

[文章编号] 1003—4684(2020)01-0079-07

SWMM 的校园区降雨径流污染及 LID 控制模拟

周明来¹, 潘 璐², 李泽实¹, 刘瑞芬¹

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;

2 武汉鹏森环境科技有限公司, 湖北 武汉 430000)

[摘 要] 为研究武汉市校园区降雨径流污染负荷及其控制措施对城市通江河流域水环境的治理作用, 以武汉市南湖排水片区内湖北工业大学及巡司河为例, 通过室外监测不同降雨事件下校园区内不同下垫面类型降雨径流过程, 以此为基础进行 SWMM 建模, 模拟各典型年校园区降雨径流污染负荷, 并评估海绵化改造(即实施 LID 措施)情景下校园区降雨径流污染入河削减效果。结果表明: 武汉市校园区年降雨径流负荷在各典型年下存在差异, 表现为: 丰水年>平水年>枯水年。校园区平水年 TSS、COD_{Mn}、TN、TP 降雨径流污染负荷分别为 42.64 t、12.24 t、1.24 t、0.058 t, 占校园区生活污水污染负荷的 22.17%、11.09%、1.43%、0.67%。对校园区实施绿色屋顶、透水路面的生物滞留池等 LID 措施后, 一年一遇和十年一遇 2 h 降雨事件所产生的各污染物负荷削减率范围分别为 42.31%~43.95% 和 30.61%~36.63%, 因为 LID 对一年一遇降雨事件的径流总量削减率更高(43.23%), 因而其污染物负荷削减效果更好。

[关键词] 降雨径流; 污染负荷; Storm Water Management Model; Low Impact Development

[中图分类号] X506 **[文献标识码]** A

长江经济带建设是国家发展的重大战略, 武汉市作为长江经济带中游区域的特大城市, 对长江生态环境的保护具有重要作用。作为“龙腰”的武汉有着独厚的区位优势, 市内江河纵横, 湖泊交织, 全境水域覆盖率达 26%, 素有“江城”、“百湖之市”的美誉。但随着快速城市化的发展, 武汉市也面临着水体污染严重、水质整体下降、水生态恶化等问题。针对这些问题, 武汉市出台了《武汉市主城区污水全收集全处理五年行动计划》、“四水共治”等政策, 并积极推进水生态文明和海绵城市建设, 开展城市水环境治理。武汉市有 82 所高校, 在城市中面积占比不少, 校园区污染负荷排放在武汉市水环境污染防治与保护中扮演着重要的角色, 特别是由降雨径流引起的非点源污染负荷的排放对水环境的影响, 值得引起人们的关注^[1-4]。Storm Water Management Model (SWMM) 是美国环境保护署开发的都市雨洪管理模型, 是一个动态的降水-径流模拟模型, 主要用于模拟某单一降水事件或长期连续降雨条件下的水量和水质过程。近年来, SWMM 模型在我国城市雨洪分析与管理中的应用越来越广泛^[5-7], 特别

是对城市典型居住区雨洪模拟应用较多, 但对于城市的重要组成部分校园区研究较少。2014 年在该模型的 5.0 版本中增设了 LID (Low Impact Development) 模块, 可以模拟海绵改造各种工程措施, 如绿色屋顶、透路面、生物滞留池等的降雨径流管理效果, 但如何利用模型有针对性的进行海绵体改造、进行 LID 措施布控, 在我国仍处于探索阶段。

本次研究选取武汉市南湖排水片区内湖北工业大学及巡司河为例, 研究武汉市校园区降雨径流污染负荷及其控制措施对城市通江河流域水环境的治理作用。在对校园区各典型下垫面进行降雨径流过程监测的基础上, 建立基于 SWMM 的降雨径流量水质模型, 估算各典型年内校园区入河污染负荷, 并设置校园区海绵改造情景, 评估实施 LID 措施后校园区入河污染削减效果。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

武汉市南湖排水片区内的降雨径流问题一直备受关注。片区内巡司河长约 16 km, 河宽约为

[收稿日期] 2019-09-05

[基金项目] 国家科技重大专项重点项目(2017ZX07101003-08); 湖北工业大学博士科研启动基金项目(BSQD2016029); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金课题(KF2016-09)

