

综合研究

1990—2020年延安市土壤侵蚀演变及其时空偏移特征

谢明阳^{1,2}, 焦春萌³, 韩小雨⁴, 焦峰^{1,2,4}

(1.中国科学院 水利部 水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 10004; 3.长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710000; 4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 71210)

摘要: [目的] 揭示陕西省延安市退耕还林还草进程中土壤侵蚀强度时空递变规律, 为水土保持规划与评价、土地资源管理和生态修复等问题的研究提供参考。[方法] 基于延安市1990—2020年遥感影像解译结果及水利部土壤侵蚀分级标准(SL190-2007), 引入偏移份额模型对延安市土壤侵蚀情势进行分析。[结果] ①延安市土壤侵蚀变化情势整体表现为北部剧烈, 南部缓和, 并以2000年为拐点实现从侵蚀加剧到逐渐恢复的转折, 其平均土壤侵蚀模数从最高时4071.38 t/(km²·a)下降到2366.19 t/(km²·a)。②主要由轻度、中度和强烈3种土壤侵蚀水平的变化影响整体土壤侵蚀情况变化。③偏移份额模型可以用于研究退耕还林还草工程对土壤侵蚀情况的偏移效应, 但其应用过程仍存在精度较低、生态学意义不明确等问题, 有待进一步改进和研究。[结论] 延安市北部、中部地区林地增长迅速, 南部地区草地增长迅速, 林地、耕地及不同覆盖度草地之间的比例结构变化是土壤侵蚀情势发生阶段性变化的主要原因。

关键词: 土壤侵蚀; 偏移—份额模型; 时空偏移特征; 陕西省延安市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0187-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 谢明阳, 焦春萌, 韩小雨, 等. 1990—2020年延安市土壤侵蚀演变及其时空偏移特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 187-192. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.024; Xie Mingyang, Jiao Chunmeng, Han Xiaoyu, et al. Evolution and spatial-temporal shift characteristics of soil erosion in Yan'an City during 1990—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 187-192.

Evolution and Spatial-temporal Shift Characteristics of Soil Erosion in Yan'an City During 1990—2020

Xie Mingyang^{1,2}, Jiao Chunmeng³, Han Xiaoyu⁴, Jiao Feng^{1,2,4}

(1. Soil and Water Conservation Ecological Engineering Technology Research

Center, Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Academy of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial changes in soil erosion intensity when farmland is returned to forest or grassland in Yan'an City Shaanxi Province were analyzed in order to provide a reference for researches on the planning and evaluation of soil and water conservation, land resource management, and ecological restoration. [Methods] Based on the interpretation results of remote sensing images of Yan'an City from 1990 to 2020 and standards for classification and gradation of soil erosion set by the Ministry of Water Resources, PRC (SL190-2007), soil erosion in Yan'an City was analyzed using the shift-share model. [Results] ① The graded change of soil erosion in Yan'an City as a whole was severe in the north and mild in the south, and the year 2000 was the inflection point where the situation changed from aggravated erosion to gradual recovery. The average soil erosion modulus in Yan'an City decreased from a maximum value of 4071.38 t/(km²·yr) to 2366.19 t/(km²·yr). ② The overall change of soil erosion was mainly affected by

收稿日期: 2021-12-26

修回日期: 2022-04-01

资助项目: 中国工程院咨询研究项目“黄土高原典型地区退耕还林(草)成效、问题与对策”(2019-XY-65)。

第一作者: 谢明阳(1997—), 男(汉族), 黑龙江省齐齐哈尔市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与环境效应评价。Email: 735502956@qq.com。

通信作者: 焦峰(1967—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与环境效应评价研究。Email: Jiaof@ms.iswc.ac.cn。

three erosion levels (slight erosion, moderate erosion, and severe erosion). ③ The shift-share model might be useful in exploring the offset effects of the grain for green project on soil erosion in the districts and counties of Yan'an City. Nevertheless, its application needs to be further investigated and improved due to issues such as accuracy and precision, as well as its ecological significance. [Conclusion] The forest land in the north and central part of Yan'an City increased rapidly, while the grassland in the south increased rapidly. The proportional changes among forest land, cultivated land, and grassland with different coverages were the main reason for the periodic changes in soil erosion.

