

DOI: 10.13870/j.cnki.stbexb.2024.02.028

贾晨阳, 刘宏远, 于悦, 等. 东北黑土区冻融循环对切沟沟壁崩塌的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 109-117.

JIA Chenyang, LIU Hongyuan, YU Yue, et al. Effects of freeze-thaw cycles on gully wall collapse in the black soil region of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 109-117.

东北黑土区冻融循环对切沟沟壁崩塌的影响

贾晨阳, 刘宏远, 于悦, 马芊红, 柯奇画, 张科利

(北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: [目的] 通过测量冻融循环期间沟壁崩塌体积来评价冻融循环对切沟侵蚀的贡献。[方法] 2016—2018 年间, 选取 36 条切沟共计 463 个崩塌点开展了野外调查。基于调查结果, 切沟沟壁崩塌主要表现为 2 种类型: 块状崩塌和松散堆积。在每个崩塌点测量 2 种堆积体的形态参数: 崩塌土壤的体积、切沟横断面的宽度和深度, 以及相应沟壁土壤的剪切力和硬度。[结果] (1) 3 年研究期间冻融作用导致的沟壁崩塌强度平均为 $16.12 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{a})$ 。2 种崩塌类型在切沟内随机发生, 单点冻融崩塌量主要集中在 $0 \sim 3 \text{ m}^3$, 但块状崩塌导致的土方量更大。(2) 切沟横断面宽度和深度是沟壁崩塌的主要影响因素, 崩塌量随宽深比增大而增加, 当宽深比 > 2.71 后, 崩塌量迅速增加。(3) 切沟崩塌量与沟壁土壤的剪切力和硬度等紧密相关。[结论] 沟壁冻融崩塌与切沟宽度和深度紧密相关, 冻融崩塌量占切沟侵蚀泥沙产量的 $3.28\% \sim 23.68\%$, 其影响与沟头溯源侵蚀相当。研究结果为定量评价冻融循环对切沟侵蚀贡献提供数据支撑。

关键词: 切沟沟壁崩塌; 冻融循环; 黑土; 切沟侵蚀

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0109-09

Effects of Freeze-thaw Cycles on Gully Wall Collapse in the Black Soil Region of Northeast China

JIA Chenyang, LIU Hongyuan, YU Yue, MA Qianhong, KE Qihua, ZHANG Keli

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] To evaluate the contribution of freeze-thaw cycle (FTCs) to gully erosion by measuring the collapse volume of gully wall collapse during FTCs. [Methods] From 2016 to 2018, a total of 463 collapse points in 36 gullies were selected for field investigation. Based on the investigation results, there were two types of wall collapse: massive collapse and loose accumulation. The morphology parameters of two kinds of accumulations were measured at each collapse point, including the volume of the collapsed soil, the width and depth of the gully cross-section, and the shear force and hardness of soil of the corresponding gully wall soil. [Results] (1) The average collapse strength of gully wall collapse caused by FTCs during the three-year study period is $16.12 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{a})$. The two types of collapse occurred randomly within the gully, and the single point freeze-thaw collapse mainly concentrated in $0 \sim 3 \text{ m}^3$, but the amount of soil caused by massive collapse was larger. (2) The transverse width and depth of the gully were the main factors affecting the collapse of the gully wall, and the collapse amount increased with the increase of the width-depth ratio. When the width-depth ratio > 2.71 , the collapse amount increased rapidly. (3) The amount of gully collapse was closely related to the shear force and hardness of the soil on the gully wall. [Conclusion] The freeze-thaw collapse of the gully wall was closely related to the width and depth of the gully cross-section, the freeze-thaw collapse accounted for 3.28% to 23.68% of the sediment yield of the gully erosion, and its influence was equivalent to that of the headward erosion of gully head. The research results provide data support for

收稿日期: 2023-08-31

修回日期: 2023-10-23

录用日期: 2023-11-26

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-02-01

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500701)

第一作者: 贾晨阳 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤资源利用与保护研究。E-mail: chen yangjia@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 张科利 (1962—), 男, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: keli@bnu.edu.cn

http://stbexb.alljournal.com.cn

quantitatively evaluating the contribution of FTCs to gully erosion.

Keywords: gully sidewall collapse; freeze-thaw cycles; black soil; gully erosion

Received: 2023-08-31

Revised: 2023-10-23

Accepted: 2023-11-26

Online(www.cnki.net): 2024-02-01

切沟侵蚀是一种广泛分布于世界的严重土地退化方式^[1]。由于切沟形成与发育,土地不断破碎,并且逐渐丧失生产力。已有研究^[2-5]表明,切沟侵蚀也是流域泥沙主要来源。切沟发育包括沟头溯源、沟底下切和沟岸扩张过程^[6-7]。切沟发育受地形、土质、土地利用等多种因素影响,其中,上游汇水面积、植被根系和土壤性质是影响沟头后退的主要因素^[2,8-10]。然而,沟岸扩张主要受降雨特征和土壤含水量^[11-12]、土壤结构稳定性^[13]、沟壁坡度和深度^[14-15]、冻融循环^[16]及其他因素控制。由于受水力、重力以及冻融循环的叠加作用影响,沟岸扩张过程具有随机性和间歇性的复杂特点^[12]。因此,关于沟岸对流域产沙贡献的定量及其侵蚀机制研究十分困难^[17]。

冻融循环(FTCs)是寒温带地区的一种常见自然现象,可导致冻融侵蚀的发生^[18-19]。冻融循环通过土壤水分相变影响水热分布,进而破坏土壤原有结构,导致土壤物理性质、内聚力等其他力学性质发生改变,包括土壤含水量、容重、孔隙度和团聚体稳定性^[20-22],进而影响土壤侵蚀。对冻融循环的影响评价主要基于室内模拟试验,发现受冻融作用的土壤会变得极易侵蚀^[23],但由于缺乏统一的试验标准,结果差别较大^[18,22]。与未受冻融循环影响的切沟相比,冻融循环使切沟宽度、深度、横断面积和侵蚀量显著增加,沟壁崩塌量增加尤为明显^[1,24-26]。

切沟侵蚀的研究方法包括早期的侵蚀针^[1,27]、卷尺^[28-29]、航空相片解译^[4,11]和渐趋成熟的遥感技术^[30-31]、无人机^[9,19,30]、激光扫描^[5,29]和差分GPS^[28,32-33]等,但由于东北地区的切沟发展受流水和冻融循环叠加作用,上述方法仍未分离出冻融循环导致的沟壁崩塌,本研究采用几何估算法能够实现沟壁冻融崩塌的剥离。

