

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220517003

文章编号: 1672-9331(2023)04-0089-16

引用格式: 隆院男, 郑谟若, 闫世雄, 等. 渌水流域水沙演变规律及其对土地利用变化的响应研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 89-104.

Citation: LONG Yuannan, ZHENG Moruo, YAN Shixiong, et al. Study on the evolution pattern of water and sediment in the Lushui Basin and their response to land use changes [J]. J. Changsha Univ. Sci. Tech. (Nat. Sci.), 2023, 20(4): 89-104.

# 渌水流域水沙演变规律及其对土地利用变化的响应研究

隆院男<sup>1,2</sup>, 郑谟若<sup>1,2</sup>, 闫世雄<sup>1,2</sup>, 刘易庄<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】探究渌水流域土地利用变化对水沙变化的影响。【方法】基于遥感影像数据及实测水沙数据, 分析渌水流域水沙变化趋势及其对土地利用变化的响应, 进一步构建 CA-Markov 城市扩张模型及水文模拟模型(hydrologic simulation program-Fortran, HSPF), 量化土地利用变化和气候变化对水沙的影响; 基于模型开展渌水流域未来土地利用情景预测及未来水沙过程模拟。【结果】1980 年以来渌水流域内建设用地面积持续增长, 渌水流域实测径流量呈增加趋势, 输沙量呈减少趋势, 两者的突变点分别在 1988 年及 1998 年; 气候变化和人类活动对径流增加的贡献率分别为 49.53%、50.47%, 对输沙减少的贡献率分别为 3.45% 和 96.55%; 实施耕地保护政策的 2030 年土地利用情景在保障耕地面积的同时, 并未明显加剧水土流失问题, 还能兼顾社会经济发展和城市化建设。【结论】1988 年之后渌水流域径流量增加是土地利用变化和气候变化共同作用的结果; 而 1998 年之后流域输沙量显著减少的主要原因为土地利用变化。

**关键词:** 水沙变化; 渌水流域; HSPF 模型; 土地利用变化; CA-Markov 模型; 贡献率

**中图分类号:** TV213.4

**文献标志码:** A

## 0 引言

水沙问题是关乎流域水土保持、水文环境、水文过程的重要问题之一。水沙变化不仅反映了流域自身的发展情况, 更能反映流域内水土流失程度和生态环境状况。流域水沙变化是研究流域生态环境的重要内容, 也是评价流域生态系统恢复、重建以及河道治理的重要指标<sup>[1]</sup>。

目前, 水沙变化导致的环境以及工程方面的问题已经引起了诸多专家学者的重视<sup>[2]</sup>。水沙变化主要受气候与人类活动的影响, 其中, 人类活动导致水沙变化主要归因于下垫面的改变。前人已针对土地利用变化的水沙响应开展了相关研究并

取得诸多成果, 例如, 利用 GeoWEPP 模型研究伊朗 Talar 流域土地利用变化和输沙量之间的关系<sup>[3]</sup>, 利用遥感影像以及历史水文数据研究墨西哥三条热带溪流的流域土地利用变化和输沙量之间的关系<sup>[4]</sup>, 利用 ERDAS imagine 软件并结合水文数据分析埃塞俄比亚德雷达瓦市土地利用的变化与径流的关系<sup>[5]</sup>。诸多研究表明, 区域建设用地、裸地的增加, 林地的减少均会导致径流量与输沙量增加; 此外, 还发现建造淤地坝等水工建筑物有助于降低流域的输沙率<sup>[6]</sup>。尽管前人就土地利用变化与水沙演变的关系给出了解释, 但对于如何清晰地量化气候及土地利用变化对水沙演变的影响还有待深入研究。

湘江是长江七大支流之一, 近年来, 随着城市

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-05-31; 接受日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079010); 湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-41); 湖南省重点研发计划项目(2020SK2130); 长沙市自然科学基金资助项目(kq2014103)

通信作者: 闫世雄(1994—)(ORCID: 0009-0000-0813-2276), 男, 在读博士研究生, 主要从事水文及水资源方面的研究。E-mail: 1041747087@qq.com

扩张及气候变化的加剧,该流域内水文情势发生了显著变化<sup>[7-8]</sup>。渌水作为湘江一级支流,集水面积约为3 054 km<sup>2</sup>,地处湘东山区,渌水流域内城市发展迅速,建设用地面积占比从1980年的2.31%激增到2020年的15.08%。同时,渌水流域位于湖南省五大暴雨区中,年均降雨量为1 600 mm以上,且多为高强度持续性降雨,是山洪灾害高发的主要原因。高强度降雨加之下垫面变化,使得流域内水沙演变规律发生改变,进一步对环境造成影响,如河道、水质、污染物迁移等<sup>[9-12]</sup>。

目前,关于渌水流域土地利用变化对水沙影响的研究较少,本文借助遥感及地理信息技术研究土地利用变化规律并构建土地利用预测模型;基于实测水沙资料研究水沙变化规律并构建水文模型量化渌水流域气候与人类活动对水沙的影响;利用已构建的土地利用预测模型和水文模型,模拟并研究不同时期、不同发展模式下的土地利用情景对水沙的响应,为流域水土保持提供数据支撑,为流域生态恢复及可持续发展奠定基础。

## 1 流域概况与研究方法

### 1.1 流域概况

渌水流域位于湖南省东部与江西省接壤处,介于东经113°45′~114°2′,北纬27°37′~28°18′之间,北临浏阳市,西部毗邻长沙、株洲、湘潭“金三角”经济区,东、南部与萍乡市接壤,流域呈窄三角形,东西方向宽约60 km,南北方向长约90 km,流域面积约为3 054 km<sup>2</sup>,如图1所示。渌水流域地处湘东山区,地貌以山地、丘陵和岗地为主,地势东北高,西南低。

### 1.2 数据资料

本研究所需数据主要包括流域水文、气象数据、遥感影像、数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据及土壤数据。水文、气象数据为渌水流域1960—2019年径流、输沙、降雨量及蒸散发数据,其中,径流、输沙及降雨量数据由湖南省水文水资源勘测中心提供,包括大西滩(二)站水文要素摘录表以及醴陵站、花麦田站、上栗站、萍乡站降水量摘录表;日蒸发数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。Landsat 系列遥感影像

下载于USGS网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),90 m×90 m数字高程模型数据下载于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/search>),土壤数据参考《1:100万中华人民共和国土壤图》和《中国土种志》。

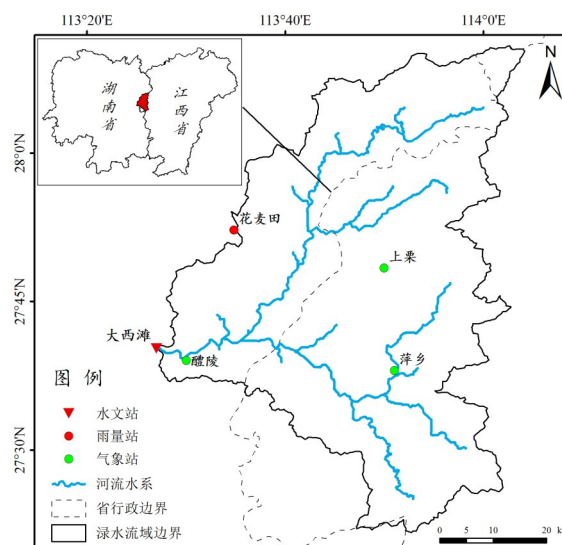


图1 渌水流域位置图

Fig. 1 Location map of Lushui Basin

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 流域土地利用信息提取

在USGS网站下载1980—2020年渌水流域适宜遥感影像8幅,借助ENVI 5.3.1软件进行遥感影像处理,通过非监督分类的方式,以每5年为时间间隔,提取解译土地利用情况,共得到8幅渌水流域土地利用图。利用ArcGIS 10.2软件的空间分析功能,统计逐时期各地类面积变化,分析各地类面积变化规律。构建土地利用预测模型,以2015年土地利用情况为输入条件,模拟2020年土地利用情况,并将遥感影像解译结果与模拟结果进行比较,评价模型的模拟精度。

#### 1.3.2 实测水沙数据的统计分析

##### 1.3.2.1 曼-肯德尔非参数秩次相关检验法

曼-肯德尔(Mann-Kendall, M-K)法是一种非参数统计检验方法<sup>[13]</sup>,非参数检验方法亦称无分布检验,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,计算也比较简便。对于具有 $n$ 个样本的时间序列 $x$ ,构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, k=2, 3, \dots, n \quad (1)$$

其中,  $r_i = \begin{cases} +1, & \text{当 } x_i > x_j \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, i$

