

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.035 CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.035

李滢聪, 刘建祥, 许秀泉, 等. 基于地貌发育阶段的大兴安岭东南山地丘陵区侵蚀沟分异规律[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 48-56.

LI Yancong, LIU Jianxiang, XU Xiuquan, et al. Differentiation patterns of gullies in mountainous and hilly area of southeastern Daxing'an Mountains based on geomorphological development stages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 48-56.

基于地貌发育阶段的大兴安岭东南山地 丘陵区侵蚀沟分异规律

李滢聪¹, 刘建祥², 许秀泉¹, 范昊明¹, 周丽丽¹,
米彩虹¹, 高鹏程³, 邵浩源⁴

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 松辽水利委员会察尔森水库管理局, 内蒙古兴安盟 137400; 3. 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010052; 4. 兴安盟水利事业发展中心, 内蒙古兴安盟 137400)

摘要: [目的] 建立地貌发育阶段与侵蚀沟特征的联系, 为大兴安岭东南山地丘陵区的侵蚀沟治理提供依据。[方法] 利用回归、相关性分析探讨集水区面积高程积分(HI)与侵蚀沟的面、线、体积密度及长度、沟底宽深比等11个形态参数的关系。[结果] 1) 3种HI计算结果差异较小, HI表现出尺度依赖性。HI空间异质性显著; 老年期(HI<0.35)、壮年期(HI>0.35)集水区分别占61.7%、38.3%, 对应河流下游沉积区与中上游侵蚀区。2) HI与面密度呈显著正相关; 对线密度与体积密度存在显著阈值效应(HI=0.35); 当HI<0.35时, 二者随HI上升显著增加, HI>0.35时线密度下降, 而体积密度增速趋缓。3) 整体上, HI与沟底宽深比呈极显著负相关; 壮年期HI与坡度分级、纵比降呈显著正相关, 与体积、面积、长度及沟底宽深比呈显著负相关; 老年期HI与坡度分级、纵比降和沟底宽深比呈显著负相关。[结论] HI=0.35作为地貌分类中老年期与壮年期的分界点, 可作为线密度变化的临界阈值, 同时也是侵蚀沟发育方式转变的关键标志。从地貌演化的角度, HI可为黑土区侵蚀沟防治提供参考。

关键词: 阈值; 面积高程积分; 侵蚀沟密度; 形态特征; 沟底宽深比

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2026)02-0048-09

Differentiation Patterns of Gullies in Mountainous and Hilly Area of Southeastern Daxing'an Mountains Based on Geomorphological Development Stages

LI Yancong¹, LIU Jianxiang², XU Xiuquan¹, FAN Haoming¹, ZHOU Lili¹,
MI Caihong¹, GAO Pengcheng³, TAI Haoyuan⁴

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Charlson Reservoir Authority of Songliao Water Resources Commission, Hinggan League, Inner Mongolia 137400, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Water Resources Research Institute, Hohhot 010052, China; 4. Hinggan League Water Resources Development Center, Hinggan League, Inner Mongolia 137400, China)

Abstract: [Objective] To establish the relationship between geomorphological development stages and gully characteristics, providing a basis for gully management in the mountainous and hilly area of southeastern Daxing'an Mountains. [Methods] Regression and correlation analyses were employed to investigate the relationships between the catchment hypsometric integral (HI) and 11 gully morphological parameters, including areal density, linear density, volumetric density, length, and width-depth ratio of the gully bottom. [Results] 1) The three HI calculation results showed minimal differences. HI exhibited scale dependence and significant spatial heterogeneity.

收稿日期: 2025-09-27 修回日期: 2025-11-06 录用日期: 2025-11-14 网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-07

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1501200); 内蒙古自治区水利科技项目(202501010001A)

第一作者: 李滢聪(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: lyc0513@stu.syau.edu.cn

通信作者: 许秀泉(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: xuxiuquan@syau.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

Old-stage ($HI < 0.35$) and mature-stage ($HI > 0.35$) catchments accounted for 61.7% and 38.3% of the total area, corresponding to downstream depositional areas and mid-upper stream erosional areas, respectively. 2) HI exhibited a significant positive correlation with areal density. A significant threshold effect ($HI = 0.35$) was observed for linear and volumetric density: when $HI < 0.35$, both increased markedly with HI; when $HI > 0.35$, linear density decreased while the growth rate of volumetric density slowed down. 3) Overall, HI exhibited a highly significant negative correlation with the width-depth ratio at the gully bottom. In mature-stage catchments, HI showed significant positive correlations with slope classification and longitudinal gradient, but had significant negative correlations with volumetric density, areal density, length, and width-depth ratio. In old-stage catchments, HI showed significant negative correlations with slope classification, longitudinal gradient, and width-depth ratio. [Conclusion] $HI = 0.35$ serves as the boundary between the old and mature stages in geomorphological classification, acting as a critical threshold for linear density changes and a critical indicator of the transition in gully development modes. From the perspective of geomorphological evolution, HI can provide a reference for gully management in black soil regions.

Keywords: threshold; hypsometric integral; gully density; morphological characteristics; width-depth ratio of gully bottom

Received: 2025-09-27

Revised: 2025-11-06

Accepted: 2025-11-14

Online(www.cnki.net): 2026-01-07

东北黑土区承载着我国约1/3的商品粮产能。侵蚀沟是东北黑土区主要的土壤流失形式之一,严重威胁国家粮食安全底线^[1]。侵蚀沟的发生发育与其集水区地形地貌特征密切相关。现有研究多集中于坡度^[2]和汇水面积^[3]等微观地形因子对侵蚀沟发生和发育的关键作用,缺乏对侵蚀沟集体发育的系统性认识。集水区的地貌演化阶段是其内在稳定性的直接体现。根据Davis侵蚀循环理论^[4],侵蚀是流域从抬升初期的幼年期、经均衡的壮年期、最终至夷平的老年期的演化过程,实则是其从不稳定状态向稳定状态过渡的过程。上述稳定性直观的表现包括但不限于水土流失,即不稳定的幼年期集水区,地势起伏大、势能高,为径流汇集和侵蚀提供强大动力,导致水土流失剧烈;而稳定的老年期集水区地势平缓,以沉积作用为主,水土流失微弱。侵蚀沟作为水土流失集中的表现形式,其发育正是集水区不稳定的标志之一^[4]。

