

DOI: 10.5846/stxb201910232222

高艳丽, 李红波. 汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响. 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. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2248-2260.

汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响

高艳丽, 李红波*

华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070

摘要:在流域尺度上,景观格局变化是决定土壤侵蚀程度的重要因素。以汉江流域为研究区域,基于 2000—2015 年四期土地利用类型数据及环境气象数据,运用中国土壤流失方程和逐步回归法,探究景观格局变化对土壤侵蚀的影响。结果表明:(1)在 2000—2015 年间,汉江流域土壤侵蚀量下降,高值区分布在流域中部草地区,低值区分布在流域东西两侧的林地和耕地。不同坡度下各等级土壤侵蚀量不同,侵蚀量最大值出现在 10—30°的坡度范围内。(2)研究期间,汉江流域的景观破碎化程度加强,斑块形状趋于简单,各斑块自身连通性增强,景观类型空间分布均匀。(3)汉江流域土壤侵蚀量与斑块密度和平均邻接度指数呈正相关,与蔓延度指数和香农均匀度指数呈负相关,即景观破碎度越高、连通性越差,土壤越容易遭受侵蚀,反之则不易受到侵蚀;研究表明景观格局变化对土壤侵蚀有显著影响,结果可为流域尺度景观管理与水土保持研究提供参考。

关键词:土壤侵蚀;景观格局变化;影响因素;汉江流域

Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han River Basin

GAO Yanli, LI Hongbo*

College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: Soil erosion is a serious environmental problem in the world, which is a complex process depending on a set of factors, such as topography of the river basin, rainfall, soil characteristics, and landscape pattern. The relationship between landscape pattern and ecological process is an important research project in landscape ecology. The impact of landscape pattern changes on soil erosion remains a major issue in ecosystem service. Therefore, research on soil erosion in Han River Basin is of great significance for ensuring the development of regional economic. The purpose of this study is to explore the impact of landscape pattern changes on soil erosion through Chinese soil loss equation and stepwise regression method, based on the land use data and environmental meteorological data from 2000 to 2015. The results show that: (1) from 2000 to 2015, the amount of soil erosion in Han River Basin presents downward trend. The high-value areas are distributed in the middle areas of the watershed, which is grass land. And the low-value areas are located in the east and west of the watershed, with the land type of forest and arable. In addition, slope is an important factor which affects the amount of soil erosion. As the slope increases, soil erosion shows an inverted U-shaped trend of increasing first and then decreasing. The amount of soil erosion is different for each grade under different slopes, and the maximum value appears in the slope range of 10—30°. (2) At landscape level, the degree of landscape fragmentation in Han River Basin increased during the study period, the shape of patches became simpler, the connectivity of each patch enhanced, and the spatial distribution of landscape types was distributed evenly. At the class level, the area of forest land and cultivated land were decreased, and the other land types were increased. The forest land is the dominant land type in Han River Basin, and the patch shape of forest land is relatively simple and stable. The landscape patch shapes of grassland and arable land are more complex than

基金项目:国家自然科学基金资助面上项目(41871179);华中农业大学自主科技创新基金(2016RC014)

收稿日期:2019-10-23; **网络出版日期:**2021-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihb20132013@163.com

others, with landscape is more shattered. However, the overall landscape distribution in the region is even and stable. (3) The soil erosion in Han River Basin was positively correlated with patch density and average contiguity index, and negatively correlation with contagion index and Shannon's evenness index. The results show that the higher landscape fragmentation and the worse connectivity between patches, the easier erosion of soil. On the contrary, the higher landscape connectivity between patches and the richer of landscape diversity, the more difficult erosion of soil. Furthermore, rainfall changes have an important role in soil erosion, and rainfall erosivity is not only consistent with the soil erosion in spatial distribution, but also consistent with temporal trend of that. In conclusion, this study indicates that the change of landscape pattern has a significant impact on soil erosion, and the results can provide a reference for watershed-scale landscape management and soil-water conservation.

Key Words: soil erosion; landscape pattern change; influencing factors; Han River Basin

景观格局与生态过程的相互关系是景观生态学中的重要研究内容^[1],而景观格局指数是描述景观空间组织结构的重要工具^[2]。随着景观生态学与空间信息分析方法的发展,景观格局指数逐渐应用到土壤侵蚀中,用于探究景观格局变化对土壤侵蚀的影响^[3]。土壤侵蚀造成区域水土流失,植被退化,严重威胁区域生态环境与经济发展,是一个世界性的难题^[4]。习总书记说过“既要金山银山,又要绿水青山”,“保护生态环境就是保护生产力,改善生态环境就是发展生产力”。针对土壤侵蚀这一严重制约全球经济和社会可持续发展的问题^[5],探究景观格局变化如何影响土壤侵蚀程度,对区域防治水土流失,改善生态环境具有重要意义。

土壤侵蚀是一个综合性的过程,它的发生受到降雨、地形、植被变化等多重因素共同影响^[6-7]。饶恩明和肖焱通过对四川省土壤保持功能的影响因素进行分析,发现地形因子、降雨因子和土壤因子对土壤保持功能有显著的正向作用^[8]。钟莉娜等以黄土高原为研究区,分析了降雨和土地利用格局对土壤侵蚀的影响,发现随着流域面积增加,降雨对土壤侵蚀的影响减小,但土地利用格局对其影响增大^[9]。肖继兵等通过模拟不同降雨强度对不同坡度农作物的径流量与侵蚀量影响,探究降雨和植被对坡耕地的土壤侵蚀影响^[10]。除却上述因素,景观格局变化对土壤侵蚀的影响意义深远^[11-12]。李婷等^[13]针对丹江流域,探讨了土地利用类型转变对土壤侵蚀的影响,发现地表景观格局变化会引起土壤侵蚀强度的变化。其他学者也证实了这一点,比如林地转换为耕地和草地可以加剧土壤侵蚀的程度^[14],而坡耕地转变为林地和草地可以减少土壤侵蚀的影响^[15]。土地利用变化直接导致景观格局的改变,而景观格局变化对生态过程的影响是景观生态学中的重要内容^[16]。因此,在流域尺度上,认识和把握景观格局变化对土壤侵蚀的影响具有重要意义。

汉江中上游山高坡陡,土薄石厚且降水量大,土壤被侵蚀后极易形成沙砾或砾质劣地,水土流失危害严重^[17],不仅危害当地生态环境与经济发展,还影响南水北调中线工程的顺利实施,因此土壤侵蚀治理是汉江流域当前的重要问题。目前针对景观格局与水土流失的研究多集中在黄土高原区域,对汉江流域土壤侵蚀的研究很少,且大多文献仅是对景观格局与土壤侵蚀进行空间叠加分析或相关系数分析^[18-22]。因此,选取水土流失严重的汉江流域上中游区域,运用中国土壤流失方程(CSLE)分析土壤侵蚀空间分布状况,利用 Fragstats 软件探索 2000—2015 年汉江流域景观格局演化机制,并用逐步回归法研究景观格局与土壤侵蚀的相关关系,为汉江流域水土流失改善和治理提供科学依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