式中:秩序列  $S_k$  为第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值个数的累积数。

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量  $F_k$  如下:

$$F_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{v(S_k)}}, k=2, \dots, n \quad (2)$$

其中,  $E(S_k)$ ,  $v(S_k)$  分别为累积数  $S_k$  的均值和方差,在  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立,且有相同连续分布时,它们可由下式计算:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \\ v(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, \end{cases} \quad k=2, \dots, n \quad (3)$$

式中:  $F_k$  为标准正态分布,它是按时间序列  $x$  顺序  $x_1, x_2, \dots, x_n$  计算出的统计量序列。给定显著性水平  $\alpha$ ,查正态分布表,若  $|F_k| > U_\alpha$ ,则表明序列存在明显的趋势变化,另外  $F_1=0$ 。

按时间序列  $x$  逆序  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ ,再重复上述过程,同时使:

$$B_k = -F_k (k=n, n-1, \dots, 1), B_1=0$$

其中,  $B_k$  和  $F_k$  均服从标准正态分布,  $B_k$  和  $F_k$  的正负可作为判断某一时间段数据变化趋势的依据,当  $|F_k|$  或者  $|B_k|$  超过显著性水平时,表明变化趋势较为明显。根据  $B_k$ 、 $F_k$  两条曲线是否存在交点,可以判断原数据序列是否存在突变点。

### 1.3.2.2 双累积曲线法

双累积曲线(double mass curve, DMC)法是目前最简单、最直观、最广泛地用于水文气象要素一致性或长期演变趋势分析的方法<sup>[14]</sup>。

首先,以突变年份为界线将实测年份分为两段,对前段的累积降雨量  $\Sigma P_1$  和累积径流深或累积输沙量  $\Sigma R_1$  进行回归分析,得到:

$$\Sigma R_1 = k \Sigma P_1 + b \quad (4)$$

式中:  $\Sigma P_1$  为前段累积降雨量, mm;  $\Sigma R_1$  为前段累积径流深或累积输沙量, mm/万 t;  $k$ 、 $b$  均为回归系数。

然后,将式(4)应用到后段(气候变化与人类活动共同作用),依据后段的累积降雨量  $\Sigma P_2$  计算

得到  $\Sigma R_2$  (累积径流深或累积输沙量),这时得到的  $\Sigma R_2$  是与前段下垫面条件相同(没有人类活动影响)的累积径流深或累积输沙量。

最后,用得到的累积径流深或累积输沙量  $\Sigma R_2$  计算后段年径流深或年输沙量的均值  $R_{2\text{计算}}$ ,再通过与实测的前后两段径流深或输沙量的均值  $R_{1\text{实测}}$ 、 $R_{2\text{实测}}$  作差,即可得到人类活动和气候变化所产生的影响量:

$$\zeta_{\text{人}} = R_{2\text{实测}} - R_{2\text{计算}} \quad (5)$$

$$\zeta_{\text{气}} = R_{2\text{计算}} - R_{1\text{实测}} \quad (6)$$

式中:  $\zeta_{\text{人}}$  和  $\zeta_{\text{气}}$  分别为人类活动和气候变化对径流深或输沙量的影响量;  $R_{1\text{实测}}$  为前段实测值的均值,  $R_{2\text{实测}}$  为后段实测值的均值;  $R_{2\text{计算}}$  为后段计算值的均值。

本研究采用贡献率量化人类活动和气候变化对径流深或输沙量演变的影响,其表达式为:

$$\eta = \frac{\zeta_{\text{人}}}{R_{\text{阶段差}}} \times 100\% \text{ 或 } \eta = \frac{\zeta_{\text{气}}}{R_{\text{阶段差}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $\eta$  为人类活动和气候变化对径流深或输沙量演变的贡献率, %;  $R_{\text{阶段差}}$  为实测年份前段和后段径流深或输沙量均值差值的绝对值。

### 1.3.3 流域水文水质模拟软件

流域水文水质模拟软件(hydrologic simulation program-Fortran, HSPF)是20世纪70年代美国国家环境保护局开发的半分布式水文模型。该模型主要由透水地段、不透水地段、地表水地段3个水文水质模拟模块组成,支持年、月、日、小时4种时间尺度模拟,不仅能长时间模拟水文序列,也能模拟流域非点源污染和点源污染,是海外应用非常广泛的流域水文水质模拟软件。

收集整理绿水流域土壤数据、数字高程数据、土地利用数据、水沙数据以及对应气象数据,以小时为时间尺度构建水文模型。本文基于绿水流域2000—2019年共20年的水沙数据开展HSPF模型率定及验证工作<sup>[15-17]</sup>,其中,2000—2009年的水沙数据用于参数率定,2010—2019年的用于模型验证。选用月径流深和输沙量的相对误差  $R_e$ 、线性回归相关系数  $R^2$  及纳什效率系数  $N_s$  作为模型模拟性能评估参数<sup>[18]</sup>。

相对误差的计算式如下:



$$R_e = \frac{S_i - O_i}{O_i} \times 100\% \quad (8)$$

纳什效率系数的计算公式如下:

$$N_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_a)^2} \quad (9)$$

式中:  $S_i$  为模拟值;  $O_i$  为观测值;  $O_a$  为观测值的平均值。  $R_e$  越接近 0, 就表明模拟值与实测值越接近, 模拟效果越好。从式(9)可知,  $N_s$  最大值为 1, 其数值越大表明模拟效果越好。

本研究基于已构建的 HSPF 模型, 组合不同的气候与土地利用情景, 定量研究水沙对气候与土地利用变化的响应。

### 1.3.4 CA-Markov 土地利用预测模型

CA-Markov 模型已广泛应用于土地利用变化模拟研究中。土地利用模拟中的元胞自动机 (cellular automata, CA) 具有考虑空间结构和邻里状态生成过渡潜力图的优势, 而马尔可夫链分析可以提供基于时间变化的土地利用及覆被变化 (land use-cover change, LUCC) 过渡区矩阵。通过系统不同状态的初始概率以及状态之间的转移概率来确定各状态未来的变化趋势<sup>[19]</sup>。

基于已生成的 Markov 转移矩阵及综合适宜性图集, 以 2015 年土地利用为输入, 利用 CA-Markov 模型进行 2020 年土地利用情景模拟, 引入  $K_p$  系数评价模型结果<sup>[20]</sup>, 该系数计算式如下:

$$K_p = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad (10)$$

式中:  $P_o$  为正确模拟的比例;  $P_c$  为随机情况下期望的正确模拟比例;  $P_p$  为理想分类情况下的正确模拟比例 (若完全正确则为 100%)。按模拟精度需求确定期望的正确模拟比例。一般认为, 当  $K_p \geq 0.75$  时, 两幅参与对比的图像较为相似; 当  $0.4 \leq K_p < 0.75$  时, 两幅图像的相似度一般, 区别明显; 当  $K_p < 0.4$  时, 两幅图像的相似度较低, 区别较大。

应用土地利用预测模型, 设计 3 种城市发展模式, 可得到三种未来土地利用情景, 即当前发展模式下 2030 年、2050 年土地利用及耕地保护模式下 2030 年土地利用。将得到的三种未来情景与一种对照组土地利用情景输入水文模型, 模拟未来渌水流域水沙演变过程, 分析历史降雨量下平、丰、枯水期的水沙对不同情景的响应。

## 2 结果与分析

### 2.1 渌水流域土地利用变化分析

分析渌水流域土地利用数据。借助 ENVI 5.3.1 软件对遥感影像进行处理, 通过非监督分类的方式, 以每 5 年为时间间隔, 提取解译土地利用情况, 结果如图 2 所示。统计 1980—2020 年 8 幅土地利用各地类面积变化, 结果见表 1。耕地、林地、建设用地为渌水流域三种主要土地利用类型, 这三者面积总和占流域总面积的 99% 以上, 1980—2020 年期间, 林地面积减少了 7.36%, 耕地面积减少了 27.92%, 建设用地面积增加了 552.71%, 土地利用突变点在 1995—2000 年间。三种主要土地利用类型按变化幅度由大到小排序依次为: 建设用地、耕地、林地。

表 2 为渌水流域 1980—2020 年土地利用类型转移矩阵, 由表 2 可知, 渌水流域 40 年来的土地利用变化主要为林地、耕地、建设用地三者之间的相互转换。三种主要土地利用类型按转出面积由大到小排序依次为: 耕地、林地、建设用地, 三者转出面积分别为 229.97、172.21 和 0.57 km<sup>2</sup>; 三种主要土地利用类型按转入面积由大到小排序依次为: 建设用地、林地、耕地, 三者转入面积分别为 390.56、11.59 和 10.53 km<sup>2</sup>。建设用地转入面积最大, 且随着经济的迅速发展, 建设用地的面积还会继续增加。

