

青藏高原典型区1970—2025年 切沟发育特征及其影响因素

盛翰苑^{1,2}, 王佳希^{1,2}, 焦菊英^{1,2,3}, 李芊穆^{1,2}, 李建军^{2,4}

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.山西农业大学水土保持科学研究所, 太原 030013)

摘要: [目的] 明确长时间尺度切沟发育特征, 探究切沟侵蚀的显著影响因子, 为气候变化背景下青藏高原水土流失治理提供理论参考。 [方法] 基于1970年和2025年高分辨率遥感影像, 获取念青唐古拉山西段东南麓冲洪积扇的稳定沟、发育沟和新形成沟形态参数特征与发育速率, 采用Spearman相关性分析发育沟的发育速率、新形成沟形态特征的显著影响因子。 [结果] 2025年稳定沟、发育沟和新形成沟的平均沟长分别为265.42、401.61、123.12 m, 平均面积分别为12 350.93、7 517.52、1 055.36 m²; 发育切沟的平均线发育速率为2.35 m/a, 平均面发育速率为21.24 m²/a。线发育速率与集水区面积和近地面气温呈显著正相关($p < 0.05$), 面发育速率与集水区面积、高程、近地面气温呈显著或极显著正相关($p < 0.01$); 新形成沟沟长与集水区面积和近地面气温呈极显著正相关($p < 0.01$), 与季节冻土最大冻结深度呈极显著负相关($p < 0.01$); 面积与集水区面积、年降水量、雨季降水量呈极显著正相关($p < 0.01$), 与季节冻土最大冻结深度呈极显著负相关($p < 0.01$)。 [结论] 切沟发展主要受集水区面积和高程影响, 切沟形成主要受集水区面积、年降水量、雨季降水量、年平均气温及冻土冻结深度的共同影响; 气候变化和人类活动背景下, 青藏高原侵蚀沟具有较大的发育潜力。

关键词: 切沟侵蚀; 发育速率; 形态特征; 气候变化; 念青唐古拉山

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0015-10

Development Characteristics and Influencing Factors of Gullies in Typical Region on the Qinghai-Xizang Plateau from 1970 to 2025

SHENG Hanyuan^{1,2}, WANG Jiayi^{1,2}, JIAO Juying^{1,2,3}, LI Qianmu^{1,2}, LI Jianjun^{2,4}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation Science, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: [Objective] To clarify the long-term development characteristics of gullies and explore the significant influencing factors of gully erosion, thereby providing a theoretical reference for soil and water conservation on the Qinghai-Xizang Plateau under the background of climate change. [Methods] Based on high-resolution remote sensing images of 1970 and 2025, this study extracted the morphological parameters and development rates of stable gullies, developing gullies, and newly formed gullies on the alluvial-proluvial fans at the southeastern

收稿日期: 2025-09-19

修回日期: 2025-10-21

录用日期: 2025-11-04

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-21

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(42430506); 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室开放基金项目(Z2010025001-KJ2508); 西北农林科技大学科研启动经费项目(2452024019)

第一作者: 盛翰苑(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: hysheng@nwfu.edu.cn

通信作者: 焦菊英(1965—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

foothill of the western Nyainqêntanglha Mountains. Spearman correlation analysis was employed to identify the significant influencing factors of the development rates of developing gullies and the morphological characteristics of newly formed gullies. [Results] In 2025, the average lengths of stable, developing, and newly formed gullies were 265.42, 401.61, and 123.12 m, respectively, and the average areas were 12 350.93, 7 517.52, and 1 055.36 m², respectively. The average linear development rate of developing gullies was 2.35 m/a, and the average areal development rate was 21.24 m²/a. The linear development rate was significantly positively correlated with catchment area and near-surface air temperature ($p < 0.05$). The areal development rate was significantly or highly significantly positively correlated with catchment area, elevation, and near-surface air temperature ($p < 0.01$). The length of newly formed gullies was significantly positively correlated with catchment area and near-surface air temperature ($p < 0.01$), and significantly negatively correlated with the maximum freezing depth of seasonal frozen ground ($p < 0.05$). The area of newly formed gullies was highly significantly positively correlated with catchment area, annual precipitation, and rainy season precipitation ($p < 0.01$), but highly significantly negatively correlated with the maximum freezing depth of seasonal frozen ground ($p < 0.01$). [Conclusion] Gully development is primarily influenced by catchment area and elevation, while gully formation is jointly influenced by catchment area, annual precipitation, rainy season precipitation, annual average temperature, and freezing depth of frozen ground. Under the background of climate change and human activities, gullies on the Qinghai-Xizang Plateau have significant development potential.

Keywords: gully erosion; development rate; morphological characteristics; climate change; Nyainqêntanglha Mountains

Received: 2025-09-19

Revised: 2025-10-21

Accepted: 2025-11-04

Online(www.cnki.net): 2025-11-21

切沟侵蚀是现代地理环境中流域内发育最强烈的侵蚀形态,占到流域产沙量的 20%~80%^[1]。作为径流和泥沙的主要输移通道,其形成和发展不仅分割地形地貌,提高流域水文和泥沙连通性,导致土壤大量流失和土地资源的减少,威胁农业可持续发展,而且将大量泥沙引入河道,导致江河湖库淤积和生态环境恶化,影响现代地貌特征及演变过程^[2-3]。已有研究^[4]表明,降雨强度和雨型结构是触发沟蚀启动的直接动力因素,短历时高强度降雨可显著提高径流剪切力,加速沟头溯源和沟底下切;地形条件(坡度、坡长和集水区面积等特征)则决定汇流路径与侵蚀能量分配,进而影响沟蚀发育^[2-3];人类活动与地形的交互作用共同促进沟蚀发展^[5-6];冻融作用对高寒区切沟的形成具有决定性影响,频繁的冻融循环可改变土壤物理性质,导致融化期极易出现沟头崩塌与坡面失稳^[5,7]。可见切沟侵蚀作为一个复杂的地表过程,受到降雨、地形、气候、人为活动等多种因素的综合影响^[2-5,7],特别是在青藏高原此类地形复杂、气候多变的特殊高寒区,由冻融作用引发的大量热融沟、热融滑塌和热融湖等热融喀斯特现象表明,冻融作用与冻土退化、季节性冰川积雪消融过程同样对切沟的启动和发育具有重要作用,显著改变高寒地区的切沟侵蚀特征^[8-9]。因此,青藏高原的切沟形成与演变机制必然和黄土高原、东北黑土区和南方红壤区等区域具有显著差异。近年来,黄土高原