汉江流域上中游位于陕西省南部,在陕西境内由西向东穿行于北部的秦岭山地与南部米仓山、大巴山之间,地形起伏大,峡谷盆地交错分布,流域面积为 95004.986 km²,约占整个汉江流域 60%。海拔高度为 99—2947 m,气候属亚热带季风性气候。河流支流众多,大多属于山溪性河流,河床狭窄,水流湍急,加之降水主要集中在夏季,因此暴雨、洪涝灾害频发。汉江中游丹江口水库是南水北调中线工程的水源地,也是中国重要的

水源保护区之一。随着长江经济带城镇化进程推进和南水北调工程的实施,汉江上中游流域的生态环境遭到严重威胁,植被退化,水土流失严重,泥石流等地质灾害频发,水土流失及荒漠化的危害程度远比黄土高原直接和严重。本研究主要关注汉江流域上中游,该区域既是丹江口水库的水源地,又是汉江和丹江的源头区,生态与经济发展战略地位显著。

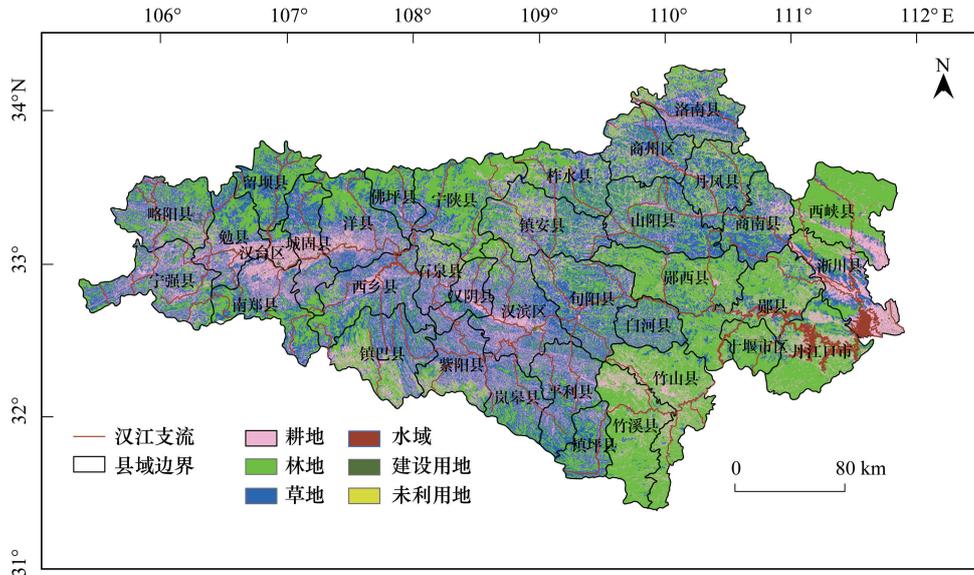


图1 汉江流域示意图

Fig.1 The location of Hanjiang River Basin

1.2 数据来源

本文数据主要包括:①土地利用分类数据:来源于地理空间数据云 (<http://www.giscloud.cn/>) Landsat 5 TM (2000,2005,2010年)和 Landsat 8 OLI(2015年)四期影像,之后用 ENVI 5.1 进行人工解译,得到 Kappa 系数大于 80%且空间分辨率为 30 m 的土地利用分类图;②气象观测数据,选取 2000—2015 年汉江流域 37 个气象站点的日降雨量数据,来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>);③土壤数据:来自世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 (v1.1),分辨率为 1 km (<http://westdc.westgis.ac.cn/>);④归一化植被指数 (NDVI)数据:来自中国科学院资源环境科学数据中心,分辨率为 1km (<http://www.resdc.cn/>);⑤数字高程数据 (DEM):采用 ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM)数据,来自地理空间数据云,分辨率为 30 m (<http://www.giscloud.cn/>)。将所有数据统一到 WGS_1984_UTM_Zone_49N 投影坐标系下再进行计算。

2 研究方法

2.1 土壤侵蚀计算

本文运用刘宝元^[23]基于通用土壤流失方程 (USLE) 提出的中国土壤侵蚀模型 (CSLE) 来计算汉江流域年均土壤侵蚀量:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \times T \quad (1)$$

式中, A 为土壤侵蚀量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子 ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖和管理因子; P 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。

2.1.1 降雨侵蚀力因子计算 (R)

通过各种方法的比较,本文选用章文波^[24]日降雨量降雨侵蚀力公式。采用汉江流域 2000—2015 年 37 个

气象站的逐日降雨量数据,具体公式如下:

$$M_i = \alpha \times \sum_j^k D_j^\beta \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + \left(\frac{18.144}{P_{d12}} \right) + \left(\frac{24.455}{P_{y12}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta - 7.1891 \quad (4)$$

式中 M_i 为第 i 个半月的降雨侵蚀力值 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), D_j 是半个月第 j 天降雨量,要求 D_j 大于等于 12 mm,这是国内通用的计算降雨侵蚀力的标准^[25-26]。 K 是研究期内半月的时段数,每月分为两个半月研究时段,全年共 24 个时段; α 和 β 是模型参数, P_{d12} 为日降雨量大于等于 12 mm 的日均降雨量, P_{y12} 为日降雨量大于等于 12 mm 年均降雨量。按照上述公式计算逐年各半月的降雨侵蚀力,然后汇总得到年降雨侵蚀力,最后在 Arcgis10.2 软件中,运用反距离权重法对年降雨量进行插值,即可得到降雨侵蚀力因子图。

2.1.2 土壤可蚀性因子计算(K)

本文采用 Williams 等^[27]提出的方法,根据土壤有机碳数据和土壤颗粒组成数据计算 K 因子。

$$K = 0.1317 \times \{0.2 + 0.3 \times \exp[-0.0256 \times \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100)]\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{SIL} + \text{CLA}} \right) 0.3 \times \left[1 - 0.25 \times \frac{\text{TOC}}{\text{TOC} + \exp(3.72 - 2.95 \times \text{TOC})} \right] \times \left[1 - 0.7 \times \frac{\text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(22.9 \times \text{SN}_1 - 5.51)} \right] \quad (5)$$

式中, SAN、SIL 和 CLA 分别为砂粒、粉粒和黏粒的含量(%); TOC 为有机碳的含量(%);其中, $\text{SN}_1 = 1 - \frac{\text{SAN}}{100}$, 0.1317 为美制单位转化为国际单位的系数。

2.1.3 坡长坡度因子计算(LS)

坡度因子的算法是对 McCool 等^[28]和 Liu 等^[29]提出的坡度算法的改良;坡长因子的计算,是参考 Wischmeier 和 Smith^[30]提出的经验公式。根据汉江流域 DEM (Digital Elevation Model) 数据在 ArcGIS 10.2 软件中提取坡长坡度因子:

$$L = (\lambda/22.1)^\alpha \quad (6)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.05 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha = \beta / (1 + \beta) \quad (8)$$

$$\beta = (\sin\theta/0.089) / (3.0\sin\theta^{0.8} + 0.56) \quad (9)$$

式中, L 为坡长因子; S 为坡度因子; θ 为 DEM 数据提取出的坡度值; α 、 β 分别为坡度指数和细沟侵蚀与面蚀的比值。

2.1.4 植被覆盖和管理因子(C)

