

# 东北典型黑土区耕地侵蚀沟形态系统分类方法构建

李全峰<sup>1,2</sup>, 李吉程<sup>1</sup>, 于明鹏<sup>3</sup>, 张鹏<sup>4</sup>

(1. 东北农业大学公共管理与法学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省土地遥感大数据技术创新中心, 哈尔滨 150030;  
3. 广东国地规划科技股份有限公司, 广州 510000; 4. 长安大学土地工程学院, 西安 710054)

**摘要:** 侵蚀沟形态分类是认识其发展现状和潜在危害的重要方法, 探究耕地侵蚀沟形态分类特征和分布特征对把握耕地侵蚀沟防治重点, 预防坡耕地水土流失具有重要意义。针对现有侵蚀沟形态分类体系指标获取难、分类结果不完整等问题, 利用遥感解译数据, 根据系统分类和信息科学理论, 结合东北黑土区现实需求, 构建了耕地侵蚀沟系统分类方法, 并在典型黑土耕作区海伦市进行了验证。结果表明: 1) 海伦市耕地侵蚀沟具有小面积、大宽度、短长度的特点, I类和II类为数量最多的一级分类; II类四等微型沟(II4T)和II类四等小型沟(II4S)在二级和三级分类中数量居多, 易通过高标准农田建设进行治理。2) 地形要素下耕地侵蚀沟形态分布差异明显, 需要特别关注在高程180~<240 m, 坡长35~<55 m, 坡度2°~6°, 西南坡区域内的I4T、II4S、II4T等发育程度较低的侵蚀沟向更高发育程度的IV4M、V4M等类型转变, 建议结合农田建设及时采取综合防治措施, 以防止耕地侵蚀沟的潜在破坏。3) 构建的“类+等+型”耕地侵蚀沟分类定级方法, 兼顾指标的易获取性和方法的易操作性, 能够精准、直观地揭示耕地侵蚀沟的形态特征及其危害情况, 可为侵蚀沟和黑土耕地的协同综合治理提供方法借鉴。

**关键词:** 侵蚀; 分类; 遥感; 形态特征; 耕地; 东北黑土区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307178

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-14-0053-09

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307178 <http://www.tcsae.org>

LI Quanfeng, LI Jicheng, YU Mingpeng, 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 (Transactions of the CSAE), 2024, 40(14): 53-61. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307178 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

侵蚀沟分类是评估其危害程度的重要方法, 也是制定综合防治策略的重要依据<sup>[1]</sup>。根据水利部公布的数据显示<sup>[2]</sup>, 东北黑土区有近50万条侵蚀沟发生在耕地上, 其中90%仍在持续发育, 由此引发的溯源侵蚀和沟岸坍塌导致大量耕地被蚕食切割, 严重影响着黑土耕地资源的持续利用<sup>[3-5]</sup>。面对新时期黑土地保护利用的要求<sup>[1]</sup>, 优化侵蚀沟道分区分类体系, 建立高效识别侵蚀沟形态特征及危害程度的分类方法, 探索与农田建设相结合的高效协同治理策略, 已成为国家黑土地保护工程方案的实施重点。

中国对侵蚀沟的分类研究起源于黄土高原区的土壤侵蚀调查<sup>[6]</sup>。已有研究从沟谷形态、发育过程和演进阶段等角度, 将侵蚀沟分为细沟、浅沟、切沟、冲沟和干沟等类型<sup>[7-9]</sup>。这一分类体系将复杂的水蚀过程标准化, 为中国相关地区认识侵蚀沟演变规律和发生机理提供了关键技术参考<sup>[10-11]</sup>。但是与黄土高原区相比, 东北黑土

区的侵蚀沟主要出现在近代开垦之后, 并集中分布于漫岗区 and 丘陵区的耕地上, 在融雪、冻融、重力、风力和耕作等多种外力影响下<sup>[12-14]</sup>, 具有数量众多、分布广泛、变化迅速等特点<sup>[15-17]</sup>, 存在较高的潜在危害<sup>[18-20]</sup>。与此同时, 已有分类体系对侵蚀沟形成机理与发展阶段的深入剖析<sup>[7-8]</sup>, 不便于东北黑土区侵蚀沟危害程度的高效识别, 从而影响农田建设中侵蚀沟的协同治理成效。在全面推进黑土地保护工程与高标准农田建设阶段, 构建一套适合东北黑土区耕地侵蚀沟的分类体系, 精准、直观的识别侵蚀沟形态特征与危害情况, 可以为侵蚀沟综合防治策略提供理论参考。

在侵蚀沟分类中, 面积、长度、宽度、深度是常用的形态指标, 通常采用遥感解译<sup>[21]</sup>、无人机航测<sup>[22]</sup>和野外调查<sup>[23]</sup>的方法进行提取。而在实用性方面, 遥感技术在提取大范围侵蚀沟形态信息方面则表现出高效率与低成本的特点, 被学者们广泛应用<sup>[24-26]</sup>。针对侵蚀沟形态分类体系构建, 水利部发布的《东北黑土区侵蚀沟治理专项规划(2016—2030年)》采用沟道面积作为标准, 将侵蚀沟分为3类, 并制定了相应的治理投资预算<sup>[27]</sup>。石长金等<sup>[28]</sup>在沟道面积的基础上, 考虑年侵蚀量指标, 将侵蚀沟划分为3大类9个亚类; 范昊明等<sup>[29]</sup>以深度、宽度为标准, 结合坡度、横剖面等定性指标, 将侵蚀沟分为5类; 东北黑土区的侵蚀沟普查则依据植被覆盖率

收稿日期: 2023-07-18 修订日期: 2023-11-06

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2021M700738; 2022T150103); 国家自然科学基金项目(41901208); 东北农业大学东农学者计划项目(21XG52)

作者简介: 李全峰, 博士, 副教授, 研究方向为黑土区耕地利用与保护。  
Email: [quanfeng.li@neau.edu.cn](mailto:quanfeng.li@neau.edu.cn)

