

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.013

再生水对园林升降式喷头水力性能的影响^{*}

栗岩峰¹ 李久生¹ 尹剑锋²

(1. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

【摘要】 选取园林喷灌中常用的3种升降式旋转喷头:DPX-HP型喷头、具有记忆功能的DPX-TS型喷头和托罗V-1550型喷头,分别在地下水和再生水条件下运行447 h,测定运行前、后的流量-压力关系、喷头水量分布和转动均匀性,并利用单喷头水量分布资料模拟计算组合喷灌均匀系数,以评价再生水对升降式喷头水力性能的影响。结果表明,再生水运行447 h后喷头流量降低3.4%~4.7%、射程降低2.7%~9.0%,而地下水分别降低了0.03%~0.09%和2.5%~3.9%,再生水降幅明显大于地下水。再生水运行使喷头各象限转动时间的最大偏差率增加4.2%~4.4%,水质变化对喷头转动均匀性影响不明显。再生水运行不会对喷头的均匀系数产生明显影响,能够满足高灌水均匀度的要求。

关键词: 升降式喷头 再生水 流量 水力性能

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0056-06

Hydraulic Performance of Pop-up Sprinklers with Reclaimed Sewage Effluent

Li Yanfeng¹ Li Jiusheng¹ Yin Jianfeng²

(1. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract

Water distribution, discharge-pressure relation and rotation nonuniformity of pop-up sprinklers during application of reclaimed sewage effluent and groundwater were tested to investigate the effects of water quality on sprinkler performance. The overlapped sprinkler uniformity coefficients were also determined from the radial water distribution of an individual sprinkler. Three types of pop-up sprinklers, DPX-HP sprinkler, DPX-TS sprinkler (recordable angle adjusting) and Toro V-1550 sprinkler, were used and sprinkler performance were measured after the operation of 447 h for both sewage effluent and groundwater application. A significant influence of water quality on sprinkler performance was found. Sewage effluent application resulted in 3.4%~4.7% and 2.7%~9.0% reduction in sprinkler discharge and coverage radius, respectively; while sprinklers applying groundwater produced a 0.03%~0.09% reduction in discharge and a 2.5%~3.9% reduction in radius. Sprinkler rotation nonuniformity, represented by a maximum rotation deviation, increased after a continuously operation of 447 h, but no significant influence of water quality on the rotation nonuniformity was observed. The influence of water quality on Christiansen uniformity coefficient (CU) was also insignificant.

Key words Pop-up sprinkler, Reclaimed sewage effluent, Discharge, Hydraulic performance

收稿日期: 2009-09-22 修回日期: 2009-12-24

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100212)和农业科技成果转化资金项目(2008GB23320438)

作者简介: 栗岩峰,高级工程师,博士,主要从事灌溉原理及技术研究, E-mail: liyf@iwhr.com

通讯作者: 李久生,研究员,博士生导师,主要从事灌溉原理及技术研究, E-mail: lij@s@iwhr.com

引言

再生水灌溉是缓解农业水资源供需矛盾的有效途径。目前,我国的再生水灌溉仍以传统的地面灌溉为主,而相关的研究多集中在地面灌和滴灌上^[1-4]。“十五”以来,我国园林绿地喷灌发展迅速,利用再生水进行园林喷灌逐年增加,而关于再生水用于喷灌的适应性研究还很少,已有的研究多集中在再生水喷灌对作物生长和土壤环境的影响上^[5-7]。有关喷头对再生水的适用性研究还未见报道。目前,用于再生水喷灌的喷头都是以常规水为介质设计制造的,相关的水力性能研究也都在清水中开展^[8-11]。喷头水力性能很大程度上决定了喷灌系统的灌水和施肥质量,同时也是影响土壤水、肥分布和淋失以及作物生长的重要因素^[12]。因此,再生水对喷头水力性能的影响已成为再生水喷灌应用过程中亟待解决的关键问题。尤其对于升降式喷头,由于采用了齿轮传动、升降和换向等机构使其流道结构比摇臂式喷头更加复杂。喷头结构形式的变化直接影响到喷灌的均匀度、抗堵塞能力^[13]和对水质变化的敏感性。为此,本文选取 3 种典型的园林升降式旋转喷头,通过测试再生水对其水力性能的影响,探讨升降式喷头对再生水利用的适应性,为再生水喷灌的设计和评价提供依据。

