

# 基于SWAT模型的江西八里湖流域 氮磷污染负荷研究

陈岩<sup>1</sup> 赵琰鑫<sup>1</sup> 赵越<sup>1</sup> 王东<sup>1</sup> 白辉<sup>1,†</sup> 郭怀成<sup>2</sup>

1. 生态环境部环境规划院, 长江经济带生态环境联合研究中心, 北京 100012; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: baihui@caep.org.cn

**摘要** 基于SWAT模型, 通过社会调查和统计数据获取模型所需的空間数据及污染源输入数据, 构建江西八里湖流域的氮磷负荷模拟模型, 并利用当地2010—2014年的气象、径流和水质观测资料, 对模型进行率定和验证。依据该模型, 分别在时间和空間上对研究流域的氮磷污染物分布进行模拟。结果表明: 流域氮磷污染主要来自城镇生活源、农田施肥和畜禽养殖, 工业源最少; 氮磷负荷主要集中在汛期(5—9月), 占全年的55%, 汛期污染负荷主要受农村生活和农业施肥的面源影响, 随着降水增大等因素导致冲刷作用增强, 径流中总氮和总磷的负荷也随之增大。氮磷等营养物负荷主要分布在流域内人口密集的九江县、浔阳区和庐山区, 与对应区域大量城镇生活污水的排放相关。

**关键词** SWAT模型; 非点源污染; 负荷结构; 八里湖流域; 营养盐

## Estimating Nitrogen and Phosphorus Pollution Load in Bali Lake Basin of Jiangxi Province Based on SWAT Model

CHEN Yan<sup>1</sup>, ZHAO Yanxin<sup>1</sup>, ZHAO Yue<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, BAI Hui<sup>1,†</sup>, GUO Huaicheng<sup>2</sup>

1. United Center for Eco-Environment in Yangtze River Economic Belt, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871;  
† Corresponding author, E-mail: baihui@caep.org.cn

**Abstract** The simulation of nitrogen (N) and phosphorus (P) pollution load structure in Bali Lake basin was performed by SWAT model using the spatial and attribute database acquired through social survey and statistical data. The model was applied and validated based on the data of meteorology, runoff and water quality from 2010 to 2014. The spatial-temporal distribution of N and P in the basin was also studied. The results showed that the urban life was the most important source of N and P load, following by agriculture and livestock breeding pollution source, and the least was industry pollution source. The annual TN and TP loads were mainly concentrated in flood season (from May to September) which took up nearly 55% of the whole year load. As the amount of precipitation increased, TN and TP loads increased during flood period, which was mainly due to the increasing of non-point rural living water and agricultural fertilization pollution source with scouring action of the heavy rainfall during flood season. The spatial distribution of N and P was centered on the Jiujiang county, Xunyang and Lushan district as the urban agglomeration area affected by urban sewage pollution.

