

# 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

罗佳茹<sup>1</sup> 李斌斌<sup>2</sup> 张凤宝<sup>1,3\*</sup> 丛佩娟<sup>2</sup> 王海燕<sup>2</sup> 杨明义<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>水利部水土保持监测中心, 北京 100053; <sup>3</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 研究土壤侵蚀与景观格局变化的关系对小流域的治理开发具有重要的指导意义。本研究以实施退耕还林草、生态农业、生态旅游及科技示范的黄土高原安塞南沟特色治理小流域为研究对象, 基于GIS平台和通用土壤流失方程, 分析小流域1981—2018年景观格局和土壤侵蚀量的时空演化特征, 并利用主成分回归法, 从斑块类型水平和景观水平两个尺度分析土壤侵蚀模数与3类9个景观格局指标的关系。结果表明: 研究期间, 在5种景观类型中, 耕地和林地面积的时空变化主导了南沟小流域景观格局的演化, 并且影响整个小流域的聚集分散程度; 南沟小流域的土壤侵蚀量逐年减少, 1981—2018年土壤侵蚀面积减少29.7%, 侵蚀模数减少61.2%, 且有73.4%的区域土壤侵蚀强度减轻; 耕地和林地面积的变化决定了整个小流域土壤侵蚀模数的变化, 其景观格局指数的变化方向与该景观类型土壤侵蚀的变化方向一致; 退耕还林草工程是流域景观格局变化、土壤侵蚀减轻的主要原因, 特色开发治理可以减弱局部地区土壤侵蚀强度。景观类型的合理化配置能有效地防治小流域土壤侵蚀, 将其与特色治理开发相结合有助于实现小流域可持续高质量发展。

**关键词** 土壤侵蚀; 景观指数; 主成分回归; 通用土壤流失方程(ULSE)

**Responses of soil erosion to changes in landscape pattern and its evolution in watershed in the loess hilly region under characteristic management and development.** LUO Jia-ru<sup>1</sup>, LI Bin-bin<sup>2</sup>, ZHANG Feng-bao<sup>1,3\*</sup>, CONG Pei-juan<sup>2</sup>, WANG Hai-yan<sup>2</sup>, YANG Ming-yi<sup>1,3</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; <sup>3</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** Understanding the relationship between soil erosion and the changes in landscape patterns is important for guiding the management and development of watersheds. The Nangou watershed in Ansai County, Shaanxi on the Loess Plateau, is an area with the implement of “Grain for Green”, ecological agriculture, ecological tourism and the demonstration of science and technology for landscape management. We quantified the spatial and temporal variations of landscape pattern and soil erosion from 1981 to 2018 using the GIS and the universal soil loss equation (USLE). The relationship between the soil erosion modulus and nine landscape pattern indices in three categories was analyzed using the principal component analysis at both plot and landscape levels. The results showed that, among the five landscape types, the spatial and temporal changes of cultivated land and woodland dominated the evolution of landscape patterns, which affected the concentration and distribution degree of the whole watershed. Soil erosion in the Nangou watershed decreased annually, with erosion area, erosion modulus and soil erosion intensity decreasing by 29.7%, 61.2%, and

本文由国家自然科学基金项目(42077071)和国家重点研发计划项目(2016YFC0503705)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42077071) and the National Key R&D Program of China (2016YFC0503705).

2021-05-03 Received, 2021-08-23 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

73.4% from 1981 to 2018, respectively. The variation of cultivated land and forest land areas determined the changes of soil erosion modulus of the whole watershed. The change trend of landscape pattern index was consistent with that of soil erosion. "Grain for Green" Project was the major driving force for the changes in the landscape pattern and for the reduction of soil erosion. The characteristic development and management could weaken soil erosion intensity in parts of the study area. The rational configuration of landscape types could effectively control soil erosion in a watershed. The combination of rational configuration and characteristic management could help achieve the goals for sustainable and high quality development of the watershed.

**Key words:** soil erosion; landscape index; principal component regression; universal soil loss equation (ULSE).

景观格局指土地利用类型斑块的大小、形状及空间配置,是各种生态过程耦合的结果<sup>[1-2]</sup>。景观格局与生态过程的耦合关系研究是景观生态学研究理论的核心部分<sup>[3-4]</sup>。土壤侵蚀作为水文生态过程的一部分,与土地利用等景观格局相互作用,引起了一系列的生态、经济和社会问题<sup>[5]</sup>。大量研究表明,景观格局与流域土壤侵蚀动态变化有着十分紧密的联系<sup>[6-7]</sup>,尤其是人类活动主导的土地利用类型变化直接驱动了流域景观格局的演变<sup>[8]</sup>,也是流域土壤侵蚀时空分异的重要原因<sup>[9]</sup>。另外,在新时期以“科技示范、产业开发、宣传教育、休闲旅游”为重点,打造集“综合治理、产业开发、科研示范、成果展示、休闲宜居”为一体的特色治理模式被逐渐引入小流域治理与开发中,但特色治理开发对小流域可持续发展的作用还有待进一步明确。

目前,对土壤侵蚀与景观格局关系方面的研究较多。游珍等<sup>[10]</sup>在 GIS 和 RS 技术的支持下,从土壤侵蚀角度计算不同地类阳坡、阴坡的景观格局指数,结果表明,阳坡更利于水土保持;张建香等<sup>[11]</sup>应用生态学理论和方法,分析通用土壤流失方程 (USLE) 中各因子的变化趋势及各地类景观格局指数的动态变化来探讨两者之间的关系;康磊等<sup>[12]</sup>利用土壤侵蚀等级的变化来探索不同景观格局对流域土壤侵蚀过程的影响及动态变化,结果表明,该流域以草地为主的植被恢复和景观格局变化,在降低流域土壤侵蚀上取得了显著成效。也有研究从不同尺度上探讨景观格局对土壤侵蚀过程的影响。在斑块类型尺度上,运用景观指数和典范对应分析 (CCA) 排序来分析景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响,结果表明,流域治理更应关注单一景观类型及其格局特征对一些生态过程的指示意义<sup>[13]</sup>;在景观尺度上,王计平等<sup>[14]</sup>借助 GIS 和 RUSLE,得出景观格局对水土流失过程的作用机制是随景观尺度的变化而变化;郭思琪等<sup>[15]</sup>通过建立土壤侵蚀与土地利用及

地形因子之间的关系,并从景观水平上分析该地区的土壤侵蚀和景观格局变化,得到人类活动对秦岭地区景观的干扰随时间而减弱。上述研究皆从一些特定的角度,很好地解释了流域景观格局与土壤侵蚀之间的关系,但由于土壤侵蚀生态过程的复杂性和景观格局指数本身性质的局限<sup>[16]</sup>,如何充分利用不同景观尺度的流域景观格局时空演变特征,以此来分析现有景观格局指数对土壤侵蚀的影响。这是解释流域土壤侵蚀随景观特征变化的关键所在,同时考虑特色治理开发模式下小流域景观格局及作用,对未来黄土高原小流域水土流失治理及可持续发展具有参考价值。

安塞南沟生态农业示范园区是近几年黄土高原小流域生态治理取得显著成功的典型代表,是对黄土高原退耕还林草工程取得良好生态效益的背景下小流域可持续高质量发展模式的有益探索。在特色治理开发下,该地区生态效益正在逐步转化为促农增收的经济效益,具有十分重要的研究价值。本研究以该特色治理开发小流域为研究对象,使用 GIS 软件分析 1981、1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2018 年流域景观类型的转移变化情况,使用 USLE 模型得到流域土壤侵蚀时空演变规律,通过主成分回归法从斑块类型水平和景观水平定量分析黄土丘陵沟壑区景观格局与土壤侵蚀之间的关系,明确特色治理对土壤侵蚀减弱的作用及其与退耕工程的关系,以期为该小流域的进一步治理及黄土高原其他地区类似特色开发治理小流域的规划与发展提供参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区属黄土丘陵沟壑区第二副区,位于陕西省延安市南部 30 km 处的安塞区高桥镇南沟村南沟流域 (36°33'36"—36°37'58" N, 109°17'13"—

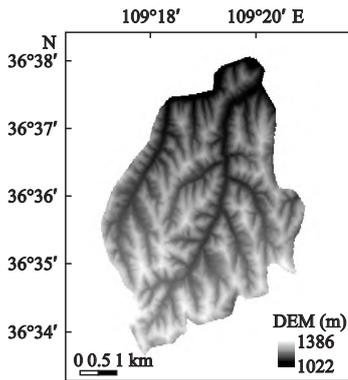


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area.

