

· 灌溉技术与装备 ·

文章编号: 1672-3317(2021)02-0070-07

固定式太阳能喷灌系统喷洒水滴动能分布的研究

刘俊萍, 江楠*, 许继恩, 李吉鹏, 张晴
(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要:【目的】提高太阳能喷灌系统水力性能的稳定性和能量转换效率。【方法】采用激光雨滴谱仪测量技术,对225.7~1 145 W/m²之间不同光照强度下的固定式太阳能喷灌系统水力特性参数进行试验研究,分析了单个水滴动能、单位体积水滴动能及动能强度等参数的分布规律,并提出了系统能量转换效率的测量及计算方法。【结果】光照强度对单个水滴动能影响主要集中在距离较近处的直径1 mm以下的小水滴;单位体积水滴动能随光照强度的增大先增大后减小并趋于稳定,其径向分布与建立的四次多项式模型拟合较好;动能强度随径向距离的增大而增大,在射程末端迅速减为0,光照强度为300.8~1 018.8 W/m²时波动幅度较小;太阳能喷灌系统能量转换效率在24.59%~37.21%之间波动,光照强度为225.7~416 W/m²时,系统能量强度转换效率较高,稳定在36%左右。【结论】在光照强度为300.8~416 W/m²时,动能强度波动幅度最小,能量分布更均匀,能量转换效率更高。

关键词: 太阳能喷灌系统;光照强度;水滴分布;动能强度;能量转换

中图分类号:S277.9

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020352

OSID:



刘俊萍, 江楠, 许继恩, 等. 固定式太阳能喷灌系统喷洒水滴动能分布的研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 70-76.

LIU Junping, JIANG Nan, XU Ji'en, et al. Kinetic Energy Distribution of Water Droplets in Fixed Solar Sprinkler Irrigation System[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 70-76.

0 引言

【研究意义】太阳能喷灌具有显著的节能降耗效果,但发电量易受气象、时间等因素影响,在功率高峰工作时可能出现供能不足的现象,存在能量转换效率低、水力性能不稳定等问题。光照强度作为能量供给的重要参数,受地理位置影响,实时变化。而光照强度影响太阳能板吸收太阳能,造成转换的电能不稳定,易导致电能带动的水泵工作压力变化,进而影响喷头进口压力。太阳能喷灌系统喷头工作稳定性差,影响灌水质量。研究太阳能喷灌系统喷洒性能对提高能量转换率,优化不同地区运行参数配置具有重要意义。【前人研究进展】对于太阳能灌溉系统,国内外学者对其进行了大量的研究。Abdelouahed 等^[1]改进了温室光伏水泵的嵌入式控制系统,引入抽水资源的可用性作为模糊控制系统的新增输入变量,提高了设

施的安全性。李丹等^[2]利用光伏板、蓄电池、汽油发电机互补供电技术,设计了一种卷盘式喷灌机喷头车的电动牵引装置。张锴等^[3]采用混沌粒子群算法,构建风/光/普适农业互补系统,有效降低了成本。李加念等^[4]采用太阳能供电驱动隔膜泵的提水方式,研制了恒压供水自动装置,实现了微灌系统入口水压的稳定性。对于喷灌系统喷洒水力特性方面的研究,主要有:白更等^[5]提出了面粉法来研究测量水滴的直径、打击角度和打击速度,改进了喷洒水滴粒径的测量方法;任乃望等^[6]采用激光雨滴谱仪研究并比较了动态水压和恒压模式下坡地水滴直径的分布;朱兴业等^[7]提出动能强度均匀性与组合间距之间有着密切的联系。【切入点】现有研究大多是太阳能喷灌机组驱动性能优化和控制系统自动化,或是对现有喷灌机组进行水力特性研究,但关于太阳能喷灌系统供给能源对喷洒水力性能影响的规律尚未掌握,存在太阳能喷灌系统喷洒性能不稳定,能量分布不均及转换效率低等问题。【拟解决的关键问题】本文通过对太阳能喷灌系统喷洒水力特性的研究,揭示不同光照强度下喷洒水滴分布规律,探索太阳能与喷洒水滴落到地面的能量关系,为提高太阳能喷灌系统喷洒性能和能量转换率提供参考。

收稿日期: 2020-06-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202); 国家自然科学基金项目(51679109); 江苏高校优势学科建设工程(三期)资助项目(PAPD-2018-87)

作者简介: 刘俊萍,女,副研究员,主要从事节水灌溉装备的研究。

E-mail: liujp@ujs.edu.cn

通信作者: 江楠,女,硕士研究生,主要从事节水灌溉方向的研究。

E-mail: 1207516278@qq.com

1 材料与方 法

1.1 试验方 法

太阳能喷灌系统洒水水力特性试验在直径 44 m 的室内圆形喷灌大厅进行。图 1 为固定式太阳能喷灌系统示意。系统包括太阳能板、太阳能控制器、离心泵、储水箱、压力表、电磁流量计、水管和喷头。离心泵型号为 MG80C，喷头型号为 NelsonR2000，本系统中配置 4 个喷头，间距为 10 m，安装高度为 1.2 m。试验时间为夏秋季的 09:00—14:30。

