

文章编号: 1672-3317(2023)12-0092-07

基于偏差分布的喷灌均匀性评价指标构建与应用

薛绍鹏^{1,2}, 葛茂生^{1,2*}, 魏福强^{1,2}, 张骞文^{1,2}

(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 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】建立综合评价水量分布整体和局部特性的均匀度系数,为喷灌系统优化设计与运行参数的合理配置提供参考。【方法】通过定义正负偏差与偏差分布的概念,提出一种基于偏差分布的均匀系数 DU_1 和 DU_h 。选取Nelson D3000喷头作为研究对象,实测和计算其水量分布,对比了均匀系数 DU_1 、 DU_h 、 CU 、 DU 对水量分布的评价性能,对发生亏缺灌溉或过量灌溉的敏感度,不同组合间距和工作压力下的均匀性。【结果】①组合间距为 $1.5R$ 时,发生过量灌溉,仅 DU_h 表现出较差均匀度,此时正偏差集中分布在小区域内。②发生小区域过量灌溉时, CU 和 DU_h 具有较高敏感度,分别为11.15%和9.32%;发生小区域亏缺灌溉时, DU_1 和 DU_h 敏感度分别为4.69%和5.70%。③组合间距对 DU_h 、 DU_1 、 CU 、 DU 有显著影响;随着工作压力的增大, DU_1 和 DU_h 差异显著, CU 、 DU 差异不显著。④参考 CU 水平分类标准,构建了均匀系数 DU_1 、 DU_h 随正负偏差分布动态变化的评价指标划分标准,假设正负偏差分布相等, DU_1 和 DU_h 的及格标准分别为70%和130%。【结论】基于偏差分布构建的均匀系数 DU_1 、 DU_h 对于准确评价水量分布均匀性和优化喷灌机配置较 CU 、 DU 更为优越。

关键词: 喷灌; 均匀系数; 偏差分布; 分布均匀; 敏感度分析; 显著性检验

中图分类号: S275.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023140

OSID: 

薛绍鹏, 葛茂生, 魏福强, 等. 基于偏差分布的喷灌均匀性评价指标构建与应用[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 92-98.

XUE Shaopeng, GE Maosheng, WEI Fuqiang, et al. Modeling and Application of Rotary Refractive Sprinkler Head Mobile Spray Water Distribution Calculation Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 92-98.

0 引言

【研究意义】均匀度是评价喷灌机灌溉质量的关键指标之一,一般用均匀系数表示,为了准确应用均匀系数评价灌溉质量,部分学者构建和定义了形式多样的均匀系数。例如基于平均偏差的Christiansen均匀系数^[1],基于标准偏差的W-S均匀系数^[2]和Strong变异系数 C_v ^[3],除此之外,也有采用 $N/4$ 低值、 $N/4$ 高值、 $N/2$ 高值等测点水深均值与平均降水深的比值定义的均匀系数^[4-6],其中 N 为总测点数。如此多样的均匀系数各有不同的针对性,应根据评价和研究目选用相应的均匀系数^[7],但如何选择还存在盲目性。

【研究进展】目前,在世界范围内应用最广泛的是Christiansen均匀系数(CU)和美国农业部推荐的分布均匀系数(DU)^[4]。这2个指标各有侧重,同时也存在局限性。 CU 可以较好地表征田间整体喷灌水

量分布的均匀度,但若极个别测点数据与平均水深偏差较大甚至是发生漏喷时,采用 CU 会存在评价失准的情况^[8]。 DU 描述了 $N/4$ 低值水深的平均值与平均降水深的比值,有利于保证作物的最小灌水量需求,但难以反映田间整体水量分布或个别区域可能发生的过量灌溉的情况^[7]。综上所述, CU 与 DU 虽然被广泛应用,但特殊情况下仍存在评价失准现象,究其原因在于水量分布可能存在平均喷灌强度与偏差相等,而偏差有平均分布或集中分布2种喷灌场景,虽然这2种喷灌场景水量分布差异较大,但却存在均匀度相等的情况,此时 CU 与 DU 评价失准。鉴于此,有必要构建或改进现有均匀系数,以便于对水量分布进行准确、有效的评价。

目前,研究人员对均匀系数评价的准确性要求越来越高,促使许多学者就实际应用对均匀系数进行优化或定义新的均匀系数。如韩文霆^[9]提出了基于几何平均数的均匀系数概念,适用于局部灌溉不足或过量灌溉的均匀性评价,但几何平均方法的应用使得计算复杂,测点数量对结果影响较大,不利于推广和应用。鞠学良等^[10]基于样本流量偏差率,建立了灌水均匀度评价标准,但样本容量对结果的影响较大。Mohamed等^[11]提出了一种基于中心枢轴上小范围灌溉变异性

