



武汉大学学报(信息科学版)  
*Geomatics and Information Science of Wuhan University*  
ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 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  
作者: 李珊珊, 王春梅, 唐杰, 龙永清, 张先华, 杨安南, 申华珍  
DOI: 10.13203/j.whugis20230493  
收稿日期: 2024-06-03  
网络首发日期: 2024-07-17  
引用格式: 李珊珊, 王春梅, 唐杰, 龙永清, 张先华, 杨安南, 申华珍. 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/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230493>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230493

### 引用格式:

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), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230493 (LI Shanshan, WANG Chunmei, TANG Jie, et, al. Study on the Development of Ephemeral to Permanent Gullies and the Critical Terrain Threshold in Typical Watershed in the Mollisol Region of Northeastern China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 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<sup>1,2</sup>, 王春梅<sup>1,2</sup>, 唐杰<sup>3</sup>, 龙永清<sup>1,2</sup>, 张先华<sup>4</sup>, 杨安南<sup>3</sup>, 中华珍<sup>1,2</sup>

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, 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, 西安 710048

3 北京师范大学珠海校区自然科学高等研究院, 珠海 519087

4 北大荒集团黑龙江鹤山农场有限公司, 黑河 161443

**摘要:** 浅沟和切沟是黑土区主要的侵蚀沟类型, 目前侵蚀沟治理以被动治理切沟为主, 而忽视了浅沟向切沟发育的主动预防, 其根本原因是这一动态过程科学认识水平不足。本文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, 探究 2011 年至 2022 年间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 年间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  $16.6 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ; (2)浅沟发育为切沟动态类型主要成间断性分布在小流域各子流域左右岸中下部及沟掌地下游, 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  $S \geq 0.421 A^{-0.252}$ , 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, 证明了东北黑土区浅沟向切沟发育这一问题的重要性。

**关键词:** 东北黑土区; 坡度; 汇水面积; 地形临界模型; 浅沟; 切沟

### Study on the Development of Ephemeral to Permanent Gullies and the Critical Terrain Threshold in Typical Watershed in the Mollisol Region of Northeastern China

LI Shanshan<sup>1,2</sup>, WANG Chunmei<sup>1,2</sup>, TANG Jie<sup>3</sup>, LONG Yongqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xianhua<sup>4</sup>, YANG Annan<sup>3</sup>, SHEN Huazhen<sup>1,2</sup>

1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Shaanxi Key Laboratory 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 Advanced Institute of Natural Sciences, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai 519087, China

4 Beidahuang Group Heilongjiang Heshan Farm Co., Ltd, Heihe 161443, China

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (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

通讯作者: 王春梅, 教授, 博士生导师。cmwang@nwu.edu.cn

**Abstract: Objectives:** Gully development has become a critical issue in the mollisol region in northeast China, severely damaging black soil resources and threatening national food security. Ephemeral and permanent gullies are the main erosion gullies in the mollisol region in northeast China. Currently, the control and management of gully erosion in the mollisol region in northeast China mainly focus on treating permanent gullies, with insufficient attention on preventing ephemeral gullies development into permanent gullies. The fundamental reason lies in the inadequate scientific understanding of this dynamic process. This research aims to offer a quantitative analysis of ephemeral gullies developing into permanent gullies in recent years in a typical watershed in the mollisol region of northeastern China. **Methods:** This study analyzed the phenomenon of ephemeral gullies developing into permanent gullies in the Hebei Watershed in Nenjiang County, Heilongjiang Province, covering an area of 28.02 km<sup>2</sup>. The morphological parameters of ephemeral gullies and permanent gullies from 2011 to 2022 were obtained through visual interpretation based on high-resolution satellite images and unmanned aerial vehicle (UAV) images, and the accuracy was verified by field measurement data using Global Navigation Satellite System-Real Time Kinematic (GNSS-RTK). The slope and drainage area were obtained using the Digital Elevation Model (DEM) with a 1m resolution derived from the UAV image. Plotting slope and drainage area data on a double logarithmic coordinate system to construct a slope-area critical terrain threshold model. **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) A large number of ephemeral gullies in the study area developed into permanent gullies from 2011 to 2022, accounting for 23.7 % of the total length of ephemeral gullies in 2011. By 2022, the number and total length of permanent gullies had significantly increased, reaching 5.5 times and 5 times greater than those in 2011, respectively. Approximately 50% of these permanent gullies developed from ephemeral gullies during the period, with a length change rate of 16.6 m·a<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>; (2) The development of ephemeral gullies into permanent gullies mainly distributed intermittently in the lower middle parts of the left and right banks as well as in the downstream areas of gully palm within the sub-watersheds in the Hebei watershed, with a few distributed on both sides of the main channel, and longer ones in the downstream areas of gully palm; (3) An area-slope critical threshold model of watershed for the transformation of ephemeral gullies into permanent gullies was constructed, with the model formula as  $S \geq 0.421 A^{0.252}$ , and the accuracy of the model was 72.7 %. **Conclusions:** The high-resolution satellite image and high-precision modern surveying and mapping technology played an essential role in this research. Ephemeral gullies were rapidly developing into permanent gullies in the Hebei watershed in the mollisol region of northeastern China. The critical terrain threshold model can predict the locations that are vulnerable to occur. Further study on the accuracy and applicability of critical terrain threshold model construction can be improved through more factors analysis in regions of different erosion types.

