

正三角形组合喷灌均匀度计算方法*

韩文霆¹ 崔利华¹ 吴普特² 罗晓宁³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学经济管理学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 喷灌均匀度是衡量喷头水力性能和喷灌质量的重要指标,为研究雨量筒取样间距、计算网格点间距以及插值方法对喷灌均匀度计算结果的影响规律,利用雨量筒径向间隔为 1 m 和 2 m 的 Nelson R33 型喷头无风喷洒试验数据,取 1 m 和 0.5 m 的计算网格点间距,采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法、距离插值法和平面插值法计算了克里斯琴森均匀度。结果表明,采样间隔 1 m 比 2 m 计算出的均匀度小 1.3 ~ 3.4 个百分点;计算网格点间距越小,喷头组合均匀度越大,但相差都小于 1.2 个百分点。采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法,喷灌组合均匀度计算结果非常接近,但平面插值法计算结果的差异较大。均匀度影响因素正交试验的方差分析结果表明,雨量筒采样间距、计算网格点间距、插值方法对均匀度的影响依次降低。

关键词: 喷灌 均匀度 插值 水量分布 喷头组合

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0099-09

Calculation Methods for Irrigation Uniformity with Sprinklers
Spaced in Regular Triangle

Han Wenting¹ Cui Lihua¹ Wu Pute² Luo Xiaoning³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Uniformity coefficient of sprinkler irrigation is an important indicator for measuring hydraulic performance and irrigation quality of sprinkle irrigation system. In order to investigate the influence of the catch-can space, grid space and interpolation methods on the christiansen uniformity (C_u), C_u was computed by linear interpolation, cubic interpolation, cubic spline twice interpolation, inverse distance weighting method and plane interpolation method with 1 m and 2 m sampling spaces, and 1 m and 0.5 m grid spaces. The experiment was preceded indoor with no wind for the single sprinkler Nelson R33. The data here used to compute the C_u were measured in catch cans along one radial leg from the sprinkler position. The results showed that C_u computed from 2 m space catch-can data were less than that from 1 m space catch-can data by 1.3% ~ 3.4%. Smaller the grid space was, greater the C_u was, with deviations all less than 1.2%. The C_u calculation results by linear interpolation, cubic interpolation, cubic spline twice interpolation and inverse distance weighting method were very close to each other. However, C_u showed great difference when using the plane interpolation method with the other methods. The orthogonal test of variance analysis method was used to analyze the factors which influence the result of the C_u . The results showed that the influence of catch-can space, grid space and interpolation method on C_u was less and less in turn.

Key words: Sprinkler irrigation Uniformity Interpolation Water distribution Sprinkler space

收稿日期: 2012-10-08 修回日期: 2012-12-10

* 国家自然科学基金资助项目(51079140)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)和高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007)

作者简介: 韩文霆,副教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术与装备研究,E-mail: hanwt2000@126.com

通讯作者: 吴普特,研究员,博士生导师,主要从事节水农业技术研究,E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

引言

喷灌是最常用的农业灌溉方式之一,早在 1942 年喷灌均匀度的重要性已经被确认,从 1942 年克里斯琴森最早提出用克里斯琴森均匀度来表示喷灌均匀度以来,许多学者对影响喷灌均匀度的因素进行了研究^[1-2]。

获取喷灌水量分布数据是计算和分析喷灌均匀性的基础和前提条件,雨量筒测量法是获取水量分布数据最常用的方法^[3]。雨量筒获取的数据结果直接决定喷灌均匀性的计算结果,因此雨量筒获取的数据应提供测量点可靠的降水信息,而雨量筒开口大小和雨量筒开口与喷头安装的高度差对获取测量点数据的可靠性有着重要影响^[4-5]。

影响喷灌均匀度的其他因素还有风速、风向、喷头结构、旋转速度的均匀性,以及喷嘴大小、喷嘴压力、喷头组合形式和喷头组合间距、竖管高度和地形等^[6-13]。喻黎明等以美国雨鸟 30PSH 型喷头为例,用正交方法分析了喷头的组合系数、工作压力、布置形式对喷灌均匀度影响的强弱顺序^[14]。Zhang 等研究了大田喷灌中,各处喷头不同工作压力情况下,喷灌均匀度的计算评价方法^[15]。

获取单喷头水量分布数据后,需要通过相应的计算得到喷灌组合均匀度,多喷头组合喷洒的水量分布可以通过对单喷头水量分布的实测数据进行插值和叠加求得^[16-17]。韩启彪等认为目前均匀度测算精度受单喷头水量分布的简化计算影响,其精度需要继续提高,离真正意义的推广使用尚有一定距离^[18]。

由单喷头水量分布数据计算多喷头组合的均匀度,采用不同的计算方法会得到不同结果^[19]。本文使用 Sprinkler3D 和 SIUEW1.0 两个喷灌均匀性分析软件,采用不同均匀度计算方法,计算喷头正三角形组合方式下不同组合间距的均匀度,研究不同的计算方法对计算结果的影响规律^[20-21]。

