DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.013
田昌园,张红丽,汪军红,等.近 30 年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应[J].水土保持学报,2024,38(3):37-44.
TIAN Changyuan, ZHANG Hongli, WANG Junhong, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in Dabie Mountains of western Anhui in recent 30 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024, 38(3):37-44.

近 30 年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应

田昌园[1],张红丽[2],汪军红[3],李嘉宁[1],张 艺[1],查同刚[1]
(1.北京林业大学水土保持学院.北京 100083;2.水利部水土保持监测中心,北京 100000;
3.霍山县水土保持试验站,安徽 六安 237266)

摘 要:[**目的**]为明确安徽省内长江流域和淮河流域重要的生态过渡区皖西大别山区的景观格局与土壤侵蚀及其关系,为该区域的景观格局调控和水土流失治理提供参考。[**方法**]借助 RULSE 模型计算皖西大别山区近 30 年土壤侵蚀模数,借助景观指数对其景观格局的变化进行描述,并使用偏最小二乘回归(PLSR)探究该区域景观指数对土壤侵蚀的影响关系。[**结果**]近 30 年,土壤侵蚀模数呈先减少后增加趋势;土壤侵蚀较严重地区主要集中在中西部和南部山区;大部分地区土壤侵蚀强度主要为微度和轻度,且各类土地利用类型的侵蚀强度有明显差别,表现为草地>耕地>林地;土地利用类型及景观格局总体较稳定,景观格局变化主要表现为景观破碎化的降低、景观异质性和连接性的提高;香农多样性指数(SHDI)、边界密度指数(*ED*)、相似邻近百分比(PLADJ)、景观形状指数(LSI)对皖西大别山区具有显著解释意义,且表现为 SHDI、*ED*、LSI 对土壤侵蚀起显著正向作用,PLADJ 对土壤侵蚀起显著负向作用。[**结论**]在皖西大别山区,景观破碎化的提高和景观连通度的降低显著促进土壤侵蚀。

关键词: 土壤侵蚀; 景观格局; RULSE 模型; 偏最小二乘回归
中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A 1009-2242-(2024)03-0037-08

Temporal and Spatial Changes of Soil Erosion and Its Response to Landscape Pattern in Dabie Mountains of Western Anhui in Recent 30 Years

TIAN Changyuan[1], ZHANG Hongli[2], WANG Junhong[3], LI Jianing[1], ZHANG Yi[1], ZHA Tonggang[1]
(1.*School of Soil and Water Conservation*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*;
2. *Soil and Water Conservation Monitoring Center*, *Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100000, *China*;
3. *Huoshan Water and Soil Conservation Monitoring Station*, *Lu'an*, *Anhui* 237266, *China*)

Abstract: [**Objective**] The Dabie Mountain area in western Anhui Province is an important ecological transition area between the Yangtze River Basin and the Huaihe River Basin in Anhui Province. The study on the landscape pattern and soil erosion and their relationship in this area is helpful to provide a reference for the regulation of landscape pattern and soil erosion control in this area. [**Methods**] The RULSE model was used to calculate the soil erosion modulus in the Dabie Mountains of western Anhui in the recent 30 years. The changes of landscape pattern were described by landscape index, and the influence of landscape index on soil erosion was explored by partial least squares regression (PLSR). [**Results**] In recent 30 years, the soil erosion modulus showed a trend of decreasing first and increasing later. The areas with serious soil erosion were mainly concentrated in the central and western regions and the southern mountainous areas. In most areas, the soil erosion intensity was mainly slight and mild, and the erosion intensity of different land use types had obvious difference, which was grassland > cultivated land > forest land. The land use type and landscape pattern were generally stable. The change of landscape pattern was mainly manifested in the reduction of landscape fragmentation and the improvement of landscape heterogeneity and connectivity.

收稿日期:2023-10-13 **修回日期:**2023-12-15 **录用日期:**2023-12-27 **网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-01-03
资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFF1303)
第一作者:田昌园(2000—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事土壤退化与生态修复研究。E-mail:tianchangyuan@bjfu.edu.cn
通信作者:查同刚(1972—),男,安徽六安人,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤退化与生态修复研究。E-mail:zhtg73@bjfu.edu.cn

Shannon's Diversity Index (SHDI), Edge Density Index (*ED*), Proportion of Like Adjacencies (PLADJ), and Landscape Shape Index (LSI) had significant explanatory significance for the Dabie Mountain area in west Anhui Province. Shannon's Diversity Index (SHDI), Edge Density Index (*ED*), and Landscape Shape Index (LSI) had significant positive effects on soil erosion, while Proportion of Like Adjacencies (PLADJ) had significant negative effects on soil erosion. [**Conclusion**] In the Dabie Mountains of western Anhui, the increase of landscape fragmentation and the decrease of landscape connectivity will significantly promote soil erosion.

