

绿色校园雨水利用及 WASP 模型模拟评价

崔慧萍¹, 彭森¹, 吴卿¹, 赵新华¹, 杨立焜²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中规院<北京>规划设计公司, 北京 100044)

摘要: 大学校园汇水面积大,雨水容易收集,若对雨水进行适当处理后再利用,将具有良好的环境和经济效益。天津市某大学在校园生态集雨区设计与建设实施过程中,建立了集植草沟、下凹式绿地、生态护岸为一体的生态雨水收集系统,以渗蓄和净化雨水、削减洪峰流量、减轻地表径流污染。以该大学校园雨水径流补充景观水系为例,介绍了绿色校园雨水利用的低影响开发(LID)措施,并利用 WASP 模型进行水质模拟,评估 LID 措施的预期效果,以期为校园雨水利用提供参考。

关键词: 雨水利用; 低影响开发; WASP 模型; 景观水系补充; 水质模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0127-06

Rainwater Utilization and WASP Simulation Evaluation in Green Campus

CUI Hui-ping¹, PENG Sen¹, WU Qing¹, ZHAO Xin-hua¹, YANG Li-kun²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. CAUPD Planning & Design Consultants Co., Beijing 100044, China)

Abstract: Rainwater is easy to be collected in the university campuses for the huge catchment areas. If rainwater can be utilized, it will have good environmental and economic benefits. In the process of designing and building the campus ecological rainwater collection area in a university in Tianjin, the ecological rainwater collection system consisted of grass gully, concave greenbelt and ecological embankment was established, so as to infiltrate, store and purify the rainwater, reduce the peak flow rate and mitigate the pollution of surface runoff. Taking the rainwater runoff replenishing the landscape water system of the university as an example, the low impact development (LID) measures of rainwater utilization in green campus were introduced, water quality was simulated by using WASP model, and the expected effect of LID measures were evaluated, which desired to provide reference for rainwater utilization in campus.

Key words: rainwater utilization; low impact development; WASP model; landscape water supplement; water quality simulation

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高,景观水体作为一种可以防洪排涝、调节气候、美化环境、陶冶情操的特殊“元素”,在越来越多的城市开始出现。然而,大多数景观水体都是静止或流动性较差的封闭缓流水体,自身净化能力差、水环境容量

小^[1]。因此,如何改善与维持景观水体水质成为亟需解决的问题。笔者以天津市某大学校园为例,以雨水作为景观水体的补充水源^[2,3],介绍了校园雨水径流污染控制措施,在此基础上利用 WASP 模型模拟景观水体水质,评估雨水径流污染控制措施的

预期效果,旨在为校园雨水利用提供参考。

1 WASP 模型

水质分析模拟程序(WASP)是美国国家环保局开发的专业水质模型软件^[4],为一维动力箱式模型,基于质量守恒原理求解方程,可用于分析各种水体的水质变化问题。WASP模型主要由富营养化模块EUTRO和有毒化学物模块TOXI两部分组成,其中EUTRO模块应用最广泛,可以满足一般性的水体研究要求。EUTRO模块中包括无机磷(OPO_4)、有机磷(OP)、氨氮($\text{NH}_3 - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、有机氮(ON)、叶绿素a(Chl-a)、溶解氧(DO)、碳生化需氧量(CBOD)等8个水质指标,其相互影响和转化可归纳为4个反应系统:磷循环、氮循环、溶解氧平衡和藻类生长系统。本研究主要选取CBOD和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 两个指标进行模拟。

2 实例分析

2.1 校园概况

选取天津市某大学校园的景观水体作为研究对象,校园水域面积为 $15.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,主要包括中心湖、中心河、溢流湖及人工湿地(如图1所示)。校园雨洪排放系统为多层级排放系统,中心岛生态集雨区面积约为 $85.67 \times 10^4 \text{ m}^2$,中环管道集雨区面积为 $29.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,外环排雨区面积约为 $92.39 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。中心岛生态集雨区采用了多种生态雨水收集方式,将雨水作为景观水体的重要补充水源;中环管道集雨区雨水通过管道进行收集,并经人工湿地后回用于校内景观水系补水;外环自然排雨区内径流排入校园外城市二级河道。

