

黑龙江省拜泉县典型区坡耕地侵蚀沟发育的影响因素

钱志晶¹, 刘焯¹, 侯驭麒¹, 高澳¹, 牛羽萱¹, 徐金忠², 肖洋¹

(1.黑龙江大学 现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2.黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: [目的] 探究东北漫川漫岗黑土区侵蚀沟发育特征, 揭示坡耕地侵蚀沟影响因素, 为该区侵蚀沟治理提供科学依据及数据支撑。[方法] 选取黑龙江省拜泉县国富镇的 61 条典型坡耕地侵蚀沟为研究对象, 采用无人机航拍技术生成数字高程模型, 并基于研究区域的遥感影像等数据源, 提取并分析坡度、坡向、海拔高度等因素对坡耕地侵蚀沟形态变化及发育特征的影响。[结果] ①研究区侵蚀沟沟长、面积和体积与影响因素(坡度、海拔高度和集水面积)之间存在显著相关性。除沟长外, 侵蚀沟形态参数与影响因素相关性从大到小依次为集水面积>坡度>海拔高度。②侵蚀沟沟长变化及形态指数随坡度增加呈逐渐下降变化趋势, 在坡度为 0°~2°范围内达最大值。沟深则随坡度增大而增大, 坡度峰值为 4°~5°; 阳坡、半阳坡坡向侵蚀沟发育显著, 西南坡向侵蚀沟发育最为迅速; 研究区平均沟长变化及形状指数随海拔高度变化呈先升高后降低的变化趋势, 在海拔高度 230—240 m 范围内达到峰值。③研究区侵蚀沟所处集水面积越大, 侵蚀沟形态参数越大, 侵蚀沟发育也越剧烈。当集水面积在 >20 hm² 区间内时, 侵蚀沟沟长变化和沟缘面积达到峰值。④侵蚀沟形态参数与影响因素构建的多元回归模型, 拟合程度较高。沟长、面积、体积拟合模型相关系数分别为 0.73, 0.47, 0.16。[结论] 拜泉县典型区侵蚀沟发育受坡度、坡向、集水面积及海拔高度影响显著, 治理时应优先针对治理分布在 2°~3°坡度、东南坡坡向、海拔高度 230—240 m 及集水面积 >20 hm² 的侵蚀沟。

关键词: 侵蚀沟; 黑土; 黑龙江省拜泉县; 坡耕地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0166-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 钱志晶, 刘焯, 侯驭麒, 等. 黑龙江省拜泉县典型区坡耕地侵蚀沟发育的影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 166-176. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.018; Qian Zhijing, Liu Ye, Hou Yuqi, et al. Factors affecting development of erosion gullies on typical slope farmland at Baiquan County of Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 166-176.

Factors Affecting Development of Erosion Gullies on Typical Slope Farmland at Baiquan County of Heilongjiang Province

Qian Zhijing¹, Liu Ye¹, Hou Yuqi¹, Gao Ao¹, Niu Yuxuan¹, Xu Jinzhong², Xiao Yang¹

(1. College of Advance Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. Hydro-science Research Institute of Hydro-science of Heilongjiang, Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract: [Objective] The development characteristics of erosion gullies at black soil area in rolling hilly area in Northeast China were explored, and the influencing factors of erosion gullies in sloping farmland were revealed, in order to provide scientific basis and data support for erosion gully control in the region. [Methods] The study selected 61 typical erosion gullies on sloping farmland at Guofu Town, Baiquan County, Helongjiang Province, as research sites. Factors such as slope, aspect, altitude, and catchment area were extracted and analyzed for their effects on the morphological changes and development characteristics of gullies on sloping farmland, using drone aerial photography techniques to generate digital elevation models and based on data sources such as remote sensing images in the study area. [Results] ① The length, area, and volume of the erosion gullies in the study area showed a significant correlation with factors such as slope, altitude, and catchment area. Except for gully length, the correlation between gully morphological parameters and

收稿日期: 2024-07-09

修回日期: 2024-07-26

资助项目: 国家重点研发计划项目子课题“北部低山丘陵水蚀区土壤侵蚀防治保护性利用模式”(2021YFD150080503); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2020D018)

第一作者: 钱志晶(2000—), 女(汉族), 江苏省盐城市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与农业资源。Email: yanchenqianzhijing@163.com.

通信作者: 肖洋(1978—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持与农业资源方面的研究。Email: xiaoyang@hlju.edu.cn.

influencing factors ranked from large to small (i.e., catchment area > slope > altitude). ② Gully length variation and shape index showed a gradual decrease with increasing slope, reaching the maximum value within the range between 0° and 2° . Gully depth increased with increasing slope, peaking at 4° to 5° ; significant variations were observed in gully development on sunny and semi-sunny slopes, with the most rapid development occurring on southwest-facing slopes. The average gully length and shape index in the study area showed a trend of first increasing and then decreasing with increasing altitude, reaching a peak in the range of 230—240 m. ③ Larger catchment areas corresponded to larger gully morphological parameters and more intense gully development. When the catchment area was within the range of $>20 \text{ hm}^2$, the variations in gully length and gully bank area reached their peak values. ④ A multivariate regression model constructed with gully morphological parameters and influencing factors showed a high degree of fit. The fitting coefficients for gully length, area, and volume were 0.73, 0.47, and 0.16, respectively. [Conclusion] The development of erosion gullies in typical areas of Baiquan County is significantly influenced by slope, aspect, catchment area, and altitude. It is recommended to prioritize erosion control measures for gullies located on slopes between 2° and 3° , facing southeast, at altitudes of 230—240 m, and with catchment areas exceeding 20 hm^2 .

Keywords: erosion gully; black soil; Baiquan County, Heilongjiang Province; slope farmland

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力、风力、冻融或重力等外营力作用下,破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程^[1-2]。土壤作为人类生存与发展的基本资源,不仅是地球陆地生态系统的重要组成部分,还是粮食产量及人类生存质量的关键。2020年以来,土壤侵蚀引起的生态环境问题愈加受到世界广泛关注与高度重视,联合国已经将土壤侵蚀作为世界面临的十大环境问题之一^[3-4]。许多国家土壤资源迅速流失,粮食生产安全遭到严重威胁^[5-6]。中国东北地区自20世纪50年代大规模开垦以来,黑土长期高强度利用导致土壤有机质含量大幅下降,黑土耕作层土壤有机质含量下降了近1/3。东北黑土区面临着严重的沟蚀威胁,每年因侵蚀沟发育造成的粮食损失达 $3.62 \times 10^9 \text{ kg}$ ^[7]。耕地资源严重透支,严重影响农业可持续发展。

土壤侵蚀是多种自然因素与社会因素共同作用的结果,其发育过程受降雨、地形、植被和土地利用等多种因素影响^[8-10]。明确土壤侵蚀影响因素可以更好地了解土壤侵蚀的机理和发育规律,有助于制定科学合理的耕作方式,有效保障农业生产的可持续发展^[11-12]。对于保护土地资源、促进农业生产、维护生态环境和促进社会经济可持续发展具有重要意义。为保障我国粮食生产安全,深化侵蚀认知。国内外许多学者针对侵蚀时空分布格局^[13-15]、发育状况^[16-17]、治理措施^[18-19]以及动态监测^[10,20]等方面展开评述。

