

考虑水滴运动蒸发的喷灌水量分布模拟*

李永冲¹ 严海军¹ 徐成波² 肖建伟¹ 李文颖¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054)

摘要: 提出了有风条件下喷头水滴运动与喷灌水量分布模拟方法, 并利用 Visual Basic 6.0 开发了喷灌水量分布模拟软件。该软件在已知单喷头的径向水量分布数据时, 可以模拟出不同风速、风向、空气温湿度等环境条件下单喷头或多喷头组合的喷灌水量分布, 计算出喷灌系统的组合喷灌强度、喷灌均匀系数和蒸发损失率。以 9708A 型喷头为例, 分别对工作压力为 0.20、0.25 和 0.30 MPa 下单喷头径向水量分布以及喷灌系统组合间距为 14 m × 14 m 和 14 m × 12 m 时的喷灌水量分布进行了模拟, 并与实测值进行了对比, 结果表明: 模拟的单喷头径向水量分布与实测值总体一致, 由模拟水量分布推算的喷头流量与实测值的相对误差为 0.83% ~ 8.01%; 喷灌均匀系数模拟值与实测值的相对误差为 0.69% ~ 6.36%, 蒸发损失率模拟值为 0.51% ~ 1.75%, 小于实测的水量损失率。模拟了不同组合间距下的喷灌水量分布, 得到的喷灌均匀系数模拟值与其他软件比较, 相对误差在 0.11% ~ 2.44% 之间。

关键词: 喷灌 水滴运动 蒸发飘移 水量分布 软件

中图分类号: S277.9⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0127-06

Simulation of Sprinkler Water Distribution with Droplet Dynamics and Evaporation

Li Yongchong¹ Yan Haijun¹ Xu Chengbo² Xiao Jianwei¹ Li Wenying¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China)

Abstract: Based on the model of droplet dynamics and evaporation, the simulation method of droplet flight was put forward under the wind condition. Software of simulating sprinkler water distribution was developed by Visual Basic 6.0. With the radial water distribution data of single sprinkler, the software could simulate water distribution of single sprinkler or sprinkler irrigation system and calculate combined application rate, uniformity coefficient and evaporation loss rate of sprinkler irrigation system. Taking the sprinkler 9708A as example, radial water distribution of single sprinkler and water distribution of sprinkler irrigation system with the combined spacings of 14 m × 14 m and 14 m × 12 m were simulated and compared with the measured values under the pressures of 0.20, 0.25 and 0.30 MPa. The results showed that the simulated values of radial water distribution of single sprinkler had the same tendency as the measured values on the whole, the relative error between simulated and measured values of flow rate ranging from 0.83% to 8.01%, that of the uniformity coefficient (C_u) ranging from 0.44% to 7.77%, and the simulated evaporation loss rate ranging from 0.51% to 1.75%. Several cases of sprinkler water distribution with different combined spacing were compared by using the developed software and other software. The relative error of the simulated values of C_u varied from 0.11% to 2.44%.

Key words: Sprinkler irrigation Droplet flight Evaporation and drift Water distribution Software

收稿日期: 2012-09-12 修回日期: 2012-11-22

* 国家自然科学基金资助项目(51179191)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100506)和水利部科技推广计划资助项目(TG1216)

作者简介: 李永冲, 博士生, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: yongchong.ok@163.com

通讯作者: 严海军, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: yanhj@cau.edu.cn

引言

喷灌水量分布是计算组合喷灌强度、喷灌均匀系数及喷洒水利用系数的基础,一般在喷灌工程竣工运行后经过田间试验才能求得,在喷灌工程设计时若能准确模拟出喷灌水量分布更受国内外学者的关注。水滴运动过程中会受到风速风向及周围环境的影响发生蒸发飘移,并最终影响喷灌水量分布。Fukui 等^[1]模拟计算了有风条件下组合喷灌水量分布及均匀系数,Seginer 等^[2]引入修正的空气阻力系数,模拟了风对喷灌水量分布的影响,但他们均没有考虑水滴的蒸发损失。Carrion 等^[3]和 Playan 等^[4]应用水滴运动理论来模拟喷灌水量分布,但蒸发损失计算采用与风速、空气湿度有关的经验公式,而未能全面考虑不同时间和地域下各环境因子的影响。国内不少学者利用相关商业软件或自编开发软件模拟了组合喷灌系统的水量分布^[5~9],但以上学者开发的软件均没有考虑风速风向对水量分布的影响,因此只能模拟无风条件下喷灌水量分布。也有国内学者考虑了风对喷灌水量分布的影响,但模拟中忽略了水滴运动过程中的蒸发损失^[10~11],一定程度上降低了软件计算精度。本文充分考虑水滴运动过程中的蒸发影响,提出有风条件下单喷头或多喷头组合喷灌系统的水量分布模拟方法,并开发模拟软件。