收稿日期: 2023-03-31

修回日期: 2023-08-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279045); 陕西省青年科技新星项目(2023KJXX-011)

作者简介: 薛绍鹏(1998-),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉技术与装备研究。E-mail: 1570096512@nwfufu.edu.cn

通信作者: 葛茂生(1990-),男,副教授,硕士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: gmsnongshui@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

构建的均匀系数 CU 和 DU ，能够有效描述过度灌溉实际影响，但对亏缺灌溉或漏喷的情况失准严重。

【切入点】综上所述，对于均匀系数的优化和改进大多基于单一因素影响，缺乏全面考虑，在场景适用性、可操作性或代表性上还存在应用的局限性。【拟解决的关键问题】本研究结合 Christiansen 均匀系数 (CU) 与分布均匀系数 (DU) 的建立方法，构建基于平均偏差的均匀系数，并基于试验数据验证和分析均匀系数的评价准确性和适用性，以期准确评价水量分布均匀性和优化喷灌配置。

1 材料与方法

1.1 定义正负偏差和偏差分布

假定喷头洒水水量呈三角形径向分布^[12]，以喷灌水深均值 \bar{h} 为界，将各点喷灌水深与喷灌水深均值之间的差值定义为水量偏差，并分为正、负偏差 2 个部分，高于喷灌水深均值的偏差为正偏差，低于喷灌水深均值的偏差为负偏差，假定正、负偏差的面积分别为 S_h 和 S_l ，由平均喷灌强度的定义可知，正负偏差相等，即：

$$S_h = S_l, \quad (1)$$

将高于或低于平均喷灌强度的各测点喷灌强度分为同一测点集合，定义该测点集合的总径向长度为偏差分布，分为负偏差分布 a 和正偏差分布 b ，计算式为：

$$a = \Delta x \times n_l, \quad (2)$$

$$b = \Delta x \times n_h, \quad (3)$$

式中： a 、 b 分别为低于平均喷灌强度和高于平均喷灌强度水量分布的径向长度 (m)，其中 $a+b=L$ ， L 为喷头射程； Δx 为测点间距 (m)； n_l 和 n_h 分别为低于或高于平均喷灌强度的测点数量。

正负偏差 (S_h 、 S_l) 和正负偏差分布 (a 、 b) 可以随水量分布形式的变化而变化。

1.2 分布均匀系数的构建

类比分布均匀系数 (DU) 的构建方法，将高于平均降水深的测点水深均值 (\bar{h}_h) 与平均降水深 (\bar{h}) 的比值定义为新的分布均匀系数 DU_h ，同理，低于平均降水深的测点水深均值 (\bar{h}_l) 与平均降水深 (\bar{h}) 的比定义为 DU_l ，计算式为：

$$DU_l = \frac{\bar{h}_l}{\bar{h}}, \quad (4)$$

$$DU_h = \frac{\bar{h}_h}{\bar{h}}, \quad (5)$$

其中， \bar{h}_l 、 \bar{h}_h 可用平均降水深与正负偏差表示，详见式 (6)、式 (7)。

$$\bar{h}_l = \frac{\bar{h}a - S_l}{a}, \quad (6)$$

$$\bar{h}_h = \frac{\bar{h}b + S_h}{b}, \quad (7)$$

均匀系数 DU_l 和 DU_h 计算式为：

$$DU_l = \frac{\bar{h}_l}{\bar{h}} = \left(1 - \frac{S_l}{a\bar{h}}\right) \times 100\%, \quad (8)$$

$$DU_h = \frac{\bar{h}_h}{\bar{h}} = \left(1 + \frac{S_h}{b\bar{h}}\right) \times 100\%. \quad (9)$$

由式 (8)、式 (9) 可知，一般情况下， $DU_l < 1$ ，其值越高，意味着灌溉均匀性越好；而 $DU_h > 1$ ，其值越高，表明灌溉均匀性越差。当二者越接近于 1 时，喷灌系统的水量分布越均匀。

1.3 敏感度分析

敏感度分析可以用于评价均匀系数对小区域不均匀灌溉的评价能力^[13]。定义均匀度变化率与降水深变化率的比值为敏感度，通过将接近最高值或最低值降水深的 10% 测点修改为平均降水深来测定，敏感度计算式为：

$$\zeta = \frac{\left|\frac{D-D'}{D}\right|}{\left|\frac{h-h'}{h}\right|} \times 100\%, \quad (10)$$

