

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.025.

梁彦荣, 张岩, 李坤衡, 等. 基于高分遥感调查东北黑土区 10 年尺度切沟治理效果[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 67-73.

Liang Yanrong, Zhang Yan, Li Kunheng, et al. Investigation on the Effects of Gully Control in China's Black Soil Region over a 10-Year Scale Based on High-Resolution Remote Sensing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 67-73.

# 基于高分遥感调查东北黑土区 10 年尺度切沟治理效果

梁彦荣, 张岩, 李坤衡, 张俊彬, 杨润泽, 陈昶

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 分析黑土区切沟治理措施的存量、区域差异及治理后切沟演化特征, 评估 10 年尺度切沟治理效果。[方法] 以松嫩典型黑土区为研究区, 采用系统抽样方法与 3 期高分遥感影像解译相结合, 分析了耕地切沟治理效果和复发情况。[结果] 在松嫩典型黑土区的 998 个抽样单元中, 有切沟治理措施调查单元 73 个, 占耕地抽样单元的 10.11%, 93.2% 分布于黑土带。2010—2018 年, 有治理措施的情况下, 仍约 30% 的抽样单元切沟密度增加, 尤其是强度侵蚀以上抽样单元数量增加。切沟治理措施能够有效阻控切沟的发育, 约 80% 的切沟保持稳定或缩短, 但仍有 8% 的切沟持续增长, 另有 12% 的新生切沟。[结论] 东北黑土区耕地切沟治理措施在 2010 年之后广泛分布且能够有效阻控切沟的发育, 但还需要进一步改进切沟治理策略, 提高切沟治理的长效性, 保障黑土资源的可持续利用。

**关键词:** 黑土; 抽样调查; 高分遥感; 切沟侵蚀; 切沟治理

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0067-07

## Investigation on the Effects of Gully Control in China's Black Soil Region over a 10-Year Scale Based on High-Resolution Remote Sensing

Liang Yanrong, Zhang Yan, Li Kunheng, Zhang Junbin, Yang Runze, Chen Chang

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

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the distribution of gully treatment measures, to analyze post-treatment gully evolution, and to assess the effectiveness of gully rehabilitation in black soil areas at the decadal scale. [Methods] The Songnen typical black soil region, the largest black soil area in China, was taken as the study area. A systematic sampling method combined with the interpretation of high-resolution remote sensing imagery from three different periods was employed to evaluate the effect of gully erosion control and the recurrence of gullies on cultivated land from 2010 to 2018. [Results] In 998 sampled units in the Songnen typical black soil region, 73 units which represented 10.11% of all cropland units received gully control treatments. An overwhelming 93.2% of these treated units were situated within black soil belt areas. From 2010 to 2018, around 30% of the sampled units demonstrated an increase in gully density despite the control measures, particularly where erosion intensity was already high. The soil conservation measures had been substantially effective in stemming gully progression, with approximately 80% of previously formed gullies either remaining stable or showing signs of regression. However, about 8% of gullies continued to expand, and 12% of gullies were emerged after establishment of conservation measures. [Conclusion] The soil conservation measures of cultivated land in the black soil region of northeast China have been widely distributed after 2010 and can effectively control the development of gully, but this indicates that there is requirements for improvement in gully control strategies to bolster the long-term success of these measures

收稿日期: 2023-12-27

修回日期: 2024-01-19

资助项目: 国家重点研发计划项目“黑土地风蚀水蚀融蚀过程、耦合机制与阻控原理”(2021YFD150070)

第一作者: 梁彦荣(1996—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: 1051921349@qq.com

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

<http://stbcyj.paperonce.org>

and guarantee the sustainable utilization of black soil resources.