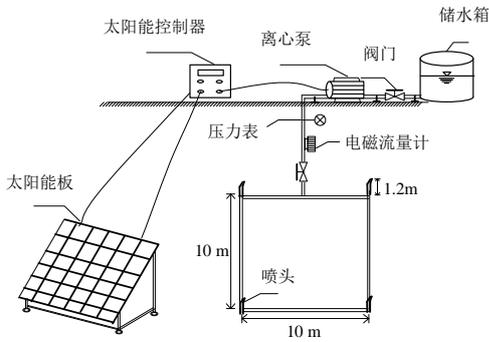


图 1 固定式太阳能喷灌系统示意

Fig.1 Schematic diagram of solar sprinkler irrigation system

在太阳能喷灌系统稳定运转 10 min 之后，每隔 15 min 测量 1 次光照强度和喷头工作压力，光照强度由 TES 1333R 太阳能勘测仪测得，喷头工作压力由量程 1 MPa，精度 0.02 MPa 的压力表测得。由于喷头相同且同时间内压力几乎一致，因此选取一个喷头为研究对象。当喷头工作压力稳定在某一固定值超过 30 min 后，取该时间段内光照强度平均值。试验期间共获得 7 组喷头工作压力及其对应光照强度平均值，结果如表 1 所示。利用外部电源稳定运转喷灌装置，使喷头工作压力为上述固定值，模拟光照强度提供的能量。系统稳定运转 10 min 后开始水力性能试验，用激光雨滴谱仪（Laser Precipitation Monitor, LPM）测量各个测点的水滴直径和速度。

表 1 喷头工作压力和光照强度对应关系

Table 1 Correspondence between sprinkler working pressure and solar intensity

光照强度/ (W m ⁻²)	225.7	300.8	416	716.8	912	1 018.8	1 145
喷头 压力/MPa	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45

本研究的太阳能喷灌系统水滴试验如图 2 所示。对单个喷头进行试验，其余 3 个喷头此时并不工作。使用 LPM 测量不同位置处洒水水滴的直径和速度，由于 4 个喷头几乎等效，因此系统的结果将单个喷头的效果叠加即可。从喷头初始位置到射程末端，每隔 1 m 设置一个测量点，测量点位置为距喷头距离。为了避免样本的偶然性，每个测量点收集 10 000 个喷

洒水水滴数据。为了便于后续的能量计算，对每个测量点收集到的数据取平均值记为水滴平均直径和平均速度。通过水滴平均直径和平均速度，计算单个水滴动能和单位体积动能，进而对动能强度和能量转换进行研究。对于存在的测量误差，在处理激光雨滴谱仪的水滴数据时有必要对异常数据进行判别和剔除。本文根据统计学原理采用“3σ”准则分别对各直径级的速度值所对应粒子数进行统计检验，判别并剔除其粗大误差和异常数据^[9]。

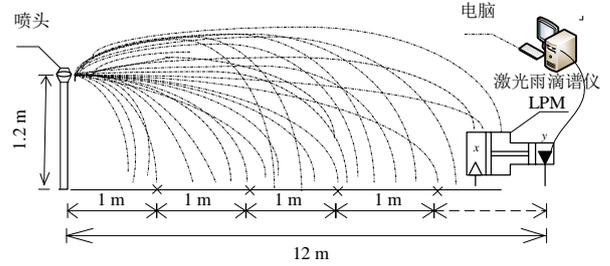


图 2 太阳能喷灌系统水滴试验示意

Fig.2 Schematic diagram of solar sprinkler irrigation system droplets experiment

1.2 数据处理方 法

1.2.1 单个水滴动能

通过 LPM 测得不同测点处的水滴速度与直径，可计算出单个水滴落地时的动能。此处单个水滴动能是指测点处某一直径级水滴的水滴动能平均值，计算式^[10-11]为：

$$E_{sd} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{12} \pi \rho_w d^3 \cdot W \cdot V_{di}^2}{\sum_{i=1}^n W} \quad (1)$$

式中： E_{sd} 为直径为 d 的单个水滴动能 (J)； V_{di} 为直径为 d 的水滴速度 (m/s)； W 为 V_{di} 对应的粒子数； i 为直径为 d 的水滴速度级名。

1.2.2 单位体积水滴动能

单位体积水滴动能是指在喷洒区域中不同测点处的单个水滴动能总和与总体积的比值，其计算式^[12]为：

$$E_{ks} = \frac{\sum_{j=1}^m E_{sdj}}{1000 \sum_{j=1}^m \frac{1}{6} \pi \cdot W \cdot d_j^3} \quad (2)$$

