

# 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区 土壤侵蚀速率的影响

孟祥冬<sup>1</sup>, 曾奕<sup>1</sup>, 方怒放<sup>1,2</sup>

(1.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 杨陵 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** [目的] 分析地形和土地利用对坝控小流域侵蚀速率的影响, 为黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀治理和水土保持措施的制定提供理论依据。[方法] 基于无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)摄影测量技术获取流域高分辨率数字高程模型(digital elevation model, DEM)和影像数据并准确提取流域的地形因子和土地利用要素, 采用偏最小二乘回归方法确定坝控小流域地形和土地利用对土壤侵蚀速率的影响及其相对重要性。[结果] 坝控小流域侵蚀速率变化范围为 2 869~14 191 t/(km<sup>2</sup>·a), 平均侵蚀速率为 9 984 t/(km<sup>2</sup>·a); 坝控小流域的地形和土地利用因子存在一定差异, LS 因子与 L 因子、连通性指数(IC)与地形湿度指数(TWI)、流域面积(A)与流域长度(BL)和形状因子(Ff)之间存在显著相关性( $p < 0.01$ ); 侵蚀速率偏最小二乘回归模型中最大 VIP 值为坡长因子(VIP=1.66; RCs=0.30), 其次是地形湿度指数(VIP=1.62; RCs=0.25)、坡度坡长因子(VIP=1.43; RCs=0.27)、连通性指数(VIP=1.39; RCs=-0.19)、农地面积占比(VIP=1.03; RCs=0.10)和草地面积占比(VIP=1.03; RCs=-0.10)。[结论] 各坝控小流域侵蚀速率存在显著差异, 坡长因子、坡度坡长因子、地形湿度指数、连通性指数、农地面积比例和草地面积比例是影响流域侵蚀速率的重要影响因子, 且 VIP 值都大于 1。

**关键词:** 土壤侵蚀; 坝控小流域; 偏最小二乘回归方法; 影响因子; 黄土丘陵沟壑区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)05-0025-08

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 孟祥冬, 曾奕, 方怒放. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀速率的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 25-32. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220525.002; Meng Xiangdong, Zeng Yi, Fang Nufang. Effects of topography and land use on soil erosion rate in loess hilly and gully region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 25-32.

## Effects of Topography and Land Use on Soil Erosion Rate in Loess Hilly and Gully Region

Meng Xiangdong<sup>1</sup>, Zeng Yi<sup>1</sup>, Fang Nufang<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the

Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The influence of topography and land use on the soil erosion rate of dam-controlled catchments was analyzed in order to provide a theoretical basis for soil erosion control and soil and water conservation measures in a loess hilly and gully region. [Methods] A high-resolution digital elevation model (DEM) and image data for catchments were obtained by use of unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry technology. Topographical factors and land use of the catchments were accurately extracted. Partial least squares regression was used to determine the impact and relative importance of topography and land use on soil erosion rate in dam-controlled catchments. [Results] The variation range of soil erosion rate in dam-controlled

收稿日期: 2022-01-08

修回日期: 2022-03-15

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵区小流域切沟侵蚀与泥沙连通性耦合作用机制”(42177335)

第一作者: 孟祥冬(1995—), 男(汉族), 安徽省阜阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: mx05@nwfafu.edu.cn。

通信作者: 方怒放(1985—), 男(汉族), 安徽省铜陵市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。Email: fnf@ms.iswc.ac.cn。

catchments was 2 869~14 191 t/(km<sup>2</sup>·yr), with an average value of 9 984 t/(km<sup>2</sup>·yr). Differences existed in topographic and land use factors in dam-controlled catchments. Significant correlations ( $p < 0.01$ ) were observed between  $LS$  factor and  $L$  factor; connectivity index (IC) and topographic wetness index (TWI); catchment area (A) and watershed length (BL) and shape factor (Ff). From the partial least squares regression of soil erosion rate, the maximum VIP value was detected for the slope length factor (VIP=1.66; RCs=0.30), followed by topographic wetness index (VIP=1.62; RCs=0.25),  $LS$  factor (VIP=1.43; RCs=0.27), connectivity index (VIP=1.39; RCs=-0.19), percentage of agricultural area (VIP=1.03; RCs=0.10), and percentage of grassland area (VIP=1.03; RCs=-0.10). [Conclusion] There were significant differences in soil erosion rate in the dam-controlled catchments. Slope length factor,  $LS$  factor, topographic wetness index, connectivity index, percentage of agricultural area, and percentage of grassland area were important factors influencing soil erosion rate, with all having VIP values greater than 1.

**Keywords:** soil erosion; dam-controlled catchments; partial least squares regression; influence factors; loess hilly and gully region

土壤侵蚀是世界上主要的环境问题之一,通常会导导致肥沃的表层土壤流失、土壤质量退化和耕地数量减少<sup>[1-3]</sup>。土壤侵蚀每年对全球 GDP 造成约 8.00 × 10<sup>9</sup> 美元的损失,对粮食安全的伴随影响是全球农产品产量减少 3.37 × 10<sup>7</sup> t<sup>[4]</sup>。准确量化土壤侵蚀并确定土壤侵蚀影响因素是控制土壤侵蚀的重要前提,对区域土壤侵蚀治理具有重要意义。