Keywords: soil erosion; shift-share model; spatial-temporal shift characteristics; Yan'an City, Shaanxi Province

黄土丘陵沟壑区是中国生态环境最脆弱的地区之一,区域自然、人文、经济地理条件复杂,加之长期地盲目毁林开垦和进行陡坡地、沙化地耕种,使得黄土丘陵沟壑区生态环境不断恶化^[1],生态环境恶化过程中伴随着严重的土壤侵蚀,造成了中国严重的水土流失和风沙危害,并且部分地区出现了“越垦越穷,越穷越垦”的恶性循环。陕西省延安市地处黄土高原腹地,境内沟壑纵横、地表支离破碎,干旱少雨、植被稀少,曾是黄河中上游地区水土流失最为严重、生态环境最为脆弱的地区之一,黄土丘陵沟壑区占到全市土地总面积的 39%。20 世纪末,延安水土流失面积高达 $2.88 \times 10^4 \text{ km}^2$,占土地总面积的 77.8%,森林覆盖率不到 30%,耕地立地条件差。土壤侵蚀是重要的地表过程。它包括土壤物质的原位剥离和沿地表的输移、沉积^[2]。土壤侵蚀会导致土壤肥力下降、土层厚度变薄,从而诱发滑坡、泥石流等地质灾害^[3]。为了保护 and 改善生态环境,同时也作为国家西部开发战略的重要支撑,自 1999 年起,中国逐步实行退耕还林还草工程,退耕还林工程是中国林业生态建设史上涉及面最广、政策性最强、规模最大、任务最重、投入最多、群众参与度最高的生态建设工程,也是继天然林资源保护工程之后,中国生态环境建设的又一历史性举措^[4]。国内外学者对退耕还林还草工程及与其相关的生态恢复、水土保持效应、土壤侵蚀影响等问题展开了大量研究,已有结果表明:在不同尺度下(如:小流域、山区、市域),退耕还林还草工程都显著地遏制了土壤侵蚀^[5-6]。

偏移份额模型(shift-share analysis, SSA)1960 年由 Dunn 等^[7]相继提出,其核心思想是将研究指标的整体变化趋势按照部门附属关系的不同分解为不同水平的变化趋势的加和形式,随后 Montaña^[8]等、Esteban^[9]和 Nazara 等^[10]提出了基于空间框架的偏移份额模型,将空间相关性纳入了偏移份额模型之中,中国学者崔功豪等^[11]在前人研究基础上,对模型进行了进一步完善,将一定时间段区域经济增长细分为区域分量、结构分量和竞争分量。该模型已广泛

应用于区域经济增长、市场结构分析、移民分析等研究领域^[12-14]。为探究土壤侵蚀的空间配置差异和时间演变规律,本文引入了区域经济学中的偏移—份额模型,以期揭示退耕还林还草进程中土壤侵蚀强度时空递变规律,从而对延安市水土保持规划与评价、土地资源管理和生态修复等工作方向提供参考,对偏移—份额模型在区域生态学研究领域的适应性进行初步的评估。

1 研究区概况

延安市位于陕西省北部, $35^{\circ}21' - 37^{\circ}31' \text{ N}$, $107^{\circ}41' - 110^{\circ}31' \text{ E}$ 之间,黄土高原中南部,西安以北 371 km。北连榆林,南接关中咸阳、铜川、渭南 3 市,东隔黄河与山西省临汾、吕梁县相望,西邻甘肃省庆阳市(图 1)。延安市属内陆半干旱气候,四季分明,日照充足,昼夜温差大,年均无霜期 70 d,年均气温 $7.7 \sim 10.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年均日照数为 $2\ 300 \sim 2\ 700 \text{ h}$,年均降水量为 500 mm 左右。延安市地处黄河中游,属于黄土高原丘陵沟壑区,地貌以高原、丘陵为主。地势西北高东南低,平均海拔 1 200 m。研究区属于半暖温带向中温带的过渡区域,草原植被广泛分布,林地在地连片分布^[15]。

