

# 喷洒水滴直径面粉测定法改进<sup>\*</sup>

白 更 严海军 王 敏

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 面粉法是一种应用广泛的水滴直径测定方法。以往水滴率定时只考虑干面粉团质量与水滴直径的关系,而忽略水滴打击角度和打击速度对水滴直径的影响。通过正交试验设计进行了喷洒水滴直径、打击角度和打击速度对干面粉团质量影响的试验研究。显著性分析结果表明:水滴直径和打击角度对干面粉团质量的影响非常显著,而水滴打击速度对其影响较小。建立了考虑水滴直径和打击角度双因素共同作用的改进率定公式。与传统率定公式相比,改进的率定公式具有较高精度。结合水滴运动蒸发模型,提出了应用改进的率定公式测定喷洒水滴直径的基本方法。

**关键词:** 喷灌 水滴直径 面粉法 率定公式 回归分析

中图分类号: S275.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0076-05

## Measuring Sprinkler Droplet Size with Modified Flour Methodology

Bai Geng Yan Haijun Wang Min

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

### Abstract

Flour method is extensively used in the sprinkler droplet size measurement. The traditional calibration equation only considered the relationship between dried pellet mass and droplet diameter. The effects of droplet diameter, droplet impact angle and impact velocity on dried pellet mass were discussed through the orthogonal test. The results showed that droplet size and impact angle had significant influences on dried pellet mass while droplet impact velocity had little influence. A modified calibration equation considering two factors of droplet size and impact angle was established. The modified calibration equation had high calculation accuracy compared with the traditional one. The method of measuring sprinkler droplet using the modified calibration equation was presented with the application of the droplet dynamics-evaporation model.

**Key words** Irrigation, Droplet size, Flour method, Calibration equation, Regression analysis

### 引言

喷洒水滴直径是评价喷灌工程质量的重要指标之一。小直径水滴在有风条件下易产生蒸发漂移,降低灌溉水利用系数和喷洒均匀系数;而大直径水滴会伤害作物,降低土壤入渗性能,加剧地表径流等。因此,在喷头开发和喷灌工程设计时需要准确测定喷洒水滴直径。目前,喷洒水滴直径的测定方法有面粉法<sup>[1-8]</sup>、滤纸法<sup>[9-13]</sup>、光学法<sup>[14]</sup>、照相

法<sup>[15]</sup>和浸入法<sup>[16]</sup>等,各种方法的适用范围、测定成本及测定精度等相差较大。其中,面粉法因具有较高测定精度和较低成本而被广泛应用。建立高精度的水滴直径率定公式是提高面粉法测定精度的关键步骤。喷头喷洒水滴与面粉接触时具有一定的打击角度和速度,不同打击角度和速度会对面粉团形成和干面粉团质量产生影响,但以往的率定公式只考虑水滴直径和干面粉团质量之间的关系<sup>[1-8]</sup>,而忽略了打击角度和速度的影响。因此,本文在喷洒水

收稿日期: 2010-07-30 修回日期: 2010-09-14

<sup>\*</sup> “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAD4B03)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009-2-12,2009-1-92)

作者简介: 白更,硕士生,主要从事节水灌溉装备研究,E-mail: baigeng001@yahoo.com.cn

通讯作者: 严海军,副教授,博士,主要从事节水灌溉装备研究,E-mail: yanhj@cau.edu.cn

滴直径面粉法测定的传统率定基础上,研究水滴打击角度和速度对干面粉团质量的影响,建立面粉法改进率定公式。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验中使用新鲜精细面粉,面粉承盘由 0.5 mm 厚的薄铁皮制成,承盘口直径 21 cm,盘高 2 cm。为生成不同直径水滴,试验使用微升注射器和一次性注射器。假设水滴为圆球形,根据生成的水滴体积或者质量换算出对应的水滴直径。微升注射器规格为 0.5 ~ 10  $\mu\text{L}$  和 20 ~ 100  $\mu\text{L}$ ,可以精确生成喷洒水滴直径,如表 1 所示。由于水滴的表面张力和流体粘性力等作用,用微升注射器生成小直径水滴较困难,当生成小于 1.83 mm 的水滴时其针头开始出现面粉倒吸现象,因此微升注射器生成的最小水滴直径是 1.83 mm。试验还使用了 5 种不同规格的一次性注射器,受一次性注射器针头直径限制,所生成的水滴直径覆盖范围较窄。生成的 100 滴水质量(重复不少于 3 次)与其对应的水滴直径如表 2 所示。

