

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.019; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.019.

许长安, 王乃举. 基于 RUSLE 和地理探测器的皖南地区土壤侵蚀时空分异及定量归因[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 21-29.

Xu Changan, Wang Naiju. Spatiotemporal differentiation and quantitative attribution of soil erosion in southern Anhui based on RUSLE and GeoDetector[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 21-29.

基于 RUSLE 和地理探测器的皖南地区 土壤侵蚀时空分异及定量归因

许长安¹, 王乃举²

(1. 合肥大学 生物食品与环境学院, 合肥 230601; 2. 合肥大学 旅游与会展学院, 合肥 230601)

摘 要: [目的] 揭示皖南地区土壤侵蚀时空分异特征及成因可为该区域的土壤侵蚀防治提供科学依据。[方法] 基于 RUSLE 模型和地理探测器, 结合多源遥感数据, 探查皖南地区土壤侵蚀时空分布及其影响因素。[结果] (1) 2002—2022 年该地区土壤侵蚀空间分布差异显著。安庆市北部大别山区、安庆市东南部大别山余脉大龙山片、铜陵市东部与芜湖市中西部狮子山片、池州市与宣城市南部、黄山市内黄山山区和周边齐云山及白际山等地区系主要侵蚀区; 而皖江诸市沿江平原及其他诸河河谷平原土壤侵蚀较小。(2) 2002—2022 年该地区的土壤侵蚀总体呈“下降—上升—下降”趋势。其中, 2002 年总侵蚀量为 2 231.41 万 t/a, 2007 年降至 2 118.05 万 t/a, 而 2012 年增至 2 452.36 万 t/a, 之后持续下降至 2022 年的 2 060.67 万 t/a。(3) 因子探测器的各因子解释力结果显示: 土地覆盖类型、坡度、海拔、降雨是该地区的主要影响因素。(4) 2002 年、2017 年、2022 年土地覆盖类型与其他因子共同作用对土壤侵蚀的解释力大于其他因子, 而 2007 年、2012 年为植被覆盖度与其他因子共同作用对土壤侵蚀的解释力较为突出。(5) 基于 2022 年的土壤侵蚀数据及因子数据所识别的高风险区域为植被覆盖度 < 37.1%、年均降水量 1 971.96 ~ 2 092.37 mm、坡度 > 63.96°、海拔 1 056 ~ 1 819 m、年均温度 10.46 ~ 11.3 °C 的灌丛。[结论] 皖南地区在过去 20 年中土壤侵蚀状况有所改善, 但坡度大、植被覆盖度低、降雨强度高及不合理土地利用的山地丘陵区仍然是高侵蚀风险区域, 未来的防治工作应针对这些重点区域。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 地理探测器; 皖南地区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0021-09

Spatiotemporal differentiation and quantitative attribution of soil erosion in southern Anhui based on RUSLE and GeoDetector

Xu Changan¹, Wang Naiju²

(1. School of Biology, Food and Environment, Hefei University, Hefei 230601, China;

2. School of Tourism and Convention & Exhibition, Hefei University, Hefei 230601, China)

Abstract: [Objective] The objectives of this study are to reveal the spatiotemporal differentiation characteristics and causes of soil erosion in southern Anhui Province and to provide a scientific basis for soil erosion prevention and control in this region. [Methods] Based on the RUSLE model and GeoDetector, combined with multi-source remote sensing data, the spatial and temporal distribution and influencing factors of soil erosion in southern Anhui were explored. [Results] (1) The spatial distribution of soil erosion in this region from 2002 to 2022 was significantly different. The Dabie Mountains in the north of Anqing City, the Dalongshan area in the southeast of Anqing City, the Lion Mountain area in the eastern part of Tongling City and the central and western parts of Wuhu City, the southern part of Chizhou City and Xuancheng City, the Huangshan

收稿日期: 2024-01-29

修回日期: 2024-02-27

资助项目: 安徽高校学科(专业)拔尖人才学术项目(gxbjZD2021015)

第一作者: 许长安(1997—), 男, 安徽省阜阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态。E-mail: xuchangan0917@163.com

通信作者: 王乃举(1971—), 男, 安徽省合肥市人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为资源环境评价。E-mail: wang200541607@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Mountain Area in Huangshan City and the surrounding Qiyun Mountain and Baiji Mountain were the main erosion areas. However, the soil erosion in the plains along the river and other river valleys in the cities of Anhui was small. (2) From 2002 to 2022, soil erosion in this area showed a general trend of ‘decreasing-rising-decreasing’. Among them, the total erosion in 2002 was 22 314 100 t/a, which decreased to 21 180 500 t/a in 2007, increased to 24 523 600 t/a in 2012, and then continued to decline to 20 606 700 t/a in 2022. (3) The explanatory power results of each factor detector show that land cover type, slope, altitude and rainfall are the main influencing factors in this area. (4) In 2002, 2017 and 2022, the explanatory power of land cover type and other factors on soil erosion was greater than that of other factors, while in 2007 and 2012, the explanatory power of vegetation cover and other factors on soil erosion was more prominent. (5) Based on the soil erosion data and factor data in 2022, the high-risk areas were shrubs with vegetation coverage less than 37.1%, average annual precipitation ranging from 1 971.96 to 2 092.37 mm, slope greater than 63.96°, altitude between 1 056 m and 1 819 m, and average annual temperature ranging from 10.46 °C to 11.3 °C. [Conclusion] Soil erosion has improved in southern Anhui in the past 20 years, but the mountainous and hilly areas with large slopes, low vegetation coverage, high rainfall intensity and irrational land use are still high erosion risk areas, and future prevention and control efforts should be aimed at these key areas.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; GeoDetector; southern Anhui region

