

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.019

城市地表水体径流污染模拟分析:以苍海湖为例

李帅杰, 栗玉鸿, 范锦, 王家卓
(中规院<北京>规划设计有限公司, 北京 100044)

摘要: 在我国城市持续推进绿色发展理念的背景下,为科学支撑海绵城市规划编制工作,以梧州市苍海湖为研究实例,结合国内外相关研究经验和属地化的测量参数,应用InfoWorks ICM构建研究区水量水质数学模型。设计旱季和雨季两种模拟情景,分别对苍海湖汇水区内的污染物径流冲刷效应和湖体内污染物迁移扩散规律进行模拟分析,计算不同设计情景下地表污染物随雨水径流进入苍海湖及在湖内扩散的演进过程,并基于计算结果为苍海湖水动力条件改善、湖泊水质保护等提出工程指引建议,以期为水量水质数学模型在海绵城市规划中的应用提供参考。

关键词: 城市地表水体; 雨水径流污染; 水量水质数学模型; 污染物迁移扩散

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)01-0122-07

Simulation of Runoff Pollution in Urban Surface Water: Case Study of Canghai Lake

LI Shuai-jie, LI Yu-hong, FAN Jin, WANG Jia-zhuo
(CAUPD BEIJING Planning & Design Consultants Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: With the continuous promotion of green development concept in cities of China, in order to scientifically support the preparation of sponge city planning, a mathematical model of water quantity and water quality in Canghai Lake, Wuzhou was established by using InfoWorks ICM and combining relevant research experience at home and abroad and local measurement parameters. Two scenarios of dry season and rainy season were designed to simulate the runoff scour effect of pollutants in Canghai Lake catchment and the migration and diffusion of pollutants in the lake, respectively, and the evolution process of surface pollutants entering Canghai Lake with rainwater runoff and diffusing in the lake under different design scenarios were calculated. Based on the calculation results, engineering guidelines and suggestions were proposed to improve the hydrodynamic conditions and protect the water quality of Canghai Lake, so as to provide reference for application of mathematical model of water quantity and water quality in sponge city planning.

Key words: urban surface water; rainfall runoff pollution; mathematical model of water quantity and water quality; diffusion and transport of pollutants

根据国家生态环境部的统计数据,2012年—2019年全国地表水国控断面中劣V类水质水体平均占比高达8%,城市水环境治理形势依然严峻。城市地表水域因面积较小,水体自净能力也相对较弱,其水环境更容易受到汇水范围内人为活动的影

响^[1-2]。笔者以梧州市苍海湖为例,通过开展湖区及其汇水范围内的污染负荷定量计算和污染物运移模拟,旨在为苍海湖周边用地开发和水体环境质量管理提供技术支撑。

城市地表径流主要包括坡面漫流、排水系统汇

流、河网汇流等三个过程,地面累积的污染物经雨水冲刷进入城市地表水体,随后在风力、水力坡度力、密度梯度力等综合因素驱动下向下游迁移扩散^[3]。坡面漫流和排水系统汇流主要作用于污染物的冲刷过程,当前学术界主要采用“累积-冲刷”模型对地表径流污染演进物理机制进行简化与概化^[4];不同晴雨条件下的城市各类下垫面累积与冲刷负荷测算则主要采用实验方法,分析所得到的经验曲线与特征参数可以用于地表径流污染数学模型的构建。当前国内外较为常用的SWMM、MIKE、SUSTAIN、InfoWorks等模型均是利用地表沉积物累积与冲刷经验公式或物理原理建立计算方程,通过合理的概化与参数设置,模型都有较好的计算精度^[5-8]。

河网汇流中的污染物迁移扩散演算主要应用水动力与水质耦合的数值模型完成^[9],水动力模型可根据降雨和入流条件模拟城市河湖水动力场,为水质运算提供水动力驱动条件;水质模型基于水运动流场,以离散格式计算污染物浓度场的空间分布特征。当前国内外常用的河湖水质数学模型包括MIKE、InfoWorks、EFDC、WASP等。本研究通过构建水动力与水质耦合数值模型,对规划条件下梧州市苍海湖汇水范围内的下垫面污染物沉积与冲刷机制、地表水体污染物迁移扩散机制等开展仿真模拟研究。

