

# 2003—2021年拜泉县典型区侵蚀沟 形态特征及发育变化规律

钱志晶<sup>1</sup>, 肖洋<sup>1</sup>, 牛羽萱<sup>1</sup>, 高澳<sup>1</sup>, 刘烨<sup>1</sup>, 侯驭麒<sup>1</sup>, 徐金忠<sup>2</sup>

(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] 研究东北黑土区侵蚀沟形态特征及不同时间尺度形态变化规律, 为该区侵蚀沟发育演化提供科学依据和数据支撑。[方法] 选取拜泉县国富镇域内 61 条典型侵蚀沟为研究对象, 采用无人机航拍技术生成数字高程模型, 并通过人工目视解译提取沟长、断面宽深比等形态参数, 结合历史航拍影像数据分析侵蚀沟发育变化规律及影响因素。[结果] ① 2003—2021 年拜泉县研究区侵蚀沟发育整体呈加剧趋势, 主要沟道类型为中型沟, 占研究区总数的 60.66%。② 研究区内侵蚀沟形态发育差异较大, 沟长、平均断面面积及体积主要分布在 41.89~1 173 m, 11.23~440.69 m<sup>2</sup>, 895.38~107 686.57 m<sup>3</sup>, 整体形态参数分布较为集中。③ 研究区侵蚀沟沟长、面积及形状指数呈现先升高后降低的变化趋势。平均沟长发育变化速率为 9.64 m/a, 面积变化速率为 246.39 m<sup>2</sup>/a, 侵蚀沟表现为狭长不规则形。④ 回归分析表明, 研究区侵蚀沟沟长(L)与沟宽(W)、周长(P)、面积(S)均呈显著正相关关系。顶宽(TW)与底宽(BW)、周长(P)、面积(S)也存在显著相关关系, 决定系数分别为 0.82, 0.23, 0.58。但沟深(D)与侵蚀体积(V)及面积(S)相关性较低未发现显著联系。[结论] 拜泉县典型区域侵蚀沟总体发育趋势较之前相对减缓, 但沟蚀现象仍十分严重。整体侵蚀沟形态参数分布较为稳定, 且不同形态参数间相互联系, 沟长与侵蚀沟缘面积及周长呈紧密正相关关系。

**关键词:** 侵蚀沟; 东北黑土区; 形态参数; 发育规律; 拜泉县

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)04-0225-11

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 钱志晶, 肖洋, 牛羽萱, 等. 2003—2021 年拜泉县典型区侵蚀沟形态特征及发育变化规律[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 225-235. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.024; Qian Zhijing, Xiao Yang, Niu Yuxuan, et al. Morphological characteristics and developmental change mechanisms of erosion gully in Baiquan County during 2003—2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 225-235.

## Morphological Characteristics and Developmental Change Mechanisms of Erosion Gully in Baiquan County During 2003—2021

Qian Zhijing<sup>1</sup>, Xiao Yang<sup>1</sup>, Niu Yuxuan<sup>1</sup>, Gao Ao<sup>1</sup>, Liu Ye<sup>1</sup>, Hou Yuqi<sup>1</sup>, Xu Jinzhong<sup>2</sup>

(1. College of Advanced 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 morphological features of eroded gullies in rolling hill areas of black soil in Northeast China and temporal-scale variations in their morphology. were analysed in order to provide a scientific basis and empirical data to understand the development and evolution of erosional gullies in this area. [Methods] This study selected 61 typical gullies in Guofu Town, Baiquan County, China. Unmanned aerial vehicle technology was used to generate digital elevation models and manually interprets parameters such as gully length and width-to-depth ratio. Historical aerial imagery data were used to analyse the developmental changes and influencing factors of gullies. [Results] ① From 2003 to 2021, gully development

收稿日期: 2023-12-02

修回日期: 2024-03-01

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研究。Email: yanchenqianzhijing@163.com.

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

in Baiquan County showed an overall intensification trend, with medium-sized gullies accounting for 60.66% of the total gullies. ② A significant variation was observed in gully morphology within the study area, with gully length, average cross-sectional area, and volume mainly distributed between 41.89—1 173 m, 11.23—440.69 m<sup>2</sup>, and 895.38—107 686.57 m<sup>3</sup>, respectively. The overall shape parameter distribution was concentrated. ③ Gully length, area, and shape index exhibited a trend of increase followed by a decrease, with an average development rate of 9.64 m/a for length and 246.39 m<sup>2</sup>/a for area. The erosion gullies showed narrow and irregular shape. ④ Regression analysis revealed significant positive correlations between gully length and width, perimeter, and area (S), and significant relationships between top width and bottom width, perimeter, and S, with determination coefficients of 0.82, 0.23, and 0.58, respectively. However, gully depth showed a low correlation with erosion volume and S. [Conclusion] In typical areas of Baiquan County, the general trend in gully erosion has shown a relative slowdown compared with previous assessments, although gully erosion remains severe. Furthermore, there is an interrelationship among different morphological parameters, with gully length showing a close positive correlation with the area and perimeter of the eroded gullies.

**Keywords:** erosion gully; the black soil region in Northeast China; morphological parameters; law of development; Baiquan County

东北黑土区作为世界仅有的四大黑土区之一,是中国最大的商品粮生产基地和生态安全保障区<sup>[1-2]</sup>,其粮食总产量在全国总产量所占比例约为 1/4,具有极其重要的战略地位。但由于其独特的气候、地形等自然环境条件及不合理的人为耕作活动,导致东北黑土区土地资源遭到严重破坏,逐渐成为我国水土流失主要区域之一<sup>[3]</sup>。根据水利部最新统计表明<sup>[4]</sup>,黑土区共有侵蚀沟 66.67 万条,其中黑龙江省范围内有 20.75 万条,侵蚀面积可达 1 171.45 km<sup>2</sup>,且 88.44% 的侵蚀沟均属发展沟。侵蚀沟作为水土流失最主要的表现形式,其发育过程不仅严重损毁土地,还大量蚕食耕地导致耕地破碎化<sup>[5-6]</sup>。严重影响农业机械化生产效率,为我国土地粮食安全带来极大隐患<sup>[7]</sup>。因此系统研究东北黑土区沟蚀发育机理对防止土地资源退化,保障农业粮食生产安全具有重大意义。目前对于东北黑土区土壤侵蚀的研究主要集中在空间分布、影响因素等方面。侵蚀沟空间分布上,东北黑土区侵蚀沟密度整体由西南向东北呈逐步增加趋势,主要以轻度侵蚀为主,整体发育潜力巨大<sup>[8]</sup>。总体黑土区水土流失呈加剧趋势,但由于不同流失区域环境条件不同,其区域侵蚀程度及侵蚀模数均不同,大兴安岭区域风蚀程度显著高于其他侵蚀区域<sup>[9]</sup>。在针对影响因素研究发现,黑土区地形、植被、气候以及人类活动与其他区域存在显著地带性差异,地形和人为因素互作是导致侵蚀沟不断发育的关键<sup>[10-11]</sup>。地形作为影响侵蚀沟分布格局的重要因素,其坡度、坡长的变化显著影响侵蚀沟沟壑密度<sup>[12-13]</sup>。此外李镇等<sup>[14]</sup>研究还发现由于侵蚀沟发育过程受多重因素影响,不同区域间侵蚀沟外在形态差异较大。这些研究表明,

