排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2022 年 1 月 Jan. 2022 | 第 40 卷 第 1 期 Vol.40 No.1

水药一体化喷头结构设计与水力性能试验

张晴，刘俊萍*，袁寿其，李扬帆，李红
（江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）


张晴

摘要： 将水药一体化技术应用于喷灌系统中，设计了一种新型水药一体化喷头.对喷头结构及工作原理进行分析，采用五因素四水平正交试验，研究在低压 150 kPa 和中压 350 kPa 下，喷头内流道结构对喷头流量、射程、喷洒净高度、喷洒均匀性系数等水力性能的影响规律，进而得到水药一体化喷头的最佳结构组合.研究结果表明：在同等条件下，增大喷头出口直径可有效提高喷头流量和喷洒均匀性系数；在相同喷头出口直径下，喷头喷洒净高度随流量的增大而增大，喷头导流孔和导流斜槽结构能有效影响喷头水力性能；影响喷头水力性能的结构因素依次为喷头出口直径、导流孔直径、导流斜槽数量、导流斜槽宽度、导流孔数量；喷头最优结构参数为喷头出口直径 3.0 mm，导流孔 3 个，导流孔直径 2.0 mm，导流斜槽 3 个，导流斜槽宽度 0.8 mm.该结果可为水药一体化喷头的设计研制以及工程应用推广提供一定的理论数据.

关键词： 喷头；水药一体化；结构设计；水力性能；正交试验
中图分类号： S277.9　**文献标志码：** A　**文章编号：** 1674-8530(2022)01-0102-07
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.20.0132

张晴，刘俊萍，袁寿其，等. 水药一体化喷头结构设计与水力性能试验[J].排灌机械工程学报，2022，40(1)：102-108.

ZHANG Qing，LIU Junping，YUAN Shouqi，et al. Structure design and hydraulic performance test of water and pesticide integrated sprinkler[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2022，40(1)：102-108.(in Chinese)

Structure design and hydraulic performance test of water and pesticide integrated sprinkler

ZHANG Qing，*LIU Junping**，*YUAN Shouqi*，*LI Yangfan*，*LI Hong*
(National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China)

Abstract：A new water-pesticide integrated sprinkler was designed by applying water medicine integrated technology to sprinkler irrigation system. An orthogonal array with five factors and four levels was selected to carry out the experiments，and the optimum values of structure parameters were confirmed after the experiments. The influence of the sprinkler structure on hydraulic performance，mainly include the flow rate，the range，the spraying net height and uniformity coefficient，under two operating pressures of 150 kPa and 350 kPa were analyzed. Then，the best structure combination of water medicine integrated nozzle was obtained. The results show that under the same conditions，increasing of sprinkler outlet diameter can effectively improve the sprinkler flow rate and uniformity coefficient. Under the same sprinkler outlet diameter，the spraying net height is increased with the increase of flow rate. The structures of the outlet holes and beveled grooves can effectively affect the hydraulic

收稿日期： 2020-05-08；**修回日期：** 2020-08-02；**网络出版时间：** 2021-12-20
网络出版地址： https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20211216.1755.020.html
基金项目： 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202，2017YFD0201502)；江苏省重点研发计划项目(BE2018313)；江苏省六大人才高峰项目(GDZB-018)；河南省节水农业重点实验室开放课题(FIRI2018-04)
第一作者简介： 张晴(1994—)，女，河南周口人，硕士研究生(Zhangqing_Tracy@163.com)，主要从事喷头设计研究.
通信作者简介： 刘俊萍(1982—)，女，辽宁海城人，副研究员，博士(liujp@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及排灌机械研究.

performance of the sprinkler. The influencing factors in decreasing order of importance for hydraulic performance are the sprinkler diameter, the outlet holes diameter, the bevelled grooves number, the bevelled grooves width, the outlet holes number. The optimum structural parameters of the sprinkler are the sprinklers diameter of 3.0 mm, three outlet holes, 2.0 mm of the outlet holes diameter, three bevelled grooves, 0.8 mm of the bevelled grooves width. The results provide certain important theoretical data for the design and development of the sprinkler and its engineering application.