Keywords: soil erosion; landscape pattern; RULSE model; partial least-squares regression

Received: 2023-10-13 **Revised**: 2023-12-15 **Accepted**: 2023-12-27 **Online**(www.cnki.net): 2024-01-03

土壤侵蚀是造成区域土地生产力下降、植被退化的重要原因,严重威胁着区域的生态环境与经济发展。同时,水土流失的过程也造成土壤养分流失[1],成为面源污染的重要驱动力[2]。景观单元的组成、配置及其空间分布能改变水文路径和侵蚀系统,合理地配置景观单元的空间镶嵌特征,能提高土壤流失的拦截能力,减少泥沙向水体的输出[3]。景观指数是景观格局分析的有力工具,探究景观格局与土壤侵蚀等生态过程之间的耦合关系是景观生态学研究的关键[4]。

USLE/RULSE 模型作为有效的预报经验模型被广泛应用于土壤侵蚀研究,近年来,多名学者利用该模型从土壤侵蚀区域分布[5]、土壤侵蚀时空变化[6]以及土壤侵蚀的驱动因素[7]等方面对土壤侵蚀特征进行分析,得到丰富的研究成果。对于景观指数对土壤侵蚀的作用机制,国内外学者进行了大量研究,高艳丽等[3]研究汉江流域景观格局演变对土壤侵蚀的影响得出,景观指数对土壤侵蚀有着正向或负向的作用;罗佳茹等[8]研究黄丘区特色治理开发小流域中景观格局演变对土壤侵蚀的影响得出,景观指数能很好地从景观水平描述流域景观与土壤侵蚀之间的关系;ZHANG 等[9]使用回归分析研究景观指数对土地利用景观格局变化及其对土壤侵蚀的影响,为流域景观的优化管理提供理论参考。综上可知,利用景观指数可以在一定程度上反映景观对土壤侵蚀的作用特征。

皖西大别山既是安徽省内重要的生态区,也是长江流域和淮河流域的重要分水岭,该区域地形复杂,流域之间相互嵌套,水土流失不仅导致当地生态环境恶化,自然灾害频发,也严重威胁着长江和淮河流域的水质。景观格局对生态过程的作用具有空间异质性和尺度依赖性[4],现有研究关于景观格局与土壤侵蚀相互关系的研究大多针对于小流域[8]和流域尺度[10],缺少对多流域山区的探究,因此,对该区域进行土壤侵蚀时空变化评估,并分析该尺度下景观格局与土壤侵蚀关系探究具有重要现实意义。基于此,选取皖西大别山区为研究区,采用 1990—2020 年土地利用数据、降雨数据、土壤数据以及 DEM 数据,借助 RULSE 模型描述近 30 年皖西大别山区土壤侵蚀时空变化,使用偏最小二乘回归方法探究景观格局对土壤侵蚀的影响,进一步揭示该区域景观格局与土壤侵蚀的耦合关系,以期为该区的水土流失治理和景观调控管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

皖西大别山区(30°15′00″—31°54′36″N,115°22′12″—117°10′48″E)位于安徽省西南部(图 1)地区,与河南、湖北两省交界,属于大别山东脉,是安徽省内长江流域和淮河流域的分水岭,总面积约为 17 258.52 km^2。该区域属于北亚热带温暖季风性气候,年平均气温达 14～16 ℃,多年平均降水量为 1 400 mm,个别地区多年平均降水量可达 2 000 mm 以上,受梅雨影响显著,是典型的江淮梅雨区域。研究区内主要岩性为花岗岩、花岗片麻岩、凝灰岩以及砂岩等多种岩类,在此基础上发育的土壤类型主要有山地棕壤、黄棕壤和紫色土等。土地利用类型主要以林地、草地和耕地为主,其中林地占比最多。农业经济以茶叶、板栗等为主。

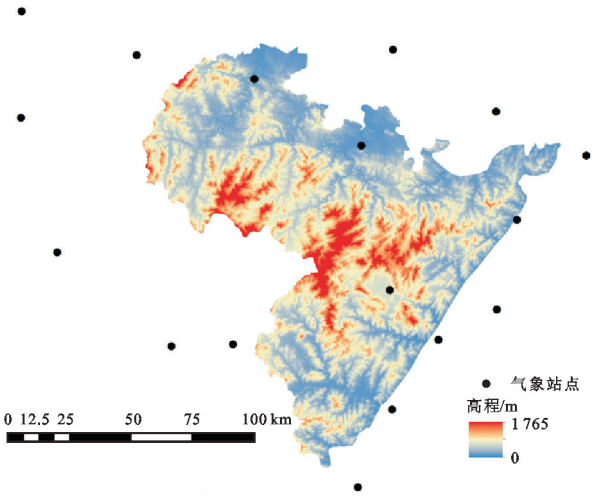

图 1 研究区域及气象站

Fig. 1 Location of study area and meteorological station

1.2　数据来源

土地利用分类数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（https://www.resdc.cn/），该数据通过 LUCC 分类体系对土地利用类型进行分类，空间分辨率为 30 m；

降雨数据来源于中国地面气象站日值数据集（v 3.0）中 17 个气象站 1990—2020 年的日降雨数据；

土壤数据来源于世界土壤数据库（HWSD）的中国土壤数据集（v 1.1）（http://westdc.westgis.ac.cn/），空间分辨率为 1 km；

数字高程数据（DEM）来自于地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）的 ASTER GDEM 数据，空间分辨率为 30 m。