[第一作者] 周明来(1996-), 男, 湖北宜昌人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为生态水利

[通信作者] 刘瑞芬(1986-), 女, 湖北天门人, 湖北工业大学副教授, 研究方向为生态水利, 海绵城市

30 m,西连长江南接汤逊湖,是武汉城区最大的排污明渠。据近年来水质监测数据显示^[8],巡司河整体为劣五类水质,水体表面漂浮大量腐殖质,呈现黑臭状态,对巡司河水环境治理刻不容缓。湖北工业大学位于巡司河西岸,总占地面积达 107 万 m²,校园区生活污水及雨水经管渠收集后直接入河,属直泄式合流制排水体系。随着武汉市治水政策的推行,校园内的生活污水将随截留管进入市政污水厂进行处理后排放,点源污染会得到有效控制,而由降雨所产生的非点源污染还未引起关注,所做研究正是基于此展开。

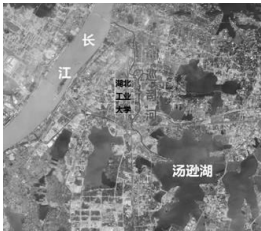


图 1 研究区具体位置

1.2 校园区 SWMM 模型构建

1.2.1 校园区排水系统概化 根据湖北工业大学校内地形和排水特性,利用学校地形地貌图、排水管网图、高程图等资料,将校内分为 101 个子汇水区,96 个节点,30 个排放口,SWMM 模型概化结果见图 2。同时,将校园区分为五种下垫面类型,分别为路面、屋面、绿地、庭院/广场、操场等(图 3),各下垫面面积分别占全校区面积的 9.84%、32.43%、20.23%、29.22%、7.52%,不透水面积比率高达 79.02%。

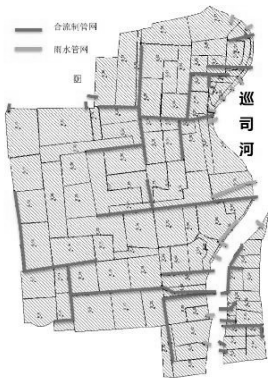


图 2 校园区排水管网分布

1.2.2 SWMM 模型水量参数选取及确定 SWMM 模型产流模拟为非线性水库模型,地表径流量 Q 可以通过曼宁公式(式 1)计算得出:

Q = W \cdot \frac{1.49}{n} \cdot (d - d_p)^{\frac{5}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \tag{1}

式中:Q 为径流量,m³/s;W 为子汇水区集水宽度,m;n 为曼宁糙率系数;d 为蓄水池深度,m;d_p 为最大注蓄深度,m;S 为子汇水区坡度。

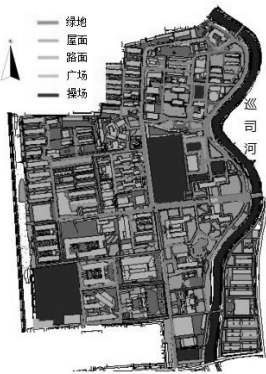


图 3 校园区下垫面类型分布

由于各子汇水区中均包含不同比例的下垫面类型,子汇水区参数由各下垫面参数按面积加权平均后求得。各下垫面的曼宁系数、注蓄量预估值取值参考相关文献、模型用户手册^[9-14],曼宁系数 n 取值范围为 0.011—0.5,注蓄量 d_p 取值均为 2.5 mm。下渗模型选择 Horton 方程^[15],相关参数根据校园区地貌特点赋予相同初始值,如最大下渗率取 40 mm/h,最小下渗率取 2.7 mm/h,衰减系数 2.7 h⁻¹等。管网汇流模拟采用运动波法进行汇流计算^[9],相关参数包括节点与管网信息,节点信息为管内底标高和最大水深,管网信息为入流节点、出流节点、管道形状、最大深度、管长、管道曼宁系数等,均根据已有校园区排水管网图进行概化。

参考有关文献对 SWMM 参数敏感性分析的结果^[17-18],上述参数中对模型模拟结果影响较大的是曼宁系数及注蓄量,本文采用实测降雨事件对此二参数进行率定。选取 2017/9/29 日的降雨事件,对路面、庭院/广场、屋面等下垫面降雨径流过程进行率定。率定通过比较 SWMM 模型流量模拟值与实测值之间的差值,使差值尽可能降低做为参数调整的依据。