东北黑土区侵蚀沟在形态上具有显著区域分异特征。形态特征作为量化水土流失严重程度的重要指标,是了解沟蚀发生、发育的关键性因素<sup>[15]</sup>。研究区域沟蚀形态有助于探究区域侵蚀沟发育机理,可以在一定程度上反映侵蚀沟的演变过程<sup>[16-17]</sup>。但由于侵蚀沟发展的复杂性和技术手段的欠缺,侵蚀沟形态研究一直较为薄弱,随着监测技术日益成熟,三维激光扫描仪<sup>[18-20]</sup>,立体摄影测量法<sup>[21-22]</sup>,遥感解译法等<sup>[23-25]</sup>被广泛用于调查冲沟特征,但有关黑土区典型形态特征研究仍然较少。鉴于此,本文选取拜泉县域内 61 条典型侵蚀沟,结合历史航片影像及无人机测绘技术,分析东北黑土区侵蚀沟发育变化规律,探究该区侵蚀沟发育特征,阐释侵蚀沟形态特征间相互关系。以期为该区发育机制提供科学依据和数据支撑。

## 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°20′—47°55′N,125°30′—126°31′E),属中温带大陆性季风气候,海拔 145~300 m,地处小兴安岭余脉与松嫩平原的过渡地带,多年平均气温为 1.6℃,多年平均降水量 488.2 mm,降水季节分布不均,雨量多集中在 7—9 月,其降雨量占全年的 80% 左右,主要耕作土壤类型为黑土,腐殖质含量高,为典型漫川漫岗黑土区。国富镇镇域面积共 224.73 km<sup>2</sup>,其辖区现状为中度侵蚀。由于垦殖历史较长,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

研究采用空间分辨率 5 m 数字高程模型 (DEM), 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; 空间分辨率 0.5 m DEM 数据, 来源于由 Google Earth 整合发布的 Pleiades 卫星 2013 年和 2021 年拍摄的卫星影像。投影坐标系为国家大地坐标系 CGCS2000, 格式为 TIF。

无人机航测数据来源于 2021 年 10 月野外实地测量。飞行设备选用 DJI 大疆精灵 Phantom 4 搭载 FC330 云台相机, 最大分辨率为  $5\,472 \times 3\,648$ 。拍摄时特选择植被覆盖率较低、晴朗无云的秋季。模型软件选用法国 Bentley 公司开发的 Context Capture Center Master, 空间分辨率 0.15 m。采用人机交互方式解译提取侵蚀沟长度、宽度、深度、面积及其他衍生参数。

## 1.3 沟道形态参数的提取及分析

对无人机航拍影像数据进行空三计算、点云生成等处理, 形成可视化三维模型。还原研究区侵蚀沟的整体空间环境形态, 选取典型代表侵蚀沟, 确定侵蚀沟发生位置。以 2003, 2013, 2021 年影像为基础数据源 (图 1), 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。选择国家大地坐标系 CGCS 2000。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。① 侵蚀沟基本形态特征提取: 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)、周长 ( $P$ , m)、面积 ( $S$ ,  $m^2$ ) 等形态参数。将 2021 年无人机航拍影像数据生成的三维模型, 导入 Acute 3D Viewer, 应用 Measurements 功能人工目视解译提取参数。并结合实地调研、野外验证等综合工作进一步验证侵蚀沟形态和数量, 对提取矢量数据反复验证修改。② 侵蚀沟断面形态特征计算: 由于侵蚀沟自身发育的不均等性及整体形态的不规则性。为提高研究精度, 对研究区侵蚀沟整体宽度和深度有更深层次的了解。将每条侵蚀沟均分为 5 段。选取其沟头 ( $a_1$ )、沟上中段 ( $a_2$ )、沟中 ( $a_3$ )、沟中下段 ( $a_4$ )、沟尾 ( $a_5$ ) 这 5 个部分的横截面 (图 2), 应用 “Distance” 工具对每个横截面的顶宽 (TW, m)、底宽 (BW, m) 及沟深 ( $D$ , m) 进行测量。并结合人工修正, 使误差降到最低。③ 侵蚀沟衍生形态特征计算: 为更好反映土壤侵蚀强度变化, 在基本形态特征参数的基础上提出了形状指数 (SI)、断面面积 (CAS,  $m^2$ )、断面宽深比 ( $R_{WD}$ ) 等衍生形态参数。

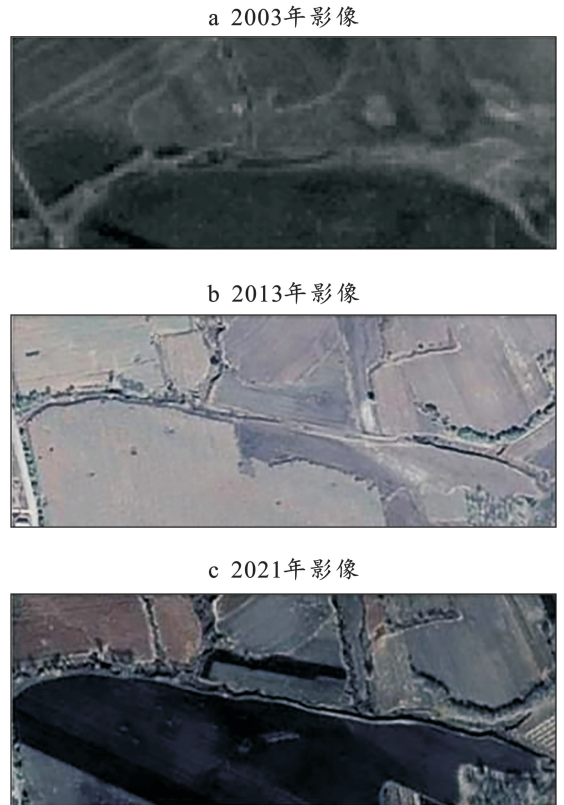


图 1 同一侵蚀沟在 2003, 2013 和 2021 年的遥感影像对比

Fig.1 Historical aerial photo comparison of same erosion gully in 2003, 2013 and 2021

形状指数 (SI) 是引入景观格局斑块形状指数定义<sup>[13]</sup>, 通过计算某一斑块与相同面积的正方形的偏离程度来测量其形状复杂程度。计算公式为:

$$SI = \frac{0.25P^{[26]}}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

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 ( $m^2$ )。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。

断面宽深比 ( $R_{WD}$ ) 是侵蚀沟某断面处切沟的平均宽度与切平均深度之比, 该项指标能表征侵蚀沟整体纵断面形状变化, 反映侵蚀沟在发育过程中下切侵蚀与侧蚀间的相互关系, 为无量纲参数<sup>[27-28]</sup>。计算公式为:

$$R_{WD} = \frac{\sum_{j=1}^m W_j}{\sum_{j=1}^m D_j} \quad (2)$$

式中:  $R_{WD}$  表示侵蚀沟宽深比;  $W_j$  表示侵蚀沟第  $j$  处监测点的侵蚀沟宽度 (m);  $D_j$  表示第  $j$  处监测点的细沟深度 (m)。