和沟长为标准,将侵蚀沟分为2大类5小类<sup>[30]</sup>。基于前人研究发现,在综合指标分类方法中面积、宽度、长度形态指标可以通过遥感影像直接获取,可以有效提高大范围侵蚀沟识别的高效性与危害程度评估的准确性,而深度指标表示侵蚀沟对耕地的纵向切割程度,已有研究证明沟宽与沟深存在较为明显的正相关关系,侵蚀沟横剖面呈现不同程度的“V”或“U”字形<sup>[26]</sup>。但是深度指标通常需要高分遥感、数字高程模型等多源数据综合提取<sup>[21]</sup>或者在样区进行野外实地调查获取<sup>[23]</sup>,不利于分类方法对侵蚀沟类型的快速识别。在侵蚀沟和农田协同防治策略制定过程中,不仅需要综合考虑侵蚀沟发育分布和防治需求,系统刻画侵蚀沟形态和分布特征,还需要考虑方法的推广性,以适应大范围耕地和侵蚀沟的综合治理需求。

基于以上考虑,本文在已有研究基础上,利用面积、长度、宽度等形态指标,尝试为东北黑土区耕地侵蚀沟建立一套系统的形态识别分类方法,以海伦市为研究区,高效识别耕地侵蚀沟的形态特征和分布特征,评估侵蚀沟对耕地的具体损毁情况,以期优化面向现代农业的耕地侵蚀沟协同治理体系,为黑土耕地可持续利用提供参考。

## 1 “类+等+型”耕地侵蚀沟分类定级方法构建

本文基于指标易获取性和方法易操作性的综合考虑,

以面积、宽度、长度指标构建耕地侵蚀沟“类+等+型”形态识别分类体系。在此体系中,面积划分“类”,宽度划分“等”,长度划分“型”,逐级开展耕地侵蚀沟类型诊断和危害情况评估。其中,面积指标在《东北黑土区侵蚀沟治理专项规划(2016—2030年)》中与治理投资预算直接相关,可以反映侵蚀沟治理的难易程度<sup>[25]</sup>。宽度和长度指标与沟岸坍塌和沟头侵蚀直接相关,可以反映侵蚀沟对农业规模化生产的危害程度。结合本文构建的形态指标抽象模型发现(图1c),面积和宽度越大,侵蚀沟“V”或“U”字形的横剖面展宽越大,下切程度则越深。理论上,面积、宽度、长度这些形态指标对耕地侵蚀沟形态特征有较强的解释力<sup>[31-33]</sup>。因此,为了最大程度满足大范围耕地侵蚀沟形态特征的高效识别,本文未考虑深度指标。

基于以上分析,本研究根据系统分类学理论,将耕地侵蚀沟面积、宽度、长度信息全部纳入分类系统,解析不同环境下耕地侵蚀沟的形态特征,结合水利部沟道普查标准<sup>[2,30]</sup>和东北黑土区侵蚀沟指标特点<sup>[21,34]</sup>,优化分类标准。并在分类过程中,遵循信息科学理论的穷尽原则,分类分级排列组合,以涵盖所有可能的侵蚀沟类型。最终,按照“类+等+型”的形式进行命名和分类共形成100种结果。具体分类定级标准和命名见表1。

表1 耕地侵蚀沟分类定级标准和命名

Table 1 Classification standard and nomenclature of erosion gullies in cultivated land

类 Class (C)		等 Grade (G)		型 Ty (T)	
命名 Nomenclature	面积 Area (S)/hm <sup>2</sup>	命名 Nomenclature	宽度 Width (W)/m	命名 Nomenclature	长度 Length (L)/m
I	≤0.2	1	≤0.5	T	≤200
II	>0.2~<0.8	2	>0.5~1.0	S	>200~500
III	0.8~<1.4	3	>1.0~5.0	M	>500~1 000
IV	1.4~<2.0	4	>5.0	L	>1 000~2 500
V	≥2.0	-	-	H	>2 500

## 2 案例分析

### 2.1 研究区概况

东北黑土区侵蚀沟道密集,主要集中分布在漫岗区 and 丘陵区的坡耕地上,直接导致耕地面积损失417.72万亩(2.78×10<sup>9</sup> m<sup>2</sup>)<sup>[2]</sup>。海伦市(126°14'E~127°45'E, 46°58'N~47°52'N)位于典型黑土核心区,其地貌从西南向东北涵盖了低洼平川(高程<180 m)、漫川漫岗

(高程180~<240 m)、丘陵漫岗(高程240~300 m) and 低山丘陵(高程>300 m)等多种地形(图1a),主要土地利用类型为耕地,占比达到土地总面积的76.06%,主要种植大豆和玉米,年降雨量为550 mm。研究区的地形和耕作方式与东北黑土区大部分坡耕地的特征相似,这些条件也造成了耕地侵蚀沟形态的复杂性和多样性。因此,海伦市是验证耕地侵蚀沟形态分类的优选地区。

