

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.03.02

基于不同土地利用类型下的初期雨水径流污染特征分析与 LID 措施研究

朱甜甜, 于增知, 于晗, 于宏兵, 迟泽旭, 刘晓珍, 张杨帆, 董斌斌
(南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 探究初期雨水径流污染物在不同用地类型下的变化规律, 对比分析海绵城市建设技术对径流污染的控制效果。首先对 landsat 8 卫星影像资料进行目视解译将天津市河西区解放南路郁江道研究区分为 9 类二级用地类型, 之后根据土地利用类型划分结果和雨水管网资料建立 SWMM 水质模型并进行相关参数率定, 最后模拟典型径流污染物悬浮固体(SS)的污染特征和低影响开发设施(LID)对其的削减效果。结果表明: 不同土地利用类型和重现期下, 径流污染物均呈现先增大后减小最后稳定在某一数值附近即初期雨水径流污染效应。采用渗透铺装和生物滞留池对径流 SS 拦截效果明显, 但随着降雨强度增大, 其处理能力逐渐达到饱和, 处理效果不明显。

关键词: 土地利用类型; 初期雨水径流污染; SWMM 模型; 水质模型; 海绵城市; 低影响开发设施

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2020)03-0008-07

Analysis of initial stormwater runoff pollution characteristics and LID controls based on different land uses

ZHU Tiantian, YU Zengzhi, YU Han, YU Hongbing, CHI Zexu, LIU Xiaozhen,
ZHANG Yangfan, DONG Binbin

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The variation law of initial stormwater runoff pollutants under different land uses was explored and the control effect of sponge city construction technology on runoff pollution was compared and analyzed. First, through the visual interpretation of Landsat 8 satellite imagery, we classified the land cover of Yujiang Road study area (which is in the Jiefangnan Road experimental area of Hexi District, Tianjin City) into nine types of secondary land uses. Then, based on the classification and stormwater network data, the storm water management model (SWMM) of water quality was established and the relevant parameters were calibrated accordingly. With this model, the pollution characteristics of typical runoff pollutant suspended solid (SS) and the reduction effects of low impact development (LID) controls on SS were simulated. The results showed that under the situation of different land uses and return periods, the runoff pollutants uniformly increased then decreased, and finally stabilized at a certain range, which was the manifestation of the initial stormwater runoff pollution effect. When block paver and bio-retention cells of LID controls were applied to the rainfall runoff, SS was evidently reduced; however, the reduction effect was not evident after the treatment capacity was saturated with the increase of the rainfall intensity.

Key words: land use type; initial stormwater runoff pollution; storm water management model (SWMM); water quality model; sponge city; low impact development (LID) facility

收稿日期: 2019-08-06; 修回日期: 2020-02-05

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX07106); 国家自然科学基金项目(4161113008)

作者简介: 朱甜甜(1993-), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为海绵城市建设技术和评价方法等。

通讯作者: 于宏兵(1958-), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水土污染治理与控制、清洁生产、循环经济关键技术等。

1 研究背景

近年来,我国的城市化发展速度明显加快,1978-2016年全国城镇化率由17.92%增长到57.35%,但城市在快速发展过程中也带来了许多负面影响。城市建设活动改变了原有的地形、地质、水系、气候、植被和水文等自然属性,导致不透水面增加。这使得自然水循环过程受阻,暴雨产汇流量增多,从而引发水质污染、水生态恶化等一系列环境问题^[1-3]。地表径流尤其是初期雨水径流中含有多种有机和无机污染物,常见的污染物主要包括悬浮固体(SS)、营养物质(N和P)、耗氧物质(COD)、重金属(Pb、Cu等)以及有机污染物(多氯联苯、多环芳烃等)^[4-5]。径流污染物的主要污染源有居民区、商业区、工业区、城市道路区以及人类建设活动和大气沉降等。初期雨水径流污染属于面源污染,具有污染物成分复杂多样、污染源空间分布广泛等特点,给其治理带来巨大挑战^[6]。因此需要对我国的雨水径流污染特征进行研究并提出有效的解决办法,以减少其对城市水环境造成的污染。