植被覆盖和管理因子是指在其他条件相同时,某一特定作物或植被覆盖的土壤流失量与裸地土壤流失量的比值,取值范围在 0 到 1 间,反映了植被或作物管理措施对土壤流失量的影响。本文采用像元二分法模型计算植被覆盖度(Fraction vegetation coverage, FVC)^[31]:

$$\text{FVC} = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \quad (10)$$

式中, FVC 为植被覆盖度, NDVI 为归一化植被指数, NDVI_{\max} 表示完全由植被覆盖的像元的 NDVI 值, NDVI_{\min} 表示裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值,这两个参数由置信区间的最大值和最小值确定,即累计频率为 99.5% 的 NDVI 值为 NDVI_{\max} 值,累计频率为 0.5% 的 NDVI 值为 NDVI_{\min} ^[32]。

求出植被覆盖度(FVC)后,根据汉江流域实际情况并参考谢红霞^[33]的研究成果,对不同植被覆盖度下的土地利用类型赋予不同的 C 值。由于未利用地在汉江流域中面积占比极小(仅占 0.6%)且空间分布零散,在

影像图中基本看不到,因此本文土壤侵蚀量不包括未利用地的计算:

表 1 汉江流域不同土地利用类型的植被覆盖和管理因子

Table 1 Vegetation covers and management factors of different land use types in Han River Basin

植被覆盖度 Vegetation cover index	林地 Forest land	草地 Grass land	耕地 Arable land	水域 Water	建设用地 Construction land
0—20%	0.1	0.45			
20%—40%	0.08	0.24			
40%—60%	0.06	0.15	0.23	1.00	0.90
60%—80%	0.02	0.09			
80%—100%	0.004	0.043			

2.1.5 水土保持措施因子(P)

水土保持措施因子是指实施水土保持措施下的土壤流失量与未实施水土保持措施下土壤流失量之比。汉江流域总流域面积为 95004.986 km²,想对流域 2000—2015 年的所有工程措施进行了解很难实现,因此参考他人针对流域的研究进行取值^[34-35],建设用地和水域取 0,耕地取 0.4,其余用地类型为 1。

2.1.6 耕作措施因子(T)

耕作措施因子参考谢红霞的研究成果^[33],即根据不同坡度下等高耕作减少土壤流失的方法来确定:

表 2 不同坡度下耕作措施因子

Table 2 Tillage practice factor value under different slope

坡度范围 Slope range	0—5°	5—10°	10—15°	15—20°	20—25°	>25°
T	0.100	0.221	0.305	0.575	0.735	0.800

2.2 景观格局指数计算

景观格局指数分为类型水平指数、斑块水平指数和景观水平指数^[36]。斑块水平指数通常作为计算其他指数的基础,相较类型水平指数和景观水平指数的解释价值较小^[37]。因此本文选用类型水平指数和景观水平指数对汉江流域上中游 2000—2015 年的景观格局变化进行分析。在景观水平上,选取斑块数量(NP)、平均斑块面积(AREA_MN)、平均形状指数(SHAPE_MN)、平均邻接度指数(CONTIG_MN)、香农多样性指数(SHDI)、平均分维度指数(FRAC_MN)、香农均匀度指数(SHEI)7个指标。在类型水平上,选取斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、斑块类型面积(CA)、聚合度指数(AI)、景观百分比(PLAND)、最大斑块指数(LPI)和斑块边缘密度(ED)7个指标,共计 14 个指标进行分析。

2.3 回归分析法

为探究景观格局变化对土壤侵蚀的影响程度,本文通过研究景观生态学意义,从景观格局指数中选取 10 个与生态水文密切相关的指数作为自变量,汉江流域 37 个县域土壤侵蚀量作为因变量进行逐步回归分析。首先用 ArcGIS10.2 软件对汉江流域 37 个县市进行分区统计,求得不同年份各个县市的土壤侵蚀量平均值作为回归方程中的因变量,再用 Fragstats 4.2 软件计算出各个县市的景观格局指数作为自变量,最后借助 STATA 软件对土壤侵蚀与景观格局进行逐步回归分析,探究流域尺度景观格局对土壤侵蚀的影响。选取的 10 个指标分别为最大斑块指数(LPI)、斑块密度(PD)、平均邻接度指数(CONTIG_MN)、蔓延度指数(CONTAG)、景观形状指数(LSI)、聚合度指数(AI)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)、斑块数量(NP)、平均分维度指数(FRAC_MN)。

3 结果分析

3.1 土壤侵蚀分析

3.1.1 土壤侵蚀量时空变化特征

汉江流域上中游属于西南山石地区,根据中国水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—

2007)^[38],该区域属于水力侵蚀区域,因此土壤侵蚀量划分为 6 个等级,见下表:

表 3 汉江流域土壤侵蚀强度分级

Table 3 Classification of hydraulic erosion intensity

级别 Class	平均侵蚀模数 Average soil erosion/ (t hm ⁻² a ⁻¹)	级别 Class	平均侵蚀模数 Average soil erosion/ (t hm ⁻² a ⁻¹)
微度侵蚀 Slight erosion	<1000	强烈侵蚀 Intensive erosion	5000—8000
轻度侵蚀 Light erosion	1000—2500	极强烈侵蚀 Extremely intensive erosion	8000—15000
中度侵蚀 Medium erosion	2500—5000	剧烈侵蚀 Severe erosion	>15000

根据计算结果(图 2)可知,在 2000—2015 期间,汉江流域年均土壤侵蚀量显著下降,由 2000 年的 8327.52 t hm⁻² a⁻¹ 下降到 2015 年的 2677.51 t hm⁻² a⁻¹。2000 年和 2005 土壤侵蚀量空间格局分布相似。高值区均分布在以西乡县、白河县、镇巴县和镇坪县围成的矩形范围内,低值区分布在流域东侧的十堰市中,包括西峡县、丹江口市、张湾区和茅箭区。2010 年均土壤侵蚀量 3763.38 t hm⁻² a⁻¹,比 2005 年下降 47.03%,土壤剧烈侵蚀量下降,空间分布上呈现出中部侵蚀严重,东西部侵蚀较弱。2015 年土壤侵蚀量进一步减少,空间分布格局与 2010 年相似,流域中部土壤侵蚀量较之前明显下降,侵蚀类型主要以微度和轻中度侵蚀为主。

