

近50年来王茂沟流域侵蚀沟变化及其影响因素

杨力华^{1,3}, 庞国伟^{2,4}, 杨勤科^{1,2,4}, 裴志林^{1,3}, 王雷^{2,4}, 龙永清^{2,4}, 王春梅^{2,4}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨陵 712100; 2.西北大学城市与环境学院, 西安 710127;
3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710127)

摘要: 基于1968年、2004年和2018年3期高分遥感影像, 以王茂沟流域为典型研究区, 提取了3个时间点的沟沿线、土地利用、水土保持措施、植被覆盖度和LS因子, 对近50年侵蚀沟时空变化特征及其影响因素进行了分析。结果表明: (1) 用遥感方法采集的信息, 可基本满足侵蚀沟中长期变化分析; (2) 50年来王茂沟流域侵蚀沟一直处于变化中, 时间上变化速度逐渐减缓, 前期和后期沟头年均前进速率分别为0.30, 0.27 m/a, 沟壁年均扩张速率分别为0.009, 0.004 m/a; 空间上2个时期年均侵蚀沟变化密度大于200 m/(km²·a)的值分别占比26.89%, 7.07%, 且多分布在流域中下游; (3) 1968—2004年侵蚀沟变化主要受到土地利用变化和水土保持措施增加的影响, 2005—2018年, 侵蚀沟变化主要受到植被覆盖度进一步提高和土地利用多样性的影响。研究有助于量化分析多年治理过程中侵蚀沟的变化及其影响因素, 能对退耕还林还草工程实施前后侵蚀沟治理的生态效益评价提供重要参考。

关键词: 沟沿线; 侵蚀沟; 黄土高原; 土地利用; 退耕还林

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0064-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.010

Changes and Influencing Factors of Erosion Gully in Wangmaogou Watershed in the Last 50 Years

YANG Lihua^{1,3}, PANG Guowei^{2,4}, YANG Qinke^{1,2,4}, PEI Zhilin^{1,3},

WANG Lei^{2,4}, LONG Yongqing^{2,4}, WANG Chunmei^{2,4}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, CAS and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. Key Laboratory of State Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Area, Xi'an 710127)

Abstract: The spatiotemporal variations and influencing factors of erosion gully in the last 50 years in Wangmaogou Watershed were studied by extracting some information like shoulder line, land use, soil and water conservation measures, vegetation coverage and LS from the three high-resolution remote sensing images of 1968, 2004 and 2018. The results showed that: (1) The information collected by remote sensing could basically satisfy the analysis of medium and long-term change in the erosion gully. (2) Gully erosion in Wangmaogou Watershed was developing all the time, but this change tempered gradually in the past 50 years. Specifically, the average advance rate of gully head were 0.30 m/a and 0.27 m/a respectively in early stage and the late stage, and the average expansion rate of gully wall were 0.009 m/a and 0.004 m/a. Spatially, the proportion of the variation density of erosion gully above 200 m/(km²·a) in the two periods were 26.89% and 7.07% respectively, which mainly distributed in the middle and lower reaches of the watershed. (3) In 1968—2004, the dominant factors affecting the development of erosion gully were land use changes and increased soil and water conservation measures, while erosion gully changes were mainly affected by the further improvement of vegetation coverage and land use diversity in 2005—2018. The study could help to quantify and analyze the development of erosion gully and its influencing factors for many years in the management process, and could also provide an important reference for ecological benefit evaluation of erosion gully before and after the implementation of “Grain-for-Green Program”.

收稿日期: 2019-08-03

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040202); 黄河流域(片)全国水土流失动态监测项目(DTJC2019-32)

第一作者: 杨力华(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事区域土壤侵蚀调查与定量评价研究。E-mail: yanglihual7@mailsucas.ac.cn

通信作者: 庞国伟(1982—), 男, 讲师, 主要从事区域土壤侵蚀评价研究。E-mail: gwpang@nwnu.edu.cn

杨勤科(1962—), 男, 教授, 主要从事区域土壤侵蚀评价和侵蚀地形分析研究。E-mail: qkyang@nwnu.edu.cn

Keywords: shoulder line; erosion gully; Loess Plateau; land use; Grain-for-Green

黄土高原的水蚀分面状侵蚀和沟道侵蚀2类^[1],其中沟道侵蚀引起的侵蚀产沙量达到流域总产沙量的70%以上^[2]。沟蚀不仅加剧水土流失,同时也破坏农业生产和人类生存环境^[3-4]。侵蚀沟作为沟蚀的结果,对其变化状况研究是侵蚀地貌学和土壤侵蚀学研究的重要内容,也是沟蚀治理的基础。