**Keywords:** black soil; sampling survey; high-resolution remote sensing; gully erosion; gully treatment

切沟侵蚀作为水土流失的重要形式,破坏耕地,切割地表,蚕食土地,冲走沃土,造成土地资源的极大浪费<sup>[1-2]</sup>。据 2013 年水利部全国第一次水利普查的蚀沟专项调查,东北黑土区有侵蚀沟 29.17 万条,沟壑密度达 0.20 km/km<sup>2</sup>,是中国除黄土高原外沟道侵蚀最为严重的区域,而且主要发生坡耕地<sup>[3-4]</sup>。研究表明 1968—2018 年,松嫩黑土区北部海伦市切沟发育速率 1.5~2.5 m/a<sup>[5]</sup>,而嫩江坡面切沟平均发育速率 4.2 m/a,沟底切沟高达 13.1 m/a<sup>[6]</sup>。可见,宝贵的黑土资源面临严重威胁。2003 年以来,东北黑土区先后实施了多个水土流失综合治理项目<sup>[7]</sup>。在重点治理工程中推广应用多种侵蚀沟治理措施,完成水土流失治理面积 1.8 万 km<sup>2</sup><sup>[8]</sup>,直接针对侵蚀沟的治理措施包括削坡、固沟林、谷坊等;间接治沟措施包括横坡改垄和地埂植物带等<sup>[9]</sup>。黑土区侵蚀沟治理工程总体保存效果良好,可以显著减少坡耕地的地表径流和土壤侵蚀<sup>[10]</sup>。但是,部分侵蚀沟治理工程因超标降水、后期管护不到位等导致措施损毁<sup>[11]</sup>。虽然已有研究对侵蚀沟治理措施进行了多方位评价<sup>[10-14]</sup>,但侧重于小流域尺度,东北黑土区大范围治理措施的存量、区域差异以及长期治理效果有待深入调查研究<sup>[8]</sup>。全国第一次水利普查的土壤侵蚀普查采用了分层不等概率系统抽样调查方法<sup>[15]</sup>,Tang<sup>[2]</sup>和李坤衡<sup>[16]</sup>等分别使用这种抽样方法研究了黑土区切沟的分布特征,结果表明抽样方法估计切沟密度的空间分布与实地调查结果比较接近<sup>[16]</sup>。也采用这种抽样方法研究了黑土区的切沟侵蚀特征。Karydas 等<sup>[17]</sup>采用随机抽样方法研究希腊农业用地浅沟分布特征,抽样密度为 0.055%。上述研究表明抽样方法在评估区域尺度切沟侵蚀方面具有适用性。本文旨在采用系统抽样方法,通过多期高分辨率历史遥感影像对比,分析黑土区切沟治理措施的分布、治理后切沟发育及区域差异,评估十年尺度切沟治理效果。

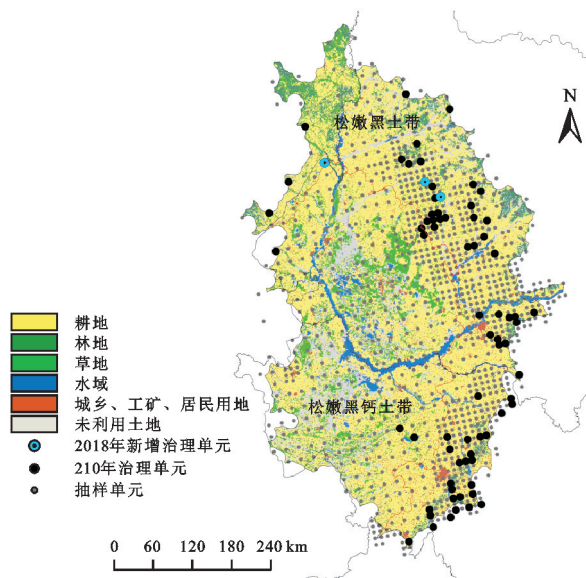
## 1 材料与方法

### 1.1 研究区选择和抽样调查方法

松嫩典型黑土区(122°7'29"—128°9'53"E,43°3'25"—50°15'43"N)是东北典型黑土区的 3 个亚区之一,是黑土和黑钙土集中分布的区域,可分为东部的松嫩黑土带和中西部的松嫩黑钙土带<sup>[18]</sup>,总面积约 21.2 万 km<sup>2</sup>(图 1)。松嫩典型黑土区气候主要以温带大陆性季风气候为主,多年平均气温在 2~6 °C,年均降水量 420~650

mm<sup>[16]</sup>。主要的土地利用类型为耕地,面积约 19.6 万 km<sup>2</sup>,是中国玉米、大豆等商品粮的主要生产基地<sup>[19]</sup>。

本研究沿用全国第一次水利普查采用的分层不等概率系统抽样调查方法和抽样单元,选取研究区及其周边抽样单元共 998 个(图 1),平原区抽样单元的面积一般为 1 km×1 km 的矩形,丘陵区 and 山地区为 0.17~3.3 km<sup>2</sup> 的小流域,东部的松嫩黑土带抽样密度为 0.37%,西部的松嫩黑钙土带为 0.24%,平均为 0.31%<sup>[16]</sup>。以耕地为主的单元 722 个,其中有治理措施单元 73 个,占耕地抽样单元的 10.11%。有治理措施单元分布于松嫩黑土带 68 个,松嫩黑钙土带 5 个,分别占耕地调查单元的 9.42%和 0.69%。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图未作修改,下同。