Key words: sprinkler; water-pesticide integration; structural design; hydraulic performance; orthogonal experiment

中国人口众多、幅员辽阔，但降雨量时空分布不均，农业用水紧张.同时中国又是农药消耗大国，年农药用量高达 200 多万 t，是欧美国家平均水平的 3.5 倍，农药有效利用率仅为 30%左右[1].因而，采用节水节药、减本增效的灌溉施药技术成为发展现代农业的必然趋势[2-3].

水药一体化是将灌溉与施药相结合的节水灌溉技术，具有精准喷洒和节约水药等优点[4-5].部分学者已将水药一体化技术应用在滴灌中[6-8]，其思路是将药剂随毛管内灌溉水按时、按需输送至作物根系，有效减少作物根系处的病虫害和药剂损失.对于果树类作物，叶片表面病虫害防治的常见措施为人工喷药或喷雾机施药，施药方式存在农药飘逸损失大、喷洒均匀性差等缺点[9-11].采用植保无人机进行航空施药，具有施药灵活精准、农药利用率高等优势[12-13]，但存在无人机载重量有限、造价较昂贵等问题.因此，探索将水药一体化与喷灌技术相结合，使其兼容灌溉施药功能，实现高效灌溉施药，对提高水资源和农药有效利用率，具有重要意义.

文中设计一种适用于果树类作物的新型水药一体化喷头，对该喷头内流场结构对外流场水力特性的影响进行研究，并采用正交试验进一步对喷头结构进行优化，以期为该型水药一体化喷头设计制造和应用推广提供有益参考.

1　试验材料与方法

1.1　水药一体化喷头结构及工作原理

图 1 为水药一体化喷头结构示意图，其中剖面 *A-A* 为喷头体顶端剖面.喷头总体高度为 43 mm，主要由喷头帽、喷头体及管接头结构组成.喷头体顶端边缘为圆形凸状结构，凸状结构上设有大小一致的导流槽.喷头体靠近凸状结构的圆柱面上设有均匀分布且直径相同的导流孔.喷头体与喷头帽通过螺纹连接，连接处设有 O 型密封圈.

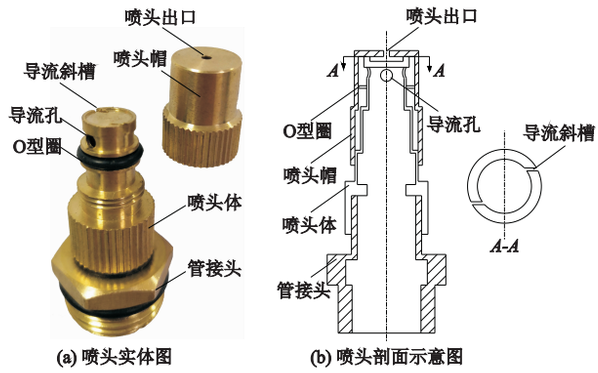


图 1　喷头结构图

Fig.1　Structure diagram of sprinkler

喷头工作原理：压力水进入喷头后，通过导流孔、导流槽，进入喷头顶端与喷头帽之间的凹槽内，经凹槽内旋转加速后喷射到空气中.通过进口球阀调节喷头工作压力至低压范围（大于 100 kPa 且小于 200 kPa）时，喷洒高度较低，进行灌水作业；将喷头工作压力调节至中压范围（大于 200 kPa 且小于 500 kPa）时，压力增大，喷洒高度增高，液滴喷至作物叶片背面，进行施药喷洒.

1.2　试验设置

试验在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心喷灌大厅内进行，主要试验装置包括水泵机组、电磁流量计（精度为 0.5 级）、压力表（精度为 0.4 级）、喷头样机（安装高度 1.2 m）、雨量筒和测量杆.