集水区的地貌演化与侵蚀沟发生发育密切相关。面积高程积分(hypsometric integral, HI)作为一种宏观地形因子,有效反映整体区域的侵蚀发育程度^[5],其应用范围也从传统地貌学扩展至水土保持领域^[6]。HI通过表征地表高程分布结构综合反映地表侵蚀与沉积的时空动态^[7-8],对研究地貌形态、流域演化、侵蚀性倾向等具有重要意义^[9]。在侵蚀沟研究方面,HI已展现出与侵蚀活动的关联,ZHAO等^[10]在黄土高原地区发现,HI与侵蚀沟密度呈正相关,侵蚀沟更容易出现在凸型地形区域;ZHOU等^[11]在南方红

土区发现,重力侵蚀占比主要受HI影响;WEI等^[12]在黄土高原的研究发现,HI与单位面积侵蚀体积显著相关。上述成果表明,HI对侵蚀沟发育具有重要指示意义,但在东北黑土区侵蚀沟发育是否在不同地貌阶段存在响应关系,尚缺乏针对性研究。作为侵蚀沟发育最活跃地区之一,与侵蚀模数较高的黄土高原相比,大兴安岭东南山地丘陵区虽整体侵蚀强度较低,但其自新生代以来持续隆升^[13],具有年轻活跃的地质背景,溯源侵蚀和沟壁坍塌成为侵蚀沟扩张的主要过程^[14];而黄土高原则因深厚的松散黄土层,重力侵蚀和潜蚀等过程更为突出。与东北黑土区内部的漫川漫岗区相比^[15],后者地势相对平缓,其侵蚀沟发育更多地受坡面汇水面积和细沟侵蚀的影响,而本研究区域则表现为强烈的沟头前进和沟岸扩张^[1]。

基于此,本文选取内蒙古突泉县典型区流域,通过野外实测与数据统计,分析集水区HI与侵蚀沟参数和密度关系,揭示地形因子与侵蚀沟特征的关联,探讨地形发育阶段对侵蚀沟发生发育的影响。研究结果可为黑土区侵蚀沟治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区兴安盟突泉县中南部($45^{\circ}32' \sim 45^{\circ}37' N, 121^{\circ}19' \sim 121^{\circ}32' E$),太和乡与巨力乡交界处,总面积60.91 km²。该区域属于大兴安岭东南山地丘陵土壤保持区,地质上发育侏罗系-白垩系地层,以沉积岩和火山岩为主^[16]。2023年8月水利部发布东北黑土区侵蚀沟普查结果,大兴安岭东

南低山丘陵土壤保持区占侵蚀沟总数量的 33.19%，是东北黑土区侵蚀沟数量最多的区域。研究区气候为中温带大陆性季风气候，年平均气温 3.1℃，无霜期 127 d，主导风向为西北风，年平均降水量 422.1 mm。土壤类型以暗棕壤为主，土层薄、多砂石，持水能力差，植被覆盖度较低，土地利用以耕地为主。耕作机械化与过度放牧等人为活动，进一步破坏地表植被，因此该区域易发生水土流失^[17]。

1.2 数据来源

1.2.1 DEM 数据 选择 ALOS (Advanced Land Observation Satellite) DEM 数据，像元分辨率 12.5 m×12.5 m，空间参考为 WSG_1984_UTM_Zone_51N。数据来源于资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/)。

1.2.2 野外调查数据 2023年8月水利部发布东北黑土区侵蚀沟普查结果^[1]。具体方法为：先以 2011 年第一次全国水利普查东北黑土区侵蚀沟专项调查结果为基础进行目视解译，按照单个侵蚀沟汇水面积≤50 km²的原则，提取长度≥50 m 的侵蚀沟起讫经纬度等指标，生成侵蚀沟道解译矢量图。而后在研究区实地测量 467 条沟道数据^[17]。使用手持 GPS(型号 SW-100A, ±0.5 m)测量长度≥50 m 且深度>0.5 m 侵蚀沟的断面及沟头坐标，从沟深达 0.5 m 的沟头起，至连接河道或汇入主沟的沟尾止。断面布设遵循的原则为：沟长≤100 m，分别为沟头、沟尾、沟中间 3 个断面；沟长>100 m，或沟长≤100 m 且深度或宽度变化大时，除上述 3 个点外，增加沟中上部、沟中下部，共计测量 5 个断面；如果沟长>300 m，每 50 m 测量断面；另在沟道转弯处、形态变化大的部位、明显分叉处加测。

1.3 数据处理

1.3.1 集水区划分与侵蚀沟指标计算 基于 DEM 数据，利用水文分析工具进行流域划分^[18]，通过多次调整河网提取阈值，验证其与实际河网分布的吻合程度。最终确定在累积流量阈值 4 000 时，可得到与研究区实际水文特征相符的流域划分结果。

467 条侵蚀沟分布在 47 个集水区。侵蚀沟特征包括 11 个特征参数^[19]。利用侵蚀沟实测长度、宽度和深度数据，计算得到平均顶宽、平均底宽、断面面积、面积、纵比降、体积、宽深比、沟底宽深比 8 种形态参数。根据 DEM 提取沟道坡度，然后对坡度进行 1~9 分级，分级标准为 0~0.25、0.25~1.5、1.5~3、3~4、4~5、5~8、8~15、15~25、25~90。

1) 侵蚀沟参数

沟道纵比降指流域内沟道高程差与沟道长度比

的比值，是描述侵蚀沟在垂直方向上侵蚀发育程度的重要指标；宽深比是侵蚀沟沟顶平均宽度与平均深度之比，该项指标能表征侵蚀沟整体纵断面形状变化；沟底宽深比是侵蚀沟平均底宽与平均深度之比，反映侵蚀沟沟底发育程度。