**Key words** SWAT model; nonpoint pollution; load structure; Bali Lake basin; nutrients

水资源是国家和社会发展的战略资源, 水资源保护和水污染问题一直是各国关注的重点。由于社会经济的高速发展和人口的快速增长, 我国水

环境污染形势十分严峻。如何有效地控制各种污染源的排放, 是水环境质量改善的关键问题。以流域为尺度的点源和非点源污染负荷的精确核算是流域

水污染控制的先决条件,也是流域水污染控制管理的主要依据。但是,由于流域内各环境要素的差异性,给污染物排放量核算带来一定的困难。

目前,流域污染负荷核算的主要方法包括排放清单法和环境模型法。其中,排放清单法主要基于经济社会统计数据 and 排放系数等来核算研究区内污染源的排放量。王刚等<sup>[1]</sup>基于最新源排放清单,解析北京市当前主控污染物 COD 和氨氮排放的结构特征和空间特征。陈学凯等<sup>[2]</sup>基于输出系数,对程海流域溶解态氮磷入湖污染负荷进行解析。彭亚辉等<sup>[3]</sup>基于输出系数法及等标污染负荷法,全面解析湘江流域长株潭段水污染负荷时空分布规律及成因。Zhang 等<sup>[4]</sup>基于输出系数法,解析南四湖流域非点源氮磷负荷贡献。国内外多数研究通过环境模型对流域尺度的污染物负荷进行模拟研究<sup>[5-10]</sup>。匡舒雅等<sup>[8]</sup>基于 L-THIA 模型,对四川省濛溪河流域非点源污染负荷进行分析。邱瑛等<sup>[9]</sup>基于一维水质模型(Qual2Kw),对湟水流域氨氮和总氮污染负荷进行解析。Bai 等<sup>[10]</sup>基于 EFDC 和数值源解析模型,对湖泊流域污染源氮磷污染贡献进行解析。

本研究以我国长江中下游的江西八里湖流域为对象,进行流域污染负荷的模拟研究。作为城镇聚

集区,八里湖流域不仅承载着人类生活、工业企业等点源污染物,流域内还有大量的农田以及畜禽养殖场为主的面源污染物的排放,是进行流域水污染研究的典型区域。本研究通过社会调查和统计数据,获取研究区的气象、水文、污染源和下垫面数据,构建流域 SWAT 模型,通过模型分析流域尺度内的点源、面源的时间和空间分布特征,以期对流域水污染控制和水质改善提供科学依据。

## 1 研究区概况

八里湖位于江西九江市中心城区西侧,毗邻庐山,由庐山西麓数支涧水汇聚而成。周边为山地丘陵、滩涂和汉港,地势平整。八里湖现有水面面积约 18 km<sup>2</sup>,汇水面积约 316.5 km<sup>2</sup>,湖区南北长、东西窄(图 1)。流域主要河流有十里河和沙河,经城市核心区进入八里湖新区,并汇入八里湖。十里河为流经九江城区的一条河流,濂溪河为十里河支流,沙河穿过九江县城最终在西南方向流域八里湖。北部有新开河,沟通八里湖和长江。八里湖流域地处中亚热带向北亚热带的过渡区,气候温和,四季分明,年平均气温为 16~17℃。流域雨量充沛,年降雨量为 1200 mm 左右,雨量年内分配不均匀,年降

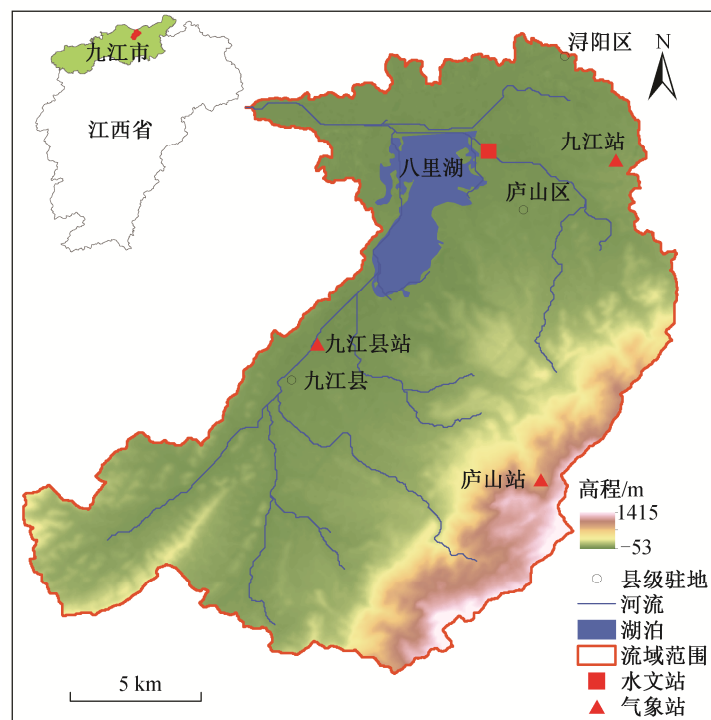


图 1 八里湖流域地理位置、DEM、水系及水文气象观测点分布

Fig. 1 Location, DEM, rivers and hydrological stations and meteorological stations in Bali Lake basin