结合土地利用分类图(图 3)可知,土壤侵蚀高值区的土地利用类型主要为草地,例如紫阳县、旬阳县和岚皋县分布着许多牧场与农畜产品基地,放牧使得草地植被覆盖率变低,截水能力和渗透能力较弱,故土壤侵蚀强度大;而土壤侵蚀低值区的主要用地类型是林地和耕地,包括流域东部的西峡县、淅川县、丹江口市、竹山、竹溪县,流域西部城固县和汉台区(耕地),以及流域北部的宁陕县(林地)。这是因为林地植被覆盖程度高,树叶截水能力和土壤渗透力都较强,而耕地是人类干扰最多的土地类型,一般设有防护水土流失的耕作措施,因此林地和耕地土壤侵蚀程度低;此外,土壤侵蚀低值区中,流域东侧的西峡县和淅川县属于国家重要粮食生产基地,耕地质量高,土壤持水力强,因此土壤流失量少。

除却上述原因,南水北调工程的实施也是影响汉江流域土壤侵蚀的重要原因。南水北调中线工程的水源地为丹江口水库,该项目从 2000 年开始建设。2000—2010 年间是南水北调工程建设时期,工程实施对该区域生态环境造成破坏,再加上该区域降雨量多,水土流失严重,因此 2000 和 2005 年丹江口周围的淅川县、郧县和丹江口市北部地区土壤侵蚀有强烈侵蚀和极强烈侵蚀。2010 年 3 月中线工程基本完成,之后国家对该区域进行一系列生态整治,建设汉江生态经济带,对汉江流域的生态环境进行改善,并取得了良好的效果,因此 2010—2015 年丹江口水库周围土壤侵蚀明显下降,以微度侵蚀为主。

3.1.2 土地利用与土壤侵蚀

根据土壤侵蚀计算结果,由于建设用地和水域中土壤侵蚀为 0,归类于微度侵蚀。因此本文仅分析耕地、林地和草地的土壤侵蚀等级。表 4 为不同地类下各等级土壤侵蚀量占该地类总侵蚀量的面积比值。

从表 4 可知,在 2000—2015 年间,各地类的土壤侵蚀等级中微度侵蚀面积最大,占据主导地位。在耕地土壤侵蚀类型中,微度、轻度、中度和强烈侵蚀面积都在增加,尤其是轻度侵蚀和中度侵蚀类型,2015 年比 2000 年分别增加 47.40% 和 38.21%。极强烈侵蚀面积一直在减少,从 2000 年的 12.67% 减少到 2015 年的 8.97%。剧烈侵蚀在 2000 年(18.67%) 和 2005 年(20.43%) 面积占比较高,是所有侵蚀等级中第二大侵蚀类,2010 年明显下降(5.13%),2015 年耕地剧烈侵蚀面积占比最小;林地是汉江流域中优势地类,占流域总面积的 41.80%,其主要侵蚀类型为微度侵蚀。从 2000—2015 年林地微度侵蚀面积占比从 65.87% 增加到 2015 年的 94.23%,主要是林地中其他严重侵蚀等级占比转为微度侵蚀所致。除却微度侵蚀,其余侵蚀类型在研究期间下降速度均大于 70%,说明林地在防治侵蚀中扮演着重要角色;草地占地面积仅次于林地,其微度侵蚀、轻度侵蚀和中度侵蚀类型呈增加趋势,而强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀呈减少趋势。2000 年草地土壤剧烈侵蚀占比较大(18.29%),仅次于微度侵蚀(28.65%)。草地各侵蚀类型中增长率最快的为轻度侵蚀