受地形、土壤、气候、植被、人类活动等多种因素共同影响下,不同区域的土壤侵蚀存在较大差异<sup>[5]</sup>。其中,地形对流域水文、土壤侵蚀和产沙量具有重要作用,且被认为是影响土壤侵蚀的重要因素<sup>[6]</sup>。地形因子中的海拔高度是影响径流系数的最重要变量,海拔较低的地区土壤水分含量较高,可增加径流系数<sup>[7]</sup>。坡度坡长因子是土壤侵蚀模型中重要的地形因子,其反映了坡度和坡长对土壤侵蚀的综合影响,土壤侵蚀随坡度坡长因子的增加而增加<sup>[8]</sup>。土地利用通常会改变下垫面条件(植被覆盖、土壤性质、地形条件等)并引起侵蚀发生及泥沙拦截能力的变化,进而影响侵蚀速率<sup>[9]</sup>。因此土地利用也是影响土壤侵蚀速率的重要因素,如近十几年来,在全球土地利用变化的驱动下,全球土壤侵蚀总量增加了 2.5%<sup>[2]</sup>。中国在实施退耕还林还草工程后,土地利用类型中的草地和林地增加,耕地减少,侵蚀面积减少了 6 291 km<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。然而,以上研究多集中于从区域尺度探究地形和土地利用对土壤侵蚀的影响。目前仍然缺乏小流域尺度的相关研究,这不利于小流域土壤侵蚀综合治理的开展。因此,需要进一步地研究地形和土地利用对小流域土壤侵蚀的影响。

黄土高原因其特殊的降雨特征、土壤性质、地形地貌以及脆弱的生态环境,使得该地区成为中国乃至世界上水土流失最严重的区域<sup>[11]</sup>,阐明黄土高原土

壤侵蚀速率的影响因素对于区域生态发展等至关重要。诸多有关地形和土地利用对土壤侵蚀影响的研究在该地区相继开展,如 Sun 等<sup>[12]</sup>评估了黄土高原土地利用与地形对土壤侵蚀影响的发现,森林、灌木和茂密的草地覆盖的区域土壤侵蚀较弱,在相同的土地利用类型下,随着坡度的增加,土壤侵蚀显著增加。Zhang 等<sup>[13]</sup>通过 30 m 分辨率 DEM 数据计算出丘陵沟壑区的地形因子并分析其对流域侵蚀产沙的影响认为,流域形状和地形因子是影响中国黄土高原侵蚀产沙的主要因素。

然而,目前的研究主要是通过粗分辨率的 DEM 和卫星影像数据提取流域地形因子和土地利用<sup>[14-15]</sup>。但粗分辨率的数据源会导致计算的地形因子不能真实反映实际地表特征<sup>[16-17]</sup>,而且提取的土地利用精度也会大大降低<sup>[18]</sup>。因此需要基于高分辨率的 DEM 和影像数据,进一步确定地形因子和土地利用对流域土壤侵蚀速率的影响。

鉴于此,本研究以黄土丘陵沟壑区典型坝控小流域为研究对象,基于淤地坝沉积泥沙反演坝控小流域土壤侵蚀速率;借助无人机摄影测量技术获取流域高分辨率的地形因子和土地利用;结合偏最小二乘回归方法分析地形因子和土地利用对流域土壤侵蚀速率的影响及其相对重要性。本研究为黄土丘陵沟壑区流域水土保持规划及生态治理提供科学依据。

## 1 研究区概况

本研究的研究区为黄土丘陵沟壑区。该区域位于北纬 35°41'21"—40°44'09",东经 108°11'59"—114°31'28",区域面积为 2.12 × 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,占黄土高原总面积的 33%(图 1)。研究区土壤类型以黄土为主,易受侵蚀和崩塌。该区气候类型为干旱半干旱大陆性气候,年平均气温为 6.69~9.95 °C,年平均降雨量

为 454.5 mm。雨季(6—9 月)的降雨量通常占年总降雨量的 70%以上,具有强度大、历时短的特点。

本研究在该区域共选取 10 个典型坝控小流域作为研究对象(图 1 和表 1)。所选的每个流域需满足以下条件,首先流域内的淤地坝为源头坝,其次淤地坝附近没有放水建筑物,最后是淤地坝在运行期间

没有被冲毁。因此,本研究认为符合上述条件的流域侵蚀产沙的所有泥沙都被淤地坝拦截,可以通过估算淤地坝淤积量反演流域土壤侵蚀。流域和淤地坝详细信息见表 1。所选小流域面积为 0.18~1.28 km<sup>2</sup>,坝地面积为 0.15~5.47 hm<sup>2</sup>,其中 8 座淤地坝修建于 20 世纪 70 年代左右,2 座淤地坝修建于 2000 年后。