1 数学模型的建立

1.1 水滴运动模型

水滴运动过程中受到重力、空气阻力和空气浮力的共同作用,基于弹道理论建立的有风条件下水滴运动模型可表示为^[3,10]

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{3}{4}\frac{\rho_a}{\rho_w}\frac{C_D}{D}v(u_x-w_x) \\ \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{3}{4}\frac{\rho_a}{\rho_w}\frac{C_D}{D}v(u_y-w_y) \\ \frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{3}{4}\frac{\rho_a}{\rho_w}\frac{C_D}{D}v(u_z-w_z) + g\frac{\rho_a-\rho_w}{\rho_w} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $v = [(u_x-w_x)^2 + (u_y-w_y)^2 + u_z^2]^{\frac{1}{2}}$
式中 $x、y、z$ —— $X、Y、Z$ 轴方向的位移分量, m
 t ——水滴飞行时间, s
 D ——水滴直径, m
 C_D ——空气阻力系数
 $\rho_a、\rho_w$ ——空气、水的密度, kg/m³
 $u_x、u_y、u_z$ ——水滴速度 u 在 $X、Y、Z$ 轴方向上的速度分量, m/s
 $w_x、w_y、w_z$ ——风速 w 在 $X、Y、Z$ 轴方向上的速度分量, m/s

v ——水滴相对运动速度, m/s
 g ——重力加速度, m/s²

1.2 水滴蒸发模型

喷洒水滴在运动过程中的蒸发现象将引起水滴直径的变化。基于热质传递理论的水滴蒸发模型可表示为^[12~14]

$$\frac{dD}{dt} = -2\frac{M_v}{M_m}\frac{K}{D}\frac{\rho_a}{\rho_w}\frac{\Delta p}{p_f}Nu \quad (2)$$

其中 $\Delta p = p_{sw} - p_v$ $p_f = p_a - p_v$
式中 M_v ——扩散水汽的分子量, kg/mol
 M_m ——混合空气的平均分子量, kg/mol
 K ——空气中水汽的扩散系数, m²/s
 Nu ——努塞尔数
 $p_{sw}、p_v$ ——湿球温度下的饱和水气压、干球温度下的实际水气压, kPa
 p_f ——空气分压, kPa
 p_a ——大气压, kPa

联立式(1)和(2)构成水滴运动蒸发模型,可采用四阶龙格-库塔方法数值求解。

1.3 水滴蒸发损失

水滴蒸发损失可用水滴离开喷嘴至接触地面飞行过程中的体积差表示,假设单个水滴运动过程中都呈球体状,其蒸发损失率 λ_s 表示为^[15]

$$\lambda_s = \left(1 - \frac{V_e}{V_i}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{D_e^3}{D_i^3}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中 $V_i、V_e$ ——单个水滴离开喷嘴、接触地面时的体积, m³
 $D_i、D_e$ ——单个水滴离开喷嘴、接触地面时的直径, m

对于喷头喷洒水量分布,可认为由不同径向距离位置处不同直径水滴群累积体积构成。试验表明,距离喷头某径向位置的水滴中数直径可以反映喷头该位置的水滴直径^[16],也可将该位置的水滴群所含水量视为一定量的中数直径水滴体积的累积,因此在应用水滴运动蒸发模型时可以采用水滴中数直径直接代入。当已知喷头某径向距离的中数直径水滴的蒸发损失率 λ_s 时,则将该中数直径水滴所代表的水量 $V(i,j)$ 乘以 λ_s 可得到该水滴直径所代表水量的蒸发损失量,记为 $V_s(i,j)$ 。落到地面的实际水量,记为 $V_f(i,j)$ 。对不同径向位置处水滴中数直径所代表的、落到地面的实际水量累加可得到单喷头在一定喷洒时间内落地的总水量,记为 V_f ,其公式为