土壤侵蚀是导致土地退化的主要自然过程之一,它使土壤母质遭受破坏和流失,降低土地生产力,威胁粮食安全^[1]。水力、风力和冻融是土壤侵蚀的主要类型。近年来,由于不合理的土地利用方式、气候变化等因素,土壤侵蚀日益严重,已成为全球范围内的环境问题^[2]。20 世纪 40—50 年代,通用土壤侵蚀方程(USLE)等^[3]经典土壤侵蚀模型的建立,开启了土壤侵蚀定量评估和预测的新纪元。USLE 模型采用多因子叠加的方法预测平均年土壤侵蚀量,奠定了后来土壤侵蚀模型发展的理论基础^[4]。在 USLE 基础上衍生发展出中国土壤侵蚀方程(CSLE)^[5]、改进的通用土壤侵蚀方程(RUSLE)等^[6]模型。RUSLE 模型因其与 GIS 可兼容、计算简便等特点,被广泛应用^[7]。如兰泽凡等^[8]基于 RUSLE 模型和 GIS/RS 技术,定量分析了雅鲁藏布江流域土壤侵蚀分布,并识别了关键侵蚀区域。杨严攀等^[9]采用 RUSLE 模型研究了鄂西南土壤侵蚀,并从人地关系视角分析了自然和社会经济驱动因素。池金洺等^[10]运用 RUSLE 模型,解析妫水河流域城市化过程中土壤侵蚀时空变化。可见,RUSLE 模型可为不同区域和尺度的土壤侵蚀研究提供有效支持。

目前安徽省土壤侵蚀的研究,主要是对皖西大别山、巢湖盆地等局部区域的土壤侵蚀时空演变分析。如邓国徽^[11]利用 RUSLE 模型分析了巢湖流域土壤侵蚀时空变化及土地利用变化效应。田昌园等^[12]借助 RUSLE 和景观指数,探究了皖西大别山区景观格局与土壤侵蚀的关系。这些研究已涉及土壤侵蚀的

多个影响因素,但尚缺乏定量检验不同因素交互作用和贡献率的分析。皖南地区作为包括或部分包括两个国家级重点预防区、两个省级重点预防区、4 个省级重点治理区的国家和地方政府的重点关注区域,其区域内土壤侵蚀机制和驱动因素亟待深入解析,以提供决策支持。因此,本研究将以皖南地区为研究区域,基于 RUSLE 模型结合遥感和 GIS 技术,深入剖析 2002—2022 年该区域土壤侵蚀时空分布特征、动态变化规律及其主导因素,并采用地理探测器方法进行各影响因子的交互作用强度定量检验等因子作用分析。该研究有助于理解皖南地区土壤侵蚀的发生机制,为区域土壤侵蚀治理提供科学依据。

1 研究区概况

皖南地区地处安徽省南部,与江苏、浙江、江西三省接壤,是长江三角洲重要组成部分。值得说明的是,本文中“皖南地区”的范围并非已撤销的原皖南行政区划,而是依据安徽省发展改革委确定的功能区划,与皖南国际旅游文化示范区^[13]的范围一致,涵盖黄山市、池州市、宣城市、马鞍山市、芜湖市、铜陵市、安庆市共七市,面积 5.7 万 km²,2014 年常住人口 1 895.2 万。该区属亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温暖少雨,年均气温 15.5~16 °C。地形以山地、丘陵和江河沿岸平原为主,主要山系有九华山、黄山和天目山,主要水系有长江及其支流新安江、青弋江和水阳江。植被以亚热带常绿阔叶林为主。矿产资源丰富,有铁、铜等。皖南地区数字高程模型如图 1 所示。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究的皖南地区的气候数据来源于国家科学数据共享平台的由西北农林科技大学水土保持研究所制作并提供的中国逐月降水数据集和逐月平均气温数据集(空间分辨率均为 1 km)。该数据基于 CRU 和 WorldClim 全球气候数据,采用 Delta 降尺度方法生成,并经过 496 个气象站点验证。土壤数据采用 FAO 和 II ASA 构建的世界土壤数据库 HWSO (分辨率 1 km)。植被 NDVI 数据为基于 Google Earth Engine 平台的处理 MODIS MOD13Q1 产品,使用 6—9 月数据中位数合成法得到年 NDVI,并利用 NDVI 和像元二分模型估算植被覆盖度 FVC。数字高程 DEM 来源于地理空间数据云提供的 GDEM v3 数据(分辨率 30 m)。土地利用数据为基于 Landsat 影像监督分类生成的 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年和 2022 年研究区土地利用图(分辨率 30 m,分类精度 87.5%),包含水田、旱地、林地、灌木、草地、水域、建设用地和裸土 8 个分类。

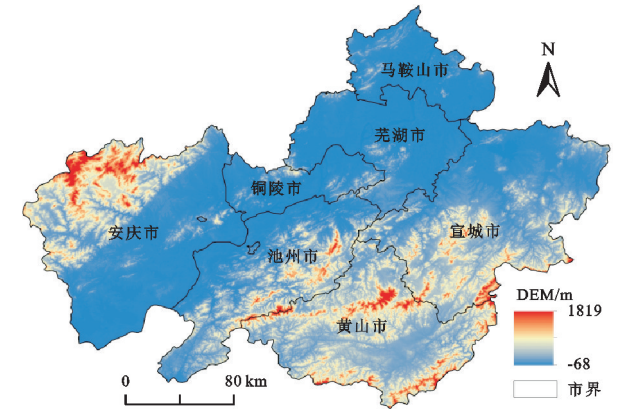
2.2 研究方法

2.2.1 土壤侵蚀模型 本研究基于 RUSLE 模型和 GIS 技术评价皖南地区 2002—2022 年土壤侵蚀的时空变化,模型计算公式为:

$$A=R\times K\times L\times S\times C\times P$$
 (1)

