

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220117001

文章编号: 1672-9331(2023)02-0082-10

引用格式: 盛丰, 张彬, 盛鑫斌, 等. 铁山水库流域非点源污染负荷研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 82-91.

Citation: SHENG Feng, ZHANG Bin, SHENG Xinbin, et al. Non-point source pollution load in Tieshan Reservoir Basin[J]. J. Changsha Univ. Sci. Tech. (Nat. Sci.), 2023, 20(2): 82-91.

# 铁山水库流域非点源污染负荷研究

盛丰<sup>1,2</sup>, 张彬<sup>1,3</sup>, 盛鑫斌<sup>1,3</sup>, 蔡锦文<sup>1,2</sup>, 胡国华<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】研究铁山水库流域非点源污染负荷的空间分布规律及影响因素, 为铁山水库流域水质保护与非点源污染控制提供参考。【方法】建立了铁山水库流域的水土评价模型(soil and water assessment tool, SWAT), 并运用该模型研究了流域总氮和总磷非点源污染排放强度与贡献率的空间分布特征及3种不同土地利用情景下非点源污染的变化情况。【结果】SWAT模型在模拟铁山水库流域水流和污染物运移过程方面精度良好。铁山水库流域非点源氮素主要来源于库区农田耕作过程中施加的化肥, 而流域非点源磷素则主要来源于库区分散农村人口排放的生活污水及库区农田耕作过程中施加的化肥。流域非点源总氮和总磷污染负荷量在1995—2015年间分别下降了49.26%和86.66%。【结论】在流域内进行退耕还林及人口集中与外迁安置对流域非点源污染控制具有积极作用。

**关键词:** 非点源污染; SWAT模型; 土地利用; 污染负荷; 铁山水库

中图分类号: X52

文献标志码: A

## 0 引言

非点源污染是指溶解性或非溶解性的污染物从非特定的地域, 在降水和径流的冲刷下, 通过径流过程汇入受纳水体而引起的污染<sup>[1]</sup>。在20世纪60年代, 大量的研究、调查结果表明, 单纯的点源污染控制无法从根本上改善水质, 这就促使学者们转向非点源污染的定量化研究, 并开始尝试利用数学模型和计算机软件来研究非点源污染问题<sup>[2]</sup>。其中, 水土评价(soil and water assessment tool, SWAT)模型, 因在模型参数、率定时间、所模拟流域的空间尺度、对管理措施和营养元素的模拟效果等方面具有综合优势, 逐渐成为应用最广泛的模型之一<sup>[3]</sup>。国外学者如BAUWE等<sup>[4]</sup>使用改进的SWAT模型预测了水中的溶解性活性磷的

浓度及其演变; DAKHLALLA等<sup>[5]</sup>使用SWAT模型评估模型参数对流量、泥沙和养分迁移的敏感性和不确定性; HALECKI等<sup>[6]</sup>发现由SWAT模型模拟得到的管理方案对有效减少农业面源污染具有重要意义。国内许多学者的研究表明, SWAT模型不仅适用于国外, 其在国内用来模拟非点源污染的效果也较好。冯麒宇等<sup>[7]</sup>基于SWAT模型对我国华南地区的泗合水小流域的污染进行控制模拟, 结果表明SWAT模型在该流域适用效果较好; 毕直磊等<sup>[8]</sup>在地处南水北调中线的水源地——丹江流域运用SWAT模型探究了不同土地利用配置及施肥和灌溉措施对流域非点源氮污染负荷的影响; 陈铁等<sup>[9]</sup>使用SWAT模型对我国深圳市观澜河流域的污染进行模拟, 并实现了对该流域内城市面源污染负荷量化与影响的效应解析; 王敏等<sup>[10]</sup>在我国安徽省的兆河流域构建SWAT模型, 模拟

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-03-18; 接受日期: 2022-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579020、51809020); 湖南省教育厅科学研究项目重点项目(17A009); 湖南省水利科技项目(XSKJ[2016]194-41、XSKJ[2019]081-43)

通信作者: 盛丰(1981—)(ORCID: 0000-0002-1142-9262), 男, 教授, 主要从事水资源管理与水土环境保护方面的研究。E-mail: fsaint8586@163.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

研究了该流域的非点源污染分布特征,并对污染关键区进行识别;杜娟等<sup>[11]</sup>基于SWAT模型对我国西北的渭河流域的污染进行控制效果模拟,取得了较好的结果。虽然国内对于SWAT模型的应用研究比较多,但是对饮用水水源地非点源污染的研究仍相对较少。铁山水库作为湖南省重要的饮用水水源地,到目前为止鲜有学者对其开展过非点源污染研究,这导致铁山水库水源保护工作的开展受到了一定的阻碍。本研究根据收集的Landsat TM 遥感影像、流域数字高程模型(digital elevation model, DEM)、土地利用及水文气象等数据和实测的流域水质资料,构建铁山水库流域的SWAT模型,并运用该模型对铁山水库流域非点源污染的排放强度和污染负荷贡献率的空间分布特征进行模拟分析,同时对3种不同土地利用情景下的流域非点源污染负荷量的变化情况进行研究,以为铁山水库饮用水水源地水环境保护工作提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

铁山水库流域位于东洞庭湖水系新墙河南支流上游,大坝坝址(东经113°31'14.87",北纬29°10'3.78")位于湖南省岳阳县公田镇,下距岳阳县及京广铁路40 km,控制流域面积493 km<sup>2</sup>,涉及岳阳县毛田、公田、月田3个乡镇,总人口11.8万。铁山水库流域地处亚洲东南季风区,气候温和,雨量充沛,库区多年平均降水量达1 471.6 mm,降水在年内和年际间分配不均。库区年内降水多集中在3—8月,占全年降水量的74.7%;最大年降水量达2 314.4 mm(1995年),而最小年降水量仅有969.3 mm(2007年)。流域内大部分地区的自然土壤以花岗岩红壤为主,耕作土壤以麻砂泥田、麻砂土为主。