和东北黑土区等区域均有侵蚀沟发育速率的研究进展,如 WANG 等^[10]基于多源遥感影像评估黄土高原东南部 50 a 尺度的切沟发育速率;ZHANG 等^[6]结合遥感影像和野外调查研究东北地区 50 a 以来的沟蚀速率和密度变化。然而,目前关于高寒地区长时间尺度切沟侵蚀特征的研究较少,不仅影响高寒地区关于土壤侵蚀的深入研究,更无法对青藏高原水土保持和生态安全屏障建设提供支撑。

青藏高原素有“地球第三极”之称,是世界上海拔最高的高原,具有强烈的新构造运动、复杂多变的地形、丰富的松散地表物质及独特的气候系统,高原内冰川、冻土和积雪等冰冻圈元素分布广泛^[11-12]。观测与研究^[13]表明,近几十年来,青藏高原气候变化趋势显著,年平均气温上升率约为 0.33 °C/(10 a),年降水量增速约为 8.6 mm/(10 a)。随着青藏高原持续增温和极端气候事件的增加,冰雪消融、冻土退化和土地沙漠化等生态环境问题日益凸显^[13-14],如青藏高原在 1985—2020 年冰川整体面积平均每年退缩 0.5%,多年冻土活动层厚度增速约为 19.5 cm/(10 a),季节冻土冻结深度平均每年下降约 5.1 cm^[13]。该变化不仅反映出冰冻圈过程对气候变化的敏感响应,也直接影响着区域切沟侵蚀过程。因此,关于高寒高海拔地区由冰雪消融、冻土退化所引发的切沟侵蚀问题亟待研究。

念青唐古拉山脉地处青藏高原重要的气候、地质和生态过渡带,分布有典型的冰川、积雪和冻土等

多种冰冻圈元素^[15]。已有研究^[16]表明,该区冰川退缩率高于高原平均水平,年平均退缩率已达 $(0.76\% \pm 0.11\%)$,直接凸显出该区对气候变化响应的高度敏感,同时也意味着其地表过程和生态系统极易受到气候变化和人为扰动的影响,气候变暖与人类活动的叠加作用使该区切沟侵蚀、水土流失的形势愈发严峻^[12]。但目前关于青藏高原沟蚀的相关研究集中于侵蚀沟分类和易发性评价等,如李建军等^[9]结合野外调查和遥感判读初步提出一套适合青藏高原特点的多依据侵蚀沟综合分类原则,并通过机器学习建模发现拉萨河下游沟蚀易发性较强,且海拔是影响沟蚀的重要因素^[17]。但上述研究缺乏对切沟长期演变过程的系统分析,尤其是在气候持续变暖和冰冻圈快速退化的背景下,长时间尺度切沟侵蚀特征尚不明确。因此,本研究以念青唐古拉山西段东南麓冲洪积扇为例,基于 1970 年和 2025 年长时序高分辨率遥感影像,系统探讨在气候变化与冰冻圈退化背景下高寒地区切沟发育及速率变化特征,揭示切沟侵蚀的主控因子。研究结果对于深入理解高寒区地貌演化规律、评估气候变化对切沟侵蚀的影响及为青藏高原草地资源修复与保护制定合理的生态保护措施具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

念青唐古拉山西段($29^{\circ}34' \sim 30^{\circ}34' \text{N}$, $89^{\circ}51' \sim 91^{\circ}14' \text{E}$)位于青藏高原中南部,呈东北-西南走向,西起尼木县,向东北方向延伸至当雄县以北(图 1)。该区地质构造复杂,地质活动频繁,同时包括西北部冰蚀高山和极高山、东部高寒中山、北部高原湖盆地和中部洪积宽谷盆地等地貌,海拔为 3 522~7 122 m,平均海拔 5 500 m。由于受大陆西风和印度洋季风作用的显著影响,研究区处于半干旱高原温带季风气候区,年平均气温为 0~8℃,年平均气温低且日较差大,年平均降水量约为 400 mm,且降水年内分布不均,主要集中在 6—9 月^[15],同时,降雨和冰川积雪融水从念青唐古拉山东南麓分别流入桑曲河、拉曲河、布曲河等拉萨河支流。该区受高寒气候影响,分布有广泛的多年冻土和季节性冻土,同时多发育有属于亚大陆性冰川的小型冰斗冰川和山谷冰川,是青藏高原主要的冰川分布区之一^[13,16]。强烈的冰川作用、复杂的地质地貌和气候条件,使得该区成为研究青藏高原气候变化与地貌演化的典型区域,而分布在季节性冻土区的东南麓山前冲洪积扇群是该区重要的“三生空间”^[18],总面积约 3 493.14 km²,遭受切沟侵蚀的影响,土地破碎化严重,具有开展本研究的典型性和代表性,并对该区土地资

源的保护具有现实指导意义。

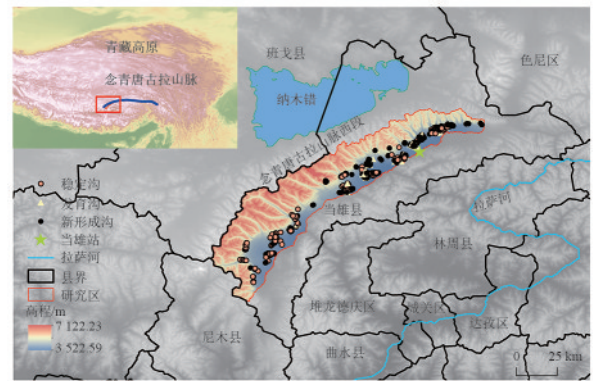


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据收集及处理

1.2.1 影像收集及预处理 本研究所用遥感影像源于 CORONA KH-4 B 卫星影像(earthexplorer.usgs.gov)和高分 7 号(GF-7)卫星影像(cpeos.org.cn)(表 1)。KH-4 B 卫星影像拍摄时间为 1968 年 11 月至 1970 年 11 月,空间分辨率为 1.8 m。高分 7 号卫星影像拍摄时间为 2025 年 1—6 月,全色波段地面分辨率约为 0.65 m,多光谱分辨率约为 3.2 m,经过正射校正、影像融合后进行重采样,生成空间分辨率为 0.65 m 的真彩色正射影像。由于 2 期影像年代相隔较为久远,且影像范围较大,配准控制点寻找较为困难,因此,本研究主要选择在 55 a 内较为稳定的控制点约 500 个,如稳定的道路网拐点和交叉点、村庄房屋等。以 2025 年 GF-7 号影像为基准,将 KH-4 B 影像在最高分辨率和最大比例下进行地理配准,并得到 1970 年研究区正射影像。

