

# 基于 SWAT 模型的寿昌江流域产沙模拟及影响因素分析

李朝月<sup>1,2</sup>, 方海燕<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,  
北京 100101; 2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)

**摘要:** 为分析山地丘陵地带侵蚀产沙的变化及驱动机制,应用 SWAT 模型对浙江省建德市寿昌江流域进行了产流产沙模拟,并基于 Fragstats 4.2 对不同年份土地利用数据进行景观指数计算,进而分析流域内侵蚀产沙状况,探讨了坡度、坡长、海拔高程、流域面积、降雨以及景观格局对侵蚀产沙的影响,并进行主成分分析。结果表明:(1)构建的 SWAT 模型在寿昌江流域具有很好的适用性,在产流模拟中,校准期和验证期的  $R^2$  分别为 0.95 和 0.88, NSE 分别为 0.93 和 0.87, PBIAS 分别为 +4.96% 和 +5.36%; 在产沙模拟中,校准期和验证期的  $R^2$  分别为 0.73 和 0.72, NSE 分别为 0.69 和 0.64, PBIAS 分别为 -4.3% 和 -20%, 均满足模拟要求,保证了模拟结果的精度。(2)整个寿昌江流域 1980—2010 年最大侵蚀产沙负荷均小于 500 t/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),土壤侵蚀强度属于微度,土壤保持能力良好。(3)地形因子、景观多样性因子、景观形状因子、雨强因子 4 个主成分对产沙模数的贡献率分别为 51.48%, 18.51%, 10.70%, 6.94%, 地形因子是影响流域侵蚀产沙的主要因素。(4)景观指数与产沙模数间存在显著相关性且对产沙影响显著,在今后的土地利用规划中应考虑景观特征,达到改善流域土壤侵蚀的目的。

**关键词:** 侵蚀产沙; SWAT 模型; 寿昌江流域; 主成分; 景观指数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0127-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.018

## Simulation of Sediment Yield and Analysis of Influencing Factors in the Shouchang River Basin Based on SWAT Model

LI Chaoyue<sup>1,2</sup>, FANG Haiyan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** In order to analyze the change and driving mechanism of erosion and sediment yield in the hillside area, this paper applied SWAT model to simulate sediment yield in Shouchang River Basin of Jiande City, Zhejiang Province, and calculated the landscape metrics based on Fragstats 4.2 for land use data in different years. The sediment yields in the basin were analyzed, the effects of slope, slope length, elevation, drainage area, rainfall, and landscape pattern on soil and sediment yield were discussed, and the principal components analysis was carried out. The main results were as follows: (1) The SWAT model had good applicability in the Shouchang River basin,  $R^2$ , NSE and PBIAS all met the simulation and ensured the accuracy of the simulation results. (2) The maximum sediment yield of the entire Shouchang River basin from 1980 to 2010 was less than 500 t/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ), and the soil erosion intensity was slight and the soil erosion retention ability was good. (3) The contribution rates of four principal components of topographic factor, landscape diversity factor, landscape shape factor, and rain intensity factor to sediment yield were 51.48%, 18.51%, 10.70%, and 6.94%, respectively, and topographic factor was the main factor affecting soil erosion and sediment yield. (4) There was a significant correlation between the landscape metrics and the sediment yield, and the landscape metrics had a significant impact on the sediment yield. In the future land-use planning, the landscape characteristics should be effectively considered to improve the soil erosion in the basin.

收稿日期: 2019-05-15

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41571271, 41977066)

第一作者: 李朝月(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: licy.17s@igsnr.ac.cn

通信作者: 方海燕(1977—), 男, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: fanghy@igsnr.ac.cn

**Keywords:** soil erosion and sediment yield; SWAT model; Shouchang River Basin; principal components; landscape metrics

人类活动对下垫面的改造,尤其是土地利用格局的变化,在自然因素的引发下导致土壤侵蚀加剧,造成流域土壤养分流失、肥力下降、土地生产力降低,泥沙进入河道和水库,淤积河床,同时径流携带的营养物质加剧水体污染<sup>[1-2]</sup>。因此,研究影响流域侵蚀产沙的各种因素,通过水沙模拟筛选出危害因子,以制定和实施有效的水土保持措施,对改善流域生态环境,实现人与自然和谐相处以及可持续发展具有重要意义。

基于 GIS 技术和分布式水文模型的应用,可以有效地定量分析土壤侵蚀,如长时段的流域分布式水文模型 SWAT (soil and water assessment tool)。SWAT 模型具有很强的物理基础,主要用来模拟水土流失、非面源污染、农业管理措施等问题,适用于不同的土地利用类型、土壤类型和地形条件的复杂流域,并能在资料不足的地区进行模拟,弥补了传统水文模型对数据丰富度的要求,且满足模拟精度的要求<sup>[3-5]</sup>。

流域侵蚀产沙与多种因素有关。朱惇等<sup>[6]</sup>计算不同环境背景下的土壤侵蚀综合指数,并分析了土壤侵蚀与所选因素间的关系;Ma 等<sup>[7]</sup>以子流域为基础,定量分析了沂蒙山区土壤侵蚀风险空间格局与坡度、降雨、土地利用等影响因素之间的关系变化;冯君园等<sup>[8]</sup>选取气候因子、地形因子、植被因子和土壤因子,基于主成分分析方法提取融水侵蚀的主要影响因素。气候、地形地貌、土壤属性等对流域侵蚀的影响研究已相对成熟,土地利用对侵蚀产沙的影响的研究大多针对某一单一土地利用类型<sup>[9-10]</sup>,土地利用变化下景观格局变化与侵蚀产沙的关系研究尚不成熟。景观格局指标是表征景观的基本指标<sup>[11-13]</sup>,定量描述景观的组成结构和空间配置等信息,高度概括景观格局的复杂特征<sup>[14]</sup>。景观指数是景观格局分析常用的工具,在 Fragstats 软件出现之后,景观指数得到更广

泛的应用。景观指数包括斑块水平、景观类型水平和景观水平等类型。地理信息技术和景观格局理论方法的逐步发展,推进了景观格局与生态过程的关系研究,并逐步应用到流域侵蚀产沙研究中<sup>[15-16]</sup>。

目前,我国自引进 SWAT 模型后,较多地应用在水土流失相当严重的侵蚀产沙研究中,在南方山地丘陵地区的侵蚀研究相对较少,特别是在钱塘江流域,有关研究就钱塘江流域的水文径流展开分析<sup>[17]</sup>,但流域的产沙模拟分析尚待补充。径流和产沙是相互影响、不可分割的水文过程。因此,本文基于 SWAT 2012 构建寿昌江流域水文模型,对流域多年的产流产沙进行模拟,利用最佳参数模拟结果对寿昌江流域侵蚀产沙状况进行分析,运用主成分分析对寿昌江流域侵蚀产沙强度进行综合评价,探寻流域侵蚀分布特征与主控因子的响应关系,以期为该地区侵蚀研究或水土保持的布设提供参考,弥补产沙模拟的空白。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

寿昌江是建德境内新安江的最大支流,是建德市三大水系之一,属山溪性河流(图 1)。源口水文站控制的流域面积 680.28 km<sup>2</sup>,主流长 63.5 km,干流长 33.7 km,共有 7 条支流汇入,包括大同、翠坑、乌龙、南浦、老村、小江、童家等溪流。

