

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2025.03.032

CSTR: 32310.14.stbxb.2025.03.032

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 Huimiao, ZHANG Yan, GUO Haiyan, 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.

东北典型黑土区不同级别沟道形态特征分析

邢慧淼, 张岩, 郭海燕, 欧俊杉, 杨润泽

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 通过解析东北典型黑土区小流域沟系特征和不同级别沟道形态差异, 探索侵蚀沟和河道划分方法。[方法] 选取黑龙江省宾县典型黑土分布区的小流域 (14.59 km²), 基于无人机影像及其生成高精度数字高程模型, 利用 Strahler 河网分级法对永久性沟道进行分级。[结果] 小流域沟道线密度为 3.87 km/km², 各级沟道数量随着等级增加呈指数递减趋势。1 级沟道数量占比最高 (64.60%), 2 级沟道的长度和面积占比最大 (分别为 37.62% 和 29.57%), 4 级以上沟宽明显增大, 5~6 级的沟长、沟宽和面积均明显高于低等级沟道, 4~6 级沟道沟深逐渐增加, 1~3 级沟道截面以“V”形和“V~U”形为主。1~3 级沟道为切沟, 5 级和 6 级沟道均为河道, 4 级既有沟道也有河道。[结论] 河网分级法可以用于划分黑土区小流域沟道级别, 切沟和河道在形态上具有显著差异, 研究结果可以为侵蚀沟分类提供参考。

关键词: 河网分级; 沟道; 切沟; 河道; 黑土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0027-07

Analysis of the Morphological Characteristics of Channels at Different Levels in a Typical Black Soil Region of Northeast China

XING Huimiao, ZHANG Yan, GUO Haiyan, OU Junshan, YANG Runze

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to analyze the channel characteristics in a typical small watershed in the black soil region in northeast China, and to explore the methods for distinguishing gullies and stream channels. [Methods] A small watershed (14.59 km²) in the typical black soil region of Bin County, Heilongjiang Province, was selected as the study area. Based on drone imagery and the high-resolution digital elevation model, the Strahler's stream order method was used to classify permanent channels. [Results] The channel density in the watershed was 3.87 km/km², and the number of channels in the small watershed decreased exponentially as the stream order increased. The proportion of level 1 channels was the highest (64.60%), while the length and area of level 2 channels accounted for the largest proportion, 37.62% and 29.57%, respectively. Channels at levels 4 and above had significantly greater width, length, and area than those at lower levels. Channel depth gradually increased from level 4 to level 6. The cross sections of channels at levels 1 to 3 were primarily "V"-shaped or "V~U"-shaped. All level 1 to 3 channels were classified as erosion gullies, and level 5 and 6 channels were classified as stream channels, while level 4 channels exhibited characteristics of both. [Conclusion] The Strahler stream order method is applicable for classifying channels in small watersheds of black soil regions. Erosion gullies and stream channels show distinct morphological differences. The findings provide a reference for erosion classification and management.

Keywords: river network classification; channel; erosion gully; stream channel; black soil region

Received: 2024-12-11

Revised: 2025-02-18

Accepted: 2025-03-01

Online (www.cnki.net): 2025-04-10

收稿日期: 2024-12-11

修回日期: 2025-02-18

录用日期: 2025-03-01

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-04-10

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD1501200)

第一作者: 邢慧淼 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态环境遥感研究。E-mail: 1326212436@qq.com

通信作者: 张岩 (1970—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhangyan9@bjfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

东北黑土区是全球四大黑土区之一,因其肥沃的腐殖质表土层成为优质的耕地^[1],是我国重要的粮食产业基地。然而近百年的大范围垦殖导致黑土地严重退化,造成土层剥蚀、养分流失及耕地破碎化等严重问题^[2],东北黑土区正在从“生态功能区”向“生态脆弱区”转变^[3]。根据中国水土保持公报^[4],50 m 以上沟道多达 66.67 万条,总长度 23.24 万 km,发展沟占比 88.43%。因此,深入开展沟道发育特征研究对于东北黑土区水土保持具有重要意义。