式中： D 为变动前均匀度 (%)； D' 为变动后均匀度 (%)； h 为变动前降水深 (mm)； h' 为变动后降水深 (mm)。

1.4 水量分布试验设计与方法

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大厅构建了喷灌试验测试平台 (图 1)，试验采用美国 Nelson 公司 (Nelson Irrigation Co. Walla Walla) 研制的 D3000 固定折射式喷头，这是一种适用于大型喷灌机的低压灌溉喷头 (图 2)，配备喷嘴直径 6.8 mm，喷盘为 36 沟槽蓝色喷盘，安装高度距地面 1.6 m^[14]，压力传感器位于喷头上方 0.20 m 处，采用管道式离心泵输水，设置水箱容积为 20 m³。选用量程 2 000 mL 的雨量筒用以测量各测点处喷灌强度，沿射流方向呈放射线径向布置，共布置 3 组，相邻射线角度差为 20°，相邻雨量筒布置间距为 40 cm，共布置 25 个雨量筒，总长 10 m。

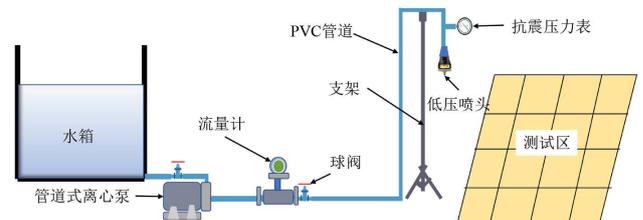


图1 水量特性试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of the water quantity characteristic test



图2 Nelson D3000喷头及其喷盘

Fig.2 Nelson D3000 sprinkler and its spray plate

试验设置工作压力为 50、70、90、110、130、150 kPa, 测试时间 10 min, 称量各测点雨量筒所收集水量, 取 3 条射线对应点水量平均值, 径向各测点喷灌强度计算式为:

$$w = \frac{6m}{\rho s}, \quad (11)$$

式中: w 为喷灌强度 (mm/h); m 为雨量筒记录降水量 (g); ρ 为水密度 (kg/m^3), 本研究采用的水体积质量为 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$; s 为雨量筒底面积 (m^2), 本研究使用雨量筒的底面积为 132 cm^2 。

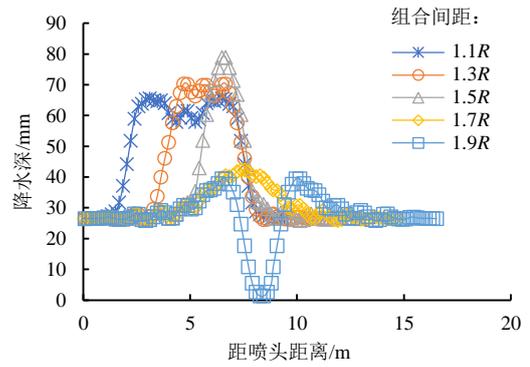
对径向水量分布进行最小二乘法拟合, 采用移动喷灌模型计算移动喷洒径向水量分布^[15]。在单喷头移动喷洒水量分布的基础上, 沿供水主管方向进行多喷头水量叠加, 组合间距分别为喷头喷洒半径 R 的 1.1、1.3、1.5、1.7、1.9 倍, 忽略相邻喷头射流相互作用的影响。

2 结果与分析

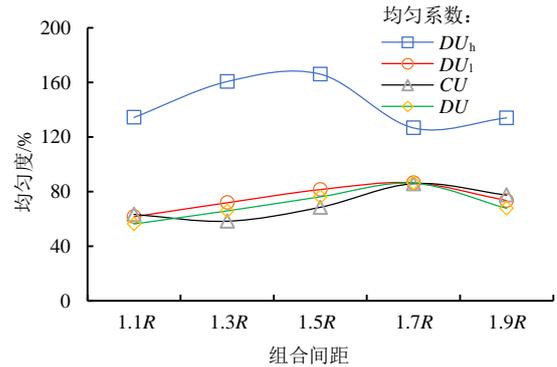
2.1 水量分布均匀性

当工作压力为 110 kPa, 不同组合间距的降水分布曲线见图 3 (a)。均匀系数 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 的计算结果见图 3 (b)。