断面面积 (CSA) 是侵蚀沟某处横断切面的面积,

反映侵蚀沟不同部位所受侵蚀程度的变化<sup>[29]</sup>。计算公式为:

$$CSA = \frac{TW_j + BW_j}{2} \times D_j \quad (3)$$

式中:CSA 表示断面面积(m<sup>2</sup>);TW<sub>j</sub>表示第 j 处监测点的侵蚀沟顶宽(m);BW<sub>j</sub>表示第 j 处监测点的侵蚀沟底宽(m);D<sub>j</sub>表示第 j 处监测点的侵蚀沟深度(m)。

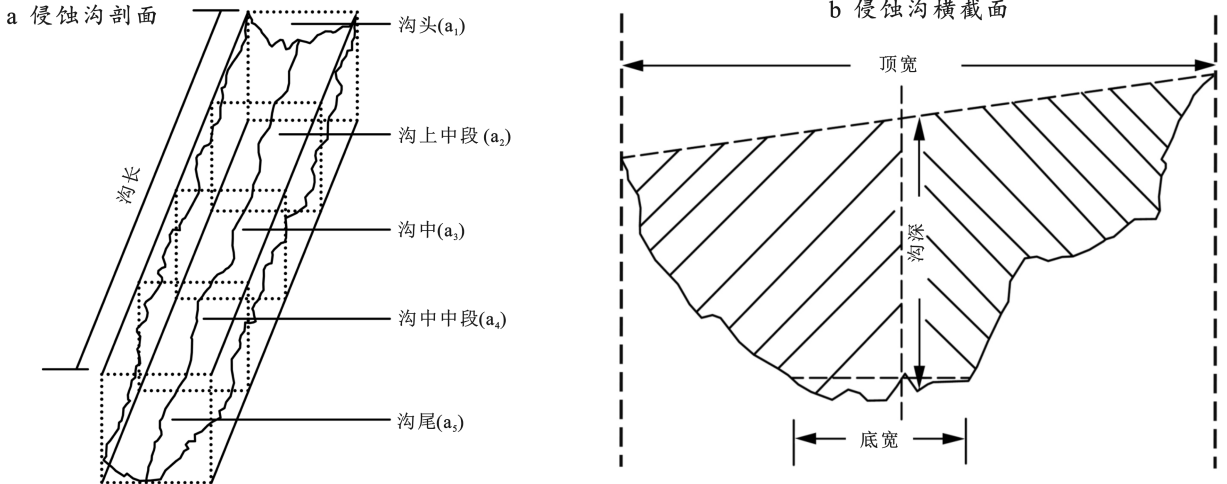


图 2 侵蚀沟各位点和横截面

Fig.2 Schematic of erosion gully profiles and cross-sections

## 2 结果与分析

### 2.1 侵蚀沟等级分析

按照《侵蚀沟分级与分类(DB23/T2412—2019)》标准对调查成果进行统计划分,调查结果如表 1 所示。研究区内侵蚀沟小型沟、中型沟、大型沟的沟道数量分别为 19,37,5 条,分别占调查对象总数的 31.15%,60.66%,8.20%。此外,2003—2021 年,拜泉县侵蚀沟共增加 22 条中型沟、5 条大型沟,而小型沟数量则由 2003 年的 46 条降低至 2021 年的 19 条。表明拜泉县国富镇境内侵蚀沟多为中型沟,沟道发展迅速、发育变化较大。

表 1 拜泉县典型区沟道类型变化情况

Table 1 Changes of gully types in Baiquan County

沟道等级	2003 年	2013 年	2021 年
小沟	46	35	19
中沟	15	24	37
大沟	0	2	5

### 2.2 侵蚀沟形态特征分析

由图 3 所示研究区侵蚀沟的沟长在 41.89~1 173.72 m 范围,均值为 353.08 m;平均沟深在 2.13~10.64 m,均值为 3.65 m;平均顶宽在 6.95~58.30 m,均值为 17.84 m;平均底宽分布于 1.08~36.41 m,

试验数据提取完成后,利用 SPSS 25,Origin 2022 及 Excel 2020 软件对原始数据进行描述性分析。根据黑龙江省水利厅发布的《侵蚀沟分级与分类(DB23/T2412—2019)》标准,结合前人沟道侵蚀分类研究成果<sup>[8,30-31]</sup>,综合研究区侵蚀沟实际发育特征,将沟壑占地面积、沟道长度作为判别指标对研究区侵蚀沟进行分级判定。

均值为 5.93 m;平均断面面积在 11.23~440.69 m<sup>2</sup>,均值为 51.45 m<sup>2</sup>;侵蚀沟体积主要分布在 896.38~107 686.57 m<sup>3</sup>,均值为 13 489.95 m<sup>3</sup>。表明当前不同侵蚀沟的发育形态差异较大。

由表 2 可见除顶宽外,侵蚀沟不同位置的沟深、底宽和断面面积均值表现为:沟上端>沟中>沟头>沟下段>沟尾,中位数未发现显著变化规律。分析具体形态参数发现,研究区形态参数分布存在一定的规律。如图 4 所示,沟长主要集中在 100~800 m 区间内,累计频率超过 80%。其中以 100~200 m 范围内最集中,所占比例为 28.87%;顶宽主要集中在 5~25 m 范围,而底宽主要集中在 0~10 m,所占比例分别为 78.03%和 87.21%。此外,研究区沟深的频率发生范围也表现出随着深度的增加呈现出先升高后降低的变化趋势,主要集中在 1~5 m,累计频率达 85.25%。其中 2~3 m 范围的沟道深度比例最多,约占总体的 30%。分析断面面积可知,断面面积分布主要集中在 15~60 m<sup>2</sup>,累计频率可达 76.8%。其中 15~30,30~45 m<sup>2</sup>的侵蚀沟数量比例最多,分别占总体的 27.42%,24.19%。此外,研究区侵蚀沟体积分布也较为集中,超过 10 000 m<sup>3</sup>的比例达到了 59.02%。其中 5 000~10 000 m<sup>3</sup>内侵蚀沟数量最多,占总数的 31.15%。

表 2 不同位置侵蚀沟断面主要参数统计

Table 2 Statistical summary of main parameters for erosion gully cross-sections at different locations

参数	断面位置	最小值	最大值	均值	中位数
沟深 $D/m$	沟头	1.38	12.10	3.76	3.53
	沟上段	1.47	13.96	4.44	4.01
	沟中	1.59	11.87	3.96	3.48
	沟下段	0.86	9.37	3.31	2.81
	沟尾	0.54	9.18	2.79	2.54
顶宽 $TW/m$	沟头	3.84	96.38	17.50	12.74
	沟上段	5.54	69.98	21.13	15.87
	沟中	6.32	63.05	19.85	15.89
	沟下段	4.77	53.41	17.57	14.31
	沟尾	3.11	35.20	13.17	10.51
底宽 $BW/m$	沟头	1.08	36.77	5.98	3.98
	沟上段	1.65	36.41	6.41	4.26
	沟中	1.91	34.54	6.35	4.71
	沟下段	1.28	20.08	5.74	4.03
	沟尾	1.46	28.60	5.19	3.76
断面面积 $CSA/m^2$	沟头	3.93	803.14	53.24	28.60
	沟上段	8.88	640.72	72.42	41.24
	沟中	9.83	502.53	60.87	37.30
	沟下段	3.08	158.94	42.32	25.50
	沟尾	2.19	130.77	28.41	23.70

