引文格式:李珊珊,王春梅,唐杰,等.东北黑土区典型小流域浅沟向切沟发育及其地形临界研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):345-356.DOI:10.13203/j.whugis20230493

Citation: LI Shanshan, WANG Chunmei, TANG Jie, et al. Development Processes from Ephemeral to Permanent Gullies and Their Critical Terrain Thresholds in a Typical Watershed of the Mollisol Region, Northeast China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(2):345-356.DOI:10.13203/j.whugis20230493

东北黑土区典型小流域浅沟向切沟发育及其地形临界研究

李珊珊[1,2] 王春梅[1,2] 唐 杰[3] 龙永清[1,2] 张先华[4]
杨安南[3] 申华珍[1,2]

1 西北大学城市与环境学院,陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安,710127
2 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,陕西 西安,710048
3 北京师范大学未来技术学院,广东 珠海,519087
4 北大荒集团黑龙江鹤山农场有限公司,黑龙江 黑河,161443

摘 要:浅沟和切沟是黑土区主要的侵蚀沟类型。侵蚀沟治理目前以被动治理切沟为主,常忽视浅沟向切沟发育的主动预防,对切沟发育动态过程认识水平不足。以黑龙江省嫩江市鹤北小流域为研究区,基于高分辨率遥感影像和野外实地测量,研究2011—2022年浅沟向切沟发育的动态规律及其发生的地形临界阈值。结果表明:(1)2011—2022年研究区有大量浅沟发育为切沟,占2011年浅沟总长度的23.7%,2022年切沟总长度约50%是由浅沟发育而来,变化速率为16.6 m/(km^2·a);(2)浅沟发育为切沟主要呈间断性分布在流域各子流域沟掌地下游及左右岸坡中下部,少数分布在主沟道两侧;(3)浅沟发育为切沟的地形临界阈值模型为$S\geqslant 0.421A^{-0.252}$,模型准确率为72.7%。研究结果丰富了黑土区侵蚀沟发育规律认识,为东北黑土区浅沟向切沟转化风险识别与切沟防治提供了理论依据。

关键词:东北黑土区;坡度;汇水面积;地形临界模型;浅沟;切沟

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-08

DOI:10.13203/j.whugis20230493 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0345-12

Development Processes from Ephemeral to Permanent Gullies and Their Critical Terrain Thresholds in a Typical Watershed of the Mollisol Region, Northeast China

LI Shanshan[1,2] *WANG Chunmei*[1,2] *TANG Jie*[3] *LONG Yongqing*[1,2] *ZHANG Xianhua*[4]
YANG Annan[3] *SHEN Huazhen*[1,2]

1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China
2 Key Laboratory of Ecohydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China
3 School of Technology and Sustainability, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China
4 Beidahuang Group Heilongjiang Heshan Farm Co., Ltd., Heihe 161443, China

Abstract: **Objectives**: Gully erosion has become a critical issue in the mollisol region of Northeast China, severely degrading black soil resources and threatening national food security. Ephemeral and permanent gullies are the main erosion gullies in this region. Current gully control strategies mainly focus on treating permanent gullies, while insufficient attention has been paid to preventing the transformation of ephemeral gullies into permanent gullies, largely due to a limited quantitative understanding of this process. This re-

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1500600)。

第一作者:李珊珊,硕士生,研究方向为土壤侵蚀空间分异。lishanshan2@stumail.nwu.edu.cn

通信作者:王春梅,教授。cmwang@nwu.edu.cn

search aims to offer a quantitative analysis of the development of ephemeral gullies into permanent gullies in recent years within a typical watershed in the mollisol region of Northeast China. **Methods**: The Hebei watershed in Nenjiang County, Heilongjiang Province, with an area of 28.02 km^2, was selected as the study area. Morphological parameters of ephemeral and permanent gullies from 2011 to 2022 were extracted through visual interpretation of high resolution satellite images and unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. The interpretation accuracy was validated using field measurement data obtained by global navigation satellite system real-time kinematic surveys. Slope and drainage area were derived from a 1 m resolution digital elevation model generated from UAV imagery. Slope and drainage area data were plotted on a double logarithmic coordinate system to construct a slope-area critical terrain threshold model for gully transformation. **Results**: From the analysis of the phenomenon of ephemeral gullies developing into permanent gullies, the development rate, distribution of vulnerable areas, and critical terrain parameters were acquired. The results showed that: (1) From 2011 to 2022, a large number of ephemeral gullies in the study area developed into permanent gullies, accounting for 23.7% of the total ephemeral gully length in 2011. By 2022, the number and total length of permanent gullies increased by factors of 5.5 and 5.0, respectively, compared with those in 2011. Approximately 50% of the permanent gullies originated from ephemeral gullies during the study period, with a length change rate of 16.6 m/(km^2·a); (2) The development of ephemeral gullies into permanent gullies was mainly distributed intermittently in the lower and middle reaches of both banks and in downstream areas of gully heads within sub-watersheds, with a few occurring along both sides of the main channel; (3) A slope-area critical threshold model for gully transformation was established as $S \geqslant 0.421A^{-0.252}$, achieving an overall prediction accuracy of 72.7%. **Conclusions**: High resolution satellite imagery combined with high precision modern surveying and mapping techniques proved effective for identifying and quantifying the transformation of ephemeral gullies into permanent gullies. Ephemeral gullies were rapidly developing into permanent gullies in the Hebei watershed in the mollisol region of Northeast China. The proposed critical terrain threshold model can effectively predict areas vulnerable to gully transformation. Further research incorporating additional controlling factors and different erosion environments is needed to improve the accuracy and applicability of the model.

Key words: mollisol region of Northeast China; slope; drainage area; critical terrain model; ephemeral gully; permanent gully

东北黑土区是中国重要的粮食主产区和商品粮基地[1-3]。然而,受多种自然和人为因素的影响[2],东北黑土区水土流失日益严峻[1,4-5]。沟道侵蚀是东北黑土区水土流失的主要形式之一[6],据东北黑土区侵蚀沟调查数据显示,东北黑土区108.75万km^{2}范围内,侵蚀沟总数为66.67万条,其中100~500 m的侵蚀沟占69.49%[3,7]。侵蚀沟类型以切沟为主。由于其对土壤损害更为明显[8],目前的治理工作主要针对这类侵蚀沟,对于小型切沟的治理及浅沟向切沟发展的预防重视不够。每年仍有大量的浅沟在向切沟发育,需对浅沟向切沟发育问题进行深入研究。《中华人民共和国黑土地保护法》明确指出,应加强侵蚀沟治理[9]。研究黑土区浅沟向切沟发育动态规律及其影响因素对于正确认识黑土侵蚀沟的发生和发育过程具有重要意义,为下一步防治结合型黑土侵蚀沟治理提供关键依据。

