

养殖肥水喷灌条件下摇臂式喷头水力性能研究

蒋跃^{1,2}, 王莉莎¹, 李红¹, 左新乐¹

(1. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013;

2. 常州江苏大学工程技术研究院, 江苏 常州 213164)

摘要:【目的】研究不同喷灌介质对喷头水力性能的影响。【方法】以 20PY₂H 摇臂式喷头为研究对象, 在不同工作压力下测定了清水和养殖肥水 2 种喷灌介质对喷头压力-流量、喷头水量分布的影响。通过模拟计算和田间喷灌试验分析相结合的方法, 探查喷灌介质、工作压力、组合间距、田间气象条件与喷灌均匀性之间的关系。【结果】①与清水灌溉相比, 养殖肥水运行下喷头流量降低了 2.06%~5.38%, 射程前中段径向水量分布差异较大; ②工作压力为 200~300 kPa、组合间距为 1.0R~1.4R 条件下, MATLAB 拟合出的 CU 模拟值为 0.74~0.88, CU 试验值为 0.66~0.79。复杂的大田气象条件导致喷灌均匀系数下降了 6.28%~12.78%。工作压力、喷头组合间距对清水运行喷灌均匀性的影响大于养殖肥水运行。【结论】养殖肥水喷灌更利于喷灌系统降低工作压力和增加喷头布置间距以降低设计成本。

关键词: 养殖肥水; 摇臂式喷头; 水力性能; 试验水量分布; 组合均匀性

中图分类号: S275.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023600

蒋跃, 王莉莎, 李红, 等. 养殖肥水喷灌条件下摇臂式喷头水力性能研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(6): 61-67, 85.

JIANG Yue, WANG Lisha, LI Hong, et al. Experimental study on the hydraulic performance of impact-sprinkler system using aquaculture water for irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(6): 61-67, 85.

0 引言

【研究意义】规模化、集约化畜禽养殖行业迅速发展, 而废弃物处理成本高且利用率较低^[1-2]。养殖水体量大、污染物浓度高, 若直接排放到环境中, 会造成土壤环境污染和水体富营养化^[3], 成为我国绿色低碳农业发展前进道路上的一大阻碍。但将养殖废水经过二级处理成为养殖肥水, 水质标准满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB18596-2001)^[4]和《农田灌溉水质标准》(GB5084-2021)^[5]后再用于回灌农田则是将污染源变成了资源, 既有利于养殖废水的资源化利用^[3,6], 又缓解了农业水资源供需矛盾^[7]。【研究进展】近年来, 养殖肥水用于农田回灌从而进行养分循环利用的方式逐渐发展, 施用于水稻、小麦、果树、牧草等农作物能获得明显的增产提质效应^[3]。但养殖肥水还田应用的研究多集中在养殖肥水灌溉对作物生长和土壤环境的影响上^[8-11], 目前缺少对养殖肥水还田灌溉模式的针对性研究。喷灌是一种高效节水灌溉技术, 因其节水、增产、

适应性强^[12-13], 成为实现养殖肥水高效灌溉的重要手段^[14]。喷头作为喷灌系统中将水流分散为细小水滴并均匀落在灌溉区域的关键部件^[15-16], 其本身的水力性能以及组合后的喷灌均匀系数都直接影响到灌水质量^[17-20]。对此, 国内外学者进行了大量研究。Stambouli 等^[21]提出综合考虑喷头种类、喷嘴直径和工作压力的组合可以提高喷灌均匀性和水分利用效率。王子君等^[22]通过改进主副喷嘴改善了摇臂式喷头水量分布, 并提出了正方形布置下最佳组合间距和组合均匀性。常杰等^[23]运用 MATLAB 构建组合条件下多喷头组合水量分布模型, 计算出不同组合下的水量分布和喷灌均匀系数。在实际大田作业中, 风速、风向、空气温度、湿度、坡度等也成为影响喷灌质量的重要外部因素^[24-26]。Sanchez 等^[27-28]开展无风和有风时喷头水量分布对比发现, 风速对喷灌水量分布的影响较大。徐红等^[29]针对 ZY-2 摇臂式喷头开展田间试验, 构建了组合喷灌的主要技术参数和气象因素的回归模型, 分析得出影响喷灌均匀系数的主要因素为空气温度和风速。孟繁华^[30]指出污水的高矿化度和悬浮物提高了污水的黏度和表面张力系数, 导致喷头流量和射程以及转动速度有不同程度下降, 喷灌强度和水滴粒度增加, 并且在设计喷灌系统时这些问题不容忽视。周俊辉等^[31]运用

收稿日期: 2023-12-30 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 镇江市重点研发计划项目(CN2022003); 省部共建现代农业装备与技术协同创新中心资助(XTCX2018)

作者简介: 蒋跃(1987-), 男, 江苏泰州人。副研究员, 博士, 主要从事节水灌溉设备理论研究。E-mail: jy261715267@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Fluent 仿真软件对污水流过摇臂式喷头时的内流场进行数值模拟,发现高黏度污水在流道低速区容易滞留,多次运行可能堵塞流道,从而提出了需对喷头流道进行结构优化。王珍等^[32]研制了一种园林升降式旋转喷头,比较再生水和地下水喷灌时喷头在不同运行时间下的水力性能,指出需要每运行 50 h 清洗喷头进口滤网来防止堵塞造成的流量和射程降低。养殖肥水中含有与污水、再生水相似的物质成分,如大量氮磷等营养养分、有机物和微生物等^[33]。【切入点】当前,关于喷头水力性能的相关研究侧重以清水为喷灌介质,养殖肥水对喷头水力性能影响的研究报道较少。【拟解决的关键问题】鉴于此,选取 20PY₂H 摇臂式喷头,测试养殖肥水对喷头水力性能

