

无人机遥感下的东北薄层黑土区切沟三维形态时空演变分析

柯力玮^{1,2}, 杨久春¹, 王佳琦^{1,2}, 李颖¹

1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102;

2. 中国科学院大学, 北京 100000

摘要: 耕地是农业生产的核心资源, 切沟侵蚀作为一种破坏性极强的水力侵蚀形式, 严重威胁着耕地资源。明确切沟三维形态的时空演变过程, 是定量评估侵蚀速率、精准布设水土保持措施的前提。本研究以吉林省九台区典型切沟“二道沟”为研究对象, 基于2017年—2021年连续5年的无人机遥感数据(正射影像与数字高程模型), 采用三维形态分析与沟型指标体系相结合的方法, 定量研究了切沟在不同时间尺度和空间位置上的三维形态变化特征。同时, 结合气象数据, 探讨了降雨因子与沟蚀活动的关系。结果表明: (1) 2017年—2021年, 研究区切沟扩张主要由沟头溯源侵蚀驱动, 沟头共前进3.01 m, 新蚕食耕地39.57 m²; (2) 沟内侵蚀与沉积并存, 最大垂直侵蚀深度为1.156 m, 最大垂直沉积厚度为0.776 m, 其中沟头阳坡的侵蚀最为剧烈; (3) 影响切沟扩张的主导降雨因子是侵蚀性降雨的发生次数, 而非单次降雨强度或年降雨总量。本研究证明, 基于无人机遥感的时序观测能够精细刻画薄层黑土区的切沟侵蚀过程, 为该区域水土保持措施的优化布局提供了科学依据。

关键词: 无人机遥感, 薄层黑土区, 切沟, 三维形态, 沟型指标体系, 水土保持, 土壤侵蚀, 时空变化

中图分类号: P931.5/P2

引用格式: 柯力玮, 杨久春, 王佳琦, 李颖. 2025. 无人机遥感下的东北薄层黑土区切沟三维形态时空演变分析. 遥感学报, 29(9): 2765–2775

Ke L W, Yang J C, Wang J Q and Li Y. 2025. Spatiotemporal analysis of gully three-dimensional morphological evolution in the northeast black soil region based on drone remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 29(9): 2765–2775 [DOI:10.11834/jrs.20243429]

1 引言

耕地是农业生产的核心资源, 保证耕地质量和直接影响粮食安全和可持续发展(沈仁芳等, 2012)。东北黑土区作为中国最重要的粮食基地之一, 被誉为中国粮食的“压舱石”, 2022年产粮达到14328.38万t, 占全国总产量的20.87%。玉米和大豆的年产量在全国总产量中占比分别达到33.39%和47.01%(吉林省统计局, 2023; 辽宁省统计局, 2023; 黑龙江省统计局和国家统计局黑龙江调查总队, 2023)。然而, 东北黑土区近1/3的耕地/土地存在土壤流失现象(Wang等, 2020), 50 m以上侵蚀沟数量达66.67万条, 且近九成属于发展型侵蚀沟(水利部, 2023), 严重威胁到区域

乃至国家粮食安全。

沟蚀作为最具破坏性的水力侵蚀形式, 是土壤退化进入严重阶段的标志(Poesen等, 2003)。由沟蚀过程形成的切沟, 则是一种具有明确三维形态的地貌单元。当前, 对于切沟的形成发展机理尚缺乏共识, 描述其演变过程的量化标准也未统一, 这严重制约了沟蚀防治和水土保持措施的精准布设(郑粉莉等, 2019; 何煦等, 2021)。

为监测切沟演变, 研究方法经历了从二维到三维的发展。早期研究多采用卷尺等工具进行二维测量, 精度有限且可能对地表造成扰动(Vandekerckhove等, 2001; 丁文峰等, 2006)。随着遥感影像分辨率的提高, 高分辨率卫星影像, 如陆地观测卫星(SPOT)和解密的Corona影

收稿日期: 2023-11-09; 预印本: 2024-02-22

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2021YFD1500102); 国家自然科学基金(编号:42171380)

第一作者简介: 柯力玮, 研究方向为无人机遥感、土壤侵蚀遥感监测。E-mail: 18239766390@163.com

通信作者简介: 杨久春, 研究方向为土壤侵蚀遥感监测。E-mail: yangjiuchun@iga.ac.cn

像,使得农田细沟识别和长时序分析成为可能(Mararakanye和Le Roux, 2012; Li等, 2021)。全球定位系统GPS(Global Positioning System)技术虽精度高,但难以捕捉沟内微地形细节(Wu和Cheng, 2005; Tang等, 2023)。近年来,地面三维激光扫描、近景摄影测量以及无人机UAV(Unmanned Aerial Vehicle)遥感等技术的发展,极大地提升了切沟三维形态的精细监测能力(Gao等, 2021; He等, 2022; Niculiță等, 2020)。其中,无人机遥感技术凭借其厘米级的精度、灵活的数据获取能力和搭载多源传感器的潜力,已成为土壤侵蚀研究的重要手段(Wang等, 2022)。

目前对于切沟侵蚀的研究大多集中于黄土区,黑土区的切沟侵蚀研究起步较晚,研究基础较为薄弱,对其发育过程研究较少,东北黑土区切沟发展机理有待进一步探索。随着近年来东北黑土区保障国家粮食安全战略地位的凸显,展开对东北黑土区切沟发展模式的探索,设置更具有针对性的水土保持措施迫在眉睫。

因此,为精细刻画东北薄层黑土区切沟的演变过程,本研究以吉林省九台区典型切沟“二道沟”为研究对象,基于2017—2021年连续5年的无人机遥感数据,采用三维形态分析与沟型指标体系相结合的方法,定量研究了切沟在不同时间尺度和空间位置上的二维与三维形态变化特征,并探讨了其与降雨等环境因子的关系,以期为该区域的切沟侵蚀过程模拟、未来发展预测及水土保持措施的精准布设提供科学依据。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

二道沟位于吉林省长春市九台区中部,属于大型侵蚀沟,地处东北典型黑土带南部的薄层黑土区,土壤类型以黑土、黑钙土和草甸土为主,二道沟内主要是黑土。九台区属于典型漫川漫岗地形,二道沟地处的坡面坡度约 10.5° ,几乎都已开垦为耕地,主要种植玉米。

二道沟所处的九台区气候属于温带季风气候,秋冬季持续时间较长,从每年的10月末持续至次年4月末,最低气温达到 -4.1° ,平均气温仅 7.0° 。长时间的低温期与明显的季节交替导致了季节性

冻融现象的出现,土壤颗粒会在周期性的冻结和解冻过程中膨胀和收缩,从而影响土壤结构和质地,进而影响植物生长和土壤侵蚀(Barnes等, 2016),成为了影响东北黑土区切沟发展的主要影响因素之一。降雨主要集中于6—8月,平均年降水量864.8 mm。近年来极端降雨等天气事件频繁。研究区位及概况详见图1。