1 研究区域概况

苍海湖位于梧州市苍海核心区,水域面积约4.36 km²,湖区汇水范围约26.77 km²,主要功能为调蓄雨洪、涵养与保护生态(见图1)。

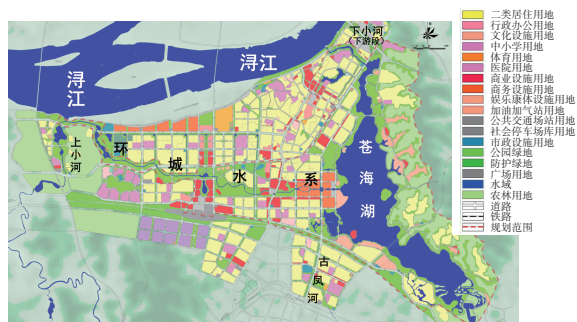


图1 梧州市苍海核心区用地规划

Fig.1 Urban landuse planning of Canghai new area of Wuzhou City

研究区规划用地以建设用地、绿地和水域为主,区内绿地、水系空间丰富,用地占比超过50%,其中绿地系统以局部连片和穿插交织为主要形态,水系以环城水系连通浔江和苍海湖,形成布局均衡的蓝绿空间;区内建设用地包括居住、商业和公建等多种类型,主体功能区分布于苍海湖西岸和环城水系两岸,开发强度较高。建成后研究区内建设用地面积比例将超过40%,为科学控制过量的面源污染物进入苍海湖,开展地表径流污染模拟分析可为相关控制措施提供依据。

2 数学模型

2.1 基本原理与物理概化

2.1.1 基本原理

① 雨洪仿真数学模型

基于水文水动力学原理的城市雨洪仿真模型可细分为地表产流模型、一维汇流模型和二维汇流模型等,数学运算过程分别对应净雨量计算、一维河道径流演算、一维雨水管道径流演算、二维地表径流演算等4个模块。本研究采用InfoWorks ICM软件构建研究区域地表产流模型和一维、二维水力学模型,模型采用Preissmann四点加权隐式差分格式离散求解一维圣维南方程组,采用有限体积法离散求解二维圣维南方程组,并基于TVD技术和Riemann解处理一维和二维耦合运算问题。模型通过对研究区内规划下垫面和排水工程条件进行物理概化,求解在设计情景下研究区降雨径流演进过程,获取全过程雨洪特征值。

② 降雨径流污染数学模型

苍海核心区降雨径流污染模拟重点针对城市规划用地上的面源污染负荷及其迁移规律进行研究。城市面源污染负荷计算主要包括污染物地面和管道累积、污染物冲刷、污染物在水体中的运移等过程,其动态过程可概括表述为晴天累积于地表、雨天被冲刷进入或沉积于排水系统、经汇流扩散后最终进入受纳水体。本研究联合应用SWMM(v5.1)模型和InfoWorks ICM(v6.5)水质模块对研究区内面源污染物在地表和水体内的迁移扩散过程进行模拟,其中SWMM模型分别应用饱和函数模型和指数函数模型模拟计算污染物在地表的累积与冲刷过程,InfoWorks ICM水质模块用于模拟污染物在河道和苍海湖中的扩散过程。

饱和函数模型基于经验或实验数据推求污染物增长速率与时间之间的饱和函数关系,认为污染物累积量达到浓度饱和限值后便停止;针对径流期内地表污染物质被侵蚀和溶解的过程,采用指数冲刷函数进行计算,该函数设定污染物冲刷速率与污染物累积量成正比,与雨水径流量构成指数函数关系。