表 1 渌水流域 1980—2020 年各类型土地利用面积统计表

Table 1 Statistics of land use types and areas in the Lushui Basin from 1980 to 2020 km<sup>2</sup>

土地利用类型	各年份土地利用面积							
	1980 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
林地	2 181.81	2 183.54	2 183.86	2 139.37	2 117.28	2 086.76	2 066.09	2 021.19

表 1 （续）  
Table 1 （Continued）

土地利用类型	各年份土地利用面积							
	1980年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
耕地	786.02	760.95	751.53	710.03	689.19	642.44	615.11	566.58
建设用地	70.56	96.37	106.04	194.94	238.17	318.33	366.37	460.55
水体	15.84	13.41	12.87	10.03	9.79	6.94	6.94	6.25
裸地	0.35	0.31	0.28	0.21	0.15	0.11	0.07	0.01

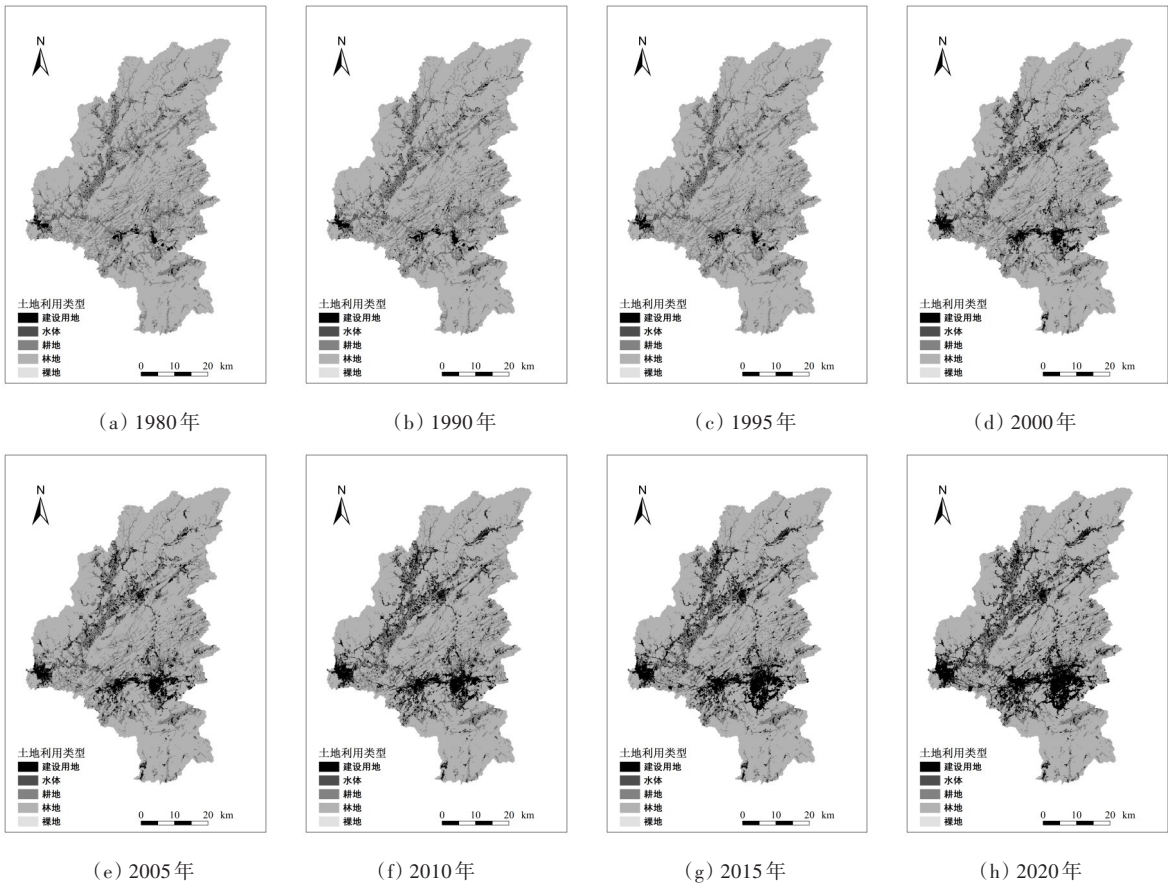


图 2 涿水流域在 1980—2020 年土地利用类型图

Fig. 2 Map of land use type in the Lushui basin from 1980 to 2020

表 2 涿水流域 1980—2020 年土地利用类型转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of land use types in Lushui basin from 1980 to 2020 km<sup>2</sup>

年份	土地利用类型	2020 年					转出面积
		建设用地	水体	耕地	林地	裸地	
1980 年	建设用地	69.99	0.00	0.45	0.12	0.00	0.57
	水体	9.56	5.98	0.14	0.16	0.00	9.86
	耕地	218.52	0.14	556.05	11.31	0.00	229.97
	林地	162.14	0.13	9.94	2 009.60	0.00	172.21
	裸地	0.34	0.00	0.00	0.00	0.01	0.34
转入面积		390.56	0.27	10.53	11.59	0.00	412.95

## 2.2 水沙特征变化及影响因素

### 2.2.1 水沙趋势突变分析

图3展示了1960—2019年渌水流域径流量和输沙量年际变化情况。由图3可以看出,渌水流域在1960—2019年径流量呈显著增加趋势,输沙量呈减少趋势。表3为1960—2019年渌水流域径流量、输沙量的变化情况统计表。由表3可知,在1960—2019年渌水流域多年平均径流量为27.01亿 $\text{m}^3$ ,其中最大径流量为38.88亿 $\text{m}^3$ ,出现在1970年,最小径流量为11.39亿 $\text{m}^3$ ,出现在1963年;多年平均输沙量为52.58万t,其中最大输沙量为132.60万t,出现在1970年,最小输沙量为3.79万t,出现在2018年。多年平均径流量随年代的推移呈增加趋势,多年平均输沙量随年代的推移呈减少

趋势,两者均存在波动且年代间差异性显著。1988—2019年多年平均径流量为28.40亿 $\text{m}^3$ ,1998—2019年多年平均输沙量为36.99万t,1988—2019年多年平均径流量与1960—2019年多年平均径流量相比,增加了5.15%,1998—2019年多年平均输沙量与1960—2019年多年平均输沙量相比,减少了29.65%。

图4展示了渌水流域年径流量和年输沙量M-K检验情况。由图4可以看出,年径流量在2002年超过置信区间,表明上升趋势显著。在置信区间内的交点只有1988年通过M-K检验,表明年径流量在1988年发生突变。年输沙量整体呈下降趋势,置信区间内的唯一交点1998年通过M-K检验,表明年输沙量在1998年发生突变。

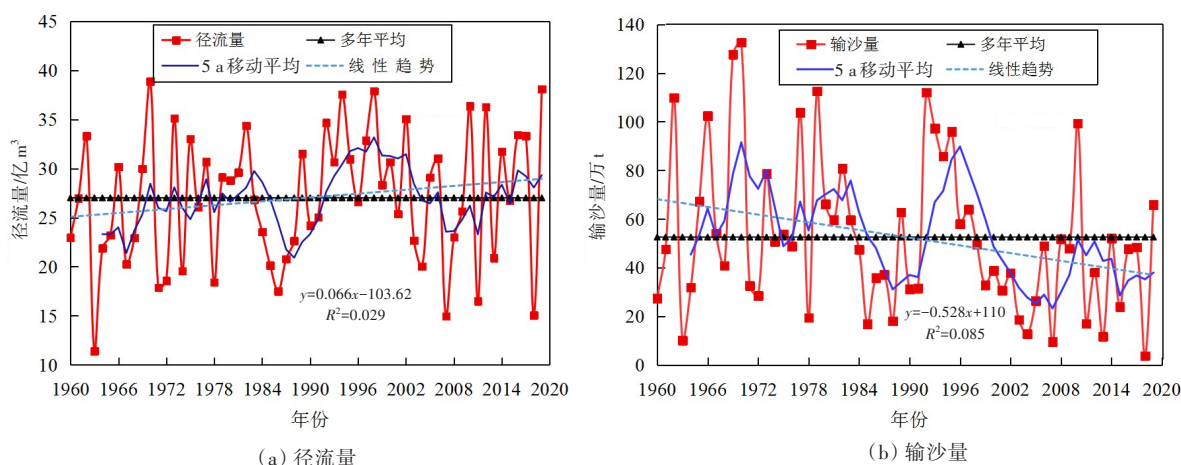


图3 1960—2019年渌水流域径流量和输沙量年际变化曲线

Fig. 3 Interannual variation curves of runoff and sediment in the Lushui basin from 1960 to 2019