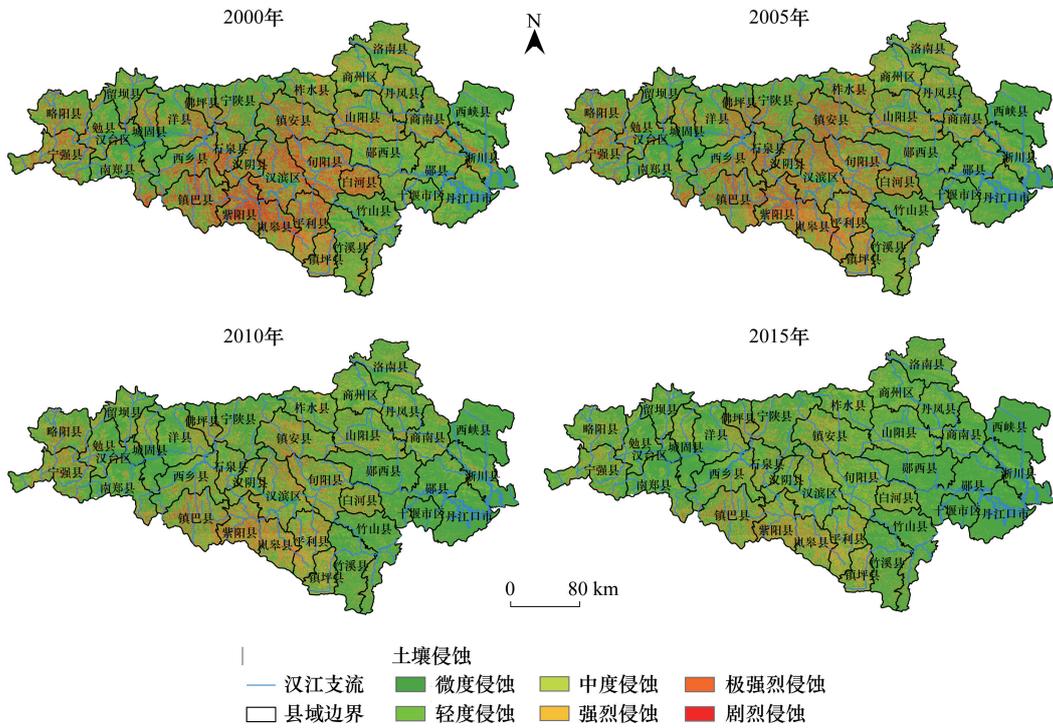


图2 土壤侵蚀时空变化图

Fig.2 Spatiotemporal distribution and change of soil erosion

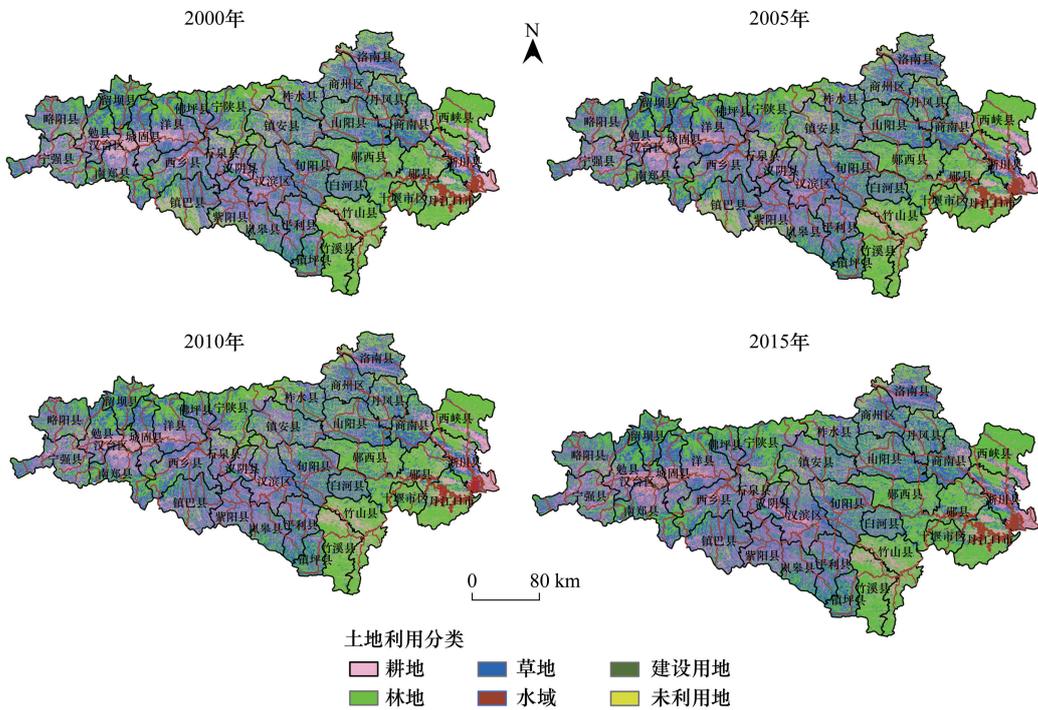


图3 土地利用分类图

Fig.3 The map of land use type

(117.82%),侵蚀面积中减少最快的为剧烈侵蚀,15年间减少了81.90%。

表4 不同地类土壤侵蚀等级面积占比/%

Table 4 Proportion of soil erosion grade area of different land types

土地类型 Land use type	年份 Year	微度侵蚀 Slight erosion	轻度侵蚀 Light erosion	中度侵蚀 Medium erosion	强烈侵蚀 Intensive erosion	极强烈侵蚀 Extremely intensive erosion	剧烈侵蚀 Severe erosion
耕地 Arable land	2000	41.66	8.63	9.68	8.69	12.67	18.67
	2005	41.36	8.26	9.11	8.32	12.53	20.43
	2010	45.32	22.45	9.46	11.75	5.88	5.13
	2015	49.09	12.72	13.38	9.23	8.97	6.62
	增长率	17.84	47.40	38.21	6.12	-29.21	-64.55
林地 Forest land	2000	65.87	18.60	8.94	3.40	1.99	1.19
	2005	77.29	15.82	4.34	1.29	0.77	0.49
	2010	90.25	8.83	0.46	0.27	0.09	0.09
	2015	94.23	4.21	0.98	0.28	0.17	0.12
	增长率	43.05	-77.35	-89.05	-91.65	-91.53	-89.89
草地 Grassland	2000	28.65	10.30	14.43	12.32	16.01	18.29
	2005	30.32	11.81	16.23	13.11	15.46	13.08
	2010	35.86	37.31	12.00	9.20	3.01	2.62
	2015	42.81	22.43	18.05	8.18	5.22	3.31
	增长率	49.45	117.82	25.08	-33.65	-67.41	-81.90

3.1.3 地形与土壤侵蚀

坡度是地形地貌的重要因子之一,同时也是影响土壤侵蚀的重要因素^[39]。根据汉江流域 DEM 图提取出流域坡度图,并按照每 10°的坡度范围进行划分,之后分别统计不同坡度下各类土壤侵蚀面积。结果显示不同坡度范围内的不同类别土壤侵蚀面积占比随时间变化很小,因此用四年土壤侵蚀面积占比的平均值进行分析,如下表:

根据表 5 可知,各等级土壤侵蚀面积随着坡度增加,都出现先增大后减小的趋势,这与已有的研究结果一致^[28,40]。坡度在 0—10°范围内,土壤微度侵蚀面积占比最大(16.65%),其次是轻度侵蚀(0.77%),其余土壤侵蚀等级较小。在 10—20°的坡度范围中,各个侵蚀等级的面积明显增加,增加最多的是轻度侵蚀和中度侵蚀,分别增加了 4.58%和 2.39%。在 20—30°的范围内,土壤微度侵蚀面积减少 3.21%,轻度侵蚀基本没有变化,其余等级的侵蚀面积都增加了大概 1.5%,达到侵蚀最大值。坡度大于 30°后,所有土壤侵蚀类型的面积都出现下降的现象,当坡度大于 60°时,基本不发生土壤侵蚀,原因是坡度过大时地形属于陡坡和岩壁,这类地形均为岩石,基本无土壤覆盖。

综上,微度侵蚀和轻度侵蚀最大值发生在 10—20°之间,其余侵蚀地类的最大值位于 20—30°之间。在各个坡度范围内,微度侵蚀占据主导地位。当坡度大于 30°时,所有等级土壤侵蚀面积都开始下降,这表明汉江流域土壤侵蚀存在临界坡度,范围在 10—30°之间。坡度大于 60°时,基本不发生土壤侵蚀。

3.2 汉江流域景观格局分析

3.2.1 景观水平格局指数分析

本文用 Fragstats 4.2 软件计算汉江流域 2000—2015 年的景观格局指数(表 6)。根据结果可知 2000—2015 年间,汉江流域斑块数量(NP)增加 13.13%,NP 值越大说明景观破碎化程度越高。平均斑块面积(AREA_MN)下降 11.61%,该指标越小代表景观破碎化程度越大。而代表形状指标的平均形状指数(SHAPE_MN),平均分维度指数(FRAC_MN)有轻微减少,说明汉江流域的景观斑块形状趋于稳定,受人类干扰较多。景观平均邻接度指数(CONTIG_MN)轻微下降,说明各景观斑块与其他景观斑块之间的连接减少,景观分散。

此外,香农多样性指数(SHDI)和香农均匀度指数(SHEI)反映景观分布的均匀程度,值越大说明景观类型分布越均匀。SHDI 和 SHEI 的数值基本没有变化,且 SHEI 指数为 0.64,说明汉江流域景观斑块分布均匀,景观多样性趋于稳定。

表 5 不同坡度范围下土壤侵蚀面积占比/%

Table 5 Proportion of soil erosion area of different slope ranges

坡度范围 Slope range/(°)	微度侵蚀 Slight erosion	轻度侵蚀 Light erosion	中度侵蚀 Medium erosion	强烈侵蚀 Intensive erosion	极强烈侵蚀 Extremely intensive erosion	剧烈侵蚀 Severe erosion
0—10	16.653	0.767	0.245	0.127	0.108	0.121
10—20	18.027	5.345	2.636	1.388	1.089	1.122
20—30	14.286	5.315	3.830	2.878	2.745	2.769
30—40	6.886	2.660	1.866	1.557	1.592	1.760
40—50	1.480	0.663	0.405	0.350	0.380	0.462
50—60	0.167	0.085	0.046	0.041	0.044	0.060
60—70	0.015	0.008	0.004	0.004	0.004	0.006
70—80	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
80—90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 6 汉江流域景观水平指数