图 1 切沟治理单元分布

Fig. 1 Distribution map of gully treatment units

### 1.2 历史影像的获取与处理

历史影像来源于 Google-18 级影像与 CORONA-KH-4B 间谍卫星影像 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>),其中 Google 影像拍摄时间为 2010 年 11 月和 2018 年 11 月,原始影像分辨率约为 0.5 m;CORONA-KH-4B 高分辨率间谍卫星影像拍摄时间为 1970 年 11 月。以 2018 年遥感影像为基础,采用局部精确配准方法,选取路口建筑物等易于识别的地物为控制点确保 1970 年与 2010 年中每块抽样单元尽可能精确配准,为提取切沟与治理措施范围提供精准数据。

### 1.3 切沟及治理措施的解译

参考前人的研究结果<sup>[20-22]</sup>分别从 73 个有治理措施调查单元的 1970 年、2010 年、2018 年影像采用目视

解译方法提取抽样单元内切沟沟缘线,并利用编程提取其中心线,中心线长度作为切沟沟长(图2),其中切沟中主沟与支沟分别计数和统计沟长。每条切沟沟长除以所在单元面积,得到每条切沟线密度<sup>[16]</sup>。考虑到1970年影像解译切沟面积的精度较低,只分析3个时期抽样单元切沟沟长和线密度的变化。调查单元内的切沟治理措施判读采用如下方法:(1)对比无治理

措施时期的影像,耕地中原来发育侵蚀沟位置有边界规整的林草植被;(2)结合1:1万地形图分析,规整林草植被区域处于沟谷区或地势较低区域(图2)。由于影像精度的限制,无法解译线状和点状治理措施,只分析有面状治理措施的调查单元。对于有治理措施单元,通过目视解译对面状措施的边界进行勾绘,并利用ArcGIS 10.8计算切沟治理措施面积。

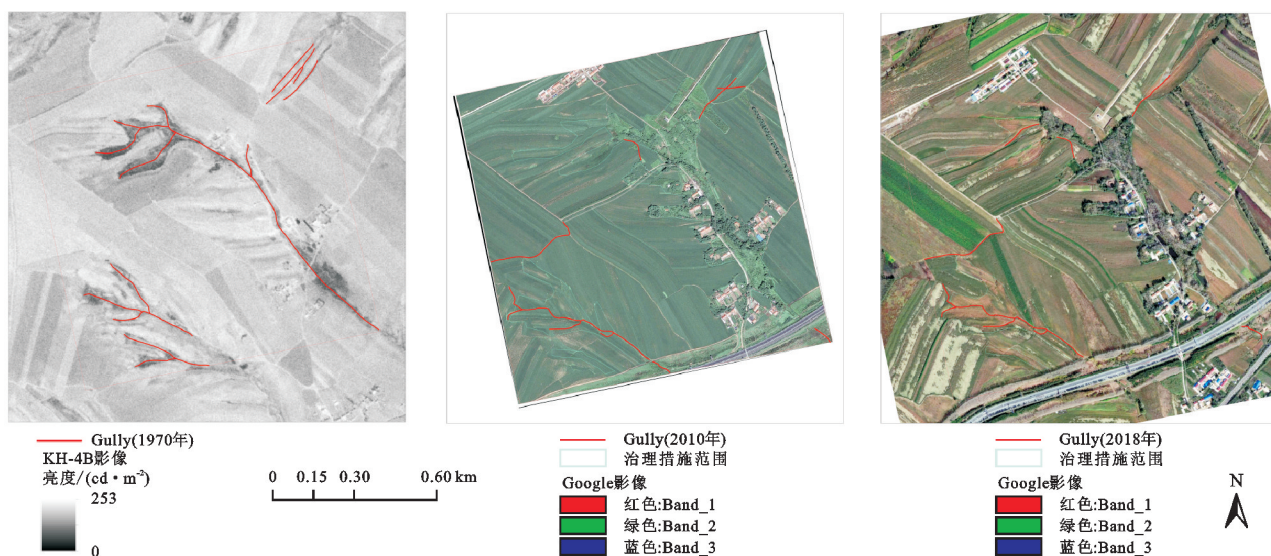


图2 基于1970年、2010年、2018年影像解译的切沟与切沟治理措施

Fig. 2 Gully and gully management based on image interpretation in 1970, 2010 and 2018

