doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.013

折射式喷头喷灌强度及能量空间变化规律研究*

张以升[1]　朱德兰[1,2]　张　林[2]　巩兴晖[1]　杨　雯[1]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;
2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西杨凌 712100)

摘要: 采用自计雨量筒、视频雨滴谱仪(2DVD)测得不同工作压力下 Nelson D3000 型蓝色喷盘、喷嘴直径 4.76 mm 喷头的喷洒水量、喷灌水滴落地速度及粒径等指标,研究了不同压力下该喷头的水量、能量分布及其扩散规律,建立了不同工况下水量峰值、能量峰值与工作压力及喷灌高度的回归关系式。结果表明:增大喷头工作压力、升高喷头安装高度均有利于水量及能量的扩散;喷头的安装高度过低会导致较高的水量峰值和能量峰值,易产生地表径流,0.5 m 高度水量峰值变化范围为 166.4~196.4 mm/h,能量峰值变化范围为 0.607~0.821 W/m^2。喷头水量峰值和能量峰值的计算式可为确定喷灌系统工作压力和喷头安装高度提供参考依据,避免因水量峰值和能量峰值过大而产生地表径流。

关键词: 折射式喷头　喷灌强度　能量　峰值　空间变化

中图分类号: S275.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2015)07-0085-06

Spatial Variation of Application Rate and Droplet Kinetic Energy for Fixed Spray Plate Sprinkler

Zhang Yisheng[1]　Zhu Delan[1,2]　Zhang Lin[2]　Gong Xinghui[1]　Yang Wen[1]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Data logging rain gauges and two-dimensional video disdrometer (2DVD) were applied to measure its water application rate, droplet diameter and velocity in radial direction of Nelson D3000 blue spray plate sprinkler with 4.76 mm nozzle. The equations of peak application, peak kinetic energy rate about working pressure and mounting height were regressed based on the diffusion of water application and kinetic energy under different working conditions. The result indicates that the diffusion of water application rate and droplet kinetic energy are facilitated by increasing the working pressure and mounting height. This is due to that the jet flow speed is higher when the operating pressure increased, and with the air turbulence enhanced, it is easy to smash. The water drops to pieces. At the same time, the duration of landing increased when the mounting height is high. That seems to have the same effect. The low nozzle height which presents high peak application and kinetic energy rate leads to the generation of runoff. The peak water application and droplet kinetic energy rate varied from 166.4 mm/h to 196.4 mm/h, and 0.607 W/m^2 to 0.821 W/m^2, respectively. The equation of peak rate can be helpful to design the working pressure and mounting height in sprinkler systems to prevent high peak application rate and kinetic energy rate which leading to occurrence of runoff.

Key words: Fixed spray plate sprinkler　Application rate　Kinetic energy　Peak value　Spatial variation

收稿日期:2014-10-27　修回日期:2014-12-06

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B02)、国家工程技术研究中心再建资助项目(2011FU125Z27-1)、高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007)和国家自然科学基金青年基金资助项目(51409244)

作者简介: 张以升,博士生,主要从事灌溉排水新技术研究,E-mail: hnsqzys@163.com

通讯作者: 朱德兰,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: dlzhu@126.com

引言

Nelson D3000 型喷头在移动式喷灌机上应用广泛,其喷洒形式呈多股水束分布,当水束从喷头射出后,若扩散不充分,会造成喷灌水量集中,产生较大的水量峰值[1-3],易产生地表径流;若喷灌能量过大,会对土壤结构造成破坏,致使表层土壤压实,影响土壤入渗,一定程度上也会导致地表径流的发生[4-7],降低了水分利用率。多位学者[8-11]分析了土壤容重及水分入渗速率对水分利用率的影响,探讨了喷灌设计中水量及能量分布的重要性。喷灌中土壤及作物受打击伤害,多是由于较大的喷灌强度及能量引起,因此需要探明不同工况下喷灌强度及能量的变化规律。