水量的 40%~50%集中在第二季度。多年平均径流的深度在 400~1000 mm 之间<sup>[11]</sup>。

随着九江市城市发展战略的转移,八里湖已逐渐成为城市内湖,八里湖流域水环境问题也日益凸显,流域水环境现状不容乐观,水环境保护面临较为严峻的形势。

## 2 材料与方法

### 2.1 SWAT 模型构建

SWAT(soil and water assessment tool)是由美国农业部农业研究中心开发的分布式水文和水质耦合模型<sup>[12-13]</sup>,可用于模拟地表水及地下水的水质状况。该模型可根据研究区土地利用类型、土壤类型和坡度,将流域细分为水文响应单元(hydrological response unit, HRU),并以 HRU 为基本水文计算单元,模拟流域尺度的径流、泥沙和氮磷等营养物的运移和输送过程<sup>[14-16]</sup>。SWAT 模型利用 EPIC 模型,对水体中的氮磷循环过程分别进行模拟。氮在水循环过程中分为有机氮、作物氮和硝酸氮 3 种形态,SWAT 模型通过模拟径流、侧流和入渗水文过程,进而推算各种形态氮的迁移转化过程,主要包括生物的固氮作用、有机氮向无机氮的转化、溶解性氮在壤中流的迁移以及氨氮的挥发扩散等过程。磷元素的循环过程则主要考虑溶解态磷和吸附态磷,同时考虑磷的流失以及作物生长的吸收。

在结合历年统计资料和环境调查的基础上,本研究详细地分析流域内的社会经济发展状况以及各污染源的排污情况。通过 SWAT 模型,建立流域水文和水质模型,研究八里河流域水污染物符合的空间和时间分布特征。

首先将 2010—2014 年流域内 3 个气象站点(九江站、九江县站和庐山站)的气象数据作为模型的驱动数据,将 2010—2011 年流域入湖口流量站的河流流量监测数据作为模型的验证数据,对参数进行率定,并利用 2012—2014 年流量数据进行模型验证。选用 Nash-Sutcliffe 效率系数  $E_{ns}$  和确定系数  $R^2$  为模型率定标准。在  $\leq 1$  的范围内,  $E_{ns}$  和  $R^2$  值越大,表明模型模拟结果越好。利用 SWAT-CUP 软件对模型进行参数优选,利用入湖口观测月径流量,通过 LHS-OAT (Latin hypercube sampling one-factor-at-a-time)方法进行参数敏感性分析。

### 2.2 数据来源

构建 SWAT 模型所需的主要数据有空间数据、

土壤属性数据、土地利用类型和水文气象数据<sup>[17]</sup>。

1) 空间数据。利用中国科学院地理空间数据云平台提供的 STRM 30 m×30 m 分辨率数字高程模型(DEM)数据(图 1),此数据用于提取八里湖流域的水系、地形坡度以及子流域的划分。

2) 土壤属性数据。土壤类型分布数据采用联合国粮农组织构建的 1:100 万 HWSO 数据库<sup>[18]</sup>、FAO1990 土壤分类系统<sup>[19]</sup>和中国土壤分类系统<sup>[20]</sup>,通过美国华盛顿大学开发的土壤水特性软件 SPAW (Soil-Plant-Air-Water)计算土壤的属性数据,进而得到八里湖流域内土壤类型和土壤属性及其分布,如图 2 所示。

3) 土地利用数据。来源于 2014 年九江市城市和农村土地调查数据库,根据土地利用分类系统进行分类,得到流域土地利用分布情况(图 3)。

4) 水文气象数据。采用九江、九江县和庐山 3 个测站(位置见图 1)的气象数据,主要包括日最高(最低)气温、日相对湿度、日降水量、日平均风速和太阳辐射量数据。流量数据为八里湖入湖口径流的月均流量监测数据。水文气象数据时间序列均为 2010—2014 年。

