

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.033.

路志强, 魏霞, 阿克俭. 蒲河流域退耕前后降水和植被对土壤侵蚀变化的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 7-12.

LU Zhiqiang, WEI Xia, AN Kejian. Influence of Precipitation and Vegetation on Erosion Change Before and After Grain for Green Project in Puhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 7-12.

蒲河流域退耕前后降水和植被对土壤侵蚀变化的影响

路志强, 魏霞, 阿克俭

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:为了定量评价退耕还林还草前后蒲河流域土壤侵蚀变化特征及降水和植被对土壤侵蚀的影响,运用修正后的通用土壤流失方程(RUSLE模型)探讨1990—2019年流域土壤侵蚀变化,结合LMDI模型评估了1990—2000年、2000—2010年、2010—2019年3个时间段植被和降水对流域土壤侵蚀变化的影响。结果表明:30年来,流域侵蚀强度以微度和轻度侵蚀为主,而中度及以上等级的土壤侵蚀面积有逐渐减小的趋势;流域侵蚀情况总体持续向好,植被覆盖度与降雨侵蚀力相互作用驱动了研究区土壤侵蚀的动态发展;2000年以前,降水是影响土壤侵蚀变化的主导因素,随着退耕还林还草工程的实施,植被作用逐渐凸显。蒲河流域的退耕还林还草成效显著,是流域侵蚀防治的有效措施,应在侵蚀较强的流域中上游地区继续加强植被恢复措施。

关键词:土壤侵蚀;退耕还林还草;LMDI模型;蒲河流域

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0007-06

Influence of Precipitation and Vegetation on Erosion Change Before and After Grain for Green Project in Puhe River Basin

LU Zhiqiang, WEI Xia, AN Kejian

(College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the change characteristics of soil erosion and the effects of precipitation and vegetation on soil erosion in Puhe River Basin before and after Grain for Green Project, we used the revised universal soil loss equation (RUSLE) model to assess soil erosion in Puhe River Basin and analyzed its dynamic changes from 1990 to 2019. Combined with LMDI model, we studied the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in this basin from 1990 to 2000, 2000 to 2010 and 2010 to 2019 at the pixel scale. The results show that: over the past 30 years, the erosion intensity of the basin was mainly micro and mild erosion, while the soil erosion area of medium and above levels tended to decrease gradually; the overall erosion situation of the basin continued to improve, the interaction between vegetation coverage and rainfall erosivity drove the dynamic development of soil erosion in the study area; before 2000, rainfall was the dominant factor affecting the change of soil erosion; with the implementation of the Grain for Green Project, the role of vegetation became more and more prominent. The research shows that the Grain for Green Project in Puhe River Basin has achieved remarkable results, which is an effective measure for erosion control and the vegetation restoration project should continue to be strengthened in the middle and upper reaches of this basin.

Keywords: soil erosion; Grain for Green Project; LMDI model; Puhe River Basin

收稿日期:2022-01-14

修回日期:2022-02-14

资助项目:国家自然科学基金(51679115);兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基本科研业务费专项基金(lzujbky-2018-kb01)

第一作者:路志强(1997—),男,山西运城人,在读硕士研究生,研究方向为水文及水资源、土壤侵蚀与水土保持。E-mail:973414685@qq.com

通信作者:魏霞(1980—),女,陕西扶风人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文学及水资源学研究。E-mail:weix@lzu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

土壤侵蚀是全球性的生态环境问题,会导致水体污染,土地生产力和蓄水能力下降,生态环境恶化,最终威胁到人类的生存与发展^[1-3]。作为制定水土保持规划和维护生态安全的基础,土壤侵蚀研究在世界范围内受到广泛关注^[4]。流域土壤侵蚀时空变化及其影响因素研究,可为土壤侵蚀防治和生态环境保护政策制定提供科学依据。

土壤侵蚀主要受植被、降水、土壤性质、地形和人类活动等因素的影响^[5-8],其中任一因素的变化都会对土壤侵蚀产生不同程度的影响。研究表明,虽然土壤类型和地形对土壤侵蚀影响较大,但总体上比较稳定^[9-11],短期内土壤侵蚀的变化主要由降雨和植被变化驱动^[1,11-15]。然而,由于降水、植被和土壤侵蚀之间的相互作用,它们的关系复杂且不确定。传统的土壤侵蚀影响因素研究方法,如主成分分析法、回归分析法和相关系数法^[16]并不能量化地给出影响因子对土壤侵蚀的作用程度^[17]。LMDI 模型(Logarithmic Mean Divisia Index model)是一种广泛应用的驱动力分析模型,被应用于评估不同影响因素对研究对象的影响程度,可量化不同影响因素对目标变量的贡献^[18]。近两年,该模型被引入土壤侵蚀研究,用以量化植被和降雨对土壤侵蚀变化的贡献程度^[16,19-20]。