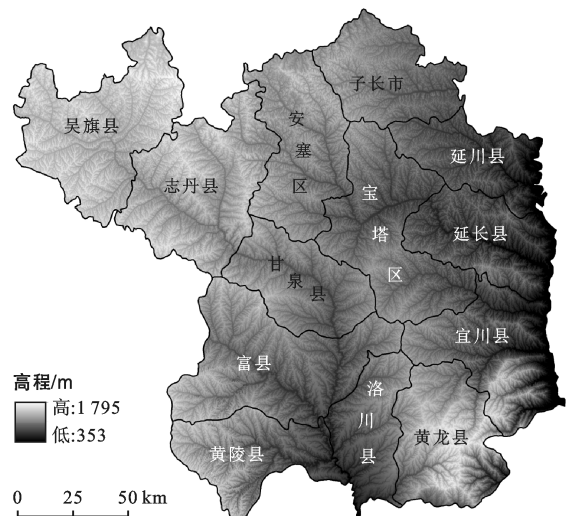


图 1 陕西省延安市地形图

2 材料与方 法

2.1 偏移—份额模型

按照偏移份额模型的基本原理,本研究定义了偏移份额模型在土壤侵蚀强度时空递变规律研究中的数学表达式如下:

$$\Delta X_{ij} = NS_{ij} + IM_{ij} + RS_{ij} \quad (1)$$

式中: ΔX_{ij} 为研究期内子区域 j 第 i 级土壤侵蚀分区面积发生的变化,将这个变化量分解为如下3个部分:

(1) 份额量。份额量(national share) NS_{ij} 代表初期某子区域 j 的 i 级土壤侵蚀强度按照研究区域整体土壤侵蚀强度变化趋势 R 增长所能发生的变化^[16]。其计算方法如下:

$$NS_{ij} = x_{ij}^0 \cdot R \quad (2)$$

$$R = \left(\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M x_{ij}^t \cdot \lambda_i - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M x_{ij}^0 \cdot \lambda_i \right) / \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M x_{ij}^0 \cdot \lambda_i \quad (3)$$

式中: x_{ij}^0 和 x_{ij}^t 分别为研究初期和 t 时间后子区域 j 第 i 级土壤侵蚀的面积,侵蚀程度加权因子 λ_i 代表第 i 级土壤侵蚀的平均侵蚀模数。

(2) 结构性偏移量。结构性偏移量(industry mix) IM_{ij} 代表初期某子区域 j 的 i 级土壤侵蚀强度按照研究区域该级土壤侵蚀分区平均变化趋势 R_i 所能发生的变化与 NS_{ij} 的差值。

$$IM_{ij} = x_{ij}^0 \cdot \lambda_i \cdot (R_i - R) \quad (4)$$

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^M x_{ij}^t - \sum_{j=1}^M x_{ij}^0}{\sum_{j=1}^M x_{ij}^0} \quad (5)$$

(3) 竞争性偏移量。

$$RS_{ij} = x_{ij}^0 \cdot \lambda_i \cdot (R_{ij} - R_i) \quad (6)$$

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}^t - x_{ij}^0}{x_{ij}^0} \quad (7)$$

竞争性偏移量(regional shift) RS_{ij} 代表某子区域 j 的 i 级土壤侵蚀分区的实际变化趋势 R_{ij} 与按研究区域该级土壤侵蚀分区平均变化趋势 R_i 所能发生的变化差值。

偏移份额模型分析的目的是通过对两个地理区域(研究区域与参考区域,通常选择一个地区与国家)经济增长的部门分布进行比较分析^[7],在本研究中将延安市整体作为参考区域,将各县区作为研究区域(子区域),从而对各县区的土壤侵蚀偏移状况展开研究。

根据水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)^[17]中的面蚀(片蚀)分级指标及水力侵蚀强度

分级,按各级侵蚀程度平均侵蚀模数均值确定土壤侵蚀程度加权因子 λ_i 见表1。

表1 土壤侵蚀程度加权因子 λ_i 赋值

侵蚀程度	平均侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	侵蚀程度加权因子 λ_i 取值/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)
微度侵蚀	<1 000	500
轻度侵蚀	1 000~2 500	1 750
中度侵蚀	2 500~5 000	3 750
强烈侵蚀	5 000~8 000	6 500
极强烈侵蚀	8 000~15 000	11 500
剧烈侵蚀	>15 000	15 000