1.2.1　测量参数与测试方法

由于该水药一体化喷头在不同压力下应实现不同喷洒功能，因此设计 2 个工作压力（低压 150 kPa 和中压 350 kPa）进行试验.前人研究表明水药混合液的雾滴粒径、喷洒液膜破碎形式等特性与纯水的雾滴特性大小差异较小[13-16]，故喷洒介质均选用自来水.测量参数包括：

1）流量 q 和射程 s.分别采用电磁流量计和卷尺测得.其中喷头射程指雨量筒收集的水量为 0.15 mm/h 测点处到喷头中心的距离[17].

2）喷洒净高度 H.试验中,设置垂直于地面的测量杆,测量杆表面设有可上下移动试纸,试纸浸湿最高点即为喷头喷洒净高度,如图 2 所示.

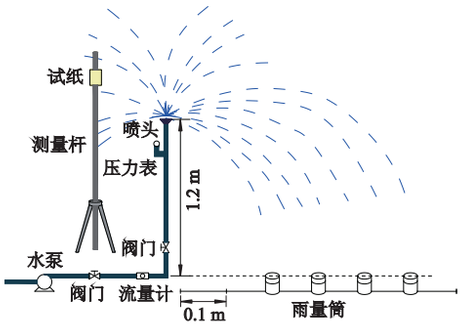


图 2 试验布置简图

Fig.2 Experiment layout sketch

3）喷灌强度 I.试验在无风实验厅内进行,可以近似认为各个方向的降水深度基本相同,因此选取一条射线上的数据代替圆周内的各条射线,雨量筒(采用内径 7 cm,高 10 cm 的塑料筒)沿径向线布置,测试喷洒时间为 1.0 h,布置间距为 0.1 m(见图 2).

4）喷洒均匀性系数 CU.均匀性系数是衡量喷灌质量的重要指标之一,文中采用克里斯琴森均匀系数 CU 计算,其公式为

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

其中

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{n} , \quad (2)$$

式中:h_i 为第 i 个测量点的降水深度;$\bar{h}$ 为整个喷洒面积内的平均水深;n 为测量点的数量.

1.2.2 试验因素和方案

设计优化水药一体化喷头以实现喷头射程较远、喷洒均匀性系数较大且流量较小,并在低压条件下喷洒高度较低,在中压条件下喷洒高度较高,因此文中选取流量、射程、喷洒高度和单喷头均匀性系数等 4 个性能指标进行研究.根据微喷头设计原理及经验[18],以因素 A,B,C,D,E 分别代表喷头出口直径(mm)、导流孔数量(个)、导流孔直径(mm)、导流斜槽数量(个)、导流斜槽宽度(mm),设计喷头结构五因素四水平如表 1 所示.

选用 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表,试验方案如表 2 所示.试验过程中保持导流孔均匀分布在圆柱形喷头体上且圆心距喷头出口的竖直距离保持不变,为 3.2 mm.

表 1 喷头结构因素水平表

Tab.1 Factor level of geometrical parameters

水平	因素				
	A	B	C	D	E
1	1.5	2	1.5	2	0.5
2	2.0	3	2.0	3	0.8
3	2.5	4	2.5	4	1.0
4	3.0	5	3.0	5	1.3

表 2 试验方案

Tab.2 Test schemes

试验号	A	B	C	D	E	试验号	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1	9	3	1	3	4	2
2	1	2	2	2	2	10	3	2	4	3	1
3	1	3	3	3	3	11	3	3	1	2	4
4	1	4	4	4	4	12	3	4	2	1	3
5	2	1	2	3	4	13	4	1	4	2	3
6	2	2	1	4	3	14	4	2	3	1	4
7	2	3	4	1	2	15	4	3	2	4	1
8	2	4	3	2	1	16	4	4	1	3	2

2 结果与分析

2.1 流量与喷洒高度

表 3 为试验测得的不同工作压力下水药一体化喷头流量和喷洒净高度.

