

# 1981—2013 年桃江流域径流与泥沙模拟研究

李志强<sup>1</sup>, 齐述华<sup>1</sup>, 刘旗福<sup>2</sup>, 仝兴庆<sup>2</sup>, 刘贵花<sup>1</sup>, 郑海金<sup>3</sup>

(1. 江西师范大学 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室/地理与环境学院, 江西 南昌 330022;  
2. 赣州市水文局, 江西 赣州 341000; 3. 江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌 330029)

**摘要:** [目的] 探讨人类活动对桃江流域水文过程的影响, 为赣江源区的生态保护与可持续发展决策提供一定依据。[方法] 利用 1980, 2000, 2015 年 3 期土地利用数据, 结合 SWAT 模型模拟桃江流域 1981—2013 年的径流与泥沙, 分析土地利用方式对土壤侵蚀的影响, 并定量评价居龙滩水电站的拦沙效应。[结果] ① SWAT 模型能够较好的模拟桃江的径流与泥沙, 其中月径流模拟的 Ens 为 0.92, 月泥沙模拟的 Ens 为 0.8; ② 1980—2013 年土地利用变化对桃江径流和泥沙的影响很小; ③ 桃江流域以轻度侵蚀为主, 草地侵蚀模数最大, 林地绝对产沙量最大; ④ 居龙滩水电站对桃江的泥沙具有较强的拦截作用, 2007—2013 年预计拦沙量为  $7.78 \times 10^6$  t, 约占桃江流域输沙总量的 77.5%。[结论] 土地利用变化不是引起桃江流域径流和泥沙变化的主要原因, 但居龙滩水电站的建设对桃江泥沙影响显著。

**关键词:** SWAT 模型; 径流模拟; 泥沙模拟; 桃江流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)01-0203-05

中图分类号: P333

**文献参数:** 李志强, 齐述华, 刘旗福, 等. 1981—2013 年桃江流域径流与泥沙模拟研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 203-207. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.036. Li Zhiqiang, Qi Shuhua, Liu Qifu, et al. Simulation of runoff and sediment during 1981—2013 in Taojiang basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 203-207. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.036

## Simulation of Runoff and Sediment During 1981—2013 in Taojiang Basin

LI Zhiqiang<sup>1</sup>, QI Shuhua<sup>1</sup>, LIU Qifu<sup>2</sup>, TONG Xingqing<sup>2</sup>, LIU Guihua<sup>1</sup>, ZHENG Haijin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China; 2. Ganzhou Municipal Hydrology Bureau, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 3. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi 330029, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effects of human activities on the hydrological processes in order to provide a certain basis for decision-making regarding ecological protection and sustainable development in Ganjiang River headwaters region. [Methods] SWAT (soil and water assessment tool) model was used to simulate the runoff and sediment in Taojiang basin during 1981—2013 based on the land use data of 1980, 2000 and 2015. And the effect of land use change on soil erosion was analyzed. The effects of sediment retention on Julongtan water conservancy project were analyzed quantitatively. [Results] ① Monthly runoff and sediment obtained from SWAT model were agreed with the observed data in Taojiang basin, with Ens was 0.92 and 0.8, respectively. ② Land use variations during 1980—2013 showed little effects on the runoff and sediment output in Taojiang basin. ③ Soil erosion in Taojiang basin was mainly light erosion. Soil erosion modulus in meadow was the maximum, and the sediment yield in woodland was the maximum. ④ The Julongtan water conservancy project effectively intercepted sediment Taojiang basin. It was estimated that about  $7.78 \times 10^6$  t sediment was retained during 2007—2013, accounted for 77.5% of the total amount of sediment transported into the Taojiang basin. [Conclusion] Land use change is not the main reason that causes runoff and sediment change in Taojiang basin. In contrast, the construction of Julongtan water conservancy project

收稿日期: 2017-07-14

修回日期: 2017-08-14

资助项目: 国家自然科学基金地区科学项目“结合激光雷达和光学遥感研究人工纯林下水力土壤侵蚀”(41261069); 国家自然科学基金青年项目(41501026); 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心建设项目(JXS-EW-00); 江西省科技计划项目(2015ZBBF60010)

第一作者: 李志强(1991—), 男(汉族), 广东省清远市人, 硕士生, 研究方向为水文模拟。E-mail: 641832081@qq.com。

通讯作者: 齐述华(1973—), 男(汉族), 江西省婺源县人, 博士, 教授, 主要从事生态、水文与环境遥感应用研究。E-mail: qishuhua11@163.com。

shows a significant effect on the variation of sediment in Taojiang basin.