能影响;同时以正方形布置的方式在田间开展组合喷灌试验研究,分析实际应用中工作压力、喷头组合间距、气象因素对养殖肥水喷灌均匀系数的影响,为养殖肥水喷灌的设计和后续实际应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 养殖肥水水质

试验喷头选取我国农田灌溉常用喷头 20PY₂H 摇臂式喷头,在江苏省淮安市苏嘴镇高荡村某试验田(33°64'86.83" N, 119°36'14.62" E)进行喷灌试验,试验田面积为 54 m×108 m。养殖肥水选用温氏畜牧养殖场废水处理站处理水。试验用水委托温氏养殖场技术人员对 9 项水质指标进行测定,结果见表 1。

表 1 养殖肥水水质指标

Tab.1 Water quality index of fertilizer water

| 水源 | pH 值 | 密度 ρ / (g·cm ⁻³) | 电导率 EC/ (mS·cm ⁻¹) | 质量浓度/(mg·L ⁻¹) | | | | | 粪大肠杆菌/ (MPN·L ⁻¹) |
|-------|---------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------|-----------------------|-------|--------------------------|----------------------------------|
| | | | | 化学需氧量 COD | 悬浮物 SS | 氨氮 NH ₃ -N | 总磷 TP | 五日生化需氧量 BOD ₅ | |
| 清水 | 7.38 | 0.99 | 0.404 | 10.8 | 13.3 | 0.48 | 0.11 | 2.7 | 6.9 |
| 地表水标准 | 6~9 | / | / | 20 | 30 | 1 | 0.2 | 4 | 10 |
| 养殖肥水 | 7.95 | 1.05 | 3.08 | 135.2 | 76.9 | 55.32 | 4.28 | 79.5 | 35 760 |
| 肥水标准 | 5.5~8.5 | / | / | 200 | 100 | 60 | 8 | 100 | 40 000 |

1.2 试验方法

喷灌试验分为 2 个部分,单喷头喷洒试验和组合喷灌试验。试验步骤和方法参照国家标准 GB/T 22999—2008《旋转式喷头》^[34]和 GB/T19795. 2—2005《水量分布均匀性和试验方法》^[35]。主要测量仪器:压力表、电磁流量计、量筒、手持气象仪等。管路压力由 0.4 级的精密压力表读出,流量通过 0.5 级精度的电磁流量计测量得出,同时塑料桶代替雨量筒进行体积测量。喷头的安装高度为 1.2 m,塑料桶的口径为 200 mm、高度 170 mm。在稳定运转 5 min 后开始测量数据,每工作 0.5 h 进行 1 次水量分布测量。

试验期间环境气温为 23.6~39.8 °C,相对湿度为 34.3%~93%。试验顺序为:养殖肥水单喷头试验、清水单喷头试验、清水组合喷灌试验、养殖肥水组合喷灌试验,每个试验全部完成后开展后续试验。考虑到每次试验时间较短,水量蒸发较小,因此认为每个测点塑料桶中的水量为实际喷灌水量。试验结束后,用雨量筒立即测量每个塑料桶内水体积,将其转化为喷灌水深。

图 1 为单喷头喷洒布置,试验选取压力分别为 200、250、300、350、400 kPa。采用射线法测量径向水量分布的喷灌强度,以喷头为中心,沿喷头喷洒方向布置 4 条呈射线状分布的塑料桶,相邻射线夹角均为 90°,射线上相邻塑料桶间隔为 1 m。

单喷头喷洒试验对于固定式组合喷灌的水量分布均匀性研究至关重要。喷头径向水量分布曲线应

尽可能在室内检测。由于场地不够,本试验在开阔的田间进行,受到了风速、风向影响。

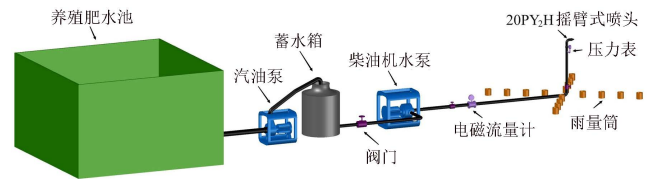


图 1 试验系统布置

Fig.1 Layout of test system

图 2 为 20PY₂H 单喷头在试验工作压力为 200 kPa,养殖肥水喷洒试验中径向布置量筒的实测降水深模拟出的水量等值线图和水量剖面图;其中图 2 (a)主导风向为南风,平均风速 \bar{U} 为 1.5 m/s,图 2 (b)主导风向为东北风,平均风速为 0.5 m/s。从图 2 (a)可以看出,平均风速 1.5 m/s 条件下,风速风向导致顺风北向收集水量远远大于逆风南向收集水量,顺风北向水量峰值往喷头远处移动,逆风南向水量峰值往喷头近处移动,其径向水量分布曲线发生了变形;从图 2 (b)可以看出,风速减小后,径向水量分布的测量准确性明显提高,主导风向垂直剖面水量分布曲线基本对称。

本研究中每个工作压力下均进行了 1~3 次单喷头喷洒试验,取多次试验平均值研究压力-流量关系;为了确保喷头径向水量分布曲线的准确性,剔除了其中风速>0.6 m/s 情况下获得的试验数据,选取其中最为合适的 12 次试验对喷头射程、径向水量分布进行对比分析。表 2 为 12 次单喷头径向水量分布试验的相关技术参数。

