

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.002.

汪澳, 高俊峰, 闫人华, 等. 太湖上游西苕溪流域水沙产出特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 86-95.

Wang Ao, Gao Junfeng, Yan Renhua, et al. Characteristics and Causes of Runoff and Sediment Production in the Xitiaozi Watershed in the Upper Reaches of Taihu Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 86-95.

太湖上游西苕溪流域水沙产出特征及影响因素

汪澳^{1,2}, 高俊峰², 闫人华², 严嘉龙²

(1.南京信息工程大学 地理科学学院, 南京 211800; 2.中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: [目的] 定量分析流域水沙产出时空分布, 探究其主要成因, 为太湖西苕溪流域内水土保持、生态综合治理提供科学参考。 [方法] 选取太湖上游西苕溪流域作为研究区, 并应用 SWAT 模型和相关统计方法, 研究了该流域 2016—2020 年水沙时空变化特征及其驱动力。 [结果] (1) 流域内水沙产出主要集中在雨季 (4—9 月), 年均径流深为 588 mm, 占全年的 63.2%。平均产沙量为 0.83 t/hm², 占全年的 75.1%。 (2) 流域内产水主要集中在流域上游西南地区和下游东北地区, 而中部地区相对较低, 与流域降雨量分布基本保持一致 (相关系数 $R=0.96$)。 (3) 流域内产沙主要集中在西北平原区和中部河谷地带, 坡度梯度小于 15° 或大于 25° 且用地类型为耕地的区域。 (4) 流域内土壤侵蚀以微度侵蚀为主, 与耕地面积呈较好的线性函数关系 ($y=0.0202x+0.539, R^2=0.748, p<0.001$), 流域内年均产沙量约为 (1.02 ± 0.44) t/hm²。 [结论] 流域水沙产出具有明显的时空分布特征, 径流与降雨分布基本一致, 产沙与耕地面积和坡度密切相关, 未来水资源管理需综合考量这些关键因素。

关键词: 水沙输出特征; 成因分析; SWAT 模型; 西苕溪流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0086-10

Characteristics and Causes of Runoff and Sediment Production in the Xitiaozi Watershed in the Upper Reaches of Taihu Basin

Wang Ao^{1,2}, Gao Junfeng², Yan Renhua², Yan Jialong²

(1. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 211800, China; 2. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to quantitatively analyze the spatiotemporal distribution of runoff and sediment production in the watershed, to investigate its main causes, and to provide scientific references for soil and water conservation and ecological management in the Xitiaozi watershed of Lake Taihu. [Methods] The Xitiaozi watershed in the upper reaches of Taihu basin was selected as the study area. The SWAT model and related statistical methods were applied to study the spatial and temporal characteristics of runoff-sediment variability and its driving forces in the watershed during 2016—2020. [Results] (1) The output of runoff and sediment in the watershed was mainly concentrated in the rainy season (April—September), and the average annual runoff depth was 588 mm, accounting for 63.2% of the year. The average sediment production was 0.83 t/hm², accounting for 75.1% of the year. (2) Runoff production in the watershed was mainly concentrated in the upper southwestern part and the lower northeastern part, while the central part was relatively low, which was basically consistent with the distribution of rainfall in the basin (correlation coefficient $R=0.96$). (3) Sediment production in the watershed was mainly concentrated in the northwest plain area and the central river valley area, where the

收稿日期: 2024-01-03

修回日期: 2024-02-05

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3208704); 国家自然科学基金 (42071052; 42371043); 中国科学院南京地理与湖泊研究所自主部署科研项目 (NIGLAS2022GS10)

第一作者: 汪澳 (1999—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为流域水文模拟。E-mail: wa2417@126.com

通信作者: 闫人华 (1987—), 男, 河南安阳人, 博士, 副研究员, 主要从事流域水文生态研究。E-mail: yrh036@163.com

http://stbcj.paperonice.org

slope gradient was less than 15° or more than 25° and the land type was cultivated land. (4) Soil erosion in the watershed was mainly slight erosion, and it had a good linear function relationship with the cultivated land area, that is, $y=0.0202x+0.539(R^2=0.748, p<0.001)$, and the average annual sediment production in the watershed was about (1.02 ± 0.44) t/hm². [Conclusion] The runoff and sediment production in the watershed exhibits significant spatiotemporal distribution patterns. Runoff distribution is generally consistent with rainfall distribution, sediment yield is closely related to the area of cultivated land and slope. Water resource management should comprehensively consider these key factors in the future.

Keywords: characteristics of water-sediment production; causes analysis; SWAT model; Xitiaoqi watershed

流域水沙输移是地球水文、物质循环的重要过程,其变化趋势是研究流域水资源科学利用、土壤侵蚀与营养盐流失的重要指标。随着全球气候变化和人类社会活动的影响加剧,流域的水沙输移过程也发生了显著的变化,流域水沙产出特征及成因研究在全球范围内都获得了广泛关注^[1]。随着统计学与计量分析方法的发展,定量分析流域水沙输送量和土壤侵蚀程度已成为流域研究的一项重要内容,为流域统筹管理和科学决策提供重要支撑^[2]。已有的研究认为影响流域水沙输送的因素是多样的,其中气候变化和人类活动是引起流域水沙变化的主要因素^[3],这些因素在宏观尺度上具有一致性和协调性,而在具体到河流和湖泊时,受到某一种或者多种因素影响的程度是综合且复杂的。

流域水文模型是流域尺度水文过程的数学模型概化,有助于深刻理解水沙输送机制、优化水资源管理、防洪减灾和保护生态环境。如 Cheng 等^[4]将 HEC-HMS 模型运用于河南省栾川、藁城、下河村 3 个典型小流域,通过对 1980—2013 年的 12 次典型洪水事件进行洪峰时差、径流相对误差、洪峰流量相对误差和 NSE 系数等指标的评估,发现模拟结果的平均合格率均高于 80%,说明 HEC-HMS 模型对丘陵区小流域降雨径流过程模拟具有较强的适应性。Zhang 等^[5]将 3 种不同降雨数据集(实测气象数据,CMAD 数据和 TRMM 数据)输入 MIKE SHE 模型进行评估,发现 CMAD 数据驱动的模式对嘉陵江流域径流模拟具有更好的适用性,同时,对未来 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情境下气候变化进行了分析,对比了 4 个水文站点的径流量变化情况,发现 RCP4.5 情景与未来情景的一致性较好,嘉陵江流域未来将更冷、更干。Wang 等^[6]采用了 VIC-WEPP 模型来量化美国五大湖区域在 3 种气候变化情景(A2, A1B, B1)下,未来 3 个时期(2030s, 2060s 和 2090s)土壤侵蚀的变化情况,发现在森林覆盖的北部研究区,由于每年降水量增加了 9.7~68.3 mm,土壤侵蚀量在未来 3 个时期每年将持续增加 0.01~0.18 t/hm²。Chen