2.2 数据来源及预处理

影像和DEM数据均来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),其中1990—2010年为Landsat 5遥感图像,2015—2020年为Landsat 8遥感图像。各时期遥感图像空间分辨率为30 m×30 m。基于ENVI遥感数字图像处理软件平台,对遥感图像进行辐射校正、FLAASH大气校正、几何校正、图像镶嵌、图像裁剪等预处理,得到1990—2020年7个时期延安市遥感影像,使用ENVI5.1的Band math工具计算延安市1990—2020年共7期遥感影像NDVI和植被覆盖度,采用支持向量机(support vector machine,SVM)监督分类方法,根据国家标准《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017)得到延安地区土地利用类型分布图,遥感图像分类精度达到90%以上,kappa系数大于0.8。DEM数据精度为30 m,通过ArcGIS中的Spatial Analysis模块中的Slope工具直接生成研究区坡度分布图。依据水利部制定的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)^[17]中的面蚀(片蚀)分级指标,对研究区土壤侵蚀状况进行侵蚀强度分级,得到土壤侵蚀强度分级图。

3 结果与分析

3.1 延安市土壤侵蚀强度演变特征

计算得到7期延安市土壤侵蚀分级图,将各期图像各类型侵蚀发生的面积按表1中的加权因子进行加权平均可得,1990—2020年延安市的平均土壤侵蚀模数从最高时的4 071.38 t/(km²·a)下降到2 366.19 t/(km²·a)。分别将每期的各级土壤侵蚀面积进行统计得到图2。横向对比各期土壤侵蚀分级图的各侵蚀级别比例发现:整体侵蚀强度呈先恶化后好转的趋势,在1995年时土壤侵蚀情况最为严重;各时期微度侵蚀面积占比基本不变,均保持在8.43%

水平;轻度侵蚀面积比例从 1990 年时的 39.7% 下降到 1995 年时的 33.9%,之后继续上升,到 2020 年时面积比例增加至 63.6%;中度侵蚀面积比例在 1990 年时为 29.6%,到 1995 年下降到 26.5%,随后继续上升,在 2005 年时达到最高比例,为 35.6%,之后又开始下降,在 2020 年下降到 23.6%的水平;强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的面积占比都呈现先上升后下降的趋势,且都在 1995 年达到最大值 23.4%,7.0%和 0.8%。可见退耕还林还草工程前,土壤侵蚀程度大体上不断加剧,经过 20 a 的退耕还林还草工程,土壤侵蚀明显受到遏制,生态环境得到明显好转。

