

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 04. 002

# 北江飞来峡库区典型流域非点源污染特征分析及模拟

黄国如<sup>1,2,3</sup>, 陈晓丽<sup>1</sup>, 任秀文<sup>4</sup>

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640; 4. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510530)

**摘要:**为分析飞来峡库区典型流域非点源污染状况, 开展社岗流域场次降雨径流水量水质监测试验, 采用平均浓度法估算非点源污染负荷量, 分析各场次降雨径流污染物特征并计算非点源污染贡献率, 应用 SWAT 模型进行径流及非点源污染模拟。结果表明, 径流量对 SS、BOD<sub>5</sub> 等浓度和负荷量均有较强的主导作用, TN、NH<sub>3</sub>-N 等初期冲刷效应较为明显, 污染物负荷量与径流量的相关性好于污染物浓度与径流量的相关性, 各污染物的非点源污染贡献率均达到 80% 以上。SWAT 模型径流模拟的率定期和验证期效率系数分别为 0.85 和 0.73, 表明所构建的 SWAT 模型精度良好。在污染物率定期, 雨强较大的典型日污染物模拟效果最佳, 污染物相对误差基本在 10% 以内, 而在雨强较小时, TN、TP 等均出现较大程度的低估现象; 在污染物验证期, 由于该时期正处于春耕施肥期, TN、TP 模拟结果相对误差较大, 且均为低估。总体而言, SWAT 模型模拟精度良好, 基本能反映该流域非点源污染状况, 可为飞来峡库区流域的非点源污染模拟与控制提供参考。

**关键词:**非点源污染; SWAT 模型; 污染物负荷核算; 飞来峡水库

中图分类号: TV697.2; X501 文献标志码: A 文章编号: 1004 - 6933 (2019) 04 - 0009 - 08

**Characteristic analysis and simulation of non-point source pollution in typical watershed of Feilaixia Reservoir area**  
// HUANG Guoru<sup>1,2,3</sup>, CHEN Xiaoli<sup>1</sup>, REN Xiuwen<sup>4</sup> (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China; 4. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510530, China)

**Abstract:** In order to analyze the non-point source pollution of the typical watershed in the Feilaixia Reservoir area, an experiment of water quantity and quality monitoring in each rainfall events in Shegang watershed was conducted, and non-point source pollution load was estimated by mean concentration method, analyzing the pollutant characteristics of runoff from different rainfall events and calculating the contribution rate of non-point source pollution. Simulation of runoff and non-point source pollution was made by using SWAT model. The results show that: runoff plays a dominant role in the concentration and load of SS, BOD<sub>5</sub>, etc.; the initial scouring effect of TN and NH<sub>3</sub>-N is obvious; the correlation between pollutant load and runoff is better than that between pollutant concentration and runoff; the contribution rate of non-point source pollution of pollutants is more than 80%. The efficiency coefficients of SWAT model for runoff simulation in calibration and validation periods are 0.85 and 0.73, respectively, showing that the SWAT model has good accuracy. In the pollutants calibration period, typical daily pollutants with strong rain have the best simulation effect, with the relative error of pollutants within 10%. When the rain intensity is low, TN and TP are underestimated to a large extent. In the pollutants validation period, since it is in the spring ploughing and fertilizing period, the relative errors of TN and TP simulation results are large and underestimated. In general, SWAT model has good simulation accuracy, which can basically reflect the non-point source pollution situation in the basin, and can provide reference for non-point source pollution simulation and control in the Feilaixia Reservoir Basin.

**Key words:** non-point source pollution; SWAT model; pollutant load accounting; Feilaixia Reservoir

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2016-22); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202006-002); 广东省水资源节约与保护基金项目(201711031)

作者简介: 黄国如(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

近年来,随着点源污染逐步得到控制,非点源污染已成为各大流域主要污染源并引起专家学者的高度重视<sup>[1-2]</sup>。降雨径流是造成非点源污染最主要的自然原因。伴随着降雨淋融和径流冲刷,由土壤侵蚀产生的土壤流失事件时有发生,N、P等营养盐和溶解有机质等不断进入水体,导致各大流域非点源污染形势变得十分严峻。与点源污染相比,非点源污染具有随机、滞后、模糊及隐蔽等特性,使得非点源污染的估算与模拟研究难度极大<sup>[3]</sup>。目前,非点源污染负荷的估算方法主要分为两种:经验模型估算和机理模型模拟。经验模型以输出系数模型最为常用,是一个直接建立土地利用、土地覆盖与受纳水体非点源污染负荷量之间关系的模型<sup>[4-5]</sup>,能够避开繁杂的非点源污染迁移转化物理过程,对实测污染物数据要求较低,因此得到了广泛应用。张辰等<sup>[6-8]</sup>采用输出系数模型分别在云南省洱海流域、长春市新立城水库流域、四川省射洪县等区域进行了非点源污染负荷量估算,并深入评估了各研究区非点源污染情况。另外,蔡明等<sup>[9]</sup>提出了考虑降雨因素影响和污染物在迁移过程中损失的改进的输出系数模型,并在渭河流域进行了非点源污染估算,结果表明,改进后的输出系数模型机理更明确、模拟更准确,因此得到了广泛应用<sup>[10]</sup>。自20世纪80年代以来,非点源污染模拟模型已广受重视,表现较为出色的非点源污染模型主要有美国国家环保局的HSPF模型和SWMM模型、美国农业部的AGNPS模型和SWAT模型等,其中SWAT模型是一个具有很强物理机制、可进行连续长时段模拟的分布式流域尺度水文模型<sup>[11-12]</sup>。国内外学者利用SWAT模型在非点源污染方面做了广泛且深入的研究,使得SWAT模型在全世界范围内得以推广应用。张晓晗等<sup>[13]</sup>采用SWAT模型在黑河水库上游流域进行非点源污染模拟与分析,结果表明,该流域非点源污染主要发生在汛期6—10月;刘吉开等<sup>[14]</sup>利用SWAT模型探讨气候条件变化对渭河流域陕西段非点源污染负荷影响,发现未来气温升高、降雨增多,河道径流量增加,TN、TP负荷增多,非点源污染问题越来越突出;赖格英等<sup>[15]</sup>通过修正的SWAT模型对岩溶地区江西省横港河流域的非点源污染进行模拟研究,定量评估落水洞、伏流、暗河等岩溶特征对氮、磷等主要非点源污染物质输移的影响及其带来的时空效应。