2) 侵蚀沟密度

侵蚀沟密度分为线密度、面密度和体积密度。线密度指侵蚀沟总长度与流域面积之比^[20]；面密度为侵蚀沟面积与流域总面积之比^[21]；体积密度指集水区单位面积侵蚀体积^[12]。计算公式为：

$$D_L = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (1)$$

$$D_A = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{S} \quad (2)$$

$$D_V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{S} \quad (3)$$

式中： D_L 为集水区侵蚀沟线密度，km/km²； D_A 为集水区侵蚀沟面密度，m²/km²； D_V 为体积密度，m³/km²； L_i 为第 i 条侵蚀沟的长度，m； A_i 为第 i 条侵蚀沟的面积，m²； V_i 为侵蚀沟体积，m³。

1.3.2 HI 计算 利用 DEM 数据计算面积高程积分值，主要有 3 种方法：积分曲线法、体积比例法和起伏比法^[22]。

1) 积分曲线法^[6]：利用等间距分割方法对整个研究区范围内的高程进行划分，从而构建曲线模型，进行多项式拟合。面积高程积分值则为曲线与坐标轴围成的面积。计算公式为：

$$X = \frac{a_i}{A} \quad Y = \frac{h_i}{H} \quad (4)$$

式中： a_i 为研究区内某一等高线以上面积，m²； A 为研究区总面积，m²； h 为研究区内某一等高线高程，m； H 为研究区高差，m。

2) 体积比例法：流域单元内未被侵蚀掉的物质体积和流域单元被侵蚀之前总物质体积的比值。

$$HI = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (5)$$

式中： V_1 为流域侵蚀后剩余的物质体积； V_2 为被侵蚀掉的物质体积。

3) 起伏比法：利用 DEM 数据计算面积高程积分值，该方法是将研究区的高程起伏比看作研究区面积高程积分值的简要估算方法，公式为：

$$HI \approx (\text{DEM}_{\text{mean}} - \text{DEM}_{\text{min}}) / (\text{DEM}_{\text{max}} - \text{DEM}_{\text{min}}) \quad (6)$$

式中： DEM_{mean} 为流域高程平均值，m； DEM_{max} 为流域高程最大值，m； DEM_{min} 为流域高程最小值，m。

1.3.3 数据分析 根据 Strahler 分级,按等级提取完整子流域,分别计算各级别所有流域的 HI 并选取稳定阈值。利用 3 种方法计算 HI,比较标准差(SD)、中位数(ME)及变异系数(CV)选取最优计算方法。以 HI 划分发育阶段的分界点(0.35,0.60)进行分类,通过 Shapiro-Wilk 检验验证数据正态性,Levene 检验检查方差的齐性,利用 Mann-Whitney U 检验对比不同 HI 区间侵蚀沟特征的组间差异。采用 Spearman 相关系数解析集水区线、面密度和体积密度、HI 与侵蚀沟参数的相关性。利用线性回归分析 HI 与面密度关系,并采用分段线性回归(piecewise linear regression)深入分析 HI 与线密度和体积密度关系。

2 结果与分析

2.1 HI 影响因素

2.1.1 地域稳定面积对 HI 的影响 为确定 HI 计算的稳定面积,分别计算各级别子流域的 HI^[9],并与其面积值制作散点图(图 1)。当子流域面积较小时,积分值域分布较宽,离散程度大。随着子流域面积的增大,其积分值呈收敛趋势。从不同级别子流域 HI 的分布形态来看,一级子流域 HI 分布最为松散;随着子流域级别升高,其值域范围逐渐收窄。因此,本研究将 0.5 km² 设定为该区域计算 HI 的稳定阈值。研究区内共有 47 个集水区有侵蚀沟分布,且满足计算 HI 稳定阈值面积。

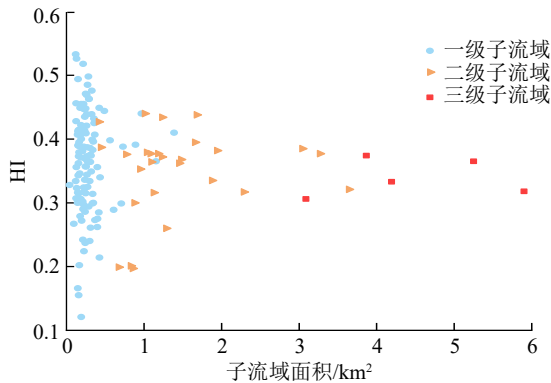


图 1 各级别子流域积分值与面积的散点分布

Fig.1 Scatter plot of HI values and area of sub-catchments at different levels

2.1.2 不同方法计算 HI 的比较 对起伏比法、曲线法、体积比法 3 种方法计算的 HI 进行描述性统计(表 1)表明,3 种方法的平均值和标准差高度吻合,整体分布高度一致。3 种方法的分布范围、中位数和变异系数极为接近,起伏比法的最小值和最大值与体积比法和曲线法基本一致,分别为 0.196 和 0.444,表明 3 种方法在计算 HI 时均具有较高的可靠性和一致性。鉴于计算结果的高度一致性,起伏比法计算最为简便的优势,后续分析均采用起伏比法的计算结果。

表 1 HI 3 种方法描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of HI values calculated by three methods

| 统计量 | 起伏比法 | 曲线法 | 体积比法 |
|------|-------|-------|-------|
| 平均值 | 0.323 | 0.329 | 0.322 |
| 标准差 | 0.065 | 0.066 | 0.065 |
| 中位数 | 0.325 | 0.333 | 0.324 |
| 最小值 | 0.196 | 0.197 | 0.196 |
| 最大值 | 0.444 | 0.446 | 0.443 |
| 变异系数 | 0.201 | 0.201 | 0.202 |