黄河流域幅员辽阔,地形、气候差异显著,加之气候变化和人类活动的影响^[21],不同地区不同历史时期土壤侵蚀特征及主要影响因素也有所不同^[20]。陇东黄土高原的蒲河地处黄河中游的多沙粗沙重点区,是黄河水系泾河的一级支流,也是黄河流域水土保持生态工程建设 11 条重点支流之一,流域生态环境脆弱,水土流失严重。鉴于此,本研究基于 RUSLE 模型和 LMDI 模型分别计算蒲河流域 1990—2019 年的土壤侵蚀模数,分析土壤侵蚀强度的时间变化规律和空间分布格局,评估植被和降水对流域土壤侵蚀变化的贡献,以期揭示蒲河流域 30 年来的土壤侵蚀的动态变化特征及不同时期降雨和植被对土壤侵蚀变化的影响,研究可为蒲河流域水土流失治理和生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

蒲河流域地跨甘肃宁夏两省,地理坐标为 35°19′59″—36°30′13″N,106°11′38″—107°46′22″E,流域面积约 7.48×10³ km²,海拔 927~2 908 m。流域气候属温带大陆性气候,气候南北差异明显,地域性气候差异较大,年平均温度 7.5~9.5℃,无霜降期为 140~180 d,年降水量 450~600 mm,时空分布不均,主要集中在汛期的 7—9 月。流域地质构造相对复杂,地

形崎岖,地表起伏变化明显,地势呈西北向东南倾斜,该区生态环境脆弱,农业生产条件差,群众生产、生活水平低下,水土流失严重。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

数据主要包括植被、土壤、降雨、土地利用、地形数据:

(1) 植被数据。来源于中国科学数据网的中国区域 Landsat 遥感指数产品^[22],经过去除背景值,拼接等处理后,计算得到植被覆盖度,从而得到植被覆盖因子;(2) 土壤数据。来源于 1:100 万土壤数据库。经过格式转换等处理得到研究区的土壤数据;(3) 降雨数据。来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);包括研究时段内蒲河流域及周围共 11 个气象站点的日降雨量,由各站点降雨数据插值得到降雨量空间分布,从而计算降雨侵蚀力因子。(4) 土地利用数据;来源于 Yang 等^[23]公开发表的中国土地覆盖数据集,重分类赋值后,利用栅格计算器计算水土保持措施因子。(5) 地形数据;来源于地理空间数据云平台(<http://www.Gscloud.cn/>),基于 DEM 数据,提取坡度、坡长因子。

2.2 研究方法

本文采用 RUSLE 模型计算流域侵蚀量,结合 LMDI 模型量化降水、植被对土壤侵蚀变化的贡献,定量区分不同时期降雨和植被对土壤侵蚀变化的影响。

2.2.1 RUSLE 模型 RUSLE 模型的计算公式为:

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

式中:A 为土壤侵蚀模数[t/(km²·a)];R 为降雨侵蚀力因子;K 为土壤可侵蚀性因子;L 为坡长因子;S 为坡度因子;C 为植被覆盖因子;P 为水土保持措施因子;

(1) 降雨侵蚀力(R):采用章文波等^[24]提出的基于日降雨资料的年降雨侵蚀力简易算法;

(2) 土壤可侵蚀性因子(K):采用 Williams 等^[25]提出的 EPIC(the erosion-productivity impact calculator)模型,该方法主要考虑了土壤类型、机械构成及有机质含量;

(3) 坡度坡长因子(LS):由符素华等^[26]提出的适合中国区域的计算方法得到;

(4) 植被覆盖因子(C):采用蔡崇法等^[27]建立的 C 因子与植被覆盖度(f_c)的关系式来计算流域的 C 因子;

(5) 水土保持措施因子(P):参考前人在相近地区的研究成果^[28-29],将耕地、草地和林地的 P 值分别赋为 0.31,0.16,0.05;建设用地和水域一般未采取水