为深入研究飞来峡库区的非点源污染情况,笔者选取典型小流域进行场次降雨径流水量水质同步监测实验,对监测结果进行规律及特征分析,建立小流域SWAT非点源污染模型,以模拟研究小流域非点源污染情况,并率定、验证径流及水质参数,旨在

为相关部门开展社岗流域非点源污染防治及水资源保护提供科学依据,也为飞来峡库区流域非点源污染模拟提供参数借鉴。

## 1 研究区概况

飞来峡库区地处我国南方湿润地区,年均降雨量1853 mm,雨量充沛,属亚热带季风气候。其控制面积为2450 km<sup>2</sup>,横跨广东省清远市英德市以及清城区两个县级区,含飞来峡镇、黎溪镇、连江口镇、大站镇、英红区、英城镇、望埠镇、石灰铺镇、西牛镇以及水边镇在内的10个镇级行政区划,流域内人口约为29.5万人。据广东省水利科学研究院编制的《广东省飞来峡水利枢纽库区污染源普查报告》,飞来峡库区流域内的污染物70%以上由非点源污染贡献,且库区内生活用水逐年增加,生活用水的散排、农业化肥的不当施用,导致非点源污染占比呈逐年增大的态势。为研究飞来峡库区流域的非点源污染情况,选择典型小流域社岗排洪渠流域(简称社岗流域)为研究对象。社岗流域位于飞来峡水利枢纽坝前左岸,流域面积为37.61 km<sup>2</sup>(图1),控制范围内有社岗、横石、升平等村,人口密度为400人/km<sup>2</sup>,社岗排洪渠片区水质状况不容乐观。

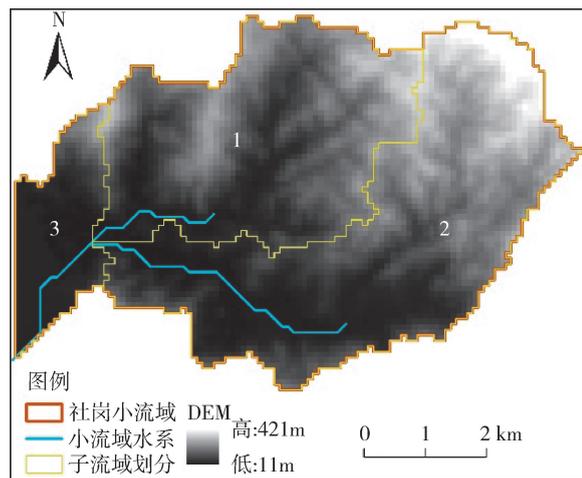


图1 飞来峡社岗排洪渠流域DEM

## 2 研究资料与方法

### 2.1 降雨径流量水质监测

在社岗流域出口断面处设置流量监测点,安装多普勒超声波明渠流量计,并于2017年8月至2018年6月进行流域场次降雨过程的同步监测,监测内容包括降雨量、径流量、各场次降雨的水样采集(采样频率为1h)等。经污染物检测,可得2017年后汛期5场及2018年前汛期6场降雨的污染物浓度数据。所采集水样大多为淡黄色,轻微气味,表面有大量悬浮物。2017年场次降雨时间分别为20170824、

20170827、20170828、20170904 和 20170907, 2018 年场次降雨时间分别为 20180414、20180415、20180424、20180507、20180509 和 20180606, 所检测污染物包括 SS、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、TP、TN 和 NH<sub>3</sub>-N 共 6 种。另外, 进行非点源污染模拟时必须扣除河道的点源排放污染, 且由于降雨径流是非点源污染的主要原因, 因此假设非汛期无雨日河道污染物排放均为点源污染, 进行 2017 年 10 月下旬至 2018 年 3 月上旬的无雨日水样采集(采样频率为每月 2 次), 得到 10 个无雨日点源排放的污染物浓度样品。采用 SWAT Bflow Program 程序对 2017 年 10 月至 2018 年 3 月径流进行基流分割, 得到各月份常规水质样品当日基流量, 再采用基流量加权平均算法得到枯季各污染物平均浓度, 最后控制常规点源污染日负荷量不变, 得到汛期基流的点源污染浓度。

## 2.2 皮尔逊相关系数法

皮尔逊相关系数法 (Pearson correlation coefficient) 也称皮尔逊积矩相关系数法, 用来反映两个变量线性相关程度的统计量, 一般用  $r$  表示, 计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中:  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  分别为变量  $X_i$ 、 $Y_i$  系列的平均值;  $r$  的取值范围为  $-1 \sim 1$ , 越接近 1 或  $-1$ , 相关性越强, 越接近于 0, 相关性越弱。通常情况下, 当  $0.8 \leq |r| \leq 1$  时, 认为两变量极强相关; 当  $0.6 \leq |r| \leq 0.8$  时, 认为两变量强相关; 当  $0.4 \leq |r| < 0.6$  时, 认为两变量中等程度相关; 当  $0.2 \leq |r| < 0.4$  时, 认为两变量弱相关;  $0.0 \leq |r| < 0.2$  时, 认为两变量极弱相关或不相关。

## 2.3 平均浓度法

平均浓度法又称水文分割法, 利用它能够简便而有效地根据有限的水质监测资料来估算非点源污染负荷量。采用平均浓度法估算社岗流域 2017 年非点源污染平均浓度及负荷情况, 然后将场次降雨污染物平均浓度近似作为典型日非点源污染物浓度, 计算典型日非点源污染负荷, 作为 SWAT 模型参数率定及验证依据。

利用平均浓度法计算场次降雨径流过程非点源污染平均质量浓度  $\rho$  的计算公式为

$$\rho = \frac{W_L}{W_A} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Ti}\rho_{Ti} - Q_{Bi}\rho_{Bi})\Delta t_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{Ti} - Q_{Bi})\Delta t_i} \quad (2)$$