Table 6 Landscape-level metrics in Han River Basin

年份 Year	NP	AREA_MN	SHAPE_MN	FRAC_MN	CONTIG_MN	SHDI	SHEI
2000	73724	128.70	2.18	1.11	0.82	1.15	0.64
2005	73667	128.80	2.17	1.11	0.81	1.15	0.64
2010	79795	118.91	2.10	1.10	0.76	1.15	0.64
2015	83407	113.76	2.07	1.10	0.74	1.16	0.65

NP: 斑块数量 Number of patches; AREA_MN: 平均斑块面积 Mean patch area; SHAPE_MN: 平均形状指数 Mean shape index; FRAC_MN: 平均分维度指数 Mean fractal dimension; CONTIG_MN: 平均邻接度指数 Mean contiguous index; SHDI: 香农多样性指数 Simpson's diversity index; SHEI: 香农均匀度指数 Shannon's evenness index

3.2.2 类型水平格局指数分析

类型水平上的景观格局指数见表 7。在 2000—2015 年间,从斑块类型面积(CA)可知,林地和耕地的面积在减少,其余用地面积增加,其中草地增加面积最多、建设用地次之、水域和未利用地的面积增加较少;景观百分比(PLAND)和最大斑块指数(LPI)代表斑块优势度,林地的 PLAND 和 LPI 最大,说明林地是汉江流域的优势地类,其次是草地和耕地,这两个指数在时间变化趋势上与斑块类型面积(CA)变化一致;斑块密度(PD)代表景观破碎化程度,其值越大,代表景观破碎化程度越高,所有地类中耕地的斑块密度最大,在 0.38—0.45 之间,说明耕地的破碎化程度相对较高,这是由于随着经济发展,耕地因城市扩张与人类活动,多被侵占为建设用地和养殖基地,其破碎化程度增加,连通性降低;此外,各地类的边缘密度(ED)变化很小,说明景观边缘异质性小;而草地和耕地的斑块形状指数(LSI)明显高于其他地类,说明这两种地类斑块形状较其他地类复杂,边界割裂的程度高,景观破碎程度大,而林地的斑块形状相对简单且时间变化很小;聚合度指数(AI)除了未利用地从 90.605 减少到 87.167,其余地类基本未发生变化,这说明区域整体的景观分布均匀,趋于稳定,与上述景观水平指数得出的结果一致。

3.3 景观格局变化对土壤侵蚀的影响

将提取的汉江流域 37 个县市土壤侵蚀量作为因变量,相应各县市的景观格局指数作为自变量,应用 STATA 软件对汉江流域 2000—2015 年间景观格局指数和土壤侵蚀量做逐步回归分析,以显著性小于 0.1 为标准对景观格局指数进行筛选,结果如表 8:

汉江流域土壤侵蚀量与斑块密度(PD)呈正相关,即斑块密度越大,土壤侵蚀量越大。斑块密度代表景观破碎化程度,当PD变大时,景观破碎化程度变大,景观分散性增强,对土壤的阻滞作用减弱,土壤容易遭受侵蚀。当PD越低,景观破碎化程度越低,同类景观之间的连通性增强,不仅有利于动植物繁衍生长,还能有效阻止水土流失。

表 7 类型水平景观格局指数

Table 7 Class-level metrics in Han River Basin

土地利用类型 Land use type	年份 Year	CA	PLAND	LPI	PD	ED	LSI	AI
草地 Grassland	2000	3064504	32.297	3.497	0.164	32.188	437.051	92.526
	2005	3079338	32.453	3.535	0.164	32.107	434.920	92.580
	2010	3168250	33.390	3.577	0.167	33.210	443.496	92.540
	2015	3165987	33.366	3.580	0.173	33.208	443.609	92.536
耕地 Arable land	2000	2301190	24.252	3.584	0.388	32.938	515.654	89.819
	2005	2269300	23.916	3.561	0.386	32.626	514.379	89.774
	2010	2274059	23.966	3.553	0.438	32.813	516.747	89.737
	2015	2261956	23.839	3.269	0.456	32.870	519.049	89.664
建设用地 Construction land	2000	53994.33	0.569	0.010	0.054	0.875	89.443	88.560
	2005	59711.04	0.629	0.015	0.054	0.929	90.235	89.025
	2010	62148.69	0.655	0.016	0.054	0.975	92.919	88.925
	2015	80561.07	0.849	0.020	0.056	1.242	103.885	89.109
林地 Forest land	2000	3978306	41.927	8.893	0.166	22.816	273.794	95.896
	2005	3983582	41.983	8.892	0.167	22.825	273.741	95.900
	2010	3886871	40.964	8.890	0.176	22.160	269.086	95.920
	2015	3877180	40.861	8.233	0.187	22.224	270.176	95.898
水域 Waters	2000	89981.28	0.948	0.330	0.005	0.885	70.253	93.066
	2005	96045.48	1.012	0.342	0.006	0.922	70.784	93.235
	2010	96642.81	1.019	0.343	0.006	0.929	71.119	93.225
	2015	101604.4	1.071	0.346	0.007	0.982	73.293	93.187
未利用地 Waste land	2000	654.30	0.007	0.002	0.000	0.009	8.895	90.605
	2005	654.39	0.007	0.002	0.000	0.009	8.895	90.606
	2010	658.62	0.007	0.002	0.000	0.009	8.936	90.563
	2015	1342.44	0.014	0.002	0.001	0.025	16.498	87.167

CA: 斑块类型面积 Class area; PLAND: 景观百分比 Percent of landscape; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; PD: 斑块密度 Patch density; ED: 斑块边缘密度 Edge density; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; AI: 聚合度指数 Agglomeration index;

汉江流域土壤侵蚀量与蔓延度指数(CONTAG)呈负相关。CONTAG是指景观中不同斑块类型的集聚程度或延展程度,该指数中包含空间信息,是描述景观格局的重要指数之一。高蔓延度指数反映景观中某种优势地类具有良好的连接性,随着景观斑块连接性增大,径流量明显减少,土壤侵蚀也显著下降,这与其他学者的研究结果一致^[41-42]。低蔓延度代表景观破碎化程度高,景观物种内部的繁衍与景观整体的生态维护受到影响,土壤侵蚀量增加。

土壤侵蚀量与平均邻接度指数(CONTIG_MN)呈正相关。景观平均邻接度指数反映同类型斑块间的邻近程度,当景观平均邻接度指数增加时,该景观类型斑块间的相邻边界增加,景观之间连通性增强,说明该区域单一景观占比增加,单一景观对土壤保持能力较弱,因此土壤侵蚀程度增加。反之,当景观平均邻接度指数减少时,区域景观多样性增加,土壤侵蚀降低。

土壤侵蚀与香农均匀度指数(SHEI)呈负相关。香农均匀度指数是我们比较不同景观或同一景观不同时期多样性的一个重要指标。SHEI较小时斑块优势度较高,说明区域中有一种或少数几种优势斑块占主导地位,此时水土保持能力较弱;当SHEI越大时景观类型优势度越低,说明景观中没有明显的优势类型,各类型景观分布均匀,景观丰度增加,对泥沙有显著的阻滞作用,能有效防止土壤流失。