**Key words:** mollisol region of northeast China; slope gradient; drainage area; critical terrain threshold; ephemeral gully; permanent gully

东北黑土区是我国重要的粮食主产区和商品粮基地<sup>[1-3]</sup>。然而，受多种自然和人为因素的影响<sup>[2]</sup>，东北黑土区水土流失日益严峻<sup>[1, 4, 5]</sup>。沟道侵蚀是东北黑土区水土流失的主要形式之一<sup>[6]</sup>，据水利部 2023 年公布的东北黑土区侵蚀沟调查数据显示，全国水土保持规划一级分区东北黑土区 108.75 万平方公里范围内，侵蚀沟总数为 66.67 万条，其中主要是 100-500 m 的侵蚀沟，占 69.49 %<sup>[3, 7]</sup>，侵蚀沟类型以切沟为主，由于其对土壤损害更为明显<sup>[8]</sup>，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，导致每年仍有大量的浅沟在向切沟发育，急需对浅沟向切沟发育问题进行深入研究。2022 年 6 月国家颁布了《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<sup>[9]</sup>。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发育过程具有重要意义，也将成为下一步防治结合型黑土侵蚀沟治理策略形成的关键。

浅沟和切沟是黑土区重要的侵蚀沟类型<sup>[2]</sup>。浅沟是发生于耕地上由集中水流引起的沟道<sup>[10]</sup>，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<sup>[11]</sup>，在耕作填充和侵蚀的长期共同作用下，可形成瓦背状地形<sup>[11]</sup>或称槽形地<sup>[12]</sup>。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<sup>[11]</sup>。浅沟若不加以治理，可不断加宽加深<sup>[13]</sup>，一部分切沟由此形成。在过去 20 多年中，网络 RTK 技术已广泛应用于测绘、导航和地学研究等领域<sup>[14]</sup>。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、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<sup>[15]</sup>。不同学者对黑土区切沟的发育速率和影响因素已进行了大量研究，基于高精度 RTK GPS 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<sup>-1</sup><sup>[16, 17]</sup>，结合厘米级 UAV 影像得出 2005-2018 年切沟发育速率为 7.9 m·a<sup>-1</sup><sup>[18]</sup>；在黑龙江省海伦市，通过 RTK GPS 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<sup>-1</sup> 和 253.97 m<sup>2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[19]</sup>，切沟发育受气候、土地利用、地形等因素的综合影响<sup>[19-21]</sup>。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<sup>3</sup>·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[22]</sup>，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<sup>[13]</sup>。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<sup>[23]</sup>，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<sup>[2, 22, 24]</sup>，因而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<sup>[25]</sup>等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： $S=0.203 A^{-0.148}$  和  $S=0.263 A^{-0.141}$ ；刘欣<sup>[26]</sup>等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阈值模型为  $S=0.159 A^{-0.171}$ 。

综上，目前东北黑土区侵蚀沟发育相关研究主要体现在对浅沟、切沟的发育速率及其影响因素上，多偏重于切沟，对浅沟的发育规律研究相对薄弱，尤其是将这两者联系起来对浅沟发育为切沟这一动态类型的针对性分析较少。

本研究拟针对浅沟发育为切沟这一特定的动态类型，在黑土典型小流域内开展 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这一问题对东北黑土区的重要影响，并给出目前由浅沟发育为切沟的临界地形阈值。

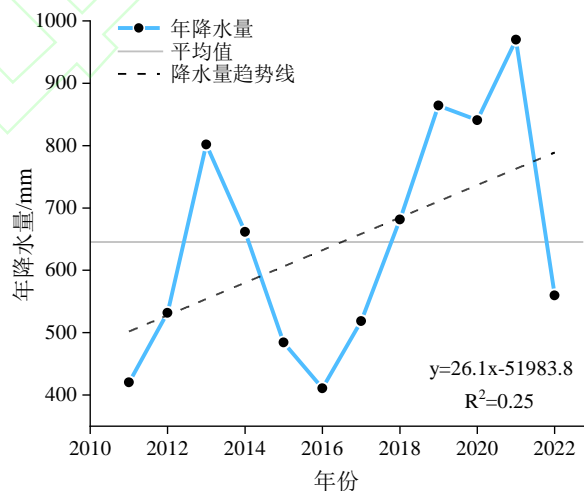


图1 研究区 2011-2022 年降水年际动态图

Fig.1 Annual Precipitation Dynamics in the Study Area from 2011 to 2022

## 1 方法

### 1.1 研究区

研究区为鹤北小流域（北纬  $48^{\circ} 59' -49^{\circ} 03'$  和东经  $125^{\circ} 16' -125^{\circ} 21'$  ），面积为  $28.02 \text{ km}^2$ 。该流域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<sup>[19]</sup>（图 2）。

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  $1^{\circ}-6^{\circ}$  之间，坡长以  $500-4000 \text{ m}$  为主<sup>[2]</sup>。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  $-7-11^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>；夏季高温多雨，平均气温  $19.6^{\circ}\text{C}$ <sup>[19]</sup>，近 50 年年均降水量为  $558.8 \text{ mm}$ 。2011-2022 年降水年际动态变化如图 1 所示，2011 年降水量为  $420.2 \text{ mm}$ ，2022 年降水量为  $559.6 \text{ mm}$ ，2011-2022 年平均降水量为  $645.4 \text{ mm}$ ，整体呈增长趋势，趋势率为  $26.1 \text{ mm/a}$ ，2021 年年降水量达到最大值  $970 \text{ mm}$ （据鹤山农场气象站资料）。研究区土壤类型主要为黑土<sup>[27]</sup>，质地黏重，透水性差<sup>[2, 28]</sup>。斜坡和顺坡起垄耕作普遍，近些年来侵蚀沟发育迅速，严重影响了农业发展。