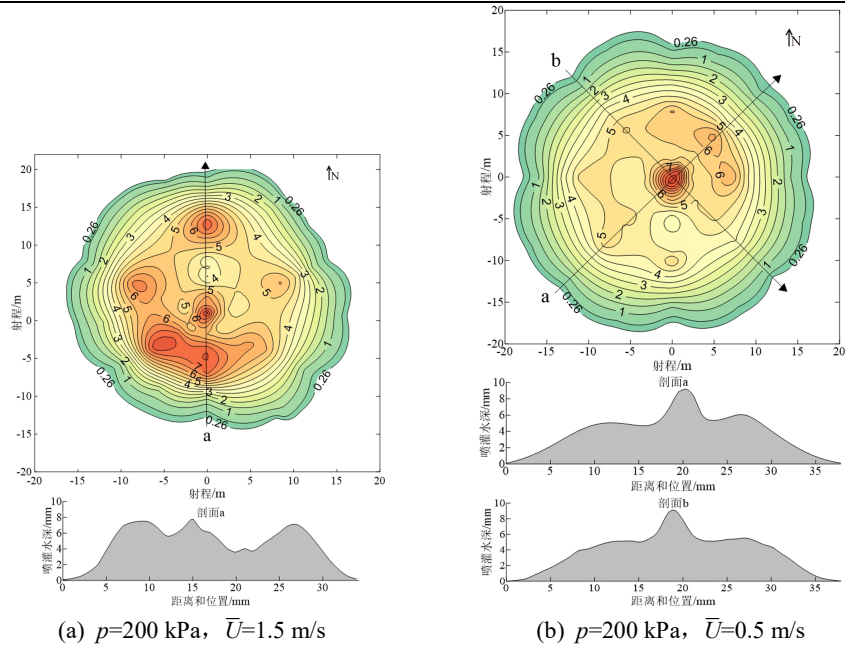


图 2 单喷头水量分布等值线及剖面图

Fig.2 Isograms and profiles of water distribution of sprinkler

表 2 养殖肥水和清水运行单喷头喷灌主要参数比较

Tab.2 Comparison of main parameters of sprinkler irrigation for fertilizer water and clean water

| 水质 | 压力/kPa | 流量/(L h ⁻¹) | 环境温度/℃ | 相对湿度/% | 平均喷灌水深/(mm h ⁻¹) | 风 | |
|------|--------|-------------------------|--------|--------|------------------------------|-------------------------|------|
| | | | | | | 风速/(m s ⁻¹) | 风向 |
| 清水 | 200 | 2.80 | 33.1 | 77.9 | 3.92 | 0.63 | S |
| 养殖肥水 | | 2.62 | 34.9 | 72.8 | 4.05 | 0.41 | SE |
| 清水 | 250 | 3.19 | 29.2 | 63.6 | 4.45 | 0.59 | S |
| 养殖肥水 | | 3.02 | 38.1 | 64.8 | 4.31 | 0.42 | SW |
| 清水 | 300 | 3.47 | 26.7 | 63.6 | 4.51 | 0.66 | S |
| 养殖肥水 | | 3.32 | 39.5 | 42.5 | 4.13 | 0.47 | W SW |
| 清水 | 350 | 3.68 | 29.2 | 61.3 | 4.84 | 0.53 | E |
| 养殖肥水 | | 3.54 | 36.4 | 65.3 | 4.32 | 0.48 | W |
| 清水 | 400 | 3.920 | 27.2 | 77.6 | 4.86 | 0.51 | NE |
| 养殖肥水 | | 3.82 | 33.8 | 75.1 | 4.53 | 0.18 | SE |

根据《喷灌工程技术规范》(GB/T 50085—2007) [36], 喷灌工程的设计风速为 2~3 m/s, 对于大田作物, 固定式喷灌系统组合喷灌均匀系数应大于 75%。因此本研究的组合喷灌试验在风速小于二级风 (0~3.4 m/s) 的情况下进行。本文采用喷头正方形组合布置形式, 沿南北方向平行布置 2 条支管, 每条支管上安装 2 个 20PY₂H 喷头, 喷头工作方式为全圆喷洒, 在试验区布置间距为 2 m 的测量用塑料桶。由于喷灌组合间距>1.4R 时, 风速对灌溉区域的喷灌效果影响较大, 造成喷灌效果不佳。因此选取喷灌组合间距为 1.0R、1.1R、1.2R、1.3R、1.4R 进行对比, 其中 R 为当前压力所测射程; 工作压力选取中低压 200、250、300 kPa。

1.3 指标选取与计算

根据 GB/T19795.2—2005《水量分布均匀性和试验方法》[35], 对于流量>75 L/h 的喷头, 在正常旋转时, 喷头中心线距喷灌强度为 0.26 mm/h 的最远点的距离即为该喷头的射程, 本文中喷头射程由插

值法测出。转速由秒表测量喷头单位时间内的转数获取, 喷灌强度由单位时间内塑料桶读取的各测点降水深获取, 养殖肥水和清水各测点喷灌强度的变异程度用变异系数表示, 其计算式为:

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu} \times 100, \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (h_i - \mu)^2}, \tag{2}$$

式中: c_v 为变异系数 (%); σ 为各测点喷灌强度标准差; μ 为各测点喷灌强度平均值 (mm); n 为测点个数。

喷灌均匀系数是指水量在喷灌面积上分布均匀的程度, 本文采用常用的组合均匀系数 CU 表示, 采用 Christiansen 算法, 其计算式为:

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}|}{\sum_{i=1}^n h_i}, \tag{3}$$