已有研究表明,降雨、地形因素、植被覆盖以及土地利用方式对土壤侵蚀具有显著影响,是东北黑土区土壤侵蚀发生发育的主导因素^[21-22]。沟蚀作为东北黑土区土壤侵蚀的主要表现形式,其发生发展需要一定的降雨产生径流提供动力,降雨强度、降雨历时均会影响降雨侵蚀力从而导致侵蚀的发生^[23]。地形也

可以通过影响径流汇集及其侵蚀能量影响沟蚀发育^[7]。坡度、坡长作为反映区域地形特征的主要因素,密切影响土壤侵蚀发生的强度与过程^[24]。郭明航等^[25]研究发现坡度、坡长不仅影响土壤的稳定性、入渗速率,其交互作用还决定集水区特征影响侵蚀沟发育,侵蚀强度也随坡度和坡长的增加而增加。除地形外,土地利用方式也是显著影响侵蚀发育的重要因素,人为活动导致的覆盖变化加大侵蚀强度的变化。李茂娟等^[7]利用侵蚀沟裂度从土地利用变化分析近50 a来东北黑土区沟蚀变化,发现毁林开荒严重加剧黑土区侵蚀状况。相较于草地和林地,耕地更易于导致侵蚀发生,治理也更为困难。这些研究结果表明探索侵蚀影响因素对于有效针对治理侵蚀具有重要意义。

然而,目前东北漫川漫岗黑土区侵蚀沟的影响因素研究相对较少。因此本研究重点分析漫川漫岗黑土区影响侵蚀沟发育的主要因素,这对于探索漫川漫岗黑土区沟蚀发生机理及发育规律具有重要意义。

鉴于此,本研究选取漫川漫岗黑土区黑龙江省拜泉县典型区61条侵蚀沟为研究对象。人工目视解译且结合无人机遥感航测影像获得侵蚀沟形态参数,并利用GIS技术分析高分辨率DEM数据,提取坡度、坡向及海拔高度等影响因素。探究坡度、坡向、海拔高度及集水面积对侵蚀沟发育变化影响,并构建侵蚀沟发育模拟模型。研究结果可为漫川漫岗黑土区侵蚀沟治理提供科学依据及数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省齐齐哈尔市拜泉县国富镇($47^\circ 20' - 47^\circ 55' \text{N}$, $125^\circ 30' - 126^\circ 31' \text{E}$),地处小兴安

岭余脉与松嫩平原的过渡地带。属中温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨。国富镇镇域面积共 224.73 km²,其辖区现状为中度侵蚀。该区多年平均降水量 488.2 mm,降水季节分布不均,降雨主要分布在 7—9 月,占全年降雨量 80% 以上。多年平均气温为 1.6 ℃,全年有效积温(≥10 ℃)为 2 320 ℃,年均日照时间为 2 730 h。地形为典型漫川漫岗,坡度为 3°~8°,海拔高度为 145~300 m。土壤类型以黑土、黑钙土、草甸土和沼泽土为主,主要耕作土壤为黑土。土壤分层明显,有机质含量为 4% 左右,黑土层厚度约为 30 cm。作物类型主要以大豆和玉米轮作为主,主要耕作方式为顺坡垄作。由于垦殖历史较久,垦殖率高,原生植被大部分遭到破坏。水土流失情况较为严重,是当地水土流失防治的重点治理区域之一。

1.2 数据来源

本文历史影像来源于法国国家太空研究中心(CNES)已公开发布的 SPOT5 卫星 2003 年拍摄的全色波段影像及 Google Earth 整合发布的 Pleiades 卫星 2013,2021 年卫星影像,空间分辨率分别为 0.5 和 5.0 m;航测数据来源于拜泉县 2021 年 10 月野外调查无人机实地测量采集。飞行设备为 DJI 大疆精灵 Phantom4 无人机搭载 FC330 云台相机,最大分辨率为 5 472×3 648。地形数据来源于 BIGEMAP 地图下载器(<http://www.bigemap.com>),并应用 ArcGIS 提取坡度、坡向、海拔高度等数据(分辨率为 10 m×10 m),投影坐标系为国家大地坐标系 CGCS 2000,格式为 TIF。

1.3 侵蚀沟空间信息提取及分析

(1) 沟道形态参数信息提取与识别。对无人机航拍影像进行空中三角测量计算、点云生成等处理,形成可视化三维模型。以 2003,2013 和 2021 年影像

为基础数据源,利用 Envi 对 spot5 卫星和 Pleiades 卫星的全色与多光谱影像进行正射校正和图像融合等预处理工作,统一坐标系为国家大地坐标系 CGCS2000,使其与研究区范围精准拟合匹配。应用 color mapping 功能对图像灰度及色彩进行调整拉伸,增强地貌特征,提高图像精度。根据研究区影像光谱特征及侵蚀沟纹理特征,通过人工目视解译方式提取侵蚀沟长度(L/m)、沟深(D/m)、面积(A/m^2)等形态参数。并在基本形态特征参数的基础上提出了形状指数(SI)这一衍生形态参数。

形状指数(SI)是引入景观格局斑块形状指数定义^[26],通过计算某一斑块与相同面积的正方形之间的偏离程度来测量其形状复杂程度。正方形斑块指数的值为 1,指数值越大,表明形状斑块与正方形相差越大,斑块形状越长。计算公式为:

$$SI = \frac{0.25P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

式中:SI 表示形状指数;P 表示侵蚀沟周长(m);A 表示侵蚀沟面积(m²)。

(2) 侵蚀沟影响因素的提取与分级。选用 ArcGIS 空间分析功能依据国富镇边界范围进行掩膜提取,获取研究区地形数据。如图 1—2 所示,利用 Arc Toolbox 工具箱中“Spatial Analyst,水文分析”等工具,提取研究区坡度、坡向、海拔高度及集水面积等数值。并按拜泉县典型区实际情况重新分级,记录每个分级在拜泉县典型区整体情况中所占比例。将研究区坡度、坡向及海拔高度等数值与侵蚀沟形态参数进行叠加,得到不同坡度、坡向上侵蚀沟形态参数特征值。