1 材料与方法

1.1 喷头喷洒试验系统

喷头喷洒试验系统包括不锈钢储水槽、离心泵、电动机、输水管、阀门、压力传感器、流量计、喷头和雨量筒等,试验程序和方法参照《美国农业工程师学会喷灌分布测试标准》^[22]。试验选用的 Nelson R33 为旋转喷头,喷嘴形状为圆形,喷嘴直径为 4.4 mm,喷头工作压力为 0.35 MPa。在室内无风条件下,喷头喷嘴高度在雨量筒开口上方 0.46 m 处,即喷头的安装高度按照厂家推荐的高度进行安装,

雨量筒开口直径为 19 cm,高度为 23 cm。试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院喷灌水力学测试大厅(长 80 m,宽 30 m)内进行,室内无风。由于试验是在无风条件下进行的,各个方向的降雨深可以认为基本相同,所以可用一条辐射线的数据代替其他方向辐射线的数据,这样可以减少试验工作量^[23]。雨量筒以喷头所在位置为中心径向布置,第一个雨量筒的中心距离喷头 0.1 m,其余雨量筒中心间距为 1 m,距离喷头分别为 1、2、…、16 m,一条辐射线上共放置 17 个雨量筒,延伸到喷头喷射半径之外,如图 1 所示^[24]。

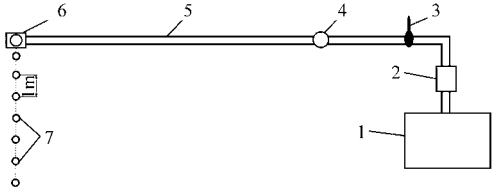


图 1 喷灌试验设备布置示意图
Fig. 1 Sprinkler test equipment layout

1. 储水槽 2. 离心泵 3. 阀门 4. 压力表 5. 输水管 6. 喷头
7. 雨量筒

1.2 均匀度计算方法

选用克里斯琴森均匀度计算喷头组合均匀度^[1],计算公式为

$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}|}{\sum_{i=1}^n h_i} \right) \times 100\% \tag{1}$$

- 式中 C_u ——克里斯琴森均匀度
 h_i ——第 i 个测点的降水深,mm
 $\bar{h}$ ——喷洒面积上各测点平均降水深,mm
 n ——测点数目

对于径向布置的雨量筒喷洒试验,需用不同计算方法将实测径向降水深数据转换为网格点的降水深,然后计算 C_u 。一般是根据喷头不同的组合方式和组合间距,通过二维插值,将单喷头圆形喷洒域的水量分布试验数据转换为多喷头组合的网格型数据,然后按照均匀度的计算方法求得多喷头组合均匀度。常用的二维插值方法包括距离插值法、平面插值法和两次插值法,其中两次插值法又有线性插值法、立方插值法和三次样条插值法^[23-24]。

1.2.1 距离插值法

距离插值法又称作反距离加权法,其插值原理如图 2 所示。假设 A 点为某 2 条相邻射线(L_i, L_{i+1})之间任意一个网格点,则 A 点的降水深决定于这两条射线上与 A 点最邻近的 4 个测点的降水深,并且不同点由于距 A 点的距离不同,对 A 点的影响也不

同^[21]。距 A 点越近,对其值影响越大,即权重越大;距 A 点越远,对其值影响越小,即权重越小。

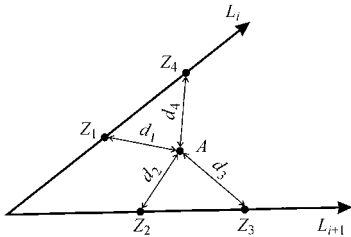


图 2 距离插值方法示意图

Fig. 2 Inverse distance weighting method

1.2.2 两次插值法

两次插值法分两步进行插值,从而计算喷灌区域内任意一点 P 的降水深。如图 3 所示,首先通过径向插值分别计算出各辐射线上与网格点 P 与喷头相同距离处 A_i 的降水深 D_i ($i = 1, 2, \cdots, 6$),再利用同一圆周上的数据采用与径向插值方法相同的插值方法计算出所求网格点 P 的降水深 D_p 。两次插值过程中,每次插值可以用线性插值、立方插值和三次样条插值(图 4)。

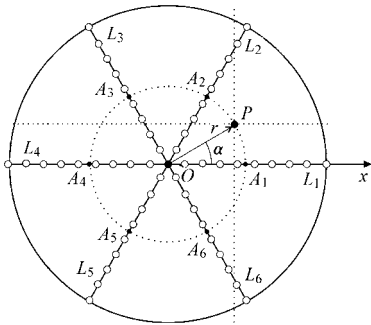


图 3 两次插值方法示意图

Fig. 3 Twice interpolation method

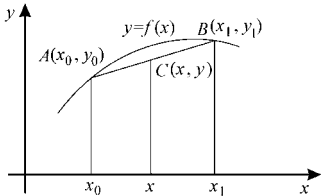


图 4 线性插值、立方插值及三次样条插值示意图

Fig. 4 Linear interpolation, cubic interpolation and cubic spline twice interpolation method

线性插值法是指在插值区间 $[x_0, x_1]$ 内,以线性函数为插值函数,利用 A 、 B 两点的值插值计算 C 点的值。

立方插值是指在插值区间 $[x_0, x_1]$ 内,以三次多项式函数为插值函数。在插值区间内满足插值公式 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 。

