

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.02.023

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.02.023

李欣梦,张岩,郭海燕,等.松嫩典型黑土分布区侵蚀沟对耕地破碎化的影响[J].水土保持学报,2026,40(2):83-92.

LI Xinmeng, ZHANG Yan, GUO Haiyan, et al. Impact of gully erosion on cultivated land fragmentation in Songnen typical black soil region[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 83-92.

## 松嫩典型黑土分布区侵蚀沟对耕地破碎化的影响

李欣梦,张岩,郭海燕,邢慧淼

(北京林业大学水土保持学院,北京 100083)

**摘要:** [目的] 东北黑土区是中国重要粮食产区,但长期耕作引发严重水土流失,侵蚀沟加剧耕地破碎化,威胁农业可持续发展。然而,侵蚀沟对耕地破碎化的影响缺少量化研究。[方法] 在松嫩典型黑土分布区选取9个县的50个小流域,基于亚米级卫星影像解译土地利用和侵蚀沟,采用多个景观指标,分析耕地破碎化程度、空间差异及其主要影响因素,量化侵蚀沟对耕地破碎化的贡献率。[结果] 1) 研究区耕地综合破碎指数为0.371~0.993,破碎化程度总体上处于中等水平,呈现明显的空间差异,破碎化程度最高的地区分布在中部。2) 耕地破碎化指数受多种因素影响,随侵蚀沟密度、平均坡度、降水量、林地面积比例的增加而显著上升,随耕地面积比例增加而显著下降。道路网络对侵蚀沟造成的耕地破碎具有明显的“放大效应”,加剧侵蚀沟对耕地空间完整性的负面影响。3) 侵蚀沟的发育显著加剧耕地破碎化,但其影响程度存在空间差异。在超过60%的小流域中,侵蚀沟对破碎化的贡献率低于20%,在约有10%的小流域中,侵蚀沟已成为破碎化的主导因素,贡献率超过50%。4) 耕地破碎化轻微的区域,侵蚀沟的贡献率较高,在耕地高度破碎的区域,侵蚀沟的影响反而较弱。[结论] 侵蚀沟是东北黑土区耕地破碎化的重要影响因素,其作用程度与耕地破碎化的总体水平及环境特征密切相关。研究结果可为黑土区耕地保护和农业可持续发展提供科学依据。

**关键词:** 东北黑土区; 耕地破碎化; 侵蚀沟; 景观指数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0083-10

## Impact of Gully Erosion on Cultivated Land Fragmentation in Songnen Typical Black Soil Region

LI Xinmeng, ZHANG Yan, GUO Haiyan, XING Huimiao

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

**Abstract:** [Objective] The black soil region of northeast China is a major grain-producing area. Long-term cultivation has caused severe soil erosion, and gully erosion exacerbates cultivated land fragmentation, posing a threat to sustainable agricultural development. However, the impact of gully erosion on cultivated land fragmentation lacks quantitative research. [Methods] In the typical Songnen black soil distribution region, 50 small watersheds across nine counties were selected. Land use and gully erosion were interpreted based on sub-meter resolution satellite imagery. Multiple landscape indicators were applied to assess the degree of cultivated land fragmentation, its spatial variation, and major influencing factors, and to quantify the contribution rate of gully erosion to cultivated land fragmentation. [Results] 1) The comprehensive cultivated land fragmentation index in the study area ranged from 0.371 to 0.993, with the overall fragmentation degree at a moderate level, showing significant spatial heterogeneity. The areas with the highest fragmentation degree were distributed in the central region. 2) The cultivated land fragmentation index was influenced by multiple factors. It increased significantly with gully density, average slope, precipitation, and proportion of forest area, while decreasing significantly with the proportion of cultivated land area. Road networks exhibited a pronounced "amplification effect" on cultivated

收稿日期: 2025-11-04

修回日期: 2025-11-30

录用日期: 2025-12-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1501200)

第一作者: 李欣梦(2001—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: lxm4535416@bjfu.edu.cn

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

http://stbcbx.alljournal.com.cn

land fragmentation caused by gully erosion, further exacerbating the negative impact of gully erosion on the spatial integrity of cultivated land. 3) The development of gully erosion significantly intensified cultivated land fragmentation, but its degree of impact exhibited spatial differences. In over 60% of the small watersheds, the contribution rate of gully erosion to fragmentation was below 20%. In approximately 10% of the small watersheds, gully erosion became the dominant factor of fragmentation, with a contribution rate exceeding 50%. 4) In areas with low levels of cultivated land fragmentation, the contribution rate of gully erosion was relatively high. In areas with highly fragmented cultivated land, the impact of gully erosion was weaker. [Conclusion] Gully erosion is a key influencing factor of cultivated land fragmentation in the black soil region of northeast China. Its impact is closely linked to the overall cultivated land fragmentation level and environmental characteristics. The research findings can provide a scientific basis for cultivated land conservation and sustainable agricultural development in the black soil region.