式中： E_{ks} 为单位体积水滴动能 (J/L)； j 为水滴直径级名； m 为 LPM 测量的粒子直径级数。

1.2.3 动能强度

太阳能喷灌系统动能强度由单位体积水滴动能及喷灌强度决定，表示单位时间内测点处的动能大小，计算式^[13]为：

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m E_{sdj}}{1000 \sum_{j=1}^m \frac{1}{6} \pi \cdot d_j^3} \times \frac{h_j}{3600} \quad (3)$$

式中： K 为至喷头距离 l 处的喷洒动能强度 (W/m²)； h_j 为至喷头不同距离处的喷灌强度 (mm/h)。

1.2.4 能量转换效率

测点的水滴总动能 E_{Tl} 由单个水滴动能 E_{sd} ，分

别乘以该直径级对应的粒子数 W ，累加后得出，计算式为：

$$E_{Tl} = \sum_{i=1}^0 \frac{1}{12} \pi \cdot \rho_w \cdot d^3 \cdot W \cdot V_{di}^2, \quad (4)$$

式中： E_{Tl} 为测点距离 l 处水滴总动能 (J)； l 为测点距离 (m)。

系统水滴总动能 E_T 由射程上所有点的水滴总动能 E_{Tl} 累加和得出。本系统中搭配 4 个相同喷头，因此计算式为：

$$E_T = 4 \sum_{l=0}^{Ra} E_{Tl}, \quad (5)$$

式中： E_T 为系统水滴总动能 (J)； Ra 为最远处水滴落点距喷头的距离 (m)。

根据公式 $J=W/s$ ，结合太阳能板总面积 16 m^2 和每次试验所用时间 5 min ，可计算得到对应光照强度下太阳能喷灌系统与雨滴能量转换效率 η 计算式：

$$\eta = \frac{1200 \sum_{l=0}^{Ra} \sum_{i=1}^0 \frac{1}{12} \pi \cdot \rho_w \cdot d^3 \cdot W \cdot V_{di}^2}{16x}, \quad (6)$$

式中： η 为太阳能喷灌系统能量转换效率； x 为光照强度 (W/m^2)。

2 结果与分析

2.1 水滴直径和速度分布

2.1.1 水滴直径分布

图 3 为在不同光照强度下的体积加权平均法^[14-15]计算出的水滴平均直径分布。

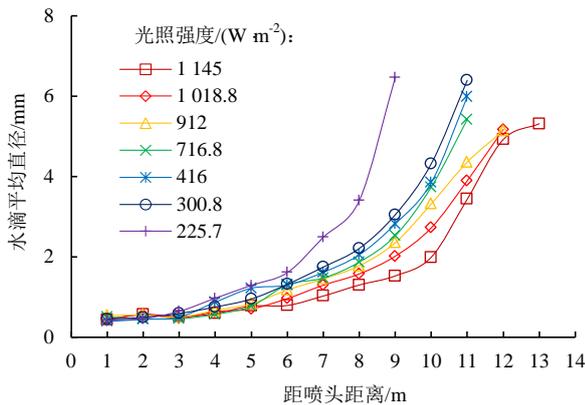


图 3 不同光照强度下水滴直径径向分布

Fig.3 Radial distribution of water drop diameter under different solar intensity

由图 3 可以看出，在任一光照强度下，水滴平均直径随着距喷头距离的增大而增大，增大幅度也逐渐变大。在距喷头 1~4 m 处，光照强度对水滴平均直径的影响较小，水滴平均直径基本维持不变。从距喷头 4 m 处开始，水滴平均直径开始随着光照强度的变化而变化。当光照强度为 $225.7 \text{ W}/\text{m}^2$ 时，水滴平均直径最大。当光照强度为 $716.8 \text{ W}/\text{m}^2$ 时，水滴平均直径减幅为 26%~66%。当光照强度为 $1145 \text{ W}/\text{m}^2$ 时，水滴

平均直径最小，水滴平均直径减幅为 32%~78%。由此可以看出，在距喷头距离 4 m 后，随着光照强度的增大，相同测点处水滴平均直径变小，变化幅度也逐渐较小。这是因为随着光照强度增大，太阳能板接收的能量越大，喷头压力增大，在空气中破碎形成的小水滴数量增多，因此水滴平均直径减小。