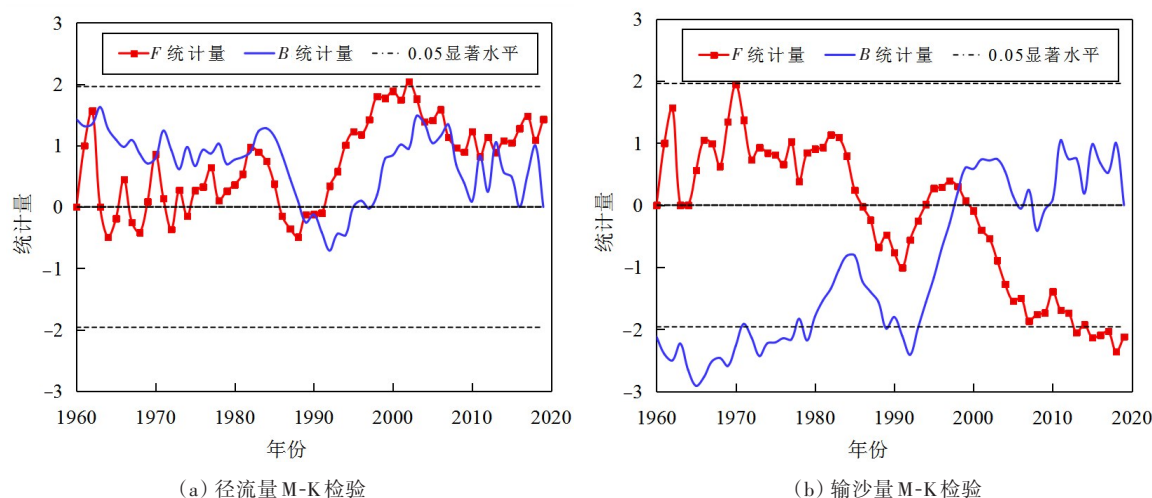


图4 年径流、输沙量M-K检验

Fig. 4 M-K test of annual runoff and sediment

表 3 1960—2019 年涿水流域径流量、输沙量变化特征

Table 3 Variation characteristics of runoff and sediment in the Lushui basin from 1960 to 2019

年代	径流量/亿 m <sup>3</sup>			输沙量/万 t		
	均值	变异系数	极值比	均值	变异系数	极值比
1960—1969	24.31	0.26	2.92	61.94	0.63	12.58
1970—1979	26.73	0.29	2.18	66.14	0.59	6.81
1980—1989	25.56	0.21	1.96	48.44	0.44	4.80
1990—1999	30.87	0.16	1.57	65.81	0.46	3.59
2000—2009	25.75	0.23	2.34	32.34	0.47	5.41
2010—2019	28.83	0.30	2.53	40.80	0.70	26.16
多年平均	27.01	0.25	3.41	52.58	0.60	34.94

2.2.2 降雨和人类活动对流域水沙影响的量化分析

为进一步分析气候变化与人类活动对径流变化的贡献,根据已有的气象水文数据,通过累积降雨量与累积径流深、累积输沙量之间的关系来建立双累积曲线,确定流域 1960—2019 年气候变化和人类活动对径流深、输沙量变化的贡献度,如图 5 所示。

表 4、表 5 为人类活动和气候变化对涿水流域径流深、输沙量影响的统计表。为了定量分析各影响因素的影响程度,引入贡献率概念,即各因素的影响量与总影响量的比值。由表 4 可知,1988 年前后,径流深计算值与实测值差异明显,计算值

大于实测值,1988 年前实测多年平均径流深为 833.46 mm,而 1988 年后计算多年平均径流深为 881.72 mm,这表明气候的影响使径流增大。气候变化与人类活动对径流增加的贡献率分别为 49.53%、50.47%,可见,两者对径流增加的贡献率相近。从表 5 中的数据可知,1998 年后,输沙量计算值与实测值差异明显,计算值明显高于实测值,该阶段实测输沙量多年平均值为 36.99 万 t,而计算输沙量多年平均值为 60.75 万 t,这表明人类活动导致输沙量变小,而且变化明显。可见,人类活动对输沙量减少的贡献率比较大,达 96.55%,而气候变化对输沙量减少的贡献率为 3.45%。综上所述,人类活动是涿水流域水沙变化的主要因素。

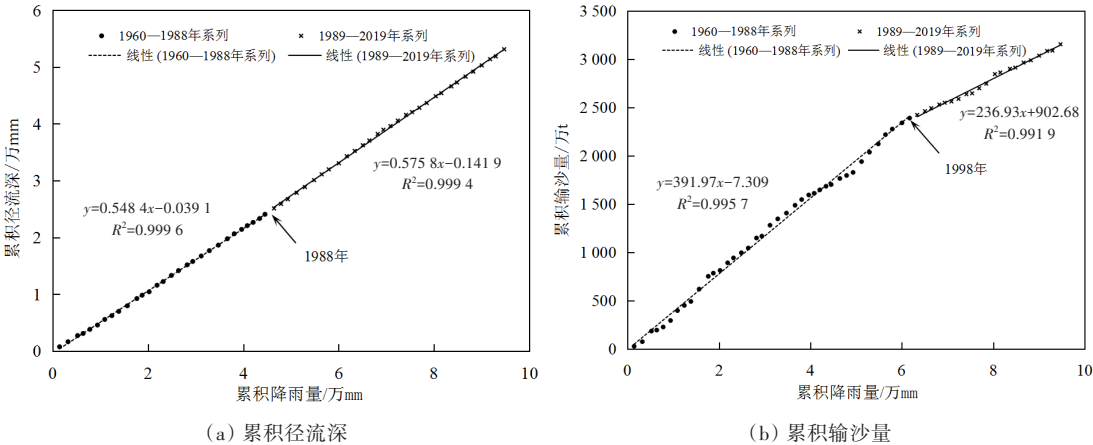


图 5 涿水流域累积年降雨与累积径流深、累积输沙量双累积曲线

Fig. 5 Double accumulation curve of annual rainfall,cumulative runoff depth and cumulative sediment transport in the Lushui Basin

表 4 人类活动和气候变化对涿水流域径流深影响统计值

Table 4 Statistical value of impacts of human activities and climate on runoff depth in the Lushui Basin

时段	平均降雨量/mm	实测平均径流深/mm	计算平均径流深/mm	气候变化影响量/mm	人类活动影响量/mm	气候变化对径流增加的贡献率/%	人类活动对径流增加的贡献率/%
1960—1987 年	1 550.76	833.46		48.26	49.18	49.53	50.47
1988—2019 年	1 602.98	930.90	881.72				



表5 人类活动和气候变化对渌水流域输沙量影响统计值

Table 5 Statistical value of impacts of human activities and climate change on sediment transport in the Lushui Basin

时段	平均降雨量/mm	实测平均输沙量/万t	计算平均输沙量/万t	气候变化影响量/万t	人类活动影响量/万t	气候变化对输沙量减少的贡献率/%	人类活动对输沙量减少的贡献率/%
1960—1997年	1 579.95	61.60		-0.85	-23.76	3.45	96.55
1998—2019年	1 576.31	36.99	60.75				

### 2.3 HSPF模型适用性分析

HSPF模型的率定与验证,以及参数评估结果分别如图6和表6所示。由表6可知,率定阶段月径流量观测值与模拟值平均相对误差为5.93%,相关系数为0.92,纳什系数为0.89,模拟结果达到了非常好的标准( $R_e < 10\%$ ,  $R^2 \geq 0.85$ ,  $N_s \geq 0.75$ )。验证阶段月径流量观测值与模拟值平均相对误差为15.37%,相关系数为0.88,纳什系数为0.87,模拟结果达到了合理标准( $15\% \leq R_e < 25\%$ ,  $R^2 \geq 0.85$ ,  $N_s \geq 0.75$ )。率定阶段月输沙量平均相对误差为32.38%,纳什系数为0.73,模拟结果达到了合理标准( $30\% \leq R_e < 45\%$ ,  $0.65 \leq N_s < 0.75$ )。验证阶段月输沙量平均相对误差为42.65%,纳什系数为0.65,模拟结果也达到了合理标准。输沙量模拟误差偏大,而泥沙主要产在汛期,从图6也可以看出,雨季相应输沙量模拟误差要更大一些。分析其原因:首先,汛期降水在侵蚀土壤产沙外还冲刷了一