表 1 影像信息

Table 1 Image information

影像来源	拍摄时间	空间分辨率/m	云量/%	数量/景
KH-4B	1970 年 10—11 月	1.80	0	10
GF-7	2025 年 1—6 月	0.65	1~5	30

1.2.2 切沟遥感解译及发育特征计算 本研究中切沟解译参考借鉴刘宝元等^[19]的切沟定义,切沟是间隙性径流侵蚀而成的狭窄水道,在遥感影像上呈细长条带状,边界清晰,常与汇流线吻合。沟头处常有凹陷或扇形集水区;沟壁两侧坡度明显大于周围地形,形成狭长“V”形或“U”形断面;沟底多呈线状或条带状,沿着地势向下延伸。为避免云层、山体阴影和植被的干扰,前期尽可能选择春季的影像,便于切沟的提取。为保证切沟解译结果的精度,本研究进行严格的解译质量控制,并结合本研究基于 2018—2025 年在拉萨河流域野外调查建立的切沟解译标志;解译工作完成后由 2 名解译人员逐条切沟进行检

查,若发现错误立即修正,对存在分歧的切沟逐个讨论,将误差控制在1~2个像素之内。

基于1970年和2025年高分辨率遥感影像,利用室内人工目视解译获取切沟形态。切沟形态特征主要包括长度(L),从切沟的沟头位置出发,沿切沟汇流路径进行手动勾画,到切沟沟尾处结束,即为切沟的长度和面积(A),即切沟沿线内包含的面积。根据解译结果将切沟分为稳定沟,即在1970年和2025年均能解译获得,切沟形态参数未发生变化(图2a、图2b);发育沟,即在1970年和2025年均能解译,且切沟形态参数发生变化

(图2c、图2d);新形成沟,即只在2025年解译出的切沟(图2e、图2f)。解译完成后,计算发育沟的线发育速率($R_L, m/a$)和面发育速率($R_A, m^2/a$)。计算公式为:

$$R_L = \frac{L_e}{T} \quad (1)$$

$$R_A = \frac{A_e}{T} \quad (2)$$

式中: R_L 为切沟的线发育速率, m/a ; R_A 为切沟的面发育速率, m^2/a ; L_e 为沟长变化量, m ; A_e 为切沟面积变化量, m^2 ; T 为监测周期,本研究中为1970—2025年,即 $T=55$ 。