式中:A 为单位面积的年平均土壤侵蚀量[t/(hm²·a)]; R 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·h·a)],采用周伏建等^[14]的计算公式,以 5 a 平均值表示每期的降雨侵蚀力,如 2002 年的降雨侵蚀力为 1998—2002 年

的平均值;K 为土壤可蚀性因子[t·h/(MJ·mm)],基于 Williams^[15]在 EPIC 模型中的计算方法,并借助张科利等^[16]的修正方法确定 K 值;L,S 分别为坡长坡度因子,无量纲,采用张宏鸣等^[17]的方法计算坡长,L 因子采用 Wischmeier 等^[18]建立的公式,S 因子在缓坡(≤10°)采用 Mc Cool 等^[19]的公式,在陡坡(>10°)采用刘宝元等^[20]的算法;C 为植被覆盖因子;P 为水土保持措施因子,皆无量纲,结合皖南地区的土地利用数据、植被覆盖度数据,参考《中华人民共和国国家生态环境标准》(HJ1173-2021)、RUSLE 手册、刘宝元等^[21]、程先富等^[22]的研究,将水田、旱地、水域、建设用地、裸土地的 CP 因子值分别赋值为 0.01,0.108 5,0,0.01,0.7,林地、草地和灌木的 CP 因子值按不同植被覆盖度进行赋值(见表 1)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未做修改,下同图。

图 1 皖南地区地理位置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the geographical location of southern Anhui

表 1 CP 因子赋值依据

Table 1 Basis for assigning CP factors

土地利用类型	植被覆盖度/%					
	0~10	10~30	30~50	50~70	70~90	90~100
林地	0.10	0.08	0.06	0.02	0.004	0.001
草地、灌木	0.42	0.23	0.14	0.087	0.042	0.011

根据水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)^[23],依土壤侵蚀模数将皖南地区土壤侵蚀水平划分为 6 个等级,如表 2 所示。

表 2 土壤侵蚀等级分类

Table 2 Classification of soil erosion grades

侵蚀等级	侵蚀模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
微度侵蚀	<500
轻度侵蚀	500~2500
中度侵蚀	2500~5000
强烈侵蚀	5000~8000
极强烈侵蚀	8000~15000
剧烈侵蚀	>15000

2.2.2 地理探测器 地理探测器是一种基于变量地理分层分析的空间统计方法,可以检测研究对象的空间异质性,并评估变量与潜在影响因素之间的相关性^[24]。其计算公式^[25]为:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$
 (2)

式中:h 为因变量 Y 或自变量 X 的分层数;N 为总体样本数;N_h 为 h 层的样本数;σ² 为总体因变量 Y 的方差,σ_h² 为 h 层的方差。q 值范围为[0,1],其值表示自变量 X 对因变量 Y 的解释力,q 越大则 X 对 Y 的解释力越强。

本研究采用地理探测器分析 RUSLE 模型各影响因子对土壤侵蚀的作用力。参考前人的研究方法^[26],同时借助基于 R 语言的“GD”包最优参数地理探测器模型获取本文的连续型变量数据的最佳离散方法,将 6 类影响因子进行分类处理。年降雨量分为 10 类,年均温度分为 9 类,海拔数据分为 10 类,植被覆盖度分为 8 类,坡度分为 10 类,土地利用类型按前文预处理类别进行分类。将皖南地区划为 1 km 空间分辨率的分析单元,输入各影响因子数据和土壤侵蚀量数据至地理探测器,依据其输出的结果进行影响因子显著性分析和交互作用分析。

3 结果与分析

3.1 皖南地区土壤侵蚀强度的时空分布

将按上述土壤侵蚀模型中各因子计算方法计算所得的各因子图叠加,获得 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年、2022 年皖南地区土壤侵蚀模数分布图。由于此次研究时段内皖南地区按照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)分级后高侵蚀等级区域面积过小,会使得土壤侵蚀空间分布图以轻度侵蚀区域显示为主,分级显示效果不佳,因此采用杜朝正等^[27]分级方法绘制皖南地区 2002—2022 年土壤侵蚀强度空间分布图,且计算了该地区不同强度的土壤侵蚀面积、平均侵蚀速率和侵蚀量,见表 3 和表 4。

如图 2 所示,皖南地区大部分地区属于侵蚀速率小于 500 t/(km²·a)的微强度侵蚀,各强度土壤侵蚀面积按侵蚀速率从低到高依次递减,侵蚀速率大于 500 t/(km²·a)的需要预防与治理的区域主要分布于安庆市北部大别山区、安庆市东南部大别山余脉、铜陵市东部与芜湖市中西部、池州市和宣城市南部、黄山市内黄山山区和周边齐云山及白际山等地区,分

别对应“桐柏山大别山片”国家级重点预防区、“大龙山片”省级重点治理区、“狮子山片”省级重点治理区、“九华山—牯牛降”省级重点预防区、“青弋江—南漪湖上游”省级重点预防区、“新安江片”国家级重点预防区,与国家和省级重点防治区域范围较为一致。整体来看,除 2012 年黄山市徽州区北部与歙县西部短时出现较大面积的局部严重区外,其余区域侵蚀分布整体相似,较强侵蚀区域主要分布于大别山脉、九华山脉、天目—白际山脉 3 个区域。