受到冻融、降雨等自然因素的多重作用^[5-7],以及长期耕作的影响,东北黑土区沟道主要分布在漫川漫岗和丘陵区,具有数量大、分布广等特点^[8],沟道形态特征差异大,类型多样。关于东北黑土区沟道分类方法,刘从坦等^[9]使用深度、宽度、坡度等指标将沟道分为 5 类;姜芸等^[10]根据沟谷发育阶段、规模和纵剖面形态特征等,结合东北地区地形及耕作特点将沟道分为 4 类。不同学者的分析与评判角度不同,造成黑土区沟道的分类并没有形成统一标准。大部分公开发表的文献中只区分浅沟和切沟,对于黑土区是否存在冲沟也有争议。其中,有些研究^[11-12]并未严格区分切沟和河道,文献中的切沟涵盖沟长从几米到十几千米的沟道。关于分级方法,东北黑土区侵蚀沟调查按沟道长度分为 7 级^[4]。不同类型和级别的沟道发生、发育机理有所不同,危害程度和治理措施也不相同,科学的沟道分级分类方法是沟道调查、

监测和精准治理的重要依据。

沟道的精确分类和分级还依赖于高精度测量数据。无人机测量因其时效性强、灵活度高、数据分辨率高等优点^[13-14],为构建高精度数字地形模型,精准提取沟道三维形态参数提供重要数据^[15]。

本研究选取东北典型黑土区的完整小流域(14.59 km²),基于无人机影像及其生成的高精度 DEM 数据(0.13 m)提取全部永久性沟道(不包括浅沟),参照 Strahler 河网分级法^[16]划分沟道级别,解析不同级别沟道数量、形态特征及切沟和河道的形态差异,力求为黑土区沟蚀的精准防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取东北典型黑土分布区^[17]黑龙江省宾县马蛇子河流域的 1 个小流域作为研究区(图 1)。小流域位于宾县宾安镇(45°41′03″~45°44′05″N,127°38′06″~127°42′01″E),面积 14.59 km²。土地类型以耕地为主,沟道侵蚀呈现复杂性和多样性。宾县属于松花江流域,地形主要以漫山漫岗和低山丘陵为主^[18],属于寒温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 -7~11℃,多年平均降水量 570 mm,从影像上能确认研究流域有秸秆覆盖,耕作方式既有顺坡起垄也有横坡起垄,土壤类型以暗棕土、黑土为主,土壤母质发育于第四纪黄土状沉积物,发育深度为 30~100 cm^[19],小流域土地利用以耕地为主,主要种植玉米和大豆。