等^[7]将 3 种常用模型 SWMM, SWAT 和 MIKE11 结合起来,提出了一种针对复杂流域的集成建模方法,发现十五里河的 NH₃-N 浓度主要受城市非点源(NPS)污染的影响,城市 NPS 污染主要源于污染物的积累和冲刷过程,因此 NH₃-N 浓度更符合河流水文曲线和降雨趋势。SWAT (soil and water assessment tool)模型在水沙产出及流域水资源管理研究中应用十分成熟,能全面模拟多种土地利用类型和管理措施对流域水文过程的影响,有助于揭示流域水沙产出特征及变化的关键驱动机制。如 Li 等^[8]提出了一种综合水体环境容量和污染负荷时空分布的 NPS 污染风险评估方法,运用 SWAT 模型确定了乐安河流域的重点污染负荷源区。Deng 等^[9]利用 SWAT 模型对汉江流域上游进行了水文过程的模拟,并研究了 1980 年和 2000 年实际 LUCC 情景以及 2020 年模拟 LUCC 情景下流域地表径流和蒸散量的变化,研究结果显示,汉江流域中建设用地的面积增加以及水体的大面积减少,对植被截留、土壤含水量和地表蒸散等水文因子产生了影响,这些变化导致流入丹江口水库的年平均径流呈现增加趋势,且土地利用变化对全年径流量的影响大于汛期。Worku 等^[10]使用 SWAT 模型对埃塞俄比亚青尼罗河流域上游杰玛子流域进行了水文过程的模拟,考虑了对气候数据进行的统计偏差校正以及未来气候变化情景(RCP4.5 和 RCP8.5),预测了未来降雨量减少、温度和蒸散量增加的变化将导致地表径流减少。通过流域水文模型,研究者能够对流域内的水资源分配、土壤侵蚀和水沙产出等关键问题进行模拟与预测。

西苕溪流域集水区面积 2 268 km²,平均年径流量贡献了太湖水量的 27.7%,是太湖上游重要的产水区域。近几十年来伴随着水土流失,以泥沙等颗粒物为载体的外源性营养盐^[11]不断地向太湖输送,加剧了太湖水体富营养化、底质污染、草型生境破坏的程度。因此,西苕溪水沙研究对太湖流域外源性营养盐入湖控制具有重要意义。本文旨在通过构建 SWAT 模型来模拟西苕溪流域的水循环过程,核算水沙产出

通量,并揭示流域水沙产出的时空变化特征及其影响因素,将为保持流域水土资源、控制入太湖泥沙量提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

西苕溪流域位于浙江省北部的湖州市境内,是太湖流域西南部的重要集水单元,西北临安徽省宣城市,地跨东经 $119^{\circ}14'—119^{\circ}53'$,北纬 $30^{\circ}23'—30^{\circ}53'$ 。地势西南高,东北低,海拔高度在 1 600 m 以下,呈阶梯式分布。西北、西南地区以山地、丘陵分布为主,东北和北部地区以平原分布为主,呈口袋型包裹西苕溪流域(图 1)。流域上游有西溪、南溪、龙王溪、浒溪、递铺溪等主要支流呈扇状汇水进入西苕溪干流,中下游有浑泥港、晓墅港、和平港等支流汇入,整个流域自西南向东北汇水进入太湖,集水面积约为 2 268 km²。流域地处北亚热带季风气候区,降雨丰富,年降水量大于 1 500 mm,流域内水系发达,人类活动多集中于河流沿岸和下游平原地区。但流域内降水具有明显的季节分布差异,夏季降水丰富且集中,河道汇水量大,对地表冲刷能力强;冬季降水量较少,河道汇水量小,对地表冲刷能力较弱。

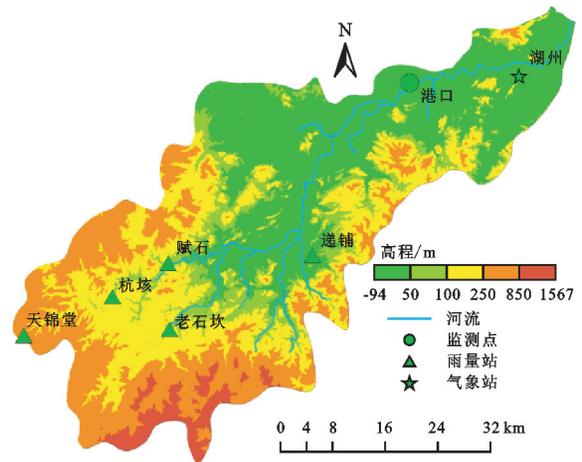
表 1 研究区主要数据来源

Table 1 Primary data sources for the study area

数据类型	数据尺度	数据来源
DEM 数据	30 m×30 m 网格	https://www.gscloud.cn
土壤数据	1000 m×1000 m 网格	https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12
土地利用数据	30 m×30 m 网格	http://www.globallandcover.com
气象数据	逐日降水、气温等数据(2009—2020 年)	湖州气象站,天锦堂、赋石水库、老石坎水库、杭垓、递铺、港口等雨量站
港口实测径流、泥沙数据	逐月径流、泥沙数据(2016—2020 年)	港口水文站

1.2.2 数据处理

(1) 土壤、土地利用数据重分类与数据库建立。模型需对土壤数据进行重分类,将具有相同理化性质的土壤归为一类。西苕溪流域初始获取的土壤数据共有 28 小类,重分类后归为 9 类。其中,流域内水体并不具有土壤属性,但占比较少,归为附近较近的土壤类型,重分类为 ATC(人为土)中,并对照中国第二次全国土地调查所获取的土壤数据,重建土壤数据库。同时,需要合并土地利用分类中的二级地类,将研究区域划分为林地、耕地、人造地表(包括城镇等各类居民地、工矿、交通设施等)、草地、水体 5 种主要的土地利用类型,其中以林地、耕地为主,分别占比 63%,23.5%。而人造地表、草地、水体,分别占比 6.2%,5.1%,2.2%。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)4309 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 西苕溪流域地理概况

Fig. 1 Geographical location of the Xitiaoqi watershed

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 构建流域水文分布模型需要空间和属性数据支持,包括研究区域的数字高程(DEM)数据、土地利用数据、土壤数据、河网数据、气象数据以及港口站实测流量、泥沙数据。具体数据来源见表 1。在使用 ArcSWAT 进行模型构建时,这些数据将被整合和分析,以生成流域水文分布模型。