表 3 皖南地区 20 年间土壤侵蚀面积

Table 3 The area of soil erosion in southern

Anhui in 20 years					km ²
侵蚀速率/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	2002 年	2007 年	2012 年	2017 年	2022 年
0~25	19616.83	20695.62	19748.49	19302.79	20047.71
25~50	8315.70	8723.04	8573.89	8429.01	8622.47
50~100	8456.36	8517.57	8502.26	8500.56	8600.73
100~250	8951.77	8370.13	8685.51	9045.59	8694.58
250~500	4646.07	4264.58	4419.37	4672.54	4427.74
500~750	2223.12	2056.56	2160.94	2229.58	2141.78
750~1000	1293.85	1228.24	1290.60	1297.59	1273.30
1000~1500	1529.43	1442.27	1536.02	1532.70	1499.46
1500~2000	835.34	746.46	825.73	838.59	783.00
2000~3000	738.24	626.20	720.78	744.67	651.33
>3000	730.78	667.03	872.27	740.44	595.33

表 4 皖南地区 20 年间土壤侵蚀平均速率与侵蚀量

Table 4 The average rate and amount of soil erosion in southern Anhui Province over the past 20 years

指标	2002 年	2007 年	2012 年	2017 年	2022 年
平均侵蚀速率/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	270.43	256.69	297.21	272.73	249.74
侵蚀量/ (t·a ⁻¹)	2231.41	2118.05	2452.36	2250.37	2060.67

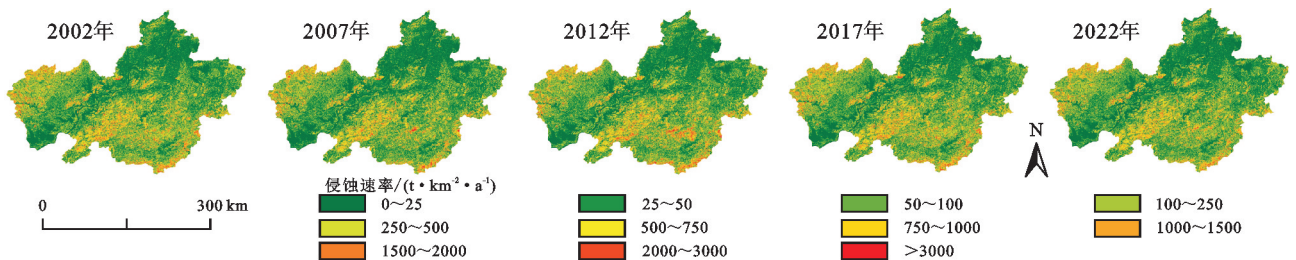


图 2 皖南地区土壤侵蚀强度分布

Fig. 2 Distribution of soil erosion intensity in southern Anhui Province

皖南地区的土壤侵蚀整体呈“下降—上升—下降”趋势,其 2002 年总侵蚀量为 2 231.41 万 t/a,在 2007 年降至 2 118.05 万 t/a,在 2012 年又增至 2 452.36 万 t/a,后至 2022 年持续下降至 2 060.67 万 t/a。五期皖南地区侵蚀速率图中接近且低于允许侵蚀速率的土壤侵蚀

[250~500 t/(km²·a)]区域面积分别为 4 646.07 km², 4 264.58 km², 4 419.37 km², 4 672.54 km², 4 427.74 km², 面积较大,侵蚀强度接近临界值,转化风险较高,需持续监测预防。侵蚀速率在 500~750 t/(km²·a)内的区域面积分别为 2 223.12 km², 2 056.56 km², 2 160.94

km^2 , 2 229.58 km^2 , 2 141.78 km^2 , 这些区域相比更高侵蚀速率的区域面积更大, 且超出允许侵蚀速率不多, 治理难度相对较低, 应及时采取相应措施遏制。侵蚀速率大于 3 000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的区域面积分别为 730.78 km^2 , 667.03 km^2 , 872.27 km^2 , 740.44 km^2 , 595.33 km^2 , 这些地区虽面积小但严重超出允许侵蚀速率值, 理应优先治理。

3.2 皖南地区土壤侵蚀等级的动态变化

为深入了解皖南地区的土壤侵蚀等级的动态变化, 将皖南地区土壤侵蚀模数分布图按照水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007) 进行分级, 再将 2002—2022 年这一时间段按每五年为一个时间步长划分为 4 个时段分别做侵蚀等级变化计算, 得到这 4 个时段的土壤侵蚀强度变化空间分布图、侵蚀强度面积转移桑基图以及 2002—2022 年土壤侵蚀转移矩阵表。考虑到此次研究时段内皖南地区高侵蚀等级的区域面积较小, 此处的土壤侵蚀变化桑基图只做发生土壤侵蚀程度变化区域的转移情况, 未发生侵蚀等级变化的区域不计入计算。

由图 3 可知, 皖南地区在 2002—2007 年和 2017—

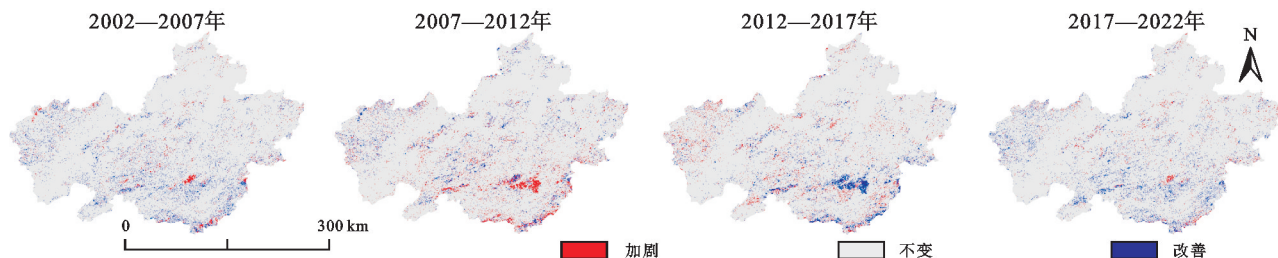


图 3 皖南地区土壤侵蚀强度变化空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil erosion intensity in southern Anhui Province