1 材料与方 法

选取园林喷灌中常用的 3 种升降式旋转喷头: DPX-HP 型喷头(浙江润茵节水喷灌设备有限公司)、具有记忆功能的 DPX-TS 型喷头(浙江润茵节

水喷灌设备有限公司)和托罗 V-1550 型喷头(美国 Toro 公司),文中用 HP 喷头、记忆功能喷头和托罗喷头表示。各种喷头的主要技术性能参数如表 1 所示。

表 1 升降式喷头技术参数

Tab. 1 Characteristics of the pop-up sprinklers used in the experiments

技术参数	DPX-HP 型喷头	具有记忆功能的 DPX-TS 型喷头	托罗 V-1550 型喷头
工作压力范围/kPa	206~470	206~470	167~470
最佳工作压力/kPa	350	350	343
射程/m	8.5~15.8	8.5~15.8	5.8~16.8
流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.11~3.20	0.11~3.20	0.19~2.64
旋转角度/ $^\circ$	0~330(可调)	0~360(可调)	0~360(可调)
喷射仰角/ $^\circ$	25	25	25
进水口尺寸/mm	19	19	19

每种喷头各选 6 个,每 3 个一组,分别用地下水和再生水进行喷灌试验。试验过程中系统工作压力保持为 0.35 MPa,系统每天运行 16 h(6:00~22:00),总运行时间均为 447 h。喷灌试验在国家节水灌溉工程技术研究中心(北京)大兴试验研究基地进行,试验装置采用自行研制的喷头耐久性试验台。再生水选用北京市大兴区黄村污水处理厂的二级处理水,试验台内再生水循环使用,试验期间未进行更换。试验开始前取试验用水委托北京市农林科学院植物营养与资源研究所对 15 项水质指标进行测定,结果如表 2 所示。

表 2 再生水和地下水水质指标测试结果

Tab. 2 Characteristics of the sewage effluent and the groundwater used in the experiments

水源	质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$													细菌总数/ $\text{cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$		
	钙	镁	钠	氯	HCO_3^-	CO_3^-	SO_4^-	铁	锰	BOD_5	COD_{cr}	全盐	TN		TP	TSS
地下水	24.3	21.9	75	26.7	240	36.7	50	0.13	未检出	11.6	15.1	334	1.36	0.038	未检出	1.7×10^3
再生水	47.1	38.9	154	178	554	33.5	92	0.276	0.024	43.8	132	712	50.9	0.874	53.1	2.9×10^5

喷灌前、后测试每个喷头的水力性能,分析比较地下水和再生水对喷头水力性能影响的差异。喷头水力性能在水利部节水灌溉设备质量检测中心(水利部农田灌溉研究所,河南新乡)喷头水力学试验大厅测试,测试项目包括喷头流量-压力关系、转动均匀性和水量分布等,测试方法参照相关标准^[14-15]。

喷头压力用 0.4 级精密压力表控制,流量用 0.5 级涡轮流量计测定。每个喷头同一压力下的流

量在升压和降压过程各测一次,取两次测试的平均值作为该压力下的流量。

单喷头水量分布在室内无风情况下测试。承雨筒采用径向单侧排列,间隔 0.5 m,承雨筒的平均内径及允许偏差为 $200 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$,每次水量分布测试历时为 0.5 h。

使用分辨率为 0.01s 的秒表测量喷头旋转 1/4 圈所需时间,重复测量 5 次,计算各象限转动时间的平均值以及相对于平均值的最大偏差率^[14]。

2 结果与分析

2.1 流量-压力关系

图1给出了用地下水和再生水运行447 h后,3种喷头的平均压力-流量关系。结果显示,在运行相同的时间后,使用地下水运行的喷头流量无明显变化,其中HP喷头平均降低0.03%,记忆功能喷头平均降低0.09%,托罗喷头平均提高0.06%。使用再

