

延安市坡耕地资源时空变化及其土壤侵蚀效应

王 祯, 吴金华, 白 帅, 史飞航, 韩株桃

(长安大学 土地工程学院, 西安 710054)

摘 要:为研究黄土高原坡耕地利用变化与土壤侵蚀变化的时空联系,以延安市的坡耕地与土壤侵蚀强度为研究对象,运用坡耕地动态度、土地利用转移矩阵、核密度分析、RUSLE 模型、地理加权回归模型等方法,阐明了坡耕地与土壤侵蚀强度的时空演变规律,揭示了坡耕地时空变化带来的土壤侵蚀效应。结果表明:(1) 1990—2018 年,延安市坡耕地总面积经历了“上升→下降→下降”的变化,总体坡耕地动态度为 $-0.68\%/a$ 。缓坡耕地、陡坡耕地、峭坡耕地面积均减少,减少的剧烈程度为峭坡耕地>陡坡耕地>缓坡耕地。(2) 1990—2018 年延安市坡耕地最主要的转入和转出的土地利用类型均为草地和林地,其中转入、转出面积最大的坡耕地类型均为陡坡耕地。(3) 1990—2018 年期间延安市的缓坡耕地主要集中在南部北洛河沿岸,陡坡耕地与峭坡耕地集中在北部丘陵沟壑区。坡耕地减少区域分布在延河沿岸、清涧河—永坪川沿岸与西北部北洛河沿岸;西部葫芦河沿岸坡耕地少量增加,主要的增加类型是陡坡耕地与峭坡耕地。(4) 1990—2018 年延安市的土壤水力侵蚀状况显著改善,土壤侵蚀模数大部分区域均有减少,主要增加区分布在西部葫芦河与北洛河之间的土石山区、西南土石山区、延河与西川的交界地带。(5) 1990—2018 年延安市不同类型坡耕地动态变化区域的土壤侵蚀模数总体下降,土壤侵蚀变化的剧烈程度为峭坡耕地>陡坡耕地>缓坡耕地。不同类型坡耕地动态变化区域的土壤侵蚀量强烈减少区在空间上均呈现出左开口的“C”字形,其空间分布格局受植被覆盖度变化、降雨侵蚀力变化和水土保持措施因子变化影响,影响力大小为植被覆盖变化>降雨侵蚀力变化>水土保持措施因子变化。

关键词:坡耕地; 时空变化; 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 地理加权回归模型; 黄土高原

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0001-11

Spatiotemporal Changes of Sloping Farmland Resources and Its Soil Erosion Effects in Yan'an City

WANG Zhen, WU Jinhua, BAI Shuai, SHI Feihang, HAN Zhutao

(School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the spatiotemporal relationship between the use of sloping farmland and the change of soil erosion in the Loess Plateau, we took the sloping farmland and soil erosion intensity in Yan'an City as the research object, and used sloping farmland dynamic, land use transfer matrix, kernel density analysis, RUSLE model, geographically weighted regression model, etc, to clarify the spatiotemporal evolution of sloping farmland and soil erosion intensity, and the soil erosion effect brought by spatiotemporal changes of sloping farmland was revealed. The results show that: (1) from 1990 to 2018, the total area of sloping farmland in Yan'an City experienced a change of 'rise→decrease→decrease', and the overall dynamic degree of slope farmland was $-0.68\%/a$; from 1990 to 2018, the area of gentle sloping farmland, steep sloping farmland, and precipitous sloping farmland all decreased, and the sharpness of the decrease was precipitous sloping farmland>steep sloping farmland>gentle sloping farmland; (2) from 1990 to 2018, the most critical land use types of sloping farmland transferred in and out of Yan'an City were grassland and woodland, among which the type of sloping farmland with the largest transfer area was steep sloping farmland; (3) from 1990 to 2018, the gentle sloping farmland in Yan'an City mainly concentrated along the Beiluo River in the south, and steep sloping farmland and precipitous sloping farmland concentrated in the hilly and

收稿日期:2021-05-11

修回日期:2021-06-01

资助项目:国家自然科学基金面上项目“基于坡位特征的黄丘区坡面植被恢复评价及模型构建”(41871190)

第一作者:王祯(1996—),男,云南昆明人,硕士研究生,主要研究方向为土地保护与土地整治。E-mail:724492594@qq.com

通信作者:吴金华(1965—),女,陕西西安人,博士,教授,主要研究方向为土地信息系统与土地利用规划。E-mail:jinghuaw@chd.edu.cn

gully areas in the north; the areas with reduced sloping farmland distributed along the Yan River, along the Qingjian River-Yongping River, and along the Beiluo River in the northwest; the sloping farmland along the Hulu River in the west increased slightly, and the main types of increase were steep sloping farmland and precipitous slope farmland; (4) from 1990 to 2018, the soil water erosion situation in Yan'an City was significantly improved; the soil erosion modulus decreased in most areas; the main increase areas were located in the rocky mountainous area between the Hulu River and Beiluo River in the west, the rocky mountainous area in the southwest, the junction area of Yan River and Xichuan River; (5) from 1990 to 2018, the soil erosion modulus of the dynamic change areas of different types of sloping farmland in Yan'an City decreased overall, and the severity of soil erosion changes was precipitous sloping farmland > steep sloping farmland > gentle sloping farmland; different types of sloping farmland had a strong reduction in soil erosion in the areas with dynamic changes. All areas had a left-open 'C' shape in space, and their spatial distribution pattern was affected by changes of vegetation coverage, changes of rainfall erosivity, and changes of water and soil conservation measures. The magnitude of influence was change of vegetation cover > change of rainfall erosivity > change of water and soil conservation measures.

Keywords: sloping farmland; spatiotemporal changes; soil erosion; RUSLE model; geographically weighted regression model; Loess Plateau

随着我国人口数量增长与耕地面积减少,粮食安全问题日益严峻。要保障国家粮食安全,首先要确保耕地资源的数量和质量。坡耕地是中国耕地资源的重要组成部分,坡耕地的数量、质量与区域粮食安全密切相关^[1]。坡耕地指分布在山坡上地面平整度差、跑水跑土跑肥严重、作物产量较低的旱作耕地,具有一定的坡度属性是坡耕地区别于其他耕地类型的本质特征^[2]。据《关于第二次全国土地调查主要数据成果的公报》,在我国 1.35 亿 hm^2 的耕地资源中,坡耕地($\geq 6^\circ$ 的耕地)的面积占耕地资源总面积的 27%,其中 79.9%的坡耕地位于我国的西部地区^[3]。坡度属性决定了坡耕地是水土流失和面源污染最为严重的地类之一,坡耕地水土流失导致的土壤流失和养分流失也是造成区域生态环境恶化、生产力低下的根本原因^[4]。因此,研究坡耕地数量与分布特征的时空变化,分析坡耕地资源时空变化与及其带来的土壤侵蚀效应对合理利用坡耕地资源、从空间宏观层面制定坡耕地的水土保持措施与政策具有重要的参考价值,对于区域农业可持续发展以及国家粮食安全具有重要意义。

近年来,国内外学者在坡耕地资源的时空变化、坡耕地的土壤侵蚀效应以及坡耕地的水土流失治理方面做了大量的研究^[5-9],但从坡耕地与土壤侵蚀时空变化的关系的层面研究较少。同时,黄土高原丘陵沟壑区作为我国水土流失的重灾区,研究其坡耕地的时空变化及其土壤侵蚀效应对于保障粮食安全和生态文明建设具有重要意义。基于此,以黄土丘陵沟壑区的延安市作为研究区,利用多源数据,采用土地利用动态度、土地利用转移矩阵、核密度估计、RUSLE