其中  $\Delta t_i = (t_{i+1} - t_{i-1})/2$

式中:  $W_L$  为该次暴雨携带的污染物负荷量, g;  $W_A$  为该次暴雨产生的径流量, m<sup>3</sup>;  $Q_{Ti}$  为  $t_i$  时刻的实测流量, m<sup>3</sup>/s;  $\rho_{Ti}$  为  $t_i$  时刻的实测污染物质量浓度, mg/L;  $Q_{Bi}$  为  $t_i$  时刻的枯季流量, m<sup>3</sup>/s (即非本次暴雨形成的流量, 也称基流流量);  $\rho_{Bi}$  为  $t_i$  时刻的基流浓度 (枯季浓度), mg/L;  $n$  为该次暴雨径流过程中流量与水质浓度的同步监测次数。

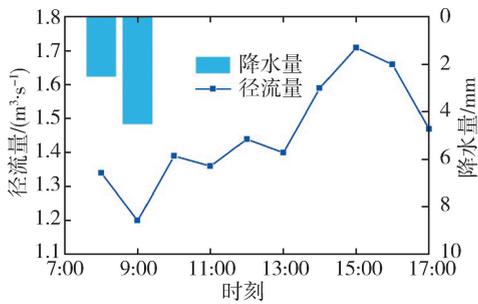
## 2.4 SWAT 分布式水文模型

SWAT 模型是基于 GIS 的分布式流域水文模型, 可以利用遥感和地理信息系统提供的空间信息模拟多种不同的水文物理化学过程, 如水量、水质以及污染物输移转化过程等。SWAT 模型所需数据主要包括流域 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据、雨量数据、流域气象站点数据和流域水文站点数据等。DEM 数据来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云的 SRTMDemUTM 的数字高程数据, 流域内高程值介于 11 ~ 421 m 之间。土地利用数据来自中国科学院计算机网络信息中心全球变化参量数据库, 分为耕地、草地、林地以及水域 4 类, 所占比例分别为 13.68%、22.44%、60.13% 和 3.75%。土壤数据采用世界粮农组织 (FAO) 和国际应用系统分析学会 (HASA) 共同开发的全球土壤数据库 (HWSD)。按照土壤理化性质, 将土壤类型空间数据分为 5 类, 分别为粉质壤土 30.17%、砂土 2.61%、黏土 6.25%、壤土 3.40% 以及砂质黏壤土 57.57%。雨量数据来自广东省飞来峡水利枢纽管理处的飞坝上雨量站点。气象数据选用临近的佛冈气象站的逐日温度、湿度、风速和太阳辐射数据等, 数据来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)。

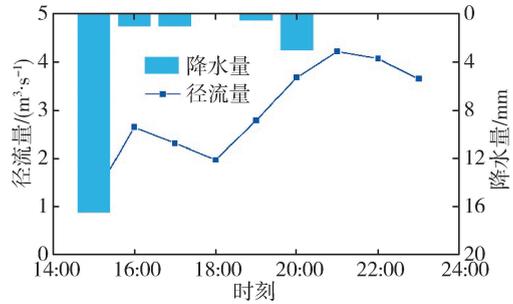
## 3 结果分析

### 3.1 污染物质量浓度、负荷量与径流量变化特征

选取 2017 年和 2018 年各一个典型场次降雨事件来分析降雨径流过程的污染物输出特征, 两个场次降雨分别为 20170824 和 20180507。20170824 场次降雨流域出口径流过程如图 2(a) 所示。由图 2(a) 可知, 20170824 场次降雨事件的降雨从 08:00 开始, 09:00 降水量达到最大值并结束降雨, 相应的流域出口径流量在 15:00 左右达到峰值 (1.71 m<sup>3</sup>/s)。20180507 场次降雨流域出口径流过程如图 2(b) 所示。由图 2(b) 可知, 20180507 场次降雨事件的降雨从 15:00 开始, 降水量为 16.5 mm, 达到本场降雨的最大值, 降雨持续至 20:00, 流域出口径流量在 21:00 左右达到峰值 (4.22 m<sup>3</sup>/s)。



(a) 20170824



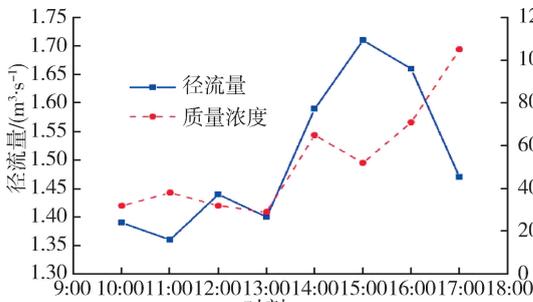
(b) 20180507

图2 20170824、20180507 场次降雨流域出口径流过程

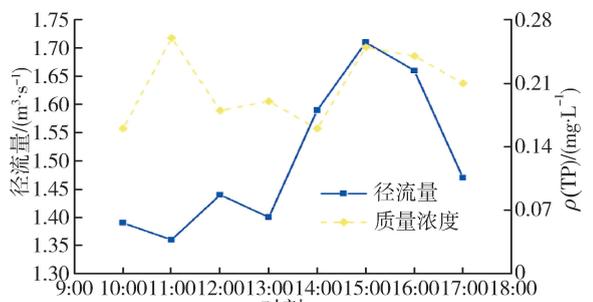
20170824 场次降雨的径流-污染物浓度变化过程见图3。由图3可知,SS 和  $BOD_5$  这两种污染物与径流量变化趋势基本一致,说明径流量对这两种污染物输出起主导作用。另外, TN、 $NH_3-N$  和 TP 这三种污染物具有明显的初期冲刷效应,其浓度最大值均出现在降雨发生后 1h。究其原因,前期久旱无雨,地表污染物积累量大,径流对污染物的侵蚀和冲刷使污染物浓度升高并迅速达到峰值,特别是流域中下游地区,耕地比例较大,氮、磷等可溶性强的污

染物容易累积,径流冲刷更易带走大量可溶性污染物。后续随着径流量增大,稀释作用又占据了主导地位,使得污染物浓度逐渐降低。 $COD_{Mn}$  与径流量的变化关系较为一致,存在一定的初期冲刷效应。上述研究所得结论与冯麒宇等<sup>[16]</sup>、代丹等<sup>[17]</sup> 分别在潭江泗合水流域、北京市清河流域的研究结论较为一致。