铁山水库库区的生活污染源主要是流域内居住人口所产生的生活污水及垃圾。现阶段铁山水库库区内各住户基本都安装了四格净化池,但由于缺乏管理,加上居民的环保意识薄弱,大部分净化池已经无法正常工作,生活污水大部分被直接排入河道。流域内的耕地面积为451.2 ha,主要的农作物有水稻、棉花、豆、薯类等,主要使用的农药

为敌敌畏和乙酰甲胺磷等,主要使用的化肥有尿素、复合肥等。目前,库区各镇的农药用量不大,因而化肥的施用是造成水体营养化的主要因素,大量的氮和磷通过地表径流进入库区,对水库水质产生了不利影响。

### 1.2 土地利用及水文气象数据

本研究从地理空间数据云服务平台下载1995、2005和2015年的Landsat TM 遥感影像,然后用ENVI软件的监督分类工具对其进行解译,获得土地利用数据。本研究采用一级分类系统将土地利用类型分为6类:耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用地,然后从1995、2005和2015年土地利用分类图的属性信息中分别提取出这3个时期的一级分类土地利用类型信息(表1)。流域DEM数据来源于地理空间数据云平台,为分辨率30 m×30 m的全球数字高程模型(ASTER GDEM)数据。根据流域DEM数据和土地利用数据,得到铁山水库各子流域及水质监测点的分布和2015年各子流域的土地利用情况,结果分别见图1和表2。

表1 铁山水库流域土地利用数据

年份	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
1995	5.40	64.95	13.75	9.16	6.64	0.10
2005	2.75	82.49	3.70	8.20	2.77	0.09
2015	0.91	84.47	3.46	10.34	0.78	0.04

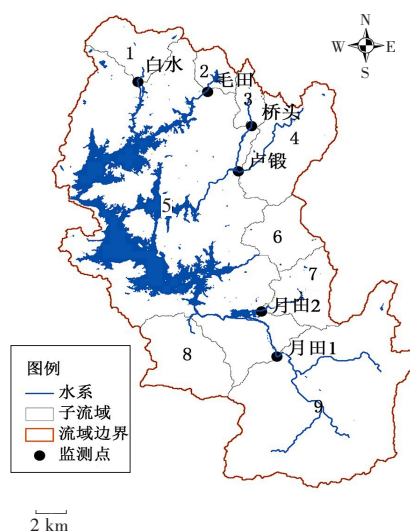


图1 铁山水库子流域及水质监测点分布图

Fig. 1 Distribution map of sub-basins and water quality monitoring points of the Tieshan Reservoir

表2 2015年铁山水库流域及其子流域的土地利用数据

Table 2 Land use data in each sub-basin of the Tieshan Reservoir Basin in 2015

编号	流域	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%	各土地利用类型的面积占比/%					
				耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
1	孟城河	17.26	3.50	0.41	87.94	9.92	0.38	1.33	0.02
2	毛田河	7.49	1.52	1.98	89.50	2.54	4.85	1.13	0.00
3	珠港河	7.91	1.60	3.36	91.30	2.82	0.41	2.01	0.10
4	小港河	37.14	7.53	1.06	96.14	1.46	0.29	1.03	0.02
5	坝址控制	245.90	49.88	0.99	74.22	3.59	20.32	0.86	0.02
6	吴家段河	17.28	3.51	0.36	95.22	3.92	0.23	0.27	0.00
7	蒋家湾河	18.88	3.83	1.80	92.43	2.51	1.18	1.98	0.10
8	双江	20.02	4.06	0.00	99.16	0.84	0.00	0.00	0.00
9	沙港河	121.12	24.57	0.72	95.04	3.53	0.10	0.52	0.09
10	铁山水库流域	493.00	100.00	0.91	84.47	3.46	10.34	0.78	0.04

土壤数据来源于联合国粮农组织(FAO)创立的世界土壤数据库(HWSD),用提取出的铁山水库坝址以上流域边界剪切出铁山水库流域的土壤类型图。水文数据来源于铁山水库坝址的水文监测站,包括逐日水位、流速、流量等数据。气象数据为湖南省气象局提供的岳阳站逐日平均气象数据。雨量数据为流域内月田、毛田和板江3个雨量站的实测逐日雨量。

### 1.3 污染源及水质监测数据

#### 1.3.1 生活污染源

根据2017年当地调查的产污系数<sup>[12]</sup>,COD<sub>Cr</sub>为16.4 g/(人·d),氨氮为4 g/(人·d),总磷为0.44 g/(人·d),总氮为5 g/(人·d)。根据当地人口调查结果,位于2号子流域的毛田集镇约有人口0.54万,位于4号子流域的相思集镇约有人口0.30万,位于7号子流域的月田集镇约有人口0.68万,其余为分散居住的农村人口。对铁山水库生活污水排放情况进行调查发现,集镇产生的生活污水大多未经处理就被直接排入河道,考虑到集镇人口集中,可以将整个集镇视为一个集中排污点。故集镇人口排放的生活污水按点源污染处理,流域内分散的农村人口产生的生活污水按非点源污染进

行处理。各子流域内集镇人口和农村分散人口产生的污染负荷量分别按式(1)~(2)计算:

$$W_{i,j,t} = 3.65P_{i,t}w_j \quad (1)$$

$$W_{i,j,c} = 3.65P_{i,c}w_j = 3.65\frac{P_T - P_t}{B_T - B_t}B_{i,c}w_j \quad (2)$$

