

基于光感技术的径流雨水分质截留模式研究

陈 翊¹, 汪志霞², 唐中亚³, 王金辉³, 王一鸣³, 丛海兵¹

(1. 扬州大学 环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 扬州市涵闸河道管理处, 江苏 扬州 225009; 3. 扬州市给排水管理处, 江苏 扬州 225009)

摘 要: 基于“初期冲刷”理论的传统径流雨水截留模式没有直接与水质挂钩, 因而不能准确拦截污染径流雨水、弃流清洁径流雨水。为此, 提出了一种基于光感技术的径流雨水分质截留模式, 建立径流雨水水质与透光性的关系, 根据透射光衰减量对实际降雨径流进行截留分析。试验结果表明, 径流雨水水质与透光性具有较高的一致性。与容积式截留模式相比, 在截留体积相同的条件下, 光感式所拦截的 SS、COD 和 TP 质量增加了 17% ~ 105%; 光感式应用范围更广, 为径流污染的削减提供了一种新模式。

关键词: 径流雨水; 透光性; 截留模式; 光感技术

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0119-06

Runoff Quality-dependent Interception Mode Based on Photoelectric Technology

CHEN Hong¹, WANG Zhi-xia², TANG Zhong-ya³, WANG Jin-hui³,
WANG Yi-ming³, CONG Hai-bing¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;
2. Yangzhou River and Sluice Management Office, Yangzhou 225009, China; 3. Yangzhou Water Supply and Drainage Management Office, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The traditional runoff interception mode based on the “initial wash” theory is not directly related to water quality, so it cannot accurately intercept the polluted runoff and discharge the clean runoff. Therefore, a new runoff interception mode based on photoelectric technology was proposed. The relationship between runoff quality and light transmittance was established, and the interception effect of actual rainfall runoff was analyzed according to the decrement of transmitted light. The results showed that the runoff quality was consistent with the light transmittance. Compared with the traditional volumetric mode, the amount of SS, COD and TP intercepted by the photoelectric interception mode increased by 17% - 105% under the same interception volume condition. The photoelectric interception mode has a wider range of applications which provides a new mode for runoff pollution reduction.

Key words: runoff; transmittance; interception mode; photoelectric technology

基金项目: 江苏省水利科技项目(2016048); 扬州市建设科技项目(2017-8); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16_1394)

通信作者: 丛海兵 E-mail: chb9903@126.com

雨水淋洗大气尘埃,冲刷下垫面、管道内的污染物,经城市管网排入河湖,会引起水体富营养化等问题^[1]。作为非点源污染,径流雨水变化规律复杂,管理难度大^[2]。从削减排入河道的径流污染、改善河道水质的角度,笔者尝试研究如何将高浓度污染雨水准确截留后排入污水管或雨水处理系统进行处理,而将低浓度清洁雨水直接弃流至河道。对于径流雨水的“截留”与“弃流”问题,目前学术界建立了基于“初期冲刷”理论^[3]的容积式截留模式(简称“容积式”),该模式以水质控制体积(WQV)^[4]为依据来确定径流雨水的截留容积,设截留池以拦截每场降雨初期固定体积的径流,如以5 mm降雨深度的产流量来确定截留池容积^[5]。然而,容积式未充分考虑大气污染、降雨特征、下垫面条件和排水管网等因素对径流水质的综合影响^[1,6-7],没有全面建立径流污染与各影响因素的关系,其在任何情况下总是拦截降雨初期相同体积的雨水,未认识到不同降雨的初期冲刷时间与初期雨量的差异很大,主观地用一个固定的体积来拦截“初期雨水”,导致污染雨水的错误弃流及清洁雨水的错误拦截,具有较大的局限性。为避免上述问题,笔者不关注流域的汇流过程,直接以入河径流的水质为判断指标来决定截留或弃流,并借以试验方法,建立径流雨水水质与透光性的关系,结合光电转换技术,通过检测雨水的透射光衰减量(光衰减量)快速反映水质,实现径流雨水的分质截留。