(2) 气象数据的处理。气象数据由湖州气象站和各雨量站实测数据与天气发生器两部分构成。其中,实测数据包括日降水量、日最低最高气温、日相对湿度、日太阳辐射和日平均风速,而天气发生器主要用于弥补实测数据的缺失值。气象数据中降水变化是影响流域水文过程的重要因素,由图 2 可知,流域中 4—9 月降水量较多,月均降水量为 185 mm,将其归为雨季;10—翌年 3 月降水量较少,月均降水量为 86 mm,将其归为非雨季。

1.3 水文模型构建

位于流域下游的港口水文站控制着整个流域的水沙输送,具有较为完整的监测功能。本研究以该水文站为监测点,通过输入 DEM 数据和真实河网数

据,对流域进行河网水系和子流域的划分。将西苕溪流域按 4 000 hm²划分为 33 个子流域,并对各子流域的径流和产沙进行模拟。此外,根据地物类型、土壤、

坡度等数据,将子流域划分为 1 364 个水文响应单元。最后,输入各气象站 2009—2020 年的真实气象数据,建立 SWAT 水文模型,模拟水循环过程。

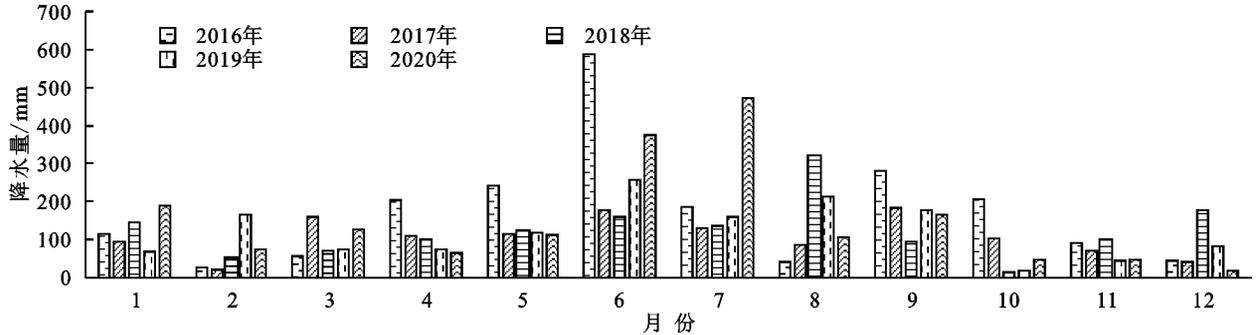


图 2 2016—2020 年湖州气象站各月降水量
Fig. 2 Monthly precipitation at Huzhou weather station from 2016 to 2020

2 结果与分析

2.1 模型率定与验证

SWAT 模型主要通过 SWAT-CUP 软件中的 SUFI-2 算法进行径流和泥沙参数的率定。本模型选取港口站 2016—2020 年的实测月径流和月泥沙数据进行率定验证,确定模型参数值。其中 2014—2015 年设置为模型预热期,2016—2018 年设置为模型率定期,2019—2020 年设置为模型验证期。

2.1.1 敏感性分析及参数的确定 在不同的研究区域上,不同的参数在空间上分布不均,参数的不同取值会导致不同的模型精度,这使得参数选取和取值具有不确定性,因此提高模型的适应性需要进行参数敏感性分析。敏感性分析可以反映模型输出结果对参

数选取种类和参数取值微小变动的反应程度^[12]。ArcSWAT 提供了两种参数敏感性分析方法:局部敏感性分析(One-at-time Sensitivity Analysis)和全局敏感性分析(Sensitivity Analysis)。全局敏感性分析更加侧重于不同参数选取及取值所导致的模型适应性的分析评价,注重不同参数之间的相互关系,将不同参数的敏感性由强到弱进行排序,从中保留敏感性较强的一些参数,剔除一些敏感性较弱的参数,既保证了模型的精度,又大大提高了模型的运算效率,具有较强的实用价值。

本次研究参考构建流域水文分布模型的相关文献^[13-14],运用 SWAT-CUP 提供的全局性敏感性分析方法,对选取的参数进行数次迭代,最终确定 12 个参数用于径流率定,6 个参数用于泥沙率定(表 2)。

表 2 模型主要率定参数及最佳取值

Table 2 Main calibration parameters of the model and their optimal values

率定项目	参数名称	所在文件	参数定义	校准范围	最佳取值
径流	CN2	mgt	SCS 模型径流曲线数	-0.2~0.2	0.0674
	ALPHA_BF	gw	基流消退系数	0~1	0.7045
	GWQMN	gw	浅层地下水发生回流阈值	0~5000	892.5
	OV_N	hru	地面的曼宁糙率系数	0.01~30	22.157616
	ESCO	hru	土壤蒸发补偿系数	0~1	0.6455
	CANMX	hru	最大树冠存储量	0~100	16.35
	GW_DELAY	gw	地下水滞后时间	0~500	123.25
	CH_N2	rte	主河道曼宁系数	-0.01~0.3	0.235055
	SOL_AWC	sol	土壤可用含水量	0~1	0.1165
	SOL_K	sol	土壤饱和导水率	0~2000	47
	GW_REVAP	gw	地下水再蒸发系数	0.02~0.2	0.03989
	REVAPMN	gw	浅层地下水再蒸发的阈值	0~500	104.25
	SPCON	bsn	最大泥沙量线性参数	0.0001~0.01	0.006886
	BIOMIX	mgt	生物混合效应	0~1	0.2775
泥沙	USLE_K	sol	土壤侵蚀因子	-0.5~0.5	-0.0045
	USLE_C{1}	crop.dat	USLE 中的植被覆盖与田间管理因子(C)	0.001~0.5	0.492765
	USLE_P	mgt	USLE 中水土保持措施因子	0~1	0.2875
	HRU_SLP	hru	河道平均坡度	0~1	0.0675

2.1.2 率定结果验证与评价 本文采用实测值和模拟值之间的相关系数(R^2)、纳什系数(NS)和百分比偏差(PBIAS)来评估 SWAT 模型的精度。其中相关系数(R^2)反映模拟值与实测值之间的模拟优度,其值越接近 1,数据一致性越高;纳什系数(NS)反映了模拟数据与实测数据之间的吻合程度,其值越接近 1,模型适用性越高;百分比偏差(PBIAS)反映了模拟值和实测值的累积偏差,其值越接近于 0,模拟水文过程与实际趋势越贴合^[15]。

