

基于暴雨洪水管理模型的雨水工程环境效益 评估方法研究*

凌文翠 范玉梅 孙长虹 刘桂中[#]

(北京市生态环境保护科学研究院,国家城市环境污染控制工程技术研究中心,北京 100037)

摘要 以COD为例,利用暴雨洪水管理模型预测了北京市农村居民区雨水径流污染物排放负荷,研究了降雨强度和不同季节对雨水污染物排放的影响。结果表明,降雨强度越大,COD浓度峰值出现越早,排放负荷越大。在前期干旱日为30 d、降雨历时为120 min时,降雨重现期由0.5 a增加至5.0 a,COD排放负荷增加了29.5%。分别采用前期干旱日2 d、降雨重现期5.0 a和前期干旱日30 d、降雨重现期0.5 a两种情景代表典型的夏季、春秋季节降雨进行预测发现,春秋季节降雨的COD浓度峰值和排放负荷均远大于夏季。COD浓度峰值夏季为44 mg/L,而春秋季节则达到了183 mg/L;降雨历时120 min时,春秋季节降雨COD排放负荷为42.7 kg,是夏季的1.9倍。以人工湿地为例,考虑生活污水排放和流域水质控制目标,建立了雨污合流制下的雨水工程环境效益评估方法,并预测了人工湿地对雨污合流污染物的削减效果。研究证明,相比夏季,人工湿地在春秋季节可以发挥更大的环境效益。人工湿地联合调蓄池,在典型的春秋季节降雨中的COD削减量为18.4 kg,而夏季仅为3.6 kg。建议北京地区居民区雨水工程根据不同季节采用更适宜的运行方式,提高雨水工程的处理效率和环境效益。

关键词 雨水工程 暴雨洪水管理模型 雨水污染负荷预测 环境效益评估

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.10.015

Environmental benefit assessment method for rainwater treatment projects based on SWMM LING Wencui, FAN Yumei, SUN Changhong, LIU Guizhong. (National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037)

Abstract: Taking COD as an example, the rainwater pollutant emission load of rural residential area in Beijing was predicted by SWMM, and the influence of rainfall intensity and season on rainwater pollutant emission was studied. The results showed that with the greater rainfall intensity, the COD peak concentration would appear earlier and the emission load was greater. When the rainfall repetition period increased from 0.5 a to 5.0 a at the antecedent dry days of 30 d and rainfall duration of 120 min, the COD emission load increased by 29.5%. Two scenarios, namely the antecedent dry days of 2 d, rainfall repetition period of 5.0 a and the antecedent dry days of 30 d, rainfall repetition period of 0.5 a, were used to represent typical summer and spring-autumn rainfalls respectively, and the predictions were made. It was found that the COD peak concentration and emission load in spring-autumn were much greater than those in summer. The COD peak concentration in summer was 44 mg/L, while it reached 183 mg/L in spring-autumn. When the rainfall lasted for 120 min, the COD emission load of spring-autumn rainfall was 42.7 kg, which was 1.9 times that of summer rainfall. Taking the constructed wetland as an example and considering domestic sewage discharge and water quality target in the basin, an environmental benefit assessment method for rainwater treatment projects was established in the context of the rainwater and sewage combined pipeline, and the effect of constructed wetland on pollutant reduction was predicted. It was proved that the constructed wetland had better environmental benefit in spring-autumn than in summer. The constructed wetland combined with detention tank reduced the COD amount by 18.4 kg in spring-autumn rainfall, but only 3.6 kg in summer. It was recommended that a more suitable operation mode should be applied for the rainwater treatment projects in Beijing residential areas according to different seasons to improve the efficiency and environmental benefit of rainwater treatment projects.