2.2 HI 特征分析

Strahler 将 HI 划分为 3 个阶段:HI>0.60 为幼年期,0.35<HI≤0.60 为壮年期,HI≤0.35 为老年期^[4]。研究区 HI 为 0.196~0.444,无幼年期样本。整体处于壮年期向老年期过渡的地貌演化过程中,流域侵蚀程度较为严重。

集水区 HI 分布特征见图 2。HI 平均为 0.323,标准差为 0.065,变异系数为 20.1%,表明地貌发育阶段的空间异质性较强。HI 近似正态分布,峰值集中在 0.300~0.350。空间分布上(图 2),老年期集水区(N=37,占比 61.7%)多分布于东南部河流下游区,该区域地势平缓,河网密度较高;壮年期集水区(N=23,占比 38.3%)主要分布于河流中上游及山地过渡带,空间上集中于研究区西北部及中部山麓地带,该区域地形起伏显著,河网密度较低。西北部高海拔山地 HI 多的 HI 集中在 0.400~0.440,西部过渡带的 HI 呈现 0.350~0.400 的渐变特征。整体上,东南部低海拔老年期区域与河流下游沉积区对应,西北部高海拔壮年期区域与中上游侵蚀区一致,表明 HI 的空间分布与河流等级及高程相关^[5]。

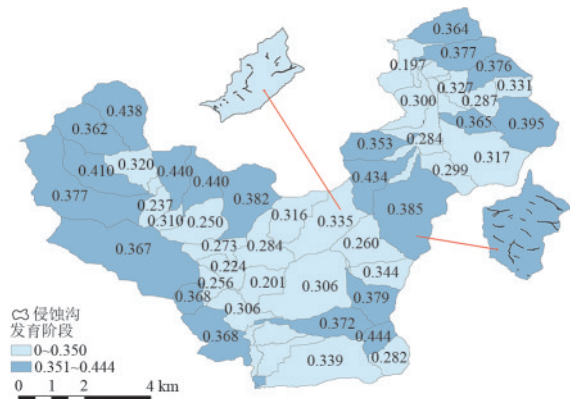


图 2 HI 分布区间

Fig.2 Distribution ranges of HI values

2.3 不同发育阶段参数差异分析

HI=0.35 是老年期和壮年期的分界点,对集水区线密度、体积密度及侵蚀沟各参数在 HI=0.35 前后进行分组,Mann-Whitney U 检验结果(表 2)表明,

壮年期线密度中位数为 2.453 km/km^2 , 显著高于老年期的 1.459 km/km^2 ($Z = -3.146, p = 0.002$)。壮年期体积密度中位数为 $30\ 125.095 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 高于 $HI < 0.35$ 的 $18\ 542.504 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ($Z = -2.118, p = 0.034$)。老年期沟底宽深比中位数为 1.738 , 高于壮年期的

1.432 ($Z = -1.988, p = 0.047$), 表明侵蚀沟的发育强度(线密度、体积密度)和沟底形态(沟底宽深比)在壮年期集水区和老年期集水区之间存在显著差异, 且壮年期集水区具有较大的侵蚀沟密度和较窄的沟底形态。

表 2 侵蚀沟非参数秩和检验

Table 2 Non-parametric rank sum test for gullies

| 侵蚀沟参数 | 中位数 $M(p_{25}, p_{75})$ | | Mann Whitney 检验 统计量 U 值 | Z | p |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------|---------|
| | $HI > 0.35$ | $HI < 0.35$ | | | |
| 线密度/ $(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$ | 2.453(1.916, 3.298) | 1.459(0.913, 2.713) | 131 | -3.146 | 0.002** |
| 体积密度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$ | 30 125.095(18 436.760, 60 089.218) | 18 542.504(4 575.187, 34 863.050) | 174 | -2.118 | 0.034* |
| 沟底宽深比 | 1.432(0.857, 2.250) | 1.738(1.116, 2.924) | 23 295 | -1.988 | 0.047* |

注:*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

2.4 HI 与侵蚀沟特征的关系分析

2.4.1 HI 与侵蚀沟分布密度的相关性

通过对 HI 与线密度、面密度、体积密度进行回归分析, 探讨地形演化过程中沟壑发育与地形割裂的关系。侵蚀沟密度指标(表 3)显示, 研究区面密度变化为 $1\ 254.835 \sim 90\ 992.138 \text{ m}^2/\text{km}^2$, 线密度变化为 $0.238 \sim 7.719 \text{ km/km}^2$, 体积密度为 $964.852 \sim 12\ 4231.602 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 均存在较大的变异性。

线密度与面密度、体积密度之间存在较强的相关关系, 相关系数分别为 0.86 和 0.76 ($p < 0.001$), 表明随着线密度的增加, 地形的割裂程度和侵蚀物质质量显著加剧。Spearman 相关性分析(表 4)表明, HI 与线密度、面密度和体积密度均具有显著正相关 ($r_s = 0.48, p < 0.001$; $r_s = 0.44, p < 0.01$; $r_s = 0.37, p < 0.05$), 证明侵蚀活跃度对侵蚀沟分布密度及发育有显著的正向影响。

表 3 侵蚀沟密度统计

Table 3 Statistics of gully densities

| 侵蚀沟密度 | 样本数 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 标准差 |
|---|-----|-------------|-----------|------------|------------|
| 面密度/ $(\text{m}^2 \cdot \text{km}^{-2})$ | 47 | 90 992.138 | 1 254.835 | 27 446.892 | 20 868.306 |
| 线密度/ $(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$ | 47 | 7.719 | 0.238 | 2.284 | 1.520 |
| 体积密度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$ | 47 | 124 231.602 | 964.852 | 32 998.349 | 31 173.674 |