**Keywords:** black soil region of northeast China; cultivated land fragmentation; gully erosion; landscape index

**Received:** 2025-11-04

**Revised:** 2025-11-30

**Accepted:** 2025-12-07

**Online**(www.cnki.net): 2025-12-30

东北黑土区是中国重要的农业基地,素有“中国粮仓”之称<sup>[1]</sup>。然而,长期的耕作导致黑土区面临日益严峻的土壤侵蚀与质量退化问题<sup>[2]</sup>。特别是在大规模农业开发和植被破坏的背景下,坡耕地上发育的侵蚀沟对土地造成严重破坏<sup>[3]</sup>,加剧耕地破碎化<sup>[4]</sup>,加速土地退化<sup>[5]</sup>。由此可见,研究东北黑土区侵蚀沟对耕地破碎化的影响,对于指导耕地保护、优化土地利用和实现可持续农业发展具有重要意义。

耕地破碎化是指在地形、地貌及土地利用方式等因素的影响下,耕地被分割成不规则的小块,形成零散且分布不均的空间格局<sup>[6]</sup>。其典型特征表现为农田面积小、形状不规则、边界复杂等<sup>[7]</sup>。耕地破碎化不仅降低农业生产效率,还增加耕作成本,已成为制约农业现代化与可持续发展的关键因素之一<sup>[8]</sup>。耕地破碎化的影响因素复杂多样<sup>[9-10]</sup>,主要包括自然因素(如地形、气候、坡度<sup>[11]</sup>等)与人为因素(农业活动<sup>[12]</sup>、基础设施建设<sup>[13]</sup>等)。已有研究<sup>[14]</sup>表明,东北黑土区侵蚀沟发育加速,导致耕地破碎化程度明显加剧。2021年东北黑土区侵蚀沟专项调查表明长度50 m以上的侵蚀沟有 $6.67 \times 10^5$ 余条,损毁耕地面积已达4 029.57 km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。但是,在侵蚀沟影响耕地破碎化调查程度和贡献率方面还缺少定量研究。

本研究于2024年元月12日开始,以沟蚀严重的松嫩典型黑土分布区为研究区<sup>[16]</sup>,选取9个县的50个小流域。在基于亚米级卫星影像解译土地利用和提取侵蚀沟的基础上,计算耕地破碎化指数,评估耕地破碎化的程度及空间差异,识别耕地破碎化的主要影响因素,探讨侵蚀沟对耕地破碎化的贡献率,力求为黑土区的耕地保护和可持续利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

松嫩典型黑土分布区以肥沃深厚的典型黑土为主(图1a),局部地区分布有草甸土、沼泽土和棕壤等土壤类型<sup>[17]</sup>。气候以温带大陆性季风气候为主,多年平均气温2~6℃,年平均降水量420~650 mm<sup>[18]</sup>。地貌以典型的漫川漫岗为主,其中漫川为平坦开阔的河谷平原,地势低平,土壤肥沃;漫岗则是坡度平缓的台地,适宜机械化耕作<sup>[18]</sup>。耕地面积比例达73.4%(图1b),主要种植玉米、大豆等旱作作物,是我国最重要的商品粮生产基地之一<sup>[19]</sup>。该地区沟蚀强度存在空间差异,轻度以上沟蚀面积占比35.87%,强烈沟蚀以上面积占比33.33%<sup>[16]</sup>。

选取松嫩典型黑土分布区的9个县共50个小流域(表1),流域面积为6.22~45.09 km<sup>2</sup>。所选小流域相对均匀分布在典型黑土分布区。土地利用总体上以耕地为主,占比17.8%~83.9%。小流域平均坡度为2.0°~12.9°,侵蚀沟密度为0.56~3.33 km/km<sup>2</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据来源