在计算过程中，将所有空间数据全部重采样到 30 m 的空间分辨率下进行计算。

1.3　研究方法

1.3.1　土壤侵蚀计算　使用修正的土壤通用流失方程 RULSE 模型计算皖西大别山区土壤侵蚀模数，其公式为：

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \tag{1}$$

式中：A 为土壤侵蚀模数[t/(hm^2 · a)]；R 为降雨侵蚀力因子[(MJ · mm)/(hm^2 · h · a)]；K 为土壤可蚀性因子[(t · hm^2 · h)/(hm^2 · MJ · mm)]；LS 为坡度坡长因子，无量纲；C 为植被覆盖与管理因子，无量纲；P 为水土保持措施因子，无量纲。

降雨侵蚀力因子的计算采用章文波等[11]建立的基于日降雨资料的年降雨侵蚀力简易算法，鉴于此，采用 1990—2020 年皖西大别山区周边庐江、六安、霍山、舒城、岳西、桐城、太湖、潜山、怀宁、宿松、金寨、商城、罗田、英山、光山、新县和麻城等 17 个气象站（图 1）的日降雨数据进行计算，计算公式为：

$$R_i = \alpha \cdot \sum_{n=1}^{k} P_n{}^{\beta} \tag{2}$$

式中：R_i 为第 i 个半月的降雨侵蚀力[(MJ · mm)/(hm^2 · h · a)]；P_n 为半个月内第 n 天的侵蚀性降雨量（mm），要求 $P_n \geqslant 12$ mm，若 <12 mm 则计为 0[12]；k 为半月的天数（天），将每个月的前 15 天看作 1 个半月时段，剩下的天数作为另一个半月时段；α 和 β 为模型参数，其公式为：

$$\beta = 0.836\ 3 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \tag{3}$$

$$\alpha = 21.586 \cdot \beta^{-7.189\ 1} \tag{4}$$

式中：P_{d12} 为发生侵蚀性降雨的日平均降雨量（mm）；P_{y12} 为年平均降雨量（mm）。

土壤可蚀性因子的计算选取 WILLIAMS 等[13]提出的 EPIC 模型计算，计算公式为：

$$K = 0.131\ 7\left\{0.2 + 0.3 \cdot \exp\left[-0.025\ 6 \cdot \mathrm{SAN}\left(1 - \frac{\mathrm{SIL}}{100}\right)\right]\right\} \left(\frac{\mathrm{SIL}}{\mathrm{CLA} + \mathrm{SIL}}\right)^{0.3} \cdot \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95 \cdot C)}\right] \left[1 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(22.9SN_1 - 5.51)}\right] \tag{5}$$

$$SN_1 = 1 - \frac{\mathrm{SAN}}{100} \tag{6}$$

式中：SAN 为砂粒含量（%）；SIL 为粉粒含量（%）；CLA 为黏粒含量（%）；C 为有机碳含量（%）。

坡度坡长因子采用汪帮稳等[14]提出的算法计算，其中坡度因子考虑陡坡与缓坡分段计算，计算在 ArcGIS 平台上进行，计算公式为：

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\varphi + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\varphi - 0.50 & 5^\circ \leqslant \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\varphi - 0.96 & \theta \geqslant 10^\circ \end{cases} \tag{7}$$

式中：S 为坡度因子；θ 为基于 DEM 数据提取的坡度值（°）；φ 为坡度的弧度形式。

坡长因子的计算公式为：

$$L = (\lambda/22.1)^m \tag{8}$$

$$\alpha = \beta/(1 + \beta) \tag{9}$$

$$\beta = (\sin\varphi/0.089\ 6)/(3 \cdot \sin\varphi^{0.8} + 0.56) \tag{10}$$

式中：L 为坡长因子；m 为坡长指数；λ 为水平坡长（m）；β 为细沟和细沟间侵蚀的比率。

植被覆盖与管理因子和水土保持措施因子参考前人[14-16]研究，结合皖西大别山区的区域特点，对土地利用图进行赋值计算。旱地、建设用地、水田、疏林地、水域 C 因子赋值分别为 0.35，0.20，0.18，0.02，0；草地、有林地、灌木林及其他林地赋值为 0.006；林地、草地 P 因子赋值为 1，旱地、水田 P 因子赋值分别为 0.35，0.15，建设用地、水域赋值均为 0。由于研究区中未利用地占比较小（<0.02%），且其主要类型为裸岩石质地，几乎不发生土壤侵蚀，因此，将未利用地 C 因子和 P 因子赋值为 0。

1.3.2　景观格局指数的计算　与土壤侵蚀相关的景观特征主要表现在景观破碎度[17]，在景观水平上选择斑块、边界密度指数、形状类指数、描述聚集与分散的指数及斑块类型多样性等 4 个类型的 7 个景观指数，分析皖西大别山区的景观格局变化特征及其对土壤侵蚀的影响，各类景观指数见表 1。