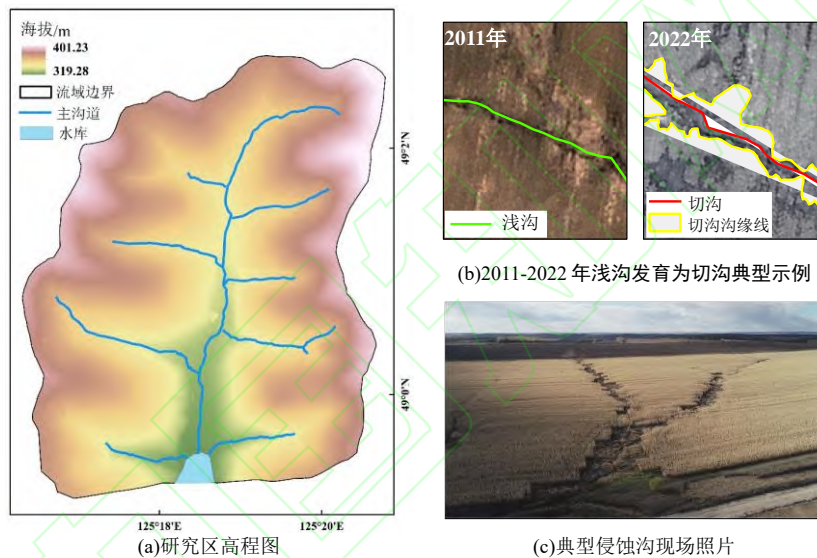


图 2 研究区

Fig.2 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 年 6 月 24 日和 2022 年 4 月 21-26 日，分辨率分别为  $0.61 \text{ m}$  和  $5 \text{ cm}$ ，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的辨识研究区侵蚀沟，有利于进行人工目视解译。DOM 和 DSM 经 Pix4mapper 空三解运算功能计算得到，对其进行高斯滤波和重采样处理可获取研究区  $1 \text{ m}$  分辨率的数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）。野外实测在 2022 年 4 月 21 日至 28 日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-Real Time Kinematic, 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<sup>[14]</sup>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  $8 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ ，垂直精度为  $15 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ 。

### 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，以获取切沟的面积，利用 Arcmap 10.8 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 年 4 月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切沟长度的平均绝对百分比误差为 0.35 %<sup>[29]</sup>，以野外实测结果修订解译结果；最后，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，我们在 2023 年 7 月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，在研究区范围内逐条沟询问北大荒集团鹤山农场资历深厚的管理人员，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 %。以上，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 年四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如表 1。

表 1 各类侵蚀沟动态类型示意图

Tab.1 Illustrations of Gully Erosion Dynamic Types

名称	定义	示意图
浅沟发育为切沟	在相同的位置，2011 年为浅沟，2022 年为切沟	
新成切沟	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，发育类型包括：沟头前进，沟底下切，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<sup>[30]</sup>，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的变化<sup>[31]</sup>；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<sup>[31]</sup>。沟头汇水面积的计算步骤为：1) 基于 2022 年分辨率为 1m 的 DEM 数据，利用 Arcmap10.8 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、DEM 进行逐沟头修改<sup>[32]</sup>，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，并去除各类沟头点总数的 5% 个（浅沟发育为切沟：2 个，无变化：3 个）明显离群的沟头点<sup>[33]</sup>，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（ $n=36$ ）和无变化类型侵蚀沟沟头（ $n=61$ ）两类数据随机抽取其 70%（浅沟发育为切沟：25 个，无变化：43 个）进行数据建模，对其下限点拟合得到临界线<sup>[25, 32]</sup>，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<sup>[32, 34]</sup>，表达式为公式（1）。剩余 30% 的数据进行模型验证（浅沟发育为切沟：11 个，无变化：18 个），当验证数据落在直线上方说明模型预测正确，落在直线的下方说明模型预测错误，模型精度表达式为公式（2）。

$$S=a \times A^{-b} \quad (1)$$

式中， $S$  为坡度(m/m)， $A$  为汇水面积( $m^2$ )， $b$  值表示直线的斜率； $a$  值指沟蚀发生的临界值， $\ln a$  表示直线在  $Y$  轴的截距。通过将两个下限点的坡度、汇水面积值代入公式(1)，求解出  $a$ ， $b$  值，由此建立浅沟发育为切沟动态类型的地貌临界模型。

$$P=\frac{n}{N} \times 100 \quad (2)$$

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/ $km^2$ ，2022 年为 2.3 条/ $km^2$ ，减少了 20.7 %；长度密度由 768.1  $m/km^2$  变为 487.7  $m/km^2$ ，减少了 36.5 %。2011 年切沟的沟条密度为 0.4 条/ $km^2$ ，2022 年为 2.2 条/ $km^2$ ，增加了 450.0 %；切沟长度密度由 73.6  $m/km^2$  变为 365.4  $m/km^2$ ，增加了 396.5 %；面积密度由 0.02  $ha/km^2$  变为 0.09  $ha/km^2$ ，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 年浅沟的长度密度为 768.1  $m/km^2$ ，其中转变为切沟的长度密度为 182.2  $m/km^2$ ，占 23.7%；未转变为切沟的长度密度为 585.9  $m/km^2$ ，占 76.3%。结果表明 2011-2022 年，约有 1/4 的浅沟发育为切沟。