除几何特征外,侵蚀沟的断面宽深比和比降等参数更能直观反映侵蚀沟发育过程。研究结果显示研究区宽深比值主要集中在 2~6, 累计频率可达 73.77%。大于 8 以上的比值仅占 6.56%。相对于沟

底下切,研究区侵蚀沟发育主要以沟岸扩张为主。平均比降也呈现出先升高后降低的变化趋势,主要分布在 0~7 区间内,累计频率达 85.25%。其中 4~5 区间范围的比降比例最大,约 21.15%。总体来看,研究区侵蚀沟形态特征分布情况较为集中,且发生频率均呈随数值增加先升高后降低的变化趋势。表明研究区内侵蚀沟在形态特征上呈现一定的稳定性和共性。

### 2.3 侵蚀沟形态变化规律

2.3.1 沟长变化规律 由图 5a 可以看出,2003—2013 年,侵蚀沟整体呈随长度变化值增加先升高后降低的变化趋势。其长度变化主要集中在 0~100 m 范围内,约占总体变化区间的 78.69%。在 50~100 m 时达到增长峰值。研究区侵蚀沟长度由 10.96 km 增长至 17.62 km,共新增 6.66 km,平均变化速率为 10.92 m/a;与之相反,2013—2021 年整体上侵蚀沟呈现出随长度增加逐渐减小的变化趋势。其长度变化主要集中在 0~50 m 区间范围内,数量约占总体变化的 59.02%,侵蚀沟总长度由 17.62 km 增长至 21.54 km,平均每条侵蚀沟增加约 64.28 m,平均变化速率为 8.04 m/a。2003—2021 年研究区沟长呈随长度变化值增加先升高后降低的变化趋势,且不同侵蚀沟增长差异较大。沟长增长范围在 7.32~804.01 m,其增长主要集中在 50~250 m,累计频率为 75.41%。其中 50~100 m 范围内最为集中,占总数的 27.87%。整体侵蚀沟长度由 2003 年的 10.96 km 增至 2021 年的 21.54 km,累计新增 10.58 km,沟长平均增长速率为 9.64 m/a。

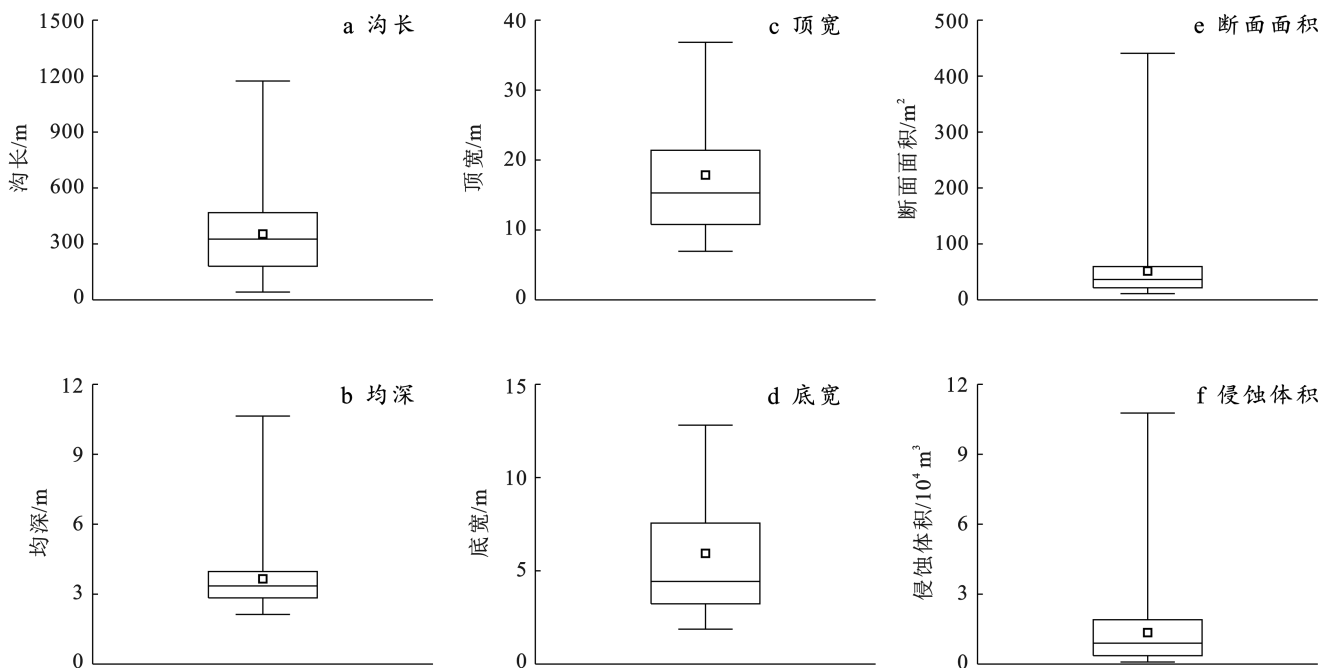


图 3 拜泉县典型区侵蚀沟不同形态参数盒图

Fig.3 Box plot of different morphological parameters of erosion gullies in Baiquan County