式中: $W_{i,j,t}$ 和 $W_{i,j,c}$ 分别为第*i*号子流域内集镇人口和农村分散人口产生的第*j*种污染物的污染负荷量,t/a; $P_{i,t}$ 和 $P_{i,c}$ 分别为第*i*号子流域内集镇人口和农村分散人口的数量,万人; $w_j$ 为第*j*种污染物的产污系数,g/(人·d); $P_T$ 和 $P_t$ 分别为铁山水库流域内的人口总数和集镇人口总数,万人; $B_T$ 和 $B_t$ 分别为铁山水库流域内的总建筑用地面积和集镇建筑用地面积,km<sup>2</sup>;  $B_{i,c}$ 为第*i*号子流域内农村分散人口的建筑用地面积,km<sup>2</sup>。

#### 1.3.2 农业污染源

农业污染为典型的非点源污染。通过查阅当地年鉴和实地调查得知,该流域种植的农作物以水稻为主,且大部分为双季稻,施肥以复合肥(N、P、K元素的质量比例为26:13:15)和尿素为主,施肥主要采用基肥加追肥的模式。具体的农业管理数据<sup>[12]</sup>见表3。

表3 铁山水库流域农业管理措施

Table 3 Agricultural management measures in Tieshan Reservoir Basin

农业管理措施	早稻			晚稻		
	时间	肥料	用量/(kg·ha <sup>-1</sup> )	时间	肥料	用量/(kg·ha <sup>-1</sup> )
耙田	4月14日			7月12日		
基肥	4月15日	复合肥	425	7月13日	复合肥	425
移栽	4月16日			7月14日		
追肥	4月28日	尿素	130	7月28日	尿素	130
收割	7月10日			10月22日		



### 1.3.3 水文与水质监测

氮和磷是湖泊水库富营养化的控制性因素,也是影响库区水体水质的主要因素。因此,本研究主要对铁山水库流域内的总氮(total nitrogen, TN)和总磷(total phosphorus, TP)进行分析和研究。根据流域内的水文监测资料,铁山水库流域丰水期为每年的5—8月,平水期为每年的3—4月和9—10月,枯水期为每年的11月—次年2月。汛期暴雨是流域内农业非点源污染形成的主要原因,因此,选择在2017年5—12月监测流域内水环境中的总氮和总磷浓度。

监测断面的位置如图1所示(其中,5、6、8号子流域由于受水库壅水影响,无法监测)。在各监测断面处均有小桥,在桥梁中间通过吊桶采集水样。将采集到的水样转移至两个容积均为500 mL的广口玻璃瓶中保存,并贴好记载了采样断面、采样时间等的标签。在采样完成后,用便携式电波流速仪和手持式超声波水深探测仪测量监测断面的流速和水深,并在此基础上根据断面河宽计算监测断面的流量。

将每次采集到的各断面的水样及时送到实验室进行检测分析。其中,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法进行测定,TP采用钼酸铵分光光度法进行测定。

### 1.4 研究内容与方法

采用决定系数( $R^2$ )和Nash-Sutcliffe效率系数( $E_{ns}$ )<sup>[13]</sup>判断所建立的铁山水库流域面源污染SWAT模型的模拟精度;采用SWAT-CUP自动校准工具率定径流参数;根据实际土壤的情况,参照相邻流域的部分参数,手动赋值对污染物的参数进行率定。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流参数率定与验证

#### 2.1.1 径流参数本土化

首先,通过SWAT-CUP工具分析铁山水库流域面源污染SWAT模型各参数的敏感性,在所有参数中筛选出对径流结果影响较明显的9个参数;然后,用SUFI-2算法对敏感性参数进行赋值并迭代计算,得到符合流域情况的最佳参数(表4)。

表4 铁山水库流域径流敏感参数

Table 4 Runoff sensitivity parameters of Tieshan Reservoir Basin

名称	取值范围	最佳参数值
初始SCS径流曲线数	-0.2~0.2	0.055
基流 $\alpha$ 因子/d	0~1	0.968
地下水时间延迟/d	0~500	49.95
浅层含水层水位阈值/mm	0~5 000	0.275
地下水再蒸发系数	0.02~0.20	0.108
土壤蒸发补偿因子	0~1	0.909
主河道曼宁系数	0.0~0.3	0.178
基流对河岸进行调蓄的 $\alpha$ 因子	0~1	0.153
降雪气温/°C	-5~5	-0.675

注:SCS指美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service)。

#### 2.1.2 径流参数率定与验证

选取1996—2001年作为模型的率定期,2002—2007年作为验证期,通过对模型进行率定、验证,并经过多次调参后获得最佳参数值。铁山水库流域率定期(1996—2001年)和验证期(2002—2007年)月尺度地表径流量的模拟结果与实测结果的对比如图2所示。从图2可以看出,模型率定期和验证期模拟结果的 $R^2$ 和 $E_{ns}$ 均大于0.85,表明模型模拟的径流过程与实测的径流过程吻合较好,尤其是峰值部分。