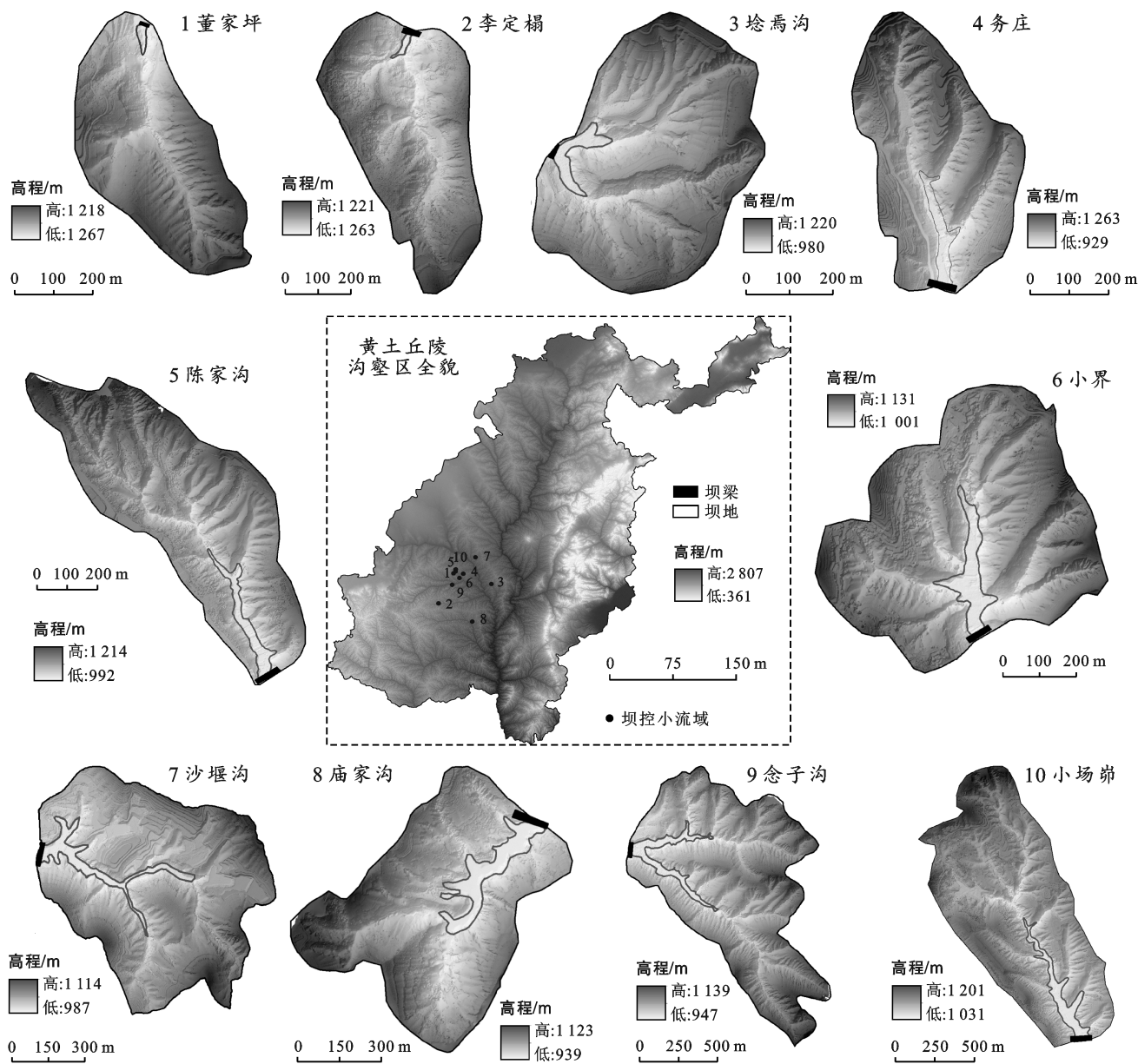


图 1 黄土丘陵沟壑区位置及 10 个坝控小流域分布

## 2 研究方法

### 2.1 数据收集

2019 年 9 月至 2020 年 10 月,本研究使用 DJI Phantom 4 RTK(P4 RTK)无人机获取小流域的影像。P4 RTK 配有型号为 FC6 310 R 的相机,该相机具有 1 英寸 CMOS,分辨率为 4 864×3 648,有效像

素 2 000 万传感器。P4 RTK 携带一个多频全球导航卫星系统(GNSS)接收机,具有实时运动学(RTK)功能,影像传感器精度垂直为 1.5 cm+1 ppm(RMS),水平为 1 cm+1 ppm(RMS),可提供 cm 级高精度准确定位,有关 P4 RTK 无人机和 RTK 精度的更多详细信息,请参见 DJI Phantom 4 RTK 使用手册<sup>[19]</sup>。

通过多次预飞行,本研究将飞行高度、航向重叠



率和旁向重叠率参数分别设置为 100 m, 80% 和 70%, 以确保获取最佳的高分辨率地形数据。使用 Agisoft Photoscan Professional 1.2.6 处理无人机拍摄的影像, 影像处理过程包括对齐照片、优化对齐方式、生成密点云、分类地面点、生成网格、构建 DEM

和 Orthomosaic。通过上述步骤, 获得了这些小流域高分辨率的 DEM 数据, 分辨率为 0.12~0.24 m, 总误差为 0.06~0.15 m。为了减少 DEM 数据分辨率对地形因子提取的影响, 本研究将所有小流域 DEM 分辨率统一重采样为 0.2 m。

表 1 黄土丘陵沟壑区坝控小流域和淤地坝信息

流域编号	流域名称	控制面积/km <sup>2</sup>	坝地面积/hm <sup>2</sup>	淤积深度/m	坝型	淤地坝运行时间
1	子洲董家坪	0.18	0.15	7.00	V	2012—2019 年
2	子长李家塌	0.32	0.17	3.00	V	2012—2017 年
3	绥德埝焉沟	0.18	0.60	11.30	U	1960—1990 年
4	子洲务庄	0.21	0.89	13.00	U	1975—2019 年
5	子洲陈家沟	0.45	1.63	18.00	U	1974—2019 年
6	子洲小界	0.39	1.82	14.00	U	1970—2019 年
7	米脂沙堰沟	0.69	3.00	17.40	U	1968—2017 年
8	清涧县庙家沟	0.54	3.67	12.00	梯形	1962—2017 年
9	子洲念子沟	1.20	4.83	10.00	梯形	1972—2017 年
10	子洲小场崩	1.28	5.47	19.50	U	1972—2019 年

## 2.2 侵蚀速率计算

在黄土高原上由于基岩母质和淤地坝中沉积泥沙的土壤性质和含水率各不相同, 所以这两种介质具有完全不同的电阻率。本研究通过高密度电阻法获取部分淤地坝中泥沙沉积深度和剖面形状, 再结合淤积面积构建沉积区三维模型估算沉积泥沙体积<sup>[20]</sup>。其余淤地坝中泥沙沉积深度通过人工钻探的方式获取, 并结合几何方法计算了淤地坝淤积的泥沙体积<sup>[21]</sup>。当淤地坝的淤积量准确计算后, 结合容重、淤地坝运行时间、流域面积等数据, 可以准确获取流域土壤侵蚀速率。

$$E = \frac{V \times \rho}{A \times Y} \quad (1)$$

式中:  $E$  是土壤侵蚀速率, 是指单位面积单位时间内的土壤流失量 [ $t/(km^2 \cdot a)$ ];  $V$  是淤地坝泥沙淤积体积 ( $m^3$ );  $\rho$  是土壤容重 ( $kg/m^3$ );  $A$  是流域面积 ( $km^2$ );  $Y$  是淤积年限 ( $a$ )。