**Keywords:** SWAT model; runoff simulation; sediment simulation; Taojiang basin

河道的径流和泥沙是河流水文特征的最重要参数,同时受地形、气候、地质、土壤、植被等多种自然因素和人类活动的影响<sup>[1]</sup>。开展人类活动或自然条件变化对流域水文过程的影响评价,对区域的生态工程建设、维持区域可持续发展提供参考和依据。

目前,利用水文模型模拟人类活动<sup>[2-3]</sup>、气候变化<sup>[4-5]</sup>、植被覆盖变化<sup>[6-7]</sup>等因素对水文过程的影响研究取得了显著的进展。按照水文模型的类型可以划分为集总式模型和分布式模型<sup>[8]</sup>,集总式模型利用概念和经验关系来描述水流运动状态,具有所需参数较少、参数率定相对简单等优势,在诸多流域的径流和泥沙模拟中取得了较好的效果<sup>[9-10]</sup>。虽然集总式水文模型应用广泛,但是模型的物理基础较少,只能模拟出水文的宏观表现,难以表达水文现象的本质和物理机制。分布式水文模型因具有明确的物理意义,可以准确的描述水文过程,且具有较强的适应性,目前主要有 AnnAGNPS<sup>[11]</sup>, VIC<sup>[12]</sup>, WATLAC<sup>[13]</sup> 等模型应用较为普遍,其中 SWAT 模型是由美国农业部开发的流域分布式水文模型,其主要包括水文过程模型、土壤侵蚀模型和污染负荷模型 3 大子模型,目前均已得到较为广泛的运用<sup>[14]</sup>。

鄱阳湖流域地处东亚季风气候区,自 1980s 年代以来,鄱阳湖流域中主要河流泥沙含量呈下降趋势<sup>[15]</sup>,这与 1980s 年代以来江西省发起以“植树造林”为主的“山江湖”生态恢复工程显著改变鄱阳湖流域植被覆盖特征有关<sup>[16]</sup>,同时也与流域范围内修建水库的拦沙效应有关。鉴于此,本研究拟以赣江上游的桃江流域为研究区,运用 SWAT 模型对该流域水文泥沙过程进行模拟,分析不同时期土地利用情景对径流与泥沙的影响,并根据泥沙变化情况评价居龙滩水利枢纽工程的拦沙效应,以期界定桃江水文特征变化的主要原因。

## 1 研究区概况

桃江古称彭水,又名信丰江,发源于赣粤交界的九连山脉,自西南向东北流经江西省赣州市的全南县、龙南县和信丰县,在赣县注入贡水,经贡水注入赣江,流域介于北纬 24°30′—25°55′,东经 114°10′—115°20′,面积 7 864 km<sup>2</sup>,是赣江的主要源区。桃江流域属于中亚热带湿润季风气候,该区年均气温为 19.94 ℃,年均降水量为 1 497 mm,降水量年内变化较大,一般 4—6 月为丰水期,占全年降水量的 43.8%,11 月至翌年 1 月为枯水期,占全年降水量的 10.4%。流域年平均径流量 6.45×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>,占赣江流

域径流量的 9.4%,年平均输沙量 1.35×10<sup>6</sup> t,占赣江流域输沙量的 13.8%。流域内有水库 9 个,其中居龙滩水利枢纽工程位于桃江下游,库容量为 7.36×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,为桃江流域内的最大水库,是一座以发电为主,兼有水库养殖、改善航运等综合效益的中型水利工程,水库正常蓄水位 122.0 m,发电死水位 117.0 m。出库下行 1.4 km 为居龙滩水文站,是桃江流域的水文控制站。

桃江流域地势南高北低,以山地为主,流域内主要土地利用类型为:以马尾松、杉木松、毛竹松为主的林地(77%)和耕地(17.5%),特色经济作物为脐橙、柑橘和板栗等。流域内主要土壤类型为红壤(65.10%),黄红壤(16.83%)和潴育水稻土(13.41%)。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据收集与预处理

SWAT 模型的运行需要针对研究区建立各要素数据库,包括数字高程模型(DEM)、土地利用和土壤等空间数据以及土壤属性数据库。

(1) DEM。由地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)下载的 ASTER GDEM,该数据空间分辨率为 30 m,利用 ENVI 软件进行校正并拼接生成研究区的 DEM。