国内学者对初期雨水径流污染的研究主要集中在特定区域或者混合土地利用类型下的污染物类型、含量、变化特征以及控制措施等。刘守城等^[7]分析了南京市3种类型的建筑屋面径流污染特性,其结果表明初期径流污染浓度随降雨历时的延长呈前高后低的变化趋势且受降雨强度影响较大。杜玉来^[8]以合肥市经济开发区为研究区域,发现初期雨水污染特性除了与降雨强度有关外还与雨前干燥天数有关。柳健^[9]对6类道路雨水径流污染物含量的监测结果显示,各监测点径流中含有的部分污染物含量远超地表水V类水标准。孙志康等^[10]用SWMM(storm water management model)对LID(low impact development)控制下径流水文水质进行模拟,得出LID组合措施对SS、COD、TN的控制效果。但运用SWMM模型从定量角度分析不同土地利用类型下的初期雨水径流污染含量的研究相对较少,从而不能定量分析径流污染物含量变化与用地类型之间的关系。

鉴于此,本文以天津市河西区解放南路试点区域中的郁江道分区为例,首先对研究区的landsat 8卫星影像进行图像预处理,再用ArcGIS软件对处理后的影像进行目视解译划分土地利用类型。在土地利用类型划分的基础上建立SWMM水质模型,对SS径流污染特征进行研究并评价低影响开发设施(LID)对其的削减效果,以期为我国不同土地利用类型下的初期雨水

径流污染特征研究及控制提供一定的理论基础。

2 研究区概况

2.1 研究区简介

天津市地处华北平原东北部,海河流域下游,东临渤海,属于暖温带半湿润大陆季风性气候,多为地势平坦的平原。郁江道研究区位于天津市河西区解放南路试点区之内,其中心经度约117°14'30",纬度约39°4',面积约为210.4 hm²。复兴河和长泰河分别位于研究区的北部和东部,其主要功能是承担包括研究区在内的周边区域的雨水排泄,同时兼具观赏和调节气候的作用,研究区的地理位置及水系分布如图1所示。

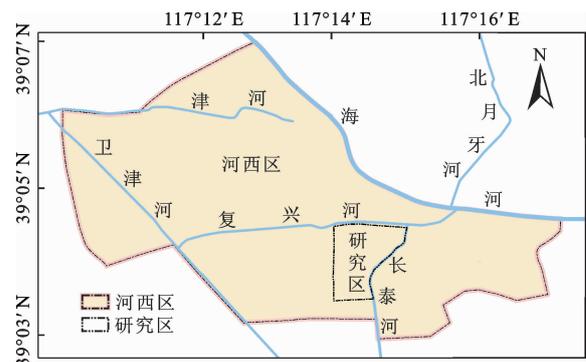


图1 研究区地理位置及水系分布图

2.2 研究区土地利用现状

开展研究区的土地利用现状分析,需要获取该地区的影像资料。从地理空间数据云获取天津地区的landsat 8卫星遥感影像,其所在影像的条带号为122,行编号为33,多光谱波段的空间分辨率为30 m × 30 m,图像的获取时间为2018年5月份,平均云量为0.46%,数据质量较好。

在目视解译前需要用ERDAS图像处理软件对卫星影像进行几何校正、图像裁剪、图像融合等操作,使影像包含的地物信息更易辨别,目标区域更加突出,以增强解译性。以《土地利用现状分类(GB/T 21010-2017)》作为分类标准,用ArcGIS软件对研究区卫星影像进行目视解译划分土地利用类型,划分结果如图2所示。图2中划分出道路、水系、空闲地、工业用地、公园与绿地、零售商业用地、机关团体用地、商务金融用地、城镇住宅用地9类二级用地类型,表1为各类土地利用类型的面积和比例。