模型、地理加权回归等方法,研究延安市 1990—2018 年坡耕地时空格局的动态演变特征、1990—2018 年土壤侵蚀模数的时空变化以及二者在时空变化上的相关性,为黄土高原丘陵沟壑区的坡耕地保护和整治及其相关政策的制定提供科学依据。

1 研究区概况

延安市位于陕西省北部,黄土高原中南部,位于北纬 $35^\circ 21' - 37^\circ 31'$,东经 $107^\circ 41' - 110^\circ 31'$,全市总面积 3.7 万 km^2 (图 1)。地势西北高东南低,平均海拔 1 200 m 左右。北部是黄土丘陵沟壑区,占全市总面积的 72%;南部北洛河沿岸是黄土塬沟壑区,占总面积 19%;西南、东南为土石山区,占总面积 9%。气候属于温带季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。年平均降水总量 507.7 mm,最多年降水量 774.0 mm,最少年降水仅 330.0 mm,降水多集中在夏季,且多暴雨,强度大,占全年总降水量的 57%。主要的河流为北洛河、延河、汾川河。从 1999 年起,全市范围内实施了大规模退耕还林还草工程,截至 2018 年,共完成退耕还林面积 7 183.13 km^2 ,占国土总面积的 19.4%,成为全国退耕还林面积最大的地级市。统计数据显示,退耕还林持续实施 20 a 后,森林覆盖率提高到 46.35%;植被覆盖度由 2000 年的 46% 提高到 2017 年的 81.3%^[10]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与数据预处理

(1) 30 m 空间分辨率的 LUCC 数据。1990 年、2000 年、2010 年、2018 年四期 LUCC 数据来自于中

国科学院资源环境数据云(<http://www.resdc.cn>),用于坡耕地的提取与土地利用转移矩阵的制作。

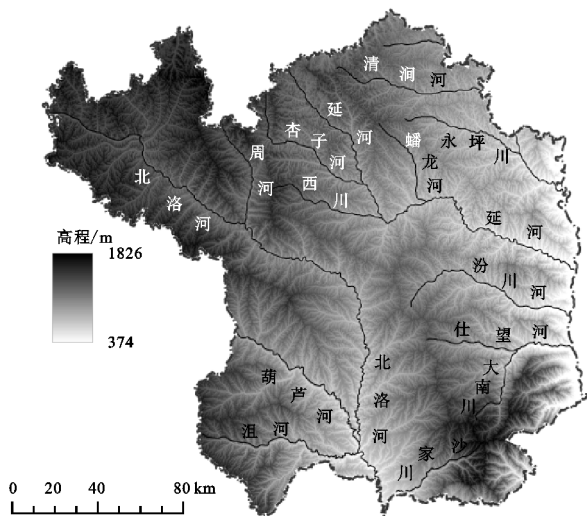


图 1 延安市概况

(2) 30 m 空间分辨率的 DEM 数据。来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),用于坡耕地的提取与 RUSLE 模型中坡度坡长因子(LS)的计算。

(3) 1990—2018 年逐日降水数据。来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。选取了靖边、吴起、绥德、延安、延长、吉县、洛川、韩城共 8 个气象站点的日降水量数据计算 RUSLE 模型中降雨侵蚀力因子(R)。

(4) 遥感影像数据。Landsat4/5 数据和 Landsat8 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m。将原始多月份的数据进行辐射定标、大气校正和几何校正后,采用最大值合成法计算研究区的归一化植被指数(DNVI),进而计算 RUSLE 模型中的植被覆盖与管理因子(C)。

(5) 土壤类型与质地数据。来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>),用于计算 RUSLE 模型中的土壤可蚀性因子(K)。

2.2 研究方法

2.2.1 坡耕地的提取 目前还未形成坡耕地统一的定义,根据前人研究成果^[5,11],结合延安市实际,明确坡耕地的定义为:坡度 $\geq 6^\circ$ 的非水田耕地。为确保坡耕地的提取精度,将四期 LUCC 数据和 DEM 数据转换为相同的地理坐标系,在 ArcGIS 中先对两种数据进行重分类,再利用空间分析工具→数学分析→乘将两种数据的栅格值相乘,依据相乘后的数值特征提取出 3 个类别的坡耕地与非坡耕地。

2.2.2 坡耕地与土壤侵蚀模数的时空变化分析 采用坡耕地动态度、土地利用转移矩阵、核密度估计来研究坡耕地与土壤侵蚀模数的时空变化。

(1) 坡耕地动态度。用以表征延安市坡耕地面积 1990—2018 年的动态变化。坡耕地动态度的表达式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中: K 为研究时段内坡耕地动态度($\%/a$); U_a, U_b 为研究时段期初和期末坡耕地的面积(km^2); T 为研究时段长(a)。由于研究中 T 的单位为年,所以坡耕地动态度 K 值就是研究时段内某类坡耕地的年变化率($\%/a$)。

(2) 土地利用转移矩阵。采用土地利用转移矩阵研究各类型坡耕地从 1990—2018 年的转入与转出情况。土地利用转移矩阵如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}$$

式中: S 代表土地面积(km^2); n 代表转移前后的土地利用类型的总数; i, j 分别代表转移前与转移后的土地利用类型。

(3) 核密度估计(kernel density estimation, KED)。采用核密度估计研究土壤侵蚀量从 1990—2018 年的变化量的空间分布。核密度估计优点是它强调从数据本身出发,避免参数估计中函数设定的主观性,能有效捕捉到数据分布的客观实际^[12],因而在变化量的空间分布刻画中优势明显。核密度估计的表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

式中: n 为数据个数; h 为阈值; $K(\cdot)$ 为核密度方程; $(x - x_i)$ 是估计点 x 到事件 x_i 的距离。先对研究区建立 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的渔网,用分区统计功能统计渔网每个格网中土壤侵蚀模数平均值,再对两年侵蚀模数的平均值栅格相减,获得研究区 1 km 精度的土壤侵蚀模数平均增减量。经过比较,确定采用 $h = 8000$ 的带宽进行核密度估计得到土壤侵蚀模数平均变化量的分布密度。

2.2.3 土壤侵蚀量的计算 采用通用土壤流失方程 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)模型分别对延安市 1990 年、2018 年的土壤侵蚀模数进行估算。其计算公式如下:

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

式中: A 为土壤侵蚀模数 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; K 为土壤可蚀性因子 $[t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot a \cdot MJ \cdot mm)]$; LS 为坡长坡度因子; C 为地表植被覆盖因子; P 为土壤保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)。降雨侵蚀力因子是土壤侵蚀的驱动因子,直接影响了土壤侵蚀模数的大小。目前降雨侵蚀力(R)的计算可以分为 EI_{30} 经典计算方法和常规气象资料简易算法两类。由于降雨动能 E 和 30 min 降雨强度 I_{30} 资料获取难度较大,所以国内外许多学者根据区域性降雨侵蚀特点,建立了基于常规降雨量资料的简易模型^[7]。本研究采用章文波等^[13]的全国日降雨量拟合模型来估算降雨侵蚀力(R)。其公式如下:

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k (D_j) \beta$$

式中: M_i 为第 i 个半月时段的侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$]; K 为该半月时段内的天数(d); D_j 为半月时段内第 j 天的大于 12 mm 的日雨量(mm),否则以 0 计算。 α 和 β 为模型待定参数,公式为:

$$\alpha = 21.568 \beta - 7.1891$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}}$$

式中: P_{d12} 为日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均雨量(mm); P_{y12} 为日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年平均雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子(K)。土壤可蚀性因子(K)体现了不同土壤类型对侵蚀的敏感程度,常使用 Wischmeier 等^[14]提出的 Nomo 图法、Williams 等^[15]在侵蚀生产力评价模型 EPIC 中使用的计算方法以及参考前人研究结果对土壤类型直接赋值。由于诺模方程是用美国的实测资料求得的^[16],而黄土高原独特的自然地理环境导致其土壤条件与美国存在着巨大的差异,因此采用 Williams 等建立的 EPIC 模型来计算延安市的土壤可蚀性因子(K),其公式如下:

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

式中:SAN 为砂粒含量百分比(%);SIL 为粉砂含量百分比(%);CLA 为黏粒含量百分比(%); C 为有机质含量百分比(%), $\text{SN} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

(3) 地形因子(LS)。地形是导致土壤侵蚀发生的直接诱导因子,坡长坡度因子(LS)反映了坡度和坡长对土壤侵蚀的影响。本研究的坡度坡长因子的算法建立在 McCool 等^[17]和 Liu 等^[18]的研究的基础之上,利用研究区 30 m 分辨率的 DEM 数据计算得出,计算公式法如下:

$$LS = L \times S$$

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

$$m = \frac{B}{B+1}$$

$$B = \frac{\sin \theta}{3 \sin \theta^{0.8} + 0.56}$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \times \sin \theta + 0.036 & \theta < 6^\circ \\ 16.8 \times \sin \theta - 0.5 & 6^\circ \leq \theta < 15^\circ \\ 21.9 \times \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 15^\circ \end{cases}$$

式中: λ 为坡长(m); θ 为坡度($^\circ$)。

(4) 植被覆盖因子(C)。植被覆盖因子(C)是影响土壤侵蚀最敏感的因子,与植被覆盖度有着直接的关系。使用蔡崇法等^[19]提出的方法计算延安市的植被覆盖与管理因子(C),计算公式为:

$$C = \begin{cases} 1 & \text{FVC} = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg(\text{FVC}) & 0 < \text{FVC} < 78.3\% \\ 0 & \text{FVC} \geq 78.3\% \end{cases}$$

$$\text{FVC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}$$

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI_{soil} 为纯裸土像元的 NDVI 值;NDVI_{max} 纯植被像元的 NDVI 值。

(5) 水土保持措施因子(P)。水土保持措施因子是指采取专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值,其值在 0~1 之间,0 表明不发生水土流失,1 表示未采取任何水土保持措施^[20]。耕地的 P 因子使用 A Lufafa 等^[21]建立的 P 因子与坡度的线性关系公式,其他土地利用类型 P 因子的赋值参考陈金珂等^[22]和翟睿洁等^[23]的研究,结合延安市实际,得出延安市水土保持措施因子(P)赋值表(见表 1)。

表 1 水土保持措施因子(P)赋值

土地利用类型	P 值
耕地	$P = 0.2 + 0.03\theta$
林地	0.7
草地	0.5
水体	1.0
建设用地	0
未利用地	1.0

注: θ 为坡度($^\circ$)。

2.2.4 坡耕地的时空变化土壤侵蚀效应分析 采用地理加权回归模型(GWR)研究坡耕地动态变化范围内土壤侵蚀变化量空间分布的影响因素。地理加权回归模型由 Fotheringham 等^[24]提出,认为回归系数具有空间非稳性^[25],地理加权回归模型将解释变量的位置信息加入到了回归参数之中,回归系数可以随着空间位置的变化而发生变化^[26-27]。地理加权回归模型可以用来考察一个地区回归结果的空间变异性,了解空间非平稳性的存在,其表达式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i$$

式中: (u_i, v_i) 为第 i 个采样点的坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为模型在第 i 个采样点的回归常数; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为第 i 个采样点上第 k 个回归参数; ϵ_i 为第 i 个区域的随机误差,它满足零均值、同方差、相互独立等基本假定。

3 结果与分析

3.1 坡耕地资源的时空变化

3.1.1 坡耕地的时间变化特征 (1) 坡耕地面积的时间变化特征。根据坡耕地提取的结果,1990 年延安市坡耕地的面积为 10 102.86 km²,占 1990 年耕地总面积的 87.90%;2018 年延安市坡耕地的面积为 8 184.66 km²,占 2018 年耕地总面积的 87.07%。1990—2018 年的 28 a 间,延安市坡耕地的总面积减少了 1 918.20 km²,与 1990 年相比下降了 18.99%。但坡耕地在耕地中的占比变化甚微,坡耕地依然占据

耕地的主体,是延安市耕地资源的重要组成部分。这与黄土高原丘陵广布、沟壑纵横的地形地貌密不可分。根据《第三次全国国土调查技术规程》(TD/T1055—2019),结合延安市实际,将坡耕地分为 6°~15°(缓坡耕地),15°~25°(陡坡耕地),≥25°(峭坡耕地)3 个类别,总体情况见表 2。1990 年,延安市缓坡耕地、陡坡耕地、峭坡耕地的面积为 3 780.80 km²,3 904.40 km²,2 417.66 km²,分别占 1990 年坡耕地面积的 37.42%,38.65%,23.93%;到 2018 年,3 类坡耕地的面积为 3 098.28 km²,3 158.25 km²,1 928.12 km²,分别占 2018 年坡耕地面积的 37.85%,38.60%,23.55%。28 a 间延安市 3 类坡耕地在耕地中的占比变化不大,面积减少明显,但是到 2018 年,极不适合耕种的峭坡耕地依然占很大比重,今后该类坡耕地仍是退耕的首选。

表 2 1990—2018 年延安市坡耕地的面积与占比

年份	缓坡耕地 面积/km ²	缓坡耕地 占比/%	陡坡耕地 面积/km ²	陡坡耕地 占比/%	峭坡耕地 面积/km ²	峭坡耕地 占比/%	面积合计/ km ²
1990	3780.80	37.42	3904.4	38.65	2417.66	23.93	10102.86
2000	3868.36	37.29	4020.01	38.75	2485.06	23.96	10373.44
2010	3226.36	39.10	3148.95	38.16	1877.00	22.75	8252.31
2018	3098.28	37.85	3158.25	38.60	1928.12	23.56	8184.66