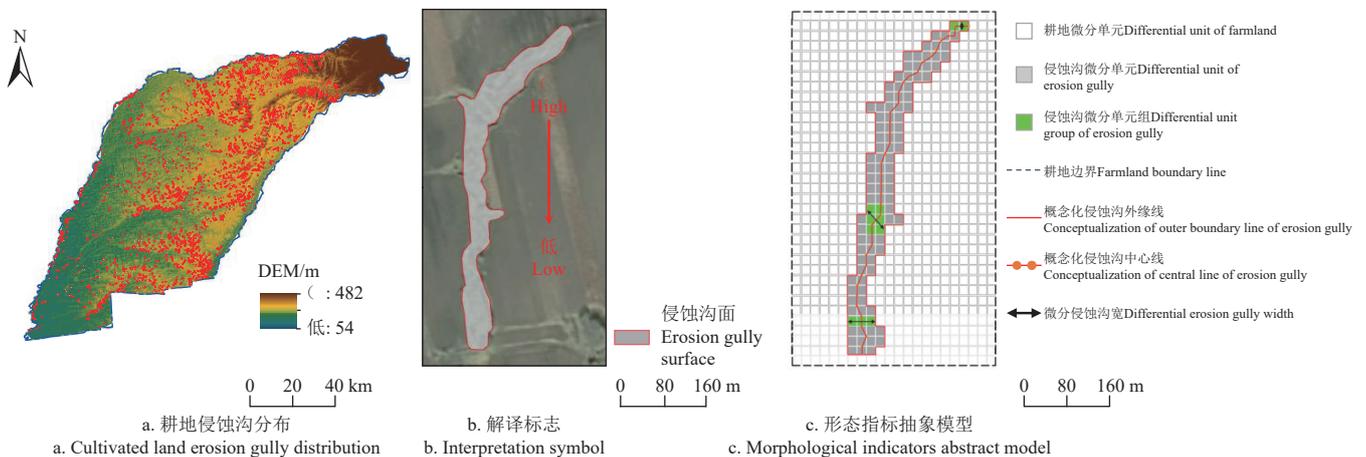


图1 研究区示意图

Fig.1 Location of research area

### 2.2 数据来源与预处理

本研究的数据主要包括耕地侵蚀沟数据、耕地利用数据和地形数据。耕地侵蚀沟数据根据李全峰等<sup>[34]</sup>确定的获取方法，在资源卫星（成像时间为 2017 年 4 月 22 日，分辨率为 2.1 m）和高分一号卫星（成像时间为 2017 年 5 月 22 日，分辨率为 2.1 m）融合形成海伦市遥感影像数据（分辨率为 2 m）上目视解译各类型耕地侵蚀沟 4 223 条，形成海伦市耕地侵蚀沟分布图（图 1a）；耕地利用数据源自地理空间数据云下载的 Landsat8 影像（成像时间为 2017 年 9 月 25 日，条号 118、行号 27，云量为 0，分辨率为 15 m），并经过人工解译获得。坡长、坡度、坡向、高程等数据通过地理空间数据云下载的 1：5 万数字高程模型（digital elevation model, DEM）生成。

### 2.3 耕地侵蚀沟形态指标提取

在上述分类体系基础上，基于遥感影像数据提取沟道面积、宽度与长度等分类指标（如图 1c）。具体而言，采用数学微分思想<sup>[35]</sup>，将耕地细分为若干小的耕地单元，以每个小单元为搜索单位，识别出四周的异常值。将异常值单元组合形成的区块识别为侵蚀沟，并与数字高程模型叠加，高程高的为沟头，低的为沟尾。沿沟头至沟尾的方向，将侵蚀沟再微分成若干小单元，做每个微分单元中心线的中垂线。最终，每个区块外缘线围成的面状要素范围即为耕地侵蚀沟的面积（ $S$ ）<sup>[36]</sup>；沿沟底的中心线即为侵蚀沟的长度（ $L$ ）；微分单元内中垂线的平均值即为侵蚀沟的宽度（ $W$ ），宽度近似等于面积与长度的比。

### 2.4 研究方法

#### 2.4.1 技术路线

为了准确识别耕地侵蚀沟的发展现状和危害情况，本文结合耕地侵蚀沟分级分类标准（表 1），构建耕地侵蚀沟的系统分类框架（图 2）。

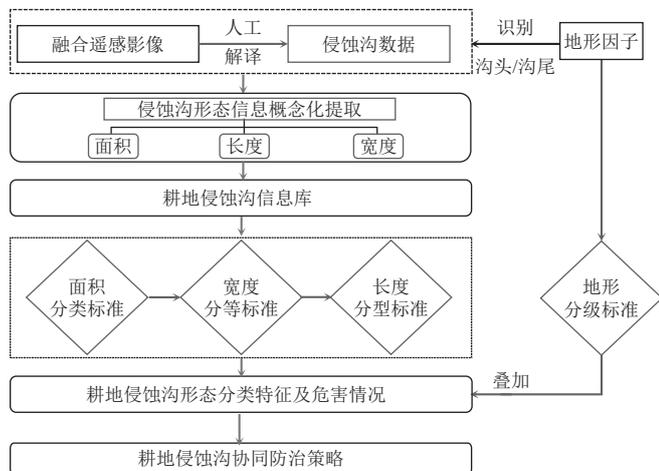


图 2 耕地侵蚀沟分类框架

Fig.2 Classification framework of cultivated land erosion gullies

首先，基于遥感解译数据提取耕地侵蚀沟的面积、长度、宽度等形态信息，分类统计单一指标下的耕地侵蚀沟形态特征。然后，采用递进式筛选机制，依据形态

指标的层级差异，对每条侵蚀沟进行精细化的识别与归类，从而构建耕地侵蚀沟的形态数据库。最后，根据耕地侵蚀沟的综合分类结果，利用地理信息系统平台，将各类耕地侵蚀沟与坡长、坡度、坡向、高程等多重地形因子进行叠加分析，评估耕地侵蚀沟的危害情况，制定侵蚀沟和黑土耕地的协同防治策略。

#### 2.4.2 耕地侵蚀沟形态分析方法

基于 SPSS 软件对遥感解译的耕地侵蚀沟数据进行描述性统计分析，并计算耕地侵蚀沟面积、宽度和长度各形态指标的变异系数（coefficient of variation, CV）；进一步依据耕地侵蚀沟分级分类标准，利用 OriginPro 2022 软件对海伦市的耕地侵蚀沟进行综合分类，并结合数理统计分析面积、沟宽和沟长之间的关系。

#### 2.4.3 耕地侵蚀沟形态空间分布分析方法

为深入分析耕地侵蚀沟形态分布的差异特征，首先利用 ArcGIS10.2 软件提取研究区的高程、坡长、坡度、坡向等地形因子，并在借鉴前人研究的基础上<sup>[21,37]</sup>，结合海伦市的地形特点（图 1a），对地形因子分级。其中，高程分为 4 个等级，坡长分为 4 个等级，坡度分为 5 个等级，坡向分为 9 个方向（表 2）。然后，将这些地形因子与不同类型耕地侵蚀沟数据相叠加，分类统计不同耕地侵蚀沟类型的分布。最后，结合耕地侵蚀沟的危害情况，制定协同防治策略。

表 2 海伦市地形因子分级标准

Table 2 Classification standard of topographical factors in Hailun city

级别 Level(LE)	高程 Elevation/m	坡长 Length/m	坡度 Slope(°)	坡向 Aspect
1	<180	<35	<2	平面
2	180~<240	35~<55	2~<6	北
3	240~300	55~<85	6~<15	东北
4	>300	>85	15~25	东
5	-	-	>25	东南
6	-	-	-	南
7	-	-	-	西南
8	-	-	-	西
9	-	-	-	西北

## 3 结果与分析

### 3.1 形态统计特征

海伦市耕地侵蚀沟数量较多，总体上形态差异明显（表 3）。

表 3 耕地侵蚀沟形态指标统计

Table 3 Statistics of morphological indicator of cultivated land erosion gullies

指标 Indicators	面积 Area/hm <sup>2</sup>	沟宽 Width/m	沟长 Length/m
最小值 Minimum	0.01	0.11	0.85
最大值 Maximum	14.56	312.93	4 035.91
均值 Average	0.43	15.98	243.85
标准差 Standard deviation	0.77	14.17	255.48
变异系数 (CV) Variation of coefficient	1.77	0.89	1.05
样本量 Sample size	4 223	4 223	4 223