1990—2020 年景观指数的计算在 Fragstats 4.0 软件中进行。

表 1 景观指数及其类别

Table 1 Landscape index and its categories

景观指数类型	景观指数
斑块、边界密度指数	斑块密度(*PD*)
	边界密度(*ED*)
形状类指数	景观形状指数(LSI)
描述聚集与分散的指数	相似邻近百分比(PLADJ)
	斑块结合度(COHESION)
	分割指数(SPLIT)
斑块类型多样性指数	香农多样性指数(SHDI)

1.3.3 偏最小二乘回归 偏最小二乘回归(partial least squares regression,PLSR)集多元线性回归分析、典型相关分析及主成分分析于一体,是一种适合分析具有高度自相关、噪声的多个自变量数据的多元回归方法[18]。偏最小二乘回归方法能在自变量存在严重多重相关性及样本量少于自变量个数的条件下进行回归建模,且能在最终模型中包含原有的自变量。该方法可得到变量投影重要性(VIP)值,根据VIP可以判断自变量对因变量的解释程度,一般认为,VIP>1具有显著解释意义;0.8<VIP<1具有中等程度解释意义;VIP<0.8基本不具备解释意义[19]。在SPSS 27.0软件中以7个景观指数作为自变量,土壤侵蚀模数为因变量进行RLSR回归,利用VIP筛选对土壤侵蚀模式变化有解释意义的指标,并通过自变量的回归系数来分析景观指数对土壤侵蚀模数的影响。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀时空变化特征

在ArcGIS平台对土壤通用流失方程的各个因子及进行相乘计算,得到1990—2020年皖西大别山区土壤侵蚀强度变化,并参考《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)[20],结合土壤侵蚀模数,将其分为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀6个等级,其中,各等级土壤侵蚀模数范围值分别为<500,500~2 500,2 500~5 000,5 000~8 000,8 000~15 000,>15 000 t/(km^2·a)。

根据计算结果可知,1990—2020年皖西大别山土壤侵蚀模数总体呈现先下降后上升的趋势,平均土壤侵蚀强度为轻度侵蚀。1990—2000年总体呈下降趋势,2000年土壤侵蚀模数最小,为812.12 t/(km^2·a),相比1990年下降17.99%;2000—2020年土壤侵蚀模数呈增长趋势,2010年土壤侵蚀模数为1 519.48 t/(km^2·a),相比2000年增长87.10%,2010—2020年土壤侵蚀模数增加速率先减缓后增加,其中,2015年土壤侵蚀为1 706.64 t/(km^2·a),相比2010年增长12.31%。2020年土壤侵蚀模数上升至2 732.20 t/(km^2·a),土壤侵蚀达到近30年最大程度。

从土壤侵蚀强度空间分布图(图2)来看,1990—2000年土壤侵蚀明显减少的地区为皖西大别山区中部和南部,2000—2010年的土壤侵蚀增加主要在南部地区;到2020年皖西大别山土壤侵蚀强度以上地区主要集中在中西部和南部山区,主要分布在金寨县的西部和南部、霍山县的东南部、岳西县的西北部以及太湖县的中南和中北部山区,海拔较高,地形起伏度较大,且地表破碎化程度较高,易发生土壤侵蚀。