DEM: 数据高程模型 Digital elevation model.

109°21'6" E),是整个黄土高原最中心的位置(图1)。流域总面积为 28.3 km<sup>2</sup>,平均海拔 1160 m,地貌由梁峁、沟坡、沟床单个单元组成,共有 123 条侵蚀沟道,总长 62.41 km,沟壑密度为 2.21 km · km<sup>-2</sup>。

南沟小流域属于暖温带半干旱气候,年均降水量 501 mm,年内降水分配不均,6—9 月降水量占全年降水量的 70% 以上。年均温 8.8 °C,年无霜期 157 d。流域内以钙质干润锥形土的黄绵土为主,地带性植被属于由暖温带落叶阔叶林到荒漠草原过渡的森林草原区,主要有针阔叶混交林、灌丛、灌草等,包括刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabuliformis*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、苹果 (*Malus domestica*) 和苜蓿 (*Medicago sativa*) 等。

该小流域 1999 年开始退耕还林草和封禁牧措施,2015 年开始规划建设安塞南沟生态农业示范园,根据土地利用现状及地形、地貌特征,按照“山、水、田、林、路、村”统一规划,引、蓄、灌、排、节、治综合运用,开展水土保持科技示范园、生态观光休闲旅游、试验观测设施建设等,建设水土保持科技示范区、生态旅游示范区、生态采摘示范区、生态农业示范区、生态养殖示范区、生态恢复示范区 6 个功能区,并在相应的示范区建立旅游休闲设施、生态采摘园、生态养殖场、五星生态大棚等特色治理措施<sup>[17]</sup>。2020 年,南沟村共接待游客 55 万人次,实现旅游综合收入 2750 万元,南沟集体经济收入 35.9 万元,经济效益得到大幅度提升 ([https://m.sohu.com/a/466444597\\_121106869/](https://m.sohu.com/a/466444597_121106869/))。

## 1.2 数据来源

从地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 获取空间分辨率为 30 m 的数字高程模型 (DEM)。通过 Landsat 卫星 TM 遥感影像解译获取南沟小流

域多年土地利用数据。在中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 获得逐月逐年降雨数据。1981—2018 年采用 AVHRR NDVI 植被数据。基于欧空局 (<https://www.esa.int/>) CCI\_LC 土地覆被数据计算得到  $P$  因子。

## 1.3 研究方法

**1.3.1 小流域土壤侵蚀模数的估算** 本研究基于 USLE 模型<sup>[18]</sup>的无缝网格估算法,定量分析黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀的空间分布特征,并且结合胡云华等<sup>[19]</sup>和刘斌涛等<sup>[20]</sup>对 USLE 模型的改进,利用下式计算南沟小流域土壤侵蚀模数:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \times M$$

式中:  $A$  为年均土壤流失量 ( $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ );  $R$  为降雨侵蚀力因子 ( $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ );  $K$  为土壤可蚀性因子 ( $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ );  $LS$  为坡度坡长因子,其值在 0~1;  $C$  为植被覆盖与管理因子,其值在 0~1;  $P$  为水土保持措施因子,其值在 0~1;  $M$  为修正因子。

1) 降雨侵蚀力因子 ( $R$ ) 指降雨造成土壤侵蚀的潜在能力<sup>[21]</sup>。本研究采用章文波等<sup>[22]</sup>建立的降雨侵蚀力模型,结合黄土高原地区特点,得到南沟流域  $R$  的计算公式:

$$R = 0.3589F^{1.9462}$$

$$F = \left[ \sum_{i=1}^{12} P_i^2 \right] \times P^{-1}$$

式中:  $P$  为年降雨量 (mm);  $P_i$  为第  $i$  月的降雨量 (mm);  $R$  为年降雨侵蚀力 ( $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ );  $F$  为降水季节变率指数。

2) 使用 EPIC 模型计算南沟小流域土壤可蚀性因子 ( $K$ ):

$$K_{EPIC} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256S_a \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right]$$

$$S_n = 1 - S_a / 100$$

式中:  $S_a$  为砂粒 (0.05~2 mm) 含量 (%);  $S_i$  为粉砂 (0.002~0.05 mm) 含量 (%);  $C_i$  为黏粒 (<0.002 mm) 含量 (%);  $C$  为有机碳含量 (%).

由于使用 EPIC 模型计算得出的  $K$  值与实际测出的  $K$  值有较大偏差,张科利等<sup>[23]</sup>提出  $K$  值修正公式:

$$K = -0.01383 + 0.51575K_{EPIC}$$

3) 根据杨子生<sup>[24]</sup>的研究计算坡长因子( $L$ ):

$$L = (L_0/20)^{0.24}$$

式中:  $L_0$  为坡长, 由 ArcGIS 水文分析模块计算得到。

根据刘宝元等<sup>[25]</sup>的研究结果计算坡度( $\theta$ )  $10^\circ$  以上的坡度因子( $S$ ), 根据 McCool 等<sup>[26]</sup>研究计算  $10^\circ$  以下的  $S$ , 计算公式如下:

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta \leq 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ) \\ 21.91\sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases}$$

根据  $L$ 、 $S$  因子, 利用栅格计算器得到  $L$ 、 $S$  因子。

4) 基于第一次全国水利普查的土壤侵蚀野外调查单元得到植被覆盖与管理因子( $C$ ) 值, 与 MODIS NDVI 拟合统计, 建立统计模型。得到基于 NDVI 的林草地  $C$  因子的模拟公式:

$$C = 1.2899 \times e^{-6.343 \times \text{NDVI}} \quad (R^2 = 0.7531)$$

基于 NDVI 的耕地  $C$  因子模拟公式如下:

$$C = -0.143 \times \ln(\text{NDVI}) + 0.2525 \quad (R^2 = 0.0539)$$

$$\text{NDVI} = \sum_{i=1}^{12} \text{NDVI}_i \times P_i / P$$

式中:  $\text{NDVI}_i$  为月 NDVI 合成值, 其值为  $0 \sim 1$ ;  $P_i$  为月降水量(mm);  $P$  为年降水量(mm)。

5) 水土保持措施因子( $P$ ) 的取值在区域尺度的空间统计上主要与梯田相关, 且  $P$  因子赋值时也要考虑黄土高原的地貌类型和坡度因素。本研究的  $P$  因子主要基于欧空局 CCI\_LC 土地覆被数据计算。考虑到我国大量的水土保持工程措施都是近 20 年修建, 因而 1981—1990 年的  $P$  因子数据皆采用欧空局 1992 年的数据。