水土保持措施,赋值为 1。

2.2.2 LMDI 模型 LMDI 模型计算公式如下:

$$V=\sum_{i=1}^nV_i=\sum x_{1,j}x_{2,j}\cdots x_{n,j}\tag{2}$$

式中: V 为目标量; V_i 为导致目标量发生变化的次级变量,设为 n 个; $x_{n,j}$ 为 V_i 的第 n 个指标量, $i=1,2,\cdots,n$ 。

$$\Delta V_{\text{tot}}=V^T-V^0=\Delta V_{x_1}+\Delta V_{x_2}+\cdots+\Delta V_{x_n}\tag{3}$$

式中: ΔV_{tot} 为目标变量的总变化量; V^0 为基准期 0 的目标变量; V^T 为计划期 T 的目标变量; $\Delta V_{x_k}(k=1,2,3,\cdots,n)$ 为与各自因素相关的目标变量的差异。

$$\begin{aligned}\Delta V_{x_k}&=\sum_{i=1}^nL(V_i^T,V_i^0)\ln(\frac{x_{k,i}^T}{x_{k,i}^0})\\&=\sum_{i=1}^n\frac{V_i^T-V_i^0}{\ln V_i^T-\ln V_i^0}\ln(\frac{x_{k,i}^T}{x_{k,i}^0})\end{aligned}\tag{4}$$

$$L(a,b)=\begin{cases}\frac{a-b}{\ln a-\ln b} & a\neq b\\a & a=b\end{cases}\tag{5}$$

式中: ΔV_{x_k} 为第 k 个因子对目标变量 V 的贡献; $x_{k,i}^0$ 为基准期的第 k 个因子的值; $x_{k,i}^T$ 为计划期第 k 个因子的值; $L(a,b)$ 为 a 和 b 的对数平均值。

2.2.3 植被及降水对土壤侵蚀的影响评估 定量分析植被覆盖(C 因子)和降雨侵蚀力(R 因子)对土壤侵蚀变化的贡献值。方程如下:

$$\begin{aligned}\Delta A_C&=\sum_{i=1}^nL(A_i^m,A_i^n)\ln(\frac{C_{k,i}^m}{C_{k,i}^n})\\&=\sum_{i=1}^n\frac{A_i^m-A_i^n}{\ln A_i^m-\ln A_i^n}\ln(\frac{C_{k,i}^m}{C_{k,i}^n})\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}\Delta A_R&=\sum_{i=1}^nL(A_i^m,A_i^n)\ln(\frac{R_{k,i}^m}{R_{k,i}^n})\\&=\sum_{i=1}^n\frac{A_i^m-A_i^n}{\ln A_i^m-\ln A_i^n}\ln(\frac{R_{k,i}^m}{R_{k,i}^n})\end{aligned}\tag{7}$$

式中: $\Delta A_C,\Delta A_R$ 分别为 C 因子和 R 因子对土壤侵蚀的贡献值 $[\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$; A_i^m 为 m 年土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$; A_i^n 为 n 年土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$; $C_{k,i}^m$ 为 m 年植被覆盖系数, $C_{k,i}^n$ 为 n 年植被覆盖系数;当 $\Delta A_C>0$ 时, C 因子加剧了土壤侵蚀,当 $\Delta A_C<0$ 时, C 因子减小了土壤侵蚀。 $R_{k,i}^m$ 为 m 年降雨侵蚀力因子, $R_{k,i}^n$ 为 n 年降雨侵蚀力因子;当 $\Delta A_R>0$ 时, R 因子加剧了土壤侵蚀,当 $\Delta A_R<0$ 时, R 因子减小了土壤侵蚀。

C 因子和 R 因子对土壤侵蚀变化影响的评价标准参照 Wu 等^[20]提出的方法(表 1)。

3 结果与分析

为了评估蒲河流域退耕还林还草工程实施以来

侵蚀变化情况及分析降水植被对其影响,本文将蒲河流域侵蚀动态变化分为 3 个阶段分析:1990—2000 年退耕还林还草工程实施之前 10 a,2000—2010 年退耕还林还草工程实施初期 10 a,2010—2019 年退耕还林还草工程实施 20 a。

表 1 C 因子和 R 因子对土壤侵蚀变化的评价标准

ΔA	ΔA_C	ΔA_R	说明
	>0	>0	C 因子与 R 因子共同加剧了土壤侵蚀(ISECR)
>0	>0	<0	C 因子加剧了土壤侵蚀(ISEC)
	<0	>0	R 因子加剧了土壤侵蚀(ISER)
	<0	<0	C 因子与 R 因子共同减小了土壤侵蚀(DSECR)
<0	<0	>0	C 因子减小了土壤侵蚀(DSEC)
	>0	<0	R 因子减小了土壤侵蚀(DSER)