(2) 土地利用数据。土地利用矢量数据来自于江西省土地利用/覆盖数据库。该数据库利用秋季获取的无云 Landsat 卫星遥感影像,参照《环境状况评价技术规范》(HJ/T 192-2006)中土地利用分类方法建立的土地利用数据库。该数据库 2005 年以来的土地利用数据是经过内业校核和外业核查,Ⅰ级分类的总体精度达到 90%以上,Ⅱ级分类精度大于 85%,2005 年之前的数据是按照前溯变化监测方式完成土地利用制图。依照 SWAT 模型运行要求,将土地利用归并为如表 1 所示的耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 类。

表 1 桃江流域 1980、2000、2015 年

各主要土地利用类型面积 km<sup>2</sup>

土地利用类型	1980 年	2000 年	2015 年
耕地	1 307.29	1 310.10	1 327.94
林地	5 807.79	5 811.16	5 750.81
草地	255.08	246.28	269.44
水域	50.87	50.95	51.42
建设用地	78.81	81.27	101.08
未利用土地	0.33	0.41	0.40

(3) 土壤数据。包括土壤类型数据和土壤属性数据。土壤类型数据采用 1 : 50 万土壤图,桃江流域主要分布有 13 类土壤。土壤属性数据是记录土壤层数、土壤粒径组成、土壤湿密度等属性要素。1 : 50 万土壤图采用国际制土壤质地分类,与 ArcSWAT 采用的 USDA 简化的美国制土壤质地不同,本文运用 3 次样条插值法将国际制土壤质地标准转换为适用于 ArcSWAT 模型支持的土壤质地标准<sup>[17-18]</sup>,并建立土壤属性数据库。

(4) 气象数据。包括 1959—2013 年温度、降水量、相对湿度、风速与日照时数等数据。ArcSWAT 模型的运行需要站点日降水量和日最高、最低温度,其余数据利用桃江流域及其周边共 8 个气象站点,由模型天气发生器生成。

(5) 水文数据。收集了 1980—2013 年桃江下游的居龙滩水文站观测的日径流和泥沙含量资料。

## 2.2 方法

(1) 子流域和水文响应单元划分。ArcSWAT 能够依据 DEM 提取河网并划分子流域,但由于模型

通过默认阈值提取的河网精度不高,文中采用 Google Earth 平台矢量化的实际河网,然后根据提取的河网划分子流域。

水文响应单元(HRUs)为模型模拟的最小空间单元,依据土地利用、土壤和坡度等,通过设定阈值由 ArcSWAT 生成,将桃江流域划分为 43 个子流域和 185 个水文响应单元。

(2) 模型运行与参数敏感性分析。由 SUFI2, GLUE, ParaSol 和 MCMC 等算法集成的 SWAT-CUP 是一个公共程序,用于 ArcSWAT 模型参数的敏感性分析,并对模拟结果进行率定和验证。

按照先径流、后泥沙的校准顺序调试运行<sup>[19]</sup>,以 ArcSWAT 模型给定的参数范围为基准,利用 SWAT-CUP 的参数校准工具和 ArcSWAT 中的 sensitivity analysis 工具确定各参数敏感性,得出表 2 中与径流和泥沙有关的 23 个敏感参数。其中 CN2. mgt, GW\_REVAP. gw, GWQMN. gw 和 REVAPMN. gw 等参数对径流最为敏感,SPCON. bsn, SPEXP. bsn 和 USLE\_P. mgt 等参数对泥沙最为敏感。