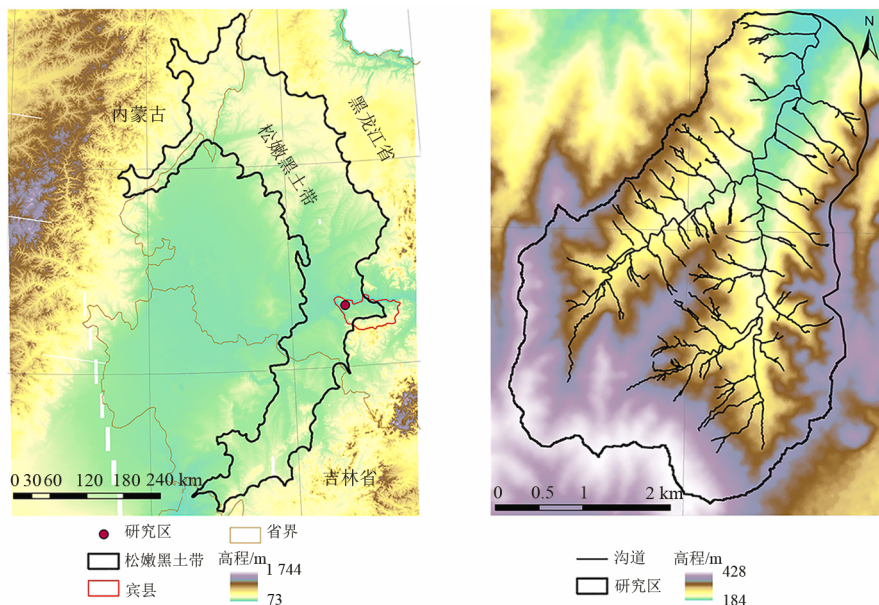


图 1 研究区位置

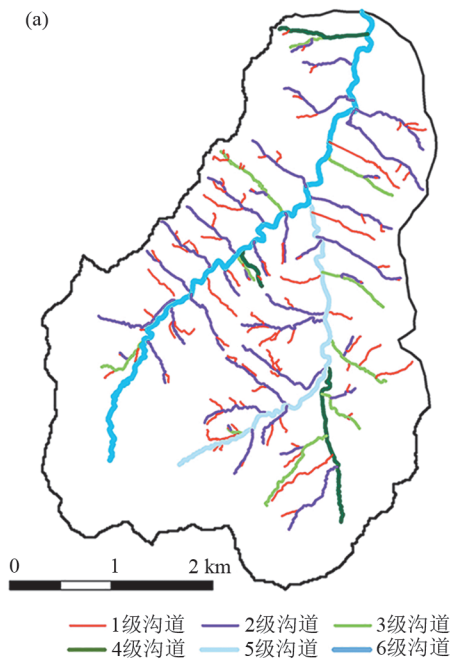
Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源

多期无人机影像数据主要拍摄于 2022 年 10 月,2024 年 6 月及 2024 年 10 月进行部分补拍。使用 DJI

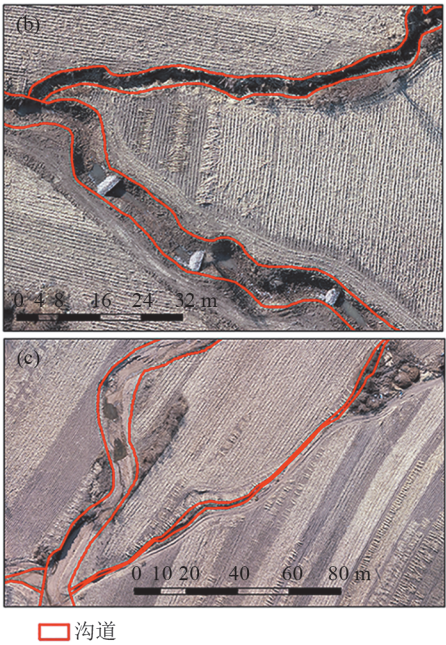
大疆精灵无人机进行拍摄,为确保飞行稳定及良好的光照条件,选择在晴朗无风的天气进行拍摄。无人机在 500 m 的高度上飞行,横向和纵向重叠率都

设置为 70%,地面分辨率为 0.13 m。得到航拍相片后,使用 Pix4Dmapper 无人机影像处理软件对其进行拼接,获得原始影像,经过图像预处理、空中三角测量、正射镶嵌 3 部分,得到正射影像(DOM)和数字表面模型(DSM),通过点云滤波去除植被干扰,得到分辨率为 0.13 m 的数字高程模型(DEM)。坐标系采用 WGS_1984_UTM_Zone_52N,高斯-克吕格投影。



1.3 沟道分级方法

Strahler 河网分级法是一种基于河流汇流结构的河流分类系统,旨在通过定义河流的等级来研究河流的水文特性^[16]。本研究以 Strahler 河网分级法的原理为基础,设没有支沟的沟道等级为 1 级,相同等级的沟道交汇时,交汇的沟道等级提升 1 级,若不同级别的沟道交汇,等级选取较高者,结果见图 2。



注:图 a 为沟道河网分级结果;图 b、图 c 为不同类型沟道解译结果,底图为无人机影像。

图 2 沟道河网分级

Fig. 2 Classification of the channel network

1.4 沟道形态参数的提取与统计分析

对于浅沟和切沟的界定有明确的标准,而且耕地上的浅沟是暂时性沟道,可以被耕作消除,可能在原地重复出现^[20]。本文通过目视解译和对比不同时期的影像,只提取研究区的永久性沟道(包括切沟与河道)。采用 Strahler 河网分级法对沟道进行分级,统计不同级别的数量。

以无人机影像为基础,通过目视解译在研究区内提取沟道的沟缘线,计算沟道面积。使用 ArcGIS 10.8 软件提取沟道中心线,计算沟道沟长。

结合 DEM,使用 ArcGIS 软件计算沟道纵比降(沟道沟头与沟尾高程差与沟长的比值)、宽深比等参数。利用 ArcGIS 10.8 软件在每条沟道上中下游分别截取 3 个剖面,使用 3D Analys 模块下的 Profile Graph 功能生成剖面图^[21],分别测量每个沟道剖面的顶宽、底宽和沟深,进一步依据顶宽和底宽判断沟谷截面的形态。