## 2.3 影响因素

淤地坝运行年限的不同会导致不同阶段地貌形态的发育, 同时也会改变流域的地形特征。淤地坝在拦沙淤地的过程中会使侵蚀沟道形态由“窄深式”变为“宽浅式”<sup>[22]</sup>。淤地坝泥沙沉积过程缩短了主沟长度, 减少了主沟的破碎状况, 使坡面变得更平缓。地形因子是对地形的具体数字描述, 是地形信息的载体和最重要的形式之一<sup>[23]</sup>。在本文中淤地坝运行年限的不同以及淤地坝自身对地貌因素的影响都通过不同的地形因子反应。

地形因子和土地利用是影响侵蚀速率的因素, 其中地形因子是由 DEM 数据直接计算或者通过特定公式间接计算得到, 包括面曲率、坡度坡长因子、连通性指数、地形湿度指数和水流动力指数等, 这些地形因子用来描述或表征景观中发生的特定过程的空间变异性<sup>[24]</sup>。沟壑密度是基于 DEM 数据通过 ArcGIS 中的水文分析模块计算得到。流域长度和形状因子是通过流域面积和对应关系式计算得到的。通过实地调查获取流域的土地利用类型 (主要为农地和草地), 结合无人机摄影测量获取高分辨率影像及人工目视解译的方法, 确定流域中农地和草地的面积。表 2 描述了土壤侵蚀速率影响因子的描述或公式。

## 2.4 统计分析

本研究通过偏最小二乘回归 (partial least-squares regression, PLSR) 探究表 2 中影响因子对流域土壤侵蚀速率的影响及其相对重要性。PLSR 是一种将主成分分析和多元线性回归相结合的方法, 用于解决许多传统多元回归无法解决的问题, 例如自变量之间的多重相关性和比变量数更少的样本点<sup>[25]</sup>。PLSR 是在 SIMCA-P (Umetrics AB, 瑞典) 软件中进行的, 本研究对 17 个影响因子进行了拟合, 确定了影响土壤侵蚀速率的主要变量。影响因子对侵蚀速率变化的解释能力由变量投影重要性指标 (variable importance for the projection, VIP) 表示, 其中 VIP 值大于 1 被认为是影响土壤侵蚀速率的重要自变量, 小于 0.5 的值被认为是不重要的自变量。



表 2 土壤侵蚀速率影响因子的描述或公式

基本性质	影响因子	缩写	描述或公式
地形因子	面曲率	PI	表面垂直于坡面方向的曲率
	坡度因子	S	坡度因子
	坡长因子	L	坡长因子
	坡度坡长因子	LS	$LS=(m+1)(As/22.13)^m \times (\sin\beta/0.0896)^n$ , 其中 $As$ 是单位汇水面积, $\beta$ 为坡度, $m$ 为 0.4, $n$ 为 1.3
	连通性指数	IC	$IC=\lg(D_{up}/D_{dn})$ , $D_{up}$ 和 $D_{dn}$ 分别表示连通性的上坡、下坡分量
	地形湿度指数	TWI	$TWI=\ln(As/\tan\beta)$ , $As$ 是单位汇水面积, $\beta$ 是以弧度计算的坡度
	水流强度指数	SPI	$SPI=As \times \tan\beta$ , $As$ 是单位汇水面积, $\beta$ 是以弧度计算的坡度
	地形起伏度	RF	$RF=H_{max}-H_{min}$ , $H_{max}$ 为最高高程, $H_{min}$ 为最低高程
	高程变异系数	VC	$VC=HSTD/H_{mean}$ , $HSTD$ 为高程标准差, $H_{mean}$ 为平均高程
	地表切割深度	CH	$CH=H_{mean}-H_{min}$ , $H_{mean}$ 为平均高程, $H_{min}$ 为最低高程
	粗糙度指数	R	$R=1/\cos(S\pi/180)$ , $S$ 为流域平均坡度
	沟壑密度	Dd	$Dd=SL/A$ ( $\text{km}/\text{km}^2$ ), $SL$ 为流域河网总长度, $A$ 为流域面积
	土地利用	流域面积	A
流域长度		BL	$BL=1.4 \times A^{0.6}$ , $A$ 为流域面积
形状因子		Ff	$Ff=A/BL^2$ , $A$ 为流域面积, $BL$ 为流域长度
农地面积比例		C	农地面积占流域总面积的比例
草地面积比例		G	草地面积占流域总面积的比例

### 3 结果与分析

#### 3.1 流域土壤侵蚀特征

黄土丘陵沟壑区不同流域之间的泥沙淤积量和侵蚀速率具有显著的差异。以本研究中的流域为例,淤地坝的泥沙淤积量范围从  $3\ 400\ \text{m}^3$  到  $5.33 \times 10^5\ \text{m}^3$ , 平均淤积量为  $1.98 \times 10^5\ \text{m}^3$ , 流域侵蚀速率变化范围为  $2\ 869 \sim 14\ 191\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 平均侵蚀速率为  $9\ 984\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (图 2)。以 1999 年(退耕还林还草工程的实施)为界限将淤地坝运行时间划分为两个时间阶段,其中退耕还林还草工程之前修建淤地坝的流域的平均土壤侵蚀速率为  $11\ 419\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 而退耕还林还草工程以后修建淤地坝流域的平均土壤侵蚀速率为  $4\ 247\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。退耕还林还草工程以后修建淤地坝的李家塌和董家坪小流域侵蚀速率显著低于其他流域的土壤侵蚀速率。按照水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96),李家塌小流域属于中度侵蚀,董家坪小流域属于强度侵蚀,念子沟、埝焉沟、务庄、小场岭、小界、沙堰沟、陈家沟和庙家沟小流域属于极强度侵蚀。