对侵蚀沟变化的研究一般有2种方式:一是基于野外调查测量侵蚀沟的变化,Wu等^[5]采用GPS监测了绥德1年内典型切沟的发育,并估算了其发育速率;马鼎等^[6]采用三维激光扫描技术得到切沟高精度DEM以及切沟长宽变化;王雷等^[7]采用高精度GNSS对黄土侵蚀沟进行稳定性监测,表明植被、降水是影响侵蚀沟发育的重要因素;刘宝元等^[8]以东北黑土区为研究区,采用基于抽样单元的野外调查方法,调查不同样区切沟和浅沟发育比例以及发育程度。二是利用高分遥感影像或者地形图进行判读,闫业超等^[9]通过1945年1:10万地形图和2000年Landsat ETM影像(分辨率为15 m)获取2个时期黑龙江克拜侵蚀沟分布图,分析1945—2000年侵蚀沟变化与高程、坡度、坡向的分异规律;王文娟等^[10]通过SPOT5(2.5 m分辨率)和Corona(2.75 m分辨率)数据源获取侵蚀沟数据,研究了东北典型黑土区1965—2005年来侵蚀沟密度剧增,表明各等级侵蚀沟密度都出现向更高一级发展的趋势;黄萌等^[11]以2 m分辨率遥感影像和DEM为数据源,以侵蚀沟密度为量化指标,得出辽宁省2010—2015年侵蚀沟变化是由发展沟向稳定沟过渡的过程;白舒婷等^[12]基于2013年Pleiades影像(0.7 m分辨率)提取侵蚀沟,采用侵蚀沟密度和侵蚀沟割裂度指标衡量长春三岔河流域侵蚀沟发育程度和分异特征。野外实地调查和测量方法可用很高的精度分析少数侵蚀沟的变化,但这种方法费时费力,难以实现对侵蚀沟的中长期动态分析。基于高分遥感影像的方法则可用于较长时间跨度、小流域侵蚀沟整体的形态变化分析。

侵蚀沟变化受到自然因素和人为因素的影响,自然因素主要有气候、地质地貌、地表物质、植被等因素^[3,13-14],人为因素包括对侵蚀沟的治理和对土地的不合理利用^[15-16]。张永光等^[17]利用SPSS软件分析了东北黑土区浅沟发育程度与地形的关系,确定了研究区浅沟和切沟侵蚀发生的地形临界条件;孙根行等^[18]以青海省乐都县小流域为研究区,采用回归分析方法分析了侵蚀沟的影响因素,认为植被覆盖度对沟蚀量的贡献率最大;陈一先等^[19]以陕北安塞县坊塔流域为研究区,利用SPSS软件分析了黄土高原地区植被覆盖度大于65%的植被能更加有效的控制大切沟发育。这方面的研究主要问题是难以量化分析各种影响因子的作用以及不同影响因子的交互作用。

本研究通过提取3期沟沿线、土地利用、水土保持工程措施、植被覆盖度,分析50年来王茂沟流域侵蚀沟时空变化,同时引入地理探测器模型分析侵蚀沟变化的影响因素。该研究对于量化分析多年治理过程中侵蚀沟的变化,认识理解侵蚀沟发展变化主控因子以及各因子的交互作用,具有重要理论意义外,对于侵蚀沟的治理,也具有实用意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

王茂沟流域位于陕西省绥德县韭园沟中游左岸,也是无定河中游左岸的1条二级支沟(图1),流域面积5.97 km²。属黄土丘陵沟壑区第一副区,地形为典型的黄土地貌,以峁状丘陵为主。侵蚀方式梁峁地带以片蚀和少量沟蚀为主,沟谷地带则以水力和重力作用下的沟蚀为主。小流域治理前坡耕地占流域面积59%,年平均土壤侵蚀模数高达18 000 t/(km²·a)^[2]。经过近70年治理,坝系布局较为完善,坡耕地大幅减少,梯田面积和植被覆盖度提高,可有效抗击特大暴雨的冲击^[20-21]。该流域对于侵蚀沟变化及其影响因素分析,具有典型代表性^[22]。

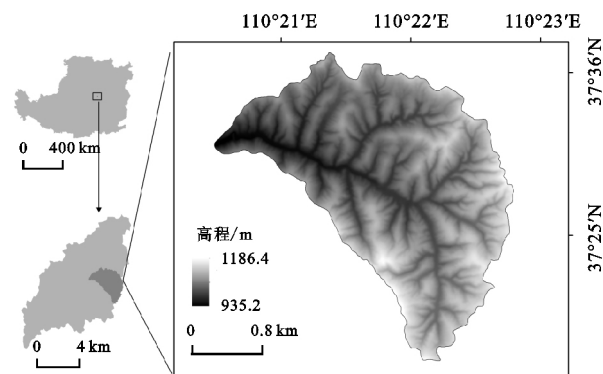


图1 研究样区位置示意

1.2 数据及信息提取

1.2.1 数据及预处理 本文高分遥感影像选择1968年、2004年和2018年3个年份的数据(表1),对相关数据统一高斯投影。以2018年影像为基准,选择一些比较稳定的地物(如房基地、陷穴中心、峁顶等),精确配准1968年和2004年遥感影像,配准点总体误差均控制在2个像元以内。