以路面下垫面率定结果为例(图 4),在不同时刻 SWMM 模型的流量模拟值与实测值之间的平均误差为 2.29%。模拟的流量过程线与时间轴所组成的面积即为模拟的径流总量,而通过径流公式(2)也可估算本场降雨径流总量。2017/9/29 日降雨为 2.4 mm,路面集水区面积约为 130 m²,径流系数取 0.9,则由径流公式所估算的径流总量为 0.28 m³。径流总量估算值与模型模拟值的误差为 8.0%。选取 2017/10/17 日的降雨事件对上述路面水文参数进行验证,其结果见图 5。该数据表明平均误差为 19.4%,在可接受范围内(≤|±20%|),故认为率定的水量参数较为合理可信。

Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{1000} \tag{2}

式中:Q 为径流量,m³/s;C 为径流系数;i 为降雨强

度,mm/s;A 为集水区面积,m²。

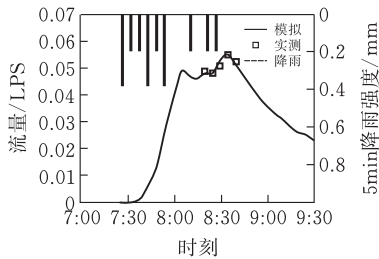


图 4 2017/9/29 日水量参数率定

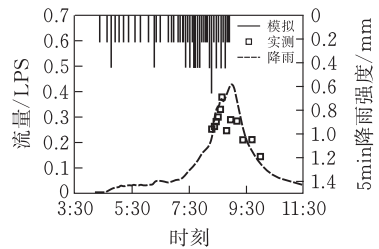


图 5 2017/10/17 日水量参数验证

屋面、庭院/广场下垫面降雨径流过程率定均按上述步骤进行,径流量和径流总量的平均误差分别为 4.37%、16.20%,最终此三种下垫面所率定的不透水区曼宁系数取值范围为 0.013~0.15,不透水区洼蓄量取值范围为 3.0~5.5 mm。因天气原因导致降雨监测事件过少,其它两种下垫面绿地与操场的水文参数借鉴前人研究成果^[18]。

1.2.3 SWMM 模型水质参数确定 对校园区内的路面、屋面、绿地、庭院/广场、操场等下垫面进行降雨径流水质模拟,水质指标涉及 TSS、TN、TP、COD_{Mn}。其中污染物积累模型选用饱和模型,冲刷模型选择指数模型,相关参数通过调查校园污染物特点、借鉴国内外研究^[10-12],TSS 最大积累量取值范围为 60~270 kg/m²,冲刷系数取值范围为 0.004~0.008 mm⁻¹,冲刷指数取值范围为 1.2~1.8,清扫去除率取值范围为 0~70%;COD_{Mn} 最大积累量取值范围为 30~80 kg/m²,冲刷系数取值范围为 0.0035~0.007 mm⁻¹,冲刷指数取值均为 1.8,清扫去除率取值范围为 0~70%;TN 最大积累量取值范围为 4~10 kg/m²,冲刷系数取值范围为 0.002~0.004 mm⁻¹,冲刷指数取值范围为 1.2~1.7,清扫去除率取值范围为 0~70%;TP 最大积累量取值范围为 0.2~0.6 kg/m²,冲刷系数取值范围为 0.001~0.002 mm⁻¹,冲刷指数取值范围为 1.2~1.7,清扫去除率取值范围为 0~70%。该五种下垫面的半饱和和积累时间取值均为 10 kg/m²。

2 结果与讨论

2.1 校园区入河污染总负荷预测

地表径流污染负荷是指在一场或是一年中多场

降雨事件中引起的地表径流污染物的总量,一场降雨中径流排放的污染物总量称之为次降雨径流污染负荷,亦称为次污染负荷;而在一年中由多场降雨事件所引起地表径流污染物排放总量称之为年污染负荷。由于地表径流排污具有较强的随机性,大大削弱了次降雨径流污染负荷的代表性,因而通常采用年污染负荷作为降雨径流污染对受纳水体影响的评价标准。基于以上所构建的 SWMM 模型,预测在不同来水情况下校园区年降雨径流负荷,并结合生活污水排放规律预测校园区入巡司河污染总负荷。