3.1 流域降雨侵蚀力和植被覆盖度的变化

由于已有研究表明土壤类型和地形地貌对土壤侵蚀影响总体上比较稳定,短期内土壤侵蚀的变化主要由降雨和植被变化驱动,因此本文主要分析讨论降雨和植被对流域土壤侵蚀的影响。

通过对蒲河流域平均土壤侵蚀强度、植被、降水变化的分析(图 1),初步评估植被、降水对土壤侵蚀的影响。总体而言,1990—2019 年,随着退耕还林还草工程的有效实施,植被覆盖度得到了提高,土壤侵蚀强度有所下降,但由于暴雨的年际差异,1990—2019 年蒲河流域土壤侵蚀状况改善并不明显。

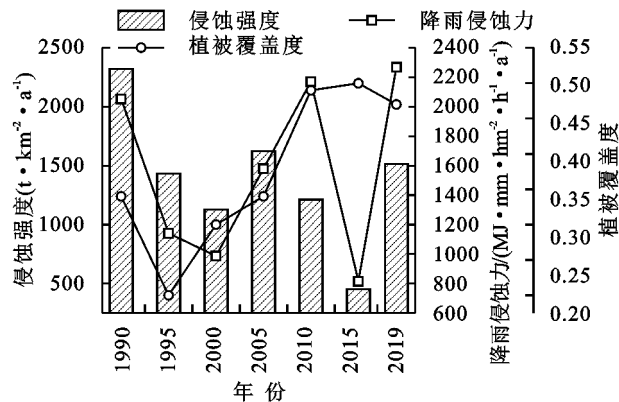


图 1 年均侵蚀强度,植被覆盖度,降雨侵蚀力变化

由图 1 可知,在第一阶段(1990—2000 年),年降雨侵蚀力持续下降,由 1990 年的 $2\,053.48\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 降至 2000 年的 $986.94\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。植被覆盖度不高且在 $0.2\sim0.34$ 波动变化,侵蚀状况却持续向好,表明该阶段植被的波动变化对侵蚀强度影响较小,降水为侵蚀强度减小的主因;在第二阶段(2000—2010 年),年降雨侵蚀力持续上升,至 2010 年升至研究期内最大值 $2\,171.64\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,而随着退耕还林还草工程的大力开展,植被盖度持续增加,由 2000 年的 0.3,至 2005 年的 0.34,2010 年的 0.49。和第一阶段显著不同的

是,第二阶段的年均侵蚀强度与年降雨侵蚀力在 2005—2010 年不再呈现相同的变化趋势,可能是随着植被的恢复,部分降雨侵蚀力导致的侵蚀强度的增大被抵消;在第三阶段(2010—2019 年),植被与降水均呈波动变化,分别为 $0.47\sim 0.50$, $816.13\sim 2\,270.00$ $\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。与前两个阶段不同的是,植被覆盖度已经处于相对高位,侵蚀状况应当是在植

被与降雨的影响下起伏变化。

3.2 蒲河流域 1990—2019 年土壤侵蚀的时空变化

根据《土壤侵蚀强度分类分级标准(SL190—2007)》^[30],将蒲河流域的土壤侵蚀强度划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈 6 个级别,形成蒲河流域土壤侵蚀强度等级时空分布图及侵蚀等级变化图,分别见图 2—3。