**1.3.2 景观格局指数选择** 通过 Landsat 卫星 TM 遥感影像解译出不同土地利用类型, 根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)<sup>[27]</sup> 将解译出来的土

地利用类型分为耕地、林地、草地、建设用地、水域 5 大类, 并使用 Google Earth 进行对比校正。使用 Fragststs 4.2 景观格局分析软件对流域景观格局进行定量分析, 同时考虑研究区域的水土流失状况, 选择斑块类型水平和景观水平上三大类 9 个指标进行度量(表 1)。

#### 1.4 数据处理

为了使流域景观类型和土壤侵蚀时空变化研究更加直观, 1981 至 2018 年间选用 5 年数据分 4 个阶段进行分析, 每个阶段基本为 10 年, 以 2000、2010 年为重要时间节点。其中, 2000 年是实施退耕的时间节点, 2010 年为退耕还林还草工程措施取得明显生态效益的时间节点, 2018 年反映研究示范园区建立后景观的情况。4 个阶段基本能够反映出未治理-开始治理-退耕还林草-特色治理开发的景观格局及土壤侵蚀状况。选用 9 年的数据进行主成分回归分析。在 SPSS 软件的支持下, 以不同年份不同地类的景观格局指数为自变量, 流域土壤侵蚀模数为因变量, 利用主成分回归分析法<sup>[28]</sup> 分别从斑块类型水平和景观水平分析南沟流域景观格局与土壤侵蚀模数的关系, 用以说明不同景观类型对土壤侵蚀的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 南沟小流域景观格局时空演化特征

**2.1.1 景观类型面积变化** 1981—2018 年, 南沟流域土地利用斑块类型发生了明显的地类转移(图 2)。耕地面积大量减少, 呈从北向南逐渐减少的趋势; 林地面积大量增加, 呈从中心向四周扩散的趋势; 而草地、水域、建设用地的面积空间变化不明显。

流域治理最直观的变化是景观类型的变化转移情况。为了研究黄土高原丘陵沟壑区不同时期生态治理措施前、后景观类型的动态变化, 分别对研究区

表 1 本研究选取的景观指数

Table 1 Selected landscape metrics

| 指数类型<br>Index category                         | 指数名称<br>Index name | 含义<br>Explanation | 分析尺度<br>Level of analysis |
|--|--------------------|-------------------|---------------------------|
| 斑块/边界密度指数<br>Patch/edge density<br>index       | 面积比例 PLAND         | 某一斑块类型面积与景观总面积比值  | 类型尺度                      |
|  | 斑块密度 PD            | 单位面积斑块数量          | 景观、类型尺度                   |
|  | 景观形状指数 LSI         | 景观形状指数            | 景观、类型尺度                   |
|  | 最大斑块指数 LPI         | 最大斑块所占的面积比例       | 景观、类型尺度                   |
| 聚集与分散指数<br>Aggregation and<br>dispersion index | 散布与并列指数 IJI        | 各个斑块类型间的总体散布并列状况  | 景观、类型尺度                   |
|  | 聚合度指数 AI           | 景观中同类斑块的聚集程度      | 景观、类型尺度                   |
|  | 破碎度指数 SPLIT        | 景观中斑块的破碎程度        | 景观、类型尺度                   |
| 多样性指数<br>Diversity index                       | Shannon 多样性指数 SHDI | 景观斑块的不确定性         | 景观尺度                      |
|  | Shannon 均匀度指数 SHEI | 景观中各斑块在面积上的不均匀程度  | 景观尺度                      |

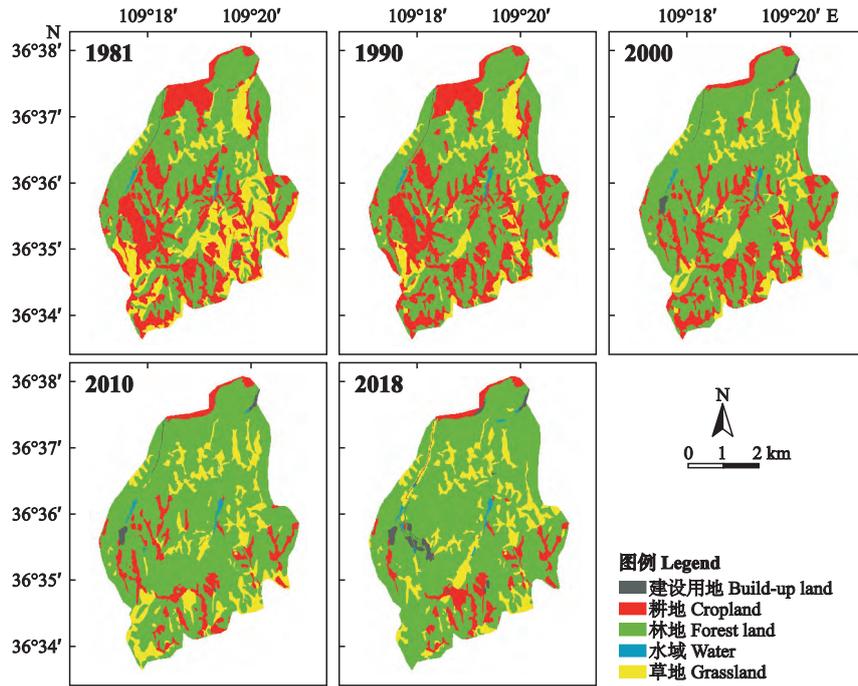


图 2 南沟小流域 1981—2018 年景观类型的空间变化  
 Fig.2 Spatial change in the landscape types in the Nangou watershed from 1981 to 2018.

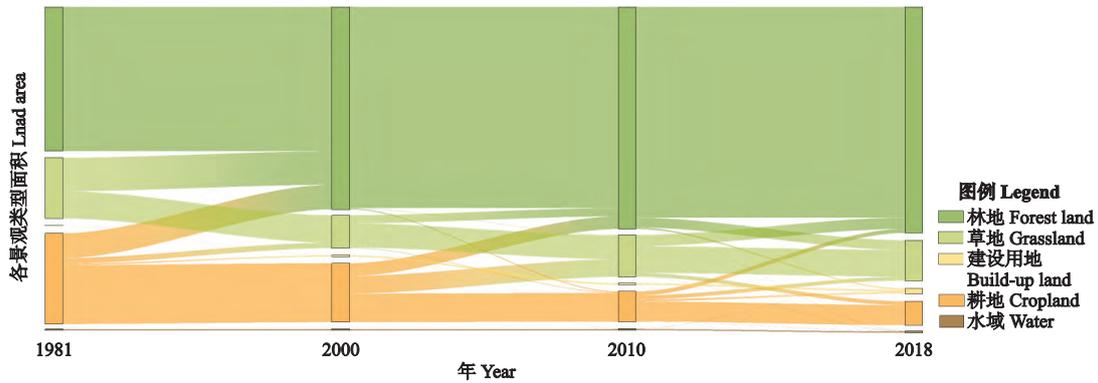


图 3 南沟小流域重要时段景观类型面积转移图  
 Fig.3 Transition map of landscape types during important periods in the Nangou watershed.