切沟广泛分布于中国东北地区。2012年中国水利部调查^[8]表明,黑土区现有切沟超过 295 000 条,且 80%分布在耕地。切沟的形成和发育加剧黑土区土壤流失和耕地破碎化。而冻融循环促进切沟的形成和发展过程。为此,2016—2018年每年春季对冻融期间切沟崩塌开展系统调查,以期对沟壁冻融崩塌鉴别与估算其体积及其影响因子研究提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省鹤山农场境内的鹤北小流

域(48°59′3.37″—49°02′35.7″N,125°15′45.71″—125°20′46.79″E)。流域面积 27.6 km²,流域海拔 312~388.5 m,地形以漫岗漫坡为主,耕地坡度为 2%~14%,平均坡度 6%,坡面坡长集中变化于 500~4 000 m。气候为寒温带大陆性季风气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥。年降水量 300~750 mm,平均降水量 534 mm,但年内分布极度不均。多年平均气温 0℃,最冷月(1月)平均气温约-21℃;最暖月(7月)平均气温约 20℃。研究区为典型的季节性冻土区,冬季低温导致土壤冻结深度达 1.5~2.0 m,冻结时间长达 120~200 天。地带性土壤为黑土,典型作物有春小麦、大豆和玉米。流域内切沟广布,主要发育在耕地中、林带旁和道路旁。

1.2 野外调查时间选定

根据鹤北小流域多年气温观测结果,每年从 10 月中旬开始,气温进入零上和零下的日循环,持续到 11 月中旬循环结束。从 11 月中旬到翌年 3 月中旬,气温完全处于零下。3 月中旬开始到 4 月下旬结束,气温再次处于零上和零下的日循环状态;5 月初到 10 月上旬,气温完全处于零上。随着气温的正负变化,从地面到地下一定深度范围内土壤孔隙中的水分也随之发生冻结和融化的交替循环变化。当气温处于零上的时候,土壤处于完全融化状态,当气温处于零上和零下的日循环阶段的时候,土壤则处于冻结和融化的日循环状态,即冻融循环阶段。

因此,春季冻融循环结束后,在切沟中可以看到随机分布、大小不一的土块和土堆。野外测量工作在每年春季冻融循环结束进行,即 4 月 20—30 日,通过测量崩塌土壤体积来量化冻融作用对切沟侵蚀的贡献。

1.3 冻融崩塌土壤的识别与体积估算

对于 2 种方式的崩落物,需要分别采用不同的方法来测量和计算体积。对于块状崩塌体,其体积=长×宽×高;而对于松散堆积体,由于非冻融循环期间也发生沟壁崩塌,因此如何鉴别发生于冻融循环期间的堆积体十分困难。本研究采用方法为:

(1)首先仔细探查堆积体表面是否有降雨或水流冲刷痕迹及是否被茂密的杂草覆盖,如果符合上述两者之一,说明该堆积体形成于冻融期之前;反之,则表明堆积体形成于冻融期。堆积体表面的枯草是追踪切沟冻融崩塌土壤的重要指纹。(2)识别出冻融循环导致的崩塌堆积体后,需要从中进一步判断出当年冻

融期剥落下的土壤。观察发现,当年冻融循环期剥落的土壤与形成于冻融期之前的堆积体表面存在 1 个界面,该界面的识别依靠 2 个标志:存在杂草生长面和土壤紧实度变大。如果发现杂草生长面,那么当年冻融期剥落下的土壤一定处于该生长面以上。

大量实地调查发现,位于切沟底部的松散堆积体的整体形态可以看作 1 个三棱柱,松散堆积体横截面则为三角形(图 1),那么冻融期崩塌土壤的体积则为 2 个三棱柱的体积之差。因此,分别用卷尺和罗盘测量拨土前(n)、后(p)堆积体横截面三角形的斜边长度 L_n (m)、 L_p (m)和坡度 α (°)、 β (°),以及堆积体沿着沟道走向的长度 L (m),可以根据公式(1)计算得到松散堆积体的体积(V, m^3)。

$$V = L(0.5 L_n^2 \cos \alpha \sin \alpha - 0.5 L_p^2 \cos \beta \sin \beta) \\ = L[0.25(L_n^2 \sin 2\alpha - L_p^2 \sin 2\beta)] \quad (1)$$

式中: V 为松散堆积体的体积(m^3); L 为堆积体沿沟道方向的长度(m); L_n 和 L_p 分别为堆积体拨土前后的横截三角面斜边长度(m); α 和 β 分别为堆积体拨土前后的坡度(°)。

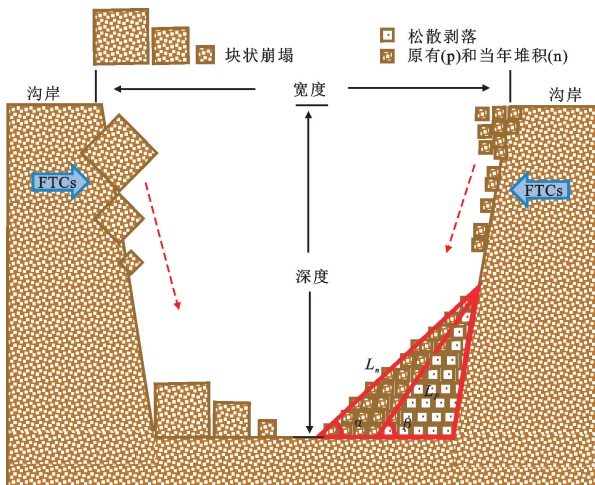


图 1 切沟横截面示意

Fig. 1 Diagram of gully cross-section

1.4 数据处理

对于每条切沟,依次从沟头开始,沿着切沟寻找和识别冻融崩塌点,对于每个目标崩塌点,利用手持 GPS(UniStrong-G138BD)对其定位。用卷尺和地质罗盘测量崩塌点对应切沟断面的宽度和深度、块状崩塌土体的长、宽和高,以及松散堆积体的形态参数,分别利用土壤坚实度仪(Eijkelkamp Model 06.03 Pocket Penetrometer)和十字板剪切力仪(Eijkelkamp Model 14.05 Field Inspection Vane Tester)测定崩塌点对应切沟边壁的土壤剪切力和硬度,均重复测量 3 次取平均值。综合冻融崩塌点的代表性和典型性,3 年共计调查冻融崩塌点 463 个,其

中块状崩塌点 240 个,剥落崩塌点 223 个。共获取切沟断面形态参数:宽、深、宽深比 409 套,切沟沟壁土壤力学参数:剪切力 245 个,硬度 248 个。崩塌体积—断面形态参数—沟壁土壤力学参数成套数据共计 239 套。

相关性计算采用斯皮尔曼系数,所有统计分析的显著水平均为 $p < 0.05$ 。数据的基础计算和初步处理采用 Excel 2016 软件,统计分析及数据可视化分别在 SPSS 24、Origin 2021 及 PowerPoint 2016 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 冻融切沟特征