三次样条插值是指通过一系列形值点的一条光滑曲线,在插值区间内满足插值公式,最高次幂不高于三次的样条函数。

1.2.3 平面插值法

除距离插值和两次插值法外,黄修桥等提出了平面插值法。平面插值法也称作空间平面内插法,是将地面上三点的特征量(喷洒水深)作为铅直坐标处理,并且假定在以地面 3 个点 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$ 为顶点所组成的 $\triangle ABC$ 内的任一点 $D(x, y)$ 的特征量均在由 A 、 B 、 C 对应的三个空间点 $a(x_1, y_1, z_1)$ 、 $b(x_2, y_2, z_2)$ 、 $c(x_3, y_3, z_3)$ 所组成的空间平面内(图 5)^[23]。由立体解析几何原理可知,空间三点(不在同一直线)构成唯一的空间平面,只要知道 $\triangle ABC$ 内所求点 D 的地面坐标,就可通过平面方程求出该点的特征量 z 。

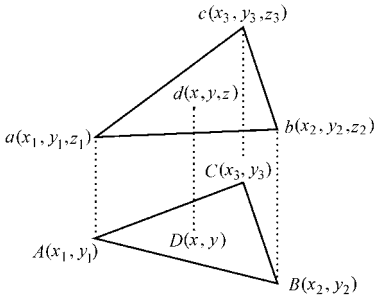


图 5 平面插值方法示意图

Fig. 5 Plane interpolation method

以上的计算方法在喷灌均匀度计算软件 Sprink3D 和 SIUEW1.0 中都有计算程序。输入喷头喷洒试验的雨量筒数据,选用不同计算方法,即可输出均匀度计算结果。

1.3 计算方法的正交分析法

1.3.1 正交表的选用

对于给定的喷头和上述无风喷洒试验条件,影响均匀度计算结果的因素主要有插值方法、雨量筒采样间距和计算网格点间距。本文正交分析的插值方法有 4 种(四水平),雨量筒采样间距有 2 种(二水平),计算网格点间距有 2 种(二水平),如表 1 所示^[25]。因涉及因素和水平数较多,若采用两两对比分析三因素对计算结果的影响,分析过程较复杂,对比次数较多,为简化分析,采用正交分析法,选用

表 1 均匀度计算结果影响因素正交分析组合

Tab.1 Orthogonal experiment combination analysis for influencing factors of uniformity coefficient calculation

因素	水平			
	1	2	3	4
插值方法 A	两次插值法(线性插值)	两次插值法(立方插值)	两次插值法(三次样条插值法)	距离插值法
雨量筒采样间距 B/m	1.0	2.0		
计算网格点间距 C/m	1.0	0.5		

$L_8(4 \times 2^4)$ 的正交表进行分析。

1.3.2 方差分析

采用方差分析法来研究各种方法对均匀度计算结果的影响程度,计算步骤如下:

(1) 总体偏差的平方和 S

$$S = \sum_{i=1}^N U_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N U_i \right)^2 \tag{2}$$

式中 U_i ——组合均匀度计算结果

N ——试验号数(也称处理数目),此处为 8

(2) 误差偏差平方和 S_e

$$S_e = S_4 + S_5 \tag{3}$$

式中 S_4 ——第 4 列偏差平方和

S_5 ——第 5 列偏差平方和

(3) 列误差均方差 V_e

$$V_e = S_e / f_e \tag{4}$$

其中 $f_e = f_4 + f_5$

式中 f_e ——误差的自由度

f_4 ——第 4 列自由度

f_5 ——第 5 列自由度

(4) 列偏差平方和 S_j

$$S_j = \frac{b_j}{N} \sum_{k=1}^{b_j} y_{jk}^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N U_i \right)^2 \tag{5}$$

式中 b_j ——第 j 列的水平数

y_{jk} ——各试验因素列的各水平的均匀系数之和

k ——各试验因素列对应的不同水平序号

(5) 列偏差均方差 V_j

$$V_j = S_j / f_j \tag{6}$$

其中 $f_j = b_j - 1$

式中 f_j ——列自由度

(6) 各列偏差均方差和误差均方差的比值 F_j

$$F_j = V_j / V_e \tag{7}$$

根据 F_j 的大小可以判断各因素对均匀度计算结果的影响程度。

2 结果与讨论

2.1 单喷头水量分布

表 2 为 Nelson R33 单喷头喷洒试验中径向布置雨量筒的实测降水深数据。

表 2 Nelson R33 喷头在 0.35 MPa 工作压力下的降水深资料

Tab.2 Precipitation depth data of Nelson R33 sprinkler under 0.35 MPa of working pressure

距喷头距离/m	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
降水深/mm·h ⁻¹	2.55	1.93	2.17	2.17	2.41	2.60	2.74	2.74	2.89	3.18	2.98	2.50	2.02	1.64	1.35	0.39	0

2.2 喷灌组合均匀度

表 2 中第一个数据为距离喷头 0.1 m 处的降水深,为了计算方便,用该值近似代替喷头所在位置的降水深。将表 2 中的雨量筒实测降水深数据输入软件 Sprink3D 和 SIUEW1.0 中,分别利用采样间距为 1 m 和 2 m 的喷头试验数据,取 1 m 和 0.5 m 的计算网格点间距,采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法、距离插值法和平面插值法计算了克里斯琴森均匀度。由于篇幅所限,本文主要对比研究喷头正三角形组合(组合间距系数为 1.2)下计算方法对喷灌组合均匀度的影响程度。