具体来说，耕地侵蚀沟面积范围在 0.01~14.56 hm<sup>2</sup>

之间, 均值为 0.43 hm<sup>2</sup>, 变异系数最大, 为 1.77; 沟宽范围在 0.11~312.93 m 之间, 均值为 15.98 m, 变异系数最小, 为 0.89; 沟长范围在 0.85~4 035.91 m 之间, 均值为 243.85 m, 变异系数仅次于面积, 为 1.05。总体来看, 与东北黑土区侵蚀沟道普查结果相比<sup>[2,30]</sup>, 海伦市耕地侵蚀沟表现为面积小、宽度大、长度短

在单一形态指标分类下, 同类型耕地侵蚀沟内部形

态差异明显。由图 3 可知, 海伦市耕地侵蚀沟在面积 I 类 (0~0.2 hm<sup>2</sup>)、沟宽 4 等 (>5 m)、沟长微型 (0~200 m) 这 3 个发育阶段的数量最多, 分别占比 48.28%、95.43%、56.62%。与此同时, 这 3 个发育阶段的变异系数也达到最大, 分别为 5.10、0.86、0.45。总体而言, 单一指标下的耕地侵蚀沟分类结果对于评估耕地侵蚀沟危害情况具有一定局限性。

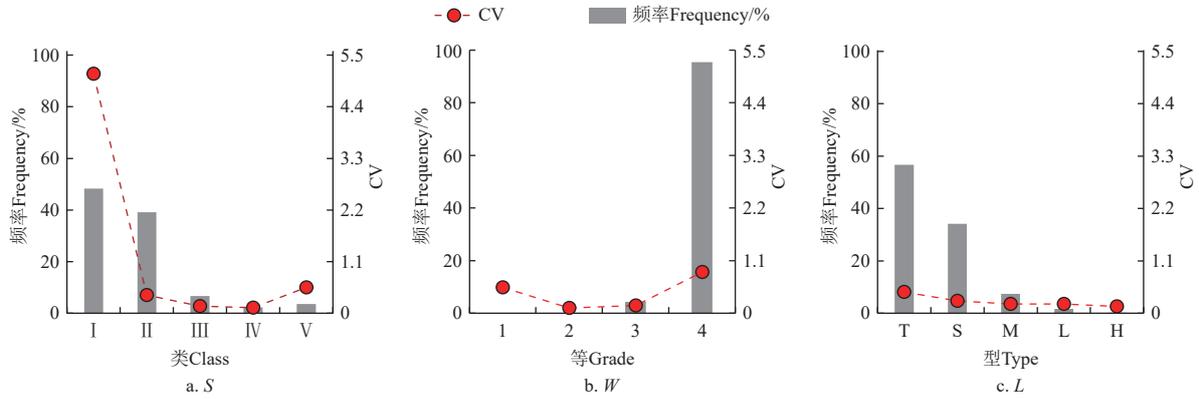


图 3 耕地侵蚀沟单一形态指标分类参数统计

Fig.3 Statistics of single morphological indicators classified for cultivated land erosion gullies

### 3.2 形态结构特征

海伦市耕地侵蚀沟综合分类后的结果共有 26 种, 其形态结构化差异明显。在一级分类中, 海伦市耕地侵蚀沟主要为 I 类和 II 类 (图 4), 分别有 2 039 条和 1 654 条, 占总侵蚀沟数量的 87%, 这些耕地侵蚀沟治理难度相对较低, 大多数可以通过高标准农田建设得到消除; 在二级和三级分类中, 主要为 I 类 4 等微型沟 (I 4T)、II 类 4 等微型沟 (II 4T) 和 II 类 4 等小型沟 (II 4S), 累计频率超过 70%, 表明海伦市耕地侵蚀沟具有宽而短的空间形态。总体而言, 海伦市耕地侵蚀沟总体发育程度低, 易于通过高标准农田建设治理。

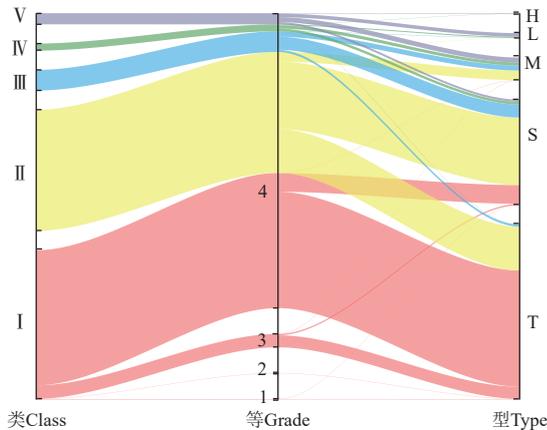
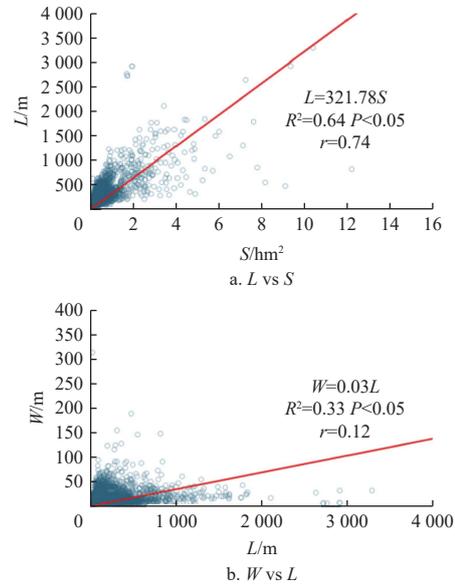


图 4 海伦市耕地侵蚀沟形态特征转移桑基图

Fig.4 Transfer sankey map of erosion gully morphological characteristics for cultivated land in Hailun city

侵蚀沟各指标间的相关性分析有助于识别导致耕地面积损失的关键因子。从图 5a 可知, 沟长与面积之间呈正相关, 且相关性较强, 相关系数为 0.74, 决定系数为

0.64。随着面积的增加, 沟长也显著增长, 并且增长速率较快。尽管沟长与沟宽也呈正相关 (图 5b), 但相关性较弱, 相关系数仅为 0.12, 决定系数为 0.33。从长宽比的来看, 沟长的变化速率远快于沟宽, 这表明溯源侵蚀的速率也大于沟岸坍塌。总体而言, 耕地面积的损失受沟长变化的影响较大。



注:  $r$  为相关系数;  $R^2$  为决定系数。

Note:  $r$  is the correlation coefficient;  $R^2$  is the coefficient of determination.