为进一步揭示 HI 与侵蚀沟密度的关系, 对集水区 HI 与侵蚀沟线密度、体积密度进行分段回归模型拟合^[23](图 3)。结果显示, HI 与线密度和体积密度的关系在 $HI = 0.353$ 处出现明显的断点 ($p < 0.05$), 该值极为接近老年期和壮年期的分界值 (0.35)。断点前后关系发生明显转变, 当 $HI < 0.353$ 时, 线密度和体积密度随 HI 的增加而快速上升; 而当 $HI > 0.353$ 时, 线密度出现缓慢下降趋势, 体积密度则缓慢上升。线密度是反映沟头前进及侵蚀发育程度的重要指标^[19]。该指标值越大, 说明沟头前进程度越大, 即侵蚀沟生长延伸程度越大, 发育程度越高。体积密度是反映集水区内单位面积被侵蚀的物质体积多少, 体积密度越大, 说明除侵蚀沟扩张外, 垂直方向的侵蚀也在加剧。HI 与面密度之间存在显著线性关系 ($p < 0.05$)(图 4), 表明随着 HI 的增加, 面密度呈现上升趋势。面密度是表征集水区地表切割程度的重要指标之一^[19], 可以反映沟沿线侵蚀演进的位置变化, 同时也可以表达沟道横向发育的程度。面密度越大, 则说明侵蚀沟侵蚀越

强, 横向扩展程度越高, 侵蚀沟总体发育程度越高。综上, 侵蚀沟线、面、体积密度总体与 HI 都具有正相关关系, 反映侵蚀活跃度是影响侵蚀沟发育的关键因素。分段回归的结果说明 $HI = 0.35$ 的关键阈值意义, 它既是侵蚀沟线密度的转折点, 也标志着体积密度由快速扩张向缓慢增长的收敛。

2.4.2 HI 与侵蚀沟特征值响应关系研究

使用 Spearman 相关性分析(表 5)揭示研究区集水区 HI 与流域侵蚀沟坡度分级、平均顶宽、平均底宽、沟深、断面面积、长度、面积、纵比降、体积、宽深比和沟底宽深比等侵蚀沟形态参数的关系在不同地貌发育阶段存在显著差异。

整体上, HI 与侵蚀沟沟底宽深比的关系最为一致且显著。沟底宽深比在整体样本 ($r_s = -0.248, p < 0.001$)、壮年期 ($r_s = -0.282, p < 0.001$) 和老年期 ($r_s = -0.152, p < 0.05$) 均与 HI 呈显著负相关, 表明随着集水区侵蚀活跃度增强 (HI 增大), 侵蚀沟沟底形态趋于窄深 (沟底宽深比减小)。此现象与地貌发育理论吻合, 即在壮年期向老年期过渡过程

中,地表残留原始物质比例减少^[4],沟底沉积物不断向下游搬运^[24],沟道形态逐渐从较宽浅的“U”形向较窄深的“V”形转变^[25]。因此,壮年期对应着更

活跃的下切侵蚀和较窄深的沟底形态,而老年期则对应着相对稳定,侧向拓宽为主及沟底较宽浅的形态。

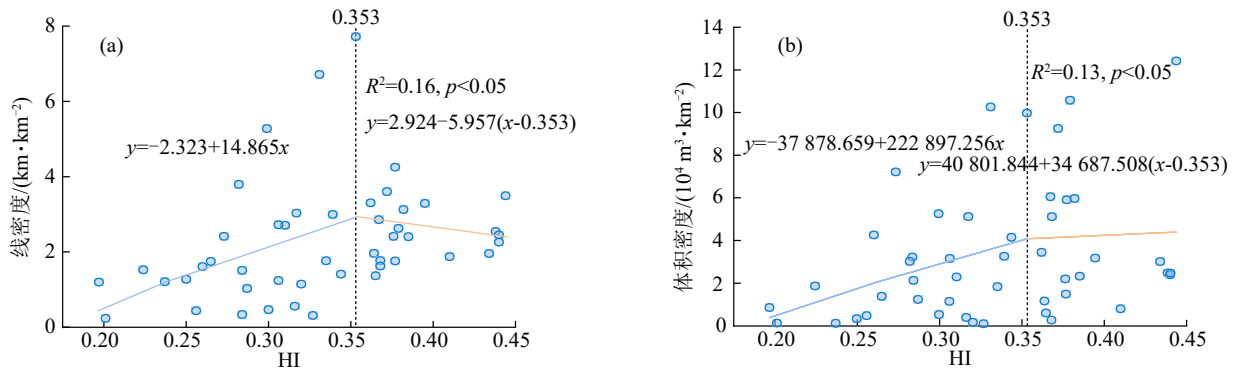


图 3 HI与线密度和体积密度分段线性回归

Fig.3 Piecewise linear regression of HI values with linear density and volumetric density

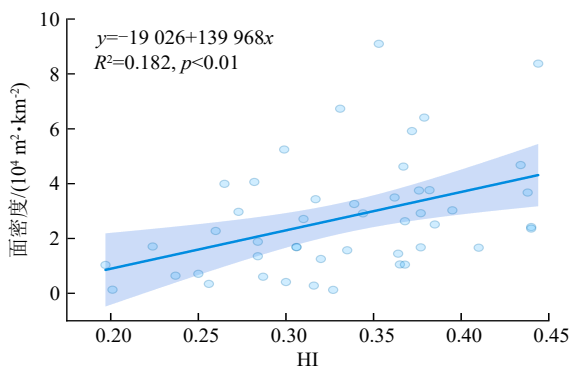


图 4 HI与面密度回归

Fig.4 Regression of HI values with areal density

表 4 HI与侵蚀沟密度相关性分析

Table 4 Correlation analysis between HI values and gully density

| 特征值 | HI | 线密度 | 面密度 |
|------|---------|---------|---------|
| 线密度 | 0.48*** | | |
| 面密度 | 0.44** | 0.86*** | |
| 体积密度 | 0.37* | 0.76*** | 0.86*** |

注:*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。下同。

在老年期集水区 HI 与坡度分级、纵比降呈显著负相关 ($p < 0.05$), 说明集水区发育越成熟, 地表物质侵蚀量越多, 侵蚀沟冲刷严重, 沟长增加, 因此呈显