InfoWorks ICM 二维水质模块通过与水动力模型耦合求解污染物对流扩散方程,获取各网格点不同时刻的污染物浓度,用于模拟污染物进入苍海湖后的“平移-扩散”的过程。

2.1.2 模型概化

根据研究区的地形特征、规划竖向、规划用地及地块容量控制要求等,按照数字化处理要求对研究区地表覆面、排水工程、河网水系等进行数字离散和物理概化(见图2),提炼特征参数,形成离散化的计算单元,包括节点、河段、管段和2D三角网格。

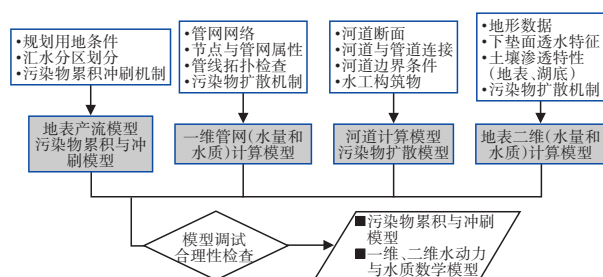


图2 研究区数学模型计算要素概化流程

Fig.2 Flow chart of mathematical model generalization of study area

经模型概化,研究区被划分为1 822个子汇水分区,同时被划分为26 502个2D三角网格,包含地

表单元和湖面单元,其中苍海湖湖面单元为3 736个,单元平均面积为1 260 m²;研究区内环城水系、上小河、下小河等河道全长约16 km,被189个规划控制断面离散概化为163个河段;规划雨水排水管道104 km,被概化为409个管段、412个节点,如图3所示。

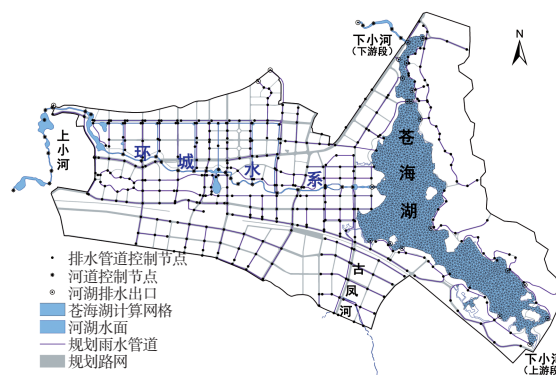


图3 研究区规划排水系统概化图

Fig.3 Generalized map of planned drainage system in study area

2.2 边界条件

2.2.1 水位和流量边界

研究区域内的环城水系和下小河均是连通泻江与苍海湖的通道,环城水系因有设计蓄水功能,末端设置有挡水闸门,闸前水位可以根据设计进行调节;下小河出口处设置有闸门和泵站,可以根据闸内外水位变化情况确定排水方式。模型水位边界包括环城水系入口水位和下小河出口水位,其在汛期(4月—9月)和非汛期(10月—次年3月)的取值如表1所示。

表1 研究区出流河道水文特征值

Tab.1 Hydrological characteristics of outflow rivers in study area

项 目	研究区段 长度/km	出口常水位/m		外江设计常水位/m		排水方式
		非汛期	汛期	非汛期	汛期	
下小河(苍海湖下游段)	1.6	16.0	17.37~21.0	4.6	18.6	非汛期自由出流;汛期泻江水位高于16 m时,下小河口闸门关闭,启动泵站强排
环城水系	8.0	20.0~20.6	20.0	20.6	18.6	闸门控制
苍海湖	—	20.0	18.0	—	—	—

2.2.2 流量边界

下小河和古风河均发源于南侧的低山丘陵地区,在研究区域内汇入苍海湖。在构建的水量水质数学模型中,将古风河概化为排水沟渠,由于下小河上游河道全部位于研究区域之外,因此将其概化

为入流节点;数学模型的流量边界包括古风河入流和下小河节点入流。进入苍海湖的水量取河道的多年平均流量,统计流量分为汛期(4月—9月)和非汛期(10月—次年3月),研究区域入流河道的水文特征值如表2所示。