图 5 耕地侵蚀沟沟长与面积、沟宽之间的关系

Fig.5 Relationships between erosion gully length, area, and width in cultivated land

### 3.3 形态分布特征

在地形分异方面, 耕地侵蚀沟在不同地形因子上的形态分布特征具有显著的差异性 (图 6)。随着高程、

坡长、坡度的增加，各类型耕地侵蚀沟的数量呈现先增大后减小的趋势。而坡向导致的区域水热条件差异，则对阳坡与半阳坡耕地侵蚀沟的形态造成了显著影响。其中，在高程为 180~<240 m，坡长为 35~<55 m，坡度为 2°~<6°，坡向为西南范围内，耕地侵蚀沟的分布最为集中。因此，预防和治理耕地侵蚀沟，应当优先考虑这些具有关键地形特征的区域。

在形态分布方面，同一种地形条件下的耕地侵蚀沟形态特征也具有显著差异（图 6）。在高程为 180~<240 m，坡长为 35~<55 m，坡度为 2°~<6°，坡向为西南这一耕地侵蚀沟集中分布的地形条件下，发育程度不同的耕地侵蚀沟类型共有 14 种。其中 I 3T、I 4T、I 4S、II 4T、II 4S、II 4M、III 4T、III 4S、III 4M 等现阶段发育程度不高，易于治理的耕地侵蚀沟极易向同地形条件下的 IV 4S、IV 4M、V 4S、V 4M、V 4L 等更成熟的耕地侵蚀沟类型转变。因此，结合海伦市地形特点（图 1）和耕地侵蚀沟分类分布规律（图 6），在评估耕地侵蚀沟危害情况的基础上，制定了侵蚀沟和黑土耕地的协同防治策略（表 4）。其中，低山丘陵区耕地较少，侵蚀沟治理以封育保护为主；丘陵漫岗和漫川漫岗区是海伦市侵蚀沟主要发生区，也是高标农田主要建设区，侵蚀沟治理以改善耕作方式、恢复耕地地力为主；低洼平川

区旱田、水田交叉分布，侵蚀沟治理以土地复垦、减少泥沙下泄为主。

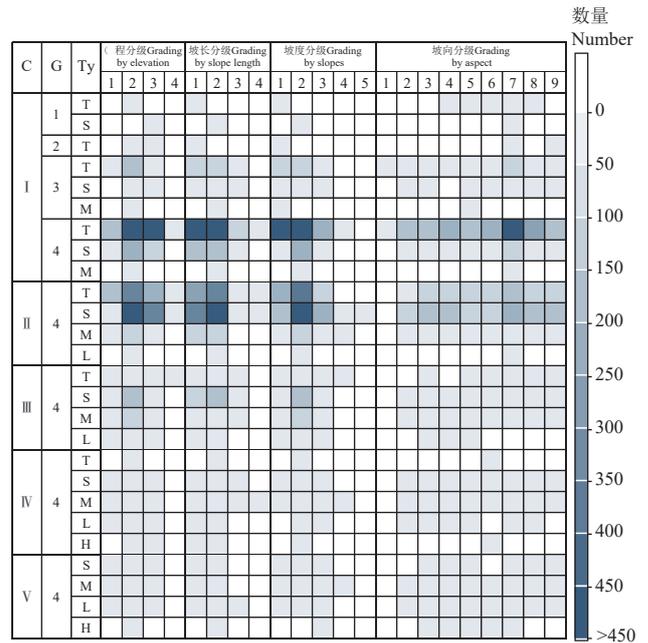


图 6 海伦市耕地侵蚀沟形态分类分布特征  
Fig.6 Distribution of erosion gully morphology classification for cultivated land in Hailun city

表 4 海伦市耕地侵蚀沟协同防治策略

Table 4 Collaborative control strategies for cultivated land erosion gullies in Hailun city

区域划分 Region division	区域特点 Region feature	侵蚀沟类型 (类-等-型) Erosion gully classification (Class-Grade-Type)	占比 Ratio/%	协同防治策略 Collaborative control strategies	
				重点 Keys	策略 Strategies
低山丘陵区 Low hill and hill region	高程大于 300 m，位于海伦市东北部，地势较缓，耕地少，耕地侵蚀沟数量和类型也较少	I 4T、II 4T、II 4S、III 4T	0.14	预防发育程度低的侵蚀沟发生沟岸坍塌进一步变宽	以封育保护为主，对现有侵蚀沟整形后采取植物措施进行封沟，防止侵蚀沟变宽、变长
丘陵漫岗区 Rolling hill and ridge region	高程 240~300 m，位于海伦市中北部，地形起伏较为连续，旱地较多，侵蚀沟形态变化相对复杂	I 1S、I 2T、I 3T、I 3S、I 4T、I 4S、II 4T、II 4S、II 4M、III 4T、III 4S、III 4M、III 4L、IV 4S、IV 4M、IV 4L、IV 4H、V 4S、V 4M、V 4L	29.74	预防发育程度低的侵蚀沟发生溯源侵蚀进一步变长	以水土流失综合治理为主，优化耕作方式，实施等高横坡改垄，并对发育程度低的沟道进行填埋复垦，对发育程度高的以植物和少量工程措施进行完全控制，减缓水流速度，防止水土流失
漫川漫岗区 Rolling hill region	高程 180~<240 m 位于海伦市中南部，地形起伏较为和缓，是旱地的主要集中区，侵蚀沟形态变化最复杂，影响机械化	I 1T、I 2T、I 3T、I 3S、I 3M、I 4T、I 4S、I 4M、II 4T、II 4S、II 4M、II 4L、III 4T、III 4S、III 4M、III 4L、IV 4T、IV 4S、IV 4M、IV 4L、IV 4H、V 4S、V 4M、V 4L、V 4H	60.41	预防发育程度低的侵蚀沟同时发生沟岸坍塌和溯源侵蚀进一步变宽、变长	以坡耕地综合治理为主，最大程度恢复耕地，实现沟坡兼治，实施垄向区田、改长坡为短坡、植物埂等坡面治理措施，并对发育程度低的侵蚀沟配合高标准农田建设工程进行土地复垦，发育程度高的加强沟头防护、谷坊、护坡等控制工程建设，减少水土流失
低洼平川区 Low-lying plain region	高程小于 180 m，位于海伦市西南部，河流下游，地形起伏不大，耕地类型呈现出旱地、水田交叉分布的状态，耕地侵蚀沟数量少但变化剧烈	I 3T、I 4T、I 4S、II 4T、II 4S、II 4M、III 4T、III 4S、III 4M、III 4L、IV 4S、IV 4M、IV 4L、V 4S、V 4M、V 4L	9.71	预防发育程度低的侵蚀沟发生溯源侵蚀，进一步变长	以侵蚀沟综合治理为主，实施保护性耕作措施，并对发育程度低的侵蚀沟配合高标准农田建设工程进行土地复垦，对发育程度高的主要采取工程措施，修建沟道谷坊、沟头和沟坡防护工程，建立排水体系，并减少河泥沙下泄