(2) 坡耕地面积的动态度变化。根据坡耕地动态度计算结果,绘制延安市各类型坡耕地 1990—2018 年坡耕地动态度变化图,见图 2。

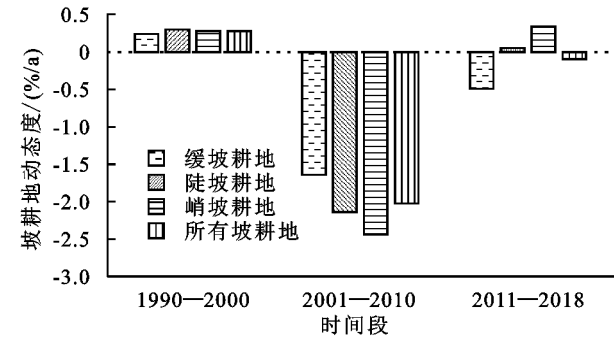


图 2 1990—2018 年延安市坡耕地的动态度变化

28 a 间,延安市总体坡耕地动态度为-0.68%/a,即 1990—2018 年平均每年减少 0.68%的坡耕地。通过分析 1990—2000 年、2001—2010 年、2011—2018 年 3 个时间段的坡耕地动态度可知,延安市坡耕地总面积经历了“上升→下降→下降”的变化,其中,1990—2000 年和 2010—2018 年为小幅变化,坡耕地总动态度不超过±0.3%/a。1990—2000 年,各类型坡耕地的动态度均>0,即各类型坡耕地在这十年间为正增长;2011—2018 年,虽然坡耕地总动态度小于 0,但陡坡耕地和峭坡耕地的动态度大于 0,即 2011—2018 年,坡耕地面积总体下降,但陡坡耕地和峭坡耕地的面积有所上升,其中

峭坡耕地的上升幅度较大,坡耕地动态度达-0.34%/a。2001—2010 年十年间,坡耕地面积减少了 2 121.13 km²,年变化率为-2.04%/a,坡耕地面积大量减少;缓坡耕地、陡坡耕地、峭坡耕地的动态度分别为-1.66%/a,-2.17%/a,-2.45%/a,峭坡耕地面积减少最多,年均变化最为剧烈。

(3) 坡耕地土地利用类型的动态转移。根据 1990 年与 2018 年的土地利用变化,生成 1990—2018 年延安市土地利用转移矩阵(表 3)。分析土地转移矩阵可知,1990—2018 年,坡耕地总体转出大于转入,转出和转入的土地利用类型均以草地、林地为主。在转出的坡耕地中,缓坡耕地、陡坡耕地、峭坡耕地的转出面积分别为 1 118.5 km²,1 321.30 km²,879.8 km²。建设用地是坡耕地转出的第三大土地利用类型,转出面积缓坡耕地>陡坡耕地>峭坡耕地,表明建设占用也是 28 a 间坡耕地减少的重要原因。共有 1 199.65 km²,189.54 km²的草地和林地转为了坡耕地,其中大部分转为了陡坡耕地。

经分析,1990—1999 年耕地保护措施尚不健全,水土流失较为严重,土壤肥力随之丧失,原有坡耕地被大量撂荒,农民又开垦新的耕地,导致坡耕地增加。1999 年以来,延安市大力实施退耕还林还草工程,3 类坡耕地面积显著减少,其中峭坡耕地是退耕还林还

草工程的主要退耕对象,因此减少得也最剧烈。草地与林地转入坡耕地的主要时间段是 1990—2000 年,这一阶段轮荒耕作导致大量林地和草地转为坡耕地;

1999 年退耕还林还草工程开始实施,但由于时间较短,成效不显著;导致 1990—2000 年整体上林地和草地大量转为坡耕地。

表 3 1990—2018 年延安市土地利用转移矩阵

km²

土地利用类型	2018 年								
	非坡耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	缓坡耕地	陡坡耕地	峭坡耕地
非坡耕地	1062.26	68.09	203.29	4.72	51.77	0.48	0.08	0.05	0.03
林地	15.10	8397.51	428.62	3.63	9.80	11.34	59.23	77.42	52.89
草地	82.80	715.26	14160.04	18.48	39.64	12.51	368.34	494.97	336.34
水域	3.48	2.96	10.79	126.06	1.87	0.27	4.55	1.51	0.66
1990 年 建设用地	3.79	1.19	4.29	0.38	101.93	0.01	3.94	1.34	0.45
未利用地	0.01	0.05	0.32	0.00	0.00	2.19	0.05	0.03	0.01
缓坡耕地	0.07	252.92	807.45	5.77	50.70	1.68	2662.08	0.00	0.00
陡坡耕地	0.08	299.00	1000.13	2.09	18.17	1.83	0.00	2582.92	0.00
峭坡耕地	0.08	196.76	673.36	1.27	7.34	0.99	0.00	0.00	1537.74

3.1.2 坡耕地的空间变化特征 根据坡耕地提取的结果,按 3 类坡耕地的分布分别绘制延安市 1990 年与 2018 年的坡耕地空间分布图(图 3)。

1990 年与 2018 年缓坡耕地主要集中在南部北洛河沿岸,陡坡耕地与峭坡耕地集中在北部丘陵沟壑区。北部丘陵沟壑区是黄土高原水土流失较为严重的区域,加之耕地轮荒耕种问题较为突出,导致这里也是 1999 年实施的退耕还林还草工程的重点退耕区

域。经过 10 a 的改造,到 2018 年,北部丘陵沟壑区的坡耕地明显减少,减少区域分布在延河沿岸、清涧河—永坪川沿岸与西北部北洛河沿岸。与北部相比,由于东南部、西南部为土石山区,植被覆盖度较高,用地类型以林地和草地为主,坡耕地分布稀疏。1990—2018 年,西部葫芦河沿岸坡耕地少量增加,主要的增加类型是陡坡耕地与峭坡耕地,为 1990—2000 年抛荒耕作的结果。

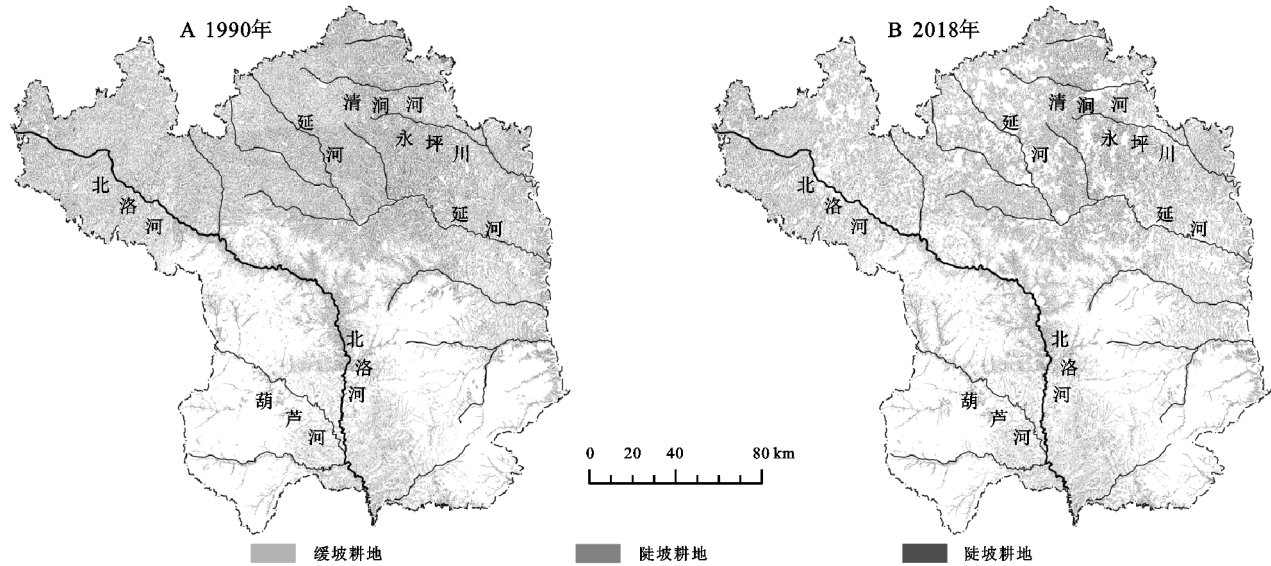


图 3 1990—2018 年延安市坡耕地空间分布

3.2 坡耕地时空变化的土壤侵蚀效应

3.2.1 延安市土壤侵蚀强度的时空变化 运用 RU-SLE 模型分别计算延安市 1990 年和 2018 年的土壤侵蚀模数,并根据水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),将延安市的土壤侵蚀模数划分为<1 000 t/(km²·a)(微度侵蚀),1 000~2 500 t/(km²·a)(轻度侵蚀),2 500~5 000 t/(km²·a)(中度侵蚀),5 000~8 000 t/(km²·a)(强烈侵蚀),8 000~15 000