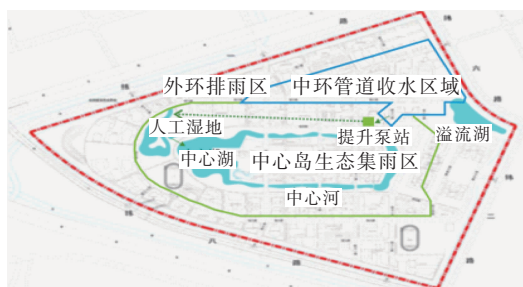


图1 规划校园水系分布及雨水排水分区

Fig. 1 Layout planning of water area and rainwater discharging area in campus

2.2 校园景观水体补水平衡分析

① 校园雨水总量计算

不同类型下垫面对应不同的雨水径流系数,根

据《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》(GB 50400—2016),在未采用任何雨洪控制措施的前提下,各类型下垫面的雨水径流系数如下:水面面积为 15.44 hm^2 ,径流系数为1;绿地面积为 58.97 hm^2 ,径流系数为0.15;道路广场(混凝土和沥青路面)面积为 14.1 hm^2 、径流系数为0.8,道路广场(铺砌等路面)面积为 86.83 hm^2 、径流系数为0.4;建筑屋面面积为 47.45 hm^2 ,径流系数为0.8;下垫面总面积为 222.79 hm^2 ,综合径流系数为0.486。

可利用的雨水设计径流总量计算公式为:

$$W = 10 \Psi_c h_y F \quad (1)$$

式中: W 为雨水设计径流总量, m^3 ; Ψ_c 为雨水径流系数; h_y 为设计降雨量, mm ; F 为汇水面积, hm^2 。其中, h_y 来源于天津市水科院提供的天津市多年平均各月降雨资料,1月—12月的平均降雨量分别为3.94、4.5、7.43、26、42.54、78.56、183.11、168.25、43.78、27.01、12.27、5.51 mm。

经计算,该大学校园全年降雨总量为 $65.12 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中在未采取任何雨洪控制措施的前提下,可形成径流的雨水总量为 $62.15 \times 10^4 \text{ m}^3$ (11月—次年3月初除降到水面的雨水可以利用外,其他下垫面因无法形成径流,故不能利用)。根据雨水损失量得出,集雨区(中心岛生态集雨区+中环管道集雨区)在未采用雨洪控制措施的前提下,全年可形成的径流量约为 $43.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。中心岛生态集雨区采用生态滞洪措施后,径流量大幅度减少,规划集雨区全年可形成的径流量约为 $32.82 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

② 校园景观需水量计算

景观水系水量自然损失主要因为蒸发及护岸、湖底渗透造成的渗漏。考虑最不利情况下,该大学校园景观水体水量损失主要为蒸发作用和渗透作用。根据天津市水科院提供的天津市历史蒸发资料,可得出景观水系全年需水量为 $21.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中冬季(12月—次年2月)不需要补水,全年最大月需水量为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$,发生在5月份,校园景观逐月需水量见图2。可知,规划集雨区全年可汇集的雨水水量多于景观水体全年的损失水量,雨水盈余量为 $11.6 \times 10^4 \text{ m}^3$;在6月—9月的雨季,规划集雨区可汇集的雨水径流量多于景观补水需求,雨水盈余量约为 $16.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,此盈余量通过管道收集排到溢流湖,当溢流湖水位过高时,通过雨水泵站排放到校园外城市二级河道中;在4月、5月和10月的旱季,