1.4 数据分析

试验数据提取完成后,利用 Origin 2022,Excel 2020 和 SPSS 19.0 软件对原始数据进行统计分析。

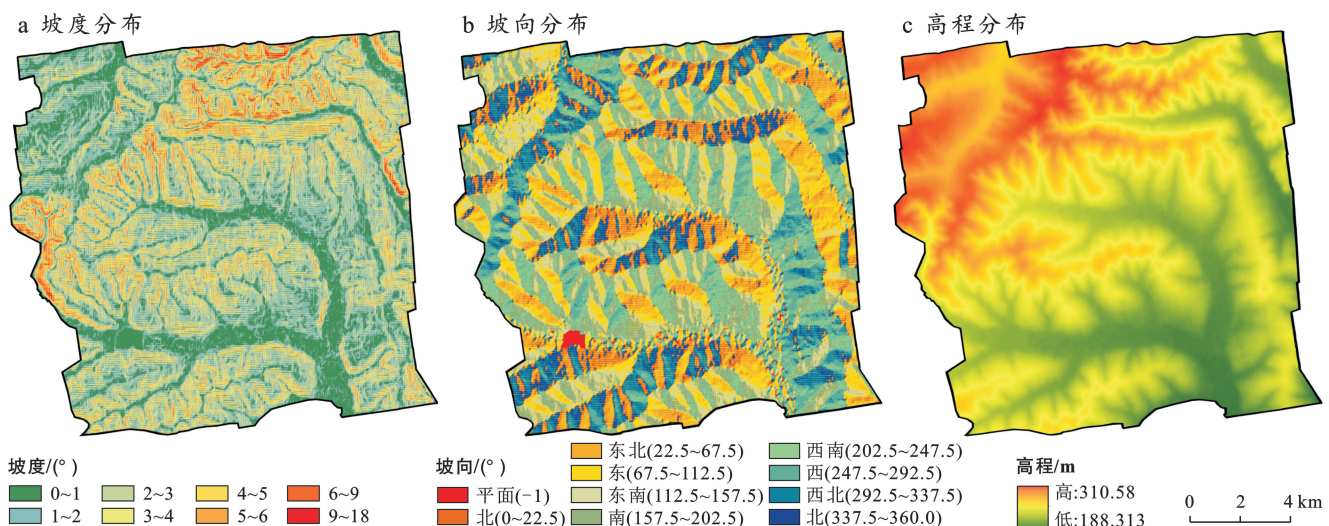


图 1 黑龙江省拜泉县国富镇地形数据

Fig.1 Topographic data of Guofu Town, Baiquan County, Heilongjiang Province



图 2 研究区某沟道集水面积分布示意图

Fig.2 Diagram of catchment area distribution at a gully in study area

2 结果与分析

2.1 侵蚀沟形态参数与影响因素的相关性分析

相关性分析结果表明,拜泉县典型区侵蚀沟形态参数与影响因素均呈显著($p < 0.01$)相关,研究区侵蚀沟沟长、周长、面积及体积与集水面积均呈显著正相关。形态参数与集水面积相关性从大到小依次为:沟长 > 周长 > 面积 > 体积,相关系数分别为 0.854, 0.831, 0.701, 0.356。这表明集水面积与侵蚀沟沟长、周长、面积 3 个形态间信息重叠较多,因此集水面积对侵蚀沟形态影响显著。侵蚀沟面积、体积与集水面积的相关性显著低于沟长,此外集水面积还与侵蚀沟沟深呈负相关关系,相关系数为 -0.169 。沟深与集水面积无显著相关关系,集水面积对沟深影响较小。

坡度和海拔高度也与侵蚀沟的形态参数存在显著的负相关关系($p < 0.01$)。坡度与沟长之间显著负相关关系为 -0.461 ($p < 0.01$),相比浅沟时期^[27]坡度的影响有所减小,表明坡度主要在侵蚀沟发育早期起重要作用。但坡度与沟深之间呈正相关关系($R = 0.42$, $p < 0.01$),海拔高度与形态参数间也存在与坡度类似的相关关系。

2.2 坡度对侵蚀沟发育影响

根据漫川漫岗黑土地区缓坡长的特点,将研究区的坡度分为 6 个等级:Ⅰ为 $[0^\circ, 2^\circ)$,Ⅱ为 $[2^\circ, 3^\circ)$,Ⅲ为 $[3^\circ, 4^\circ)$,Ⅳ为 $[4^\circ, 5^\circ)$,Ⅴ为 $[5^\circ, 6^\circ)$,Ⅵ为 $[6^\circ, 18^\circ)$,分析不同坡度分区的侵蚀沟特征值变化。从沟长发育变化和形状指数来看,研究区侵蚀沟总体沟长变化和形状指数随坡度增高呈现下降变化趋势。不同侵蚀沟发育时期沟长平均变化峰值分布有所不同,除 2003—2013 年研究区沟长变化峰值在 $[2^\circ, 3^\circ)$ 外,研究区 2013—2021 年和 2003—2021 年侵蚀沟沟长变

化峰值均在 $[0^\circ, 2^\circ)$ 坡位。同一地形坡度下侵蚀沟在不同发育时期表现出不同的增长情况,除 1 级坡度外,2003—2013 年的年均沟长变化始终大于 2013—2021 年。研究区不同侵蚀沟发育时期的形状指数呈相似的变化趋势,坡度等级为 1 时,研究区形状指数最高,侵蚀沟外缘形状最为复杂。坡度等级越高,侵蚀沟外缘形状越趋于简单。

但坡度等级越高,沟道侵蚀下切越严重。如图 3 所示,研究区侵蚀沟坡度等级为 1 时,其研究区侵蚀沟均深最低。坡度等级为 5 时均值最高,约为最小值的两倍。整体侵蚀沟坡度每升高一级,其侵蚀沟沟深就增加 0.40 m。坡度等级从Ⅲ级升为Ⅳ级时,沟深变化最大,均深约增加 1.37 m。相较于坡度对沟长变化及沟深的影响,坡度对体积的影响相对较小。研究区侵蚀沟体积随坡度等级升高波动变化,整体呈先增大后减小的变化趋势。第Ⅴ坡度等级平均侵蚀体积最小,坡度等级Ⅳ侵蚀沟体积则为最高,其平均值为坡度等级Ⅴ的 3.37 倍。这主要是由于第Ⅳ坡度等级出现一条大型冲沟,侵蚀体积区间跨度大,最大值与最小值相差 120 倍。

2.3 坡向对侵蚀沟发育影响

坡向作为影响侵蚀沟形态特征的重要影响因素之一,不同坡向所接受的水热条件、太阳辐射等均有差异。如图 4 所示,2003—2013 年侵蚀沟沟长变化主要集中在 SE, NE 坡向,而 2003—2021 年典型区总体沟长变化集中在 SE 的坡向上,其次是 E, NE, S, W 坡向上(阳坡),而 N, SW, NW 坡向(阴坡)侵蚀沟沟长变化较低。总体 SE 坡向对于侵蚀沟沟长变化影响较大,侵蚀发育剧烈。而 2003—2013 年和 2013—2021 年侵蚀沟阳坡阴坡长度变化比值分别为 1.05 和 1.73,坡向对侵蚀沟长度变化的影响随时间推移逐渐增大。

侵蚀沟缘面积变化与沟长变化在不同坡向上存在一定差异,2003—2021 年沟缘面积变化也主要集中在 SE, S 坡向上,但 2003—2013 年和 2013—2021 年阳坡阴坡沟缘面积变化比值分别为 1.11 和 1.03,这与侵蚀沟沟长变化后期阳坡阴坡变化比值大于沟长变化早期情况相反。

相较于沟长变化及沟缘面积,坡向对侵蚀沟形状指数的影响较小。N 坡向上的侵蚀沟形状指数始终保持最大值,外缘形状最为复杂且随时间推移不断向曲折式发展。除 2003 年形状指数最小值为 W 坡向外,2013 和 2021 年形状指数最小值均在 SW 坡向。侵蚀沟体积方面,阳坡坡向(W, SE 和 S)侵蚀沟体积发育剧烈,特别是 W 坡向最大,约为 NE 坡向的 3.95 倍。这表明阳坡坡向的侵蚀强度和土壤流失情况更为严重。