2002—2007 年、2007—2012 年、2012—2017 年、2017—2022 年 4 个时段内, 皖南地区土壤侵蚀有侵蚀强度变化的区域面积分别为 2 435.20 km^2 , 3 177.13 km^2 , 2 964.11 km^2 , 2 301.77 km^2 , 分别占总侵蚀面积的 4.24%, 5.53%, 5.15%, 4.00%。由图 4 可以看出, 本次研究时间范围内该地区的土壤侵蚀强度变化以微度侵蚀和轻度侵蚀之间的相互转化为主, 其次为轻度侵蚀和中度侵蚀之间的转换, 强烈及以上侵蚀强度变化占比较小。具体每个时段来看, 2002—2007 年该地区的轻度侵蚀与中度侵蚀向微度侵蚀与轻度侵蚀正向转移面积明显多于负向转移面积, 其余转移面积较小, 这一时段内该地区土壤侵蚀呈改善状态。2007—2012 年该地区的轻度侵蚀与中度侵蚀向微度侵蚀与轻度侵蚀负向转移面积多于正向转移面积, 这与上一时段情况相反, 且侵蚀强度转换后的轻度及以上侵蚀强度的区域面积都比转换之前有所增加, 该时段皖南地区侵蚀水平整体有所加剧。2012—2017 年

2022 年土壤侵蚀改善区域面积大于加剧区域面积, 在 2012—2017 年改善和加剧的区域面积基本一致, 在 2007—2012 年土壤侵蚀加剧的区域面积大于改善的区域面积。2002—2007 年该地区土壤侵蚀强度发生变化的区域主要分布于池州市、安庆市内大别山区以及黄山市内黄山、齐云山、白际山 3 个山区, 总体改善面积多于加剧面积, 黄山市黄山区南部和休宁县内的白际山西段有较大面积的加剧区域。2007—2012 年皖南地区的土壤侵蚀改善区域相对集中, 且主要为 2002—2007 年的加剧区域, 这一时段的加剧区域较上一时段明显增多, 较大面积的加剧区域主要分布黄山市徽州区北部、歙县西部、齐云山、白际山, 其余较分散。2012—2017 年皖南地区的土壤侵蚀改善区域主要为池州市和黄山市内上一时段的较大范围的加剧区域, 这两个市在这一时段得到较大改善, 其余地区分散的土壤侵蚀加剧区域仍较多, 其中大别区和狮子山片等地区为土壤侵蚀加剧区域面积大于改善区域面积。2017—2022 年皖南地区内的几个国家和地方政府治理与预防区域都得到了较好改善, 加剧区域面积降至全研究时段最小值, 且无大连续面积加剧区域。

该地区的轻度侵蚀向微度侵蚀转移面积少于微度侵蚀向轻度侵蚀转移面积, 中度侵蚀转移变化不明显, 强烈及以上的侵蚀强度的区域面积相比转换之前有所减少。2017—2022 年该地区除微度侵蚀区域面积在转换后有所增加外, 其他所有侵蚀强度的区域面积在转换之后都在减少, 且面积都达到全研究时段最小值, 整体侵蚀状态改善明显。

由表 5 可以看出, 皖南地区 2002—2022 年土壤侵蚀状况有所好转, 侵蚀程度减弱的区域明显多于加剧的区域, 高侵蚀等级向低侵蚀等级正向转移面积基本都大于负向转移面积, 但是轻度及以上侵蚀强度的区域面积维持强度不变的仍保有较多, 有待进一步治理改善。

3.3 皖南地区土壤侵蚀影响因子分析

3.3.1 影响因子显著性分析 土壤侵蚀受自然因素(降水、坡度、海拔等)和人为活动(土地覆盖类型、植被覆盖等)的共同影响, 确定各因子的解释力和贡献率, 对制定后续水土保持措施具有重要意义。本文研

究探讨的土壤侵蚀影响因素为降水、坡度、海拔、土地覆盖类型、植被覆盖度、温度。地理探测器中的因子探测器输出的每个因子的 q 值统计结果如表 6 所示。显然,各个因子对土壤侵蚀的影响不同,且每个因子在不同时期的解释力也有差别。2002 年、2017 年、2022 年影响侵蚀变化的前 3 种驱动因子为土地覆盖类型>坡度>海拔,土地覆盖类型的 q 值最高,贡献率达到 21.68%~23.96%,是影响侵蚀变化的主导因子。2007 年影响侵蚀变化的前 3 种驱动因子为土地覆盖类型>海拔>年降雨量,2012 年影响侵蚀变化的前 3 种驱动因子为土地覆盖类型>年降雨量>坡度,这两个时期的影响侵蚀变化的主导因子仍是土地覆盖类型,但是其 q 值降为其他时期的一半左右,其与坡度、植被覆盖度的解释力减弱不少,同时年均温度、年降雨量、海拔的 q 值相比其他时期都有所增大。总的来说,皖南地区土壤侵蚀的主要影响因素为土地覆盖类型、坡度、海拔、降雨。结合安徽省相关水利调查资料可知,不合理的土地利用方式是导致局部区域土壤侵蚀加剧的主要人为原因,如过度开垦陡坡、大范围城