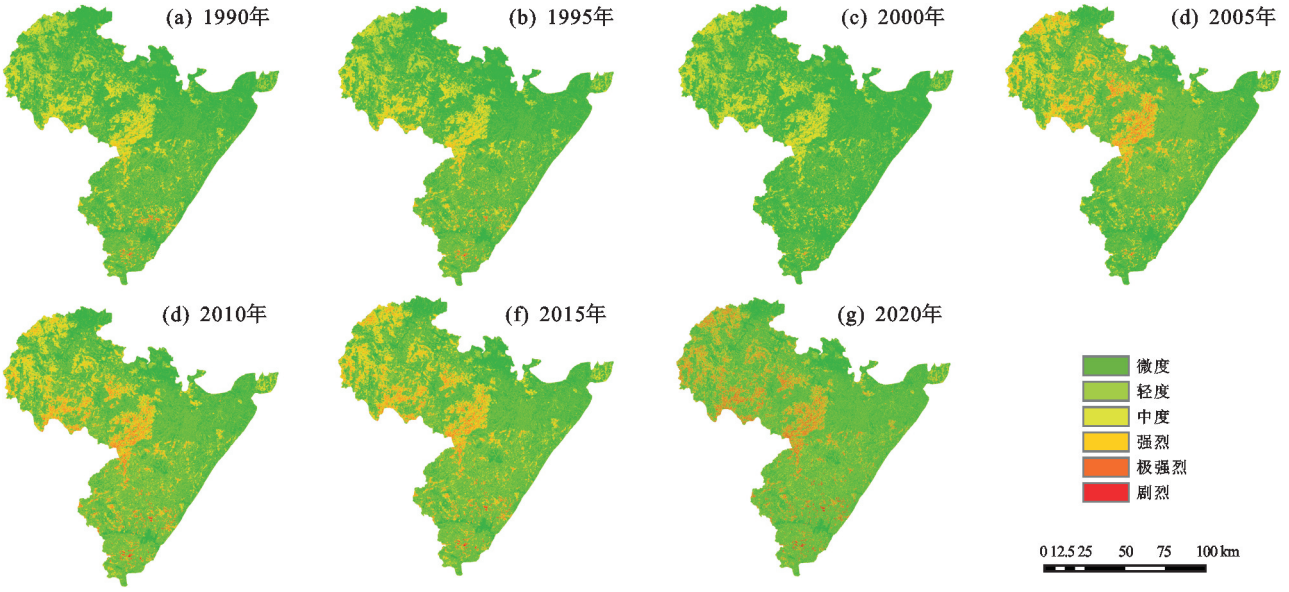

图 2 1990—2020年土壤侵蚀空间分布

Fig. 2 Spatial distribution map of soil erosion from 1990 to 2020

图 3 为 1990—2020 年 6 类土壤侵蚀强度等级面积占比的变化。由图 3 可知，皖西大别山区 1/2 以上区域土壤侵蚀等级为微度和轻度，在各年份中的占比均在 70% 以上，极强烈及以上等级占比较少。1990—2000 年主要表现为微度侵蚀面积的增加和极强烈侵蚀面积的减少；2000—2010 年微度侵蚀和轻度侵蚀面积均有减少，且极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积有明显增加；2010—2020 年土壤侵蚀程度增加的趋势主要体现在微度侵蚀面积的减少及极强烈和剧烈侵蚀面积的增加。

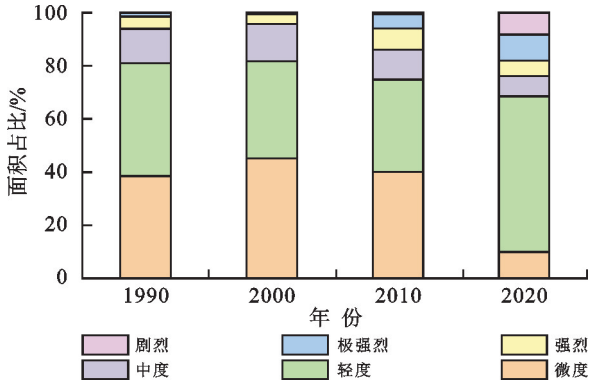

图 3　1990—2020 年各土壤侵蚀等级面积占比变化

Fig. 3　Change in the area proportion of each soil erosion grade from 1990 to 2020

对不同土地利用类型的土壤侵蚀模数进行提取（图 4）表明，皖西大别山区草地平均侵蚀模数最大，达到强度侵蚀，林地平均侵蚀模数最小，主要为微度和轻度侵蚀。不同土地利用类型土壤侵蚀模数呈草地＞耕地＞林地，3 种类型的土壤侵蚀模数也呈先减少后增加趋势。说明该区域在水土流失治理中，应重点关注草地和耕地 2 种土地利用类型。

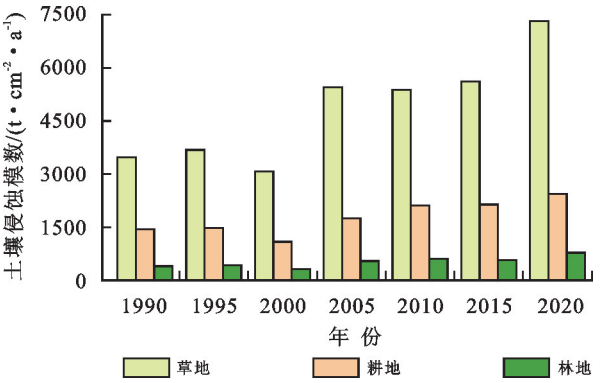

图 4　1990—2020 年不同土地利用类型侵蚀模数变化

Fig. 4　Changes in erosion modulus of different landuse types from 1990 to 2020

2.2　土地利用与景观格局动态变化

2.2.1　土地利用类型变化　表 2、表 3 和表 4 为 1990—2020 年土地利用类型的时空动态变化。从各类土地利用类型面积来看，皖西大别山区主要为林地，其次为草地和耕地。由转移矩阵可知，1990—2000 年草地、建设用地、水域和未利用土地面积较稳定，未有明显转出，2 203.20 hm^2 耕地转为林地，5 068.53 hm^2 林地转为耕地；2000—2010 年，草地以转变为林地为主，耕地以转变为林地为主，林地以转变为草地和耕地为主；2010—2020 年，草地转为林地与林地转为草地的面积基本相等，耕地主要转变为林地，小部分转为草地与建设用地。总体来说，皖西大别山区土地利用类型格局较稳定。

表 2　1990—2000 年土地利用转移矩阵

Table 2　Landuse transfer matrix from 1990 to 2000　　hm^2

年份	土地利用类型	2000 年					
		草地	建设用地	耕地	林地	水域	未利用土地
1990 年	草地	229 570.65	18.00	268.47	45.09	45.00	0
	建设用地	0.36	3 562.83	373.77	85.50	0.09	0
	耕地	34.11	0.45	184 087.26	2 203.20	0.81	0
	林地	310.95	0.36	5 068.53	820 976.67	4.50	0
	水域	0.18	0.09	0.99	5.04	20 430.81	0
	未利用土地	0	0	0	0	0	122.67