研究区属于亚热带季风气候区,四季分明,水热条件优越,流域多年平均气温约 17 ℃,多年平均降水量 1 200~2 200 mm,受地貌影响,流域内降水呈现自西南向东北递减的趋势,且受季风影响,降水年内分布不均,集中在 4—9 月,占全年降水量的 60%。主要土壤类型有红壤、黄壤、黄棕壤、粗骨土和水稻土。土地利用类型主要有林地、草地、水田、旱地和城镇用地,其中地带性植被是中亚热带常绿阔叶林。

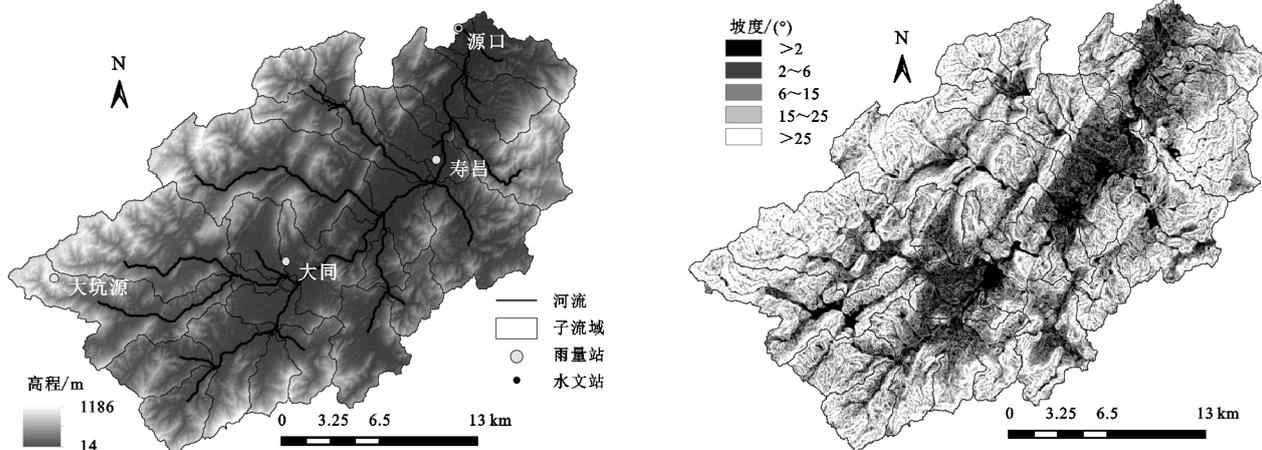


图 1 研究区位置及坡度分布

## 1.2 数据来源与处理

本研究采用的 1980 年、1990 年、2000 年和 2010 年土地利用数据由国家地球系统科学数据共享服务平台提供(<http://www.geodata.cn/>);数字高程数据(DEM)分辨率为 30 m(图 1),下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);土壤数据来源于世界土壤数据库(harmonized world soil database,简称 HWSO);逐日实测径流和泥沙数据源于 1976—1989 年源口水文站水文年鉴;气象数据(最低温度、最高温度、太阳辐射、风速)则从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获得,流域内雨量站的逐日降雨数据来自寿昌江流域的水文年鉴。

有研究<sup>[18-19]</sup>表明,不同土地利用和植被景观格局的径流产沙效果不同。因此,本文基于相关研究,遴选出 10 个景观指数来描述景观特征(表 1)。所选景观指数包括面积—边缘指数、形状指数、聚散性指数和多样性指数,这些指数在土壤侵蚀与土地覆被类型的响应关系研究中已广泛应用<sup>[12,20-21]</sup>。所选景观指数均可用 Fragstats 4.2 软件计算。

表 1 本研究中使用的景观指数

| 序号 | 指数名称        | 缩写       | 应用尺度    | 类别    |
|----|-------------|----------|---------|-------|
| 1  | 斑块密度        | PD       | 斑块类型    | 聚散性   |
| 2  | 最大斑块占景观面积比例 | LPI      | 斑块类型    | 面积—边缘 |
| 3  | 边缘密度        | ED       | 斑块类型/景观 | 面积—边缘 |
| 4  | 斑块平均大小      | SHAPE_MN | 斑块类型    | 形状    |
| 5  | 平均斑块分维数     | FRAC_MN  | 斑块类型    | 形状    |
| 6  | 蔓延度指数       | CONTAG   | 斑块类型    | 聚散性   |
| 7  | 斑块结合指数      | COHESION | 斑块类型    | 聚散性   |
| 8  | 香农多样性指数     | SHDI     | 景观      | 多样性   |
| 9  | 香农均匀度指数     | SHEI     | 景观      | 多样性   |
| 10 | 聚合度         | AI       | 斑块类型/景观 | 聚散性   |

## 1.3 SWAT 模型构建

SWAT 模型是一个半分布式水文模型,基于 DEM 数据和河网分布,将流域分为若干子流域,并以

表 2 寿昌河流域土地利用类型代码转换与重分类

| 一级分类    | 原分类及代码                        | 重分类及代码                           |
|---------|-------------------------------|----------------------------------|
| 耕地      | 山地水田(111)、丘陵水田(112)、平原水田(113) | Rice(RICE)                       |
|         | 山地旱地(121)、丘陵旱地(122)、平原旱地(123) | Agricultural Land-Generic(AGRL)  |
| 林地      | 有林地(21)、灌木林(22)、疏林地(23)       | Forest-Mixed(FRST)               |
|         | 其他林地(24)                      | Orchard(ORCD)                    |
| 草地      | 高覆盖度草地(31)、低覆盖度草地(33)         | Pasture(PAST)                    |
| 水域      | 河渠(41)、水库坑塘(43)               | Water(WATR)                      |
| 城乡、居民用地 | 城镇用地(51)                      | Residential-Middle Density(URMD) |
|         | 农村居民点(52)、其他建设用地(53)          | Residential-Low Density(URLD)    |
| 未利用地    | 裸土地(65)                       | Bare land(BARR)                  |

在 SWAT 模拟时,采用 1980 年的土地利用数据作为基准,径流、泥沙数据的时间为序列为 1976—1989 年,

相对均质的水文响应单元(HRU, hydrological response unit)为模拟单元精确地模拟复杂流域中的径流、泥沙、氮—磷、杀虫剂等产出量,然后累计到子流域的产出,并能预测土地利用变化及土地管理措施产生的影响<sup>[22]</sup>。

在 SWAT 模型中,对由降雨及地表径流产生土壤侵蚀的计算采用 MUSLE(modified version of universal soil loss equation)计算。在模拟流域土壤侵蚀时,泥沙从陆地输移到水体包括 2 个阶段:(1)土壤颗粒的剥离过程;(2)土壤随径流的输移过程。径流的流量和流速,既反映了降水能量,还能进一步反映泥沙输移过程。采用径流因子,不再考虑输移比参数,提高了产沙预测精度。其计算过程为:

$$\text{sed} = 11.8 \cdot (Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot A_{\text{hru}})^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot \text{CFRG} \quad (1)$$

式中:sed 为土壤流失量(t); $Q_{\text{surf}}$ 为地表径流(mm/h); $q_{\text{peak}}$ 为洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $A_{\text{hru}}$ 为的面积( $\text{hm}^2$ ); $K$ 为土壤可蚀性因子; $C$ 为土地覆被管理因子; $P$ 为水土保持措施因子; $LS$ 为地形因子; $\text{CFRG}$ 为粗糙系数。