2.1.1 典型年降雨径流污染负荷模拟 根据武汉市 1962—2015 年的年降雨数据,通过目估适线法完成降雨序列的皮尔逊Ⅲ型概率分布曲线,其结果见图 6。

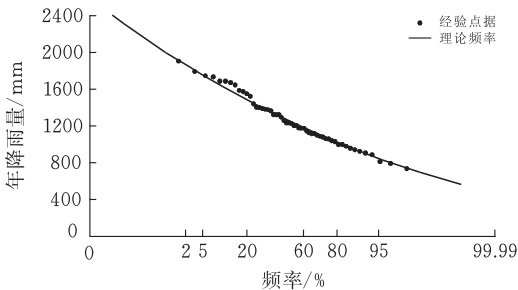
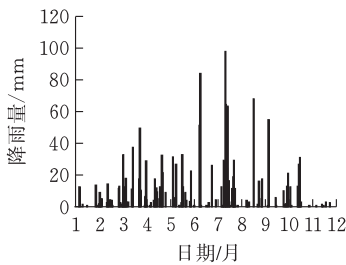
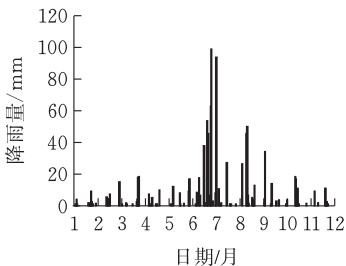


图 6 武汉市降雨皮尔逊Ⅲ型概率分布

根据图 6,并结合 2009—2015 年武汉市逐日降雨数据,选定三个典型年,分别为 2010 年(丰水年,1551.5 mm)、2013 年(平水年,1228.0 mm)、2011 年(枯水年,980.0 mm),此三年的逐日降雨分布见图 7。

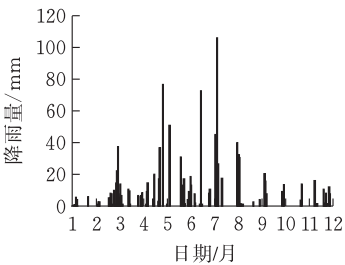


(a)2010 年(丰水年)日降雨量



(b)2011 年(枯水年)日降雨量

利用所构建的 SWMM 模型对校园区各典型年进行年降雨径流污染模拟,汇总 30 个人河排水口的



(c)2013 年(平水年)日降雨量

图 7 武汉市典型年日降雨量分布

污染负荷,其结果见表 1。由表可知,武汉市校园区各典型年降雨径流负荷存在一定差异,即丰水年>平水年>枯水年。在负荷总量最大的丰水年中,TSS、COD_{Mn}、TN、TP 的年污染负荷分别达到 51.02 t、14.64 t、1.44 t、0.064 t。

表 1 校园区典型年降雨径流污染负荷 t

	丰水年(2010)	枯水年(2011)	平水年(2013)
TSS	51.02	30.63	42.64
COD _{Mn}	14.64	8.82	12.24
TN	1.44	0.91	1.24
TP	0.064	0.041	0.058

2.1.2 校园区入河污染物总量预测 校园区入巡司河污染物总量预测除了考虑降雨径流污染负荷之外,还需考虑校园区内生活污水的排放。选择沿河某一合流制管道排放口,其管径为 500 mm,集水面积约为 4000 m²,于无雨日 2017/10/28 日进行采样分析,采样时段为 8:00—16:00,每 2 h 取样一次,其水量水质结果见图 8。