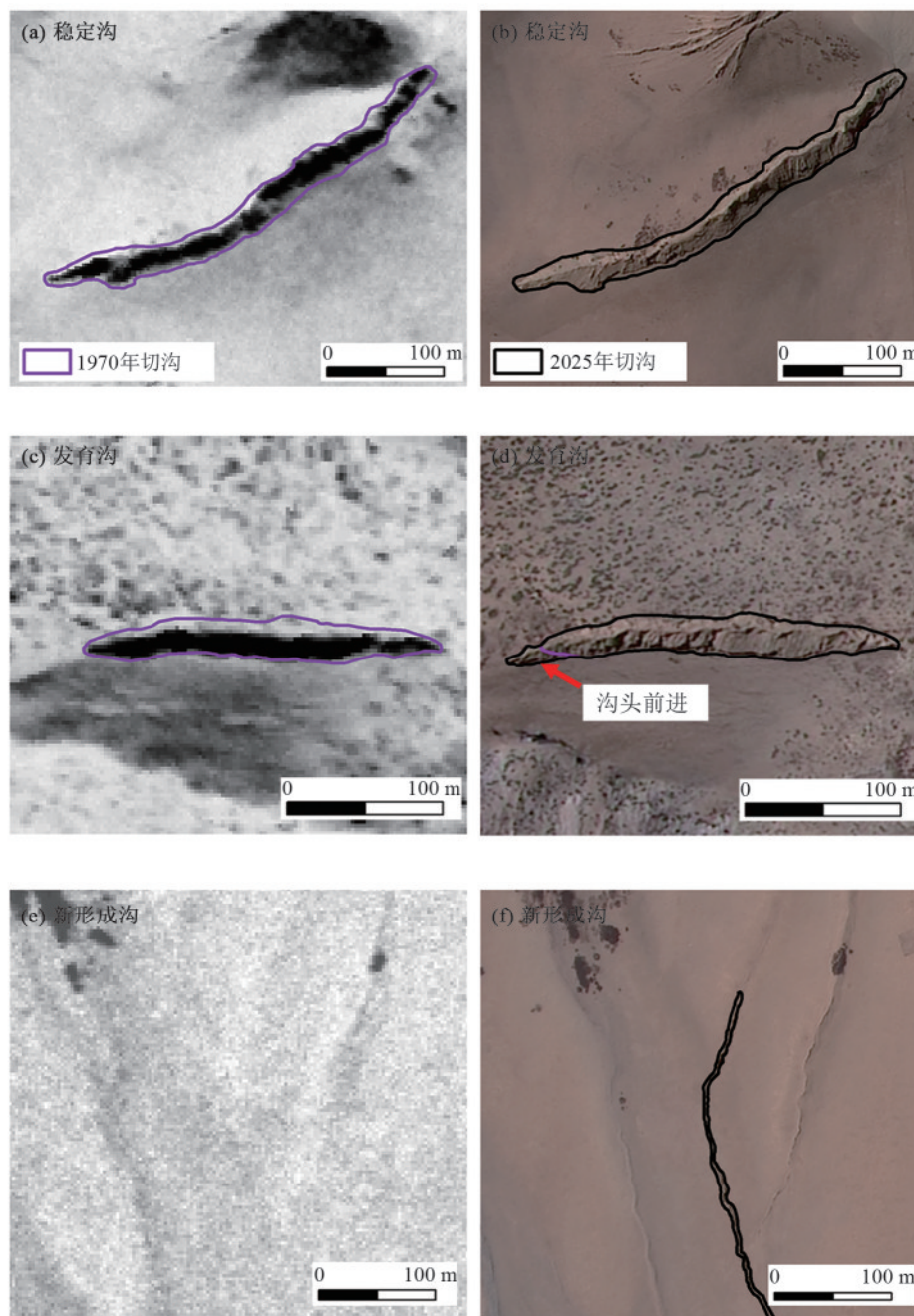


图2 稳定沟、发育沟和新形成沟示例

Fig. 2 Examples of stable gullies, developing gullies, and newly formed gullies

1.2.3 影响因子数据获取与处理 青藏高原切沟规模悬殊、成因复杂,且不同地区的地形地貌和气候条件差异较大。因此,本研究根据切沟形成和发育的条件及影响因素,综合考虑自然因素和人类活动影响,选取地形、气象、土壤、植被和人类活动等方面的因子(表 2)。地形因子基于 GF-7 卫星影像立体像对生成的高分辨率 DEM(1 m)获得,具体包括沟头上方坡度、切沟平均高程和切沟的集水区面积等。其中,沟头上方坡度通过 ArcGIS 在沟头处建立 Outside 型、半径为 25 m 的扇面状缓冲区,基于 DEM 提取缓冲区内平均坡度,即为沟头上方坡度;平均高程为沟底中心线的起始点高程的平均值;对 DEM 进行水文分析得到,每条切沟的集水区面积。降水来源于中国逐日格点降水数据集 V2.1(1960—2024 年),分辨率为 0.1°,本研究中采用多年平均年降水量(mm)和多年平均雨季(5—9 月)降水量(mm)。季节冻土最大冻结深度源于中国西北、西藏和周边地区 1 km/(10 a)

季节最大冻土数据集(1960—2020 年),分辨率为 1 km,本研究中采用多年平均季节冻土最大冻结深度(cm)。土壤可蚀性因子(K)来自泛第三极(20 国)土壤可蚀性因子(K)数据集,分辨率约为 25 m。温度数据来自中国区域地面气象要素驱动数据集 v2.0(1951—2024 年),分辨率为 0.1°,本研究中采用多年平均近地表气温(°C)。植被数据源于 NASA MOD13A3 的 2000—2024 年全国逐年归一化植被指数(NDVI)栅格数据(年平均值),分辨率为 0.1°,本研究采用多年平均 NDVI。人类活动数据源于全国 2000—2020 年高精度人类足迹栅格数据,分辨率为 1 km,本研究采用多年平均人类足迹数据。为保证气象、土壤等数据精度的相对一致性,同时,为确保长时间序列气象数据的可靠性,本研究选择将更容易获得的降水、温度和植被数据,并将其重采样至 1 km,以满足区域尺度气候变化的研究需求,避免分辨率不匹配带来的系统误差。

表 2 数据来源

Table 2 Data sources

类型	数据名称	空间分辨率	来源
地形	数字高程模型(DEM)	1 m	GF-7 立体像对生成
气象	中国逐日格点降水数据集 V2.1(1960—2024 年)	0.1°	国家青藏高原科学数据中心 (data.tpdc.ac.cn) ^[20-23]
	中国区域地面气象要素驱动数据集 v2.0(1951—2024 年)	0.1°	
土壤	中国西北、西藏和周边地区每十年 1 km 季节冻土最大冻结深度数据集(1960—2020 年)	1 km	
	泛第三极(20 国)土壤可蚀性因子(K)数据集	25 m	
植被	2000—2024 年逐年平均 NDVI 数据	1 km	nasa.gov ^[24]
人类活动	2000—2020 年全国人类足迹栅格数据	1 km	

1.3 数据统计与分析

由于切沟形态特征呈非正态分布,因此,通过 Mann-Whitney U 检验来比较稳定沟、发育沟和新形成沟间的影响因子的差异。由于发育沟的样本数量较少($n=50$),采用 Spearman 相关性分析发育沟的线、面发育速率与影响因子的相关性,以及新形成沟形态特征与影响因子的相关性。

2 结果与分析

2.1 切沟形态特征

基于遥感解译发现,本研究区 1970 年存在切沟共 340 条,2025 年存在切沟共 758 条,其中稳定沟共 290 条,发育沟共 50 条,新形成沟共 418 条。

稳定沟的沟长和切沟面积频率分布表明(图 3a、图 3b),切沟沟长主要为 50~200 m(占全部比重为 48.97%),切沟数量随沟长增加呈明显下降趋势,其中大于 300 m 的切沟数量仅占总数的 30% 以下;切沟面积 < 3 000 m² 的累积频率已超过 60.69%。稳定沟的平均长度为 265.42 m,平均面积为 12 350.93 m²(图 4)。

发育沟形态在 1970 年与 2025 年表现出明显差

异(图 3c、图 3d)。1970 年切沟沟长为 100 m 以内的占比为 34%,面积在 1 000 m² 以下的占比为 32%;到 2025 年,切沟沟长为 100 m 以内的占比为 12%,沟长超过 100 m 的区间占比由 66% 增加至 88%;面积为 1 000 m² 以下的占比为 16%,面积超过 1 000 m² 的区间占比由 68% 增加至 84%。其中,切沟沟长为 200~350 m 的区间占比增幅最大(12%),面积为 2 000~4 000 m² 的区间占比增幅最大(20%)。2025 年发育沟的平均长度为 401.61 m,平均面积为 7 517.52 m²(图 4)。表明处于发育阶段的切沟在过去 55 a 中经历快速的扩展和演化。

新形成切沟沟长与面积的分布区间较为集中(图 3e、图 3f),切沟沟长在 100 m 以内的占比为 54.54%,面积在 600 m² 以下的占比为 55.02%。有 3% 的切沟沟长已超过 400 m,10% 的切沟面积已达 2 000 m² 以上。新形成沟的平均长度为 123.12 m,平均面积为 1 055.36 m²(图 4)。相比稳定沟和发育沟,新形成沟已经形成一定规模,表明在气候变化与人类活动加剧背景下,该地区切沟仍具有较大发育潜力。