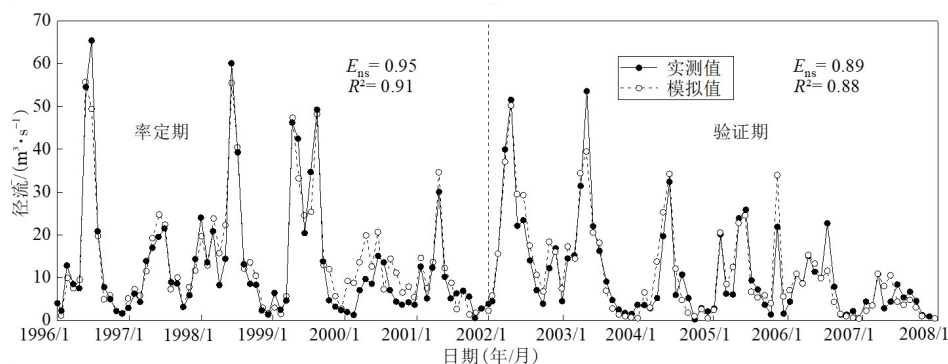


图2 模型率定期与验证期月径流实测值和模拟值对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated monthly runoff values between model calibration period and verification period

## 2.2 营养物参数率定与验证

### 2.2.1 营养物参数率定

用 ArcSWAT 软件自带的敏感性分析工具分析总氮和总磷的参数敏感性,并从所有参数中选取对总氮和总磷敏感性较高的 8 个参数。根据实际土壤情况,参照相邻流域的部分参数,不断手动赋值进行参数调整,进而得到比较理想的参数组合。最终确定的各参数的数值见表 5。

表5 铁山水库流域营养物敏感参数

Table 5 Nutrient sensitivity parameters in Tieshan Reservoir Basin

名称	取值范围	最终取值
氮渗透系数	0~1	0.5
磷渗透系数	0~1	0.3
土壤磷分配系数	100~200	150
土壤 $\text{NO}_3^-$ 的起始浓度/( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	0~100	1.3
土壤有机氮的起始浓度/( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	0~100	0.5
土壤有机磷的起始浓度/( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	0~100	1
生物混合效率	0~1	0.15
深层蓄水渗透系数	0~1	0.05

### 2.2.2 营养物参数验证

将率定的营养物参数代入模型,运行 SWAT 模型计算得到各子流域出口断面 2017 年 5—12 月各月 TN 和 TP 的模拟结果,其与实测结果的对比

如图 3~4 所示。从图 3~4 可以看出,各断面 TN 和 TP 模拟结果的  $R^2$  均大于 0.750,  $E_{ns}$  均大于 0.65, 均达到了模型的精度要求。

### 2.3 非点源污染排放强度空间分布

采用 2015 年的土地利用数据,由 1985—2017 年的逐日实测气象资料和降水资料,模拟出 1985—2017 年铁山水库流域的非点源污染月平均数据,计算出各子流域多年平均非点源污染排放强度,并通过 ArcGIS 软件处理得到铁山水库流域各子流域非点源污染排放强度,结果见表 6。

表6 各子流域非点源 TN 与 TP 污染负荷强度

Table 6 Intensity of non-point source TN and TP pollution load in each sub-basin  $\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$

子流域	TN	TP	子流域	TN	TP
孟城河	10.01	0.26	吴家段河	10.59	0.30
毛田河	13.56	1.08	蒋家湾河	12.89	2.06
珠港河	18.75	2.52	双江	10.15	0.17
小港河	11.44	0.22	沙港河	10.77	0.16
坝址控制	8.70	1.03			

分析表 6 可知:①铁山水库流域非点源 TN 排放强度最大的是珠港河子流域,其次是毛田河子流域和蒋家湾河子流域。地类统计分析结果(表 2)显示,珠港河、毛田河和蒋家湾河子流域的耕地面积占比分别为 3.36%、1.98% 和 1.80%,在 9 个子