表 3　2000—2010 年土地利用转移矩阵

Table 3　Landuse transfer matrix from 2000 to 2010　　hm^2

年份	土地利用类型	2010 年					
		草地	建设用地	耕地	林地	水域	未利用土地
2000 年	草地	228 342.11	1.03	234.60	1 377.13	69.80	0.20
	建设用地	14.89	3 941.64	1 052.48	466.03	4.96	0
	耕地	239.64	54.28	182 929.52	2 253.62	74.54	0
	林地	1 241.67	21.58	2 030.27	822 030.49	152.01	1.51
	水域	30.93	2.75	57.24	167.73	20 133.49	0
	未利用土地	0.13	0	0	1.67	0	120.96

表4 2010—2020年土地利用转移矩阵

Table 4 Landuse transfer matrix from 2010 to 2020 hm^2

年份	土地利用类型	2020年					
		草地	建设用地	耕地	林地	水域	未利用土地
2010年	草地	225 403.64	5.32	706.26	3 684.63	84.07	1.14
	建设用地	124.17	5 202.93	1 528.75	2 474.71	268.14	0
	耕地	678.55	184.77	176 824.48	6 295.59	163.08	0
	林地	3 655.09	69.97	6 267.71	812 247.89	432.23	4.72
	水域	94.04	15.31	154.39	435.91	19 424.65	0
	未利用土地	1.08	0.31	9.67	115.28	13.97	116.90

2.2.2 景观格局指数变化 从景观水平(表5)来看,斑块密度(*PD*)先增加后减少再增加,总体变化比较微弱,近30年,皖西大别山地区景观破碎化程度也呈先增加后减少再增加趋势,但变化幅度不大;边界密度指数(*ED*)不断增加,说明该区域斑块形状趋于复杂,且斑块间物质能量交流性增强;景观形状指数(LSI)除在2010年有所下降外,总体呈增长趋势,表明各斑块的形状趋于复杂;相似邻近百分比(PLADJ)有略微降低,斑块结合度(COHESION)变化不明显。2类指数的变化表明,研究区破碎度略微减小;分割指数(SPLIT)在1990—2010年减少,在2020年有略微增加,但波动不大,表明该区域景观被分割程度降低,趋于完整;近30年,香农多样性指数(SHDI)总体呈略微增长趋势,其中,在2010—2020年增长最为明显,说明在2010年后,各类景观类型更加趋于稳定。总体来看,皖西大别山区各类景观指数变化幅度不大,在景观水平上破碎化程度有所降低,景观异质性和稳定性有所增加。

表5 1990—2020年景观水平指数变化

Table 5 Changes of landscape level index from 1990 to 2020

年份	*PD*	*ED*	LSI	PLADJ	COHESION	SPLIT	SHDI
1990	0.504 0	29.258 1	84.656 4	95.549 4	99.752 8	25.993 3	1.452 8
2000	0.505 9	29.275 7	84.704 4	95.546 8	99.753 1	25.383 6	1.450 9
2010	0.501 5	29.520 2	85.381 6	95.510 4	99.755 1	25.187 6	1.456 8
2020	0.503 7	29.668 1	85.959 4	95.483 7	99.753 5	25.256 4	1.471 2

2.3 土壤侵蚀对景观格局变化的响应

以皖西大别山区1990—2020年土壤侵蚀模数为因变量,以7个景观指数为自变量,进行偏最小二乘回归($R^2=0.658$)。结果表明,各景观指数对土壤侵蚀模数变化的解释能力依次为SHDI(1.230 0)>*ED*(1.221 0)>PLADJ(1.201 0)>LSI(1.169 0)>COHESION(0.772 0)>SPLIT(0.647 0)>*PD*(0.437 0),其中SHDI、*ED*、PLADJ、LSI的VIP均>1,说明4类景观指数对皖西大别山土壤侵蚀的变化具有显著的解释意义,其中边界密度指数的解释意义最强,而COHESION、SPLIT、*PD*的VIP均<0.8,因此,选取SHDI、*ED*、PLADJ和LSI 4个指数的回归系数进一步分析景观指数对土壤侵蚀的作用。

SHDI、*ED*、PLADJ和LSI的回归系数分别为0.312 0,0.232 0,0.214 0,−0.334 0,由此可知,SHDI、*ED*、LSI对土壤侵蚀起正向作用,且SHDI的正向作用最强;PLADJ对土壤侵蚀起负向作用。表明在皖西大别山区,SHDI、*ED*和LSI越大,土壤侵蚀程度越高,PLADJ越大,土壤侵蚀程度越小。