1 基于光感技术的截留模式

水中悬浮颗粒浓度与其透射光强度有较好的线性关系,该现象遵循朗伯-比尔定律;激光具有单色性、方向性等优点,能反映不同粒径颗粒的浓度变化;硅光电池是根据光生伏特效应制成的光辐射探测器件,能将光强转换成电信号,具有不耗能、性能稳定等优点,上述技术被广泛应用于环境监测领域^[8]。为了研究径流雨水水质与透光性的关系,本研究使用自制的光感检测器来检测水的透光性。光感检测器由透光室、激光源和光电池组成,其中,透光室为一长方体透明小室,两端进出口与采样泵相连;激光源为半导体激光灯,光电池为硅光电池,二者分别安装于透光室相对的两个侧面,光电池能检测到从激光源照射而来的光束,产生感应电信号,其强度与透射光强相对应。采用该检测器检测实际径流水样的透射光电信号强度,建立水质与信号强度

的关系。根据相关规范确定需拦截的临界水质及其对应的电信号阈值。当径流雨水水质差、透光性弱、检测到的电信号强度小于阈值时,拦截径流雨水,否则弃流。截留模式如图1所示,自控截留井是截留执行装置,其内部设有自控翻板,能根据径流雨水的透光性自动切换到截留状态或弃流状态(专利号:ZL201720868298.7)。

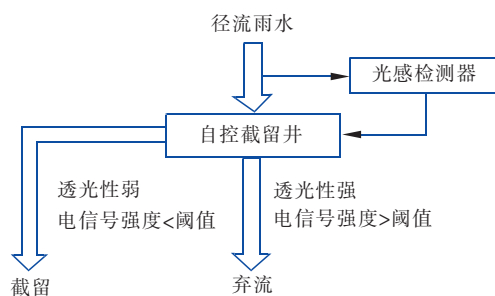


图1 光感式截留模式流程

Fig. 1 Flow chart of the photoelectric interception mode

2 试验材料与方法

2.1 水样采集

在扬州市内设置3个雨水口采样点和1个排水管网入河采样点。雨水口采样点分别位于城市道路(点A)、居住小区(点B)和事业单位(点C);排水管网入河采样点D位于事业单位内,其汇水面积为2 236 m²,其中绿地面积为830 m²、不透水面积为1 406 m²。

当降雨-径流事件发生时,在采样点A、B、C处使用自制漏斗进行人工采样,每隔5~30 min采样1次,装进500 mL的PET瓶中。在采样点D处设置明渠-三角堰测流装置,对径流雨水的流量和水质进行同步监测,每次采样500 mL,采样间隔为1~30 min,视降雨历时和径流量而定。

2.2 水质指标测定

径流样品的保存和水质参数的测定均依照《水和废水监测分析方法》进行。测试的水质指标包括SS、TN、TP、COD。其中SS用称重法测定;TN用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;TP用钼酸铵分光光度法测定;COD用重铬酸盐法测定。所有玻璃器皿使用前均在体积比为1:35的稀硫酸中浸泡24 h,消解用酸均为优级纯。

2.3 水样透光性测定

透光性采用光感检测器测定,其中激光源是波长为650 nm的半导体激光器,最大输出功率约为

30 mW;透光室为 2 cm × 3 cm × 5 cm 的长方体小室,材质为有机玻璃,壁厚为 5 mm;光电池为硅光电池探头,一端连接在激光功率表上,用于检测透射光强度。透光性测定在暗室进行,步骤如下:以纯水润洗装置后,在持续通入纯水的状态下测定透射光电信号强度,记为背景值 P_0 ,随后以相同的流速通入各待测水样,读取透射光电信号强度 P_1 。定义水样相较于纯水的透射光电信号强度减少量为光衰减量,作为水样透光性的评价指标,记为: $P = P_0 - P_1$ 。

2.4 降雨过程监测

用 SJ-1 型虹吸式雨量计记录降雨过程。实测 2016 年 9 月—11 月和 2017 年 3 月—9 月期间共 11 场降雨过程。场次降雨量为 0.9 ~ 30.1 mm,最大降雨强度为 0.02 ~ 0.93 mm/min,降雨前期旱天数为 1 ~ 18 d。