2016—2018 年调查和测量 36 条切沟,共计得到 463 个冻融崩塌点,包括 240 个块状崩塌点和 223 个松散崩塌点,崩塌体积共计 $182.55 m^3$,其中,块状 $120.30 m^3$,松散堆积体 $62.25 m^3$,有完整数据的 25 条切沟数据(表 1)。每条切沟的崩塌点数量不等,其中,崩塌点少于 10 个的切沟有 12 条(G3, G4, G5, G8, G9, G12, G18, G19, G20, G26, G35, G36), 10~30 个崩塌点的切沟有 9 条(G1, G2, G6, G7, G11, G14, G16, G33, G34),剩下 4 条切沟崩塌点在 40~70 个(G29, G30, G31, G32)。崩塌点的数量一定程度上能够反映切沟受冻融作用影响的程度,崩塌点数量越多,受冻融作用影响越强烈。野外调查表明,块状和松散状崩塌在每条切沟内基本随机发生。按照 2 种不同的体积计算方法,分别对块状崩塌和松散堆积体的体积进行估算。在选定的切沟范围内,基本上崩塌点越多的切沟,崩塌总量也越大,但切沟之间崩塌量差异较大,最大崩塌总量可达 $45.589 m^3$,而最小仅 $0.112 m^3$ 。冻融崩塌点处的沟宽和沟深分别为 $0.95 \sim 16.36 m$, $0.41 \sim 4.07 m$,宽深比为 $1.61 \sim 4.74$ 。

3 年共计调查崩塌点 463 个,崩塌长度 $11.63 km$,崩塌量共计 $182.55 m^3$ (表 2)。其中,2016 年共计 142 个崩塌点,合 $74.20 m^3$,2017 年共计 191 个崩塌点,合 $50.43 m^3$,2018 年共计 130 个崩塌点,合 $57.92 m^3$ 。平均来看,春季冻融作用导致的切沟沟壁崩塌量可达 $16.12 m^3 / (km \cdot a)$ 。在黑土容重取 $1.27 g/cm^3$ 的情况下,冻融循环导致的切沟崩塌量约为 $20.47 t / (km \cdot a)$ 。

切沟断面形态特征是影响沟壁扩张的重要因素。为了探究切沟断面形态特征与冻融崩塌量之间的内在联系,分别测量切沟断面的宽度和深度,并计算得到切沟断面的宽深比数据(表 2)。结果表明,切沟断面平均宽度和深度分别为 $3.37 \sim 4.26 m$, $1.13 \sim 1.43 m$,平均宽深比为 2.80。

土壤剪切力和硬度作为土壤力学参数,能够反映土壤抵抗外力破坏的能力大小。测量结果(表 2)显示,经过冻融循环后的沟壁土壤平均剪切力 21.71 kPa,平均硬度 0.22 MPa。

表 1 调查切沟基本信息

Table 1 Basic information on the investigation gully

切沟 编号	崩塌点个数			崩塌量/m ³			沟宽/m			沟深/m			宽深比		
	总数	块状	松散	最大值	最小值	合计	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
G1	30	5	25	2.619	0.004	9.366	9.80	1.90	5.63	2.50	0.70	1.84	8.18	1.43	3.24
G2	16	0	16	0.330	0.003	0.732	5.70	3.00	4.54	2.20	0.45	1.59	6.67	2.07	3.06
G3	8	3	5	0.028	0.005	0.112	1.80	0.70	1.52	0.60	0.30	0.45	5.67	1.17	3.80
G4	3	0	3	0.062	0.007	0.123	1.50	1.20	1.33	0.55	0.45	0.52	2.89	2.18	2.60
G5	1	0	1		0.027			2.80				0.85			3.29
G6	12	2	10	0.067	0	0.357	6.50	1.00	3.46	1.75	0.60	1.05	5.91	0.83	3.46
G7	10	2	8	0.168	0.003	0.429	1.20	0.55	0.95	0.55	0.30	0.41	3.67	1.82	2.37
G8	7	0	7	0.128	0.020	0.414	4.35	0.60	2.01	0.79	0.55	0.71	6.73	0.80	2.94
G9	5	2	3	0.132	0.007	0.236	2.40	1.00	1.72	1.09	0.50	0.78	2.53	1.88	2.21
G11	10	4	6	2.525	0.024	4.551	4.40	0.30	2.74	1.80	0.50	1.34	2.75	0.60	1.84
G12	2	0	2	0.219	0.035	0.254	4.60	2.30	3.45	0.95	0.90	0.93	5.11	2.42	3.77
G14	14	12	2	0.219	0.037	1.397	8.20	0.94	3.89	1.75	0.44	1.28	4.69	1.76	2.92
G16	15	6	9	0.280	0.003	1.233	4.80	0.90	2.34	1.10	0.50	0.72	8.25	1.54	3.21
G18	2	2	0	0.172	0.098	0.270	1.40	1.40	1.40	0.45	0.45	0.45	3.11	3.11	3.11
G19	6	3	3	0.122	0.012	0.374	1.80	1.10	1.32	0.90	0.55	0.71	2.40	1.33	1.91
G20	4	3	1	1.080	0.050	1.346	3.80	0.80	2.56	1.60	0.50	1.14	2.38	1.60	2.13
G26	1	0	1		0.194			4.00				2.00			2.00
G29	56	26	30	2.297	0.001	18.412	11.70	1.05	3.36	2.40	0.45	1.01	9.40	1.50	3.44
G30	43	27	16	10.620	0.008	36.939	10.90	1.80	6.43	4.00	0.68	2.43	9.41	1.05	2.83
G31	68	37	31	3.168	0.009	45.589	31.60	1.60	16.36	17.10	0.67	4.07	9.91	0.76	4.74
G32	56	34	22	1.549	0.004	13.402	11.80	0.25	4.61	2.80	0.30	1.64	7.38	0.33	2.92
G33	14	3	11	0.683	0.007	3.015	7.20	2.10	5.04	2.70	0.85	2.20	4.60	1.10	2.43
G34	18	12	6	5.999	0.016	12.445	5.40	0.50	2.13	3.00	0.30	1.02	6.38	1.09	2.25
G35	4	1	3	0.480	0.053	0.799	2.90	2.00	2.40	1.20	0.80	0.93	3.22	2.25	2.62
G36	4	2	2	0.357	0.034	0.592	2.19	0.16	1.46	1.09	0.76	0.88	2.59	0.21	1.61

表 2 切沟年平均特征

Table 2 Annual average characteristics of gully

年份	样本数	崩塌量/ (m ³ · a ⁻¹)	崩塌长度/ km	单位长度崩塌量/ (m ³ · km ⁻¹ · a ⁻¹)	沟宽/m	沟深/m	宽深比	剪切力/kPa	硬度/MPa
2016	142	74.20	3.51	21.14	4.26	1.43	2.88	32.49	0.18
2017	191	50.43	4.50	11.21	3.37	1.13	2.90	13.37	0.26
2018	130	57.92	3.62	16.00	3.97	1.41	2.61	19.28	0.21
平均值		60.85	3.87	16.12	3.87	1.33	2.80	21.71	0.22