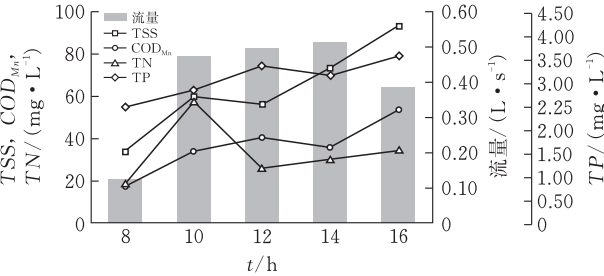


图 8 校园区生活污水水量水质排放情况

由图 8 可知,随着人类活动的开始,生活污水的水量及其水质在 8:00—10:00 呈现上升趋势,之后出现了一定程度的波动,其中波动幅度较小的是 TP 和 COD_{Mn};同时,TSS 含量及污水水量的变化趋势较为一致,但在 8:00—12:00 期间,TN 含量波动幅度较明显,而在 12:00—16:00 时段内相对趋于稳定。经测,出口处的 TSS 的浓度范围为 34.00~73.33 mg/L, COD_{Mn} 的浓度范围为 17.58~53.63 mg/L,TP 的浓度范围为 2.50~3.38 mg/L, TN 的浓度范围为 18.67~57.66 mg/L,污染物浓度过高,说明点源污染对巡司河水质恶化有着较为严

重的影响。在估算生活污水排放量时,将全天分为 6 个时间段,把 0:00—8:00 及 16:00—24:00 作为两个较长的时间段,而 8:00—16:00 中的其余时间段以 2 h 为时间间隔划分为 4 个时间段,每个时间段的生活污水污染负荷量均按固定浓度值与流量的乘积得出,其中 0:00—8:00 的污染物浓度取 8:00 时刻的浓度值,16:00—24:00 的污染物浓度取 16:00 时刻的浓度值,其余时间浓度见图 8。根据面积成比例法完成全校区全年段生活污染负荷的估算。估算可得,校园区生活污水中 TSS、COD_{Mn}、TN、TP 的年污染负荷分别为 192.29 t、110.38 t、86.50 t、8.66 t。将平水年降雨径流污染与该生活污染年负荷做比较,可知校园区降雨径流污染物 TSS、COD_{Mn}、TN、TP 分别占其生活污水排放量的 22.17%、11.09%、1.43%、0.67%,可见对校园区降雨径流污染的控制应重点考虑对 TSS 与 COD_{Mn} 的削减。

2.2 校园区降雨径流污染控制对策

2.2.1 降雨径流污染影响因素及控制措施 降雨径流污染与多种因素有关,如下垫面类型的选择、污染物的种类及其富集的程度、雨量强弱及雨型。据调查,目前对降雨径流污染的管控多分为 3 部分:源头削减、过程控制及末端治理。在源头削减多采用增加路面清扫、大气沉降控制、改造下垫面材料等措施。LID 是我国海绵城市建设中大力推行的一种以源头控制为核心,实现水环境保护和城市可持续发展的雨洪管控策略,于 20 世纪 90 年代在美国马兰州开始实施,被认为能够有效解决传统雨洪资源排泄及运输系统所引起的水资源、水环境问题^[19]。LID 工程措施主要包括绿色屋顶、雨水花园、植草沟、透水铺装、生物滞留池等,对降低城市降雨径流污染有较好效果。

绿色屋顶对径流总量削减率达 15.3%~40.0%,延缓产流时间达 7~21 min,对径流峰值削减率为 18.0%~62.3%,能一定程度缓解城市内涝^[20];可拦截径流中 80.2%的硝酸盐,67.5%的磷酸盐,并且污染物的截流能力随时长而增加^[21]。透水铺装对径流总量削减率在 40%~90%之间,对径流峰值可削减 20%~80%^[22],对于 TP 的削减率达 65%~85%^[23],但对 TN 的削减率仅为 4.87%~28.54%^[24]。生物滞留池的径流总量削减率在 12%~48%之间^[25],径流峰值削减率 65%~86%^[26],TSS 削减率达 90%以上,COD 削减率达 35%~91.4%,TN 削减率 22%~45.4%,TP 削减率 68%~80%^[27]。本研究拟采用上述 LID 技术(绿色屋顶、透水铺装、生物滞留池)对校园区进行海绵改造,以达到削减降雨径流负荷,对巡司河水环境治理提

供技术支撑。

2.2.2 LID 措施设置 根据《武汉市海绵城市设计规划导则》、《武汉市绿色建筑管理试行办法》、《室外给排水设计规范》等导则,利用现场调研、校园区地形图等资料,对校园区内三种占地面积较大的下垫面屋面、绿地、庭院/广场各设置 LID 技术,总面积达 8.09 万 m²,占校园总面积 7.56%。设置情景见表 2,并在构建好的 SWMM 模型中输入相应 LID 措施的相关参数^[28]。