$$V_f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_f(i,j) \quad (4)$$

其中 $V_f(i,j) = V(i,j) - V_s(i,j)$

式中 m ——水滴的喷洒方向数量,如每隔 2° 取喷洒射线,则喷头全圆喷洒时 m 为 180
 n ——水滴直径的分级数

通过式(4)可求得有风条件下考虑蒸发影响后单喷头喷洒到地面的总水量。

如果已知喷头在无风条件下沿某喷洒方向、距离喷头某径向位置处所代表的水量,则可求出单喷头无风条件下喷洒到地面的总水量,即

$$V_b = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V(i,j) \tag{5}$$

式中 V_b ——无风条件下单喷头喷洒到地面的总水量,理论上等于一定时间内喷头所喷洒的总水量, m^3

由式(4)和(5)可得到有风条件下单喷头的总

蒸发损失率,其计算公式为

$$\lambda_i = \left(1 - \frac{V_f}{V_b}\right) \times 100\% \tag{6}$$

2 软件开发

2.1 软件总体结构

根据上述数学模型开发的喷灌水量分布模拟软件以 Visual Basic 6.0 为开发工具,数据存储与输出采用 Microsoft Access 数据库及 Microsoft Excel 等相结合方法,同时可调用 Surfer 软件绘制单喷头水量分布三维图、组合喷灌水量分布等值线图和三维图。软件主要包括参数设置、计算、结果输出 3 大模块,总体结构如图 1 所示。

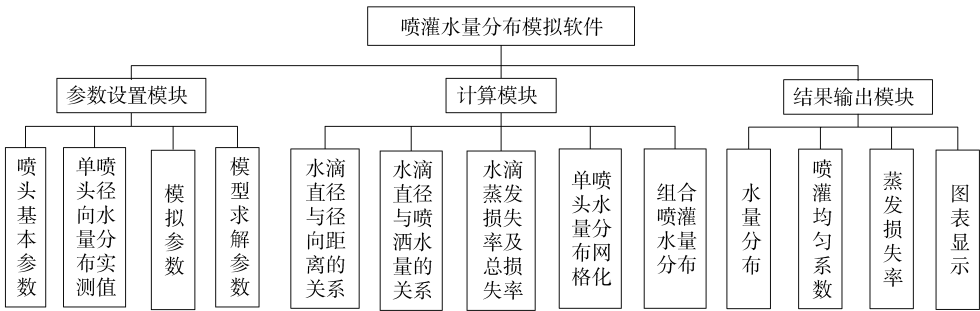


图 1 软件的总体结构图

Fig. 1 Structure diagram of software

软件开发流程大致分为单个水滴运动模拟、单喷头水量分布模拟、组合喷灌水量分布模拟和性能参数预测等 4 部分,总体开发流程图如图 2 所示。

2.2 喷头径向水量分布的离散化

已知室内实测的无风条件下喷头径向水量分布(假设喷头各个方向上的径向水量分布一致),即 $\rho_k = f(R_k)$,其中 ρ_k 为点喷灌强度,单位 mm/h ; R_k 为室内测得的某雨量筒与喷头的径向距离,单位 m 。无风条件下 $w = 0$,暂不考虑蒸发,由式(1)可求得不同直径的水滴所对应的飞行距离 r_j 。

计算中将水滴初始直径设为 0.2 mm ,水滴直径增加量 ΔD 取 $0.05\text{ mm}^{[3]}$,计算发现水滴飞行距离随着水滴直径的增大而增大。当水滴的飞行距离超出单喷头无风条件下的湿润半径时,该水滴直径视为最大水滴直径。对于不能直接测得的喷灌水深可以根据其相邻雨量筒实测的喷灌水深值经过线性插值法求得。

假设某直径水滴落在以喷头为中心的圆环内,也就是说某圆环面积内所有水滴直径相同,则该圆环面积内收集水量 V_j 可表示为

$$V_j = \frac{h_j}{1\,000} \pi \left[\left(\frac{r_j + r_{j+1}}{2} \right)^2 - \left(\frac{r_{j-1} + r_j}{2} \right)^2 \right] \tag{7}$$

式中 h_j ——某直径水滴所对应的喷灌水深, mm
 r_{j-1} 、 r_j 、 r_{j+1} ——某个喷洒方向上第 $j-1$ 、 j 、 $j+1$ 个水滴所飞行的距离, m