表 3 不同工作压力下喷头流量与喷洒净高度试验结果

Tab.3 Test results of sprinkler flow rates and net spraying height under different working pressures

试验号	q/($m^3 \cdot h^{-1}$)		H/m	
	150 kPa	350 kPa	150 kPa	350 kPa
1	0.117 8	0.134 7	1.30	2.00
2	0.117 6	0.143 3	1.50	2.20
3	0.131 9	0.158 7	1.75	2.90
4	0.139 5	0.167 6	2.20	3.30
5	0.169 9	0.199 3	2.00	3.20
6	0.175 4	0.215 6	2.10	3.60
7	0.145 6	0.169 9	1.40	2.60
8	0.153 7	0.180 3	1.60	2.90
9	0.196 0	0.245 2	2.50	3.80
10	0.182 5	0.206 7	2.30	3.40
11	0.165 5	0.203 0	2.20	3.20
12	0.153 6	0.179 0	1.50	2.70
13	0.214 7	0.257 6	1.65	2.95
14	0.181 3	0.225 4	1.55	2.65
15	0.171 4	0.261 1	1.75	3.15
16	0.184 4	0.237 5	2.35	3.55

由表 3 可以看出:同等喷头出口直径下,喷头的喷洒净高度随流量的增大呈增大趋势;在相同工作压力下,喷头流量随喷头出口直径的增大而增大,在 350 kPa 压力下,相比出口直径为 1.5 mm 时,直径为2.0,2.5,3.0 mm 的喷头流量均值的增加幅度分

别为 26.61%，37.99%，62.44%.

由于喷头出口直径、导流孔和导流斜槽结构参数的变化，喷头的流量和喷洒净高度没有显示明显函数关系，如在 150 kPa 工作压力下，流量最大值和喷洒净高度最大值没有出现在同一试验方案：流量最大值 0.214 7 m^3/h 出现在 13 号方案，喷洒净高度最大值 2.5 m 出现在 9 号方案，说明喷头出口直径、导流孔和导流斜槽结构参数能够有效地影响喷头的喷洒高度.

2.2　径向水量分布与射程

图 3 为水药一体化喷头径向水量分布，图中横坐标 l 为距喷头距离，纵坐标 I 为点喷灌强度.