表2 研究区入流河道水文特征值

Tab.2 Hydrological characteristics of inflow rivers in study area

项 目	多年平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	汛、枯期平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		河道长度/km	研究区段长度/km
		汛期	非汛期		
下小河(苍海湖上游段)	12.20	16.70	7.90	80.2	0
古凤河	0.35	0.48	0.23	7.0	2.0

2.2.3 水质边界

模型以高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(TP)等指标浓度作为水质模拟状态变量,将河网水体的年平均水质监测结果作为水质边界。环城水系水源包括浔江和周边雨水径流,其水质受水源来水比例影响较大,存在波动变化;根据水质监测数据,最终确定各河道初始水质指标值如表3所示。

表3 研究区内河网水系水质指标浓度

Tab.3 Water quality index concentration of rivers in study area

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD_{Mn}	TN	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
古凤河入苍海湖断面	3.0~5.0(Ⅲ)	2.00~2.60(劣Ⅴ)	0.65~1.00(Ⅲ)	0.20~0.26(Ⅳ)
下小河入苍海湖断面	1.6~4.2(Ⅲ)	0.77~1.46(Ⅳ)	0.12~0.81(Ⅲ)	0.11~0.12(Ⅲ)
苍海湖	1.9~3.6(Ⅱ)	0.80~0.90(Ⅲ)	0.26~0.61(Ⅲ)	0.04~0.34(Ⅴ)

注: 括号内为水质等级。

2.3 模型参数设置

2.3.1 地表阻水参数

地表与河湖曼宁糙率系数根据研究区内的用地类型、覆面铺装、土地覆被、渗透属性等综合因素确定,参数计算结果如图4所示。

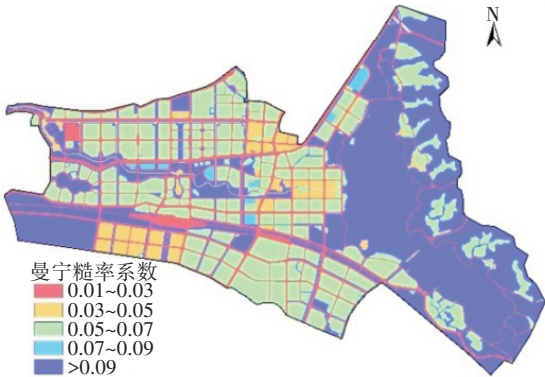


图4 研究区下垫面糙率系数取值特征

Fig.4 Zoning map of underlying roughness coefficient

2.3.2 土壤入渗参数

研究区下垫面渗透属性根据汇水分区的透水率和渗透参数,采用面积加权平均法求得。研究区的地形坡度如图5所示,其中,平坦低洼区土壤的最大入渗率、最小入渗率、衰减系数和排干时间分别为49 mm/h、13 mm/h、4 h^{-1} 、10 d,坡度缓变区土壤的上述参数值分别为49 mm/h、21.6 mm/h、4 h^{-1} 、10 d,坡度陡变区土壤的上述参数值分别为82 mm/h、33 mm/h、4 h^{-1} 、10 d。