1.2.2 信息提取

(1)沟沿线提取:使用ArcGIS 10.4软件平台,参考1:1万地形图数据(或DEM),对王茂沟流域精确配准后的3期高分遥感影像的沟沿线进行手动勾绘。

(2)土地利用和水土保持工程措施提取:根据1968年、2004年、2018年3期高分遥感影像,采用人工目视解译方法,解译土地利用和水土保持工程措

施。土地利用和水土保持措施分类系统利用了泛第三极项目的方案^[23]。

表 1 所用数据信息

数据名称	来源	时间/a	分辨率/m	用途
KeyHole 卫星数据	https://earthexplorer.usgs.gov	1968	1.5	解译沟沿线、土地利用、水土保持措施
WorldView 数据	项目积累数据	2004	0.5	解译沟沿线、土地利用、水土保持措施
WorldView 数据	项目积累数据	2018	0.5	解译沟沿线、土地利用、水土保持措施
Landsat2 MSS	https://earthexplorer.usgs.gov	1975	60	植被覆盖度反演数据
Landsat5 TM、	https://earthexplorer.usgs.gov	2004	30	植被覆盖度反演数据
Landsat8 OLI	https://earthexplorer.usgs.gov	2017	30	植被覆盖度反演数据
1:10000 地形图	陕西测绘局绘制	1966	—	获取 5 m 分辨率 DEM, 提取 LS 因子
DEM 数据	项目积累数据	2016	2.5	提取 LS 因子

(3) 植被覆盖度计算: 基于 ENVI 软件计算相应年份植物生长季(8 月)的 NDVI 值, 使用公式(1)计算植被覆盖度。

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (1)$$

式中: NDVI 为像元实际值; $NDVI_{soil}$ 为地表全部被裸土覆盖所对应的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为地表全部被植被所覆盖对应的 NDVI 值。对于 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的确定, 参考同时期卫星影像, 选择 10 个纯裸土区域, 提取对应区域的 NDVI 值并取平均数作为 $NDVI_{soil}$; 同理, 选择 10 个纯植被区域, 提取相应区域的值并取平均作为 $NDVI_{veg}$ 。

(4) LS 因子提取: 根据获取的高分辨率 DEM 数据, 运用 LS Tool 工具, 采取基于多流向的坡长估算算法^[24-25]提取 LS 因子。

1.3 研究方法

1.3.1 沟沿线提取结果合理性方法 通过与地形地貌的套合, 定性分析手动勾绘的沟沿线的形态特征; 通过统计正负地形的高程、坡度和土地利用差异, 从数量上分析沟沿线位置的合理性。

1.3.2 侵蚀沟变化特征分析方法

(1) 侵蚀沟形态特征研究: 基于 ArcGIS 10.4 软件平台, 将 3 期沟沿线图层进行叠加, 分别量测 1968—2004 年、2004—2018 年时段侵蚀沟沟头前进距离和沟壁扩张距离, 采用 SPSS 23.0 软件进行统计, 分析近 50 年来侵蚀沟形态变化特征。

(2) 侵蚀沟变化空间分布: 基于沟沿线和 DEM 数据, 使用 GIS 软件平台的汇水区分析功能, 将研究区沟沿线以上的沟间地部分划分为一系列微型汇水区域(200 m²作为汇水区域的阈值), 统计 2 个时段每个微型汇水区的面积, 量测每个微型汇水区内侵蚀沟发生变化的长度(图 2), 获取每个汇水区域的年均侵蚀沟变化密度(每个微型汇水区内侵蚀沟变化长度/微型汇水区面积/时段, 单位: m/(km²·a)), 采用克里金插值方法生成年均侵蚀沟变化密度图, 并进行分级统计, 量化分析退耕前、后 2 个时段侵蚀沟变化密度的空间分布。

1.3.3 侵蚀沟变化影响因素 地理探测器模型可以很好地探测表达某一时空现象的主要驱动因子^[26]。侵蚀沟分析中, 通过计算单个影响因子的探测力指标 q (公式 2)来探测和理解侵蚀沟的主控因子。

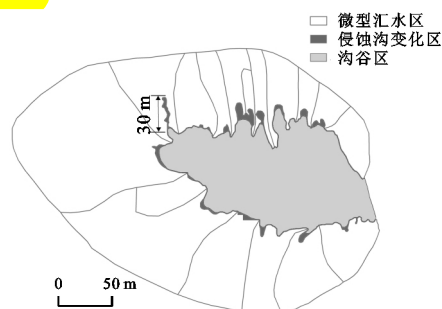


图 2 微型汇水区侵蚀沟前近距离示意

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (2)$$

式中: N_h 为次一级区域样本单元数; N 为整个区域样本单元数; L 为次级区域个数; σ^2 为整个区域侵蚀沟发育的方差; σ_h^2 为次一级区域的方差; $q \in [0, 1]$, q 值越大, 表示某因素对侵蚀沟影响越强。根据地理探测器的参数要求, 首先对各影响因子做离散化处理。植被覆盖度分级参考土壤侵蚀分类分级标准^[27]分为 5 级, LS 因子按照自然断点法分为 8 级, 土地利用和水土保持工程措施保持原始分类。基于 ArcGIS 软件, 使用格网点方法对分类后影响因素 X , 包括植被覆盖度变化(FVC)、土地利用变化(LU)、水土保持措施变化(ENG)、LS 因子变化和因变量 Y 侵蚀沟变化密度进行属性提取, 并导出成文本文件, 作为地理探测器的运行数据。