浅沟和切沟是黑土区重要的侵蚀沟类型[2]。浅沟是发生于耕地上由集中水流引起的沟道[10],一般深入犁底层(20 cm),宽约30~50 cm,普通耕作工具可以横跨且常被耕作活动填充,但不可被完全消除[11],在耕作填充和侵蚀的长期共同作用下,可形成瓦背状地形[11]或槽形地[12]。切沟一般切破犁底层,其宽度和深度一般超过50 cm,沟槽横断面呈“V”或“U”型,普通耕作工具无法横跨[11]。浅沟若不加以治理,可不断加宽加深形成切沟[13]。在过去20多年中,网络实时动态定位(real-time kinematic,RTK)技术已被广泛应用于测绘、导航和地学研究等领域[14]。同时,无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)在土地及资源调查与分类的应用中也开展了大量研究,弥补了外业工作效率低和成本高的缺点,并且由UAV处理所得数据在外业和内业整合后,可以满足工作精度要求[15]。不同学者对黑土区切沟的发育速

率和影响因素进行了大量研究,基于高精度RTK在东北典型黑土区漫川漫岗地带的鹤山农场进行监测得出,2002—2004年切沟发育速率为3.52~5 m/a[16-17],结合厘米级UAV影像得出2005—2018年切沟发育速率为7.9 m/a[18]。在黑龙江省海伦市,通过RTK实测发现,2018—2019年切沟的长度、面积的发育速率分别为10.56 m/a和253.97 m^2/a[19],切沟发育受气候、土地利用、地形等因素的综合影响[19-21]。在鹤山农场采用GPS与传统测量相结合的方法测量浅沟宽度和深度得出其侵蚀模数可达118~199 $m^3/(km^2 \cdot a)$[22],垄作有助于控制浅沟的初步形成,但也加速了单个浅沟的发育[13]。另外,地形是影响沟蚀速率的关键因素,也是沟蚀发育过程的重要判据[23]。研究者们普遍认为坡度和汇水面积是影响侵蚀沟发育的重要因子[2,22,24],可以通过坡度和汇水面积确定侵蚀沟发育的临界条件。张永光等[25]确定了鹤山农场附近两个小流域浅沟和切沟地形临界模型分别为$S=0.203A^{-0.148}$和$S=0.263A^{-0.141}$。LIU等[26]通过分位数回归建立了黑龙江省海伦市切沟沟头形成的地形临界模型为$S=0.159A^{-0.171}$。

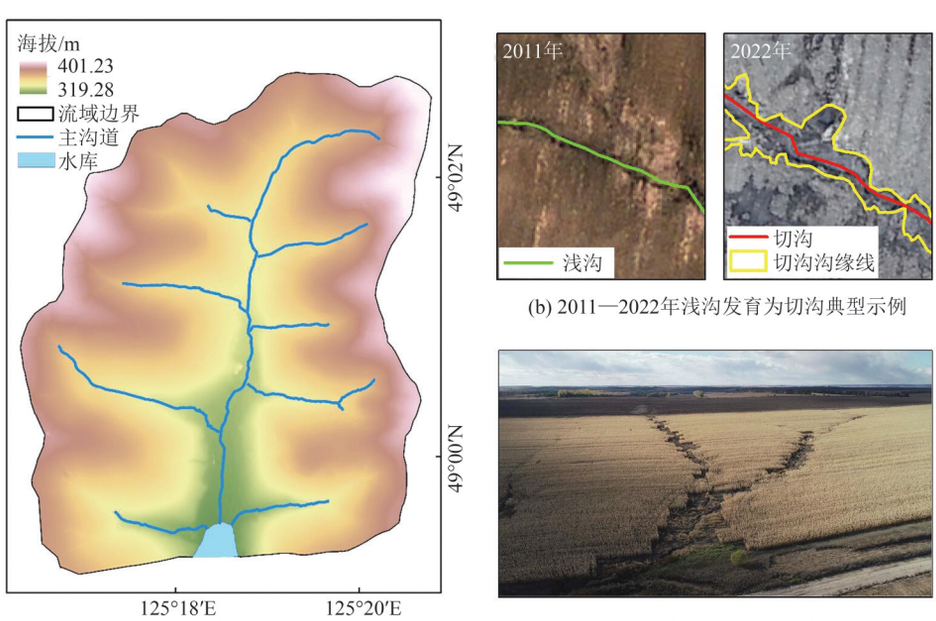
综上,东北黑土区侵蚀沟发育相关研究目前主要体现在浅沟、切沟的发育速率及其影响因素上,且多偏重于切沟。对浅沟的发育规律研究相对较少,尤其对浅沟发育为切沟这一动态过程的针对性分析较少。

本研究拟针对浅沟发育为切沟这一特定的动态类型,在东北黑土区典型小流域内开展2011—2022年的侵蚀沟动态研究。明确浅沟发育为切沟的发育速率、分布规律及地形临界阈值,从而量化浅沟发育为切沟对东北黑土区的重要影响,并给出由浅沟发育为切沟的地形临界阈值。

1　方法

1.1　研究区

研究区为鹤北小流域(图1),面积为28.02 km^2,属黑龙江省嫩江市鹤山农场,由北大荒集团九三分公司管理,是一个以种植大豆、小麦为主的典型现代化机耕小流域[19]。该小流域位于东北漫川漫岗丘陵区,坡缓坡长是其典型的地形特征,坡度在1°~6°之间,坡长为500~4 000 m[2]。研究区属温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,无霜期短,年平均气温-7~11 ℃[2],夏季高温多雨,平均气温19.6 ℃[19]。近50年年均降水量为558.8 mm。2011年降水量为420.2 mm,2022年降水量为559.6 mm,2011—2022年平均降水量为645.4 mm,整体呈增长趋势,增长率为26.1 mm/a,2021年年降水量最大值达到970 mm(据鹤山农场气象站资料)。研究区土壤类型主要为黑土[27],质地黏重,透水性差[2,28]。斜坡和顺坡起垄耕作普遍,近年来侵蚀沟发育迅速,严重影响了农业发展。



(a) 研究区高程图　(b) 2011—2022年浅沟发育为切沟典型示例　(c) 典型侵蚀沟现场照片

图1　研究区

Fig. 1　The Study Area

1.2 基础数据

基础数据包括数字正射影像(digital orthophoto map,DOM)、数字表面模型(digital surface model,DSM)、野外实测数据和现场访谈数据。DOM数据包括QuickBird遥感影像和无人机影像,日期分别为2011-06-24和2022-04-21—2022-04-26,分辨率分别为0.61 m和5 cm。此时研究区处在春种后,或春季融雪后春播前。在这两种高分辨率影像上可以较为清晰地辨识研究区侵蚀沟。DOM和DSM经Pix4Dmapper空三解运算计算得到。随后,对影像进行高斯滤波和重采样处理,获取研究区1 m分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM)。野外实测在2022-04-21—2022-04-28同步无人机数据获取开展,应用全球导航卫星系统实时动态(global navigation satellite system-RTK, GNSS-RTK)进行了侵蚀沟形态参数的高精度实测。GNSS-RTK采用网络RTK技术对侵蚀沟形态参数进行实测,网络RTK作为GNSS应用技术的主流[14],结合虚拟参考站技术实现了大范围的厘米级定位。GNSS接收机动态水平精度为8 mm±2×10^{-6},垂直精度为15 mm±2×10^{-6}。