3 SWMM模型建立

3.1 SWMM概述

雨水管理模型(storm water management model)简称SWMM模型,于1971年被开发推广^[11]并不断更新

升级,作为降雨-径流动态模拟模型,其可以对城市区域单一或长期降雨条件下的水质水量变化过程进行数值模拟。

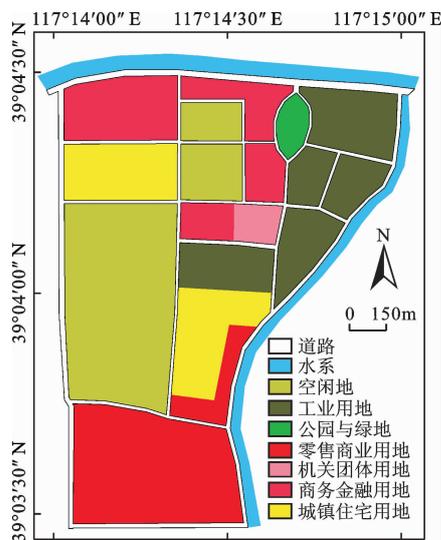


图2 研究区土地利用类型划分结果

表1 研究区各土地利用类型的面积和比例

土地利用类型	面积/hm ²	比例/%
道路	22.5	10.7
水系	17.9	8.5
空闲地	47.8	22.7
工业用地	32.6	15.5
公园与绿地	2.7	1.3
零售商业用地	35.1	16.7
机关团体用地	3.0	1.4
城镇住宅用地	23.6	11.2
商务金融用地	25.2	12.0
总计	210.4	100

3.2 研究区概化

对研究区进行子汇水区的合理划分是SWMM模型建模的关键步骤之一,当前主要有3种类型的划分方法:(1)根据市政管网走向、建筑物和街道的规划布局,直接人为划分子汇水区;(2)对研究区创建泰森多边形然后根据实际情况作局部调整;(3)在人工划分大的汇水区的基础上创建泰森多边形对其进行细分,之后人工作局部调整。因所选区域范围不大,选用第1种方法直接人工划分子汇水区。根据已有的土地利用类型和雨水管网资料等将研究区分为16个面积不等的子汇水区,概化结果如图3所示。

3.3 SWMM基本参数选取

SWMM模型中包含水文模块、水力模块和水质模块。水文模块模拟降雨后地表的产流汇流过程;

水力模块主要模拟进入城市排水管网的降雨在管网中的输送过程;水质模块模拟不同土地利用类型上污染物的积累冲刷过程。在建模过程中根据研究目的选用不同的模块组合以达到不同的模拟目的。

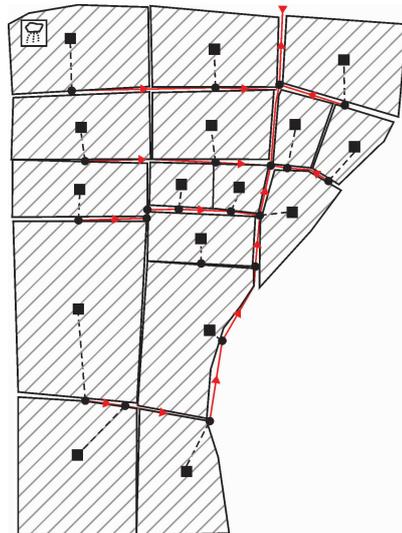


图3 研究区汇水区概化图

3.3.1 水文参数 SWMM中Horton模型应用最为广泛,Modified Horton模型在其基础上有所改进,模拟结果有所提高,故本研究采用Modified Horton下渗模型。对研究区的土壤经勘查取土、土层分析确定其土壤类型主要为粉质黏土,其特征是具有高径流潜力,水在土壤中运动阻力较大,土层下渗能力较弱容易形成径流。根据研究区土壤特性和模型手册,Modified Horton模型中的最大入渗率、最小入渗率、衰减常数、排干时间分别设为35.1mm/h、0.508mm/h、5h⁻¹和7d,其他主要参数取值及获取方法如表2所示。

表2 研究区部分水文参数取值及获取方法

参数名称	取值	获取方法
宽度/m	分区计算	经验公式
坡度/%	0.05	规划资料
不透水区曼宁系数	0.011	模型手册
透水区曼宁系数	0.25	模型手册
不透水区填洼量/mm	1.5	模型手册
透水区填洼量/mm	5.1	土壤类型、模型手册
不透水区无填洼占比/%	20~50	用地类型、模型手册

3.3.2 水力参数 研究区排水管网概化为雨水节点21个,埋深在1~2m,雨水管段21个,管径500~2000mm,管段材质主要为塑料管和圆形水泥管,排放口1个。在本模拟中选用动态波演算模型,该演算方法能够模拟水流在管段中的复杂运动,模拟

的时间步长为 30 s。

3.4 雨型设计

为了使模型模拟结果符合当地实际,需要模拟当地的降雨量和降雨过程即雨型设计。在缺乏实际数据时降雨量可根据研究区暴雨强度公式计算,暴雨过程采用芝加哥降雨模型。按照天津市暴雨分区^[12],研究区所在的河西区属于第一分区,其暴雨强度计算公式为:

$$q = \frac{2141(1 + 0.7562 \lg P)}{(t + 9.6093)^{0.6893}} \quad (1)$$

式中: q 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为重现期, a; t 为降雨历时, min。