表 2 2011 和 2022 年浅沟和切沟密度统计表

Tab.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 ( $ha/km^2$ )
	浅沟	切沟	浅沟	切沟	切沟
2011	2.9	0.4	768.1	73.6	0.02
2022	2.3	2.2	487.7	365.4	0.09

2022 年切沟来源主要分为三类，见表 3。由表可知，2011 年原有切沟均发生变化，但其长度密度占 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  $m/km^2$  和 182.2  $m/km^2$ ，占比分别为 29.0% 和 49.9%，发育速率分别为 9.6  $m \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$  和 16.6  $m \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$ 。由此可知，

研究区正处于浅沟快速向切沟发育的阶段，2022 年的现有切沟中有近一半是 2011-2022 年期间由浅沟发育而来的，并且有浅沟的部位发育出切沟的速率是无浅沟部位的 1.7 倍。

图 3 为 2022 年切沟来源动态类型长度变化箱线图。结果显示，2022 年切沟来源类型包括新成切沟、浅沟发育而来的切沟和原有切沟发育三种，其中前两类的长度变化差异明显，新成切沟的长度相对更短，其长度主要集中在 35-115 m 之间，最大值可达 205 m；而浅沟发育为切沟的长度相对更长，其长度主要集中在 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。

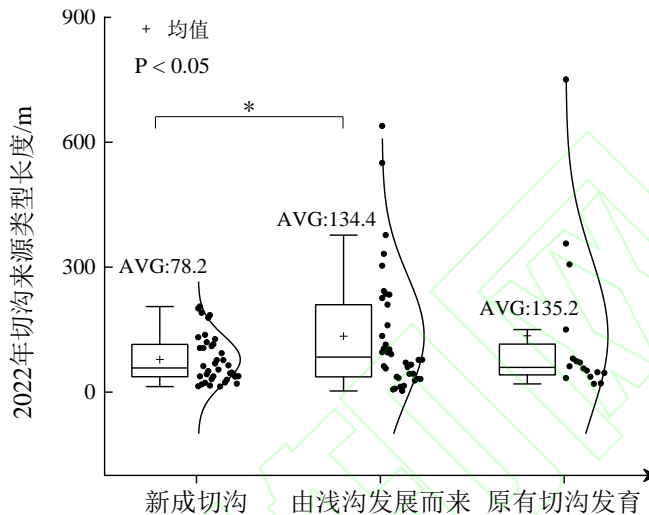


图 3 2022 年不同来源切沟长度变化箱线图

Fig.3 Boxplot of Length Variation of Permanent Gullies from Different Sources in 2022

注：\*表明两者有显著差异 (P<0.05)。

Note: \*indicates significant difference (P<0.05).

表 3 2022 年不同来源切沟的长度密度和发育速率

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

2022 年沟类型	2022 年切沟长度密度 (m/km <sup>2</sup> )	2022 年切沟来源类型	长度密度 (m/km <sup>2</sup> )	发育速率 (m·a <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	比例 (%)
切沟	365.4	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

## 2.2 浅沟向切沟发育的空间分布特征

图 4 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部，长度密度分别为 105.8 m/km<sup>2</sup> 和 48.1 m/km<sup>2</sup>，分别占比 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，其长度密度为 28.3 m/km<sup>2</sup>，仅占比 15.5%。从图 4 中可以发现该动态类型的侵蚀沟部分呈间断性分布，而非连续分布。



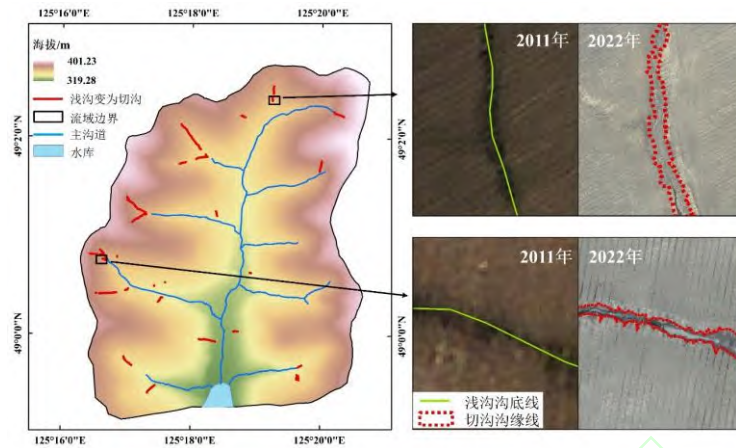


图 4 浅沟发育为切沟的空间分布情况

Fig.4 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表

Tab.4 Statistics on Length Density at Different Locations of Ephemeral Gullies Developing into Permanent Gullies

发生部位	长度密度 (m/km <sup>2</sup> )	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

不同流域部位浅沟向切沟发育的每段平均长度有较大差异 (图 5), 子流域沟掌地及左右岸坡中下部和主沟道两侧分别为 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。