表 2 桃江流域径流、泥沙敏感参数

序号	参数	参数名称	最小值	最大值	最佳值
1	ALPHA_BF. gw	基础 alpha 因子	0	1	0.02
2	CANMX. hru	最大冠层截留量	0	10	6.90
3	CH_K2. rte	主河道河床有效水力传导度	0	150	6.88
4	CN2. mgt	SCS 径流曲线系数	35	98	97.45
5	EPCO. hru	植物吸收补偿因子	0	1	0.91
6	ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	0	1	0.97
7	CH_N2. rte	主河道河床曼宁系数	0	1	0.69
8	GW_DELAY. gw	地下水滞后系数	0	50	43.31
9	GW_REVAP. gw	地下水再蒸发系数	0.02	0.2	0.02
10	GWQMN. gw	浅层地下水径流系数	0	5000	300
11	SFTMP. bsn	降雪基温	0	5	2.62
12	SLSUBBSN. hru	平均坡长	10	150	76.41
13	SMFMN. bsn	12 月 21 日的融雪因子	0	10	9.54
14	SMFMX. bsn	6 月 21 日的融雪因子	0	10	0.26
15	SMTMP. bsn	融雪基温	0	5	4.56
16	SOL_ALB(). sol	湿润土壤反照率	0	0.25	0.23
17	SOL_AWC(). sol	表层土壤可利用的有效水	0	1	0.69
18	SOL_K(). sol	土壤饱和水力传导度	0	100	42.16
19	RCHRG_DP. gw	深蓄水层渗透系数	0	1	0.04
20	REVAPMN. gw	浅层含水层“再蒸发”	0	500	500
21	SPCON. bsn	水流挟沙能力函数的线性系数	0.000 1	0.01	0.000 1
22	SPEXP. bsn	水流挟沙能力函数的幂指数	1	2	1.25
23	USLE_P. mgt	土壤侵蚀防治因子	0	1	0.50

## 2.3 精度评价

采用相对误差( $R_e$ ), 决定系数( $R^2$ )和 Nash-Suttcliffe 效率系数(Ens)分别评价模拟精度。其中  $R_e$  评价模拟值与实际值的偏差, $R_e$  趋于 0 说明模拟结果越好; $R^2$  描述模拟值与观测值的序列变化趋势

的一致性, $R^2$  趋于 1,说明模拟精度高;Ens 表示模拟值与实际值的接近程度:

$$\text{Ens} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - P_r)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_d)^2}$$

Ens 越接近于 1,说明模拟值与实际值的偏离程度越小。一般来说,Ens>0.5 时可以认为模拟结果有一定的可信度,Ens>0.65 时,模拟结果较好<sup>[20-21]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 径流和泥沙模拟

将 SWAT 模型模拟时段划分为预热期,率定期和验证期,其中预热期用于确定模型初始变量;率定期用来率定模型的敏感参数;验证期是对率定期确定的敏感参数和模拟结果的评价<sup>[22]</sup>。根据 1980,1990,2000 年 3 期土地利用数据,1980—1990 年土地利用变化很小,将 1980 年设为模拟的预热期,1981—1990 年为模拟的率定期,1991—2000 年为模拟的验证期。

由表 3 可以看出,经过 SWAT 模型的预热和率定,桃江流域在率定期和验证期的径流和泥沙模拟效果良好。

表 3 桃江流域率定期与验证期的径流、泥沙模拟精度评价

评价目标	模拟期	$R_e$	Ens	$R^2$
流量	率定期(1981—1990)	-0.32	0.93	0.94
	验证期(1991—2000)	-0.68	0.92	0.92
输沙量	率定期(1981—1990)	-7.87	0.83	0.85
	验证期(1991—2000)	0.71	0.84	0.84

图 1 给出了 1981—2013 年的月径流模拟值与观测值变化趋势,由表 4 可以看出模拟效果很好。从分时间段的模拟评价结果可以看出:2007—2013 年的月径流模拟 Ens 和  $R^2$  都表明水电枢纽运行没有显著改变桃江月径流。这是由于居龙滩水电枢纽是以发电为主要功能的河道型水力工程,正常蓄水位 122.0 m 至起调水位 118.0 m,在汛期遇有相应量级的洪水时才进行预泄,将库水位降至 118 m;在非汛期,为维持正常蓄水位,上游来水量基本等于水库泄水量。这样的水库运行方案,会影响调蓄洪水后几天的径流,但对月尺度的径流影响较小。因此月径流模拟的结果受居龙滩水电枢纽工程运行的影响较小。