2.2 数据获取及处理

本研究数据主要包括2017年—2021年连续5年的无人机遥感数据和同期气象数据。

2.2.1 无人机数据

无人机数据通过大疆精灵4 RTK(DJI Phantom 4 RTK)获取,该机型搭载1英寸CMOS影像传感器。野外数据采集时,航向重叠率设为70%,旁向重叠率设为80%,相机垂直于地面拍摄。为应对研究区内近50 m的高差,飞行任务采用仿地飞行模式,仿地数据源于公开的ALOS DEM数据集。所有的飞行任务均选择在上午9:00—11:00,下午15:00—19:00进行的,以确保无人机能够稳定准确地获取影像。

数据处理流程如下:2017年—2019年的数据使用Pix4Dmapper软件处理,2020年—2021年的数据使用DJI Terra软件处理。处理过程中,通过在研究区内布设的地面控制点GCP(Ground Control Point)进行地理配准,以确保各期数据空间位置的一致性。同时,为每个观测年份生成了厘米级分辨率的数字表面模型DSM(Digital Surface Model)和正射影像。

为获取真实地表高程,需从DSM中移除植被等非地面点。本研究通过Global Mapper软件,采用基于迭代三角网加密算法、最大似然分类和点云分割等组合算法对点云进行分类,将点云分离为地面点与非地面点。随后,仅使用地面点通过不规则三角网(TIN)插值法,生成了覆盖主要研究区域的时间序列高精度数字高程模型DEM(Digital Elevation Model)。

2.2.2 气象数据

气象数据来源于距研究区最近的气象站(编号54161),获取了2017年—2021年逐小时降雨量数据。基于此,统计了年降雨量、侵蚀性降雨次

数（日降雨量>12 mm）、大雨次数（25 mm<日降雨量<50 mm）与暴雨次数（日降雨量>50 mm）等指标（表1）。侵蚀性降雨标准参考东北黑土区切沟发展的相关研究（Xie等，2000），降雨等级划

分参考国家气象局标准。在统计的过程中，由于东北黑土区的降雨大多是间歇性雨，一天内不同时间上观测到的符合条件的降雨均被记录为一次降雨。

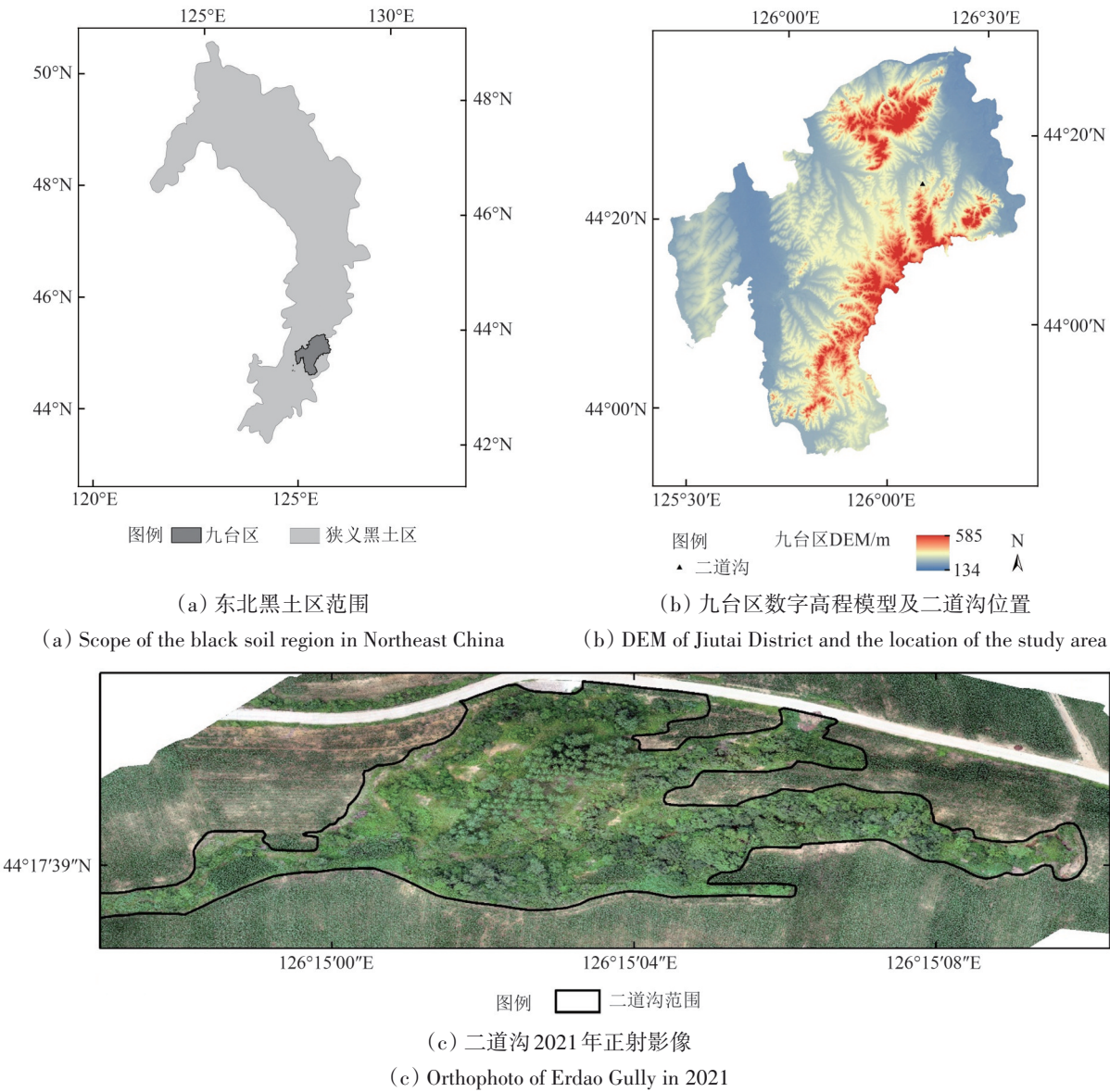


图1 研究区地理位置与概况
Fig. 1 Location and overview of the study area

表1 2017—2021年研究区域降雨情况统计表

Table 1 Statistical table of precipitation conditions in the study area from 2017 to 2021

年份	年降雨量/mm	年降雨天数/d	降雨 观测次数	大雨次数 (25<RRR<50 mm)	暴雨次数 (RRR>50 mm)	侵蚀性降雨次数 (RRR>12 mm)
2017—2018	141	63	972	7	3	19
2018—2019	1242	199	2195	6	2	20
2019—2020	1287	128	1345	16	4	64
2020—2021	789	90	1096	22	11	70