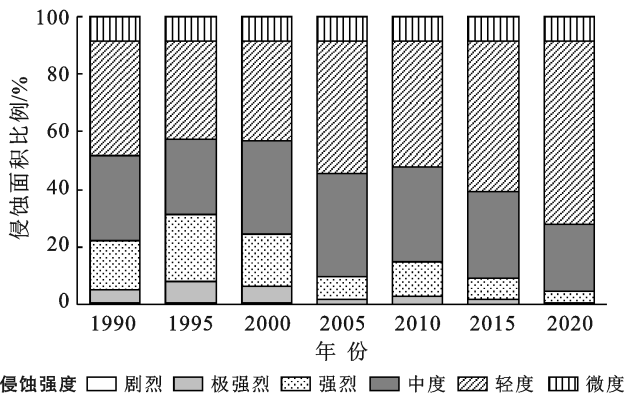


图 2 延安市 1990—2020 年各土壤侵蚀强度分区面积比例

3.2 延安市土壤侵蚀结构的时间偏移特征

由表 2 可知,在 1990—2000 年这段时间内,土壤侵蚀总量上升了 5.4%,侵蚀整体份额呈增加趋势,剧烈侵蚀增量份额为 21.3%,呈显著增长型结构,极强烈侵蚀、强烈侵蚀和中度侵蚀次之,侵蚀份额分别增加了 12.2%,9.2%和 8.3%,该时期内仅轻度侵蚀份额为 -11.8%,为衰退型结构;在 2000—2010 年这段时间内,土壤侵蚀总量下降了 16.3%,土壤侵蚀份额呈显著降低趋势,该时期的剧烈侵蚀、极强烈侵蚀、强烈侵蚀份额都极大降低,侵蚀份额依次降低了 56.3%,50.7%和 36.1%。侵蚀降低的幅度依次减缓,而轻度侵蚀份额上升显著,增加了 25.9%,综合来看,该时间段土壤微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀属于增长性结构,其余程度的侵蚀均属衰退性结构;2010—2020 年,土壤侵蚀强度继续降低,侵蚀总量下降了 25%,降幅比 2000—2010 年更加明显,该时间段轻度侵蚀份额量增加了 44.2%,剧烈侵蚀、极强烈侵蚀、强烈侵蚀和中度侵蚀份额量依次下降了 72.1%,72.6%,70.2%和 27.7%,均属于衰退性结构。

表 2 延安市总体及各级土壤侵蚀变化趋势因子

侵蚀强度	土壤侵蚀变化趋势因子 R		
	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2020 年
微度	0.000	-0.000	-0.000
轻度	-0.118	0.259	0.442
中度	0.083	0.022	-0.277
强烈	0.092	-0.361	-0.702
极强烈	0.122	-0.507	-0.726
剧烈	0.213	-0.563	-0.721
阶段	0.054	-0.163	-0.250

3.3 延安市土壤侵蚀结构的时空偏移特征

将各阶段内各区县的土壤侵蚀变化量除以该阶段内延安市土壤侵蚀变化总量即可得到各阶段各区县土壤侵蚀(恢复)贡献比例(表 3),分析总结延安市退耕还林还草前后土壤侵蚀递变的一般性规律如下:在任何研究阶段内,对土壤侵蚀情况变化影响较大的地区大多集中在延河流域亦即延安市北部,1990—2000 年侵蚀加剧阶段,延长、志丹、延川县和宝塔区分别贡献了侵蚀增加总量的 29.7%,20.4%,14.3%和 12.0%;2000—2010 年退耕还林阶段,延长县、宝塔区、安塞区、志丹县、吴起县分别贡献了侵蚀恢复总量的 16.0%,14.4%,12.5%,10.3%和 10.1%;2010—2020 年,吴起、志丹县、安塞区、子长县分别贡献了侵蚀恢复总量的 25.9%,18.9%,14.3%和 13.7%,同时这些区县在退耕还林还草前耕地面积比例较大;而对土壤侵蚀情况变化影响较小或呈现出相反趋势的地区大多在北洛河流域亦即延安市南部,同时这些区县退耕还林还草前林地面积比例较大。即延安南部的区县对整体土壤侵蚀变化趋势的反应相对迟钝;而延安北部地区则一定程度带动了整体研究区的土壤侵蚀情况变化。