2.1.2 水滴速度分布

喷洒水滴速度是决定水滴打击动能的重要因素^[15]，图 4 为不同平均光照强度下水滴平均速度沿径向的变化情况分布。

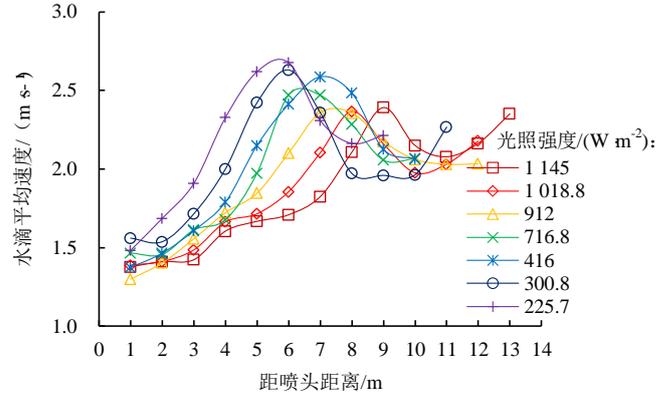


图 4 不同光照强度下水滴平均速度径向分布

Fig.4 Radial distribution of droplet average velocity under different solar intensity

由图 4 可以看出，当光照强度一定时，随着距喷头距离增大，水滴平均速度呈现先增大后减小的变化趋势，并在末端会有一些的回升。当光照强度为 $225.7 \text{ W}/\text{m}^2$ 时，最大水滴速度为 $2.67 \text{ m}/\text{s}$ ，最大速度出现在距离喷头 5.6 m 处。光照强度为 $716.8 \text{ W}/\text{m}^2$ 时，最大水滴速度为 $2.47 \text{ m}/\text{s}$ ，出现在距离喷头 6.6 m 处。光照强度为 $1145 \text{ W}/\text{m}^2$ 时，最大水滴速度为 $2.39 \text{ m}/\text{s}$ ，最大水滴速度出现点为距离喷头 9 m 处。可以看出，出现水滴速度最大点的距离随着光照强度的增加而增大，且光照强度越大，水滴最大速度越小。出现上述现象的原因是光照强度越大，喷洒水舌获得的初始动能增大，其水滴初始速度较大，飞行距离增大。因此，水滴速度最大点的距离随着光照强度的增加而增大。

2.2 水滴动能分布规律

2.2.1 单个水滴动能分布规律

根据式 (1) 分别计算距喷头距离为 4、6 和 8 m 处的不同水滴直径对应的单个水滴动能。图 5 为太阳能喷灌系统在不同平均光照强度下的单个水滴动能与水滴直径的关系。

从图 5 可以看出，在 7 种不同光照强度条件下，单个水滴动能随着水滴直径增大而增大，增大的幅度随直径增大而逐渐减小，呈幂函数关系。随着与喷头距离的增大，最大水滴直径越来越大，且光照强度的

变化对单个水滴动能的影响越来越小。由于洒水水舌被周围气体包围，水舌在惯性力、黏性力、重力和表面张力的共同作用下不断掺气而分裂出大量水滴，洒水水舌在破碎成水滴的过程中，从水舌表面逐渐向核心发展，水舌核心区产生的水滴直径与速度均较大。因此随着距喷头距离的增大，较大直径水滴所占比例越来越多；故距喷头越远处的水滴直径越大，速度越大，单个水滴动能也越大，单个水滴动能也相差越来越小。光照强度对单个水滴动能的影响主要集中在距离较近处的小直径水滴。

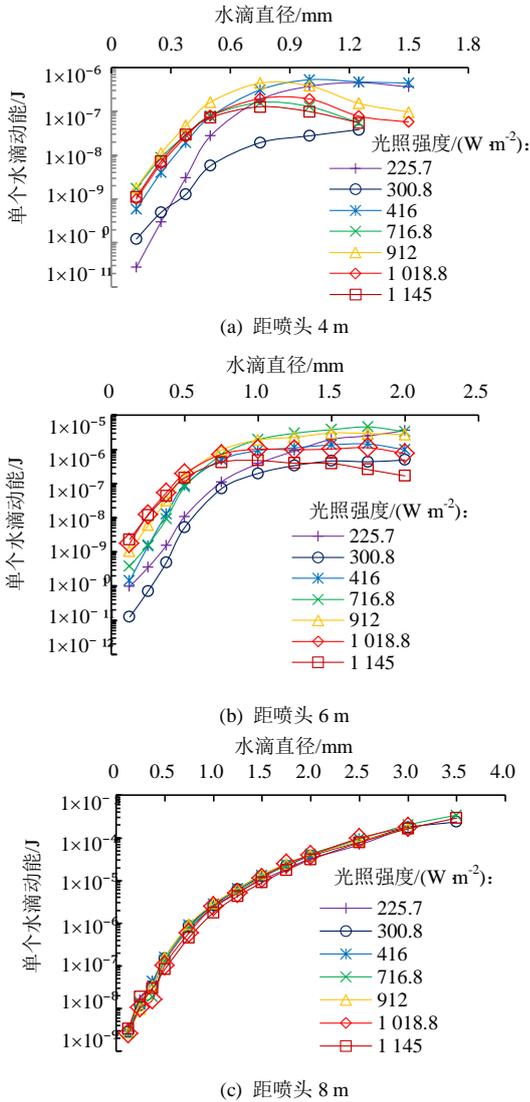


图5 不同光照强度下单个水滴动能分布
Fig.5 Kinetic energy distribution of single drop under different solar intensity