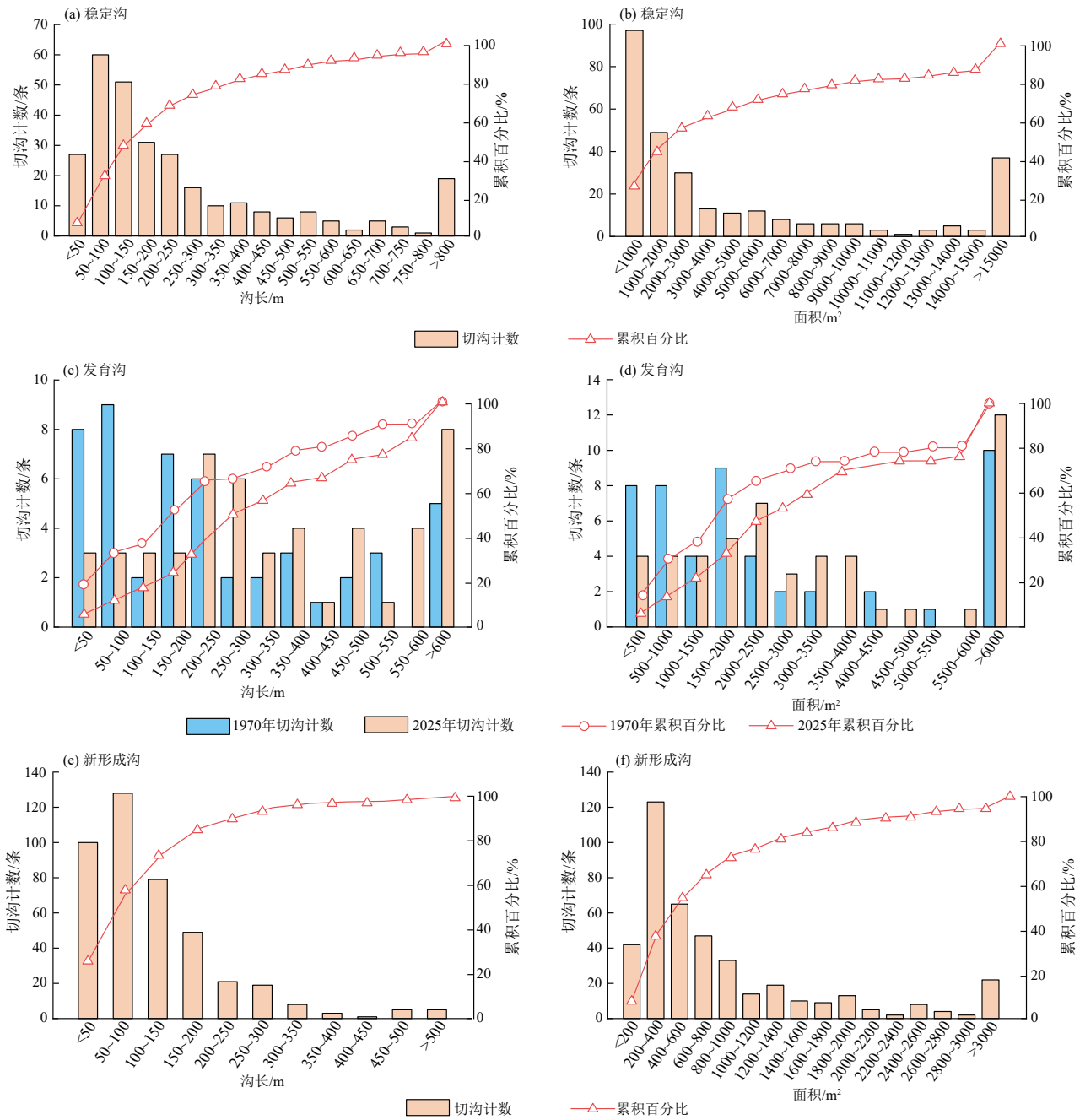


图 3 稳定沟、发育沟和新形成沟的沟长和沟面积

Fig. 3 Gully length and gully area of stable gullies, developing gullies, and newly formed gullies

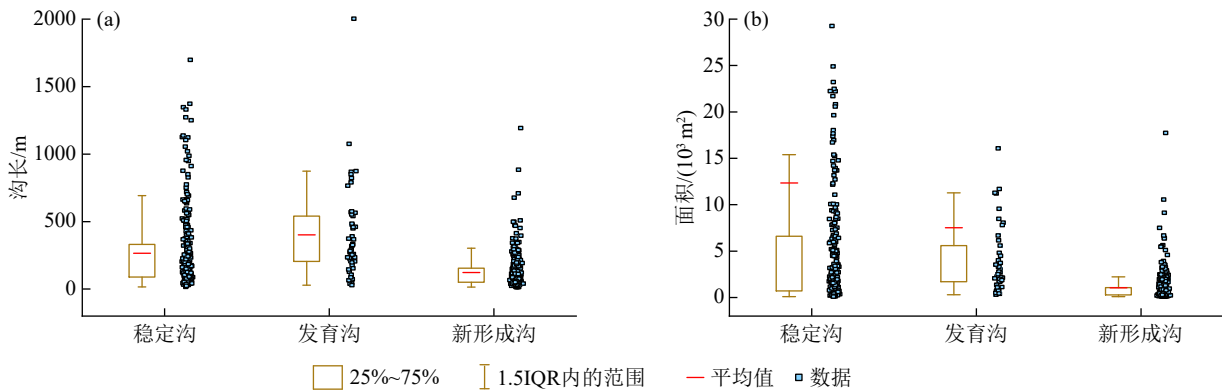
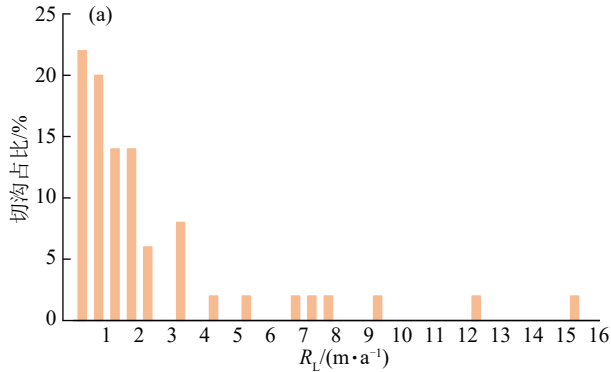


图 4 2025年稳定沟、发育沟和新形成沟的沟长和面积

Fig. 4 Gully length and gully area of stable gullies, developing gullies, and newly formed gullies in 2025