1.3 侵蚀沟及其动态获取方法

1.3.1 侵蚀沟提取流程

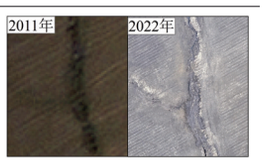
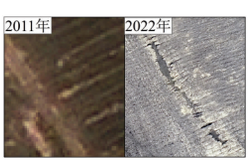
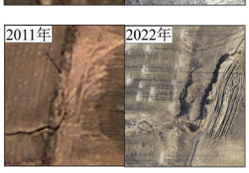
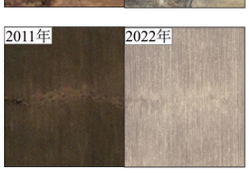
首先建立地理数据库,创建浅沟和切沟的线要素以获取长度和切沟面要素,以及切沟的面积。利用ArcMap对两期影像的浅沟和切沟进行人工目视解译。其次,针对2011年影像上一些不确定的浅沟,结合Google Earth上的历年不同月份的影像进行判断,并建立侵蚀沟解译标志。根据在2022-04已展开的侵蚀沟野外GNSS-RTK和传统测量的实测调查进行精度验证,包括7条典型侵蚀沟沟头点、切沟长度、周长和面积等基本形态参数。基于无人机影像解译的黑土区切沟长度的平均绝对百分比误差为0.35%[29],以野外实测结果修订解译结果。然后,为了进一步保障因不同数据源造成的沟类型转变判断误差,除了参考Google Earth影像,在2023-07到研究区进行了现场访谈,将已解译好的侵蚀沟数据导入到奥维地图,在研究区范围内进行访谈,进一步了解2011—2022年每条沟的发育动态过程,得出研究区侵蚀沟的解译正确率可达90%。最后,根据调查和访谈结果修改先前已经完成解译的侵蚀沟数据,得到符合实际情况的侵蚀沟动态类型分布图。

1.3.2 浅沟、切沟动态发育的分类方法

黑土坡较长,一条汇水线上的侵蚀沟往往会出现浅沟、切沟交错分布的情况。为了区分不同侵蚀沟类型,在目视解译时对每段沟分别记录了编号,将2011年和2022年浅沟、切沟的空间分布进行对比,对每条侵蚀沟分段统计不同动态类型侵蚀沟数量并计算其长度。本研究主要针对研究区2011—2022年4种动态类型进行研究:浅沟发育为切沟、切沟新成、原有切沟发育和无变化,并重点对浅沟发育为切沟的类型进行分析。界定侵蚀沟分段动态类型的标准见表1。

表1 各类侵蚀沟动态类型示意图

Table 1 Illustrations of Gully Erosion Dynamic Types

名称	定义	示意图
浅沟发育为切沟	位置相同,2011年为浅沟,2022年为切沟	
切沟新成	2011年汇流路径上既无浅沟也无切沟,2022年出现了切沟	
原有切沟发育	2011年无浅沟坡面上切沟发育,切沟发育类型包括:沟头前进、沟底下切和沟壁扩张	
无变化	2011年和2022年在相同位置发育的侵蚀沟类型相同,且基本无溯源和扩张	

1.4 沟头地形临界模型构建方法

1.4.1 沟头汇水面积和坡度计算方法

本研究中坡度-汇水面积临界模型中的坡度指的是2022年由浅沟发育而来的切沟沟头处土壤表面的局部坡度[30],其计算步骤为:(1)以沟头点为起点,由低海拔向高海拔方向垂直于等高线绘制坡面线,坡面线的长度可根据距离分水岭的距离而适当变化[31];(2)利用分辨率为1 m的DEM数据,以坡面线上各栅格高程为Y,各高程栅格距坡面线起点距离为X,制作散点图,并进行线性拟合,拟合线斜率为沟头点坡度[31]。沟头汇水面积的计算步骤为:(1)基于2022年分辨率为1 m的DEM数据,利用ArcMap水文分析工具提取汇水范围;(2)依据水文分析得到的汇水范围

综合DOM和DEM进行逐沟头修改[32],修改汇水范围边界线为垂直于等高线,从而得到更高精度沟头点的坡度和汇水面积,以支撑地形临界模型的构建。

1.4.2　沟头形成地形临界模型构建

本研究采用沟头坡度-汇水面积关系曲线进行浅沟发育为切沟动态类型的地形临界探测。在无变化侵蚀沟类型中,提取2022年浅沟沟头,在浅沟发育为切沟类型中,提取2022年该类型中切沟沟头,将两种类型沟头处的坡度和汇水面积绘入双对数坐标系中,分别进行线性拟合,并去除明显离群的沟头点(浅沟发育为切沟2个,无变化3个)[33]。分别将去除离群点后的浅沟发育为切沟动态类型侵蚀沟沟头(36个)和无变化类型侵蚀沟沟头(61个)两类数据随机抽取70%进行数据建模,并对其下限点拟合得到临界线[25,32]。该临界线在双对数坐标系中以一条直线显示,临界关系用幂函数表示[32,34],表达式为:

$$S = a \times A^{-b} \tag{1}$$

式中,S为坡度;A为汇水面积;a值指沟蚀发生的临界值;b值表示直线的斜率。通过将两个下限点的坡度、汇水面积值代入式(1),求解出a和b,由此建立浅沟发育为切沟动态类型的地形临界模型。剩余30%的数据进行模型验证,当验证数据落在直线上方说明模型预测正确,模型精度表达式为:

$$P = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{2}$$

式中,P为模型的准确率;n为落在临界线上方满足发生条件的沟头点数量;N为验证数据总数。

2　结果与分析

2.1　小流域浅沟和切沟的密度分析

2011—2022年,鹤北小流域浅沟和切沟的沟条密度、长度密度和面积密度见表2。2011年浅沟的沟条密度为2.9条/km²,2022年为2.3条/km²,减少了20.7%。长度密度由768.1 m/km²变为487.7 m/km²,减少了36.5%。2011年切沟的沟条密度为0.4条/km²,2022年为2.2条/km²,增加了450.0%;切沟的长度密度由73.6 m/km²变为365.4 m/km²,增加了396.5%;面积密度由181.73 m²/km²变为890.10 m²/km²,增加了350%。研究结果表明,2011—2022年,鹤北小流域的浅沟减少,切沟增加。

2011—2022年浅沟发育类型可分为浅沟变为切沟和浅沟未变为切沟。2011年浅沟转变为切沟的长度密度为182.2 m/km²,占23.7%。未转变为切沟的长度密度为585.9 m/km²,占76.3%。结果表明,2011—2022年,约有25%的浅沟发育为切沟。

表2　2011年和2022年浅沟和切沟密度统计

Table 2　Statistics on Density of Ephemeral Gullies and Permanent Gullies in 2011 and 2022