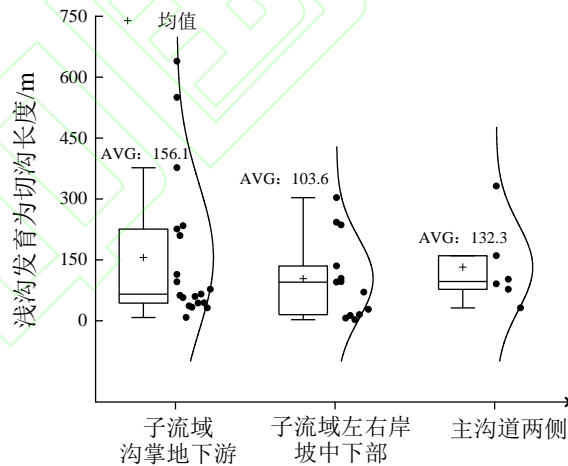


图 5 不同空间位置由浅沟发育为切沟的长度变化箱线图

Fig.5 Boxplot of Length Variation of Ephemeral Gullies Developing into Permanent Gullies at Different locations in a Watershed

### 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动态类型侵蚀沟的沟头地形特征差异如图 6 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要的汇水面积明显大于无变化类型, 均值分别为 10.6 ha 和 3.5 ha, 前者是后者的 3 倍。

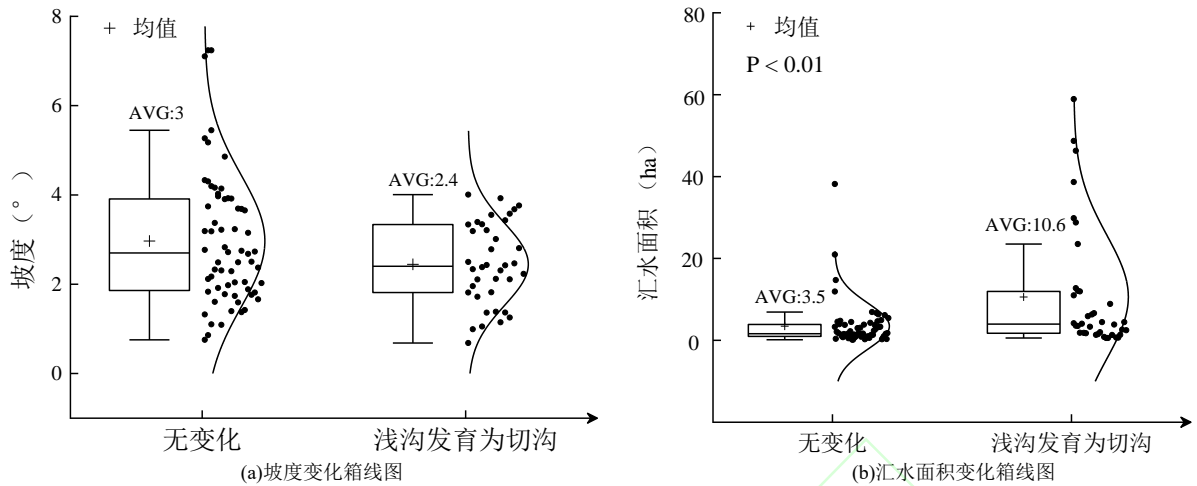


图 6 沟头地形特征箱线图

Fig.6 Boxplots of Topographic Features of Gully Heads

去除离群点后，将随机抽取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 S-A 临界关系模型分别为： $S \geq 0.421 A^{-0.252}$  和  $S \geq 0.295 A^{-0.287}$ ，如图 7a。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，而落在直线  $S = 0.421 A^{-0.252}$  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的侵蚀沟沟头点。可以发现两种动态类型的 S-A 临界关系直线斜率相近，即 b 值，这代表了汇水面积指数，表明在两种类型发生过程中，汇水面积的相对重要性相似。浅沟发育为切沟动态类型的 a 值要显著大于无变化动态类型的 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 S-A 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，如图 7b，发现浅沟发育为切沟动态类型的侵蚀沟沟头有 8 个点在对应临界线上方，模型准确率达 72.7%，无变化类型的 18 个点全部落在对应临界线上方，准确率可达 100%。

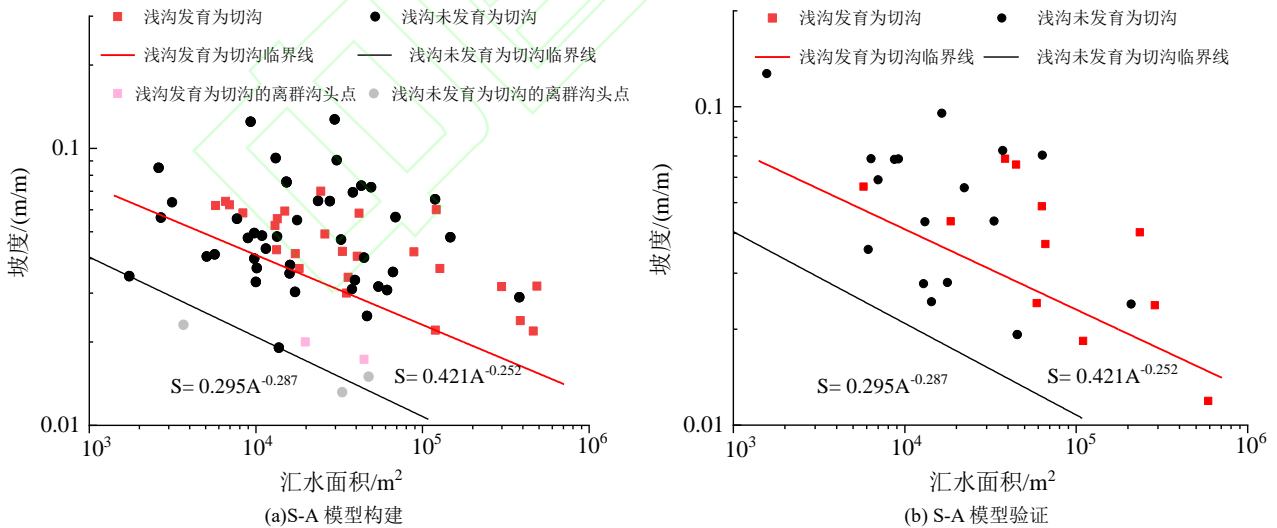


图 7 2011 至 2022 年浅沟发育和未发育为切沟的沟头 S-A 关系图

Fig.7 S-A Relationship at Gully Heads with and Without Ephemeral Gullies Developing into Permanent Gullies 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