部分固体废弃物进入河流;其次,流域存在中型水库拦沙;再次,实测河道特征数据缺乏造成河道剪切力模拟与实际情况有差异,进而影响河床中泥沙沉降与侵蚀速率的计算结果。以上原因均会影响输沙量的模拟效果。总体来说,HSPF模型对月径流量及月输沙量的模拟效果较为合理,基本满足模拟精度要求,该模型可以用于进一步构建模拟情景及分析流域下垫面变化对水沙的影响。

表6 HSPF模型参数评估

Table 6 HSPF model parameter evaluation

评价参数		模型率定 2000—2009年	模型验证 2010—2019年
月径流量	$R_e/\%$	5.93	15.37
	$R^2$	0.92	0.88
	$N_s$	0.89	0.87
月输沙量	$R_e/\%$	32.38	42.65
	$R^2$	0.75	0.71
	$N_s$	0.71	0.65

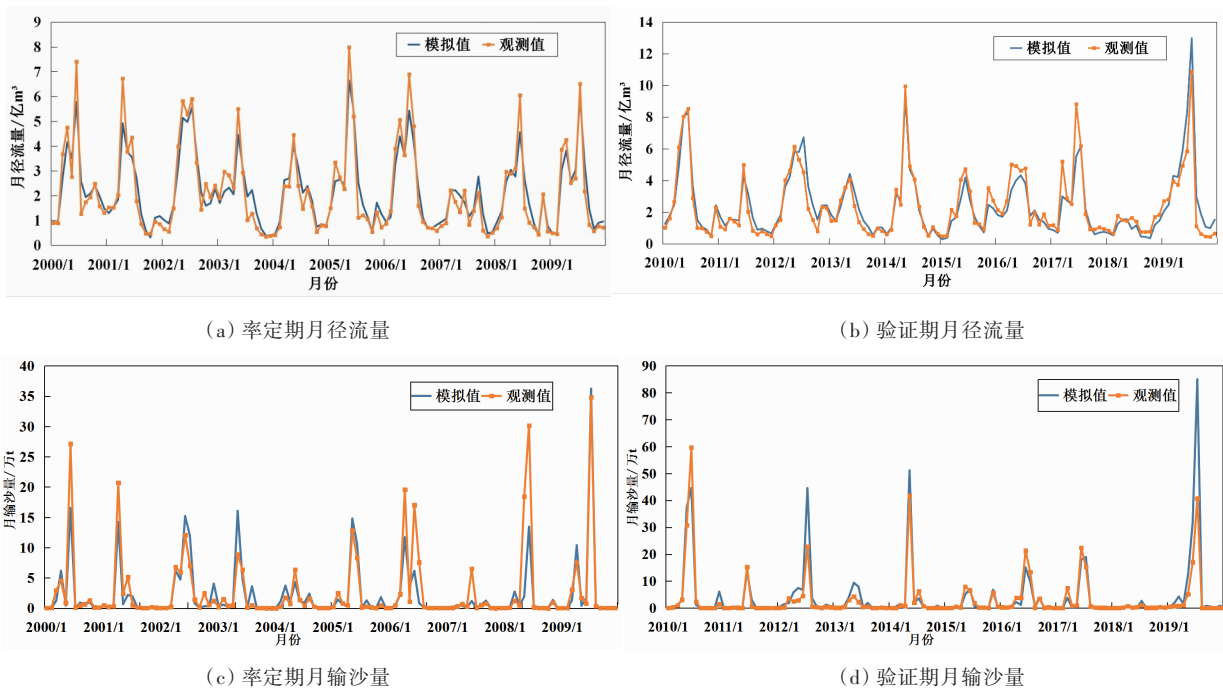


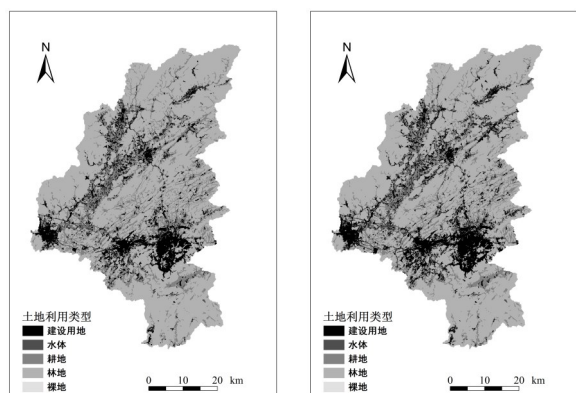
图6 HSPF模型率定及验证结果

Fig. 6 HSPF model calibration and verification results



## 2.4 CA-Markov模型适用性分析

采用CA-Markov模型对2020年绿水流域土地利用进行模拟,模拟栅格图如图7(a)所示。2020年绿水流域土地利用实际栅格图如图7(b)所示。对比模拟和实际栅格图,统计正确模拟栅格并计算 $K_p$ 值。两幅图对比结果表明,各类图斑大小及分布一致性较高, $K_p=0.8618$ ,可见构建的CA-Markov模型对绿水流域土地利用模拟的效果较好,可用于对该流域未来土地利用变化情况的模拟预测。



(a) 2020年模拟土地利用

(b) 2020年实际土地利用

图7 2020年绿水流域土地利用模拟与实际情况对比

Fig. 7 Comparison between simulated and actual land use in the Lushui basin in 2020

## 2.5 气候和土地利用变化情景下的流域水沙响应分析

气候变化与土地利用变化是水沙变化的重要影响因素,本节设计了三组试验,以量化气候变化和土地利用变化对流域水沙的影响。第一组试验量化水沙对土地利用变化的响应;第二组试验量化水沙对气候变化的响应;第三组试验量化气候和土地利用变化对流域水沙的综合影响及其贡献率。参考前人研究成果及本文结论,考虑到降雨为径流变化的主要驱动因素,以降雨突变点为时间点,结合1980年、2000年、2020年三期土地利用情景,分别量化气候和土地利用变化对径流的影响及贡献率;考虑到土地利用变化为输沙变化的主要驱动因素,以土地利用突变点为时间点,结合对应时段降雨数据,分别量化气候和土地利用变化对输沙的影响及贡献率。量化试验具体方案如下:

① 2000—2019年气象数据组合1980年、2000年、2020年土地利用情景,即模拟2000—2019年气候条件下,流域水沙对不同阶段土地利用情景的响应;② 选取1980年土地利用情景组合1960—1993年和1994—2019年两个阶段的气象数据,模拟1980年土地利用情景下,流域水沙对不同气候条件的响应;③ 对于径流,基于1960—1987年气候条件模拟1980年土地利用条件下的径流响应,基于1988—2019年气候条件分别模拟1990年和2015年土地利用条件下的径流响应;对于输沙,基于1960—1993年气候条件模拟1990年土地利用条件下的输沙响应,基于1994—2019年气候条件分别模拟1995年和2015年土地利用条件下的输沙响应。在此基础上分析土地利用与气候同时变化情景下流域水沙的响应,最后估算气候与土地利用各自对流域水沙变化的贡献率。

### 2.5.1 水沙对土地利用变化情景的响应

在2000—2019年气候条件下,分别采用1980年、2000年、2020年三期土地利用数据,统计这三期土地利用条件下流域出口多年平均水沙数据,定量分析土地利用变化对流域水沙的影响。

表7为不同土地利用条件下绿水流域水沙模拟情况统计表。由表7可知,在2000—2019年气候条件不变的情况下,2020年土地利用情景下的年均径流量最大、输沙量最小,而1980年土地利用情景下的年均径流量最小、输沙量最大。以1980年土地利用情景下的年均水沙量为基准,2000年土地利用情景下的年均径流量增加了0.31亿 $m^3$ ,增幅为1.18%,输沙量减少了0.68万t,减幅为1.85%,2020年土地利用情景下的年均径流量增加了0.84亿 $m^3$ ,增幅为3.20%,输沙量减少了2.43万t,减幅为6.61%;以2000年土地利用条件为基准,2020年土地利用情景下的年均径流量增加了0.53亿 $m^3$ ,增幅为1.99%,输沙量减少了1.75万t,减幅为4.85%。从变异系数来看,2000年和2020年土地利用情景下的径流量和输沙量的年际波动要小于1980年土地利用情景下的年际波动。土地利用变化主要体现在建设用地面积快速增加,由试验对比结果可知,气候条件不变时,城市扩张会导致流域径流量增加,同时,扩张侵占了大面积的耕地,导致水土流失现象因下垫面硬化而减少,对应造成输沙量减小。

表7 不同土地利用条件下渌水流域水沙模拟统计表(2000—2019年气候条件下)