2.2 冻融崩塌特征

2.2.1 崩塌量 图 2 为块状和松散堆积体体积频数统计结果。2 种类型的沟壁冻融崩塌在体积上存在差别,块状崩塌为 0~11 m³,松散堆积体为 0~4.5 m³。其中,98.75%块状崩塌体积集中在 0~3.5 m³,99.1%松散堆积体体积介于 0~3 m³,表明块状崩塌土方量较松散崩塌范围更大,且以产生大方量的崩塌为主。但 2 种崩塌方式产生的土方量均以 0~1 m³ 范围最为常见,累计频率分别占 85.83%和 94.17%。崩塌量反映冻融作用对沟壁土壤侵蚀的影响程度,但二者没有绝对的因果关系,还需综合考虑含水量、容

重等沟壁土壤性质、切沟断面形态特征及植物根系等因素。

2.2.2 空间分布 图 3 反映冻融崩塌在切沟内的分布情况。选取崩塌点数量在 10 个及以上的切沟共计 14 条,通过气泡图来展示冻融崩塌在切沟内的分布情况,可以看到单点崩塌量在各自切沟内无明显分布规律,即崩塌点在切沟内出现的位置具有随机性,且崩塌量的多少在空间上也没有呈现出一致的规律。这也印证前人^[12]认为沟岸崩塌的发生具有随机性特征的观点。