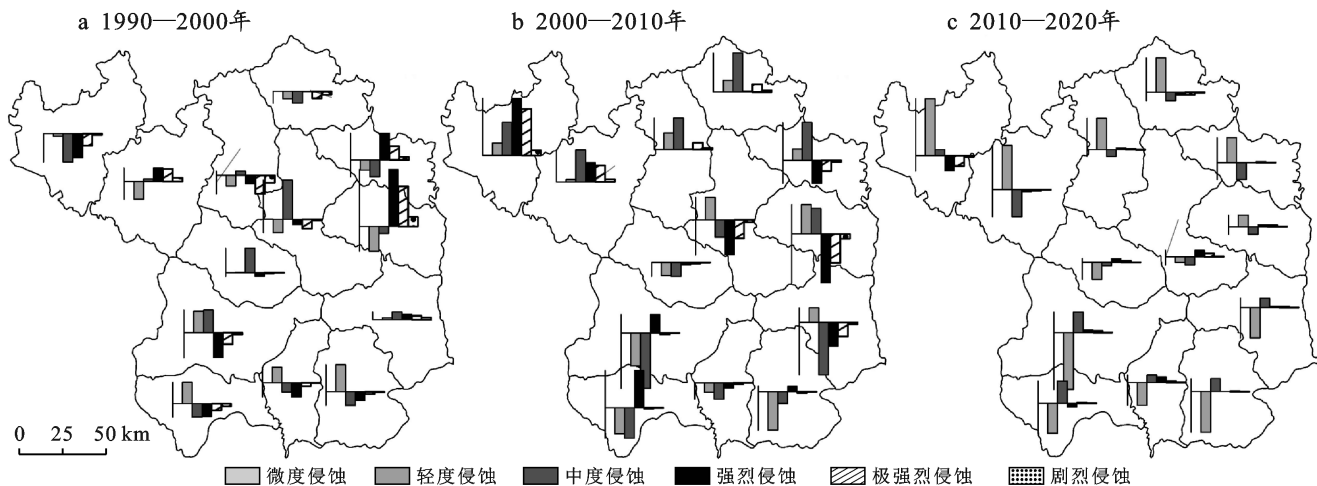
表 3 延安市各区县土壤侵蚀(恢复)贡献比例

行政区划	土壤侵蚀(恢复)贡献比例/%		
	1990—2000 年 (侵蚀加剧阶段)	2000—2010 年 (侵蚀恢复阶段)	2010—2020 年 (侵蚀恢复阶段)
子长市	7.73	9.68	13.71
吴旗县	7.03	10.06	25.95
安塞区	7.48	12.46	14.35
志丹县	20.43	10.28	18.88
延川县	14.34	9.75	8.71
宝塔区	12.02	14.44	6.62
延长县	29.68	15.99	6.85
甘泉县	5.31	3.17	2.36
宜川县	8.12	9.47	1.46
富县	-1.46	2.71	0.56
洛川县	-3.32	2.04	-0.53
黄龙县	-2.84	0.63	0.12
黄陵县	-4.54	-0.71	0.97

对各级土壤侵蚀的偏移量展开讨论,发现主要由轻度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀3种土壤侵蚀水平的变化影响整体土壤侵蚀情况的变化。而且土壤强烈侵蚀的偏移份额比与土壤极强烈侵蚀、土壤剧烈侵蚀的偏移份额比分布特征具有很强的一致性;土壤中度侵蚀作为侵蚀程度的“缓冲地带”,其偏移量所表现出的效应一定程度上可以用来表征该地区的土壤侵蚀形势。

从各地区各侵蚀程度的竞争性偏移量(图3)来看,各竞争性偏移量的分布能很好地解释各地区对土壤侵蚀的贡献。在1990—2000年期间,延安市平均土壤侵蚀模数从 $3\ 579.42\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 上升到1995年的 $4\ 071.38\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,后又下降至 $3\ 773.14\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,微度侵蚀上的竞争性偏移量差异不大,轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀的竞争性偏移量分布则有明显的地带差异,延安南部的富县、黄龙、黄陵、洛川的轻度侵蚀竞争性偏移量依次为 $521\ 768, 415\ 060, 411\ 979, 296\ 052\ \text{t}$,且这些区县的竞争性偏移量随侵蚀程度的增加逐渐变为负值,体现了延安南部区县对土壤侵蚀程度恶化的贡献较小,甚

至表现出负贡献,而延安北部的延长、延川、志丹县的轻度侵蚀竞争性偏移量依次为 $-479\ 728, -200\ 192, -342\ 655\ \text{t}$,且这些区县的竞争性偏移量随侵蚀程度的上升骤增为正值,表明以这些区县为代表的延安北部地区是该时期土壤侵蚀程度恶化的主要贡献者;在2000—2010年期间,延安市的土壤侵蚀程度开始好转,平均土壤侵蚀模数从 $3\ 773.14\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 下降至 $3\ 156.54\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,其中恢复成效最好的延长、宝塔区、安塞的轻度侵蚀竞争性偏移量依次为 $647\ 229, 496\ 641, 360\ 925\ \text{t}$,且这些区县的竞争性偏移量随侵蚀程度的上升出现了不同幅度的下降,印证了这些区县在这一时期对延安市土壤侵蚀情况的好转做出了贡献;在2010—2020年,延安市的土壤侵蚀程度进一步好转,平均土壤侵蚀模数从 $3\ 156.54\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 下降到 $2\ 366.19\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,恢复成效较好的吴旗、志丹、子长等北部区县的轻度侵蚀竞争性偏移量依次为 $2\ 369\ 050, 1\ 843\ 364, 1\ 438\ 846\ \text{t}$,与前一阶段一致,这些区县的竞争性偏移量随侵蚀程度的上升出现了不同幅度的下降,表现出对土壤侵蚀好转的贡献。