假设某直径水滴在各个喷洒方向上的喷洒水量相同,则可求得无风条件下不同直径水滴沿各个方向上在其径向距离处所对应的喷洒水量 $V(i,j)$,其表示为

$$V(i,j) = \frac{V_j}{m} \tag{8}$$

2.3 有风条件下单喷头水量分布的网格化

将喷头周围划分成小网格,竖管所在位置为坐标原点,设接收水量区域为正方形 $ABCD$,如图 3 所示。设虚拟小网格 4 个顶点的坐标分别为 (X_a, Y_b) 、 (X_{a+1}, Y_b) 、 (X_a, Y_{b+1}) 、 (X_{a+1}, Y_{b+1}) ,如图 3 中阴影部分所示。考虑蒸发影响后,由水滴运动蒸发模型可求出某风速下不同直径水滴在各个喷洒方向上落到地面的横纵坐标值为 $l_x(i,j)$ 、 $l_y(i,j)$,将两者与小网格 4 个顶点的坐标进行比较,以判断水滴是否落到小网格内。将落到某小网格内不同直径水滴对应的水量进行累加,可以求得有风条件下单喷头在其接收水量区域正方形 $ABCD$ 内的水量分布,并以数组的形式保存,可用于组合喷灌的叠加计

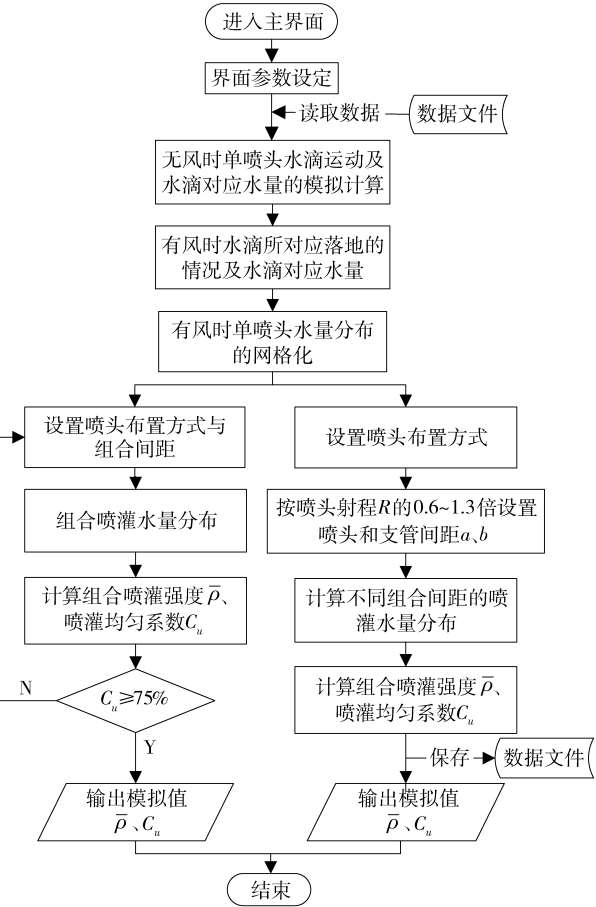


图2 软件的总体开发流程图

Fig.2 Development flow chart of software

算^[3]。虚拟小网格的边长为 L ,取为1 m。

2.4 组合喷灌水量分布模拟

喷头的布置方式分为矩形组合和三角形组合。对于矩形组合,先选择4个相邻喷头围成的区域为典型面积,再将对该典型区域有贡献的有效喷头水量分布矩阵进行相加,获得典型面积内的水量分布;对于三角形组合,由于直接使用小网格中喷洒水量进行矩阵叠加计算困难,故典型面积以矩形等效面积代替,其以任一喷头为中心,沿支管方向的长度为喷头间距,垂直于支管方向的长度为支管间距^[17],再同理将对典型区域有贡献的有效喷头水量分布矩阵

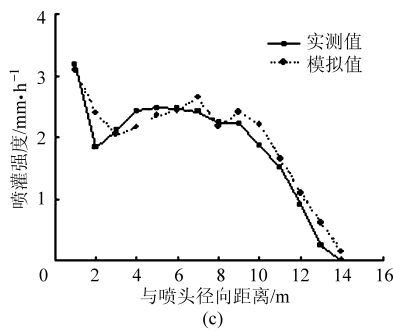
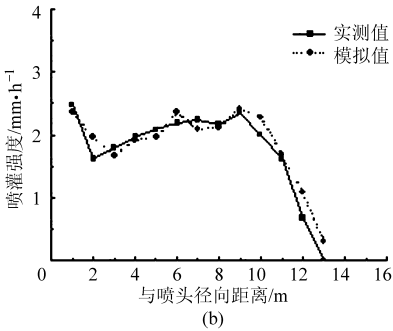
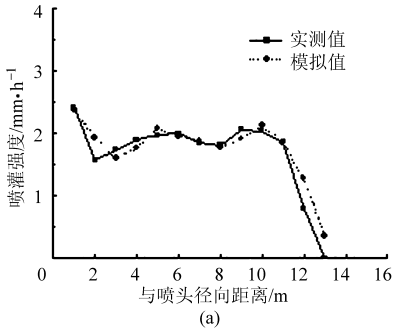