2.2.2 单位体积水滴动能分布规律

根据式(2)计算距喷头不同距离处的单位体积动能。图6为太阳能喷灌系统在不同平均光照强度下的单位体积动能径向分布。

由图6可以看出，光照强度的变化对单位体积动能的径向分布有较大影响。在测量点0~3 m范围内，不同光照强度下单位体积动能均较小且相差很小，波

动范围为0%~5%。在测量点3 m后，单位体积动能相差逐渐变大，随着光照强度的增大，单位体积动能呈先增加后减小并趋于稳定的过程。从光照强度为225.7 W/m²开始，随着光照强度增大，单位体积动能在300.8 W/m²时达到最大，后突然下降并趋于稳定，下降幅度为53%~75%，在光照强度为416~1145 W/m²时，单位体积动能相差不大，总体在0~0.1 J/L范围内浮动，差值不超过8%。在光照强度在300.8 W/m²时，距喷头距离为10 m时，单位体积动能达到最大值0.35 J/L。在光照强度大于416 W/m²后，水滴动能强度保持在0.1 J/L以下，较为稳定。

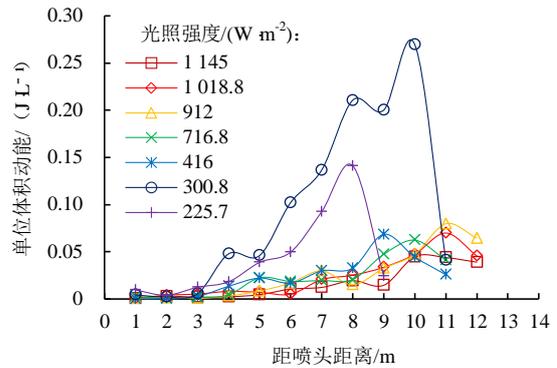


图6 不同光照强度下单位体积动能径向分布

Fig.6 Radial distribution of kinetic energy per unit volume under different solar intensity

为了研究太阳能喷灌系统在不同光照强度的单位体积水滴动能的径向分布规律，本文采用多项式回归分析法，建立了在不同光照强度范围内单位体积动能与距喷头距离大小的数学模型，计算式为：

$$E_{ks} = k_0x^4 + k_1x^3 + k_2x^2 + k_3x + b, \quad (7)$$

式中： E_{ks} 为单位体积水滴动能(J/L)； x 为测点距离(m)； k_0, k_1, k_2, k_3, b 为拟合系数。

本文系统采用R2000喷头，单位体积水滴动能与式(7)拟合相关系数均在0.9以上，拟合系数见表2。可见本文所建立的函数模型能较准确地反映单位体积动能分布情况。

表2 R2000单位体积动能径向分布拟合曲线

Table 2 The fitting model of radial distribution of kinetic energy per unit volume of R2000

光照强度/ (W m ⁻²)	数学模型					R ²
	k_0	k_1	k_2	k_3	b	
225.7	-0.001	0.012	-0.064	0.136	-0.079	0.900
338.3	-0.001	0.012	-0.064	0.138	-0.087	0.935
416.0	-	-0.002	0.014	-0.029	0.018	0.981
716.8	-	-0.002	0.012	-0.028	0.021	0.946
912.0	-	-0.002	0.010	-0.025	0.019	0.908
1018.8	-	0.001	-0.006	0.018	-0.013	0.906
1145.0	-	-0.001	0.007	-0.018	0.014	0.913

2.3 动能强度分布规律

根据式(3)计算距喷头不同距离处的动能强度。图7为太阳能喷灌系统在不同平均光照强度下的动能强度径向分布。

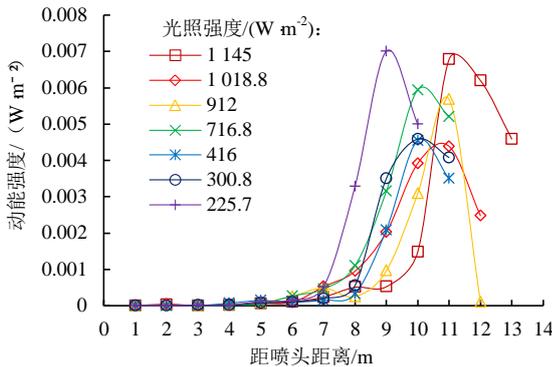


图7 不同光照强度下系统动能强度径向分布

Fig.7 Radial distribution of kinetic energy intensity under different solar energy intensity