5) 其他数据。八里湖流域主要种植物有水稻、小麦等粮食作物,油菜、芝麻等油料作物以及蔬菜、棉花等经济作物。氮肥主要为尿素,磷肥主要为磷酸钙。

根据《2013 九江统计年鉴》,将流域内城镇生活用水和污水处理厂排污、工厂企业以及规模化集中畜禽养殖的污染物排放量计为点源污染源。非点源主要包括农田施肥,农村生活分散污水以及畜禽粪便等排放。对点源和非点源分别进行统计和计算,其总氮总磷排放量列于表 1。

利用空间数据输入模型,通过 DEM 自动提取流域水系以及子流域,同时根据子流域的土壤类型、土地利用以及地形坡度,生成相应的水文响应单元。本研究中八里湖流域分为 27 个子流域,616 个水文响应单元<sup>[21]</sup>(图 2)。

## 3 结果分析

### 3.1 SWAT 模型率定与验证

根据自动率定结果,得到八里湖流域 SWAT 模型参数的最优值(表 2),率定期的评价参数  $E_{ns}$  和  $R^2$  值分别为 0.85 和 0.60;验证期值的  $E_{ns}$  和  $R^2$  值分别为 0.83 和 0.58,表明模型模拟结果较好。

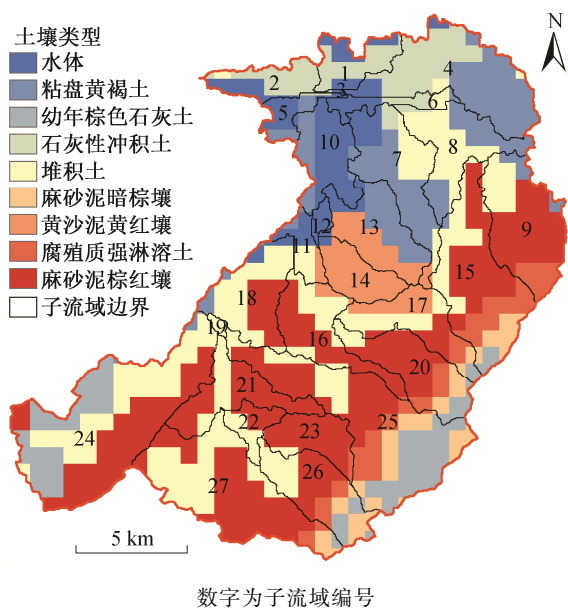


图 2 八里湖流域土壤类型及子流域分布  
Fig. 2 Soil types and sub basins in Bali Lake basin

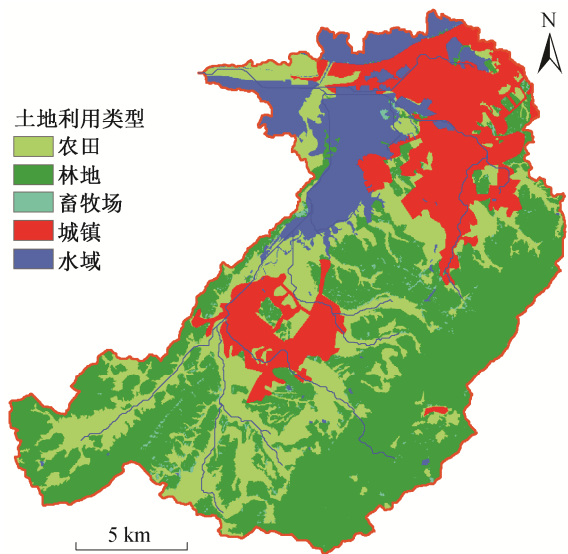


图 3 八里湖流域土地利用分类  
Fig. 3 Land use classification in the Bali Lake basin

由于缺乏长时间序列的泥沙和水质监测数据,本研究只对流域的总氮模拟过程进行校准。结果表明,总氮的模拟误差在 30% 左右,基本上反映实际情况。

3.2 流域主要污染源负荷模拟

由污染源氮磷产生量的统计情况可知八里河流域主要污染源的排序情况:城镇生活>农业施肥及养殖>农村生活源>污水处理场>规模化畜禽养殖源>工业。通过 SWAT 模型的点源和非点源输入,