用于解译土地利用和侵蚀沟的遥感影像来源于2021年5—11月高分七号卫星数据(空间分辨率0.65 m),共40幅;区域土地利用(图1b)来源于2021年的中国土地覆盖数据,分辨率为30 m(<https://zenodo.org/records/12779975>),小流域土地利用基于高分影像解译;小流域DEM来源于ALOS卫星获取的分辨率为12.5 m的高精度地形数据(<https://nasadaacs.eos.nasa.gov/>)。多年平均降水量来源于国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>)提供的东北地区95个气象站1961—2020年降水量(mm),采用克里格插值生成分辨率为250 m的栅格数据。

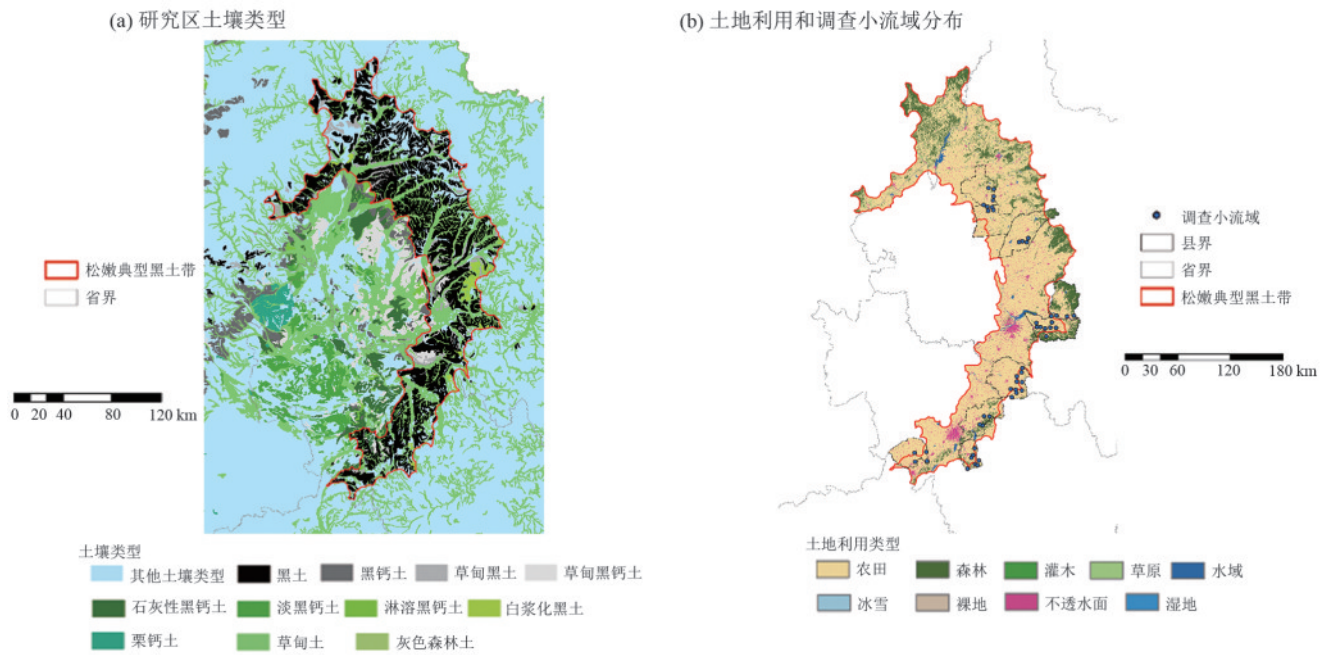


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

表 1 50 个调查小流域基本信息

Table 1 Basic information of 50 surveyed small watersheds

单元位置	流域数量	耕地面积比例/%	林地面积比例/%	道路面积比例/%	小流域平均坡度/(°)	侵蚀沟密度/(km·km <sup>-2</sup> )
克山县	5	34.1~79.9	14.1~59.2	0.2~1.2	2.3~4.6	0.59~1.68
拜泉县	4	72.0~75.7	12.2~16.7	0.3~1.1	2.6~3.1	1.33~1.83
海伦市	4	73.2~83.8	6.8~12.2	0.4~1.6	2.2~2.3	0.84~1.91
木兰县	3	37.6~81.8	1.1~46.2	1.2~3.6	2.1~2.6	1.00~2.89
宾县	9	35.9~81.0	1.7~58.8	0.1~3.8	2.6~7.6	0.70~3.30
榆树市	10	60.9~83.9	1.4~24.0	1.0~3.3	2.1~2.7	0.84~2.44
九台区	4	17.8~64.3	21.8~69.9	0.5~1.0	3.1~8.2	0.56~1.47