注:图中各柱状图代表该阶段内各侵蚀程度竞争性偏移量比例。

图3 3个时期延安市各区县土壤侵蚀竞争性偏移量分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 延安市发生土壤侵蚀的情况以及退耕还林的措施及配置上存在一定的差异性,北部地区以退耕还草为主,南部地区以还林育林为主,延安市北部的植被覆盖度增加显著抑制了土壤侵蚀,在空间规律上与包玉斌等^[18]、朱青等^[19]的研究结果一致;同时林地、耕地和不同覆盖度的草地彼此之间的比例结构也会随着恢复植被的生长年限而改变,这是延安市推行退耕还林还草工程之后土壤侵蚀情势发生两次阶段性变化的主要原因,薛亚永等^[20]的研究也揭示了随

着植被覆盖度的增大,单位面积土壤保持量呈增加趋势;同时也需要考虑到城市化、经济建设等人为因素对这个过程的影响,以能够对延安市部分区县出现的不同偏移表现进行解释,如朱青等^[19]的研究表明在延河流域中游存在城市化快速增长导致植被退化的问题,刘文超等^[21]的研究表明在延安市中南部的个别地区,耕地减少造成土壤侵蚀模数少量增加的主要原因是耕地的撂荒。

(2) 作为新引入的方法,偏移份额模型可以为我们提供一种新的视角,本研究借助偏移份额模型探究了延安各区县在退耕还林还草工程前后对土壤侵蚀情况的偏移效应,但是该模型仍然存在诸多问题:首

先,无法客观地对研究时期进行划分,偏移一份额模型的定义上只存在基期和初期,是一种双时相的分析方法,对于多期甚至是连续的时域,其使用方法有待进一步改良。其次,偏移份额模型在量化各子区域的竞争性偏移量时,缺少对于各子区域体量和基数等本底情况的考量,所得到的竞争性偏移量往往是绝对而非相对的。最后,偏移份额模型作为区域经济学的模型,其引入后的生态学意义需要解释和扩展,在本研究中人为地指定了各种程度土壤侵蚀的土壤侵蚀模数,并用这个参数重新定义了偏移份额模型的数学表达式,但如此定义出的偏移份额模型表达式存在精度不够的问题,且如何解释具体的偏移效应仍有待进一步的研究。

4.2 结论

(1) 在整体上,1990—2020年延安市的平均土壤侵蚀模数从最高时的 $4\,071.38\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 下降到 $2\,366.19\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,各时期平均土壤侵蚀模数估算结果与陈楚群^[22]、李天宏^[23]等、高海东^[24]等的研究成果在数值上近似。在1995年土壤侵蚀情况最为严重,总体以2000年为拐点,土壤侵蚀状况逐渐好转。各时期微度侵蚀面积比例均保持在8.34%水平;轻度侵蚀面积比例从1990年时的39.7%下降到1995年时的33.9%,之后继续上升至2020年时的63.6%,始终是面积比例最大的侵蚀程度;中度侵蚀面积比例次之;强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的面积比例都呈现先上升后下降的趋势。该区土壤侵蚀程度主要为轻度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀。

(2) 延安市在1990—2000年退耕还林工程前期,侵蚀整体份额呈增加趋势,仅轻度侵蚀为衰退型结构,其余侵蚀程度皆为增长型结构,土壤侵蚀总量上升了5.4%;在2000—2010年退耕还林工程初期土壤微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀属于增长性结构,其余程度的侵蚀均属衰退性结构,土壤侵蚀总量下降了16.3%;2010—2020年退耕还林工程推进期,除轻度、微度侵蚀外,均属衰退型结构,侵蚀强度降幅更加明显,土壤侵蚀总量下降了25%。