式中: CU 为克里斯琴森均匀系数; \bar{h} 为喷洒区域上的平均水深 (mm); h_i 为第 i 测点的降水深度 (mm); n 为测点的雨量筒个数。

2 结果与分析

2.1 压力-流量、射程关系

表 3 为 20PY₂H 摇臂式喷头在清水和养殖肥水下运行的平均压力-流量关系。由表 3 可知,在相同压力条件下,清水和养殖肥水运行的喷头流量有所差异。工作压力为 200、250、300、350、400 kPa 时,养殖肥水运行时的喷头流量较清水降低了 5.38%、4.74%、3.62%、3.13%、2.06%,说明养殖肥水对喷头流量的影响程度随压力的增大而减小,总体影响程度不明显。

表 4 为养殖肥水和清水运行条件下 20PY₂H 喷头射程比较。养殖肥水运行时,200、300 kPa 工作压力下喷头射程较清水下降 1.75%、1.07%,但在 400 kPa 工作压力下养殖肥水运行时喷头射程较清水上升 3.16%。

表 3 2 种水源运行时不同工作压力下喷头流量

Tab.3 Flow rate of sprinkler under different working pressures for two types of water sources

| 指标 | 压力/kPa | | | | |
|--|--------|------|-------|------|------|
| | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| 清水介质下流量/(m ³ ·h ⁻¹) | 2.79 | 3.16 | 3.45 | 3.66 | 3.89 |
| 养殖肥水介质下流量/(m ³ ·h ⁻¹) | 2.64 | 3.01 | 3.325 | 3.56 | 3.81 |
| 误差/% | 5.38 | 4.74 | 3.62 | 3.13 | 2.06 |

表 4 2 种水源运行时不同压力下喷头射程

Tab.4 Wetted radius of sprinkler under different working pressures for two types of water sources

| 指标 | 压力/kPa | | |
|-------------|--------|------|------|
| | 200 | 300 | 400 |
| 养殖肥水介质下射程/m | 16.8 | 18.4 | 19.6 |
| 清水介质下射程/m | 17.1 | 18.6 | 19 |
| 误差/% | 1.75 | 1.07 | 3.16 |

2.2 不同喷灌介质对单喷头水量分布影响

图 3 为喷头在养殖肥水和清水 2 种喷灌介质、工作压力为 200、300、400 kPa 下的径向水量分布。由图 3 可知,随着工作压力的增加,单喷头水量分布的趋势均从马鞍线形态逐渐变为直线形态。马鞍线形态指从喷头中心往远处呈先减少再增大后减小的趋势,径向水量分布中存在 1 个低点和 1 个高点;直线形态指喷头往远处呈逐渐减小趋势。工作压力为 200、300 kPa 时,不同水源的喷头水量分布曲线差别主要在前中段。养殖肥水运行时喷头在此段平均喷灌强度在 200、300、400 kPa 工作压力下分别为 5.88、6.22、7.28 mm/h,变异系数分别为 23.37%、7.86%、12.37%。清水运行时在相同压力下平均喷灌强度为 6.36、7.19、7.65 mm/h,变异系数为 27.45%、12.90%、13.88%。说明养殖肥水径向水量分布曲线在前半段走向较清水更加平缓。工作压力为 400 kPa 时,养殖肥水在 0~6 m 射程的喷灌水深仍稍低于清

水喷灌,但这种差距有所缩小。在喷头射程的后半段,2 种水源运行对喷头径向水量分布的影响不大,基本一致。

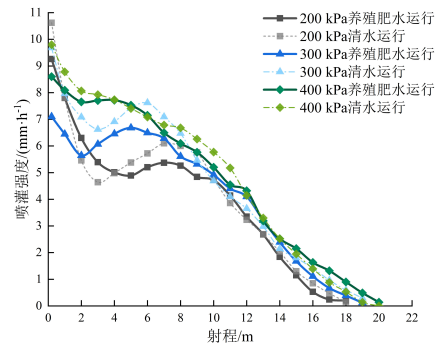


图 3 喷头在 2 种水源运行下的径向水量分布
Fig.3 Radial water distribution of sprinkler under two kinds of water sources

2.3 组合喷灌效果对比分析

2.3.1 工作压力和组合间距对喷灌均匀系数的影响

根据 2 种水源下摇臂式喷头测得的径向水量分布数据,采用 MATLAB 软件仿真模拟不同工作压力、不同组合间距下的喷灌试验 CU 值。图 4 为养殖肥水和清水 2 种喷灌介质在 1.0R~1.4R 喷灌组合间距,200、250、300 kPa 工作压力下的组合均匀系数模拟值对比图。由图 4 可知,清水喷灌最佳工作条件是 300 kPa 工作压力、1.0R 组合间距,养殖肥水喷灌最佳工作条件是 300 kPa 工作压力、1.1R 组合间距。在组合间距为 1.0R、1.1R、1.2R、1.3R、1.4R 的情况下,200 kPa 工作压力时,养殖肥水运行组合均匀系数较清水运行分别变化了-0.40%、-1.32%、-0.48%、0.95%、2.79%。300 kPa 工作压力时,养殖肥水运行组合均匀系数较清水运行分别变化了-4.39%、-1.23%、1.15%、4.60%、3.56%。养殖肥水运行在 1.0R~1.1R 组合间距下组合均匀系数稍低于清水运行,在 1.2R~1.4R 组合间距下养殖肥水运行组合均匀系数则高于清水运行,二者的组合均匀系数差异随工作压力的提升有所增大。

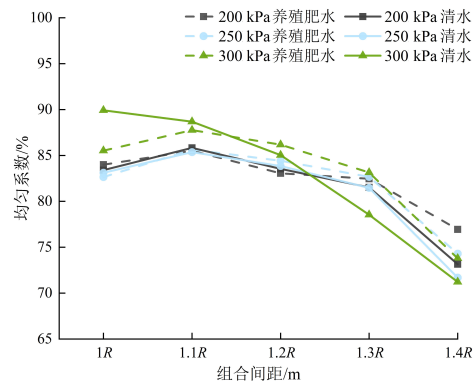


图 4 组合均匀系数模拟值对比

Fig.4 Comparison of simulated values of uniformity coefficient for sprinkler irrigation