表 1 八里湖流域不同污染源氮磷产量及其比例  
Table 1 Nitrogen and phosphorus production and their proportions of different pollution sources in Bali Lake basin

污染源	产氮量/		产磷量/	
	(t·a <sup>-1</sup> )	比例/ %	(t·a <sup>-1</sup> )	比例/ %
点源	工业	5.0	0.7	0
	城镇生活	284.1	41.7	26.8
	污水处理场	83.2	12.2	1.2
	规模化畜禽养殖场	11.2	1.6	1.7
面源	农业施肥及养殖场	184.1	27.0	15.4
	农村生活	114.0	16.7	10.8
总计	681.6	100.0	55.9	100.0

表 2 八里湖流域 SWAT 模型参数率定  
Table 2 Parameter calibration of SWAT model in Bali Lake basin

参数	描述	取值范围		率定值
		最小值	最大值	
CN2	径流曲线数	-0.040	0.400	0.180
ALPHA_BF	基流 α 系数/d	0.175	0.925	0.550
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.699	0.921	0.810
GW_DELAY	地下水延迟时间/d	69.964	368.036	219.000
GWQMN	基流判定系数/mm	-0.066	1.466	0.700
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.021	0.159	0.090
CH_K2	主河道河床有效水力传导系数/(mm·h <sup>-1</sup> )	-57.825	80.325	11.250
CH_N2	曼宁系数	-0.061	0.211	0.075
SOL_AWC	土壤层可利用有效水/(mm·mm <sup>-1</sup> )	0.006	0.614	0.310
SOL_K	土壤饱和水力传导系数/(mm·h <sup>-1</sup> )	-0.313	1.113	0.400
SFTMP	雨雪比例分割温度/°C	-8.553	1.553	-3.500
BIOMIX	生物混合效率	0.950	0.200	1.000
CMN	活性有机营养物质腐殖质矿化速率因子	0.002	0.001	0.003
N_UPDIS	氮吸收分布参数	59.000	30.000	70.000
P_UPDIS	磷吸收分布参数	45.000	30.000	70.000

对八里湖流域 2011—2014 年总氮、总磷等污染负荷进行模拟,模拟结果按照子流域的年均总量分布如图 4 所示。可以看出,总氮和总磷的分布区域与主要污染源总氮总磷污染输出地情况符合,主要分布在流域内人口密集的九江县(子流域编号 18)以及浔阳区(子流域编号 1, 4)和庐山区(子流域编号 7, 8)这 3 个城镇人口聚集区及其周边的农村人口聚集地。流域内总氮和总磷高污染负荷区均为人类活动

