

汾河上游土壤侵蚀时空变化及景观格局的影响

邹琴英¹, 师学义¹, 张臻²

(1.中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2.山西农业大学 林学院, 山西 晋中 030810)

摘 要: 为了了解汾河上游土壤侵蚀状况和景观格局变化, 借助 RUSLE 模型计算汾河上游近 12 a 土壤侵蚀模数, 并对流域土壤侵蚀景观格局进行了研究。结果表明: (1) 平均侵蚀模数连年下降; 土壤侵蚀强度所占面积由土壤强度的高级别向低级别转移; 侵蚀格局从东南和西北高、中间低的格局逐渐转变到西北向东南逐渐增强。(2) 近 12 a, 草地和建设用面积显著减少, 耕地和林地面积大幅增加; 耕地、有林地和草地是土壤侵蚀发生的主要地类, 潜在土壤侵蚀量大。(3) 人类活动对汾河上游景观的干扰性随着时间变化而减弱, 区域各侵蚀强度的景观斑块形状趋于简单化、斑块的团聚程度加强、斑块的平均面积增大、优势斑块连接度好, 各侵蚀类型的景观破碎度水平低, 土壤侵蚀状况得到改善。由此可知, 汾河上游近 12 a 土壤侵蚀状况改善, 景观格局得到优化, 生境质量得到提高。

关键词: 土壤侵蚀; 景观格局; RUSLE 模型; 时空变化

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)04-0015-07

Effects of Temporal and Spatial Changes of Soil Erosion and Landscape Pattern in the Upper Reaches of the Fenhe River

ZOU Qinying¹, SHI Xueyi¹, ZHANG Zhen²

(1.College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2.College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030810, China)

Abstract: In order to understand the soil erosion status and landscape pattern changes in the upper reaches of the Fenhe River, with the help of the RUSLE model, the soil erosion modulus in the upper 12 years of the Fenhe River was calculated, factor gradient analysis and a study on the landscape pattern of soil erosion in the watershed were carried out. The results show that: (1) the average erosion modulus has decreased year by year; the area of soil erosion intensity has shifted from a high level of soil intensity to a low level; the erosion pattern has gradually changed from southeast and northwest, and the pattern of low in the middle has gradually changed from northwest to southeast; (2) in the past 12 years, the areas of grassland and construction land have decreased significantly, and the areas of cultivated land and forest land have increased significantly; cultivated land, forested land and grassland are the main types prone to soil erosion, and the potential amount of soil erosion is severe; (3) the disturbance of human activities to the landscape of the upper Fenhe River weakens with time; the shapes of the landscape patches at each erosion intensity in the region tend to be simplified, the degree of patch reunion is strengthened, the average area of the patches increases, and connectivity of the advantage patches is good, the landscape fragmentation level of each erosion type is low, and the soil erosion situation has been improved. It can be seen that the soil erosion situation in the upper reaches of the Fen River has improved in the past 12 years, the landscape pattern has been optimized, and the quality of the habitat has been improved.

Keywords: soil erosion; landscape pattern; RUSLE model; temporal and spatial change

土壤侵蚀是黄土高原主要的环境问题。人类活动、自然环境及其相互影响是土壤侵蚀的主要原因^[1]。据山西省政府统计,截至 2018 年,仍有近 10.8 万 km² 水土流失面积需要治理,占全省土地面积的 69%^[2]。长时间、大面积、高强度、低效能的煤矿资源开发,土地利用过于粗放导致生态系统功能下降,超出了生态系统自行调节能力范围^[3]。同时,土壤侵蚀是生态系统中生态环境效应相互作用下地表物质位移过程^[4],是生态环境恶化的表现^[5],严重的土壤侵蚀造成土壤肥力下降,诱发滑坡泥石流等自然灾害,不但影响着区域生态环境的可持续发展,而且影响着中下游居民的生命财产安全和河道治理等生态保护工程的实施。