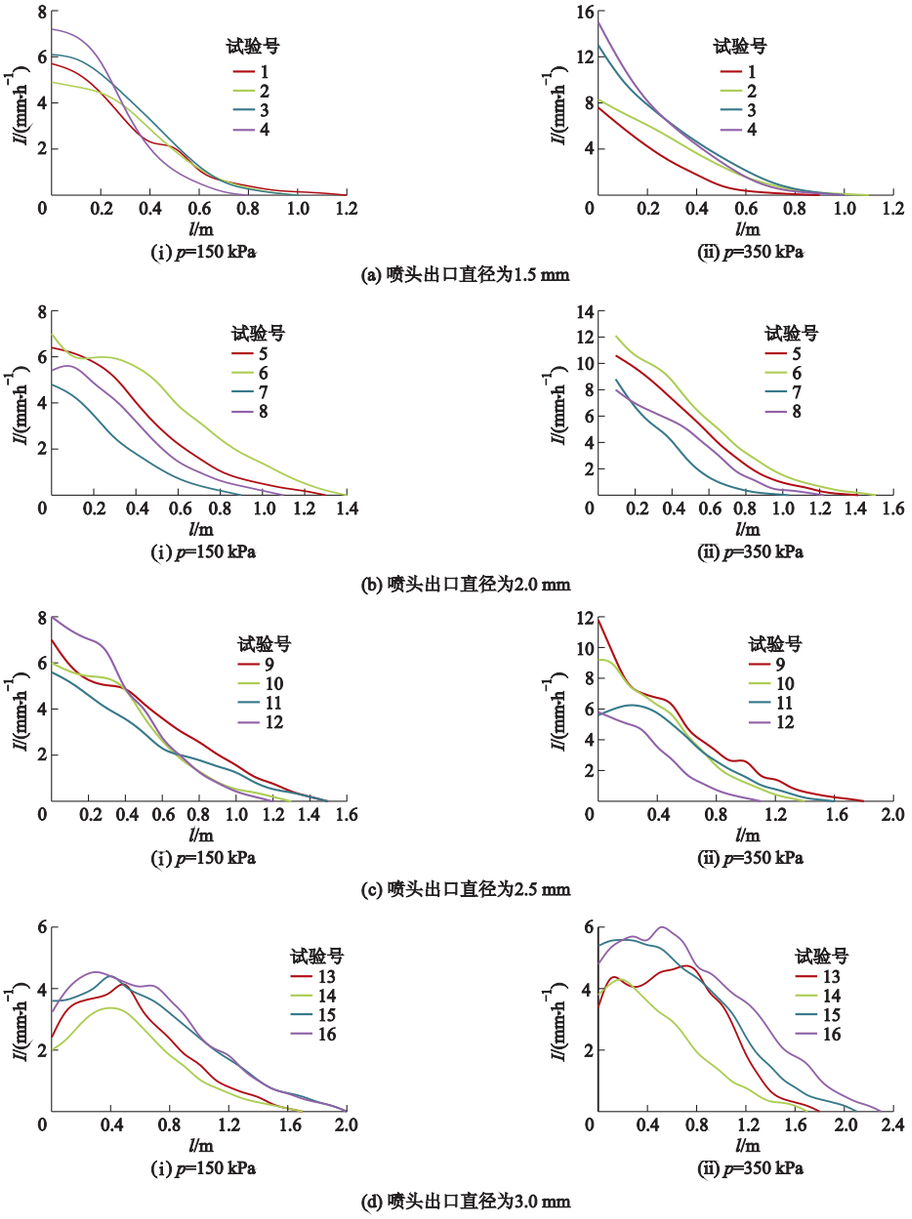


图 3　喷头径向水量分布

Fig.3　Radial water distributions of sprinkler

由图 3 可以看出：喷头的径向水量分布近似呈三角形或倒 U 形，当喷头出口直径为 1.5，2.0 mm（试验号为 1—8）时，最大点喷灌强度均在 0 m 处，且喷灌强度沿径向分布的趋势相似，距喷头距离的增大呈近线性减小，减小趋势较为平滑，径向水量分布近似于三角形，喷洒均匀性较好；当喷头出口直径为 2.5 mm（试验号为 9—12）时，除 11 号方案外，点喷灌强度最大值依然在 0 m 处，且喷灌强度沿径向呈减小趋势，造成 11 号试验现象的原因可能是该方案结构下的喷头体内水流流速较大，水流喷出

后分裂加剧，破碎变快，过多的水量落在了喷头附近；在150 kPa压力下，距喷头0~0.4 m出现不规则的小幅度波动，在350 kPa压力下，点喷灌强度呈小幅度波动下降，喷洒均匀性与1—8试验方案相比较差；当喷头出口直径为3.0 mm（试验号为13—16）时，沿径水量分布趋势为倒U形，呈先增大后减小趋势，降水量主要集中在喷头射程的中部区域内；在150 kPa压力下，点喷灌强度最大值分布在距喷头0.3~0.5 m处，在350 kPa压力下，点喷灌强度最大值分布在距喷头0.1~0.7 m处；在350 kPa工作压力下，各试验方案的最大点喷灌强度值随喷头出口直径的增大呈减小趋势，出现这种趋势的原因可能是在相同工作压力下，喷头射程随喷头出口直径的增大而增大，喷射出的液滴不再集中于近喷头处而是逐渐向远处扩散，径向水量分布的最大点喷灌强度值减小.这一现象在150 kPa工作压力下并不明显，可能是由于工作压力较小、液滴破碎不完全造成的.

综上所述，该水药一体化喷头的径向水量分布主要呈较为理想的“三角形”，有利于提高组合喷洒的均匀性.

表4为试验测得水药一体化喷头在150 kPa和350 kPa工作压力下的射程.