2 结果与分析

2.1 沟道数量特征

小流域永久性沟道总数为 147 条(表 1),主沟支沟比(流域内主沟道长度与总沟道长度之比)为 1:8.3。1 级沟道数量最大,占总沟道数量的 64.60%,明显高于其他等级沟道。随着等级上升,沟道数量呈指数递减,5 级和 6 级均只有 1 条,仅占 0.7%。2 级沟道占沟道总长度和总面积的比例最大,总长度为 21.26 km,总面积 9.88 hm²,分别占比 37.62% 和 29.57%,表明该流域正处于壮年期侵蚀阶段。2 级沟道作为主干支流,既继承 1 级沟道的溯源侵蚀特征,又通过侧蚀扩张形成规模优势。4 级沟道的长度和面积占比均最低,为规模分布的转折点,可能对应着流域内切沟与河道的过渡。6 级沟道虽然只有 1 条,但长度和面积占比分别为 11.97% 和 27.66%,说明高级别沟道具有更显著的横向扩展能力。小流域总的沟道密度为 3.87 km/km²,其中,2 级沟道的线密度最高,为 1.42 km/km²。4 级沟道的线密度最低,为 0.19 km/km²。

表 1 沟道数量特征

Table 1 Statistics of the number of channels at each level

沟道级别	数量/条	占比/%	沟长			面积		
			长度/km	占比/%	线密度/ (km·km ⁻²)	面积/hm ²	占比/%	面密度/ (m ² ·km ⁻²)
1 级	95	64.60	15.33	27.15	1.02	6.29	18.83	4 337.93
2 级	37	25.20	21.26	37.62	1.42	9.88	29.57	6 813.79
3 级	10	6.80	6.31	11.17	0.42	2.42	7.24	1 668.97
4 级	3	2.00	2.86	5.06	0.19	1.19	3.56	820.69
5 级	1	0.70	3.98	7.04	0.27	4.39	13.14	3 027.59
6 级	1	0.70	6.76	11.97	0.44	9.24	27.66	6 372.41