由图 3 (a) 可知, 组合间距为 $1.5R$ 时, 叠加中心峰值降水深是平均降水深的 2.76 倍, 表现出过量灌溉。由图 3 (b) 可知, DU_1 、 DU 随组合间距的增加整体呈增大趋势; 组合间距为 $1.5R$ 时, DU_1 、 DU 值分别为 81.00%、76.17%。与 DU_1 、 DU 相比, CU 在组合间距为 $1.3R$ 取最小值 58.29%, 但在组合间距为 $1.5R$ 时, 均匀度有所提高, 为 68.50%; 由于个别测点降水深与平均降水深差异较大, 导致 CU 表征失效。对于均匀系数 DU_h 来说, 在 $1.1R \sim 1.5R$ 时, 其值由 134.30% 增大到 166.02%, 此时水量分布不均匀。当组合间距为 $1.7R$ 时, 此时均匀系数 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 均达到最优, 分别为 85.81%、86.13%、89.70%、118.19%。



(a) 径向降水深



(b) 均匀度

图3 110 kPa工作压力下不同组合间距 D3000喷头的径向降水深和均匀度

Fig.3 Radial precipitation depth and uniformity of D3000 sprinkler with different combination spacing under 110 kPa working pressure

当组合间距增大到 $1.9R$ 时, 由于单喷头水量分布末端低值部分叠加, 使得水量分布叠加区域凹陷于平均降水深之下, 水量分布中心降水深降幅达 49.19%, 此时最低点降水深仅为 0.8 mm, 与平均降水深差异显著, 表现出明显的亏缺灌溉。与组合间距为 $1.7R$ 的 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 值相比, 组合间距增大到 $1.9R$ 时 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 的平均变化幅度分别为 9.41%、22.01%、15.11%、5.56%。

为进一步明确均匀系数 DU_1 、 DU_h 对于水量分布的表征能力, 提取了式 (8)、式 (9) 中的变量, 包括平均降水深 \bar{h} 、负偏差 S_1 和正负偏差分布 a 、 b (图 4)。

在平均降水深随组合间距增大而逐渐减小的前提下, 组合间距为 $1.5R$ 时, 负偏差分布 a 最大, 正偏差分布 b 最小为 2.59 m, 此时正偏差集中分布在长度为 b 的小区域内, 此时发生过量灌溉。组合间距为 $1.7R$, 正负偏差分布 (a 、 b) 不均匀, 但负偏差 S_1 取得最小值 30.18 mm, 此时水量分布均匀性较 $1.5R$ 组合间距更好。组合间距 $1.9R$ 时, 此时水量分布出现亏缺灌溉, 正偏差分布 b 取得最大值 6.14 m, 表明组合间距 $1.9R$ 时的水量分布不均匀, 存在亏缺灌溉。

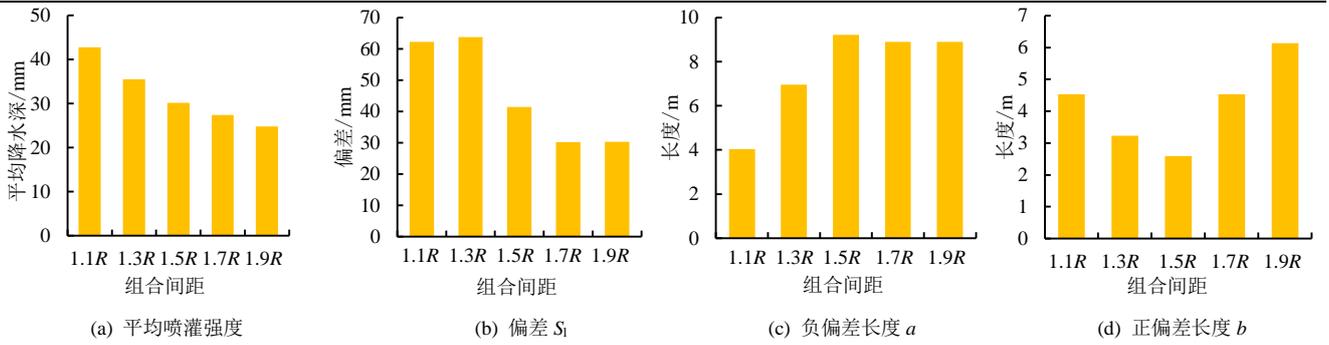


图4 不同组合间距下公式变量变化特征

Fig.4 Variation characteristics of formula variables under different combination spacing

2.2 异常水量分布敏感度分析

图 5 为喷头工作压力为 110 kPa 时均匀系数在不同组合间距下的敏感度 ζ 。

由图 5 (a) 可知，当发生小区域过量灌溉时， DU_h 和 CU 的敏感度相似，组合间距为 1.5R 时敏感度最高，二者分别为 25.42% 和 26.30%。 DU_1 与 DU 的敏感度较差，仅为 14.54% 和 14.38%。 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 的平均敏感度分别为 11.51%、7.34%、7.76%、9.32%。图 5 (b) 为发生小区域亏缺灌溉时各均匀系数的敏感度， DU_1 和 DU_h 的敏感度较 CU 、 DU 高。