SWAT 模型构建时根据模型提供的土地利用数据库建立土地利用索引表,对其进行重分类(表 2)。同时建立与 SWAT 土壤数据库对应的土壤分类索引表,并对土壤类型栅格数据进行重分类。根据我国对耕地利用的影响限制程度将坡度划分为 5 级,即  $\leq 2^\circ$ ,  $2^\circ \sim 6^\circ$ ,  $6^\circ \sim 15^\circ$ ,  $15^\circ \sim 25^\circ$ ,  $> 25^\circ$ (图 1)。采用 Krasovsky\_1940\_Albers 投影对所有空间数据进行投影转换,使之统一都在同一坐标系中。选择源口水文站作为流域出口,从而研究的区域涵盖了整个寿昌江流域,汇水面积达  $680 \text{ km}^2$ 。SWAT 模型划分子流域时设置阈值为  $1200 \text{ hm}^2$ ,将整个流域划分为 35 个子流域。在定义 HRU 时,将土地利用面积、土壤面积和坡度面积的最小阈值比依次设为 10%,15%,20%,最终得到 230 个 HRU。

气象数据的时间序列为 1970—2005 年。为确保模拟的准确性和稳定性,设置 1 年的预热期(1976 年),校准和

验证周期分别为 1977—1982 年、1983—1989 年。为了探讨不同土地利用变化下景观格局对流域侵蚀产沙的影响,依次采用 1990 年、2000 年和 2010 年的土地利用数据模拟寿昌江流域的侵蚀产沙变化。

本研究采用 SWAT-CUP(SWAT-Calibration and Uncertainty Programs)中的 SUFI-2 算法对所构建的 SWAT 模型进行参数敏感性分析、率定、验证和不确定性分析。在 SWAT-CUP 中利用 SUFI-2 算法进行多次迭代,迭代结果会显示参数敏感性分析、 $p$ -factor 值、 $r$ -factor 值和每次模拟的 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)和决定系数( $R^2$ )值,并推荐新的参数范围以及模拟的最优值。通过参数敏感性分析,添加了 7 个参数对径流进行校准,迭代 200 次,确定了径流曲线数  $CN_2$ 、土壤可利用水量  $SOL\_AWC$ 、基流消退系数  $ALPHA\_BF$ 、土壤蒸发补偿系数  $ESCO$ 、河道有效水力传导度  $CH\_K_2$ 、地下水再蒸发系数  $GW\_REVAP$ 、土壤饱和导水率  $SOL\_K$  的最

终参数范围(表 3)。将校准期获得的最优参数范围固定,带入验证期进行一次迭代,观察迭代效果。然后固定径流参数添加仅对泥沙敏感的参数进行校准,最终的参数范围见表 4,包括泥沙输移线性指数  $SP\_CON$ 、泥沙输移指数  $SPEXP$ 、USLE 方程土地覆被管理因子  $USLE\_C$ 、平均坡长  $SLSUBBSN$ 、平均坡度等级  $SLOPE$ 、水土保持措施因子  $USLE\_P$ 、USLE 方程中的土壤可蚀性因子  $USLE\_K$ ,其验证过程与分析径流模拟时相同。

表 3 径流模拟的敏感性参数及率定值

| 参数                   | 参数定义      | 范围        | 率定值     |
|----------------------|-----------|-----------|---------|
| $r\_CN_2.mgt$        | 径流曲线数     | -0.2~0.2  | 0.180   |
| $v\_ESCO.hru$        | 土壤蒸发补偿系数  | 0~1       | 0.890   |
| $r\_SOL\_K(1).sol$   | 土壤饱和导水率   | -0.8~0.8  | 0.570   |
| $v\_CH\_K_2.rte$     | 河道有效水力传导度 | -0.01~500 | 103.730 |
| $v\_ALPHA\_BF.gw$    | 基流消退系数    | 0~1       | 0.058   |
| $v\_GW\_REVAP.gw$    | 地下水再蒸发系数  | 0.02~0.2  | 0.167   |
| $r\_SOL\_AWC(1).sol$ | 土壤可利用水量   | -0.2~0.4  | -0.070  |

表 4 泥沙模拟的敏感性参数及率定值

| 参数                     | 参数定义     | 范围          | 率定值                           |
|------------------------|----------|-------------|-------------------------------|
| $v\_SPCON.bsn$         | 泥沙输移线性指数 | 0.0001~0.01 | 0.006                         |
| $v\_SPEXP.bsn$         | 泥沙输移指数参数 | 1~1.5       | 1.25                          |
| $v\_USLE\_C.plant.dat$ | 土地覆被管理因子 | 0.001~0.5   | 林地:0.10<br>草地:0.15<br>耕地:0.35 |
| $v\_SLSUBBSN.hru$      | 平均坡长     | 0~150       | 9.55                          |
| $v\_HRU\_SLP.hru$      | 平均坡度等级   | 0~1         | 0.157                         |
| $v\_USLE\_P.mgt$       | 水土保持措施因子 | 0~1         | 0.07                          |
| $v\_USLE\_K.sol$       | 土壤可蚀性因子  | 0~0.65      | 0.22                          |

在模拟过程中选用  $R^2$  和 NSE 系数评估模型的适用性。计算公式分别为:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{avg})(Q_{si} - Q_{avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{avg})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{avg})^2} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{avg})^2} \quad (3)$$

式中: $R^2$ 为模型模拟的相关系数; $Q_{oi}$ 和  $Q_{si}$ 分别为实测值和模拟值; $Q_{avg}$ 和  $Q_{savg}$ 分别为实测值和模拟值的均值; $n$ 为数据的个数。

此外,采用百分比偏差(PBIAS)指标评估泥沙模拟的准确性,用来比较观测值和模拟值的平均趋势<sup>[23]</sup>,能够准确评估模型性能<sup>[24]</sup>。计算公式为:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \cdot 100 \right] \quad (4)$$

式中:变量含义与公式(2)、(3)中的意义相同。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型校准和验证

有研究<sup>[25-26]</sup>认为,在流域模拟时  $R^2$  和 NSE 大于

0.5 时,结果是可被接受的。在月时间尺度,径流模拟效果非常好,校准期和验证期的最佳模拟值的  $R^2$  和 NSE 分别为 0.95 和 0.88,0.93 和 0.87。在月时间尺度,泥沙模拟效果良好,校准期和验证期的最佳模拟值的  $R^2$  和 NSE 分别为 0.73 和 0.72,0.69 和 0.64,满足模拟要求,但强降水时段模拟值低于实测值<sup>[27]</sup>,尤其是洪峰期误差较大<sup>[28]</sup>。寿昌江流域源口站的径流和泥沙的校准和验证结果见图 2。一般认为,当径流的 PBIAS 为  $\pm 25$ ,泥沙为  $\pm 55$ ,模型模拟结果是令人满意的<sup>[25]</sup>。在径流和泥沙的校准期和验证期,PBIAS 分别为  $+4.96\%$  和  $+5.36\%$ , $-4.30\%$  和  $-20.00\%$ 。