3 讨论

本研究表明,1990—2020年皖西大别山土壤侵蚀模数总体呈先下降后上升趋势,与徐少杰等[21]的研究结果一致。近年来,皖西大别山区降雨量呈增加趋势,且在2020年降雨量"骤增",年平均降雨量达2 000 mm以上,显著促进土壤侵蚀;在空间上,土壤侵蚀强度地区主要分布在中西部和南部山区,是由于此地区山高谷深,地形起伏较大,地表切割破碎,容易发生土壤侵蚀;在土壤侵蚀特征中,本研究得出,不同土地利用类型土壤侵蚀模数呈现草地>耕地>林地,可能是由于在该区域中,草地大部分分布在海拔较高和坡度较陡的地区,耕地主要分布在海拔较低且平坦的地区,因此,在地形因素的影响下,草地的土壤侵蚀较强于耕地,此结果与前人[21-22]的研究结果一致。

本研究中SHDI、*ED*、LSI对土壤侵蚀起正向作用,PLADJ对土壤侵蚀起负向作用。SHDI对皖西大别山区的土壤侵蚀起着正向促进作用,与LIU等[23]研究结果一致,SHDI越高,表明景观系统土地的不确定性信息含量越大,土壤保持功能越低[10],是

由于 SHDI 强调稀有斑块类型对其的贡献,其值的增大表明景观的斑块类型增加,导致景观连通性减小,从而为泥沙运移提供通道;*ED* 的正向作用表明,斑块密度增大,皖西大别山区土壤侵蚀呈增大趋势。斑块密度表现某种斑块在景观中的密度,揭示地块被分割的程度,可反映出景观整体的异质性与破碎度以及某一类型的破碎化程度,其数值增大表明景观破碎化程度增大,从而使得景观对泥沙运移的阻碍减弱[3],在降雨、人为活动等因素的驱动下,容易使土壤产生流失。与陈万旭等[10]研究结果相似,LSI 对土壤侵蚀具有正向作用,较高的 LSI 值说明斑块形状较为复杂[24],景观破碎化程度较高,与上述分析相同,景观破碎化的提高减少景观对土壤的阻滞作用,从而更容易引起土壤流失。PLADJ 表示景观的离散程度,即给定阈值内景观类型的连接程度,其值越高表示连接程度越高,有助于减少径流量,增强对泥沙的截留作用[3,25]。综上所述,在皖西大别山区,景观的破碎化促进土壤侵蚀,而适当增加景观类型的连接度,可减轻水土的流失程度。因此,在今后的水土保持工作中,应重点在景观单元间的通道和界面处进行泥沙运移的阻滞和疏导;在景观调控工作中,应增强景观单元的连通度,加强对整体景观的保护,防止其破碎化。

结合前人[17]研究,选取景观指数与土壤侵蚀过程进行耦合分析,然而,即使景观指数能在一定程度上反映土壤侵蚀过程,但其反映的仅是各类景观类型在其形状、结构和分布等方面的特点对土壤侵蚀的影响,由于土壤侵蚀过程的复杂性和异质性,在深入理解景观格局和土壤侵蚀过程的耦合关系方面还需要更为综合、全面的指标体系和方法描述。此外,本文得出景观破碎化的减少和景观连通度的提高减少土壤侵蚀的发生,但其影响阈值目前还尚不清楚,因此,景观格局对土壤侵蚀的影响关系阈值还值得去深入探讨。

4　结 论

(1)近 30 年皖西大别山区土壤侵蚀呈先下降后上升趋势;土壤侵蚀较严重地区主要集中在中西部和南部山区,且南部山区近 30 年变化较大。大部分地区土壤侵蚀强度主要为微度和轻度,且各类土地利用类型的侵蚀强度有明显差别,表现为草地>耕地>林地。

(2)近 30 年,皖西大别山区的土地利用类型和景观格局总体较稳定,景观格局主要表现为景观破碎化的降低及景观异质性和连接性的提高。

(3)SHDI、*ED*、PLADJ、LSI 4 个指数对皖西大别山区具有显著解释意义,且表现为 SHDI、*ED*、LSI 对土壤侵蚀起正向作用,PLADJ 对土壤侵蚀起负向作用。

参考文献:

[1] 邓越,唐代生,李裕元,等.亚热带典型农林混合流域河岸带景观格局对河流磷输出的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):64-70.
DENG Y, TANG D S, LI Y Y, et al. Influences ofriparian landscape pattern on river phosphorus output in typical subtropical agroforestry mixed watershed[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(3):64-70.

[2] 陈正发,龚爱民,宁东卫,等.基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J].水土保持学报,2021,35(6):7-14.
CHEN Z F, GONG A M,NING D W, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient loss in Yunnan Province based on RUSLE model[J].Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(6):7-14.

[3] 高艳丽,李红波.汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J].生态学报,2021,41(6):2248-2260.
GAO Y L, LI H B. Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han River Basin[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(6):2248-2260.

[4] 孙然好,孙龙,苏旭坤,等.景观格局与生态过程的耦合研究:传承与创新[J].生态学报,2021,41(1):415-421.
SUN R H, SUN L, SU X K, et al. Study on the coupling of landscape pattern and ecological process: Inheritance and innovation[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(1):415-421.