镇建设和矿产资源开采等,破坏了植被并改变了地表结构,加速了水土流失。因此,调整土地利用结构,增强植被覆盖,是减轻地区土壤侵蚀的重要途径。

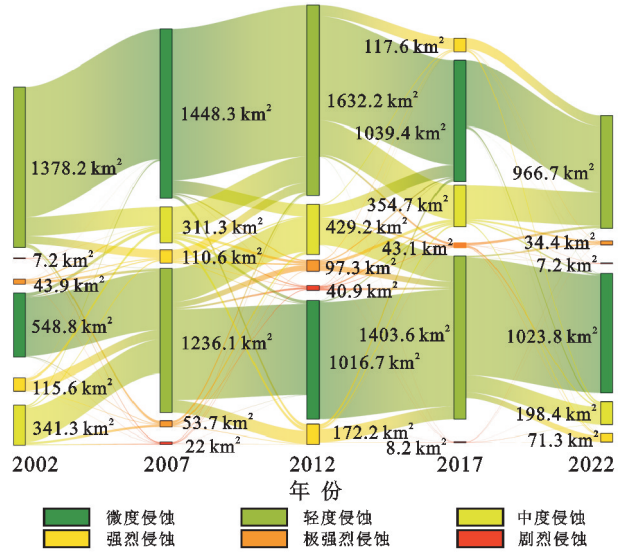


图 4 皖南地区土壤侵蚀强度变化桑基图

Fig. 4 Sankey diagram of soil erosion intensity change in southern Anhui Province

表 5 皖南地区 2002—2022 年不同侵蚀等级面积转移矩阵

Table 5 Area transfer matrix of different erosion grades in southern Anhui Province from 2002 to 2022 km²

2002 年	2022 年					
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
微度	49576.8249	554.5989	14.8923	3.1914	0.7956	0.2376
轻度	961.3422	5168.553	150.9489	51.0381	13.0806	1.9368
中度	13.9626	275.7114	418.2705	10.7757	15.4908	2.2464
强烈	3.1482	91.0485	13.2597	83.7684	3.5577	1.0494
极强烈	1.3338	20.6307	13.0428	4.4982	20.4381	1.9224
剧烈	0.4833	2.8917	2.3121	0.6201	1.4553	2.1357

表 6 皖南地区 2002—2022 年土壤侵蚀驱动因素 q 值统计结果

Table 6 Statistical results of q value of driving factors of soil erosion in southern Anhui Province from 2002 to 2022

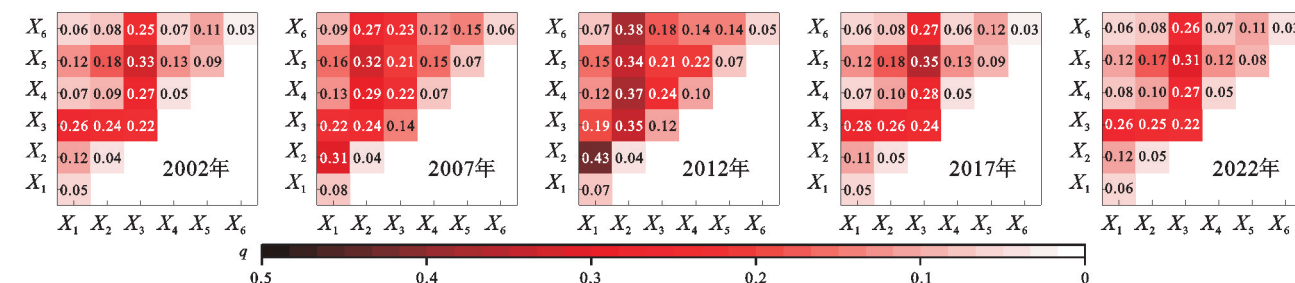
年份	海拔	植被覆盖度	土地覆盖类型	年降雨量	坡度	年均温度
2002	0.0525	0.0445	0.2226	0.0485	0.0938	0.0276
2007	0.0778	0.0381	0.1364	0.0739	0.0680	0.0600
2012	0.0680	0.0394	0.1152	0.1000	0.0742	0.0516
2017	0.0531	0.0460	0.2396	0.0473	0.0949	0.0317
2022	0.0576	0.0479	0.2168	0.0522	0.0836	0.0348

3.3.2 影响因素交互作用分析 地理探测器中的交互作用探测器输出的各个影响因素交互作用对土壤侵蚀的解释力的值如图 5 所示。土壤侵蚀的各影响因子之间存在复杂的交互作用,其解释力高于单一因子。具体来看,2002 年、2017 年、2022 年的影响因素交互作用情况相似,土地覆盖类型与其他因子共同作用对土壤侵蚀的解释力明显大于其他因子,土地覆盖类型与坡度因子的交互作用在这些时期中都为最高,其次为与海拔、降雨的交互作用。这表明土地利用类型应成

为皖南地区土壤侵蚀治理的重点之一,并针对其与其他因子的联合作用采取有效措施。2007 年、2012 年与其他时期不同,这些时期为植被覆盖度与其他因子共同作用对土壤侵蚀的解释力明显大于其他因子,但是植被覆盖度单因子作用水平却比其他时期还低。这表明植被覆盖度虽然是土壤侵蚀的重要因素之一,但其作用与其他因素的交互作用高度相关。2002 年、2007 年温度单因子作用及与其他因子共同作用都有所增加,整体作用甚至不弱于 RUSLE 模型计算中的几个