表 1 微升注射器容积与对应水滴直径

Tab. 1 Microliter-syringe volumes and corresponding droplet diameters

微升注射器容积/ $\mu\text{L}$	3.2	10	20	35	55	82	115
水滴直径/mm	1.83	2.67	3.37	4.06	4.72	5.39	6.03

表 2 一次性注射器的水滴质量与对应水滴直径

Tab. 2 Droplet weights by disposable-syringe and corresponding droplet diameters

针头编号	1	2	3	4	5
100 滴水质量/g	1.92	1.34	0.95	0.77	0.56
水滴直径/mm	3.32	2.95	2.63	2.45	2.21

试验过程中面粉干燥采用 101-3AB 型电热鼓风干燥箱,用标准筛筛选不同级别干面粉团,干面粉团称量采用万分之一精度电子秤。

### 1.2 试验方法

#### (1) 传统率定公式

首先将面粉承盘装满新鲜面粉,并仔细刮平;传统率定公式不考虑水滴打击角度和速度,用微升注射器针头紧贴面粉承盘,将挤滴出的 20 ~ 30 滴相同直径水滴均匀散布在面粉承盘上,避免水滴重叠;然后将面粉承盘放入 38 $^{\circ}\text{C}$  的恒温干燥箱中干燥 24 h;最后采用标准筛筛选出干面粉团,用电子秤称出一定数目干面粉团的总质量(面粉团数目不少于 20 个),换算可得单个干面粉团的平均质量,从而建

立单个干面粉团质量与水滴直径之间的率定公式。

#### (2) 改进率定公式

水滴接触面粉时打击角度和速度与水滴直径、喷头结构及仰角、喷嘴工作压力、风速风向等因素有关,绝大部分水滴与地表面接触的打击角度(水滴运动方向与水平线的夹角)在 50 $^{\circ}$  ~ 90 $^{\circ}$  之间、打击速度在 2 ~ 7 m/s 之间<sup>[14]</sup>。为模拟不同打击角度,将试验面粉承盘放置在倾角为 0 $^{\circ}$ 、10 $^{\circ}$ 、20 $^{\circ}$ 、30 $^{\circ}$  和 40 $^{\circ}$  的 5 个薄木板上。为生成不同打击速度,水滴分别从 0.2、0.6、1.2、1.8 和 2.4 m 高度自由落下,水滴运动终端相应的打击速度如表 3 所示。

表 3 水滴下落高度与对应水滴打击速度

Tab. 3 Droplet falling heights and corresponding droplet impact velocities

水滴下落高度/m	0.2	0.6	1.2	1.8	2.4
水滴打击速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.98	3.43	4.85	5.94	6.86

为了探讨水滴直径、水滴打击角度和水滴打击速度对干面粉团质量的影响,本文设计了三因素五水平的正交试验,选择  $L_{25}(5^3)$  正交表,相应试验因素与水平如表 4 所示。

表 4 试验因素水平

Tab. 4 Factors and levels of orthogonal test

水平	水滴直径 A/mm	打击角度 B/ $^{\circ}$	打击速度 C/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	2.21	90	6.86
2	2.45	80	5.94
3	2.63	70	4.85
4	2.95	60	3.43
5	3.32	50	1.98