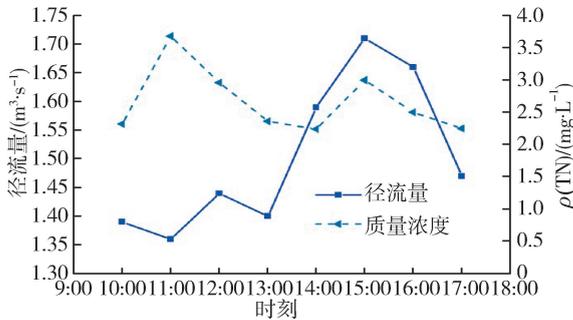
20180507 场次降雨的径流-污染物浓度变化过程如图4所示。由图4可知,除去 TN、 $NH_3-N$  这两



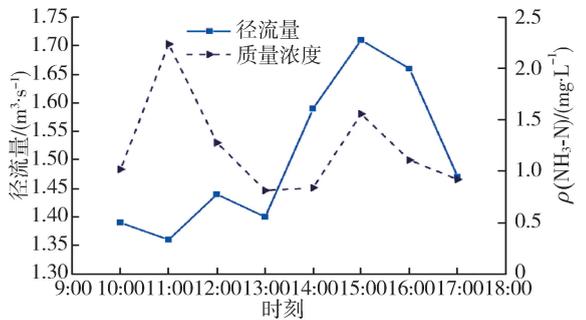
(a) SS



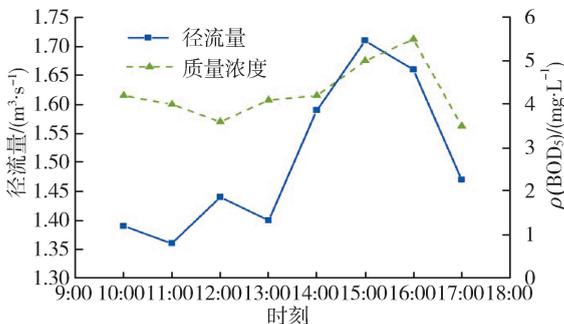
(b) TP



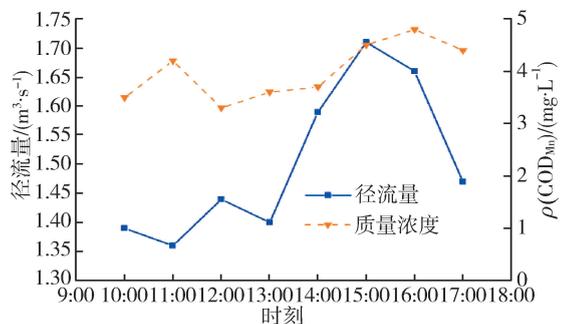
(c) TN



(d)  $NH_3-N$



(e)  $BOD_5$



(f)  $COD_{Mn}$

图3 20170824 场次降雨的径流-污染物质量浓度变化过程

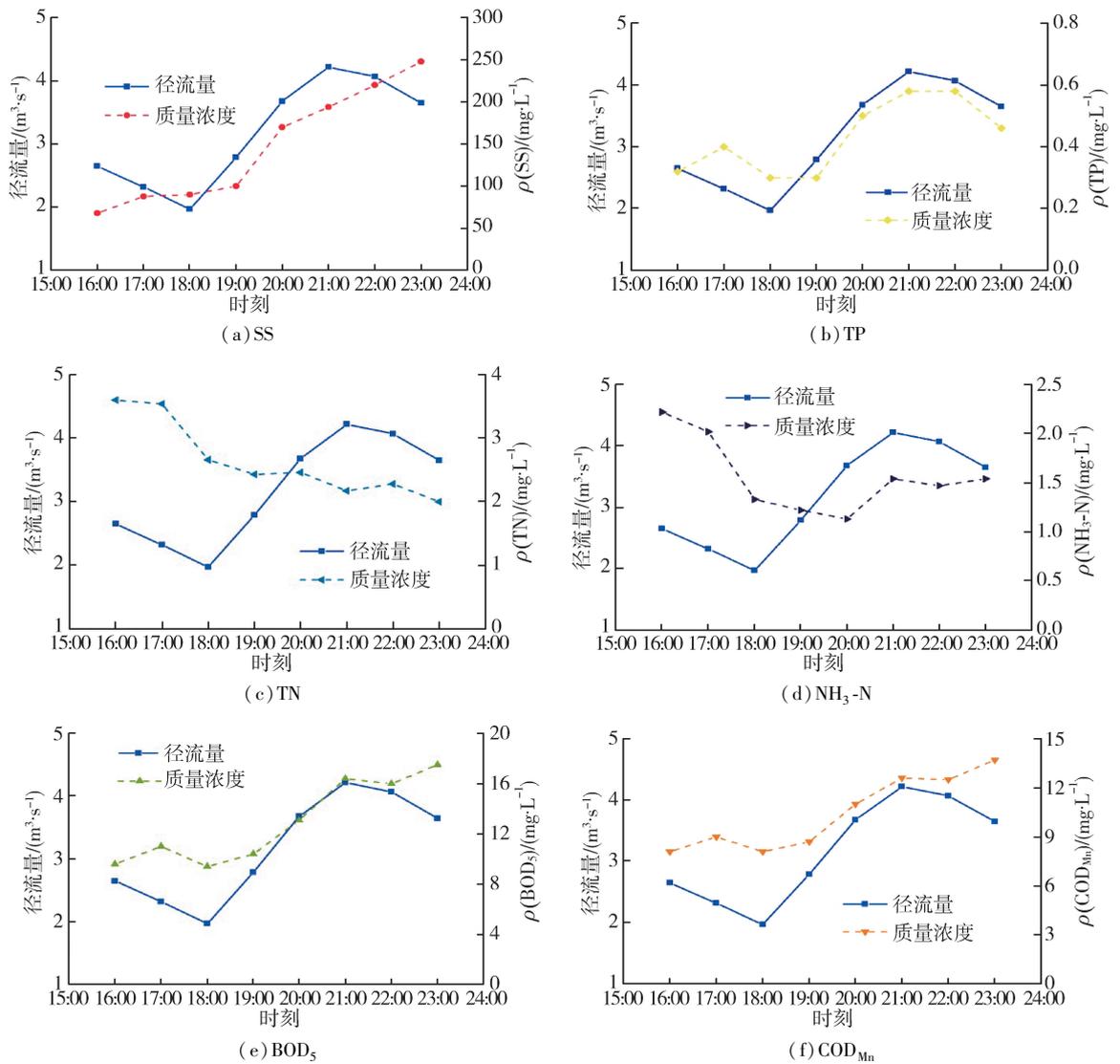


图4 20180507 场次降雨的径流-污染物质量浓度变化过程

类初期冲刷效应非常明显的污染物外,其余污染物与径流量的变化关系均非常一致,说明径流量呈强主导作用。TN、NH<sub>3</sub>-N 等最大浓度值均出现在最大降水量的后 1 h。随着径流量逐渐增大,稀释作用显现,浓度值开始下降,使得 TN、NH<sub>3</sub>-N 与径流量呈现负相关关系。春季正是流域内农耕施肥时节,氮肥施用 in 浅层地表,汛期到来,降雨淋融,使得氮肥的施用效果大打折扣的同时,也产生了非常严重的非点源污染,值得关注。