由图7可以看出,动能强度随着距喷头距离的增大呈指数型增长,并在接近射程末端时突然下降。在测量点0~7 m范围内,动能强度均较小且相差很小,不同光照强度下波动范围低于5%。测点距离大于7 m后,随着光照强度的增加,动能强度相差逐渐增大,动能强度最大点距喷头的距离也逐步增大。除此之外,除最大和最小光照强度外,动能强度径向分布曲线的波动范围较小,低于15%。出现上述现象是因为动能强度是由对应测点的点喷灌强度和单位体积水滴动能共同决定,各光照强度下距喷头1~7 m处的点喷灌强度波动较小,7 m后喷灌强度逐渐增大并在射程末端迅速减小为0,单位体积动能则在光照强度大于416 W/m²后趋于稳定,影响较小。太阳能喷灌系统在光照强度300.8~1 018.8 W/m²时动能强度波动幅度较小,而在光照强度为225.7 W/m²和1 145 W/m²下工作时,射程末端动能强度变化幅度较大,不够稳定,易造成土壤板结,形成地表径流。

表3 能量转换效率

Table 3 Energy conversion efficiency statistical table

光照强度/ (W m ⁻²)	光照总 能量 (J)	拟合公式	R ²	拟合水滴 总能量 (J)	转换 效率/%
225.7	12.04	$y = 5 \times 10^{-5} e^{1.120x}$	0.987	4.48	37.21
300.8	16.04	$y = 1 \times 10^{-4} e^{0.751x}$	0.941	5.88	36.66
416	22.19	$y = 3 \times 10^{-4} e^{0.754x}$	0.967	8.00	36.05
716.8	38.23	$y = 1 \times 10^{-4} e^{0.906x}$	0.950	9.40	24.59
912	48.64	$y = 6 \times 10^{-4} e^{0.671x}$	0.973	12.88	26.48
1 018.8	54.34	$y = 3 \times 10^{-4} e^{0.755x}$	0.963	13.72	25.25
1 145	61.07	$y = 3 \times 10^{-4} e^{0.695x}$	0.941	15.56	25.48

2.4 能量转换效率

根据式(4)和式(5)计算系统水滴总动能,再由式(6)计算太阳能喷灌系统光照总能量与雨滴总

能量转换效率,表3为固定式太阳能喷灌系统在不同光照强度下的能量转换效率。

由表3可以看出,太阳能喷灌系统能量转换效率在24.59%~37.21%波动,并随着光照强度的增大,呈先减小后保持恒定的趋势。能量转换效率在光照强度为225.7~416 W/m²时较高,稳定在37%左右。当光照强度为416~716.8 W/m²时,能量转换效率随着光照强度的上升而下滑,从36.05%下降到24.59%,降幅达到31.8%。在光照强度在716.8~1 145 W/m²时,能量转换效率保持恒定,稳定在25%左右。出现上述现象是因为当光照强度介于716.8~1 145 W/m²时,光照强度较大,经过太阳能控制器转换而来的交流电较多,提供给离心泵的电能使泵达到额定转速,部分光照能量出现满溢,所以能量转换效率相对较低。当光照强度较低时,太阳能板接收的能量较少,经过太阳能控制器转换而来的交流电也较少,提供给离心泵的电能未能使泵达到额定转速,未出现能量满溢现象,大部分光照能量间接转化成水滴能量,因此能量转换率相对较高。

3 讨论

现有光伏参数的配置,多以月均日辐照强度下的光伏发电量与负载耗能之间的关系来确定^[8],本研究以小时为单元,更详细地研究了太阳能喷灌系统能量转换关系。本试验条件下的结果表明,任一光照强度下,水滴直径与距喷头距离呈指数关系,水滴平均速度随距喷头距离的增加先增大后减小;当光照强度从225.7 W/m²变化到1 145 W/m²,系统接收的太阳能更多,喷头的工作压力增大,空气中的破碎小水珠增多,使得相同测点处水滴平均直径逐渐变小,且变化幅度逐渐变小,水滴平均速度也随光照强度的增加而减小,与巩兴晖等^[17]、任乃望等^[6]试验结论一致。

单个水滴动能与水滴直径呈幂函数关系;单位体积水滴动能在距喷头近处均较小,随着距喷头距离增加而增大;动能强度沿径向距离增加,且在射程末端迅速减少至0,与朱兴业等^[16]研究全射流喷头喷洒规律结论一致。光照强度对动能的影响表现为,300.8~1 018.8 W/m²时动能波动幅度较小;225.7 W/m²和1 145 W/m²时,射程末端动能强度变化幅度较大,不够稳定。本研究的系统配置不建议应用于光照强度过小或过大的地区,易造成土壤板结,形成地表径流。