采用目前广泛应用的芝加哥降雨模型,设计重现期分别为 1、3、5、10 a,雨峰系数 $r = 0.4$,降雨历时为 2 h,降雨量分别为 54.037, 73.534, 82.599, 94.900 mm,图 4 所示为不同重现期下的降雨过程线。

4 SWMM 水质过程建模

不同土地利用类型上沉积的各种有机和无机污染物在降雨过程中被降雨不断淋洗、冲刷进入受纳水体,会对水环境造成不同程度的污染。本研究选用地表径流中的典型污染物悬浮固体(SS)作为研究对象,模拟其降雨前在地表的累积过程和降雨中的冲刷过程。

4.1 累积过程模拟

污染物在地表的累积是一个复杂过程。SWMM 模型中针对累积过程有 3 种方法:幂函数(power function)、指数函数(exponential function)和饱和函数(the saturation function)。本研究采用指数函数来模拟污染物的累积过程,其表达式如下:

$$b = B_{\max}(1 - e^{-K_B t}) \quad (2)$$

式中: b 为单位面积上的累积量, kg/hm^2 ; B_{\max} 为最大累积量, kg/hm^2 ; K_B 为衰减常数, d^{-1} ; t 为衰减时间, d。

当单位面积上的累积量为最大累积量的 99% 时,即 $b = 0.99 \times B_{\max}$ 时,等式(2)变形为等式(3):

$$K_B = \frac{\ln 100}{t} \quad (3)$$

4.2 冲刷过程模拟

冲刷是指在降雨中子汇水区上形成的地表径流对下垫面淋洗或侵蚀的过程。SWMM 提供 3 种经验模型来模拟地表污染物的冲刷过程:指数冲刷函数(exponential washoff),流量曲线冲刷函数(rating curve washoff),平均浓度冲刷函数(event mean con-

centration washoff)。因指数冲刷函数既与径流量相关又与污染累积量相关^[13],故本研究采用该函数来表示污染物的冲刷过程,其函数表达式如下:

$$W = C_1 \cdot q^{C_2} \cdot B \quad (4)$$

式中: W 为冲刷负荷, kg/h ; C_1 为冲刷系数, $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})^{-C_2}/\text{h}$; q 为径流速率, mm/h ; C_2 为冲刷指数,为某一常数; B 为地表污染累积量, kg 。

4.3 水质参数设置

SWMM 是以研究区内不同的土地利用类型为基础来对水质进行模拟的。本研究在土地利用类型划分的基础上,根据天津市 2009 年 6、7 月份的降雨径流资料^[14]和手册^[15-17]中关于不同土地利用类型上 SS 产生量对模型水质参数进行率定。SS 累积规律参考张静等^[18]的研究结果即 SS 累积量基本稳定约需要 30 d,在建立模型时设定其达到最大累积量的 99% 所需时间在 30 ~ 60 d,根据公式(3)对衰减常数进行确定。道路、工业用地、公园与绿地、零售商业用地、机关团体用地、商务金融用地、城镇住宅用地的清扫模式设置为 1 次/d,空闲地没有进行规划建设所以不设置清扫模式,清扫效率为 0.3 ~ 0.5。天津市全年降雨量分配不均,降雨时间一般主要集中在每年的 6 - 9 月,故前期干旱天数设置为 40 d,冲刷函数和累积函数的参数设置如表 3 所示。

表 3 不同土地利用类型下的累积函数和冲刷函数的参数取值

土地利用类型	最大累积量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-1}$)	衰减常 数/ d^{-1}	时间/ d	冲刷 系数	冲刷 指数
道路	16	0.11	39	0.009	1.9
空闲地	8	0.15	30	0.007	1.6
工业用地	25	0.10	35	0.008	1.6
公园与绿地	2	0.07	60	0.006	1.2
零售商业用地	16	0.12	40	0.008	1.6
机关团体用地	3	0.08	56	0.006	1.7
城镇住宅用地	20	0.09	45	0.006	1.7
商务金融用地	7	0.10	46	0.005	1.7

注:冲刷系数单位为 $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})^{-C_2}/\text{h}$ 。