#### 3.2 流域影响因子特征

流域的地形因子和土地利用统计结果见表 3。其中,坡度因子、坡度坡长因子、水流强度指数和沟壑密度存在较大的差异,且标准差都大于 0.5。流域面积和水流强度指数的变异系数均大于 70%,表明这两个因子的离散程度较大。坡度因子的平均值为 7.48,变化范围在  $5.80 \sim 8.09$ ,标准差为 0.68;坡度坡长因子的平均值为 3.12,变化范围在  $2.22 \sim 3.70$  之间,标准

差为 0.51;水流强度指数的平均值为 15.35,变化范围在  $8.39 \sim 45.24$  之间,标准差为 10.76,变异系数为 70.13%;沟壑密度的平均值为  $3.73\ \text{km}/\text{km}^2$ ,变化范围在  $1.81 \sim 5.29\ \text{km}/\text{km}^2$  之间,标准差为 0.92。流域面积的平均值为  $0.54\ \text{km}^2$ ,变化范围在  $0.50 \sim 1.62\ \text{km}^2$  之间,标准差为 0.40,变异系数为 73.85%。连通性指数范围从  $-5.60$  到  $-3.97$ ,平均值为  $-5.08$ ,且均为负值,表明流域连通性较低。各小流域农地面积比例为  $0.04 \sim 0.24$ ,平均值为 0.14,草地面积比例为  $0.76 \sim 0.96$ ,平均值为 0.86。

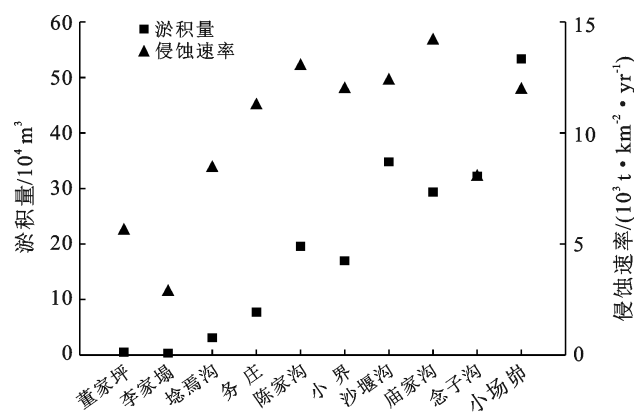


图 2 黄土丘陵沟壑区坝控小流域淤积量和侵蚀速率

在应用 PLSR 方法之前,对地形和土地利用因素进行 Pearson 相关分析(表 4)。初步分析表明,说明地形和土地利用因子之间存在自相关性,例如,LS 因子与 L 因子、连通性指数(IC)与地形湿度指数(TWI)、流域面积(A)与流域长度(BL)和形状因子(Ff)之间存在显著相关性( $p < 0.01$ )。

表 3 黄土丘陵沟壑区流域影响因子统计结果

影响因子	缩写	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
面曲率	PI	0.00	0.02	0.01	0.00	50.64
坡度因子	S	5.80	8.09	7.48	0.68	9.04
坡长因子	L	0.27	0.45	0.38	0.06	15.11
坡度坡长因子	LS	2.22	3.70	3.12	0.51	16.43
连通性指数	IC	-5.60	-3.97	-5.08	0.47	9.20
地形湿度指数	TWI	1.95	2.62	2.33	0.21	8.95
水流强度指数	SPI	8.39	45.24	15.35	10.76	70.13
地形起伏度	RF	0.32	0.41	0.38	0.03	8.98
高程变异系数	VC	0.10	0.13	0.12	0.01	9.89
地表切割深度	CH	0.16	0.21	0.19	0.02	8.44
粗糙度指数	R	1.24	1.37	1.31	0.05	3.51
沟壑密度	Dd	1.81	5.29	3.73	0.92	24.70
流域面积	A	0.18	1.28	0.54	0.40	73.85
流域长度	BL	0.50	1.62	0.92	0.41	44.27
形状因子	Ff	0.49	0.72	0.61	0.09	14.09
农地面积占比	C	0.04	0.24	0.14	0.06	43.75
草地面积占比	G	0.76	0.96	0.86	0.06	7.06

### 3.3 侵蚀速率与影响因子的关系

为了准确探究不同影响因子对侵蚀速率的影响,本研究建立了土壤侵蚀速率偏最小二乘回归模型(表 5)。从表 5 中可以看出,偏最小二乘回归模型中所有

成分对侵蚀速率变异性的累积解释率和累积可解释的因变量方差比均超过了 50%,说明建立的侵蚀速率偏最小二乘回归模型均具有较好的稳健性。侵蚀速率的偏最小二乘回归模型提取了 2 个成分。对于侵蚀速率模型,第一分量解释了侵蚀速率 71.4%的变异性,第二累积解释了 93.9%变异性。当预测分量数增加时,预测误差减小,当选择两个分量时,RMSEP 最小(表 5)。

各流域特征的 VIP 值和回归系数(RCs)见图 3。侵蚀速率偏最小二乘回归模型中最大 VIP 值为坡长因子(VIP=1.66;RCs=0.30),其次是地形湿度指数(VIP=1.62;RCs=0.25)、坡度坡长因子(VIP=1.43;RCs=0.27)、连通性指数(VIP=1.39;RCs=-0.19)、农地面积比例(VIP=1.03;RCs=0.10)和草地面积比例(VIP=1.03;RCs=-0.10)。从回归系数可以看出,侵蚀速率随着坡长因子、地形湿度指数、坡长因子和农地面积占比的增加而增加,但随着连通性指数和草地面积占比的增加而减少。侵蚀速率偏最小二乘回归结果,进一步说明坡长因子、地形湿度指数、坡度坡长因子、连通性指数、农地面积占比和草地面积占比是影响土壤侵蚀的重要因素。