表4 不同工作压力下的喷头射程

Tab.4 Range of sprinklers under different working pressure

试验号	s/m		试验号	s/m	
	150 kPa	350 kPa		150 kPa	350 kPa
1	1.2	0.9	9	1.5	1.9
2	1.0	1.1	10	1.3	1.4
3	1.0	1.1	11	1.5	1.7
4	0.8	1.0	12	1.1	1.2
5	1.3	1.4	13	1.7	1.8
6	1.4	1.5	14	1.7	1.7
7	0.9	1.0	15	2.0	2.1
8	1.1	1.2	16	2.0	2.3

由表4可以看出，除1号试验外，喷头在350 kPa下的射程要大于150 kPa的射程，出现1号试验现象的原因可能是1号试验的喷头出口直径过小（喷头出口直径为1.5 mm），使其在中压350 kPa工作压力下雾化程度较高、液滴直径较小、液滴动能较小、漂移蒸发损失较大造成；当喷头出口直径为2.0 mm（试验号为5—8）时，中压与低压条件下的喷头射程差值较小，约为0.1 m，这可能是由于喷头在出口直径为2.0 mm时的极限射程较小，喷头射程随工作压力的增大而缓慢增加且逐渐趋于不变.在相同工作压力下，喷头出口直径为3.0 mm（试验号为13—16）的射程约为喷头出口直径为1.5 mm（试验号为13—16）的1.13~2.13倍，说明该水药一体化喷头的射程随喷头出口直径的增大而增大.因此，适当选取较大喷头出口直径的喷头，有利于减少水药一体化系统的喷头数量，减少工程成本.

2.3 喷洒均匀性系数

图4为根据公式（1）—（2）计算所得单喷头在工作压力为150 kPa和350 kPa下的喷洒均匀性系数，可以看出：当喷头出口直径为1.5 mm和2.0 mm（试验号为1—8）时，喷洒均匀性系数大多低于80%，喷洒均匀性较差；当喷头出口直径为2.5 mm和3.0 mm（试验号为9—16）时，均匀性系数均大于80%，部分*CU*大于90%，说明喷洒均匀性系数随喷头出口直径的增大而增大；在150 kPa压力下，最大均匀性系数值出现在9号试验（喷头出口直径为2.5 mm），为95.28%；在350 kPa压力下，最大值出现在16号试验（喷头出口直径为3.0 mm），为94.91%.因此对于该水药一体化喷头，选择较大的喷头出口直径有利于提高喷头喷洒均匀性系数，进而提高喷灌系统中水药的有效利用率，减少水药消耗和系统成本.

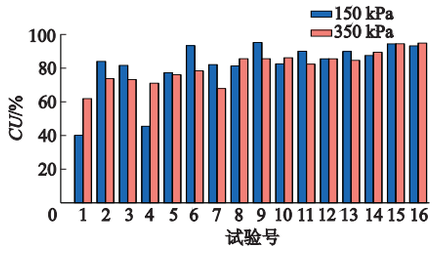


图4 均匀性系数

Fig.4 Uniformity coefficient

2.4 基于正交试验的喷头结构参数多指标优化

该水药一体化喷头结构参数优化目标为多指标优化，各因素及水平对性能指标的影响程度不同，因此本研究采用综合评分法对试验结果进行分析.采用归一化方法对指标进行数据标准化处理，即

$$Y_{ij}=\begin{cases}\dfrac{x_{ij}-\min x_{ij}}{\max x_{ij}-\min x_{ij}},\\ \dfrac{\max x_{ij}-x_{ij}}{\max x_{ij}-\min x_{ij}},\end{cases} \tag{3}$$

$$F=\sum_{n=1}^{k}a_nY_n, \tag{4}$$

式中：Y_{ij}为数据标准化处理后的数值；$\min x_{ij}$为每个指标中的最小值；$\max x_{ij}$为每个指标中的最大值；a_n

为各项指标的权重，$\sum_{n=1}^{k} a_n = 1$；F 为综合评价的综合值.

越大越优的指标采用公式(3)，如射程、均匀性系数和中压 350 kPa 下的喷洒高度；越小越优的指标采用公式(4)，如流量和低压 150 kPa 下的喷洒高度.