图 3 为港口站月径流量模拟结果。在率定期,月径流量模拟的相关系数 R^2 为 0.92,纳什系数 NS 为 0.8,百分比偏差 PBIAS 为 8.3%。在验证期,月径流量模拟的相关系数 R^2 为 0.95,纳什系数 NS 为 0.86,百分比偏差 PBIAS 为 2.8%。可以看出,港口站月径流量模拟结果在率定期与验证期 R^2 值和 NS 值均大

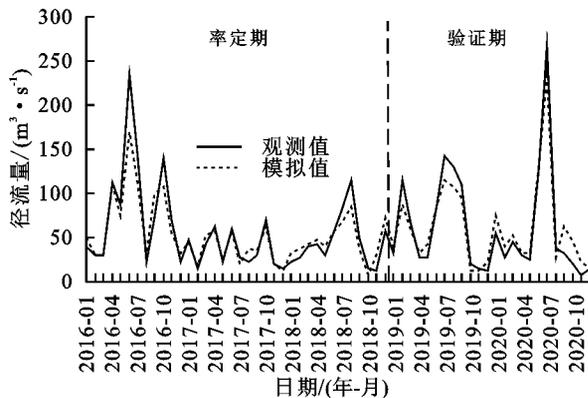


图 3 港口站径流实测值和模拟值拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of measured and simulated runoff values at the Gangkou hydrological station

2.2 流域水沙时空变化及其驱动力

2.2.1 降水与流域水沙季节 2016—2020 年西苕溪流域的年均径流深为 930 mm,年均产沙量为 1.1 t/hm²,各子流域的年均径流深处于 790~1 100 mm 范围、年均产沙量小于 2 t/hm²,平均侵蚀模数小于 200 t/(km²·a),流域内的土壤侵蚀主要以微度侵蚀为主^[18]。如图 5 所示,西苕溪流域 2016—2020 年各子流域的水沙产出具有明显的季节变化特征,流域内雨季(4—9 月)年均降水量 1 115 mm(图 2),年均径流深为 588 mm,全年占比 63.2%,年均产沙量为 0.83 t/hm²,全年占比 75.1%;而非雨季(10 月—翌年 3 月),年均降水量 508 mm(图 2),年均径流深为 342 mm,全年占比 36.8%,年均产沙量为 0.27 t/hm²,全年占比 24.9%。可以看出,西苕溪流域的水沙输出与降水有着密切关系,雨季(4—9 月)是流域单元主要水沙产出时期。

在自然状态下,气候变化引起的降水量变化是造成流域水沙输出变化的主要因素^[3]。根据港口站 2016—2020 年 60 个月份统计的降水数据和水沙输

于 0.8,百分比偏差均小于 10%,这表明该模型可较好地模拟西苕溪流域径流过程。

图 4 为港口站月泥沙量模拟结果。在率定期,月泥沙量模拟的相关系数 R^2 为 0.85,纳什系数 NS 为 0.82,百分比偏差 PBIAS 为 5%。在验证期,相关系数 R^2 为 0.59,纳什系数 NS 为 0.58,百分比偏差 PBIAS 为 6.9%。泥沙模拟在验证期的精度相对较低,这主要是由于 2019 年 8 月的台风强降雨事件属于异常事件,对流域内水文循环过程产生了显著影响,包括土壤侵蚀、植被拦蓄、下渗率等方面,而模型是对降雨事件水文过程的概化,重在揭示一般降雨径流-泥沙过程,这些因素的差异导致了模型模拟出现偏差^[16]。尽管如此,泥沙模拟在验证期间的精度已经达到相关研究的一般水平^[17],对流域产沙模拟具有一定的适用性。

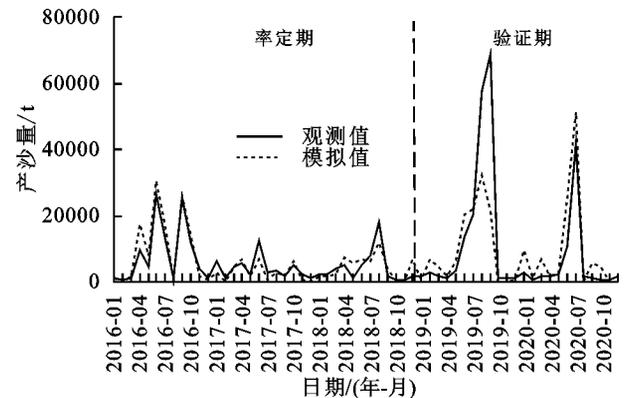


图 4 港口站泥沙实测值与模拟值拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of measured and simulated sediment values at the Gangkou hydrological station

出数据相关分析表明(图 6):流域产流和产沙均与降水量呈显著正相关。流域月均降水量为 135 mm,月均径流量为 58 m³/s,月均输沙量为 0.04 t/hm²。当月降雨量小于 100 mm($n=25$)时,流域月均径流量为 28.2 m³/s,月均产沙量为 0.01 t/hm²;当月降雨量大于 100 mm($n=35$)时,流域月均径流量为 79.2 m³/s,月均产沙量为 0.15 t/hm²。这种经验关系表明,流域水沙输出量随降水量增加而增加,流域水沙产出主要集中在月降雨大于 100 mm 的月份。与各子流域汇总的水沙量不同,各子流域入河道水沙量在向下游输送过程中会发生衰减,如输沙量衰减,按照西苕溪各子流域输沙单元统计的月均输沙量约为 0.09 t/hm²,是流域过港口断面输沙总量的 2.25 倍。这主要是由于从各子流域进入主河道的泥沙量在向河道下游迁移过程中,会由于沉积物本身粒径大小、水利工程拦截而发生沉降。如聂小飞等^[19]通过长时间序列水沙数据分析发现,以水土保持工程为主

的生态保护工程对平江流域输沙量减少的贡献率在 94.0% 以上。曾海鳌等^[20]根据汭东小流域土地利用类型和土壤侵蚀速率的分布,估算出流域土壤侵蚀总量的 23.7% 会进入太湖。薛天翼等^[21]通过泥沙归因诊断分析研究表明,1964—2016 年红水河流域水库建设使输沙量减少了 83.49%。由此可见,西苕溪流

域内人为引水、坝库调节、水利水电开发等流域工程措施,以及流域侵蚀土壤粒级会影响河流输沙沉降与入湖物质通量。除此之外,极端天气下流域水沙输出也具有不确定性。此次研究主要分析西苕溪各子流域水沙输出特征,对于子流域水沙输出量向下游运输过程所发生的衰减率研究,则需要更多的基础数据支撑。