表 4 黄土丘陵沟壑区流域地形和土地利用因子之间 Pearson 相关系数矩阵

	PI	S	L	LS	IC	TWI	SPI	RF	VC	CH	R	Dd	A	BL	Ff	C	G
PI	1																
S	-0.104	1															
L	-0.067	0.007	1														
LS	-0.075	0.281	0.953**	1													
IC	0.597	0.437	-0.221	-0.089	1												
TWI	-0.322	-0.669*	0.317	0.158	-0.819**	1											
SPI	-0.120	-0.122	-0.047	-0.047	-0.280	0.226	1										
RF	0.286	0.039	-0.081	-0.042	0.206	-0.131	-0.595	1									
VC	0.087	0.836**	0.124	0.357	0.595	-0.658*	-0.501	0.388	1								
CH	0.223	0.072	-0.072	-0.025	0.114	-0.107	-0.610	0.981**	0.413	1							
R	0.168	0.637*	0.231	0.407	0.531	-0.564	-0.445	0.586	0.910**	0.594	1						
Dd	0.018	-0.089	-0.402	-0.373	-0.265	0.232	0.655*	-0.590	-0.503	-0.558	-0.694*	1					
A	-0.074	-0.277	0.026	0.004	-0.573	0.451	0.682*	-0.080	-0.470	-0.011	-0.302	0.481	1				
BL	-0.019	-0.319	0.068	0.034	-0.586	0.496	0.630	-0.027	-0.481	0.039	-0.302	0.458	0.994**	1			
Ff	-0.114	0.381	-0.146	-0.093	0.569	-0.548	-0.497	-0.094	0.473	-0.153	0.278	-0.389	-0.942**	-0.973**	1		
C	-0.472	-0.720*	-0.034	-0.249	-0.693*	0.649*	0.438	-0.286	-0.777**	-0.287	-0.592	0.132	0.395	0.376	-0.303	1	
G	0.472	0.720*	0.034	0.249	0.693*	-0.649*	-0.438	0.286	0.777**	0.287	0.592	-0.132	-0.395	-0.376	0.303	-1.000**	1

注:①\*\*和\*\*分别表示在  $p < 0.05$  和  $p < 0.01$  水平显著相关;②表中英文字母缩写具体含义见表 3。下同。

表 5 黄土丘陵沟壑区流域侵蚀速率偏最小二乘模型概述

因变量 Y	$R^2$	$Q^2$	成分	Y 变异性解释的百分比	Y 变异性解释的累积百分比	RMSEP/ ( $t \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$ )	$Q_{cum}^2$
侵蚀速率	0.94	0.75	1	0.714	0.714	2 706	0.380
			2	0.225	0.939	2 098	0.748

注: $R^2$  为偏最小二乘回归模型中主成分对因变量累积解释能力; $Q^2$  为偏最小二乘回归模型中各主成分可解释的因变量方差比;RMSEP,预测的均方根误差; $Q_{cum}^2$  为偏最小二乘回归模型中所有主成分可解释的因变量方差比。

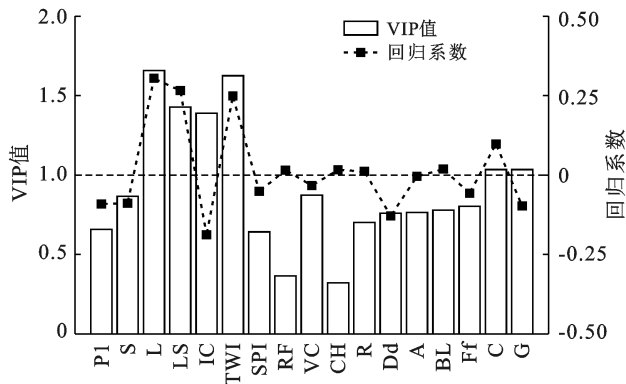


图3 黄土丘陵沟壑区流域侵蚀速率偏最小二乘回归模型VIP值和回归系数

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 不同流域侵蚀速率比较。本研究选取的10个坝控小流域之间的侵蚀速率具有显著的差异,退耕还林还草工程以后修建淤地坝的小流域侵蚀速率显著低于其他流域的土壤侵蚀速率。主要差异主要是由于淤地坝运行年限和当地农业活动强度不同造成的。其中李家塌和董家坪小流域的侵蚀速率结果较低,主要是因为该流域中的淤地坝修建于退耕还林还草工程之后且运行年限短。庙家沟小流域是所研究的10个流域中侵蚀速率最大流域,本研究将其归因于该流域中的淤地坝运行年限长且流域农业活动较强。淤地坝中沉积泥沙为反演流域泥沙淤积过程和土壤侵蚀演变提供重要信息<sup>[26]</sup>,许多学者通过估算淤地坝拦截的泥沙量计算出流域土壤侵蚀速率<sup>[27]</sup>。张信宝等<sup>[28]</sup>结合淤地坝计算出安塞区云台山沟小流域1960—1970年平均侵蚀速率为 $12\ 900\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。薛凯等<sup>[29]</sup>通过淤地坝沉积旋回估算出绥德县王茂沟流域1957—1990年的平均侵蚀速率为 $10\ 839\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。这些和本研究中退耕还林前建坝的小流域土壤侵蚀速率 $11\ 419\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 基本一致。魏艳红等<sup>[30]</sup>估算出延河流域3个小流域退耕还林后的平均侵蚀速率分别为 $2\ 308, 3\ 827, 2\ 875\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。本研究通过淤地坝反演的退耕还林后流域的平均侵蚀速率为 $4\ 247\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。本研究计算出的10个小流域的侵蚀速率与前人估算的结果基本一致,同时这10个小流域与前人研究的小流域均位于黄土丘陵沟壑区且空间位置相近,因此进一步证实本研究中流域平均侵蚀速率结果的正确性。

(2) 地形和土地利用对侵蚀速率的影响。土壤侵蚀作为地表过程的一种,在不同地形地貌条件下存在显著差异<sup>[31]</sup>。本研究通过偏最小二乘回归方法探