规划集雨区可汇集的雨水径流量少于景观水系的补水需求,还需 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的补水,此时可考虑将市政中水作为补水水源;冬季(12月—次年2月)不补水;3月和11月雨水径流量很少,靠雨水作为补充水源不能满足景观水体补水需求,应考虑将市政中水作为补水水源。

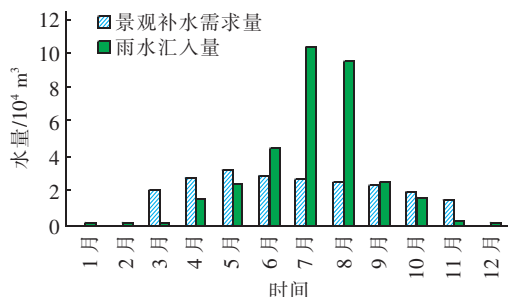


图2 逐月雨水汇入量与景观补水需求量

Fig.2 Rainwater flow and landscape water supplement demand of each month

2.3 校园雨水径流污染控制措施

雨水用于景观水体补充水源基本可以满足要求,不足部分可以由其他水源进行补充。但是雨水径流污染较大,若直接进入景观水体会对水体水质产生较大影响,因此需要采取一些雨水污染控制措施进行后再补充景观水体。

校园雨水利用系统主要考虑中心岛区和中环管道集雨区,雨水生态利用系统具体规划将围绕中心岛区展开,如图3所示。

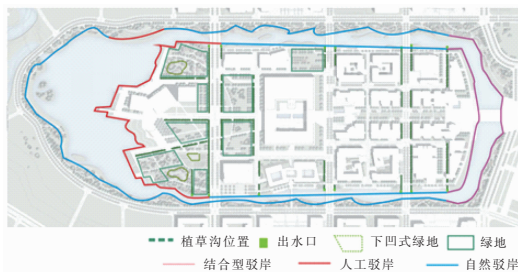


图3 雨水生态措施布置示意

Fig.3 Layout of rainwater ecological measures

① 下凹式绿地

下凹式绿地^[5]是绿地雨水调蓄技术的一种,较普通绿地而言,下凹式绿地利用下凹空间充分蓄集雨水,显著增加了雨水的下渗时间。黄民生等人^[6]研究发现,下凹式绿地系统对雨水径流中的污染物去除作用明显,对有机物、氮、磷的平均去除率可达到40%~50%以上。

② 植草沟及一般透水性下垫面

该校园绿地结合植草沟进行设置,雨水流经绿地和植草沟后可以得到净化。杨清海等人^[7]研究发现在2h的降雨过程中,绿地对雨水径流中COD、氨氮的平均去除率分别为41.3%、44.1%,且随着降雨时间的延长,去除率逐渐降低。

透水路面比普通路面的渗透系数大,可防止路面积水,使雨水下渗、进一步净化,最终补充地下水或者通过管道收集利用。该校园慢行道路、人行便道以及停车场都采用透水铺装,中心岛透水铺装路面覆盖率可达到85.8%,形成的雨水径流通过雨水管道收集后进入景观水体。

③ 生态护岸

缓坡绿化带^[8]等生态护岸设施对雨水中的污染物具有拦截作用,尤其是对初期雨水可起到净化作用,可有效控污,减少入河污染物总量。张国珍等人^[9]研究表明植被带对雨水径流污染物有一定的去除作用,对COD和氨氮的去除率分别约为40%和45%。该大学校园景观水系岸线以自然驳岸(水生植物驳岸)为主,同时还规划了人工驳岸(几何式砌石驳岸、砌石亲水平台驳岸)、结合型驳岸等,构成了多样的水体景观。

④ 人工湿地

人工湿地建在校园中心湖西侧,占地约6500 m²,人工湿地净化后出水汇入中心湖,按照前期规划人工湿地设计出水水质为Ⅳ类水。

2.4 校园景观水体 WASP 模型构建

2.4.1 模型构建

为了考察雨水径流污染控制措施的实际效果,利用WASP软件对景观水体建立水质模型,模拟未处理雨水直接对景观水体补水的情况以及雨水经净化后对景观水体补水的情况,通过对比得出雨水径流污染控制措施的预期效果。