2.3 研究方法

侵蚀沟的演变通常是一个以年为单位的缓慢过程（范昊明 等，2004）。在二道沟中，除沟头外的沟道主体部分植被覆盖极为茂密。一方面，茂密的植被起到了良好的固土作用，使得这些区域的地形趋于稳定，侵蚀和沉积活动微弱；另一方面，对于无人机获取的可见光影像和DSM数据而言，在技术上难以完全去除茂密植被的影响以精确还原其下方的真实地表。综合考虑侵蚀活跃度与数据有效性，本研究将分析重点聚焦于侵蚀活动最剧烈、植被覆盖相对稀疏的沟头区域。基于2017年—2021年的正射影像与DEM时间序列数据，从二维和三维两方面定量评估切沟的时空演变。

2.3.1 沟型指标体系构建

在切沟整体发展分析中，本研究选取了沟头

表面积、沟头范围面积和沟头体积这3个参数来研究其变化趋势。三者分别在沟壑的地貌演化、沟壑整体发展趋势和沟头整体侵蚀与沉积量变化等方面对切沟沟头在一定时间内直观的变化进行展示。

为了确保沟头范围的准确性，我们使用逐年正射影像结合DEM和坡度等辅助数据进行目视解译。体积和表面积是在目视解译的基础上，借助ArcGIS软件中的Surface Volume工具进行计算获取。

同时，为精细刻画切沟的三维形态变化，本研究构建了一个包含11个指标的沟型指标体系（表2）。该体系旨在从不同维度（如坡度、曲率、汇流能力、地表起伏等）量化切沟的微地貌特征。所有指标均基于厘米级DEM计算。

表2 沟道形态指标体系
Table 2 Morphometric index system of gullies

沟道形态指标	公式	含义
平均坡度 Average slope	$\arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \cdot \frac{\pi}{180}$	f_x 和 f_y 表示水平和垂直方向高程上的变化,反映了地表的坡降情况,揭示了地形起伏对侵蚀沟发育的影响
收敛指数 Convergence index, CI	$\frac{\tan \alpha + \tan \beta}{d_1 + d_2}$	α 和 β 分别为起始和结束断面的坡度角, d_1 和 d_2 为起始和结束断面之间的距离,通过量化沟道的汇聚性,进而揭示沟道的几何形态演化和沟床侵蚀过程
地形湿度指数 Topographic wetness index, TWI	$\ln \frac{\alpha}{\tan \beta}$	α 代表像元的局部流域面积, β 表示像元的坡度角,反映了地表土壤水分的累积程度,用来评估侵蚀沟形态与地表水分之间的关系,揭示沟谷区域的水分分布情况
地形位置指数 Topographic position index, TPI	$Z - Z_{\text{avg}}$	Z 代表像元位置高程, Z_{avg} 代表一定范围邻域内像元高程平均值,通过比较某一像元高程与其周围邻域像元的平均高程来衡量地形的相对高低
地形耐用指数 Terrain ruggedness index, TRI	$\sum H_i - H_j $	H_i 代表中心位置像元的高程值, H_j 代表邻域内各像元的高程值,通过计算地表的起伏变化和地形的复杂性来量化地貌形态
平面曲率 Planar curvature, PC	$\frac{(Z_1 - Z_0) + (Z_2 - Z_0)}{2\Delta x^2}$	$Z_0Z_1Z_2$ 分别代表相邻3个点的高程, Δx 代表相邻点之间的水平距离,用于描述地表的弯曲程度,反映地形表面在水平方向上的变化率
相对坡位 Relative slope position, RSP	$\frac{\Delta H}{l_w}$	ΔH 代表相邻像元之间的高程差, l_w 代表沟底到水流网络的距离,用于描述地形中某一点相对于周围区域的坡度位置
沟头点高程标准差 Elevation standard deviation, STD	$\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2 / n}$	H_i 为第 <i>i</i> 个沟头点的高程值, $\bar{H}$ 为所有沟头点的平均高程, n 为沟头点个数,是衡量侵蚀沟形态中地形高程变化的指标,其代表了沟头点附近地形的起伏程度
地表切割度 Surface incision, SI	$H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}$	H_{mean} 代表一定邻域内沟头点的平均高程, H_{min} 代表了该区域内的高程最小值,用于量化表示地表侵蚀剥蚀程度,反映了地表由水流或其他侵蚀作用引起的切割或削减情况
地表粗糙度 Surface roughness, ROUG	$1 / \cos \left(\frac{\text{SLOPE} \cdot \pi}{180} \right)$	Slope代表坡度,是描述地表表面纹理复杂程度的指标,反映了地表的起伏和凹凸不平程度
地表高程差 Difference of DEM, DoD	$\text{DEM}_y - \text{DEM}_x$	DEM_x 代表前一时间的高程, DEM_y 代表后一时间的高程,能够最直观的量化表现出范围内的侵蚀或沉积情况

2.3.2 时空演变分析

为探究切沟演变的空间分异规律,本研究将沟头区域依据坡向划分为阳坡(坡向 135° — 225°)和阴坡(坡向 0° — 45° 及 315° — 360°),并依据5年内的变化情况划分为沟道(相对稳定区)与沟头(活跃发展区)。采用叠加分析、地图代数等空间分析方法,探讨不同空间位置上各沟型指标的差异。

3 结 果

3.1 二道沟整体变化

监测结果表明,二道沟在2017年—2021年整

体形态趋于稳定。2021年,主沟总面积为 9676.33 m^2 ,主沟长 627.94 m ,与2017年的 9540.37 m^2 和 624.03 m 相比无显著变化。沟体的主要扩张集中在东部的主沟沟头区域,该区域的溯源侵蚀现象最为显著(图2)。

如图2所示,在2017年—2021年,主沟沟头因溯源侵蚀共向南前进 3.01 m ,新蚕食耕地面积达 39.57 m^2 。沟头表面积和体积的变化趋势如图3(a)所示。沟头表面积在5年间整体呈增加趋势,从2017年的 72.33 m^2 迅速增长至2019年的 117.95 m^2 ,增幅达 63.07% ,随后两年保持相对稳定。沟头体积则变化不大,5年间从 176.70 m^3 微增至 187.34 m^3 。