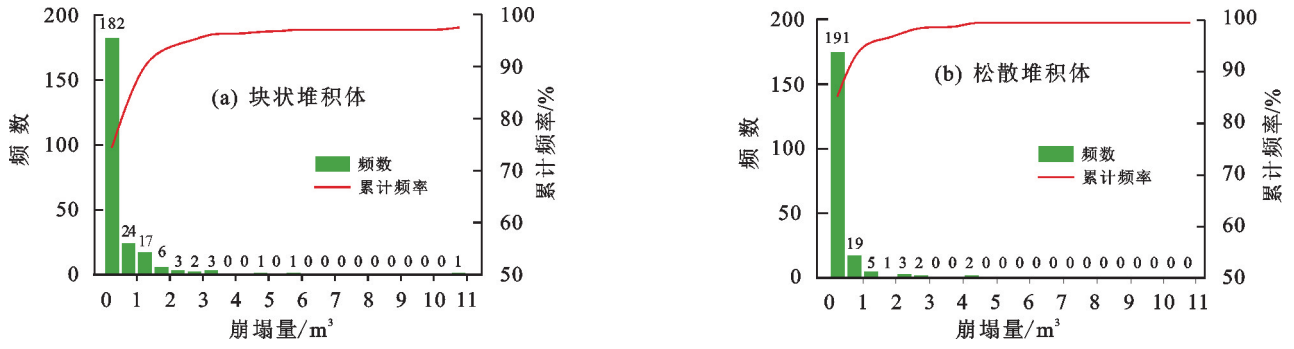


图 2 2 种冻融崩塌类型的体积频数统计

Fig. 2 Volume frequency statistics of two types of freeze-thaw collapse

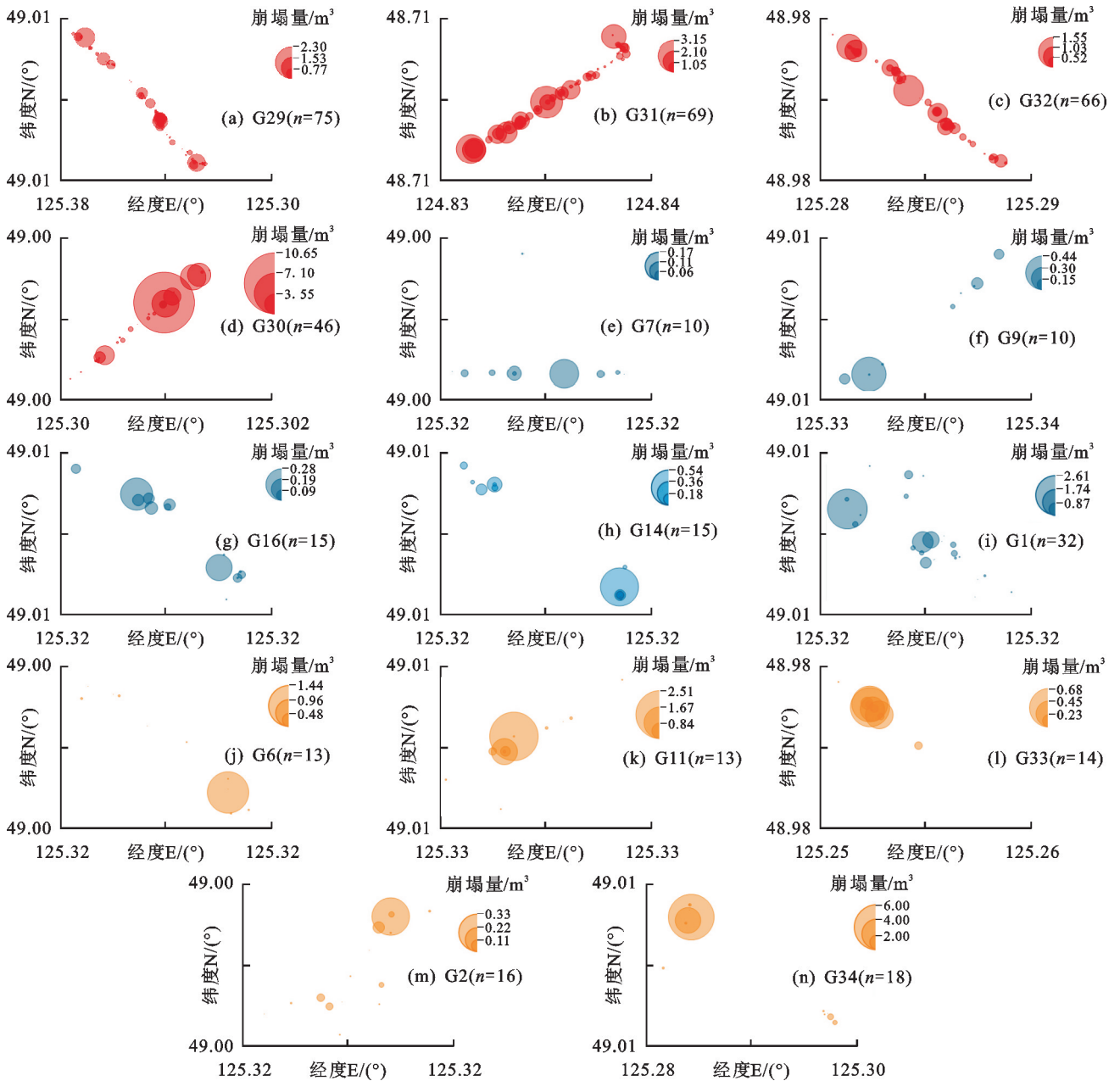


图 3 切沟内冻融崩塌的空间分布

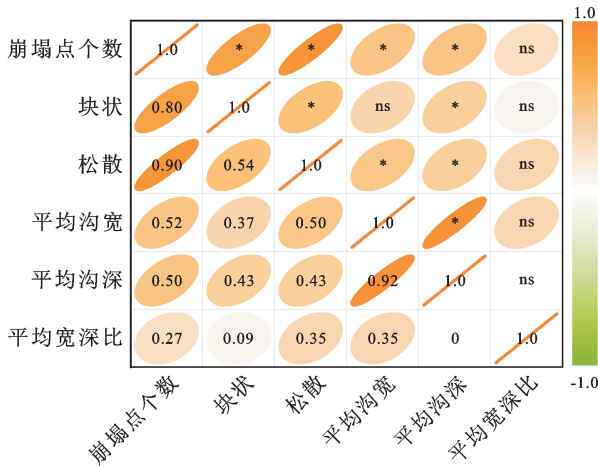
Fig. 3 The spatial distribution of freeze-thaw collapse in gully

2.3 冻融崩塌影响因素

2.3.1 切沟形态 基于表 1 的 25 条切沟数据对崩塌

点个数与形态参数进行相关分析。结果(图 4)显示,切沟内崩塌点总数与平均沟宽和沟深均存在显著正

相关关系。而单独看 2 种崩塌类型时则有所差异：松散崩塌与平均沟宽和沟深均存在显著正相关关系，而块状崩塌只与平均沟深存在显著正相关关系。平均沟宽和沟深反映切沟规模。切沟规模越大，冻融崩塌点越多，即冻融崩塌作用越强烈。此外，从切沟形态来讲，沟宽和沟深之间存在较好的正相关关系。



注：* 表示通过显著性水平为 $p < 0.05$ 的检验；ns 表示没有通过显著性检验。下同。

图 4 切沟内崩塌点个数与切沟形态的相关关系

Fig. 4 The correlation between the number of collapse points in the gully and the gully morphology

崩塌体积角度的影响因素。对获取的 239 套崩塌体积—切沟断面形态—沟壁土壤力学性质配套参数进行两两相关分析(图 5)可知，在显著性检验水平 $p < 0.05$ 的情况下，崩塌点体积与切沟断面宽度和深度呈显著正相关，切沟断面宽度和深度呈显著正相

关，宽深比和宽度呈显著正相关，印证切沟形态对冻融崩塌的影响。而沟壁土壤力学参数和崩塌体积之间相关性则不显著。另外，切沟断面宽度和深度与沟壁剪切力之间存在一定的负相关，同样属于土壤力学参数的剪切力和硬度之间存在显著正相关。

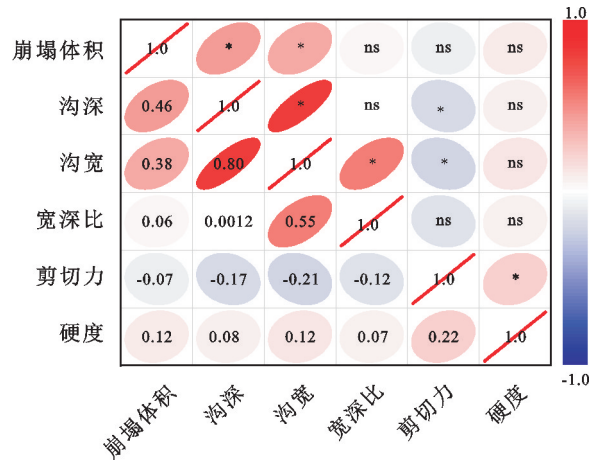


图 5 崩塌点各参数相关分析

Fig. 5 Correlation analysis of parameters at collapse points

对崩塌点 409 套宽深数据进行分析发现，宽深比 2.71 是一个临界点(图 6)。当切沟断面宽深比 ≤ 2.71 时，切沟宽度和深度之间的关系可以通过一元二次方程拟合。而当宽深比 > 2.71 时，切沟断面的宽度和深度之间则存在幂函数关系。切沟的发育是一个三维过程，包括纵向的伸长、横向的拓宽和垂向的下切。在切沟发育的活跃阶段，随着切沟长度增加，宽度和深度都相应增大。

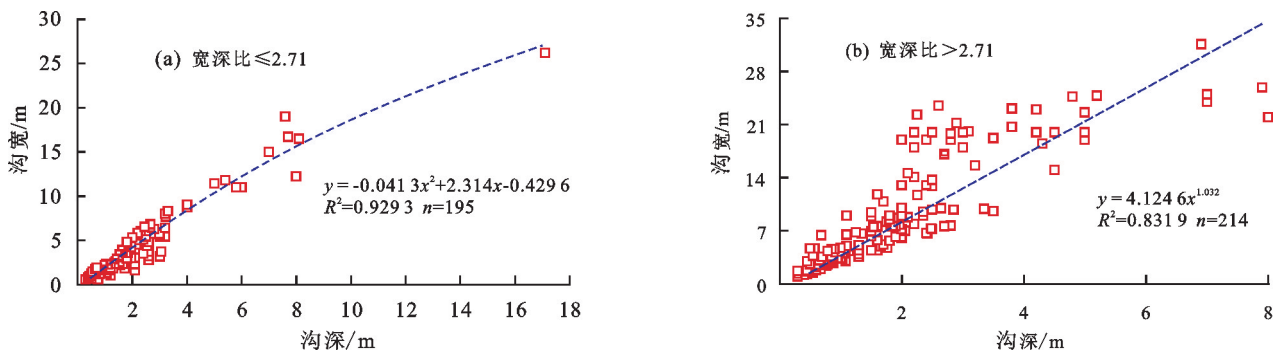


图 6 切沟断面形态特征

Fig. 6 Morphological characteristics of the gully cross section

为了探究崩塌量与切沟断面形态之间的关系，对 409 套崩塌点数据进行分组分析。将沟宽从小到大排序，等距分组，横、纵坐标分别为各组沟宽和崩塌量的平均值。对沟深和宽深比做同样处理，结果表明，分组之后的数据呈现出相对清晰的关系(图 7a、图 7b)。随着切沟断面宽度和深度增加，崩塌量逐渐增加，且都属于幂函数关系。冻融崩塌的发生与切沟规模有显著关系，切沟规模越大，崩塌发生的概率与崩