图4 喷头径向水量分布实测值与模拟值的比较

Fig.4 Comparison of measured and simulated value of radial water distribution of single sprinkler

(a) 工作压力 0.20 MPa (b) 工作压力 0.25 MPa (c) 工作压力 0.30 MPa

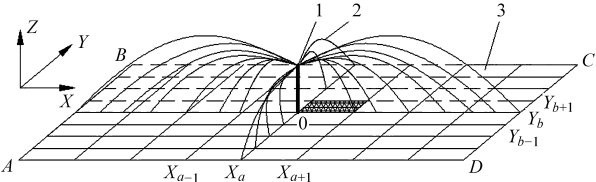


图3 单喷头水滴运动过程示意图

Fig.3 Sketch map of droplet flight for single sprinkler

1. 竖管 2. 水滴运动轨迹 3. 虚拟小网格

进行相加,最终获得典型面积内的水量分布。

3 软件应用

利用室内实测的某公司 9708A 型摇臂式喷头的径向水量分布数据,对软件的准确性进行验证。由模拟水量分布推算出的喷头流量与实测值相对误差在 0.83%~8.01% 之间,平均值为 3.36%,如表 1 所示。图 4 给出了 0.20、0.25 和 0.30 MPa 3 种工作压力下单喷头径向水量分布的实测值与应用软件求得的模拟值,可以看出:单喷头的径向水量分布的模拟值与实测值总体上基本一致,只是在喷头附近 2 m 处和射程末端误差稍大些。

表1 喷头流量实测值与模拟值的比较

Tab.1 Comparison of measured and simulated value of flow rate for single sprinkler

工作压力 /MPa	实测流量 /m³·h ⁻¹	模拟流量 /m³·h ⁻¹	流量相对 误差/%
0.20	0.799	0.863	8.01
0.25	0.886	0.897	1.24
0.30	0.966	0.974	0.83

采用与室内试验同批新出厂的 9708A 型喷头进行了组合喷灌系统的田间试验。试验区地势平坦,按梳子型布置 4 条支管,每条支管上布置 4 个喷头,喷头采用 14 m×14 m 和 14 m×12 m 布置方式(即喷头间距为 14 m,支管间距为 14 m 和 12 m),支管首个喷头距离进口 7 m,喷头安装高度为 1.2 m。选择中间 2 条支管及支管上的中间 2 个喷头组成喷

洒水量测试区,并在支管上这 2 个喷头中间安装精密压力表(0.4 级,量程 0.6 MPa),压力表管口与喷头主喷嘴相平齐,所测压力作为喷头的试验工作压力,分别取 0.20、0.25 和 0.30 MPa,每个工作压力下试验时间均取 1 h;使用手持式风速风向仪每隔 15 min 测定风速风向,风速测量 5 次取平均值,并确定主风向。试验过程中测定的相关环境参数见表 2。充分考虑喷头水量重叠,在 14 m×14 m 和 14 m×12 m 测试区域内按 2 m×2 m 方格网状布置雨量筒。雨量筒所接水量用分度值为 1 g 的电子秤称得,换算求得喷灌水深;由测试区域内的平均喷灌水深可求得单位时间内落在区域内总水量,与单位时间内喷头在该区域内的理论喷洒水量比较,可得到喷灌水量损失率的实测值;测试区域内的喷灌均匀系数采用克里斯琴森公式计算。根据室内无风条件下的单喷头径向水量分布数据,应用本软件模拟了相同田间试验环境参数下的组合水量分布,并得到喷灌均匀系数和蒸发损失率的模拟值,相关结果见表 3。可以看出:模拟和实测得到喷灌均匀系数的相对误差在 0.69%~6.36% 之间,平均值为 3.41%;模拟得到蒸发损失率在 0.51%~1.75% 之间,而实测的水量损失率为 0.73%~8.72%,分析原因主要是实测的水量损失率除水量蒸发损失之外,还包括飘移损失部分;另外由于分干管、支管水力损失和喷头安装高度,使得田间试验时喷头实际