表 8 景观水平指数与土壤侵蚀的回归模型参数

Table 8 Coefficients in regression model between landscape-level metrics and soil erosion

景观格局变量 Landscape pattern variable	标准系数 Standard coefficient	显著性系数 Significant coefficient	景观格局变量 Landscape pattern variable	标准系数 Standard coefficient	显著性系数 Significant coefficient
PD	0.243	0.079	CONTIG_MN	0.407	0.001
CONTAG	-1.572	0.005	SHEI	-1.455	0.008

CONTAG: 蔓延度指数 Contagion index

4 讨论

通过中国通用土壤流失方程和逐步回归法探究了景观格局变化对土壤侵蚀的影响。研究发现土壤侵蚀是多种社会因素和自然因素共同作用的结果。从 2000 年到 2015 年,汉江流域林地和耕地面积减少,其余四类用地面积有不同程度的增加。减少的林地主要转化为草地,其次转化为耕地。而耕地主要转化为草地和建设用地。草地的转入面积最大,景观边缘密度(ED)高,破碎化程度较高,因此土壤侵蚀最为强烈。耕地转入转出面积也较大,且斑块密度(PD)和斑块形状指数(LSI)均高于其他地类,景观破碎化程度较高,但由于耕地受人类活动影响较大,因此土壤侵蚀量小于草地。林地主要为转出面积,转入面积较少,斑块形状变化较小,景观分布均匀稳定,土壤侵蚀量最小。

除却土地利用变化因素外,降雨是影响土壤侵蚀程度的重要自然因素之一^[43]。降雨侵蚀力反映了由降雨带来的土壤侵蚀力,计算方法见公式(2)–(4)。降雨侵蚀力因子图(图 4)显示,2000—2015 年均降雨侵蚀力呈下降趋势。2000 年降雨侵蚀力因子的高值区分布在流域南部的镇巴县、紫阳县、岚皋县和镇坪县,低值区位于流域西部的略阳县、勉县以及南部的洛南县、商州区等位置,与土壤侵蚀图(图 2)的高值区出现重合现象。2005 年降雨侵蚀力高值区由东向西转移,高值区仍然分布在镇巴县和紫阳县附近。2010 年降雨侵蚀力明显减少,高值区在镇巴县与东部西峡县附近。2015 年高值区转移到流域南部的镇巴县、紫阳县附近和中北部的佛坪县,与土壤侵蚀量时空分布变化一致。流域南部镇巴县、紫阳县、岚皋县和镇坪县位于嘉陵江和汉江两大水系的分水岭,属于东南季风湿润区,大陆性较强,降水量高,因此一直属于降雨侵蚀力高值区,也是土壤侵蚀量的高值区。降雨侵蚀力的时空变化与土壤侵蚀的时空变化重合,这说明降雨是影响土壤侵蚀的重要因素。

除却上述因素,政策因素也是导致汉江流域土壤侵蚀量下降的重要原因。南水北调工程实施的前期,汉江流域的生态环境受到影响,水土流失严重。针对这些问题,政府开展了一系列生态修复措施,如水土保持项目和退耕还林还草项目的开展,使林地、草地和耕地生态系统逐渐恢复,土壤保持作用增强。此外,国家在 2009 年完成了长江上中游水土保持重点防治工程,该项目主要针对小流域进行治理,汉江流域为重点治理区域。之后,针对丹江口库区提出了《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划》,并在“十二五”期间投资 19.76 亿元对汉江流域进行生态治理。这些工程的建设实施改变了土地利用结构,改善了汉江流域的生态环境,减缓了汉江流域内土壤流失状况。

5 结论

针对汉江流域上中游开展景观格局变化的土壤侵蚀效应研究。结果表明:

(1) 2000—2015 年汉江流域土壤侵蚀程度明显下降,整体以轻度和中度侵蚀为主,侵蚀特点为中部侵蚀剧烈,东西两侧侵蚀较弱。侵蚀高值区位于流域中南部的草地区,低值区位于丹江口市、西峡县、张湾区和茅箭区等水土保持良好的林地和耕地区;各地类土壤侵蚀中,微度侵蚀占据主导地位,极强烈侵蚀和剧烈侵蚀类型下降明显;坡度是影响土壤侵蚀程度的重要因素,随着坡度增加,土壤侵蚀呈现出先增加后减少的倒 U 形趋势,各类别侵蚀程度的最大值出现在 10—30°的坡度范围内,当坡度大于 60°时,基本不发生土壤侵蚀。

(2) 汉江流域的景观格局在 2000—2015 年发生了明显改变。在景观水平上,斑块数量增加,平均斑块面

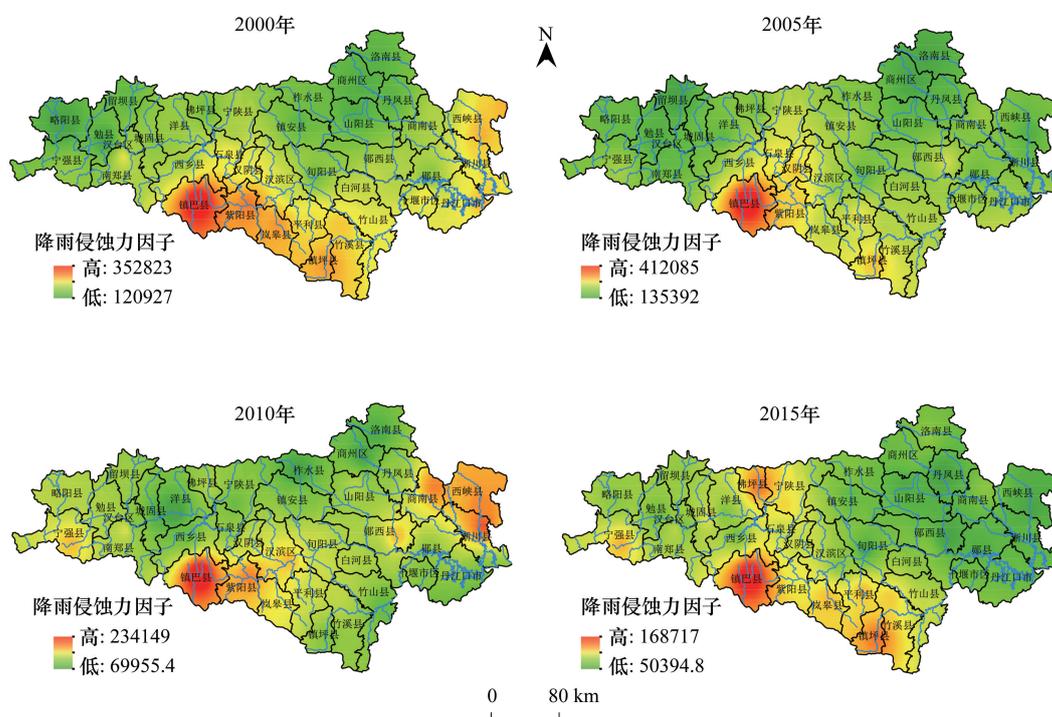


图4 降雨侵蚀力因子

Fig.4 Rainfall erosivity factor

积下降,景观破碎化程度增加,斑块形状简单,景观多样性趋于稳定,斑块分布均匀;在类型水平上,林地和耕地的面积在减少,其余用地面积增加。林地为汉江流域优势地类,斑块形状相对简单且变化很小。草地和耕地景观斑块形状较其他地类复杂,景观破碎程度大。但区域整体的景观分布均匀,趋于稳定。