2 结果与分析

2.1 沟沿线提取结果准确性

2.1.1 沟沿线形态特征准确性 将调绘修正后的沟沿线与坡度、山体阴影套合, 其立体显示(图 3a、3b)可见, 手动勾绘的沟沿线整体上位于分数线和流水线之间的中间部位。这种形态与野外观察到的黄土侵蚀沟地貌特征一致, 与朱震达^[28]沟沿线的形态特征一致(图 3c), 满足进一步研究的要求。

选取王茂沟某一小流域, 从分水线至流水线布设 2 个断面并生成剖面线图(图 4)。图 4 沟间地和沟坡

地过渡处(沟沿线)高程有转折,坡度也有明显变化。这与有关研究^[29-30]提到的沟沿线概念,即沟间地和沟

谷地的分界线叫沟沿线(常有陡坎),这一结论相符;也与 Zhou 等^[31]对沟沿线地貌特征的描述一致。

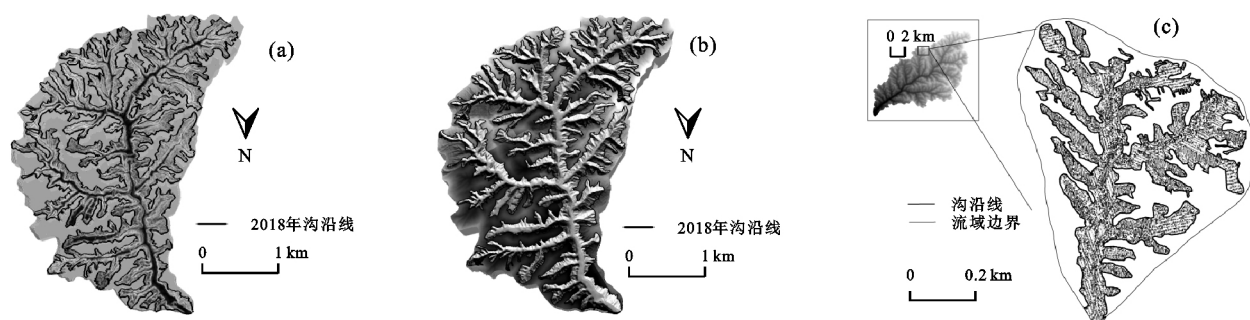


图3 王茂沟沟沿线与坡度、山体阴影、韭园沟高舍窠沟沟沿线

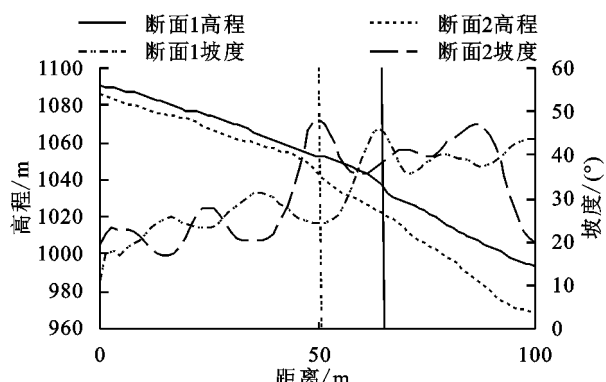


图4 断面剖面

2.1.2 正负地形量化分析

(1)高程和坡度差异:基于2016年的2.5 m分辨率DEM提取坡度,对沟沿线建立5 m缓冲区,统计沟沿线附近高程和坡度的平均值(图5)。结果表明,沟间地和沟谷地平均高程分别为1 079,1 035 m,沟沿线附近平均高程值为1 066 m,介于沟间地和沟谷地之间。沟间地和沟谷地平均坡度值分别为25.3°和44.1°,沟沿线附近平均坡度值为35.2°。与闫国年等^[32]、Tang等^[33]研究在陕北地区沟沿线附近坡度一

般在30°~35°,沟间地坡度一般小于25°,沟谷地坡度一般大于35°的结论相符。

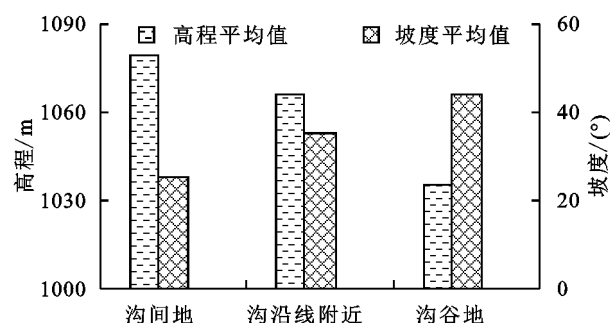


图5 正负地形高程和坡度统计

(2)土地利用差异性:退耕还林(草)工程之前,通常认为沟沿线是明显的土地利用分界线。其上的沟间地一般为耕地,其下部沟谷地一般为草地和少量林地^[32]。1968年的土地利用的正负地形分异具有这种特征(图6a)。1968年沟间地耕地面积占96.7%,林草面积占3.2%;沟谷地耕地面积占27.1%,林草面积占71.6%,耕地和林草面积在正负地形上存在较大差异。2004年和2018年由于大量退耕,沟间地也出现大量草地和林地(图6b),因而这种特征不明显。