## 2 结果与分析

### 2.1 1970—2018年切沟治理措施的分布特征

2018年有切沟治理措施的73个抽样单元比较均匀地分布于黑土带,包括4省所属的8个市(图1),说明在松嫩黑土区切沟得到广泛治理。通过对1970年、2010年和2018年3个时期抽样单元分析,发现2018年有治理措施的73个调查单元在1970年时都没有治理措施,而2010年已经有70个单元有治理措施。说明大部分切沟治理措施在2010年以前已经存在,此后新增的3个单元分布都在松嫩黑土区的北部,说明在2010年以后黑土带北部的黑龙江省是重点治理区。同时,治理单元主要分布在东部的黑土带。黑土带是切沟集中分布的区域<sup>[14]</sup>。

### 2.2 抽样单元切沟数量和密度的变化

在73个抽样单元中,61个的单元的1970年影像上发现切沟,主要集中在吉林省,同时期内蒙古自治区的切沟单元几乎没有切沟发育。从1970—2010年,73个抽样单元解译的切沟总数从358条增长到549条。其中70个抽样单元在2010年以前已有治理措施,切沟数量的快速增加主要发生在治理前。2010—2018年切沟条数减少到522条,减幅约5%。52.1%的抽样单元切沟密度都有降低(图3),说明切

沟治理在持续进行;同时,约30%的抽样单元切沟密度增加,个别调查单元切沟密度大幅度增加,说明切沟治理未能完全阻控切沟发育。

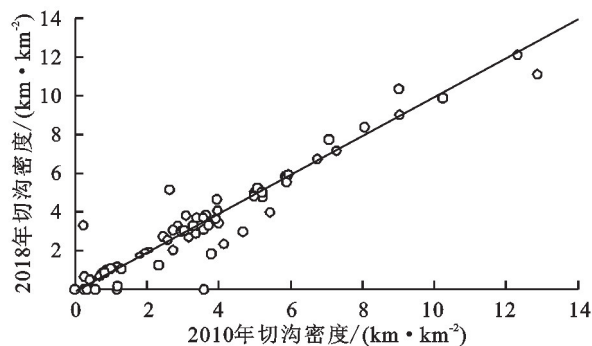


图3 两个时期单元内切沟线密度分布

Fig. 3 Distribution of gully line density in the unit during the two periods

计算各单元内切沟的线密度( $D_{Ln}$ ),按照《黑土区水土流失综合治理防治技术标准》进行侵蚀强度分类(图4)。总的来说,近50年来,轻度侵蚀( $<1 \text{ km/km}^2$ )单元持续减少。1970年,轻度侵蚀的抽样单元有47个,到2018年减少了22个(图7)。切沟线密度 $>4 \text{ km/km}^2$ (切沟侵蚀强度为剧烈侵蚀)的单元数量在3个时期持续增长,1970年只有7个、2010年由16个到2018年增加到18个,分布区域从吉林省和黑龙江省扩大到4个省。需要强调的是,2010—2018年轻度和中度侵



蚀单元也在减少,强度侵蚀以上单元都在增加。上述结果表明:从长期来看,即使在治理的情况下,松嫩黑土区切沟侵蚀总体上仍在持续加重。

### 2.3 切沟复发特征分析

为了进一步分析治理单元切沟发育特征,将抽样单元内的切沟根据其发育位置分为:原位切沟和新生切沟,其中原位切沟进一步分为原位增长、原位缩短和原位稳定 3 种类型(图 5)。原位切沟指的是在治理前后两期影像中同一位置的切沟,可能是治理后复发的切沟,也可能是治理时遗留的切沟,从影像上难以分辨,新生切沟是指在调查单元内两期影像对比发现的新生切沟,同时,还统计了治理后没有出现切沟的调查单元(图 6)。

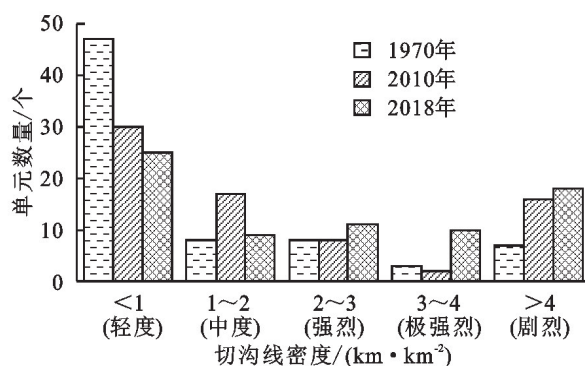


图 4 不同分类切沟线密度调查单元数量统计

Fig. 4 Quantity statistics of gully line density within units in different categories

