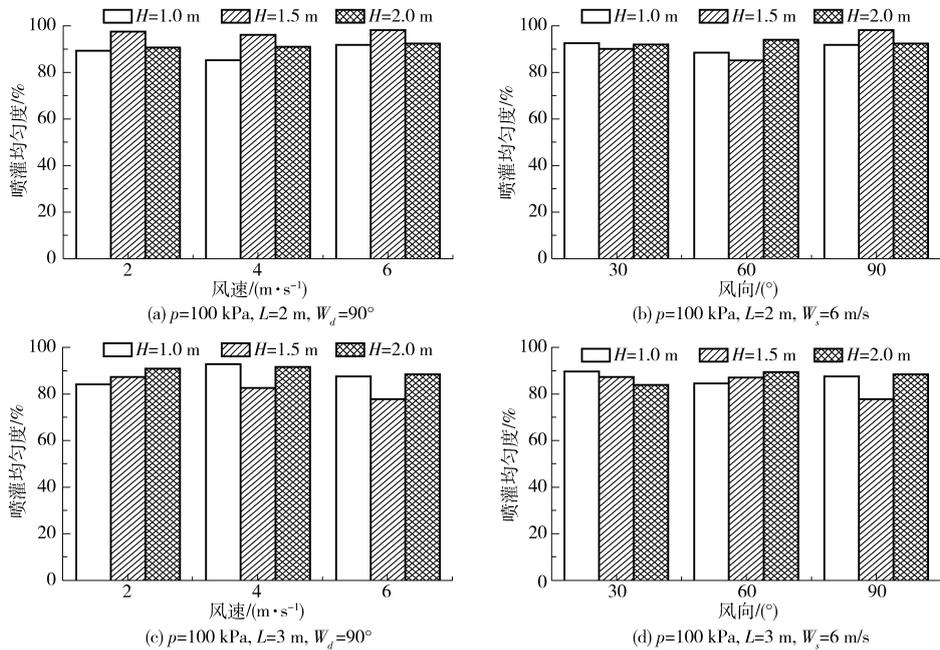


图4 安装高度与喷灌均匀度的关系

Fig. 4 Relationships between CU and riser height

3.4 不同风速和风向工作压力对喷灌均匀度影响

同样选取2 m和3 m喷头间距,喷头安装高度为1 m,分析不同风速和风向工作压力对喷灌均匀度的影响,结果如图5所示。图中显示,喷头间距为2 m和3 m时,增大喷灌压力一定程度上可以

提高喷灌均匀度,但是提高的尺度有限,由于采用低压灌溉,很大程度上能够降低系统运行费用,因此当喷头安装间距在2~3 m范围内,尽可能选取较低的工作压力进行喷灌,以降低喷灌系统运行成本。