200 kPa 工作压力时，组合间距为 1.0R、1.2R、1.3R、1.4R 下养殖肥水运行的 CU 值较组合间距为 1.1R 的 CU 峰值分别下降了 1.76%、2.87%、3.56%、8.01%，清水运行分别下降了 2.82%、3.67%、5.02%、14.77%；300 kPa 工作压力下，养殖肥水运行组合间距为 1.0R、1.2R、1.3R、1.4R 下的 CU 值较组合间距为 1.1R 的 CU 峰值分别下降了 1.98%、1.80%、5.25%、13.92%，清水运行组合间距为 1.1R、1.2R、1.3R、1.4R 下的 CU 值较组合间距为 1.0R 的 CU 峰值分别下降了 2.54%、5.43%、12.65%、20.79%；说明工作压力、组合间距对清水运行下的喷灌均匀系数影响大于养殖肥水运行。

2.3.2 养殖肥水和清水田间组合喷灌试验

图 5 为养殖肥水和清水 2 种喷灌介质，在 1.0R~1.4R 喷头组合间距，200、250、300 kPa 工作压力下的组合均匀系数田间试验结果。由图 5 可知，田间试验条件下养殖肥水和清水喷灌的组合均匀系数的变化趋势与模拟值变化趋势大致相同，表现为 1.0R~1.1R 组合间距时，清水组合均匀系数稍高于养殖肥水组合均匀系数；1.2R~1.4R 组合间距时，养殖肥水组合均匀系数高于清水组合均匀系数。当喷头间距为 1.4R 时，清水和养殖肥水在 200~300 kPa 工作压力下的喷灌均匀系数均低于 0.75，不满足规范要求，因此组合间距均需控制在 1.3R 以内。

田间试验条件下清水喷灌在 200、250、300 kPa 工作压力下的最佳组合间距分别为 1.0R、1.0R、1.1R；养殖肥水喷灌在 200、250、300 kPa 工作压力下最佳组合间距为 1.0R、1.3R、1.1R。300 kPa 工作压力、1.4R 组合间距时，清水组合均匀系数为 0.61，养殖肥水组合均匀系数为 0.67。在工作压力和组合间距的影响下，养殖肥水喷灌均匀系数表现出更好稳

定性，与前文 2 种喷灌介质模拟值对比分析结果一致。

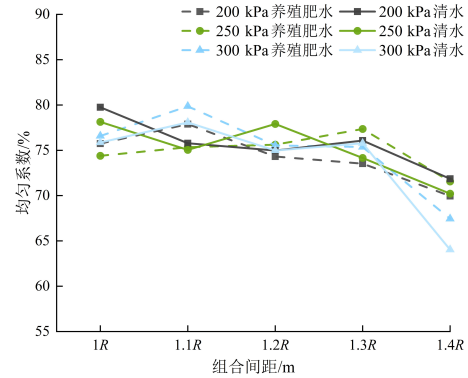


图 5 大田条件下喷灌均匀系数

Fig.5 Uniformity coefficient of sprinkler irrigation under field conditions

2.3.3 田间气象因素对喷灌均匀系数的影响

组合喷灌的理论组合均匀系数与大田试验值有较大差异，因此，将 MATLAB 组合分析得到的 CU 模拟值作为无风条件下的对应相同工作压力、组合间距下的组合均匀系数，将模拟值和试验值进行比较。

表 5 为 15 组养殖肥水组合喷灌试验的主要技术参数以及组合均匀系数模拟值和大田试验值。由表 5 可知， CU 模拟值为 0.74~0.88， CU 试验值为 0.66~0.79。复杂的大田气象条件导致组合均匀系数下降了 6.28%~12.78%。喷头布置间距从 1.3R 变为 1.4R 时，组合均匀系数均下降幅度较大，200、250、300 kPa 工作压力下 CU 模拟值下降了 6.10%、8.54%、10.84%， CU 试验值下降了 5.48%、9.10%、8.22%，因此喷头组合间距不应超过 1.3R；在相同工作压力下，喷头组合间距从 1.0R 变为 1.3R 时，组合均匀系数试验值变化规律与模拟值不一致，复杂的气象条件使组合均匀系数降低，在实际喷灌作业时导致工作压力和组合间距对喷灌均匀系数的影响程度减小。

表 5 养殖肥水运行下喷灌均匀系数模拟值与试验值对比

Tab.5 Comparison of simulated and experimental values of uniformity coefficient under the fertilizer water sprinkler irrigation