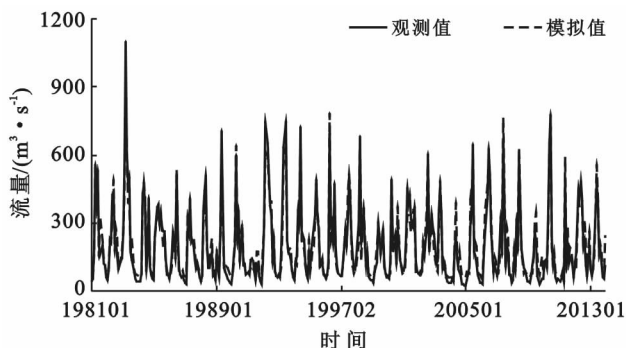


图 1 桃江流域月径流模拟值与水文观测值比较

从 1981—2013 年泥沙模拟效果的图 2 和表 4 来看,模拟值与观测值的变化趋势基本一致,受 2007 年居龙滩水电站的建成运行的拦沙影响,Ens 只有 0.64。以 2007 年为界,1981—2006 年的泥沙模拟效果良好,泥沙模拟的 Ens 为 0.81,模拟值与观测值的决定系数  $R^2$  为 0.81,模拟值与观测值达到显著相关水平;而 2007—2013 年,尽管模拟值与观测值变化趋势一致决定系数达到极显著,但模拟值明显高于观测值,模拟相对误差显著增加。

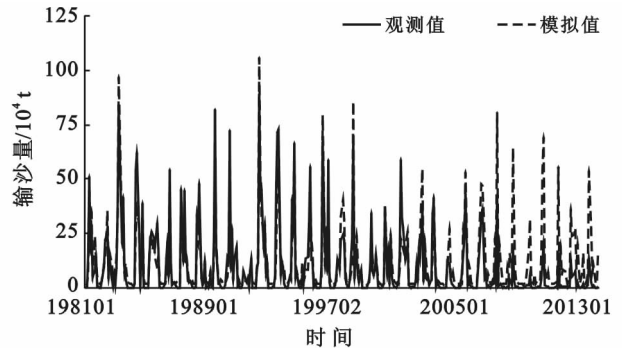


图 2 桃江流域月输沙量模拟值与水文观测值比较

表 4 SWAT 模型模拟桃江流域 1981—2013 年的径流、泥沙精度评价

评价目标	模拟期	$R_e$	Ens	$R^2$
流量	1981—2006	0.17	0.92	0.93
	2007—2013	9.32	0.91	0.92
	1981—2013	1.92	0.92	0.92
输沙量	1981—2006	1.46	0.81	0.81
	2007—2013	345.63	-5.08	0.82
	1981—2013	21.11	0.64	0.69

#### 3.2 土地利用变化对径流、泥沙的影响

分别以 1980,2000,2015 年 3 期的土地利用数据,模拟不同土地利用情景下的月尺度桃江流域的径流和泥沙。由表 5 可以看出:不同土地利用情景下模拟的径流和泥沙变化很小,这主要是由于按照 SWAT 模型运行需要输入的 6 大类土地利用类型中 1980,2000,2015 年这 3 个时期的土地利用变化很小,导致森林或草地的覆盖度变化对径流和泥沙的影响难以得到表达。尽管如此,仍取得较好的模拟结果,可以认为:1980 年以来,桃江流域的森林和草地的植被覆盖度变化不是导致桃江径流和泥沙变化的主要原因。

表 5 不同土地利用情景下桃江流域年均径流、泥沙比较

年份	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	输沙量/ $10^4 \text{ t}$
1980	199.94	144.43
2000	199.96	144.46
2015	200.18	144.71

### 3.3 土壤侵蚀分析

根据 SWAT 模型的模拟结果,对桃江流域土壤侵蚀做进一步的分析:①参考土壤侵蚀强度分级标准表(SL190-96),依据 1980—2013 年的模拟结果计算各子流域侵蚀模数,对各子流域土壤侵蚀强度进行分级,得出桃江流域轻度侵蚀区域面积为 3 877.06 km<sup>2</sup>,占桃江流域总面积的 51.68%,中度侵蚀区域面积为 3 624.90 km<sup>2</sup>,占桃江流域总面积的 48.32%。②表 6 分析了桃江流域内 185 个水文响应单元不同土地利用方式对侵蚀产沙的影响,表明不同土地利用类型的土壤侵蚀强度顺序为:草地>耕地>建设用地>林地。

表 6 桃江流域不同土地利用类型侵蚀模数

土地利用类型	面积/ km <sup>2</sup>	产沙量/ 10 <sup>4</sup> t	平均侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
耕地	1 313.52	144.93	1 103.37
林地	6 019.32	486.54	808.31
草地	118.82	17.69	1 488.80
建设用地	50.21	4.39	874.34