景观格局与生态过程的相互关系是景观生态理论研究的重要部分^[6-7],景观指不同生态系统组成的异质性区域,景观格局是不同地表景观要素在空间上排列组合,影响着生态学过程^[8]。景观格局的变化可反映相邻土地利用类型变化程度,是土壤侵蚀产沙和输沙空间变化的重要驱动力^[9-10]。但目前景观格局与土壤侵蚀的相关研究较少,大多数景观格局定量评价单纯止步于景观格局指数的计算和分析上,定量描述两者关系仍是一个难点^[11-12]。因此,学者们从土壤侵蚀角度切入,将不同的土壤侵蚀强度视为景观过程变化的一个表征指标,运用景观指数来揭示土壤侵蚀的时空演变,探寻土壤侵蚀对环境驱动因子和景观格局的响应关系^[13-14]。王库等^[15]基于景观类型参数分析兴国县土壤侵蚀时空演变规律和分布格局;李阳兵等^[16]借助 GIS 和 Fragstats 技术定量分析了重庆市土壤侵蚀格局分析和破碎化评价,弥补了土壤侵蚀研究对土壤侵蚀景观空间信息研究的不足;漆良华等^[17]基于空间格局分析方法和景观生态学理论,研究了区域生态恢复适宜度与景观格局特征,为后续流域景观优化利用和生态恢复工程实施提供依据;康磊等^[18]使用 USLE 模型和应用景观生态学理论,评价了岷江上游 1990—2015 年土壤侵蚀变化和景观格局变化,对以生态建设和找出不利于景观格局配置因素为目标的流域具有重要的参考价值。因此,与土壤侵蚀相结合的研究成为生态问题解决的需要^[19],将景观生态学与土壤侵蚀理论相结合,分析不同土壤侵蚀强度景观格局动态变化,揭示土壤侵蚀强度与生态过程间的动态关系,以期优化流域土地利用布局和改进流域水土流失措施提供参考价值。

本文以汾河上游为研究区域,应用 RUSLE 模型开展 2005 年、2010 年、2017 年 3 年土壤侵蚀模数评估,兼顾流域不同时期地表覆被状况,借助 ArcGIS,

Fragstats 开展相应的景观破碎化分析,探讨土壤侵蚀与景观破碎化指数的关联关系,揭示土壤侵蚀强度与生态过程间的动态关系,为汾河上游的生态环境治理提供科学依据和决策参考。

1 研究区概况

汾河上游(38°7′57″—39°8′41″N, 111°42′43″—112°36′55″E)位于山西省西北部,是山西省最重要的水源涵养区之一,流域面积达 3 884 km²。地形以山地丘陵为主,汾河自北向南流经芦芽山和云中山,总体呈现“两山一川”大格局(图 1),总长约 160 km。温度大陆性季风气候,多年平均降雨量为 427.6 mm,年内降雨分布不均,主要集中在 6—9 月,占全年降雨量的 75.29%;植被以森林和山地草地为主;土壤主要是草甸土、棕壤、褐土。汾河上游流域地形地貌独特,沟壑纵横,地势起伏大,黄土高原境内煤炭资源储量大,煤炭开采、林木开发等生产活动破坏地表植被,使得汾河上游流域成为土壤侵蚀的易发区。

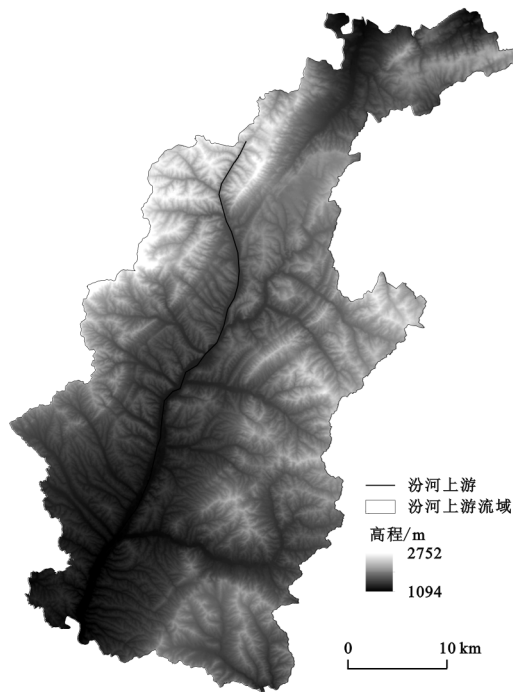


图 1 研究区范围及高程

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源及处理

本文使用的数据包括:DEM 数据、2017 年使用的 landsat 8 影像、2005 年和 2010 年使用的 Landsat4~5 TM 影像来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m,时相为 6—10 月,云覆盖率低。在 ENVI 5.3 中进行几何纠正、大气校正等影像预处理,利用遥感影像的近红外波段

和红光波段进行 NDVI 计算;月/年降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);2005 年、2010 年、2017 年汾河上游土地利用现状变更数据来源于忻州市政府普查数据;部分土壤数据来源于世界土壤数据库中国土壤数据集(Harmonized World Soil Database version 1.1)(HWSD),其余土壤数据来源于山西省第二次土壤普查数据集,空间分辨率为 1 km。将所有数据统一重采样为 30 m 分辨率,分别进行 2005 年、2010 年、2017 年土壤侵蚀模数的计算。