表 2 LID 措施于校园子汇水区内的分布

下垫面类型	子汇水区	LID 措施	LID 措施面积/万 m ²
屋面	S_12、S_42	绿色屋顶	4.3
庭院/广场	S_18	透水路面	1.54
绿地	S_67	生物滞留池	2.25

2.2.3 水量水质动态模拟 根据武汉市典型降雨事件一年一遇和十年一遇的降雨(降雨时长 2 h,降雨量分别为 34.43 mm 和 88.84 mm),对校园区进行降雨径流量模拟,并比较有无 LID 措施情况下入河径流的变化,其结果见图 9。设置了 LID 措施后,校园区降雨径流峰值及总量都发生了较大幅度的下降。其中,在十年一遇的降雨事件中,对比 LID 措施设置前后,校园区径流峰值由 20.41 m³/s 降至 10.65 m³/s,峰值削减率达 47.82%;径流总量由 80278.75 m³ 下降至 51 595.69 m³,削减率达到 35.73%。尽管 LID 的设置使校园区在应对十年一遇降雨时径流系数由 0.93 减小至 0.60,但没有改变径流出现时间。而在一年一遇的降雨事件中,LID 措施设置前后校园区径流峰值由 5.60 m³/s 下降至 2.45 m³/s,削减率为 56.25%;径流总量由 26 237.49 m³ 下降至 14 894.68 m³,削减率达到 43.23%。设置 LID 使校园区在应对一年一遇降雨时径流系数由 0.78 减小至 0.45,径流出现时间推后 5 min,说明 LID 措施对小强度降雨事件的径流过程有更好的削减效果。

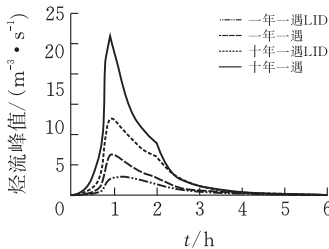
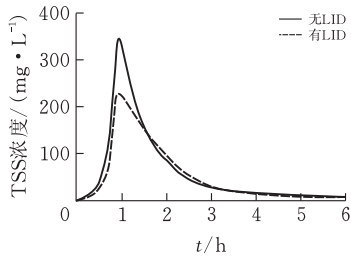


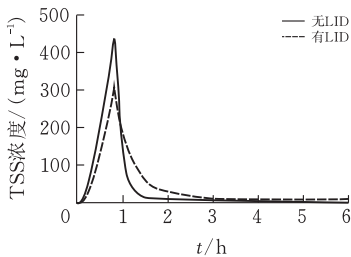
图 9 校园区 LID 水文过程控制效果

以 TSS 为例,说明校园区有无 LID 措施情况下,在一年一遇和十年一遇降雨事件时入河污染物浓度和负荷变化情况,结果见图 10。设置了 LID 措施后,对应于一年一遇降雨事件,校园区降雨径流入

河 TSS 浓度峰值由 340.73 mg/L 下降至 227.00 mg/L,削减率达 33.37%,污染负荷由 4.47 t 降至 2.55 t,削减率 42.99%(图 10a);而对应于十年一遇降雨事件,TSS 浓度峰值由 433.97 mg/L 降至 304.92 mg/L,削减率达 29.74%,污染负荷由 6.73 t 降至 4.63 t,削减率 31.18%。尽管在两种降雨事件中,LID 措施对污染物的负荷削减作用明显,但对于浓度削减效果随时间有所波动,具体表现为当 TSS 浓度峰值出现后,LID 措施改造情景对比于未改造情景,TSS 浓度有增加现象,这在十年一遇降雨事件表现明显(图 10b)。这说明在应对大强度降雨事件时,所设置的 LID 措施情景当入河污染物达到浓度峰值后其对污染物浓度的削减作用消失。其他污染物浓度和负荷变化规律与 TSS 类似。最终结果显示,对于一年一遇降雨事件,各污染物的浓度峰值削减率范围为 31.08%~41.01%,负荷削减率范围为 42.31%~43.95%;对于十年一遇降雨事件,各污染物的浓度峰值削减率范围为 28.81%~41.26%,负荷削减率范围为 30.61%~36.63%,实施 LID 措施对校园区降雨径流污染物负荷有较好的削减作用。