2.2.1 插值方法

尽管雨量筒的采样间距和计算网格点间距相同,但插值方法不同,喷头组合均匀度的计算结果也不同。图 6 为采用不同的插值方法计算出的喷头组合均匀度。由图 6 可以看出,对于 Nelson R33 喷头,在喷头组合间距为 15 ~ 21 m(组合间距系数为 1.0 ~ 1.4)范围内,采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法,喷头组合均匀度的变化幅度较一致,采用平面插值法的喷头组合均匀度变化规律与其他几种方法的差异较为明显。

在相同的组合间距下,采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法,4 种喷头组合均匀度的计算结果差异较小,而与相同组合间距下采用平面插值法喷头组合均匀度的计算结果差异较大。其原因有可能是采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法计算插值点的降水深时,都利用了距离插值点最近的 4 个点的降水深,这 4 个数据对插值点的结果影响很大;而采用平面插值法计算插值点的降水深时,只采用了距离插值点最近 3 个点的的数据,没有运用另外 1 个点的的数据值。

随着喷头组合间距的增大,采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法计算的喷头组合均匀度逐渐减小;采用平面插值法计算时,当喷头组合间距从 15 ~ 19 m 变化时,喷头组合均匀度逐渐减小,当喷头组合间距达到 19 m 后,喷头组合均匀度逐渐增大,尤其是当采用 1 m 采样间距的数据进行计算时,组合间距为 21 m 时的组合均匀度大于组合间距为 15 m 时的组合均匀度,这与实际情况不太相符,因此可认为当喷头组合形式为正三角形时,不宜选用平面插值法计算喷头组合均匀度。

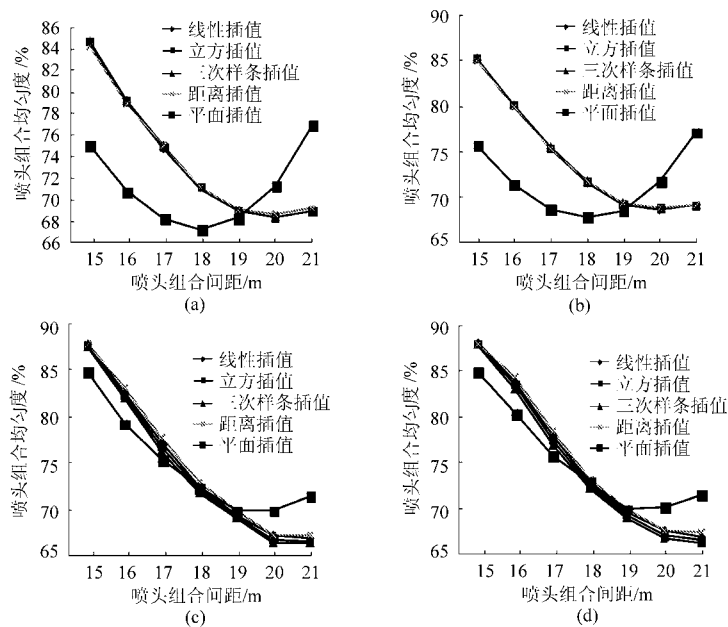


图 6 不同插值方法下喷头组合均匀度随组合间距的变化曲线

Fig. 6 Change rule of nozzle combination uniformity coefficient with change of combination spacing by different interpolation methods
(a) 1 m 采样间距, 1 m 计算网格 (b) 1 m 采样间距, 0.5 m 计算网格 (c) 2 m 采样间距, 1 m 计算网格 (d) 2 m 采样间距, 0.5 m 计算网格

2.2.2 采样间距

插值方法和计算网格点间距相同,但雨量筒的采样间距不同,喷头组合均匀度的计算结果也不同。雨量筒采样间距分为 1 m 和 2 m,喷头组合均匀度计算结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,对 Nelson R33 型喷头,采样间距 1 m 比 2 m 计算出的均匀度总体小 1.3 ~ 3.4 个百分点;组合间距在 15 ~ 19 m 范围内时,采样间距为 2 m 的喷头组合均匀度大于采样间距为 1 m 的喷头组合均匀度;在喷头组合间距在 19 ~ 21 m 范围内时,采样间距为 2 m 的喷头组合均匀度小于采样间距为 1 m 的喷头组合均匀度。对照图 6 可知,当采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法时,采用 1 m 采样间距与 2 m 采样间距对喷头组合均匀度计算结果和总体变化趋势没有明显影响;而对采用平面插值的计算结果有较显著的影响,而且采样间距 1 m 的计算结果与实际情况差异较大。因此在喷头组合均匀度的计算中,当采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法时,既可采用 1 m 采样间距的数据也可采用 2 m 采样间距的数据,为了减少计算工作量,建议选用 2 m 采样间距数据。

2.2.3 计算网格点间距

插值方法和雨量筒的采样间距相同,但计算网格点间距不同,喷头组合均匀度的计算结果也不同。计算网格点间距为 1 m 和 0.5 m,喷头组合均匀度计算结果如图 8 所示。由图 8 可以看到,对 Nelson R33 型喷头,在喷头组合间距为 15 ~ 21 m,计算网格点间距取 0.5 m 时的喷头组合均匀度大于计算网格