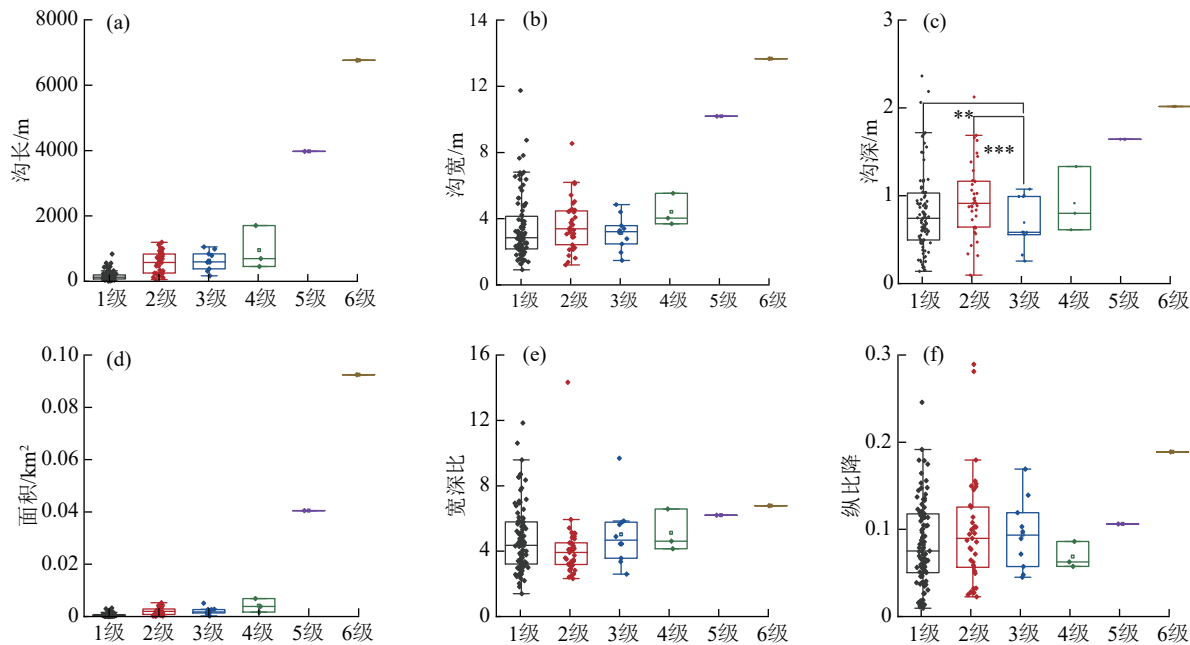
2.2 不同级别沟道形态参数比较

随着沟道等级的增加,平均沟长和面积显著增大(表 2 和图 3)。1 级沟道的平均沟长最短,平均面积最小,与更高级别的沟道差异很大。2 级、3 级沟道的平均沟长和面积差异不大。4 级沟道相较于 2 级、3 级沟道长度和面积进一步增大。1 级到 3 级的沟长和面积的变异系数逐级递减。1 级沟道的沟长和面积变异系数高达 85% 和 112%,高度离散。2 级和 3 级沟道的规模接近但变异系数下降,表明沟道侵蚀进入稳定扩展期。4 级以上沟道数量少,难以反映真实的离散程度。

表 2 沟道沟长与面积

Table 2 Statistics of channel length and area

级别	沟长/m					面积/m ²				
	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
1 级	9.47	837.18	161.46	138.04	0.85	8.44	3 429.17	661.77	743.92	1.12
2 级	52.92	1 194.49	574.52	317.04	0.55	62.57	10 302.43	2 669.14	2 003.16	0.75
3 级	170.04	1 052.77	631.01	289.66	0.46	297.54	4 811.98	2 416.81	1 569.42	0.65
4 级	455.36	1 707.00	952.42	664.37	0.70	2 175.57	6 412.31	3 981.18	2 186.54	0.55
5 级			3 975.24					43 903.03		
6 级			6 762.32					92 428.83		



注:箱体的上下边缘为分位数,箱体实线为中位数,正方形为平均值,箱体外的上下短横线为最大最小值。

图 3 各级沟道形态参数统计

Fig. 3 Morphological parameters of channels at each level

由图 3 可知,2 级沟道的平均沟深大于 1、3 和 4 级,且变异系数最小,为 29%,可能因沟底淤积使表观沟头溯源切割强烈。3 级沟道沟深显著小于 1 级和 2 级,深度减小,4~6 级沟道样本数少,但平均沟深逐级增

大。沟道宽深比呈逐级递增趋势,表明沟道形态由狭窄型向宽浅型逐渐演化,进入横向扩展成熟期。从沟道纵比降来看,1~3级逐级递增,4级沟道平均比降最小,4~6级又是逐级递增,原因有待进一步研究。

总体来看,沟宽随等级的增加而增大。1~3级的沟宽集中分布于较低范围,其中3级沟道变异系数为0.31,分布最为集中,反映流域中低等级沟道的形成条件相对一致。但从4级开始,沟宽平均值明显增大,特别是5级与6级的沟宽远高于1~4级,符合常见的侵蚀过程,随着侵蚀加剧,沟道逐渐扩展。随着沟道级别的升高,顶宽和底宽均逐渐增大(图4)。1~3级沟

道沟顶宽大部分 <4.0 m,4~6级沟道中,顶宽6~8 m的比例逐级增大。在1~3级沟道中,约80%的沟底宽 <1.5 m,4级沟道沟底宽均超过1.0 m,5级沟道底宽为2.72 m,6级沟道底宽达到7.66 m。沟道的底宽顶宽比是沟道截面形态的重要指标,能反映沟蚀过程的环境特征。根据底宽顶宽比可将截面形态分为“V”形(0~0.4)、“V~U”形(0.4~0.6)和“U”形(0.6~1.0)^[22]。由图5可知,1、2级沟道的“V”形比例接近40%，“U”形较少;3级沟道中“V”形比例只有20%，“V~U”形占比近70%;4级沟道3种类型各有1条;5级沟道上游为“V~U”形,下游为“U”形;6级沟道为“U”形。