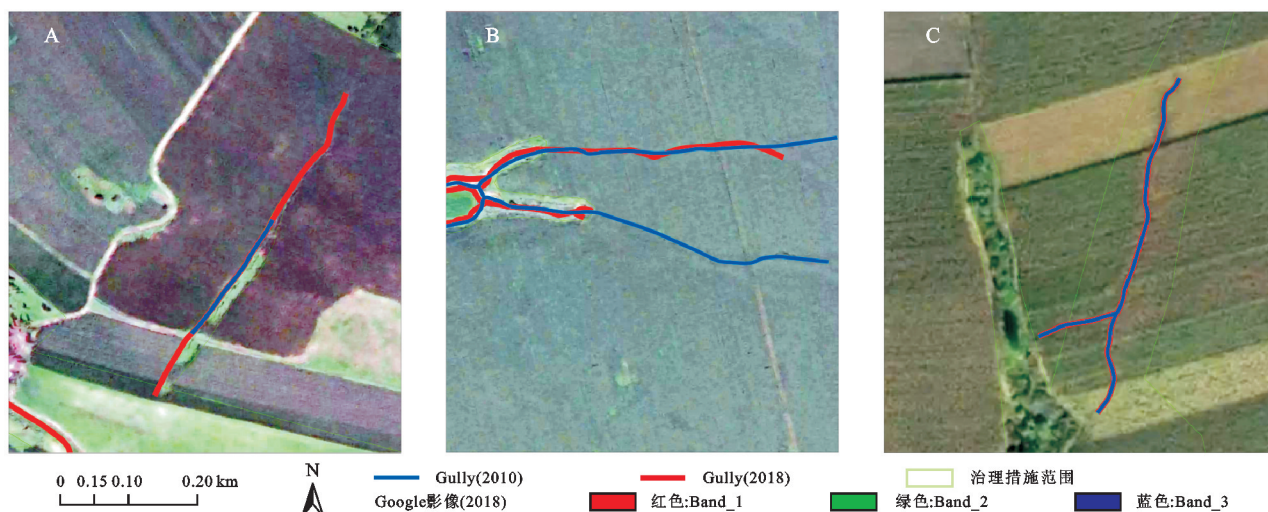


图 5 2010—2018 年单元内切沟典型原位增长 A、原位缩短 B 和原位稳定 C

Fig. 5 Typical in situ growth A, showing signs of regression B and stability C of gullies within units from 2010 to 2018

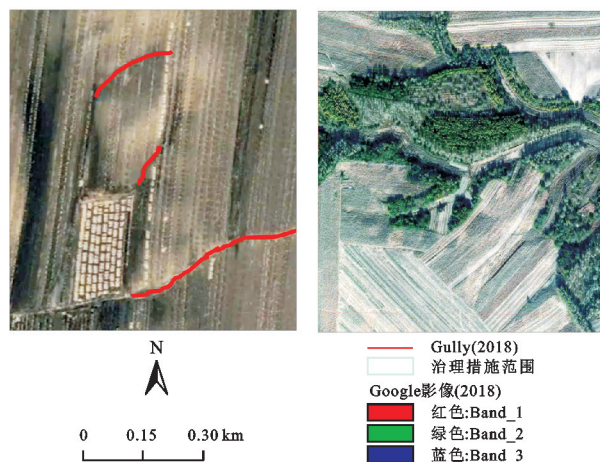


图 6 2010—2018 年单元内切沟典型新生切沟(左)和无切沟(右)

Fig. 6 Typical gullies were emerged after establishment of conservation measures (left) and without gullies (right) within units from 2010 to 2018

从表 1 可以看出:1970—2010 年新生切沟比原位切沟多,但 2010—2018 年相反,新生切沟少于原位切沟,新生切沟占切沟总数的 12.07%。两个阶段原

位增长的切沟数量和抽样单元基本不变,原位增长的切沟占比约为 8%(图 7)。2010—2018 年有 55 个抽样单元发现原位稳定切沟共 379 条,原位缩短的切沟 36 条,共占切沟总数的 79.50%。2010—2018 年治理后没有出现切沟的调查单元增加了 3 个。总的来说,治理后大部分切沟保持稳定,少数切沟仍在发育,新生切沟明显减少。

## 3 讨论

作为重要的商品粮基地,东北黑土区侵蚀沟治理受到高度重视,多种切沟治理措施如石笼防治、连续式柳编跌水防治和柳谷坊防治等得到大范围应用<sup>[13,23-24]</sup>。已有研究对侵蚀沟治理措施进行了多方位评价,其中包括结合某一特定治理工程开展水土保持效益评价<sup>[10,14,25]</sup>、小尺度侵蚀沟综合治理效益评价及小流域综合治理措施效益评价<sup>[11-12,26]</sup>和东北黑土区治理工程保存情况及治理模式分析<sup>[14,25-28]</sup>等。但缺少在区域尺度对黑土区切沟治理效果的宏观评价,这在世界各地都有欠缺<sup>[29]</sup>。本研究通过抽样方法结