点间距为 1 m 的喷头组合均匀度,计算网格点间距 0.5 m 比 1 m 计算出的均匀度总体大 0.4 ~ 0.6 个百分点,即计算网格点间距越小,喷头组合均匀度越大。对照图 6 可知,采用 1 m 和 0.5 m 计算网格间距对喷头组合均匀度的计算结果和变化趋势没有显著影响,因此在喷头组合均匀度的计算中,可以采用 1 m 的计算网格,以减少计算工作量。

2.2.4 不同因素对组合均匀度的影响

喷头组合间距系数为 1.2 的正三角形组合下各影响因素的正交分析结果如表 3 所示。

在正交分析过程中,本文暂不考虑平面插值法,原因是通过 2.2.1 节分析知,采用平面插值法与其他几种插值法计算出的喷头组合均匀度差异都较大,若在正交分析中考虑平面插值法,会对正交分析的结果产生很大的影响,甚至会导致错误的正交分析结果。

由表 3 可知, $F_A = 0.556$, $F_B = 14.983$, $F_C = 3.139$, $F_B > F_C > F_A$; 所以可得以下结论:雨量筒采样间距、计算网格点间距和插值方法对组合均匀度的影响程度依次降低。

产生这种现象的原因分析如下:采样点的降水深是计算喷灌均匀度最初始的数据,它们直接决定着计算的结果,采样间距不同,用于计算喷灌均匀度的数据会不同,因此采样点间距对喷灌均匀度的计算结果影响很大;计算网格点的间距越小,用于计算的网格点的数量越多,网格点的数目对计算结果的影响也较大,即计算网格点间距对喷灌均匀度的结果影响较大;在计算过程中采用不同的插值方法,对