### 3.4 水利工程对河道输沙的影响

居龙滩水电站于 2007 年 3 月第一台机组正式运行,2007 年 5 月全部投入运行<sup>[23]</sup>,导致桃江流域居龙滩水文站观测的输沙量大幅下降。从图 2 可以看出,2007 年以后,泥沙模拟值普遍大于泥沙观测值,这正是由于难以获得居龙滩水电站的调蓄水方案中的诸多参数所引起。结合水文站观测泥沙含量序列和模拟结果,可以定量评价居龙滩水电站每年的拦沙量,结果如图 3 所示:居龙滩水电站的建成与运行使桃江输入贡江的泥沙量显著降低,2007—2013 年期间居龙滩水电站的拦沙量约 7.78×10<sup>6</sup> t。

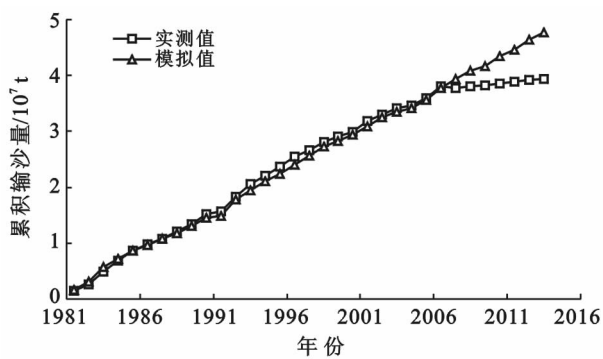


图 3 1981—2013 年桃江累积输沙量

## 4 结论与展望

(1) SWAT 模型适用于桃江流域的径流和泥沙

模拟,率定期和验证期的模拟精度较高,达到显著相关水平;

(2) 土地利用变化不是引起桃江径流和泥沙变化的主要原因;

(3) 桃江流域轻度侵蚀区域面积为 3 877.06 km<sup>2</sup>,占桃江流域总面积的 51.68%,中度侵蚀区域面积为 3 624.90 km<sup>2</sup>,占桃江流域总面积的 48.32%;

(4) SWAT 模型能够较好地用于水利枢纽工程拦沙效应的定量评价,桃江下游的居龙滩水利枢纽工程在 2007—2013 年总的拦沙量约为 7.78×10<sup>6</sup> t,占桃江流域输沙总量的 77.5%,显著改变了桃江的输沙特征。

由于 1980,2000 和 2015 年 3 个年份的森林和草地面积相近,土地利用变化对径流和泥沙的情景模拟结果不能表达 20 世纪 80 年代以来植被覆盖度变化对径流和泥沙的影响,在未来的研究中,有必要进一步强化 SWAT 模型针对不同覆盖度的林、草地的水文特征参数数据库的建设和完善;另外,在实现桃江流域径流和输沙模拟的基础上,有必要进一步对土地利用变化的环境效应进行模拟研究,特别是农业生产和果园开发中大量使用化肥和农药对水质的影响。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 韦杰,贺秀斌.流域侵蚀产沙人类活动影响指数研究:以长江上游为例[J].地理研究,2012,31(12):2259-2269.
- [2] 吕乐婷,彭秋志,郭媛媛,等.基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J].自然资源学报,2014,29(10):1746-1757.
- [3] 郑捷,李光永,韩振中,等.改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用[J].水利学报,2011,42(1):88-97.
- [4] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J].生态学报,2014,34(6):1559-1567.
- [5] 丁相毅,周怀东,王宇晖,等.基于分布式水文模型的三峡库区污染负荷对气候变化的响应研究[J].环境科学学报,2012,32(8):1991-1998.
- [6] 谢媛媛.基于 SWAT 模型的罗玉沟流域森林植被变化的水文生态响应研究[J].水土保持研究,2009,16(4):197-202.
- [7] 杨大文,雷慧闯,丛振涛.流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J].水利学报,2010,41(10):1142-1149.
- [8] 徐宗学.水文模型[M].北京:科学出版社,2009.
- [9] 刘贵花,齐述华,朱婧瑄,等.气候变化和人类活动对鄱阳湖流域赣江径流影响的定量分析[J].湖泊科学,2016,28(3):682-690.
- [10] 徐夏楠,高建华,贾建军,等.气候变化和人类活动对鄱阳湖流域入湖输沙量影响的定量估算[J].地理研究,2015,34(5):838-850.