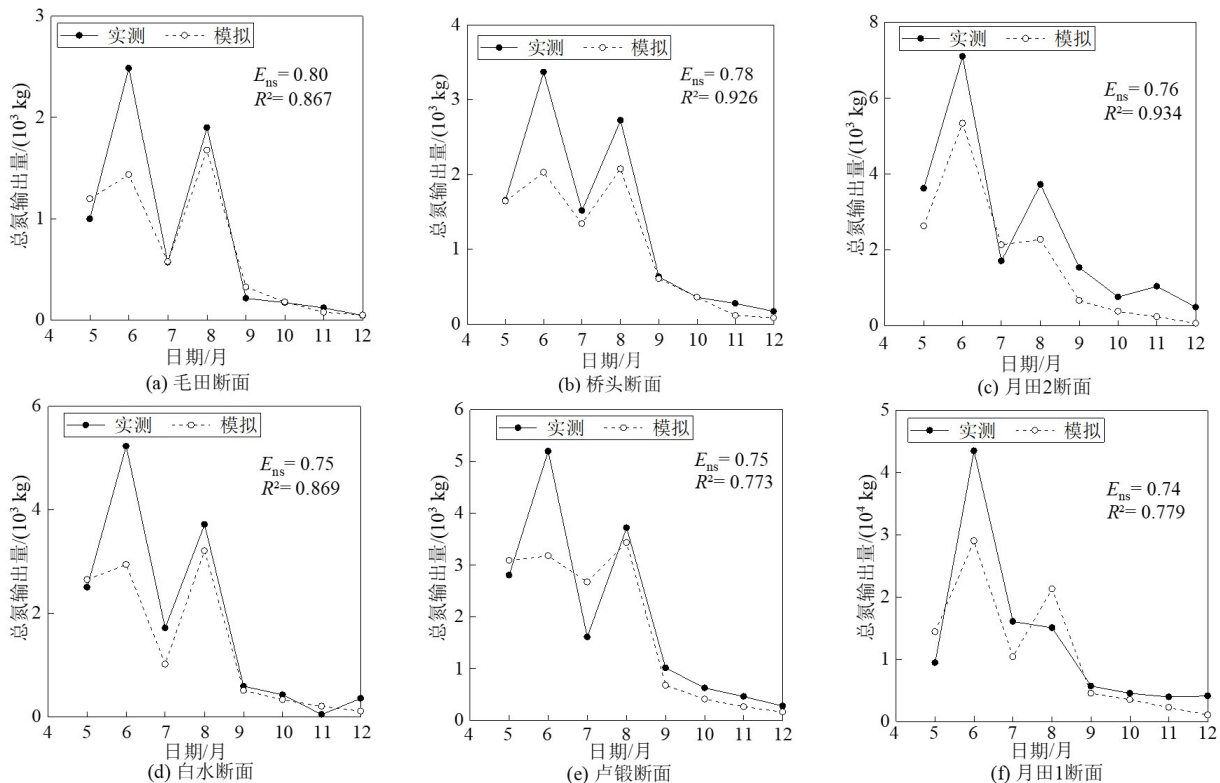


图3 2017年各监测断面总氮模拟与实测结果对比

Fig. 3 Comparison of total nitrogen simulation results with measured results of each monitoring section in 2017

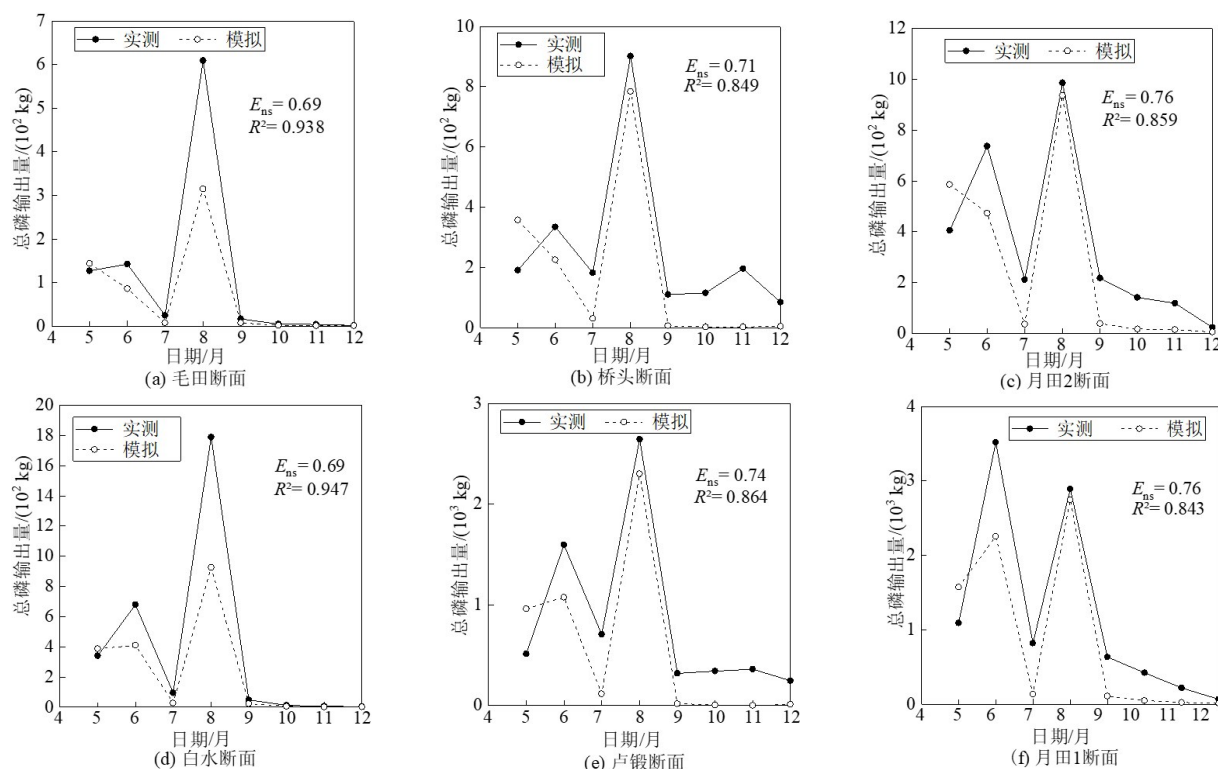


图4 2017年各监测断面总磷模拟与实测结果对比

Fig. 4 Comparison of total phosphorus simulation results with measured results of each monitoring section in 2017

流域中排前3位,分别为流域非点源TN排放强度排在第4位的小港河子流域耕地面积占比(1.06%)的3.17、1.87和1.70倍,表明库区农田耕作过程中施加的化肥是流域非点源TN的主要来源。②非点源TP排放强度最大的是珠港河子流域,其次是蒋家湾河、毛田河和坝址控制子流域,这4个子流域的TP污染负荷强度明显高于其余5个子流域。③根据流域地类统计分析结果(表2),珠港河、蒋家湾河和毛田河子流域的建筑用地面积占比分别为2.01%、1.98%和1.13%,在9个子流域中分别排第1、2和4位,表明库区人口(对应于子流域内的建筑用地面积)排放的生活污水是流域非点源TP的主要来源。④毛田河子流域的建筑用地面积占比比孟城河子流域的小,但毛田河子流域的耕地面积占比比孟城河子流域的大得多。由于流域农业种植施加的基肥(复合肥)中磷素含量较高,因此,毛田河子流域的非点源TP的排放强度明显比孟城河子流域的大。⑤坝址控制子流域的建筑用地面积占比和耕地面积占比均比小港河子流域的小,但坝址控制子流域的非点源TP的排放强度明显比小港河子流域的大。这主要是因为在小港河子流域内有相思集镇,其建筑用地面积包括了集镇面积(农村分散人口对应分散