塌量也越大。

考虑到沟宽和沟深关系之间存在临界值，因此，对崩塌量与宽深比之间存在何种关系还需要进一步分析。推测二者之间的关系可能与宽深比为 2.71 有关联。因此，对宽深比数据按照同样的方法进行排序分组求平均，从得到的崩塌量—宽深比散点图(图 7c)中发现，崩塌量和宽深比的关系可以分 2 段来看，当宽深比 ≤ 2.71 的时候，崩塌量和宽深比之间的关

系符合二次多项式;当宽深比 > 2.71 的时候,二者符合一元一次线性关系。

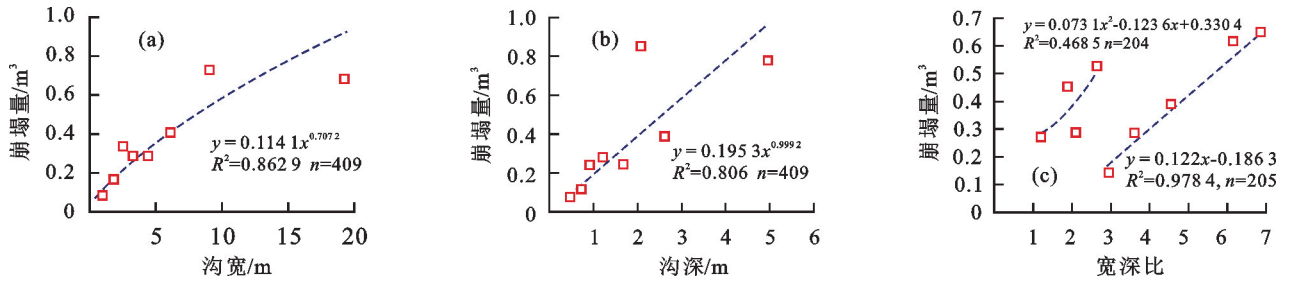


图 7 冻融崩塌量与切沟形态的关系

Fig. 7 The relationship between freeze-thaw collapse volume and gully morphology

2.3.2 沟壁土壤力学性质 对 242 套沟壁土壤剪切力—硬度数据,按照硬度从小到大排序后进行等距分组及拟合(图 8a)可以看出,幂函数曲线能较好地解释沟壁土壤剪切力和硬度之间的关系。土壤剪切力和硬度同属于土壤力学性质参数,能够反映土壤自身的强度。土壤剪切力和硬度越大,土壤抵抗风、水等外力破坏的能力也越强。

相对于形态参数,土壤剪切力和硬度与崩塌量之间的相关性不显著。对 245 套崩塌点体积—剪切力数据进行等距分组,并求得各组平均得到二者散点图见图 8b, R^2 只有 0.20。对 248 套崩塌点体积—硬度数据采用同样的分组处理方法, R^2 仅为 0.06(图 8c), 曲线拟合 R^2 过小可能和数据是基于野外实测有关。

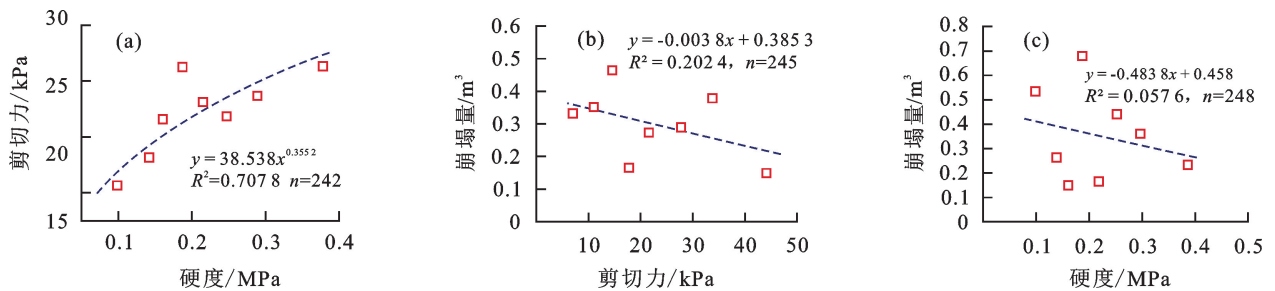


图 8 沟壁土壤力学性质关系

Fig. 8 The relationship of gully wall soil mechanical properties

3 讨论

3.1 沟壁冻融崩塌的识别与估算

由于沟壁冻融崩塌的发生具有随机性和间歇性,现有研究方法中还没有能够对其进行量化的方法。基于野外实地调查,提出沟壁冻融崩塌识别和体积计算方法。借助杂草、流水痕迹和土壤紧实状况将冻融崩塌土壤从堆积土体中区分剥离。通过几何抽象的形式对崩塌体积进行估算,原理通俗易懂;测量工具如地质罗盘、卷尺、手持 GPS 等基础易学,携带方便;高效且经济实用。ZHANG 等^[34]基于东北黑土区 2 条切沟采用 3D 摄影测量法对冻融期沟坡侵蚀堆积状况进行监测。3D 摄影测量技术的工作原理是利用全站仪配合相机拍照建模生成 DEM,将前后 2 个时间节点的 DEM 叠加得到沟坡侵蚀沉积分布图,并计算沟坡侵蚀量。该方法监测沟坡侵蚀状况精度较高,但拍照建模操作过程需控制镜头焦距和照片重叠率,对控制点的选取及定位精度要求较高,且后期建模耗时较长,总体来讲工作量偏大。BARNES 等^[1]在美国

田纳西东北部用侵蚀针监测沟道、沟壁和沟间地的冻融侵蚀过程认为,冻融作用是切沟侵蚀的一个重要力量,尤其是沟壁侵蚀过程。侵蚀针通过其在地面的出露高度变化来反映特定地点的侵蚀与沉积状况,很灵敏也很直观,但适用于连续性较好的表面;并且插在地面的侵蚀针很容易受到外界影响,如被径流冲走等。

对东北黑土区而言,春季冻融循环期间切沟侵蚀主要表现为沟岸坍塌^[35]。冻融循环过程中,由于土壤水分的体积发生变化,使得沟沿附近土壤在水平和垂直 2 个方向发生形变。而且,冻融循环使土壤结构变差,反复的冻融循环使得土体与沟岸之间黏结力越来越小,裂缝形成并逐渐加宽加深。由于沟沿附近杂草茂密,植被根系的固结作用不可忽视,所以,当土体所受重力超过黏结力和根系固结力时,便发生块状冻融崩塌。块状崩塌土壤主要来自沟壁上部,这与沟壁垂直方向上土壤理化性质差异有关。切沟沟壁相当于裸露的土壤剖面,从上往下依次为腐殖质和黏粒含量较高的黑土、潜育化作用形成的淋溶淀积层和砂粒含量较高的母质层。根据机械组成将沟壁大致划分