组合间距为 1.7R 时， DU_1 、 DU_h 的敏感度达到最大值，分别为 10.18%、19.36%，而此时 CU 、 DU 的敏感度仅为 0.78%、0.30%。 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 的平均敏感度为 4.69%、1.92%、4.43%、5.70%。综上所述，2 种情景下， DU_1 和 DU_h 对于异常水量分布的敏感度优于 CU 、 DU 。

2.3 组合间距和工作压力对均匀系数的影响

D3000 喷头在不同工作压力和组合间距下的 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 值见图 (6)。

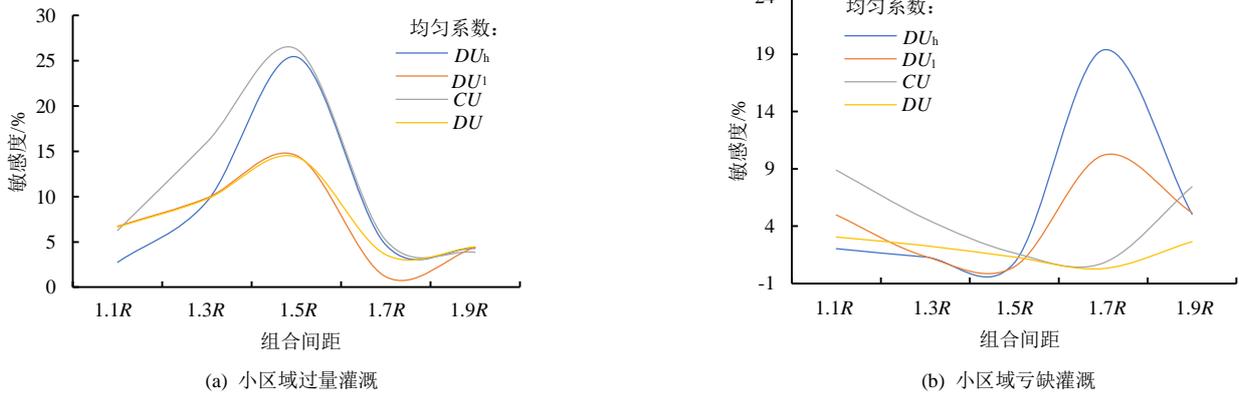


图5 小区域过量灌溉和亏缺灌溉下不同组合间距均匀系数敏感度

Fig.5 Sensitivity of different combination spacing uniformity coefficient under small area overirrigation and deficit irrigation

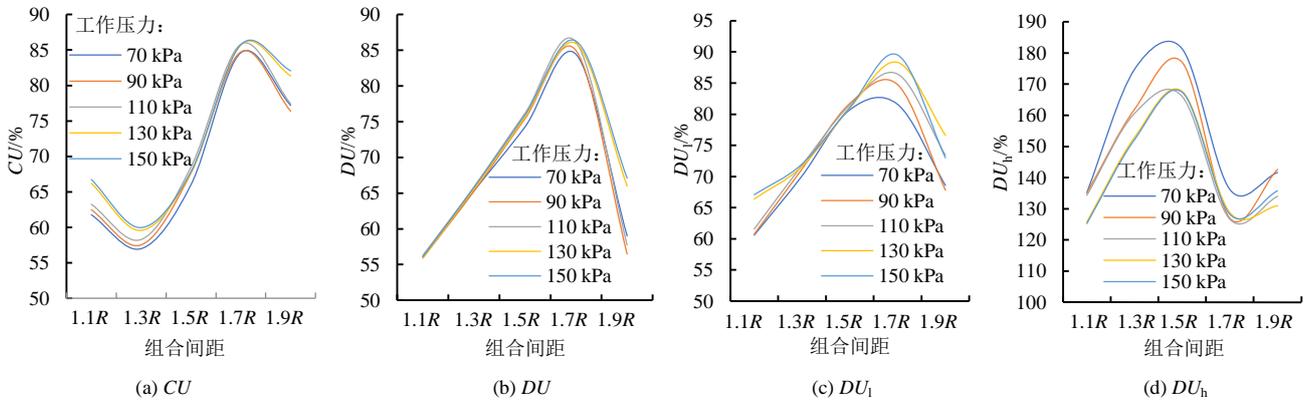


图6 组合间距和工作压力对于均匀系数的影响

Fig.6 Effect of combined spacing and working pressure on different uniform coefficients