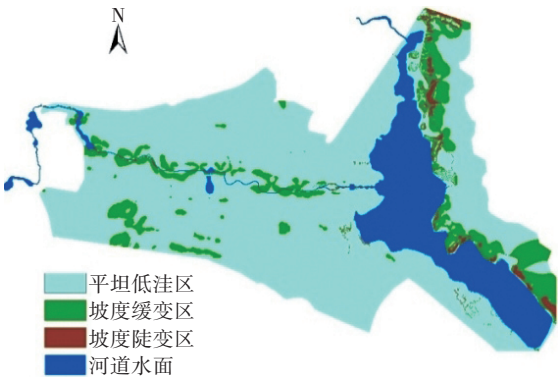


图5 研究区下垫面坡度分布

Fig.5 Zoning map of underlying slope

2.3.3 面源污染物累积与冲刷参数

研究区域不同类型用地的综合累积与冲刷概化参数如表4和表5所示。

表4 研究区不同类型用地的污染物累积参数

Tab.4 Pollutants build-up parameters of different land uses in study area

项目	参数	TSS	COD_{Mn}	TN	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
居住	最大累积量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	180	85	3.0	2	0.3
	半饱和天数/d	10	10	9	9	9
公建	最大累积量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	200	90	3.5	2	0.3
	半饱和天数/d	8	8	8	8	8
道路	最大累积量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	230	140	5	2	0.2
	半饱和天数/d	5	6	6	6	5
绿地	最大累积量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	100	40	10	1.8	1
	半饱和天数/d	20	20	20	20	20

表5 研究区不同类型用地的污染物冲刷参数

Tab.5 Pollutants washoff parameters of different land uses in study area

项目	参数	TSS	COD _{Mn}	TN	NH ₃ -N	TP
居住	冲刷系数	0.008	0.005	0.004	0.004	0.015
	冲刷指数	1.8	1.7	1.5	1.5	1.8
	清扫去除率/%	70	70	70	70	70
公建	冲刷系数	0.008	0.005	0.004	0.004	0.015
	冲刷指数	1.8	1.7	1.5	1.5	1.8
	清扫去除率/%	70	70	70	70	70
道路	冲刷系数	0.008	0.007	0.002	0.002	0.003
	冲刷指数	1.8	1.8	1.4	1.5	1.7
	清扫去除率/%	70	70	70	70	70
绿地	冲刷系数	0.03	0.03	0.007	0.008	0.042
	冲刷指数	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	清扫去除率/%	—	—	—	—	—

根据梧州市本地面源污染相关研究成果,同时选取城市功能与规模相似地区的实验结果作为参考,按照居住区、公建区、绿地以及道路等4类用地对研究区面源污染累积和冲刷规律进行分析,通过分类平均和统计加权计算求得4类用地的综合累积与冲刷概化参数。

3 苍海湖污染物运移模拟分析

3.1 设计模拟情景

本研究采用2种设计情景:旱季计算情景和雨季计算情景,对苍海湖内污染物的“平移-扩散”特征进行模拟分析。已有研究发现,苍海湖汛期与非汛期的水体交换周期相差较大^[10],为保证水流充分扩散交替和计算结果可对比,设计计算时长取汛期与非汛期水体交换周期的中间值即20 d,其中旱季情景以枯水期无降雨状态设计,苍海湖仅有外源河道水体汇入,入流量取非汛期多年平均值;雨季情景以汛期连续降雨状态设计,逐日设计降雨重复采用单日设计降雨,单日降雨量取梧州市海绵城市年径流总量控制率80%对应的设计降雨量,单日设计降雨过程根据梧州市典型雨型通过同频率缩放分析确定,雨季情景总设计降雨量为588 mm,同时考虑外源河道入流,入流量取汛期多年平均值。

3.2 模拟结果

经模拟计算,旱季与雨季情景下污染物浓度空间分布特征如图6和图7所示。苍海湖湖区流场分析结果表明,旱季与雨季水体总体均呈现为自南向北和自西向东流动、越近岸边流速越慢的特征。