合 3 个不同时期的历史遥感影像对比,分析区域尺度切沟治理的长期效果。虽然基于高分遥感只能解译以植被措施为主的切沟治理范围,难以识别谷坊、排水沟等点状和线状工程措施,但考虑到黑土区多采用切沟综合治理措施,本研究评价的实质上是涵盖植被措施在内的综合治理措施。另外,在 2018 年的影像上没有发现治理措施的调查单元,在 2010—2018 年

也可能会有治理措施。如果是面状治理措施,一般不会短期内消失,但是,如果有切沟填埋等措施,则难以从影像中解译得到,因此,有可能影响对治理措施的评价。另一方面,利用高分遥感影像,能够比较准确提取切沟分布<sup>[5,16]</sup>,尤其是通过分析治理措施实施以后 2010—2018 年的切沟发育情况,能够充分评价切沟治理效果。

表 1 对比历史时期 2010 年和 2018 年不同类型发育沟数量变化

Table 1 Comparison of the number of developed gullies of different types in 2010 and 2018

类型	1970—2010 年					2010—2018 年				
	原位增长	原位缩短	原位稳定	新生切沟	2010 合计	原位增长	原位缩短	原位稳定	新生切沟	2018 合计
单元数量/个	25	11	4	67	73	26	23	55	24	73
切沟条数/条	47	12	4	486	549	44	36	379	63	522

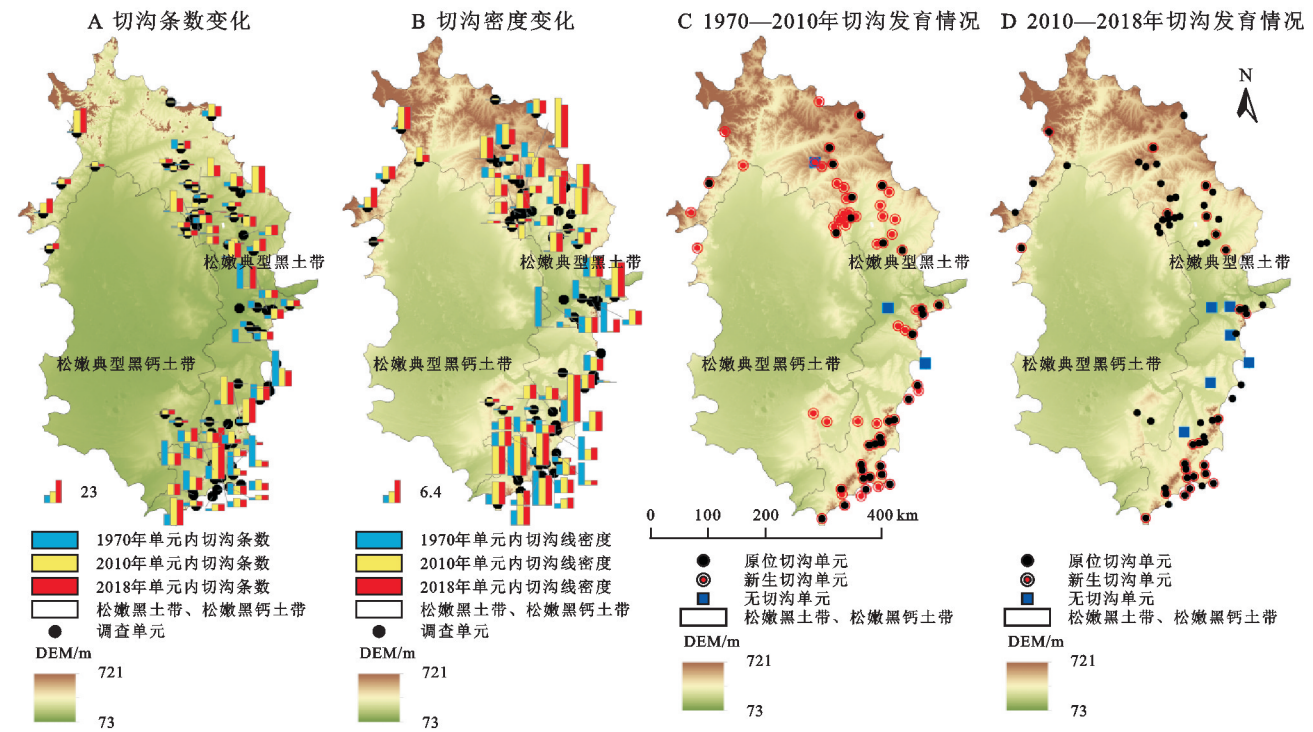


图 7 不同时期抽样单元内切沟数量特征

Fig. 7 Characteristics of the number of gullies in sampled units at different periods