表 2 喷头组间间距和环境参数

Tab.2 Combined spacings and environmental parameters for sprinklers

布置方式	工作压力 /MPa	平均风速 /m·s ⁻¹	风向	平均空气 温度/℃	平均相对 湿度/%
矩形布置 14 m×14 m	0.20	0.83	东南风	13.3	48.0
	0.25	0.56	西风	13.5	30.3
	0.30	0.71	东风	13.2	48.7
矩形布置 14 m×12 m	0.20	0.52	西风	2.0	46.7
	0.25	0.88	北风	13.5	30.3
	0.30	0.87	北风	10.3	14.7

表 3 3 种工况下的模拟值和实测值

Tab.3 Simulated and measured values under three working conditions

布置方式	工作 压力 /MPa	喷灌均匀系数 C_u			模拟的 蒸发损 失率/%	实测的 水量损 失率/%
		模拟值 /%	实测值 /%	相对误 差/%		
矩形布置 14 m×14 m	0.20	77.93	73.27	6.36	1.00	2.93
	0.25	78.40	77.86	0.69	1.55	5.83
	0.30	82.64	81.11	1.89	1.27	4.41
矩形布置 14 m×12 m	0.20	79.88	77.55	3.00	0.51	0.73
	0.25	78.67	75.03	4.85	1.50	7.11
	0.30	83.32	80.39	3.64	1.75	8.72

流量低于室内无风条件下的试验值,从而导致相应的模拟值与实测值存在偏差。

为了进一步验证本软件的计算精度,将本软件的模拟结果与文献[8]进行了比较,相关结果见表 4。可以看出,应用本软件模拟计算的喷灌均匀系数与文献[8]的结果非常接近,两者的相对误差在 0.11%~2.44% 之间,平均值为 0.96%。

表 4 本软件模拟的喷灌均匀系数与其他软件比较

Tab.4 Comparison of coefficient of uniformity with other software

序号	喷头间距 支管间距		喷灌均匀系数/%		
	系数	系数	本文	文献[8]	相对误差
1	1.30	1.20	83.86	81.86	2.44
2	1.30	1.25	82.87	81.58	1.58
3	1.30	1.30	82.76	81.47	1.58
4	1.30	1.35	81.72	81.47	0.31
5	1.35	1.00	84.80	83.84	1.15
6	1.35	1.05	84.33	83.84	0.58
7	1.35	1.10	83.58	83.02	0.67
8	1.35	1.15	83.03	82.36	0.81
9	1.35	1.20	82.45	81.86	0.72
10	1.35	1.25	81.67	81.58	0.11
11	1.35	1.30	81.67	81.47	0.25
12	1.35	1.35	80.64	81.47	1.02
13	1.10	1.05	84.82	85.85	1.20

4 结论

(1)引入水滴运动蒸发模型,提出了喷头在有风条件下喷头水滴运动与喷灌水量分布模拟方法,并开发了软件,可以模拟在不同风速、风向、空气温湿度等环境条件下的喷灌水量分布,预测出组合喷灌强度、喷灌均匀系数以及蒸发损失率等技术指标。

(2)应用开发软件对 9708A 型喷头在 0.20、0.25 和 0.30 MPa 3 种工作压力下的径向水量分布以及组合形式 14 m×14 m 和 14 m×12 m 的喷灌系统进行了模拟,结果表明单喷头径向水量分布的模拟值与实测值总体上基本一致,由模拟水量分布推算出喷头流量与实测流量的相对误差在 0.83%~8.01% 之间,平均值为 3.36%;喷灌均匀系数的模拟值与实测值之间的相对误差在 0.69%~6.36% 之间,平均值为 3.41%;模拟得到的蒸发损失率在 0.51%~1.75% 之间,实测水量损失率为 0.73%~8.72%。表明本文提出的基于水滴运动蒸发模型的喷灌水量分布模拟方法是可行的,所开发软件具有较高的计算精度。

(3)应用本软件求得了不同组合间距下的喷灌均匀系数模拟值,并与劳东青等^[8]开发软件的模拟结果进行对比,两者的相对误差在 0.11%~2.44% 之间,平均值为 0.96%。