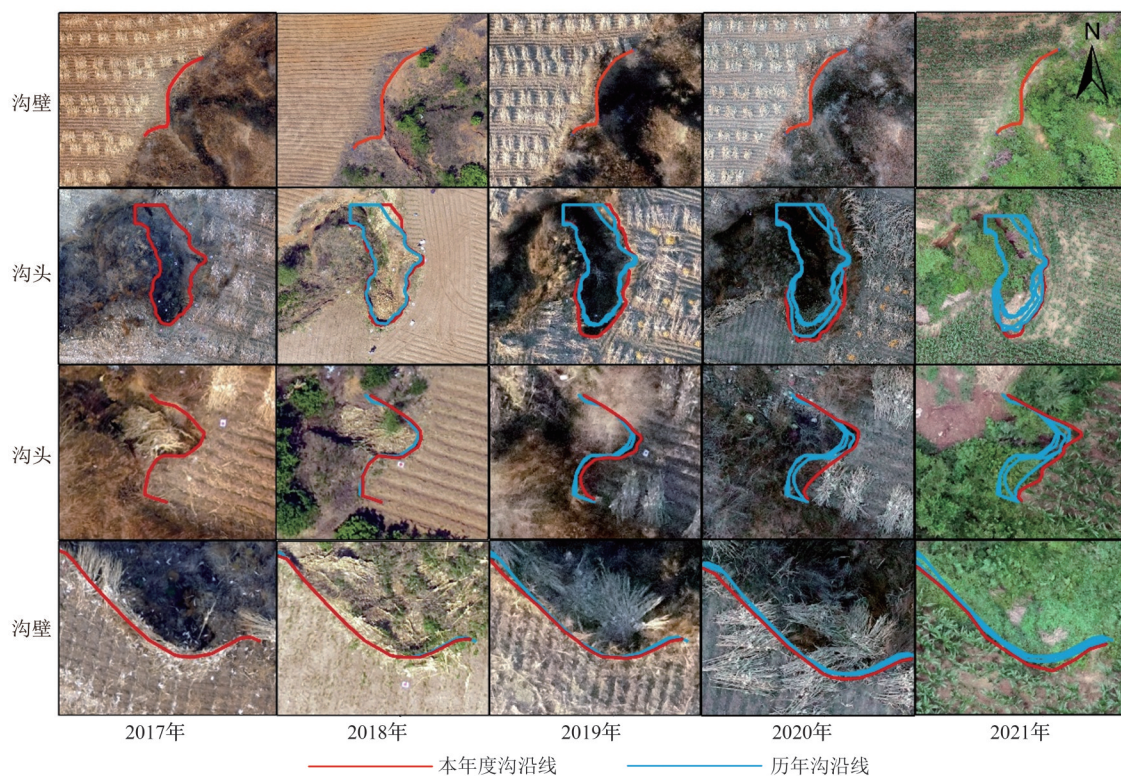


图2 二道沟5年间4种典型沟头沟壁的扩张情况

Fig. 2 Expansion of four typical gully heads and walls over five years

沟头范围面积的变化(图3(b))更直观地揭示了其在水平方向上的扩张。沟头范围面积呈稳步上升趋势,其中2018年—2019年的增幅最大,达到了 16.34 m^2 ,而其他年份的变化相对平缓。

3.2 切沟三维沟型指标时空变化

为定量分析沟头微地貌的时空演变,我们对

各沟型指标的年际变化和空间分异进行了统计。

3.2.1 指标时间变化

各沟型指标在2017年—2021年的均值变化情况如表3所示。由表可见,Slope在2020年有一次显著下降,而TWI则在不同年份间有较大波动。其他指标TPI和STD等则在5年间保持相对稳定,无明显趋势性变化。

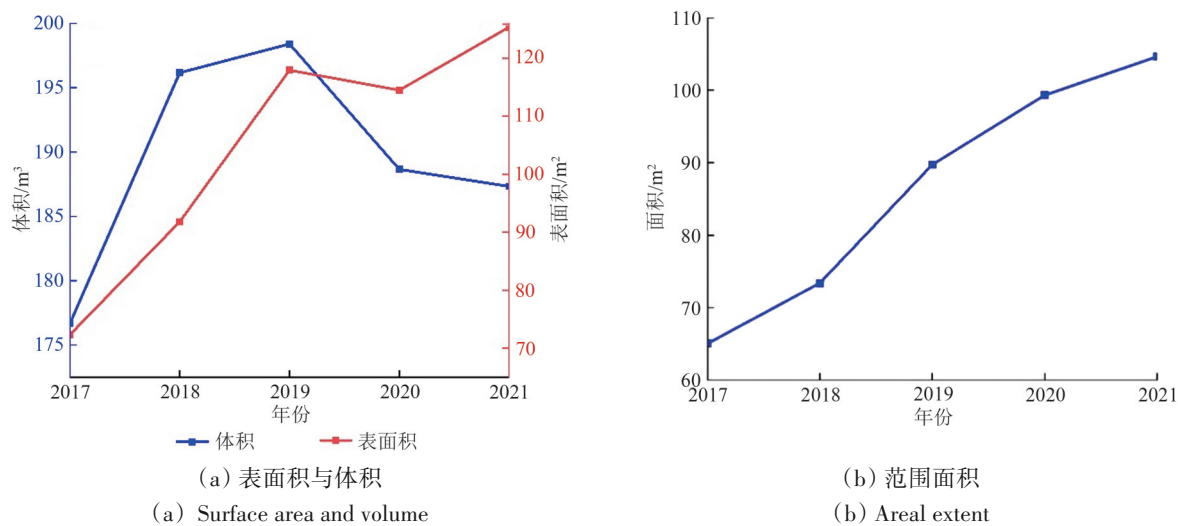


图3 2017年—2021年二道沟活跃沟头变化
Fig. 3 Changes of the active gully head in Erdao Gully during 2017–2021

表3 各沟型指标2017年—2021年均值变化
Table 3 Mean values of gully morphometric indicators from 2017 to 2021

沟型指标	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
CI	-0.1791	-0.2484	-0.1556	-0.2182	-0.3286
PC	-0.1029	-0.1177	-0.0754	-0.0716	-0.0653
RSP	0.1154	0.1784	0.3669	0.2164	0.2077
TRI	0.01092	0.0137	0.0117	0.0101	0.0153
TWI	1.4626	1.9939	1.3643	1.8547	1.8901
slope	35.7908	34.3166	36.2105	22.9413	30.0212
ROUG	1.3191	1.2741	1.336	1.1112	1.2216
STD	0.0961	0.1174	0.1063	0.0895	0.1323
SI	0.1845	0.2233	0.2116	0.1809	0.2564

3.2.2 指标空间差异

沟头区域不同空间位置（阳坡、阴坡、沟道、沟头）的沟型指标均值对比结果如表4所示。结果显示，不同指标对空间位置的敏感度不同。DoD在沟头（-0.1991）和沟道（0.4669）的值正负相反，表明沟头以侵蚀为主，沟道以沉积为主。同时，DoD在阴坡（0.3092）的值显著高于阳坡（0.0774）。RSP、CI和PC等指标在不同空间位置也表现出明显差异。为进一步探究空间位置对沟型指标的影响，本研究将沟头区域细分为四个象限：沟头阳坡、沟头阴坡、沟道阳坡和沟道阴坡。各区域沟型指标的5年均值统计结果如表4所示。

表4 沟头区域不同空间位置的沟型指标均值对比
Table 4 Comparison of mean indicator values at different spatial locations within the gully head