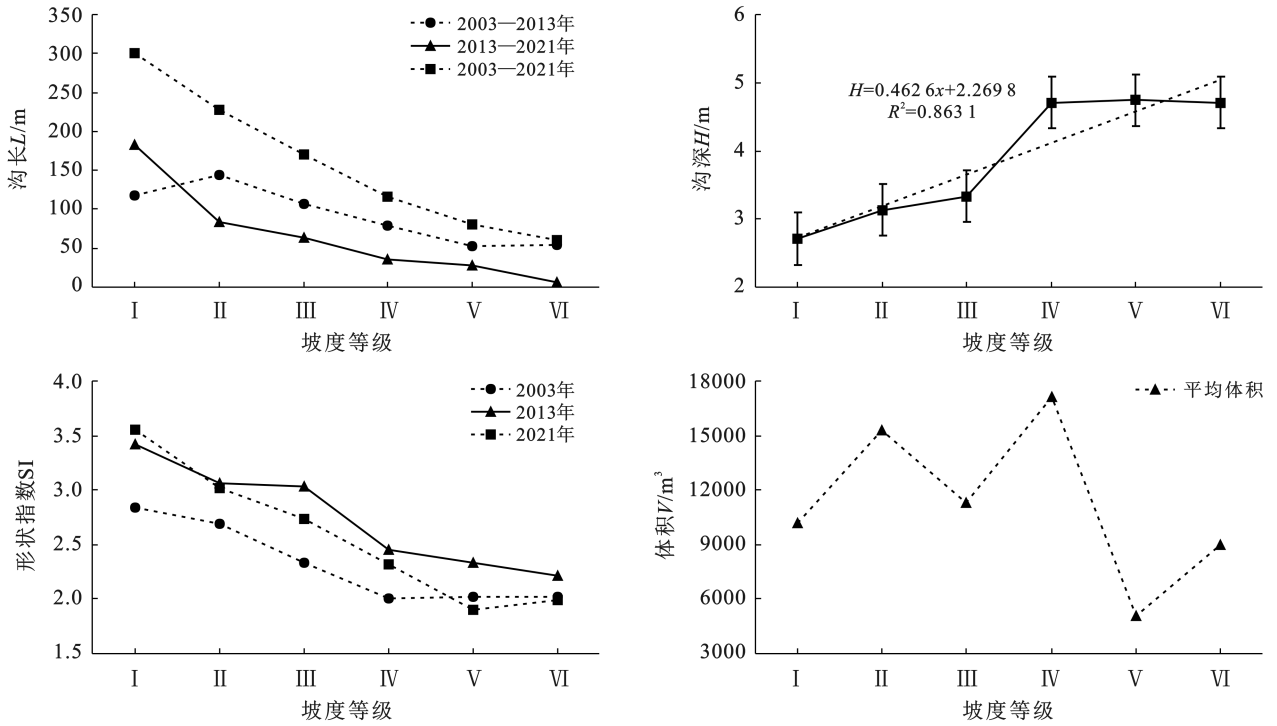


图 3 不同坡度分级条件下各年限范围内侵蚀沟形态参数变化

Fig.3 Changes in erosion gully morphological parameters for different slope grades

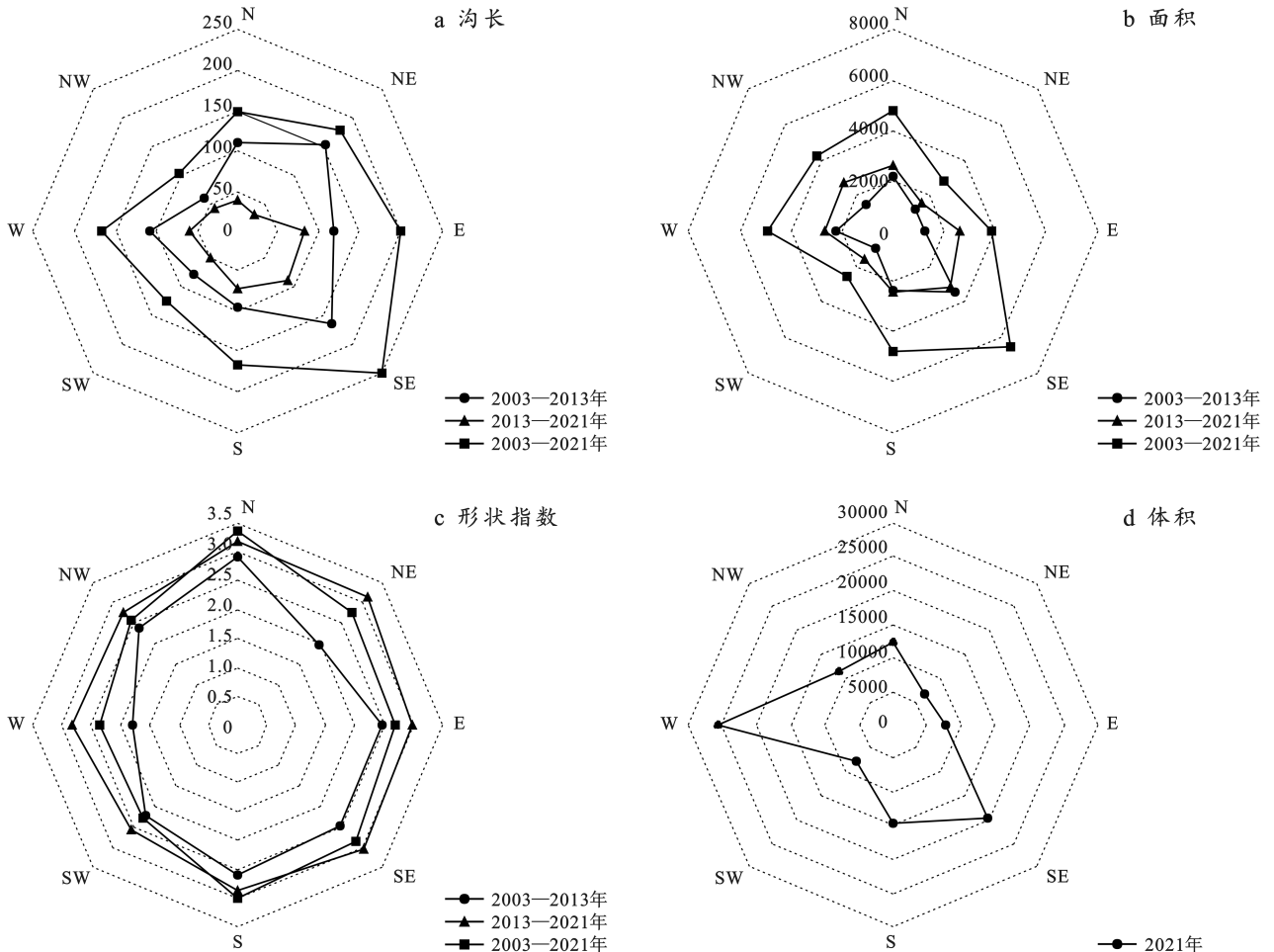


图 4 不同坡向条件下各年限范围内侵蚀沟形态参数变化

Fig.4 Changes in erosion gully morphological parameters for different slope grades

2.4 海拔高度对侵蚀沟发育影响

依据研究区侵蚀沟实际海拔高度情况将海拔高度分为 [188, 230), [230, 240), [240, 250), [250, 260), [270, 280), [270, 280) 及 [280, 311) 7 个等级。如图 5 所示,沟长变化及形状指数随海拔高度等级升高均呈现出升高后下降的变化趋势。当研究区海拔高度为 [230, 240) m 时,研究区侵蚀沟长度发育速度和侵蚀沟复杂程度达到最高,平均变化速率达 14.46 m/a, SI 值为 3.21。同一海拔高度侵蚀沟,不同年限侵蚀沟发育变化及形状指数均有不同。研究区 2003—2013 年沟长变化速率显著大于 2013—2021 年,但形状指数显著低于 2013—2021 年。这表明