为上中下 3 部分,上部黏粒含量高,湿时泥泞,干时固结成坚硬的土块。冻融期间崩塌下来以大小不一的土块形式堆积在沟道内,因此,可将其形态抽象为立方体,用立方体体积公式求得块状崩塌量。松散堆积体的土壤主要来自沟壁中部及下部。处于沟壁中部及下部的土壤,结构组成更加接近母质,表现为腐殖质和黏粒含量减少,砂粒增多。当土壤冻结时,沟壁中部和下部土壤随水分结冰发生膨胀;随着气温上升,土壤中的冰晶融化,水分发生迁移和蒸发,沟壁外层原来被冰晶填充的土壤孔隙现将被空气填充,这些土壤靠着土壤颗粒间的内聚力依附于沟壁,当春季风力吹蚀及自身重力超过内聚力时,便发生层片状剥落。由于含水量低,掉落下的土壤较为疏松,缓慢掉落并堆积在紧贴沟壁的沟道内,形成大小不一的堆积体。

3.2 沟壁冻融崩塌的影响因素

沟壁崩塌是一个打破平衡状态的过程。平衡状态的打破受沟壁土壤状况和外界条件的共同影响。切沟断面形态与冻融崩塌之间存在较好的正相关性。无论是冻融崩塌点个数还是崩塌体积都随切沟宽度和深度的增大而增加,这表明规模较大的切沟对冻融崩塌具有促进作用。松散崩塌与切沟宽度和深度之间的相关性接近,而块状崩塌则与切沟深度相关性更大,可以将这一差别归因于 2 种崩塌土方量的差别。块状崩塌由于土方量较大,受重力作用影响更大,所以与切沟深度关系更为密切。HU 等^[36]通过野外监测黑土区 1 条典型切沟发现,2004 年经历冻融期后该切沟沟壁拓宽 0.45 m。具有一定深度和宽度的切沟为沟壁冻融崩塌提供空间条件,而冻融崩塌又使得切沟拓宽,如此循环,二者相互促进。

3.3 沟壁冻融崩塌对切沟侵蚀的贡献

沟底下切和沟壁崩塌是切沟体积土壤流失量的主要贡献者^[37]。WU 等^[35]于 2002—2005 年在鹤北小流域研究发现,切沟侵蚀的泥沙产量为 257~1 854 m³/a,其中,由于沟头后退产生的侵蚀量占比 0~21.70%。本研究调查所得沟壁冻融崩塌量为 60.85 m³/a,如果以上述研究结果为参照,那么可以得到沟壁冻融崩塌在切沟侵蚀产沙量中占比为 3.28%~23.68%。此外,东北地区的切沟除受降雨侵蚀影响外,还遭受每年一度的融雪侵蚀。XU 等^[38]研究发现,融雪期土壤流失量 98.1%来自切沟融雪侵蚀;HUANG 等^[39]研究认为,融雪导致的切沟侵蚀是东北黑土区春季融雪期的主要产沙来源。而沟壁崩塌下来的土壤为融雪径流的搬运提供物质来源,这也间

接表明沟壁冻融崩塌对于切沟侵蚀的贡献之大。

4 结论

(1)2 种冻融崩塌类型在切沟内随机发生,单点冻融崩塌量主要集中在 0~3 m³,但块状崩塌产生更大的土方量。沟壁冻融崩塌占切沟侵蚀泥沙产量的 3.28%~23.68%,其影响与沟头溯源侵蚀相当。

(2)冻融崩塌与切沟形态显著相关,随断面宽度和深度增加,崩塌量均呈幂函数形式增加。块状崩塌与沟深相关性更大。

(3)冻融崩塌量与沟壁土壤力学性质无显著相关性。同属于土壤力学性质的剪切力和硬度间存在显著正相关。

参考文献:

- [1] BARNES N, LUFFMAN I, NANDI A. Gully erosion and freeze-thaw processes in clay-rich soils, northeast Tennessee, USA[J].*GeoResJ*,2016,9/10/11/12:67-76.
- [2] SEGNER I. Gully development and sediment yield[J].*Journal of Hydrology*,1966,4:236-253.
- [3] BLONG R J, GRAHAM O P, VENESS J A. The role of sidewall processes in gully development; some N.S.W. examples [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*,1982,7(4):381-385.
- [4] POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J].*Catena*,2003,50(2/3/4):91-133.
- [5] 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.
- [6] SIDORCHUK A. Dynamic and static models of gully erosion[J].*Catena*,1999,37(3/4):401-414.
- [7] WELLS R R, MOMM H G, RIGBY J R, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows[J].*Catena*,2013,101:114-121.
- [8] DONG Y F, WU Y Q, QIN W, et al. The gully erosion rates in the black soil region of northeastern China: Induced by different processes and indicated by different indexes[J].*Catena*,2019,182:e104146.
- [9] ZHANG X Y, QI J R, XU J Z, et al. Root distribution and soil properties of gully heads and their effects on headcut migration in the mollisols region of Northeast China[J].*Land*,2022,11(2):e184.
- [10] ZHOU P C, GUO M M, ZHANG X Y, et al. Quantifying the effect of freeze-thaw on the soil erodibility of gully heads of typical gullies in the Mollisols region of