国内外学者对 Nelson D3000 型喷头水量分布做了大量研究。Sayyadi 等[1]通过对 Nelson 型喷头室内试验,分析了 1.5 m 安装高度下喷头的水量分布,发现随着压力增大,水量峰值减弱,喷灌水扩散较为均匀;Kincaid[12]对安装有 Nelson 型喷头的时针式喷灌机进行室外试验,分析了不同类型喷头平均灌水强度及峰值水量,提出了峰值水量的计算方法,为预测地表径流提供了参考。Kohl 等[13]和 Basahi[14]等研究发现,喷灌水落地动能与喷灌压力有关,结果显示,当压力增大时,落地动能增大。此前对该喷头的研究大多是在一个安装高度下,通过改变喷嘴直径、喷头工作压力来分析喷灌水量变化规律,而对不同压力下峰值水量及峰值能量的空间扩散研究较少。

Nelson D3000 型喷头各水束在环向之间的水量分布和能量分布较为接近[15],在移动喷灌时,喷灌机行走速度一般较低,地面点在喷灌峰值过境时,其强度及能量与固定时水束峰值差别不大。本文选取一条水束进行室内试验,测定不同工况下单条水束固定时喷洒半径、水量分布、水滴粒径及速度等指标,分析水量、能量分布及扩散规律,通过研究水量峰值和能量峰值空间变化,建立不同工况下水量峰值及能量峰值随压力及安装高度的计算公式,为减小喷洒峰值区对土壤及作物的打击伤害,提出合理的喷头高度和喷灌压力。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验装置

试验采用的喷头为 Nelson D3000 型蓝色喷盘折射式喷头,喷嘴编号为 24(直径为 4.76 mm),如图 1 所示。试验在中国旱区节水农业研究院灌溉水力厅进行,测试装置主要包括水箱、水泵、流量计(EMF5000 型电磁流量计,量程为 0.289 5 ~ 28.95 m^3/h)、喷头支架、压力表(西安仪表厂 0.4 级精密压力表)、自计雨量筒(HOBO RG3 - M 型)和 2D 视频雨滴谱仪(Joanneum Research 公司)等。

图 1 Nelson D3000 型喷头和喷嘴

Fig. 1 Nelson D3000 sprinkler with blue plates

1.2 测试指标与测试方法

(1)喷灌强度

采用 HOBO RG3 - M 型自计雨量筒(精度 ±1%,分辨率 0.02 mm,筒高 25.7 cm,内径 15.2 cm)收集喷洒水量,雨量筒沿射流方向布设,布设间距为 1 m。为了能够完整的测得单条水束的水量及能量分布,在水量扩散区域,对测点进行拓宽及加密布置(图 2)。雨量筒收集沿射流方向上该喷头的喷洒水量,测试时间为 1 h。

(2)水滴落地粒径与速度

水滴粒径与速度的测量采用 2D 视频雨滴谱仪[16-17](Two-dimensional video disdrometer,2DVD),在沿射流方向上采集数据,采集点与水量分布雨量筒布设点相同,对 2DVD 数据实时监控,如图 3 所示。

1.3 试验方法

喷头测试高度设置 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m 5 个水平,在 50、100、150、200 kPa 4 个喷头工作压力下,测定 Nelson D3000 型喷头喷灌强度、落地水