本研究发现切沟治理措施能够有效阻控切沟的发育,这与前人的研究结果一致<sup>[7]</sup>。然而,少数切沟仍在持续发育,治理后切沟存在复发的情况,还需要进一步改进切沟治理策略,提高切沟治理的长效性,保障黑土资源的可持续利用。

4 结论

- (1) 在松嫩黑土区 998 个调查单元中,2018 年有治理措施的抽样单元共 73 个,占耕地抽样单元的 10.11%,大致均匀分布在松嫩黑土带内,2010 年以前松嫩黑土区的切沟已经得到广泛治理。
- (2) 2010—2018 年,有治理措施的情况下,切沟条数略有减少,但有约 30% 的抽样单元切沟密度增加,尤其是强度侵蚀以上抽样单元数量增加。从长期

来看,即使在治理的情况下,松嫩黑土区切沟侵蚀总体上仍在持续加重。

(3) 2010—2018 年,有治理措施的情况下,约 80% 的切沟保持稳定或缩短,但仍有 8% 的切沟持续增长,另有 12% 的新生切沟。切沟治理措施能够有效阻控切沟的发育,但是,还需要进一步改进切沟治理策略,提高切沟治理的长效性,保障黑土资源的可持续利用。

参考文献 (References):

[1] 伍永秋,刘宝元.切沟、切沟侵蚀与预报[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(2):134-142.  
Wu Y Q, Liu B Y. Gully, gully erosion and prediction [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000, 8



- (2):134-142.
- [2] 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.
- [3] 李智广,王岩松,刘宪春,等.我国东北黑土区侵蚀沟道的普查方法与成果[J].*中国水土保持科学*,2013,11(5):9-13.  
Li Z G, Wang Y S, Liu X C, et al. Survey methods and results of erosion gullies in black soil areas of northeastern China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(5):9-13.
- [4] 张兴义,祁志,张晟旻,等.东北黑土区农田侵蚀沟填埋复垦工程技术[J].*中国水土保持科学*,2019,17(5):128-135.  
Zhang X Y, Qi Z, Zhang S M, et al. Rehabilitation engineering of gully filling in the Mollisols farmland of Northeast China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019,17(5):128-135.
- [5] Wen Y R, Kasielke T, Li H, et al. A case-study on history and rates of gully erosion in Northeast China[J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(15):4254-4266.
- [6] 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.
- [7] Liu X B, Zhang S L, Zhang X Y, et al. Soil erosion control practices in Northeast China: A mini-review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011,117:44-48.
- [8] 李珊.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 S. The Ministry of Water Resources organized the investigation of erosion gully in the black soil area of Northeast China (excerpt)[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2023,6(8):157.
- [9] 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 B Y, Yan B X, Shen B, 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.
- [10] Wang J L, Shi X X, Li Z Z, et al. Responses of runoff and soil erosion to planting pattern, row direction, and straw mulching on sloped farmland in the corn belt of Northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021,253:106935.
- [11] 任明,王教河,温磊磊,等.东北黑土区侵蚀沟综合治理成效分析[J].*中国水利*,2023(10):46-48.  
Ren M, Wang J H, Wen L L, et al. Analysis of the comprehensive treatment effects of gully erosion in the black soil region of Northeast China[J]. *China Water Resources*, 2023(10):46-48.
- [12] 王琦,杨勤科.区域水土保持效益评价指标体系及评价方法研究[J].*水土保持研究*,2010,17(2):32-36,40.  
Wang Q, Yang Q K. Parameters and methods for benefit evaluation of region-scale soil and water conservation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010,17(2): 32-36,40.
- [13] 张锋.东北黑土区侵蚀沟现状及治理模式[J].*中国水土保持*,2020(12):54-55,79.  
Zhang F. Current situation and control model of eroded gully in black soil area of Northeast China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2020(12):54-55,79.
- [14] 杨庆楠,徐金忠,殷哲,等.黑龙江省侵蚀沟连续式柳编跌水治理模式分析[J].*中国水土保持*,2023(8):14-16.  
Yang Q N, Xu J Z, Yin Z, et al. Management model of continuous Willow Weaving Water fall in erosion gullies of Heilongjiang Province [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(8):14-16.
- [15] Liu B Y, Xie Y, Li Z G, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020,8(4):430-439.
- [16] 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.
- [17] Karydas C, Panagos P. Towards an assessment of the ephemeral gully erosion potential in Greece using google earth[J]. *Water*, 2020,12(2):603.
- [18] 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 north-eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66 (1):96-106.
- [19] Wang S H, Xu X L, Huang L. Spatial and temporal variability of soil erosion in Northeast China from 2000 to 2020[J]. *Remote Sensing*, 2022,15(1):225.
- [20] 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.
- [21] 杜国明,雷国平,宗晓丹.东北典型黑土漫岗区切沟侵蚀空间格局分析[J].*水土保持研究*,2011,18(2):94-97,271.