Keywords: rainwater treatment projects; SWMM; rainwater emission load prediction; environmental benefit assessment

近年来,随着海绵城市建设的推进,全国各地建设了大量的雨水工程。以北京市为例,多年北京

第一作者:凌文翠,女,1984年生,博士,副研究员,研究方向为水污染防治与水环境管理规划。[#] 通讯作者。

* 国家重点研发计划项目(No.2016YFC0503601);北京市科技计划课题(No.Z161100004516015);北京市环境保护科学研究院基金资助项目(No.2017B05)。

• 1304 •

市水务统计年鉴显示,2011—2018年,全市雨水工程从1 706处增至2 683处,增幅达57.3%。如此大量的雨水工程建设,其雨洪控制效果和对地表水环境改善的贡献受到各方关注。与此同时,随着我国城镇建设的飞速发展,不透水下垫面比例日益加大,非点源污染给水环境治理带来了巨大的压力^[1-3]。当前迫切需要对大量的雨水工程进行环境效益评估,即评价雨水工程对所在流域非点源污染物的削减能力,为流域管理和目标水体达标规划提供科学支撑。

当前,已有很多学者对雨水工程进行了径流量模拟和雨洪控制效果评价^{[4]628-634,[5-8]}。另外也有学者对雨水工程的污染物削减效率进行了研究^[9-13],但是大多数研究仅是从雨水工程进水、出水的角度评价了工程的污染物削减比例,不足以对流域整体管理和规划提供支撑。国外非点源污染研究起步较早,先后开发了一系列模型用于计算雨水径流污染负荷^[14-15],其中暴雨洪水管理模型(SWMM)被广泛用于模拟城市地表径流污染的产生过程,以及排水管网和自然排放系统的水质^{[16],[17]12-14,[18-19]}。人工湿地在北京市农村地区应用广泛,因此本研究以人工湿地为代表,研究雨水工程的环境效益评估方法。利用SWMM对人工湿地汇水范围的非点源污染负荷进行预测,建立雨污合流制下的人工湿地环境效益评估方法,并对人工湿地进行环境效益评估,即考察人工湿地对雨水污染物的削减量,为流域环境管理和规划提供技术支持,同时为其他雨水工程的环境效益评估提供参考。

1 模型构建

1.1 研究区域概况

研究区域为北京市东北部某村庄,该村共有居民156户,438人,居民区面积约为8.3 hm²。村内已建成雨污合流制管网对村庄生活污水、雨水进行收集。该村居民区排水管网共设7个排放口,其中1个排放口的雨污水进入人工湿地处理后排放,人工湿地的汇水面积约为3.1 hm²,占全村居住面积的37.3%。汇水区内地势较为平缓,平均坡度为1.1%。区域内土地利用类型主要为交通道路和屋面。人工湿地设计面积为400 m²,设计处理能力为46 m³/d,水力停留时间为2~4 d。人工湿地附近有天然坑塘作为其调蓄池,容积约为3 800 m³。

1.2 模型构建与验证

降雨数据是SWMM的主要输入变量,本研究

中采用北京市暴雨强度公式和暴雨雨型合成的降雨过程线来分析获取相关数据。北京市分为2个暴雨分区,研究区域所在地为Ⅱ区范围,设计暴雨强度根据降雨历时和重现期的不同按式(1)计算^[20]。