t/(km²·a)(极强烈侵蚀)、>15 000 t/(km²·a)(剧烈侵蚀)共 6 个等级。计算结果表明,1990 年延安市微度侵蚀的面积为 18 076.55 km²,占延安市土地总面积的 48.78%,而其余 52.22%的土地都在遭受不同程度的水力侵蚀,21.11%遭受着强烈及以上等级的水力侵蚀,土壤侵蚀形势十分严峻;到 2018 年,微度侵蚀的土地面积上升到了 26 509.58 km²,占延安市土地总面积的 71.54%,强烈及以上等级侵蚀的土地

面积由 7 824.39 km²下降到了 2 042.48 km²,占比由 21.11%下降到了 5.51%,土壤侵蚀状况明显好转。

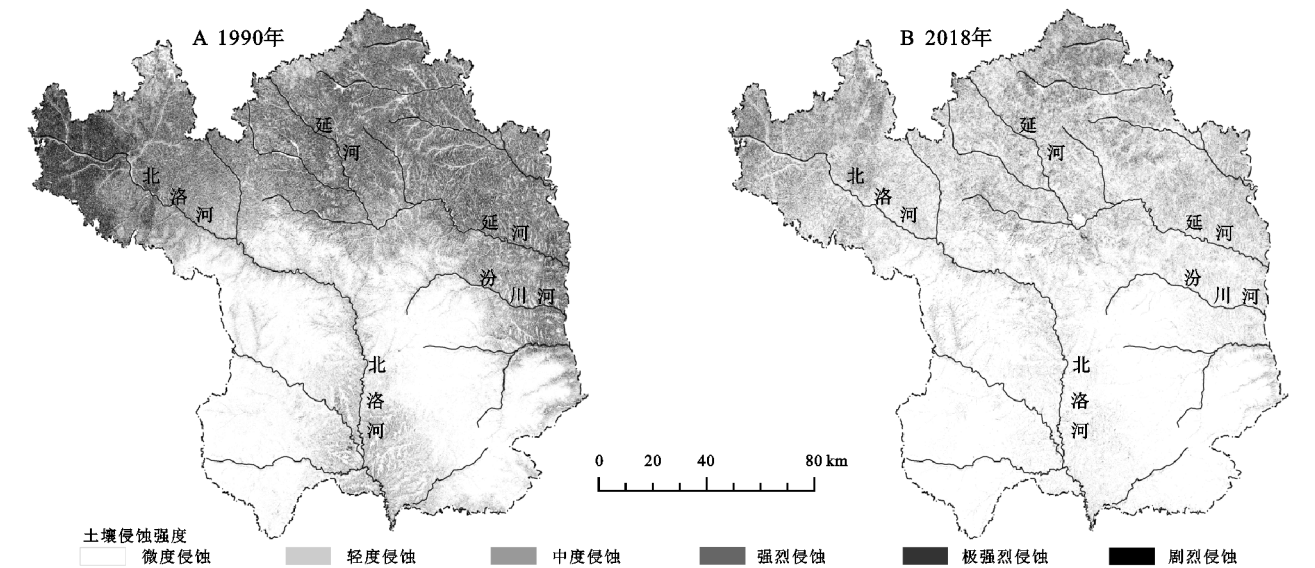


图 4 1990—2018 年延安市土壤侵蚀强度分布

由图 4 可以看出,1990 年土壤侵蚀强度呈现出北高南低的格局,强烈及以上侵蚀等级主要集中在北部黄土丘陵沟壑区以及南部北洛河沿岸,其中剧烈侵蚀主要集中在西北部北洛河沿岸,轻度、微度侵蚀区主要集中在西南、东南部的土石山区。2018 年,总体土壤侵蚀强度显著下降,土壤侵蚀模数显著减少区分布在北部丘陵沟壑区、北洛河沿岸、西部延河、汾川河沿岸,强烈及以上强度侵蚀区仍集中在西北部北洛河沿岸。28 a 间整体土壤侵蚀强度大量降低是植被、降水、水土流失治理多因素综合作用的结果。

为分析 1990—2018 年土壤侵蚀模数的时空动态变化特征,以土壤侵蚀模数的平均变化量为基础,生成 1990—2018 年平均土壤侵蚀模数变化量核密度分析图(图 5)。

核密度估计结果表明,1990—2018 年延安市土壤侵蚀模数减少区主要集中在北部丘陵沟壑区以及南部北洛河沿岸,其中变化最剧烈的区域是西北部北洛河沿岸。1990 年西北部土壤侵蚀虽然最严重,但经过 28 a 的水土流失治理,土壤侵蚀状况已经得到极大的改善。土壤侵蚀模数增加区主要分布在西部葫芦河与北洛河之间的土石山区、西南土石山区以及延河与西川的交界地带,坡耕地增加以及城镇扩张导致的植被覆盖度下降是这些区域土壤侵蚀模数增加的主要原因。

3.2.2 坡耕地时空变化的土壤侵蚀效应 分别统计 1990—2018 年 3 类坡耕地转出区、未变化区、转入区的平均土壤侵蚀模数的变化量,生成 1990—2018 年延安市坡耕地动态变化的土壤侵蚀模数变化表(表 4)。