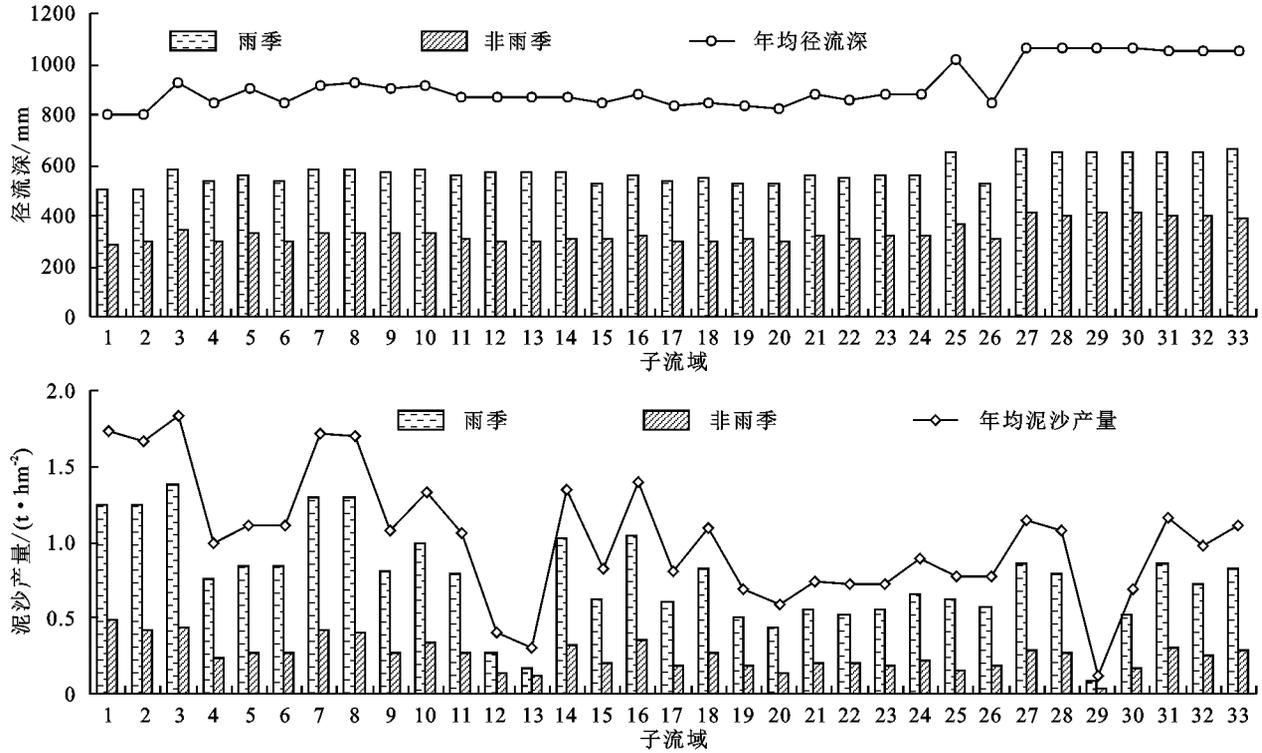


图 5 西苕溪各子流域雨季和非雨季径流量和产沙量比较

Fig. 5 Comparison of runoff and sediment output in different sub-basins of Xitiaoxi watershed during the rainy and non-rainy seasons

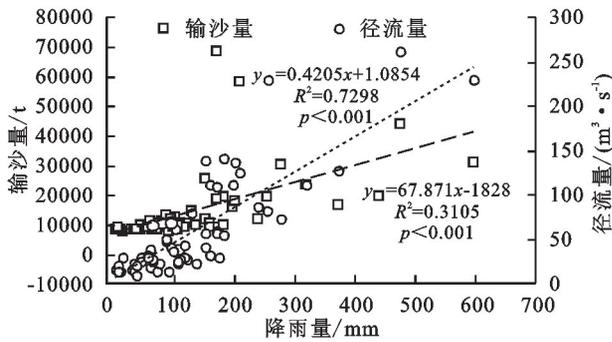


图 6 流域降水与港口监测站水沙输出关系

Fig. 6 Relationship between basin precipitation and water-sediment output at the Gangkou hydrological station

2.2.2 子流域产流空间分布 西苕溪流域 2016—2020 年的多年平均产流量在空间分布上具有一定差异性,主要是受流域降水强度、坡度和下垫面性质组合影响。如图 7 所示,西苕溪流域西南方向径流深最大、东北方向次之、中部地区较低,这与流域降雨量分布基本保持一致(相关系数 $R=0.96$)。结合图 8 分

析原因,流域西南部为山区,坡度多大于 15° ,受垂直气压梯度影响,降雨较多,东北方向则是靠近太湖,受充足的湖泊水汽扰动,降雨也较多。这与之前的相关研究发现结论比较一致,如和继军等^[22]根据 6 场次降雨研究发现,坡面径流量随坡度增大而增大;郑莉萍等^[23]在璧南河流域径流模拟中发现,径流深与降水量在空间上的分布呈现高度相关性。郭晓娜等^[24]通过对山东省主要河流径流变化的归因分析,认为降水和下垫面条件改变是引起径流变化的主要因素。

经统计,西苕溪各子流域降雨量范围在 1 500~2 000 mm,径流深范围为 797~1 067 mm。年均降雨量 $>1 800$ mm 的有 8 个子流域,分别是 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 号子流域,位于坡度较陡的流域上游西南部,与径流深 $>1 000$ mm 的 8 个子流域保持一致。年均降雨量处于 1 700~1 800 mm 范围的有 9 个子流域,分别是位于流域上游西北部的 21, 23, 24 号 3 个子流域和下游东北部的 3, 5, 7, 8, 9, 10 号 6 个子流域,其中 23 号子流域径流深为 877 mm,

另外8个子流域径流深处于880~922 mm,需注意流域上游的3个子流域降水略多于下游的6个子流域,径流深却是呈现相反的趋势,可能是因为流域下游人类活动显著,耕地面积占比较大,植被覆盖率相对较低,土地对径流的拦蓄作用相对较弱,因此径流深较高。年均降雨量处于1600~1700 mm范围的有14个子流域,径流深处于821~878 mm,主要位