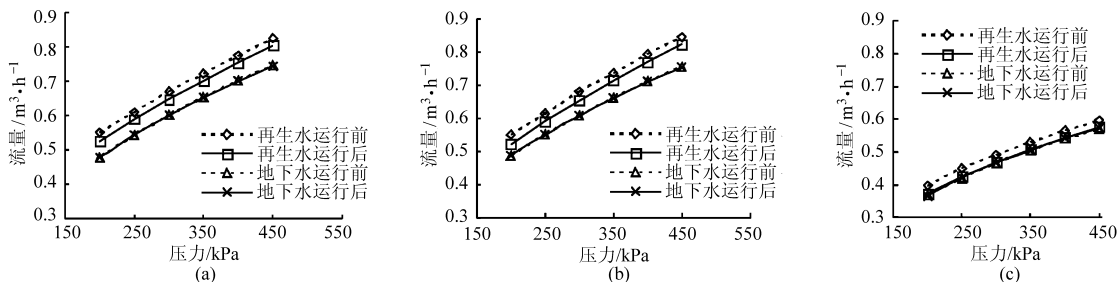


图1 流量与压力关系曲线

Fig. 1 Relationship between discharge and operating pressure for pop-up sprinklers tested

(a) DPX-HP型喷头 (b) 具有记忆功能的DPX-TS型喷头 (c) 托罗V-1550型喷头

再生水运行447 h后,3种喷头的流量系数明显降低,流态指数明显升高(表3)。其中托罗喷头变化最为明显,流量系数降低23.6%,流态指数升高

7.2%。可见,托罗喷头的流量对水质变化较为敏感。地下水运行对3种喷头的流量系数和流态指数的影响都不大,变化不超过5%。

表3 喷头流量 Q (m^3/h) 与压力 H (kPa) 关系

Tab. 3 Relationship between sprinkler discharge (Q , m^3/h) and operating pressure (H , kPa)

水源	状态	DPX-HP型喷头	具有记忆功能的DPX-TS型喷头	托罗V-1550型喷头
地下水	运行前	$Q = 0.0261H^{0.5497}$ ($R^2 = 0.9996$)	$Q = 0.0271H^{0.5455}$ ($R^2 = 0.9999$)	$Q = 0.0211H^{0.5414}$ ($R^2 = 0.9981$)
	运行后	$Q = 0.0271H^{0.5426}$ ($R^2 = 0.9997$)	$Q = 0.0279H^{0.5405}$ ($R^2 = 0.9999$)	$Q = 0.0201H^{0.5499}$ ($R^2 = 0.9977$)
再生水	运行前	$Q = 0.0392H^{0.4978}$ ($R^2 = 0.9993$)	$Q = 0.0321H^{0.5356}$ ($R^2 = 0.9996$)	$Q = 0.0288H^{0.4971}$ ($R^2 = 0.9983$)
	运行后	$Q = 0.0329H^{0.5226}$ ($R^2 = 0.9998$)	$Q = 0.0259H^{0.5665}$ ($R^2 = 1.0000$)	$Q = 0.0220H^{0.5358}$ ($R^2 = 0.9986$)

2.2 喷头水量分布

图2~4给出了再生水和地下水运行前、后3种喷头在工作压力350 kPa时的径向水量分布图。结果显示,地下水运行447 h后,除1个记忆功能喷头外,其余喷头都能正常旋转,喷灌强度降低不明显,其中HP喷头平均降低3%;记忆功能喷头平均升高5%;托罗喷头平均降低5%。再生水运行447 h后,3种喷头的喷灌强度都有明显降低,并有多数喷头不能正常旋转。其中,1号、2号HP喷头无法旋转,3号喷头喷灌强度平均降低16%;1号、3号记忆功能喷头无法旋转,2号喷头喷灌强度平均降低23%;3个托罗喷头都能正常旋转,喷灌强度平均降低18%。

根据实测的水量分布,采用线性插值得出喷灌强度为0.25 mm/h的点,确定喷头的射程^[15],结果如表4所示。可以看出,再生水和地下水运行447 h后喷头射程都有不同程度的降低。再生水运行后,

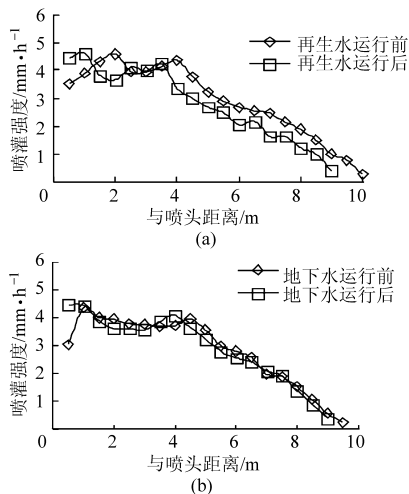


图2 DPX-HP型喷头的径向水量分布

Fig. 2 Radial water distribution for the DPX-HP sprinklers

(a) 3号喷头(再生水) (b) 3个喷头均值(地下水)