| 压力/kPa | 组合间距 | 射程/m | 风速/(m s ⁻¹) | 平均空气湿度/% | 平均空气温度/℃ | 组合喷灌强度/(mm h ⁻¹) | CU 试验值 | CU 模拟值 |
|--------|------|------|-------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| 200 | 1.4R | 17 | 0.24~1.56 | 70.6 | 22.9 | 5.47 | 0.69 | 0.77 |
| | 1.3R | | 0~1.11 | 67.2 | 25.1 | 6.3 | 0.73 | 0.82 |
| | 1.2R | | 0.94~2.14 | 57 | 29.2 | 6.72 | 0.74 | 0.84 |
| | 1.1R | | 0.22~1.37 | 50.6 | 35.1 | 8.53 | 0.77 | 0.86 |
| | 1.0R | | 0.2~0.95 | 62.4 | 25.9 | 10.3 | 0.75 | 0.84 |
| 250 | 1.4R | 17.8 | 0.3~1.15 | 66.7 | 23.5 | 5.09 | 0.7 | 0.75 |
| | 1.3R | | 0.68~2 | 71.8 | 27.6 | 7.59 | 0.77 | 0.82 |
| | 1.2R | | 0~0.83 | 48 | 31.6 | 7.36 | 0.75 | 0.84 |
| | 1.1R | | 1.12~2.77 | 63.6 | 29.4 | 8.57 | 0.75 | 0.85 |
| | 1.0R | | 0.29~1.28 | 67.2 | 28.7 | 10.41 | 0.74 | 0.83 |
| 300 | 1.4R | 18.4 | 0.09~1.23 | 47 | 33.9 | 5.18 | 0.67 | 0.74 |
| | 1.3R | | 0.15~0.88 | 73.9 | 26.3 | 6.01 | 0.73 | 0.83 |
| | 1.2R | | 0.39~1.71 | 67.9 | 28.3 | 7.22 | 0.75 | 0.86 |
| | 1.1R | | 1.12~2.41 | 73.6 | 29.4 | 8.69 | 0.78 | 0.88 |
| | 1.0R | | 0.39~2.05 | 52.9 | 33.4 | 10.64 | 0.76 | 0.86 |

3 讨论

养殖肥水中富含营养物、悬浮颗粒,与清水有较大差别,本文采用养殖肥水进行摇臂式喷头水力性能试验。由于粘滞性增强,水头损失增大^[30],灌溉水的流量有一定程度降低^[37]。考虑到喷头在 2 种喷灌介质运行时射程差异较小,径向水量分布的差异也集中体现在射程前中段,推测养殖肥水内富含的复杂物质主要影响到喷头的副喷嘴射流破碎过程和流动特性,随着工作压力的增大,影响逐渐降低。

喷灌均匀系数是衡量喷灌质量的重要指标和喷灌系统规划设计中的重要参数。研究表明,喷灌均匀系数随着组合间距的增大呈先增大后减小的趋势,这与许正典等^[38]研究结果类似,工作压力的变化对喷灌均匀系数的影响相对较小^[39]。清水喷灌最佳工况下的组合均匀系数高于养殖肥水,但在低压力、大间距的工作条件下养殖肥水喷灌均匀系数则优于清水喷灌。受作物根系生长和土壤入渗特性的影响,地表喷灌水量分布并不能绝对代表土壤中的水分分布,适当降低喷灌均匀系数并不会导致作物减产。因此,养殖肥水喷灌可适当增大组合间距减少喷灌系统的成本。除了喷灌介质、组合方式等因素影响外,风是减少喷灌均匀系数和增加喷灌中水分损失的主要因素。本研究中,大田条件下所有工作条件的养殖肥水组合喷灌均匀系数都呈下降趋势^[40],下降 6.28%~12.78%。在有风条件下,水滴在运动过程中势必产生偏移,从而降低了田间试验的喷灌均匀性。

本研究为养殖肥水喷灌系统的设计应用提供依据,但尚未对比 2 种喷灌介质对摇臂式喷头洒水水滴特性如洒水水滴直径分布、动能强度等的影响,须在未来进一步研究。

4 结论

1) 养殖肥水运行使得摇臂式喷头在同等工作压力下流量降低。水源对摇臂式喷头径向水量分布的影响主要集中于距喷头 0~9 m 处,在射程后半段,养殖肥水与清水运行下单喷头水量分布差异较小。

2) 组合间距为 1.0R~1.1R 时,组合均匀系数随着喷头布置间距的增大呈增大趋势;组合间距为 1.1R~1.4R 时,组合均匀系数呈降低趋势,工作压力越大,组合均匀系数下降趋势越大。工作压力、组合间距对清水运行时喷灌均匀系数的影响大于养殖肥水运行。

3) 大田条件下 CU 试验值为 0.66~0.79。复杂的大田气象条件导致喷灌均匀系数下降了 6.28%~12.78%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- 王文平. 畜禽养殖废弃物资源化利用与现代生态养殖模式思考[J]. 畜牧兽医学报(电子版), 2022(15): 172-174.
WANG Wenping. Thinking and analysis on resource utilization of livestock and poultry breeding waste and modern ecological breeding mode[J]. *Graziery Veterinary Sciences (Electronic Version)*, 2022(15): 172-174.
- 农业部. 全国每年 38 亿吨畜禽废弃物综合利用率只有 6 成[J]. 家禽科学, 2018(3): 5.
- 于海霞, 陈荣荣, 李泽青, 等. 畜禽养殖场肥水还田存在问题及对策[J]. 天津农业科学, 2022, 28(2): 83-86.
YU Haixia, CHEN Rongrong, LI Zeqing, et al. The problems and countermeasures of anaerobic effluents treatment from livestock farm to agricultural fields[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2022, 28(2): 83-86.
- 国家环境保护总局. 畜禽养殖业污染物排放标准: GB 18596—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- 杨晓磊, 贾晴晴, 王存, 等. 猪粪尿全量还田对水稻种植化肥减量增效的影响[J]. 现代农业科技, 2021(12): 9-11.
YANG Xiaolei, JIA Qingqing, WANG Cun, et al. Effect of pig manure and urine returning to the field on fertilizer reduction and efficiency improvement in rice planting[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021(12): 9-11.
- 陶甄, 李中阳, 李松旌, 等. 模拟再生水、养殖废水灌溉对农田温室气体排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 124-131.
TAO Zhen, LI Zhongyang, LI Songjing, et al. Greenhouse gas emissions from soils are affected by irrigation water sources[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(5): 124-131.
- 李宝贵, 刘源, 陶甄, 等. 前期灌溉养殖废水和再生水对土壤吸附镉能力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1 244-1 255.
LI Baogui, LIU Yuan, TAO Zhen, et al. Effects of irrigation using antecedent reclaimed water and livestock wastewater on the cadmium adsorption capacity of soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1 244-1 255.
- 刘源, 崔二革, 李中阳, 等. 再生水和养殖废水灌溉下土壤-植物系统养分和重金属迁移特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 45-51.
LIU Yuan, CUI Erping, LI Zhongyang, et al. Differences of nutrient and heavy metals migration in soil-plant system irrigated by reclaimed water and livestock wastewater[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(2): 45-51.
- 杨焕焕, 杜君, 刘红恩, 等. 养殖污水灌溉对不同土层磷素形态含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 318-323.
YANG Huanhuan, DU Jun, LIU Hongen, et al. Effects of livestock wastewater irrigation on phosphorus forms content in different soil layers[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3): 318-323.
- 魏飞, 李永杰, 孙琪玮, 等. 沼液与化肥施肥对水稻生长及土壤质量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 48-54.
WEI Fei, LI Yongjie, SUN Qiwei, et al. Combined effects of biogas slurry application and chemical fertilization on rice growth and soil quality[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(8): 48-54.
- 吴文勇, 龚时宏, 李久生, 等. 现代灌溉水肥调控原理与技术研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 81-89.
WU Wenyong, GONG Shihong, LI Jiusheng, et al. Research development on principle and technology of water and fertilizer regulation under modern irrigation[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(1): 81-89.
- 李红, 汤攀, 陈超, 等. 中国水肥一体化施肥设备研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2): 200-209.
LI Hong, TANG Pan, CHEN Chao, et al. Research status and development trend of fertilization equipment used in fertigation in China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(2): 200-209.
- CAO C, ZHANG P, MA Z P, et al. Coupling sprinkler freshwater