## 2 结果与分析

### 2.1 传统率定公式建立

使用微升注射器得到的水滴直径与干面粉团质量之间的关系如图 1 所示,采用幂函数回归得到的

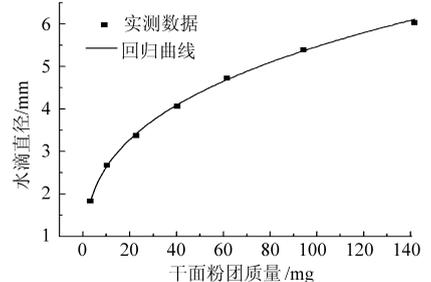


图 1 传统率定公式的水滴直径与干面粉团质量之间关系

Fig. 1 Relationship between droplet diameter and dried pellet mass for traditional calibration equation

传统率定公式为

$$d = 1.27m^{0.317} \quad (R^2 = 0.99) \quad (1)$$

式中  $d$ ——水滴直径, mm

$m$ ——干面粉团质量, mg

本文建立的传统率定公式(1)与其他学者提出公式基本接近(表5),由此验证了本文试验准确性。但因试验新鲜面粉的密实度、干燥度等因素的影响,表5给出的各公式回归系数略有差异。

表5 本文传统率定公式与其他公式比较

Tab.5 Comparison of the established traditional calibration equation in this study and other equations

传统率定公式	公式出处
$d = 1.27m^{0.317} \quad (R^2 = 0.99)$	本文
$d = 1.14m^{0.361} \quad (R^2 = 0.99)$	文献[5]
$d = 1.27m^{0.324}$	文献[7]
$d = 1.26m^{0.336}$	文献[8]

## 2.2 改进率定公式

### (1) 试验因素对干面粉团质量的影响

表6给出了不同水滴直径、打击角度和打击速度时的干面粉团质量,其中干面粉团质量为相同级别干面粉团质量的平均值。同时对试验结果进行方差分析和显著性检验(按  $F_{0.01}$  检验),结果如表7所示。

由表7的  $F$  值可知:①水滴直径对干面粉团质量的影响非常显著。干面粉团质量随水滴直径的增大而增加。水滴直径越大,面粉吸水越多,形成的面粉团体积越大,其相应的干面粉团质量也越大。②水滴打击角度对干面粉团质量的影响也很显著。干面粉团质量随着水滴打击角度的减小而减小,这是因为水滴打击面粉会破碎形成大量不同直径的碎裂水滴,部分碎裂水滴发生飞溅后再次与面粉接触,形成更小的独立面粉团,最终使主干面粉团质量减小,而且随着水滴打击角度减小,这种趋势更为明

显。③水滴打击速度对干面粉团质量的影响并不显著,原因可能是水滴与面粉接触后的扩散体积变化不大。

表6 正交试验结果

Tab.6 Results of orthogonal test

试验序号	水滴直径 $A$	打击角度 $B$	打击速度 $C$	干面粉团质量 $Y$ /mg
1	1	1	1	4.97
2	1	2	2	4.37
3	1	3	3	4.20
4	1	4	4	4.00
5	1	5	5	3.50
6	2	1	2	6.92
7	2	2	3	5.98
8	2	3	4	5.50
9	2	4	5	4.97
10	2	5	1	4.60
11	3	1	3	8.70
12	3	2	4	8.50
13	3	3	5	8.10
14	3	4	1	6.40
15	3	5	2	5.80
16	4	1	4	12.38
17	4	2	5	10.51
18	4	3	1	10.10
19	4	4	2	9.75
20	4	5	3	8.59
21	5	1	5	16.03
22	5	2	1	15.25
23	5	3	2	14.89
24	5	4	3	14.05
25	5	5	4	13.25

表7 方差分析和显著性检验结果

Tab.7 Results of variance analysis and significance test

差异源	离差平方和	自由度	均方	$F$ 值	$F_{0.05}(4,12)$	$F_{0.01}(4,12)$	显著性
水滴直径 $A$	346.696	4	86.674	498.019	3.259	5.412	非常显著
打击角度 $B$	20.658	4	5.164	29.675			非常显著
打击速度 $C$	0.862	4	0.216	1.239			不显著
误差 $e$	2.088	12	0.174				
总和	370.304	24					