沟型指标	阳坡	阴坡	沟道	沟头	沟道阳坡	沟道阴坡	沟头阳坡	沟头阴坡
CI	-0.3404	-0.5043	-1.1807	-0.2472	-0.1523	-0.2264	-0.1881	-0.2779
PC	-0.1490	-0.1795	0.5865	-0.1503	-0.0433	-0.0061	-0.1057	-0.1734
TRI	0.0237	0.0243	0.0112	0.0128	0.0112	0.0112	0.0125	0.0131
TPI	-0.0995	-0.1225	-0.0614	-0.0398	-0.0424	-0.0918	-0.0571	-0.0307
DoD	-0.1115	0.7294	0.4669	-0.1991	0.2233	0.8579	-0.3348	-0.1285
STD	0.2193	0.2056	0.1027	0.1088	0.1041	0.1001	0.1152	0.1055
SI	0.4412	0.4090	0.2011	0.2222	0.2055	0.1939	0.2357	0.2151
RSP	0.6398	0.6187	0.2290	0.4097	0.2468	0.2004	0.393	0.4183
TWI	3.4247	3.4253	1.6134	1.8024	1.6006	1.6341	1.8241	1.7912
ROUG	2.5022	2.4673	1.2188	1.2609	1.2195	1.2178	1.2827	1.2495

结果显示，不同指标对空间位置的敏感度不同。DoD在沟头处为负值（侵蚀），在沟道处为正值（沉积），且阴坡的绝对值普遍大于阳坡。CI在

所有区域均为负值，且沟道处的值远小于沟头处。SI则呈现出沟头处大于沟道处、阳坡处大于阴坡处的规律。

3.3 环境因子与侵蚀关系

为探究降雨对切沟扩张的影响,本研究将年际沟头面积增量与不同降雨指标进行了相关性分析。对比沟头面积的年际变化(图4)与降雨数据(表1)可以发现,两者关系并非简单的线性对应。例如,2018年—2019年,降雨量、降雨天数和降雨频次均为5年中最高,沟头扩张也最为剧烈;然而,在总降雨量更高的2019年—2020年,沟头的发展速率反而下降,面积仅增加了 9.58 m^2 。与此相对,2017年—2018年的降雨总量虽仅为 141 mm ,但沟头面积依然扩大了 7.7 m^2 。

在降雨强度方面,2020年—2021年强度超过 25 mm/h 的大雨和暴雨事件最为频繁,但该年度的沟头扩张面积仅为 5.33 m^2 ,是5年中的最小值。进一步的分析显示(图4),沟头面积增量与侵蚀性降雨($\text{RRR}>12\text{ mm}$)的发生次数呈现出一定的正相关性,而与大雨、暴雨次数的相关性不明显。

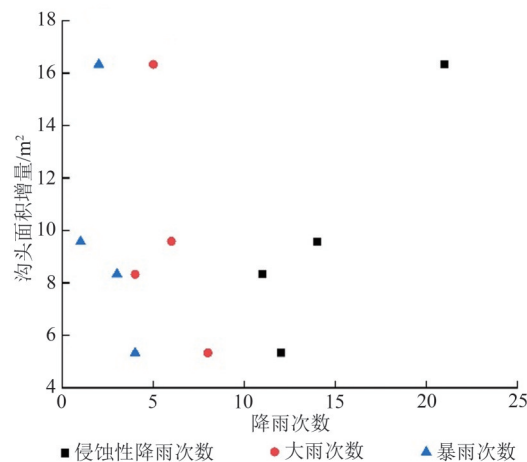


图4 沟头面积增量与大雨、暴雨及侵蚀性降雨次数关系
Fig. 4 Scatter plots of gully head area increment with heavy rain, heavy rainfall, and erosive rainfall occurrences

3.4 切沟内典型剖面变化

为揭示切沟内部侵蚀与沉积的空间关系,本研究选取了沟头与沟道两个典型位置,对其2017年—2021年的剖面变化进行分析(图5)。

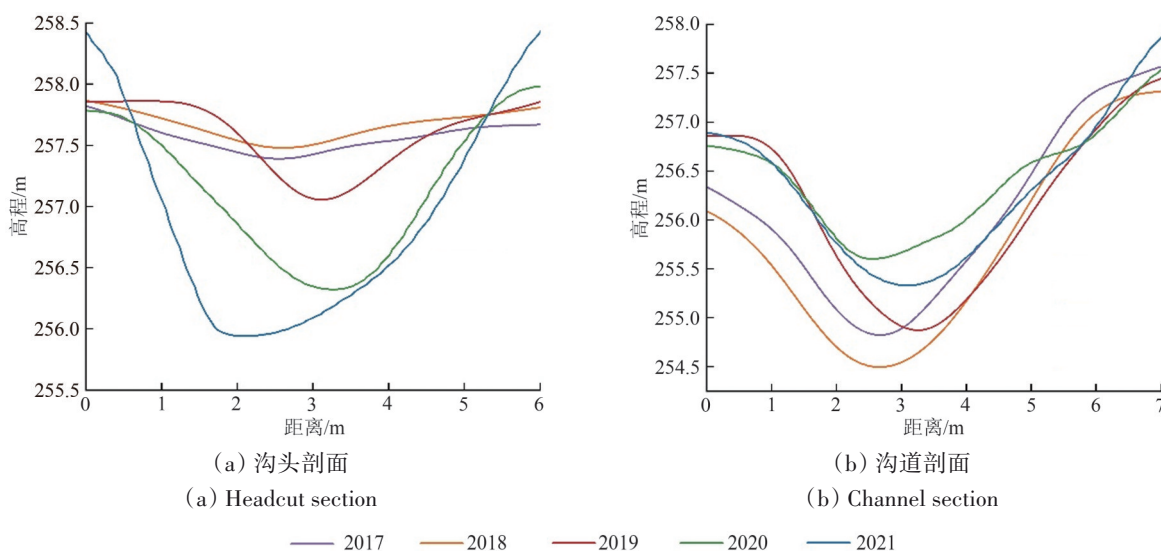


图5 典型沟道与沟头剖面变化(2017年—2021年)

Fig. 5 Profile changes of typical channel and headcut during 2017—2021

剖面图显示,两个位置的演变特征截然不同。沟头剖面(图5(a))整体呈现出显著的侵蚀特征。具体来看,在2017年—2018年,剖面有少量沉积;在随后的2年中(2018年—2020年),剖面中间位置发生了大幅度的垂直下切;而在2020年—2021年,侵蚀主要发生在剖面的左下方(阴坡侧)。5年间,该剖面的前后高度落差最大可达 2 m 左右。

与之相对应,其下游的沟道剖面(图5(b))

则整体表现为沉积趋势。在2017年—2018年,该剖面发生了约 0.25 m 的少量侵蚀,但随后逐年沉积。5年间,该剖面的沉积物累积厚度最大约为 0.8 m 。

4 讨论

本研究基于连续5年的无人机遥感数据,不仅量化了典型薄层黑土区切沟的形态演变,更揭示了其独特的演变过程与驱动机制。本章节将围绕

以下三个核心问题展开讨论：(1) 切沟的演变过程及其主要驱动因子是什么？(2) 本研究构建的沟型指标体系在量化微地貌变化中的有效性如何？(3) 研究存在哪些局限性，未来应如何深化？