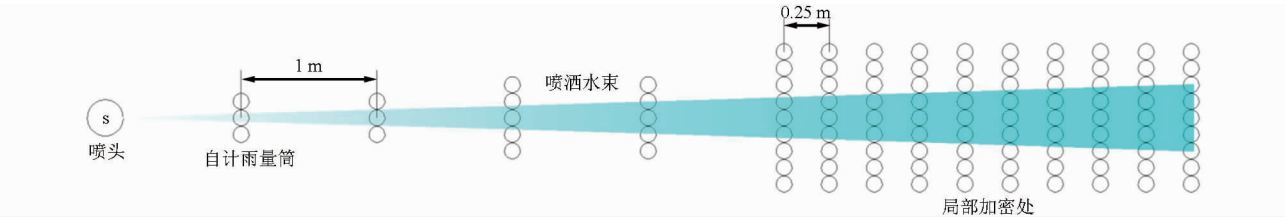

图 2 水量分布测试示意图

Fig. 2 Experimental setup for water distribution

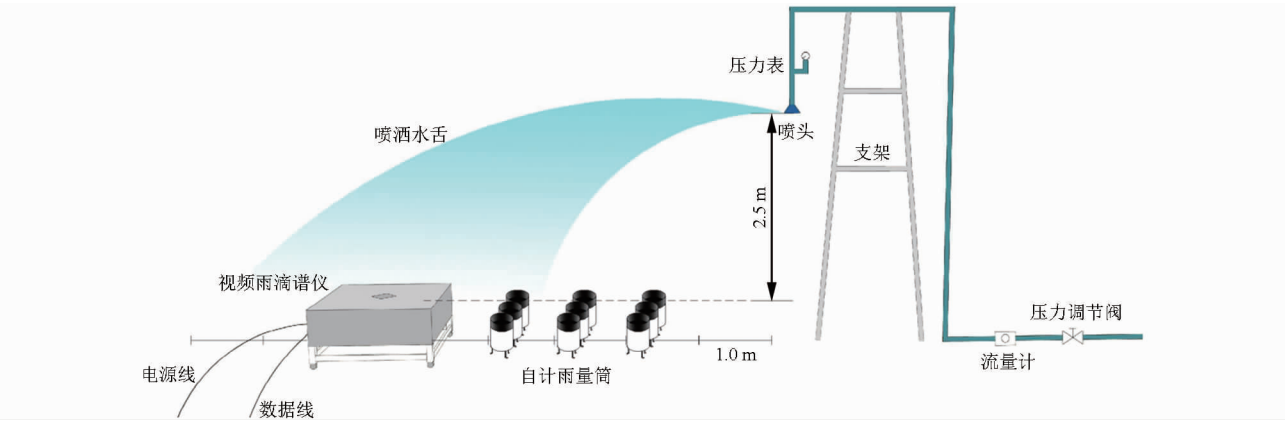

图 3　喷洒水测试示意图

Fig. 3　Experimental setup for spray characterization

滴粒径及速度、喷头流量、喷洒距离等指标。

2　结果分析

2.1　喷灌强度变化规律

为计算单条水束的有效喷洒面积，分析单条水束喷射距离及喷洒幅宽时，以最外侧自计雨量筒测得的降雨量为零作为边界[1]，试验测得距离喷头中心线 0.425 m 处已无有效降水，即喷头有效喷洒区域宽度为 0.85 m。根据试验结果绘制 0.5 ~ 2.5 m 安装高度、50 ~ 200 kPa 工作压力下的径向水量分布曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出，同一压力下，随着喷灌高度的升高，喷头射程增加，水量分布较为均匀。如图 4a 所示，在 50 kPa 工作压力、0.5 m 安装高度下，水量集中分布在距喷头 2.5 m 处，最大平均喷灌强度为 66.13 mm/h，当喷头距离地面高度升高至 2.5 m 时，喷头射程最大为 5.28 m，最大喷灌强度降低至 32.93 mm/h。工作压力由 50 kPa 增大为 200 kPa 时（图 4d），0.5 ~ 2.5 m 的安装高度下，喷头最大强度分别为 37.07、27.06、29.46、27.06、28.04 mm/h。由此可以看出，低压喷灌时，喷灌强度随高度的升高减弱较为明显；当压力大于 100 kPa 时，喷头距地面高度 1.0 ~ 2.5 m 时，降雨强度变化幅度较小。

当安装高度相同时，随着压力的增大，喷灌射程增大，0.5 m 安装高度、工作压力为 50 ~ 200 kPa 时，最大喷灌强度分别为 66.13、65.07、65.87、65.6 mm/h；安装高度升高至 1.5 m 时，喷灌强度减弱，其值分别为 37.66、37.76、32.66、37.76 mm/h；当喷头距地面 2.5 m 时，不同压力下喷灌强度在 30 mm/h 左右。

2.1.1　水量峰值变化

图 5 为不同工作压力下水量峰值强度空间变化柱状图。从图中可以看出，相同压力下，0.5 m 高度时，水量峰值强度最大，当高度升高至 1.0 m 时，水量峰值强度急剧降低，1.0 ~ 2.5 m 喷灌高度降低相对较小。50 kPa 工作压力下，0.5 m 安装高度水量峰值强度为 196.4 mm/h，1.0 m 安装高度下水量峰值强度减小至 111.2 mm/h，当高度增大至 2.5 m 时，水量峰值强度降至最低，其值为 65.6 mm/h；当工作压力增大至 200 kPa 时，水量峰值强度最大为 166.4 mm/h，最小为 52.4 mm/h。由此可以看出，0.5 m 喷灌高度产生较大的水量峰值强度，易对土