4.4 低影响开发设施

低影响开发设施(LID)在降雨时发挥的主要功能有渗透、储存、调节、拦截净化等,其既能减少末端雨水处理成本,又能减轻对受纳水环境的污染^[19]。在海绵城市建设过程中要适当选用低影响开发单项或者组合设施,增加雨水下渗及其对径流污染的拦截、吸收、降解作用,考虑到在郁江道研究区大部分为已经建成的区域,宜选用经济成本低、施工或改建方便又能增加雨水下渗、降低径流污染物的设施。所以在研究区采用透水铺装和生物滞留池,基于不同用地类型上的不透

水面积占比,设置子汇水区的透水铺装面积为9%~20%,生物滞留池面积为2%~23%,利用两者的下渗作用和截污作用,降低径流污染物含量。

5 结果与分析

5.1 径流水质分析

通过对模型相关参数的赋值和率定,对研究区不同土地利用下的径流水质进行模拟分析,得出径流污染物SS的变化规律。天津城市化程度较高,不透水面积占比较大,降雨时较易在地表形成径流,且不透水面积占比越大,越容易形成径流。不同土地利用类型上的径流量随时间变化曲线如图5所示。由图5可看出,降雨后很快在地表形成径流,不同土地利用类型下径流量峰值差异较大,依次分别为空闲地<城镇住宅用地<商务金融用地<工业用地<零售商业用地。

不同土地利用类型上SS浓度变化趋势如图6所示,由图6可看出,SS浓度范围变化较大,峰值浓度依次为空闲地<商务金融用地<零售商业用地<城镇住宅用地<工业用地。这主要与不同土地利用类型有关,工业用地不透水面积较大且工业活动产生的污染物比较多,导致初期径流污染中SS含量浓度较大;住宅用地则是因为人类居住活动导致产生的污染物含量较多;零售商业用地和商务金融用地SS污染物除了与下垫面硬化程度较高、污染物容易积聚有关,还与各种商业活动带来的污染有关;空闲地上的初期径流SS含量则主要与土壤特性有关,粉质黏土渗透性较差,很容易形成地表径流。从图6也可以看出,地表径流污染物浓度均在30~60min达到最大值,之后呈现下降趋势,最后稳定在某一数值,这除了与雨峰系数^[20]有关,也证实了地表径流污染主要集中在初期雨水径流带来的污染上。这是因为

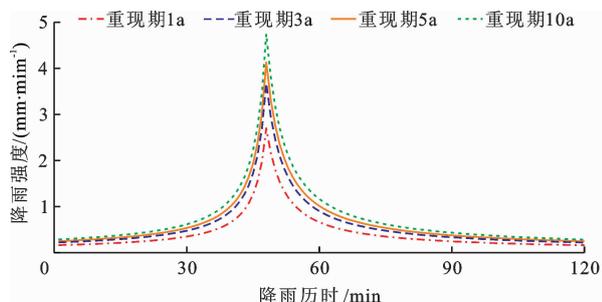


图4 不同重现期降雨过程线

5.2 LID 削减效果分析

在研究区不同子汇水面上各布设一定比例的透水铺装和生物滞留池,其主要作用是增加雨水下渗和对初期雨水径流污染物的截留,不同重现期下排

研究区域不透水面积占比较大,在特定的干旱天数下,污染物累积到一定的数量,降雨时地表形成径流对前期累积的污染物冲刷,降雨强度越大冲刷作用越大,径流SS浓度越大。随着降雨历时的延长,地表径流携带的SS不断汇集到雨水井导致地表污染物总量不断下降,所以径流SS浓度达到某一峰值后开始呈下降趋势,随着降雨强度减小,SS最终稳定在某一数值。

对不同重现期下的径流SS浓度变化趋势图进行比较发现:随着重现期的增加,子汇水面上不同土地利用类型的峰值SS浓度均呈现增大趋势且趋势逐渐变尖锐和陡峭,但随着重现期的增加,峰值浓度增加量越来越小。这是因为随着重现期增加,降雨总量增多,冲刷作用增大,污染物总量增多,且污染物总量增大作用占主导,使得径流SS浓度逐渐增大,但随着重现期越来越大,虽然降雨总量和污染物总量均增大,但污染物总量增大的主导作用减弱,降雨增多的主导作用增强,降雨稀释作用增强,导致随着重现期增加峰值浓度增加量逐渐减少。