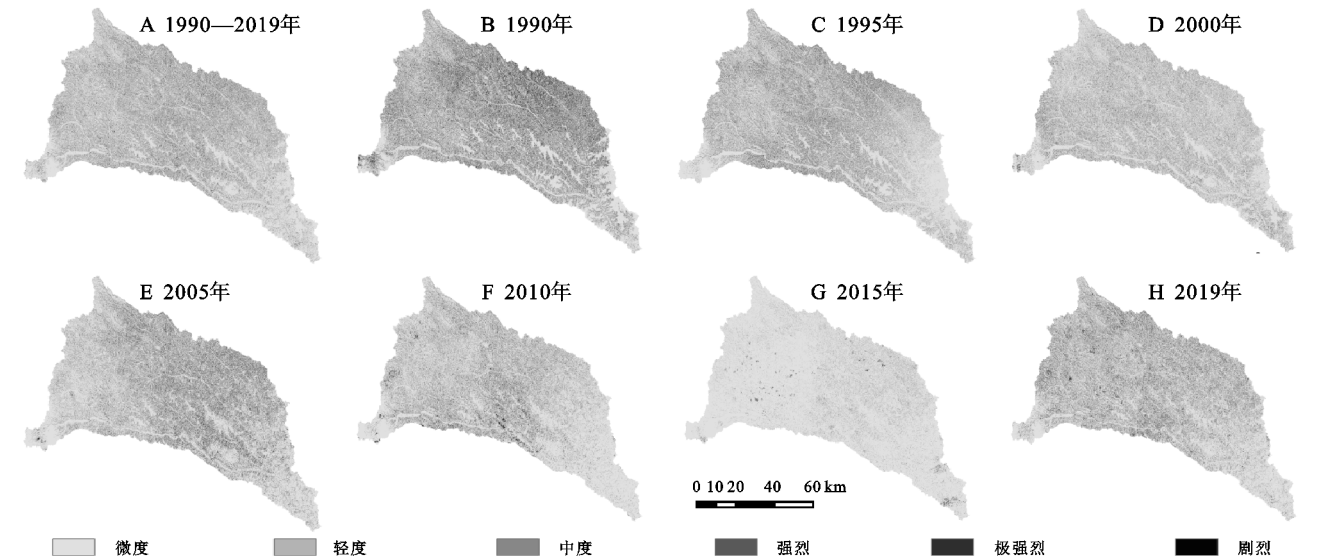


图 2 蒲河流域侵蚀强度等级时空分布

由图 2A 可知,1990—2019 年期间蒲河流域平均土壤侵蚀模数为 $1\,384.06\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,属于轻度侵蚀;1990—2019 年流域土壤侵蚀整体上以微度、轻度和中度为主,不同等级土壤侵蚀模数在面积和空间分布上存在显著差异。微度侵蚀区主要分布在流域下游和中上游部分地区,占总面积的 53.60% 。轻度和中度侵蚀主要分布在流域中上游,分别占总面积的 26.98% , 15.66% 。

不同区域的土壤侵蚀程度随着时间的变化具有差异性,强度等级也有所变化,尤其是流域中上游地区,而下游地区虽然土壤侵蚀强度也呈现起伏变化,但总体下游地区始终以微度侵蚀为主。然而,在整个研究区域,微度、轻度和中度的侵蚀形式仍然普遍存在,详见图 2—3。

1990—2000 年,即第一阶段(图 2B,C,D),流域土壤侵蚀强度整体呈减小趋势,侵蚀模数由 1990 年的 $2\,320.24\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 降低到 1995 年的 $1\,433.44\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,2000 年的 $1\,128.30\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,减小幅度为 51.38% ,主要表现为中度及以上侵蚀程度向微度和轻度的变化。微度侵蚀占比由 1990 年的 46.20% 增加至 2000 年的 60.77% ;轻度侵蚀占比由 1990 年的 20.88% 增至 2000 年的 26.11% ,主要是上游和中游地区侵蚀的改善;2000—2010 年,即第二阶段(图

2D,E,F),流域土壤侵蚀强度与第一阶段相比,土壤侵蚀状况得到了一定改善,但存在波动变化,主要以中游地区及上游部分地区侵蚀的起伏变化为主。侵蚀模数以 2000 年最小,为 $1\,128.30\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$;2005 年最大,为 $1\,625.00\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。侵蚀等级表现为轻度侵蚀向轻度之外侵蚀等级的转变,轻度侵蚀占比则表现为持续减小,由 2000 年的 26.11% 变化为 2010 年的 20.97% ;2010—2019 年,即第三阶段(图 2F,G,H),流域侵蚀状况于 2015 年达到研究期最好,侵蚀模数为 $452.89\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,整体达到微度侵蚀的水平,中度及以上侵蚀等级占比仅为 2.08% ,但在 2019 年流域中上游地区又出现侵蚀加剧的情况,侵蚀模数为 $1\,515.44\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