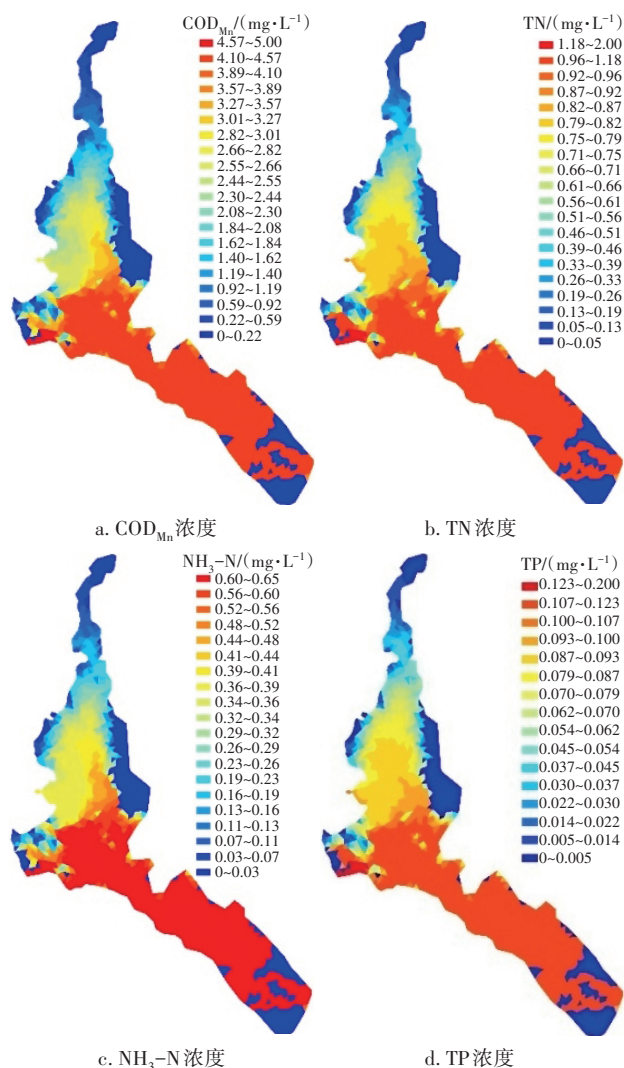
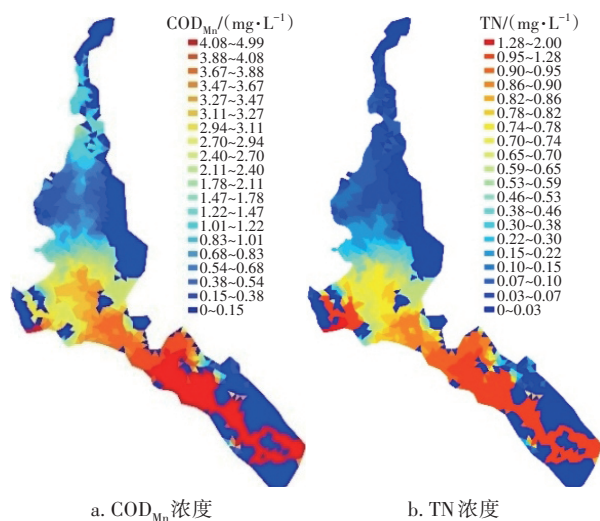


图6 旱季情景下苍海湖的主要污染物浓度分布
Fig.6 Concentration zoning of pollutants in Canghai Lake under design dry season scenario



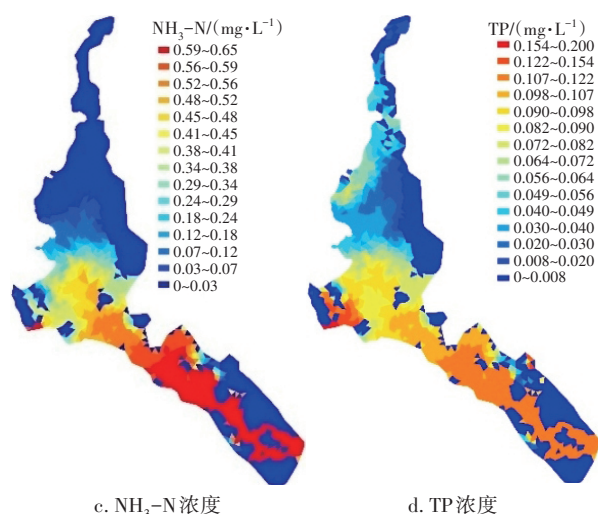


图7 雨季情景下苍海湖的主要污染物浓度分布

Fig.7 Concentration zoning of pollutants in Canghai Lake under design rainy season scenario