WASP模型的建立主要包括7部分:①模拟和输出控制;②确定模型的分段数据;③污染物的平流和弥散作用的界定;④边界浓度的确定;⑤点源与面源污染负荷的确定与输入;⑥动力学参数、常量与时间变化相关函数的输入;⑦初始浓度的输入。对于模型的模拟和输出控制,本研究以该大学校园的景观水体作为模拟对象,以景观水体在2015年9月—2016年9月的水质变化作为输出,主要模拟的指标为COD、氨氮。

在建立 WASP 模型之前,需要对景观水体进行分段处理,在同一片段内水体流速变化均匀,具体分段情况见图 4,片段 1~7 为中心湖区域,片段 8~17 为中心河区域。片段 1 为中环集雨区经人工湿地处理后Ⅳ类水体输入端;片段 2、5、8、9、12、13 为雨水输入片段,这 6 个片段存在雨水口,其他通过径流进入水体的雨水折算到雨水口一起汇入水体;片段 16 为景观水体溢流处。各个片段的长、宽、水深等基础数据输入到 WASP 模型的 SEGMENT,景观水体水质本底值输入 SEGMENT 中的 Initial Concentrations (COD、氨氮平均浓度分别为 46、1.06 mg/L)。

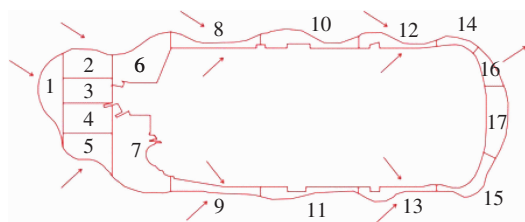


图 4 研究区域分段示意

Fig. 4 Schematics of regional segmentation

对于污染源的输入,在前期规划中,为了控制污染源,景观水体无污水输入,且中心岛区内基本为慢行道路系统,仅设置一条机动车道路,岛内限制机动车的进出,故景观水体污染物的来源主要为雨水径流污染。

根据前期调研及水质监测,得到该校园一般道路雨水径流中 COD 和氨氮浓度的平均值分别为 166、2.29 mg/L。根据雨水径流污染措施的削减作用及其规模,预估处理后各下垫面雨水径流水质指标如下:水面面积占比为 11.58%,COD 和氨氮分别为 20、1.50 mg/L;建筑屋面面积占比为 19.13%,径流 COD 和氨氮浓度分别为 21、1.50 mg/L;植草沟及一般透水性下垫面面积占比为 53.13%,对径流中 COD 和氨氮的削减率分别为 41.3%、44.1%,处理后 COD 和氨氮浓度分别为 97.44、1.28 mg/L;下凹式绿地面积占比为 0.19%,对径流中 COD 和氨氮的削减率均为 50%,处理后 COD 和氨氮分别为 83、1.15 mg/L;生态护岸面积占比为 10.75%,对径流中 COD 和氨氮的削减率分别为 50%、45%,处理后 COD 和氨氮浓度分别为 83、1.26 mg/L;一般道路面积占比为 5.22%,径流 COD 和氨氮浓度分别为 166、2.29 mg/L。其中,水面、建筑屋面和一般道路的雨水径流水质为实测值,其他下垫面的径流水

质指标值则是通过参考其他文献中雨水径流控制措施的削减效果预估得到。最后根据面积权重得到处理后雨水径流水质指标 COD 和氨氮的平均浓度分别为 75.85、1.40 mg/L。