2.2 研究方法

(1) 土壤侵蚀量估算。本文基于 GIS 和 RS 技术,采用修正的水土流失通用方程(RULSE)方程对汾河上游土壤侵蚀进行估算。基本表达式如下:

$$A=R\times K\times L\times S\times C\times P$$

式中: A 为单位面积上平均的土壤流失量 $[\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})]$ ^[20]; K 为土壤可蚀性因子 $[(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})]$ ^[21]; L 和 S 分别为坡长和坡度因子^[22]; C 为植被覆盖因子^[23]; P 为水土保持措施因子^[24-25],其中 L, S, C, P 为无量纲因子。

(2) 景观格局分析。运用景观格局指数分析法研究流域侵蚀景观时空变化特征,利用 Fragstats4.2 软件计算景观格局指数,以期通过不同时期的景观指数对比探讨侵蚀景观格局时空变化特征。参考相关文献^[26-28],结合流域实际情况,选取 5 个景观指数。斑块水平反映单个斑块的结构特征,是计算其他景观级别指标的基础,景观水平反映的是区域整体特征结构。斑块水平上包括:斑块数量(NP)、边缘密度(ED);景观水平上包括:分离度指数(DIVISON)、蔓延度指数(CONTAG)和香农多样性(SHDI),表征流域景观的破碎化程度,各个指标的定义和生态学意义详见 Fragstats 用户手册^[29]。

3 结果与分析

3.1 流域土壤侵蚀时空变化

3.1.1 土壤侵蚀强度的时间变化 用修正通用土壤流失方程计算得到汾河上游 2005—2017 年土壤侵蚀模数(图 2)。2005—2017 年汾河上游土壤侵蚀流失量显著减小,平均侵蚀模数从 2005 年的 $50.26 \text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 下降到 2010 年的 $37.47 \text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,在 2017 年跌至 $30.71 \text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 。

根据土壤侵蚀分类分级标准对 2005—2017 年汾河上游土壤侵蚀模数进行土壤侵蚀强度分级(表

1)^[30]。从土壤侵蚀强度所占面积来看,总体呈现中等强度等级以上所占面积向微度和轻度强度转移。2005—2010 年,微度侵蚀、轻度侵蚀面积增加,增幅达 53.93%,2.91%,占流域总面积的 53.75%;中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀面积减少,降幅依次为 9.07%,11.40%,30.06%,39.80%。随后 2010—2017 年,微度侵蚀增幅为 37.76%,轻度侵蚀至剧烈侵蚀 5 个等级降幅依次为 11.52%,20.08%,23.19%,16.89%,12.08%,但中度侵蚀等级以上的面积仅占侵蚀总面积的 23.87%,区域土壤侵蚀等级以微度侵蚀和轻度侵蚀为主。

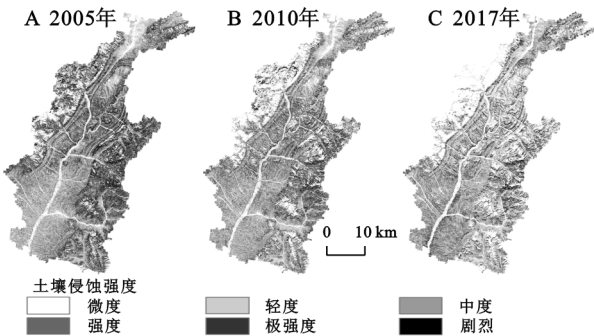


图 2 汾河上游流域 2005—2017 年土壤侵蚀强度

表 1 汾河上游流域不同土壤侵蚀强度面积的百分比 %

年份	微度	轻度	中度	强度	极强	剧烈
2005	19.97	22.36	18.48	13.89	19.62	5.69
2010	30.74	23.01	16.80	12.30	13.72	3.42
2017	42.35	20.36	13.43	9.45	11.41	3.01

3.1.2 土壤侵蚀强度的空间变化 近 12 a,土壤侵蚀格局变化显著。从 2005 年东部西部高、南北两侧低、中间中等的格局逐渐转变到 2017 年西部低,东部高,中部中等的格局,形态以条带状为主。2005 年西北森林带和部分东南山地丘陵区是高值区的集中地,中部地区以中值区为主,低值区在西南部中部地带和北部丘陵地带;2017 年高值区集中于东南山地丘陵地带,中值区位于中部地带和西南部汾河两岸平原地带,低值区在西北森林带和部分东南山地丘陵区。