4.1 切沟演变过程及环境因子响应

本研究的核心发现是，研究区切沟的扩张主要由沟头溯源侵蚀驱动，而侵蚀活动的时间动态与降雨模式密切相关。从结果（图3、图4）可以看出，沟头表面积和范围面积在2018年—2019年扩张最为剧烈。这一时期的侵蚀特征表现为水平方向的扩张（表面积增加而体积变化不大），我们推测这主要是由较强的地表径流冲刷和沟底土壤的搬运所导致的。而在2017年—2018年，侵蚀则更多表现为垂直方向的下切（表面积和体积同步增加），这可能与水流冲刷导致的沟底加深和沟壁土壤崩塌有关（Addisie等，2017）。

除此之外，侵蚀的剧烈程度与降雨总量或单次降雨强度并不完全对应。如表1所示，2019年—2020年的降雨总量远高于其他年份，但该年度的沟头扩张速率却显著放缓。同样，降雨强度最大的年份（2020年—2021年）对应的沟头扩张也最小。这一现象与许多研究中暴雨是侵蚀沟快速发

展主因的结论有所不同（Anderson，2021）。我们认为，这揭示了东北黑土区独特的侵蚀驱动模式：该区域降雨以历时短、强度不大的阵雨为主，单次强降雨事件不足以成为侵蚀的主导力量。相反，侵蚀性降雨的发生频率（本研究定义为日降雨量>12 mm）与沟头扩张速率表现出更强的一致性。频繁的侵蚀性降雨可能导致土壤持续处于较高含水率状态，降低了土壤的抗剪强度和抗蚀能力，使得即使强度不大的径流也能造成显著的侵蚀。

此外，沟头剖面（图5）的演变清晰地展示了侵蚀与沉积的耦合关系。沟头在观测期内持续发生侵蚀后退，而其下游的沟道则相应地表现为沉积物的累积。这证实了沟蚀地貌系统中物质从侵蚀区（源）到沉积区（汇）的输移过程，即沟头溯源侵蚀为下游沟道提供了物质来源。

4.2 沟型指标体系的有效性及其空间差异解读

本研究构建的沟型指标体系，为从三维层面精细刻画切沟微地貌提供了有效工具。不同指标间的相关性（图6）揭示了其内在的地貌学意义。例如，ROUG与SI之间存在强正相关，这表明在侵蚀活跃的区域，地表不仅起伏更大（粗糙度高），被水流切割的深度也更大。

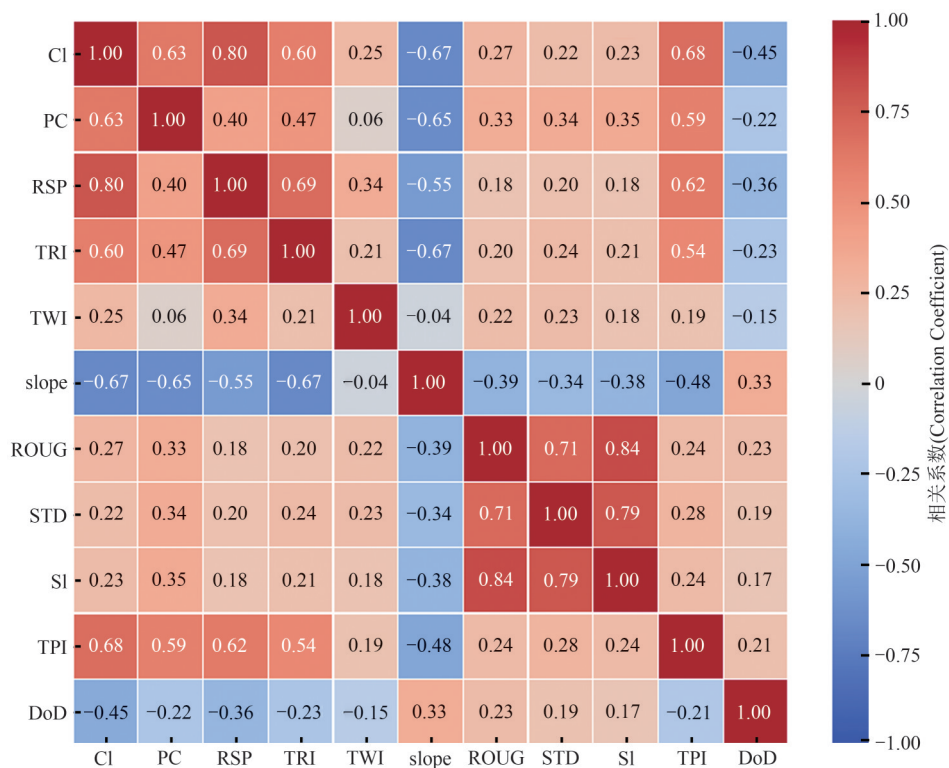


图6 沟壑形态指标间的相关性

Fig. 6 Correlations among gully morphometric indicators

通过将沟头划分为不同空间单元(阳坡、阴坡、沟道、沟头),我们得以深入解读侵蚀过程的空间分异规律(表4)。一个关键发现是,DoD在阴坡的值(0.3092)显著高于阳坡(0.0774),这表明阴坡的净侵蚀/沉积活动远比阳坡剧烈。进一步分析表4可知,这种差异在沟道处(阴坡上的0.86对比阳坡上的0.22)比在沟头处(阴坡上的-0.1285对比阳坡上的-0.3348)更为显著。这可能与坡向导致的水热条件差异有关。阴坡接受日照较少,土壤湿度通常更高,植被覆盖可能更优,但同时也可能因为水分条件更好而导致径流侵蚀潜力更大。RSP在阴坡的值也更高,进一步佐证了阴坡可能经历了更强的土壤移动过程。

然而,本研究也发现:作为侵蚀/沉积最直接量度的DoD,与其他所有地形指标的相关性均不强。剖面分析(见3.4节)同样佐证了这一点:DoD能够很好地反映区域整体的侵蚀或沉积趋势,但对于剖面上的微地貌沉降或局部崩塌等细节变化,其表现能力有限。这表明,试图仅依靠静态的地形指标来定量反演动态的侵蚀或沉积量,其效果是有限的。地形指标能很好地描述“地貌形态”,但侵蚀/沉积是一个复杂的“过程”,受到降雨、土壤性质、植被覆盖等多种因素的综合影响。这为未来构建更精准的侵蚀预测模型指明了方向,即必须融合多源数据,而不能仅仅依赖地形参数。

4.3 研究局限性及展望

本研究存在的局限性:首先,在数据源方面,本研究使用的可见光无人机数据无法穿透植被,导致分析主要局限于侵蚀活跃、植被稀疏的沟头区域。未来若能采用无人机激光雷达(LiDAR)等技术,将有望获取植被下的真实地形,从而实现对整个切沟的全面分析;其次,本研究仅针对一条典型切沟进行了深入分析,其结论在多大程度上适用于东北黑土区其他类型的侵蚀沟,尚需更多样本来验证。未来的研究应扩大样本量,对不同类型、不同背景条件下的多条切沟进行对比研究,以增强结论的普适性。此外,本研究主要探讨了降雨因子的影响,而土壤属性(如粒径、有机质含量)和冻融作用同样是影响黑土区沟蚀的关键因素,未来的研究若能整合土壤采样数据,开展多因子综合分析,将能更全面地揭示切沟演变的驱动机制。最后,本研究侧重于对过去演变