通过对初期雨水径流污染特征的分析,得出影响径流污染物浓度的因素主要有以下4类:一是前期干旱天数,干旱时长越长,污染物在地表的积累量越多,降雨时淋洗冲刷下来的污染物增多,导致地表径流污染物浓度增高;二是降雨,降雨本身含有的SS会对径流水质产生影响,降雨强度和降雨时长对地表污染物的影响主要体现在淋洗强度上,因此也会影响地表污染物的冲刷;三是下垫面的土地利用类型,其会影响不透水面积占比,而不透水面又会对污染物的累积和冲刷产生影响;四是人类活动,人类活动如工业活动会导致污染物含量增多,而街道清扫等污染物收集活动又会降低污染物含量。

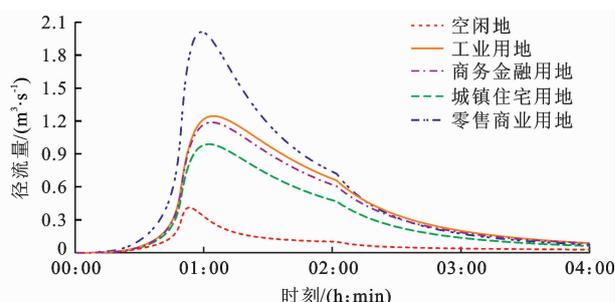


图5 不同土地利用类型上的径流量随时间变化曲线

放口SS浓度在有、无LID设施时的变化趋势如图7所示。由图7可以看出,在布设低影响开发设施(LID)之前,排放口处的SS在不同重现期下的浓度变化趋势为:随着降雨时间延长,排放口污染物浓度

逐渐增加达到最大值后又逐渐下降,最后稳定在某一数值,其峰值在 80 ~ 100 mg/L 之间变化,且变化趋势与子汇水面上的径流污染物浓度变化趋势基本一致,说明排放口处 SS 也具有初期雨水径流污染特征。在布设 LID 设施后,排放口 SS 浓度和未布设 LID 之前的变化趋势类似,峰值浓度在 50 ~ 65

mg/L 之间变化,出口处 SS 浓度下降明显,消减效率为 35% ~ 38%。这是因为 LID 设施发挥源头净化作用,使得雨水在进入管网系统前已经得到净化处理,所以出口处的 SS 浓度变化趋势也具有和子汇水面类似的初期雨水径流污染特征,只是浓度水平相比未布设 LID 设施之前有所下降。