### (2) 改进率定公式建立

由表7的显著性分析结果可知,水滴直径受干面粉团质量和水滴打击角度影响较大,因此率定公式中需要考虑水滴打击角度。根据表6的试验数据

可以建立水滴直径与干面粉团质量和水滴打击角度之间的幂函数回归模型

$$d = 3.013m^{0.318}\theta^{-0.180} \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

式中  $\theta$ ——打击角度, ( $^{\circ}$ )

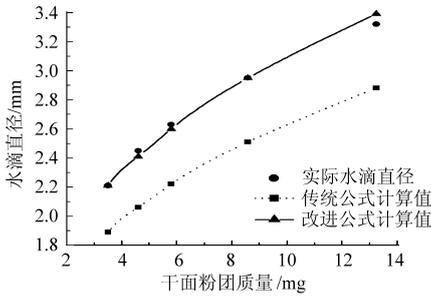


图2 打击角度为50°时两种率定公式  
计算水滴直径和实际值比较

Fig.2 Comparison between calculated droplet diameters by traditional and modified calibration equation in this study and the real droplet diameters when the droplet impact angle is 50°

与传统率定公式(1)相比,建立的改进率定公式(2)考虑了水滴打击角度,能提供较高的测定精度。图2给出了水滴打击角度为50°时两种率定公式的比较结果。可以清楚看出,应用率定公式(2)求得的水滴直径与实际水滴直径非常接近,而式(1)计算的水滴直径小于实际水滴直径。

表8给出了不同打击角度下两种率定公式的比较分析结果。可以看出,由式(2)计算的水滴直径和实际水滴直径之间的相对误差较小,所有工况下两者的平均相对误差为1.33%;式(1)计算的水滴直径随着水滴打击角度的减小,和实际水滴直径的相对误差有增大的趋势,其平均相对误差为9.89%。由此可见,改进率定公式可以明显提高水滴直径的测定精度。

### 2.3 改进率定公式应用

通过水滴运动蒸发模型<sup>[17]</sup>可以求出喷头喷洒水滴打击角度,然后将其代入改进率定公式计算水滴直径,详细步骤如下:

(1) 将干燥后求得的某级别干面粉团质量代入传统率定公式(1),得到水滴直径初始值。

(2) 将水滴直径初始值代入水滴运动蒸发模型,求解出水滴与面粉接触时的打击角度。

(3) 将干面粉团质量和水滴打击角度代入改进率定公式(2),得到相应的水滴直径修正值。

(4) 如果水滴直径初始值和修正值之差的绝对值满足判断标准,即小于0.01 mm时,则该水滴直径修正值为试验得到的最终水滴直径;否则将该水滴直径修正值作为初始值再次代入水滴运动蒸发模型进行迭代计算,直至符合判断标准。

## 3 结论

(1) 面粉法测定水滴直径时水滴直径和打击角

表8 不同试验工况下两种水滴率定公式的比较  
Tab.8 Comparison between calculated droplet diameters by traditional and modified calibration equations in this study and the real droplet diameters under all experimental conditions

试验 序号	实际水滴 直径/mm	传统率定公式		改进率定公式	
		计算值 /mm	相对 误差/%	计算值 /mm	相对 误差/%
1	2.21	1.63	4.47	2.23	0.99
2	2.21	1.63	8.28	2.19	0.98
3	2.21	1.63	9.43	2.21	0.16
4	2.21	1.63	10.82	2.24	1.39
5	2.21	1.63	14.52	2.22	0.42
6	2.45	1.69	4.29	2.48	1.21
7	2.45	1.69	8.62	2.42	1.31
8	2.45	1.69	11.01	2.41	1.56
9	2.45	1.69	13.82	2.40	2.00
10	2.45	1.69	15.91	2.42	1.20
11	2.63	1.73	4.13	2.67	1.40
12	2.63	1.73	4.84	2.70	2.81
13	2.63	1.73	6.28	2.73	3.71
14	2.63	1.73	13.02	2.60	1.07
15	2.63	1.73	15.69	2.61	0.92
16	2.95	1.79	4.42	2.98	1.13
17	2.95	1.79	9.25	2.89	1.94
18	2.95	1.79	10.39	2.93	0.82
19	2.95	1.79	11.39	2.97	0.84
20	2.95	1.79	14.87	2.95	0.09
21	3.32	1.86	7.82	3.24	2.44
22	3.32	1.86	9.27	3.26	1.92
23	3.32	1.86	9.95	3.31	0.29
24	3.32	1.86	11.59	3.34	0.64
25	3.32	1.86	13.22	3.39	2.07