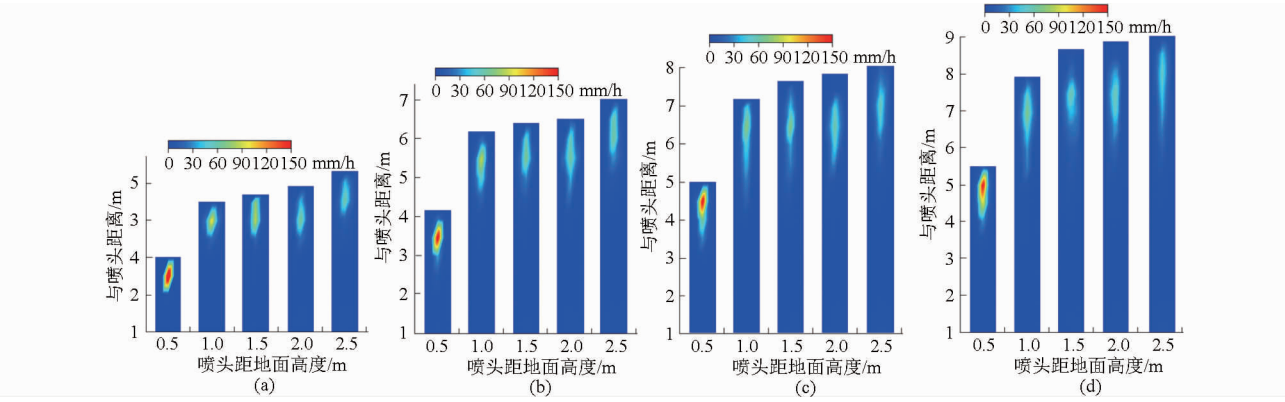

图 4　不同安装高度下平均喷灌强度变化

Fig. 4　Contour maps of application rate with different mounting heights

(a) 50 kPa　(b) 100 kPa　(c) 150 kPa　(d) 200 kPa

壤结构产生破坏,为最不利喷灌高度。相同高度下,水量峰值强度随着压力的增大而呈现减小趋势,但减小的效果不明显,这是由于随着压力的增大,喷头流量增大,这在一定程度上弥补了由于水分充分扩散而造成的水量峰值强度减小的损失。

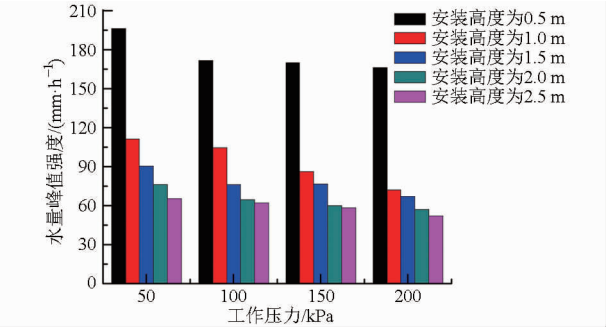

图 5 水量峰值强度变化柱状图

Fig. 5 Peak application rate at different working pressures

分别分析水量峰值强度与工作压力、安装高度的关系,发现非线性关系较为明显,其中指数模型回归系数较高,应考虑指数模型。利用 SPSS 软件,建立多元非线性指数模型,回归出水量峰值强度 R_p 随压力 P 及喷头安装高度 H 的变化函数为

$$R_p = 228.055P^{-0.167}H^{-0.727} \quad (R^2 = 0.973) \tag{1}$$

式(1)可以计算工作压力 50 ~ 200 kPa、安装高度 0.5 ~ 2.5 m 范围内任一工况下的水量峰值强度,为合理布置喷头间距、减小水量峰值强度对作物和土壤的打击伤害提供计算依据。

2.1.2 喷灌水扩散分析

以上分析可以看出,射流过程中随着高度及压力的增大,水量扩散区域均匀,Kincaid 等[12]用峰值喷灌强度与平均喷灌强度的比值 r 分析喷灌水在空间的扩散规律,其表达式为