1981、2000、2010、2018 年的景观分类图进行空间叠加运算,得到 3 个时间段的流域景观类型面积转移变化情况。由图 3 可以看出,1981—2000 年,54.9% 的草地流向林地,27.3% 的耕地流向林地,6.1% 的耕地流向草地,建设用地和水域面积增加缓慢;2000—2010 年,24.9% 的草地流向林地,21.5% 的耕地流向林地,29.9% 的耕地流向草地,而建设用地和水域面积增加不明显;2010—2018 年,4.4% 的林地流向草地,26.9% 的草地流向林地,13.6% 的耕地流向林地,12.7% 的耕地流向草地,水域面积增加 39.7%,建设用地面积增加了 199.6%;2015 年小流域采取生态旅游-经济治理措施,如修建 5 座蓄水坝,建造生态餐厅、小型码头、生态停车场等集休闲、餐饮、娱乐为

一体的生态旅游示范区,使得流域水域、建设用地的面积明显增加。

1981—2018 年间,流域景观类型的结构发生了直观变化。耕地和林地的面积始终占整个流域面积的 80% 以上,起到绝对的主导作用;建设用地和水域面积的总和占整个流域面积的 2% 左右。耕地面积逐年减少,草地呈先减少后增加的趋势,林地、水域、建设用地的面积逐年增加,其中,林地面积增加最明显。耕地减少的部分主要转化为林地,虽然林地和草地部分转移成耕地,但占比极少,因而耕地面积持续降低;林地面积增加的部分主要来源于耕地和草地,且二者所占比例相近;建设用地增加的面积主要由耕地补充。这进一步说明 2000 年退耕还林

工程的实施,使得黄土高原大面积农耕地及部分荒草地转化为林地<sup>[29]</sup>,并在流域植被覆盖方面取得了显著成效。

**2.1.2 景观格局变化** 1981—2018年,在斑块类型水平上,林地、水域、建设用地的面积比例指数逐年增加,耕地逐渐减少,草地先减少再缓慢增加;草地、水域、建设用地的斑块密度指数逐渐增加,耕地先增加后减少,林地逐渐减小;草地、耕地的最大斑块指数整体呈逐年下降趋势,建设用地、林地呈逐年增长趋势,水域则保持不变;耕地和林地的景观形状指数逐年减少,水域逐年增加,草地和建设用地呈先减小后增大的趋势;草地、耕地的散布与并列指数大致呈逐年下降趋势,其他土地利用类型则呈离散变化;林地、建设用地、水域的破碎度指数整体呈下降趋势,耕地呈逐渐增大趋势;建设用地、林地的聚合度指数呈逐渐增加趋势,草地、水域和耕地则逐渐减少(图4)。

在景观水平上,景观格局发生十分显著的变化(图5)。景观形状指数、破碎度指数、多样性指数持续降低,且均在2010年开始逐渐变得稳定,最大斑块指数、斑块密度、聚合度指数呈增加趋势,散布与并列指数变化不稳定,但其值一直在50上下波动。这表明流域的破碎化程度降低,各景观类型的聚合程度增加,但流域多样性程度并不高。

## 2.2 南沟小流域土壤侵蚀的变化

**2.2.1 土壤侵蚀时空演变** 利用 ArcGIS 空间分析功能和 USLE 模型得到南沟小流域的土壤侵蚀模数分布图,并根据《(SL 190—2007)土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[30]</sup>对侵蚀模数分类。由图6可以看出,1981—2018年,小流域的土壤侵蚀模数逐渐减小,在空间上整体表现出侵蚀模数较低的值在小流域所占范围越来越大,1981、1990、2000、2010、2018年的年平均土壤侵蚀模数分别为 7161.99、6928.12、5159.71、3453.87、2779.41  $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ ,总体减少

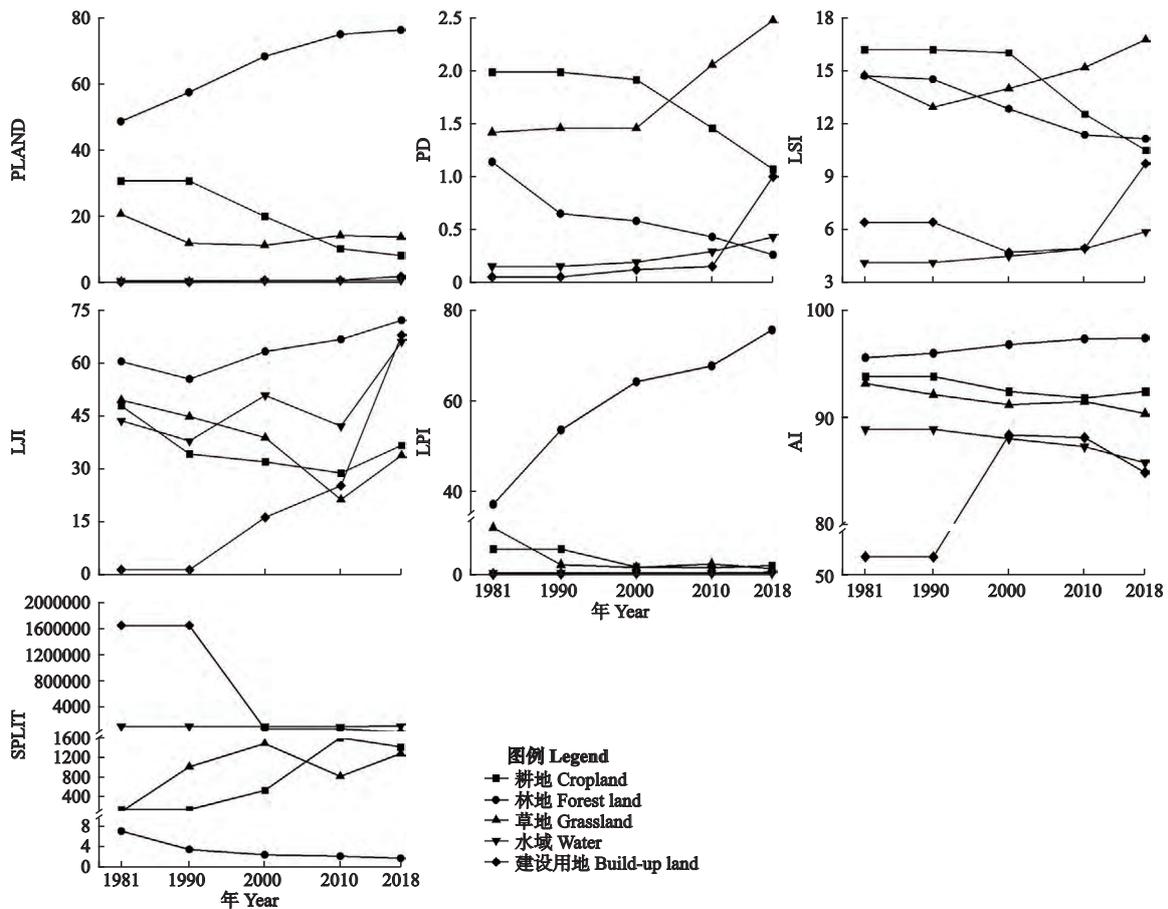


图4 1981—2018年南沟小流域不同景观类型的景观格局指数

Fig.4 Landscape pattern index of different landscape types from 1981 to 2018.

PLAND: 面积比例 Percent of landscape; PD: 斑块密度 Patch density; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; IJI: 散布与并列指数 Interspersion and Juxtaposition index; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; AI: 聚合度指数 Aggregation index; SPLIT: 破碎度指数 Splitting index; SHDI: Shannon 多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI: Shannon 均匀度指数 Shannon's evenness index. 下同 The same below.