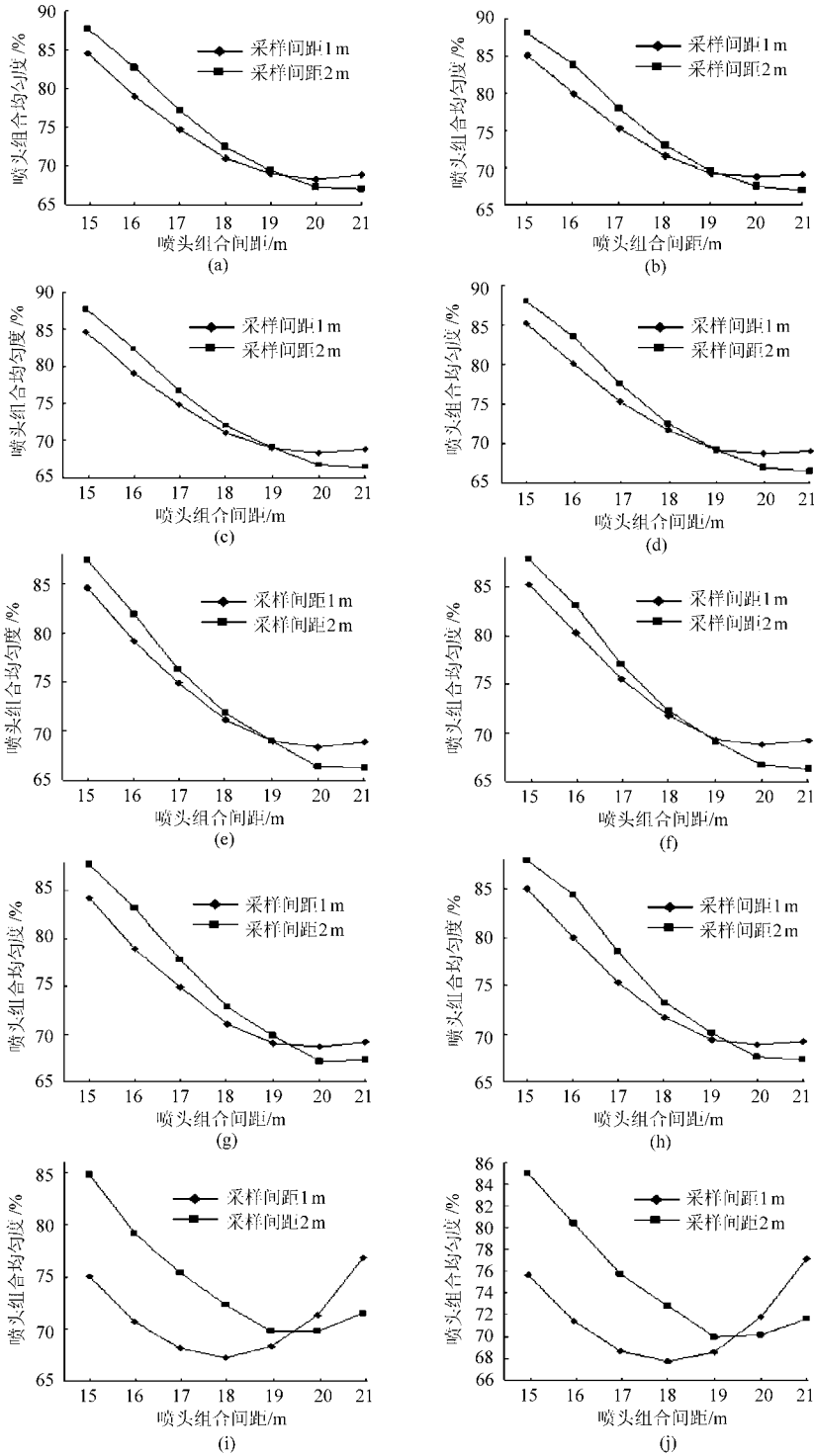


图 7 不同采样间距的喷头组合均匀度

Fig. 7 Sprinkler combination C_u with different sampling spacings

(a) 线性插值, 1 m 计算网格 (b) 线性插值, 0.5 m 计算网格 (c) 立方插值, 1 m 计算网格 (d) 立方插值, 0.5 m 计算网格 (e) 三次样条插值, 1 m 计算网格 (f) 三次样条插值, 0.5 m 计算网格 (g) 距离插值, 1 m 计算网格 (h) 距离插值, 0.5 m 计算网格 (i) 平面插值, 1 m 计算网格 (j) 平面插值, 0.5 m 计算网格

计算结果也有一定的影响。对于 Nelson R33 喷头的这种相对平直的径向水量分布曲线来说, 在不同插值方法下, 尤其是采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法, 喷头径向水量分布曲线变化很小, 因此对 Nelson R33 喷头来

说, 除平面插值法外, 其他插值方法对喷灌均匀度计算结果影响最小。

3 结论

(1) 对于单喷头水量分布曲线相对平直的

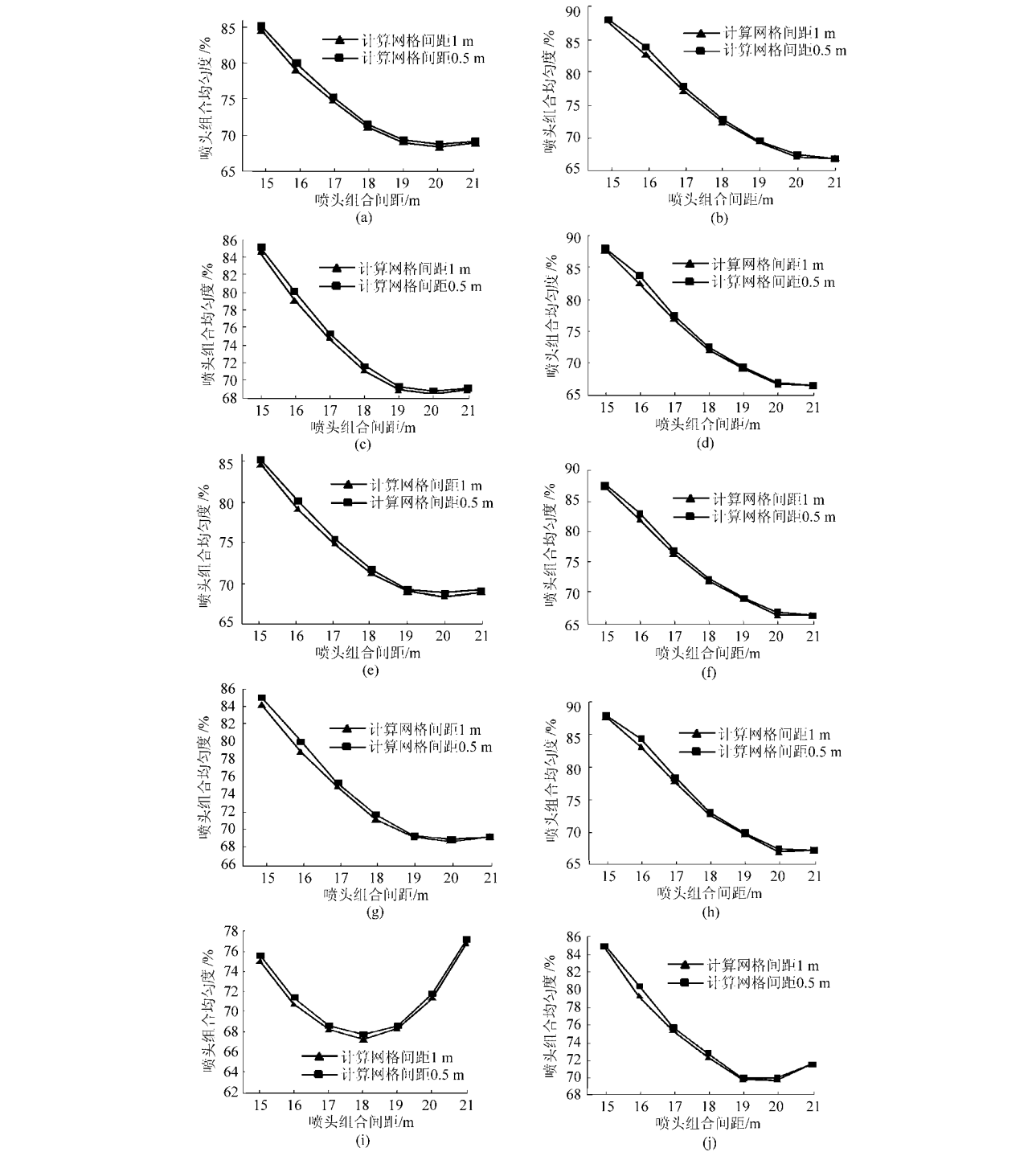


图 8 不同计算网格点间距的喷头组合均匀度

Fig. 8 Sprinkler combination C_u with different computational grid-point spacings