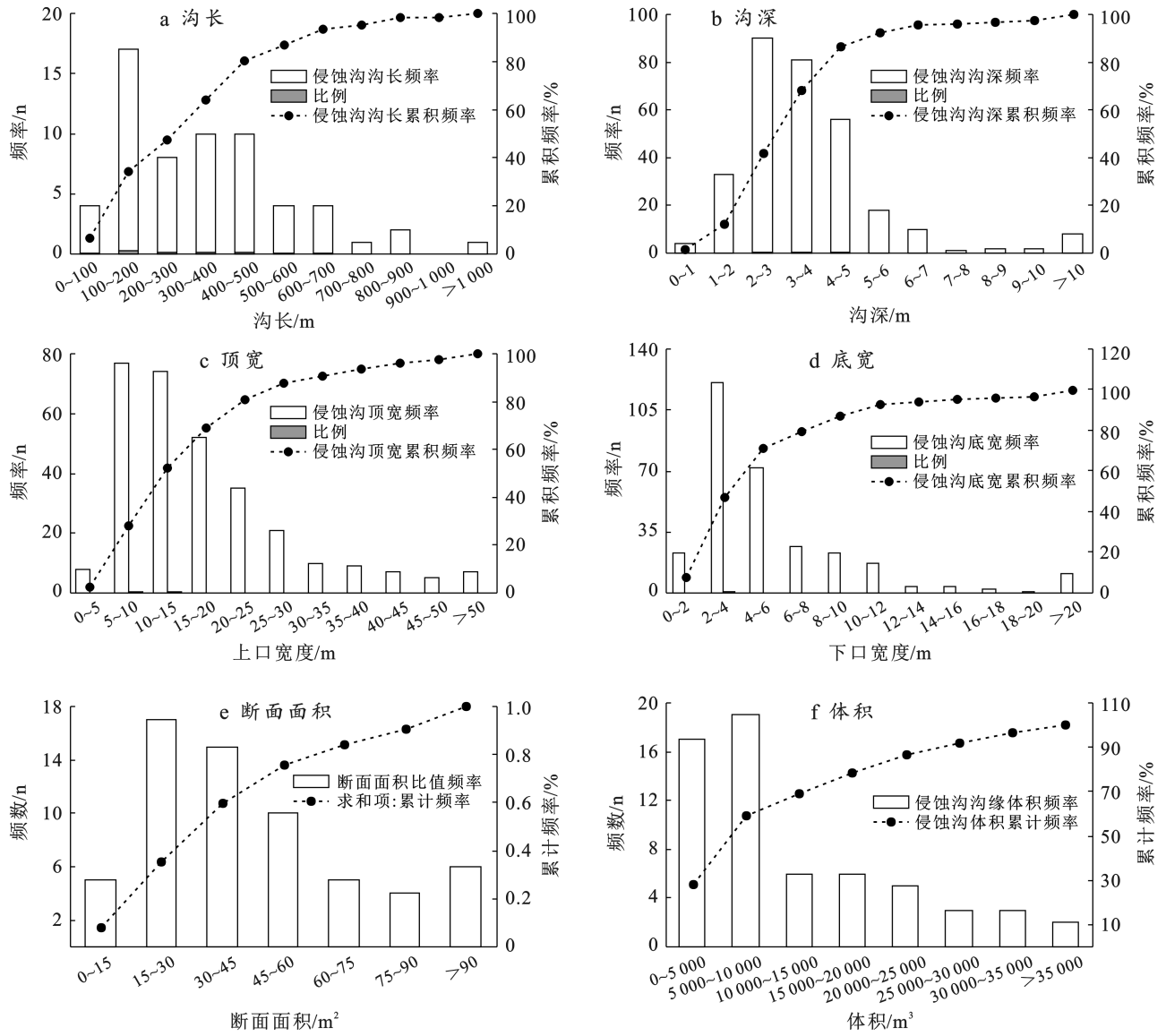


图 4 研究区侵蚀沟不同体积范围的频率

Fig.4 Frequency of erosion gullies in different volume ranges in study area

2.3.2 面积变化规律 与沟长早期先升高后降低的发育变化情况不同,侵蚀沟面积变化早期,侵蚀沟数量随面积变化值增加而减少。如图 5b 所示,2003—2013 年侵蚀沟面积变化主要集中在  $0\sim 3\,000\text{ m}^2$  的范围内,约占总体的 80.33%。侵蚀沟面积由  $114\,984.56\text{ m}^2$  增长至  $236\,383.50\text{ m}^2$ ,累计新增  $121\,398.94\text{ m}^2$ ,面积变化速率为  $199.02\text{ m}^2/\text{a}$ ;2013—2021 年研究区侵蚀沟的数量也呈随面积变化增加呈现逐步降低的趋势。与 2003—2013 年的集中变化范围一致但比例较小,仅占总体的 70.49%。侵蚀面积由  $236\,383.50\text{ m}^2$  增长至  $385\,520.36\text{ m}^2$ ,累计新增  $149\,136.86\text{ m}^2$ ,增长速率达  $305.61\text{ m}^2/\text{a}$ ,相对于发育早期阶段变化速率更大。2003—2021 年整体,研究区侵蚀沟数量随面积变化值的增加呈现出先升高后降低的发展趋势,各区间范围几乎均有涉及。侵蚀沟面积变化在

$535.59\sim 15\,976.17\text{ m}^2$ ,其主要增长范围集中在  $1\,000\sim 2\,000\text{ m}^2$ ,占 21.13%。整体侵蚀沟面积由 2003 年的  $114\,984.56\text{ m}^2$  增长至 2021 年的  $385\,520.36\text{ m}^2$ ,累计新增  $270\,535.80\text{ m}^2$ ,单条侵蚀沟面积发育速率可达  $246.39\text{ m}^2/\text{a}$ 。

2.3.3 形状指数变化 如图 5c 所示,2003—2021 年研究区侵蚀沟的 SI 值主要集中在  $1.5\sim 3$ ,表明侵蚀沟的外缘形状明显偏离于正方形。研究区形状指数大于 2.5 的侵蚀沟仅占总数的 59.02%。从时间上来看,研究区侵蚀沟形状指数呈随时间发展先升高后降低的变化规律。以均值为例,2003 年小、中、大沟的 SI 均值分别为 2.14,3.08;2013 年小、中、大沟的 SI 均值分别为 2.74,2.99 和 3.73,整体平均形状指数由 2.37 上升到 2.87;2021 年小、中、大沟的 SI 均值则分别为 2.07,2.91 和 3.55,整体平均形状指数下降为 2.70,呈

现低—高一低的变化趋势。分析形状指数分布特征发现,2003年研究区形状指数主要集中在1.5~3.5,占总数的78.69%;2013年集中在2~4,比例77.05%;2021年研究区形状指数主要集中在1.5~3.5。均呈现先增加后减小的变化规律,基本符合正态分布。

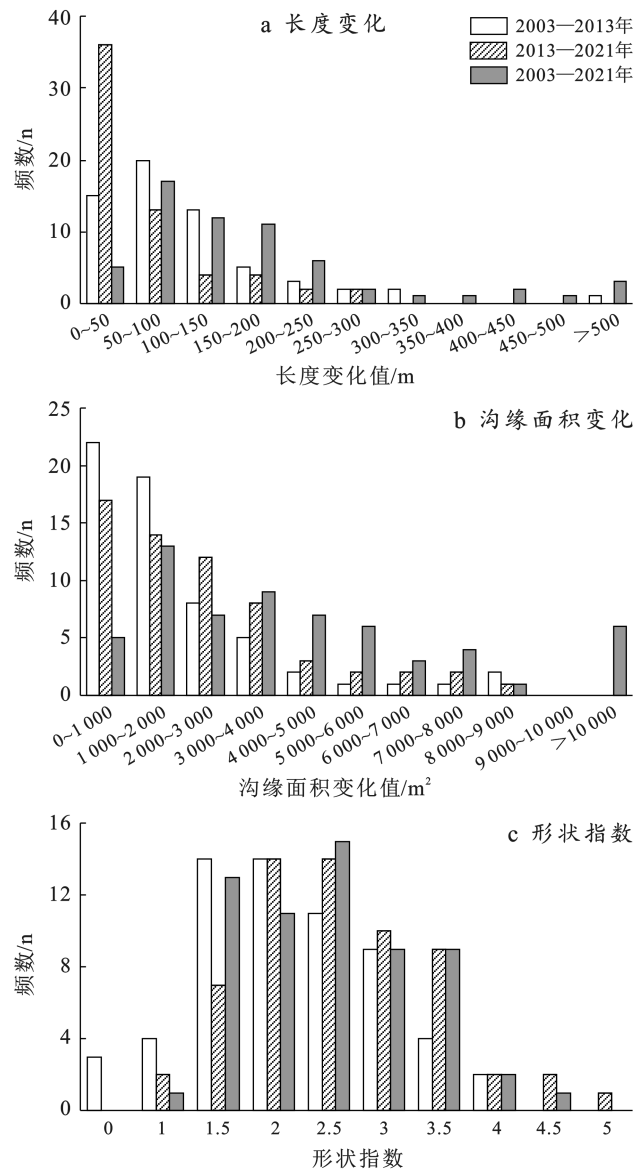


图5 研究区侵蚀沟不同形态特征变化情况

Fig.5 Changes in different morphological characteristics of erosion gullies in study area