因子。因此,土壤侵蚀治理不仅要考虑土壤侵蚀经验模型因子,还要关注其他潜在影响因素,并针对其交互

效应制定全面、科学的治理策略,以最大限度减少土壤侵蚀对区域生态环境和可持续发展的不利影响。



注: X_1 为海拔; X_2 为植被覆盖度; X_3 为土地覆盖类型; X_4 为年降雨量; X_5 为坡度; X_6 为年均温度。

图 5 皖南地区交互作用探测结果

Fig. 5 Interaction detection results in southern Anhui Province

风险探测器的结果如表 7 所示。总体来说,皖南地区的高风险地区为高降雨量、高坡度、高海拔、低植被覆盖度、低年均温度的裸地、灌丛、草地。2002—2022 年影响因子高风险区域均为海拔 $>1\ 056\text{ m}$ 、坡度 $>56.85^\circ$,说明高海拔陡坡垦殖是该地区土壤侵蚀严重的原因之一。同时高风险区域的土地覆盖

类型为植被覆盖率低的裸地、灌丛和草地,高强度降雨冲刷地表,破坏土壤结构和引起颗粒位移,加剧了土壤流失。因此想要缓解该地区土壤侵蚀状况,可以通过植树造林等途径,增加植被覆盖度或改善土地利用方式,以提高土地保水和保持能力,降低土壤流失风险。

表 7 皖南地区 2002—2022 年影响因子高风险区域

Table 7 High risk area of influencing factors in southern Anhui Province from 2002 to 2022

年份	降雨量/mm	坡度/ $^\circ$	高程/m	土地类型	植被覆盖度/%	年均温度/ $^\circ\text{C}$
2002	1971.96~2092.37	56.85~63.96	1056~1819	灌丛	0~37.1	<10.46
2007	1971.96~2092.37	56.85~63.96	1056~1819	草地	0~37.1	10.46~11.32
2012	>2092.37	56.85~63.96	1056~1819	裸地	37.1~60.5	11.32~12.18
2017	1971.96~2092.37	56.85~63.96	1056~1819	裸地	0~37.1	<10.46
2022	1971.96~2092.37	63.96~71.06	1056~1819	灌丛	0~37.1	10.46~11.3

4 讨论

本研究基于 RUSLE 模型和地理探测器,对皖南区土壤侵蚀变化趋势及其驱动因素进行了深入分析。根据程先富等^[22]对 2002 年安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系研究可知,安徽省内为皖南丘陵山地等海拔较高地区土壤侵蚀面积和侵蚀量最大,主要原因为人为活动强烈和降雨充沛等,这与本文较为一致。皖南地区的土壤侵蚀是自然和人为原因共同作用的结果。从自然原因来看,皖南地区的轻度及以上侵蚀等级区域主要为大别山、九华山、白际山等山地丘陵区,地形起伏大,地貌类型多样。该地区特别是大别山区地表出露多为易风化易侵蚀的岩石及其风化物,降雨量大且时间集中,为土壤侵蚀提供了物质基础和动力条件。在人为原因方面,过去不合理的农业措施如陡坡开垦,以及当前城镇建设、矿产开采等项目的大量开展,破坏了植被并改变了地表结构,加速了土壤侵蚀的发生。

本研究还存在一些不足之处:(1) 本文研究根据

数据获得情况,使用的数据分辨率有 1 km , 250 m ,后续研究可考虑使用更高时间分辨率与空间分辨率的数据。如利用详细的地面气象站气候数据与遥感数据、雷达数据联合插值获得更加精准的逐日地面气候数据,再代入精度更高的以日雨量计算降雨侵蚀力的模型方法,提升研究结果的可靠性,为区域土壤侵蚀防治提供更具参考价值的科学依据。(2) 本研究在利用地理探测器探讨土壤侵蚀的影响因素方面没有纳入更多的因素,如人为因素方面,后续研究可考虑结合合理的 GDP 空间分布数据、人口空间分布数据等,进行更多的土壤侵蚀驱动因素探讨。

5 结论

(1) 皖南地区大部分地区属于侵蚀速率小于 $500\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的微强度侵蚀,各强度土壤侵蚀面积按侵蚀速率从低到高依次递减,侵蚀速率大于 $500\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的需要预防与治理的区域主要分布于安庆市内大别山区、安庆市东南部、铜陵市东部与芜湖市中西部、池州市、宣城市南部、黄山市内黄山山区和

周边齐云山、白际山等地区,这与国家和省级重点预防与治理区域较为一致。

(2) 皖南地区的土壤侵蚀整体呈“下降—上升—下降”趋势,其 2002 年总侵蚀量为 2 231.41 万 t/a,在 2007 年降至 2 118.05 万 t/a,在 2012 年增至 2 452.36 万 t/a,之后持续下降至 2022 年的 2 060.67 万 t/a。皖南地区在 2002—2007 年和 2017—2022 年土壤侵蚀改善区域面积大于加剧区域面积,在 2012—2017 年改善和加剧的区域面积基本一致,在 2007—2012 年土壤侵蚀加剧的区域面积大于改善的区域面积。皖南地区 2022 年相比 2002 年土壤侵蚀状况整体有所好转,侵蚀程度减弱的区域多于加剧的区域,但是轻度及以上侵蚀强度的区域面积维持强度不变的仍保有较多,有待进一步治理改善。

(3) 根据因子探测器的结果可知,2002 年、2017 年、2022 年影响侵蚀变化的前 3 种驱动因子为土地覆盖类型>坡度>海拔,2007 年影响侵蚀变化的前 3 种驱动因子为土地覆盖类型>海拔>年降雨量,2012 年影响侵蚀变化的前 3 种驱动因子为土地覆盖类型>年降雨量>坡度。总体而言,土地覆盖类型、坡度、海拔、降雨是该地区的主要影响因素。