建立 WASP 一维水质模型,将雨水径流作为 WASP 模型的点污染源,输入边界浓度设置中,其中边界浓度片段主要为片段 2、5、8、9、12、13。根据天津市的历史降雨数据,确定污染物的流量和流向输入到 WASP 模型的 FLOW 设置中,以 8 月份为例,天津市降雨量为 168.25 mm,校园可形成的雨水径流量为 $18.21 \times 10^4 \text{ m}^3$,考虑管道损失等不可预见的雨水损失量,可利用雨水地表径流按设计总量的 80% 计,水面雨量按 100% 计,可得出未采取雨洪控制措施下校园可形成的雨水径流量为 $12.55 \times 10^4 \text{ m}^3$;因中心岛生态集雨区采用生态滞洪措施后,径流量大幅度减少,根据设计资料,中心岛生态集雨区按原径流量的 50% 计算,得出采取雨洪控制措施下校园可形成的雨水径流量为 $9.55 \times 10^4 \text{ m}^3$,按照 8 月份天津市降雨规律将雨水流量输入到 FLOW 中,为了方便,将每场雨的流量平均到全天,时长为 24 h。

以 2015 年 9 月 10 日作为模型模拟的第 1 天,并将其监测值作为模型的初始浓度。由于模型参数较多,模拟时参数值的选取参考 WASP 用户手册的 Brandywine 案例、Chesapeake 湾富营养化模型、Lake Huron and Saginaw Bay 水质模型、Upper Mississippi 河和 Pepin 湖水水质模型的参数设置,同时参考 WASP 模型应用于长江等实际案例^[10]的参数选取,同时根据实际情况需要对参数进行一定程度的试算与修正,具体见表 1。

表 1 模型具体参数选取

Tab. 1 Specific parameter selection of model

项 目	参数名称	取值	本模型使用值
CBOD	20 °C 时 BOD 衰减系数/ d^{-1}	0.16 ~ 0.21	0.003 2
	BOD 衰减系数的温度系数	1.05	1.08
	BOD 半饱和常数/ ($\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)	0.5	0.5
	BOD 溶解分数	0.5	0.5
$\text{NH}_3 - \text{N}$	20 °C 硝化速率系数/ d^{-1}	0.09 ~ 0.13	0.000 6
	硝化速率系数的温度系数	1.08	1.08

2.4.2 模型检验与有效性分析

为了检验构建的景观水体 WASP 模型,选取靠近雨水排放口附近的景观水体监测点进行验证,并

采用统计学中的相对误差对模型的模拟值与实测值进行分析。

将 2015 年 9 月 10 日作为第 1 天,考虑到冬季结冰的特殊情况,主要模拟 COD 和氨氮浓度在 2015 年度(2015 年 9 月—11 月)与 2016 年度(2016 年 3 月—6 月)的变化情况,其中,雨水排放口附近景观水体监测点的水质模拟值与实测值的比较如图 5 所示。