## 2.4 不同形态参数相互关系

为进一步分析不同形态参数间相互关系,本研究选取沟长、沟宽、周长及面积等形态参数进行线性回归分析。分析结果如图6所示,侵蚀沟的顶宽(TW)和底宽(BW)呈显著正相关( $R=0.904$ ,  $p<0.01$ ),两者呈倍数增长关系。且沟长与各沟宽也呈正相关关系,相关程度依次为:均宽(AW)>顶宽(TW)>底宽(BW),但相关水平较低( $p<0.01$ )。此外,图6还表

征了研究区侵蚀沟沟长、顶宽与周长的关系,均呈显著正相关关系。相较于沟长,周长与顶宽的相关性较差,两者相关系数分别为0.973,0.480。与周长一致,沟缘面积与沟长和沟宽表现出相似的相关关系,沟缘面积与沟长相关系数略大于沟宽。除沟长和顶宽外,研究区侵蚀沟沟深与沟缘面积及侵蚀体积均呈正相关关系,但相关系数较低,分别为0.288,0.038。

## 3 讨论

由于不同区域侵蚀沟所受影响因素差异较大,此外在形态特征差异也较大,因此研究区域侵蚀沟形态特征对于该区域侵蚀沟发育机理具有重要作用。研究发现研究区侵蚀沟在2003—2021年发育演化迅速,沟道类型发育变化较大,具有显著的时空演变特征。研究区侵蚀沟沟头、沟壁均有裂隙及坍塌,沟头上方有汇水痕迹,表明研究区侵蚀沟沟头可能会继续前进割裂农地,使耕地破碎化。这主要是由于本研究区的坡耕地坡长较长、汇水面积较大且侵蚀沟处于发育活跃期。与温艳茹<sup>[32]</sup>研究相比,本研究区内侵蚀沟发育速率更快,侵蚀程度更剧烈。其主要原因可能是温艳茹研究区坡度变化范围较大,导致不同沟道间发育速率存在差异,而拜泉县典型区坡度分布较为集中。此外沟道发育还可能与侵蚀沟所处发育阶段及监测周期有关<sup>[33]</sup>。本文选取的61条典型侵蚀沟均处于发育活跃期且其侵蚀沟监测周期较长,因此侵蚀沟发育速率较快。研究区内侵蚀沟沟长、沟宽等形态特征参数分布较为集中,这与焦鹏<sup>[34]</sup>研究结果相同,这表明本区域侵蚀沟发育具有一定的稳定性和共性。但面积、体积分布结果存在差异,这可能与研究区域所处地形为低山丘陵区且划分单位不同有关。

除分布特征外,研究区不同侵蚀沟发育存在一定的时空变化规律。研究区内侵蚀沟沟长及形状指数均呈现先升高后降低的变化趋势,表明侵蚀沟发育逐渐减弱,总体呈减缓趋势,这一结果与Wang等<sup>[9]</sup>研究发现一致。但整体沟长发育速率仍显著大于焦鹏<sup>[34]</sup>研究结果。这可能与漫川漫岗区地形坡缓坡长、垄作方向导致的汇流路径不稳有关。本研究通过相关性分析发现,侵蚀沟沟长与面积和周长存在显著正相关关系,这与李镇<sup>[35]</sup>研究结果相同。相关系数进一步表明,与沟宽相比,沟长对于侵蚀沟周长和面积变化的贡献更为显著。这表明在拜泉县典型区侵蚀沟发育主要以沟长发育为主,沟壁侧蚀相对较弱。沟长是影响侵蚀沟面积、周长变化的重要因素。除沟长外,研究区顶宽与周长相关系数显著低于李镇<sup>[35]</sup>研究结果。表明在漫川漫岗黑土区沟宽对于沟缘周

长的影响显著低于黄土高原区。其主要原因是黄土区土壤结构疏松,沟岸易于塌陷,且气候类型与黑土区具有显著差异。

本研究探索了研究区侵蚀沟近 20 a 来不同年限范围内的发育变化速率及形状复杂程度,为今后漫川

漫岗黑土区侵蚀沟的了解、估算及治理提供了一定数据支撑。但为获得高精准确的侵蚀沟形态数据,仅选取具有代表性侵蚀沟监测侵蚀沟发生、发展、治理效果,代表部分区域侵蚀发展状况。未来还需就更大数据量、不同区域的土壤侵蚀进一步开展研究。