由图 (6) 所示， CU 与 DU_h 随组合间距增大呈“S”形变化；组合间距为 1.7R 时， CU 与 DU_h 值最

大，分别为 85.81% 和 126.63%，不同工作压力下二者平均变化幅度为 14.38% 和 15.27%。 DU 与 DU_1 呈先

升高后降低趋势，组合间距为 1.7R 时， DU 、 DU_1 最大，为 86.27% 和 89.50%，不同工作压力下二者平均变化幅度为 18.78% 和 12.54%。组合间距对 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 影响差异明显。随着工作压力的增大， DU_1 、 DU_h 较 CU 、 DU 变化明显，在组合间距为 1.7R 时，最优 DU_1 、 DU_h 分别为 89.50% 和 125.24%，不同工作压力下二者平均变化幅度为 3.30% 和 3.16%，此时， CU 与 DU 的平均变化幅度仅为 1.39% 和 1.63%。表 1 为工作压力对 CU 、 DU 、 DU_1 、 DU_h 影响的显著性分析结果。由表 1 可知，工作压力显著影响 DU_1 、 DU_h 值。

表1 均匀系数对于工作压力的显著性检验系数表

Table 1 Uniformity coefficients for the significance of the working pressure test coefficient table

指标	$DU_h/\%$	$DU_1/\%$	$CU/\%$	$DU/\%$
P	0.000**	0.000**	0.985	0.843

注 **表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关；*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。

2.4 评价标准构建

De^[16]在前人经验和试验基础上对 CU 和 DU 作了分类，划分为优秀、良好、及格 3 个水平，详见表 2。

表2 CU 与 DU 均匀系数评价指标标准划分

Table 2 Classification of CU and DU uniform coefficient evaluation index levels

水平	$CU/\%$	$DU/\%$
优秀	>90	>84
良好	80~90	68~84
及格	70~80	52~68

参考 CU 在分类评价中的结果。根据平均偏差的定义，均匀系数 CU 计算式简化为：

$$CU = \left(1 - \frac{2S_1}{L \times \bar{h}}\right) \times 100\%, \quad (12)$$

提出 S_1 ，式 (12) 变化为：

$$S_1 = \frac{(1-CU) \times L \times \bar{h}}{2}, \quad (13)$$

同理，将式 (8)、式 (9) 中 DU_1 和 DU_h 计算式变化为：

$$S_1 = (1-DU_1) \times a \times \bar{h}, \quad (14)$$

$$S_h = (1+DU_h) \times b \times \bar{h}, \quad (15)$$

联立式 (13)、式 (14)、式 (15)，得：

$$a \times DU_1 - \frac{L}{2} \times CU = a - \frac{L}{2}, \quad (16)$$

$$b \times DU_h + \frac{L}{2} \times CU = b + \frac{L}{2}, \quad (17)$$

又因为 $a+b=L$ ，令 $a=k \times L$ 得：

$$DU_1 = 1 - \frac{1}{2k} + \frac{1}{2k} \times CU, \quad (18)$$

$$DU_h = 1 + \frac{1}{2(1-k)} - \frac{1}{2(1-k)} \times CU. \quad (19)$$

假设 $a=b=L/2$ ，此时 $k=1/2$ ，得：

$$DU_1 = CU, \quad (20)$$

$$DU_h = 2 - CU. \quad (21)$$

均匀系数 DU_1 和 DU_h 评价指标划分标准见表 3，但表 3 仅作参考，应用时还需根据实际水量分布计算。

表3 均匀系数评价指标划分标准

Table 3 Horizontal classification of uniformity coefficient evaluation indicators

水平	$DU_h/\%$	$DU_1/\%$
优秀	<110	>90
良好	120~110	80~90
及格	130~120	70~80

3 讨论

均匀度是评价喷灌机灌溉质量的关键指标之一，本研究通过定义正负偏差和偏差分布的概念构建了均匀系数 DU_1 和 DU_h ，与 CU 相比^[1]， CU 基于平均偏差构建，使得极个别低值测点数据被忽略，难以准确表征亏缺灌溉的情况^[8]，而在本研究中低值测点数据与高值测点数据被分为 2 类，使得 DU_1 和 DU_h 在表征亏缺灌溉中较 CU 更为准确和合理。而同理，分布均匀系数 DU 虽然强调了 $N/4$ 低值降水深对于水量分布的影响，但难以反映田间整体水量分布或个别区域可能发生的过量灌溉的情况^[7]，而 DU_1 和 DU_h 对过量灌溉更为敏感。此外，学者还采用了 $N/4$ 低值、 $N/4$ 高值、 $N/2$ 高值等测点水深均值与平均降水深的比值定义的均匀系数^[4-6]，但以上均匀系数均采用了固定区域的偏差作为分子，同 DU 类似，偏差分布均匀对其评价能力有较大影响。