过程的分析,在此基础上,未来可以利用机器学习等方法,融合多期遥感数据和多种环境因子,构建切沟发展的预测模型,为水土保持措施的超前部署和精准治理提供更直接的科学依据。

5 结 论

本研究基于无人机遥感数据,通过构建沟型指标体系,对东北薄层黑土区典型切沟“二道沟”2017年—2021年的三维形态时空演变进行了定量分析。主要结论如下:

(1) 研究区切沟的扩张主要由沟头溯源侵蚀驱动,其中沟头阳坡的侵蚀最为剧烈。5年间,沟头共向南前进3.01 m,新蚕食耕地39.57 m²,而沟道主体则表现为沉积状态,这清晰地揭示了切沟系统内侵蚀与沉积的耦合关系。

(2) 影响切沟扩张的主导降雨因子是侵蚀性降雨的发生次数,而非单次降雨强度或年降雨总量。这一发现揭示了东北黑土区在阵雨频发气候背景下的独特侵蚀驱动模式,对该区域的侵蚀预测和防治具有重要指导意义。

(3) 本研究建立的沟型指标体系可有效量化切沟的微地貌形态变化。其中,ROUG、SI和STD等指标间存在强相关性,可作为综合描述沟蚀活动度的指标。然而,DoD与各地形指标相关性均较弱,表明仅依靠静态地形指标难以精确反演动态的侵蚀量。

(4) 空间差异分析表明,坡向(阴/阳坡)对侵蚀/沉积格局(DoD)的影响显著,这对于水土保持措施在沟内不同位置的差异化、精准化布设具有重要的科学参考价值。

志 谢 此次野外实验的数据获取主要通过东北地理所土地系统遥感组进行,气象数据主要来源于网站<https://rp5.ru/>。

参考文献(References)

- Addisie M B, Ayele G K, Gessess A A, Tilahun S A, A D Zegeye A D, Moges M M, Schmitter P, Langendoen E J and Steenhuis T S. 2017. Gully head retreat in the sub-humid Ethiopian highlands: the Ene-Chilala catchment. *Land Degradation and Development*, 28(5): 1579-1588 [DOI: 10.1002/ldr.2688]
- Anderson R L, Rowntree K M and Le Roux J J. 2021. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. *CATE-*

- NA, 206: 105482 [DOI: 10.1016/j.catena.2021.105482]
- Barnes N, Luffman I and Nandi A. 2016. Gully erosion and freeze-thaw processes in clay-rich soils, northeast Tennessee, USA. *Geo-ResJ*, 9-12: 67-76 [DOI: 10.1016/j.grj.2016.09.001]
- Ding W F, Zhang P C and Li M. 2006. Application of topographic Gauging needle board to soil erosion study. *Soil and Water Conservation in China*, (1): 49-51 (丁文峰, 张平仓, 李勉. 2006. 地形测针板在坡面土壤侵蚀研究中的应用. *中国水土保持*, (1): 49-51) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0941.2006.01.022]
- Fan H M, Cai Q G and Wang H S. 2004. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(2): 66-70 (范昊明, 蔡强国, 王红闪. 2004. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境. *水土保持学报*, 18(2): 66-70) [DOI: 10.3321/j.issn.1009-2242.2004.02.017]
- Fang H Y and Guo M. 2015. Aspect-induced differences in soil erosion intensity in a gullied hilly region on the Chinese Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 74(7): 5677-5685 [DOI: 10.1007/s12665-015-4648-4]
- Frankl A, Nyssen J, Adgo E, Wassie A and Scull P. 2019. Can woody vegetation in valley bottoms protect from gully erosion? Insights using remote sensing data (1938-2016) from subhumid NW Ethiopia. *Regional Environmental Change*, 19(7): 2055-2068 [DOI: 10.1007/s10113-019-01533-4]
- Gao C D, Li P F, Hu J F, Yan L, Latifi H, Yao W Q, Hao M K, Gao J J, Dang T M and Zhang S H. 2021. Development of gully erosion processes: a 3D investigation based on field scouring experiments and laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 265: 112683 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112683]
- He T, Yang Y, Shi Y Z, Liang X Z, Fu S H, Xie G G, Liu B Y and Liu Y N. 2022. Quantifying spatial distribution of interrill and rill erosion in a loess at different slopes using structure from motion (SfM) photogrammetry. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3): 393-406 [DOI: 10.1016/j.iswcr.2022.01.001]
- He X, Sang Q M, Zheng F L and Wang Y F. 2021. An experimental study on impact of multiples agent actions on sloping water erosion in different mollic thickness regions of Northeast China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 35(1): 103-109, 115 (何煦, 桑琦明, 郑粉莉, 王一菲. 2021. 东北不同黑土厚度区多营力作用的坡面土壤侵蚀试验研究. *水土保持学报*, 35(1): 103-109, 115) [DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.01.015]
- 黑龙江省统计局, 国家统计局黑龙江调查总队. 2023. 2022年黑龙江省国民经济和社会发展统计公报. [2023-08-18]. http://tjj.hlj.gov.cn/tjj/c106779/202303/c00_31558382.shtml?eqid=c5e3403700079e410000000664336777
- Hosseinalizadeh M, Kariminejad N, Chen W, Pourghasemi H R, Alinejad M, Mohammadian Behbahani A and Tiefenbacher J P. 2019. Spatial modelling of gully headcuts using UAV data and four best-first decision classifier ensembles (BFTree, Bag-BFTree, RS-BFTree, and RF-BFTree). *Geomorphology*, 329: 184-193 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.01.006]
- Kang H L, Wang W L, Guo M M, Li J M and Shi Q H. 2021. How does land use/cover influence gully head retreat rates? An in-situ simulation experiment of rainfall and upstream inflow in the gullied loess region, China. *Land Degradation and Development*, 32(9): 2789-2804 [DOI: 10.1002/ldr.3892]
- Li M J, Li T Q, Zhu L Q, Meadows M E, Zhu W B and Zhang S W. 2021a. Effect of land use change on gully erosion density in the black soil region of Northeast China from 1965 to 2015: a case study of the Kedong County. *Frontiers in Environmental Science*, 9: 652933 [DOI: 10.3389/fenvs.2021.652933]
- Li S, Li Q Q, Chen J and Han Y. 2021b. Application of 3D laser image scanning technology and cellular automata model in the prediction of the dynamic process of rill erosion. *Remote Sensing*, 13(13): 2586 [DOI: 10.3390/rs13132586]
- 辽宁省统计局. 2023. 二〇二二年辽宁省国民经济和社会发展统计公报. [2023-08-18]. <https://www.ln.gov.cn/web/zwgkx/tjgb2/ln/2023032912043850007/index.shtml>
- Mararakanye N and Le Roux J J. 2012. Gully location mapping at a national scale for South Africa. *South African Geographical Journal*, 94(2): 208-218 [DOI: 10.1080/03736245.2012.742786]
- Mokarram M and Zarei A R. 2021. Determining prone areas to gully erosion and the impact of land use change on it by using multiple-criteria decision-making algorithm in arid and semi-arid regions. *Geoderma*, 403: 115379 [DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115379]
- Niculita M, Mărgărit M C and Tarolli P. 2020. Using UAV and LiDAR data for gully geomorphic changes monitoring. *Developments in Earth Surface Processes*, 23: 271-315 [DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.00010-2]
- Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G and Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA*, 50(2-4): 91-133 [DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1]
- Shen R F, Chen M J, Kong X B, Li Y T, Tong Y A, Wang J K, Li T and Lu M X. 2012. Conception and evaluation of quality of arable land and strategies for its management. *Acta Pedologica Sinica*, 49(6): 1210-1217 (沈仁芳, 陈美军, 孔祥斌, 李永涛, 同延安, 汪景宽, 李涛, 鲁明星. 2012. 耕地质量的概念和评价与管理对策. *土壤学报*, 49(6): 1210-1217)
- 水利部. 2023. 水利部组织完成东北黑土区侵蚀沟调查. [2023-10-20]. https://www.waterinfo.com.cn/yw/slxw/202308/t20230829_35883.html
- 吉林省统计局. 2023. 吉林省2022年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. [2023-08-18]. http://tjj.jl.gov.cn/tjsj/tjgb/ndgb/202304/t20230401_8687326.html
- Sudra P, Demarchi L, Wierzbicki G and Chormański J. 2023. A comparative assessment of multi-source generation of digital elevation models for fluvial landscapes characterization and monitoring. *Remote Sensing*, 15(7): 1949 [DOI: 10.3390/rs15071949]
- Tang J, Xie Y, Wu Y Q and Liu G. 2023. Influence of precipitation change and topography characteristics on the development of farmland gully in the black soil region of northeast China. *CATENA*, 224: 106999 [DOI: 10.1016/j.catena.2023.106999]
- Tsouros D C, Bibi S and Sarigiannidis P G. 2019. A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11): 349 [DOI: 10.3390/info10110349]