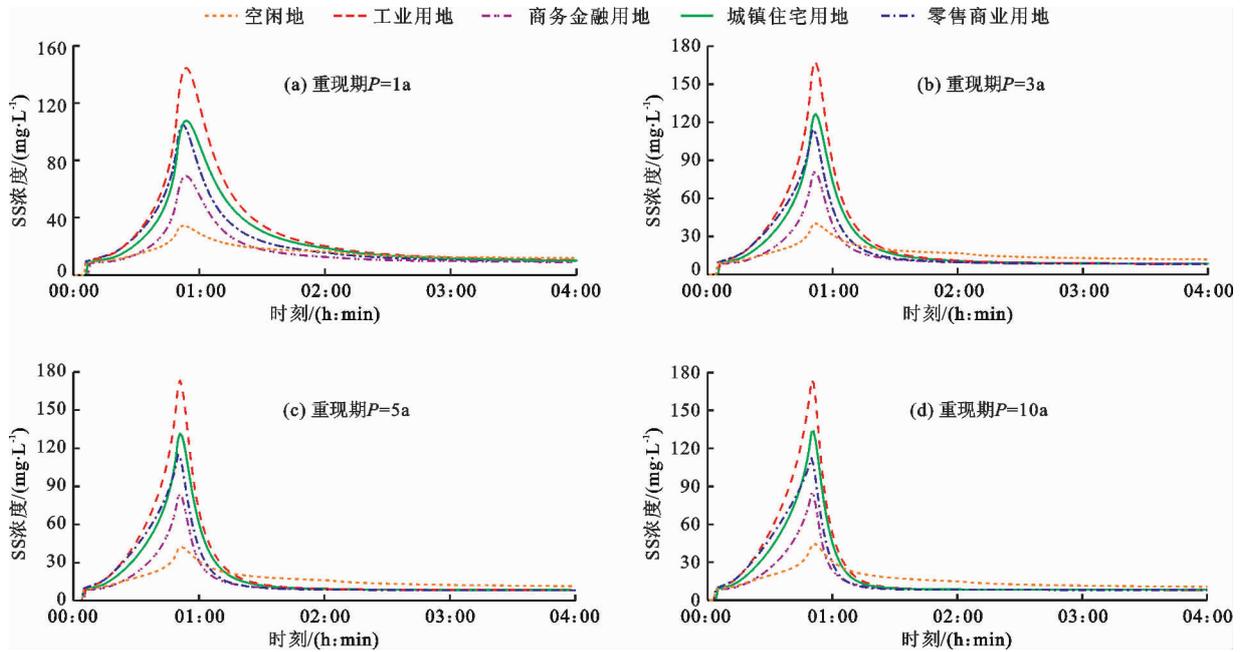


图 6 不同重现期和不同土地利用类型上的 SS 浓度变化趋势

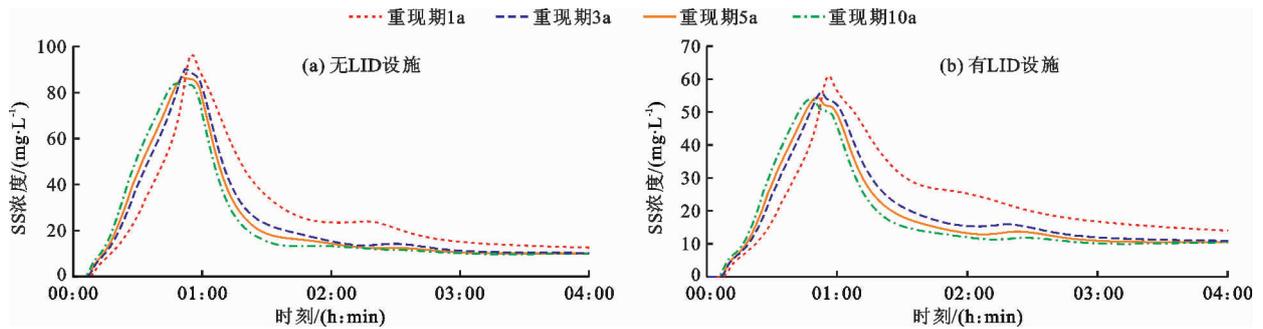


图 7 不同重现期下排放口 SS 浓度在有、无 LID 设施时的变化趋势

表 4 为布设两种 LID 后不同重现期下的 SS 产生总量和去除率。由表 4 可以看出,在渗透铺装和生物滞留池布设比例一定的情况下,随着重现期增加,LID 设施对径流 SS 消减量增加,去除效率也随之增加,由 20.4% 增加到 27.9%。这是因为一方面生物滞留池能对雨水径流进行预处理,增加雨水下渗并能去除部分大颗粒污染物;另一方面渗透铺装之间有缝隙且下层为吸水性底料,携带污染物的地表径流经渗透铺装时,会通过透水铺装间的缝隙向下层入渗,同时吸水性底料也能在雨水下渗的过程中拦截部分污染物。

表 4 布设两种 LID 后不同重现期下的 SS 产生总量和去除率

重现期/a	SS 产生总量/kg	LID 下 SS 去除量/kg	去除率/%
1	2933.1	597.8	20.4
3	3199.4	799.1	25.0
5	3323.0	877.8	26.4
10	3490.7	972.7	27.9

但随着重现期增大,去除率增速变缓,这是因为降雨强度变大,冲刷作用增强,径流中携带的 SS 含量增多,而 LID 对 SS 有一定的去除能力,达到其去除上限后对 SS 的去除效果就会不明显。因此 LID 控制措施对初期雨水径流 SS 尤其是对小重现期下

的径流 SS 污染控制消减效果明显,能在一定程度上减少其对受纳水体的污染,保护水体生态环境。

6 结 论

(1)在对 landsat 8 卫星影像处理的基础上对郁江道研究区进行土地利用类型划分,分为道路、水系、空闲地、工业用地、公园与绿地、零售商业用地、机关团体用地、商务金融用地、城镇住宅用地 9 类二级用地类型。

(2)基于相关文献和 SWMM 模型手册中水质模拟的参考资料,建立研究区的 SWMM 模型并对水文、水力和水质模块进行参数设置和率定。其中子汇水区的划分主要基于土地利用类型和搜集到的雨水管网资料;水质模块中污染物累积方式选用指数累积函数,衰减常数以达到最大累积量的 99% 所需要天数来确定;冲刷方式选用能反映污染物浓度变化过程的指数冲刷函数。