$$q = \frac{2001 \times (1 + 0.811 \times \lg P)}{(t + 8)^{0.711}} \quad (1)$$

式中: q 为设计暴雨强度,L/(s·hm²); P 为设计重现期; a ; t 为降雨历时,min。

模型所需的水力基础数据主要来自管网施工CAD图、卫星影像图和高程数据。利用ArcGIS处理示范区数字高程模型(DEM)数据,获得每个汇水子区域的平均坡度。

根据基础资料,遵循概化原则,将该村居民点划分为40个汇水子区域,其中包括管道61段,节点61个,排放口7个,概化图见图1。

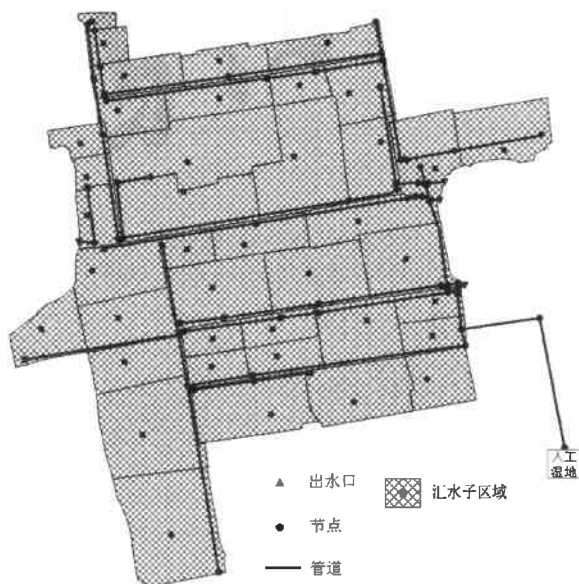


图1 研究区域管道概化图

Fig.1 The simplified graph of pipeline in the study area

研究区域内土地利用类型分为交通道路和屋面,产流模型选用Horton入渗模型。本研究区域缺乏实测数据,通过对汇水区域综合径流系数以及径流系数模型模拟值的对比来率定水文参数^[21-22]。汇水区域几乎全部为不透水下垫面,因此选用建筑稠密中心区的综合径流系数0.6~0.8^[23]。最大、最小入渗速率分别选用75.00、3.18 mm/h,衰减常数为4.5 h⁻¹,汇水区域不透水区和透水区的曼宁粗糙率分别为0.014、0.030,管道曼宁粗糙率选用0.013^{[17]95}。通过模型计算得到汇水区域内综合径流系数为0.72,在0.6~0.8范围内,说明上述采用的参数集是合理的,可以用于研究区域的雨水污染负荷

预测分析。

水质模型参数根据研究区域的特点和参考文献进行选取,分别选用饱和增长函数和指数函数模型模拟 COD 的累积和冲刷过程,半饱和常数取 20 d,交通道路的清扫去除率取 70%。COD 在交通道路、屋面的最大累积量分别为 60、30 kg/hm²,交通道路、屋面的冲刷系数分别为 0.006、0.007 mm⁻¹,冲刷指数分别为 1.8、1.7^[24-25]。采用模型效率系数(也称为纳什效率系数(N_s),计算方法见式(2))评价模型模拟的精度,一般认为 N_s 大于 0.5 表示模型拟合精度比较理想^[26]。本研究选取 2018 年 9 月 28 日 11:00—13:00 的降雨进行水质模型验证,计算得到模型的 N_s 为 0.94。进一步采用相对误差(R_e ,%)来验证模型的合理性,计算得到 R_e 为 15%,由此可见本研究建立的水质模型较为可靠^{[4]630}。

$$N_s = 1 - \frac{\sum (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

式中: $Q_{o,i}$ 为第 i 时刻的实测 COD 质量浓度,mg/L; $Q_{s,i}$ 为第 i 时刻的模拟 COD 质量浓度,mg/L; $\bar{Q}_o$ 为实测 COD 质量浓度的平均值,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 人工湿地汇水区内雨水污染物负荷预测

2.1.1 降雨强度对雨水污染物排放的影响

选择一系列降雨重现期进行径流量和污染物浓度的变化趋势研究,以此反映降雨强度对雨水污染物的影响。从模型预测结果来看,随着重现期的增加,径流量峰值越来越大,但是不同重现期的径流量峰值均出现在 50 min 左右。

为了对比降雨强度对雨水污染物排放的影响,模拟了前期干旱日为 30 d 时,不同重现期降雨的 COD 浓度,并进行了排放负荷预测。COD 排放负荷指一场降雨从发生起开始累积排放的 COD 总量,即 COD 浓度随降雨历时变化的积分值。预测结果显示(见图 2),降雨强度对污染物峰值的出现时间有影响,降雨强度越大,污染物峰值出现的时间越早。 $P=0.5$ a 时,COD 质量浓度峰值出现在 55 min; $P=5.0$ a 时,则提前至 45 min。这是因为降雨强度越大,对地面污染物冲刷强度越大,污染物进入径流所需时间越短。另外,随着降雨强度的增大,污染物的峰值浓度有变小趋势,但并不明显。