度对干面粉团质量均有非常显著的影响,其中水滴直径的显著程度要高于水滴打击角度,而水滴打击速度对干面粉团质量的影响并不明显。

(2) 建立了同时考虑干面粉团质量和水滴打击角度的水滴直径改进率定公式:  $d = 3.013m^{0.318} \cdot \theta^{-0.180}$  ( $R^2 = 0.99$ ),应用改进和传统率定公式得到的水滴直径计算值和实际水滴直径的平均相对误差分别为1.33%和9.89%,表明改进率定公式的计算精度较高。

(3) 结合喷洒水滴运动蒸发模型,给出了应用改进率定公式测定喷洒水滴直径的基本方法。

## 参 考 文 献

- 1 Laws J O, Parsons D A. The relation of raindrop size to intensity [C]. Transactions of American Geophysical Union, 24th Annual Meeting, 1943: 452 ~ 460.
- 2 Kohl R A. Drop size distribution from a medium sized agricultural sprinkler [J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17 (5): 690 ~ 693.
- 3 Kohl R A, DeBoer D W. Drop size distributions for a low pressure spray type agricultural sprinkler [C]. ASAE Paper 83-2019, 1983.
- 4 李久生. 喷洒水滴直径测试方法的研究 [J]. 排灌机械, 1993, 11(2): 45 ~ 47.
- 5 Li J, Kawano H, Yu K. Droplet size distributions from different shaped sprinkler nozzles [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37 (6): 1 871 ~ 1 878.
- 6 DeBoer D W, Monnens M J, Kincaid D C. Measurement of sprinkler droplet size [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 11 ~ 15.
- 7 Chen D, Wallender W W. Droplet size distribution and water application with low-pressure sprinklers [J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(2): 511 ~ 516.
- 8 Hills D J, Gu Y P. Sprinkler volume mean droplet diameter as a function of pressure [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 471 ~ 476.
- 9 Hall M J. Use of the stain method in determining the drop size distribution of coarse liquid sprays [J]. Transactions of the ASAE, 1970, 13(1): 33 ~ 37.
- 10 Solomon K H, Kincaid D C, Bezdek J C. Drop size distributions for irrigation spray nozzles [J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(6): 1 966 ~ 1 974.
- 11 李红, 任志远, 汤跃, 等. 喷头喷洒雨滴粒径测试的改进研究 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 50 ~ 53.  
Li Hong, Ren Zhiyuan, Tang Yue, et al. Measurement and amelioration of the test to raindrop size of sprinklers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 50 ~ 53. (in Chinese)
- 12 陈振宇, 叶全民, 赵美香, 等. 喷雾雾滴滤纸率定法研究初探 [J]. 山西农业大学学报, 1996, 16(4): 422 ~ 425.  
Chen Zhenyu, Ye Quanmin, Zhao Meixiang, et al. The elementary study of spraying droplets with filter paper ratio-assured methods [J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 1996, 16(4): 422 ~ 425. (in Chinese)
- 13 徐向舟, 张红武, 朱明东. 雨滴粒径的测量方法及其改进研究 [J]. 中国水土保持, 2004, 25(2): 22 ~ 25.  
Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu, Zhu Mingdong. Study on measuring method of particle size of raindrop and its improvement [J]. Soil and Water Conservation in China, 2004, 25(2): 22 ~ 25. (in Chinese)
- 14 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.
- 15 Salvador R, Bautista-Capetillo C F, Burguete J, et al. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers [J]. Irrigation Science, 2009, 27(4): 307 ~ 317.
- 16 Eigel J D, Moore I D. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(4): 1 079 ~ 1 084.
- 17 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.