旱季河道入湖径流量相对较小,河湖水体交汇后水流速度显著降低,苍海湖区流态呈低速运动状态,污染物在湖泊内停留时间较长。其中苍海湖东岸北部区域、近苍海公园西岸区域以及湖泊南端局部区域的水体流动性较差,东岸区域水流向边岸甚至为单向扩散状态,易形成局部死水区域,不利于湖泊水质保持。水质模拟结果表明,苍海湖内有26.5%的水域面积总氮浓度劣于地表水Ⅲ类水质标准,其他指标均可达到地表水Ⅲ类水质标准,湖体内污染物浓度以入湖口处最高,沿着水流方向逐渐递减。

降雨情景下,地表污染物被雨水径流携带进入排水系统,最终经雨水排口或河道汇流进入苍海湖。规划地表水域共有31个雨水排口,分布于环城水系南北岸和苍海湖东西岸,如图8所示。

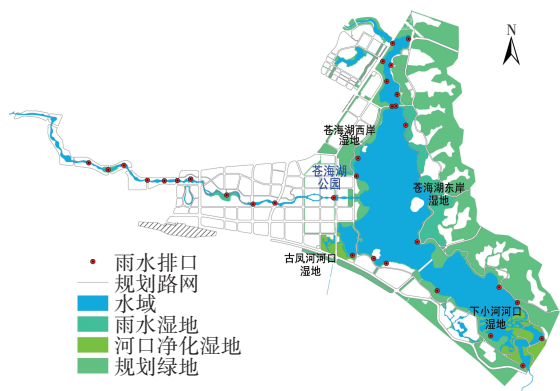


图8 苍海湖水体水质净化湿地分布

Fig.8 Planning layout of wetlands serving for Canghai Lake

苍海湖西岸片区(含环城水系)以建设用地为主,东岸片区以山体绿地为主,模拟结果显示,西岸片区 COD_{Mn} 污染负荷高于东岸片区,TP和TN污染负荷则显著低于东岸片区,并随降雨强度增大略有加剧趋势,苍海湖内有11.4%的水域面积总氮浓度劣于地表水Ⅲ类水质标准,其他指标均可达到地表水Ⅲ类水质标准,各类污染物浓度在空间上呈现自南向北和自西向东递减的趋势。

4 结论

以梧州市苍海核心区海绵城市规划为例,应用InfoWorks ICM构建研究区水量水质数学模型,结合国内外相关研究经验和实测参数,基于情景分析手段对规划用地条件下苍海核心区的面源污染负荷进行量化研究,希望通过科学准确的分析结果为研究区确定海绵城市规划目标、核算建设需求与工程量,以及制定建设计划提供强有力的支撑。研究分别构建了水力学模型、污染物累积冲刷模型、一维和二维污染物迁移扩散模型,通过开展有针对性的方案模拟,探明了规划条件下研究区面源污染负荷特征、污染物在苍海湖内的运移规律和空间分布特征,根据设计方案分析结果,提出如下3条建议:

① 由研究区用地规划方案可知,苍海湖西岸片区和东岸片区用地类型差异显著,西岸片区主要为建设用地,东岸片区则主要为山体、绿地。地表径流污染物冲刷效应分析表明,苍海湖东、西两岸的污染负荷在不同降雨强度下存在不同程度差异,其中进入河湖的污染物中西岸片区以 COD_{Mn} 占比较高,平均为东岸片区的4.85倍,东岸片区以氮、磷占比较高。城市管理应结合污染物分布差异,有针对性地制定污染物日常清理和地表水体污染防控措施。

② 根据苍海国家湿地公园规划要求,苍海湖水质需要达到国家地表水Ⅲ类水质标准。多年水质监测结果显示,下小河(苍海湖上游段)和古风河部分时段水体中总氮与总磷浓度超过地表水Ⅲ类水质标准限值,古风河总氮浓度甚至劣于地表水Ⅴ类水质标准,为保证苍海湖上游来水满足湖区水质要求,建议利用下小河和古风河入湖口绿地建设河口湿地,湿地设计应能够有效削减水体中的氮、磷污染物,确保水体水质达标。