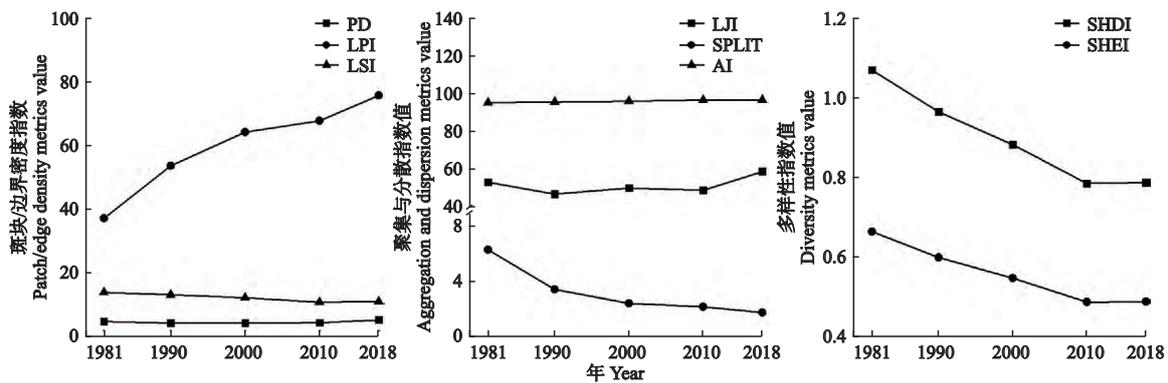


图 5 1981—2018 年南沟小流域景观水平景观指数的变化

Fig.5 Changes in the landscape level landscape indexes from 1981 to 2018.

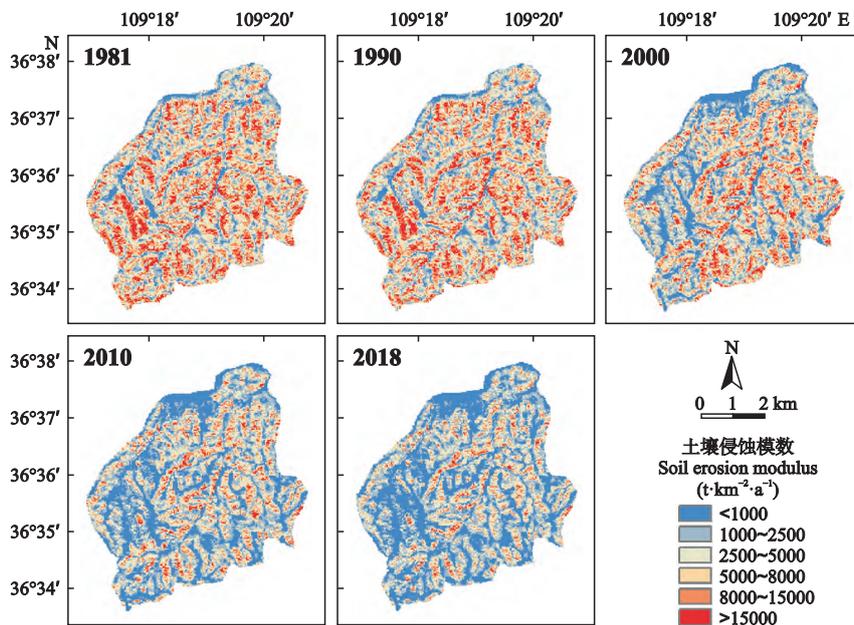


图 6 1981—2018 年南沟小流域土壤侵蚀模数的时空变化

Fig.6 Spatio-temporal changes in the soil erosion modulus in watershed from 1981 to 2018.

61.2%。1981—2000 年土壤侵蚀模数减少 27.9%，2000—2010 年减少 33.1%，2010—2018 年减少 19.5%，即流域土壤侵蚀在 2000 年呈现一个断层式缓解，说明退耕还林（还草）措施在南沟流域取得了显著成效，使土壤侵蚀现象得到了有效遏制，水土保持得到良好发展。2015 年后，小流域生态农业及生态恢复示范区的建设在局部一定程度上也减弱了流域土壤侵蚀强度。

**2.2.2 土壤侵蚀等级变化** 1981—2018 年，小流域土壤侵蚀面积从 26.16 km<sup>2</sup>减少到 18.39 km<sup>2</sup>，减少 29.7%。为了更好地了解流域不同程度土壤侵蚀的变化，根据《(SL 190—2007) 土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[30]</sup>，将土壤侵蚀模数分为微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈强度 6 个级别。

由图 7 可以看出，1981—2018 年，研究区微度侵蚀、轻度侵蚀面积所占比例增加，分别增加了 45.7% 和 23.6%；中度侵蚀面积所占比例基本不变，仅增加 4%；强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀面积所占比例逐年减少，分别减少 6.7%、11.1%、9.8%，进一步说明该流域生态治理的有效性。土壤侵蚀强度逐年减小，剧烈侵蚀和极强烈侵蚀的分布范围也在逐年减少，2018 年剧烈侵蚀和极强烈侵蚀主要分布在整个流域的东部区。从 2000 年开始，微度侵蚀和轻度侵蚀所占的面积及分布范围占据了整个流域的 50%。

由图 8 可以看出，1981—2000、2000—2018、1981—2018 年 3 个时段侵蚀等级升高的区域占比极小，均不到 0.1%，各时段的土壤侵蚀均表现为不同程度的减轻。1981—2000 年间，74.3% 的区域侵

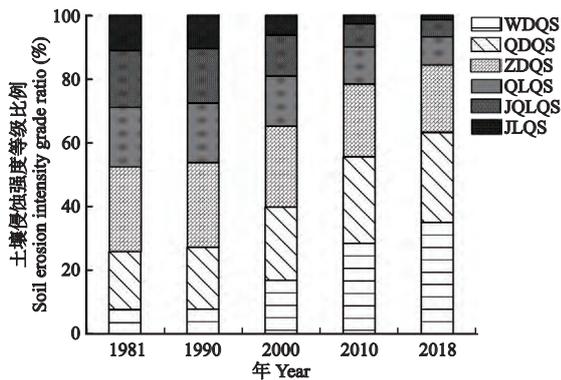


图7 1981—2018年南沟小流域土壤侵蚀等级的分布比例  
Fig.7 Distribution ratio of soil erosion classes from 1981 to 2018.

WDQS: 微度侵蚀 Microerosion; QDQS: 轻度侵蚀 Mild erosion; ZDQS: 中度侵蚀 Moderate erosion; QLQS: 强烈侵蚀 Intense erosion; JQLQS: 极强烈侵蚀 Extremely intense erosion; JLQS: 剧烈侵蚀 Severe erosion.