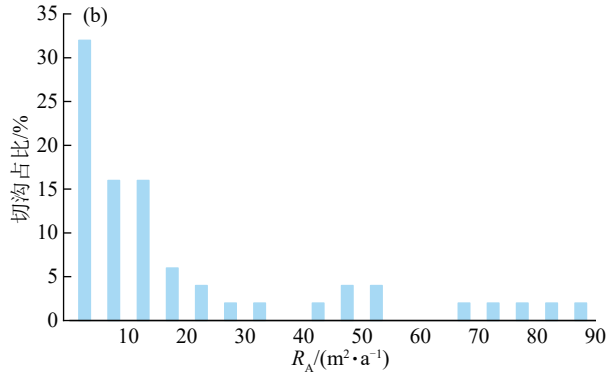
2.2 发育沟特征及影响因子

在 1970—2025 年 50 条发育切沟中,线发育速率为 0.04~15.14 m/a,平均为 2.35 m/a;面发育速率为 0.72~86.78 m²/a,平均为 21.24 m²/a。线发育速率主要为 0~3.5 m/a (占比 84%),其中 0~0.5 m/a 的占比最大(22%);面发育速率主要为 0~20 m²/a(占比 70%),其中 0~5 m²/a 的占比最大(32%)(图 5)。Mann-Whitney U 检验结果表明,稳定沟和发育沟间的集水区面积、高程和季节冻土最大冻结深度具有



显著差异($p < 0.05$)。

Spearman 相关性分析结果(表 3)表明,发育沟的线发育速率与集水区面积($\rho = 0.326, p < 0.05$)和近地面气温($\rho = 0.294, p < 0.05$)呈显著正相关。发育沟的面发育速率与集水区面积($\rho = 0.461, p < 0.01$)、近地面气温($\rho = 0.424, p < 0.01$)、平均高程($\rho = 0.281, p < 0.05$)呈显著或极显著正相关。表明集水区面积、近地面气温和高程对切沟发育速率具有显著影响。



注:切沟总数 $n = 50$ 。

图 5 发育沟线发育速率和面发育速率占比

Fig. 5 Proportion of linear and areal development rates of developing gullies

表 3 发育沟线发育速率和面发育速率与影响因子的相关性

Table 3 Correlation between linear and areal development rates of developing gullies and influencing factors

形态	集水区面积	平均高程	沟头上方坡度	年降水量	雨季降水量	NDVI	人类活动	近地面气温	季节冻土最大冻结深度	K
R_L	0.326*	0.030	-0.217	0.090	0.136	0.007	0.053	0.294*	-0.113	0.273
R_A	0.461**	0.281*	-0.135	-0.028	-0.016	0.112	0.288	0.424**	-0.180	0.084

注:*,**分别表示在 $p < 0.05, p < 0.01$ 的水平上显著。下同。

2.3 新形成沟形态特征的影响因子

采用 Spearman 相关性分析新形成沟形态特征与影响因素的相关性(表 4)。表明新形成沟沟长与集水区面积($\rho = 0.648, p < 0.01$)和近地面气温($\rho = 0.168, p < 0.01$)呈极显著正相关,与季节冻土最大冻结深度($\rho = -0.169, p < 0.01$)呈显著负相

关。新形成沟面积与集水区面积($\rho = 0.544, p < 0.01$)、年降水量($\rho = 0.217, p < 0.01$)、雨季降水量($\rho = 0.220, p < 0.01$)呈极显著正相关,与冻土最大冻结深度($\rho = -0.179, p < 0.01$)呈极显著负相关。表明集水区面积、降水量、近地面气温和季节冻土最大冻结深度是控制切沟形成的重要因子。

表 4 新形成沟形态特征与影响因子相关性

Table 4 Correlation between morphological characteristics of newly formed gullies and influencing factors

形态	集水区面积	平均高程	沟头上方坡度	年降水量	雨季降水量	NDVI	人类活动	近地面气温	季节冻土最大冻结深度	K 因子
L	0.648**	0.126	-0.079	0.017	0.018	0.068	-0.122	0.168**	-0.169**	0.112
A	0.544**	-0.077	-0.076	0.217**	0.220**	-0.021	0.037	0.092	-0.179**	0.169

3 讨论

3.1 不同地区切沟形态参数和发育速率的差异

切沟形态特征是评估切沟发展状态的重要指标,高分辨率遥感影像解译是目前解译切沟侵蚀及其发育特征的精度较高、较为便捷的重要手段^[10]。本研究中的切沟形态参数与其他地区相比具有较大差异,如在拉萨河流域下游洪积扇的侵蚀沟,具备与本研究区相似的气候条件和冻融环境,但其切沟平

均长度和面积均大于本研究区(表 5)^[25],原因可能是该区洪积扇土壤的有机质和团聚体较少,且土壤下层覆盖砾石,因此,难以剥离深层土壤,更容易发生沟头前进和沟岸拓宽等问题^[26]。黄土高原的年平均降雨量与本研究区相似,但切沟长度、面积和发育速率均显著小于本研究区(表 5)^[10,27],本研究中,切沟启动与季节冻土最大冻结深度具有显著相关性,冻土退化降低沟岸边坡的稳定性,频繁的冻融循环通过

降低土壤抗蚀性来不断促进沟岸崩塌,直至切沟发育至稳定阶段^[5,28],表明冻融循环对切沟侵蚀的影响较大,而黄土高原缺乏相同强度的冻融作用,在其他条件相似的情况下,两区冻融环境的显著差异造就切沟发育速率的差异。同时,黄土高原自实施退耕还林等生态恢复与保护政策以来,水土保持措施广泛推行,此举既降低流域水文和泥沙连通性,又有效提升植被覆盖度,降低径流对切沟的冲刷能力,极大减轻切沟侵蚀发生与发展^[29]。东北黑土区的年平均降雨量与本研究区相似,同样具有强烈的冻融循环,且还伴随密集的农业生产活动。东北黑土区切沟发育速率大于本研究区(表 5),原因可能是该区由林草

地转向耕地的剧烈土地利用变化,诱发大规模侵蚀切沟的出现。加之该区漫川漫岗的地形特点,促进侵蚀沟的进一步发展^[6]。在罗马尼亚的研究^[30]揭示低海拔寒区切沟发生发展的主控因素(表 5),切沟的形成由年降水量和集水区面积共同控制,切沟的发展则更多受到冻融作用和融雪径流的影响,有 57.4% 的沟头前进发生在冻土冻结期。表明不同地区在不同气候和地形条件下降雨、冻融等外营力组合对切沟发育驱动机制的差异性。

尽管通过遥感技术监测切沟长期变化具有大范围获取切沟形态的优势,无法准确测定切沟深度也是应用遥感技术监测切沟侵蚀时面临的一个瓶颈^[3]。

表 5 不同地区切沟形态参数和发育速率对比

Table 5 Comparison of gully morphological parameters and development rates in different regions