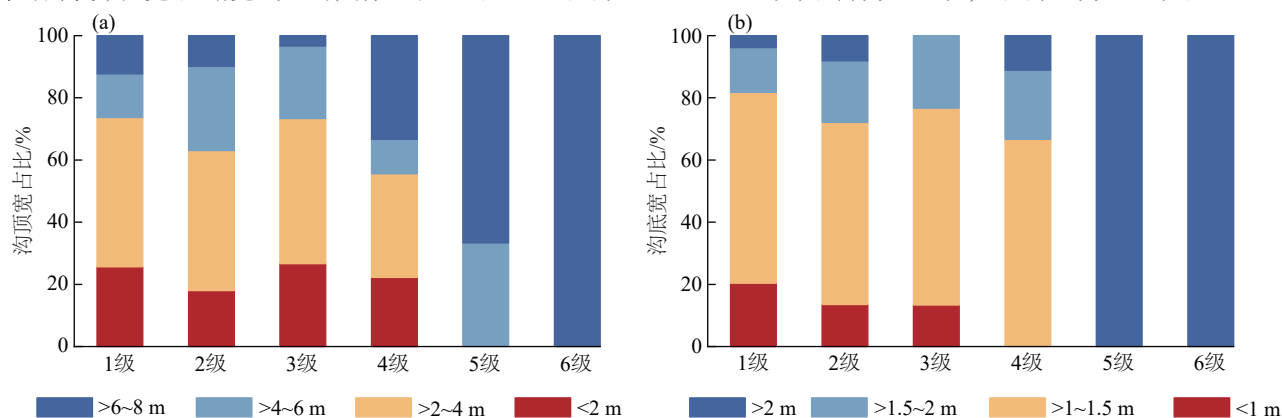


图4 各级沟道顶宽和底宽的频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of the top and bottom widths of channels at each level

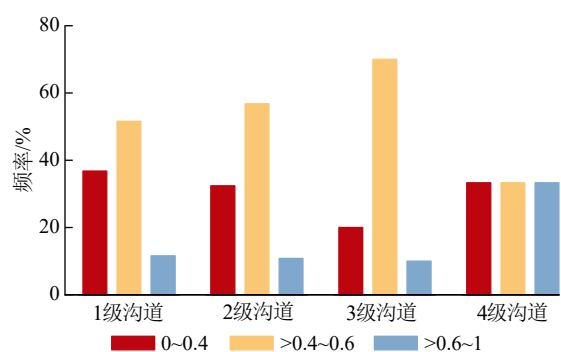


图5 1~4级沟道底宽顶宽比的频率分布

Fig. 5 Frequency distribution of ratios of bottom width to top width of level 1~4 channels

2.3 切沟和河道划分

准确区分切沟和河道对于侵蚀沟调查和治理具有重要意义,但切沟和河道在形态参数上没有明确的区分标准。根据 THWAITES 等^[23]提出的指标:河道是由流动的水(季节性或常年性)通过侵蚀和沉积形成的永久性特征,存在河床、河流阶地和河漫滩等;切沟与河道相比较短,且可以独立存在;河道宽深比 >1 。本研究中的沟道宽深比数据均 >1 ,无法依据宽深比区分切沟和河道。按照单一指标(季节性或常年性流水)分类,1~3级沟道均为切沟,5、6级沟道均为河道。在3条4级沟道中有1条为河道(图2

中最长的4级沟道),截面形态为“U”形,明显不同于另外2条切沟,其沟长、面积和宽深比均远大于同级的2条切沟。

3 讨论

黑土区沟蚀危害严重,沟道分级和分类是沟蚀监测和防治的重要依据。切沟是最活跃的侵蚀沟,是沟蚀防治的重点,而河道属于河网系统,区分切沟和河道对于提高侵蚀沟防治的针对性十分必要。受地域差异的影响,黑土区并不能完全照搬黄土区的侵蚀沟分类体系,到目前为止还没有形成统一的分级分类标准。难点在于切沟的规模和形态差异巨大^[24-25],导致较大的切沟与河道难以区分。

李全峰等^[26]使用面积、长度和宽度等指标建立耕地侵蚀沟“类+等+型”的分类定级方法,揭示耕地侵蚀沟的形态特征及其危害情况。河网分级方法对沟道的分类有重要的启示作用^[27],优势是能够反映不同级别沟道的发展阶段,结合沟道流水特征明确区分切沟和河道。研究区1~3级沟道全部为切沟,尤其是1级沟道数量大,进一步发育的风险较大,应作为重点监测和治理对象。本研究可为东北黑土区沟道分级、分类及侵蚀沟治理提供参考。