径流污染物排放总量对流域水环境管理有重要

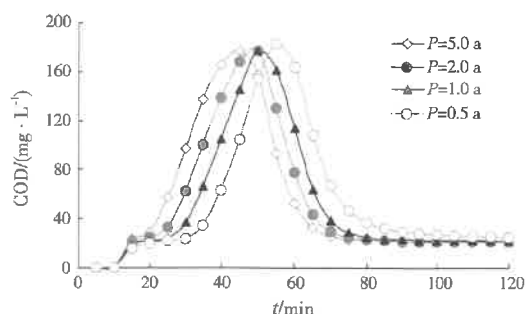


图 2 降雨强度对 COD 质量浓度的影响
Fig.2 Influence of rainfall intensity on COD concentration

意义,因此利用模型对降雨中的 COD 排放负荷进行了预测,结果见图 3。整体上,随着降雨历时的增加,COD 排放负荷逐渐增加,30~60 min 时增加速度较快,此时段正是径流量迅速上升的阶段;而在降雨后期(60~90 min),径流量保持在较高水平,但是 COD 排放负荷增加明显变缓。对不同重现期的降雨进行对比发现,随着重现期的增大,COD 排放负荷逐渐增加,降雨历时为 120 min,重现期由 0.5 a 增加至 5.0 a 时,COD 排放负荷由 42.7 kg 增加至 55.3 kg,增加了 29.5%,这是降雨强度增大对污染物的冲刷强度增大导致的。

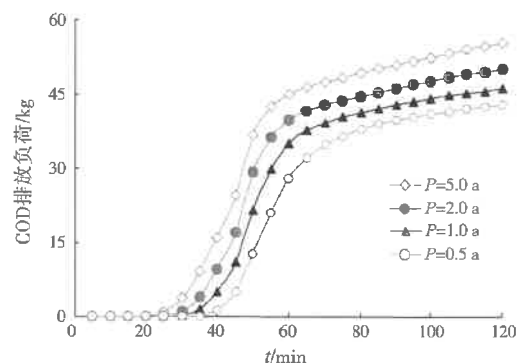


图 3 降雨强度对 COD 排放负荷的影响
Fig.3 Influence of rainfall intensity on COD emission load

2.1.2 不同季节的降雨对雨水污染物的影响

北京市降雨有明显的季节特征,夏季降雨集中且强度较大,6、7、8 月集中了全年 80% 的雨量,春秋季节降雨间隔时间较长且强度小。因此本研究采用 $P=5.0$ a、前期干旱日为 2 d 的降雨代表夏季降雨, $P=0.5$ a、前期干旱日为 30 d 的降雨代表春秋季节降雨。

采用模型对不同季节降雨引起的 COD 污染情况进行了模拟,结果见图 4。夏季降雨污染物浓度峰值明显低于春秋季节,夏季 COD 质量浓度峰值为 44 mg/L,接近于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类限值,而春秋季节 COD 质量浓度峰

值则达到了 183 mg/L, 接近于生活污水。出现这种现象一是因为夏季降雨强度大, 地面径流量大, 对污染物有稀释作用, 根据模拟结果, 夏季径流峰值为 $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$, 春秋季则为 $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$; 二是因为春秋季降雨前干旱日较长, 地面污染物累积较多。不同季节降雨引起的 COD 排放负荷变化趋势也有明显区别, 夏季降雨 COD 排放负荷在 30~55 min 期间增长较快, 55 min 后增速明显变缓。春秋季降雨则在 45~70 min 期间增长较快。两者对比可发现, 20~45 min 时, 夏季降雨 COD 排放负荷大于春秋季; 由前述可知, 在前期干旱日相同时, 降雨强度越大, COD 排放负荷越大, 说明在此时段, 降雨强度对 COD 排放负荷的影响起主导作用。50 min 后, 春秋季降雨 COD 排放负荷快速增加, 超过夏季, 降雨强度对 COD 排放负荷的影响逐渐减弱, 前期干旱日影响起主导作用。降雨历时达到 120 min 时, 春秋季降雨的 COD 排放负荷为 42.7 kg, 远高于夏季的 22.3 kg, 是夏季的 1.9 倍。