建筑用地面积),在扣除该集镇的用地面积后,小港河子流域的分散农村建筑用地面积占比明显比坝址控制子流域的小,由此一来,坝址控制子流域的非点源TP的排放强度就更大。以上分析结果表明,库区内分散农村人口排放的生活污水是流域非点源TP的主要来源,但在农田耕作过程中施加的化肥也对流域非点源TP有较大的影响。

#### 2.4 非点源污染负荷贡献率的空间分布

根据铁山水库流域各子流域多年平均非点源污染负荷量和铁山水库流域污染总负荷量,求得各子流域非点源污染贡献率(上述两者的比值),结果见表7。

表7 各子流域非点源TN与TP污染贡献率

Table 7 Contribution rate of non-point source TN and TP pollution in each sub-basin %

子流域	TN	TP	子流域	TN	TP
孟城河	3.18	1.09	吴家段河	3.30	1.48
毛田河	1.87	2.19	蒋家湾河	4.43	9.73
珠港河	2.65	4.75	双江	5.26	1.21
小港河	8.38	2.13	沙港河	24.41	5.13
坝址控制	46.52	72.29			

分析表7可知:①对铁山水库流域非点源TN污染的贡献率,最大的是坝址控制子流域,其次是



沙港河子流域。这主要是因为坝址控制子流域为库区所有子流域中面积最大的(占流域总面积的49.88%),且整个铁山水库流域内的大部分耕地都在这一子流域内。而沙港河子流域为铁山水库流域内的第二大子流域(占流域总面积的24.57%),且该子流域内的耕地面积仅次于坝址控制子流域内的,因而对整个流域的TN污染贡献率也很大。

②对铁山水库流域非点源TP污染的贡献率,最大的依然是坝址控制子流域,其次是蒋家湾河子流域。这主要是因为坝址控制子流域为所有子流域中面积最大的,且库区周边分布的人口较多,故对整个流域非点源TP污染的贡献率也最大。而蒋家湾河子流域虽然面积不是第二大的,但是该子流域的流域面积及流域内的建筑用地面积和耕地面积都较大,因而对整个流域非点源TP污染的贡献率也很大。

③对于面积第二大的沙港河子流域,其流域内人口较少,故对整个流域非点源TP污染的贡献率相对较小;对于珠港河子流域,虽然其流域面积远比沙港河子流域的小,但其流域内人口和耕地均较多(该子流域的建筑用地面积占比和耕地面积占比均为各子流域中最大的),故其对整个流域非点源TP污染的贡献率也较大,与沙港河子流域非点源TP污染的贡献率接近。

## 2.5 不同土地利用情景下非点源污染负荷量

本研究设置了3种土地利用情景:1995年为L1,2005年为L2,2015年为L3。采用1985—2017年的逐日实测气象资料和降水资料,模拟上述3种土地利用情景下1985—2017年铁山水库流域月平均非点源污染负荷量,并在此基础上计算不同土地利用情景下流域多年平均非点源污染负荷量,结果见表8。

表8 不同土地利用情景下流域多年平均非点源污染负荷量模拟结果

Table 8 Simulation results of multi-year average non-point source pollution loads in the basin under different land use scenarios t/a

土地利用情景	TN	TP
L1	961.15	274.02
L2	711.27	144.24
L3	487.70	36.56

将不同土地利用情景下的流域多年平均非点源TN和TP污染负荷量模拟结果(表8)与不同土

地利用情景下的流域土地利用数据(表1)进行相关性分析,结果见表9。

表9 流域多年平均非点源污染负荷量模拟结果与土地利用数据的相关性分析结果

Table 9 Results of correlation analysis between multi-year average non-point source pollution loads from simulation and watershed land use

污染物	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
TN	0.997**	-0.921	0.891	-0.524	0.989*	0.921
TP	0.999**	-0.930	0.901	-0.505	0.992*	0.913

注:\*表示在 $P=0.05$ 显著性水平下存在显著的相关关系;\*\*表示在 $P=0.10$ 显著性水平下存在显著的相关关系。

分析表8可知,按照流域多年平均非点源TN和TP污染负荷量,将3种土地利用情景从大到小排列,均为L1、L2、L3,表明从1995—2015年铁山水库流域的非点源污染负荷量在逐步下降,与1995年相比,2015年TN下降了49.26%,TP下降了86.66%。

分析表9可知,流域多年平均非点源TN和TP污染负荷量仅与流域耕地、建筑用地面积存在显著的相关关系,而与其他地类之间不存在显著的相关关系。其中,非点源TN和TP污染负荷量与流域耕地面积在 $P=0.05$ 的显著性水平下存在显著的相关关系,与流域建筑用地面积在 $P=0.10$ 的显著性水平下存在显著的相关关系。这主要是因为,1995—2015年铁山水库流域内的耕地面积减少了4.49%,建筑用地面积减少了5.86%,而库区农田耕作过程中施加的化肥是流域非点源氮素的主要来源,分散农村人口排放的生活污水及库区农田耕作过程中施加的化肥是流域非点源磷素的主要来源。特别是近年来库区大力推行的库区人口集中安置和外迁安置政策对库区TP污染的控制起到了极其重要的作用。

## 3 讨论

### 3.1 农业化肥施用对流域非点源污染的影响

在农业生产中施用化肥是提高农作物产量的重要方式,有资料显示粮食产量的40%~60%是由肥料贡献的。我国粮食总产量在1980—2014年提高了90%,与此同时,氮肥的投入量也增加了1.8倍。在 market 需求的驱动下,我国化肥工业发展迅