以上 3 个评价指标的分析结果表明,SWAT 模型对研究区径流、泥沙模拟都达到了满意的精度,表明了模型在寿昌江流域的适用性。

### 2.2 流域产沙时空格局

利用 SWAT 模型模拟了各子流域的产沙状况(图 3)。表 5 统计分析了不同年份 35 个子流域的侵

蚀产沙状况。不同土地利用结构的侵蚀结果表明了相似的分布模式,产沙模数在空间上分布不均匀,在时间上变化不明显。侵蚀严重的子流域多集中河流

两侧的陡峭山地,而北部产沙模数低于南部,可能是因为其分布的主要土地覆被类型是陡峭山区的森林,林下侵蚀严重。

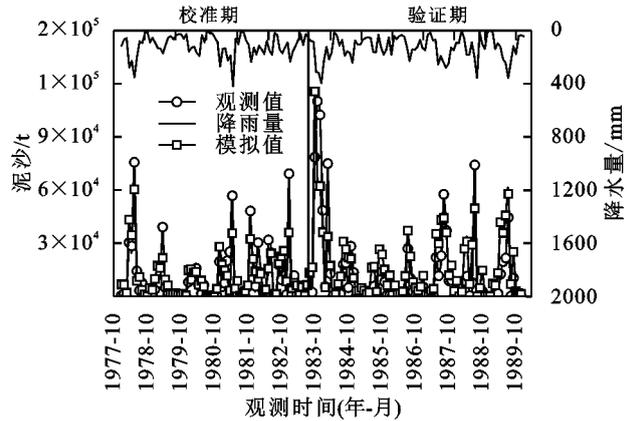
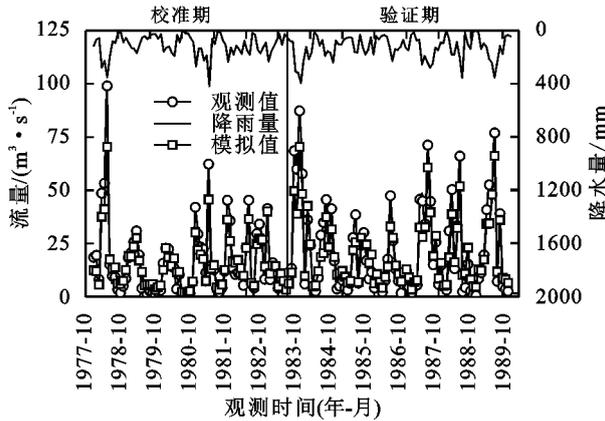


图 2 径流和泥沙的校准和验证

模拟结果表明,1980年、1990年、2000年和2010年流域平均产沙模数分别为146.24,142.10,77.24,77.30 t/(km<sup>2</sup>·a),呈减小趋势;产沙模数的变异系数依次为69.9%,68.7%,77.4%和78.8%,产沙空间分布更加离散化。1980年、1990年、2000年和2010年最大侵蚀产沙负荷均发生在子流域27,产沙模数

分别为459.7,396.2,235.7,247.7 t/(km<sup>2</sup>·a)。侵蚀相对严重的地区包括子流域19,30,26,31,32。寿昌江下游侵蚀减弱,主要包括子流域1,3,9,10。根据水利部颁布的土壤侵蚀分级分类标准<sup>[29]</sup>对各子流域的土壤侵蚀强度进行分级,可知整个寿昌江流域土壤侵蚀强度属于微度。

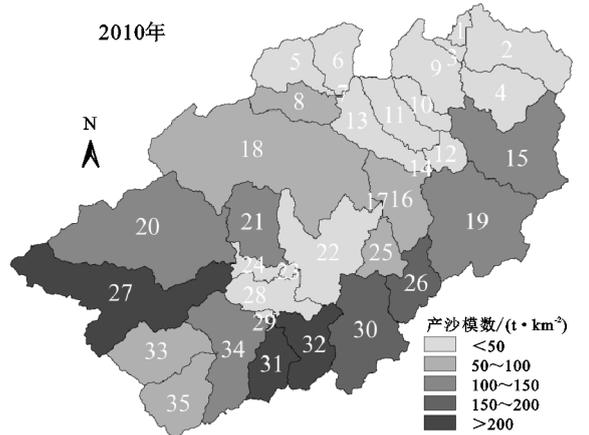
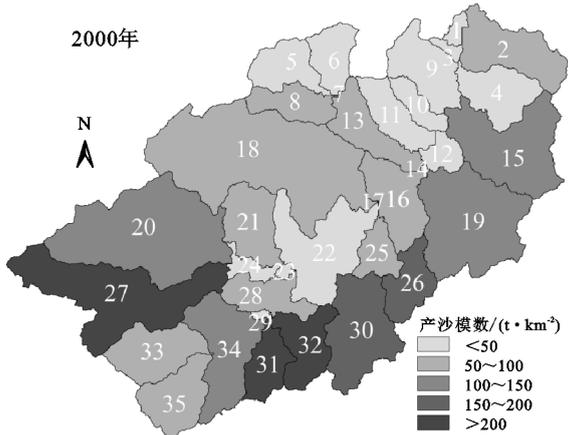
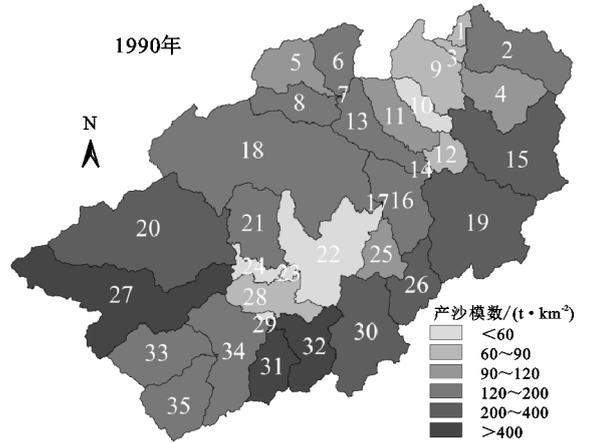
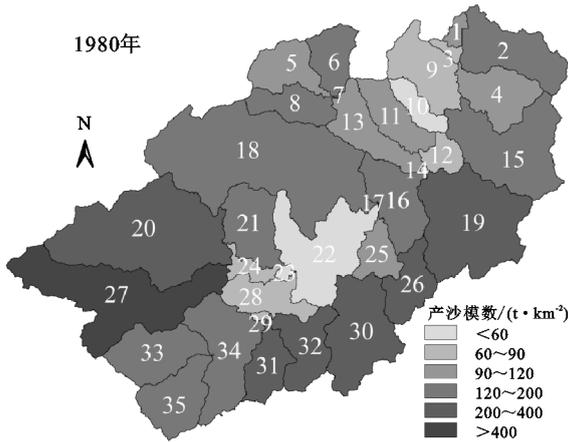


图 3 不同年份子流域土壤侵蚀分布

### 2.3 流域产沙影响因素特征

2.3.1 地形与流域面积 坡度是影响山区侵蚀产沙的重要因素<sup>[30]</sup>。寿昌江流域的子流域平均坡度(AS)分

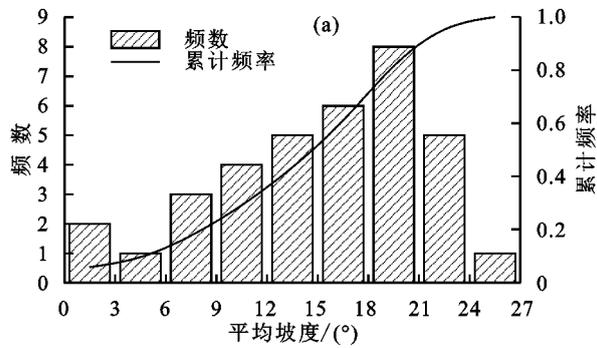
布见图4a。从图4a可以看出,各子流域的平均坡度分布在0~27°,空间分布的差异较明显,子流域平均坡度在12°以下约占28%,近55%的子流域平均坡度分布在