研究区海拔高度对沟长发育的影响随时间推移呈下降趋势,侵蚀沟外缘形状随时间推移逐渐趋于复杂。研究区侵蚀沟体积随海拔高度等级的增高而呈波动变化趋势,这与沟深变化趋势相似。当侵蚀沟处于 [188, 260) m 海拔高度时,侵蚀沟体积随海拔高度等级的增高呈先增大后减小的变化趋势,在海拔 [230, 240) m 时平均侵蚀体积达到峰值。当海拔高度 > 260 m 时,体积随海拔高度增高而增高。侵蚀沟处于第 7 等级时,研究区土壤侵蚀最为剧烈,体积和均深最大。总体而言,随海拔高度增高沟道外缘形状逐渐趋于简单,对侵蚀发育影响则呈低—高一低的变化趋势。

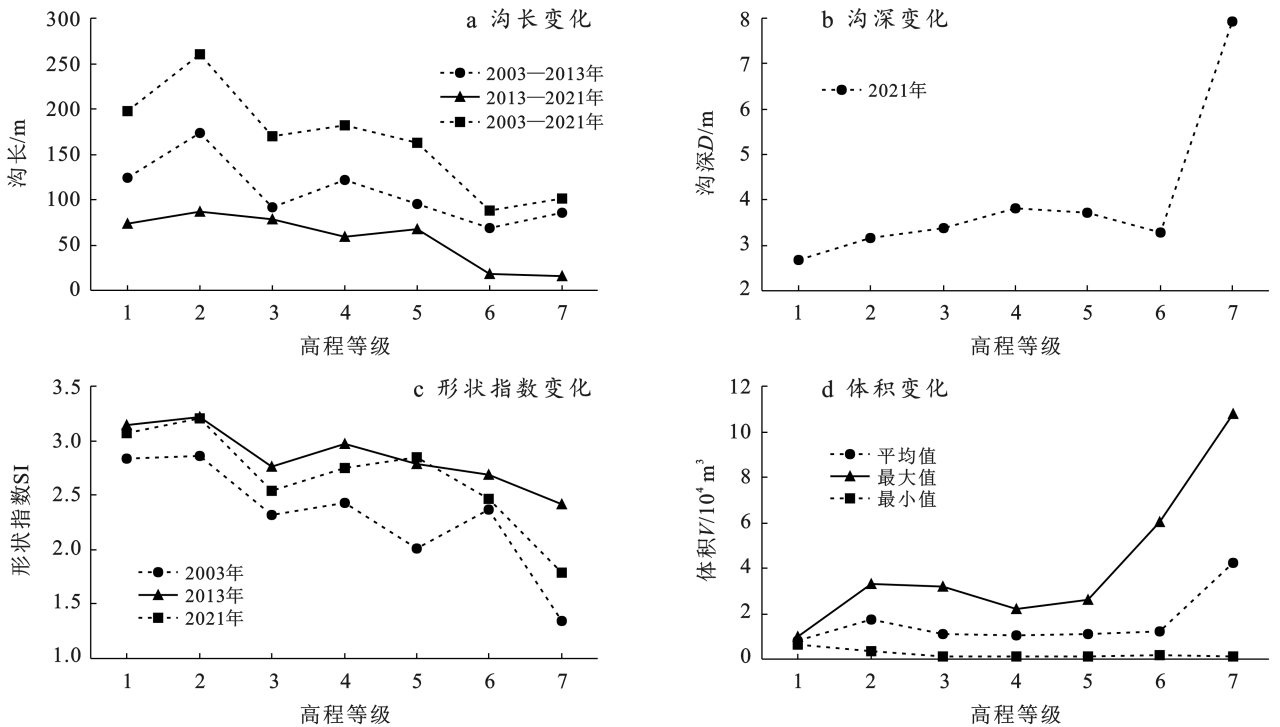


图 5 不同海拔高度条件下各年限范围内侵蚀沟形态参数变化

Fig.5 Changes in erosion gully morphological parameters for different elevations

2.5 集水面积对侵蚀沟发育影响

将研究区集水面积分为 5 个部分,分别为 [0, 5), [5, 10), [10, 15), [15, 20), [20, 60) hm²。从各年限沟长和沟缘面积变化来看,沟长和沟缘面积变化均呈随集水面积的增加而增大的变化趋势。如图 6 所示,研究区集水面积 [20, 60) hm² 时,沟长变化值和沟缘面积变化值达到最大,侵蚀发育最为剧烈。其次为 [15, 20), [5, 10), [10, 15) hm²;而当集水面积 < 5 hm²

时,沟长变化值和沟缘面积变化值最低。2003—2013 年沟长变化值显著大于 2013—2021 年。体积也呈现与均长、沟缘面积相似的变化趋势,当研究区集水面积 ≥ 20 hm² 时,体积均值达到最高,土壤侵蚀最为严重。

2.6 侵蚀沟形态参数和影响因素的多元回归分析

将侵蚀沟长度、面积及体积与坡度、海拔高度及集水面积进行多元线性回归分析。回归分析方程为:

$$L = 117.486\ 31 + 8.645\ 44S - 18.022\ 32PD + 1\ 794.297\ 51CA \quad (R^2 = 0.73) \quad (2)$$

$$A = -702.405\ 73 + 330.504\ 80S + 110.287\ 33PD + 37\ 276.960\ 78CA \quad (R^2 = 0.47) \quad (3)$$

$$V = -11\ 595.053\ 14 + 1\ 743.748\ 51S + 2\ 389.552\ 10PD + 75\ 583.925\ 30CA \quad (R^2 = 0.16) \quad (4)$$

式中: L 为沟长(m); A 为侵蚀沟面积(m^2); V 为侵蚀沟体积(m^3); S 为坡度;PD为海拔高度;CA为集水面积(hm^2)。

沟长与侵蚀影响因素模型拟合优度情况较好,拟合模型可以解释 73% 的数据变化,侵蚀沟影响因素对沟长存在显著影响,侵蚀沟长会随着侵蚀沟所处坡度及集水面积的增加而增加,随海拔高度的增高而减小。侵蚀沟面积与侵蚀影响因素的拟合模型可以解

释 47% 的数据变化,侵蚀沟影响因素对侵蚀沟面积存在一定影响,侵蚀沟面积会随着侵蚀沟所处坡度、海拔高度及集水面积的增加而增加。与沟长及面积的拟合情况不同,研究区侵蚀沟体积与侵蚀影响因素的拟合模型仅可以解释 16% 的数据变化。侵蚀沟影响因素对侵蚀沟体积存在影响,体积会随着侵蚀沟所处坡度、海拔高度及集水面积的增加而增加,但模型模拟度较低。