### 3.2 污染物质量浓度、负荷量与径流量相关性

现采用皮尔逊相关分析法对 2017 年 5 个场次以及 2018 年 6 个场次的降雨进行污染物质量浓度及其负荷量与径流量的相关性分析,结果见表 1。

由表 1 可知,对于 2017 年场次降雨而言,在径流量与污染物质量浓度关系方面,污染物 SS 与径流量均呈现不同程度的正相关,20170828 场次两者达到了强相关,说明径流量对污染物的冲刷起着重要作用。另外,BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、TP 等也与径流量大多正

相关,但 TN 和 NH<sub>3</sub>-N 则和径流量负相关。前述已提及,由于 TN 和 NH<sub>3</sub>-N 等氮污染物均易溶于水,且前期地表污染物累积量大,径流对污染物的侵蚀和冲刷作用使其质量浓度升高并迅速达到峰值,随着径流量增大其稀释作用又占据主导地位,污染物质量浓度逐渐降低,导致出现 TN 和 NH<sub>3</sub>-N 等污染物与径流量负相关。在径流量与污染物负荷量关系方面,所有场次的 COD<sub>Mn</sub> 与径流量均呈极强的正相关,且除了 20170828 场次外,其余场次均通过了 0.01 水平上的双侧检验。SS、BOD<sub>5</sub>、TP、TN 等污染物的负荷量也基本上与径流量正相关。个别污染物与径流量的相关系数可高达 0.9 以上,如 20170827 场次的 BOD<sub>5</sub>,相关系数达到 0.907;20170904 场次,TP 相关系数达到 0.980。总体上,污染物负荷量与径流量的相关性要强于污染物质量浓度与径流量的相关性,说明径流量对污染物负荷量的变化起着更为重要的主导作用。

对于 2018 年场次降雨而言,在径流量与污染物

表1 污染物质量浓度和其负荷量与径流量的相关系数

变量	场次	SS	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Mn</sub>	TP	TN	NH <sub>3</sub> -N
径流量与 质量浓度	20170824	0.418	0.746 *	0.597	0.297	-0.154	-0.124
	20170827	0.631	0.557	0.517	-0.316	-0.460	-0.426
	20170828	0.670	0.611	0.617	0.640	-0.185	-0.307
	20170904	0.366	0.094	0.661 **	0.500	-0.844 **	-0.833 **
	20170907	0.288	-0.070	-0.125	0.291	-0.292	0.310
	20180414	-0.028	-0.101	0.246	-0.152	0.053	0.005
	20180415	-0.293	-0.931 **	-0.344	-0.806 *	-0.708 *	-0.719 *
	20180424	-0.303	-0.467	-0.336	0.312	-0.221	-0.631
	20180507	0.864 **	0.887 **	0.889 **	0.905 **	-0.678	-0.249
	20180509	-0.078	0.561	0.547	-0.422	-0.750 *	-0.533
20180606	0.878 **	0.307	0.387	-0.692	-0.397	-0.173	
径流量与 负荷量	20170824	0.553	0.889 **	0.848 **	0.646	0.337	0.142
	20170827	0.841 **	0.907 **	0.905 **	0.677	0.398	-0.123
	20170828	0.725 *	0.738 *	0.787 *	0.781 *	0.219	0.183
	20170904	0.605 *	0.707 **	0.946 **	0.980 **	0.235	-0.095
	20170907	0.534	0.809 **	0.845 **	0.830 **	0.234	0.895 **
	20180414	0.996 **	0.999 **	0.999 **	0.994 **	0.995 **	0.982 **
	20180415	0.163	-0.555	0.787 *	0.644	0.477	-0.119
	20180424	-0.101	-0.275	0.387	0.968 **	0.823 **	0.718 *
	20180507	0.933 **	0.964 **	0.972 **	0.968 **	0.600	0.689
	20180509	0.703	0.966 **	0.967 **	0.770 *	0.902 **	0.524
20180606	0.964 **	0.979 **	0.980 **	0.795 *	0.063	0.066	

注: \*\*表示在0.01水平上(双侧)显著相关,\*表示在0.05水平上(双侧)显著相关。

浓度关系方面,除了20180507场次的SS、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、TP等污染物与径流量的相关系数均达到0.85以上外,其余场次污染物大多与径流量呈负相关,这是因为非汛期时,前期地表污染物有了极大的累积量,在进入4—6月初汛期时,由于暴雨冲刷,使得污染物迅速进入河道中,与2017年8—9月的后汛期相比,具有更为明显的初期冲刷效应。在径流量与污染物负荷量关系方面,大多场次污染物与径流量均呈极强的相关性,相关系数均达到0.8以上,尤其是作为2018年入汛标志的20180414场次,各污染物与径流量的相关系数均高达0.98以上,且均通过了0.01水平的双侧检验。另外,从纵向看,COD<sub>Mn</sub>、TP、TN这3种污染物各场次的负荷量与径流量均呈现较好的相关性,大部分相关系数可达0.75以上,且通过了0.05水平的双侧检验。

### 3.3 小流域非点源污染贡献率

根据非汛期点源污染物浓度和负荷,对共11个场次降雨的实测污染物浓度和负荷进行分解,分解成非点源污染和点源污染两部分,分别进行贡献率计算,再对11个场次降雨的非点源污染贡献率进行分位数计算,结果见表2。

从表2可以看出,各污染物的非点源污染贡献率均值均达到80%以上,与整个库区内非点源污染占比70%以上的结论相吻合,再次证明社岗流域的典型性和代表性。其中悬浮物SS的贡献率均值达到95.3%,说明社岗流域内降雨径流携带了大量泥沙,有严重的水土流失倾向。