HP喷头、记忆功能喷头和托罗喷头分别降低9.0%、2.7%和5.6%。地下水运行后HP喷头、记

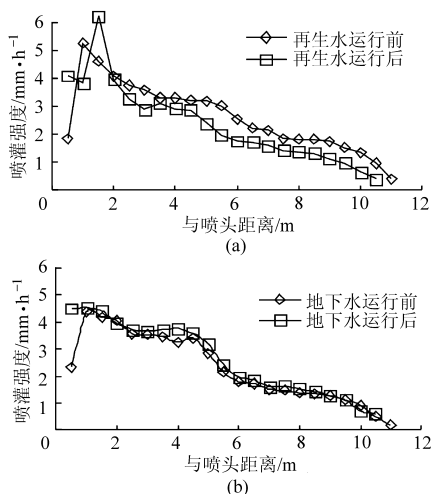


图 3 具有记忆功能的 DPX-TS 型喷头的径向水量分布

Fig. 3 Radial water distribution for the angle adjusting recordable sprinklers

(a) 2 号喷头(再生水) (b) 1 号、2 号喷头均值(地下水)

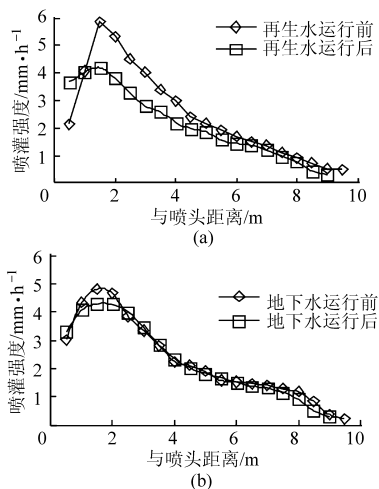


图 4 托罗 V-1550 型喷头的径向水量分布

Fig. 4 Radial water distribution for the Toro V-1550 sprinklers

(a) 3 个喷头均值(再生水) (b) 3 个喷头均值(地下水)

表 4 运行前和运行 447 h 后的射程比较

Tab. 4 Comparison of coverage radii for sprinklers at the beginning and after 447 h of operation

喷头类型	编号	再生水			地下水		
		运行前射程/m	运行后射程/m	降低百分数/%	运行前射程/m	运行后射程/m	降低百分数/%
DPX-HP 型喷头	1	9.5			9.1	9.1	0
	2	9.9			9.5	9.1	4.2
	3	10.0	9.1	9.0	9.5	9.2	3.2
具有记忆功能的 DPX-TS 型喷头	1	9.5			10.9	10.1	7.3
	2	11.1	10.8	2.7	10.8	10.9	-0.9
	3	11.2			10.7		
托罗 V-1550 型喷头	1	9.1	9.0	1.1	8.9	8.7	2.2
	2	8.8	8.3	5.7	9.2	8.7	5.4
	3	9.9	8.9	10.1	9.5	9.1	4.2
差异分析							
水源							NS($P=0.069$)
喷头类型							NS($P=0.241$)
喷头类型与水源交互作用							NS($P=0.114$)

注: NS 表示差异不显著, 下同。

忆功能喷头和托罗喷头射程分别降低 2.5%、3.2% 和 3.9%。双因素方差分析的结果显示, 不同水源对射程变化的影响明显大于喷头类型间的差异, 但二者差异均未达显著性水平, 交互作用也不显著。