蚀程度未发生变化,流域东部区域侵蚀减轻程度最明显;2000—2018年间,59.0%的区域土壤侵蚀减轻,以流域西部区域最显著;整个研究期间,仅有0.1%的区域发生恶化,主要集中在整个流域中心区域,73.4%的区域侵蚀减轻,分布在整个流域。2000年以前,黄土高原采取以“亚顶级模式”<sup>[31]</sup>为主的各项水土流失治理措施虽然取得了成效,但效果不十分明显;2000年以后的“顶级模式”<sup>[31]</sup>以退耕还林工程为代表响应国家经济社会发展战略布局,协调区域生态经济持续发展,使得黄土高原的水土流失问题得到妥善解决;2015年以后的特色治理开发,局部减弱了土壤侵蚀强度。

2.3 南沟小流域景观格局与土壤侵蚀的关系

在斑块类型水平上,采用SPSS对5种土地利用

表2 主成分分析的特征值和贡献率

Table 2 Eigenvalues and contribution rate of principal component analysis

| 土地类型<br>Land type  | 特征值 1<br>Eigenvalue 1 | 特征值 2<br>Eigenvalue 2 | 累计贡献率<br>Cumulative contribution rate (%) |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| 耕地 Cropland        | 5.384                 | -                     | 76.9                                      |
| 林地 Forest land     | 6.303                 | -                     | 90.0                                      |
| 草地 Grassland       | 4.324                 | 2.042                 | 91.0                                      |
| 水域 Water           | 5.398                 | 1.118                 | 93.1                                      |
| 建设用地 Build-up land | 5.324                 | 1.586                 | 98.7                                      |

类型的7个景观格局指数及土壤侵蚀模数进行标准化处理,并进行KMO和Bartlett检验。主成分分析后得到各地类的特征值及累计方差贡献率皆达到研究要求(表2)。

以每种土地利用类型的景观格局指数主成分得分为自变量,标准化后的小流域侵蚀模数为因变量进行线性回归,剔除掉部分显著性不强的主成分后,每个地类最终只剩1个主成分,且各主成分容差均为1(>0.1),方差膨胀因子(VIF)<5,说明本研究不存在明显的共线性问题,回归结果满足分析要求(表3)。由图9a可以看出,耕地的土壤侵蚀模数与景观格局指数各主成分得分呈线性增长趋势,其余地类呈线性降低趋势。耕地的景观格局指数随土壤侵蚀模数的变化最明显,然后依次为草地、林地和建设用地,水域的趋势线变化不明显,说明流域内水域面积过小对流域土壤侵蚀的影响不明显。每种地类主成分得分与土壤侵蚀模数之间的线性关系变化趋势涵盖了景观格局指数与流域侵蚀模数之间的响应。

由图9b可以看出,对流域耕地土壤侵蚀起正相

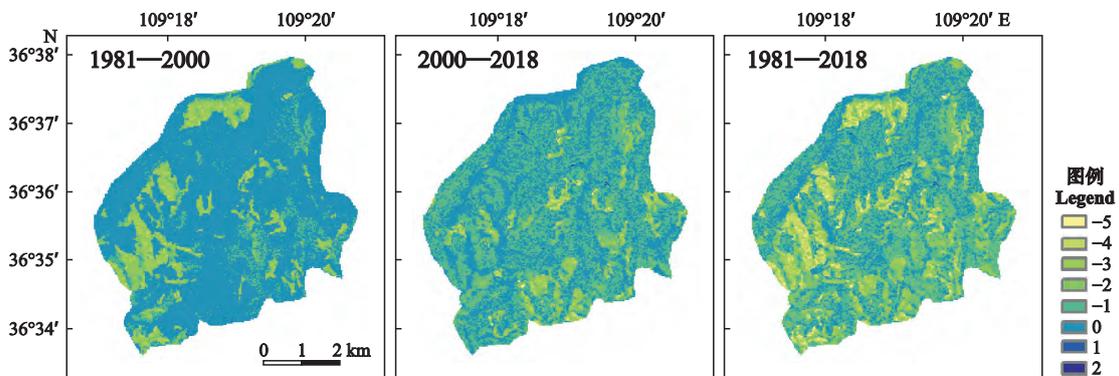


图8 南沟小流域侵蚀等级的转化  
Fig.8 Conversion of erosion classes in small watersheds.

0代表侵蚀强度不变,1代表在原有基础上侵蚀强度升高1个等级,2代表升高2个等级,-1代表降低1个等级,-2代表降低2个等级,以此类推 0 represented the same erosion intensity, 1 represented an increase of 1 grade on the original basis, 2 represented an increase of 2 grades, -1 represented a decrease of 1 grade, -2 represented a decrease of 2 grades, and so on.

表 3 主成分回归分析结果

Table 3 Principal component regression analysis results

| 土地类型<br>Land type  | 偏回归系数<br><i>B</i> | <i>t</i> 值<br><i>t</i> value | 显著性<br>Significance | 共线性统计 Collinearity statistics |                                     | <i>R</i> <sup>2</sup> | Durbin-Watson 值<br>Durbin-Watson value |
|--------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|
|                    |                   |                              |                     | 容差<br>Tolerance               | 方差膨胀因子<br>Variance inflation factor |                       |  |
| 耕地 Cropland        | 0.429             | 25.188                       | 0.000               | 1                             | 1                                   | 0.988                 | 1.642                                  |
| 林地 Forest land     | -0.349            | -4.835                       | 0.002               | 1                             | 1                                   | 0.737                 | 1.267                                  |
| 草地 Grassland       | -0.620            | -5.039                       | 0.001               | 1                             | 1                                   | 0.753                 | 1.778                                  |
| 水域 Water           | -0.380            | -4.992                       | 0.002               | 1                             | 1                                   | 0.749                 | 1.222                                  |
| 建设用地 Build-up land | -0.423            | -11.838                      | 0.000               | 1                             | 1                                   | 0.946                 | 2.836                                  |

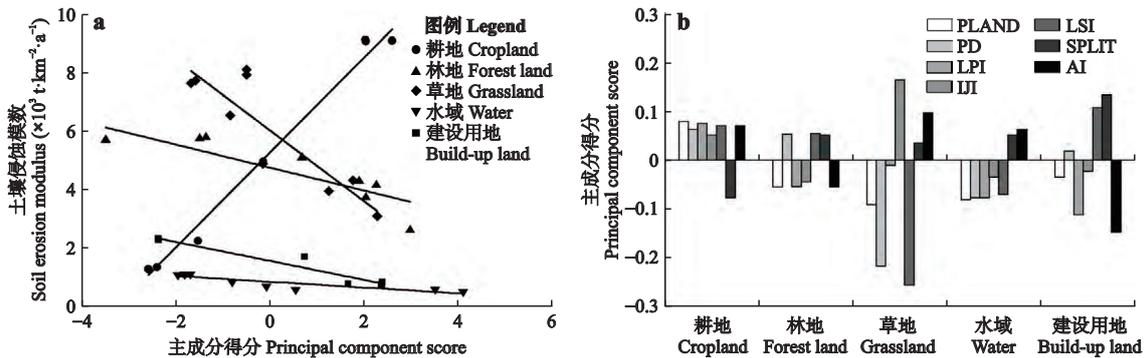


图 9 不同土地利用类型主成分得分随土壤侵蚀模数变化(a)及各景观指数的贡献情况(b)

Fig.9 Principal component scores for changes to different land use types with the soil erosion modulus (a) and the contribution of each landscape index (b).