基于熵权法具有客观性较强、适应性好等特点[19]，选取熵权法评价各个指标的权重，计算得到的权重值如表 5 所示.

表 5　各指标权重值
Tab.5　Weight of each index

p/kPa	α			
	q	s	H	CU
150	0.101 0	0.155 5	0.130 1	0.074 3
350	0.153 5	0.191 7	0.096 8	0.097 0

将各指标的权重值和试验结果代入公式(3)—(5)中，计算得到综合评价的综合值 F 如表 6 所示.

表 6　数据处理结果
Tab.6　Data processing results

试验号	F	试验号	F
1	0.335 7	9	0.569 4
2	0.474 4	10	0.492 3
3	0.411 5	11	0.545 1
4	0.286 7	12	0.494 1
5	0.473 2	13	0.622 3
6	0.524 9	14	0.618 6
7	0.392 3	15	0.687 8
8	0.486 9	16	0.713 6

为了获取各因素对喷头性能影响的主次顺序以及各水平对喷头性能指标的影响程度，选取极差分析法对数据进行分析，即

$$R_j = \max(f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, f_{i4}) - \min(f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, f_{i4}), \tag{5}$$

式中：R_j 为第 j 因素的极差；f_{ij} 为第 i 因素 j 水平对应数据平均处理后的结果.

以综合值 F 为试验结果进行指标计算分析，结果如表 7 所示.

表 7　多指标试验结果分析
Tab.7　Analysis of multiple factors test results

F	A	B	C	D	E
$\bar{f}_{i1}$	0.377 1	0.500 1	0.529 8	0.460 1	0.500 7
$\bar{f}_{i2}$	0.469 3	0.527 5	0.532 4	0.532 2	0.537 4
$\bar{f}_{i3}$	0.525 2	0.509 2	0.521 6	0.522 7	0.513 2
$\bar{f}_{i4}$	0.660 6	0.495 3	0.448 4	0.517 2	0.480 9
R_j	0.283 5	0.032 2	0.084 0	0.072 1	0.056 5

由表 7 中数据可知，$R_A > R_C > R_D > R_E > R_B$，根据极差分析法中因素极差越大对喷头的指标影响越明显的原理，得到影响水药一体化喷头流量、射程、喷洒高度和喷洒均匀性系数等性能指标的主次因素依次为 A(喷头出口直径)、C(导流孔直径)、D(导流斜槽数量)、E(导流斜槽宽度)、B(导流孔数量)，最优水平组合为 $A_4B_2C_2D_2E_2$，即水药一体化喷头的结构参数为喷头出口直径 3.0 mm、导流孔数量 3 个、导流孔直径 2.0 mm、导流斜槽数量 3 个和导流斜槽宽度为 0.8 mm 为最优结构参数.

3　结　论

1) 提出了一种新型水药一体化喷头，采用五因素四水平正交试验设计对喷头进行水力性能试验，得到了喷头流量、射程、喷洒净高度和喷洒均匀性系数等水力特性，结果表明喷头径向水量分布较好、均匀性系数较高，有利于提高水药利用率，具有较好的社会价值和发展前景.

2) 水药一体化喷头的流量、喷洒均匀性系数随喷头出口直径的增大而增大.同一工作压力和喷头出口直径下，喷头喷洒净高度随流量的增大呈增长趋势.喷头导流孔和导流斜槽结构能有效影响喷头的外流场特性.

3) 通过熵权法和极差分析法，得到在低压 150 kPa 和中压 350 kPa 工作压力下，影响喷头水力性能的结构参数主次顺序为喷头出口直径、导流孔直径、导流斜槽数量、导流斜槽宽度、导流孔数量.

4) 该水药一体化喷头的最优结构尺寸分别为喷头出口直径 3.0 mm，导流孔 3 个，导流孔直径 2.0 mm，导流斜槽 3 个，导流斜槽宽度 0.8 mm.

参考文献(References)

[1] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2019.