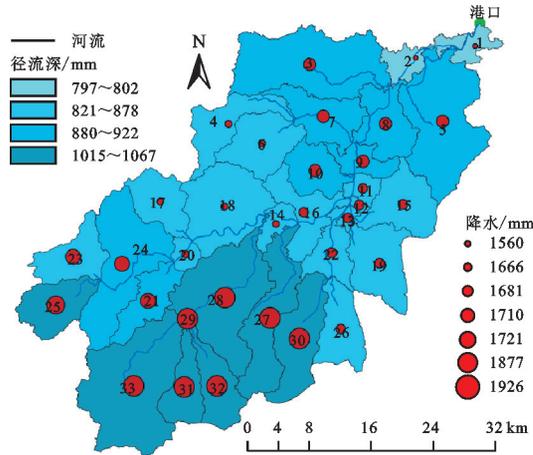


图7 西苕溪流域产流量与降水量空间分布
Fig. 7 The spatial distribution of runoff and precipitation in the Xitiaozi watershed

2.2.3 子流域产沙空间分布 西苕溪流域2016—2020年的多年平均产沙量空间差异性较大(图9)。整个流域的年均产沙总量为208 088 t。其中,1,2,3,7,8这5个子流域的年均产沙量处于第一梯队,为1.5~2 t/hm²范围内,产沙总量为52 248 t,占整个流域的25.1%。第二梯队有12个子流域,年均产沙量处于1~1.5 t/hm²范围内,产沙总量为98 479 t,占整个流域的47.3%。第三梯队有13个子流域,年均产沙量处于0.5~1 t/hm²范围内,产沙总量为57 087 t,占整个流域的27.4%。而12,13,29号3个子流域主要由城市用地和水体组成,产沙量较小,产沙总量仅占整个流域的0.1%,可以忽略不计。因此,将研究区域按照40 000 hm²划分为33个子流域时,西苕溪各子流域的年均产沙量主要集中在0.5~2 t/hm²范围内,产沙总量在整个流域占比99.9%。结合图8,可以观察到流域产沙主要集中在人类活动影响较为密切、土地利用类型为耕地的西北平原区。这是因为自20世纪60年代以来,下游浑泥港地区的森林植被长时间受到破坏,人类活动的增加对流域输沙量造成了相对较大的影响,这与相关研究土地利用类型与土壤侵蚀的研究结果一致^[25]。通过建立子流域耕地面积占比与年均产沙量的线性回归曲线,发现两者具有较好的线性函数关系,即 $y=0.0202x+0.539$ ($R^2=0.748$, $p<0.001$,图10)。也就是说,耕地面积越大的子流域,其输沙量越大。

于耕地面积较大、坡度较低的流域中部地区。年均降雨量<1600 mm的有两个子流域,分别是1,2号子流域,位于地势平坦的流域出水口处,径流深最低,约为800 mm。可以看出,西苕溪流域降水十分丰富,对流域产流贡献较大。在降雨较多的时期,流域的高径流产出可能会引发洪涝灾害,需要进一步完善流域水情灾害预警机制和灾害应急处理预案。

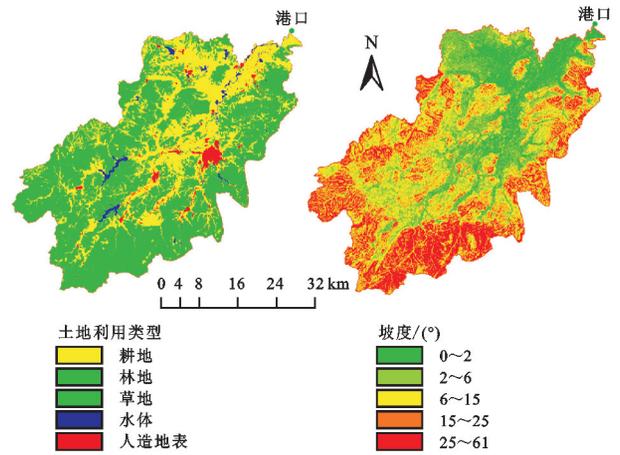


图8 西苕溪流域坡度和土地利用现状
Fig. 8 Current status of slope and land use in the Xitiaozi watershed

将整个流域的耕地用地面积占比带入计算,得到整个流域的年均输沙量约为 (1.02 ± 0.44) t/hm²,与先前统计整个流域的年均输沙量1.1 t/hm²基本接近。由此可见,流域内的耕地作为输沙的重要单元,需要进一步落实拦截工程,以减少土壤侵蚀和水土流失。

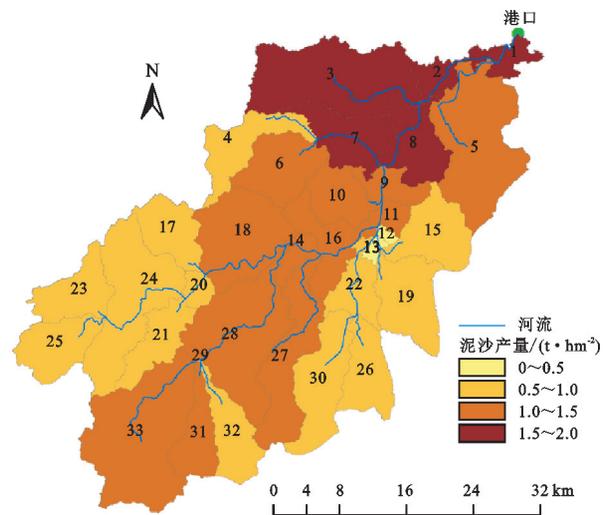
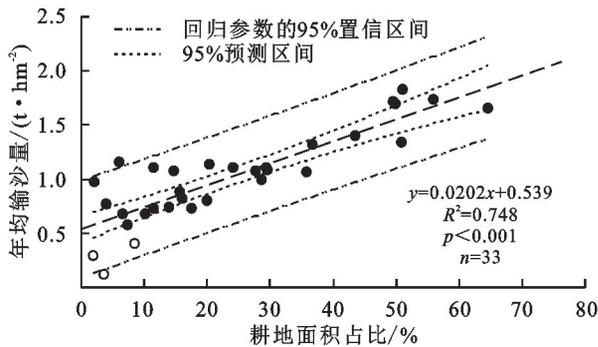


图9 西苕溪流域产沙量空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of sediment yield in the Xitiaozi watershed

同时,为了研究流域输沙与地形坡度之间的关系,本研究将子流域的年均输沙量由低到高划分为3个梯度,即0.5~1 t/hm² (I),1~1.5 t/hm² (II)和1.5~2 t/hm² (III),并去除了12,13,19这3个子流