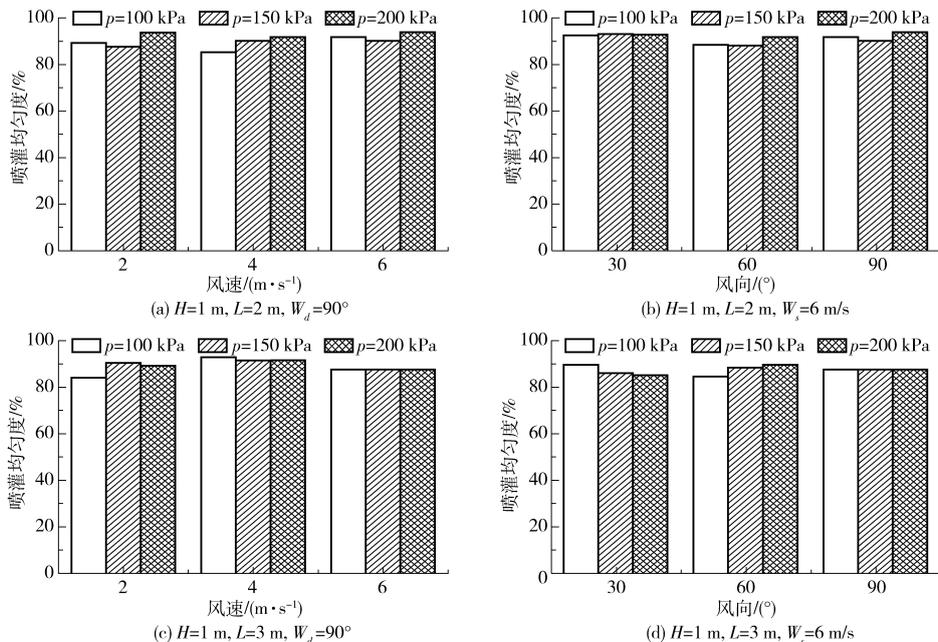


图5 工作压力与喷灌均匀度的关系

Fig. 5 Relationships between CU and working pressure

4 飘移损失分析

蒸发飘移损失影响因素较多,其中喷洒水滴直径、大气温湿度和风速等环境因素都会对其产生影响。本文在分析蒸发飘移损失时,以单喷头为研究对象,模拟风速、工作压力以及安装高度对蒸发飘移损失的影响,模拟结果如图 6 所示。由于风速增大后小粒径水滴受风的拖拽效果增大,不同工况下蒸发飘移损失均呈现增高趋势;当工作压力为 200 kPa、风速由 4 m/s 增大至 6 m/s 时,不同高度下飘移损失增加不明显,这是由于该工作压力下,4 m/s 风速已经将小粒径水滴充分吹离目标区域,当风速增大后对飘移损失影响较小。当风速相同时,飘移损失随着工作压力的增大呈现增高的趋势,这是因为压力增大后,水滴在空中的碎裂较为明显,导致在近喷头处水量增多,在水量分布模拟时,近喷头处水量对应的水滴粒径较小,小粒径水滴受风的作用效果较为明显,使得小粒径水滴对应的水量漂移出目标区域,结果使得蒸发飘移损失量增加。另外随着喷头安装高度的升高,相同风速下蒸发飘移损失均增大,产生这种现象的主要原因是高度的提升使得喷洒水滴在空气中的飞行时间增长,受风的作用持续增加后,较大粒径水滴漂移出目标区域,飘移损失量增加。

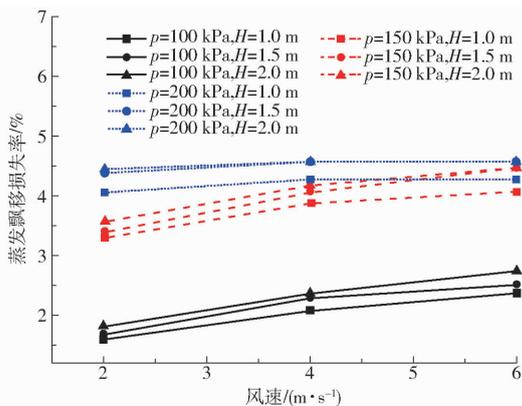


图 6 不同工况下蒸发飘移损失率变化曲线

Fig. 6 Wind drift and evaporation losses under different working conditions

表 5 给出了风速、喷头工作压力及安装高度对蒸发飘移损失率影响的分析结果,数据显示,以上 3 个因素对蒸发飘移损失率的影响效果均呈显著水

表 5 各因素对飘移损失影响的方差分析

Tab. 5 Analysis of variance between each factor and wind drift and evaporation losses

因素	III 型平方和	自由度	均方差	F	P
风速	1.994	2	0.997	34.975	0.000
工作压力	25.447	2	12.723	446.245	0.000
安装高度	0.472	2	0.236	8.280	0.002

平,从 F 值大小表明,工作压力对蒸发飘移损失的影响最大,风速的影响次之,喷头安装高度其影响最小。因此在有风条件下喷灌时,为了降低蒸发飘移损失,在保证较高喷灌均匀度的前提下,应首先考虑降低喷头工作压力,以降低水滴碎裂概率,其次还可以降低喷头安装高度,以提高喷灌水分利用率。

5 结论

(1) 基于弹道理论和风速模型,在有风条件下模拟出水滴粒径分布,通过对喷洒区域网格化处理,建立有风条件下折射式喷头水量分布计算方法。将模拟结果与 FACI 试验结果进行了对比,结果表明水量分布模拟值与实测值基本相符,模拟与实测射程的相对偏差不大于 10.03%,模拟的准确性较高。

(2) 计算了风速、风向、工作压力、喷头间距以及喷头安装高度等因素与喷灌均匀度的关系,采用 SPSS 软件分析了以上 5 种因素对均匀度的影响,结果显示风速和风向对均匀度影响不显著,喷头间距对喷灌均匀度的影响最显著,喷头安装高度次之,工作压力影响较小。

(3) 回归了有风条件下均匀度与喷头间距的经验模型,以均匀度最高为目标,计算出最佳喷头间距 2.13 ~ 3.04 m,在此间距下,喷头安装高度和喷灌压力的提升对喷灌均匀度的提高效果不大,因此为降低喷灌系统运行成本,应优先采用低压喷灌,并适当降低喷头安装高度。

(4) 风速、工作压力及安装高度对蒸发飘移损失影响都较为显著,其中工作压力影响最大,风速次之,喷头安装高度影响最小。因此有风喷灌时,在保证较高喷灌均匀度的前提下,应首先考虑降低喷头工作压力,以降低水滴碎裂概率,其次还可以降低喷头安装高度,以降低蒸发飘移损失。

参 考 文 献

1 李永冲, 严海军, 徐成波, 等. 考虑水滴运动蒸发的喷灌水量分布模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 127 - 132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130722&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.022.