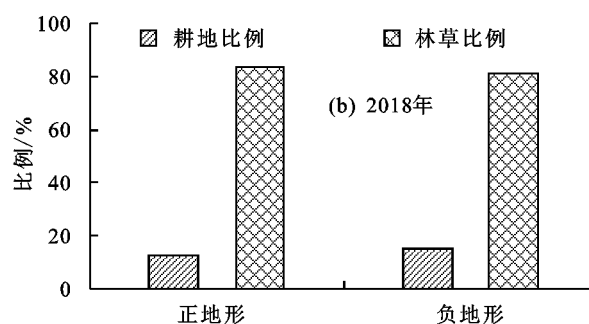
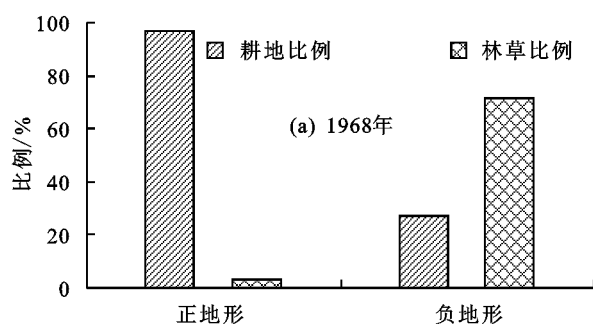


图6 1968年和2018年正负地形土地利用统计

综上,沟沿线在形态上与黄土地貌特征一致,高程、坡度和土地利用在沟间地和沟谷地有明显差异,可见基于配准后高分遥感影像手动解译的沟沿线在整体上是准确的,总体解译精度控制在2个像元可满足侵蚀沟中长期变化研究。

2.2 侵蚀沟时空变化

2.2.1 侵蚀沟形态变化 叠加三期沟谷区,通过沟

谷区的变化来研究侵蚀沟的变化特征(图7)。统计表明,近50年来,沟谷区形态变化明显,3个时期沟谷区面积分别为3.10,3.24,3.25 km²。可见,自1968年来,侵蚀沟一直处于侵蚀状态中,且前一阶段的侵蚀大于后一阶段。

分时段统计50年来侵蚀沟沟壁扩张距离和沟头前进距离(表2)。统计表明,研究区前一时段和后一

时段(近似代表退耕前和退耕后)平均扩张距离是 0.33,0.06 m,年均扩张速率分别是 0.009,0.004 m/a (有显著差异, $P<0.05$)。即自 1968 年来,侵蚀沟的沟壁一直在后退中,但后期侵蚀沟扩张范围大幅减小,平均扩张速率逐渐减弱。前一时段和后一时段沟头平均前进距离为 10.83,3.84 m,年均前进速率分别为 0.30,0.27 m/a(无显著差异, $P>0.05$)。虽后期侵蚀速率有所减缓,但沟头侵蚀仍较为严重。

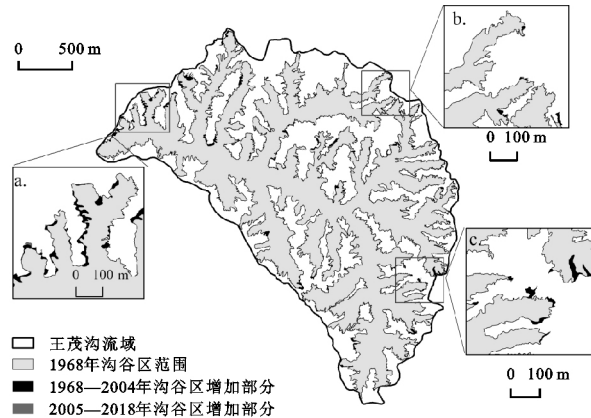


图 7 2 个时期沟谷区变化状况

综上,前一时段沟头溯源侵蚀和沟壁侧蚀均较为明显。该时段基本可代表退耕前的状态,耕地是主要的土地利用类型,侵蚀沟发展主要由于不合理的耕作方式所导致。后一时段,实施退耕还林(草)后,87%的坡耕

地转为林草地,植被覆盖度大幅增加,土壤抗冲性有所提高,侵蚀沟发展得到一定程度的抑制。故随着治理效益的逐步发挥,后期沟壁侵蚀速率减小 0.005 m/a,是前期的 1/2,沟头侵蚀速率减少 0.03 m/a。

表 2 50 年侵蚀沟沟壁扩张和沟头前进统计值

项目	时段	最小值/m	最大值/m	平均值/m	年均速率/(m·a ⁻¹)
沟壁扩张	1968—2004	0.0008	11.36	0.33	0.009 ^a
	2004—2018	0.0007	2.86	0.06	0.004 ^b
沟头前进	1968—2004	0.4200	68.96	10.83	0.300 ^a
	2004—2018	0.4000	32.97	3.84	0.270 ^a