在 2011-2022 年，研究区切沟快速生成和发育，其数量、长度和面积分别可达十年前的 5.5 倍、5 倍和 4.5 倍。有研究表明，在省级尺度 47.3 万  $\text{km}^2$  的黑龙江省，60 年的侵蚀沟变化动态结果显示，无论是侵蚀

沟条数，还是沟道面积和沟壑密度都显著增加<sup>[35]</sup>。本研究表明切沟的快速发生发育的主要来源是浅沟，在 2011-2022 年，这一占比达到了现有切沟长度比例的近一半。结果显示，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动态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。早在二十年前，已有人提出浅沟若不加以治理会发育为切沟的结论<sup>[36]</sup>，后来也有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<sup>[13, 17, 37, 38]</sup>。已受到浅沟侵蚀的耕地由于耕作活动进一步加剧，使坡面横向起伏加大，汇水面积也渐渐增加，逐渐演变成切沟侵蚀<sup>[25]</sup>。另外也有一部分浅沟在实践中易被简单填充，会随着径流过程在同一部位再次出现，所以并未真正消失。但一些特殊情况，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 至 2022 年未转变为切沟的浅沟长度密度为 585.9 m/km<sup>2</sup>，2022 年的浅沟长度密度为 487.7 m/km<sup>2</sup>，小于前者，正是由于上述原因，研究区隶属北大荒集团鹤山农场，大规模机械整地相对更为常见。

浅沟主要分布在低洼水线处<sup>[10, 22, 39]</sup>，分布形式受坡型影响呈现出辐散状和平行状<sup>[39]</sup>。张永光等人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<sup>[25]</sup>，侵蚀强度沿坡长呈强弱交替分布<sup>[40]</sup>，黑土区发育强烈的浅沟、切沟多分布于坡面中下部<sup>[41, 42]</sup>，这与本文得出浅沟发育为切沟主要发生在左右两岸坡中下部，一般成间断性分布的结论相一致。

目前国家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，根据本研究的结果分析可知，对浅沟预防的缺失将会导致大量切沟的形成。切沟的形成会增大汇流、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<sup>[43]</sup>，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更大的危害。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，而如何防治即将发育为切沟的浅沟是下一步治理工作中亟需加强的方面。有研究表明，东北黑土区是极端暴雨频次明显增加的区域<sup>[44]</sup>，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，这更促进了切沟的生成和发育<sup>[2, 20]</sup>。在这样的气候变化背景下，防治浅沟向切沟的转变就显得更为重要。

东北黑土区根据水热类型、地形地貌、土壤类型等因素将其进一步划分为不同类型区<sup>[45]</sup>。区域不同，沟道数量和沟道占地面积均有差异<sup>[2, 43]</sup>，浅沟发育为切沟的临界条件也有差异。侵蚀沟道在东北黑土区分布较多，有近九成的侵蚀沟属于发展型侵蚀沟<sup>[7]</sup>，因此建议从流域尺度推广至区域尺度，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这一问题，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的讨论

东北黑土区侵蚀沟防治结合型治理策略中最关键的一点是对哪些目前已有浅沟更易发育为切沟的精准预测。地形在浅沟和切沟的形成以及浅沟向切沟转变中起着关键的作用，坡度和汇水面积是影响侵蚀沟发育的两个主要因素<sup>[25, 46, 47]</sup>。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，这是因为东北黑土区坡缓坡长的地形特点，坡度的微小变化不能反映在侵蚀强度的变化上，因此，坡度对浅沟的发育影响有限<sup>[25]</sup>。汇水面积和坡度二者的关系经常用于确定已有沟道侵蚀的沟头，从而预测什么地方可能会发生沟蚀<sup>[25]</sup>。在 S-A 临界关系模型中，a 值代表着沟蚀发生所需的临界值<sup>[24]</sup>，a 值越大，表示该区域越不容易发生沟道侵蚀<sup>[32]</sup>，b 值在理论上代表着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<sup>[48]</sup>。本研究得出 2011-2022 年浅沟发育为切沟发生的临界模型中 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(图 7)，这就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  $b$  值变化于 0.2 和 0.4 之间<sup>[49]</sup>，这与本研究得出的结果一致。张永光等在鹤北流域的两个子流域的研究表明浅沟和切沟的临界模型的  $b$  值分别为 0.148 和 0.141<sup>[25]</sup>，显著小于本研究中浅沟发育为切沟动态类型 S-A 临界模型中的  $b$  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  $b$  值是不稳定的，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的讨论