- Du G M, Lei G P, Zong X D. Analysis on spatial pattern of gully erosion across typical black hilly region of North-east China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(2):94-97,271.
- [22] 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):328-330,334.
- 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):328-330,334.
- [23] 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.
- [24] 刘卉芳,单志杰,秦伟,等.东北黑土区水土流失治理技术与模式研究评述[J].泥沙研究,2020,45(4):74-80.
- Liu H F, Shan Z J, Qin W, et al. Review on soil and water loss control techniques and models in the Black Soil regions in the Northeast[J]. Journal of Sediment Research, 2020,45(4):74-80.
- [25] 牟廷森,沈海鹰,贺云锋,等.黑土区垄作方式对坡耕地土壤侵蚀的调控效果[J].水土保持通报,2022,42(2):22-30.
- Mou T S, Shen H O, He Y F, et al. Effects of ridge tillage patterns on soil erosion of sloping croplands in black soil region of northeastern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):22-30.
- [26] 李立新,陈英智,董景海.东北低山丘陵区小流域水土流失防治措施的布设及效益评估:以黑龙江省宁安市和盛小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):253-258.
- Li L X, Chen Y Z, Dong J H. Construction and benefit evaluation of soil erosion control in small watershed in low mountain and hill region of northeast China: A case study in Hesheng small watershed of Ning'an City in Heilongjiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(1):253-258.
- [27] 张爱玲,钟云飞,陈祥伟.黑龙江省拜泉县水土保持新进展与效益评价[J].水土保持通报,2018,38(1):276-280,286.
- Zhang A L, Zhong Y F, Chen X W. Recent progress in soil and water conservation and effect assessment in Baiquan County of Heilongjiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(1):276-280,286.
- [28] 温磊磊,许海超,秦伟,等.东北黑土区水土保持重点工程措施保存现状及其问题[J].水土保持通报,2023,43(1):417-423.
- Wen L L, Xu H C, Qin W, et al. Preservation status and problems of key soil and water conservation projects in black soil region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(1):417-423.
- [29] Vanmaercke M, Panagos P, Vanwalleghem T, et al. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art [J]. Earth-Science Reviews, 2021,218:103637.

(上接第66页)

- [24] Zheng B F, Wang J, Wu S Y, et al. Spatio-temporal patterns and driving mechanisms of rice biomass during the growth period in China since 2000[J]. Ecological Indicators, 2023,153:110389.
- [25] 高爽,逯超普,汤水荣,等.长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应[J].环境科学,2023,44(9):4853-4862.
- Gao S, Ti C P, Tang S R, et al. Runoff simulation and its response to extreme precipitation in the Yangtze River Basin[J]. Environmental Science, 2023,44(9):4853-4862.
- [26] 卞建民,胡昱欣,李育松,等.基于BP神经网络的辽河源头区水质评价研究[J].水土保持研究,2014,21(1):147-151.
- Bian J M, Hu Y X, Li Y S, et al. Water quality assessment in source area of Liao River based on BP neural network[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(1):147-151.
- [27] 路中,雷国平,郭一洋,等.不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J].生态学报,2021,41(5):1894-1906.
- Lu Z, Lei G P, Guo Y Y, et al. Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(5):1894-1906.
- [28] 李卓,杨舫.基于SWMM的多情境城市雨洪控制模拟[J].南昌大学学报:工科版,2020,42(2):169-175.
- Li Z, Yang S. Simulation of urban rainwater control in multi-scenario based on SWMM[J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2020,42(2):169-175.
- [29] Qin G X, Meng Z Y, Fu Y. Drought and water-use efficiency are dominant environmental factors affecting greenness in the Yellow River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2022,834:155479.
- [30] Piao S L, Yin G D, Tan J G, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. Global Change Biology, 2015,21(4):1601-1609.