- irrigation with vegetable species selection as a sustainable approach for agricultural production in farmlands with a history of 50-year wastewater irrigation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125-157.
- [15] 汤玲迪, 袁寿其, 刘俊萍, 等. 中国喷灌机现状与发展思考[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(10): 1 072-1 080.
TANG Lingdi, YUAN Shouqi, LIU Junping, et al. Challenges and opportunities for development of sprinkler irrigation machine in China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(10): 1 072-1 080.
- [16] 张晓敏, 朱德兰, 葛茂生, 等. 轻小型平移式喷灌机低压末端喷头改进设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(4): 75-82.
ZHANG Xiaomin, ZHU Delan, GE Maosheng, et al. Improved design and testing of the low-pressure end sprinkler nozzles for light and small pan irrigation sprinklers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(4): 75-82.
- [17] 段福义, 刘建瑞, 范永申, 等. 轻型卷盘喷灌机运行效果影响因素分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(6): 541-546, 552.
DUAN Fuyi, LIU Jianrui, FAN Yongshen, et al. Influential factor analysis of spraying effect of light hose-fed traveling sprinkling system[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(6): 541-546, 552.
- [18] 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(2): 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(2): 154-157.
- [19] 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.
- [20] 高飞, 朱德兰, 闫婧歆, 等. 安装高度和工作压力对育苗喷头水力性能影响的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 119-125.
GAO Fei, ZHU Delan, YAN Jingxin, et al. Impact of mounting height and working water pressure on the performance of micro-sprinkler irrigation system for seedling beds[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(1): 119-125.
- [21] STAMBOULI T, ZAPATA N, FACI J M. Performance of new agricultural impact sprinkler fitted with plastic nozzles[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 118: 39-51.
- [22] 王子君, 惠鑫, 黎耀军, 等. 摇臂式喷头喷嘴结构改进及水力性能试验研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(4): 488-496.
WANG Zijun, HUI Xin, LI Yaojun, et al. Optimization of nozzle structure and investigation on hydraulic performance of impact sprinkler[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(4): 488-496.
- [23] 常杰, 冯冬雪, 唐晓培, 等. 喷头不同组合模式下水量分布和喷灌均匀度的田间试验及数值模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 245-251.
CHANG Jie, FENG Dongxue, TANG Xiaopei, et al. Field test and numerical simulation of water distribution and sprinkler irrigation uniformity under different combination modes of sprinklers[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(4): 245-251.
- [24] ZAPATA N, PLAYÁN E, MARTÍNEZ-COB A, et al. From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(2): 187-199.
- [25] 刘洋, 严海军, 马开, 等. R2000WF 喷头与摇臂式喷头组合喷灌均匀性的田间试验对比[J]. *节水灌溉*, 2012(3): 33-35, 39.
- [26] 张林, 惠鑫, 陈俊英. 平地向坡地转换喷灌水量分布计算模型研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 252-260.
ZHANG Lin, HUI Xin, CHEN Junying. Calculated model for transforming sprinkler water distribution from flat ground into sloping land[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 252-260.
- [27] SANCHEZ I, FACI J M, ZAPATA N. The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 102(1): 13-24.
- [28] SANCHEZ I, ZAPATA N, FACI J M. Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation: II. Modifications of the wind velocity and of the water interception plane by the crop canopy[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1 591-1 601.
- [29] 徐红, 龚时宏, 贾瑞卿, 等. ZY-2 摇臂式喷头组合喷灌技术参数田间试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 37-39.
XU Hong, GONG Shihong, JIA Ruiqing, et al. A study on the main technical parameters of ZY-2 impact drive sprinkler head[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1): 37-39.
- [30] 孟繁华. 用污水灌溉时的喷灌技术[J]. *农业机械资料*, 1974(3): 26-28.
- [31] 周俊辉, 梁忠伟, 刘晓初, 等. 一种污水灌溉喷头流道的数值模拟及结构优化[J]. *机床与液压*, 2015, 43(11): 152-155.
ZHOU Junhui, LIANG Zhongwei, LIU Xiaochu, et al. Numerical simulation and structural optimization of a sewage irrigation nozzle flow[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(11): 152-155.
- [32] 王珍, 李久生, 栗岩峰. 园林升降式旋转射流喷头对再生水的适应性评价[J]. *节水灌溉*, 2016(8): 7-10, 17.
WANG Zhen, LI Jiusheng, LI Yanfeng. Hydraulic performance of a new pop-up multi-jet rotational sprayer and its adaptability to reclaimed wastewater[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(8): 7-10, 17.
- [33] 付莉, 张克强, 高文萱, 等. 规模化养殖场肥水水质特征研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(4): 487-493.
FU Li, ZHANG Keqiang, GAO Wenxuan, et al. Characteristics of nutrients in anaerobic effluents from large-scale livestock farms in North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 487-493.
- [34] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 旋转式喷头: GB/T 22999—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [35] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 农业灌溉设备 喷头 第 3 部分: 水量分布特性和试验方法: GB/T 27612.3—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [36] 中华人民共和国建设部. 喷灌工程技术规范: GB/T 50085—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [37] 栗岩峰, 李久生, 尹剑锋. 再生水对园林升降式喷头水力性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8): 56-61.
LI Yanfeng, LI Jiusheng, YIN Jianfeng. Hydraulic performance of pop-up sprinklers with reclaimed sewage effluent[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8): 56-61.
- [38] 许正典, 李红, 向清江, 等. 20PY2 摇臂喷头掺气情况下的低压喷灌效果[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(1): 74-79.
XU Zhengdian, LI Hong, XIANG Qingjiang, et al. Effect on combination irrigation of low pressure 20PY2 impact sprinkler with and without aeration[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(1): 74-79.
- [39] 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.
- [40] 徐红, 龚时宏, 刘兴安, 等. 双喷嘴摇臂式喷头洒水水滴运动模拟与验证[J]. *水利学报*, 2012, 43(4): 480-486.
XU Hong, GONG Shihong, LIU Xing'an, et al. Simulation and experimental study on the droplet simulated motion of double-nozzle impact sprinkler[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(4): 480-486.