年份	沟条密度/(条·km⁻²)		长度密度/(m·km⁻²)		面积密度/(m²·km⁻²)
	浅沟	切沟	浅沟	切沟	切沟
2011	2.9	0.4	768.1	73.6	181.73
2022	2.3	2.2	487.7	365.4	890.10

2022年切沟来源主要分为三类。由表3可知,2011年原有切沟均发生变化,其长度密度占2022年现有切沟长度的20%左右。此外,新成切沟和由浅沟发育而来的切沟长度密度分别为106.0 m/km²和182.2 m/km²,占总切沟的比例分别为29.0%和49.9%,发育速率分别为9.6 m/(km²·a)和16.6 m/(km²·a)。由此可知,研究区正处于浅沟快速向切沟发育的阶段。2022年现有切沟中有近一半是2011—2022年期间由浅沟发育而来的,由浅沟发育为切沟的发育速率是新成切沟发育速率的1.7倍。

表3　2022年不同来源切沟的长度密度和发育速率

Table 3　Length Density and Development Rate of Permanent Gullies from Different Sources in 2022

来源类型	长度密度/(m·km⁻²)	发育速率/(m·km⁻²·a⁻¹)	占总切沟的比例/%
切沟新成	106.0	9.6	29.0
由浅沟发育而来	182.2	16.6	49.9
原有切沟发育	77.2	7.0	21.1

2022年新成切沟、浅沟发育而来的切沟长度变化差异明显,新成切沟的长度相对较短,长度主要集中在35～115 m之间,最大值可达205 m(图2)。浅沟发育为切沟的长度相对更长,长度主要集中在35～210 m之间,最大值可达640 m,最小值不到3 m。两种类型的均值分别为78.2 m和134.4 m,后者为前者的1.7倍,说明有浅沟的部位发育出切沟的风险比无浅沟的部位更大。

2.2　浅沟向切沟发育的空间分布特征

图3与表4分别为浅沟向切沟发育的空间分布及长度密度占比。浅沟向切沟发育主要发生在各子流域的沟掌地下游和左右两岸坡的中下

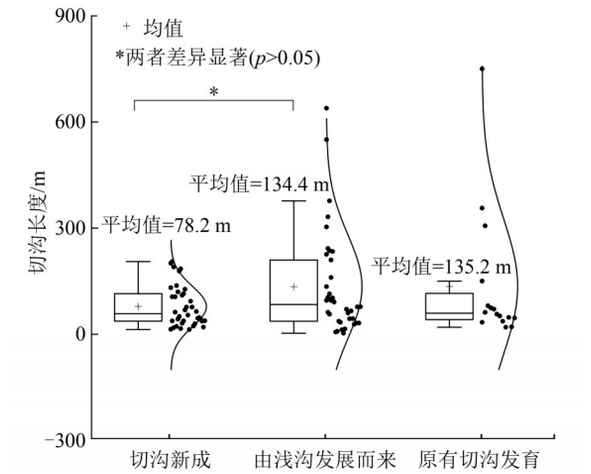


图2 2022年不同来源切沟长度变化箱线图

Fig. 2 Boxplot of Length Variation of Permanent Gullies from Different Sources in 2022

部,长度密度分别为105.8 m/km^{2}和48.1 m/km^2,占比分别为58.1%和26.4%。这是因为该处易汇集大量水流,当汇水面积产生的剪切应力达到切沟发生的临界阈值时,浅沟发育为切沟。除此之外,浅沟向切沟发育的现象在主沟道左右两侧也有零星分布,长度密度为28.3 m/km^2,仅占比15.5%。从图3中可以发现,浅沟向切沟发育过程的侵蚀沟部分呈间断性分布,而非连续分布。

流域不同位置的浅沟向切沟发育的平均长度有较大差异(图4),子流域沟掌地及左右岸坡中下部和主沟道两侧切沟长度分别为156.1 m、103.6 m和132.3 m,这说明子流域沟掌地下游更容易集中发育较长切沟。

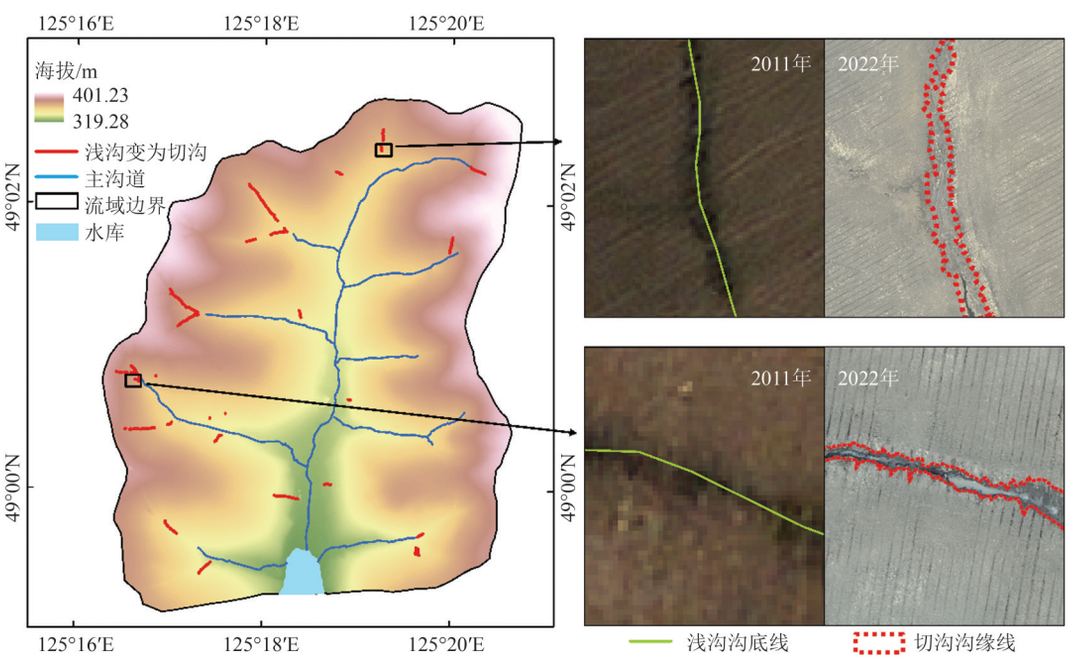


图3 浅沟发育为切沟的空间分布情况

Fig. 3 Spatial Distributions of Ephemeral Gullies Developing into Permanent Gullies

表4 浅沟发育为切沟空间分布长度密度统计

Table 4 Statistics on Length Density of Ephemeral Gullies Developing into Permanent Gullies

发生部位	长度密度/(m·km^{-2})	比例/%
子流域沟掌地下游	105.8	58.1
子流域左右岸坡中下部	48.1	26.4
主沟道两侧	28.3	15.5
汇总	182.2	100.0