- Vandekerckhove L, Poesen J, Wijdenes D O and Gyssels G. 2001. Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments. *CATENA*, 44(2): 133-161
- Wang B W, Zhao X L, Wang X, Zhang Z X, Yi L and Hu S G. 2020. Spatial and temporal variability of soil erosion in the black soil region of Northeast China from 2000 to 2015. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6): 370 [DOI: 10.1007/s10661-020-08298-y]
- Wang J X, Deng J Y, Zhang Y, Song X P and Ma R. 2021. Effects of vegetation seasonal change on 3D laser survey in gullied region. *Science of Soil and Water Conservation*, 19(1): 132-140 (王佳希, 邓家勇, 张岩, 宋晓鹏, 马瑞. 2021. 植被季相变化对三维激光测量切沟地形的影响. *中国水土保持科学*, 19(1): 132-140) [DOI: 10.16843/j.sswc.2021.01.016]
- Wang R H, Sun H, Yang J C, Zhang S W, Fu H P, Wang N and Liu Q Y. 2022. Quantitative evaluation of gully erosion using multitemporal UAV data in the southern black soil region of Northeast China: a case study. *Remote Sensing*, 14(6): 1479 [DOI: 10.3390/rs14061479]
- Wu Y Q and Cheng H. 2005. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system. *CATENA*, 63(2-3): 154-166 [DOI: 10.1016/j.catena.2005.06.002]
- Xia J W, Cai C F, Wei Y J and Wu X L. 2019. Granite residual soil properties in collapsing gullies of south China: spatial variations and effects on collapsing gully erosion. *CATENA*, 174: 469-477 [DOI: 10.1016/j.catena.2018.11.015]
- Xia J W, Zhang L C, Huang X H, Lu X H, Ge P L, Wei Y J and Cai C F. 2023. Photogrammetric technique-based quantitative measuring of gravity erosion on steep slopes in laboratory: accuracy and application. *Water*, 15(14): 2584 [DOI: 10.3390/w15142584]
- Xie Y, Liu B Y and Zhang W B. 2000. Study on standard of erosive rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation*, 14(4): 6-11 (谢云, 刘宝元, 章文波. 2000. 侵蚀性降雨标准研究. *水土保持学报*, 14(4): 6-11) [DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2000.04.002]
- Zheng F L, Zhang J Q, Liu G, Fan H M, Wang B and Shen H O. 2019. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of Northeast China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(4): 314-319 (郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 范昊明, 王彬, 沈海鸥. 2019. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点. *水土保持通报*, 39(4): 314-319) [DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.049]

Spatiotemporal analysis of gully three-dimensional morphological evolution in the northeast black soil region based on drone remote sensing

KE Liwei^{1,2}, YANG Jiuchun¹, WANG Jiaqi^{1,2}, LI Ying¹

1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China

Abstract: Arable land is a core resource for agricultural production. Gully erosion is a highly destructive form of water erosion, severely threatens these land resources. Clarifying the spatiotemporal evolution of the three-dimensional (3D) morphology of gullies is a prerequisite for quantitatively assessing erosion rates and precisely deploying soil and water conservation measures. This study focuses on atypical gully named Erdao Gully in Jiutai District, Jilin Province. Based on five consecutive years (2017—2021) of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remote sensing data (orthophotos and Digital Elevation Models), we employed a method combining 3D morphological analysis with a gully morphometric index system to quantitatively investigate the characteristics of 3D morphological changes at various temporal scales and spatial locations. Concurrently, the relationship between rainfall factors and gully erosion activity was explored by integrating meteorological data. The results indicate that: (1) During 2017 and 2021, gully expansion in the study area was primarily driven by headcut retreat erosion. The gully head retreated a total of 3.01 m, encroaching on 39.57 m² of new arable land. (2) Erosion and deposition coexisted within the gully, with a maximum vertical erosion depth of 1.156 m and a maximum vertical deposition thickness of 0.776 m. The erosion was most severe on the sunny slope of the gully head. (3) The dominant rainfall factor influencing gully expansion was the frequency of erosive rainfall events, rather than single-event rainfall intensity or total annual precipitation. This study demonstrates that time-series observations from UAV remote sensing can precisely delineate the gully erosion process in the thin black soil region, and provides a scientific basis for the optimized layout of soil and water conservation measures in the area.

Key words: UAV remote sensing, thin black soil region, gully, three-dimensional morphology, gully shape index system, soil conservation, soil erosion, spatiotemporal change analysis

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFD1500102); National Natural Science Foundation of China (No. 42171380)