究了不同地形因子对土壤侵蚀速率的影响。VIP值表明地形因子中的地形湿度指数、坡长因子、连通性指数和坡度坡长因子是影响侵蚀速率的主要因素。其中,地形湿度指数是对径流路径长度和产流面积的定量描述,该值越大则意味着土壤越容易达到饱和而产流产沙<sup>[32]</sup>。本研究中回归系数也表明地形湿度指数越大,则流域土壤侵蚀速率越大。坡度坡长因子是通用土壤流失方程(USLE)和中国土壤流失方程(CSLE)中用于土壤侵蚀建模的关键地形因素<sup>[33-34]</sup>。许多研究表明随着坡度坡长因子的增加,土壤侵蚀速率则增加<sup>[8]</sup>,这与本文研究结果一致。本研究还发现流域连通性越低,流域泥沙沉积速率反而越大。这主要是因为本研究所选的坝控流域泥沙搬运距离较短,除了流域出口处的淤地坝,流域内基本没有沉积汇,所以淤地坝拦截的沉积泥沙总量等于流域侵蚀的泥沙总量<sup>[35]</sup>。沟道网络将径流和泥沙从侵蚀源地搬运输送到下游<sup>[36]</sup>,然而修建在沟道中的淤地坝会阻碍流域的连通性和泥沙输送的路径<sup>[37-38]</sup>。Alfonso-Torreno等<sup>[39]</sup>的研究也表明淤地坝会降低流域连通性,且流域的侵蚀速率与连通性指数显著负相关。

除了地形因子外,各坝控小流域侵蚀速率的差异可能与当地农业活动强度有关。李家塌和董家坪小流域(退耕后修建淤地坝)的土壤侵蚀速率显著低于其他流域。这主要是因为黄土高原实施退耕还林还草措施后,大量的农地转为林地和草地,流域植被覆盖率增加,土壤侵蚀减少<sup>[40]</sup>。从偏最小二乘回归分析结果可以看出农地面积比例越大土壤侵蚀速率高,而草地面积比例越大土壤侵蚀速率反而越小,所以土地利用类型也是影响土壤侵蚀速率的因素。

### 4.2 结论

本研究以黄土丘陵沟壑区10个坝控小流域为研究对象,采用偏最小二乘回归方法确定地形和土地利用对土壤侵蚀速率的影响及其相对重要性。

(1) 各坝控小流域侵蚀速率变化范围为 $2\ 869 \sim 14\ 191\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,平均侵蚀速率为 $9\ 984\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,各流域间的侵蚀速率差异较大,其中退耕还林还草工程实施后修建淤地坝的小流域侵蚀速率显著低于其他流域的土壤侵蚀速率。

(2) 各坝控小流域地形和土地利用因子存在一定差异,而且地形和土地利用因子之间存在显著的自相关性。

(3) 坡长因子、坡度坡长因子、地形湿度指数、连通性指数、农地面积占比和草地面积占比是影响流域侵蚀速率的重要影响因素。



## [参 考 文 献]

- [1] Alewell C, Ringeval B, Ballabio C, et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2020,11:4546.
- [2] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017,8(1):2013.
- [3] Lal R. Soil erosion by wind and water: Problems and prospects [M]//*Soil Erosion Research Methods*; Routledge, 2017:1-10.
- [4] Sartori M, Philippidis G, Ferrari E, et al. A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion [J]. *Land Use Policy*, 2019,86:299-312.
- [5] Wuepper D, Borrelli P, Finger R. Countries and the global rate of soil erosion [J]. *Nature Sustainability*, 2020,3(1):51-55.
- [6] Jiang Chong, Yang Zhiyuan, Li Minting, et al. Exploring soil erosion trajectories and their divergent responses to driving factors: A model-based contrasting study in highly eroded mountain areas [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(12):14720-14738.
- [7] Liu Wen, Li Zhenwei, Zhu Jingxuan, et al. Dominant factors controlling runoff coefficients in Karst watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 2020,590:125486.
- [8] 郝姗姗,李梦华,马永强,等.黄土丘陵区土壤侵蚀因子敏感性分析[J].*中国水土保持科学*,2019,17(2):77-86.
- [9] 史志华,宋长青.土壤水蚀过程研究回顾[J].*水土保持学报*,2016,30(5):1-10.
- [10] Wang Xiao, Zhao Xiaoli, Zhang Zengxiang, et al. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010 [J]. *Catena*, 2016,137:256-268.
- [11] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the loess plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017,45(1):223-243.
- [12] Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China [J]. *Catena*, 2014, 121:151-163.
- [13] Zhang H Y, Shi Z H, Fang N F, et al. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China [J]. *Geomorphology*, 2015,234:19-27.
- [14] Rajbanshi J, Bhattacharya S. Assessment of soil erosion, sediment yield and basin specific controlling factors using RUSLE-SDR and PLSR approach in Konar River basin, India [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587:124935.
- [15] Li Zhenwei, Xu Xianli, Zhu Jingxuan, et al. Effects of lithology and geomorphology on sediment yield in Karst mountainous catchments [J]. *Geomorphology*, 2019, 343:119-128.
- [16] Wang Chunmei, Yang Qinke, Guo Weiling, et al. Influence of resolution on slope in areas with different topographic characteristics [J]. *Computers & Geosciences*, 2012,41:156-168.
- [17] Lu Shaojuan, Liu Baoyuan, Hu Yaxian, et al. Soil erosion topographic factor (LS): Accuracy calculated from different data sources [J]. *Catena*, 2020,187:104334.
- [18] Fisher J R B, Acosta E A, Dennedy-Frank P J, et al. Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality [J]. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018,4(2):137-149.
- [19] Mulakala J. Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & Photogrammetry [M]. *DroneDeploy, Published in Partnership with DJI*, 2019.
- [20] Fang N F, Zeng Y, Ni L S, et al. Estimation of sediment trapping behind check dams using high-density electrical resistivity tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,568:1007-1016.
- [21] Zeng Yi, Fang Nufang, Shi Zhihua. Effects of human activities on soil organic carbon redistribution at an agricultural watershed scale on the Chinese Loess Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 303:107112.
- [22] 陈晓征.基于高精度 DEM 的黄土淤地坝信息提取及特征分析[D].江苏 南京:南京师范大学,2020.
- [23] 刘蓓蕾.黄土高原淤地坝建设与地形特征的响应关系研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2021.
- [24] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications [J]. *Hydrological Processes*, 1991,5(1):3-30.
- [25] Shi Z H, Ai L, Li X, et al. Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,498:165-176.
- [26] 魏艳红.延河与皇甫川流域典型淤地坝淤积特征及其对输沙变化的影响[D].北京:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017.
- [27] 汪亚峰,傅伯杰,侯繁荣,等.基于差分 GPS 技术的淤地坝泥沙淤积量估算[J].*农业工程学报*,2009,25(9):79-83.
- [28] 张信宝,温仲明,冯明义,等.应用<sup>137</sup>Cs 示踪技术破译黄土丘陵区小流域坝库沉积赋存的产沙记录[J].*中国科学(D 辑:地球科学)*,2007,37(3):405-410.