著负相关。壮年期 HI 与更多侵蚀沟参数存在显著关联: 坡度分级、纵比降呈显著正相关 ($p < 0.01$), 表明侵蚀活跃度越高, 侵蚀沟坡度越陡、比降越大, 侵蚀势能更强。面积、长度及体积均呈显著负相关 ($p < 0.05$), 说明壮年期侵蚀沟在扩张过程中形态趋于复杂化, 下切侵蚀加剧, 反映在壮年期高侵蚀活跃度情况下, 侵蚀沟发育更侧重于剧烈的下切加深和溯源侵蚀, 导致发育活跃的沟道数量可能增多(与壮年期线密度较高但随 HI 增长停滞的现象相对应), 但单个沟道的规模(长度、面积、体积)在壮年期反而相对较小或发育受到某种制约(如快速下切导致沟壁不稳定限制侧向扩展)。沟底宽深比在此阶段与 HI 的负相关性最强, 进一步支持壮年期以强烈下切为主导的观点。

HI 对侵蚀沟形态的影响具有明显的发育阶段性。壮年期集水区主要具有更陡的坡度、更大的比降、更窄深的沟底形态, 体现强烈的下切侵蚀主导; 老年期集水区则拥有更缓的坡度、更小的比降和更宽浅的沟底形态, 反映侵蚀过程趋于缓和并以侧蚀拓宽为主。沟底宽深比是反映 HI 变化最一致的形态指标。

表 5 侵蚀沟参数与集水区的 HI 之间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between gully parameters and HI values in catchment area

| 侵蚀沟参数 | 特征值 | 坡度分级 | 平均顶宽/m | 平均底宽/m | 沟深/m | 断面面积/m ² | 长度/m | 面积/m ² | 纵比降 | 体积/m ³ | 宽深比 | 沟底宽深比 |
|----------------|-------|---------|--------|--------|--------|---------------------|----------|-------------------|---------|-------------------|--------|-----------|
| 老年期 (N=186) | r_s | -0.168* | 0.065 | -0.013 | 0.144 | -0.088 | -0.052 | -0.053 | -0.150* | 0.048 | -0.058 | -0.152* |
| | p | 0.022 | 0.377 | 0.719 | 0.050 | 0.232 | 0.480 | 0.472 | 0.041 | 0.515 | 0.432 | 0.038 |
| 壮年期 (N=281) | r_s | 0.175** | -0.084 | -0.078 | -0.095 | -0.094 | -0.168** | -0.138* | 0.144* | -0.146* | 0.034 | -0.282*** |
| | p | 0.003 | 0.159 | 0.195 | 0.113 | 0.117 | 0.005 | 0.021 | 0.015 | 0.014 | 0.566 | <0.001 |
| 全部 (N=467) | r_s | 0.077 | -0.047 | -0.073 | -0.011 | -0.030 | 0.013 | 0.011 | 0.087 | -0.015 | -0.029 | -0.248*** |
| | p | 0.098 | 0.309 | 0.115 | 0.815 | 0.522 | 0.774 | 0.807 | 0.059 | 0.746 | 0.537 | <0.001 |

3 讨论

本研究证实,面积高程积分(HI)能有效表征大兴安岭东南山地丘陵区集水区的地貌发育阶段,并深刻影响侵蚀沟的发育模式。本研究确定的分析尺度,在确保与侵蚀沟空间分布良好匹配的同时,亦满足HI指标的尺度效应要求^[26],并进一步验证HI在集水区范围内应用的可行性。空间上,HI分布格局与流域的高程梯度、河流等级的空间分带性相吻合,凸显HI作为侵蚀沟空间预测指标的潜力。HI值的高低直接反映流域相对于侵蚀基准面的剩余侵蚀能量^[9]。壮年期侵蚀能量集中,以下切作用为主导;老年期侵蚀动力衰减,侧蚀作用相对增强,致使沟底宽深比等形态参数发生系统性转变,与Strahler地貌发育理论模型一致^[4]。上述规律揭示宏观地貌演化阶段对侵蚀过程的控制机制,为探讨侵蚀沟发育的地形临界提供系统性的新视角。

HI与集水区面密度呈正相关,对线密度和体积密度的影响存在显著的阈值效应,此阈值效应可能与不同地貌发育下地形起伏对径流侵蚀力和物质输移能力的协同调控作用有关。HI与面密度呈正相关,说明侵蚀活跃导致地表扩张加剧。当 $HI < 0.35$ 时,线密度和体积密度都随着HI增大而增大;当 $HI > 0.35$ 时,线密度由显著增大转变为逐渐减少,体积密度由明显增大转变为增速趋缓。地貌发育阶段对侵蚀沟发育具有临界影响,可作为区域侵蚀沟风险预警的量化依据。ZHAO等^[10]在黄土区研究发现,HI与沟道密度存在显著正相关,与本研究的整体趋势一致。本研究发现,HI阈值与WANG等^[25]在大兴安岭东南山地丘陵区提出的坡度阈值(15°)在指示侵蚀发育临界状态上具有相似性和互补性,二者共同指向地形临界状态对侵蚀沟发育的调控。HI作为综合性地貌指标,与体积密度的高度相关性^[12]进一步印证其表征地表侵蚀强度的能力。

从地貌演化的时间序列来看,一个集水区通常由壮年期向老年期转变。本研究获取的是空间上不同集水区在当下的发育状态,其HI值差异可代表它们处于地貌演化的不同阶段。在侵蚀过程发展至壮年期,下切侵蚀是主导过程。侵蚀能量集中,导致沟道下切形成相对窄深的“V”形沟(沟底宽深比与HI极显著负相关)。在此阶段,尽管下切剧烈,体积密度累积,线密度增加。随着演化进行至老年期,流域地势趋于平缓,下切动力减弱,侧蚀和沟坡坍塌逐渐成为新的主导过程,导致沟道不断拓宽(沟底宽深比增大),溯源侵蚀趋于稳定,线密度和体积密度不再增长甚至略有降低。面密度因侧向扩张而维持在一