在黄土区,坡面上的侵蚀沟可能呈现上坡为细

沟、中坡为浅沟、下坡为切沟的特点,即一条侵蚀沟可以具备多种类型^[28]。黑土区类似情况。从沟蚀治理的角度,如果一条沟道的不同区段形态差异明显,理论上应该划分为不同类型。冲沟是黄土高原典型的沟道类型,对黄土高原的土壤侵蚀调查和治理十分重要,但在其他地区很难一一对应^[29],在黑土区是否存在冲沟还需要进一步研究。

4 结 论

1)研究流域的沟道划分为6级,各级数量随着等级增加呈指数递减趋势。1级沟道数量占比最高,达64.60%。2级沟道在长度和面积上占比最大,分别为37.62%和29.57%。流域沟道总密度为3.87 km/km²,2级沟道的线密度为1.42 km/km²,明显高于其他级别沟道,在区域水土流失中占有重要地位。

2)各级沟道形态逐级演化。1级沟道的平均沟长和面积最小。2、3级沟道的平均沟长和面积差异不大。1~3级的沟宽较小,4级以上沟宽明显增大。1~3级沟道中90%属于“V”形和“V~U”形,但“V”形逐级递减。“U”形逐级增加,5级沟道上游为“V~U”形,下游为“U”形,6级沟道为“U”形。沟道宽深比和纵比降逐级递增,显示出沟道形态的逐步演化过程。特别是4级以上的沟道,呈明显的河道特征,其宽度和深度的增加表明沟道的成熟与稳定性逐渐增强。

3)1~3级沟道全部为切沟,4级中1/3为河道,5、6级沟道均为河道。切沟与河道在沟长、沟宽、宽深比和截面形态等方面差异明显,在流域演化过程中的转变明显。

4)1级沟道数量大,但沟长和面积较小,进一步发育的风险较大,应作为重点监测和治理对象;2级沟道在长度和面积上占比最大,是小流域水土流失的主要策源地,应采取有效的措施加以防控。

参考文献:

- [1] LIU X B, LEE BURRAS C, KRAVCHENKO Y S, et al. Overview of mollisols in the world: Distribution, land use and management [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(3): 383-402.
- [2] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020) [R/OL]. (2021-07-09) [2024-01-18]. https://www.cas.cn/cm/202107/t20210712_4798122.shtml.
Chinese Academy of Sciences. White paper on northeast blackland (2020) [R/OL]. (2021-07-09) [2024-01-18]. https://www.cas.cn/cm/202107/t20210712_4798122.shtml.
- [3] 韩晓增,李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. *地理科学*, 2018, 38(7): 1032-1041.
HAN X Z, LI N. Research progress of black soil in north-

east China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1032-1041.