- Northeast China[J].*Catena*,2023,228:e107180.
- [11] BOCCO G. Gully erosion: Processes and models[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1991,15(4):392-406.
- [12] MARTINEZ-CASASNOVAS J A, RAMOS M C, POESEN J. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis[J].*Geomorphology*,2004,58(1):305-321.
- [13] COLLISON A J C. The cycle of instability: Stress release and fissure flow as controls on gully head retreat [J].*Hydrological Processes*,2001,15(1):3-12.
- [14] BULL L J, KIRKBY M J. Channel heads and channel extension [C]. BULL L J, KIRKBY M J. *Dryland Rivers: Hydrology and geomorphology of semi-arid channels* [M]. Wiley, Chichester, England, 2002: 263-298.
- [15] POESEN J, VANDEKERCKHOVE L, NACHTER-GAELE J, et al. Gully erosion in dryland environments [C]. BULL L J, KIRKBY M J. *Dryland Rivers: Hydrology and geomorphology of semi-arid channels*[M]. Wiley, Chichester, England,2002:229-262.
- [16] WEN Y R, JIANG H, KASIELKE T, et al. Prewinter soil water regime affects the post-winter cracking position on gully sidewall and slumping soil dynamics in Northeast China[J].*Geoderma*,2023,435:e116508.
- [17] POESEN J. Gully typology and gully control measures in the European loess belt[M]//*Farm Land Erosion*. Amsterdam: Elsevier,1993:221-239.
- [18] 高敏,李艳霞,张雪莲,等.冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望[J].*农业环境科学学报*, 2016,35(12):2269-2274.
- GAO M, LI Y X, ZHANG X L, et al. Influence of freeze-thaw process on soil physical, chemical and biological properties: A review[J].*Journal of Agro-Environment Science*,2016,35(12):2269-2274.
- [19] KACZMAREK H, BARTCZAK A, TYSZKOWSKI S, et al. The impact of freeze-thaw processes on a cliff recession rate in the face of temperate zone climate change [J].*Catena*,2021,202:e105259.
- [20] LI G Y, FAN H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China [J].*Pedosphere*,2014,24(2):285-290.
- [21] XIE S B, QU J J, LAI Y M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau[J].*Journal of Mountain Science*,2015,12(4):999-1009.
- [22] ZHANG L, REN F P, LI H, et al. The influence mechanism of freeze-thaw on soil erosion: A review[J].*Water*,2021,13(8):e1010.
- [23] 张科利,刘宏远.东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望 [J].*中国水土保持科学*,2018,16(1):17-24.
- ZHANG K L, LIU H Y. Research progresses and prospects on freeze-thaw erosion in the black soil region of Northeast China[J].*Science of Soil and Water Conservation*,2018,16(1):17-24.
- [24] EDWARDS L M, BURNEY J R. Soil erosion losses under freeze/thaw and winter ground cover using a laboratory rainfall simulator[J].*Canadian Agricultural Engineering*,1987,29:109-115.
- [25] ØYGARDEN L. Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway [J]. *Catena*, 2003,50(2/3/4):217-242.
- [26] NADAL-ROMERO E, LATRON J, MARTÍ-BONO C, et al. Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland area: The Araguás Catchment, Central Pyrenees[J].*Geomorphology*,2008,97(3/4):601-616.
- [27] LUFFMAN I, NANDI A. Freeze-thaw induced gully erosion: A long-term high-resolution analysis [J]. *Agronomy*,2019,9(9):e549.
- [28] 尹佳宜,伍永秋,汪言在.采用不同方法测量切沟的误差分析[J].*水土保持研究*,2008,15(1):12-16.
- YIN J Y, WU Y Q, WANG Y Z. Error analysis of gullies' measurement with different methods[J].*Research of Soil and Water Conservation*,2008,15(1):12-16.
- [29] DENG Q C, QIN F C, ZHANG B, et al. Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley[J].*Geomorphology*, 2015,228:703-713.
- [30] WANG R H, ZHANG S W, PU L M, et al. Gully erosion mapping and monitoring at multiple scales based on multi-source remote sensing data of the Sancha River catchment, Northeast China [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*,2016,5(11):e200.
- [31] RAHMATI O, TAHMASEBPOUR N, HAGHIZADEH A, et al. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework[J]. *Science of the Total Environment*,2017,579:913-927.
- [32] HU G, WU Y Q, LIU B Y, et al. Short-term gully retreat rates over rolling hill areas in black soil of Northeast China[J].*Catena*,2007,71(2):321-329.
- [33] 董一帆,伍永秋.利用虚拟插针对切沟沟底不同部位短期变化的初步研究[J].*地理科学*,2010,30(6):892-897.
- DONG Y F, WU Y Q. Short-term gully erosion at different places of bottom of gully using virtual erosion pins[J].*Scientia Geographica Sinica*,2010,30(6):892-897.

- of simulated nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen content in plantation and natural forests of *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 88-94.
- [47] 刘永万, 白炜, 尹鹏松, 等. 外源氮素添加对长江源区高寒沼泽草甸土壤养分及植物群落生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 483-491.
LIU Y W, BAI W, YIN P S, et al. Effects of exogenous nitrogen addition on soil nutrients and plant community biomass in alpine swamp meadow in the headwaters region of the Yangtze River [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 483-491.
- [48] BROWN R W, CHADWICK D R, BENDING G D, et al. Nutrient (C, N and P) enrichment induces significant changes in the soil metabolite profile and microbial carbon partitioning [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 172: e108779.
- [49] 杨建琴. 松嫩草地土壤微生物量碳、氮对模拟增温及氮沉降的响应[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
YANG J Q. Response of soil microbial biomass and nutrient to simulated warming and nitrogen application in Songnen grassland [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2011.
- [50] 尹鹏松. 青藏高原高寒沼泽草甸土壤酶活性与有机碳分布特征对增温与施氮的响应[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
YIN P S. Responses of soil enzyme activity and organic carbon distribution characteristics to warming and nitrogen application in alpine swamp meadow on the Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [51] 伍昱飞. 增温及外源氮添加对大兴安岭多年冻土区活动层土壤理化性质及酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2021.
WU Y F. Effects of Warming and exogenous nitrogen addition on soil physical and chemical properties and enzyme activities in active layer of permafrost in Daxing' an Mountains [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2021.
- [52] 姚兰, 张焕朝, 胡立煌, 等. 黄山不同海拔植被带土壤活性有机碳、氮及其与酶活性的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1069-1076.
YAO L, ZHANG H C, HU L H, et al. Soil labile organic carbon and nitrogen and their relationship with enzyme activities in different vegetation zones along an altitudinal gradient on Mount Huangshan [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36(6): 1069-1076.
- [53] 奚晶阳, 白炜, 尹鹏松, 等. 模拟增温对长江源区高寒沼泽草甸土壤有机碳组分与植物生物量的影响研究[J]. 生态科学, 2019, 38(1): 92-101.
XI J Y, BAI W, YIN P S, et al. Effects of simulated warming on soil organic carbon composition and biomass in alpine swamp meadow in the headwaters region of the Yangtze River [J]. Ecological Science, 2019, 38(1): 92-101.
- (上接第 117 页)
- [34] ZHANG S L, WANG X R, XIAO Z L, et al. Quantitative studies of gully slope erosion and soil physiochemical properties during freeze-thaw cycling in a Mollisol region [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 707: e136191.
- [35] WU Y Q, ZHENG Q H, ZHANG Y G, et al. Development of gullies and sediment production in the black soil region of northeastern China [J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 683-691.
- [36] HU G, WU Y Q, LIU B Y, et al. The characteristics of gully erosion over rolling hilly black soil areas of Northeast China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(3): 309-320.
- [37] TANG J, XIE Y, WU Y Q, et al. Influence of precipitation change and topography characteristics on the development of farmland gully in the black soil region of Northeast China [J]. Catena, 2023, 224: e106999.
- [38] XU J Z, LI H, LIU X B, et al. Gully erosion induced by snowmelt in Northeast China: A case study [J]. Sustainability, 2019, 11(7): e2088.
- [39] HUANG D H, SU L, ZHOU L L, et al. Gully is the dominant sediment source of snowmelt erosion in the black soil region: A case study [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: e105232.