(a) 线性插值,1 m 采样间距 (b) 线性插值,2 m 采样间距 (c) 立方插值,1 m 采样间距 (d) 立方插值,2 m 采样间距 (e) 三次样条插值,1 m 采样间距 (f) 三次样条插值,2 m 采样间距 (g) 距离插值,1 m 采样间距 (h) 距离插值,2 m 采样间距 (i) 平面插值,1 m 采样间距 (j) 平面插值,2 m 采样间距

Nelson R33 喷头,喷头组合形式为正三角形,采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法计算喷灌组合均匀度,雨量筒布置间距为 1 m 和 2 m,计算网格点间距为 0.5 m 和 1 m 时,雨量筒采样间距、计算网格点间距和插值方法对组合均匀度的影响程度依次降低。

(2) 对于单喷头水量分布曲线相对平直的 Nelson R33 喷头,喷头组合形式为正三角形时,采用线性插值、立方插值、三次样条插值的两次插值法和距离插值法,喷头径向水量分布曲线形状非常接近,喷灌组合均匀度计算结果差异非常小,均匀度随组合间距的变化规律也相同。但采用平面插值法计算

表 3 正交分析结果
Tab.3 Result of orthogonal analysis

序号	因素					U_i	U_i^2
	插值方法 A	采样间距 B	计算网格点间距 C	空列	空列		
1	1	1	1	1	1	70.99	5 039.580
2	1	2	2	2	2	72.91	5 315.868
3	2	1	1	2	2	71.09	5 053.788
4	2	2	2	1	1	72.53	5 260.601
5	3	1	2	1	2	71.74	5 146.628
6	3	2	1	2	1	71.82	5 158.112
7	4	1	2	2	1	71.68	5 138.022
8	4	2	1	1	2	72.85	5 307.123
y_{j1}	143.9	285.5	286.75	288.11	287.02	$\sum_{i=1}^8 U_i = 575.61$ $\sum_{i=1}^8 U_i^2 = 41\,419.72$	
y_{j2}	143.62	290.11	288.86	287.5	288.59		
y_{j3}	143.56						
y_{j4}	144.53						
y_{j1}^2	20 707.2	81 510.3	82 225.56	83 007.37	82 380.48	$S = \sum_{i=1}^8 U_i^2 - \frac{1}{8} \left(\sum_{i=1}^8 U_i \right)^2 = 3.86$ $S_e = S_4 + S_5 = 0.356$ $f_e = f_4 + f_5 = 2$ $V_e = 0.178$	
y_{j2}^2	20 626.7	84 163.8	83 440.1	82 656.25	83 284.19		
y_{j3}^2	20 609.5						
y_{j4}^2	20 888.9						
S_j	0.295	2.657	0.557	0.047	0.309		
F_j	0.556	14.983	3.139				
V_j	0.098 9	2.657	0.557	0.047	0.308 7		

的结果与其他方法相比,不仅计算值相差较大,均匀度随组间距的变化规律也不太相同。

(3)计算网格点间距越小,喷头组合均匀度越大。采用 1 m 和 0.5 m 计算网格间距对喷头组合均

匀度的计算结果和变化趋势没有显著影响,因此在喷头组合均匀度的计算中,可以采用 1 m 的计算网格。

参 考 文 献

1 Christiansen J E. Irrigation by sprinkler[R]. California Agricultural Experimental Station, Sacramento, California, 1942:124.

2 韩文霆. 喷灌分布均匀系数研究[J]. 节水灌溉,2008(7):4~8.
Han Wenting. Research on distribution uniformity coefficient for sprinkler irrigation systems[J]. Water Saving Irrigation, 2008(7): 4~8. (in Chinese)

3 Merriam J L, Keller J. Farm irrigation system evaluation: a guide for management[M]. Logan: Utah State University, 1978.

4 Dogan E, Clark G A, Rogers D H, et al. Evaluation of collector size for the measurement of irrigation depths[C]//2003 ASAE Annual International Meeting, ASAE Paper 032007, 2003.

5 Halil Kirnak, Zeki Dogan. Effect of varying the distance of collectors below a sprinkler head and travel speed on measurements of mean water depth and uniformity for a linear move irrigation sprinkler system[J]. Biosystems Engineering, 2008,99(2):190~195.

6 Vories E D,Von Bernuth R D. Single nozzle sprinkler performance in wind [J]. Transactions of the ASAE, 1986,29(5):1 325~1 330.

7 Seginer I, Kantz D, Nir D, et al. Indoor measurement of single-radius sprinkler patterns [J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(2):523~533.

8 韩文霆,冯浩,吴普特,等. 摇臂式喷头非圆形喷洒域实现方法和途径[J]. 节水灌溉,2003(2):23~24.
Han Wenting, Feng Hao, Wu Pute, et al. Methods to achieve non-circular wetted area with impact sprinkler [J]. Water Saving Irrigation, 2003(2):23~24. (in Chinese)

9 Heermann D F, Hein P R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system [J]. Transactions of the ASAE, 1968,11(1):11~15.