Table 7 Statistics of runoff and sediment simulation in the Lushui basin under different land use conditions (climatic conditions from 2000 to 2019)

变量	1980年土地利用		2000年土地利用		2020年土地利用	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数
径流量/亿 m <sup>3</sup>	26.27	0.27	26.58	0.26	27.11	0.25
输沙量/万 t	36.78	0.64	36.10	0.63	34.35	0.62

## 2.5.2 水沙对气候变化情景的响应

为准确判断气候变化造成的影响,在模型中以1980年土地利用情景为下垫面输入数据,分别以1960—1993年和1994—2019年两个时期实测气象资料为气象输入数据,统计在1980年土地利用条件下及这两个时期的气候情景下所输出的径流量和输沙量的多年平均值,见表8。

1994—2019年平均降雨量比1960—1993年的增加了50.59 mm,涨幅约为3.25%。在相同土

地利用条件下,1994—2019年的平均径流量比1960—1993年的平均径流量增加了0.15亿 m<sup>3</sup>,涨幅约为0.54%;1994—2019年的平均输沙量比1960—1993年的平均输沙量增加了0.44万 t,涨幅约为1.11%。根据以上模拟结果发现,土地利用不变时,气候变化(主要为降雨增加)会增加流域径流量和输沙量。从1960—1993年和1994—2019年这两个时期的变异系数来看,年际波动变化不大,输沙量变化略大于径流量变化。

表8 不同气候条件下渌水流域水沙模拟统计表(1980年土地利用条件下)

Table 8 Statistics of runoff and sediment simulation in the Lushui basin under different climatic conditions (land use conditions in 1980)

变量	1960—1993年气候		1994—2019年气候	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数
降雨量/mm	1 556.69	0.17	1 607.28	0.16
径流量/亿 m <sup>3</sup>	27.53	0.26	27.68	0.25
输沙量/万 t	39.58	0.73	40.02	0.60

## 2.5.3 气候和土地利用变化对流域水沙的综合影响及贡献率分析

## 2.5.3.1 气候和土地利用变化对径流的影响及贡献率

基于1960—1987年气候条件模拟1980年土地利用条件下的径流响应,基于1988—2019年气候条件分别模拟1990年和2015年土地利用条件下的径流响应,结果见表9。由表9可知,土地利

用从1980年变化到1990年,气候条件从1960—1987年变化到1988—2019年,径流量多年平均值增加了0.76亿 m<sup>3</sup>,增幅为2.79%;土地利用从1980年变化到2015年,气候条件从1960—1987年变化到1988—2019年,多年平均径流量增加了1.31亿 m<sup>3</sup>,增幅为4.81%。在1988—2019年气候条件下,土地利用从1990年变化到2015年,多年平均径流量增加了0.55亿 m<sup>3</sup>,增幅为1.96%。

表9 渌水流域气候和土地利用变化对径流量的影响

Table 9 Effects of climate and land use changes on runoff in the Lushui Basin

1960—1987年气候		1988—2019年气候				影响量/亿 m <sup>3</sup>		贡献率/%	
1980年土地利用		1990年土地利用		2015年土地利用					
径流量平均值/ 亿 m <sup>3</sup>	变异系数	多年平均径 流量/亿 m <sup>3</sup>	变异系数	多年平均径 流量/亿 m <sup>3</sup>	变异系数	土地利用 变化	气候 变化	土地利用 变化	气候 变化
27.24	0.26	28.00	0.24	28.55	0.23	0.55	0.76	41.98	58.02

由前文研究结果可知,1980年到1990年土地利用变化幅度较小,因此1960—1987年气候组合1980年土地利用情景与1988—2019年气候组合1990年土地利用情景下的多年平均径流量的差

值,可认为是气候变化造成的;1988—2019年气候组合1990年土地利用情景与1988—2019年气候组合2015年土地利用情景下的多年平均径流量的差值是由土地利用变化造成的。计算气候和土地

利用变化各自对径流量的影响量,再除以气候和土地利用同时变化对径流量的影响量,得到1960年后气候和土地利用各自对径流量变化的贡献率,分别为58.02%和41.98%。由此可以验证第2.2.2节降雨-径流双累积曲线贡献度,并进一步解释了1960—2019年径流量变化是由降雨和土地利用变化共同导致的。

### 2.5.3.2 气候和土地利用变化对输沙的影响及贡献率

基于1960—1993年气候条件模拟1990年土地利用条件下的输沙响应,基于1994—2019年气候条件分别模拟1995年和2015年土地利用条件下的输沙响应,统计以上气候和土地利用组合情景下流域出口的多年平均输沙量(表10)。由表10可知,当土地利用从1990年变化到1995年,气候条件从1960—1993年变化到1994—2019年时,输沙量多年平均值增加了0.48万t,增幅为1.21%;当土地利用从1990年变化到2015年,气候条件从1960—1993年变化到1994—2019年时,多年平均

输沙量减少了1.85万t,减幅为4.67%。在1994—2019气候条件下,当土地利用从1995年变化到2015年时,多年平均输沙量减少了2.33万t,减幅为5.81%。

由前文研究结果可知,1990年到1995年土地利用变化幅度较小,因此1960—1993年气候组合1990年土地利用情景与1994—2019年气候组合1995年土地利用情景下的多年平均输沙量的差值,可认为是气候变化造成的;1994—2019年气候组合1995年土地利用情景与1994—2019年气候组合2015年土地利用情景下的多年平均输沙量的差值主要归因于土地利用变化。由此计算得到1960—2019年气候变化对输沙量增加的贡献率为25.95%,土地利用变化对输沙量减少的贡献率为125.95%。由此可以验证第2.2.2节降雨-输沙双累积曲线贡献度,并进一步解释了1960—2019年输沙变化主要是由土地利用变化导致的。

表10 绿水流域气候和土地利用变化对输沙的影响

Table 10 Effects of climate and land use changes on sediment in the Lushui Basin

1960—1993年气候		1994—2019年气候				影响量/万 t		贡献率/%	
1990年土地利用		1995年土地利用		2015年土地利用					
多年平均输沙量/万 t	变异系数	多年平均输沙量/万 t	变异系数	多年平均输沙量/万 t	变异系数	土地利用变化	气候变化	土地利用变化	气候变化
39.63	0.73	40.11	0.60	37.78	0.59	-2.33	0.48	-125.95	25.95

## 2.6 未来土地利用情景下的水沙响应分析

### 2.6.1 未来土地利用情景预测

本节设计三个未来土地利用情景,使用土地利用预测模型对三个未来情景的土地利用状况进行预测,其中两个未来情景为当前发展模式下的2030年、2050年土地利用,即在保障生态红线条件下,不对现有流域发展做任何限制,预测2030年、2050年的土地利用状况。根据湖南省2022年开始推行的省市县乡村组户七级“田长制”政策,构建第三个未来情景——耕地保护模式下的2030年

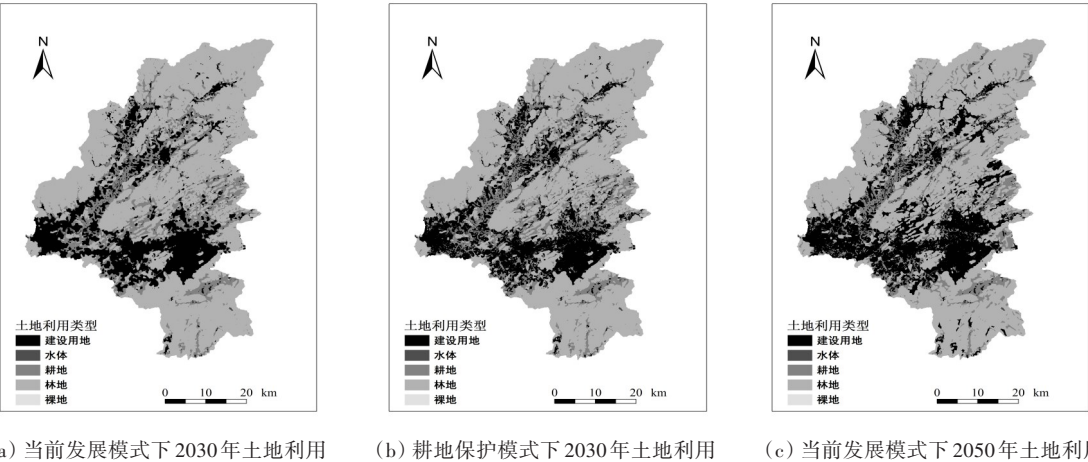
土地利用,即在保障生态红线条件下,严格限制耕地面积变化,预测2030年的土地利用状况。预测结果见表11与图8。