参 考 文 献

- 1 Fukui Y, Nakanishi K, Okamura S. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity[J]. Irrigation Science, 1980, 2(1): 23 ~ 32.
- 2 Seginer I, Nir D, von Bernuth R D. Simulation of wind-distorted sprinkler patterns[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(2): 285 ~ 306.
- 3 Carrion P, Tarjuelo J M, Montero J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. I. Description of model[J]. Irrigation Science, 2001, 20(2): 73 ~ 84.
- 4 Playan E, Zapata N, Faci J M, et al. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1 ~ 2): 89 ~ 100.
- 5 邓鲁华,郝培业. 基于 Delphi 的喷头喷洒分析软件[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2003, 17(3): 33 ~ 36.
Den Luhua, Hao Peiye. Software based on Delphi for analysis of sprinkler head insufflation [J]. Journal of Shandong University of Technology: Sci. & Tech., 2003, 17(3): 33 ~ 36. (in Chinese)
- 6 王波雷,马孝义,苗正伟. 基于 Surfer 软件的喷灌水量分布均匀性研究[J]. 人民黄河, 2008(3): 62 ~ 63.
- 7 袁寿其,朱兴业,李红,等. 基于 MATLAB 全射流喷头组合喷灌计算模拟[J]. 排灌机械, 2008, 26(1): 47 ~ 52.
Yuan Shouqi, Zhu Xingye, Li Hong, et al. Simulation of combined irrigation for complete fluidic sprinkler based on MATLAB[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(1): 47 ~ 52. (in Chinese)
- 8 劳东青,韩文霆. 喷头水量分布仿真及组合优化软件系统研究[J]. 节水灌溉, 2010(1): 42 ~ 46.
Lao Dongqing, Han Wenting. Research on software for sprinkler water distribution dynamic simulation and spacing optimization [J]. Water Saving Irrigation, 2010(1): 42 ~ 46. (in Chinese)
- 9 韩文霆. 喷灌均匀系数的三次样条两次插值计算方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 134 ~ 139.
Han Wenting. Calculation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines and linear lines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2008, 39(10): 134 ~ 139. (in Chinese)
- 10 黄修桥,廖永诚,刘新民. 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.
Huang Xiuqiao, Liao Yongcheng, Liu Xinmin. The compound uniformity of sprinkler irrigation system under wind condition: a study on its calculation theories and methods [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1995, 14(1): 12 ~ 18. (in Chinese)
- 11 张志宇. 喷头水量分布的智能仿真与组合间距的优化[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
Zhang Zhiyu. Intelligent simulation of drip's distribution and optimization of combined space between on sprinkler head [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2006. (in Chinese)
- 12 Lorenzini G. Simplified modelling of sprinkler droplet dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(1): 1 ~ 11.
- 13 Kincaid D C, Longley T S. A water droplet evaporation and temperature model[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 457 ~ 463.
- 14 刘海军,龚时宏. 喷灌水滴的蒸发研究[J]. 节水灌溉, 2000(2): 16 ~ 19.
Liu Haijun, Gong Shihong. Study on evaporation of sprinkler droplets [J]. Water Saving Irrigation, 2000(2): 16 ~ 19. (in Chinese)
- 15 Yan H J, Bai G, He J Q, et al. Model of droplet dynamics and evaporation for sprinkler irrigation[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 440 ~ 447.
- 16 Bautista Capetillo C F, Salvador R, Burguete J, et al. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(5): 1 493 ~ 1 504.
- 17 李小平,罗金耀. 单喷头水量分布的三角形组合均匀度叠加计算[J]. 水利学报, 2005, 36(2): 238 ~ 242.
Li Xiaoping, Luo Jinyao. Overlapping computation for water distribution uniformity of triangular combination by using water distribution data of single sprinkler[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(2): 238 ~ 242. (in Chinese)
- 18 韩文霆,崔利华,吴普特,等. 正三角形组合喷灌均匀度计算方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 99 ~ 107.
Han Wenting, Cui Lihua, Wu Pute, et al. Calculation methods for irrigation uniformity with sprinklers spaced in regular triangle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2013, 44(4): 99 ~ 107. (in Chinese)
- 19 魏洋洋,袁寿其,李红,等. 异形喷嘴变量喷头水力性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 70 ~ 74.
Wei Yangyang, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Hydraulic performance experiment of the variable-rate sprinkler with non-circle nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2011, 42(7): 70 ~ 74. (in Chinese)