关作用的景观格局指数从大到小依次为面积比例指数、最大斑块指数、景观形状指数、聚合度指数、斑块密度指数、散布与并列指数，起负效应的只有破碎度指数；对林地土壤侵蚀起正效应的从大到小依次为景观形状指数、斑块密度指数、破碎度指数，起负效应的依次为散布与并列指数、最大斑块指数、面积比例指数、聚合度指数；对草地土壤侵蚀起正效应的景观格局指数从大到小依次为散布与并列指数、聚合度指数、破碎度指数，起负效应的依次为最大斑块指数、面积比例指数、斑块密度指数、景观形状指数；对水域土壤侵蚀起正效应的景观格局指数从大到小依次为聚合度指数、破碎度指数，起负效应的依次为散布与并列指数、景观形状指数、斑块密度指数、最大斑块指数、面积比例指数；对建设用地起正效应的指数从大到小依次为破碎度指数、景观形状指数、斑块密度指数，起负效应的指数依次为散布与并列指数、面积比例指数、最大斑块指数、聚合度指数。这说明不同地类与土壤侵蚀之间关系贡献度最高的景观格局指数皆不相同。

在景观水平上，对南沟流域 8 个景观格局指数 (*x*) 与土壤侵蚀模数 (*y*) 进行主成分回归分析，其调整后的 *R*<sup>2</sup> 为 0.846，显著性为 0.000，Durbin-Watson

值为 1.389，最终得到小流域主成分回归的表达式为：

$$y = 0.018x_{PD} - 0.064x_{LPI} + 0.063x_{LSI} + 0.007x_{LJI} + 0.067x_{SPLIT} + 0.065x_{SHDI} + 0.064x_{SHEI} - 0.063x_{AI}$$

流域整体侵蚀模数随主成分得分呈线性增长趋势(图 10)。对流域整体的土壤侵蚀状况起正相关的景观格局指数从大到小依次为破碎度指数、Shannon 多样性指数、Shannon 均匀度指数、景观形状指数、斑块密度指数、散布与并列指数，与流域土壤侵蚀呈负相关关系的指数为聚合度指数、最大斑块指

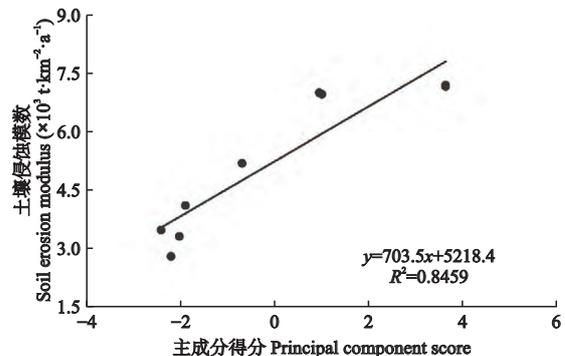


图 10 景观水平主成分得分随土壤侵蚀的变化

Fig.10 Changes in the principal component scores of landscape levels with soil erosion.

数。说明破碎度指数、Shannon 多样性指数、Shannon 均匀度指数可以很好地从景观水平描述流域景观与土壤侵蚀之间的关系。在景观格局指数与侵蚀模数的变化趋势中,耕地与整个小流域的变化趋势相同,进一步说明耕地的面积变化对流域土壤侵蚀的变化起着关键作用。林草面积增加是小流域土壤侵蚀减弱的主要原因,2015 年后实施的特色治理开发项目主要减少流域局部土壤侵蚀,以增加经济收入为主,是巩固退耕还林草成果和实现小流域高质量发展的保障。

### 3 结 论

经过多年的生态治理,安塞南沟小流域土壤侵蚀状况已经得到显著改善<sup>[32]</sup>。2000 年黄土高原退耕还林政策的实施是流域景观格局变化、土壤侵蚀减轻的重要原因<sup>[33]</sup>,2015 年以后实施的特色治理措施通过增加水域、建设用地面积来发展旅游景观,减弱了局部地区土壤侵蚀强度。本研究结果表明,决定流域景观格局与土壤侵蚀之间关系的景观类型主要为耕地和林地。在斑块类型水平上,1981—2000 年,小流域东部林地面积增加,耕地面积减少,其余地类变化不明显,流域东部土壤侵蚀缓解较明显。2000—2018 年,流域林地、草地面积显著增加,耕地面积显著减少,且主要集中在流域西部地区,流域 59.0% 的区域土壤侵蚀程度减轻,且主要集中在流域西部。耕地减少、林地增加是影响流域土壤侵蚀的重要原因。在黄土高原生态治理过程中,林地可以增加降雨拦截、减缓坡面径流,耕地向林草地的大面积转化有利于保持土壤、缓解水土流失<sup>[34-36]</sup>。对耕地与流域土壤侵蚀模数起正相关作用的面积比例指数、最大斑块指数、景观形状指数、聚合度指数、斑块密度指数、散布与并列指数逐年减小,起负相关作用的破碎度指数逐年增加,说明耕地在小流域中的分散程度增加、最大斑块的面积减少、聚集程度降低,导致流域耕地土壤侵蚀模数减少。对林地与流域土壤侵蚀模数起正相关作用的景观形状指数、斑块密度指数、破碎度指数逐年减少,起负相关作用的最大斑块指数、面积比例指数、聚合度指数、散布与并列指数逐年增加,林地的破碎化程度减弱、聚集程度增强,使得土壤侵蚀逐年减少,表明影响流域土壤侵蚀空间分异的各个景观指标并不是可以完全对应不同的土地利用类型<sup>[13]</sup>。在景观水平上,对流域侵蚀模数起正相关作用的景观形状指数、破碎度指数、Shannon 多样性指数、Shannon 均匀度指数逐年降

低,起负相关作用的最大斑块指数、聚合度指数逐年升高,且破碎度指数、Shannon 多样性指数、Shannon 均匀度指数的影响程度最高,说明 1981—2018 年间流域的斑块类型增多,在景观中所占的比例逐渐均衡,聚集程度增强,流域景观破碎化程度得到缓解。上述分析表明,小流域景观类型的优化配置对土壤侵蚀防治具有重要意义,退耕还林草提升了小流域的生态效益,而特色治理开发以提高经济效益为主,退耕还林草与特色治理开发相结合有助于实现小流域的可持续高质量发展。

景观破碎化现象是黄土丘陵沟壑区典型的景观特征,景观斑块的合理化配置是改善景观破碎程度的重要举措<sup>[37]</sup>。在斑块类型水平上,耕地和林地对流域土壤侵蚀起主要作用,建设用地占比极小使得在研究其与景观格局指数关系时不能形成一个普遍规律,但具体是建设用地面积问题还是归类问题还需要进一步研究,特色治理开发的水土保持作用定量化研究尚需加强。景观格局指数的有效性也是景观类型正、负效应产生差异的原因<sup>[37]</sup>。这取决于指数的性质和侵蚀的过程特征<sup>[16]</sup>。由于土壤侵蚀模数在整个流域的分布差异性很大,在计算景观格局与土壤侵蚀之间的关系时,如何将景观格局与土壤侵蚀之间的关系呈现出一个空间动态变化是今后亟需解决的问题。

### 参考文献

- [1] 余新晓,牛健植,关文彬,等. 景观生态学. 北京: 高等教育出版社, 2006 [Yu X-X, Niu J-Z, Guan W-B, et al. Landscape Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2006]
- [2] 陈利顶,傅伯杰,赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449 [Chen L-D, Fu B-J, Zhao W-W. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449]
- [3] Turner MG. Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989, 3: 385-397
- [4] 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 [Fu B-J, Xu Y-D, Lyu Y-H. Scale characteristics and coupled research of landscape pattern and soil and water loss. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(7): 673-681]
- [5] 傅伯杰,邱扬,王军,等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722 [Fu B-J, Qiu Y, Wang J, et al. Effect simulations of land use change on the runoff and erosion for a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Acta Geo-*