基于 RUSLE 模型的计算结果,绘制 1990—2018 年延安市土壤侵蚀强度分布图(图 4)。

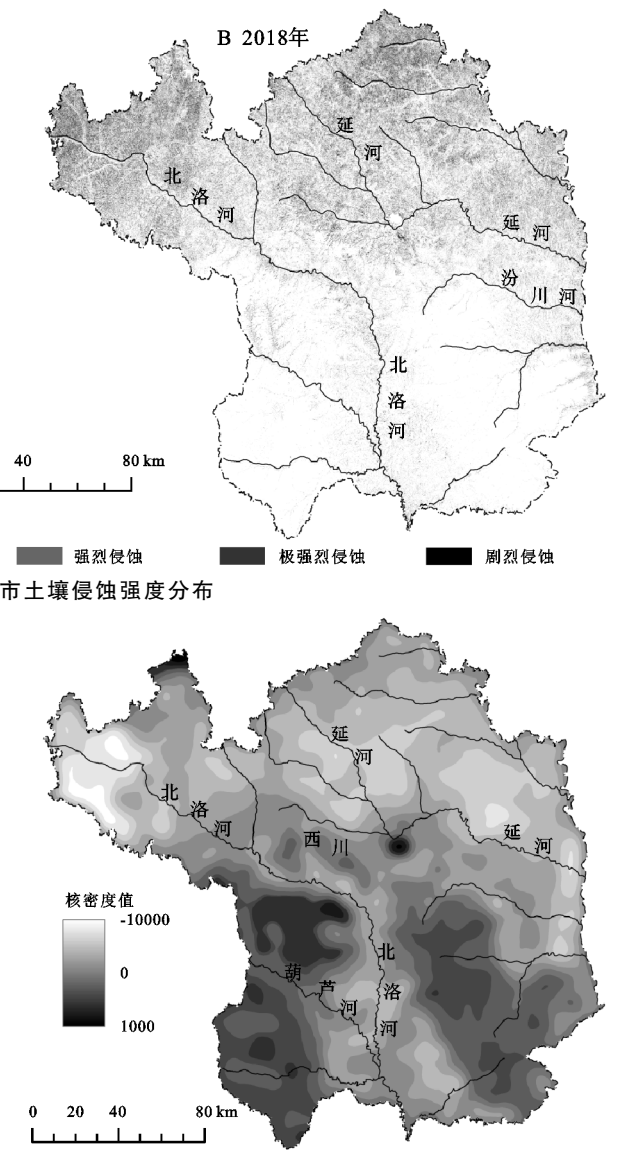


图 5 1990—2018 年平均土壤侵蚀模数变化量核密度

表 4 1990—2018 年延安市坡耕地动态变化的

土壤侵蚀模数变化			t/(km ² ·a)
坡耕地类型	坡耕地转出区	坡耕地未转移区	转入坡耕地地区
缓坡耕地	—1277.80	—714.48	—602.86
陡坡耕地	—4138.71	—2536.94	—542.36
峭坡耕地	—8692.44	—5106.75	—146.61

由表 4 可知,1990—2018 年延安市缓坡耕地、陡坡耕地、峭坡耕地的转出、未转移和转入区的平均土壤侵蚀模数变化量均为负值,表示坡耕地动态变化区的土壤侵蚀模数总体上减少。从平均侵蚀模数减少量的大小看,坡耕地转出和未转移区的土壤侵蚀效应符合峭坡耕地>陡坡耕地>缓坡耕地的基本规律。但在转入坡耕地地区,平均侵蚀模数减少量缓坡耕地>

陡坡耕地>峭坡耕地,即在转入坡耕地的区域,坡耕地的坡度越大,平均土壤侵蚀模数减少量越少。

1990—2018 年,延安市耕地范围内植被覆盖度上升明显高于其他土地利用类型,这是造成土壤侵蚀模数总体减少的直接原因。1990—2018 年,在各坡

度等级上,延安市的植被覆盖度增加百分比随坡度增加而增大,导致坡耕地转出区与坡耕地未转移区的平均土壤侵蚀模数减少量随坡度增大而增大。

以乡镇为统计单元,分别统计 9 类地区的平均土壤侵蚀变化量,得到图 6。

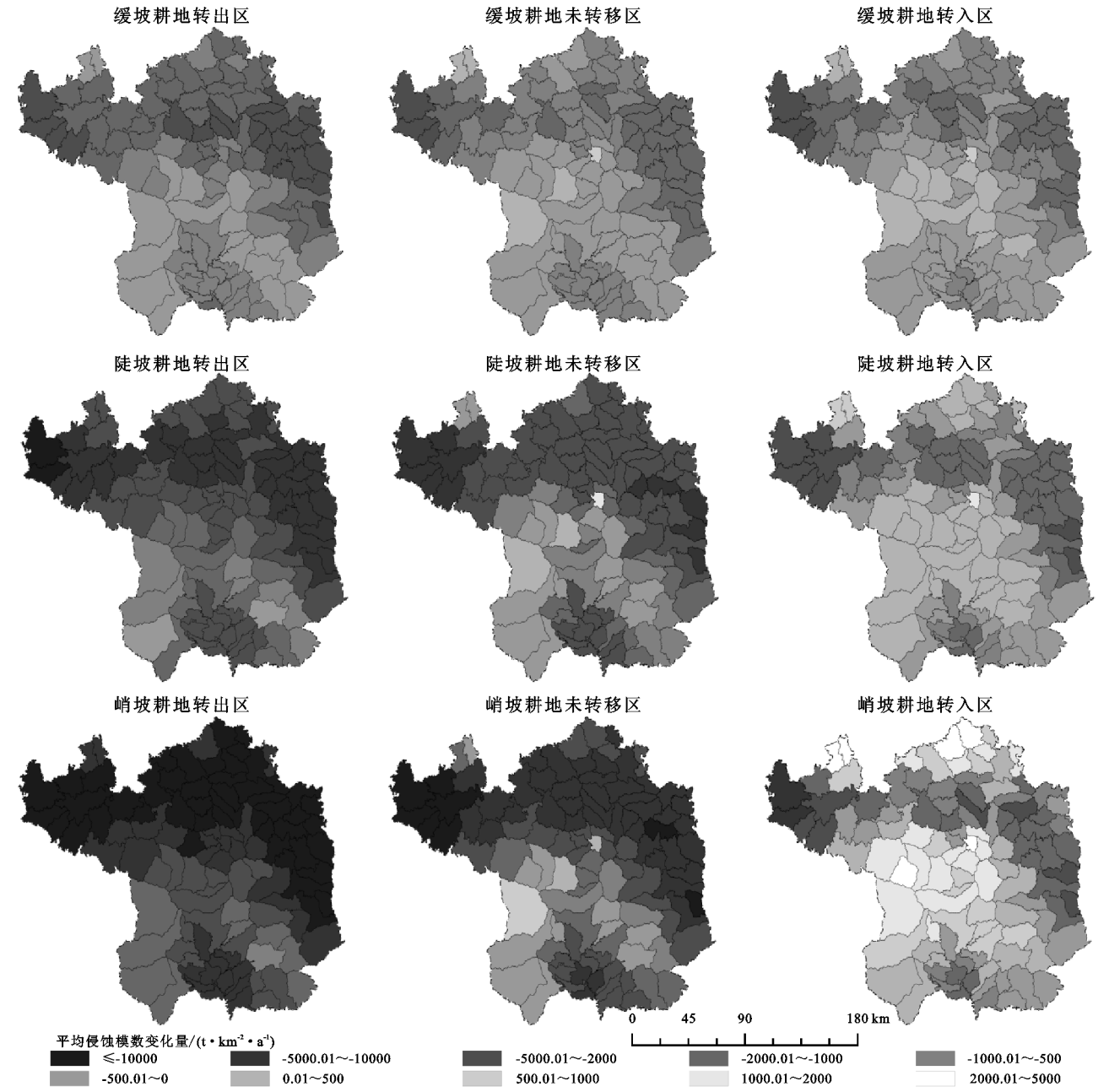


图 6 1990—2018 年延安市各类型区域平均土壤侵蚀模数变化

图 6 显示,延安市不同区域的土壤侵蚀变化的剧烈程度符合峭坡耕地>陡坡耕地区>缓坡耕地区的基本规律,即随着耕地坡度的增大,土壤侵蚀变化量的绝对值也增大。空间异质性的角度来看,9 类区域的土壤侵蚀量强烈减少区均呈现出左开口的“C”字形,空间异质性显著,9 类区域土壤侵蚀量的空间分布格局与坡耕地变化和土壤侵蚀变化的空间分布格局具有相似性。

3.2.3 坡耕地土壤侵蚀效应的影响因素 以各类区域范围内的植被覆盖度变化(负向指标)、降雨侵蚀力变化(正向指标)、水土保持措施因子变化(正向指标)作为解释变量,分别对坡耕地转出区、坡耕地未转移区、转入坡耕地区的土壤侵蚀量变化做地理加权回归分析,以探究各指标对各区域土壤侵蚀量空间分布的影响,分析结果见图 7。