在当前发展模式下,城市扩张不受限制,建设用地面积不断增加,耕地、林地受建设用地侵占面积不断减少,预测出的2030年、2050年建设用地面积分别占全流域面积的20.40%、25.31%;在湖南耕地保护政策所构建的耕地保护模式下,城市扩张受到一定限制,2030年建设用地面积将占全流域面积的20.22%。

表11 两种预测模式下流域未来土地利用类型面积占比

Table 11 Proportion of future land use types in two prediction models %

预测模式	建设用地	水体	耕地	林地	裸地
对照组(2020年土地利用)	15.08	0.20	18.55	66.17	0.00
当前发展模式(2030年土地利用)	20.40	0.21	17.73	61.65	0.01
耕地保护模式(2030年土地利用)	20.22	0.21	18.56	61.00	0.01
当前发展模式(2050年土地利用)	25.31	0.20	16.57	57.91	0.01



(a) 当前发展模式下2030年土地利用 (b) 耕地保护模式下2030年土地利用 (c) 当前发展模式下2050年土地利用

图8 不同发展模式下流域未来土地利用图

Fig. 8 Future land use map under different development modes in the Lushui Basin

2.6.2 水沙对未来土地利用情景的响应分析

为探究未来土地利用情景下的水沙响应,将当前发展模式和耕地保护模式作为试验组,2020年土地利用状况作为对照组,基于构建好的HSPF

模型,输入两种土地利用情景,还原多年绿水流域历史降水,分析两种土地利用情景对水沙变化的影响,结果见表12~14。

表12 不同土地利用情景下各土地利用类型面积统计表

Table 12 Statistics on the area of land use types under different land-use scenarios km<sup>2</sup>

不同土地利用情景	建设用地	水体	耕地	林地	裸地
对照组(2020年土地利用)	460.55	6.25	566.58	2 021.19	0.01
情景1(当前发展模式2030年土地利用)	622.72	6.31	541.44	1 882.73	0.01
情景2(耕地保护模式2030年土地利用)	617.41	6.52	566.86	1 862.87	0.01
情景3(当前发展模式2050年土地利用)	770.37	6.19	504.41	1 762.73	0.43

表13 未来情景下流域历史降水反演年径流量对比表

Table 13 Comparison of annual runoff from historical precipitation in the basin under future scenarios 亿 m<sup>3</sup>

降水年	年径流量				年径流量的变化量			
	对照组	情景1	情景2	情景3	情景1-对照组	情景2-对照组	情景3-对照组	情景2-情景1
丰水年2014	32.896	33.152	33.145	33.421	0.256 (0.778%)	0.249 (0.757%)	0.525 (1.596%)	-0.007 (-0.021%)
平水年2005	27.944	28.243	28.237	28.582	0.299 (1.070%)	0.293 (1.049%)	0.638 (2.283%)	-0.006 (-0.021%)
枯水年2003	20.242	20.470	20.461	20.703	0.228 (1.126%)	0.219 (1.082%)	0.461 (2.277%)	-0.009 (-0.044%)
平均值	27.027	27.288	27.281	27.569	0.261 (0.966%)	0.254 (0.939%)	0.541 (2.003%)	-0.007 (-0.026%)

注:表中括号内的数据为年径流量的变化率。

表14 未来情景下流域历史降水反演年输沙量对比表

Table 14 Comparison of annual sediment from historical precipitation in the basin under future scenarios 万 t

降水年	年输沙量				年输沙量的变化量			
	对照组	情景1	情景2	情景3	情景1-对照组	情景2-对照组	情景3-对照组	情景2-情景1
丰水年2014	53.020	51.019	51.257	48.913	-2.001 (-3.774%)	-1.763 (-3.325%)	-4.107 (-7.746%)	0.238 (0.466%)
平水年2005	27.612	27.047	27.076	26.419	-0.565 (-2.046%)	-0.536 (-1.941%)	-1.193 (-4.321%)	0.029 (0.107%)
枯水年2003	24.942	24.062	24.102	23.209	-0.880 (-3.528%)	-0.840 (-3.368%)	-1.733 (-6.948%)	0.040 (0.166%)
平均值	35.191	34.043	34.145	32.847	-1.148 (-3.262%)	-1.046 (-2.972%)	-2.344 (-6.661%)	0.102 (0.300%)

注:表中括号内的数据为年输沙量的变化率。



当前发展模式下的2030年土地利用(情景1)相较于2020年土地利用,情景1由于不透水面积占比增加,而耕地、林地面积占比减少,导致年径流量上升了0.778%~1.126%,虽然耕地与林地占比同时减少,但是林地转出面积最终转入了不透水面积,因此,年输沙量下降了2.046%~3.774%。

同理,当前发展模式下的2050年土地利用(情景3)相较于2020年土地利用,不透水面积占比显著增加,耕地、林地面积占比显著减少导致年径流量上升了1.596%~2.283%,年输沙量下降了4.321%~7.746%。

耕地保护模式下的2030年土地利用(情景2)相较于2020年土地利用,情景2年径流量上升了0.757%~1.082%,年输沙量下降了1.941%~3.368%。但是相较于情景1,情景2的城市扩张受到一定限制,年径流量下降了0.021%~0.044%,年输沙量上升了0.107%~0.466%。

结合耕地面积变化与输沙量变化发现,相比2020年土地利用情景,耕地保护模式下农业耕种面积基本不变,但由于城市扩张,下垫面硬化<sup>[21]</sup>,导致年平均输沙量下降2.973%;相比于当前发展模式,耕地保护模式下农业耕种面积上升4.695%,而年平均输沙量仅上升0.301%。综上所述,耕地保护模式下在保障耕地面积的同时,并未明显加剧水土流失问题,还能兼顾社会经济发展和城市化建设。

### 3 结论

本文以绿水流域为研究区域,基于1980—2020年遥感影像,提取并分析该流域内土地利用变化规律及驱动因素,进一步构建土地利用预测模型并完成模型精度验证;收集整理绿水流域1960—2019年实测水沙数据并分析其变化规律,研究水沙演变及其对气候变化与人类活动的响应;构建半分布式水文模型并完成模型的率定及验证工作,基于模型量化气候与土地利用变化对水沙过程的影响;最后,设定两种未来发展模式,基于水文模型和土地利用预测模型探究未来土地利用情景对水沙变化的影响,为流域规划和水土流失防治提供参考。研究得到的结论主要有:

1) 受人口迁移、经济发展、政策等因素影响,在1980—2020年期间,绿水流域林地面积减少了7.36%;耕地面积减少了27.92%;建设用地面积增加了552.71%,土地利用突变点在1995—2000年间,且随着城市化的推进,建设用地的面积还会继续增加。

2) 气候变化与人类活动对径流增加的贡献率分别为49.53%、50.47%;对输沙减少的贡献率分别为3.45%、96.55%。结果表明,径流量发生改变是人类活动和气候变化共同作用的结果,而输沙量减少的原因主要归结于人类活动。

3) 率定与验证阶段,模型对月径流量及月输沙量的模拟效果较为理想,径流相对误差均小于25%,纳什系数均大于0.85;输沙相对误差均小于45%,纳什系数均不小于0.65,基本满足模拟精度的要求。为量化气候变化和土地利用变化对流域水沙的影响,利用HSPF模型开展3组试验。结论如下:① 气候条件固定,林地、耕地向建筑用地转化会导致径流量增加、输沙量减少;② 土地利用固定,气候变化(降雨增加)会导致流域径流量和输沙量增加;③ 气候变化、土地利用变化对径流量增加的贡献率分别为58.02%、41.98%。气候变化对输沙量增加的贡献率为25.95%,土地利用变化对输沙量减少的贡献率为125.95%。

4) 分析未来土地利用情景下的水沙响应,结果表明:依照当前发展模式,2030年土地利用(情景1)与2050年土地利用(情景3)不透水面积占比增加,耕地、林地面积占比减少,会导致年径流量上升,输沙量下降;在耕地保护模式下农业耕种面积基本不变,但由于城市扩张,下垫面硬化,导致输沙量平均下降2.973%。相比于当前发展模式,耕地保护模式下的农业耕种面积上升4.695%,而输沙量仅上升0.301%。综上所述,耕地保护模式在保障耕地面积的同时,并未明显加剧水土流失问题,还能兼顾社会经济发展和城市化建设。

### [参考文献]

- [1] “黄河流域生态保护和高质量发展战略研究”综合组. 黄河流域生态保护和高质量发展协同战略体系研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 93-103. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.01.010.  
The Comprehensive Research Group for Research on