对 2000—2017 年汾河上游不同侵蚀等级面积进行统计,得到汾河上游不同侵蚀等级面积的转移矩阵(表 2)。由表 2 可知,近 12 a,汾河上游土壤侵蚀等级之间面积转化活跃,微度和轻度侵蚀等级面积大幅增加,中度侵蚀以上等级的面积明显减小,研究区域土壤侵蚀状况整体变好。其中,剧烈侵蚀中有 48.95%、12.13% 分别转化为微度侵蚀、极强侵蚀。极强侵蚀转化为微度侵蚀的占比 44.71%,强度侵蚀的 36.20%,12.35%,15.77% 分别转化为微度侵蚀,轻度侵蚀和中度侵蚀。

表 2 汾河上游 2005—2017 年流域土壤侵蚀面积转移矩阵 km²

年份	侵蚀程度	2017 年						合计
		微度	轻度	中度	强度	极强	剧烈	
2005 年	微度	599.12	239.42	191.77	201.02	350.78	111.29	1693.39
	轻度	65.10	485.16	177.85	68.57	14.21	3.12	814.00
	中度	41.58	113.63	204.37	87.59	85.24	4.50	536.90
	强度	36.43	43.21	89.96	136.23	62.88	9.20	377.91
	极强	43.65	9.52	70.99	52.78	251.53	27.59	456.07
	剧烈	12.71	3.05	3.84	9.15	19.93	71.65	120.33
	合计	798.58	893.99	738.78	555.33	784.57	227.36	3998.60

3.2 不同土地利用类型下土壤侵蚀统计分析

2005—2017 年汾河上游土地利用类型主要为耕地、草地和林地(表 3)。土地利用类型均发生了不同程度的变化:草地和建设用地面积分别减少 12.42%,11.49%;耕地和林地面积分别增加 16.90%,13.67%;水域和其他用地面积降幅明显,分别减少 40.39%,51.13%。

2000—2017 年土地利用类型间面积转换变动较大。期间草地面积减少最大,净减少 206.60 km²,主要流向耕地(451.44 km²)、林地(319.12 km²);林地

面积增加大,增加了约 148.55 km²,主要来自草地和耕地;建设用地、其他用地面积及比例均有较大幅度减小。主要原因在于区域生态环境(黄土丘陵地区)的特殊性,水土流失严重。一方面政府为稳定生态质量实施坡耕地退耕还林、农田整治、加强矿区的管理和绿化工程。另一方面,伴随经济的发展,人口集中于汾河两岸,占用了大量的耕地和水域,城市建设用地增加,农村建设用地急剧减少,造成土地利用类型变化频繁。

表 3 汾河上游流域 2005—2017 年土地利用类型面积转移矩阵 km²

年份	土地利用类型	2017 年						合计
		草地	耕地	建设用地	林地	其他用地	水域	
2005 年	草地	830.55	270.98	40.43	217.76	34.09	63.61	1457.42
	耕地	451.44	467.32	20.08	121.61	5.54	24.59	1090.59
	建设用地	25.57	31.66	29.55	6.00	0.86	9.24	102.87
	林地	319.12	128.77	14.18	734.53	14.70	24.23	1235.53
	其他用地	13.79	4.65	3.44	2.85	0.92	2.20	27.86
	水域	23.55	29.53	8.54	4.23	0.91	17.57	84.32
	合计	1664.02	932.91	116.23	1086.98	57.02	141.45	3998.60

土壤侵蚀在土地利用类型中差异明显,2005—2017 年各地类土壤侵蚀模数均减少(图 3),草地、耕地、林地和其他用地土壤平均侵蚀模数降幅分别达 26.37%,15.91%,61.25%,29.84%。结合各土地利用类型面积可知:土壤侵蚀主要集中在草地、耕地和林地,土地利用类型与土壤侵蚀模数高度相关。不合理的土地利用会造成生态系统服务功能的退化,植被覆盖度高的土壤侵蚀程度小,应合理优化草地、林地、耕地布局,加强土地利用的管理与监控。

3.3 土壤侵蚀景观格局变化

3.3.1 土壤侵蚀景观指数最佳分析幅度 侵蚀景观指数的空间异质性具有尺度依赖性,空间尺度的变化对景观格局定量分析结果会产生不同程度的影响,确定合理有效的分析尺度十分关键,是揭示景观破碎化空间变异的前提^[31-32]。为定量分析确定最佳分析幅度,在 2005 年、2010 年、2017 年 3 个时期的土地利用矢量数据中选取 2017 年的土地利用数据作为研究对象,将