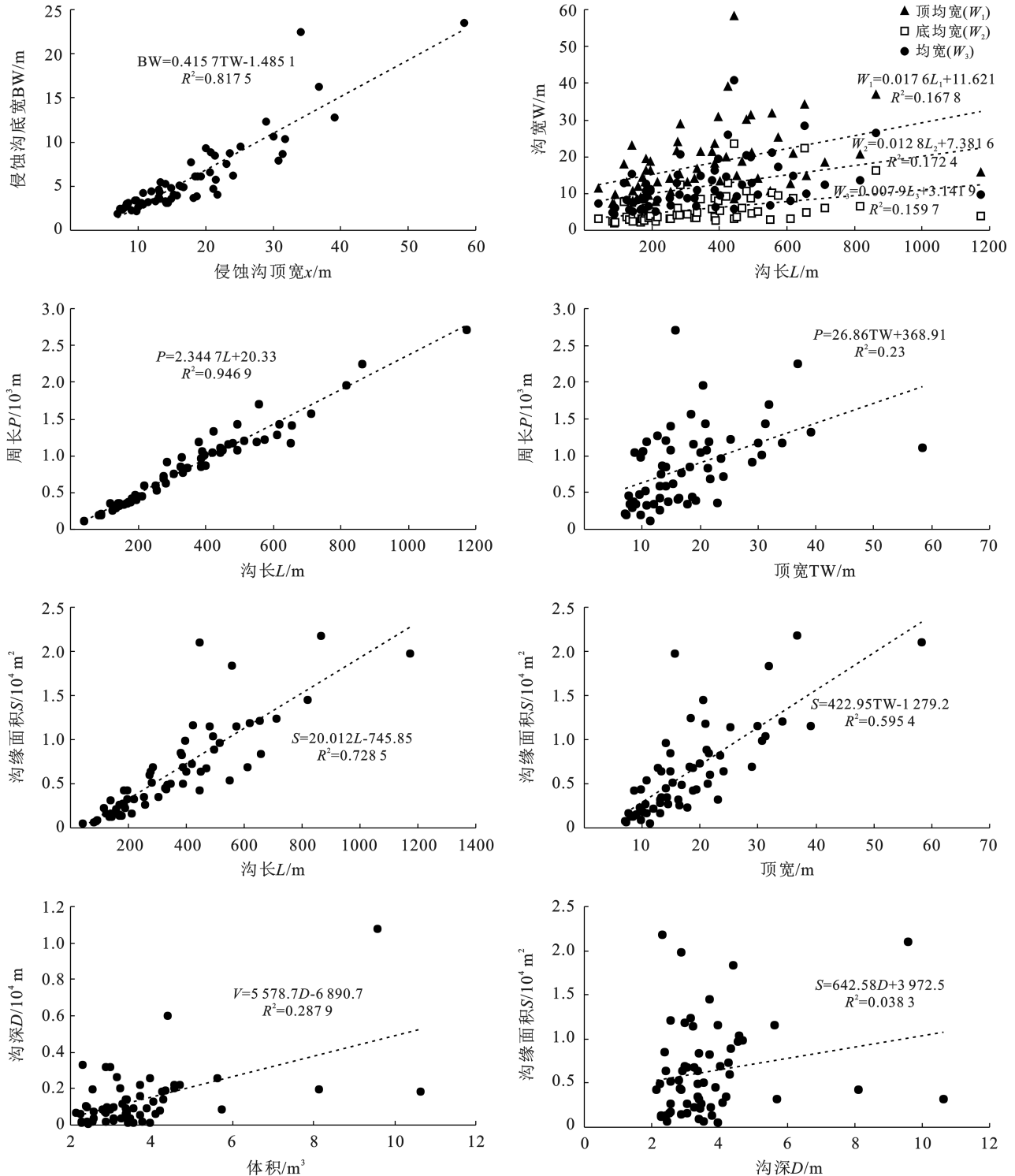


图 6 研究区侵蚀沟不同形态特征相互关系

Fig.6 Interrelationships of different morphological characteristics of erosion gullies in study area



## 4 结论

(1) 2003—2021年研究区侵蚀沟长度与占地面积呈增加趋势。研究区侵蚀沟类型变化较大,沟道发育变化显著。沟长及面积的平均发育变化速率可达9.64和246.39 m<sup>2</sup>/a,研究区仍属于东北黑土区沟蚀严重区域。

(2) 研究区侵蚀沟形态特征分布情况较为集中,且发生频率均呈随数值增加先升高后降低的变化趋势。拜泉县典型区内侵蚀沟整体在形态特征上具有一定的稳定性和共性。

(3) 回归分析结果表明,沟长和沟宽与面积及周长均呈显著正相关关系,沟长相关性显著高于沟宽。拜泉县典型区侵蚀沟形态多为细长形,侵蚀沟发育主要以沟头后退为主。且沟长与沟宽相关水平较低( $p < 0.01$ ),表明沟长与沟宽在发育过程中无显著联系。

## 参考文献(References)

- [1] 郑艺文,李福杰,刘晓煌,等.工业化背景下30年来中国东北地区自然资源时空变化及其生态环境效应[J].中国地质,2022,49(5):1361-1373.  
Zheng Yiwen, Li Fujie, Liu Xiaohuang, et al. Temporal and spatial variation of natural resources and their ecological environment effects in Northeast China in the past 30 years under the background of industrialization [J]. *Geology in China*, 2022,49(5):1361-1373.
- [2] 刘卉芳,单志杰,秦伟,等.东北黑土区水土流失治理技术与模式研究评述[J].泥沙研究,2020,45(4):74-80.  
Liu Huifang, Shan Zhijie, Qin Wei, et al. Review on soil and water loss control techniques and models in the Black Soil regions in the Northeast [J]. *Journal of Sediment Research*, 2020,45(4):74-80.
- [3] 李浩,张兴义,刘爽,等.典型黑土区村级尺度侵蚀沟演变[J].中国水土保持科学,2012,10(2):21-28.  
Li Hao, Zhang Xingyi, Liu Shuang, et al. Evolution of gully erosion in village scale in the typical black soil area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(2):21-28.
- [4] 李姗.水利部组织完成东北黑土区侵蚀沟调查(节选)[J].水利科学与寒区工程,2023,6(8):157.  
Li Shan. The Ministry of Water Resources organized the investigation of erosion gully in the black soil area of Northeast China (excerpt) [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2023,6(8):157.
- [5] 张兴义,刘晓冰.东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J].农业工程学报,2021,37(3):320-326.  
Zhang Xingyi, Liu Xiaobing. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of

Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37(3):320-326.

- [6] 王念忠,沈波.东北黑土区侵蚀沟发展状况及其对粮食安全的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(5):7-10.  
Wang Nianzhong, Shen Bo. Development of gully erosion in Northeast China and its effects on the national food security [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011,9(5):7-10.
- [7] 张兴义,隋跃宇,宋春雨.农田黑土退化过程[J].土壤与作物,2013,2(1):1-6.  
Zhang Xingyi, Sui Yueyu, Song Chunyu. Degradation process of arable mollisols [J]. *Soil and Crop*, 2013,2(1):1-6.
- [8] 李全峰,李吉程,于明鹏,等.黑土耕作区侵蚀沟治理紧迫度空间分布特征[J].地理科学进展,2021,40(7):1208-1219.  
Li Quanfeng, Li Jicheng, Yu Mingpeng, et al. Spatial pattern of gully erosion control urgency in black soil farming area [J]. *Progress in Geography*, 2021,40(7):1208-1219.
- [9] Wang Shihao, Xu Xinliang, Huang Lin. Spatial and temporal variability of soil erosion in Northeast China from 2000 to 2020 [J]. *Remote Sensing*, 2022,15(1):225.
- [10] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.  
Fan Haoming, Cai Qiangguo, Wang Hongshan. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(2):66-70.
- [11] 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.  
Yan Yechao, Zhang Shuwen, Li Xiaoyan, et al. Temporal and spatial variation of erosion gullies in kebai black soil region of Heilongjiang during the past 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005,60(6):1015-1020.
- [12] 宋华,王铮,杨凯.基于遥感和GIS技术的长春东部典型黑土区侵蚀沟动态监测研究[J].测绘与空间地理信息,2016,39(10):194-197.  
Song Hua, Wang Zheng, Yang Kai. The research of gully erosion on dynamic monitoring in typical black soil area in East Changchun based on remote sensing and geographic information system [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016,39(10):194-197.
- [13] 王迪晨.东北黑土区侵蚀沟分布特征与侵蚀前地貌重建[D].辽宁 沈阳:沈阳农业大学,2019.  
Wang Dichen. Distribution characteristics of gullies and preerosion geomorphological reconstruction In black soil area of Northeast China [D]. Shenyang, Liaoning, Shenyang Agricultural University, 2019.