注:不同小写字母表示侵蚀沟沟壁扩张或沟头前进年均速率有显著差异($P<0.05$)。

2.2.2 侵蚀沟变化空间分布 对沟间地侵蚀沟变化密度统计结果(表 3、图 8)表明:(1)1968—2004 年均侵蚀面积最大增长 0.036 km²,对应的年均侵蚀沟变化密度为 100~200 m/(km²·a),占比最大,为 49.61%。年均侵蚀沟变化密度较大值集中分布在中下游沟道地带(如 a₁、a₂、a₃、a₄)。(2)2005—2018 年均侵蚀面积最大增长 0.115 km²,对应的年均侵蚀沟变化密度为 0~100 m/(km²·a),所占比例最大,为 62.67%。年均侵蚀沟变化密度较大的地区分布在沟道下游(如 b₁、b₂、b₃),图 8b 分级图表明该阶段整体变化值较小,沟壁侧蚀和溯源侵蚀明显减弱。

表 3 年均侵蚀沟变化密度分级面积比例统计

统计年	项目	0~100 m/(km ² ·a)	100~200 m/(km ² ·a)	200~300 m/(km ² ·a)	≥300 m/(km ² ·a)
1968—2004	面积/km ²	0.610	1.280	0.590	0.110
	年均面积/km ²	0.017	0.036	0.016	0.003
	比例/%	23.500	49.610	22.710	4.180
	面积/km ²	1.610	0.770	0.130	0.050
2005—2018	年均面积/km ²	0.115	0.055	0.009	0.004
	比例/%	62.670	29.750	5.130	1.940

(3)2 个时期变化量相减(图 8c)表明,整个流域值有 76.65%的面积分布在小于 0 m/(km²·a)范围内,尤其是流域中游地区,小于 -200 m/(km²·a)的值占了

7.01%的面积,说明在该区前期年均侵蚀沟变化密度值远大于后期,主要由于前期治理效益没有发挥出来,后期退耕还林(草)工程和其他治理发挥了作用。

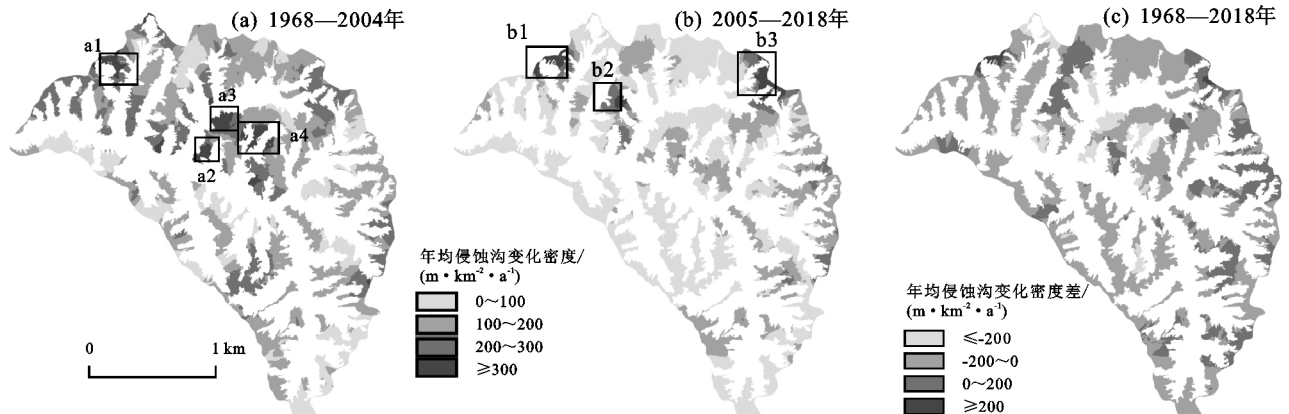


图 8 年均侵蚀沟变化密度分级及密度差分级

2.3 侵蚀沟变化影响因素

2.3.1 侵蚀沟变化主导因素 地理探测器运行结果

(表 4)表明:(1)1968—2004 年时期,土地利用变化(q 值为 0.066)是侵蚀沟变化的主导影响因素。1968 年

耕地和草地是主要的土地利用类型,尤其是沟间地部分几乎全为耕地,土地利用单一(图6、表5);在2000年实行退耕还林(草)生态保护措施后,87%的坡耕地转为草地,使地表蓄水保土能力得到提升,一定程度上减缓了侵蚀沟的发展,所以“耕转草”的变化成为该时段影响侵蚀沟变化的主要因素;(2)2005—2018年,植被覆盖度变化(q 值为0.065)是侵蚀沟变化的主导因素,2004年和2018年年均植被覆盖度分别为0.51和0.62,持稳定增长趋势,对侵蚀沟变化逐渐起作用;(3) LS 因子对侵蚀沟变化影响最小,这可能与研究区地形起伏不明显有关。

表4 主导影响因素 q 值

时段	土地利用变化	水土保持工程措施变化	植被覆盖度变化	LS 因子
1968—2004	0.066	0.019	0.020	0.001
2005—2018	0.043	0.021	0.065	0.001

2.3.2 侵蚀沟变化各因素的交互作用 交互作用计算结果(表6)表明:(1)对于1968—2004年,土地利用变化和水土保持工程措施变化的交互作用对侵蚀沟变化的解释能力最强(q 值为0.104),主要由于该时段有大量坡耕地转为草地,以及梯田和淤地坝等工