$$r = R_p / R_a \tag{2}$$

式中 r——水量扩散系数,值越接近 1 扩散越均匀

R_p——峰值喷灌强度,mm/h

R_a——平均喷灌强度,mm/h

R_a 为单位时间内喷头喷洒水量与控制面积的比值,即

$$R_a = 100Q/S \tag{3}$$

其中 $S = LW$

式中 Q——流量,s^{-1}

S——喷洒面积,m^2

L——喷洒宽度,m,试验测得 $L = 0.85$ m

W——喷洒距离,m,由试验测得

由式(2)和(3)计算可得不同工况下水量扩散系数为

$$r = R_p LW/(100Q) \tag{4}$$

利用式(4)计算不同工况下 r 值,结果见表 1。

表 1 不同工况下水量扩散系数

Tab. 1 Diffusion of water application at different working conditions

工作压力	安装高度 H/m				
P/kPa	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
50	27.82	23.63	20.06	17.68	16.36
100	25.59	23.01	17.77	14.92	15.37
150	24.08	17.67	16.76	13.43	13.24
200	22.23	14.07	14.20	12.36	11.45

造成水分扩散主要原因是射流水舌的碎裂。相同压力下,随着高度的增大,雨滴在空气中的运动时间延长,碎裂较为充分,小粒径液滴比例增大,当较大液滴碎裂产生较小粒径的雨滴时,改变了原有的飞行轨迹,使较为集中的水量得以充分扩散;当高度相同时,随着压力的升高,射流流速增大,高速水流在空气中摩擦变形,水舌碎裂较为充分,产生了较多的小粒径液滴,一定程度也有利于扩散的产生。

从表 1 中可看出水量扩散系数 r 远大于 1,这是由于射流过程中局部水量过于集中,距离喷头较近位置处水量较少,使得水分扩散的较不均匀。0.5 m 安装高度、50 kPa 工作压力下 r 最大,扩散最不均匀;增大工作压力、升高喷头安装高度,r 降低效果明显,2.5 m 安装高度、200 kPa 工作压力下 r 最小。当增高喷灌压力,喷灌水滴在空中碎裂充分,喷灌水在空间扩散较为均匀,但会增大喷灌投入成本,为增大水分扩散,可选择较低压力和较高的喷头安装高度。

2.2 落地动能变化规律

能量通量密度是产生地表径流一项重要指标[18],公式为

$$S_p = \frac{\sum_{i=1}^{D_n} \frac{\rho_w d_i^3 v_i^2}{12}}{1\,000 \sum_{i=1}^{D_n} \frac{\pi d_i^3}{6}} \frac{R_i}{3\,600} \tag{5}$$

式中 D_n——雨滴总数

S_p——能量通量密度,W/m^2

ρ_w——水密度,kg/m^3

d_i——第 i 个雨滴直径,m

v_i——第 i 个雨滴速度,m/s

R_i——该测量点的水量,mm/h

根据式(5)计算表(1)中各测点的能量通量密度,并利用 Surfer 软件绘制能量分布云图(图 6)。从图中可以看出,当压力相同时,随着喷灌高度的增大,能量扩散得较为均匀。50 kPa 压力时,能量在 0.5 m 高度最为集中,出现在距离喷头中心 2 ~ 3 m

位置处，随着高度的升高，能量逐渐向四周扩散，且能量集中区域位置沿径向向外迁移，当喷头距地面 2.5 m 高度时，能量扩散最为均匀。当压力升高至 200 kPa 时，0.5 m 高度下能量集中区域距喷头中心位置为 4.0～5.5 m，2.5 m 高度下能量集中现象得到有效改善。相同安装高度下，喷灌能量随着压力的增大而增大，0.5 m 高度、200 kPa 工作压力下能量最为集中，2.5 m 高度、50 kPa 工作压力下能量扩散最为均匀，出现此现象的主要原因是：当安装高度相同时，随着压力的增大，虽然水量扩散较为均匀，但是由于高压下水量的增大及雨滴速度的增加，使得水量集中区域的雨滴动能增大。