(3) 延安市的土壤侵蚀递变情势整体表现为北部剧烈、南部缓和。南部区县林地储备面积大,在侵蚀加剧阶段土壤侵蚀变化情势表现相对较为稳定;北部区县耕地面积比例大,土壤侵蚀变化情势表现相对剧烈;中部区县为森林—草原过渡带,又为主要市县城区所在地,土壤侵蚀递变情势表现相对较为缓和。在退耕还林还草工程初期,植被群落恢复速率较慢,植被覆盖度等级从低和中低向中低和中植被覆盖度等级过渡较为明显,土壤侵蚀得到初步遏制,各区县

对土壤侵蚀好转的贡献仍呈现出北高南低的趋势。在2010—2020年,退耕还林地、草地发育已逐渐成熟,植被由中低和中植被覆盖度等级过渡到中高和高覆盖度水平,迎来了植被恢复的红利窗口期,土壤侵蚀程度显著降低,且贡献率依然表现出北高南低的特点。纵观整个研究阶段,延安市土壤侵蚀趋势的变化都表现出局部变化带动整体的特征。

[参考文献]

- [1] 雷波. 黄土丘陵区生态脆弱性演变及其驱动力分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- [2] 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[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2167-2176.
- [3] 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[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.
- [4] 郭建英. 吴起县退耕还林工程效益的监测与评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [5] 黄婷婷, 史扬子, 曹琦, 等. 黄土高原六道沟小流域近30年来土壤侵蚀变化评价[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 8-17.
- [6] 黑哲, 王飞, 韩剑桥, 等. 退耕还林(草)以来陕北白于山区植被覆盖与土壤侵蚀强度变化[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 39-46.
- [7] Dunn Jr E S. A statistical and analytical technique for regional analysis [J]. Papers in Regional Science, 1960, 6(1): 97-112.
- [8] Montaña C V, Márquez M A, Fernández-Núñez T, et al. Spatial shift-share analysis: Some new developments [J]. Papers in Regional Science, 2021, 100(2): 305-325.
- [9] Esteban J. Regional convergence in Europe and the industry mix: A shift-share analysis [J]. Regional Science and Urban Economics, 2000, 30(3): 353-364.
- [10] Nazara S, Hewings G J D. Spatial structure and taxonomy of decomposition in shift-share analysis [J]. Growth and Change, 2004, 35(4): 476-490.
- [11] 崔功豪, 魏清泉. 区域分析与规划[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [12] Pizzuto P. The role of regional competitiveness in shaping the heterogeneous impact of the Great Recession [J]. Regional Science Policy & Practice, 2020, 12(2): 267-290.
- [13] Ray D M, Hall P G, O'Donoghue D P. The elusive quest for balanced regional growth from Barlow to Brexit: Lessons from partitioning regional employment growth in Great Britain [J]. Growth and Change, 2019, 50(1): 266-284.
- [14] Meng Guanfei, Guo Zhi, Li Jianglong. The dynamic linkage among urbanisation, industrialisation and car-

- bon emissions in China: Insights from spatiotemporal effect [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 760:144042.
- [15] 张琨,吕一河,傅伯杰.黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J].*生态与农村环境学报*,2017,33(1):23-31.
- [16] 赵瑜嘉,贺灿飞,王伟凯.基于偏移一份额模型的中国制造业空间格局变化解释[J].*地理与地理信息科学*,2013,29(3):76-81.
- [17] 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.
- [18] 包玉斌,黄涛,吕林涛.陕北黄土高原实施退耕还林还草工程后的土壤保持效应[J].*宁夏大学学报(自然科学版)*:2021,42(3):1-8.
- [19] 朱青,周自翔,刘婷,等.黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究:以延河流域为例[J].*生态学报*,2021,41(7):2557-2570.
- [20] 薛亚永,王晓峰.黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估[J].*干旱地区农业研究*,2017,35(5):122-128.
- [21] 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.
- [22] 陈楚群.土壤侵蚀量多因子灰色模型的建立与应用:以陕北典型小流域为例[J].*水土保持学报*,1991,5(1):27-32.
- [23] 李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J].*自然资源学报*,2012,27(7):1164-1175.
- [24] 高海东,李占斌,李鹏,等.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[J].*地理学报*,2015,70(9):1503-1515.