2.3 浅沟向切沟发育的地形临界模型

浅沟发育为切沟和无变化类型侵蚀沟的沟头地形特征差异如图5所示。可以发现两种类型的沟头坡度无显著差异,而两种类型的沟头汇水面积差异显著。浅沟发育为切沟动态类型所需

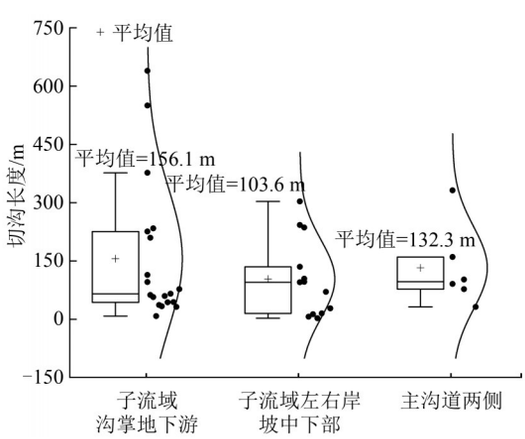


图4 不同空间位置由浅沟发育为切沟的长度变化

Fig. 4 Length Variation of Ephemeral Gullies Developing into Permanent Gullies at Different locations

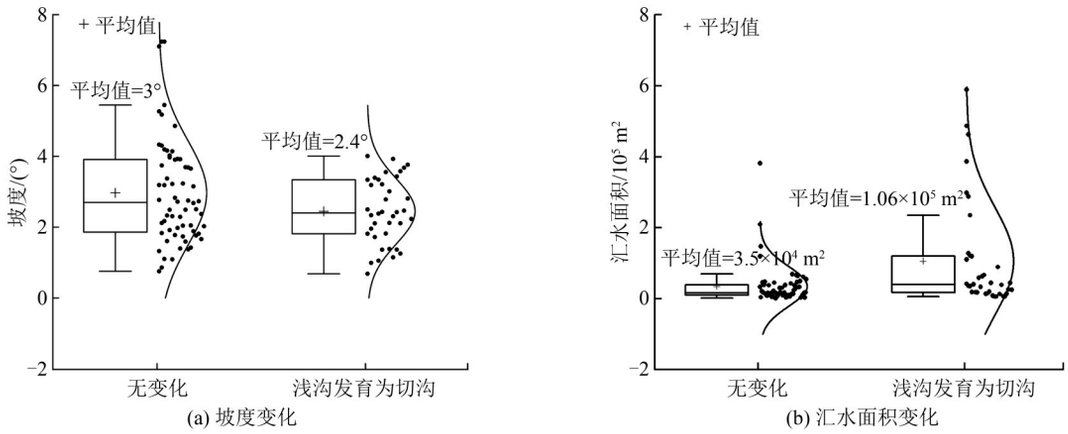


图 5　沟头地形特征箱线图

Fig. 5　Boxplots of Topographic Features of Gully Heads

要的汇水面积明显大于无变化类型,均值分别为 10.6×10^5 m^{2}和 3.5×10^5 m^2。

去除离群点后,将随机抽取的浅沟发育为切沟和无变化两种类型的数据分别绘入坡度-汇水面积双对数坐标系,对其下限点进行拟合形成临界线,可以得到浅沟发育为切沟动态类型和无变化类型的地形临界模型分别为 $S\geqslant0.421A^{-0.252}$ 和 $S\geqslant0.295A^{-0.287}$(图 6(a))。落在两个直线之间区域的点表示不满足浅沟发育为切沟的条件并且未发生变化的侵蚀沟沟头点。落在直线 $S=0.421A^{-0.252}$ 上方区域的黑色实心点表示有浅沟发育为切沟风险,但尚未发生动态变化。可以发现两种动态类型的汇水面积指数 b 值相近,表明在两种类型发生过程中,汇水面积的相对重要性相似。浅沟发育为切沟的 a 值显著大于无变化的 a 值,这表明浅沟发育为切沟所需的剪切力临界值要更大。为了进一步验证临界模型,将去除离群点后两类数据的30%绘入含有临界线的图中(图6(b)),浅沟发育为切沟的侵蚀沟沟头模型准确率达72.7%,无变化类型模型准确率达100%。

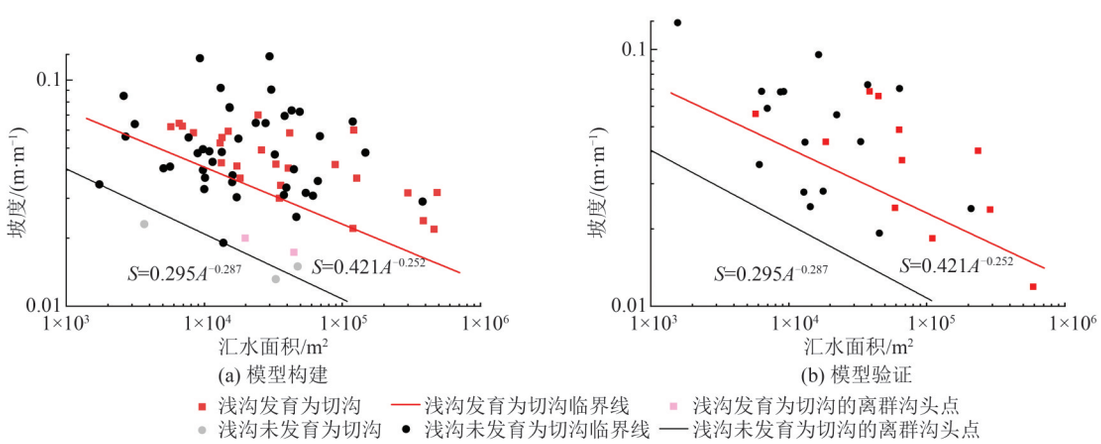


图 6　2011—2022 年浅沟发育和未发育为切沟的沟头地形临界模型

Fig. 6　Critical Terrain Models of Gully Heads for Ephemeral Gullies Evolving into Permanent Gullies and Those Remaining Undeveloped from 2011 to 2022

3　讨论

3.1　东北黑土区预防浅沟发育为切沟的必要性

2011—2022 年,研究区切沟快速生成并发育,切沟的数量、长度和面积分别可达十年前的5.5倍、5倍和4.5倍。黑龙江省60年的侵蚀变化动态结果显示,无论是侵蚀沟条数,还是沟道面积和沟壑密度都显著增加[35]。本研究表明,切沟的快速发生和发育主要来源于浅沟,在2011—2022年,这一占比达到了现有切沟长度比例的近一半。此外,在所有动态类型中,无论是长度变化所占比例,还是长度变化的速率和范围,浅沟向切沟发育这一变化类型的数值都明显高于其他动态类型,由此可见,在东北黑土区对浅沟的防治可能比直接治理已形成的切沟更重要,也更有效。早在20年前,已有人提出浅沟若不加以治

理会发育为切沟[36]。后来,越来越多的研究者提出若不对浅沟及时采取措施控制其发展,最终可能成为永久性切沟[13,17,37-38]。已受到浅沟侵蚀的耕地受到耕作活动影响,坡面横向起伏加大,汇水面积也渐渐增加,逐渐演变成切沟[25]。另外也有一部分浅沟在实践中易被简单填充,随着径流过程在同一部位再次出现,并未真正消失。在一些特殊区域,如大规模机械整地,有可能使得浅沟及其发生的浅凹地形同时消失。例如本研究中,2011—2022年未转变为切沟的浅沟长度密度为585.9 m/km^2,2022年的浅沟长度密度为487.7 m/km^{2}小于前者,正是由于机械整地。