(下转第 213 页)

- Press, 1997.
- [2] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387(1):253-260.
- [3] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. *应用生态学报*, 1999,10(5):635-640.
- [4] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M L. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem function, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002,41(3):393-408.
- [5] Assessment M E. *Ecosystems and Human Well-being* [M]. Washington, D C: Island Press, 2005.
- [6] Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units [J]. *Ecological Economics*, 2007,63(2/3):616-626.
- [7] Fisher B, Turner R K. Ecosystem services: Classification for valuation[J]. *Biological Conservation*, 2008, 141(5):1167-1169.
- [8] Keeler B L, Polasky S, Brauman K A, et al. Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109 (45): 18619-18624.
- [9] Polasky S, Segerson K. Integrating ecology and economics in the study of ecosystem services; some lessons learned[J]. *Annual Review of Resource Economics*, 2009,1(1):409-434.
- [10] 潘晓斌,何意,阎梅,等. 神农架大九湖水文水资源现状分析与保护对策[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(13): 3033-3037.
- [11] 罗涛,伦子健,顾延生,等. 神农架大九湖湿地植物群落调查与生态保护研究[J]. *湿地科学*, 2015,13(2):153-160.
- [12] 尹发能. 神农架大九湖湿地保护与利用研究[J]. *人民长江*, 2009,40(19):50-52,105.
- [13] 江波,陈媛媛,饶恩明,等. 博斯腾湖生态系统最终服务价值评估[J]. *生态学杂志*, 2015,34(4):1113-1120.
- [14] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究[J]. *生态学杂志*, 2004,23(4):47-51.
- [15] 庞丙亮,崔丽娟,马牧源,等. 若尔盖高寒湿地生态系统服务价值评价[J]. *湿地科学*, 2014,12(3):273-278.
- [16] 余明勇,姚玲. 神农架大九湖保护涉水工程对湿地生态环境的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2013(12):57-61.
- [17] 李素霞,王石,王庆云,等. 神农架湿地泥炭测评及其生态开发保护[J]. *长江大学学报:自然科学版(农学卷)*, 2008,5(3):60-62.
- [18] 江波,张路,欧阳志云. 青海湖湿地生态系统服务价值评估[J]. *应用生态学报*, 2015,26(10):3137-3144.
- [19] 李艳元,葛继稳,彭凤姣,等. 神农架大九湖泥炭湿地 CH<sub>4</sub> 通量特征及其影响因子[J]. *地球科学*, 2017,42(5):832-842.
- [20] Turner R K, Paavola J, Cooper P, et al. Valuing nature: Lessons learned and future research directions [J]. *Ecological Economics*, 2003,46(3):493-510.
- ~~~~~
- (上接第 207 页)
- [11] 田耀武,黄志霖,肖文发. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价[J]. *生态学报*, 2011, 31(16):4568-4578.
- [12] 马俊超,杭庆丰,李琼芳,等. 基于 VIC 模型的滦河流域综合干旱指数的构建与应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2015,26(2):79-84.
- [13] 李云华,张奇,李相虎. 鄱阳湖流域分布式水文模型的多目标参数率定[J]. *长江流域资源与环境*, 2013,22(5):565-572.
- [14] 邹松兵,陆志翔,龙爱华,等. ARCSWAT2009 用户指南[M]. 郑州:黄河水利出版社,2012.
- [15] 齐述华,熊梦雅,廖富强,等. 人类活动对鄱阳湖泥沙收支平衡的影响[J]. *地理科学*, 2016,36(6):888-894.
- [16] 刘冲,齐述华,汤林玲,等. 植被恢复与气候变化双重影响下的鄱阳湖流域蒸散时空特征研究. *地理研究*, 2016,35(12):2373-2383.
- [17] 蔡永明,张科利,李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. *土壤学报*, 2003,40(4):511-517.
- [18] 陆颖, Sam BUCHANAN,何大明. 流域水文模型中的土壤质地转换与饱和导水率  $K_s$  值确定[J]. *云南地理环境研究*, 2008,20(5):29-32.
- [19] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. *Soil and Water Assessment Tool User's Manual (Version 2000)* [M]. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Temple, Texas, USA, 2002.
- [20] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007,50(3):885-900.
- [21] 潘登,任理. 分布式水文模型在徒骇马颊河流域灌溉管理中的应用 I. 参数率定和模拟验证[J]. *中国农业科学*, 2012,45(3):471-479.
- [22] 肖军仓,周文斌,罗定贵,等. 非点源污染模型:SWAT 用户应用指南[M]. 北京:地质出版社,2010.
- [23] 周永忠,许荣贵. 居龙滩水电站水力机械设计[J]. *小水电*, 2008,39(1):24-27.