3 结果与讨论

3.1 水质指标与透光性的相关性分析

径流雨水水质与光衰减量的关系如图 2 所示。

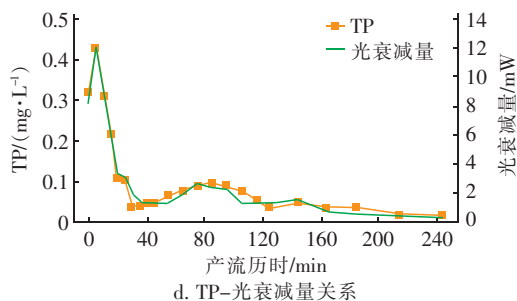
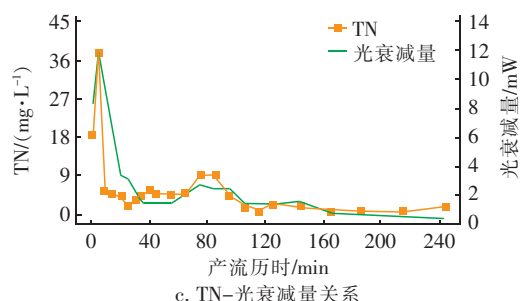
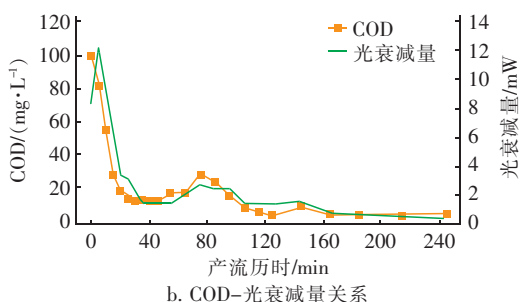
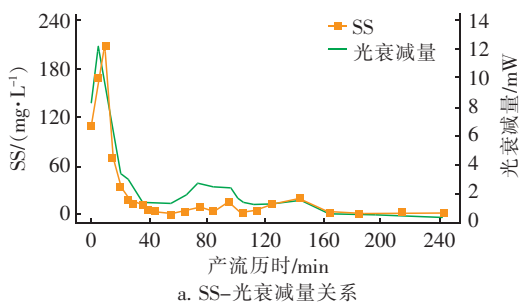


图 2 径流水样的光衰减量与污染物浓度的相关性

Fig. 2 Correlation between light attenuation and quality indexes of runoff

由图 2 可知,产流初期的径流雨水中各污染物浓度较高,水质较差;后期的径流雨水中各污染物浓度较低,水质较好。整个产流过程中,光衰减量的变化与各污染物浓度的变化基本一致,其值在 0.5 ~ 12.21 mW 之间。

使用 SPSS22.0 软件对 11 场次降雨采集的 370 组水样中各污染物浓度与光衰减量进行 Spearman 秩相关性分析和 Kendall 协和系数检验。Spearman 秩相关性分析结果显示,SS、COD、TN、TP 的秩相关性系数分别为 0.673、0.700、0.001、0.869,显著性概率 P 值分别为 0.000、0.000、0.660、0.000,可知,除 TN 之外的其余水质指标与光衰减量均呈现出中、高强度的正相关性,各系数的 P 值均小于 0.01,表明变量之间的相关性极其显著。TN 与光衰减量相关性不高的原因可能是径流雨水中溶解性氮所占比例较大,其对透光性影响较小,不能体现较好的相关性^[9]。对所有水样各污染物浓度与光衰减量进行 Kendall 协和系数检验,求得协和系数为 0.794,表明 5 个参数之间的综合相关性较好,显著性概率值为 0.000,说明该协和系数可靠,水样污染物浓度与光衰减量有较高的一致性。

综上可知,扬州市内 3 种典型下垫面径流水样的水质与透光性相关度较高,因此可用光衰减量来反映径流水质的优劣,作为径流雨水分质截留的评判依据。

3.2 两种截留模式的对比分析

① 容积式的截留容积计算

根据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,截留容积为降雨初期设计降雨量的产流量,其体积按下式计算:

$$V = 10 \cdot H \cdot \varphi \cdot F \quad (1)$$

式中: V 为截留容积, m^3 ;10为单位换算因数; H 为设计降雨量, mm ; φ 为径流系数; F 为设计汇水面积, hm^2 。

本研究中雨水管汇流区域总面积为 $2\,236\text{ m}^2$,其中,绿地面积为 830 m^2 、道路面积为 $1\,406\text{ hm}^2$ 。绿地和道路的径流系数分别取 0.15 和 0.85,则综合径流系数 $\varphi = 0.59$ 。按 $H = 5\text{ mm}$ 计算截留容积^[5],得 $V = 6.6\text{ m}^3$ 。