浅沟主要分布在低洼水线处[10,22,39],分布受坡型影响呈现出辐散状和平行状[39]。张永光等在鹤山农场通过野外调查发现,研究区坡耕地上的切沟往往由浅沟演化而来,形成坡上部是浅沟、下部是切沟的分布情形[25],侵蚀强度沿坡长呈强弱交替分布[40]。黑土区发育强烈的浅沟、切沟多分布于坡面中下部[41-42],与本文结果一致。

目前黑土区侵蚀沟治理工程中主要以大型切沟为主,没有充分关注对浅沟的预防。根据本研究结果,对浅沟预防的缺失将会导致大量切沟的形成。切沟形成会增大汇流、加快流速、增强侵蚀动力,随沟缘扩张影响周围坡面土层稳定和入渗[43],加剧黑土区的水土流失以及加大将来侵蚀沟治理的困难,对耕地和农业的发展也有着较大的危害。因此未来的工作重点必须由治理已发生的切沟向预防和治理有可能变为切沟的浅沟转变。如何防治即将发育为切沟的浅沟在下一步治理工作中亟需加强。东北黑土区极端暴雨频次明显增加[44]。张光辉等认为黑土区产流和侵蚀过程受全球气候变化影响显著,在气候变化情景下,径流和产沙均呈增大趋势,促进了切沟的生成和发育[2,20]。在气候变化背景下,防治浅沟向切沟的转变就显得更为重要。

东北黑土区依据水热类型、地形地貌、土壤类型等自然因素划分为不同类型区[45]。区域不同,侵蚀沟道数量和沟道占地面积均有差异[2,43],浅沟发育为切沟的临界条件也有差异。侵蚀沟在东北黑土区分布广泛,有近90%属于发展型侵蚀沟[7]。因此,建议从流域尺度扩展至区域尺度,借鉴本研究提出的相关方法,在不同类型区开展研究,全面探究浅沟向切沟发育的过程与机制,丰富和完善东北黑土区侵蚀沟发育规律。

3.2 浅沟向切沟发育地形临界模型参数

东北黑土区侵蚀沟防治结合型治理的关键在于对现有浅沟向切沟演化的精准预测。地形是浅沟形成及其向切沟转变的主控因素,其中坡度和汇水面积最为关键[25,46-47]。本研究得出2011—2022年浅沟无变化和发育为切沟的侵蚀沟沟头汇水面积差异显著,而坡度影响不明显,这与东北黑土区坡缓、坡长的地形特征有关,微小坡度变化难以反映侵蚀强度差异[25]。汇水面积和坡度的关系经常用于确定已有沟道侵蚀的沟头,从而预测发生沟蚀的地点[25]。在地形临界模型中,a值代表沟蚀发生所需的临界值[24],a值越大,表示该区域越不容易发生沟道侵蚀[32]。b值代表汇水面积的相对重要性,主要受气候、土壤、降水以及土地利用等因素的影响。无论是a值还是b值,都属于经验系数,均会随着环境条件的变化而变化[48]。本研究表明,2011—2022年,浅沟发育为切沟类型的a值和b值分别为0.421和0.252,浅沟未发生变化类型中的a值和b值分别为0.295和0.287,定量了浅沟发育为切沟动态类型相比未发育为切沟有更高的地形临界阈值。

有研究认为,b值变化一般介于0.2~0.4之间[49],与本研究结果一致。张永光等在鹤北流域两个子流域中得到浅沟和切沟临界模型的b值分别为0.148和0.141[25],显著低于本研究浅沟发育为切沟类型的b值。这说明b值虽然在同一个流域的其中两个子流域的浅沟和切沟的临界模型中是稳定的,但在不同流域间是不稳定的,即汇水面积的重要性在不同流域是有所差异的。

3.3 浅沟向切沟发育地形临界模型影响因素

由图6可知,部分满足浅沟发育为切沟地形临界条件的沟头在近十年间并未发生明显变化。这表明沟蚀的发生除受地貌因素控制外,还受机械碾压、地表植被、土地利用等多种因素的影响[24]。例如,本研究通过野外调查和走访发现,切沟的快速发生与发育在一定程度上与近年来基础设施建设(如涵洞修建)密切相关。已有研究表明,在基础设施建设过程中,往往会形成大量未及时硬化或覆盖的裸露地表,在车辆及其他机械反复碾压的共同作用下,地表径流量和洪峰流量分别可增加146%~227%和178%~575%[50],从而显著促进切沟的快速发育。苏子龙等[39]研究指出,鹤山农场浅沟发育过程与防护林带的数量及其空间间距密切相关,防护林带数量的增加可显著提高浅沟发育为切沟的临界汇水面积。

本研究通过野外调查发现,主沟道左岸的林带相对右岸更多,植被覆盖率较高,使其对雨水的截留效率和土壤的渗透率更高[20],从而发生浅沟发育为切沟的情况较少。徐艳燕等[51]认为在高强度降雨情况下,横坡垄向和斜坡垄向的雨水易沿垄向大量聚集,并在低洼处汇集进而促进侵蚀沟的发育。大量研究表明,退耕还林还草可以通过减少地表径流,增加土壤抗蚀力来减缓侵蚀沟的发育[52]。另一个可能影响浅沟发育为切沟空间分布的因素是农场整地活动,部分由浅沟发育而来的切沟会被填埋。同时,本研究区农场在改垄、整地造林及修筑地埂等水土保持措施方面总体优于周边区域,并取得了一定的成效。然而,这并不意味着在未来气候变化背景下,这些目前满足地形临界条件但尚未发生变化的沟头仍能长期保持稳定。当垄向或作物类型等发生变化时,其仍具有进一步发育为切沟的潜在风险。

4　结　语

4.1　研究结论

本研究以黑龙江省嫩江市鹤北小流域为研究区,基于2011年亚米级遥感影像和2022年无人机影像分别进行目视解译提取侵蚀沟。结合GNSS-RTK野外实测与现场调查,探究2011—2022年浅沟向切沟发育的动态规律及其发生的地形临界阈值,得出的主要结论如下:

1)2011年浅沟总长度的23.7%在2022年发育为切沟,2022年切沟总长度的49.9%由浅沟发育而来。

2)浅沟发育为切沟主要呈间断性分布在鹤北流域各子流域沟掌地下游和子流域左右岸坡中下部,少数分布在主沟道两侧。

3)通过汇水面积和坡度的临界阈值,确定了浅沟向切沟转变的地形临界模型为$S \geqslant 0.421A^{-0.252}$,模型准确率为72.7%。

本研究在黑土区典型小流域说明了浅沟发育为切沟这一现象的严重性,给出了定量特征、易发部位和空间预测方法,以期为黑土区进一步侵蚀沟治理决策提供理论与技术支撑。

4.2　研究不足与展望

本研究基于鹤北小流域2011—2022年的气候条件开展分析,所建立的浅沟向切沟发育地形临界模型在一定程度上反映了研究区内浅沟演化的基本特征。然而,在未来气候变化背景下,尤其是极端暴雨事件发生频率和强度可能增加的情况下[44],浅沟向切沟发育过程及其临界条件存在一定不确定性,模型参数亦可能随之发生变化。此外,由于研究尺度为小流域,本文尚未充分考虑气候条件与土壤性质在空间上的差异性,在更大区域尺度应用时,有必要针对不同气候背景和土壤类型对模型参数进行修正与优化。