- [14] 李镇,秦伟,齐志国,等.东北漫川漫岗和山地丘陵黑土区侵蚀沟形态特征遥感分析[J].农业工程学报,2019,35(14):133-140.  
Li Zhen, Qin Wei, Qi Zhiguo, et al. Remote sensing analysis on gully morphology and spatial distribution in rolling hilly region and mountainous and hilly region of Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(14):133-140.
- [15] 宋爽,范昊明,牛天一.东北黑土区不同季节侵蚀沟形态发育比较分析[J].水土保持学报,2022,36(1):18-23.  
Song Shuang, Fan Haoming, Niu Tianyi. Comparative analysis of the development the geometric forms of gully in different seasons in black soil area of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):18-23.
- [16] Bruno C, Di Stefano C, Ferro V. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia Area, South Italy [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008,33(2):263-279.
- [17] Cerdan O, Le Bissonnais Y, Couturier A, et al. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France [J]. Soil and Tillage Research, 2002,67(1):99-108.
- [18] 张鹏,郑粉莉,王彬,等.高精度 GPS,三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J].水土保持通报,2008,28(5):11-15.  
Zhang Peng, Zheng Fenli, Wang Bin, et al. Comparative study of monitoring gully erosion morphology change process by using high precision GPS, leica HDS 3000 laser scanner and needle board method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008,28(5):11-15.
- [19] 张姣,郑粉莉,温磊磊,等.利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究[J].水土保持通报,2011,31(6):89-94.  
Zhang Jiao, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Methodology of dynamic monitoring gully erosion process using 3D laser scanning technology [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,31(6):89-94.
- [20] 孙玉柱,郑粉莉,张姣.基于 LIDAR 和 GIS 技术的坡面侵蚀沟空间发育分析[J].水土保持研究,2014,21(3):20-24.  
Sun Yuzhu, Zheng Fenli, Zhang Jiao. Analysis of gully erosion development based on LIDAR and GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(3):20-24.
- [21] Vandekerckhove L, Poesen J, Govers G. Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements [J]. Catena, 2003,50(2/3/4):329-352.
- [22] Gutiérrez Á G, Schnabel S, Contador F L. Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain [J]. Land Degradation & Development, 2009,20(5):535-550.
- [23] 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.
- [24] 唐杰,张岩,范聪慧,等.使用高分遥感立体影像提取黄土丘陵区切沟参数的精度分析[J].农业工程学报,2017,33(18):111-117.  
Tang Jie, Zhang Yan, Fan Conghui, et al. Accuracy assessment of gully morphological parameters from high resolution remote sensing stereoscopic satellite images on hilly Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(18):111-117.
- [25] 李镇,张岩,杨松,等.QuickBird 影像目视解译法提取切沟形态参数的精度分析[J].农业工程学报,2014,30(20):179-186.  
Li Zhen, Zhang Yan, Yang Song, et al. Error assessment of extracting morphological parameters of bank gullies by manual visual interpretation based on Quick-Bird imagery [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(20):179-186.
- [26] 李斌,张金屯.黄土高原草原景观斑块形状的指数和分形分析[J].草地学报,2010,18(2):141-147.  
Li Bin, Zhang J. Patch shape indices and scale fractal analysis of steppe landscape in the Loess Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010,18(2):141-147.
- [27] 吴强建中.地形对细沟横断面不对称性的影响:以元谋干热河谷为例[D].四川 南充:西华师范大学,2019.  
Wu Qiangjianzhong. The influence of topographic on the cross-sectional asymmetry of rills In Yuanmou dry-hot valley [D]. Nanchong, Sichuan: China West Normal University, 2019.
- [28] 倪世民.崩岗区花岗岩红壤坡面侵蚀机制与形态演变特征[D].湖北 武汉:华中农业大学,2022.  
Ni Shimin. Slope erosion mechanism and morphological evolution characteristics of granite red soils In benggang areas [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2023.

- [29] 李镇,齐志国,秦伟,等.利用高分立体影像构建东北黑土地丘陵地区切沟体积估算模型[J].农业工程学报, 2021,37(7):122-130.  
Li Zhen, Qi Zhiguo, Qin Wei, et al. Gully volume estimation model using high-resolution satellite imaging in mountainous and hilly regions with black soil of Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(7):122-130.
- [30] 闫业超,张树文,岳书平.克拜东部黑土区侵蚀沟遥感分类与空间格局分析[J].地理科学,2007,27(2):193-199.  
Yan Yechao, Zhang Shuwen, Yue Shuping. Classification of erosion gullies by remote sensing and spatial pattern analysis in black soil region of eastern kebai [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007,27(2):193-199.
- [31] 白建宏.东北黑土区侵蚀沟分级初探[J].中国水土保持,2017(10):41-42.  
Bai Jianhong. Preliminary study on classification of erosion gully in black soil area of Northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(10):41-42.
- [32] 温艳茹.黑土区典型农业小流域沟蚀发育历史、速度和关键过程研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2020.  
Wen Yanru. Gully Erosion History, Development rates and key processes in a typical agriculture catchment in the Northeast China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [33] Vanmaercke M, Poesen J, Van Mele B, et al. How fast do gully headcuts retreat? [J]. Earth-Science Reviews, 2016,154:336-355.
- [34] 焦鹏.东北低山丘陵典型区侵蚀沟发育特征与影响因素研究[D].吉林 长春:吉林农业大学,2023.  
Jiao Peng. The study on the development characteristics and influencing factors of erosion gullies in typical areas of the northeastern hill [D]. Changchun, Jilin: Jilin Agricultural University, 2023.
- [35] 李镇.黄土高原切沟发育监测方法与侵蚀模型研究[D].北京:北京林业大学,2015.  
Li Zhen. Study on monitoring and modelling gully erosion on the Chinese Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- 
- (上接第 156 页)
- [11] 张亚杰,崔东文.基于 GEO-RVM 模型的枯水期月径流预报研究[J].人民珠江,2022,43(8):93-99.  
Zhang Yajie, Cui Dongwen. Research on monthly runoff forecast in dry seasons based on GEO-RVM model [J]. Pearl River, 2022,43(8):93-99.
- [12] 王飞宇,张彦,王偲,等.基于 Copula 函数的汉江流域降水径流丰枯遭遇研究[J].灌溉排水学报,2022,41(8):95-105.  
Wang Feiyu, Zhang Yan, Wang Cai, et al. Using copula model to analyze consecutive Wetting-drying occurrence in rainfall-runoff in Hanjiang basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(8):95-105.
- [13] 白鹤岭,刘慧勤,高计生.密云水库上游生态清洁小流域建设技术体系研究[J].中国水土保持,2016(10):43-45.  
Bai Heling, Liu Huiqin, Gao Jisheng. Study on technological system for eco-friendly small watershed construction in Miyun Reservoir upstream [J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(10):43-45.
- [14] 王晓贞,王炎如.京津冀跨区域调水生态补偿标准与方式研究[J].海河水利,2018(4):13-15.  
Wang Xiaozhen, Wang Yanru. Study on standard and mode of ecological compensation in Beijing-Tianjin-Hebei inter-regional water transfer project [J]. Haihe Water Resources, 2018(4):13-15.
- [15] 门宝辉,蔡斌,田巍.基于 SPEI 的潮白河流域气象干旱时空特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(2):10-20.  
Men Baohui, Cai Bin, Tian Wei. SPEI-based analysis of temporal and spatial characteristics of meteorological drought in the Chaobai River basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022,43(2):10-20.