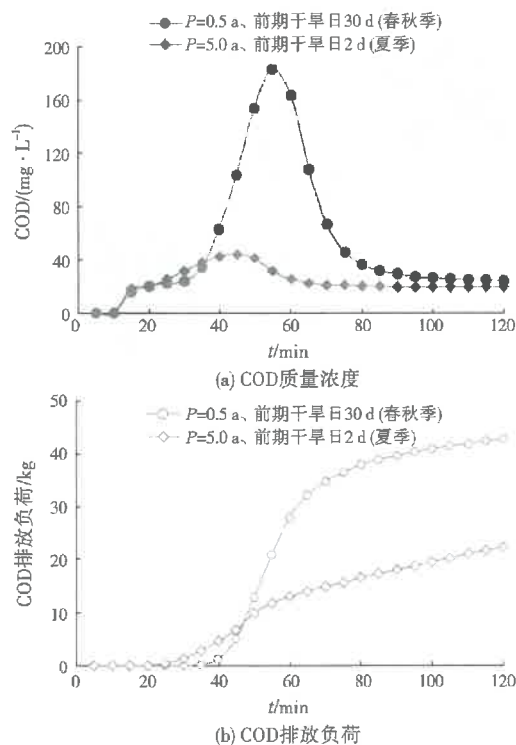


图4 不同季节降雨的污染物排放

Fig.4 Pollutant emission of rainfall in different seasons

由此可以看出, 以北京市为代表的北方地区, 雨水径流污染控制重点在春秋季的降雨污染物, 特别是春季, 经过秋冬季长时间的污染物积累, 降雨中污染物浓度和排放负荷均较大。

2.2 雨污合流制下的人工湿地环境效益评估

人工湿地汇水区内采用雨污合流制管网, 考虑

生活污水的排放, 分春秋季和夏季两种场景, 预测人工湿地对雨污水污染物的削减效果, 从而对不同季节时人工湿地的环境效益进行评价。生活污水排放量按照人均污水产生量 64 L/d 和居住人数进行计算, COD 按 250 mg/L 计^[27]。从模拟结果 (见图 5) 可以看出, 春秋季降雨中, 雨污水 COD 浓度在 15、55 min 时出现两个峰值, 分别是生活污水的排放和降雨径流引起的。55 min 后, COD 浓度逐渐降低, 80 min 时, COD 质量浓度降至 37 mg/L 。在夏季降雨中, 雨污水 COD 浓度峰值出现在 15、45 min, 55 min 时, COD 质量浓度降至 32 mg/L 。

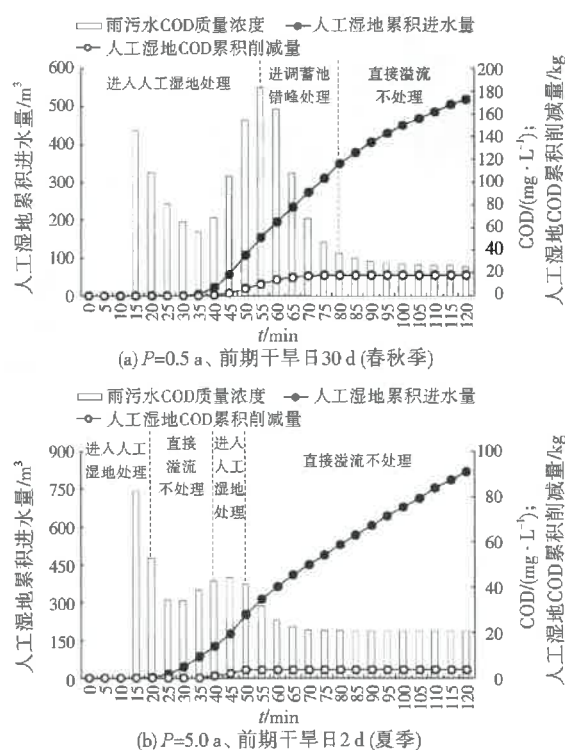


图5 人工湿地对 COD 的削减量

Fig.5 COD reduction by constructed wetland

研究区域所在流域的目标水质为 GB 3838—2002 V 类, 因此水质优于 V 类的雨污水不进行处理, 直接溢流排放至地表水体, 劣于 V 类的雨污水进入调蓄池和人工湿地进行处理后排放。综合考虑实际监测和文献报道, 调蓄池和人工湿地对 COD 的总削减率取 50% ^[28-31]。

春秋季降雨中, 人工湿地需对前 80 min 的雨污水进行收集处理, 截至此时间点, 汇入到人工湿地的水量达到 348 m^3 。人工湿地总体可容纳水量约为 150 m^3 , 其余水量溢流进入调蓄池, 通过人工湿地进行错峰处理, 可实现水质劣于 GB 3838—2002 V 类的雨污水全收集处理。按照上述情形, 在此场降雨

中人工湿地 COD 削减量为 18.4 kg。同理可计算出夏季降雨中,水质劣于 V 类的雨污水量约为 129 m³,人工湿地可以将其全部收集处理,COD 削减量为 3.6 kg。