10 韩文霆,Nguyen Van Lanh,徐琳. 摇臂式喷头内流道流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(8):58~64.
Han Wenting, Nguyen Van Lanh, Xu Lin. Investigations on internal flow characteristics of impact sprinkler based on numerical simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(8):58~64. (in Chinese)

11 韩文霆,吴普特,冯浩,等. 变量喷头实现均匀喷灌的研究[J]. 农业工程学报,2005,21(10):13~16.
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Theoretical study on variable-rate sprinklers for high uniformity precision irrigation [J]. Transactions of the CSAE,2005,21(10):13~16. (in Chinese)

12 Volker O B, Hart W E. Predicting field distribution of sprinkler systems[J]. Transactions of the ASAE,1968,11(5):801~803.

13 Evans R, Han G S, Kroeger M W. Spatial distribution and uniformity evaluations for chemigation with center pivots [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(1): 85 ~ 92.

14 喻黎明, 吴普特, 牛文全. 喷头组合间距、工作压力和布置形式对喷灌均匀系数的影响 [J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 154 ~ 157.
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan. Influence of the combination distance, work pressure and layout form of sprinkler head on uniformity coefficient in irrigation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 154 ~ 157. (in Chinese)

15 Zhang Lin, Gary P Merkley, Kasem Pinthong. Assessing whole-field sprinkler irrigation application uniformity [J]. Irrigation Science, 2011, doi:10. 1007/s00271-011-0294-0. (published online)

16 雷应海, 朱旦生. 多喷头组合喷洒均匀度的矩阵叠加算法 [J]. 甘肃水利水电技术, 1993, 6(2): 17 ~ 20.
Lei Yinghai, Zhu Dansheng. Matrix calculation for combined irrigation uniformity of sprinklers [J]. Gansu Water and Hydropower Engineering, 1993, 6(2): 17 ~ 20. (in Chinese)

17 朱旦生, 刘佳莉. 用傅里叶变换表示喷灌组合均匀度 [J]. 水利学报, 1998, 29(10): 27 ~ 31.
Zhu Dansheng, Liu Jiali. Using Fourier transforms to express sprinkler overlapping uniformity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(10): 27 ~ 31. (in Chinese)

18 韩启彪, 孙浩, 仵峰, 等. 喷灌均匀度研究现状及发展趋势 [J]. 节水灌溉, 2011(12): 74 ~ 77.
Han Qibiao, Sun Hao, Wu Feng, et al. Research status and development trends on sprinkler uniformity coefficient [J]. Water Saving Irrigation, 2011(12): 74 ~ 77. (in Chinese)

19 韩文霆, 吴普特, 杨青, 等. 喷灌水量分布均匀性评价指标比较及研究进展 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 172 ~ 177.
Han Wenting, Wu Pute, Yang Qing, et al. Advances and comparisons of uniformity evaluation index of sprinkle irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(9): 172 ~ 177. (in Chinese)

20 劳东青. 喷灌水量分布及均匀度计算和评价系统开发 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
Lao Dongqing. The evaluation system development of sprinkler irrigation water distribution and uniformity calculation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese)

21 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)

22 ANSI/ASAE. S330. 1. Procedure for sprinkler distribution testing for research purposes [S]. ASAE, 2003.

23 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]. Irrigation and Drainage, 1995, 14(1): 12 ~ 18. (in Chinese)

24 韩文霆. 喷灌均匀度的三次样条两次插值计算方法研究 [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 Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 134 ~ 139. (in Chinese)

25 邱轶兵. 试验设计与数据处理 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 58 ~ 117.

26 朱德兰, 吴普特, 王剑. 滴头制造偏差对灌水均匀度及毛管造价的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 175 ~ 179.
Zhu Delan, Wu Pute, Wang Jian. Effect of emitters manufacturing variation of micro-irrigation on uniformity and lateral cost [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 175 ~ 179. (in Chinese)

(上接第 94 页)

14 李整民. 甘蔗剥叶机的设计与试验 [J]. 热带作物机械化, 1992(3): 44 ~ 46.

15 宮部芳照, 阿部正俊, 小島新. さとうきび脱葉機の開発に関する基礎的研究: 蔗茎の衝撃抵抗について: 第 3 報 [J]. 鹿兒島大學農學部學術報告, 1979, 29(3): 245 ~ 248.
Yoshiteru Miyabe, Masatoshi Abe, Shin Kojima. Fundamental studies on the development of a leaf-stripping-machine for sugar cane Ⅲ on the impacting resistance of sugar cane stalk [J]. Bulletin of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 1979, 29(3): 245 ~ 248. (in Japanese)

16 刘庆庭. 甘蔗切割机理 [D]. 广州: 华南农业大学, 2004.
Liu Qingting. The cutting mechanism of sugarcane [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2004. (in Chinese)

17 杨坚, 黄丽丽, 杨望, 等. 弯、直蔗剥叶质量影响因素的试验 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 123 ~ 129.
Yang Jian, Huang Lili, Yang Wang, et al. Experiment on the factors affecting the detaching quality of the straight and bending sugarcane [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 123 ~ 129. (in Chinese)