LI Yongchong, YAN Haijun, XU Chengbo, et al. Simulation of sprinkler water distribution with droplet dynamics and evaporation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 127 - 132. (in Chinese)

- 258 – 263. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141140&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.040.
- PENG Xiaodong, ZHANG Tiemin, LI Jiyu, et al. Experiment of straight and airline flight operation for farmland based on UAV in visual remote mode[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 258 – 263. (in Chinese)
- 15 徐博, 陈立平, 谭彧, 等. 多架次作业植保无人机最小能耗航迹规划算法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 36 – 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.006.
- XU Bo, CHEN Liping, TAN Yu, et al. Path planning based on minimum energy consumption for plant protection UAVs in Sorties [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 36 – 42. (in Chinese)
- 16 徐博, 陈立平, 谭彧, 等. 基于无人机航向的不规则区域作业航线规划算法与验证[J/OL]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 173 – 178. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20152323&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.23.023.
- XU Bo, CHEN Liping, TAN Yu, et al. Route planning algorithm and verification based on UAV operation path angle in irregular area[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 173 – 178. (in Chinese)
- 17 王俭, 赵鹤鸣, 肖金球. 基于区域优化分割的机器人全覆盖路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(22): 59 – 62.
- WANG Jian, ZHAO Heming, XIAO Jinqiu. Optimized region decomposition based complete coverage path planning for mobile robot[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(22): 59 – 62. (in Chinese)
- 18 刘晓霞. 种群规模对遗传算法性能影响的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010: 1 – 37.

~~~~~

(上接第 97 页)

- 2 FUKUI Y, NAKANISHI K, OKAMURA S. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity[J]. Irrigation Science, 1980, 2(1): 23 – 32.
- 3 BURILLO G S, DELIRHASANNIA R, PLAYÁN E, et al. Initial drop velocity in a fixed spray plate sprinkler[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2013, 139(7): 521 – 531.
- 4 LI Y, BAI G, YAN H. Development and validation of a modified model to simulate the sprinkler water distribution[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 111: 38 – 47.
- 5 张以升, 朱德兰, 张林, 等. 基于弹道轨迹方程的折射式喷头水量分布计算模型[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 55 – 61. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151208&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151208&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.008.
- ZHANG Yisheng, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Water distribution model of fixed spray plate sprinkler based on ballistic trajectory equation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 55 – 61. (in Chinese)
- 6 黄修桥, 廖永诚. 有风条件下喷灌系统组合均匀度的计算理论与方法研究[J]. 灌溉排水, 1995, 14(1): 12 – 18.
- 7 CLARK G A, SRINIVAS K, ROGERS D H, et al. Measured and simulated uniformity of low drift nozzle sprinklers[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 321 – 330.
- 8 O'SHAUGHNESSY S A, URREGO Pereira Y F, EVETT S R, et al. Assessing application uniformity of a variable rate irrigation system in a windy location[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(4): 497 – 510.
- 9 SALVADOR R, BAUTISTA-CAPETILLO C, BURGUETE J, et al. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers[J]. Irrigation Science, 2009, 27(4): 307 – 317.
- 10 FACI J M, SALVADOR R, PLAYAÁN E, et al. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2001, 127(4): 224 – 233.
- 11 TARJUELO J M, MONTERO J, HONRUBIA F T, et al. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 1999, 40(2): 315 – 331.
- 12 VORIES E D, BERNUTH R D V, MICKELSON R H. Simulating sprinkler performance in wind[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1987, 113(1): 119 – 130.
- 13 MONTERO J, TARJUELO J, CARRIÓN P. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation[J]. Irrigation Science, 2001, 20(2): 73 – 84.
- 14 SEGNER I, NIR D, BERNUTH R D. Simulation of wind-distorted sprinkler patterns[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(2): 285 – 306.
- 15 CHRISTIANSEN J E. Irrigation by sprinkling[R]. Berkeley: University of California, 1942.