个较高水平,但相较于壮年期,其扩张速率已显著降低,整体随HI的降低而减小。老年期坡度和纵比降与HI呈显著负相关,反映老年期侵蚀动力衰减和沉积作用增强的特征。相比之下,壮年期表现出更为复杂的响应,坡度的显著正相关,表明地形活跃区侵蚀能量集中。沟道长度、面积和体积与HI的显著负相关揭示壮年期侵蚀过程中的能量耗散机制,HI升高反向抑制沟道扩展,说明侵蚀过程由垂向侵蚀为主导。WEI等^[12]在黄土高原研究得出, $HI > 0.35$ 时HI与沟谷体积呈负相关,与本文结果一致。 $HI = 0.35$ 的阈值,标志着集水区在地貌演化过程中,其内部侵蚀沟发育的主导动力机制发生转换的临界点:高于此值,下切加深为主导;低于此值,侧蚀拓宽为主导。大兴安岭地区(尤其是北段)整体已步入地貌演化的“老年期”,表现出老年期地貌特征^[27]。大兴安岭东南坡目前处于新生代持续隆升、并在外力作用长期塑造下的地貌发育阶段^[13]。由其低山丘陵广布、山形浑圆、山坡较缓的地貌特征,以及新生代以来持续的隆升历史,共同推断该区域地貌演化可能处于壮年期向老年期过渡的阶段,地表在外力长期作用下已趋于和缓,但地壳的隆升活动仍在持续。以上推断与研究区内集水区发育阶段一致。

对比侵蚀沟参数在集水区不同阶段的特征可知,老年期沟底较宽,侧蚀和沟坡坍塌较为严重,因此建议沟坡设置缓冲带,沟头注意导出径流,控制溯源侵蚀。壮年期沟底较窄,下切侵蚀较为显著,对此问题目前常见措施是沟底布设措施,减缓水流速度,拦截泥沙,在陡坎处设置跌水,消散水流动能。另有研究^[28]表明,水土保持治理的对象属于现代侵蚀范畴,而古代侵蚀如干沟和河沟等,则不是水土保持及其研究的对象。土地利用方式的改变,尤其是大规模的农垦^[29]、林草地退化等,导致在古代侵蚀沟道区重新出现侵蚀沟,因此这类侵蚀沟道应用于排水,不宜施加谷坊等拦截措施,以免影响其行洪能力(尤其是极端降雨期间)。本文并未对古代侵蚀与现代侵蚀进行区分,建议在大量野外调研基础上,探讨匹配区域特点的侵蚀沟治理原则。另外,包括侵蚀沟在内的坡面形态及形成过程研究受限于大量可靠资料的获取,尤其是发展过程数据。“各态经历假说”或者空间代替时间的分析方法尽管简单,但是难以实行。类似方法均假设侵蚀沟或坡面形态遵循着同样的发育规律,但发展速率不同。这种前提的说服力明显较弱。因此本文结论仅限于观测数据的统计结果,不宜作为侵蚀沟或集水区的发展规律(如壮年期的侵蚀沟未来发展为老年期的侵蚀沟)。建议采用物理模型、遥感和大

数据分析等方法,对类似规律进行针对性研究。本研究分析基于现有公开的DEM数据,其分辨率在表征山区细微地貌特征时存在固有局限。

4 结论

1)HI表现出尺度依赖性,突泉地区0.5 km²阈值的集水区HI达到基本稳定。3种HI计算结果差异较小,起伏比法计算简便。HI存在明显的空间异质性,分布规律与高程和河网密度相关。老年期集中分布于东南部河流下游平缓区,壮年期分布于西北部中上游侵蚀区,体现地貌发育阶段的空间分异特征。

2)HI与侵蚀沟发育强度存在阶段性关系。HI与面密度具有显著正相关($p < 0.05$)。同时,其与侵蚀沟线密度和体积密度具有显著阈值效应,具体表现为HI=0.35作为壮年期和老年期的分界值,低于该值时,线密度和体积密度随HI上升而增加,高于该值后,线密度呈现下降趋势,体积密度缓慢增长。反映出不同地貌发育阶段侵蚀能量分配差异,即老年期以侵蚀能量耗散为主,壮年期侵蚀能量活跃且沟道发育模式发生转变。

3)HI指示不同地貌阶段侵蚀方式的转变。HI与沟道形态参数的相关性分析表明,在壮年期,侵蚀以下切为主导;随着地貌向老年期发展,侧蚀作用则显著增强。HI作为综合性地貌发育阶段指标,可有效识别不同阶段的侵蚀主导方式,系统反映侵蚀沟形态对地貌发育过程的响应。

参考文献:

- [1] 郭明明,王迪晨,徐金忠,等.东北黑土区沟蚀研究进展与展望[J/OL].中国水土保持科学(中英文),2025:1-28.(2025-10-15). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STBC20251013001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- GUO M M, WANG D C, XU J Z, et al. Research progress and prospects of gully erosion in the black soil region of Northeast China [J/OL]. Science of Soil and Water Conservation, 2025: 1-28. (2025-10-15). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STBC20251013001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [2] GUAN Y B, YANG S T, ZHAO C S, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: e104800.
- [3] 李珊珊,王春梅,唐杰,等.东北黑土区典型小流域浅沟向切沟发育及其地形临界研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):345-356.
- LI S S, WANG C M, TANG J, et al. Study on the development of ephemeral to permanent gullies and the critical

terrain threshold in typical watershed in the mollisol region of northeastern China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(2): 345-356.