2017 年土地利用矢量数据转化为 30 m 分辨率的栅格数据,输入 Fragstats 4.2 软件,采用移动窗口法,方形半径,尺度设定为 200,600,1 000,1 400,1 800,2 200,2 600,3 000 m。以研究区为边界生成随机点 100 个,提取边缘密度、分离度指数、蔓延度、和香农多样性值,研究幅度变化对侵蚀景观格局指数的影响。

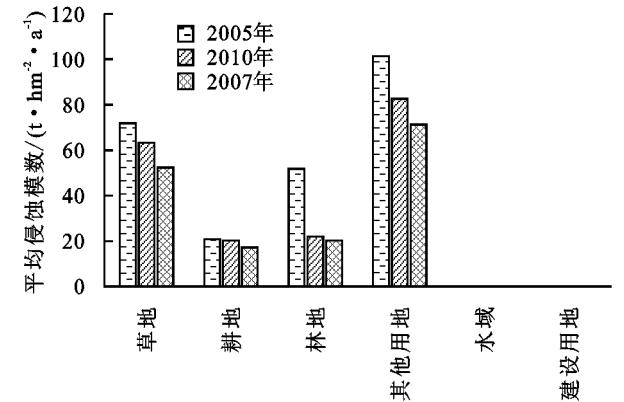


图 3 汾河上游流域不同土地利用类型的平均侵蚀模数

由图 4 可知,景观指数皆随着空间尺度的变大先急剧上升后整体趋于平稳。边缘密度、蔓延度指数在 200~800 m 迅速上升,有明显拐点,随后随着空间尺度的变大逐渐趋于平稳,波动起伏小;分离度指数、和

香农多样性随着空间尺度的增大也变大,在 1 800~2 200 m 之后增长速度产生明显变化,呈现平缓上升的趋势。考虑 Fragstats 4.2 对空间尺度的要求。综上,确定 2 100 m 为最佳分析幅度。