### 3.4 SWAT模型模拟结果分析

选取2017年为参数率定期,2018年为模型验证期,并根据SWAT模型的应用经验<sup>[18-19]</sup>以及社岗流域的基本情况,选取14个参数进行径流模拟,详细的参数信息参见参考文献[20]。选用纳什系数、相对误差和决定系数 $R^2$ 这3个指标作为模型径流模拟适用性评价标准。率定期和验证期的径流过程见图5。参数率定及验证结果为:率定期实测日径流均值为 $0.971 \text{ m}^3/\text{s}$ ,模拟值为 $0.920 \text{ m}^3/\text{s}$ ,相对误差为-5.28%,纳什系数值高达0.85, $R^2$ 为0.86,模型模拟精度较高。验证期实测径流量为 $0.622 \text{ m}^3/\text{s}$ ,模拟值为 $0.533 \text{ m}^3/\text{s}$ ,相对误差为-14.28%,纳什系数值为0.73, $R^2$ 为0.75,验证结果总体令人满意,表明所构建的SWAT模型具有良好精度,可以为未来社岗流域非点源污染负荷核算提供可靠的径

表2 11个场次降雨的非点源污染贡献率分位数

污染指标	最小值	第一四分位数	中位数	第三四分位数	最大值	平均值
SS	87.6	94.0	96.6	97.3	99.1	95.3
BOD <sub>5</sub>	65.9	79.0	89.0	90.1	96.5	84.2
COD <sub>Mn</sub>	79.0	84.1	88.9	92.0	96.7	88.0
TP	66.5	73.2	84.6	86.0	94.3	80.2
TN	55.1	78.5	82.1	86.4	94.1	80.4
NH <sub>3</sub> -N	61.2	77.2	83.0	88.0	95.5	81.9

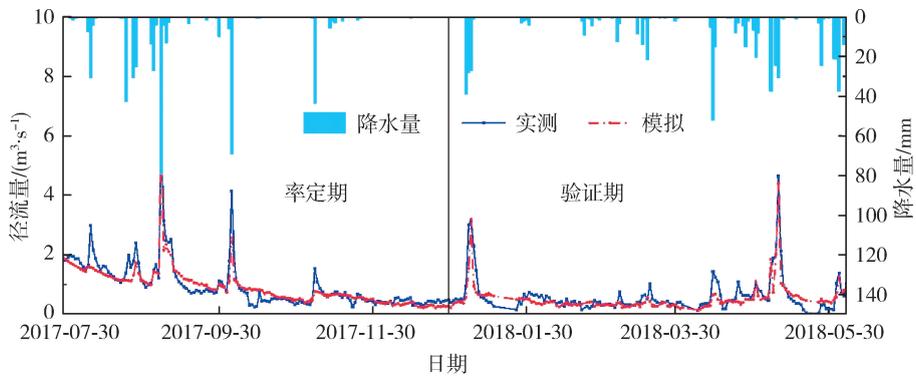


图5 率定期和验证期日径流模拟结果

流数据。

由于实测非点源污染数据有限,本研究主要利用2017年及2018年典型日非点源污染数据,以SS、TN、TP等水质指标为例进行水质参数率定和验证,所得到的水质参数和部分场次模拟结果分别见表3和表4。需要指出的是,表4给出了7场次暴雨水质模拟结果,由于其余4场次降雨强度过小,SWAT模型无法模拟其非点源污染状况,未列出其结果。

由表4可以看出,率定期3个典型日中雨强最大的20170907场次(日雨量79 mm)的模拟效果最佳,SS相对误差低至0.61%,TN相对误差为10.38%,TP相对误差为1.53%。20170828典型日(日雨量25 mm)模拟效果次之,SS、TN、TP相对误差分别为17.63%、-36.02%及-12.65%,20170904典型日(日雨量27 mm)模拟结果相对较差。另外,

可以看出雨强较大的典型日模拟效果较好,而在雨强较低时TN、TP等均出现较大程度的低估现象,说明SWAT模型更适用于高雨量、高雨强的情景。验证期除了20180414典型日外,其余3个典型日的SS相对误差基本在50%以内,且均是高估现象。而对于TN、TP来说,验证期所有场次的模拟值均低于实测值,且误差较大。分析原因可知,4—5月处于春耕施肥时期,流域内耕地等处于农耕施肥的高峰期,且前期肥料均施用于浅层地表,在强降雨的淋融冲刷下,氮、磷等元素迅速进入河道,造成严重的非点源污染,而SWAT模型难以捕捉这一人为现象。

总体而言,SWAT模型非点源污染模拟结果在率定期的表现优于验证期,与径流模拟相对应,基本能够反映非点源污染负荷的实际状况。由于非点源污染监测、基础数据采集、模型内部结构、参数等具有强烈的不确定性,可以初步认为SWAT模型在该

表3 水质参数率定结果

水质指标	参数名	物理意义	初始参数范围	参数率定范围
SS	USLE_C	植物覆盖与管理因子	0.001 ~ 0.500	0.001 ~ 0.256
	USLE_P	水土保持因子	0 ~ 1	0.390 ~ 0.943
	SPCON	水流挟沙能力函数的线性系数	0.0001 ~ 0.1000	0.003 ~ 0.009
	SPEXP	水流挟沙能力函数的幂指数	0 ~ 5	0.619 ~ 1.500
TN	NPERCO	氮下渗系数	0 ~ 1	0.654 ~ 1.000
	CDN	反硝化指数速率系数	0 ~ 3	0 ~ 0.769
	SDNCO	发生反硝化作用的土壤含水量阈值	0 ~ 1	0 ~ 0.275
	ERORGN	氮渗透系数	0 ~ 5	3.082 ~ 4.490
TP	PPERCO	磷下渗系数	10.0 ~ 17.5	11.893 ~ 15.682
	PHOSKD	磷土壤分离系数	100 ~ 200	100.000 ~ 150.660
	PSP	磷吸附系数	0.01 ~ 0.70	0.297 ~ 0.700
	ERORGP	磷渗透系数	0 ~ 5	2.483 ~ 5.000