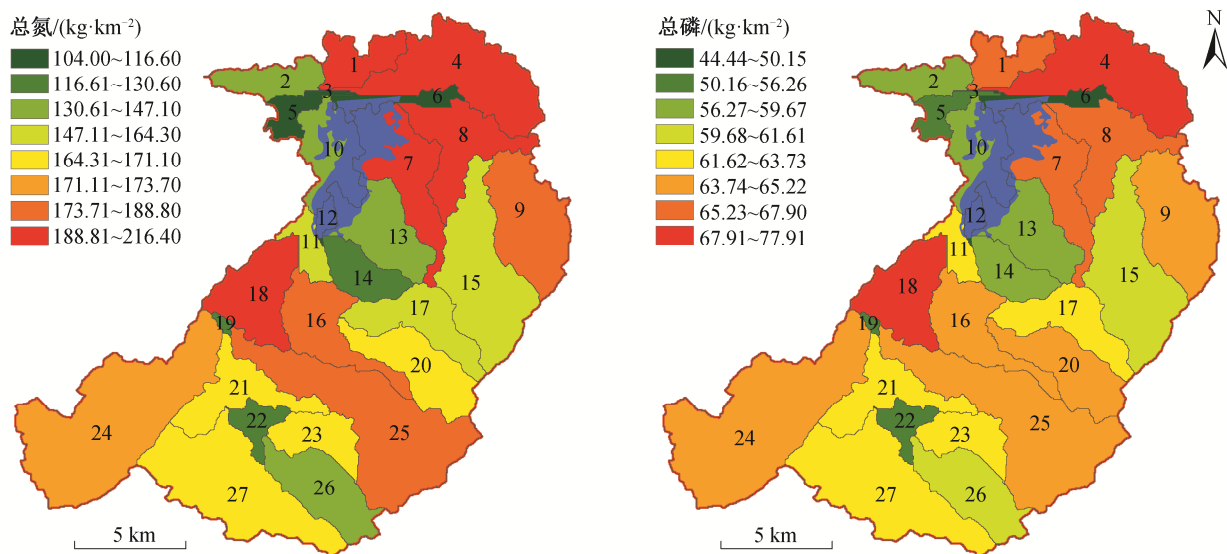


图 4 八里湖流域年均总氮和总磷空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual total nitrogen and total phosphorus load in the Bali Lake basin

聚集地区。在流域内森林和植被覆盖度较高的地区,人口较少,生活和工业污染源少,所以污染负荷相对较低。总的来说,总氮和总磷的污染负荷与流域内土地利用类型分布较为一致,城镇区域是污染物的主要负荷区。实地调查发现,由于八里湖流域城镇生活污水中只有少量进入污水处理厂处理,无管网的区域作为点源污染源污水直排河道;部分有管网的区域由于污水处理厂处理能力不够,也未进入污水处理厂处理,有溢流进入河道。

### 3.3 流域污染负荷的时间分布

八里河流域属于长江中下游地区,每年5—9月降水量骤增,为流域的汛期。从图5看出,随着汛期来临,河流径流量逐渐增大,5—9月的平均径

流量为  $15.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , 是非汛期(10月—次年4月)平均流量  $8.3 \text{ m}^3/\text{s}$  的近两倍。

图5显示,2011—2015年研究流域内月均径流量以及总氮和总磷的变化情况。流域径流量与河道的总氮、总磷负荷关系密切。随着汛期降雨量以及降雨强度的增加(特别是强降雨过程),造成土壤侵蚀,氮磷等面源营养物质附着在泥沙中进入径流造成污染,最终导致汛期总氮和总磷的排放量明显增加,并出现全年最大值,总氮和总磷排放量分别占全年的50%和55%。此比例低于水库流域的相关研究结果<sup>[22-23]</sup>,这是由于八里湖流域除东部部分地区(靠近庐山)坡度略大( $>30^\circ$ )外,流域内主要农田以及农村乡镇主要分布于平坦地区,与水库等山区坡度大的地区相比,其水流冲刷效应较弱。

### 3.4 流域污染负荷的空间分布

非点源的污染物负荷有较强的空间差异性,与研究区的降雨量、土壤属性和植被利用类型等密切相关<sup>[12,24]</sup>。通过SWAT模型输出各子流域污染物负荷,对八里湖流域非点源污染的空间分布进行研究,可以识别出对非点源污染物比较敏感的区域。本研究结合土地利用类型在流域内的空间分布情况,对有机氮、有机磷负荷的空间分布进行对比分析。图6显示SWAT模型的面源污染输出结果,与总氮、总磷的总负荷分布情况不同,面源引起的有机氮和有机磷在城镇地区污染负荷相对较低,其污染负荷主要分布于城镇周围地区(子流域编号16,17,25和

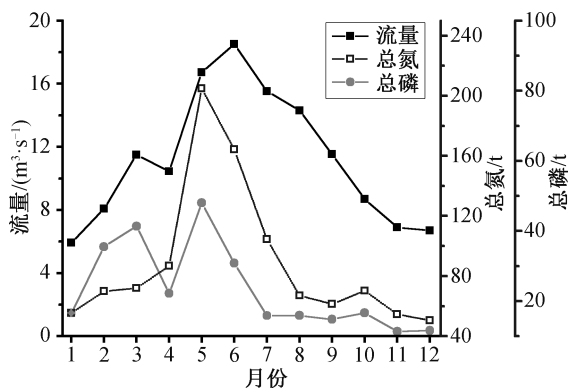


图 5 八里湖流域月均径流量与流域总氮、总磷负荷对比

Fig. 5 Comparison of monthly mean runoff and total nitrogen and total phosphorus load in Bali Lake basin