(3) 汉江流域土壤侵蚀量与斑块密度(PD)和平均邻接度指数(CONTIG_MN)呈正相关,即斑块密度越大,平均邻接度越高,土壤越容易遭受侵蚀。土壤侵蚀量与蔓延度指数(CONTAG)和香农均匀度指数(SHEI)呈负相关,即蔓延度指数和香农均匀度指数越大,土壤侵蚀量越小。上述结果表明景观破碎度越高、单一地类优势越强,土壤越容易遭受侵蚀,而景观连通性越高、景观多样性越丰富,土壤越不易侵蚀。

参考文献 (References):

- [1] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.
- [2] 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. 地球科学进展, 2010, 25(7): 673-681.
- [3] 查轩, 张萍. 基于 GIS 的重要水源地东圳库区土壤侵蚀与景观格局分析. 水土保持学报, 2007, 21(3): 43-47.
- [4] Rahman M, Shi Z H, Chongfa C. Land use/land cover change analysis using geo-information technology: Two case studies in Bangladesh and China. International Journal of Geoinformatics, 2009, 5(2):25-37.
- [5] Cerdà A, Jordán A, Zavala L, Marqués M J, Novara A. The contribution of mulches to control high soil erosion rates in vineyards in Eastern Spain//Egu General Assembly Conference. Vienna, Austria; EGU, 2014:16127.
- [6] Sharma A, Tiwari K N, Bhadoria P B S. Effect of land use land cover change on soil erosion potential in an agricultural watershed. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173(1-4):789-801.
- [7] Devátý J, Dostál T, Hösl R, Krúsa J, Strauss P. Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion-Case studies from Lower Austria and Central Bohemia. Land Use Policy, 2019, 82:674-685.
- [8] 饶恩明, 肖懿. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(24): 8741-8749.
- [9] 钟莉娜, 王军, 赵文武. 多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析——以陕北黄土丘陵沟壑区为例. 地理学报, 2017, 72(3): 432-443.

- [10] 肖继兵, 孙占祥, 刘志, 郑家明, 刘洋, 冯良山, 杨宁, 白伟. 降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响. 农业工程学报, 2017, 33(22): 159-166.
- [11] Anh P T Q, Gomi T, MacDonald L H, Mizugaki S, Van Khoa P, Furuichi T. Linkages among land use, macronutrient levels, and soil erosion in northern Vietnam: a plot-scale study. *Geoderma*, 2014, 232-234: 352-362.
- [12] Ferreira V, Panagopoulos T. Seasonality of Soil Erosion Under Mediterranean Conditions at the Alqueva Dam Watershed. *Environmental Management*, 2014, 54(1): 67-83.
- [13] 李婷, 刘康, 马力阳, 包玉斌, 吴磊. 秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价. 自然资源学报, 2016, 31(04): 583-595.
- [14] Tarolli P, Sofia G. Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. *Geomorphology*, 2016, 255: 140-161.
- [15] Yang K J, Lu C H. Evaluation of Land-Use Change Effects on Runoff and Soil Erosion of a Hilly Basin the Yanhe River in the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(4): 1211-1221.
- [16] 赵亮, 刘宇. 耦合景观破碎化和土壤侵蚀的“源”“汇”边界指数. 地理与地理信息科学, 2018, 34(1): 98-104.
- [17] 李占斌, 张秦岭, 李鹏, 宋晓强, 同新奇, 徐国策. 丹汉江流域水土流失非点源污染过程与调控研究. 北京: 科学出版社, 2017.
- [18] 郭思琪, 韩磊, 赵永华, 员学锋, 王达, 李蕴琪. 秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局. 生态学报, 2019, 38(7): 2167-2176.
- [19] 李莹, 黄岁樑. 滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响. 生态学报, 2017, 37(7): 2463-2475.
- [20] 高海东, 李占斌, 李鹏, 贾莲莲, 徐国策, 任宗萍, 庞国伟, 赵宾华. 基于土壤侵蚀控制制度的黄土高原水土流失治理潜力研究. 地理学报, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [21] 卞鸿雁, 庞奖励, 任志远, 赵艳雷, 毛沛妮, 郑树伟. 黄土高原南部土地利用/覆被变化的土壤侵蚀效应. 水土保持通报, 2013, 33(2): 11-16.
- [22] 韩永伟, 高吉喜, 王宝良, 刘成程, 汪军, 拓学森. 黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值. 农业工程学报, 2012, 28(17): 78-85, 294-294.
- [23] 刘宝元. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告. 北京: 水利部水土保持监测中心, 2006.
- [24] 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. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [25] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [26] 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. 地理研究, 2018, 37(9): 1775-1788.
- [27] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion: Sediment yield models. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [28] Mccool D K, Brown L C, Foster G R, Mutchler C K, Meyer L D. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [29] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effect on soil loss for steep slopes. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [30] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*, 1978: 5-8.
- [31] 王小燕, 杨勤科. 中尺度流域土地利用变化对土壤侵蚀的影响——以孤山川流域为例. 水土保持通报, 2016, 36(2): 1-7.
- [32] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [33] 谢红霞. 延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2008.
- [34] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析. 农业工程学报, 2017, 33(17): 280-289.
- [35] Xu L F, Xu X G, Meng X W. Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China. *Catena*, 2013, 100: 74-82.
- [36] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [37] 潘竟虎, 文岩. 基于 RUSLE-SMA 的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀评价及景观格局分析——以庆城县蔡家庙流域为例. 生态学报, 2013, 32(2): 436-444.
- [38] 中华人民共和国水利部. SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [39] 史东梅, 江东, 卢喜平, 蒋光毅. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征. 农业工程学报, 2008, 24(9): 16-21.
- [40] 魏梦瑶, 张卓栋, 刘瑛娜, 张科利. 基于 CSLE 模型的广西土壤侵蚀规律. 水土保持研究, 2020, 27(1): 15-20.
- [41] 廖凯涛, 胡建民, 宋月君, 冯明军, 郑海金. 南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系. 水土保持学报, 2019, 33(3): 36-42, 50-50.
- [42] 刘晓君, 李占斌, 李鹏, 张铁钢, 徐国策, 高海东. 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. 生态学报, 2016, 36(18): 5691-5700.
- [43] 邬铃莉, 王云琦, 王晨洋, 王玉杰, 王彬. 降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响. 农业工程学报, 2017, 33(24): 157-164.