表4 典型日非点源污染模拟结果

时期	场次	SS			TN			TP		
		实测/t	模拟/t	相对误差/%	实测/t	模拟/t	相对误差/%	实测/t	模拟/t	相对误差/%
率定期	20170828	4.59	5.40	17.63	76.78	49.13	-36.02	7.92	6.92	-12.65
	20170904	3.09	1.62	-47.39	69.75	27.76	-60.20	5.40	1.73	-68.01
	20170907	25.25	25.40	0.61	120.68	133.20	10.38	19.47	19.77	1.53
验证期	20180414	4.40	0.37	-91.68	545.01	52.30	-90.40	32.85	0.51	-98.46
	20180415	2.63	3.99	52.01	487.20	73.58	-84.90	43.76	5.45	-87.54
	20180507	17.64	21.17	20.03	252.63	72.88	-71.15	47.36	9.66	-79.61
	20180509	9.98	14.38	44.13	333.86	109.50	-67.20	34.05	17.60	-48.32

流域的模拟结果基本符合要求,所得结果可用于飞来峡库区流域非点源污染的模拟预测及趋势分析。

## 4 结论

a. 场次降雨的径流-污染物浓度变化过程表明,SS 和 BOD<sub>5</sub> 等与径流量变化趋势基本一致,说明径流量对这两种污染物的输出起主导作用,而 TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 等易溶污染物则表现出非常明显的初期冲刷效应。

b. 污染物浓度及其负荷量与径流量相关性分析表明,各场次降雨中,SS 与径流量均呈现不同程度的正相关,说明径流量对泥沙等冲刷起着重要作用,BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、TP 等也大多正相关,但 TN 和 NH<sub>3</sub>-N 则和径流量负相关,与初期冲刷效应相对应。另外,污染物负荷量与径流量的相关性要好于污染物浓度与径流量的相关性。

c. SWAT 模型模拟结果表明,SWAT 模型径流模拟精度良好,纳什率定期为 0.85,验证期为 0.73。在典型日非点源污染模拟上,SWAT 对于高雨强、大雨量的典型日模拟效果最好,但对于雨强较小的典型日则表现较差;另外,验证期由于受到春耕集中施肥影响,污染物实测值普遍高于模拟值。

### 参考文献:

[ 1 ] 程静,贾天下,欧阳威. 基于 STELLA 和输出系数法的流域非点源负荷预测及污染控制措施[J]. 水资源保护,2017,33(3):74-81. (CHENG Jing, JIA Tianxia, OUYANG Wei. Prediction of non-point source load based on STELLA and export coefficient method and prevention measures[J]. Water Resources Protection,2017,33(3):74-81. (in Chinese))

[ 2 ] 代俊峰,全秋慧,方荣杰,等. 漓江流域上游非点源污染负荷估算[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):57-63. (DAI Junfeng, QUAN Qiuhui, FANG Rongjie, et al. Estimation of non-point source pollution load in upstream of Lijiang River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(5):57-63. (in Chinese))

[ 3 ] 刘庄,晁建颖,张丽,等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题[J]. 水科学进展,2015,26(3):432-442. (LIU Zhuang, CHAO Jianying, ZHANG Li, et al. Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China[J]. Advances in Water Science,2015,26(3):432-442. (in Chinese))

[ 4 ] 涂刚琴,刘鸿雁,赵志鹏,等. 黔中平寨水库保护区非点源污染风险评价与敏感区域识别[J]. 水资源保护,2015,31(4):87-93. (TU Gangqin, LIU Hongyan, ZHAO Zhipeng, et al. Risk assessment of non-point source pollution and sensitive region recognition to Pingzhai Reservoir protection areas in central Guizhou[J]. Water Resources Protection,2015,31(4):87-93. (in Chinese))

[ 5 ] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of

land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters;the export coefficient modelling approach[J]. Journal of Hydrology,1996,183(3/4):340-349.

[ 6 ] 张辰,陆建忠,陈晓玲. 基于输出系数模型的云南洱海流域农业非点源污染研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(1):108-114. (ZHANG Chen, LU Jianzhong, CHEN Xiaoling. Study of pollution from agricultural non-point sources in lake Erhai watershed in Yunnan Province based on export coefficient model[J]. Journal of Central China Normal University ( Natural Sciences ),2017,51(1):108-114. (in Chinese))

[ 7 ] 李娜,韩维峥,沈梦楠,等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报,2016,32(8):224-230. (LI Na, HAN Weizheng, SHEN Mengnan, et al. Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering ( Transactions of the CSAE ),2016,32(8):224-230. (in Chinese))

[ 8 ] 王文章,敖天其,史小春,等. 基于输出系数模型的射洪县农村面源污染负荷估算[J]. 环境工程,2018(1):173-177. (WANG Wenzhang, AO Tianqi, SHI Xiaochun, et al. Estimation of pollution loads from rural non-point sources in Shehong county based on export coefficient modeling approach [J]. Environmental Engineering,2018(1):173-177. (in Chinese))

[ 9 ] 蔡明,李怀恩,庄咏涛,等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报,2004,35(7):40-45. (CAI Ming, LI Huaien, ZHUANG Yongtao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(7):40-45. (in Chinese))

[ 10 ] 陈亚荣,阮秋明,韩凤翔,等. 基于改进输出系数法的长江流域面源污染负荷估算[J]. 测绘地理信息,2017,42(1):96-99. (CHEN Yarong, RUAN Qiuming, HAN Fengxiang, et al. Estimation of non-point source pollution load of Yangtze watershed based on improved export coefficient model[J]. Journal of Geomatics,2017,42(1):96-99. (in Chinese))

[ 11 ] 茆峰,苏馈足,康加廷,等. 基于改进输出系数法的矿区重金属面源污染负荷核算模型[J]. 环境科学研究,2012,25(2):207-211. (MAO Feng, SU Kuizu, KANG Jiating, et al. Research on heavy metal load accounting in mining areas using improved export coefficient method [J]. Research of Environmental Sciences,2012,25(2):207-211. (in Chinese))

[ 12 ] 吕乐婷,王晓蕊,江源,等. 基于 SWAT 模型的东江流域蓝水、绿水时空分布特征研究[J]. 水资源保护,2017,33(5):53-60. (LYU Leting, WANG Xiaorui, JIANG Yuan, et al. Research on spatial and temporal distribution features of green and blue water in Dongjiang River Basin based on SWAT model[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):53-60. (in Chinese))

(下转第 62 页)