程措施的大力修建(表5表明,2004年梯田面积增长至原来的2.4倍,淤地坝面积是1968年的2.2倍),影响侵蚀沟的变化;(2)2005—2018年,植被覆盖度变化和土地利用变化的交互作用(q 值为0.109)对侵蚀沟变化具有最强的影响力。这是因为在该时段土地利用类型逐渐多样化,部分裸地向园地和林地转变;林草地逐渐达到一定的覆盖度,能较有效的实现径流拦蓄作用,植被的量化水保效益开始发挥。(3)在单因子探测中, LS 因子对侵蚀沟影响最弱(q 值为0.001),而在交互作用中, LS 因子与其他三因素交互均为非线性增强,说明地形因子与土地利用和植被覆盖度等综合作用对侵蚀沟是有影响的,不可忽略。

表5 正负地形土地利用、水保工程措施与植被覆盖度

时间	地形分异	土地利用/%		水土保持工程措施/hm ²		植被覆盖度/%
		耕地	林草地	梯田	淤地坝	平均值
1968	正地形	96.71	3.29	126.31	0	14.32
	负地形	27.13	71.59	4.12	16.39	15.24
2004	正地形	3.06	89.78	241.41	0	47.31
	负地形	11.53	84.95	66.85	35.83	54.86
2018	正地形	12.71	83.50	218.04	0	62.16
	负地形	15.24	81.33	62.43	35.3	62.41

表6 影响因素间的交互作用及 q 值

年份	交互作用	$LS \cap FVC$	$LS \cap FVC$	$LS \cap ENG$	$LU \cap ENG$	$LU \cap FVC$	$FVC \cap ENG$
1968—2004	q 值	* 0.076	* 0.022	* 0.026	* 0.104	* 0.089	* 0.048
2005—2018	q 值	* 0.053	* 0.069	* 0.028	* 0.070	* 0.109	* 0.097

注:* 为非线性增强作用,即 $q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$ 。

3 讨论

本文主要利用三期高分辨率卫星影像,辅以植被和地形等数据对侵蚀沟时空变化特征和变化影响因素,在50年时间尺度上进行研究。但受到影像资源的限制,选择1968—2004年和2004—2018年作为退耕前和后2个时段,虽然2004年为刚刚退耕的时期,侵蚀沟形态等特征变化不大,但有可能不能准确评价退耕还林(草)工程对侵蚀沟的影响。同时,对于一个50年尺度上的中长期分析,所用遥感影像的时间点偏少,这会影响对中长期规律的认识。侵蚀沟的变化表现为沟头前进、沟壁扩张和沟底下切3个方面^[13],但是受到DEM数据垂直精度的影响,本研究只分析了沟头前进和沟壁扩张2个方面。近年来,本研究在典型侵蚀沟布设监测断面^[7],随着时间序列的增长,有望通过对侵蚀沟断面变化的分析,认识沟底下切和沟壁扩张的过程。沟沿线、土地利用和水保措施的精确提取,是侵蚀沟变化的基础,本研究使用的人工解译方法,具有工作量大、受解译者业务能力和工作状态影响等缺点。今后应发展机助分类、模式识别、机器学习等方法,以便能快速、客观、精准的提取沟沿线等动态变化信息,提升研究水平。侵蚀沟的变

化受到降水、地质、地貌、土壤和植被等多个因素的共同影响^[14]。本文由于空间尺度限制,降雨在该研究区没有明显趋势性增减,地质在小范围尺度可认为是常数,土壤年际之间的变化不影响本结论,故本文对于侵蚀沟发育影响因素只考虑了土地利用、植被覆盖度、水土保持措施以及地形因子。在进一步的研究中,应扩大研究区,综合考虑土壤类型、地质特征和降水等因素对侵蚀沟变化的影响,也应考虑使用高精度野外测量方法,全面认识侵蚀沟的变化。

4 结论

(1)基于高分遥感影像解译可分析侵蚀沟长时间变化,高分遥感影像对沟沿线的解译结果,与实际地貌特征和前人的研究均较为吻合,正负地形上坡度和高程差异明显,结合提取的土地利用、植被覆盖度、水土保持措施等信息,可用于分析侵蚀沟时空动态变化和影响其变化的驱动因素。

(2)50年来研究区侵蚀沟一直在变化,但变化速度在减缓。1968—2004年侵蚀沟沟壁侧蚀和沟头溯源侵蚀都广泛存在,沟头平均前进速率为0.30 m/a,沟壁平均扩张速率为0.009 m/a;2005—2018年,主

要侵蚀形式以较小的沟头侵蚀进行,平均前进速率为 0.27 m/a ,侧蚀相对减弱,平均扩张速率为 0.004 m/a 。在空间上,年均侵蚀沟变化密度较大值主要分布在流域下游沟道附近,前一阶段年均变化密度在 $100 \sim 200 \text{ m/(km}^2 \cdot \text{a)}$ 占比最大,后一阶段年均变化密度主要分布在 $0 \sim 100 \text{ m/(km}^2 \cdot \text{a)}$ 。