双阳区	7	26.8~81.7	5.9~57.7	0.5~1.8	2.5~12.9	1.37~3.33
梨树县	4	77.0~80.7	3.0~8.8	0.9~3.8	2.0~2.5	1.04~1.68

1.2.2 数据处理

1) 遥感影像预处理 采用 ENVI 软件对 0.8 m 分辨率的多光谱数据和 0.65 m 分辨率的全色波段数据进行系统处理。通过辐射定标,消除传感器差异和大气影响。进行正射校正,消除地形起伏和传感器姿态引起的几何畸变。最后,利用线性内插法进行重采样,生成高分辨率彩色合成影像<sup>[20]</sup>。

2) 侵蚀沟的提取及密度计算 已有研究<sup>[20]</sup>表明,通过目视解译,基于高分七号遥感影像可以较为准确地提取切沟,在松嫩典型黑土区解译切沟线密度和面密度的误差分别为 1.00% 和 5.62%。本研究结合东北黑土区土壤、地形及耕作特点,利用 ArcGIS 软件勾画出侵蚀沟(不包括浅沟)的边界。由于切沟的规模和形态差异巨大,部分较大的切沟在宽度、深度等形态特征上接近沟道,因此,本研究未能区分切沟和沟

道。通过提取流域内侵蚀沟的中心线,中心线的长度作为侵蚀沟的长度,进一步计算每个研究流域内侵蚀沟的线密度,即单位面积上的侵蚀沟长度<sup>[16]</sup>。

3) 土地利用分类 基于 eCognition Developer 软件进行土地利用分类<sup>[21]</sup>。首先,采用多尺度分割算法对影像进行分割,并根据研究区内土地利用类型的空间异质性和地物形态特征优化分割尺度,以保证分类对象的完整性。选取典型样本区进行手动标注,并覆盖研究区内主要土地利用类型,包括耕地、林地、建筑物、水域、道路和侵蚀沟等。在分类过程中,综合利用光谱特征、形状特征、纹理特征及地形因子进行监督分类。

分类完成后,结合目视解译对分类结果进行检验,并通过混淆矩阵和 Kappa 系数对分类精度进行评估。结果显示,所选流域的 Kappa 系数为 88.67%

和 79.12%，均符合分类精度标准<sup>[22]</sup>。由于水田多位于地势平坦的区域，不具备侵蚀沟发育的地形条件。因此，本研究将水田类型单独划分，不纳入耕