太阳能灌溉系统为达到满足基本功能且投入最小的目的,首部和动力的技术是关键,合适的供电功率有利于降低功耗,能量转换关系的研究有助于太阳能喷灌系统喷洒性能的提高^[18-20]。本研究结果表明,

随着光照强度的增大, 能量转换效率呈先减小再保持恒定的趋势; 光照强度在 $225.7\sim 416\text{ W/m}^2$ 时, 系统能量转换效率最高, 为 36% 左右。结合上述动能的稳定性结果分析, 本文系统在光照强度为 $300.8\sim 416\text{ W/m}^2$ 的地区运行能量更稳定, 转换效率更高, 相似地区考虑太阳能喷灌系统选型时可参考本研究。

4 结论

1) 单个水滴动能随着水滴直径增大呈幂函数关系, 光照强度对其影响主要集中在距离较近处的小直径水滴。利用多项式回归法建立了光照强度、单位体积水滴动能和距喷头距离的数学模型, 拟合相关系数达到 0.9 以上。本文建立的数学模型较准确能反映实际情况。

2) 动能强度沿径向距离增加, 且在射程末端迅速减少至 0。为减小水滴动能对土壤的侵蚀, 尽量选择光照强度在 $300.8\sim 416\text{ W/m}^2$ 的地区。

3) 在光照强度为 $300.8\sim 416\text{ W/m}^2$ 的地区, 太阳能喷灌系统动能强度波动幅度最小, 能量分布更均匀, 能量转换效率更高。

参考文献:

- [1] ABDELOUAHED S, MOHAMED O, HASSAN O, et al. An embedded solar-powered irrigation system based on a cascaded fuzzy logic controller [J]. *Asian Journal of Control*, 2019, 21(4): 1 941-1 951.
- [2] 李丹, 朱德兰, 林明月, 等. 卷盘式喷灌机牵引装置油光互补供电系统配置优化[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 131-139.
LI Dan, ZHU Delan, LIN Mingyue, et al. Optimal configuration for gasoline-solar complementary driven traction device of hard-hose traveler[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 131-139.
- [3] 张楷, 任岩. 基于混沌粒子群的风/光/普适农业互补系统优化研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(S1): 133-136.
ZHANG Kai, REN Yan. Optimization of Hybrid Wind/PV/Universal agriculture system based on chaotic particle swarm[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(S1): 133-136.
- [4] 李加念, 洪添胜, 倪慧娜. 基于太阳能的微灌系统恒压供水自动控制装置研制[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 86-93.
LI Jianian, HONG Tiansheng, NI Huina. Constant pressure water supply automatic device designed for micro-irrigation system based on solar energy [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12): 86-93.
- [5] 白更, 严海军, 王敏. 洒水水滴直径面粉测定法改进[J]. *农业机械学报*, 2014, 42(4): 76-80.
BAI Geng, YAN Haijun, WANG Min. Measuring sprinkler droplet size with modified flour methodology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2014, 42(4): 76-80.
- [6] 任乃望, 胡明月, 付博阳, 等. 动态水压对坡地喷灌水滴直径分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(10): 72-82.
REN Naiwang, HU Mingyue, FU Boyang, et al. Effect of Pulsating Pressure on Water Droplet Diameter Distribution for Sprinkler Irrigation on Sloping Land[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(10): 72-82.
- [7] 朱兴业, 刘兴发, 刘俊萍, 等. 全射流喷头洒水水滴动能分布规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 26-31.
ZHU Xingye, LIU Xingfa, LIU Junping, et al. Droplet kinetic energy distribution regulation of complete fluidic sprinkler [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 26-31.
- [8] MAMAGHANI A H, ESCANDON S A A, NAJAFI B, et al. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in colombia[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 293-305.
- [9] 王可法, 张卉慧, 张伟, 等. 激光雨滴谱仪观测降水中异常数据的判别及处理[J]. *气象科学*, 2011, 31(6): 732-736.
WANG Kefa, ZHANG Huihui, ZHANG Wei, et al. The detection and elimination of abnormal data for the precipitation observed by Parsivel precipitation particle spectrometer[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(6): 732-736.
- [10] KING B A, WINWARD T W, BJORNEBERG D L. Laser precipitation monitor for measurement of drop size and velocity of moving spray-plate sprinklers[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2010, 26(2): 263-271.
- [11] BAUTISTA C, ROBLES H, SALINAS E, et al. A particle tracking velocimetry technique for drop characterization in agricultural sprinklers[J]. *Irrigation Science*, 2014, 41(4): 602-607.
- [12] 徐红, 龚时宏, 贾瑞卿, 等. 新型 ZY 系列摇臂旋转式喷头水滴粒径分布规律的试验研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1 416-1 422.
XU Hong, GONG Shihong, JIA Ruiqing, et al. Study on droplet size distribution of ZY sprinler head[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1 416-1 422.
- [13] SCHÖNHUBER M, RANDEU W L, URBAN H E, et al. Field measurements of raindrop orientation angles[J]. *European Space Agency, (Special Publication)*, 2000, 444: 9-14.
- [14] KOHL R A. Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers [J]. *Transactions of the ASAE*, 1974, 17(4): 0690-0693.
- [15] KINCAID D C, SOLOMON K H, OLIPHANT J C. Drop size distributions for irrigation sprinklers[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39: 839-845.
- [16] 朱兴业, 刘兴发, 刘俊萍, 等. 全射流喷头洒水水滴动能分布规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 26-31.
ZHU Xingye, LIU Xingfa, LIU Junping, et al. The distribution of kinetic energy of water droplets sprayed by a full jet nozzle[J]. *Journal*