③ 苍海湖水动力和流场分析结果表明,湖区

东、西两岸局部区域均存在水体缓慢对流区,形成死水区后氮、磷污染物单项汇入富集,易导致水体出现富营养化问题,建议利用西岸苍海湖公园内绿地和东岸滨湖绿地构建雨水净化湿地,并以环流方式分流湖水,调整湖体边岸区域水动力条件,优化提升湖区水质保持功能。

参考文献:

- [1] 张辰,吕永鹏,莫祖澜,等.以总磷控制为主导的滴水湖水质保障系统方案探讨[J].给水排水,2019,45(9):46-49,54.
ZHANG Chen, LÜ Yongpeng, MO Zulan, *et al.* A systematic solution to water quality control in Dishui Lake dominated by total phosphorus control[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(9): 46-49, 54 (in Chinese).
- [2] 田伟,杨周生,邵克强,等.城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例[J].环境科学,2020,41(1):183-193.
TIAN Wei, YANG Zhousheng, SHAO Keqiang, *et al.* Effect of a comprehensive improvement project on water quality in urban lakes: a case study of water quality variation in Lihu Lake over the past 30 years [J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 183-193 (in Chinese).
- [3] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
RUI Xiaofang. Principle of Hydrology [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004 (in Chinese).
- [4] VAZE J, CHIEW F H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface [J]. Urban Water, 2002, 4(4): 379-389.
- [5] TUOMELA C, SILLANPÄÄ N, KOIVUSALO H. Assessment of stormwater pollutant loads and source area contributions with storm water management model (SWMM) [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 233: 719-727.
- [6] GAUT J, CHUA L H C, IRVINE K N, *et al.* Modelling the washoff of pollutants in various forms from an urban catchment [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 374-383.
- [7] 李波,于磊,潘兴瑶,等.北京城市副中心道路污染累积负荷特征研究[J].北京水务,2019(5):19-24.
LI Bo, YU Lei, PAN Xingyao, *et al.* Study on the characteristics of cumulative load of road pollution in Beijing City Sub-center [J]. Beijing Water, 2019(5): 19-24 (in Chinese).
- [8] 李立青,吕书丛,朱仁肖,等.北京市新建城区不透水地表径流N、P输出形态特征研究[J].环境科学,2012,33(11):3760-3767.
LI Liqing, LÜ Shucong, ZHU Renxiao, *et al.* Nitrogen and phosphorus composition in urban runoff from the new development area in Beijing [J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3760-3767 (in Chinese).
- [9] 赵也,汤钟,曾胜.基于模型评估的黑臭水体综合治理方案目标可达性分析[J].中国给水排水,2020,36(13):73-82.
ZHAO Ye, TANG Zhong, ZENG Sheng. Objective reachability analysis of comprehensive treatment scheme of black and odorous water body based on model evaluation [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 73-82 (in Chinese).
- [10] 张琳,李飞鹏,张海平.基于数值模拟的城市景观水体生态设计研究——以广西苍海湖为例[J].中国园林,2015,31(10):76-80.
ZHANG Lin, LI Feipeng, ZHANG Haiping, *et al.* Aquatic ecological landscape planning based on numerical modeling—case study of Canghai Lake [J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(10): 76-80 (in Chinese).

作者简介:李帅杰(1984—),男,河南登封人,博士,城乡规划高级工程师,主要研究方向为城市排水防涝规划、城市地表水环境综合治理、给排水设计与模拟计算、城市内涝风险模拟与评估、海绵城市规划、城市排水防涝模型构建与应用技术等。

E-mail:lishuaijie2006@163.com

收稿日期:2020-10-02

修回日期:2020-12-22

(编辑:刘贵春)