速,氮肥产量于1999年升至世界第一,磷肥产量于2005年升至世界第一,2018年化肥总产量达到了6 065万t<sup>[14]</sup>。我国粮食种植面积较大,且受农民种植习惯的影响,我国农业生产中化肥施用量较大,但利用率较低,多余的氮磷养分随降水和农田地表径流流失并进入水体,由此引起的农业非点源污染问题极其普遍。研究表明,我国氮肥的利用率仅为30%~50%,磷肥的利用率更是只有10%~20%,比发达国家低15%~20%<sup>[15]</sup>。长期大量和过量施用化肥,不仅浪费资源,还会造成土壤养分失调、结构破坏等问题<sup>[16]</sup>,严重威胁流域的水质健康。

### 3.2 流域非点源污染的防治途径

国家要完善环境方面的法律法规,地方职能部门要依据法律法规制定科学、合理的污染防治规划和实施方案,明确各部门职责,投入更多资金,加大环保执法队伍建设,并落实监督。政府近些年提出的退耕还林、农业人口外迁和集镇化、低影响开发<sup>[17-18]</sup>等政策,客观上减少了流域内的耕地数量和农业分散人口,这对控制流域非点源污染起到了积极的作用。

流域非点源污染涉及化肥污染、农药污染等多种污染类型,相对落后的生产技术和观念导致非点源污染物总量居高不下。针对这种情况,政府应结合当地生产实际,大力引进和推广先进的生产材料与生产技术(如推广使用杀虫灯、有机肥等),鼓励农户采用新技术从事农业生产,引导农民调整农、林产业结构,促使农业非点源污染物总量下降。同时,向农户宣传更科学的施肥方法,针对不同作物列出施肥种类与数量,提倡使用有机肥,控制化肥、农药的使用量,以减少不合理施肥导致的氮磷流失,从而控制住施肥环节造成的非点源污染。

## 4 结论

1) 根据流域的DEM、土地利用、土壤植被、水文气象、水质监测等数据建立了铁山水库流域SWAT模型,用实测径流与水质数据对模型参数进行了率定和验证,结果表明:所建立的流域SWAT模型具有较高的模拟、预测精度,满足模型应用要求。

2) 运用所建立的铁山水库流域SWAT模型对

流域非点源污染的排放强度及贡献率的空间分布进行了研究,结果表明:库区农田耕作过程中施加的化肥是流域非点源氮素的主要来源,而流域非点源磷素则主要来源于库区分散农村人口排放的生活污水及库区农田耕作过程中施加的化肥。

3) 运用所建立的铁山水库流域SWAT模型对设置的3种土地利用情景下的TN和TP非点源污染负荷量进行模拟分析,结果表明:流域TN和TP非点源污染负荷量从1995—2015年分别下降了49.26%和86.66%,说明对流域进行适当的退耕还林及人口集中与外迁安置对流域非点源污染控制具有积极作用。

### [参考文献]

- [1] 郝改瑞,李家科,李怀恩,等.流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展[J].水力发电学报,2018,37(12):54-64.DOI:10.11660/slfdb.20181206.  
HAO Gairui, LI Jiake, LI Huaien, et al. Advances in research of watershed non-point source pollution models and uncertainty analysis methods [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(12): 54-64. DOI: 10.11660/slfdb.20181206.
- [2] 夏军,翟晓燕,张永勇.水环境非点源污染模型研究进展[J].地理科学进展,2012,31(7):941-952.DOI:10.11820/dlkxjz.2012.07.013.  
XIA Jun, ZHAI Xiaoyan, ZHANG Yongyong. Progress in the research of water environmental nonpoint source pollution models [J]. Progress in Geography, 2012, 31(7): 941-952. DOI: 10.11820/dlkxjz.2012.07.013.
- [3] HESSION W C, SHANHOLTZ V O. A geographic information system for targeting nonpoint source agricultural pollution [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 43(3): 264-266. DOI: 10.2307/3899185.
- [4] BAUWE A, ECKHARDT K U, LENNARTZ B. Predicting dissolved reactive phosphorus in tile-drained catchments using a modified SWAT model [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, 19(2): 198-209. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2019.03.003.
- [5] DAKHLALLA A O, PARAJULI P B. Assessing model parameters sensitivity and uncertainty of stream flow, sediment, and nutrient transport using SWAT [J]. Information Processing in Agriculture, 2019, 6(1): 61-72. DOI: 10.1016/j.inpa.2018.08.007.
- [6] HALECKI W, KRUK E, RYCZEK M. Loss of topsoil and soil erosion by water in agricultural areas: a multi-criteria approach for various land use scenarios in the