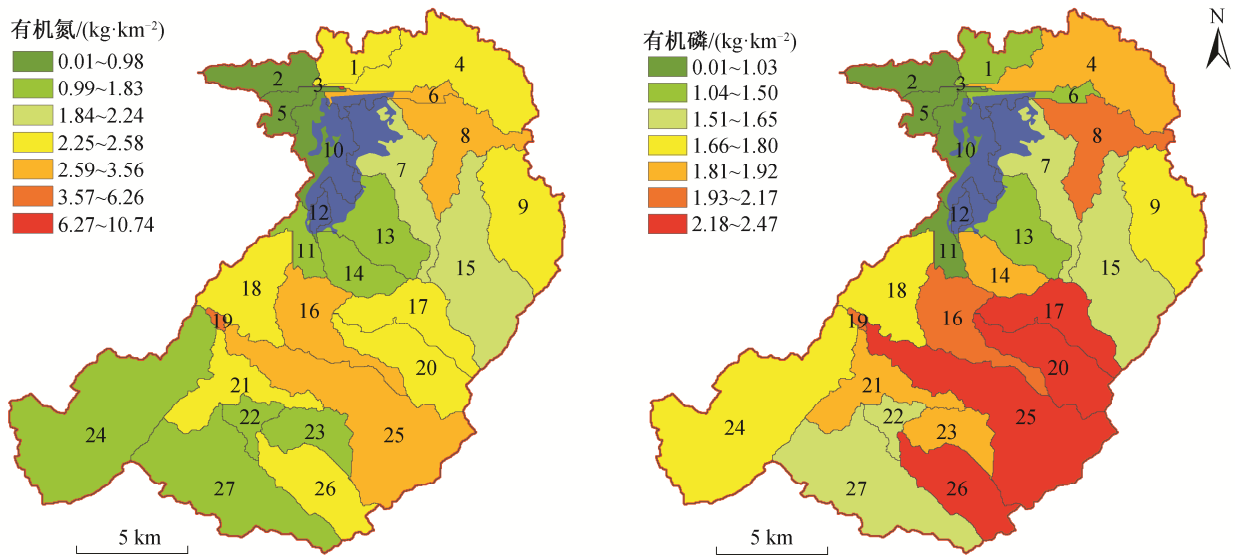


图 6 八里湖流域面源年均有有机氮和有机磷空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of annual organic nitrogen and organic phosphorus load in Bali Lake basin

26), 这些地区多是农田与家畜养殖的主要分布区域, 污染源主要来自农田施肥、水产养殖和畜禽的污染物排放。

#### 4 结论

本文通过 SWAT 模型对八里湖氮磷污染负荷的应用研究, 发现八里湖流域氮磷负荷的区域性特征和结构性特征比较明显。八里湖流域氮磷污染负荷主要贡献来源于城镇生活、农业施肥、养殖及农村生活等污染源, 污染负荷来源与流域的经济发展特点基本上吻合。氮磷负荷主要集中在每年的汛期(5—9月), 汛期总氮和总磷排放量分别占全年的50%和53%, 是流域氮磷营养物质的集中排放期。氮磷负荷主要分布在流域的庐山区、浔阳区及九江县的城区, 均为城镇地区。在流域其他区域(尤其是林地地区), 总磷和总氮的污染负荷较少。

为了有效地改善八里湖流域水环境质量, 须重点加强流域城镇生活源的控制, 加强流域内城镇生活污水管网建设, 提高城镇集中生活污水处理厂的运行效率。此外, 应在汛期加强对初期雨水的收集处理及城市污水管网和污水处理厂的管理, 并提高汛期农业面源的污染防治力度, 减少汛期农村生活源和农业面源对流域水环境的影响。