### 4 讨论

在侵蚀沟形态分类识别体系中，侵蚀沟的分类框架在不同地区 and 实际应用中存在差异，东北黑土区的侵蚀沟形态分类更应考虑高效协同治理的需求<sup>[12]</sup>。已有研究强调了分类结果对治理的重要性，但是未考虑分类指标的易获取性和分类结果的完整性<sup>[38]</sup>。本研究特色是在现有方法的基础上，选取面积、宽度和长度形态指标，依据

系统分类和信息科学理论，构建耕地侵蚀沟形态识别的系统分类体系。该体系在实证研究中能够精准、直观地揭示海伦市耕地侵蚀沟的形态特征和危害情况。研究显示，海伦市耕地侵蚀沟大部分属于 I 4T 和 II 4T 类侵蚀沟。这些侵蚀沟对耕地的大宽度切割，严重妨碍机械横过耕作，但是治理投资预算不大，结合高标准农田建设易于治理。本研究结果与东北黑土区已有研究的结论相似（表 5），

进一步验证了本分类方法构建的合理性和有效性。

表5 耕地侵蚀沟形态识别比较

Table 5 Comparison of morphological identification of cultivated land erosion gullies

研究区 Study area	数据来源 Data source	侵蚀沟分类 Erosion gully classification	侵蚀沟形态识别 Erosion gully morphology identification
海伦市 Hailun city	遥感解译	“类+等+型” 形态分类	以 I 4T、II 4T 耕地侵蚀沟为主，具有面积小、宽度大、长度短的特点，可以按照侵蚀沟分类分布特征，结合农田建设协同治理
海伦市东南部 <sup>[23]</sup> Southeastern Hailun city	野外实测	形态参数统计 未分类	耕地侵蚀沟最多，多为支沟，平均长度小，宽度大，影响农机作业，可以通过秸秆复垦工程技术治理
嫩江县 <sup>[21]</sup> Nenjiang county	遥感解译	细沟、浅沟、 切沟、冲沟 分类	海拔在 200~500 m 的切沟数量最多，且大部分侵蚀沟长度小于 500 m，可以配合土地整治工程治理
漫川漫岗区与山 地丘陵区 <sup>[37]</sup> Rolling hilly region and mountainous and hilly region	遥感解译	形态参数统计 未分类	漫川漫岗区侵蚀沟平均长度、宽度、面积都大于山地丘陵区，侵蚀沟形态多呈“细长”型，可以通过沟道填埋和沟头防护有效降低沟道长度和宽度
黑土区 <sup>[2]</sup> Black soil region	遥感解译、 野外验证、 典型区实 测等方法	沟道稳定性结 合形态参数 分类	黑土区侵蚀沟主要分布在耕地上，沟道长度主要为 50~1 000 m，可以通过专项工程实施和高标准农田建设进行综合治理

在黑土地保护利用推进阶段，尽管东北黑土区侵蚀沟综合治理已取得显著成效，但耕地水土流失仍然严重、侵蚀沟问题依然突出<sup>[1-2]</sup>。研究地形因子分级对耕地侵蚀沟分布和形态形成的影响，结合农田建设，进行协同化高效防治，是遏制黑土耕地退化的有效方式<sup>[1,12,39]</sup>。在海伦市耕地侵蚀沟形态分类过程中，发现地形要素对其形态分布具有显著影响，特别是位于高程 180~<240 m，坡长 35~<55 m，坡度 2°~<6°，坡向西南范围内的 I 4T、II 4S、II 4T 等类型侵蚀沟相较于其他地形区更易发生扩展。这一方面是因为坡耕地汇水面积大，冲刷力强形成了极易侵蚀的条件，另一方面是这些地区作为海伦市粮食生产的核心区，农户对耕地养护的重视程度不够，防治土壤水蚀的措施较少。陈家宙等<sup>[40]</sup>在典型黑土区对比侵蚀沟沟系发育形态时也发现，漫川漫岗区是侵蚀沟发育热点，且已有的治理措施不能完全防止侵蚀沟发育，侵蚀沟发育条件依然存在。本分类方法则提供了更直观的耕地侵蚀沟形态表达方式，有助于准确认识侵蚀沟对耕地的危害，设计更精准的治理方案，进一步说明该方法对于耕地侵蚀沟协同防治的适用性。

本研究构建的“类+等+型”耕地侵蚀沟形态分类定级方法，有效识别了海伦市耕地侵蚀沟的发展现状及其危害程度，并提出了针对大规模耕地侵蚀沟与高标准农田建设相协调的防治策略。未来研究应致力于构建黑土区耕地侵蚀沟的综合防治技术标准，充分利用耕地侵蚀沟分类定级方法和侵蚀沟深度指标，探究侵蚀沟形成的动因和机理。这将有助于构建科学的耕地排水系统，合理配置工程与生物措施，以发挥最大的综合防治效能。

## 5 结论

为了精准、直观地揭示耕地侵蚀沟的形态特征和其危害程度，本研究采用面积、宽度和长度等遥感解译数据，根据系统分类和信息科学理论，建立了耕地侵蚀沟“类+等+型”的分类定级方法。以海伦市为研究区，进行实证，结果表明：