地区	平均沟长/m	平均面积/m ²	平均线发育速率/(m·a ⁻¹)	平均面发育速率/(m ² ·a ⁻¹)	发育年限/a	参考文献
念青唐古拉山西段东南麓	195.94	5 803.15	2.35	21.24	55	本研究
拉萨河流域	257.86	5 922.85	—	—	—	[25]
黄土高原	58.40	910.30	0.30	5.66	50	[10,27]
东北黑土区	394.27	7 178.40	6.28	129.70	50	[6]
罗马尼亚	—	—	7.70	213.00	60	[30]

注:—表示未获得该数据。

3.2 切沟发育的影响因素

切沟是气候、地形、土壤、植被和土地利用等自然及人为因素综合作用的结果^[3]。本研究表明,发育沟的线发育速率与集水区面积呈显著正相关,发育沟的面发育速率与集水区面积和平均高程均呈显著正相关,可能是因为地形条件是控制切沟侵蚀过程的主导因素。更大的集水区面积意味着可能有更多的地表径流在沟头处集中并跌落或沿沟床持续流动,径流速度和动能的不断增加,加强径流的冲刷能力,从而为沟头的溯源侵蚀和沟床的下切侵蚀提供更强大的外营力作用^[2-3,31]。切沟的面发育速率与平均高程呈显著正相关,表明高程是影响沟蚀的重要因子,与 LI 等^[17]研究结果一致。海拔较高时,沟头上方坡度较陡,径流下切时具有更高的势能和动能,具有较强的剪切力,从而加速切沟的发育。相关研究^[3,31]表明,切沟的形成和发展具有临界条件,就地形条件而言,坡度与集水区面积的作用极为重要。坡度通过改变降雨与坡面的夹角和降雨接收区域面积影响径流动能,从而改变侵蚀动力。当坡度低于临界时,坡面相对平缓,集水区面积相对较大,更长的流路和更大的汇水面积为溯源侵蚀提供持续冲刷动力,因此,沟道可不断发生溯源侵蚀而导致切沟形成速度加快。当坡度超过临界时,坡面陡峭、地形变化强,在陡坡上切沟的汇水面积剧减,径流汇集迅速,但流路极短,更多发生沟底下切侵蚀,容易形成短促、深陡的沟谷。而本研究中,沟头上方坡度与切沟发

育呈不显著负相关,可能是因为研究区内集水区面积与切沟发育的较强相关性弱化沟头上方坡度对切沟发育的贡献,较大的集水区面积提供较强的径流汇集和冲刷能力,从而在一定程度上主导切沟发育过程。

在高寒高海拔地区,气温升高及其引起的冻土退化也是影响切沟启动的关键因子之一^[9,32]。新形成沟的沟长和面积均与季节冻土最大冻结深度呈显著负相关,沟长和多年平均近地面气温呈显著正相关,表明冻土的季相变化对切沟发育过程具有重要影响。冻融循环指的是土壤因气候季节变化而发生的周期性冻结和融化过程,冻结深度则是指在冻融循环的冻结期,土壤中冻结层所能到达的最大深度,而冻结深度是衡量冻融循环强度与持续时间的关键指标。在冻融循环过程中,土壤的水分迁移并重新分布,该种水分的迁移和相变直接影响土壤的热性质,进而影响土壤的冻结深度^[33]。季节冻土最大冻结深度的降低,意味着冻土活动层厚度增加,地表土壤在夏季融化期处于非冻结状态,地表径流和土壤水分更容易向下渗透,当饱和地下水遇到相对不透水的活动层顶时,极易形成壤中流和侧向径流,降低土体的抗剪强度,且形成的高含沙水流对沟壁和沟头的冲刷能力较强,从而更容易发生土壤侵蚀^[33-34]。因此,在其他条件相似情况下,冻结深度越浅,即活动层越深厚的区域,越有利于切沟的快速启动,越有利于长度更长、面积更大的切沟形成。本研究表明,

年降水量与新形成切沟的面积具有显著正相关,表明降水是影响该区切沟形成的重要因子。有研究^[35]表明,气候变暖背景下的降雨、冰川融水和融雪共同促进青藏高原的径流量增加,降雨径流是高寒地区地表径流增加的主要来源。而径流作为最主要的侵蚀动力,和其他影响因子一同影响地表的水文和侵蚀过程。在夏季冻土解冻期间,降雨径流和融雪径流在地形、植被等下垫面特征的综合影响下,对地表松散物质进行剥离、搬运和堆积,促进切沟的形成与发育。ZHANG等^[32]研究发现,极端降雨事件是影响拉萨河流域切沟易发性的重要变量,年极端降雨天数大于11 d是切沟启动的阈值。极端降雨改变土壤侵蚀模式,因为降雨侵蚀力因径流对高强度降雨的快速响应而大幅提升。研究区雨季降雨以暴雨为主,因此,雨季降水量($\rho=0.220$)与新形成沟的关系较年平均降水量($\rho=0.217$)更为密切。

4 结论

1)在1970年、2025年解译的758条切沟中,稳定沟、发育沟和新形成沟分别有290、50和418条。2025年稳定沟、发育沟和新形成沟的平均沟长分别为265.42、401.61、123.12 m;平均面积分别为12 350.93、7 517.52、1 055.36 m²。稳定沟、发育沟和新形成沟间的形态差异较大,青藏高原侵蚀沟仍具有较大的发育潜力。

2)1970—2025年以来,念青唐古拉山西段东南麓冲洪积扇发育切沟的平均线发育速率为2.35 m/a,平均面发育速率为21.24 m²/a。

3)切沟发育主要受集水区面积、高程、年降水量、雨季降水量、年平均温度及冻土冻结深度等因子的共同作用,上述因子受气候暖湿化的影响极大,表明暖湿化是研究区近55 a切沟侵蚀的主要驱动力。

参考文献:

- [1] VANMAERCKE M, PANAGOS P, VANWALLEGHEM T, et al. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 218: e103637.
- [2] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 48-59.
ZHENG F L, XU X M, QIN C. A review of gully erosion process research [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 48-59.
- [3] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 1-13.
ZHANG G H. Advances and prospects for gully erosion researches [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 1-13.
- [4] ANDERSON R L, ROWNTREE K M, LE ROUX J J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion[J]. *Catena*, 2021, 206: e105482.
- [5] LIU X, GUO M M, CHEN Z X, et al. Quantifying the contributions of precipitation, topography and human activity and their coupling to the development of permanent gully[J]. *Geoderma*, 2024, 449: e117015.
- [6] ZHANG S M, GUO M M, LIU X, et al. Historical evolution of gully erosion and its response to land use change during 1968—2018 in the mollisol region of northeast China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(2): 388-402.
- [7] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 1-12.
ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 1-12.
- [8] DING M K, LI X Y, JIN Z Y. Identifying landscape features within upland thermo-erosion gullies on the Tibetan Plateau via UAV-based machine learning [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2025, 25(1): 222-237.
- [9] 李建军,焦菊英,陈一先,等. 青藏高原侵蚀沟分类初探[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(1): 1-9.
LI J J, JIAO J Y, CHEN Y X, et al. Elementary study on gully classification on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(1): 1-9.
- [10] WANG J X, ZHANG Y, DENG J Y, et al. Long-term gully erosion and its response to human intervention in the tableland region of the Chinese Loess Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): e5053.
- [11] 徐胜,杨业,张茂亮,等. 构造-地貌-气候-生态系统动力学研究进展[J]. *地学前缘*, 2025, 32(3): 23-34.
XU S, YANG Y, ZHANG M L, et al. Advances in tectonics-geomorphology-climate-ecosystem dynamics [J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(3): 23-34.
- [12] WEI P J, DU J J, BAHADUR A, et al. Soil erosion and risk assessment on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Communications Earth and Environment*, 2025, 6: e365.
- [13] 周秉荣,袁佳双,乔斌,等. 青藏高原气候与冰冻圈变化研究进展[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(9): 1885-1896.
ZHOU B R, YUAN J S, QIAO B, et al. Research progress on climate and cryosphere changes in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(9): 1885-1896.
- [14] 陈德亮,徐柏青,姚檀栋,等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来 [J]. *科学通报*, 2015, 60(32): 3025-3035.
CHEN D L, XU B Q, YAO T D, et al. Assessment of

- past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32):3025-3035.
- [15] YU W S, YAO T D, KANG S C, et al. Different region climate regimes and topography affect the changes in area and mass balance of glaciers on the north and south slopes of the same glacierized massif (the West Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau) [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 495:64-73.
- [16] WANG S H, LIU J T, PRITCHARD H D, et al. Characterizing 4 decades of accelerated glacial mass loss in the west Nyainqentanglha Range of the Tibetan Plateau [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(4):933-952.
- [17] LI J J, CHEN Y L, JIAO J Y, et al. Gully erosion susceptibility maps and influence factor analysis in the Lhasa River basin on the Tibetan Plateau, based on machine learning algorithms [J]. *Catena*, 2024, 235:e107695.
- [18] CHEN T D, JIAO J Y, CHEN Y X, et al. Distribution and land use characteristics of alluvial fans in the Lhasa River basin, Tibet [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(10):1437-1452.
- [19] 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.
- [20] HE J, YANG K, TANG W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1):e25.
- [21] HU J L, MIAO C Y, SU J J, et al. An upgraded high-precision gridded precipitation dataset for the Chinese mainland considering spatial autocorrelation and covariates [J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17(8):3987-4004.
- [22] 杨苗苗, 杨勤科, 张科利, 等. 砾石含量对土壤可蚀性因子估算的影响 [J]. *土壤学报*, 2021, 58(5):1157-1168.
- YANG M M, YANG Q K, ZHANG K L, et al. Effects of content of soil rock fragments on calculating of soil erodibility [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5):1157-1168.
- [23] 王冰泉, 冉有华. 中国西北、西藏和周边地区 1961—2020 年每十年 1 km 季节冻土最大冻结深度数据集 [J]. *地球科学进展*, 2021, 36(11):1137-1145.
- WANG B Q, RAN Y H. Decadal dataset of the seasonal maximum freezing depth with 1 km resolution from 1961 to 2020 in northwest China, Tibet and surrounding area [J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(11):1137-1145.
- [24] MU H W, LI X C, WEN Y N, et al. A global record of annual terrestrial human footprint dataset from 2000 to 2018 [J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1):e176.
- [25] LI J J, ZHAO C J, CHEN T D, et al. Gully erosion on alluvial fans can be mitigated by altering the hydrological connectivity between an alluvial fan and the contributing catchment: A study in the Lhasa River basin [J]. *Land Degradation and Development*, 2022, 33(8):1170-1183.
- [26] CHEN T D, JIAO J Y, ZHANG Z Q, et al. Soil quality evaluation of the alluvial fan in the Lhasa River basin, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Catena*, 2022, 209:e105829.
- [27] WU H Y, XU X M, ZHENG F L, et al. Gully morphological characteristics in the loess hilly-gully region based on 3D laser scanning technique [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(8):1701-1710.
- [28] LIU J J, ZHANG K D, SHI W B, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity in the black soil region of northeastern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 236:e105946.
- [29] WANG K, LIU G, WANG X K, et al. Dynamic change of watershed sediment sources during implementation of the "grain for green" project in the coarse sandy areas of the Chinese Loess Plateau [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2025, 13(3):564-575.
- [30] IONITA I, NIACSU L, POESEN J, et al. Controls on the development of continuous gullies: A 60 year monitoring study in the Moldavian Plateau of Romania [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46(13):2746-2763.
- [31] 刘欣, 王春梅, 庞国伟, 等. 基于坡度-汇水面积关系的黄土浅沟与切沟沟头形成敏感区模拟 [J]. *山地学报*, 2020, 38(5):658-667.
- LIU X, WANG C M, PANG G W, et al. Sensitive area simulation of ephemeral and permanent gullies based on slope-area relationship in the loess region [J]. *Mountain Research*, 2020, 38(5):658-667.
- [32] ZHANG W J, ZHAO Y, ZHANG F, et al. Understanding the mechanism of gully erosion in the alpine region through an interpretable machine learning approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949:e174949.
- [33] 戴黎聪, 柯浔, 张法伟, 等. 青藏高原季节冻土区土壤冻融过程水热耦合特征 [J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2):390-398.
- DAI L C, KE X, ZHANG F W, et al. Characteristics of hydro-thermal coupling during soil freezing-thawing process in seasonally frozen soil regions on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2):390-398.
- [34] HU G J, ZHAO L, SUN Z, et al. Spatiotemporal characteristics and variability in the thermal state of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2024, 35(2):143-156.
- [35] WANG Y F, YE A Z, ZHANG Y H, et al. The quantitative attribution of climate change to runoff increase over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 897:e165326.