12°~21°, 平均坡度大于 21°的子流域约占 17%。

表 5 35 个子流域土壤侵蚀统计分析

| 年份   | 产沙模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |        |        |        | 变异系数/% |
|------|---|--------|--------|--------|--------|
|      | 最小值   | 最大值    | 均值     | 标准差    |        |
| 1980 | 16.90                                       | 459.70 | 146.24 | 100.81 | 69.9   |
| 1990 | 14.70                                       | 396.20 | 142.10 | 96.27  | 68.7   |
| 2000 | 9.10  | 235.70 | 77.24  | 58.92  | 77.4   |
| 2010 | 9.10  | 247.70 | 77.30  | 60.04  | 78.8   |

海拔高程( $H$ )和高程差( $H_D$ )反映了流域土壤被侵蚀、搬运的潜在能力<sup>[31]</sup>。从图 4c 可以看出,各子流域的平均高程在 50~450 m,其中,62.86%的子流域高程集中在 50~250 m,另有 31.43%的子流域集中在 250~400 m,高程>400 m 的子流域占 5.71%。各子流域的高程差变化与高程变化趋势一致,其中,34.29%的子流域高程差<500 m,高程差 500~800 m 的子流域占 45.71%,>800 m 的子流域占 20%,高程差的变异系数(CV)为 0.49,表明其空间分布的离散化程度较高。



流域面积( $A$ )是一个集合地表多个环境要素的综合变量,流域侵蚀必然受到流域面积的强烈影响<sup>[32]</sup>。从各子流域面积的频数分布(图 4b)可以看出,基于 SWAT 划分的流域面积集中分布在 10~20 km<sup>2</sup>,所占比重为 68.57%,20~40 km<sup>2</sup>的占 20%,另有 11.5%的子流域面积>40 km<sup>2</sup>。

坡长( $L$ )决定坡面能量变化,是影响坡面土壤侵蚀的主要地形因子<sup>[33]</sup>。子流域的平均坡长介于 0.5~1.6 m(图 4d)。最大坡长分布范围为 1~23 m,其中约 70%的子流域最大坡长在 10~20 m。

2.3.2 降雨 降雨( $R$ )产生径流,径流携带泥沙<sup>[34]</sup>。降雨是流域产流产沙的主要驱动力之一。从图 4b 可以看出,各子流域的降雨量集中分布在 1 350~1 450 mm,其中,80%的子流域降雨量分布在 1 350~1 450 mm,11.5%的子流域分布在 1 300~1 350 mm,另有 8.5%的子流域在 1 650~1 700 mm,降雨量的空间分布离散化程度较低。

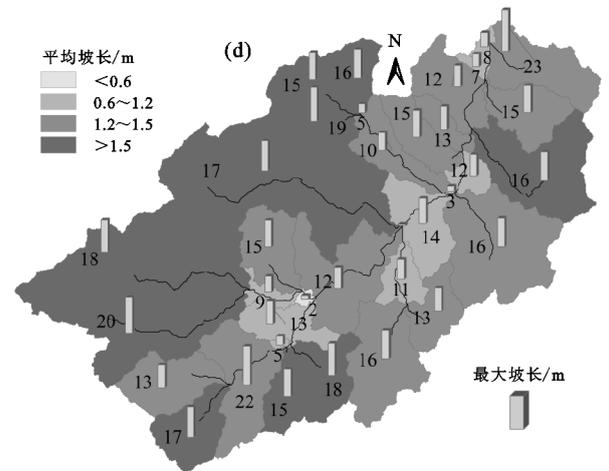
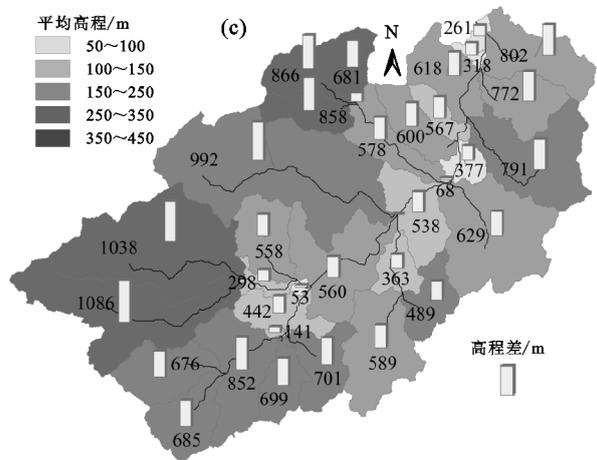
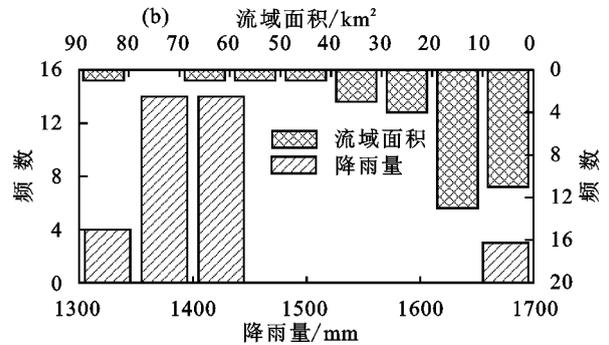


图 4 子流域平均坡度、流域面积、降雨量、高程及坡长分布

2.3.3 景观格局 景观格局的产沙过程响应已成为目前的研究热点。表 6 显示了选取的 10 个景观指数的均值和离散程度,统计表明 35 个子流域的景观特征差异较大,其中斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、最大斑块占景观面积比例(LPI)、香农多样性指数(SHDI)和香农均匀度指数(SHEI)的变异系数(CV)分别为 163.3%,36.2%,32.6%,36.4%和 32.7%,显示出较大的差异性。斑块平均大小(SHAPE\_MN)、

斑块结合指数(COHESION)、蔓延度指数(CONTAG)的变异系数(CV)相对较小,CV 值集中分布在 10%~20%。

初步分析表明,景观指数存在一定相关性(表 7),且面积和边缘指数(LPI、ED)是景观格局分析中最基本的度量指标,面积和边缘指数与许多景观变量相关,例如聚散性指数(CONTAG、COHESION 和 AI)和多样性指数(SHDI、SHEI)。所选形状指数