1) 海伦市耕地侵蚀沟面积小、宽度大、长度短，同类型耕地侵蚀沟形态差异显著。特别是，I 类、4 等、微型这 3 个发育阶段的耕地侵蚀沟数量最多，其变异系数也最高，分别为 5.10、0.86、0.45。

2) 海伦市综合分类后共有 26 种侵蚀沟类型。其中，I 类和 II 类为数量最多的一级分类；II 类四等微型沟（II 4T）和 II 类四等小型沟（II 4S）在二级和三级分类中数量居多。总体而言，海伦市耕地侵蚀沟发育程度较低，易通过高标准农田建设进行治理。

3) 在侵蚀沟与黑土耕地协同治理中，建议优先关注地形高程 180~<240 m、坡长 35~<55 m、坡度 2°~<6°、坡向西南的地区，因为这些区域对耕地侵蚀沟的形成具有显著影响。特别是在漫川漫岗区，发育程度较低的如 I 4T、II 4S、II 4T 等类型的耕地侵蚀沟极有可能向更高发育程度的 IV M4、V M4 等类型转变。因此，建议结合地形分区，及时采取相关防治措施，以防止耕地侵蚀沟对耕地的进一步蚕食和切割。

## [参考文献]

- [1] 中华人民共和国农业农村部. 国家黑土地保护工程实施方案（2021—2025 年）[J]. 中国农业综合开发, 2021(8): 4-11.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水利部组织完成东北黑土区侵蚀沟调查[EB/OL]. [2024-04-01]. [http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202308/t20230828\\_1681146.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202308/t20230828_1681146.html).
- [3] DUAN X, XIE Y, OU T, et al. Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China[J]. *Catena*, 2011, 87(2): 268-275.
- [4] WEN Y, 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.
- [5] 王世豪, 徐新良, 曹巍. 2000—2020 年东北黑土地土壤侵蚀时空演化特征[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 951-965. WANG Shihao, XU Xinliang, CAO Wei. Spatial and temporal changes of erosion in the black soil region of Northeast China from 2000 to 2020[J]. *Resources Science*, 2023, 45(5): 951-965. (in Chinese with English abstract)
- [6] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99-115. ZHU Xianmo. Classification on the soil erosion in the loess region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1956, 4(2): 99-115. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区沟谷类型[J]. 地理科学, 1984, 4(4): 321-327. CHEN Yongzong. The classification of gully in hilly loess

- region in the middle reaches of the yellow river[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1984, 4(4): 321-327. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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 Nan, ZHANG Yan, WANG Jiayi, 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. (in Chinese with English abstract)
- [9] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 48-59. ZHENG Fenli, XU Ximeng, QIN Chao. A review of gully erosion process research[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 48-59. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(6): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张广贺, 王克勤, 宋娅丽, 等. 金沙江干热河谷冲沟形态发育特征及其侵蚀速率估算[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(23): 103-112. ZHANG Guanghe, WANG Keqin, SONG Yali, et al. Morphological characteristics and erosion rate estimation of gully in Hot-Dry Valley of Jinsha River of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(23): 103-112. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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 (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(3): 320-326. (in Chinese with English abstract)
- [13] HUANG D, SU L, FAN H, et al. Identification of topographic factors for gully erosion susceptibility and their spatial modelling using machine learning in the black soil region of Northeast China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109376.
- [14] LIU C, FAN H, JIANG 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: 106798.
- [15] 于佩鑫, 周询, 刘素红, 等. 东北黑土区侵蚀沟遥感影像特征提取与识别[J]. *遥感学报*, 2018, 22(4): 611-620. YU Peixin, ZHOU Xun, LIU Suhong, et al. Feature extraction and recognition of erosion gully based on remote sensing image in the black soil region in Northeast China[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2018, 22(4): 611-620. (in Chinese with English abstract)
- [16] LI M, LI T, ZHU L, et al. Effect of land use change on gully erosion density in the black soil region of Northeast China from 1965 to 2015: A case study of the Kedong County[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 652933.
- [17] WANG R, SUN H, YANG J, et al. Quantitative evaluation of gully erosion using multitemporal UAV data in the southern black soil region of Northeast China: A case study[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1479.
- [18] PIMENTEL D, BURGESS M. Soil erosion threatens food production[J]. *Agriculture*, 2013, 3(3): 443-463.
- [19] WANG Y, ZHANG Y, CHEN H. Gully erosion susceptibility prediction in Mollisols using machine learning models[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 78(5): 385-396.
- [20] 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 Congtan, FAN Haoming. Research advances and prospects on gully erosion susceptibility assessment based on statistical modeling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(4): 29-40. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(7): 157-165. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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 Qiong, FANG Nufang. Monitoring the morphological characteristics of gully using UAV oblique photogrammetry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(8): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- [23] 丁超, 张晟旻, 胡伟, 等. 东北黑土区侵蚀沟普查结果实测验证[J]. *中国水土保持科学 (中英文)*, 2021, 19(6): 77-85. DING Chao, ZHANG Shengmin, HU Wei, et al. Field validation of gully survey of national census for soil conservation in the black soil region of Northeast China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(6): 77-85. (in Chinese with English abstract)
- [24] 闫业超, 张树文, 岳书平. 克拜东部黑土区侵蚀沟遥感分类与空间格局分析[J]. *地理科学*, 2007, 27(2): 193-199. YAN Yechao, ZHANG Shuwen, YUE Shuping. Classification of erosion gullies by remote sensing and spatial pattern analysis in black soil region of Eastern Kebai[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 193-199. (in Chinese with English abstract)