总的来看, 再生水使 3 种喷头的喷灌强度和射程都有不同程度的降低, 降低的幅度明显大于地下水, 对喷头的水量分布特征无显著影响。

2.3 转动均匀性

表 5 给出了再生水和地下水运行后仍能正常旋转喷头的转动均匀性与运行前的对比结果。由于 HP 喷头最大旋转角度为 330°~350°, 无法测试其转动均匀性。结果显示, 再生水运行 447 h 后, 记忆功能喷头各象限平均转动时间增加了 0.46 s; 最大偏差率明显上升, 增加了 4.4%; 托罗喷头平均转动时间增加了 1.32 s, 最大偏差率平均增加 4.2%。地下水运行后, 2 种喷头平均转动时间和最大偏差率的变化幅度小于再生水。其中, 记忆功能喷头各象限转动时间平均增加 0.48 s; 最大偏差率平均增加 2.6%; 托罗喷头平均转动时间增加 0.8 s, 最大偏差率平均增加 1.6%。双因素方差分析的结果显示, 水源和喷头类型对平均转动时间和最大偏差率变化的影响均不显著, 二者的交互作用也不显著。可见, 再生水运行使喷头转动均匀性降低, 降低幅度及平均转动时间与地下水相差不多。

2.4 喷灌均匀系数

利用圆形或异形喷洒域喷头组合均匀度分析系统 V 1.0^[16] 计算喷头和支管间距均为射程 1.2 倍时的组合均匀系数(CU)^[15], 结果如表 6 所示。可以看出, 再生水和地下水运行 447 h 后, 3 种喷头的均匀系数出现不同程度的变化, 但变化幅度较小, 最大变幅不超过 6.5%。双因素方差分析的结果显示,

表5 喷头运行前和运行447 h后的最大转动偏差率比较

Tab.5 Comparison of the maximum relative rotation deviation for sprinklers at the beginning and after 447 h of operation

喷头类型	编号	各象限转动平均时间/s						最大偏差率/%					
		地下水			再生水			地下水			再生水		
		运行前	运行后	差值	运行前	运行后	差值	运行前	运行后	差值	运行前	运行后	差值
具有记忆功能的 DPX-TS型喷头	1												
	2	36.97	37.45	0.48	35.28	35.7	0.46	1.2	3.8	2.6	2.1	6.5	4.4
	3												
托罗V-1550型喷头	1	15.22	15.6	0.41	15.47	17.86	2.39	4.7	7.7	3.0	7.2	8.1	0.9
	2	16.46	17.2	0.76	15.08	15.58	0.5	2.0	2.5	0.5	3.4	8.3	4.9
	3	15.49	16.7	1.22	16.77	17.85	1.08	1.7	2.9	1.2	3.8	10.5	6.7
差异分析													
水源				NS($P=0.675$)				NS($P=0.304$)					
喷头类型				NS($P=0.386$)				NS($P=0.752$)					
喷头类型与水源交互作用				NS($P=0.697$)				NS($P=0.841$)					

表6 喷头运行前和运行447 h后组合均匀系数比较

Tab.6 Comparison of CU for sprinklers at the beginning and after the operation of 447 h

喷头类型	编号	再生水			地下水		
		运行前	运行后	变化幅度/%	运行前	运行后	变化幅度/%
DPX-HP型喷头	1	0.85			0.86	0.87	1.16
	2	0.88			0.90	0.89	-1.11
	3	0.91	0.91	0	0.88	0.9	2.27
具有记忆功能的 DPX-TS型喷头	1	0.87			0.89	0.88	-1.12
	2	0.89	0.91	2.25	0.87	0.91	4.60
	3	0.89			0.90		
托罗V-1550型喷头	1	0.84	0.88	4.76	0.89	0.87	-2.25
	2	0.80	0.75	-6.25	0.87	0.90	3.45
	3	0.80	0.83	3.75	0.87	0.88	1.15
差异分析							
水源				NS($P=0.970$)			
喷头类型				NS($P=0.884$)			
喷头类型与水源交互作用				NS($P=0.982$)			

水源和喷头类型对喷灌均匀系数变化的影响均不显著,二者的交互作用也不显著。再生水运行447 h后,3种喷头的均匀系数都保持在0.75以上,说明使用再生水的升降式喷头能够满足高灌水均匀度的要求。

3 结束语

对DPX-HP型、具有记忆功能的DPX-TS型和托罗V-1550型3种喷头,分别用地下水和再生水运行447 h,测定了运行前、后的喷头水量分布、转动均匀性和流量-压力关系。结果表明,再生水运行使喷头流量降低3.4%~4.7%、喷灌强度降低