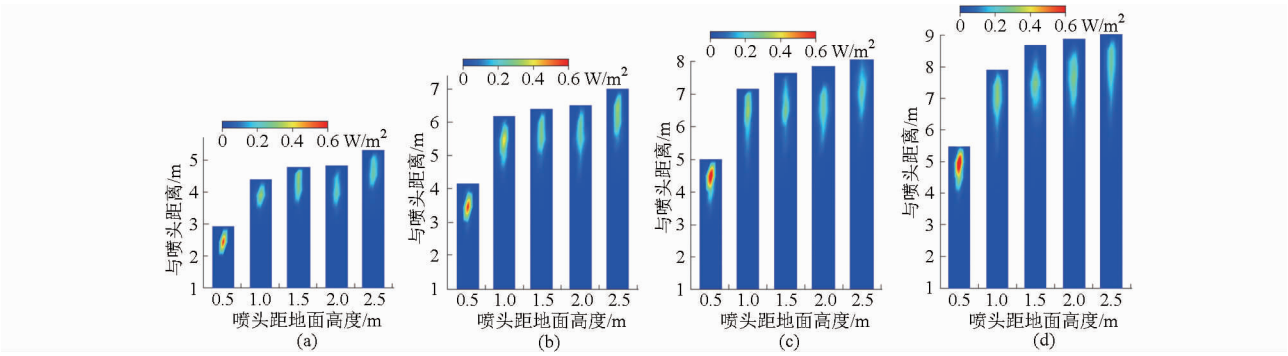

图 6　不同安装高度下平均喷灌动能变化

Fig. 6　Contour maps of kinetic energy of different mounting heights

(a) 50 kPa　(b) 100 kPa　(c) 150 kPa　(d) 200 kPa

2.2.1　能量峰值变化

图 7 为不同压力下能量峰值变化柱状图。从图中可以看出，0.5 m 安装高度下能量峰值明显高于其他高度，该安装高度下，由于水滴粒径随着压力的升高而增大，并且水分扩散得不够均匀，使得喷灌能量峰值随着压力的升高而增大；在 1.0～2.5 m 安装高度下，能量峰值规律性不强，原因是在该安装高度范围内，随着压力的增大，虽然水量扩散相对较均匀，但是由于水滴运动速度的增大，弥补了由于水量扩散产生的峰值削减现象。

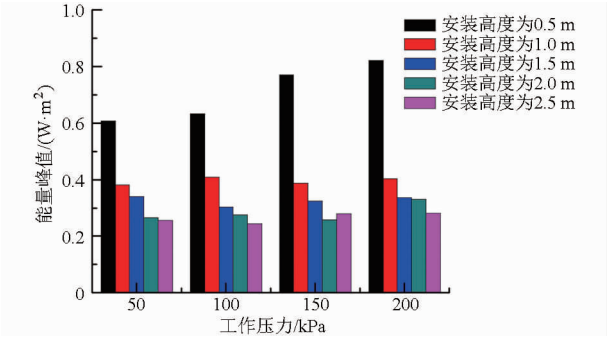

图 7　能量峰值变化柱状图

Fig. 7　Bar chart of peak kinetic energy rate

当工作压力相同时，能量峰值总体趋势随着安装高度的增加而降低，50 kPa 工作压力下，能量峰值在 0.5 m 出现极大值，为 0.607 W/m²，在 2.5 m 安装高度下出现极小值，为 0.255 W/m²，能量峰值耗散效果较为明显。100、150 kPa 工作压力下，能量峰值在 2.5 m 时出现拐点，表明在 2.5 m 安装高度时雨滴速度增大产生的动能增大效果高于水分扩散产生的能量削弱效果。较大的喷灌动能对作物和土壤的作用力较大，为减小对土壤和作物的打击伤害，应选择较高的喷灌高度和较低的喷灌压力。

利用水量峰值分析方法，回归出能量峰值 N_p 随压力 P 及喷头安装高度 H 的变化函数为

$$N_p = 0.217P^{0.147}H^{-0.675} \quad (R^2 = 0.948) \tag{6}$$

式(6)为 Nelson D3000 型喷头能量峰值计算公式，在给定压力及安装高度条件下可计算该喷头能量峰值。

2.2.2　能量扩散分析

根据水量扩散分析方法分析能量扩散，分析喷灌能量峰值与平均喷灌能量的比值为

$$n = N_p / N_a \tag{7}$$

式中　n——能量扩散系数

N_a——平均喷灌能量，W/m²

利用 Surfer 软件体积计算，得出不同工况下能量通量密度体积即为该工况下的总能量 N_s，总能量与控制面积 S 的比值即为平均喷灌能量 N_a。

采用式(7)计算不同压力、不同安装高度下的能量扩散系数 n，如表 2 所示。

表 2　不同工况下能量扩散系数

Tab. 2　Diffusion of kinetic energy under different working conditions

工作压力	安装高度 H/m				
P/kPa	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
50	29.32	25.92	23.05	18.65	17.65
100	29.18	24.34	19.09	17.17	14.96
150	30.35	21.83	19.33	15.71	16.41
200	28.58	20.32	18.49	18.43	14.62