(3)通过模拟不同汇水区上的径流污染物 SS 浓度变化趋势,发现不同土地利用类型下的径流 SS 峰值浓度差异较大,且模拟结果符合已有的初期雨水径流污染理论,并对造成径流污染特征的原因进行分析。

(4)针对初期雨水径流的污染特征,采用渗透铺装和生物滞留池两种 LID 措施,LID 设施能够在小重现期下增加雨水下渗并拦截一定量的 SS 污染物,但随着重现期增加,其处理能力达到上限后则效果不明显。

(5)径流水质模拟本身具有一定程度的不准确性,而导致这种不确定性的因素有物理、化学、生物以及数据获取和模型参数的选取等。本研究中由于缺乏不同土地利用类型上径流污染物的实测数据,导致模型准确性降低,这将是下一阶段 SWMM 模型模拟水质过程的研究重点。

参考文献:

- [1] 毕桂平,陈 嫣,徐存福,等. 城镇化大背景下的海绵城市建设与资源协调发展——以上海市海绵城市的建设途径为例[J]. 上海城市管理,2016,25(1):24-26.
- [2] 章林伟. 中国海绵城市建设与实践[J]. 给水排水,2018,54(11):1-5.
- [3] 刘晓阳,曾 坚,张 森. 快速城镇化背景下的海绵城市规划研究——以新郑市北部新区郑新大道片区为例[J]. 生态城市与绿色建筑,2017(Z1):90-94.
- [4] 邓志光,吴宗义,蒋卫列. 城市初期雨水的处理技术路线初探[J]. 中国给水排水,2009,25(10):11-14.
- [5] 李小虎,孙佳佳,薛鹏程. 雨水径流污染特征研究进展

- [J]. 污染防治技术,2017,30(5):28-30+75.
- [6] 倪艳芳. 城市面源污染的特征及其控制的研究进展[J]. 环境科学与管理,2008,33(2):53-57.
- [7] 刘守城,何兆芳,张 烨,等. 屋面雨水径流水质特性研究[J]. 环境科技,2012,25(6):28-31.
- [8] 杜玉来. 合肥市经开区初期雨水污染特征[C]//《环境工程》编委会、工业建筑杂志社有限公司.《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(下册). 北京:《工业建筑》杂志社,2018.
- [9] 柳 健. 城市道路雨水径流污染特征及源头控制技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- [10] 孙志康,李翠梅,程 桂,等. 基于 SWMM 的 LID 组合措施水文水质模拟效果研究[J]. 中国农村水利水电,2017(12):109-114.
- [11] METCALF, EDDY. Storm water management model, Volume I - Final report [R]. US Environmental Protection Agency (US EPA), Washington D. C. : Water Resources Engineers and University of Florida, 1971.
- [12] 天津市市政工程设计研究院,天津城建设计院有限公司. 天津市海绵城市建设技术导则[S]. 天津:天津市建设工程技术研究所,2016.
- [13] 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.
- [14] 李彦伟,尤学一,季 民,等. 天津市初期雨水污染控制方案初探[C]//中国水网. 上海(第二届)水业热点论坛论文集,上海,2010.
- [15] US Environmental Protection Agency (US EPA). Results of the nationwide urban runoff program, Volume I - Final report [R]. Washington D. C. : Water Planning Division, US Environmental Protection Agency, 1983.
- [16] BURON G A, PITT R E. Stormwater effects handbook [S]. FL, USA: Lewis Publishers, CRC Press Boca Raton, 2002.
- [17] ROSSMAN L A, HUBER W C. SWMM water management model reference manual, volume III - Water quality [S]. US Environmental Protection Agency (US EPA), Cincinnati Ohio: National Risk Management Laboratory Office of Research and Development, 2016.
- [18] 张 静,周玉文,刘 春,等. 降雨地表径流水质模拟中 SWMM 模型水质参数确定[J]. 环境科学与技术,2017,40(5):165-170.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2014.
- [20] 蔡 甜,詹 健,肖存艳,等. 基于 SWMM 模型的不同气象条件下城市雨水径流污染特性分析[J]. 中国农村水利水电,2017(11):63-67.