- [15] 左海凤,魏加华,王光谦. DRASTIC 地下水防污性能评价因子赋权[J]. 水资源保护,2008,24(2):22-25. (ZUO Haifeng,WEI Jiahua,WANG Guangqian. Method of determining factor weights for groundwater vulnerability assessment[J]. Water Resources Protection,2008,24(2):22-25. (in Chinese))
- [16] 罗婷,李晓,肖尧,等. 成都青白江地区地下水三氮特殊脆弱性评价[J]. 人民珠江,2016,37(1):80-84. (LUO Ting, LI Xiao, XIAO Yao, et al. Study on special vulnerability of three nitrogen in Qing Bai Jiang, Chendu [J]. Pearl River,2016,37(1):80-84. (in Chinese))
- [17] 张博,李国秀,程品,等. 基于随机理论的地下水环境风险评价[J]. 水科学进展,2016,27(1):100-106. (ZHANG Bo, LI Guoxiu,CHENG Pin, et al. Groundwater environment risk assessment based on stochastic theory[J]. Advances in Water Science,2016,27(1):100-106. (in Chinese))
- [18] KAUFMAN M M, ROGERS D T, MURRAY K S, et al. Using soil and contaminant properties to assess the potential for groundwater contamination to the lower Great Lakes, USA [J]. Environmental Geology, 2000, 56 (5): 1009-1021.
- [19] 卞建民,李立军,杨坡. 吉林省通榆县地下水脆弱性研究[J]. 水资源保护,2008,24(3):4-7. (BIAN Jianming, LI Lijun, YANG Po. Vulnerability of the groundwater environment in Tongyu County of Jilin Province[J]. Water Resources Protection,2008,24(3):4-7. (in Chinese))
- [20] 刘香,王洁,邵传青,等. 城市地下水脆弱性评价方法及
- 应用[J]. 地下水,2007,29(5):90-92. (LIU Xiang, WANG Jie, SHAO Chuanqing, et al. Groundwater vulnerability assessment in urban area[J]. Groundwater, 2007,29(5):90-92. (in Chinese))
- [21] 江剑,董殿伟,杨冠宁,等. 北京市海淀区地下水污染风险性评价[J]. 城市地质,2010,5(2):14-18. (JIANG Jian, DONG Dianwei, YANG Guanning, et al. Risk assessment of groundwater pollution of Haidian District of Beijing [J]. Urban Geology,2010,5(2):14-18. (in Chinese))
- [22] 蔡文静,张延平. 基于 ArcGIS 的 DRASTIC 法地下水脆弱性评价应用研究[J]. 地下水,2017,39(1):18-21. (CAI Wenjing, ZHANG Yanping. Application of DRASTIC method based on ArcGIS on evaluating groundwater vulnerability[J]. Groundwater,2017,39(1):18-21. (in Chinese))
- [23] 孟素花,费宇红,张兆吉,等. 华北平原地下水脆弱性评价[J]. 中国地质,2011,38(6):1607-1613. (MENG Suhua,FEI Yuhong,ZHANG Zhaoji, et al. Evaluation of groundwater vulnerability in North China Plain [J]. Geology in China, 2011,38(6):1607-1613. (in Chinese))
- [24] 马天海,朱晓明,潘扎荣. 太湖流域典型平原地区浅层地下水脆弱性研究[J]. 地下水,2014,36(6):53-56. (MA Tianhai, ZHU Xiaoming, PAN Zharong. Study on vulnerability assessment of shallow groundwater in the typical plain area in the Taihu Basin [J]. Groundwater, 2014,36(6):53-56. (in Chinese))

(收稿日期:2018-07-27 编辑:王芳)

(上接第 16 页)

- [13] 张晓晗,万甜,程文,等. 黑河水库非点源污染时空分布研究[J]. 水土保持通报,2018,38(4):324-330. (ZHANG Xiaohan, WAN Tian, CHENG Wen, et al. Temporal-spatial distribution of non-point source pollution research of Heihe Reservoir [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(4):324-330. (in Chinese))
- [14] 刘吉开,万甜,程文,等. 未来气候情境下渭河流域陕西段非点源污染负荷响应[J]. 水土保持通报,2018,38(4):82-86. (LIU Jikai, WAN Tian, CHENG Wen, et al. Effects of climate change scenarios on non-point source pollution load on Shaanxi section of Weihe River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38 (4):82-86. (in Chinese))
- [15] 赖格英,易姝琨,刘维,等. 基于修正 SWAT 模型的岩溶地区非点源污染模拟初探:以横港河流域为例[J]. 湖泊科学,2018,30(6):1560-1575. (LAI Geying, YI Shukun, LIU Wei, et al. Non-point source pollution simulation in karst region based on modified SWAT Model-A case study in Henggang River Basin [J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(6):1560-1575. (in Chinese))
- [16] 冯麒宇,胡海英,黄国如. 潭江泗合水流域降雨径流非点源污染特征分析[J]. 水资源保护,2016,32(3):143-148. (FENG Qiyu, HU Haiying, HUANG Guoru. Analysis of characteristics of non-point source pollution in rainfall-runoff process in Siheshui Watershed of Tanjiang Valley [J]. Water Resources Protection,2016,32(3):143-148. (in Chinese))
- [17] 代丹,于涛,雷坤,等. 北京市清河水体非点源污染特征[J]. 环境科学研究,2018,31(6):1068-1077. (DAI Dan, YU Tao, LEI Kun, et al. Characteristics of non-point source pollution of Qinghe River in Beijing City [J]. Research of Environmental Sciences,2018,31(6):1068-1077. (in Chinese))
- [18] 赖格英,吴敦银,钟业喜,等. SWAT 模型的开发与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):243-251. (LAI Geying, WU Dunying, ZHONG Yexi, et al. Progress in development and development and applications of SWAT model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(3):243-251. (in Chinese))
- [19] 张皓天,张弛,周惠成,等. 基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):644-650. (ZHANG Haotian,ZHANG Chi,ZHOU Huicheng, et al. Simulation of non-point pollution in watershed based on SWAT model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(6):644-650. (in Chinese))
- [20] 陈晓丽,黄国如. 基于 SWAT 模型的北江飞来峡流域径流模拟[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):1-7. (CHEN Xiaoli, HUANG Guoru. Runoff simulation of Feilaixia watershed of Beijiang River based on SWAT Model [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2017,28(5):1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2018-12-18 编辑:彭桃英)