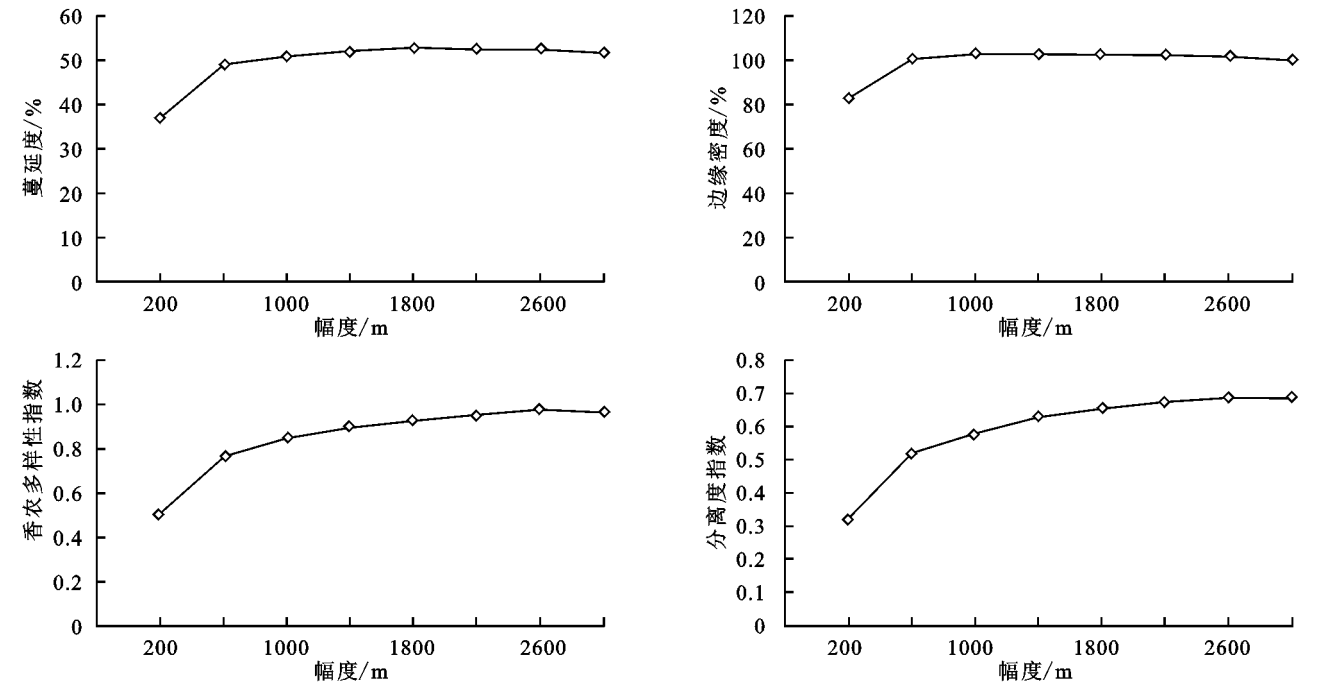


图 4 景观指数随空间幅度变化曲线

3.3.2 土壤侵蚀景观格局指数变化 由表 4 可知,近 12 a,斑块数量(NP)不断减少,说明景观破碎化程度减小,景观异质性程度降低;边缘密度(ED)、香农多样性(SHDI)先减小后增大,表明研究区景观在边缘形状上由简单向复杂发展,景观类型组成由简单向丰富发展,土地利用丰富,景观类型的均匀程度提高;蔓延度(CONTAG)先增大后减小,表明不同斑块类型的延展趋势由弱到强再变弱,蔓延度(CONTAG)整体增大,景观中整体斑块间的连通性较 2005 年基底年提高,能量流动加快,景观破碎化程度降低;分离度指数(DIVISON)微弱上升。综上,2005—2017 年景观破碎化程度整体下降,生态环境改善。

表 4 2005—2017 年景观格局指数

年份	斑块数量	SHDI	ED	DIVISION	CONTAG
2005	160361	0.72	81.57	0.52	61.33
2010	157408	0.56	23.80	0.60	69.91
2017	138300	0.60	27.70	0.67	67.07

3.3.3 土壤侵蚀强度与景观格局变化关系 2005—2017 年 3 个年度各土壤侵蚀强度的景观格局指数见表 5,各侵蚀强度的香农多样性、边缘密度总体减小,蔓延度、分离度指数总体提升。各侵蚀强度的香农多样性呈现先减后增的趋势,与 2005 年对比,2010 年各侵蚀强度的香农多样性均减小,剧烈和微度侵蚀的香农多样性降幅最大,中度侵蚀降幅最小,可知:在这 5 a 中,剧烈和微

度侵蚀景观的斑块类型组成由丰富向简单发展,分布由均衡向定向发展,与 2010 年相比,2017 年微度侵蚀的香农多样性继续减少,轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀强度的香农多样性提升,横向相比微度侵蚀的香农多样性最小,土壤侵蚀的斑块破碎度低。2005—2010 年各侵蚀强度的边缘密度逐年下降,降速快,表征景观斑块形状由复杂到简单,斑块的平均面积增大,整体景观破碎度程度降低,土地利用变化大。2005 年各侵蚀强度的边缘密度值由低到高为:微度侵蚀<剧烈侵蚀<极强烈侵蚀<强烈侵蚀<中度侵蚀,2010 年、2017 年与 2005 年各侵蚀强度的边缘密度排序基本一致。其中,2010—2017 年边缘密度值相差不大,变化小,景观斑块形状趋于常态。2010 年各侵蚀强度的分离度指数与 2005 年相比总体大幅度提升,与 2017 年相当,基本无波动。在强烈侵蚀上较大,在微度侵蚀上最小,表明在强烈等级上景观的斑块类型和数量比微度等级少,景观破碎化程度低。3 个年度中微度、轻度、中度侵蚀的蔓延度均持续上升,强度、极强度、剧烈侵蚀的蔓延度先快速增加后缓慢减少,但整体上升,表征侵蚀强度景观中优势斑块间的连接度好。

4 讨论

目前,水土保持措施因子 p 值的研究标准尚未统一^[33]。文中 p 值的确定没有采用定量方法,属于

经验值,参考相关文献^[34-36],根据汾河上游水土保持试验站资料、县志资料,使用空间信息手段,结合当地

土地利用及农事活动情况确定的。在后续研究中,将进行小区观测试验,提高 p 值的精确度。

表 5 2005—2017 年各侵蚀强度景观格局指数

景观指数	年份	侵蚀强度					
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
SHDI	2005	0.82	0.94	0.93	0.95	0.98	1.02
	2010	0.58	0.76	0.76	0.75	0.71	0.64
	2017	0.55	0.77	0.79	0.82	0.79	0.69
ED	2005	83.46	105.34	105.33	105.02	104.66	103.21
	2010	34.46	41.75	36.23	27.91	24.01	21.66
	2017	24.74	36.95	32.94	28.06	25.08	22.04
DIVISION	2005	0.59	0.69	0.68	0.69	0.71	0.73
	2010	0.69	0.86	0.88	0.90	0.88	0.80
	2017	0.65	0.84	0.87	0.91	0.89	0.79
CONTAG	2005	59.18	53.13	53.28	52.84	51.90	51.05
	2010	68.29	57.43	58.66	60.55	63.72	68.37
	2017	71.28	62.32	61.76	60.66	61.69	65.63