域。从图 11 可以看出,年均输沙量在 1.5~2 t/hm² 范围内的子流域坡度多以小于 6° 的平缓坡为主,即流域内西北角的平原区。这一区域地形平坦开阔,水源充足,耕地面积占比大,因此土壤侵蚀量较大。年均输沙量在 1~1.5 t/hm² 范围内的子流域坡度多以小于 15° 为主,其次是大于 25°。而年均输沙量在 0.5~1 t/hm² 范围内的子流域坡度分配比较均衡,并无明显优势,这可能是由于这个梯度的泥沙输出量较低,受多种因素综合的作用比较明显。总的来说,流域输沙主要以 15° 以下和 25° 以上坡度占比较大的子流域为主。这是因为 15° 以下的平缓坡地区人类活动更为显著,适宜旱地和水田耕作,较易发生农业侵蚀^[26],而处于 25° 以上的陡坡地区,坡度型土壤侵蚀和经济林地的砍伐则会加重土壤侵蚀。虽然研究区植被覆盖程度较高,林地面积大,加之近些年来水土保持措施的推进,各子流域均以微度侵蚀为主,但流域内耕地类型为主的子流域输沙和 25° 以上的坡度型输沙仍然是流域重要的输沙来源,在降雨量较大的时期,仍可能造成较大的土壤侵蚀。



注:该数据集统计了 2016—2020 年间 33 个子流域的年均输沙量模拟值。其中,空心圆点对应分析中的 12,13,29 三个子流域以水体和人造地表为主。

图 10 子流域耕地面积占比与年均产沙量的线性回归
Fig. 10 Linear regression between sub-basin cultivated area proportion and annual average sediment yield

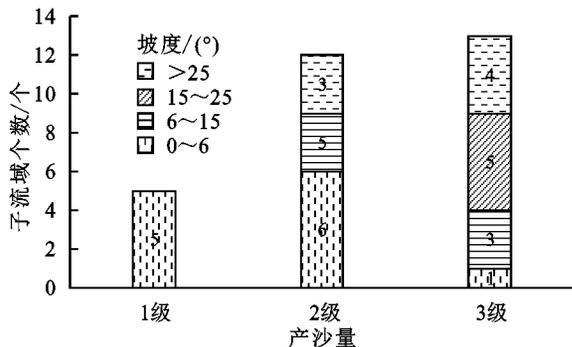


图 11 不同子流域年均产沙量等级下主要坡度类型
Fig. 11 Main slope types for different sub-basins at different levels of annual average sediment yield

2.3 不确定性分析

建立流域水文分布模型的过程中存在不确定性,主要包括以下几个方面。首先,基础数据的不确定性,如不同标准所划分的土壤与地物类型以及流域极端气候下气象数据,都会影响模型的准确性。其次,模型参数的不确定性,不同参数之间的相关性以及空间变化和动态异质性都会导致模拟结果的不确定性^[27]。最后,子流域划分的不确定性,不同的划分方法引起的土地利用空间离散化对径流、输沙模拟结果的影响具有不确定性^[28]。此外,流域内人类活动对水文循环过程的影响也具有不确定性,如人为引水、坝库调节、水利水电开发等工程措施会影响河流输沙沉降与入湖物质通量,从而影响模型的输出结果。因而,建立流域水文分布模型时需要考虑这些不确定性因素,采用合理的方法和技术手段来降低其对模型结果的影响。

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 流域内港口水文站 2016—2020 年月尺度上的模拟径流和输沙与实测径流和输沙较为贴合。模拟径流的率定和验证期 R² 值和 NS 值均大于 0.8,百分比偏差均小于 10%。模拟输沙的率定和验证期 R² 值和 NS 值均大于 0.5,百分比偏差均小于 10%。表明 SWAT 模型对西苕溪流域径流和输沙模拟具有一定的适用性。

(2) 流域内雨季(4—9 月)年均径流深为 588 mm,全年占比 63.2%。平均产沙量为 0.83 t/hm²,全年占比 75.1%;流域内非雨季(10 月—翌年 3 月)年均径流深为 342 mm,全年占比 36.8%。平均产沙量为 0.27 t/hm²,全年占比 24.9%。可以看出,西苕溪流域水沙产出具有明显的季节分布特征,雨季是水沙产出主要季节。

(3) 流域内产水产沙具有一定的空间差异性。径流主要集中在流域上游西南地区 and 下游东北地区,而中部地区径流较低,与流域降雨量分布基本保持一致(相关系数 R = 0.96)。产沙主要集中在流域西北平原区和中部河谷地带,坡度梯度小于 15° 或大于 25° 且用地类型为耕地的区域。

(4) 流域内年均径流深主要集中在 800~1 100 mm 范围,产沙量主要集中在 0.5~2 t/hm² 范围,整个流域以微度侵蚀为主。主要产沙子流域与耕地面积占比具有极显著的关系,满足关系式 $y = 0.0202x + 0.539$ ($R^2 = 0.748, p < 0.001$)。在流域多年用地类型保持不变的情况下,流域年均产沙量约为 (1.02 ± 0.44) t/hm²。

3.2 建议

(1) 流域内水文分布模型存在多种不确定性,适用性时间短,或者变化性大。未来期望能够建立一个数据共享平台,获取的数据具有统一的标准和较强的连续性,数据实时更新录入平台,专业人员定期评估模型,共同构建智慧流域。最终服务于流域综合治理建设管理,推进流域互联网与水务的融合发展,打造智慧高效的流域综合治理典范^[29]。

(2) 流域水沙产出特征研究可为流域水资源管理和水土保持提供重要理论依据。同时,河流泥沙作为非点源颗粒状态污染物质的重要载体,对河流、湖泊水质也具有一定影响^[2]。因此,西苕溪流域需要继续保持水土,控制入湖泥沙量。建议在流域地势陡峭的上游腹地强化造林治理,实施拦挡工程;在人类活动比较密集的地区合理安排生产生活和优化国土空间格局,采取打坝淤地,修筑梯田等工程措施。

参考文献(References):