- of Agricultural Engineering, 2015, 31(15): 26-31.
- [17] 巩兴晖, 朱德兰, 张林, 等. 基于 2DVD 的非旋转折射式喷头水滴直径分布规律[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 128-133, 148.
- GONG Xinghui, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Water droplet diameter distribution of non-rotating refraction nozzle based on 2DVD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 128-133, 148.
- [18] 邱林, 覃江峰. 基于太阳能光伏技术的农田智能化灌溉系统[J]. 江苏农业科学, 2016(5): 373-376.
- QIU Lin, QIN Jiangfeng. Intelligent farmland irrigation system based on solar photovoltaic technology[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016(5): 373-376.
- [19] 李文斌, 吴昌洪, 李新建. 广西糖料蔗主产区太阳能光伏提水系统分析与研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(8): 69-70.
- LI Wenbin, WU Changhong, LI Xinjian. Analysis and research on solar photovoltaic water extraction system in the main sugarcane production areas in Guangxi[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(8): 69-70.
- [20] 罗斌, 李秉晟, 王浩, 等. 基于太阳能的自动灌溉系统设计[J]. 现代农业装备, 2020, 41(3): 60-64.
- LUO Bin, LI Bingsheng, WANG Hao, et al. Design of automatic irrigation system based on solar energy[J]. Modern Agricultural Equipment, 2020, 41(3): 60-64.

Kinetic Energy Distribution of Water Droplets in Fixed Solar Sprinkler Irrigation System

LIU Junping, JIANG Nan*, XU Ji'en, LI Jipeng, ZHANG Qing

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: **【Background】** Solar sprinkler irrigation system is energy-efficient and can reduce operation costs, but it is susceptible to weather and timing of irrigation as insufficient energy supply may occur when demand for power peaks during the irrigation. This could result in low energy conversion efficiency and destabilize hydraulic performance of the system. Light radiation, as an important parameter in designing solar irrigation systems, varies spatiotemporally and could affect the amount of solar energy absorbed by the solar panel and result in unstable electricity supply and changes in water pressure in the system. Currently, there is a lack of protocol for optimizing configuration of the operating parameters of the solar sprinkler irrigation systems. **【Objective】** Considering that existing solar sprinkler irrigation systems are prone to unstable water pressure, uneven energy distribution and low conversion efficiency, this paper aims to elucidate how light intensity affects the spray performance of the sprinkler irrigation system. **【Method】** The hydraulic performance parameters of a solar sprinkler irrigation system under light intensities between 225.7 and 1 145 W/m² were measured using laser raindrop spectrometer technology, from which we calculated the kinetic energy distribution of the water droplets, kinetic energy per unit volume of water, and the kinetic energy intensity. We also proposed a method to calculate the energy conversion efficiency of the system.

【Result】 The light intensity mainly affected the kinetic energy of small water droplets with diameter less than 1 mm in the proximity of the sprinkler. As the light intensity increased, the kinetic energy per unit volume increased first and then declined asymptotically in a trend which can be fit by a fourth-degree polynomial function. With the increase in the radial distance from the sprinkler, the kinetic energy intensity increased first and then gradually reduced to 0 at the far end. With the light intensity varying between 300.8 and 1 018.8 W/m², the kinetic energy intensity only showed a small fluctuation and the energy conversion efficiency of the system varied between 24.59% to 37.21%. When the light intensity was in 225.7~416 W/m², the conversion efficiency of the energy intensity peaked approximately at 36%. **【Conclusion】** When the light intensity was within 300.8~416 W/m², the kinetic energy showed the smallest fluctuation, the energy distribution was most uniform, and the energy conversion efficiency maximized. Our results provide a baseline guidance for improving spray performance and energy conversion rate of solar sprinkler irrigation system, and helping optimize configuration of its operating parameters.

Key words: solar sprinkler irrigation system; light intensity; water droplets distribution; kinetic energy intensity; energy conversion

责任编辑: 韩洋