2011—2022年浅沟一旦快速发育为切沟,其治理难度显著增加,且难以恢复,对耕地资源造成严重破坏。因此,在侵蚀沟防治实践中,提前识别浅沟向切沟转化风险、实施防治结合型治沟策略具有重要意义。本研究从小流域尺度出发,揭示了浅沟向切沟发育的地形临界特征,但该关键科学问题的深入解决仍需在以下方面进一步加强,以更好支撑东北黑土区侵蚀沟防治与管理实践:(1)在更大空间尺度上系统刻画浅沟的空间分布特征及其向切沟发育的风险格局,提升区域尺度风险识别能力;(2)针对不同侵蚀类型区,深入探测浅沟向切沟发育的主控因素与演化规律,并进行对比分析与集成;(3)在现有以地形临界条件为核心的模型基础上,综合考虑降雨特征、地形条件、土壤性质及土地管理与水土保持措施等差异,进一步完善浅沟向切沟发育预测模型,以提升其在不同区域的适用性与预测精度。

致谢:黑龙江九三土壤侵蚀教育部野外科学观测研究站和北大荒集团九三分公司黑龙江鹤山农场有限公司为本研究开展提供了重要支持,在此表示感谢。

参　考　文　献

[1] 刘宝元,阎百兴,沈波,等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.
LIU Baoyuan, YAN Baixing, SHEN Bo, et al. Current Status and Comprehensive Control Strategies of Soil Erosion for Cultivated Land in the Northeastern Black Soil Area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 1-8.

[2] 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 Guanghui, YANG Yang, LIU Yingna, 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.

[3] 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 Yun, WANG Jun, ZHANG Li. 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.

[4] 张兴义, 胡伟, 李建业, 等. 水土流失防控是黑土地保护的重点[J]. 科学通报, 2024, 69(11): 1401-1405.
ZHANG Xingyi, HU Wei, LI Jianye, et al. Control of Soil and Water Losses Is the Critical Issue for Black Earth Conservation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(11): 1401-1405.

[5] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009(1): 17-19.
LIU Xingtu, YAN Baixing. Soil Erosion and Food Security in the Northeastern Black Soil Area of China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009(1): 17-19.

[6] 焦鹏, 阎百兴, 欧洋, 等. 东北低山丘陵典型区侵蚀沟分布特征及其地形影响研究[J]. 地理科学, 2022, 42(10): 1829-1837.
JIAO Peng, YAN Baixing, OU Yang, et al. Distribution Characteristics and Topographic Influence of Erosion Gully in Typical Hilly Region of Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(10): 1829-1837.

[7] 李姗. 水利部组织完成东北黑土区侵蚀沟调查(节选)[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(8): 157.
LI Shan. The Ministry of Water Resources Organized and Completed the Investigation of Erosion Gully in the Mollisol Region of Northeast China (Excerpt)[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2023, 6(8): 157.

[8] TANG J, LIU G, XIE Y, et al. Effect of Topographic Variations and Tillage Methods on Gully Erosion in the Black Soil Region: A Case Study from Northeast China [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(18): 3786-3800.

[9] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国黑土地保护法[EB/OL]. (2022-06-24) https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/202303/t20230314_1019525.shtml.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Black Soil Conservation Law of the People's Republic of China[EB/OL]. (2022-06-24) https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/202303/t20230314_1019525.shtml.

[10] 张永光, 伍永秋, 汪言在, 等. 典型黑土区小流域浅沟侵蚀季节差异分析[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 145-154.
ZHANG Yongguang, WU Yongqiu, WANG Yanzai, et al. Seasonal Discrepancy of Ephemeral Gully Erosion in Northeast China with Black Soils[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 145-154.

[11] 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 Baoyuan, YANG Yang, LU Shaojuan. 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.

[12] 张天宇. 垄作耕地浅沟深度的测量和换算[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 138-144.
ZHANG Tianyu. Measurement and Calibration of Ephemeral Gully Depth in Ridge-Tillage Croplands [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(5): 138-144.

[13] TANG J, LIU G, XIE Y, et al. Annual Variation of Ephemeral Gully Erosion in a Cultivated Catchment [J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115166.

[14] 李博峰, 苗维凯, 陈广鄂. 多频多模GNSS高精度定位关键技术与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1769-1783.
LI Bofeng, MIAO Weikai, CHEN Guang'e. Key Technologies and Challenges of Multi-Frequency and Multi-GNSS High-Precision Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1769-1783.

[15] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513.
LI Deren, LI Ming. Research Advance and Application Prospect of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5): 505-513.

[16] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. GPS和GIS进行短期沟蚀研究初探: 以东北漫川漫岗黑土区为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 16-19.
HU Gang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan, et al. Preliminary Research on Short-Term Channel Erosion Using GPS and GIS[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(4): 16-19.

[17] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1165-1173.
HU Gang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan, et al. The Growth Characteristics of Gully Erosion over Rolling Hilly Black Soil Area of Northeast China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1165-1173.

[18] 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: 106999.

[19] 宋爽, 范昊明, 牛天一. 东北黑土区不同季节侵蚀沟形态发育比较分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 18-23.
SONG Shuang, FAN Haoming, NIU Tianyi. Comparative Analysis of the Development the Geometric

Forms of Gully in Different Seasons in Black Soil Area of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 18-23.

[20] 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 Guanghui. Advances and Prospects for Gully Erosion Researches[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 1-13.

[21] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文, 等. 东北典型黑土区侵蚀沟发育演化特征分析[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(4): 105-110.
WANG Wenjuan, DENG Rongxin, ZHANG Shuwen, et al. Development Evolution Characteristics of Gully Erosion in Typical Black Soil Region of Northeast China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(4): 105-110.

[22] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 545-549.
HU Gang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan, et al. Growth Characteristics of Ephemeral Gully in Rolling Hillsof Black Soils in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(4): 545-549.

[23] 吴立新, 许志华, 范松滔, 等. 植被稀疏地区沟蚀变化的地面激光扫描监测与沟蚀量估算[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(10): 1343-1349.
WU Lixin, XU Zhihua, FAN Songtao, et al. Gully Erosion TLS Monitoring and Estimation in Area of Sparse Vegetation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1343-1349.

[24] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 4449-4454.
HU Gang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan, et al. Geomorphic Threshold Model for Ephemeral Gully Incision in Rolling Hills with Black Soil in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 4449-4454.