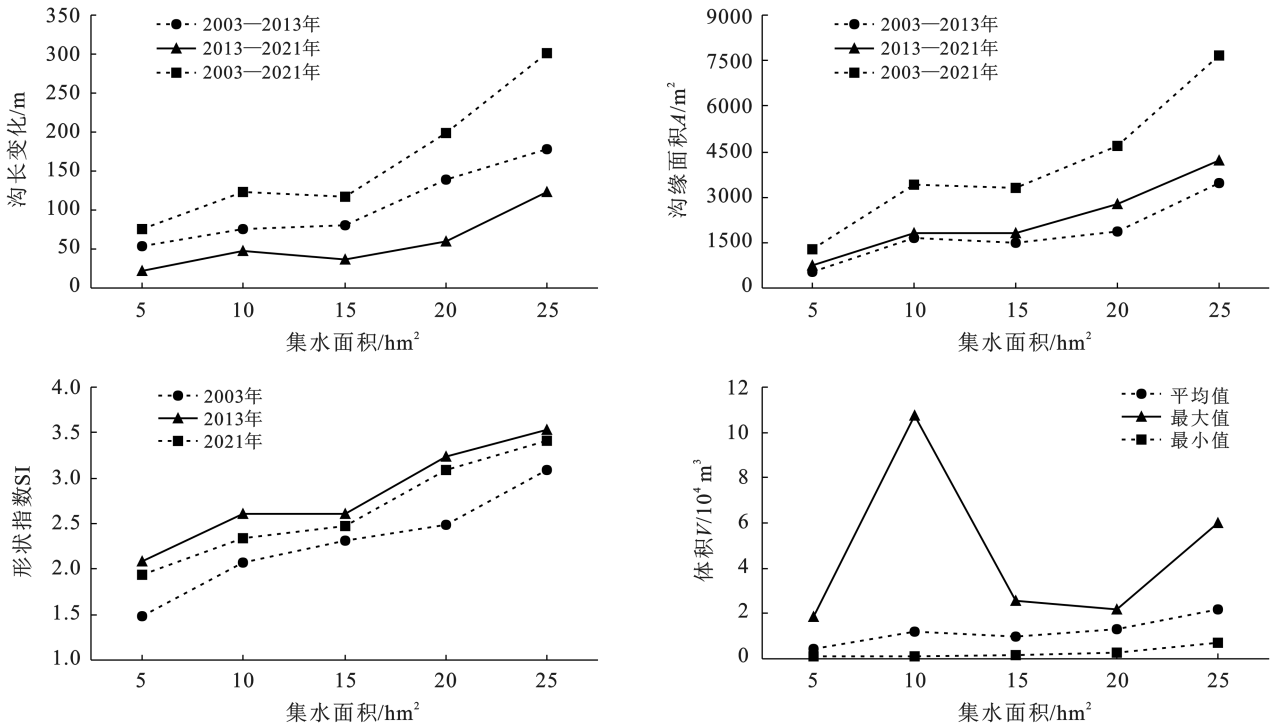


图 6 不同集水面积下各年限范围内侵蚀沟形态参数变化

Fig.6 Changes in erosion gully morphological parameters under different catchment areas

3 讨论

侵蚀沟发育及分布是气候、地形、植被及人类活动等多种自然和人为因素相互作用的结果。不同区域侵蚀沟所处外部环境不同,其所受影响因素也不同。本文针对拜泉县典型区域选取 61 条侵蚀沟,以 DEM 为数据源,利用 ArcGIS 软件获取典型区域的坡度、坡向、海拔高度等地形因子,并探究区域不同地形因子对区域侵蚀沟形态参数影响规律。结果表明拜泉县典型区域坡度、坡向、海拔高度等影响因素对侵蚀沟发育均具有一定的促成作用,不同影响因素其侵蚀沟形态参数分异也有所不同。

随坡度等级的升高,拜泉县典型区侵蚀沟沟长分布呈持续下降变化趋势,这与 Zhang Shengmin 等^[28]结果相似,但与焦鹏等^[29]研究结果不同。焦鹏等^[29]发现东北低山丘陵区侵蚀沟随坡度增大呈现先增大

后减小的规律,侵蚀沟分布及侵蚀密度主要集中在 $6^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 。冯甜^[30]研究发现陕北区黄土丘陵区沟长分布也呈相似变化趋势,这与拜泉县典型区集中分布坡度存在显著差异。这可能是由于研究区所处地区不同,侵蚀沟外部环境迥异,除地形外还有气候、植被等其他因素影响沟长分布。对比不同年限沟长变化分布发现,2003—2013 年坡度等级小于 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 时,沟长变化与坡度呈正相关。而坡度等级大于 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 时,沟长与坡度则呈负相关关系。其成因可能是由于坡度达到一定程度后,缺乏足够的汇水面积和坡长加剧侵蚀,导致侵蚀沟发育受限^[31-32]。

由于不同坡向所接受的水热条件及太阳辐射均有偏差,侵蚀沟坡向对于侵蚀分布也具有一定影响。杜书立等^[33]在研究引龙河农场侵蚀沟空间分布特征时发现,尽管研究区阴坡与阳坡侵蚀沟数量相近,但阴坡坡向侵蚀沟沟壑密度远大于阳坡。这与其研究

区冬季盛行西北风,且阴坡接受阳光照射时间较短易淤积堆雪有关。拜泉县典型区总体侵蚀沟表现为阳坡、半阳坡侵蚀发育更为剧烈,其中SE坡向沟蚀变化最强,这与东北黑土区其他区域结果相似^[29,34]。比较侵蚀发育早期与后期沟长变化,2013—2021年侵蚀沟阳坡阴坡长度变化总和比值显著大于2003—2013年,且随时间推移影响逐渐增大。而沟缘面积变化则与之相反,2003—2013年阳坡阴坡沟缘面积变化比值大于2013—2021年。说明坡向对沟缘面积影响随时间变化呈逐渐减小的变化趋势,这可能是由于坡向对沟宽的影响变化导致,2021年NW,W,S,SE坡向分布的均宽相差甚微。尽管阳坡对于沟长变化及沟缘面积发育影响大于阴坡,但阴坡外缘形状复杂程度始终大于阳坡。其原因可能是由于阳坡受光热条件等因素影响,冬季冰雪融化水流较为集中,农田土壤质地疏松抗蚀性较低。加之东北地区夏季盛行偏南风,迎风坡雨滴与坡面的夹角大于背风坡导致降雨动能较大。阳坡降雨侵蚀力较大,侵蚀变化更为集中。

此外,研究区平均沟长变化及形状指数均随海拔高度等级升高呈先升高后下降的变化趋势,而侵蚀体积则随海拔高度的增高呈逐渐上升的变化趋势,海拔高度大于280 m时,平均侵蚀体积达到峰值,土壤侵蚀最为剧烈。这可能是因为海拔高度较高地区相较于海拔低区域沟头沟尾落差较大,影响汇水区域径流流速,侵蚀强度也随之增大。此外海拔高度越高,其土壤通气性越差,土壤有机质中的N,P降低。植被覆盖减小,导致土壤稳定性及透水性降低,土壤抗蚀性减弱^[35-36]。

集水面积作为影响径流量的重要因素,对侵蚀沟发育分布也具有显著影响。研究结果表明,侵蚀沟集水面积在 $\geq 20 \text{ hm}^2$ 区间内时,其沟长变化和沟缘面积达到峰值。这主要是由于较大的集水面积往往能够汇集更多的地表径流,径流量越大对沟头冲刷也越大,沟长及沟缘面积也随径流量的增加而扩大。同一集水条件下,2003—2013年平均沟长变化值显著大于2013—2021年,而沟缘面积变化则略小于2013—2021年。这表明集水面积对于侵蚀沟长变化早期影响更大,随时间推移对沟长变化影响逐渐减小。而集水面积对沟缘面积变化的影响则逐渐变大,这可能与随时间推移集水面积对沟蚀发育的影响逐渐由沟头后撤转变为沟岸扩张有关。