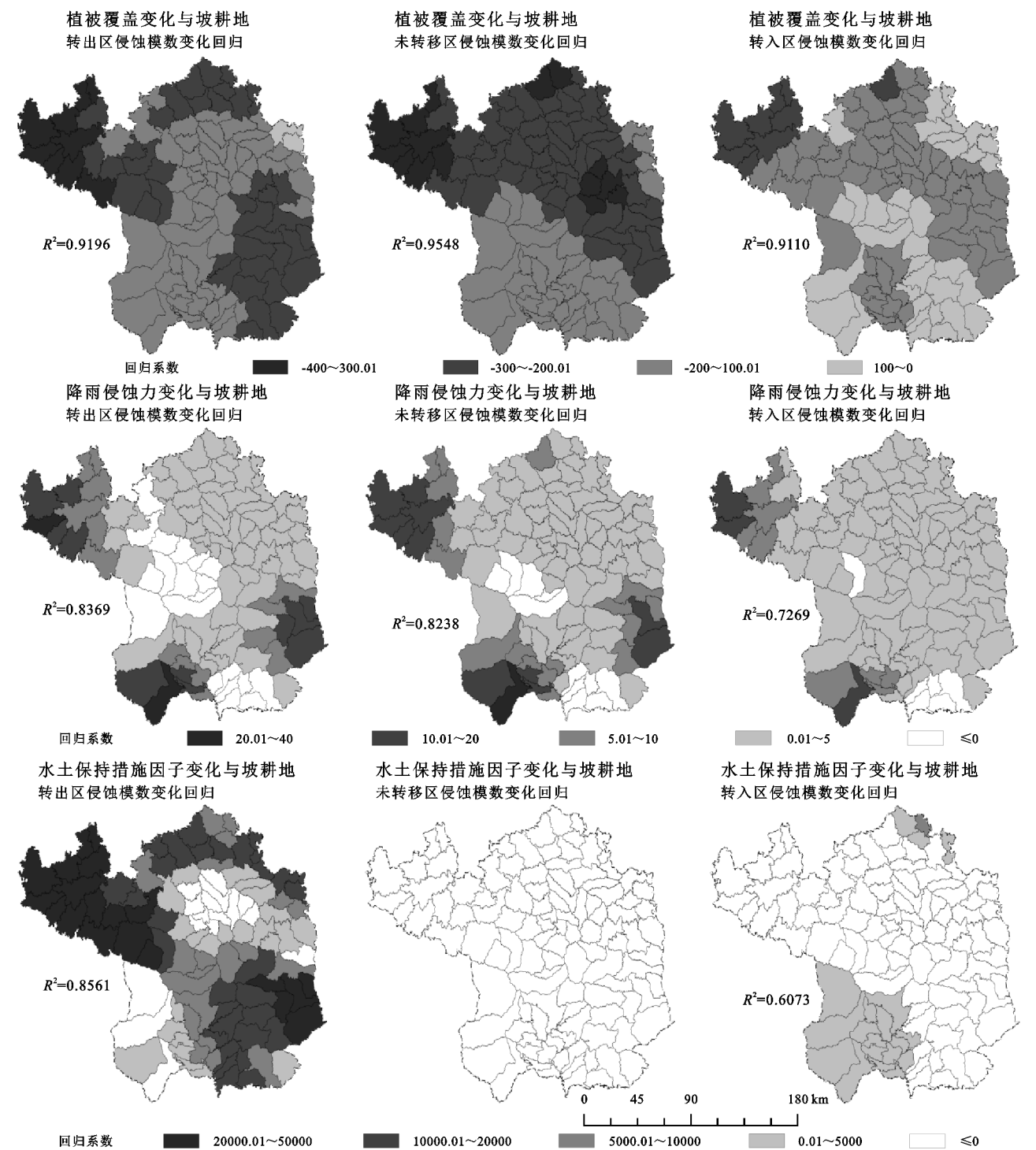


图 7 地理加权回归分析

由图 7 可知,最大调整 R^2 表示地理加权回归分析的拟合优度。综合来看,3 个变量的最大调整 R^2 大小排序为植被覆盖变化>降雨侵蚀力变化>水土保持措施因子变化,植被覆盖变化的拟合效果最好。回归系数表示解释变量与因变量的相关性,回归系数的绝对值越大,相关性越大。由于植被覆盖变化是负向指标,因此其预期的回归系数应为负值,其他两个指标的回归系数为正值。经分析,植被覆盖变化的回归系数均为负值,且 3 类地区最大调整 R^2 均大于

0.9,表明植被覆盖变化对 3 类地区全域侵蚀量变化都能较好地解释,即植被覆盖增加,土壤侵蚀量减少。降雨侵蚀力变化作为解释变量时,出现负值区,表明这些区域降雨侵蚀力变化与土壤侵蚀量变化无关或负相关。另外,降雨侵蚀力变化作为解释变量解释转入坡耕地区域的土壤侵蚀量变化时,最大调整 R^2 仅为 0.72,表明拟合效果不好,相关性不强。由于水土保持措施因子变化在未转移区未发生变化,因此无法进行地理加权回归分析;水土保持措施因子变化在转入区的最大

调整 R^2 仅为 0.61, 拟合较差。在坡耕地转出区, 水土保持措施因子变化的回归系数高值区全域表现为西北到东南走向的条带状分布, 表明水土保持措施因子变化在这些区域与土壤侵蚀量变化的相关性较强, 其余区域为弱相关、不相关或负相关。从坡耕地动态变化的角度, 坡耕地转出区的土壤侵蚀量变化是植被覆盖、降雨侵蚀力变化、水土保持措施因子变化多因素造成的; 坡耕地未转移区的土壤侵蚀量变化的主要影响因素是植被覆盖变化和降雨侵蚀力变化; 转入区的土壤侵蚀量变化只受植被覆盖变化单一指标的影响, 且地理加权回归的回归系数的空间分布也与转入坡耕地区土壤侵蚀量变化的空间格局呈现高度相似性。

3.2.4 坡耕地保护与整治建议 综合分析各类坡耕地时空变化的土壤侵蚀效应, 从变化的剧烈程度上看, 其排序为峭坡耕地 > 陡坡耕地 > 缓坡耕地, 表明峭坡耕地的土壤侵蚀敏感性最高, 陡坡耕地次之, 缓坡耕地最低。从变化的类型来看, 坡耕地转出区和未转移区的土壤侵蚀量总体减少, 虽然全域的转入坡耕地地区的土壤侵蚀平均变化量也是负值, 但精确到以乡镇为统计单元时, 转入峭坡耕地区 and 转入陡坡耕地区土壤侵蚀量增加的乡镇占全市乡镇的一半以上, 这些区域的土壤侵蚀状况与 1990 年相比表现为恶化。从影响因素的角度, 转出区和未变化区的土壤侵蚀量变化均为两个及以上因素共同作用, 在多因素共同作用于土壤侵蚀量变化时, 其中一个因素的改变对于土壤侵蚀量变化的影响程度较小, 即稳定性较高; 而转入区的土壤侵蚀量变化受植被覆盖变化影响较强, 其他因子较弱, 当植被覆盖因子发生变化时可能会引起土壤侵蚀量的巨大变化, 即稳定性较低。