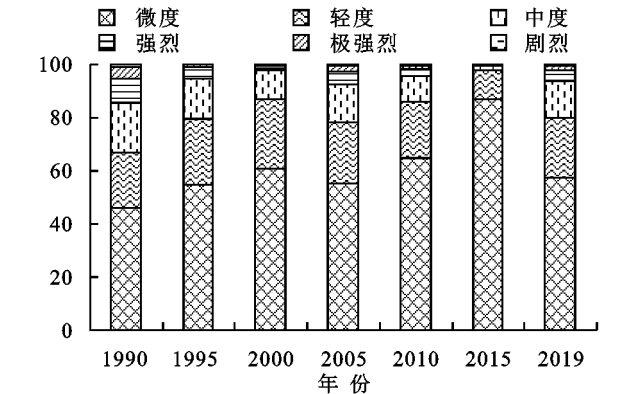


图 3 蒲河流域侵蚀等级变化

3.3 不同时期降雨和植被影响的定量区分

基于 LMDI 模型和 C 因子和 R 因子对土壤侵蚀变化影响的评价标准参照表 1, 定量区分了 30 年来降雨侵蚀力和植被覆盖度对蒲河流域土壤侵蚀的影响。由图 4A 可知, 综合来看 30 年来土壤侵蚀减小占流域面积的 58.67%, 其中由 C, R 因子共同作用 (DSECR) 的占到了侵蚀减小面积的 77.12%, 主要分布在流域上游地区及中游地区的北部, 由 R 因子单独作用 (DSER) 的占到了侵蚀减小面积的 22.87%,

分布在流域中上游部分地区, 仅有不到 0.01% 的地区侵蚀减小是由于 C 因子单独作用 (DSEC)。土壤侵蚀增加占流域面积的 16.67%, 主要由 C 因子 (ISEC) 引起, 主要分布在流域下游及中游地区的南部。

考虑到气候变化和该地区人类活动增加的影响, 不同历史时期降雨和植被对土壤侵蚀变化的影响也存在显著差异。本研究定量区分了 3 个阶段的降雨侵蚀力和植被覆盖度对蒲河流域土壤侵蚀的影响 (图 4B, C, D)。

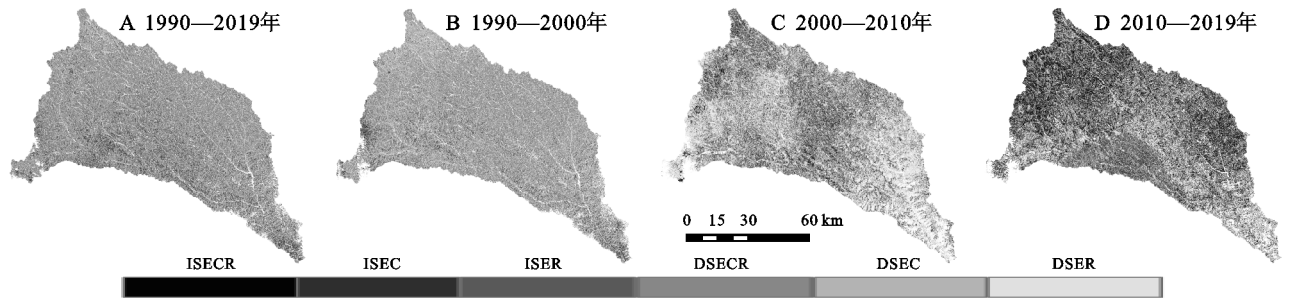


图 4 C 因子和 R 因子对土壤侵蚀变化的影响

1990—2000 年 (即第一阶段, 图 4B), 流域 11.97% 的地区土壤侵蚀增加, 分布在流域南部, 主要由 C 因子导致。62.64% 的地区土壤侵蚀减小, 分布在流域北部, 其中由 C, R 因子共同作用的占侵蚀减小面积的 54.81%, 由 R 因子单独作用的占 45.17%; 2000—2010 年 (即第二阶段, 图 4C), 流域 37.19% 的地区土壤侵蚀增加, 主要位于流域中游及上游部分地区, 其中 71.67% 由 R 因子导致, 28.33% 由 C, R 因子共同作用。35.63% 的地区土壤侵蚀减小, 分布在流域上下游地区, 主要由 C 因子引发, 占比为 99.16%。0.84% 为 R 因子单独作用; 2010—2019 年 (即第三阶段, 图 4D), 流域 48.34% 的地区土壤侵蚀增加, 主要位于流域上游及下游大部分地区, 其中由 C, R 共同作用占比 77.05%, 由 R 因子单独作用占比 13.16%, 由 C 因子单独作用占比 9.79%。21.98% 的地区土壤侵蚀减小, 主要位于流域中游地区, 其中由 C 因子单独作用占比 85.44%, 由 C, R 因子共同作用占比 13.21%, 1.35% 由 R 因子单独作用。