由图 7 可知一些满足浅沟发育为切沟地形临界条件的沟头仍在十年间未发生变化，这是因为沟蚀的发生除受地貌因素控制外，还受如机械碾压、地表植被、土地利用等多种因素的影响<sup>[24]</sup>，比如本研究通过野外调查和询问，发现切沟的快速发生发育与近年来基础设施的建设如涵洞密切相关。有研究表明在基础设施建设过程中，势必会产生大量未及时硬化或覆盖的裸露地面，加之车辆或其他机械碾压的综合影响，地表径流和洪峰流量分别增大 146%-227%和 178%-575%<sup>[50]</sup>，这会导致大量切沟快速发育<sup>[51]</sup>。苏子龙等分析了鹤山农场防护林带对浅沟发育的影响与防护林带的个数和间距密切相关，即林带个数的增加会增大浅沟发育的临界汇水面积<sup>[39]</sup>，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，植被覆盖率较大，使之对雨水的截留效率和土壤的渗透率更高<sup>[20]</sup>，从而发生浅沟发育为切沟的情况较少。徐艳燕等认为在高强度降雨情况下，横坡垄向和斜坡垄向中的雨水会沿着垄向大量聚集，并在低洼处汇集从而促进侵蚀沟的发育<sup>[52]</sup>。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<sup>[53]</sup>。另一个可能会影响浅沟发育为切沟空间分布的原因是由于农场整地，一些由浅沟发育而来的切沟会被填埋。另外，本研究区在国营农场的改垄、整地造林、地埂等防治措施要明显优于其他地方，并取得了一定的成效。然而，这并不代表在未来的气候变化条件下该研究得出的满足条件却未发生变化的沟头仍可以保持稳定，当垄向或作物类型等因素发生变化时，这些沟也有一定的危险可能发育为切沟。另外，本研究是基于鹤北小流域 2011-2022 年间的气候条件下，未来气候的变化尤其是极端暴雨的影响下<sup>[44]</sup>，模型参数也有可能发生变化。本研究是小流域尺度的研究，因此未考虑气候、土壤性质的空间差异。但在更大的区域应用时必须考虑不同气候、土壤等环境条件对模型参数的影响。因此下一步浅沟向切沟发育临界模型的研究除了地形要素，还要考虑农艺和土地管理、水土保持措施、气候、土壤性质等其他因子的综合影响来进行预测。

### 3.4 下一步研究的重点

2011-2022 年浅沟快速发育为切沟，一旦转变，治理难度陡增，很难恢复，对耕地破坏十分严重。而防治结合型治沟理念是目前治理策略中的重点。本研究已证明了防治浅沟发育为切沟的重要性，并分析了小流域尺度下浅沟发育为切沟的地形临界阈值。但浅沟向切沟发育预测这一关键科学问题的解决还需要在以下方面持续突破才可更好地支撑国家正在进行的黑土地侵蚀沟治理决策：

- (1) 更大空间尺度的浅沟空间分布及其向切沟发展风险的科学认识；
- (2) 不同侵蚀类型区浅沟向切沟发育规律的探测及集成；
- (3) 考虑降雨、地形、土壤、管理措施等差异完善目前的以地形临界为核心的浅沟向切沟发育预测模型，从而进一步提升模型在不同地区的适用性并提高精度。

## 4 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两期影像的侵蚀沟，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%是由 2011-2022 年浅沟发育而来的；

(2) 浅沟发育为切沟动态类型主要成间断性分布在鹤北流域各子流域沟掌地下部和左右岸坡中下部,少数分布在主沟道左右两侧;

(3) 通过汇水面积-坡度临界阈值,确定了浅沟向切沟转变的临界模型为  $S \geq 0.421A^{-0.252}$ ,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,给出了其定量特征、易发部位和空间预测方法,以期在黑土区进一步侵蚀沟治理决策提供理论与技术支撑。

## 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,特此致谢。

## 参考文献

- [1] 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. (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)
- [2] 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(02): 1-12. (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(02): 1-12)
- [3] 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(07): 157-165. (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(07): 157-165)
- [4] Zhang Xingyi, Hu Wei, Li Jianye, et al. Prevention and control of soil erosion is the importance of black land protection[J]. Chin Sci Bull, 2023:1-5. (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, 2023: 1-5)
- [5] 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. (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)
- [6] 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. (焦鹏, 阎百兴, 欧洋, 等. 东北低山丘陵典型区侵蚀分布特征及其地形影响研究[J]. 地理科学, 2022, 42(10): 1829-1837)
- [7] 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(08): 157. (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(08): 157)
- [8] Tang Jie, Liu Gang, Xie Yun, 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] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Black Land Protection Law of the People's Republic of China[EB/OL]. 2022. (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. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/202303/t20230314\\_1019525.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/202303/t20230314_1019525.shtml))
- [10] 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(01): 145-154. (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(01): 145-154)
- [11] 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(01): 9-16. (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(01): 9-16)
- [12] Zhang Tianyu. Measurement and calibration of ephemeral gully depth in ridge-tillage croplands[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(05): 138-144. (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(05): 138-144)