- [6] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.黄土丘陵沟壑区黄土坡面侵蚀过程及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(8):2886-2894.
- [7] 赵宽耀,许强,亓星,等.甘肃黑方台黄土滑坡类型及其发育特征研究[J].人民长江,2016,47(14):46-50.
- [8] 许元珺,谷天峰,王家鼎,等.黄土裂隙的漫灌效应对斜坡稳定性的影响分析[J].水文地质工程地质,2017,44(4):153-159.
- [9] Çabalar A F. Discussion of “biological considerations in geotechnical engineering” by James K. Mitchell and J. Carlos santamarina [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007,133(4):485.
- [10] 崔明娟,郑俊杰,赖汉江.菌液注射方式对微生物固化砂土动力特性影响试验研究[J].岩土力学,2017,38(11):3173-3178.
- [11] 刘鹏,邵光辉,黄容聘.微生物沉积碳酸钙胶结砂土力学特性及本构模型[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(4):720-726.
- [12] 袁翔,滕伟福,俞伟,等.MICP 技术对巴东组第三段软弱夹层土体的加固试验研究[J].安全与环境工程,2021,28(5):101-106.
- [13] 李驰,王硕,王燕星,等.沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究[J].岩土力学,2019,40(4):1291-1298.
- [14] 景天宇,姜哈琳,李振山.微生物诱导碳酸钙沉淀固结黄河泥沙试验研究[J].人民黄河,2019,41(11):11-16.
- [15] Bernardi D, DeJong J T, Montoya B M, et al. Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks [J]. Construction and Building Materials, 2014,55:462-469.
- [16] 吴超传,郑俊杰,赖汉江,等.微生物固化砂土强度增长机理及影响因素试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(1):31-38.
- [17] 张世参,骆亚生,田堪良,等.风积沙的微生物固化试验研究[J].人民黄河,2021,43(10):144-149.
- [18] 杨恒,陈筠,白文胜,等.活性炭固定微生物固化贵阳红黏土力学特性[J].中国岩溶,2019,38(4):619-626.
- [19] 王怀星.黄土的微生物固化及抗侵蚀性能试验研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2021.
- [20] Abo-El-Enein S A, Ali A H, Talkhan F N, et al. Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation [J]. HBRC Journal, 2012,8(3):185-192.
- [21] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- [22] 牛永振,李张楠,栾清华,等.不同坡面单元人工降雨产流试验与分析[J].科学技术与工程,2021,21(20):8389-8394.
- [23] 周凡凡,高建恩,王照润,等.坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究[J].水土保持学报,2021,35(6):95-100.
- [24] 付兴涛,王奇花,王锦志.降雨条件下晋西黄绵土坡面室内外径流侵蚀试验差异分析[J].农业工程学报,2021,37(1):116-124.
- [25] 胡乾亮.降雨对固化黄土边坡稳定性的影响[D].山西太原:太原理工大学,2016.
- [26] 付兴涛,张丽萍.红壤丘陵区坡长对作物覆盖坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):91-98.
- [27] 张珊,杨树文,王恒亮.顾及黄土滑坡的兰州市不同等级降雨时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(1):184-191.
- (上接第 32 页)
- [29] 薛凯,杨明义,张凤宝,等.利用淤地坝泥沙沉积旋迴反演小流域侵蚀历史[J].核农学报,2011,25(1):115-120.
- [30] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.
- [31] 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.
- [32] 严晰芹,焦菊英,唐柄哲,等.泥沙连通性研究方法进展[J].泥沙研究,2021,46(2):59-65.
- [33] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A Guide to Conservation Planning [M]. US Washington D C: Agriculture Handbook, 1978: 537.
- [34] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation [C]// Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference. Tsinghua University Press. Beijing, China, 2002:21-25.
- [35] 曾奕.黄土丘陵区侵蚀环境下的流域土壤有机碳动态变化及其影响机制[D].湖北 武汉:华中农业大学,2021.
- [36] 刘宇.土壤侵蚀研究中的景观连通度:概念、作用及定量[J].地理研究,2016,35(1):195-202.
- [37] Keesstra S, Nunes J P, Saco P, et al. The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics? [J]. Science of the Total Environment, 2018,644:1557-1572.
- [38] Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments [J]. Geomorphology, 2013, 188:31-41.
- [39] Alfonso-Torreño A, Gómez-Gutiérrez Á, Schnabel S, et al. SUAS, SfM-MVS photogrammetry and a topographic algorithm method to quantify the volume of sediments retained in check-dams [J]. Science of the Total Environment, 2019,678:369-382.
- [40] Deng Lei, Kim D G, Li Miaoyu, et al. Land-use changes driven by ‘Grain for Green’ program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China [J]. Global and Planetary Change, 2019,177:101-115.