随着组合间距的增大，水量分布叠加域的降水深呈先增大后降低趋势，存在过量灌溉或亏缺灌溉的可能^[17]。Zhang 等^[18]研究表明，喷头间隔太远或喷头间隔太近等都可能造成小区域的过量灌溉或亏缺灌溉。本试验中，组合间距为 1.5R 时，叠加中心降水深是平均降水深的 2.76 倍，表现出过量灌溉，该组合间距下，均匀度 CU 和 DU 有所提高，一定程度上对过量灌溉情境下的水量分布表征存在失准^[7]。相较而言，均匀系数 DU_h 在 1.5R 组合间距时表示为较差均匀性。

喷灌机配置优化是进行均匀度评价的直接目的^[14]。本研究表明，组合间距对水量分布均匀度的影响有显著差异。这与孙丰刚等^[17]研究结果一致；但工作压力对均匀系数的影响并不明显，主要是因为工作压力对水量分布形式的影响体现在射程和总降水量的增长上，而平均降水深的变化不明显。

受喷灌机应用配置因素影响, 水量分布形式差异明显, 由于 CU 与 DU 的均匀度评价划分标准被确定^[16], 这导致如果发生了不均匀灌溉, 仍可能被确定为良好或优秀的均匀性^[12]。而 DU_1 和 DU_h 的均匀度水平标准与水量分布形式密切相关, 即评价水平标准随 k 值变化而变化, 这与 CU 、 DU 水平划分标准不同。当水量分布表现出不均匀灌溉时, k 值将向 1 或 0 偏离, 此时评价水平将会提高, 使该灌溉场景下的均匀度评价结果显示为及格或较差。综上所述, DU_1 和 DU_h 在评价水量分布均匀度和配置优化上有较大的优势, 但同时, 双指标评价和计算过程复杂仍是其能否被推广应用的重要因素。因此, 仍有必要进一步优化和简化计算流程, 建立均匀性动态评价体系。

此外, 由于本试验验证是基于平移式喷灌机相同型号喷头的水量分布叠加作用, 圆形喷灌机中的应用评价应该还需要进一步研究。

4 结论

1) 组合间距为 $1.5R$ 时, 过量灌溉降水深分布 DU_h 值较低, 此时负偏差分布 a 最大, 而正偏差分布 b 最小, 正偏差集中分布在小区域内, 表现为过量灌溉。

2) 当组合间距为 $1.5R$ 时, 发生亏缺灌溉时, DU_1 、 DU_h 比 CU 、 DU 的敏感度高。

3) 组合间距对 DU_h 、 DU_1 、 CU 、 DU 均有显著影响。工作压力显著影响 DU_1 、 DU_h 值, 但对 CU 与 DU 值的影响不显著。

4) 假设正负偏差分布相等, DU_1 和 DU_h 的及格标准分别为 70% 和 130%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 朱兴业, 史永杰, 胡广, 等. 射流式喷头水量分布动态仿真及试验[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 74-83.
ZHU Xingye, SHI Yongjie, HU Guang, et al. Dynamic simulation and test of water distribution of fluidic sprinkler[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 74-83.
- [2] WARRICK A W. Interrelationships of irrigation uniformity terms[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1983, 109(3): 317-332.
- [3] STRONG W. Christiansen's coefficient of uniformity, Pearson's variability coefficient and standard deviation[R]. Personal correspondence of January, 1955.
- [4] AL-GHOBARI H M. Effect of center pivot system lateral configuration on water application uniformity in an arid area[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(3): 577-589.
- [5] BEALE J G. Distribution uniformity of sprinkler irrigation systems[D].