- Ecological Protection and High-Quality Development Strategy of the Yellow River Basin. Coordinated strategy of ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 93-103. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.01.010.
- [2] 胡春宏, 张双虎, 张晓明. 新形势下黄河水沙调控策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 122-130. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.01.013.
- HU Chunhong, ZHANG Shuanghu, ZHANG Xiaoming. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 122-130. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.01.013.
- [3] MIRAKHORLO M S, RAHIMZADEGAN M. Analysing the land-use change effects on soil erosion and sediment in the North of Iran; a case study: Talar watershed[J]. Geocarto International, 2019, 36(2): 1-16. DOI: 10.1080/10106049.2019.1624985.
- [4] ALAVEZ-VARGAS M, BIRKEL C, CORONA A, et al. Land cover change induced sediment transport behaviour in a large tropical Mexican Catchment[J]. Hydrological Sciences Journal, 2021, 66(6): 1069-1082. DOI: 10.1080/02626667.2021.1903472.
- [5] HAILE ERENA S, WORKU H. Dynamics of land use land cover and resulting surface runoff management for environmental flood hazard mitigation: the case of Dire Daw city, Ethiopia[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2019, 22: 100598. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100598.
- [6] JOSHI B R, YADAV S M. Effect on sediment delivery ratio by changes in land use land cover and construction of hydraulic structures at sub basin scale[J]. Journal of Applied Water Engineering and Research, 2022, 10(1): 52-63. DOI: 10.1080/23249676.2021.1932617.
- [7] 李彤. 资水流域径流演变规律及其归因分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- LI Tong. Runoff evolution regularity and attribution analysis in Zijiang watershed[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018.
- [8] 胡国华, 李滔, 盛丰, 等. 基于降水量距平百分率的湘江流域干旱时空特征研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 74-82, 91.
- HU Guohua, LI Tao, SHENG Feng, et al. Characteristics and adaptation of drought in Xiangjiang River based on the percentage of precipitation anomalies[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(1): 74-82, 91.
- [9] 李鹏, 陈沈良, 刘清兰, 等. 黄河尾间沙洲及河口形态对水沙变化的响应[J]. 泥沙研究, 2022, 47(2): 57-64. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2022.02.009.
- LI Peng, CHEN Shenliang, LIU Qinglan, et al. Responses of the processes in the Yellow River lowermost channel sandbars and estuary to the variation of water and sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(2): 57-64. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2022.02.009.
- [10] 赵占超, 侯素珍, 赖瑞勋, 等. 黄河内蒙古河段水沙及河床演变特性变化分析[J]. 水利水电技术, 2022, 53(2): 109-120. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.02.011.
- ZHAO Zhanchao, HOU Suzhen, LAI Ruixun, et al. Analysis on changes of water-sediment and riverbed evolution characteristics in Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(2): 109-120. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.02.011.
- [11] 梁健. 赣南桃江稀土矿区流域水系泥沙迁移和氨氮污染演化规律[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfy.2021.000004.
- LIANG Jian. Evolution of sediment transport and ammonia nitrogen discharge of rare earth Mining area in the Tao River Basin of south Jiangxi province[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfy.2021.000004.
- [12] 刘睿. 渭陕西段水沙变化对河流水质及细菌群落结构多样性的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2019.000003.
- LIU Rui. Influence of solid particles on water quality and microbial community structure in Weihe River (shaanxi section)[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2019.000003.
- [13] 薛雨婷, 李谢辉, 王磊, 等. 1976—2017年西南地区夏季不同等级降水时空变化特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 137-145. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.02.016.
- XUE Yuting, LI Xiehui, WANG Lei, et al. Spatial and temporal change characteristics of different grades of precipitation in summer in southwestern China from 1976 to 2017[J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2022, 44(2): 137-145. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.02.016.
- [14] 胡彩虹, 王艺璇, 管新建, 等. 基于双累积曲线法的径流变化成因分析[J]. 水资源研究, 2012, 1(4): 204-210. DOI: 10.4236/jwrr.2012.14028.
- HU Caihong, WANG Yixuan, GUANG Jianxin, et al. The causes of runoff variation based on double cumulative curve analysis method[J]. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(4): 204-210. DOI: 10.4236/jwrr.2012.14028.

- [15] OU-YANG Y, PARAJULI P B, FENG G, et al. Application of climate assessment tool (CAT) to estimate climate variability impacts on nutrient loading from local watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 363–371. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.017.
- [16] 朱丹彤. 基于内源释放实验及HSPF-WASP耦合模型分析环境因子对河流水质的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.004768.
- ZHU Dantong. Effect of environmental factors on river water quality analysis based on endogenous release experiments and HSPF-WASP coupling model [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.004768.
- [17] 刘燕. 南方典型小流域农业非点源污染模拟与分析: 以太平江流域为例[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2020.000401.
- LIU Yan. Simulation and analysis of agricultural non-point source pollution in typical small watersheds in south china: a case study in Taiping River Watershed. [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2020.000401.
- [18] 张先富. 基于HSPF半分布式水文模型的新立城水库流域水环境模拟及预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. DOI: CNKI: CDMD:1.1015.590892.
- ZHANG Xianfu. Water environment simulation and prediction research in Xinlicheng reservoir watershed based on semi-distributed hydrological model HSPF [D]. Changchun: Jilin University, 2015. DOI: CNKI: CDMD:1.1015.590892.
- [19] 王小伦, 刘雁, 张玉, 等. 基于CA-Markov模型的吉林省西部土地利用/覆被变化研究及预测[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(19): 7942–7948. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.19.012.
- WANG Xiaolun, LIU Yan, ZHANG Yu, et al. Exploration and prediction of land use/cover change in western Jilin Province based on CA-Markov model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(19): 7942–7948. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.19.012.
- [20] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 等. 基于RS和GIS的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(8): 928–935. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.08.004.
- LYU Jianshu, WU Quanyuan, ZHANG Zulu, et al. Land use change and ecological security assessment in Jining City based on RS and GIS [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 928–935. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.08.004.
- [21] 李盛, 秦苗, 刘萌, 等. 岳阳市某海绵城市道路系统降雨径流分析与评价[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(2): 9–16. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbzkb.2021.02.002.
- LI Sheng, QIN Miao, LIU Meng, et al. Analysis and evaluation of rainfall runoff of a sponge city road system in Yueyang City [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(2): 9–16. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbzkb.2021.02.002.

## Study on the evolution pattern of water and sediment in the Lushui Basin and their response to land use changes

LONG Yuannan<sup>1,2</sup>, ZHENG Moruo<sup>1,2</sup>, YAN Shixiong<sup>1,2</sup>, LIU Yizhuang<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** [Purposes] This study aims at exploring the effects of land use change on water and sediment changes in the Lushui Basin. [Methods] Based on remote sensing image data and measured water and sediment data, this study analyzes the trend of water and sediment changes and their response to land use changes in the Lushui Basin. Further, the CA-Markov urban expansion model and HSPF (hydrologic simulation program-Fortran) hydrological model were constructed to quantify the impacts of land use changes and climate change on runoff and sand transport. Based on models, future land use scenarios in the Lushui Basin were predicted and future water and sand process were simulated. [Findings] The area of built-up land in the Lushui Basin has continued to grow since 1980. The measured runoff in the Lushui Basin showed an increasing trend and the sand

transport showed a decreasing trend, with the abrupt change points in 1988 and 1998 respectively. The contribution of climate change and human activities to the increase of runoff is 49.53%, 50.47%, and the contribution to the decrease of sand transport is 3.45% and 96.55%, respectively. The land use scenario till the 2030 under the implementation of the arable land protection policy safeguards the area of arable land without significantly exacerbating the problem of soil erosion, and takes into account socio-economic development and urbanization. **[Conclusions]** The increase in runoff in the Lushui Basin after 1988 was the result of a combination of land-use change and climate change, while the significant decrease of sand transport in the basin after 1998 was largely attributed to land-use change.

**Key words:** water and sediment variation; Lushui Basin; HSPF model; land use change; CA-Markov model; contribution rate

---

**Manuscript received:** 2022-05-17; **revised:** 2022-05-31; **accepted:** 2022-05-31

**Foundation item:** Project(52079010) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (XSKJ2019081-41) supported by Water Science and Technology of Hunan province; Project (2020SK2130) supported by Hunan Provincial Key R&D Program; Project(kq2014103) supported by Natural Science Foundation of Changsha

**Corresponding author:** YAN Shixiong (1994—) (ORCID: 0009-0000-0813-2276) male, Ph.D. candidate, research interest: hydrology and water resources. E-mail: 1041747087@qq.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:黄志勇)