[25] 张永光, 伍永秋, 刘洪鹄, 等. 东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 35-38.
ZHANG Yongguang, WU Yongqiu, LIU Honghu, et al. Effect of Topography on Ephemeral Gully Erosion in Northeast China with Black Soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 35-38.

[26] LIU X, GUO M M, ZHANG X Y, et al. Morphological Characteristics and Volume Estimation Model of Permanent Gullies and Topographic Threshold of Gullying in the Rolling Hilly Mollisols Region of Northeast China[J]. *CATENA*, 2023, 231: 107323.

[27] 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 Baoyuan, ZHANG Ganlin, XIE Yun, et al. Delineating the Black Soil Region and Typical Black Soil Region of Northeastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(1): 96-106.

[28] 闫业超, 张树文, 李晓燕, 等. 黑龙江克拜黑土区50多年来侵蚀沟时空变化[J]. 地理学报, 2005, 60(6): 1015-1020.
YAN Yechao, ZHANG Shuwen, LI Xiaoyan, et al. Temporal and Spatial Variation of Erosion Gullies in Kebai Black Soil Region of Heilongjiang During the Past 50 Years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(6): 1015-1020.

[29] ZHANG C M, WANG C M, LONG Y Q, et al. Comparative Analysis of Gully Morphology Extraction Suitability Using Unmanned Aerial Vehicle and Google Earth Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(17): 4302.

[30] TORRI D, POESEN J. A Review of Topographic Threshold Conditions for Gully Head Development in Different Environments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 73-85.

[31] 杨丽娟, 王春梅, 张春妹, 等. 基于遥感影像研究极端暴雨条件下新成切沟发生发展规律[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 96-104.
YANG Lijuan, WANG Chunmei, ZHANG Chunmei, et al. Occurrence and Development of Newly Formed Gullies Under Extreme Rainstorm Conditions Using Remote Sensing Images[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(6): 96-104.

[32] 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 Xin, WANG Chunmei, PANG Guowei, 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.

[33] NACHTERGAELE J, POESEN J, STEEGEN A, et al. The Value of a Physically Based Model versus an Empirical Approach in the Prediction of Ephemeral Gully Erosion for Loess-Derived Soils[J]. *Geomorphology*, 2001, 40(3/4): 237-252.

[34] 丁晓斌, 郑粉莉, 王彬, 等. 子午岭地区坡面浅沟侵蚀临界模型研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 122-125.
DING Xiaobin, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al. Predicting Ephemeral Gully Erosion on Hillslopes of Ziwuling Area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(3): 122-125.

[35] 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 Xingyi, LIU Xiaobing. 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.

[36] WOODWARD D E. Method to Predict Cropland Ephemeral Gully Erosion[J]. *CATENA*, 1999, 37(3/4): 393-399.

[37] TANG J, LIU G, XIE Y, et al. Ephemeral Gullies Caused by Snowmelt: A Ten-Year Study in Northeastern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 212: 105048.

[38] TANG J, XIE Y, LIU C, et al. Effects of Rainfall Characteristics and Contour Tillage on Ephemeral Gully Development in a Field in Northeastern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218: 105312.

[39] 苏子龙, 崔明, 范昊明. 东北漫岗黑土区防护林带分布对浅沟侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 20-23.
SU Zilong, CUI Ming, FAN Haoming. Effect of Shelterbelts Distribution on Ephemeral Gully Erosion in the Rolling-Hilly Black Soil Region of Northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 20-23.

[40] 崔明, 蔡强国, 范昊明. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 29-34.
CUI Ming, CAI Qiangguo, FAN Haoming. Research Progress on the Soil Erosion in Black Soil Region of Northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(5): 29-34.

[41] 范昊明, 蔡强国, 崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 8-11.
FAN Haoming, CAI Qiangguo, CUI Ming. Soil Erosion Developed with the Vertical Belts in the Gentle Hilly Black Soil Regions in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6): 8-11.

[42] 张永光, 伍永秋, 刘宝元. 东北漫岗黑土区春季冻融期浅沟侵蚀[J]. 山地学报, 2006, 24(3): 306-311.
ZHANG Yongguang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan. Ephemeral Gully Erosion During the Spring Freeze-Thawing Period in Black Soil Rolling-Hill Regions of Northeast[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(3): 306-311.

[43] 秦伟, 殷哲, 曹文洪, 等. 东北黑土区侵蚀沟系统防治现状与未来[J]. 泥沙研究, 2021, 46(3): 72-80.
QIN Wei, YIN Zhe, CAO Wenhong, et al. Present and Future of Systematic Prevention and Control for Gully Erosion in Black Soil Area of Northeast China[J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(3): 72-80.

[44] 柏荷, 明義森, 刘启航, 等. 基于GPM卫星降雨产品的2001—2019年中国暴雨数据集[J]. 中国科学数据, 2022, 7(2): 231-240.
BAI He, MING Yisen, LIU Qihang, et al. A Dataset of Rainstorm in China Based on GPM Precipitation Product During 2001—2019[J]. *China Scientific Data*, 2022, 7(2): 231-240.

[45] 徐英德, 裴久渤, 李双异, 等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495-504.
XU Yingde, PEI Jiubo, LI Shuangyi, et al. Main Characteristics and Utilization Countermeasures for Black Soils in Different Regions of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2): 495-504.

[46] WANG D C, FAN H M, FAN X G. Distributions of Recent Gullies on Hillslopes with Different Slopes and Aspects in the Black Soil Region of Northeast China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(10): 508.

[47] 李飞, 张树文, 李天奇. 东北典型黑土区南部侵蚀沟与地形要素之间的空间分布关系[J]. 土壤与作物, 2012, 1(3): 148-154.
LI Fei, ZHANG Shuwen, LI Tianqi. The Spatial Distribution Relations Between Erosion Gully and Terrain Factors in the South of Typical Black Soil Zone in Northeast China[J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(3): 148-154.

[48] 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.

[49] PATTON P C, SCHUMM S A. Gully Erosion, Northwestern Colorado: A Threshold Phenomenon[J]. *Geology*, 1975, 3(2): 88.

[50] GUDINO-ELIZONDO N, BIGGS T W, BINGNER R L, et al. Modelling Ephemeral Gully Erosion from Unpaved Urban Roads: Equifinality and Implications for Scenario Analysis[J]. *Geosciences*, 2018, 8(4): 137.

[51] 徐艳燕, 刘宝, 高睿璐, 等. 典型黑土区地形与垄作特征对切沟发育的影响[J]. 中国农业信息, 2023, 35(4): 26-38.
XU Yanyan, LIU Bao, GAO Ruilu, et al. Effects of Topography and Tillage Characteristics on Gully Development in the Mollisol Region[J]. *China Agricultural Informatics*, 2023, 35(4): 26-38.

[52] YAN Y, ZHANG X Y, LIU J L, et al. The Effectiveness of Selected Vegetation Communities in Regulating Runoff and Soil Loss from Regraded Gully Banks in the Mollisol Region of Northeast China[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(6): 2116-2129.