② 等水量拦截下两种模式的截污分析

以 2017 年 4 月 8 日为例,分别计算等水量拦截时两种模式的截污量。该场降雨的产流过程、污染物浓度及光衰减量过程如图 3 所示。

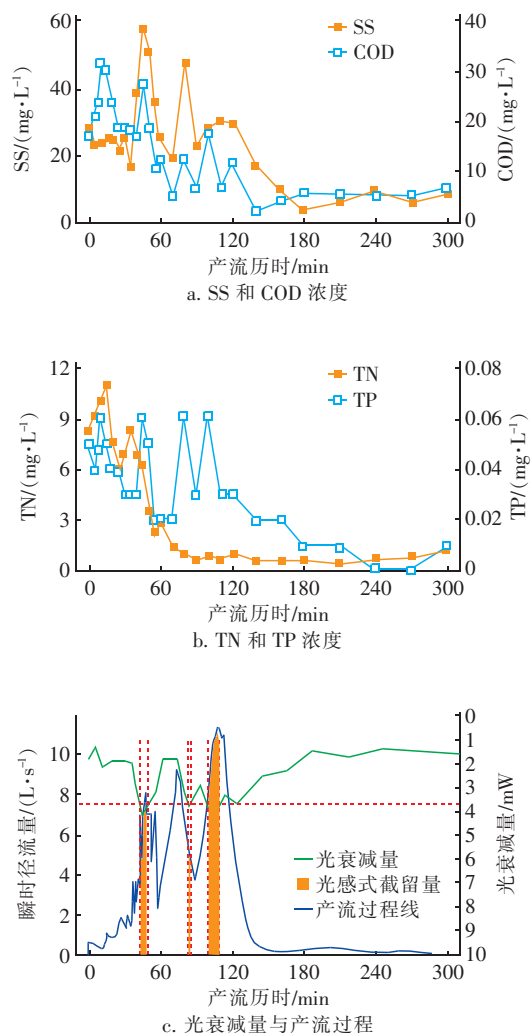


图3 产流产污过程及光感式截留法

Fig. 3 Results of the photoelectric interception mode with changes of runoff quality

径流过程线与横坐标轴围成的面积为径流量,由此计算得到产流总量为 40.82 m^3 。容积式拦截

产流初期 6.6 m^3 的径流雨水。光感式拦截整个产流过程中光衰减量最高的 6.6 m^3 水量,截留方法:用光衰减量为某一值的水平线截取光衰减量过程线中衰减量较大的时段,计算这些时段的产流量,调整水平线的上下位置,使截留量刚好等于 6.6 m^3 。

由图 3 可知,4 月 8 日降雨产流量出现若干个峰值,导致径流雨水污染物浓度也出现了几个峰值,且出现在中后期^[6]。在此情况下,容积式拦截了产流初期雨水,弃流了后期的雨水;光感式在整个产流过程中分别拦截了 3 个时间段的径流雨水,与污染物的浓度峰值相对应。容积式对 SS、COD、TN、TP 的拦截量分别占产污总量的 22%、30%、52% 和 21%,而光感式分别为 45%、35%、28%、25%。可以看出,除 TN 以外,在截留水量相同的条件下,光感式比容积式拦截的污染物质量更多,增加幅度为 17%~105%。由此说明光感截留模式与水质挂钩,截污更加准确,截污量更多。本场降雨中 TN 没有表现出二次冲刷现象,是因为 TN 以溶解态为主,容易在产流初期排出。

3.3 两种截留模式的综合评价

结合《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),与实测径流雨水水质数据进行综合比对,将控制径流雨水截留与否的光衰减量阈值确定为 3.25 mW ,对应 TP、TN、COD 和 SS 指标的阈值分别为 0.40、10.00、40.00、25.00 mg/L。