- [1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. *Global and Planetary Change*, 2003,39:111-126.
- [2] 王晓颖,宋培兵,廖卫红,等.气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究[J].*水资源与水工程学报*,2020,31(4):50-56.
Wang X Y, Song P B, Liao W H, et al. Quantitative analysis of the influences of climate change and human activities on runoff variations of Baihe River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020,31(4):50-56.
- [3] 张晓艳,刘梅先.气候变化及人为活动对湘江流域径流和输沙的影响[J].*水土保持研究*,2018,25(1):30-37.
Zhang X Y, Liu M X. Effects of climate change and human activities on water and sediment discharge in Xiangjiang Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(1):30-37.
- [4] Cheng X, Ma X X, Wang W S, et al. Application of HEC-HMS parameter regionalization in small watershed of hilly area[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35:1961-1976.
- [5] Zhang J, Zhang M, Song Y Y, et al. Hydrological simulation of the Jialing River Basin using the MIKE SHE model in changing climate[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2021,12(6):2495-2514.
- [6] Wang L L, Cherkauer K A, Flanagan D C. Impacts of climate change on soil erosion in the Great Lakes region[J]. *Water*, 2018,10(6):715.
- [7] Chen L, Dai Y, Zhi X S, et al. Quantifying nonpoint source emissions and their water quality responses in a complex catchment: A case study of a typical urban-rural mixed catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 559:110-121.
- [8] Li Y Y, Wang H, Deng Y Q, et al. Applying water environment capacity to assess the non-point source pollution risks in watersheds[J]. *Water Research*, 2023, 240:120092.
- [9] Deng Z M, Zhang X, Li D, et al. Simulation of land use/land cover change and its effects on the hydrological characteristics of the upper reaches of the Hanjiang Basin[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,73:1119-1132.
- [10] Worku G, Teferi E, Bantider A, et al. Modelling hydrological processes under climate change scenarios in the Jemma sub-basin of upper Blue Nile Basin, Ethiopia [J]. *Climate Risk Management*, 2021,31:100272.
- [11] 刘腊美,龙天渝,李崇明.三峡水库上游流域非点源颗粒态磷污染负荷研究[J].*长江流域资源与环境*,2009, 18(4):320-325.
Liu L M, Long T Y, Li C M. On the non-point source pollution of particulate phosphorus in the upstream watershed of the Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009,18(4): 320-325.
- [12] 荣易,秦成新,杜鹏飞,等.基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析[J].*环境科学*,2021,42 (6):2769-2777.
Rong Y, Qin C X, Du P F, et al. Characteristic analysis of SWAT model parameter values based on assessment of model research quality [J]. *Environmental Science*, 2021,42(6):2769-2777.
- [13] 郑思远,王飞儿,俞洁,等.水文响应单元划分对 SWAT 模型总氮模拟效果的影响[J].*农业环境科学学报*, 2019,38(6):1305-1311.
Zheng S Y, Wang F E, Yu J, et al. Effect of hydrologic response unit delineation on the SWAT model results of total nitrogen simulation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019,38(6):1305-1311.
- [14] Xiang X, Ao T Q, Xiao Q T, et al. Parameter sensitivity analysis of SWAT modeling in the upper Heihe River Basin using four typical approaches[J]. *Applied Sciences*, 2022,12(19):9862.
- [15] 聂小军,苏艳艳.川中丘陵区紫色土坡耕地土壤侵蚀特征[J].*生态环境学报*,2012,21(4):682-686.
Nie X J, Su Y Y. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands in a purple hilly region of the Sichuan Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(4):

- 682-686.
- [16] 邵辉,高建恩,Claire Baffaut,等.基于SWAT模型新开梯田模块的中国南方红壤区梯田水沙及养分流失模拟[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(5):147-156.
Shao H, Gao J E, Baffaut C, et al. Simulation of sediment and nutrients runoff of terrace in the red soil district of China using the newly developed terrace algorithm within SWAT model[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014,42(5):147-156.
- [17] 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.
Bi Z L, Zhang Y, Zhang X, 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.
- [18] 中华人民共和国水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 190—2007 Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [19] 聂小飞,郑海金,涂安国,等.南方红壤区长期水土流失综合治理显著减少河流输沙:以鄱阳湖流域赣江上游平江为例[J].湖泊科学,2021,33(3):935-946.
Nie X F, Zheng H J, Tu A G, et al. Long-term soil and water conservation in red soil region of southern China significantly reduced riverine sediment load: A case study of Pingjiang River in the upper reaches of Ganjiang River, Lake Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2021,33(3):935-946.
- [20] 曾海鳌,吴敬禄.太湖洩东流域陆地侵蚀与入湖物质通量的定量关系研究[J].长江流域资源与环境,2010,19(6):707-713.
Zeng H A, Wu J L. Quantifying the relationship between soil erosion and material fluxes from the Fudong watershed to Lake Taihu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010,19(6):707-713.
- [21] 薛天翼,武旭同,朱晨怡,等.红水河流域输沙量变化及其影响因素[J].地理科学进展,2019,38(5):772-782.
Xue T Y, Wu X T, Zhu C Y, et al. Change of sediment load and its influencing factors in the Hongshui River Basin in Southwestern China [J]. Progress in Geography, 2019,38(5):772-782.
- [22] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.
He J J, Cai Q G, Liu S B. Effects of slope gradient on slope runoff and sediment yield under different single rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(5):1263-1268.
- [23] 郑莉萍,胡煜佳,张森林,等.基于SWAT模型的璧南河流域径流模拟分析[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2023,40(3):31-47.
Zheng L P, Hu Y J, Zhang S L, et al. Simulation analysis of runoff in Binan River Basin based on SWAT model[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2023,40(3):31-47.
- [24] 郭晓娜,武玮,郑从奇,等.山东省主要河流近60a径流变化及其归因分析[J].济南大学学报:自然科学版,2022,36(4):372-379.
Guo X N, Wu W, Zheng C Q, et al. Runoff variation and its attribution analysis of major rivers in Shandong Province during recent 60 a [J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2022,36(4):372-379.
- [25] Preiti G, Romeo M, Bacchi M, et al. Soil loss measure from Mediterranean arable cropping systems: Effects of rotation and tillage system on C-factor[J]. Soil and Tillage Research, 2017,170:85-93.
- [26] 黄清华,张万昌.SWAT模型参数敏感性分析及应用[J].干旱区地理,2010,33(1):8-15.
Huang Q H, Zhang W C. Application and parameters sensitivity analysis of SWAT model [J]. Arid Land Geography, 2010,33(1):8-15.
- [27] 刘希琛,阚光远,梁珂.流域水文模型参数不确定性量化技术研究进展[J].山东农业大学学报:自然科学版,2023,54(3):468-476.
Liu X C, Kan G Y, Liang K. Research progress in quantifying parameters uncertainties in basin hydrological models[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2023,54(3):468-476.
- [28] 钟小敏,钟科元,高怡婷,等.SWAT模型子流域划分引起的土地利用变化对径流和输沙模拟结果的影响[J].水土保持研究,2022,29(6):52-58.
Zhong X M, Zhong K Y, Gao Y T, et al. Effect of land use change caused by sub-watershed division in SWAT model on runoff and sediment simulation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):52-58.
- [29] 王冠,孔宇.沙坪河河道流域智慧水务建设方案研究[J].给水排水,2020,56(3):148-152.
Wang G, Kong Y. Study on smart water affair construction scheme in Shaping river basin [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020,56(3):148-152.