(3)土地利用变化是侵蚀沟变化主要驱动因子,研究前期主要受到土地利用和水保工程措施变化的影响,耕地的持续减少、坝地的大幅度增加,是侵蚀沟变化的主要因素;研究后期,植被覆盖度持续改善以及土地利用呈现多样性,共同减缓了侵蚀沟的变化。 LS 因子在单因素分析中对侵蚀沟动态变化的影响作用较弱,但在土地利用方式变化的条件下对侵蚀沟动态变化的解释能力明显增强。

参考文献:

- [1] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956,4(2):99-115.
- [2] 蒋德麒,赵诚信,陈章霖.黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J].地理学报,1966,33(1):20-36.
- [3] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. Catena, 2005, 63(2): 132-153.
- [4] 刘元保,朱显谟,周佩华,等.黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):9-18.
- [5] Wu Y Q, Cheng H. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a Global Positioning System[J]. Catena, 2005, 63(2): 154-166.
- [6] 马鼎,李斌兵.黄土沟壑区切沟植被的激光点云滤波及地形构建[J].农业工程学报,2013,29(15):162-171,301.
- [7] 王雷,龙永清,徐佳,等.黄土侵蚀沟稳定性监测与初步分析[J].地理与地理信息科学,2017,33(4):119-122.
- [8] 刘宝元,刘刚,王大安,等.区域沟蚀野外调查方法:以东北地区为例[J].中国水土保持科学,2018,16(4):34-40.
- [9] 闫业超,张树文,李晓燕,等.黑龙江克拜黑土区 50 多年来侵蚀沟时空变化[J].地理学报,2005,60(6):1015-1020.
- [10] 王文娟,邓荣鑫,张树文.东北典型黑土区 40 年来沟蚀空间格局变化及地形分异规律[J].地理与地理信息科学,2012,28(3):68-71.
- [11] 黄萌,范昊明.辽宁省侵蚀沟发育特性及地形分异特征[J].水土保持学报,2017,31(5):93-98.
- [12] 白舒婷,张树文,王让虎,等.基于高分影像与地理国情普查成果的侵蚀沟分异特征分析[J].地理与地理信息科学,2018,34(3):103-107.
- [13] 景可.黄土高原沟谷侵蚀研究[J].地理科学,1986,6(4):340-347.
- [14] 朱显谟.黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J].水土保持通报,1982,2(3):40-44.
- [15] 唐克丽,张科利,刘元保,等.黄土高原人为加速侵蚀与全球变化[J].水土保持学报,1992,6(2):88-96.
- [16] 郑粉莉,唐克丽,张科利,等.自然侵蚀和人为加速侵蚀与生态环境演变[J].生态学报,1995,15(3):251-259.
- [17] 张永光,伍永秋,刘洪韵,等.东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J].水土保持学报,2007,21(49):35-38,49.
- [18] 孙根行,王湜,赵串串,等.青海省黄土丘陵沟壑区沟蚀影响因子的贡献率[J].生态环境学报,2009,18(4):1402-1406.
- [19] 陈一先,焦菊英,魏艳红,等.陕北黄土区退耕前(1976—1997)坡面切沟发育特征[J].农业工程学报,2017,33(17):120-127.
- [20] 刘宝元,刘晓燕,杨勤科,等.黄土高原小流域水土流失综合治理抗暴雨能力考察报告[J].水土保持通报,2017,37(4):349-350.
- [21] 王楠,陈一先,白雷超,等.陕北子洲县“7·26”特大暴雨引发的小流域土壤侵蚀调查[J].水土保持通报,2017,37(4):338-344.
- [22] 上官周平.黄土高原地区水土保持与生态建设的若干思考[J].中国水土保持科学,2006,4(1):1-4.
- [23] 朱梦阳,杨勤科,王春梅,等.泛第三极土壤侵蚀遥感抽样调查方法研究[J].水土保持学报,2019,33(5):64-71.
- [24] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等.基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J].水土保持通报,2010,30(2):203-206,211.
- [25] 张宏鸣,杨勤科,刘晴蕊,等.基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法[J].计算机工程,2010,36(9):246-248.
- [26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [27] 水利部水土保持司.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [28] 朱震达.应用数量方法来研究黄土丘陵地区的侵蚀地貌:以陕西绥德县韭园沟高舍窠“建设”高级农业生产合作社为例[J].地理学报,1958,25(3):275-305.
- [29] 罗来兴.划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J].地理学报,1956,23(3):201-222.
- [30] 中科院自然地理编委会.中国自然地理·地貌[M].北京:科学出版社,1980.
- [31] Zhou Y, Tang G A, Yang X, et al. Positive and negative terrains on northern Shaanxi Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(1): 64-76.
- [32] 阎国年,钱亚东,陈钟明.基于栅格数字高程模型自动提取黄土地貌沟沿线技术研究[J].地理科学,1998,18(6):567-573.
- [33] Tang G A, Xiao C, Jia D, et al. DEM based investigation of loess shoulder-line[C]// Geoinformatics: Geospatial Information Science. Geoinformatics 2007.