- graphica Sinica*, 2002, **57**(6): 717-722]
- [6] Wang K, Wang HJ, Shi XZ, *et al.* Landscape analysis of dynamic soil erosion in Subtropical China: A case study in Xingguo County, Jiangxi Province. *Soil & Tillage Research*, 2009, **105**: 313-321
- [7] Zhang SH, Fan WW, Li YQ, *et al.* The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 34-45
- [8] 王计平, 陈利顶, 汪亚峰. 黄土高原地区景观格局演变研究综述. 地理科学进展, 2010, **29**(5): 535-542 [Wang J-P, Chen L-D, Wang Y-F. Research on landscape pattern change in Loess Plateau: Current status, issues and trends. *Advances in Earth Science*, 2010, **29**(5): 535-542]
- [9] 邱扬, 傅伯杰. 异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异. 生态学报, 2004, **24**(2): 330-337 [Qiu Y, Fu B-J. Spatial variation and scale variation in soil and water loss in heterogeneous landscape: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2): 330-337]
- [10] 游珍, 李占斌, 袁琼. 景观生态学原理在土壤侵蚀学中的应用与实例分析. 水土保持研究, 2005, **12**(3): 141-144 [You Z, Li Z-B, Yuan Q. The application of landscape ecology principles in soil erosion and a case analysis. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, **12**(3): 141-144]
- [11] 张建香, 张勃, 张华, 等. 黄土高原的景观格局变化与水土流失研究——以黄土高原马莲河流域为例. 自然资源学报, 2011, **26**(9): 1513-1525 [Zhang J-X, Zhang B, Zhang H, *et al.* Landscape pattern change and soil erosion research: Take Malian river basin in Loess Plateau as an example. *Journal of Natural Resources*, 2011, **26**(9): 1513-1525]
- [12] 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. 水土保持通报, 2019, **39**(1): 23-28 [Kang L, Liu S-R, Liu X-Z. Chang of soil erosion landscape pattern in upper reaches of Minjiang river: A case study at Zagunao watershed. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(1): 23-28]
- [13] 王计平, 杨磊, 卫伟, 等. 黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响——斑块类型水平. 生态学报, 2011, **31**(19): 5739-5748 [Wang J-P, Yang L, Wei W, *et al.* Effects of landscape pattern on watershed soil erosion and sediment delivery in hilly and gully region of the Loess Plateau of China: Patch class-level. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(19): 5739-5748]
- [14] 王计平, 杨磊, 卫伟, 等. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较. 生态学报, 2011, **31**(19): 5531-5541 [Wang J-P, Yang L, Wei W, *et al.* Effects of landscape patterns on soil and water loss in the hilly area of Loess Plateau in China: Landscape-level and comparison at multiscale. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(19): 5531-5541]
- [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. 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. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(7): 2167-2176]
- [16] 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 [Liu Y, Lyu Y-H, Fu B-J. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(1): 267-275]
- [17] 张斌. 安塞区南沟水土保持示范园建设实践与探索. 水土保持应用技术, 2020(1): 20-22 [Zhang B. Practice and exploration on construction of Nangou soil and water conservation demonstration park in Ansai district. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2020(1): 20-22]
- [18] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查. 中国水土保持, 2013, **34**(10): 26-34 [Liu B-Y, Guo S-Y, Li Z-G, *et al.* Sampling survey of water erosion in China. *Soil and Water Conservation in China*, 2013, **34**(10): 26-34]
- [19] 胡云华, 刘斌涛, 宋春风, 等. 基于 USLE 模型的大小凉山地区土壤侵蚀定量研究. 水土保持通报, 2016, **36**(4): 232-236 [Hu Y-H, Liu B-T, Song C-F, *et al.* Soil erosion estimation mountain areas of Sichuan province based USLE model. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, **36**(4): 232-236]
- [20] 刘斌涛, 宋春风, 陶和平. 成都市土壤侵蚀定量评价研究. 长江科学院院报, 2016, **33**(9): 40-47 [Liu B-T, Song C-F, Tao H-P. Quantitative assessment of soil erosion of Chengdu City. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, **33**(9): 40-47]
- [21] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势. 地理研究, 2013, **32**(2): 245-256 [Liu B-T, Tao H-P, Song C-F, *et al.* Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in China during 1960 to 2009. *Geographical Research*, 2013, **32**(2): 245-256]
- [22] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征. 山地学报, 2003, **21**(1): 33-40 [Zhang W-B, Xie Y, Liu B-Y. Spatial distribution of rainfall erosivity in China. *Mountain Research*, 2003, **21**(1): 33-40]
- [23] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 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. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(1): 7-13]
- [24] 杨子生. 云南省金沙江流域土壤流失方程研究. 山地学报, 2002, **20**(suppl.1): 1-9 [Yang Z-S. Study on soil loss equation in Jinsha River basin of Yunnan Province. *Mountain Research*, 2002, **20**(suppl.1): 1-9]
- [25] 刘宝元, 毕小刚. 北京土壤流失方程. 北京: 科学出版社, 2010 [Liu B-Y, Bi X-G. Soil Loss Equation in Beijing. Beijing: Science Press, 2010]
- [26] McCool DK, Brown LC, Foster GR, *et al.* Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1994, **37**: 1935-1840

- [27] 国土资源部. 土地利用现状分类 (GB/T 21010—2017). 北京: 中国标准出版社, 2017 [Ministry of Land and Resources. Current Land Use Classification (GB/T 21010-2017). Beijing: China Standards Press, 2017]
- [28] 郭呈全, 陈希镇. 主成分回归的 SPSS 实现. 统计与决策, 2011(5): 157-159 [Guo C-Q, Chen X-Z. SPSS implementation of principal component regression analysis. *Statistics & Decision*, 2011(5): 157-159]
- [29] 杜娜, 王继军. 县南沟流域农业土地利用/覆被变化浅析. 水土保持研究, 2009, 16(6): 171-173 [Du N, Wang J-J. Agriculture land use/land cover change of Xiannangou watershed. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(6): 171-173]
- [30] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL 190—2007). 北京: 中华人民共和国水利部, 2008 [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion (SL 190-2007). Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2008]
- [31] 谢永生, 李占斌, 王继军, 等. 黄土高原水土流失治理模式的层次结构及其演变. 水土保持学报, 2011, 25(3): 211-214 [Xie Y-S, Li Z-B, Wang J-J, et al. Hierarchy and development of soil and water loss control model in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 211-214]
- [32] 薛梅. 黄土高原小流域综合治理发展浅析. 黑龙江水利科技, 2019, 47(1): 78-79 [Xue M. Preliminary analysis of small river basin comprehensive regulation development in Loess Plateau. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2019, 47(1): 78-79]
- [33] 钟莉娜, 赵文武, 吕一河, 等. 黄土丘陵沟壑区景观格局演变特征——以陕西省延安市为例. 生态学报, 2014, 34(12): 3368-3377 [Zhong L-N, Zhao W-W, Lyu Y-H, et al. Analysis of landscape pattern evolution characteristic in the hilly and gully area of loess plateau: A case study in Yan'an City, Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3368-3377]
- [34] 赵宏飞, 何洪鸣, 白春昱, 等. 黄土高原土地利用变化特征及其环境效应. 中国土地科学, 2018, 32(7): 49-57 [Zhao H-F, He H-M, Bai C-Y, et al. Spatial-temporal characteristics of land use change in the Loess Plateau and its environmental effects. *China Land Science*, 2018, 32(7): 49-57]
- [35] Gao P, Deng JC, Chai XK, et al. Dynamic sediment discharge in the Hekou-Longmen region of Yellow River and soil and water conservation implications. *Science of the Total Environment*, 2017, 578: 56-66
- [36] Zhang L, Wang JM, Bai ZK, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an open-cast coal mine dump in a loess area. *Catena*, 2015, 128: 44-53
- [37] 刘宇. 景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性. 生态学报, 2017, 37(15): 4923-4935 [Liu Y. Effectiveness of landscape metrics in coupling soil erosion with landscape pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 4923-4935]

---

作者简介 罗佳茹, 女, 1996年生, 硕士研究生。主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: jiaruluo@nwafu.edu.cn

责任编辑 杨弘

---



---

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. 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4165-4176