(4) 根据交互作用探测器的结果可知,2002 年、2017 年、2022 年的影响因素交互作用情况一致,土地覆盖类型与其他因子共同作用对土壤侵蚀的解释力明显大于其他因子。而 2007 年、2012 年为植被覆盖度与其他因子共同作用对土壤侵蚀的解释力明显大于其他因子,但植被覆盖度单因素作用水平却比其他时期还低。因此,土壤侵蚀治理不仅要考虑土壤侵蚀经验模型中的因子的单独作用情况,还要更多地考虑因子间的交互作用,针对其交互效应制定全面、科学的治理策略,以最大限度减少土壤侵蚀对区域生态环境和可持续发展的不利影响。

(5) 识别该地区高风险区为高降雨量、高坡度、高海拔、低植被覆盖度、低年均温度的裸地、灌丛、草地,2022 年的高风险区域为植被覆盖度<37.1%,年均降水量 1 971.96~2 092.37 mm、坡度>63.96°、海拔 1 056~1 819 m、年均温度 10.46~11.3℃的灌丛。这些区域应作为重点区域开展土壤侵蚀治理,以减轻土壤侵蚀造成的生态环境影响。

参考文献(References):

- [1] Pimentel D. Soil erosion: a food and environmental threat[J]. Environment, Development and Sustainability, 2006,8(1):119-137.
- [2] Pennock D. Soil erosion: the greatest challenge for sustainable soil management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion Losses from cropland east of the rocky mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation [M]. Washington D C: Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture in Cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station, 1965.
- [4] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984, 39(2):99-104.
- [5] 章文波,刘宝元.基于 GIS 的中国土壤侵蚀预报信息系统[J].水土保持学报,2003,17(2):89-92.
Zhang W B, Liu B Y. Development of Chinese soil loss equation information system based on GIS[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17(2):89-92.
- [6] Renard K G, Ferreira V A. RUSLE model description and database sensitivity[J]. Journal of Environmental Quality, 1993,22(3):458-466.
- [7] Alewell C, Borrelli P, Meusburger K, et al. Using the USLE: chances, challenges and limitations of soil erosion modelling [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019,7(3):203-225.
- [8] 兰泽凡,田小靖,牛祎凡,等.基于 RUSLE 模型的雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价[J].水土保持研究,2024,31(3):20-29.
Lan Z F, Tian X J, Niu Y F, et al. Evaluation on soil erosion based on RUSLE model in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):20-29.
- [9] 杨严攀,田培,沈晨竹,等.基于 RUSLE 模型和地理探测器的鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价[J].水土保持学报,2024,38(1):91-103.
Yang Y P, Tian P, Shen C Z, et al. Vulnerability assessment of soil erosion in southwestern Hubei Province based on RUSLE model and geographic detector[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):91-103.
- [10] 池金沼,于洋,冯娟龙,等.基于 RUSLE 模型的妣水河流域土壤侵蚀时空变化特征[J].水土保持学报,2024, 38(1):70-78.
Chi J M, Yu Y, Feng J L, et al. Spatial and temporal variation characteristics of soil erosion in Guishui River Basin based on RUSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):70-78.
- [11] 邓国徽.近 20 年巢湖流域土地利用/覆被变化及其土

- 壤侵蚀效应研究[D].安徽芜湖:安徽师范大学,2016.
- Deng G H. Study on land use/cover change and soil erosion in Chaohu Watershed in recent 20 years[D]. Wuhu, Anhui: Anhui Normal University, 2016.
- [12] 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 C Y, Zhang H L, Wang J H, 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.
- [13] 安徽省发展改革委.皖南国际文化旅游示范区“十四五”建设发展规划[EB/OL]. [2024-01-17]. <https://www.ah.gov.cn/public/1681/554101861.html>.
- Anhui Provincial Development and Reform Commission. The 14 th Five-Year Plan for the Construction and Development of the International Cultural Tourism Demonstration Zone in Southern Anhui [EB/OL]. [2024-01-17]. <https://www.ah.gov.cn/public/1681/554101861.html>.
- [14] 周伏建,黄炎和.福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J].水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- Zhou F J, Huang Y H. The rainfall erosivity index in Fujian Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995,9(1):13-18.
- [15] Sharply A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator:1. model documentation[M]. Washington, D.C.: Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990.
- [16] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
- Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(1):7-13.
- [17] 张宏鸣,杨勤科,李锐,等.基于 GIS 和多流向算法的流域坡度与坡长估算[J].农业工程学报,2012,28(10):159-164.
- Zhang H M, Yang Q K, Li R, et al. Estimation methods of slope gradient and slope length in watershed based on GIS and multiple flow direction algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(10):159-164.
- [18] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington D C: United States Department of Agriculture, 1978.
- [19] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987,30(5):1387-1396.
- [20] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994,37(6):1835-1840.
- [21] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- Liu B Y, Bi X G, Fu S H, et al. Beijing Soil Loss Equation[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [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] 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.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion: SL 190—2007[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116-134.
- [25] 韩晶,崔金芳,杨威,等.基于 InVEST 模型的低山丘陵区土壤侵蚀变化与驱动因素分析[J].水土保持研究,2022,29(5):32-39.
- Han J, Cui J F, Yang W, et al. Analysis of soil erosion change and driving factors in low hilly areas based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):32-39.
- [26] Wang H, Gao J B, Hou W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in karst areas: Based on the geodetector method [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(2):271-286.
- [27] 杜朝正,杨勤科,王春梅,等.青藏高原典型样区 2 种土壤侵蚀评价与制图方法的对比[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2021,49(7):95-104.
- Du C Z, Yang Q K, Wang C M, et al. Comparison of two soil erosion assessment and mapping methods in typical sample areas of the Xizangan Plateau[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2021,49(7):95-104.