- [4] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2022年) [EB/OL]. [2023-08-25]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202308/t20230825_1680719.html.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China soil and water conservation bulletin (2022). [EB/OL]. [2023-08-25]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202308/t20230825_1680719.html.
- [5] 张兴义,刘晓冰. 东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 320-326.
ZHANG X Y, LIU X B. Current scenario of gully erosion and its control strategy in mollisols areas of northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(3): 320-326.
- [6] 王岩松,王念忠,钟云飞,等. 东北黑土区侵蚀沟省际分布特征[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 67-69.
WANG Y S, WANG N Z, ZHONG Y F, et al. Inter-provincial distribution characteristics of erosion gully in black soil region of northeast China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10): 67-69.
- [7] 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.
- [8] 范昊明,王铁良,蔡强国,等. 东北黑土漫岗区侵蚀沟发展模式研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(6): 328-330.
FAN H M, WANG T L, CAI Q G, et al. Gully erosion developing model in the gentle hilly black soil regions in northeast China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(6): 328-330.
- [9] 刘从坦,范昊明. 基于统计学模型的沟道侵蚀敏感性评估的研究进展与展望[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(4): 29-40.
LIU C T, FAN H M. Research advances and prospects on gully erosion susceptibility assessment based on statistical modeling [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(4): 29-40.
- [10] 姜芸,王军,张莉. 东北典型黑土区侵蚀沟形态及分布特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 157-165.
JIANG Y, WANG J, ZHANG L. Morphology and distribution characteristics of erosion gully in the typical black soil region of northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(7): 157-165.
- [11] 张俊彬,张岩,李坤衡,等. 基于高分七号立体影像提取松嫩典型黑土区切沟和浅沟的精度分析[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(4): 152-161.
ZHANG J B, ZHANG Y, LI K H, et al. Accessing accuracy of extracting gully and ephemeral gully in the Songnen typical black soil region based on GF-7 satellite images [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(4): 152-161.
- [12] 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.
- [13] ELTNER A, BAUMGART P, MAAS H G, et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(6):741-755.
- [14] NEUGIRG F, KAISER A, SCHMIDT J, et al. Quantification, analysis and modelling of soil erosion on steep slopes using LiDAR and UAV photographs[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 367:51-58.
- [15] 王琼,方怒放.切沟形态特征无人机倾斜摄影测量[J].农业工程学报,2022,38(8):107-114.
WANG Q, FANG N F. Monitoring the morphological characteristics of gully using UAV oblique photogrammetry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(8):107-114.
- [16] STRAHLER A N. Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(11):e1117.
- [17] 刘宝元,张甘霖,谢云,等.东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J].科学通报,2021,66(1):96-106.
LIU B Y, ZHANG G L, XIE Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(1):96-106.
- [18] 阎百兴,杨育红,刘兴土,等.东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J].中国水土保持,2008(12):26-30.
YAN B X, YANG Y H, LIU X T, et al. Present situation and evolution trend of soil erosion in black soil region of northeast China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12):26-30.
- [19] 彭珏,龙凌,郭忠录,等.东北黑土区侵蚀农田土壤质量指数构建及其空间分异[J].农业工程学报,2024, 40(15):54-64.
PENG Y, LONG L, GUO Z L, et al. Construction and spatial variation of soil quality index in eroded farmland-mollisol of northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(15):54-64.
- [20] 朱显谟.董志原区土壤侵蚀及其分类的初步意见[J].新黄河,1953(9):37-40.
ZHU X M. Preliminary opinions on soil erosion and its classification in Dongzhiyuan district[J]. Yellow River, 1953(9):37-40.
- [21] 李镇,齐志国,秦伟,等.利用高分立体影像构建东北黑土地丘陵沟壑区切沟体积估算模型[J].农业工程学报, 2021, 37(7):122-130.
- LI Z, QI Z G, QIN W, et al. Gully volume estimation model using high-resolution satellite imaging in mountainous and hilly regions with black soil of northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7):122-130.
- [22] 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.
- [23] THWAITES R N, BROOKS A P, PIETSCH T J, et al. What type of gully is that? The need for a classification of gullies[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022, 47(1):109-128.
- [24] LI K H, ZHANG Y, ZHANG J B, et al. Long-term gully dynamics over cropland in the black soil area of China based on systematic sampling[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 244:e106273.
- [25] 郭明明,刘欣,陈卓鑫,等.呼伦贝尔草原切沟形态发育特征与体积估算模型[J].农业工程学报,2024,40(14):81-90.
GUO M M, LIU X, CHEN Z X, et al. Morphological characteristics and volume estimation model of the permanent gully in the Hulunbuir grassland of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(14):81-90.
- [26] 李全峰,李吉程,于明鹏,等.东北典型黑土区耕地侵蚀沟形态系统分类方法构建[J].农业工程学报, 2024, 40(14):53-61.
LI Q F, LI J C, YU M P, et al. Systematic morphological classification method for cultivated land erosion gullies in the typical black soil regions of northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(14):53-61.
- [27] 张楠,张岩,王佳希,等.黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀沟数量及形态特征[J].水土保持学报,2023,37(3):109-115.
ZHANG N, ZHANG Y, WANG J X, et al. Quantity and morphological parameters of gullies in small watersheds in the hilly-gully Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3):109-115.
- [28] GUO M M, YANG B, WANG W L, et al. Distribution, morphology and influencing factors of rills under extreme rainfall conditions in main land uses on the Loess Plateau of China[J]. Geomorphology, 2019, 345:e106847.
- [29] 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.