(SHAPE\_MN 和 FRAC\_MN) 相对独立,多样性指数之间相关性较强。此外,多样性指数与蔓延度指数 (CONTAG) 相关性较强。

表 6 景观指数的描述性统计

| 景观指数     | 单位                    | 最小值   | 最大值   | 均值    | 标准偏差  |
|----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| PD       | n/100 hm <sup>2</sup> | 0.16  | 20.73 | 2.18  | 3.56  |
| ED       | m/hm <sup>2</sup>     | 8.68  | 43.02 | 22.63 | 8.20  |
| LPI      | %                     | 22.75 | 93.05 | 62.72 | 20.47 |
| SHAPE_MN | —                     | 1.29  | 2.66  | 1.68  | 0.20  |
| FRAC_MN  | —                     | 1.05  | 1.13  | 1.08  | 0.01  |
| COHESION | —                     | 94.68 | 99.74 | 98.69 | 1.09  |
| CONTAG   | %                     | 47.91 | 87.57 | 68.54 | 10.24 |
| AI       | %                     | 92.15 | 98.44 | 96.16 | 1.39  |
| SHDI     | —                     | 0.27  | 1.56  | 0.88  | 0.32  |
| SHEI     | —                     | 0.20  | 0.84  | 0.52  | 0.17  |

表 7 产沙影响因素的相关系数及与产沙模数的关系

| 因素             | L       | AS      | H       | H <sub>D</sub> | A      | R     | PD      | ED      | LPI     | SHAPE_MN | FRAC_MN | COHESION | CONTAG  | AI      | SHDI   | SHEI  |         |
|----------------|---------|---------|---------|----------------|--------|-------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|--------|-------|---------|
| L              | 1       |         |         |                |        |       |         |         |         |          |         |          |         |         |        |       |         |
| AS             | 0.97**  | 1       |         |                |        |       |         |         |         |          |         |          |         |         |        |       |         |
| H              | 0.92**  | 0.91**  | 1       |                |        |       |         |         |         |          |         |          |         |         |        |       |         |
| H <sub>D</sub> | 0.86**  | 0.86**  | 0.84**  | 1              |        |       |         |         |         |          |         |          |         |         |        |       |         |
| A              | 0.54**  | 0.54**  | 0.55**  | 0.73**         | 1      |       |         |         |         |          |         |          |         |         |        |       |         |
| R              | 0.20    | 0.23    | 0.38*   | 0.35*          | 0.43*  | 1     |         |         |         |          |         |          |         |         |        |       |         |
| PD             | -0.59** | -0.64** | -0.49** | -0.60**        | -0.36* | -0.13 | 1       |         |         |          |         |          |         |         |        |       |         |
| ED             | -0.59** | -0.62** | -0.57** | -0.38**        | -0.18  | -0.16 | 0.33    | 1       |         |          |         |          |         |         |        |       |         |
| LPI            | 0.40*   | 0.40**  | 0.46**  | 0.20           | 0.09   | 0.11  | 0.03    | -0.77** | 1       |          |         |          |         |         |        |       |         |
| SHAPE_MN       | 0.42*   | 0.47**  | 0.38*   | 0.37*          | 0.19   | 0.02  | -0.43*  | -0.20   | 0.17    | 1        |         |          |         |         |        |       |         |
| FRAC_MN        | 0.33    | 0.39**  | 0.31    | 0.29           | 0.13   | 0.03  | -0.32   | -0.11   | 0.13    | 0.95**   | 1       |          |         |         |        |       |         |
| COHESION       | 0.75**  | 0.76**  | 0.65**  | 0.69**         | 0.46** | 0.21  | -0.87** | -0.64** | 0.36*   | 0.41*    | 0.26    | 1        |         |         |        |       |         |
| CONTAG         | 0.55**  | 0.56**  | 0.51**  | 0.34           | 0.24   | 0.12  | -0.19   | -0.83** | 0.83**  | 0.27     | 0.19    | 0.56**   | 1       |         |        |       |         |
| AI             | 0.67**  | 0.70**  | 0.62**  | 0.47**         | 0.25   | 0.17  | -0.52** | -0.96** | 0.66**  | 0.23     | 0.12    | 0.79**   | 0.77**  | 1       |        |       |         |
| SHDI           | -0.38** | -0.40*  | -0.35*  | -0.12          | 0.02   | 0.01  | 0.01    | 0.79**  | -0.90** | -0.28    | -0.23   | -0.37*   | -0.88** | -0.69** | 1      |       |         |
| SHEI           | -0.51** | -0.52** | -0.47** | -0.30          | -0.21  | -0.10 | 0.14    | 0.78**  | -0.84** | -0.27    | -0.20   | -0.51**  | -0.99** | -0.72** | 0.90** | 1     |         |
| S              | 1980    | 0.56**  | 0.48**  | 0.51**         | 0.48** | 0.44* | 0.48**  | -0.36*  | -0.33*  | 0.31     | 0.19    | 0.16     | 0.50**  | 0.46**  | 0.36*  | -0.26 | -0.45** |
|                | 1990    | 0.60**  | 0.50**  | 0.53**         | 0.49** | 0.44* | 0.44**  | -0.39*  | -0.36*  | 0.34     | 0.21    | 0.17     | 0.53**  | 0.51**  | 0.40*  | -0.31 | -0.49** |
|                | 2000    | 0.59**  | 0.51**  | 0.53**         | 0.48** | 0.43* | 0.46**  | -0.35*  | -0.37*  | 0.35*    | 0.22    | 0.19     | 0.51**  | 0.51**  | 0.39*  | -0.32 | -0.50*  |
|                | 2010    | 0.58**  | 0.51**  | 0.53**         | 0.48** | 0.43* | 0.47**  | -0.35*  | -0.36*  | 0.34     | 0.22    | 0.20     | 0.50**  | 0.50**  | 0.38*  | -0.31 | -0.49** |

注: \* 表示在置信度为 0.05 时相关性显著; \*\* 表示在置信度为 0.01 时相关性显著。

2.4.2 流域产沙与影响因素的主成分分析 基于 SPSS 20.0 软件对研究区域产沙影响因素进行主成分分析。分析结果显示,本研究 KMO 值为 0.773, Bartlett 球形检验结果显著 ( $P < 0.001$ ), 研究数据可进行主成分提取。

基于特征值大于 1 提取主成分数量。从表 8 可以看出,第 1,2,3,4 主成分的特征值均大于 1,累积贡献率约 87.63%,主成分分析结果可以接受。因此,选取前 4 个成分作为流域侵蚀产沙的主成分。根据

## 2.4 流域产沙与影响因素的关系

2.4.1 流域产沙与影响因素的相关性分析 不同时期子流域的产沙模数 (S) 与平均坡度 (AS)、降雨量 (R)、海拔高程 (H 和 H<sub>D</sub>)、流域面积 (A) 和景观格局指数的 Pearson 相关系数见表 7。从表 7 可以看出,在子流域尺度,不同时期的产沙模数与平均坡度、坡长、高程、高程差和降雨量均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。此外,流域面积与产沙模数也呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。在景观指标中,产沙模数与斑块密度 (PD) 和边缘密度 (ED) 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ),与最大斑块占景观面积比例 (LPI) 呈正相关;形状指数 (SHAPE\_MN 和 FRAC\_MN) 与产沙模数正相关;聚散性指数 (CONTAG、COHESION 和 AI) 与产沙模数均呈显著正相关;多样性指数与产沙模数均呈负相关,相关性显著 (除 SHDI)。