- [4] STRAHLER A N. Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography [J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(11): e1117.
- [5] BUNEL R, LECOQ N, COPARD Y, et al. Generation of realistic synthetic catchments to explore fine continental surface processes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2021, 46(3): 593-610.
- [6] PÉREZ-PENÁ J V, AZAÑÓN J M, AZOR A. Cal-Hypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain [J]. Computers and Geosciences, 2009, 35(6): 1214-1223.
- [7] QING F, ZHAO Y, MENG X M, et al. Application of machine learning to debris flow susceptibility mapping along the China-Pakistan karakoram highway [J]. Remote Sensing, 2020, 12(18): e2933.
- [8] GHAREHCHAH I S, BALLINGER T J, JENSEN J L R, et al. Local- and regional-scale forcing of glacier mass balance changes in the Swiss Alps [J]. Remote Sensing, 2021, 13(10): e1949.
- [9] 祝士杰,汤国安,李发源,等.基于DEM的黄土高原面积高程积分研究[J].地理学报,2013,68(7):921-932.
- ZHU S J, TANG G A, LI F Y, et al. Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68 (7) : 921-932.
- [10] ZHAO J L, VANMAERCKE M, CHEN L Q, et al. Vegetation cover and topography rather than human disturbance control gully density and sediment production on the Chinese Loess Plateau [J]. Geomorphology, 2016, 274: 92-105.
- [11] ZHOU X Q, WEI Y J, HE J, et al. Estimation of gully erosion rate and its determinants in a granite area of south-east China [J]. Geoderma, 2023, 429: e116223.
- [12] WEI H, XIONG L Y, ZHAO F, et al. Large-scale spatial variability in loess landforms and their evolution, Luohe River basin, Chinese Loess Plateau [J]. Geomorphology, 2022, 415: e108407.
- [13] 方石,刘招君,黄湘通,等.大兴安岭东南坡新生代隆升及地貌演化的裂变径迹研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(5):771-776.
- FANG S, LIU Z J, HUANG X T, et al. Uplift and topography evolution research at FT in Cenozoic of south-eastern slope of Daxing'anling Mountains [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38 (5): 771-776.
- [14] WAN Z K, SONG Q C, WANG J L, et al. Geometry

- morphology and distribution characteristics of permanent gullies in the greater and lesser Khingan mountains forest region of China[J].Sustainability,2023,15(15):e12056.
- [15] TANG J, LIU G, XIE Y, et al. Effect of topographic variations and tillage methods on gully erosion in the black soil region: A case-study from northeast China [J]. Land Degradation and Development, 2022, 33 (18):3786-3800.
- [16] 于太极,王璞珺,高有峰,等.松辽盆地西缘突泉地区晚侏罗世过铝质流纹岩和英云闪长玢岩的发现:从蒙古-鄂霍茨克洋闭合到陆陆碰撞的地质记录[J].岩石学报,2024,40(1):159-177.
- YU T J, WANG P J, GAO Y F, et al. Discovery of the Late Jurassic peraluminous rhyolites and tonalite porphyrites in the Tuquan area along the western margin of the Songliao basin: Geological records from closure of the Mongol-Okhotsk Ocean to continental collision between the Siberian plate [J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40 (1):159-177.
- [17] LIU C T, FAN H M, JIANG Y Y, et al. Gully erosion susceptibility assessment based on machine learning-a case study of watersheds in Tuquan County in the black soil region of northeast China [J]. Catena, 2023, 222:e106798.
- [18] 张威,唐倩玉,刘亮,等.基于面积-高程积分的他念他翁山玉曲流域地貌学分析[J].地理科学,2020,40(8):1394-1402.
- ZHANG W, TANG Q Y, LIU L, et al. Geomorphologic analysis of the yuqu river drainage basin in tenasserim chain based on hypsometric integral value[J].Scientia Geographica Sinica,2020,40(8):1394-1402.
- [19] 李思进,代文,熊礼阳,等.DEM分辨率对黄土侵蚀沟形态特征表达的不确定性分析[J].地球信息科学学报,2020,22(3):338-350.
- LI S J, DAI W, XIONG L Y, et al. Uncertainty of the morphological feature expression of loess erosional gully affected by DEM resolution [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(3):338-350.
- [20] ZHANG S M, HAN X, 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:e106467.
- [21] 李坤衡,张岩,陈昶,等.松嫩典型黑土区耕地切沟密度分布特征及影响因子[J].农业工程学报,2023,39(6):130-138.
- LI K H, ZHANG Y, CHEN C, et al. Distribution characteristics and influencing factors of gully density on cropland in the Songnen typical black soil region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(6):130-138.
- [22] 常直杨,王建,白世彪,等.面积高程积分值计算方法的比较[J].干旱区资源与环境,2015,29(3):171-175.
- CHANG Z Y, WANG J, BAI S B, et al. Comparison of hypsometric integral methods [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(3):171-175.
- [23] MUGGEO V M R. Estimating regression models with unknown break-points [J]. Statistics in Medicine, 2003, 22 (19):3055-3071.
- [24] 邢慧淼,张岩,郭海燕,等.东北典型黑土区不同级别沟道形态特征分析[J].水土保持学报,2025,39(3):27-33.
- XING H M, ZHANG Y, GUO H Y, et al. Analysis of the morphological characteristics of channels at different levels in a typical black soil region of northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):27-33.
- [25] WANG D C, FAN H M, FAN X G. Distributions of recent gullies on hillslopes with different slopes and aspects in the black soil region of northeast China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189 (10):e508.
- [26] 段宇英,汤军,段宇雄.基于DEM的山西黄土高原面积高程积分研究[J].水土保持研究,2020,27(5):81-86.
- DUAN Y Y, TANG J, DUAN Y X. Area elevation integral in Shanxi section of Loess Plateau based on DEM [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27 (5):81-86.
- [27] 杜蓉.大兴安岭北段晚中生代以来隆升-剥露过程[D].长春:吉林大学,2022.
- DU R. Research on the uplift and denudation process since the late Mesozoic in the northern part of the Great Khingan Mountains [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [28] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
- LIU B Y, YANG Y, LU S J. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1):9-16.
- [29] 张信宝.对东北黑土区侵蚀沟及其治理的一些初步认识 [J]. 中国水土保持, 2025(1):10-11.
- ZHANG X B. Preliminary understanding of erosion gullies and their management in the black soil region of northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2025(1):10-11.