本文将不同的土壤侵蚀强度视为景观的一种元素,探寻土壤侵蚀对外部环境和景观格局的响应,表明各侵蚀景观格局指数能够较好地反应土壤侵蚀时空规律,是提升汾河上游生态系统服务功能的重要途经。

近 12 a,研究区土壤侵蚀强度和面积都有大幅度的下降,平均侵蚀模数从 2005 年的 50.26 t/(hm² · a)下降到 2010 年的 37.47 t/(hm² · a),在 2017 年跌至 30.71 t/(hm² · a),生态系统服务功能得到提升。原因在于:从 2005 年开始打响提高煤炭产业集中度和总体素质的“三大战役”,关闭非法违法煤矿点、关闭小煤矿点、重组煤炭企业和规划实施山西省煤炭开采生态环境恢复治理,重点推进汾河的区域生态环境恢复与治理工作来,期间汾河上游的土壤侵蚀面积和强度下降,水土治理取得明显成效;2005—2010 年,香农多样性、边缘密度减小速度快,蔓延度、分离度指数提升大,说明在这 5 a 中景观格局得到优化,土壤侵蚀治理效果好,受到人为干预比较大,土地利用方式的改变是土壤侵蚀和景观格局改变的主要因素,煤矿点关闭和生态环境治理措施是主要原因。2010 年后,西部森林地带和东部山地丘陵带土壤侵蚀模数不断减弱,各侵蚀强度的分离度指数在强烈侵蚀上较大,在微度侵蚀上最小,表明在强烈等级上景观的斑块类型和数量比微度等级少,景观破碎化程度低。西部森林地带和东部山地丘陵带主要以自然恢复为主,实施封山育林、退耕还林等生态措施和人口政策(偏远地区的整村搬迁)减弱整个区域的土壤侵蚀程度,提升了整个区域的生态系统服务功能,林地和草地自然恢复为主的景观格局演变,降低了该区土壤侵蚀的

强度,叠加植被的保水固土的生态服务功能。类似康磊等^[37]研究:岷江上游以草地恢复为主的土壤侵蚀的强度明显降低;周伟等^[38]的研究表明,汾河上游区域内的管涔山汾河源头、汾河上游水库、北部露天采矿区,西部森林采矿带需要加强生态保护修复工作,本文从土壤侵蚀方面也得到类似的结论,在今后的土壤治理工作应以管涔山汾河源头、汾河上游水库、北部露天采矿区,西部森林采矿带为重点。

5 结论

(1) 土壤侵蚀模数分布规律为:平均侵蚀模数连年下降;土壤侵蚀强度所占面积由土壤强度高级别向低级别转移;土壤侵蚀格局从 2005 年东南和西北高,中间低逐渐转变到 2017 年从西北向东南逐渐增强。

(2) 土地利用类型中,草地和建设用地面积显著减少,主要流向耕地、林地;耕地和林地面积大幅增加,主要来自草地和建设用地;土壤侵蚀主要发生在耕地、有林地和草地

(3) 近 12 a 的侵蚀景观格局指数变化表明:人类活动对汾河上游景观的干扰性随着时间变化而减弱;各侵蚀强度的景观斑块形状趋于简单化,斑块的平均面积增大,优势斑块连接度好,斑块团聚程度加强,各侵蚀强度的景观破碎度水平低,土壤侵蚀状况得到改善。

参考文献:

[1] Poesen J. Soil erosion in the anthropocene: Research needs[J]. Earth Surface Processes and Landform, 2018,43(1):64-84.

[2] 张志勇.改革开放 40 年山西水土保持发展回顾[J].中国水土保持,2018(12):63-66.