各主成分对各因子的变量矩阵,影响产沙的 4 个主成分分别为地形因子、景观多样性因子、景观形状因子和雨强因子,4 个主成分对产沙模数的贡献率分别为 51.48%,18.51%,10.70%,6.94%。可见,地形因子对流域产沙影响最大。根据每个主成分的特征值占所取主成分特征值之和的比重作为主成分综合模型的权重系数,主成分特征值和为 14.02,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$  权重分别为 0.59,0.21,0.12,0.08,即主成分综合模型为:

$$F = 0.59 \times f_1 + 0.21 \times f_2 + 0.12 \times f_3 + 0.08 \times f_4$$

式中:  $F$  为产沙模数( $t/km^2$ );  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$  分别代表地形因子、景观多样性因子、景观形状因子和雨强因子。

表 8 产沙因子主成分分析总方差解释及变量矩阵

| 主成分 | 特征值  | 方差    |         | 变量    |       |       |       |       |       |          |         |       |       |       |       |       |        |          |       |  |
|-----|------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|-------|--|
|     |      | 百分比/% | 累积百分比/% | $H$   | $H_D$ | $A$   | $L$   | $AS$  | $R$   | SHAPE_MN | FRAC_MN | SHDI  | SHEI  | PD    | ED    | LPI   | CONTAG | COHESION | AI    |  |
| 1   | 8.24 | 51.48 | 51.45   | 0.84  | 0.74  | 0.50  | 0.88  | 0.90  | 0.27  | 0.49     | 0.38    | -0.68 | -0.78 | -0.58 | -0.83 | 0.68  | 0.82   | 0.84     | 0.87  |  |
| 2   | 2.96 | 18.51 | 69.99   | 0.30  | 0.55  | 0.50  | 0.31  | 0.29  | 0.26  | 0.27     | 0.26    | 0.68  | 0.53  | -0.53 | 0.40  | -0.63 | -0.50  | 0.24     | -0.23 |  |
| 3   | 1.71 | 10.70 | 80.68   | -0.14 | -0.17 | -0.32 | -0.07 | -0.05 | -0.40 | 0.80     | 0.83    | -0.16 | -0.03 | -0.08 | 0.12  | -0.01 | -0.01  | -0.05    | -0.14 |  |
| 4   | 1.11 | 6.94  | 87.63   | 0.16  | 0.09  | 0.34  | -0.04 | 0     | 0.56  | 0.14     | 0.24    | -0.09 | -0.11 | 0.51  | 0.16  | 0.19  | 0.07   | -0.37    | -0.29 |  |

### 3 讨论

分析流域侵蚀产沙空间分布与第 1 主成分地形因子之间的关系。在本研究中,寿昌江流域产沙模数与地形因子(平均坡度、坡长、高程等)存在显著的正相关。这是因为随着坡度增大,降雨入渗减小,地表径流量增加,进而导致径流的冲刷能力增强,土壤侵蚀量增加。同时高程差能够表征泥沙被侵蚀、搬运的强度。此外,随着坡长增加,径流量增加,坡面侵蚀加强,沟道水体含沙量增加,出现产沙模数与坡长呈正相关现象。因此,在坡陡高程差大的地区产沙模数明显增大,这与 Krishnaswamy 等<sup>[35]</sup>的研究结论一致。

分析流域侵蚀产沙空间分布与第 2 主成分景观多样性因子之间的关系。寿昌江各子流域的产沙模数与景观多样性指数存在显著的负相关,即流域侵蚀强度越大,其相应的景观多样性也就越低,表明景观格局的多样性减弱了土壤侵蚀形成和运输的过程,并对流域水土保持具有积极影响,这与 Ouyang 等<sup>[12]</sup>的研究结论一致。

分析流域侵蚀产沙空间分布与第 3 主成分景观形状因子之间的关系。在本研究中,子流域的产沙模数与 SHAPE\_MN 和 SHAPE\_MN 呈正相关,表明景观形态对侵蚀产沙有负面影响,较大的景观形状可以加速侵蚀。这是因为在山地丘陵地区,适度破碎化的景观状态可以通过扰乱坡面泥沙形成和输移过程,有效发挥过滤功能,达到保持水土的目的。

流域侵蚀产沙空间分布与降雨强度存在正相关关系,此外,子流域的产沙模数与流域面积存在显著的正相关,Schiefer 等<sup>[36]</sup>在 RioTerraba River 流域也发现了这种规律,降雨空间分布的不均匀性是导致产沙模数随流域面积增加而增加的主要原因。

侵蚀产沙是影响流域生态环境健康发展的重要因素之一,流域的地形地貌、气候、土壤、土地利用格局等因素对产沙的贡献显著。寿昌江流域侵蚀产沙空间分布差异不明显,但不同产沙模数侵蚀区空间分布相对集中,且侵蚀严重的区域集中分布在寿昌江南北两岸的陡峭山地。综合分析寿昌江流域

土壤侵蚀强度属于微度。1980—2010 年子流域 27 侵蚀最严重,所在流域多为山地,坡度较陡,最大坡长 20 m,相比于流域其他地区,该地区降水较多,多年平均降雨量高达 1 700 mm,且高程差较大(>1 000 m),加快了泥沙输移,各方面因素综合作用使得该地产沙严重。同时寿昌江南岸侵蚀相对严重,包括子流域 19,30,26,31,32,这些地区地处山地,地形起伏较大,且该地区主要土地覆被类型为林地和耕地,所占比例高达 90%,相对单调的景观结构导致景观形状偏大。此外,侵蚀相对严重的地区,其支流宽度较大,增强了沟道的挟沙能力。因此,不利的地形条件、较低的景观多样性和较大的景观形状综合影响加剧了该地区的侵蚀产沙的风险。寿昌江下游地区侵蚀产沙强度明显减小,包括子流域 1,3,10,11。这些子流域面积普遍较小,降雨量小于 1 400 mm,且该地区地形平缓,各方面有利因素减弱了该地区侵蚀产沙的强度。

### 4 结论

(1)基于 SWAT 模型采用 SUFI-2 方法对研究流域的径流和泥沙进行模拟,结果显示该模型在寿昌江流域具有良好的适用性, $R^2$ 、NSE 和 PBIAS 均满足模拟要求,弥补了在我国南方山地丘陵地带泥沙模拟的不足,具有一定的应用和推广价值。

(2)整个寿昌江流域 1980—2010 年最大侵蚀产沙负荷均小于 500  $t/(km^2 \cdot a)$ ,土壤侵蚀强度属于微度,土壤保持能力良好。

(3)对寿昌江流域不同环境因子下的侵蚀产沙特征研究,选取坡度、坡长、海拔高程、流域面积、降雨量、景观格局因子作为侵蚀产沙差异的影响因素,利用相关分析和主成分分析方法,对研究区侵蚀产沙的空间分布和强度变化进行评价。相关分析结果表明,坡度、坡长、高程、流域面积和降雨量均与产沙模数显著正相关。同时,景观因子与产沙模数显著相关。主成分分析结果表明,寿昌江流域侵蚀产沙的主要影响因素分别是地形因子、景观多样性因子、景观形状因子和雨强因子,对产沙模数的贡献率分别为 51.48%,

18.51%, 10.70%, 6.94%, 地形因子是各子流域侵蚀产沙差异的主要影响因素。

(4)相关分析和主成分分析结果表明,景观指数和产沙模数间存在显著相关性且对寿昌江流域土壤侵蚀变化影响较大,在今后的土地利用规划中应有效考虑景观格局特征,达到改善流域土壤侵蚀的目的。