根据研究成果, 对延安市坡耕地利用与整治提出建议。转入峭坡耕地区是水土流失的高敏感低稳定区域, 应该坚决抵制新的峭坡耕地生成, 巩固退耕还林还草工程的成果。同时应该对现存的峭坡耕地进行继续退耕可行性分析, 对于水土流失严重、粮食产量低的峭坡耕地进行退耕, 若这类峭坡耕地位于永久基本农田保护区, 可在评估后进行调整或补划。转入陡坡耕地区属于土壤侵蚀的中敏感低稳定区, 对于这类坡耕地的转入应该加以限制, 对于粮食产量低、水土流失特别严重、耕地质量等级低的部分进行退耕, 其他部分的耕地辅以适当的工程措施, 改善土壤侵蚀状况。转入缓坡耕地区属于土壤侵蚀的低敏感低稳定区, 对于缓坡耕地的整治应着眼于减少水土流失、提高耕地质量, 部分未位于永久基本农田保护区、水

土流失不严重的缓坡耕地可作为峭坡耕地和陡坡耕地退耕的补划区, 从而达到减少水土流失、保障粮食安全的目的。

4 结论

(1) 1990—2018 年, 延安市坡耕地总面积经历了“上升→下降→下降”的变化, 从 1990 年的 $10\,102.86\text{ km}^2$ 下降到 2018 年的 $8\,184.66\text{ km}^2$, 总体坡耕地动态度为 $-0.68\%/a$ 。1990—2018 年缓坡耕地、陡坡耕地、峭坡耕地面积均减少, 减少的剧烈程度为峭坡耕地 > 陡坡耕地 > 缓坡耕地。

(2) 1990—2018 年延安市坡耕地最主要的转入和转出的土地利用类型均为草地和林地, 其中转入、转出面积最大的坡耕地类型为陡坡耕地。

(3) 1990 年缓坡耕地主要集中在南部北洛河沿岸, 陡坡耕地与峭坡耕地集中在北部丘陵沟壑区, 西南、东南土石山区鲜有坡耕地分布。28 a 间, 北部丘陵沟壑区的坡耕地明显减少, 减少区域分布在延河沿岸、清涧河—永坪川沿岸与西北部北洛河沿岸; 西部葫芦河沿岸坡耕地少量增加, 主要的增加类型是陡坡耕地与峭坡耕地。

(4) 1990—2018 年延安市的土壤水力侵蚀状况显著改善, 微度侵蚀的土地面积占比从 1990 年 52.24% 上升到了 2018 年的 83.87%, 强烈侵蚀及以上的土地面积占比从 1990 年的 21.56% 下降到了 2018 年的 3.59%。土壤侵蚀模数主要减少区分布在延安北部黄土丘陵沟壑区以及南部北洛河沿岸, 主要增加区分布在西部葫芦河与北洛河之间的土石山区、西南土石山区、延河与西川的交界地带。

(5) 1990—2018 年延安市不同类型坡耕地的转入、转出、未转移区域的土壤侵蚀模数总体下降, 土壤侵蚀变化的剧烈程度为峭坡耕地 > 陡坡耕地 > 缓坡耕地。不同类型坡耕地的转入、转出、未转移区域的土壤侵蚀量强烈减少区在空间上均呈现出左开口的“C”字形, 空间异质性明显, 其空间分布格局受植被覆盖度变化、降雨侵蚀力变化和水土保持措施因子变化影响, 影响力大小为植被覆盖变化 > 降雨侵蚀力变化 > 水土保持措施因子变化。

(6) 研究采用的土地利用 30 m 数据来源于中科院资源环境数据中心, 将土地利用分为常用的耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类。经与 2018 年延安市土地利用图、《延安统计年鉴 2018》中耕地数据比对, 中科院资源环境数据中心耕地明显

较多,包含了部分“三调”分类中的园地。该数据可基本满足科学研究需求,但在实际运用中需要使用分类更精细、精度更高的数据。

参考文献:

- [1] 史东梅,蒋光毅,蒋平,等.土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J].农业工程学报,2017,33(13): 270-279.
- [2] 谢俊奇.中国坡耕地[M].北京:中国大地出版社,2005.
- [3] 国土资源部,国家统计局·关于第二次全国土地调查主要数据成果的公报[EB/OL].(2013-12-30)[2021-4-23]. http://www.gov.cn/jrzq/2013-12/31/content_2557453.htm.
- [4] 刘彦随,郑伟元.中国土地可持续利用论[M].北京:科学出版社,2008.
- [5] 陈正发,史东梅,何伟,等.1980—2015年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J].农业工程学报,2019,35(15):256-265.
- [6] 罗光杰,王世杰,李阳兵,等.岩溶地区坡耕地时空动态变化及其生态服务功能评估[J].农业工程学报,2014,30(11):233-243.
- [7] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9): 1835-1852.
- [8] Di B, Yang Z, Liu L, et al. The regionalized ecological, economic and social benefit of China's sloping cropland erosion control during the 12 th five-year plan(2011—2015) [J]. Journal of Environmental Management, 2020,276:111314, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111314>.
- [9] Koh I H, Roh H, Hwang W, et al. Reducing soil loss of sloped land using lime-organic compost mixtures under rainfall simulation[J]. Journal of Soil and Groundwater Environment, 2018,23(3):43-50.
- [10] 国家林业和草原局.退耕还林 20 载长出一片美“江南”[EB/OL].(2019-09-04)[2021-4-23]. <http://www.forestry.gov.cn/main/437/20190904/093825484412673.html>.
- [11] 王权,李阳兵,胡先培,等.岩溶槽谷区坡耕地利用的时空演变特征及驱动机制[J].生态与农村环境学报, 2020,36(1):53-61.
- [12] 陈利,朱喜钢.中国城镇化的地域非均衡及其动态演进:来自基尼系数及核密度估计的经验证据[J].统计与信息论坛,2017,32(5):76-84.
- [13] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [14] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971,26(5):189-193.
- [15] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [J]. Transactions of the Asae, 1984,27(1):129-0144.
- [16] 杨子生.滇东北山区坡耕地土壤可蚀性因子[J].山地学报,1999,17(10):11-16.
- [17] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the Asae, 1989,32(5): 1571-1576.
- [18] 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.
- [19] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 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.
- [20] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model[J]. Agricultural Systems, 2003,76(3):883-894.
- [21] 王萌,刘云,宋超,等.基于 RUSLE 模型的 2000—2010 年长江三峡库区土壤侵蚀评价[J].水土保持通报, 2018,38(1):12-17.
- [22] 陈金珂,蒲俊兵,李建鸿,等.典型岩溶流域不同坡度等级下的土壤侵蚀与石漠化分布特征耦合分析[J].水土保持研究,2020,27(5):1-9.
- [23] 翟睿洁,赵文武,贾立志.基于 RUSLE, InVEST 和 USPED 的土壤侵蚀量估算对比研究:以陕北延河流域为例[J].农业现代化研究,2020,41(6):1059-1068.
- [24] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis[J]. Environment and Planning A,1998,30(11):1905-1927.
- [25] 张显源,蔡忠亮,李桂娥,等.耕地景观破碎化成因及对农村收入影响分析[J].测绘科学,2020,45(4):134-141.
- [26] 刘彦文,刘成武,何宗宜,等.基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素[J].应用生态学报,2020,31(3):987-998.
- [27] Tomoki Nakaya. Local spatial interaction modelling based on the geographically weighted regression approach [J]. Geojournal, 2001,53(4):347-358.