以 6.6 m^3 截留容积与 3.25 mW 光衰减量阈值分别作为容积式和光感式的截留依据,计算 2017 年 3 月 12 日、4 月 8 日、6 月 5 日和 9 月 4 日这 4 场降雨(分别记作场次 1、2、3、4)的截留截污情况,结果如表 1 所示。这 4 场降雨的产流总量分别为 0.7、40.8、12.6、35.3 m^3 ,SS 的事件平均浓度(EMC)分别为 30.28、30.61、30.38、1.58 mg/L, COD 的 EMC 值分别为 21.57、11.83、17.48、8.65 mg/L, TN 的 EMC 值分别为 7.34、1.95、4.5、0.60 mg/L, TP 的 EMC 值分别为 0.10、0.03、0.09、0.01 mg/L。由表 1 可知,对于同一场次降雨,两种模式的截留截污效果存在较大差异。

① 截留量。所有场次降雨中,容积式的截留量始终不超过截留容积(6.6 m^3),而光感式可以根据径流水质的变化拦截不同量的雨水。以 2017 年 4 月 8 日和 9 月 4 日这两场降雨为例,其产流量相

当,但前者的径流污染物浓度远高于后者,容积式对两场降雨的截留量均为 6.6 m^3 ,而光感式的截留量分别为 $24.9、0\text{ m}^3$ 。由此可见,容积式不能根据雨

量大小、径流水质优劣等因素调整截留量;而光感式以径流雨水的透光强弱为依据,只拦截高污染径流雨水。

表 1 两种模式的截留截污分析

Tab. 1 Analysis of diverted runoff in two modes

项目	截留量/ m^3		SS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$				COD/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$				TN/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$				TP/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			
			截留		弃流		截留		弃流		截留		弃流		截留		弃流	
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
1	0.7	0.2	30.28	70.36	—	9.63	21.57	32.35	—	16.01	7.34	13.44	—	4.20	0.10	0.18	—	0.05
2	6.6	24.9	35.93	37.52	29.58	19.80	20.87	13.69	10.08	8.91	5.46	1.65	1.27	2.42	0.05	0.04	0.03	0.03
3	6.6	2.3	50.49	128.26	8.29	8.90	27.71	52.01	6.25	9.90	7.37	13.17	1.43	2.64	0.15	0.28	0.04	0.05
4	6.6	0	1.77	—	1.54	1.58	8.32	—	8.73	8.65	0.58	—	0.61	0.60	0.01	—	0.01	0.01

注: ①为容积式,②为光感式。

② 截污量。光感式以临界水质为分界,截留高污染物浓度的径流雨水,弃流低浓度的径流雨水,不同场次降雨的弃流雨水污染物平均浓度较低且稳定;容积式则会出现截留清洁径流雨水、弃流污染径流雨水的现象。如 4 月 8 日,容积式的截留量过少,弃流了污染径流雨水,使弃流水 SS 平均浓度高达 29.58 mg/L ,而 9 月 4 日径流雨水的 SS 平均浓度仅为 1.58 mg/L ,其仍截留 6.6 m^3 的雨水,截留水 SS 平均浓度为 1.77 mg/L ,其他污染物浓度也不高,显然是拦截了清洁的径流雨水。

根据上述对比分析可知,容积式对径流雨水水质和水量变化的适应性较差,会发生错误的截留和弃流,而光感式的适应性较好。具体来说,对于雨峰偏前的单峰降雨,初期冲刷效应明显,径流污染物浓度前高后低,容积式是比较适合的,但也存在缺陷,它不管雨量大小、前期旱天数长短、流域面沉积的污染物量多少,均采用相同的截留量,这是不妥的。对于两场雨间隔时间短、整场雨径流污染物浓度均很低的情况,容积式是不适用的。多峰降雨会导致二次冲刷,后峰降雨会导致后冲刷,径流污染物浓度往往出现多个峰值,甚至峰值偏后,此时容积式是不适用的。而对于不同前期旱天数下的各类雨型,光感式均是适用的。

4 结论

① 扬州市内 3 个典型地点 11 场降雨的 70 个径流水样,除 TN 外其余污染物浓度均与光衰减量具有中、高强度相关性,Kendall 协和系数为 0.794,表明径流水质指标与透光性具有较高的一致性,可用光衰减量反映水质变化,作为径流雨水分质截留的依据。