- Western Carpathians using a SWAT model [J]. Land Use Policy, 2018, 73: 363-372. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.01.041.
- [7] 冯麒宇,胡海英,刘俊达.有限资料条件下基于SWAT模型的泗合水流域非点源污染模拟[J].水土保持研究, 2021, 28(5): 128-133. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.016.
- FENG Qiyu, HU Haiying, LIU Junda. Simulation of non-point pollution in Siheshui basin by use of SWAT model and limited data [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 128-133. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.016.
- [8] 毕直磊,张妍,张鑫,等.土地利用和农业管理对丹江流域非点源氮污染的影响[J].水土保持学报, 2020, 34(3): 135-141. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2020.03.021.
- BI Zhilei, ZHANG Yan, ZHANG Xin, et al. The impact of land use and agricultural management on non-point source nitrogen pollution in Dan River watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 135-141. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2020.03.021.
- [9] 陈铁,孙飞云,杨淑芳,等.基于SWAT模型的观澜河流域城市面源污染负荷量化及影响效应评估[J].环境工程学报, 2020, 14(10): 2866-2875. DOI: 10.12030/j.cjee.201911108.
- CHEN Tie, SUN Feiyun, YANG Shufang, et al. Load quantification and effect evaluation of urban non-point source pollution in the Guanlan River Basin based on SWAT model [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2866-2875. DOI: 10.12030/j.cjee.201911108.
- [10] 王敏,张雨桐,李奇宸,等.安徽省兆河流域非点源污染模拟及最佳管理措施[J].水土保持通报, 2021, 41(5): 127-136, 153. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210809.003.
- WANG Min, ZHANG Yutong, LI Qichen, et al. Simulation and optimal management of non-point source pollution in Zhaohe small watershed in Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 127-136, 153. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210809.003.
- [11] 杜娟,李怀恩,赵湘璧,等.基于SWAT模型的渭河流域污染控制效果模拟[J].生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 563-569. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.04.008.
- DU Juan, LI Huaien, ZHAO Xiangbi, et al. Simulation of pollution control effect in the Weihe River Valley with swat model [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(4): 563-569. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.04.008.
- [12] 肖少怀,王琪,谢娜,等.岳阳市铁山水库饮用水源地现状调查及安全保障达标建设对策研究[C]//加强城市水系综合治理共同维护河湖生态健康:2016第四届中国水生态大会论文集.北京:北京沃特咨询有限公司, 2016: 488-495.
- XIAO Shaohuai, WANG Qi, XIE Na, et al. Present situation investigations and safeguarding measures for the Tieshan Reservoir drinking water sources in Yueyang [C]//Strengthening the Comprehensive Management of Urban Water System and Jointly Maintaining the Ecological Health of Rivers and Lakes: Proceedings of the Fourth China Water Ecology Conference 2016. Beijing: Beijing Water Consulting Co., Ltd., 2016: 488-495.
- [13] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models, part I: a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [14] 周竹叶.我国化肥工业概况与发展趋势[J].磷肥与复肥, 2019, 34(10): 1-4. DOI: CNKI: SUN: LFYF.0.2019-10-002.
- ZHOU Zhuye. General situation and development trend of chemical fertilizer industry in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(10): 1-4. DOI: CNKI: SUN: LFYF.0.2019-10-002.
- [15] 赵同科,张强.农业非点源污染现状、成因及防治对策[C]//全国农业面源污染与综合防治学术研讨会论文集.北京:中国农学会, 2004: 19-22, 100.
- ZHAO Tongke, ZHANG Qiang. Status, cause and control strategies of agricultural non-point source pollution [C]//Proceedings of the First National Symposium on Agricultural Non-point Source Pollution and Comprehensive Control. Beijing: China Association of Agricultural Science Societies, 2004: 19-22, 100.
- [16] 盛丰,文鼎,欧阳琦,等.微生物生长繁殖条件下土壤污染物的输移降解模型[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 83-91. DOI: CNKI: SUN: HNQG.0.2020-01-013.
- SHENG Feng, WEN Ding, OUYANG Qi, et al. Modeling the migration and degradation of soil contaminants by considering microbe propagation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(1): 83-91. DOI: CNKI: SUN: HNQG.0.2020-01-013.
- [17] 李盛,秦苗,刘萌,等.岳阳市某海绵城市道路系统降雨径流分析与评价[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 9-16. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.02.002.
- LI Sheng, QIN Miao, LIU Meng, et al. Analysis and evaluation of rainfall runoff of a sponge city road system in Yueyang City [J]. Journal of Changsha University of

Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(2): 9-16. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbk.2021.02.002.  
[18] 彭世良,余德清,张永忠,等.洞庭湖区生态修复现状及应对策略[J].国土资源导刊,2022,19(2):1-6.

PENG Shiliang, YU Deqing, ZHANG Yongzhong, et al. Current situation and countermeasures of ecological restoration in Dongting Lake Area [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(2): 1-6.

## Non-point source pollution load in Tieshan Reservoir Basin

SHENG Feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Bin<sup>1,3</sup>, SHENG Xinbin<sup>1,3</sup>, CAI Jinwen<sup>1,2</sup>, HU Guohua<sup>1,2</sup>

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] This study investigated the spatial distribution characteristics and impact factors of non-point source pollution of Tieshan Reservoir Basin, so as to provide reference for water quality protection and non-point source pollution control for this basin. [Methods] A soil and water assessment tool (SWAT) model of the Tieshan Reservoir Basin was established to analyze the spatial distribution characteristics of the emission intensity and contribution ratio of non-point source pollution of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). Besides, the non-point source pollution under three different land use scenarios was also studied. [Findings] The established SWAT is of good precision in simulating the water flow and pollutant transport processes in Tieshan Reservoir Basin. The non-point source pollution of TN is mainly from the applied fertilizers, while the non-point source pollution of TP is mainly from the rural domestic sewage and the applied fertilizers. The non-point source pollution of TN and TP in Tieshan Reservoir Basin decreased by 49.26% and 86.66%, respectively, from 1995 to 2015. [Conclusions] For the Tieshan Reservoir Basin, the “grain for green” program and the population centralized resettlement and relocation have positive impacts in decreasing non-point source pollution of TN and TP.

**Key words:** non-point source pollution; SWAT model; land use; pollution load; Tieshan Reservoir

**Manuscript received:** 2022-01-17; **revised:** 2022-03-18; **accepted:** 2022-03-27

**Foundation item:** Projects (51579020, 51809020) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (17A009) supported by Key Program of the Scientific Research Foundation of Education Department of Hunan Province; Projects (XSKJ[2016]194-41, XSKJ[2019]081-43) supported by Water Conservancy Technology Program of Hunan Province

**Corresponding author:** SHENG Feng (1981—) (ORCID: 0000-0002-1142-9262), male, professor, research interest: water resources management and soil and water environment protection. E-mail: fsaint8586@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:黄志勇)