#### 参考文献:

- [1] Munro R N, Deckers J, Haile M, et al. Soil landscapes, land cover change and erosion features of the central plateau region of tigray, ethiopia: Photo-monitoring with an interval of 30 years[J].*Catena*, 2008, 75(1): 55-64.
- [2] 肖军仓, 罗定贵, 王忠忠. 基于 SWAT 模型的抚河流域土壤侵蚀模拟[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 14-18.
- [3] 刘世梁, 安南南, 尹艺洁, 等. 基于 SWAT 模型的澜沧江中游小流域水土流失与 NDVI 时空动态相关性[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 62-67.
- [4] Wu Y P, Chen J. Modeling of soil erosion and sediment transport in the East River Basin in southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 441: 159-168.
- [5] Yesuf H M, Assen M, Alamirew T, et al. Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, north-east Ethiopia[J]. *Catena*, 2015, 127: 191-205.
- [6] 朱惇, 李璐, 韩小波. 基于空间主成分分析的湖北省土壤侵蚀敏感性评价[J]. *中国水土保持*, 2013(4): 40-43.
- [7] Ma Q, Yu X X, Lu G A, et al. The changing relationship between spatial pattern of soil erosion risk and its influencing factors in Yimeng mountainous area, China 1986—2005[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(5): 1535-1546.
- [8] 冯君园, 卢艳, 蔡强国, 等. 基于主成分分析的那曲地区融水侵蚀强度评价[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(5): 90-95.
- [9] Schiettecatte W, D'Hondt L, Cornelis W M, et al. Influence of land use on soil erosion risk in the Cuyaguatze watershed (Cuba)[J]. *Catena*, 2008, 74(1): 1-12.
- [10] Jordan G, van Rompaey A, Szilassi P, et al. Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton Basin (Hungary)[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 108(2): 119-133.
- [11] Gustafson E J, Roberts L J, Leefers L A. Linking linear programming and spatial simulation models to predict landscape effects of forest management alternatives[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 81(4): 339-350.
- [12] Ouyang W, Skidmore A K, Hao F, et al. Soil erosion dynamics response to landscape pattern[J]. *Science Total Environment*, 2010, 408(6): 1358-1366.
- [13] Robinson L, Newell J P, Marzluff J A. Twenty-five years of sprawl in the seattle region: Growth management responses and implications for conservation[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71(1): 51-72.
- [14] 冉建波, 陈兴伟. 闽东南沿海地区景观指数粒度效应的高分辨率遥感分析[J]. *地理信息科学学报*, 2016, 18(6): 824-832.
- [15] 查轩, 张萍. 基于 GIS 的重要水源地东圳库区土壤侵蚀与景观格局分析[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 43-47.
- [16] 李晶, 周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析[J]. *地理学报*, 2014, 69(7): 933-944.
- [17] 夏芳. 钱塘江流域气候变化及其对水文径流的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [18] 李强, 李占斌, 鲁克新, 等. 黄土丘陵区不同植被格局产流产沙试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2008(4): 100-102, 104.
- [19] Boer M M, Puigdefabregas J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: A simulation study[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(2): 149-167.
- [20] Huang J L, Li Q S, Pontius R G, et al. Detecting the dynamic linkage between landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed, southeast China[J]. *Environmental Management*, 2013, 51(1): 32-44.
- [21] Memarian H, Balasundram S K, Talib J B, et al. Trend analysis of water discharge and sediment load during the past three decades of development in the Langat basin, Malaysia [J]. *Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2012, 57(6): 1207-1222.
- [22] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(5): 121-130.
- [23] Zhang S H, Fan W W, Li Y Q, et al. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 34-45.
- [24] Hu S, Qiu H J, Yang D D, et al. Evaluation of the applicability of climate forecast system reanalysis weather data for hydrologic simulation: A case study in the Bahe River Basin of the Qinling mountains, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(5): 546-564.
- [25] 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.
- [26] 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.

- 渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
- [16] 解文艳,樊贵盛.土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(3):272-275.
- [17] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18,78.
- [18] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等.耕作对土壤入渗性能的影响[J].生态学报,2006,26(5):1624-1630.
- [19] Morin J, Van Winkel J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation[J].Soil Science Society of America Journal,1996,60(4):1223-1227.
- [20] 张常亮,李萍,李同录,等.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报,2014,45(6):728-734.
- [21] 李毅,邵明安.人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究[J].农业工程学报,2007,23(3):18-23.
- [22] 王国梁,刘国彬,周生路.黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J].自然资源学报,2003,18(5):529-535.
- [23] Huang J, Wu P T, Zhao X N. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments[J].Cate-na,2013,104:93-102.
- [24] 傅斌,王玉宽,朱波,等.紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J].农业工程学报,2008,24(7):39-43.
- [25] Fox D M, Bryan R B, Price A G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions[J].Geoderma,1997,80(1/2):181-194.
- [26] Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, et al. Role of slope on infiltration: A review[J].Journal of Hydrology,2018,557:878-886.
- [27] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.
- [28] Janeau J L, Briquet J P, Planchon O, et al. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand[J].European Journal of Soil Science,2003,24:543-553.
- [29] Greene P B, Hairsine P B. Elementary processes of soil-water interaction and thresholds in soil surface dynamics: A review [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2004,29(9):1077-1091.
- [30] Leung A K, Boldrin D, Liang T, et al. Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment[J].Géotechnique,2017,68(7):646-652.
- [31] Wang L H, Ma B, Wu F Q. Effects of wheat stubble on runoff, infiltration, and erosion of farmland on the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall [J].Solid Earth,2017,8(2):281-290.
- [32] 徐勤学,李春茂,陈洪松,等.喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J].农业工程学报,2018,34(8):124-131.
- [27] Xu Z X, Pang J P, Liu C M, et al. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model[J].Hydrological Processes,2009,23(25):3619-3630.
- [28] Rostamian R, Jaleh A, Afyuni M, et al. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran[J].Journal Des Sciences Hydrologiques,2008,53(5):977-988.
- [29] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准.SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [30] Xu Y, Tang H P, Wang B J, et al. Effects of landscape patterns on soil erosion processes in a mountain-basin system in the North China[J].Natural Hazards,2017,87(3):1567-1585.
- [31] Sarangi A, Madramootoo C A, Singh D K. Development of ArcGIS assisted user interface for estimation of watershed morphological parameters[J].Journal of Soil Water Conservation,2004(3/4):139-149.
- [32] 方海燕,蔡强国,李秋艳.产沙模数与流域面积关系研究进展[J].地理科学进展,2008,27(6):63-69.
- [33] 安妙颖,韩玉国,吴玉恒,等.基于 KINEROS2 模型的降雨和坡长因子对土壤侵蚀过程影响的研究[J].水土保持学报,2017,31(4):25-31.
- [34] 王晓康,张毓涛,张新平,等.天山中部不同林分对产流产沙影响的灰色关联分析[J].干旱区研究,2014,31(4):696-701.
- [35] Krishnaswamy J. Spatial patterns of suspended sediment yields in a humid tropical watershed in Costa Rica [J].Hydrological Processes,2002,16(5):1130-1131.
- [36] Schiefer E, Slaymaker O, Klinkenberg B. Physiographically controlled allometry of specific sediment yield in the Canadian Cordillera: A lake sediment-based approach[J].Geografiska Annaler Series a Physical Geography,2001,83A:55-65.

(上接第 135 页)