- [3] 赵弘峰,毕彦斌.坚持构建《山水林田湖草》生态保护思路:促进山西生态文明转型发展[J].华北自然资源,2019(3):126-130.
- [4] 刘宇.土壤侵蚀研究中的景观连通度:概念、作用及定量[J].地理研究,2016,35(1):195-202.
- [5] 彭月,何丙辉,黄世友.基于景观破碎化的三峡库区(重庆)土壤侵蚀评价[J].土壤学报,2012,49(4):636-645.
- [6] 肖笃宁,李秀珍.景观生态学的学科前沿与发展战略[J].生态学报,2003,23(8):1615-1621.
- [7] 傅伯杰,徐延达,吕一河.景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法[J].地球科学进展,2010,25(7):673-681.
- [8] 陈文波,肖笃宁,李秀珍.景观空间分析的特征和主要内容[J].生态学报,2002,22(7):1135-1142.
- [9] 赵亮,刘宇.耦合景观破碎化和土壤侵蚀的“源”“汇”边界指数[J].地理与地理信息科学,2018,34(1):98-104.
- [10] 刘红玉,李玉凤,曹晓,等.我国湿地景观研究现状、存在的问题与发展方向[J].地理学报,2009,64(11):1394-1401.
- [11] 索安宁,洪军,林勇.黄土高原景观格局与水土流失关系的研究[J].应用生态学报,2005,16(9):1719-1723.
- [12] 邬建国.生态学范式变迁综论[J].生态学报,1996,16(5):449-460.
- [13] 陈利顶,刘洋,吕一河,等.景观生态学中的格局分析:现状、困境与未来[J].生态学报,2008,28(11):5521-5531.
- [14] 梅嘉谔,刘洋,岳朋芸,等.旬河流域景观格局变化对泥沙输出的影响[J].水土保持研究,2020,27(3):45-50,56.
- [15] 王库,史学正,于东升,等.基于景观格局分析的兴国县土壤侵蚀演变研究[J].水土保持学报,2003,17(4):94-116.
- [16] 李阳兵,邵景安,杨华,等.重庆市土壤侵蚀空间格局研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2007,24(4):12-15.
- [17] 漆良华,张旭东,周金星,等.湘西北侵蚀小流域生态恢复适宜度与景观格局特征[J].山地学报,2009,27(5):524-530.
- [18] 康磊,刘世荣,刘宪钊.岷江上游景观格局与土壤侵蚀变化:以杂古脑流域为例[J].水土保持通报,2019,39(1):23-28,325.
- [19] 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.
- [20] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
- [21] 何莎莎,叶露培,朱文博,崔耀平,朱连奇.太行山淇河流域 2000—2015 年土壤侵蚀和水源供给变化研究[J].地理研究,2018,37(9):1775-1788.
- [22] Liu B Y, Xie Y, Li Z G, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China[J], International Soil and Water Conservation Research,2020,8(4),430-439.
- [23] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 和地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [24] 潘美慧,伍永秋,任斐鹏,等.基于 USLE 的东江流域土壤侵蚀量估算[J].自然资源学报,2010,25(12):2154-2164.
- [25] 刘婷,邵景安.基于 BP 神经网络的三峡库区土壤侵蚀强度模拟[J].自然资源学报,2018,33(4):669-683.
- [26] 李慧颖,李晓燕,于皓,等.基于多源遥感信息的过去 40 年间吉林省长吉示范区森林面积损失与景观破碎化研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(2):128-135.
- [27] 张金茜,巩杰,柳冬青.地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J].地理科学,2018,38(8):1370-1378.
- [28] 付刚,肖能文,乔梦萍,等.北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化[J].生态学报,2017,37(8):2551-2562.
- [29] 刘红玉,吕宪国,张世奎,等.三江平原流域湿地景观破碎化过程研究[J].应用生态学报,2005,16(2):289-295.
- [30] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [31] 高江波,蔡运龙.区域景观破碎化的多尺度空间变异研究:以贵州省乌江流域为例[J].地理科学,2010,30(5):742-747.
- [32] 付扬军,师学义,和娟.汾河流域景观破碎化时空演变特征[J].自然资源学报,2019,34(8):1606-1619.
- [33] 黄杰,姚志宏,查少翔,等.USLE/RUSLE 中水土保持措施因子研究进展[J].中国水土保持,2020(3):37-39.
- [34] 鹿晨昱,张琳,薛冰,等.基于 GIS 的太原市土壤侵蚀定量研究[J].水土保持通报,2013,33(6):247-251.
- [35] 何莎莎,朱文博,崔耀平,等.基于 RUSLE 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):426-439.
- [36] 张养安,张鑫,江仕嵘.基于 GIS 与 RS 的杨凌区土壤侵蚀时空变异性研究[J].水土保持学报,2018,32(6):130-133,235.
- [37] 康磊,刘世荣,刘宪钊.岷江上游景观格局与土壤侵蚀变化:以杂古脑流域为例[J].水土保持通报,2019,39(1):23-28,325.
- [38] 周伟,官炎俊,刘琪,等.黄土高原典型流域生态问题诊断与系统修复实践探讨:以山西汾河中上游试点项目为例[J].生态学报,2019,39(23):8817-8825.