② 与容积式截留模式相比,在截留体积相同的条件下,基于光感技术的径流雨水分质截留模式所拦截的污染物质量增加了 $17\% \sim 105\%$,该模式能根据径流水质和水量变化调整截留量,更加准确地截留高污染径流雨水、弃流低污染径流雨水。

参考文献:

[1] 何佳,郑一新,徐晓梅,等. 滇池北岸面源污染的时空特征与初期冲刷效应[J]. 中国给水排水,2012,28(23):51-54.
He Jia, Zheng Yixin, Xu Xiaomei, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and first flush effect of urban non-point source pollution in north bank of Dianchi Lake[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(23):51-54(in Chinese).
[2] 孟莹莹,张书函,陈建刚,等. 基于污染负荷控制的屋面初期径流弃除量探讨[J]. 中国给水排水,2010,26(7):40-42.
Meng Yingying, Zhang Shuhan, Chen Jiangang, et al. First flush discharge volume of roof runoff based on pollution load control[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(7):40-42(in Chinese).
[3] Sansalone J J, Cristina C M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(11):1301-1314.
[4] Selvakumar A, Muthukrishnan S, Madge B, et al. The Use of Best Management Practices (BMPs) in Urban Watersheds[M]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 2005.
[5] 车伍,张炜,李俊奇,等. 城市雨水径流污染的初期弃流控制[J]. 中国给水排水,2007,23(6):1-5.

- Che Wu, Zhang Wei, Li Junqi, *et al.* Initial split-flow control of urban rainwater runoff pollution [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(6): 1-5 (in Chinese).
- [6] 车伍, 张伟, 李俊奇. 城市初期雨水和初期冲刷问题剖析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(14): 9-14.
- Che Wu, Zhang Wei, Li Junqi. Analysis of urban initial rainwater and first flush [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(14): 9-14 (in Chinese).
- [7] 李贺, 张秋菊, 李田. 屋面径流污染物的出流类型与水质特性研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 90-93.
- Li He, Zhang Qiuju, Li Tian. Study on outflow types of pollutants in roof runoff and quality characteristic [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(9): 90-93 (in Chinese).
- [8] 刘文清, 崔志成, 董凤忠. 环境污染监测的光学和光谱学技术[J]. 光电子技术与信息, 2002, 15(5): 1-12.
- Liu Wenqing, Cui Zhicheng, Dong Fengzhong. Optical and spectroscopic techniques for environmental pollution monitoring [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2002, 15(5): 1-12 (in Chinese).
- [9] Goonetilleke A, Egodawatta P, Kitchen B. Evaluation of pollutant build-up and wash-off from selected land uses at the Port of Brisbane, Australia [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(2): 213-221.



作者简介:陈翺(1993-),女,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为水体污染控制。

E-mail: 471761443@qq.com

收稿日期: 2018-05-27

(上接第118页)

- concrete clogging material before and after void maintenance [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(6): 55-58 (in Chinese).
- [13] 马健萍. 彩色透水混凝土路面工程管理实践[J]. 广东公路交通, 2011(3): 52-54.
- Ma Jianping. Color pervious concrete pavement project management practices [J]. Guangdong Highway Communications, 2011(3): 52-54 (in Chinese).
- [14] 张逆. 透水路面渗水系数测试方法比较研究[J]. 公路交通技术, 2016, 32(1): 6-9.
- Zhang Ni. Comparison and study on test methods for water permeability coefficients of permeable pavement [J]. Technology of Highway and Transport, 2016, 32(1): 6-9 (in Chinese).
- [15] 唐益群, 杨坪, 王建秀, 等. 工程地下水[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011.
- Tang Yiqun, Yang Ping, Wang Jianxiu, *et al.* Engineering Groundwater [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011 (in Chinese).
- [16] Youngs E G. Developments in the physics of infiltration [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(2): 307-313.
- [17] Montes F, Haselbach L. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete [J]. Environ Eng Sci, 2006, 23(6): 960-969.



作者简介:赵金辉(1976-),男,陕西华县人,博士,副教授,研究方向为水资源利用及水处理理论与技术。

E-mail: zjh-huaxian@163.com

收稿日期: 2018-08-23