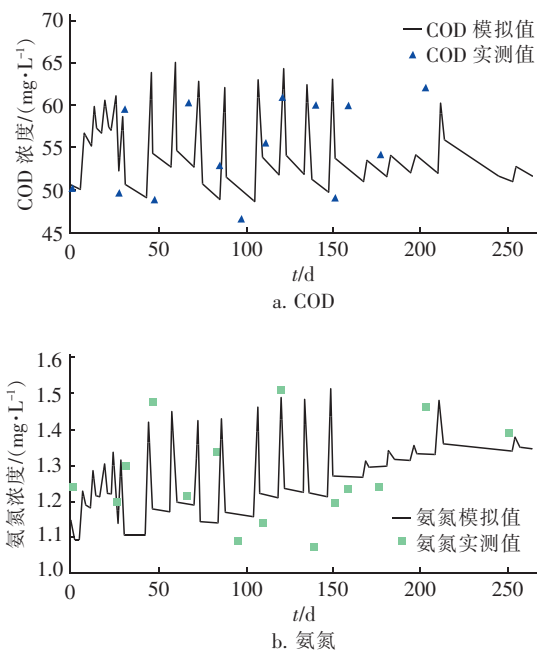


图 5 水质模拟值与实测值的对比

Fig. 5 Comparison of simulated value and monitoring value of water quality

为了进一步评估模型的有效性,利用相对误差对模拟值和实测值进行有效性分析,结果表明,COD 模拟值与实测值的相对误差平均为 8.67%,其中有 92.9% 的相对误差在 15% 以内,最大相对误差也仅为 15.13%,有将近 57.1% 的相对误差在 10% 以内;氨氮模拟值与实测值的相对误差平均为 8.03%,有 93.3% 的相对误差在 15% 以内,最大相对误差也仅为 20.66%,有将近 73.3% 的相对误差在 10% 以内。可见,建立的 WASP 模型能很好地模拟 COD 和氨氮浓度的变化,模型的有效性较好。

2.4.3 水质模拟

校园于 2015 年 9 月开始正式运行,景观水体的污染主要来源于周围地表径流和中心岛雨水排放。利用建立的模型模拟雨水径流控制措施对水质的影响,结果如图 6 所示。

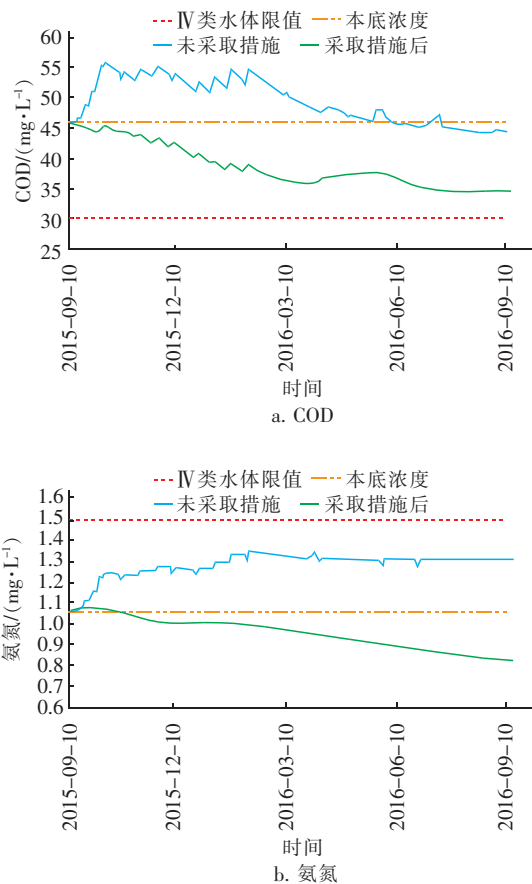


图 6 景观水体中 COD 和氨氮浓度模拟值的变化情况

Fig. 6 Change of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ simulated concentrations in landscape water

由图 6 可知,雨水径流污染经过控制后,景观水体中 COD 与氨氮的平均浓度分别为 38.65、0.95 mg/L,相比未控制时 COD 与氨氮浓度分别降低了 21.77% 和 25.90%。与本底 COD 浓度值相比,未经处理的雨水径流汇入景观水体后,前 9 个月 COD 浓度均高于本底值,后 3 个月低于本底值,这说明水体在自我净化;采取径流污染控制措施后,全年内景观水体的 COD 值均比本底值低,且 COD 值逐渐下降,接近 IV 类水体 COD 限值。与本底氨氮浓度值相比,未经处理的雨水径流汇入景观水体后,全年内景观水体的氨氮值均比本底值高,这说明水体自身对氨氮的降解作用不明显;采取径流污染控制措施后,只有第 1 个月的氨氮值高于本底值,之后均比本底值低,且氨氮值在第 3 个月就降至 1.0 mg/L,达到了 III 类水体标准。总体来看,雨水径流污染控制措施对于整个景观水体水质净化的贡献较大。