当 $n=1$ 时,能量扩散最为均匀,从表 2 中可以看出 0.5 ~ 2.5 m 安装高度、50 ~ 200 kPa 工作压力下,n 变化范围为 14.62 ~ 29.32,远大于 1,说明能量扩散得不够均匀。随着高度的增大,n 减小,表明当高度增加时,水分扩散得较为均匀;当压力升高时,n 呈降低趋势,降低规律性不明显,这是因为能量峰值不仅由水量峰值决定,还与峰值处水滴粒径、水滴速度有关。

3 结论

(1)喷灌水量及能量的扩散与喷头的安装高度、工作压力有关;较高的安装高度、较大的工作压力,有利于射流水舌的碎裂,水量及能量扩散较为均匀。

(2)喷头的安装高度过低会导致较高的水量峰值和能量峰值,对土壤和作物不利;增大喷头安装高度会降低水量和能量峰值;较大压力会降低水量峰值,能量峰值降低不明显。

(3)回归出 Nelson D3000 型折射式喷头能量峰值及水量峰值计算公式,为喷灌机设计提供了参考依据,避免因水量峰值和能量峰值过大而产生地表径流。

参 考 文 献

1 Sayyadi H, Nazemi A H, Sadraddini A A, et al. Characterising droplets and precipitation profiles of a fixed spray-plate sprinkler [J]. Biosystems Engineering, 2014, 119: 13 – 24.

2 King B A, Bjorneberg D L. Evaluation of potential runoff and erosion of four center pivot irrigation sprinklers [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(1): 75 – 85.

3 Kincaid D C, Heermann D F, Kruse E G. Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation[J]. Transactions of the ASAE, 1969, 12(6): 790 – 794.

4 Assouline S, Mualem Y. Modeling the dynamics of seal formation and its effect on infiltration as related to soil and rainfall characteristics[J]. Water Resources Research, 1997, 33(7): 1527 – 1536.

5 Thompson A L, James L G. Water droplet impact and its effect on infiltration[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(5): 1506 – 1510.

6 Mohammed D, Kohl R A. Infiltration response to kinetic energy[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(1): 108 – 111.

7 King B A, Bjorneberg D L. Characterizing droplet kinetic energy applied by moving spray-plate center-pivot irrigation sprinklers [J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(1): 137 – 145.

8 刘海军, 康跃虎. 喷灌动能对土壤入渗和地表径流影响的研究进展[J]. 灌溉排水, 2002, 21(2): 71 – 75.
Liu Haijun, Kang Yuehu. Effects of droplets kinetic energy on soil infiltration rate and surface runoff under sprinkler irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2002, 21(2): 71 – 75. (in Chinese)

9 Santos F L, Reis J L, Martins O C, et al. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3): 355 – 364.

10 King B A, Bjorneberg D L. Infiltration model for center pivot irrigation on bare soil[C]//ASABE Annual International Meeting, 2012: 1 – 20.

11 Hasheminia S M. Controlling runoff under low pressure center pivot irrigation systems[J]. Irrigation and Drainage Systems, 1994, 8(1): 25 – 34.

12 Kincaid D C. Application rates from center pivot irrigation with current sprinkler types[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(4): 605 – 610.

13 Kohl R A, deBoer D W, Evenson P D. Kinetic energy of low pressure spray sprinklers[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(5): 1526 – 1529.

14 Basahi J M A M. A piezoelectric film sensor improvement and evaluation for measuring water droplet impact energy and determining droplet impact effects on soil surfaces[D]. College Station, TX: Texas A&M University, 1998.

15 严海军. 基于变量技术的圆形和平移式喷灌机水量分布特性的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
Yan Haijun. Study on water distribution uniformity of center pivot and lateral move irrigation systems based on variable rate technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)

16 Kruger A, Witold F Krajewski. Tow-dimensional video disdrometer: a description[J]. Journal of Antmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 602 – 617.

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. Drop size distribution of fixed spray-plate sprinklers with two-dimensional video disdrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 128 – 133, 148. (in Chinese)

18 King B A, Bjorneberg D L. Droplet kinetic energy of moving spray-plate center-pivot irrigation sprinklers [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(2): 505 – 512.