- Kensington, N.S.W., Australia: University of New South Wales, 1964.
- [6] HART W E, REYNOLDS W N. Analytical design of sprinkler systems[J]. Transactions of the ASAE, 1965, 8(1): 83-85.
- [7] 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.
- [8] 李文, 黄修桥, 韩启彪, 等. 低压滴灌条件下均匀度各指标相关关系试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 72-76.
LI Wen, HUANG Xiuqiao, HAN Qibiao, et al. Correlation between indexes of uniformity in low-pressure drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4): 72-76.
- [9] 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.
- [10] 鞠学良, 吴普特, 朱德兰, 等. 基于样本流量偏差率的微灌灌水均匀度评价方法[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(2): 173-178.
JU Xueliang, WU Pute, ZHU Delan, et al. Estimation of micro-irrigation water application uniformity based on sample emitter flow variation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(2): 173-178.
- [11] MOHAMED A Z, PETERS R T, ZHU X Y, et al. Adjusting irrigation uniformity coefficients for unimportant variability on a small scale[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 1 078-1 083.
- [12] XUE Shaopeng, GE Maosheng, WEI Fuqiang, et al. Sprinkler irrigation uniformity assessment: Relational analysis of Christiansen uniformity and distribution uniformity[J]. Irrigation and Drainage, 2023, 72(4): 910-921.
- [13] RODRIGUES L N, MELLO J L P, MANTOVANI E C, et al. Coeficientes de uniformidade: Sensibilidade a mudança nos fatores operacionais[J]. IRRIGA, 1997, 2(2): 90-99.
- [14] 赵伟霞, 张萌, 李久生, 等. 喷头安装高度对圆形喷灌机灌水质量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 107-112.
ZHAO Weixia, ZHANG Meng, LI Jiusheng, et al. Influence of sprinkler height on irrigation performance of center pivot irrigator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 107-112.
- [15] 薛绍鹏, 葛茂生, 魏福强, 等. 旋转折射式喷头移动喷洒水量分布计算模型构建与应用[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 46-56.
XUE Shaopeng, GE Maosheng, WEI Fuqiang, et al. Construction and application of water distribution model for rotary refractive sprinkler spray head mobile system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 46-56.
- [16] DE FATIMA MIRANDA FREITAS E, DE FARIAS H F L, DA COSTA E SILVA S M, et al. Avaliação da velocidade de infiltração da água no solo e uniformidade de distribuição da água de irrigação por pivô central[J]. Revista Brasileira De Agricultura Irrigada, 2018, 12(1): 2 374-2 384.
- [17] 孙丰刚, 谢高畅, 彭志颖, 等. 组合方式对喷灌均匀度的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 66-72, 98.
SUN Fenggang, XIE Gaochang, PENG Zhiying, et al. Irrigation uniformity affected by spatial arrangement of sprinklers[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 66-72, 98.
- [18] ZHANG L, MERKLEY G P. Relationships between common irrigation application uniformity indicators[J]. Irrigation Science, 2012, 30(2): 83-88.

Modeling and Application of Rotary Refractive Sprinkler Head Mobile Spray Water Distribution Calculation Model

XUE Shaopeng^{1,2}, GE Maosheng^{1,2*}, WEI Fuqiang^{1,2}, ZHANG Qianwen^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education,
Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: 【Objective】 Uniformity coefficient is an important parameter in design and operation of sprinkler irrigation. Based on CU and DU , this paper proposed a methods to evaluate whole and local water distribution to help improve design of sprinkler systems and the rational configuration of operating parameters. 【Method】 We propose a uniformity coefficient DU_1 and DU_h based on by defying positive and negative skewed distribution. Water distribution of the Nelson D3000 nozzle was measured and calculated, and the ability of DU_1 , DU_h , CU and DU for evaluating water distribution, sensitivity to deficient or excessive irrigation, and uniformity under different nozzle-spacing and working pressure were compared and evaluated. 【Result】 When the irrigation occurs at 1.5R combined spacing, only DU_h shows poor uniformity, where the positive deviation is concentrated in a small region. The sensitivity of CU and DU_h was 11.15% and 9.32%, respectively. DU_1 and DU_h were more sensitive to small area deficit irrigation, with sensitivity being 4.69% and 5.70%, respectively. The combined distance has significant influence on DU_1 , DU_h , CU and DU . With the increase in working pressure, DU_1 and DU_h showed significant differences, and the differences were more significant than CU and DU , with the F value being 0.123 and 0.399. DU_1 , DU_h are more accurate. Based on CU level classification standard, the division standard of horizontal classification evaluation index with the dynamic change of uniformity coefficient DU_1 and DU_h with positive and negative deviation distribution is constructed. Assuming an equal distribution of positive and negative deviations, the pass criteria for DU_1 and DU_h are 70% and 130%, respectively. 【Conclusion】 DU_1 and DU_h based on deviation distribution are superior to CU and DU for accurately evaluating water distribution uniformity and optimizing sprinkler configuration.

Key word: sprinkler irrigation; uniformity coefficient; deviation distribution; uniformity of distribution; sensitivity analysis; significance test

责任编辑: 白芳芳