3 结论

基于某大学校园的前期规划和建设运行,分析

了可利用雨水径流量与景观水体补水量平衡情况,介绍了校园雨水径流污染控制措施,建立了 WASP 模型,并对雨水径流污染控制措施进行了评估:

① 低影响开发雨水利用技术对雨水径流污染有明显的削减作用,在保障“安全排涝”的前提下,可实现雨水的收集利用。

② 雨水作为一种非常规水源,对于高校、公园等汇水面积大且雨水易于收集利用的场所,如果将其利用起来,不仅可以节约经济成本,而且会缓解水资源缺乏的现状。

参考文献:

- [1] 赵加斌,赵新华,彭森. 变权组合模型在景观水体水质模拟中的应用[J]. 环境工程学报,2015,9(9): 4206-4210.
Zhao Jiabin,Zhao Xinhua,Peng Sen. Application of combination model of variable weight in landscape water quality simulation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2015,9(9):4206-4210(in Chinese).
- [2] 牛志广,陈彦熹,米子明,等. 基于 SWMM 与 WASP 模型的区域雨水景观利用模拟[J]. 中国给水排水,2012,28(11):50-52,56.
Niu Zhiguang,Chen Yanxi,Mi Ziming,*et al.* Simulation of rainwater landscape use in eco-town based on SWMM and WASP models[J]. China Water & Wastewater,2012,28(11):50-52,56(in Chinese).
- [3] 李俊奇,李宝宏,张洁,等. 住区雨水利用与景观水体水质保障工程设计[J]. 中国给水排水,2006,22(24):57-60.
Li Junqi,Li Baohong,Zhang Jie,*et al.* Rainwater utilization and water quality control design for landscape water body in residential area[J]. China Water & Wastewater,2006,22(24):57-60(in Chinese).
- [4] 陈美丹,姚琪,徐爱兰. WASP 水质模型及其研究进展[J]. 水利科技与经济,2006,12(7):420-422.
Chen Meidan,Yao Qi,Xu Ailan. WASP water quality model and its advance in research[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2006,12(7):420-422(in Chinese).
- [5] Dietz M E. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions[J]. Water Air Soil Pollut,2007,186(1):351-363.
- [6] 黄民生,朱勇,谢冰,等. 下凹式绿地调蓄净化城市径流[J]. 建设科技,2010,(1):65-67.
Huang Minsheng,Zhu Yong,Xie Bing,*et al.* Urban concave-down greenbelt system effect on current-runoff drain storage[J]. Construction Science and Technology,2010,(1):65-67(in Chinese).
- [7] 杨清海,吕淑华,李秀艳,等. 城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2008,(2):41-47.
Yang Qinghai,Lv Shuhua,Li Xiuyan,*et al.* Reduction functions of runoff contaminants by the urban greenbelt[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science,2008,(2):41-47(in Chinese).
- [8] 权威. 某高校新校区雨水生态化综合利用研究[D]. 天津:天津大学,2012.
Quan Wei. Research on Ecological and Comprehensive Utilization of Rainwater in a Newly Built Campus[D]. Tianjin:Tianjin University,2012(in Chinese).
- [9] 张国珍,陈现强,韩猛. 不同植被带的人工生态系统对集雨水污染物消减作用研究[J]. 环境工程,2014,32(3):10-14.
Zhang Guozhen,Chen Xianqiang,Han Meng. Research on harvested rain water pollutants removal in the different green artificial ecosystem[J]. Environmental Engineering,2014,32(3):10-14(in Chinese).
- [10] 张永祥,王磊,姚伟涛,等. WASP 模型参数率定与敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(5):28-30.
Zhang Yongxiang,Wang Lei,Yao Weitao,*et al.* Calibration and sensitive analysis on the parameters of the WASP model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2009,20(5):28-30(in Chinese).



作者简介:崔慧萍(1992-),女,山西晋中人,硕士,研究方向为水质模型模拟。

E-mail: cuihuiping1128@163.com

收稿日期:2018-04-23