[2] PRABAKARAN G, VAITHIYANATHAN D, GANESAN M. Fuzzy decision support system for improving the crop productivity and efficient use of fertilizers [J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 150: 88-97.

[3] 李仰斌，刘俊萍. 中国节水灌溉装备与技术发展展望[J].排灌机械工程学报，2020，38(7)：738-742.
LI Yangbin, LIU Junping. Prospects for development of water-saving irrigation equipment and technology in China[J]. Journal of drainage and irrigation machinery

engineering, 2020, 38(7):738-742. (in Chinese)

[4] 周瑞琼,张慧春,周宏平,等. 喷雾参数间互作效应对农药雾滴飘移的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(7): 612-617.
ZHOU Ruiqiong, ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, et al. Interaction effects of spray parameters on pesticide spray droplet drift[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2019, 37(7): 612-617. (in Chinese)

[5] TSABOULA A, PAPADAKIS E N, VRYZAS Z, et al. Environmental and human risk hierarchy of pesticides: a prioritization method, based on monitoring, hazard assessment and environmental fate[J]. Environment international, 2016, 91:78-93.

[6] 王晓坤. 吡唑醚菌酯水药一体化防治番茄颈腐根腐病应用技术研究[D]. 泰安:山东农业大学,2016.

[7] WATSON T T, DESAEGER J A. Evaluation of non-fumigant chemical and biological nematicides for strawberry production in Florida[J]. Crop protection, 2019, 117:100-107.

[8] MAO Liangang, WANG Qiuxia, YAN Dongdong, et al. Application of the combination of 1,3-dichloropropene and dimethyl disulfide by soil injection or chemigation: effects against soilborne pests in cucumber in China[J]. Journal of integrative agriculture, 2016, 15(1): 145-152.

[9] GHIDIU G M, MARÇON P G, CAMERON R A, et al. A manifold for injecting insecticides into a drip irrigation system for small plot research trials with row crops [J]. Florida entomologist, 2012, 95(1):21-24.

[10] 张鹏, 赵云贺, 韩京坤, 等. 不同施药方式下噻虫嗪和噻虫胺对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果[J]. 植物保护学报, 2015, 42(4):645-650.
ZHANG Peng, ZHAO Yunhe, HAN Jingkun, et al. Control effects of thiamethoxam and clothianidin against Bradysia odoriphaga with different application methods [J]. Journal of plant protection, 2015, 42(4):645-650. (in Chinese)

[11] 何勇, 肖舒裴, 方慧, 等. 植保无人机施药喷嘴的发展现状及其施药决策[J]. 农业工程学报, 2018,34(13):113-124.
HE Yong, XIAO Shupei, FANG Hui, et al. Development situation and spraying decision of spray nozzle for plant protection UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 113-124. (in Chinese)

[12] QIN W C, QIU B J, XUE X Y, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers[J]. Crop protection, 2016, 85:79-88.

[13] MEIVEL S, DINAKARAN K, GANDHIRAJ N, et al. Remote sensing for UREA spraying agricultural (UAV) system[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Computing & Communication Systems, 2016.

[14] QIN K, TANK H, WILSON S A, et al. Controlling droplet-size distribution using oil emulsions in agricultural sprays[J]. Atomization & sprays, 2010, 20(3):227-239.

[15] HILZ E, VERMEER A V P. Effect of formulation on spray drift: a case study for commercial imidacloprid products[J]. Aspects of applied biology, 2011, 114: 445-450.

[16] 肖丽萍, 刘木华, ZHU Heping, 等. 喷嘴喷施不同生物农药雾滴特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2):100-106.
XIAO Liping, LIU Muhua, ZHU Heping, et al. Spray droplet size characteristics of different biological pesticides with different hydraulic nozzles[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(2):100-106. (in Chinese)

[17] 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:中国计划出版社, 2007.

[18] 郑耀泉, 刘婴谷, 严海军,等. 喷灌与微灌技术应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.

[19] 李兴斯, 姜昱汐, 潘少华. 熵与最优化方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2016.

(责任编辑 陈建华)