[5] 张素,熊东红,吴汉,等.基于 RUSLE 模型的孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征[J].水土保持学报,2021,35(5):24-30.
ZHANG S, XIONG D H, WU H, et al. Research on spatial variation of soil erosion in Sunshui River Basin based on RUSLE model[J].Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(5):24-30.

[6] 陈朝良,赵广举,穆兴民,等.基于 RUSLE 模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J].水土保持学报,2021,35(4):73-79.
CHEN C L, ZHAO G J, MU X M, et al. Spatial-temporal change of soil erosion in Huangshui watershed based on RUSLE model[J].Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(4):73-79.

[7] 张艳,史飞航,张悦,等.黄河中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素[J].水土保持研究,2023,30(5):1-12.
ZHANG Y, SHI F H, ZHANG Y, et al. Temporal andspatial changes and driving factors of soil erosion in the middle reaches of the Yellow River[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(5):1-12.

[8] 罗佳茹,李斌斌,张风宝,等.黄丘区特色治理开发小流域土壤侵蚀变化对景观格局演变的响应[J].应用生态学报,2021,32(12):4165-4176.
LUO J R, LI B B, ZHANG F B, et al. Responses of soil

erosion to changes in landscape pattern and its evolution in watershed in the loess hilly region under characteristic management and development[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(12):4165-4176.

[9] 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.

[10] 陈万旭,梁加乐,卞娇娇,等.黄河流域景观破碎化对土壤保持服务影响研究[J].地理科学,2022,42(4):589-601.
CHEN W X,LIANG J L,BIAN J J,et al. Impact of landscape fragmentation on soil conservation services in the Yellow River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica,2022,42(4):589-601.

[11] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfallerosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica,2002,22(6):705-711.

[12] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
XIE Y, LIU B Y, ZHANG W B. Study onstandard of erosive rainfall[J].Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(4):6-11.

[13] WILLIAMS J R, DYKE P T, JONES C A. Epic: A model for assessing the effects of erosion on soil productivity[M]//Developments in Environmental Modelling. Amsterdam: Elsevier,1983:553-572.

[14] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.基于DEM和GIS的修正通用土壤流失方程地形因子值的提取[J].中国水土保持科学,2007,5(2):18-23.
WANG B W, YANG Q K, LIU Z H, etal. Extraction of RUSLE-LS factors using DEM data and GIS techniques[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,5(2):18-23.

[15] 郭思琪,韩磊,赵永华,等.秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局[J].生态学杂志,2019,38(7):2167-2176.
GUO S Q, HAN L, ZHAO Y H, et al. Spatiotemporal variation and landscape pattern of soil erosion in Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(7):2167-2176.

[16] 赵明松,李德成,程先富,等.皖西大别山区土壤侵蚀空间分布特征及与地形的关系[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2017,40(3):265-270.
ZHAO M S, LI D C, CHENG X F, et al. Spatial characteristicsof soil erosion and its relationship to topography in dabie mountains of West Anhui[J].Journal of Anhui Normal University (Natural Science),2017, 40(3):265-270.

[17] 刘宇.景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性[J].生态学报,2017,37(15):4923-4935.
LIU Y. Effectiveness of landscape metrics in coupling soil erosion with landscape pattern[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(15):4923-4935.

[18] SHI Z H, HUANG X D, AI L, et al. Quantitative analysis of factors controlling sediment yield in mountainous watersheds[J].Geomorphology, 2014,226:193-201.

[19] PÉREZ-ENCISO M, TENENHAUS M. Prediction of clinical outcome with microarray data: A partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) approach[J]. Human Genetics,2003,112(5):581-592.

[20] SL 190—2007,中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
SL190—2007, Ministry of water resources. Soil erosion classification standard[S].Beijing:China WaterResource sand Hydropower Press,2008.

[21] 徐少杰,邓良,赵明松,等.安徽省1980—2020年土壤侵蚀时空变化特征[J].科学技术与工程,2023,23(1):109-116.
XU S J, DENG L, ZHAO M S, et al. Spatial-temporal characteristics of soil erosion in Anhui Province from 1980 to 2020[J].Science Technology and Engineering, 2023,23(1):109-116.

[22] 程先富,余芬.安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系[J].地理研究,2010,29(8):1461-1470.
CHENG X F, YU F. Spatial distribution of soil erosion and its relationship to environment factors in Anhui Province[J]. Geographical Research,2010,29(8): 1461-1470.

[23] LIU L W, CHEN X R, CHEN W X, et al. Identifying the impact of landscape pattern on ecosystem services in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomerations, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2020,17(14):e5063.

[24] 刘晓君,李占斌,李鹏,等.基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究[J].生态学报,2016,36(18):5691-5700.
LIU X J, LI Z B, LI P, et al. Land use/cover change based relationship between landscape, runoff, and sedimentation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5691-5700.

[25] 吕乐婷,高晓琴,刘琦,等.东江流域景观格局对氮、磷输出的影响[J].生态学报,2021,41(5):1758-1765.
LÜ L T, GAO X Q, LIU Q, et al. Influence of landscape pattern on nitrogen and phosphorus output in the Dongjiang River Basin[J].Acta Ecologica Sinica,2021, 41(5):1758-1765.