- [25] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文. 东北典型黑土区 40 年来沟蚀空间格局变化及地形分异规律[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 68-71.  
WANG Wenjuan, DENG Rongxin, ZHANG Shuwen. Spatial pattern change and topographic differentia of gully erosion in the type black soil area of Northeast China during the past 40 years[J]. Geography and Geo-information Science, 2012, 28(3): 68-71. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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地区切沟体积估算模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 122-130.  
LI Zhen, QI Zhiguo, QIN Wei, 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 (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 122-130. (in Chinese with English abstract)
- [27] 中华人民共和国水利部. 东北黑土区侵蚀沟治理专项规划(2016-2030年)[R]. 北京: 中华人民共和国水利部: 2018.
- [28] 石长金, 温是, 何成全. 侵蚀沟系统分类与综合开发治理模型研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 1995, 11(3): 193-197, 200.
- [29] 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 Haoming, WANG Tieliang, CAI Qiangguo, 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. (in Chinese with English abstract)
- [30] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持, 2013(10): 2-3.
- [31] 白建宏. 东北黑土区侵蚀沟分级初探[J]. 中国水土保持, 2017(10): 41-42.
- [32] 赵宇辉, 张建军, 于洋, 等. 晋西黄土区蔡家川小流域切沟的空间分布及形态特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 151-158.  
ZHAO Yuhui, ZHANG Jianjun, YU Yang, et al. Spatial distribution and characteristics of the gullies in Caijiachuan watershed in loess region of Western Shanxi Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(4): 151-158. (in Chinese with English abstract)
- [33] 欧洋, 阎百兴, 白建宏, 等. 东北黑土区侵蚀沟危害面积识别研究[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 24-30.  
OU Yang, YAN Baixing, BAI Jianhong, et al. Identifying the damaged area of gully in black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6): 24-30. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李全峰, 李吉程, 于明鹏, 等. 黑土耕作区侵蚀沟治理紧迫度空间分布特征[J]. 地理科学进展, 2021, 40(7): 1208-1219.  
LI Quanfeng, LI Jicheng, YU Mingpeng, et al. Spatial pattern of gully erosion control urgency in black soil farming area[J]. Progress in Geography, 2021, 40(7): 1208-1219. (in Chinese with English abstract)
- [35] 刘阳, 徐卓君, 魏萍, 等. 小流域水土流失的数学模型及数值模拟[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2004, 22(5): 509-512.  
LIU Yang, XU Zhuojun, WEI Ping, et al. Mathematic model and digital simulation of small river basin soil and water loss[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2004, 22(5): 509-512. (in Chinese with English abstract)
- [36] 魏士春, 张红日, 苏奋振, 等. 基于 ArcGIS 的面状要素中轴线提取方法研究[J]. 地理空间信息, 2007, 5(2): 45-47.  
WEI Shichun, ZHANG Hongri, SU Fenzhen, et al. Method for medical axis extraction based on ArcGIS[J]. Geospatial Information, 2007, 5(2): 45-47. (in Chinese with English abstract)
- [37] 李镇, 秦伟, 齐志国, 等. 东北漫川漫岗和山地丘陵黑土区侵蚀沟形态特征遥感分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 133-140.  
LI Zhen, QIN Wei, QI Zhiguo, et al. Remote sensing analysis on gully morphology and spatial distribution in rolling hilly region and mountainous and hilly region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 133-140. (in Chinese with English abstract)
- [38] 王兆铭, 刘建祥, 高燕, 等. 基于遥感和 GIS 的侵蚀沟分类[J]. 东北水利水电, 2016, 34(5): 40-43.  
WANG Zhaoming, LIU Jianxiang, GAO Yan, et al. Classification of erosion gully based on RS and GIS[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2016, 34(5): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- [39] 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. (in Chinese with English abstract)
- [40] 陈家宙, 何阳波, 高钰淇, 等. 1970-2021 年典型黑土区侵蚀沟损毁耕地速度与发育阶段[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 51-59.  
CHEN Jiazhou, HE Yangbo, GAO Yuhao, et al. Farmland damage speed and development stage of gully erosion in typical black soil region from 1970 to 2021[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(12): 51-59. (in Chinese with English abstract)

## Systematic morphological classification method for cultivated land erosion gullies in the typical black soil regions of Northeast China

LI Quanfeng<sup>1,2</sup>, LI Jicheng<sup>1</sup>, YU Mingpeng<sup>3</sup>, ZHANG Peng<sup>4</sup>

(1. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Land Remote Sensing Big Data Technology Innovation Center, Harbin 150030, China; 3. Guangdong Guodi Planning Technology Co., Ltd, Guangzhou 510000, China; 4. School of Land Engineering, Chang'an University, Xian 710054, China)

**Abstract:** Morphological classification of erosion gullies is crucial to assessing their development status and potential hazards. Investigating erosion gullies classification and distribution in cultivated land is essential for comprehensive erosion control and preventing soil and water loss on slopes. The current literature lacks definitive indicators for a comprehensive gully morphology classification system in cultivated land, resulting in incomplete classification outcomes. This study presented a comprehensive framework for organizing morphological indicators, consolidating the essential requirements for managing cultivated land gullies in Northeast China's black soil regions. It employed systematic classification and information science methodologies. Through the combination of indicators which were obtained through remote sensing interpretation, all possible types of cultivated land erosion gullies were covered as much as possible. This framework classified area indicators into five classes, widths into four grades, and lengths into five types, creating a "class + grade + type" method for erosion gullies in cultivated land. The method was empirically evaluated in black soil agricultural zones to confirm its applicability and effectiveness. The findings showed that: (1) Erosion gullies were characterized by small areas, substantial widths, and short lengths in Hailun city's cultivated lands. In the "class + grade + type" framework, class I and II were the most common primary categories. Notably, class II grade 4 tiny gullies (II 4T) and class II grade 4 small gullies (II 4S) dominated the secondary and tertiary classifications. These erosion gullies were generally poorly developed and could be effectively controlled by developing high-standard farmland. (2) The morphological distribution of erosion gullies was significantly influenced by terrain elements. Special attention was required for gullies in areas at elevations of 180-240 m, slope lengths of 35-55 m, slopes of 2°-6°, and on southwestern slopes. Less developed gullies in these regions, such as class I grade 4 tiny gullies (I 4T), class II grade 4 small gullies (II 4S), and class II grade 4 tiny gullies (II 4T), were prone to advancing to more developed stages like class IV grade 4 medium gullies (IV 4M) and class V grade 4 medium gullies (V 4M). The study recommended timely and comprehensive prevention and control measures, along with farmland construction, to mitigate potential damage. (3) The "class + grade + type" method developed in this study accurately and intuitively elucidated the morphological features and hazards of cultivated land erosion gullies. This method offered practical advantages, including easy indicator acquisition and simple operation. This research validated that relying on a single morphological index was insufficient for nuanced gully identification. Instead, the robust classification system using area, length, and width indicators demonstrated high adaptability in Hailun city. This innovative method provided a valuable reference for the integrated management of gullies and cultivated land.

**Keywords:** erosion; classification; remote sensing; morphological parameters; cultivated land; black soil zone of Northeast China