(a) 一年一遇有无 LID 措施对 TSS 的控制效果



(b) 十年一遇有无 LID 措施对 TSS 的控制效果

图 10 有无 LID 措施对 TSS 的控制效果

3 结论

以武汉市南湖排水片区内湖北工业大学及巡司河为例,研究武汉市校园区降雨径流污染负荷及其控制措施对城市通江河流环境的影响,在海绵城市建设、长江大保护的背景下有着积极的意义及应用价值。相关结论如下:

1)在实地监测校园区内不同下垫面类型降雨径流过程的基础上,构建 SWMM 模型模拟各典型年校园区降雨径流污染负荷。各典型年径流负荷存在

差异,丰水年>平水年>枯水年。校园区平水年 TSS、COD_{Mn}、TN、TP 降雨径流污染负荷分别为 42.64 t、12.24 t、1.24 t、0.058 t,分别占其生活污水污染负荷的 22.17%、11.09%、1.43%、0.67%。对校园区降雨径流污染物 TSS 和 COD_{Mn}需要重点关注。

2)对校园区内三种面积百分比比较大的(>20%)下垫面屋面、绿地、庭院/广场进行 LID 措施设置,包括绿色屋顶、透水路面、生物滞留池,改造面积占校园总面积的 7.56%。改造后,一年一遇降雨事件(雨量 34.43 mm,历时 2 h)降雨径流峰值削减率达 56.25%,径流总量削减率达 43.23%,各污染物负荷削减率均超过 40%;十年一遇降雨事件(雨量 88.84 mm,历时 2 h)降雨径流峰值削减率达 47.82%,径流总量削减率达 35.73%,各污染物负荷削减率均超过 30%。措施改造情景对比于未改造情景,TSS 浓度有增加现象,这在十年一遇降雨事件表现明显(图 10)。这说明在应对大强度降雨事件时,所设置的 LID 措施情景当入河污染物达到浓度峰值后其对污染物浓度的削减作用消失。其他污染物浓度和负荷变化规律与 TSS 类似。最终结果显示,对于一年一遇降雨事件,各污染物的浓度峰值削减率范围为 31.08%~41.01%,负荷削减率范围为 42.31%~43.95%;对于十年一遇降雨事件,各污染物的浓度峰值削减率范围为 28.81%~41.26%,负荷削减率范围为 30.61%~36.63%,说明实施 LID 措施对校园区降雨径流污染物负荷有较好的削减作用。

[参 考 文 献]

[1] 宋晓猛,朱奎.城市化对水文影响的研究[J].水电能源科学,2008,26(4):33-35.

[2] 王和意.上海城市降雨径流污染过程及管理措施研究[D].上海:华东师范大学,2005.

[3] 周丽.福州市中心城区降雨径流污染研究[D].厦门:福州大学,2010.

[4] 欧阳威,王玮,郝芳华,等.北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J].中国环境科学,2010,30(9):1249-1256.

[5] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,等.基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J].中国给水排水,2008,24(7):88-91.

[6] 董欣,杜鹏飞,李志一,等.SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J].环境科学,2008,29(6):1495-1501.

[7] 马晓宇,朱元励,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.

[8] 艾彬,郑露,周颖,等.巡司河水质污染现状调研及防治对策[J].江汉大学学报(自然科学版),2010,38(4):54-57.

[9] 韩娇.城市降雨径流面源污染水质水量动态模型研究[D].广州:华南理工大学,2011.

[10] 祁继英.城市非点源污染负荷量化研究[D].南京:河海大学,2005.

[11] 王俊松.3S 技术支持下基于 SWMM 的城市非点源污染负荷量化研究[D].昆明:云南师范大学,2008.

[12] Keifer C J, Hung C Y, Wolka K. Modified chicao hydrograph method, storm sewer design[M]. Chicago: Universtiy of Illinois,1978.

[13] 陈为铎.武汉市城区雨水资源化利用潜力及其可行性分析[D].武汉:华中师范大学,2014.

[14] 聂铁锋.广州市城区暴雨径流非点源污染负荷核算技术研究[D].广州:华南理工大学,2012.

[15] Horton, R E. A Simplified method of determining the constants in the infiltration-capacity equation [J]. Transactions, American Geophysical Union, 1942, 23(2):575.