in the Huaibei Plain. **【Method】** The analysis was based on the drought severity index (DSI) from 2010 to 2019 calculated using metrological data measured from weather stations across the region. We focused on the top 0-10 cm soil layer and the root zone from the soil surface to the depth of 50 cm. The M-K test and the Kriging spatial interpolation were used to analyze the spatiotemporal variation in droughts over the region at different time scales.

【Result】 ① Since 2016, the severity and frequency of droughts have both significantly increased in the areas of Dangshan, Mengcheng, and Qiaocheng, while decreased in the area of Fuyang. In Suzhou, droughts mainly occurred in 2010—2012 and 2019. Compared to seasonal scale, some drought events exhibited greater severity and higher frequency at the ten-day scale with unpredictable onset. ② The highest average annual drought index and frequency both occurred during the sowing-emergence stage, reaching moderate level or above, with the frequencies exceeding 40%. Severe droughts or worse at both timescales occurred in northern Dangshan and central Mengcheng and Suzhou. The frequency of the 0-10 cm soil-layer droughts was higher in the southwest, while the frequency of 0-50 cm soil-layer droughts was higher in the east and north than in other areas. ③ At the ten-day scale, the periods with the highest drought severity in each growing season mostly started in the early stage of sowing - emergence, emergence - jointing, and the mid-stage of jointing - tasseling. Severe droughts occurred primarily in August and September. **【Conclusion】** Since 2016, there has been a significant increase in drought severity and frequency for summer maize in the Huaibei Plain, particularly during the sowing seedling stage. Severe droughts were observed at uncertain ten-day scales, with increased drought frequency.

Key words: summer corn; comprehensive drought index; time scale; growth stage

责任编辑：赵宇龙

(上接第 67 页)

Experimental study on the hydraulic performance of impact-sprinkler system using aquaculture water for irrigation

JIANG Yue^{1,2}, WANG Lisha¹, LI Hong¹, ZUO Xinle¹

(1. Research Centre of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Changzhou Engineering and Technology Institute of Jiangsu University, Changzhou 213164, China)

Abstract: **【Background】** Sprinkler irrigation is a widely used technique across various sectors. This study examines the impact of using aquaculture water for irrigation on the hydraulic performance of the 20PY₂H impact sprinkler systems. **【Method】** The experiments were conducted under varying working pressures and nozzle spacings, with clean water irrigation serving as the control. Measurements in the experiments included the pressure-flow relationship and water-droplet distribution around the nozzle for each treatment. The relationships between irrigation water type, working pressure, and nozzle spacing were analyzed, along with the influence of meteorological factors on irrigation uniformity. **【Result】** ① Compared with the control using clean water for irrigation, irrigation using aquaculture water reduced flow rate of the sprinkler system by 2.06%-5.38%. ② When working pressure was in the range of 200-300 kPa and nozzle-spacing was in the range of 1.0-1.4 of the radius of the covered area of the nozzle, the value of the *CU* calculated by our proposed model varied from 0.74 to 0.88, close to the measured *CU* which was in the range of 0.66 to 0.79. The erratic change in meteorological conditions in the field could reduce irrigation uniformity by 6.28%-12.78%. **【Conclusion】** Using aquaculture water for irrigation decreases the flow rate of the sprinkler systems. The effect of working pressure and nozzle spacing on irrigation uniformity is more pronounced when using clean water than using aquaculture water.

Key words: farming fertilizer water; impact sprinkler; hydraulic performance; test water distribution; uniformity coefficient

责任编辑：白芳芳