16%~23%、射程降低2.7%~9.0%,降幅明显大于地下水。3种喷头中托罗V-1550型喷头对再生水最为敏感,流量系数降低23.6%,流态指数升高7.2%。再生水运行使喷头转动均匀性降低,各象限转动时间的最大偏差率增加4.2%~4.4%,平均转动时间和地下水相差不大。再生水运行不会对喷头的均匀系数产生明显影响,且均匀系数都保持在0.75以上,能够满足高灌水均匀度的要求。总的来看,使用二级处理再生水不会对喷头的水力性能产生过大的不利影响,但为了保持流道畅通、流量恒定,有必要对再生水运行的升降式喷头定期处理,以保证灌水施肥质量。

参 考 文 献

- 1 冯绍元,邵洪波,黄冠华. 重金属在小麦体中残留特征的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 113~115.
Feng Shaoyuan, Shao Hongbo, Huang Guanhua. Field experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 113~115. (in Chinese)
- 2 黄冠华,查贵锋,冯绍元,等. 冬小麦再生水灌溉时水分与氮素利用效率研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 65~68.
Huang Guanhua, Zha Guifeng, Feng Shaoyuan, et al. Water and nitrogen use efficiency for winter wheat under the condition of irrigation with treated sewage effluent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 65~68. (in Chinese)
- 3 王鹏超. 再生水滴灌对灌水器堵塞影响的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
Wang Pengchao. Effect of sewage effluent application on emitter clogging in drip irrigation systems[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 4 Li J, Chen L, Li Y. Comparison of clogging in drip emitters during the application of sewage effluent and groundwater[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(4): 1 203~1 211.
- 5 Suarez-Rey E, Choi C Y, Waller P M et al. Comparison of subsurface drip irrigation and sprinkler irrigation for Bermuda grass turf in Arizona[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(3): 631~640.
- 6 Choi C Y, Suarez-Rey E M. Subsurface drip irrigation for Bermuda grass with reclaimed water[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(6): 1 943~1 951.
- 7 Hunter K A M, Wu L. Morphological and physiological response of five California native grass species to moderate salt spray: implications for landscape irrigation with reclaimed water[J]. Journal of Plant Nutrient, 2005, 28(3): 247~270.
- 8 Solomon K H, Joseph K, Farrens G P, et al. Performance and water conservation potential of multi-stream, multi-trajectory rotating sprinklers for landscape irrigation[C]//2006 ASABE Annual International Meeting (Paper No. 062168), 2006.
- 9 严海军,郑耀泉. 园林灌溉喷头的水力性能测试分析及应用研究[J]. 排灌机械, 2001, 19(2): 32~34.
Yan Haijun, Zheng Yaoquan. Test analysis on hydraulic performance and application study of sprinklers for gardens irrigation [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(2): 32~34. (in Chinese)
- 10 刘中善,李光永. 旋转式微喷头转速对水力性能影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(4): 64~68.
Liu Zhongshan, Li Guangyong. Effect of rotating speed of micro-sprinklers on hydraulic performance [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(4): 64~68. (in Chinese)
- 11 Muhammad L and Ahmad F. Operational analysis of water application of a sprinkler irrigation system installed in a golf course [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 136(4): 446~453.
- 12 李久生,饶敏杰,李蓓. 喷灌施肥灌溉均匀性对土壤硝态氮空间分布影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 51~55.
Li Jiusheng, Rao Minjie, Li Bei. Spatial distribution of nitrate in soil as affected by uniformity of sprinkler fertigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 51~55. (in Chinese)
- 13 柴春岭,杨路华,脱云飞,等. 可调式微喷头出水口流道形式对喷洒水性影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 17~20.
Chai Chunling, Yang Luhua, Tuo Yunfei, et al. Experimental study on influence of adjustable micro-sprinkler outlet flow channel type on sprinkling performance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 17~20. (in Chinese)
- 14 GB/T 19795.1—2005. 农业灌溉设备 旋转式喷头 第1部分:结构和运行要求[S].
- 15 GB/T 19795.2—2005. 农业灌溉设备 旋转式喷头 第2部分:水量分布均匀性和试验方法[S].
- 16 韩文霆. 喷灌均匀系数的三次样条两次插值计算方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 134~139.
Han Wenting. Calculation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines and linear lines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 134~139. (in Chinese)