通过上述研究可以看出,北京地区春秋季节降雨的污染物排放负荷较夏季更大。从水环境规划的角度,雨水工程在春秋季节需承担更大的处理负荷。因此在实际应用中,可以因地制宜采用收集调蓄、错峰处理的方案,使雨水工程发挥更大的环境效益。

3 结论与建议

本研究利用 SWMM 进行了农村居民区雨水污染预测,发现春秋季节降雨的污染物排放负荷远大于夏季,春秋季节降雨污染控制,特别是初期雨水治理应引起重视。北京地区夏季和春秋季节降雨中,雨水工程面临的雨污水处理压力有较大差别。春秋季节降雨量相对较小,但是雨水工程需要承担的雨污水处理负荷较大,夏季则相反。因此建议北京地区居民区雨水工程根据季节采用更适宜的运行方式,提高雨水工程的利用率和处理效率。

本研究结合流域水质控制目标,建立了雨污合流制下的雨水工程环境效益评估方法,有利于今后的水环境精细化管理,特别是非点源污染清单的建立,但是仍需对不同类型、不同规模的雨水工程进行系统评估,为流域尺度非点源污染控制提供基础数据。另外本研究建立的模型仍然有需要改进的地方,如研究区域采用雨污合流管网,但是模型没有考虑雨水冲刷管网沉积物造成的污染排放;又如模型多采用文献数据,应在北京市内分区域进行模型参数的实验,准确测定水质模型所需要的参数,建立更加精准的雨水污染负荷模型。

参考文献:

- [1] GUO H Y, WANG X R, ZHU J G. Quantification and index of nonpoint source pollution in Taihu Lake region with GIS[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2/3): 147-156.
- [2] SHEN Z Y, CHEN L, DING X W, et al. Long-term variation (1960-2003) and causal factors of non-point-source nitrogen and phosphorus in the upper reach of the Yangtze River[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 252/253: 45-56.
- [3] 王书敏,郭树刚,何强,等.城市流域降雨径流水质特性及初期冲刷现象[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(4): 532-539.
- [4] 杨钢,徐宗学,赵刚,等.基于 SWMM 模型的北京大红门排水区雨洪模拟及 LID 效果评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(5).
- [5] BERNDTSSON J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 351-360.
- [6] JU Y L, MIN J L, HAN M A. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 152: 171-176.
- [7] LIANG M, BING Q, CHANG Q Z. Performance of urban rainwater retention by green roof: a case study of Jinan[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 178/179/180/181: 295-299.
- [8] 朱文彬,孙倩莹,李付杰,等.厦门市城市绿地雨洪减排效应评价[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(1): 74-84.
- [9] 毛月鹏,汪志荣,史怡然,等.生物滞留池对屋面径流基本污染物的控制[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(1): 29-34.
- [10] WANG S M, LIN X Y, YU H, et al. Nitrogen removal from urban stormwater runoff by stepped bioretention systems[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 340-348.
- [11] GAVRIC S, LEONHARDT G, MARSALEK J, et al. Processes improving urban stormwater quality in grassswales and filter strips: a review of research findings[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 431-447.
- [12] STAGGE J H, DAVIS A P, JAMIL E, et al. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff[J]. *Water Research*, 2012, 46(20): 6731-6742.
- [13] LI D, ZHENG B H, LIU Y, et al. Use of multiple water surface flow constructed wetlands for non-point source water pollution control[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102: 5355-5368.
- [14] VOLK M, BOSCH D, NANGIA V, et al. SWAT: agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 175: 1-3.
- [15] PALLA A, GNECCO I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528(9): 361-368.
- [16] TEMPRANO J, ARANGO O, CAGIAO J, et al. Stormwater quality calibration by SWMM: a case study in Northern Spain[J]. *Water SA*, 2006, 3(1): 55-63.
- [17] ROSSMAN L A. Stormwater management model user's manual Version 5.0[R]. Washington D.C.: USEPA, 2010.
- [18] 马晓宇,朱元勋,梅琨,等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(1): 95-102.
- [19] 朱寒松,董增川,曲兆松,等.基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. *水资源保护*, 2019, 35(2): 32-36.
- [20] 北京市水利局.北京市水文手册:第一分册[R].北京:北京市水利局,1999.

(下转第 1315 页)