4 讨论

(1) 不同时期流域土壤侵蚀变化的特点分析。30 年来, 蒲河流域土壤侵蚀强度呈一定下降趋势, 但不同时期的侵蚀变化呈现不同的特点。在第一阶段 (即退耕还林还草工程实施之前), 流域土壤平均侵蚀强度同降雨侵蚀力的波动变化一致; 在第二阶段, 工程实施之后, 侵蚀强度有所降低, 2005—2010 年年均

侵蚀强度与降雨侵蚀力不再呈现相同的变化趋势; 在第三阶段, 植被覆盖度已经处于较高水平, 该地区 2015 年遭遇了严重干旱, 加之植被覆盖度已经处于研究期内最高水平, 该年土壤侵蚀强度为研究期最小。同时由于 2019 年度降雨侵蚀力为研究期最大, 同时植被覆盖度也由 2015 年的 0.50 降至 2019 年的 0.47, 因此出现了侵蚀加剧的情况。

30 年平均来看, 流域侵蚀向好主要由植被和降水共同驱动, 这说明退耕还林还草工程在流域上是卓有成效的, 而下游地区的侵蚀恶化是植被因素引发的, 这是由于该地区作为流域出口, 水资源丰富, 植被盖度处于高位, 在该评判准则下其波动变化表现为侵蚀情况的恶化, 实际侵蚀在研究期内始终处于微度侵蚀状态。

(2) 不同时期流域土壤侵蚀变化的主要影响因素。在第一阶段, 在年降雨侵蚀力持续减小的影响下, 流域土壤侵蚀整体呈持续向好的态势, 植被盖度处于低位且在 0.2~0.34 波动变化, 降水为该时期流域土壤侵蚀减小的主导因素; 在第二阶段, 退耕还林还草工程初见成效, 降水为侵蚀增加的主导因素, 植被为土壤侵蚀减小的主导因素, 表明随着植被的恢复, 抵消了一部分降雨侵蚀力造成的侵蚀强度增大, 植被的作用逐渐增大; 在第三阶段, 植被对土壤侵蚀的作用进一步提升, 随着工程实施年份的增加, 流域侵蚀增加由植被降水共同主导, 侵蚀减小由植被主导。

5 结论

(1) 30 年来, 流域平均土壤侵蚀模数为 1 384.06

$t/(km^2 \cdot a)$,属轻度侵蚀。在不同的侵蚀等级中,微度和轻度的侵蚀占比最高(67.08%~97.92%),而中度及较高等级的土壤侵蚀区域随着时间的推移逐渐向低等级转移。其中微度侵蚀区主要分布在流域下游,轻度和中度侵蚀区主要分布在流域中上游,因此未来水土流失的防治重点应当放在中上游地区。

(2) 在过去的30年里,流域侵蚀情况总体持续向好,其中由植被与降水作为主导因素引起的土壤侵蚀减小分布最为广泛,占土壤侵蚀减小面积的77.12%,植被覆盖度与降雨侵蚀力的相互作用驱动了研究区土壤侵蚀的动态发展。

(3) 2000年以前,降水是影响流域土壤侵蚀变化的主要因素。然而,随着退耕还林还草工程的实施年份的推移,植被覆盖度得到提高,植被对土壤侵蚀变化的作用逐渐增大,这表明工程在流域的实施效果显著,是缓解该地区水土流失危害的有效途径。

参考文献:

- [1] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016,137:1-11.
- [2] Diyabalanage S, Samarakoon K K, Adikari S B, et al. Impact of soil and water conservation measures on soil erosion rate and sediment yields in a tropical watershed in the central highlands of Sri Lanka[J]. *Applied Geography*, 2017,79:103-114.
- [3] Kaiser A, Erhardt A, Eltner A. Addressing uncertainties in interpreting soil surface changes by multitemporal high-resolution topography data across scales[J]. *Land Degradation & Development*, 2018,29(8):2264-2277.
- [4] Poesen J. Soil erosion in the Anthropocene: research needs [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017,43(1):64-84.
- [5] Chappell A, Baldock J, Sanderman J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes[J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(2):187-191.
- [6] Thomas J, Joseph S, Thrivikramji K P. Assessment of soil erosion in a tropical mountain river basin of the southern Western Ghats, India using RUSLE and GIS [J]. *Geoscience Frontiers*, 2018,9(3):893-906.
- [7] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].*水土保持学报*, 2020,34(4):21-30.
- [8] 钟旭珍,张素,吴瑞娟,等.沱江流域土壤侵蚀动态变化及驱动力分析[J].*水土保持研究*,2022,29(2):43-49,56.