[16] Tsihrintzis V A, Hamid R. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM [J]. Hydrological Processes,1998,12(2):311-329.

[17] 高颖会,沙晓军,徐向阳,等.基于 Morris 的 SWMM 模型参数敏感性分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(3):87-90.

[18] 吴亚男,熊家晴,任心欣,等.深圳鹅颈水流域 SWMM 模型参数敏感性分析及率定研究[J]. 给水排水,2015(11):126-131.

[19] Hunho Kim.Engineered bioretention for removal of nitrate from stormwater runoff[J]. Water Environment Research,2003,75(4):355-367.

[20] 翟丹丹,宫永伟,张雪,等.简单式绿色屋顶雨水径流滞留效果的影响因素[J].中国给水排水,2015(11):106-110.

[21] 谭卓琳,董禹.国外绿色屋顶对雨水径流量水质影响的研究[J].山西建筑,2016,42(27):177-178.

[22] 赵飞,张书函,陈建刚,等.透水铺装雨水入渗收集与径流削减技术研究[J].给水排水,2011,(S1):254-258.

[23] Jernberg P, Sjöström C, Lacasse M A. State-of-the-art report[J]. Materials & Structures, 1997, 30(1):22-25.

[24] 赵现勇,程方,张杏娟,等.不同结构透水路面对雨水径流污染物的削减作用[J].天津城建大学学报,2012(4):280-285.

[25] 潘国艳,夏军,张翔,等.生物滞留池水文效应的模拟试验研究[J].水电能源科学,2012,30(5):13-15.

[26] Brown R A, Hunt W F. Brown R A, et al. Evaluating media depth, surface storage volume, and presence of an internal water storage zone on four sets of bioretention cells in north carolina[J]. 2011:405-414.

[27] William C Lucas, Margaret Greenway. Phosphorus re-
tention by bioretention mesocosms using media formul-
ated for phosphorus sorption; response to accelerated
loads[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2011, 137
(3):144-153 .

[28] 潘璐. 武汉典型校区降雨径流污染特征及污染负荷研
究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.

Rainfall-runoff Pollution and LID Control Effect in Campus Area Based on SWMM Simulation

ZHOU Minglai¹, PAN Lu², LI Zeshi¹, LIU Ruifen¹

(1 *Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;*

2 *Wuhan Pengsen Environmental Technology Limited Company, Wuhan 430000, China*)

Abstract: As an important city located in the Yangtze River Economic Belt, it is of great significance to improve water quality of Wuhan city's river flowing into the Yangtze river for protecting the Yangtze main stream. With the gradual control of point source pollution, the impact of non-point source pollution on the urban water environment becomes increasingly prominent. In order to study the effect of rainfall-runoff pollution load and corresponding control measures on the urban water environment of Wuhan city, this study took the Hubei University of Technology and Xunsi River in the Wuhan South Lake drainage area as an example. Based on monitored rainfall-runoff dynamics of different land uses in the campus under different rainfall events, SWMM (Storm Water Management) model was constructed for the campus and rainfall-runoff pollution loads of typical years were simulated. After that, a scenario of transforming the campus into the sponge zone by setting different LID (Low Impact Development) measures was also evaluated and rainfall-runoff pollution load reduction for Xunsi River was assessed. The results show that the annual rainfall-runoff pollution load from the campus is different in typical years, that is, wet year > normal year > dry year. The rainfall-runoff pollution loads of TSS, CODMn, TN and TP from the campus are 42.64 ton, 12.24 ton, 1.24 ton and 0.058 ton, accounting for 22.17%, 11.09%, 1.43% and 0.67% of the domestic sewage discharge from the campus, respectively. After the implementation of LID measures such as green roof, permeable pavement and bioretention in the campus area, for 1-year 2-hour and 10-year 2-hour rainfall events, pollution load reduction rates of pollutants are 42.31%~43.95% and 30.61%~36.63%, respectively. The higher pollution load reduction rate for the 1-year 2-hour rainfall event is due to a higher rainfall-runoff volume reduction rate (43.23%).

Keywords: rainfall-runoff; pollution load; Storm Water Management Model; Low Impact Development

[责任编辑: 裴 琴]