- [13] Tang Jie, Liu Gang, Xie Yun, et al. Annual variation of ephemeral gully erosion in a cultivated catchment[J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115166.
- [14] Li Bofeng, Miao Weikai, Chen Guange. 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. (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)
- [15] 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(05): 505-513+40. (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(05): 505-513+40)
- [16] Hu Gang, Wu Yongqiu, Liu Baoyuan, et al. Preliminary Research on Short-term Channel Erosion Using GPS and GIS[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, (04): 16-19+41. (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, (04): 16-19+41)
- [17] 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, (11): 1165-1173. (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, (11): 1165-1173)
- [18] Tang Jie, Xie Yun, Wu Yongqiu, 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] 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(01): 18-23. (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(01): 18-23)
- [20] Zhang Guanghui. Advances and Prospects for Gully Erosion Researches[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(05): 1-13. (张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(05): 1-13)
- [21] Wang Wenjuan, Deng Rongxin, Zhang Shuwen, et al. Development Evolution Characteristics of Cully Erosion in Typical Black Soil Region of Northeast China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(04):105-110. (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(04): 105-110)
- [22] 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(04): 545-549. (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(04): 545-549)
- [23] 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. (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)
- [24] 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, (04): 4449-4454. (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, (04): 4449-4454)
- [25] 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, (01): 35-38+49. (张永光, 伍永秋, 刘洪鹤, 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, (01): 35-38+49)
- [26] Liu Xin, Guo Mingming, Zhang Xingyi, 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] Liu Baoyuan, Zhang Ganlin, Xin Yun, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China (in Chinese) [J]. *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 96-106. (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: 96-106)
- [28] Yan Yechao, Zhang Shuwen, Li Xiaoyan, et al. Temporal and Spatial Variation of Erosion Gullies in Kebai Black Soi Region Heilongjiang during the Past 50 Years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, (06): 137-142. (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, (06): 137-142)

- [29] Zhang Chunmei, Wang Chunmei, Long Yongqing, et al. Comparative Analysis of Gully Morphology Extraction Suitability Using Unmanned Aerial Vehicle and Google Earth Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(17).
- [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] 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(06): 96-104. (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. *农业工程学报*, 2022, 38(06): 96-104)
- [32] 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]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 38(05): 658-667. (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(05): 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] 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(03): 122-125+201. (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(03): 122-125+201)
- [35] 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(03): 320-326. (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(03): 320-326)
- [36] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion [J]. *Catena*, 1999, (37): 393-399.
- [37] Tang Jie, Liu Gang, Xie Yun, et al. Ephemeral Gullies Caused by Snowmelt: A Ten-Year Study in Northeastern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 212: 105048.
- [38] Tang Jie, Xie Yun, Liu Chuan, et al. Effects of Rainfall Characteristics and Contour Tillage on Ephemeral Gully Development in a Field in Northeastern China. *Soil & Tillage Research*, 2022, 218: 105312.
- [39] 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(03): 20-23+9. (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(03): 20-23+9)
- [40] 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, 19(05): 29-34. (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, 19(05): 29-34)
- [41] Fan Haoming, Cai Qiangguo, Cui Ming. Soil erosion developed with the vertical belts in the gentle hilly black soil regions in Northeast China[J]. *Transaction of the CSAE*, 2005, 21(06): 8-11. (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(06): 8-11)
- [42] 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, (03): 306-311. (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, (03): 306-311)
- [43] 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(03): 72-80. (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(03): 72-80)
- [44] Bai He, Ming Xisen, Liu Qihang, et al. A Dataset of Rainstorm in China Based on GPM Precipitation Product During 2001-2019[J]. *China Scientific Data*, 2022, 7(02): 231-240. (柏荷, 明义森, 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(中英文网络版)*, 2022, 7(02): 231-240)
- [45] 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(02): 495-504. (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(02): 495-504)

[46] Wang Dichen, Fan Haoming, Fan Xiangguo. Distribution 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] 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(03): 148-154. (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(03): 148-154)

[48] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50: 91-133.

[49] Patton P C, Schumm S A. Gully erosion, Northwestern Colorado: A Threshold Phenomenon[J]. Geology, 1975, 3(2): 88-90.

[50] 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): e137.

[51] Nyssen J. Erosion Process and Soil Conservation in A Tropical Mountain Catchment Under Threat of Anthropogenic Desertification: A Case Study from Northern Ethiopia[J]. Belgium: Department of Geography-Geology, K. U. Leuven, 2001.

[52] Xu Yanyan. Effects of topography and tillage characteristics on gully development in the Mollisol region[J]. China Agricultural Informatics, 2023, 35(4): 26-38. (徐艳燕. 典型黑土区地形与耕作特征对切沟发育的影响 [J]. 中国农业信息, 2023, 35(4): 26-38)

[53] Yan Yue, Zhang Xingyi, Liu Jieli, et al. The effectiveness of selected vegetation communities in regulating runoff and soil loss of regraded gully banks in the Mollisol region of northeast China[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32: 2116-2129.

#### 网络首发:

标题: 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

作者: 李珊珊, 王春梅, 唐杰, 龙永清, 张先华, 杨安南, 申华珍

收稿日期: 2024-06-03

DOI:10.13203/j.whugis20230493

#### 引用格式:

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), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230493 (LI Shanshan, WANG Chunmei, TANG Jie, et, al. Study on the Development of Ephemeral to Permanent Gullies and the Critical Terrain Threshold in Typical Watershed in the Mollisol Region of Northeastern China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230493)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

#### 您感兴趣的其他相关论文:

高植被山区泥石流物源 LiDAR 遥感精细识别方法研究

刘小莎, 董秀军, 钱济人, 郭晨, 赵俊丞, 詹佳琪

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(3): 400-410.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210486>

星载 GNSS-R 反演土壤湿度研究进展与思考

张双成, 郭沁雨, 马中民, 刘奇, 胡胜伟, 周昕, 赵贺斌

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 15-26.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230100>



一种利用 Unity3D 模拟崩塌三维运动全过程的方法

王豪, 黄健, 黄祥, 袁镜清, 贺子城

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1990-1998.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210237>