- [9] Ochoa P A, Fries A, Mejia D, et al. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semi-arid basin of the Andes[J]. *Catena*, 2016,140:31-42.
- [10] Teng H F, Liang Z Z, Chen S C, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635:673-686.
- [11] Zhu X Y, Zhang R Z, Sun X W. Spatiotemporal dynamics of soil erosion in the ecotone between the Loess Plateau and Western Qinling Mountains based on RUSLE modeling, GIS, and remote sensing [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14. DOI: 10.1007/s12517-020-06329-z.
- [12] Sharma A, Tiwari K N, Bhadoria P B S. Effect of land use land cover change on soil erosion potential in an agricultural watershed[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011,173:789-801.
- [13] 毛泽秦,王进鑫.平凉纸坊沟流域水土流失影响因素及其相关关系分析[J].*水土保持研究*,2011,18(1):101-104.
- [14] 蒋冲,高艳妮,李芬,等.1956—2010年三江源区水土流失状况演变[J].*环境科学研究*,2017,30(1):20-29.
- [15] 刘璐璐,曹巍,贺添,等.南北盘江流域土壤侵蚀时空动态变化及影响因素分析[J].*中国水土保持科学*,2019, 17(6):69-77.
- [16] He Q, Dai X A, Chen S Q. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River Headwaters Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2020,12(5): 865-886.
- [17] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].*地理学报*, 2018,73(9):1674-1686.
- [18] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005,33(7): 867-871.
- [19] 贺倩,戴晓爱.基于LMDI模型的三江源区植被对土壤侵蚀变化影响的定量分析[J].*长江科学院院报*,2020, 37(7):61-67.
- [20] Wu H W, Guo B, Xue H R, et al. What are the dominant influencing factors on the soil erosion evolution process in the Yellow River Basin[J]. *Earth Science Informatics*, 2021,14(4):1899-1915.
- [21] Omer A, Ma Z G, Zheng Z Y, et al. Natural and anthropogenic influences on the recent droughts in Yellow River Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,704:135428.

- Grand Canyon National Park, Arizona, 2007—2010 [R]. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2012.
- [41] Cavalli M, Goldin B, Comiti F, et al. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models[J]. *Geomorphology*, 2017, 291: 4-16.
- [42] Lane S, Westaway R M, Hicks M. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(3): 249-271.
- [43] Wheaton J M, Brasington J, Darby S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 35(2): 136-156.
- [44] Rengers F K, Tucker G E, Moody J A, et al. Illuminating wildfire erosion and deposition patterns with repeat terrestrial lidar [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2016, 121(3): 588-608.
- [45] 朱建东, 吴礼舟, 李绍红, 等. 2 种雨型的黄土坡面侵蚀室内试验[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 92-98.
- [46] Winiwarter L, Anders K, Höfle B. M3 C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 240-258.
- [47] Abellán A, Jaboyedoff M, Oppikofer T, et al. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: Experiment and application to a rockfall event [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9(2): 365-372.
- [48] 王玲玲, 姚文艺, 王文龙, 等. 黄丘区坡沟系统不同时间尺度下的侵蚀产沙特征[J]. *水利学报*, 2013, 44(11): 1347-1351.
- [49] Li M, Yao W Y, Ding W F, et al. Effect of grass coverage on sediment yield in the hillslope-gully side erosion system [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(3): 321-330.
- [50] 杨春霞, 李莉, 王佳欣, 等. 坡沟系统侵蚀时空分布特征试验研究[J]. *人民黄河*, 2017, 39(1): 95-97.
- [51] 丁文峰, 李勉, 张平仓, 等. 坡沟系统侵蚀产沙特征模拟试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 10-14.
- [52] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 1-13.
- [53] Allen P M, Arnold J, Auguste L, et al. Application of a simple headcut advance model for gullies[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 43(7): 202-217.
- ~~~~~
- (上接第 12 页)
- [22] 彭燕, 何国金, 张兆明, 等. 中国区域 Landsat 遥感指数产品 [J]. *中国科学数据: 中英文网络版*, 2020, 5(4): 83-90.
- [23] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [24] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J]. *资源科学*, 2003, 25(1): 35-41.
- [25] Williams J R, Dyke P T, Jones C A. EPIC: A new method for the effects of erosion on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5): 553-572.
- [26] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具 [J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 105-110.
- [27] 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.
- [28] 秦伟, 朱清科, 张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 157-163.
- [29] 闫瑞, 张晓萍, 李够霞, 等. 基于 RUSLE 的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 32-37.
- [30] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.