除侵蚀影响因素分异特征外,侵蚀沟形态参数与影响因素间相互关系对于侵蚀研究具有重要意义。2007年张永光等人^[27]就以浅沟为研究对象,得到浅

沟长度与汇水面积之间的相关关系($R=0.652$)。因此本研究在前人基础上涵盖侵蚀沟不同类型,发现其沟长与集水面积之间的相关性($R=0.853$)显著高于浅沟。这一结果表明侵蚀沟发育不仅与集水面积存在显著联系,且在发育过程中受集水面积的影响也逐渐增强。当径流产生时,集水面积能决定坡面上径流量的大小,也进一步影响土壤所受到的侵蚀强度大小。除集水面积外,侵蚀沟的沟长、面积和体积与影响因素(如坡度、坡向和海拔高度)之间均存在显著的相关性。这主要是由于地面坡度缓长的地块,汇水面积比较集中且径流量较大,因此坡度与沟长呈显著负相关。相较于浅沟时期^[27]坡度对沟长影响有所减小,这说明坡度在侵蚀沟发育早期对侵蚀沟影响更大,随时间推移对侵蚀发育影响呈逐渐减小的变化趋势。与沟长不同,研究区沟深随坡度的增加呈与沟长完全相反的变化趋势,这主要是因为随坡度增加其径流移速、冲击力也增加,土壤颗粒被冲刷和悬浮,下切侵蚀不断加剧。径流产生时,集水面积决定坡面上径流量的大小,也进一步影响土壤所受到的侵蚀强度大小。

目前有关侵蚀模型多集中在沟长与面积及体积之间的函数关系^[37-38],为进一步量化各种侵蚀影响因素(如坡度、海拔高度、集水面积等)对侵蚀沟形态参数的具体影响程度。本文利用多元线性回归法构建侵蚀沟形态参数与影响因素的多元线性模型。相较于面积和体积模型,沟长模型拟合度较高,可以解释73%沟长数据。该模型可以用于基于不同的侵蚀影响因素的变化情况,预测未来侵蚀沟长度的变化趋势。这有助于评估侵蚀的长期影响和可能的应对措施,还有益于深入分析复杂的侵蚀沟发育机制。

4 结论

(1) 研究区侵蚀沟沟长、面积和体积与影响因素(坡度、海拔高度和集水面积)之间存在显著相关性。相关性分析结果表明,集水面积与侵蚀沟的沟长、周长和面积呈显著正相关,与沟深呈负相关且影响较小。坡度与侵蚀沟沟长呈负相关,与沟深呈显著正相关。即侵蚀沟沟长随坡度的增加呈下降趋势,而均深则升高,侵蚀沟持续下切。海拔高度与侵蚀沟形态参数间相互关系和坡度相似。

(2) 研究区坡度、坡向及海拔高度等地形因子对侵蚀沟的分布、发育具有一定的影响。总体上,不同类型形态参数受地形因素影响存在差异。研究区侵蚀沟沟长变化及形状指数随坡度增大呈现逐步下降的变化趋势,坡度峰值为 $0^\circ\sim 2^\circ$ 。侵蚀沟沟深则呈完

全相反的变化趋势,随坡度增大呈逐渐加深的变化趋势。坡度峰值为 $4^{\circ}\sim 5^{\circ}$;坡向上,坡向分异特征表现为阳坡坡向侵蚀沟形态参数分布明显高于其他坡向。且研究区侵蚀沟形态参数随海拔高度上升呈先升高后降低的变化趋势,峰值为230—240 m。治理时应优先针对治理分布在海拔高度230—240 m阳坡坡向侵蚀沟。

(3) 在同一集水条件下,2003—2013年的沟长变化值大于2013—2021年,而沟缘面积变化略小于后者。研究区侵蚀沟所处集水面积越大,侵蚀沟形态参数越大,侵蚀沟发育剧烈程度也增大。当集水面积 $>20\text{ hm}^2$ 时,研究区沟长变化值、侵蚀沟面积及体积达到峰值。

(4) 以2021年典型区61条侵蚀沟实测数据为基础,建立侵蚀沟形态参数与坡度、海拔高度和集水面积的多元线性回归模型。其中沟长模型拟合优度情况较好,决定系数(R^2)为0.73,可以解释73%的数据变化。

参考文献(References)

- [1] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.
Liu Dinghui, Li Yong. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003,17(3):34-37, 117.
- [2] 王碧薇.东北黑土区侵蚀沟的提取与发生风险评估[D].北京:中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院),2022.
Wang Biwei. Extraction and risk assessment of erosion gully in black soil area of Northeast China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences), 2022.
- [3] 张宇婷,肖海兵,聂小东,等.基于文献计量分析的近30年国内外土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(4):797-810.
Zhang Yuting, Xiao Haibing, Nie Xiaodong, et al. Evolution of research on soil erosion at home and abroad in the past 30 years: Based on bibliometric analysis [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(4):797-810.
- [4] UNEP. Year Book 2014 Emerging Issues Update. Air Pollution: World's worst environmental health risk [EB/OL]. [2023-02-15]. <https://www.unep.org/resources/report/unep-year-book-2014-emerging-issues-our-global-environment>.
- [5] Frankl A, Poesen J, Scholiers N, et al. Factors controlling the morphology and volume (V)-length (L) relations of permanent gullies in the Northern Ethiopian Highlands [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013,38(14):1672-1684.
- [6] Caraballo-Arias N A, Conoscenti C, Di Stefano C, et al. Morphometric and hydraulic geometry assessment of a gully in SW Spain [J]. Geomorphology, 2016,274:143-151.
- [7] 李茂娟,李天奇,朱连奇,等.50年来东北黑土区土地利用变化对沟蚀的影响:以克东地区为例[J].地理研究,2019,38(12):2913-2926.
Li Maojuan, Li Tianqi, Zhu Lianqi, et al. Effect of land use change on gully erosion in black soil region of Northeast China in the past 50 years: A case study in Kedong County [J]. Geographical Research, 2019,38(12):2913-2926.
- [8] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.
Hao Haoxin, Guo Zhonglu, Wang Xianzhou, et al. Rill erosion process on red soil slope under interaction of rainfall and scouring flow [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8):134-140.
- [9] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.
Zheng Fenli, Bian Feng, Lu Jia, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope erosion with longitudinal ridge in typical black soil region of Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(2):90-97.
- [10] 温艳茹,余强毅,杨扬,等.黑土小流域沟道分布遥感监测及主控因素研究[J].农业资源与环境学报,2021,38(6):1074-1083.
Wen Yanru, Yu Qiangyi, Yang Yang, et al. Gully distribution monitoring based remote sensing and key driving factors in the catchment scale of Mollisol Region [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021,38(6):1074-1083.
- [11] 张忠学,尹致皓,余佩哲,等.黑土区坡耕地水土保持耕作措施对土壤理化性状的影响[J].农业机械学报,2024,55(1):282-293.
Zhang Zhongxue, Yin Zhihao, Yu Peizhe, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil physical and chemical properties in slope farmland in black soil region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(1):282-293.
- [12] 张晟旻,李浩.东北黑土区的侵蚀沟治理措施与模式[J].水土保持通报,2020,40(3):221-227.
Zhang Shengmin, Li Hao. Gully erosion control practices and models in mollisol areas of Northeast China [J].

- Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 221-227.
- [13] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文, 等. 东北典型黑土区侵蚀沟发育演化特征分析[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(4): 105-110.
- Wang Wenjuan, Deng Rongxin, Zhang Shuwen, et al. Development evolution characteristics of gully erosion in typical black soil region of Northeast China [J]. Geography and Geo-Information Science, 2019, 35(4): 105-110.
- [14] Guo Lijia, Liu Ruimin, Men Cong, et al. Multiscale spatiotemporal characteristics of landscape patterns, hotspots, and influencing factors for soil erosion [J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146474.
- [15] Xie Yun, Tang Jie, Gao Yan, et al. Spatial distribution of soil erosion and its impacts on soil productivity in Songnen typical black soil region [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(4): 649-659.
- [16] 汪浩, 张少良, 徐微涛, 等. 典型黑土小流域侵蚀强度时空变化特征: 以海伦市光荣小流域为例[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 198-206.
- Wang Hao, Zhang Shaoliang, Xu Weitao, et al. Spatiotemporal variation of soil erosion intensity in mollisols of a small watershed: A case study of Guangrong small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 198-206.
- [17] 姚怡航, 张展, 李永红, 等. 基于无人机贴近摄影测量的坡面细沟侵蚀及形态演化研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 142-147.
- Yao Yihang, Zhang Zhan, Li Yonghong, et al. Slope rill erosion and morphological evolution based on UAV nap-of-the-object photogrammetry [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 142-147.
- [18] Jiao Feng, Zhang Dongdong, Chen Yang, et al. Effects of long-term straw returning and nitrogen fertilizer reduction on soil microbial diversity in black soil in Northeast China [J]. Agronomy, 2023, 13(8): 2036.
- [19] 陈森, 汪小钦, 林敬兰, 等. 土地利用和植被覆盖变化对长汀县 30 多年土壤侵蚀变化的定量影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 168-177.
- Chen Miao, Wang Xiaoqin, Lin Jinglan, et al. Quantitative effects of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County in recent 30 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 168-177.
- [20] 代文. 基于 DEM 的黄土小流域侵蚀监测与输沙过程模拟研究[J]. 测绘学报, 2023, 52(5): 863.
- Dai Wen. Monitoring soil erosion and modeling sediment transport in small loess catchments based on DEM [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(5): 863.
- [21] 赵紫远, 方海燕, 武亚冰, 等. 坡形对黑土区坡耕地土壤侵蚀的模型模拟研究[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 23-29.
- Zhao Ziyuan, Fang Haiyan, Wu Yabing, et al. Simulating the impact of slope shapes on soil erosion for the black soil region, Northeastern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 23-29.
- [22] Gao Yuhao, Zhu Yifan, Chen Junxi, et al. Temporal and spatial distribution and development of permanent gully in cropland in the rolling hill region (phaeozems area) of Northeast China [J]. Catena, 2024, 235: 107625.
- [23] 耿华杰, 郑粉莉, 莫帅豪, 等. 典型黑土区农业流域土壤侵蚀—沉积对土壤养分和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 47-53.
- Geng Huajie, Zheng Fenli, Mo Shuaihao, et al. Effects of soil erosion-deposition on soil nutrients and enzyme activities in an agricultural watershed of Chinese mollisol region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 47-53.
- [24] 刘华征, 贾燕锋, 范昊明, 等. 东北松嫩典型黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀沿坡长变化规律及其对土壤质量的影响[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2292-2305.
- Liu Huazheng, Jia Yanfeng, Fan Haoming, et al. Variation of soil erosion intensity along the long gentle farming slopes and its influence on soil quality in the typical mollisol region, Songnen Plain, Northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2292-2305.
- [25] 郭明航, 杨勤科, 王春梅. 中国主要水蚀典型区侵蚀地形特征分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 81-89.
- Guo Minghang, Yang Qinke, Wang Chunmei. Analysis on erosional terrain characteristics of typical samples in main water erosion region of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 81-89.
- [26] 王迪晨. 东北黑土区侵蚀沟分布特征与侵蚀前地貌重建[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- Wang Dichen. Distribution characteristics of gullies and pre-erosion geomorphological reconstruction in black soil area of Northeast China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [27] 张永光, 伍永秋, 刘洪鹤, 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(1): 35-38.
- Zhang Yongguang, Wu Yongqiu, Liu Honghu, et al. Effect of topography on ephemeral gully erosion in Northeast China with black soils [J]. Journal of Soil

- and Water Conservation, 2007, 21(1):35-38.
- [28] Zhang Shengmin, Han Xing, Cruse R M, et al. Morphological characteristics and influencing factors of permanent gully and its contribution to regional soil loss based on a field investigation of 393 km² in mollisols region of Northeast China [J]. *Catena*, 2022, 217: 106467.
- [29] 焦鹏, 阎百兴, 欧洋, 等. 东北低山丘陵典型区侵蚀沟分布特征及其地形影响研究[J]. *地理科学*, 2022, 42(10): 1829-1837.
- Jiao Peng, Yan Baixing, Ou Yang, et al. Distribution characteristics and topographic influence of erosion gully in typical hilly region of Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(10):1829-1837.
- [30] 冯甜. 陕北黄土丘陵区侵蚀沟空间格局及影响因素研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- Feng Tian. Study on the spatial pattern and influencing factors of gullies in the loess hilly area of Northern Shaanxi [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022.
- [31] 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.
- Bai Shuting, Zhang Shuwen, Wang Ranghu, et al. Analysis of erosion gully differentiation characteristics based on high resolution images and geographical conditions census results [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(3):103-107.
- [32] 陈单, 张树文, 王让虎, 等. 基于 Pleiades 影像的东北黑土区沟蚀分异特征研究[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2016, 48(4):138-144.
- Chen Dan, Zhang Shuwen, Wang Ranghu, et al. Study on gully erosion distribution in northeast black soil areas based on Pleiades [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 48(4): 138-144.
- [33] 杜书立, 李浩, 陈强, 等. 典型黑土区侵蚀沟空间分布特征及主要影响因子分析: 以黑龙江省引龙河农场为例[J]. *土壤与作物*, 2013, 2(4):177-182.
- Du Shuli, Li Hao, Chen Qiang, et al. The spatial distribution and main impact factor of gully erosion in typical black soil region: A case study at Yinlonghe Farm [J]. *Soil and Crop*, 2013, 2(4):177-182.
- [34] 杜国明, 向悦维, 王璟. 黑土区典型县域侵蚀沟时空分布特征和影响因素研究: 以拜泉县为例[J]. *东北农业大学学报*, 2023, 54(6):78-88.
- Du Guoming, Xiang Yuewei, Wang Jing. Study on the spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors of typical county erosion gully in black soil area: A case study of Baiquan County [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2023, 54(6):78-88.
- [35] 王婧雯, 郭亚芬, 崔晓阳. 寒温带森林土壤 C、N、P 生态化学计量学对林型和海拔的响应[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(10):141-147.
- Wang Jingwen, Guo Yafen, Cui Xiaoyang. Response of soil C, N, and P ecological stoichiometry to specific forest types and altitude in cold-temperate forests [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(10):141-147.
- [36] 林圣玉, 张龙, 车腾腾, 等. 不同表土厚度对土壤养分及抗蚀性影响[J]. *江西农业大学学报*, 2015, 37(3):556-563.
- Lin Shengyu, Zhang Long, Che Tengting, et al. The effect of thickness of topsoil on soil nutrients and anti-erodibility [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2015, 37(3):556-563.
- [37] 张楠, 张岩, 王佳希, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀沟数量及形态特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3):109-115.
- Zhang Nan, Zhang Yan, Wang Jiashi, et al. Quantity and morphological parameters of gullies in small watersheds in the Hilly-gully Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3):109-115.
- [38] 万卓开, 宋清辰, 王吉林, 等. 几何形态和分布特征: 典型黑土区侵蚀沟空间分布特征及主要影响因子分析: 以黑龙江省引龙河农场为例[J]. *Sustainability*, 2023, 15(15):12056.