本研究对八里湖流域氮磷污染负荷的解析可为该流域水环境保护规划的制定和实施提供精确的治污方向, 是当前流域水质目标精细化管理实施的重

要环节之一, 对于其他典型城市湖泊氮磷污染负荷解析和水污染防治对策的制定也可有很好的借鉴作用。

本研究的不足之处主要是流域污染负荷的解析结果未能与行政区相结合, 在实际应用中需进行二次处理匹配, 这是因为 SWAT 模型的结果主要由基于水文单元的响应得出, 与行政区范围不是一一对应的关系。在未来的研究中还需建立污染负荷与水质断面的直接响应关系, 确定其对水质的直接贡献。

#### 参考文献

- [1] 王刚, 潘涛, 齐珺, 等. 北京市主要水污染物排放特征及水质改善对策. 中国环境监测, 2016, 32(2): 81-88
- [2] 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策. 环境科学, 2018, 39(10): 77-88
- [3] 彭亚辉, 周科平, 蒋俊伟. 湘江流域长株潭段水污染负荷时空分布规律及成因. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 108-116
- [4] Zhang Baolei, Cui Bohao, Zhang Shumin, et al. Source apportionment of nitrogen and phosphorus from non-point source pollution in Nansi Lake Basin, China. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(19): 101-113
- [5] Mehdi B, Ludwig R, Lehner B. Simulated future

- changes of extreme nutrient loads in a mesoscale agricultural watershed in Bavaria. *Bodenkultur*, 2016, 67(2): 77–90
- [6] Tasdighi A, Arabi M, Osmond D L. The relationship between land use and vulnerability to nitrogen and phosphorus pollution in an urban watershed. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(1): 113–122
- [7] 陈丹, 张冰, 曾逸凡, 等. 基于 SWAT 模型的青山湖流域氮污染时空分布特征研究. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 1216–1222
- [8] 匡舒雅, 李天宏, 赵志杰. 基于 L-THIA 模型的四川省濛溪河流域非点源污染负荷分析. *环境科学研究*, 2018, 31(4): 688–696
- [9] 邱瑀, 卢诚, 徐泽, 等. 湟水河流域水质时空变化特征及其污染源解析. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 2829–2837
- [10] Bai Hui, Chen Yan, Wang Dong, et al. Developing an EFDC and numerical source-apportionment model for nitrogen and phosphorus contribution analysis in a lake basin. *Water*, 2018, 10(10): 1315–1331
- [11] 罗嗣德. 九江统计年鉴. 九江: 九江市统计局, 2014
- [12] Arnold J G, Williams J R. Validation of SWRRB — simulator for water resources in rural basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1987, 113(2): 243–256
- [13] Williams J R, Nicks A D, Arnold J G. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, 111(6): 970–986
- [14] Godwin D C, Jones C A, Ritchie J T, et al. The water and nitrogen components of the CERES models // *Proceedings of the International Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer*. Patancheru, 1984: 101–106
- [15] Reddy K R, Khaleel R, Overcash M R, et al. A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes: II. Ammonia volatilization. *Transactions of the ASAE*, 1979, 22(6): 1398–1405
- [16] Jones C A, Cole C V, Sharpley A N, et al. A simplified soil and plant phosphorus model: I. documentation. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(4): 800–805
- [17] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法. *地理科学进展*, 2002, 21(5): 430–439
- [18] Fischer G F, Nachtergaele S, Prieler H T, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008). Laxenburg: IIASA, 2008
- [19] 联合国粮农组织. 世界土壤资源报告: FAO-UNESCO 世界土壤图图例(修订版). 罗马: FAO, 1996: 60
- [20] 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类. 北京: 科学出版社, 1992
- [21] 李硕. GIS 和遥感辅助下流域模拟的空间离散化与参数化研究与应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2002
- [22] 刘博, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 52–61
- [23] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区香溪河非点源氮磷负荷模拟. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 267–275
- [24] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79–86