地破碎化指标的计算范围，以确保分析结果能够客观反映侵蚀沟作用下的耕地空间格局特征。侵蚀沟提取与土地利用分类结果见图 2。

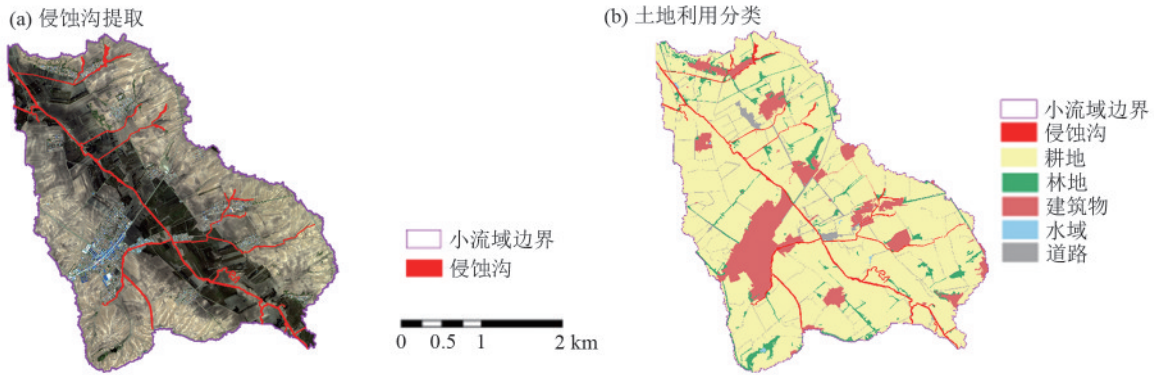


图 2 侵蚀沟及土地利用解译示例

Fig. 2 Examples of gullies and land use interpretation

### 1.2.3 耕地破碎化评价指标

目前研究多选用平均地块面积、地块数量、地块密度、边界密度指数、形状指数、聚合度指数、连接度指数、分离度指数、破碎化指数等分析破碎化情况<sup>[23-24]</sup>。由于本文只分析耕地的破碎化情况，因此，借鉴已有成果<sup>[25-27]</sup>并结合研究区特点，选取平均地块面积(MPS)、地块密度(PD)、边界密度指数(ED)、分离度指数(DIVISION)及破碎化指数(FS)，利用 Fragstats 软件计算。除平均地块面积(MPS)为负向指标(值越小破碎化越严重)外，其余指标均为正向指标(值越大破碎化越严重)。这些指标分别反映地块的大小、分布密度、形状复杂度和空间分离度，从不同角度量化耕地破碎化的程度，具有较好的适用性。

1) 平均地块面积(MPS)。平均面积大小是反映耕地破碎度最直接的一个指标，其数值的大小直接影响耕地的具体破碎程度，其值越小，破碎程度越高。

$$MPS = \frac{A}{N} \quad (1)$$

式中： $A$ 为耕地总面积， $hm^2$ ； $N$ 为耕地地块数。

2) 地块密度(PD)。地块密度是指单位土地面积上的地块数量，是土地面积破碎程度的具体量化，其值越大，表明破碎化程度越高。

$$PD = \frac{N}{A} \quad (2)$$

式中： $N$ 为耕地地块数量； $A$ 为土地总面积， $km^2$ 。

3) 边界密度指数(ED)。边界密度指数是分析地块形状的重要指标，揭示地块被分割的程度，是耕地破碎化程度的直接反映。边界密度越大，表示耕地被分割的程度越高。

$$ED = \frac{E}{A} \quad (3)$$

式中： $E$ 为耕地地块的边界总长度， $m$ ； $A$ 为耕地总面积， $hm^2$ 。

4) 分离度指数(DIVISION)。代表 2 个点落在同一个斑块中的概率，用来描述景观的破碎程度。其值为 0~1，值越接近 0，表示越连续；值越接近 1，表示越破碎。

$$DIVISION = 1 - \sum_{i=1}^n \left( \frac{a_i}{A} \right)^2 \quad (4)$$

式中： $a_i$ 为第  $i$  个斑块的面积， $hm^2$ ； $A$ 为耕地总面积， $hm^2$ ； $n$ 为耕地地块数量。

5) 破碎化指数(FS)。用来量化耕地的破碎度，是耕地破碎度的直观反映，地块的破碎化状况是其重要的属性特征之一。

$$FS = 1 - 1/MSI \quad (5)$$

$$MSI = \sum_{i=1}^n \left( 0.25p_i / \sqrt{a_i} \right) / N \quad (6)$$

式中： $MSI$ 为平均地块形状指数； $a$ 为每个地块的面积， $m^2$ ； $p$ 为每个地块的周长， $m$ ； $N$ 为耕地地块总数目。

为有效避免单一指标评估的局限性，实现对耕地破碎化程度的全面、客观评价，通过以上评价指标计算综合破碎指数。

基于熵权法<sup>[28]</sup>的客观赋权，确保各指标权重的科学性和可靠性。指标权重及耕地破碎化综合指数( $F_i$ )计算公式为：

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (7)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^m w_j x'_{ij} \quad (8)$$

式中： $F_i$ 数值越大，破碎化程度越高。

由于指标间含义不同且量纲不同,为使指标间具有统一可比性,需对原始数据进行标准化处理。标准化值计算公式为:

$$\text{正向: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (9)$$

$$\text{负向: } x'_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (10)$$

式中: $x_{ij}$ 为第*i*个评价单元在第*j*个指标下的原始值; $x_j^{\max}$ 、 $x_j^{\min}$ 分别为第*j*个指标的最大值和最小值; $x'_{ij}$ 为标准化后的值。

归一化处理公式为:

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad (11)$$

式中: $p_{ij}$ 为第*i*个单元在第*j*个指标下的归一化权重占比,值域为[0,1]; $n$ 为流域数量。

计算指标的信息熵及冗余度:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \times \ln(p_{ij}) \quad (12)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (13)$$

式中: $p_{ij} \neq 0$ ,常数 $k = \frac{1}{\ln(n)}$ ;若 $p_{ij} = 0$ ,则 $\ln(p_{ij}) = 0$ 。

熵权法计算结果表明,各破碎化指标在综合破碎指数中的权重存在一定差异。地块密度(PD)权重最高,为0.338,其次为边界密度指数(ED,0.265)和平均地块面积(MPS,0.157)。分离度指数(DIVISION)

和破碎化指数(FS)权重相对较低,分别为0.138和0.102。该权重体系反映出地块数量、边界特征及规模差异在耕地破碎化表征中的主导作用。

#### 1.2.4 统计分析方法

基于地理空间分析技术,对耕地破碎化程度进行可视化表达。通过Spearman相关系数,分析耕地破碎化指标与各影响因子之间的相关性<sup>[29]</sup>,采用多元线性回归和岭回归,定量识别耕地综合破碎指数的主导驱动因子及侵蚀沟密度与其他因子之间的交互作用。采用情景对比分析方法和*t*检验,量化有无侵蚀沟条件下耕地破碎化程度的差异,进而评估侵蚀沟对耕地破碎化的贡献率。通过回归分析,深入探讨影响侵蚀沟贡献率的关键因素及其作用机制。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕地破碎化程度及空间差异

由表2可知,小流域耕地破碎化程度存在显著的区域差异。平均地块面积为2.962~35.715 hm<sup>2</sup>,平均值为11.769 hm<sup>2</sup>。地块密度平均值为7.024个/km<sup>2</sup>,最大值达18.683个/km<sup>2</sup>,部分小流域耕地分布较为密集。边界密度指数平均值为123.706 m/hm<sup>2</sup>,地块边界曲折程度与形状复杂性差异较大。分离度指数整体偏高,平均值为0.977,最大值接近1,表明耕地空间高度分散、连片性较差。破碎化指数平均值为0.466,处于中等水平。综合破碎指数为0.371~0.993,平均为0.585,标准差为0.124,进一步表明耕地破碎化整体处于中等水平,但区域内部差异较大。

表2 小流域耕地破碎化指标统计特征

Table 2 Statistical characteristics of cultivated land fragmentation indicators in small watersheds

项目	平均地块面积 (MPS)/hm <sup>2</sup>	地块密度 (PD)/ (个·km <sup>-2</sup> )	边界密度指数 (ED)/ (m·hm <sup>-2</sup> )	分离度指数 (DIVISION)	破碎化指数 (FS)	综合破碎指数 ( $F_i$ )
最小值	2.962	2.240	72.127	0.921	0.349	0.371
最大值	35.715	18.683	229.498	0.999	0.589	0.993
平均值	11.769	7.024	123.706	0.977	0.466	0.585
标准差	6.789	3.219	31.369	0.019	0.048	0.124
变异系数/%	57.680	45.830	25.360	1.970	10.400	21.110

地块密度在综合指标中权重最大(占比33.8%)。根据自然断点法将地块密度划分为5个等级(图3a)显示,研究区地块密度存在空间差异,地块密度较高的小流域集中在中部的宾县和榆树市。对综合破碎指数进行分级可以看出,研究区耕地破碎化程度同样存在明显的空间差异。中部耕地破碎化程度高,综合破碎指数最大值出现在宾县。大多数流域处于I~III级,占比达86%,表明耕地破碎化整体处于中等偏下水平。

### 2.2 耕地破碎化的影响因素

Spearman相关系数表明,综合破碎指数( $F_i$ )与各环境因子之间的秩相关系数均未达到显著水平(表3),但与侵蚀沟密度的线性相关系数在0.05的水平上显著( $r=0.351, p=0.013$ )。单个破碎化指标与不同环境因子之间的相关性存在差异。其中,常用的破碎化指数与除道路面积比例以外的5个因子均呈显著相关,相关系数从大到小为侵蚀沟密度、平均坡度、降水量、耕地面积比例、林地面积比例。除耕地地块密度外,其他各单项破碎化指标均与小流域平均坡度显著相关。

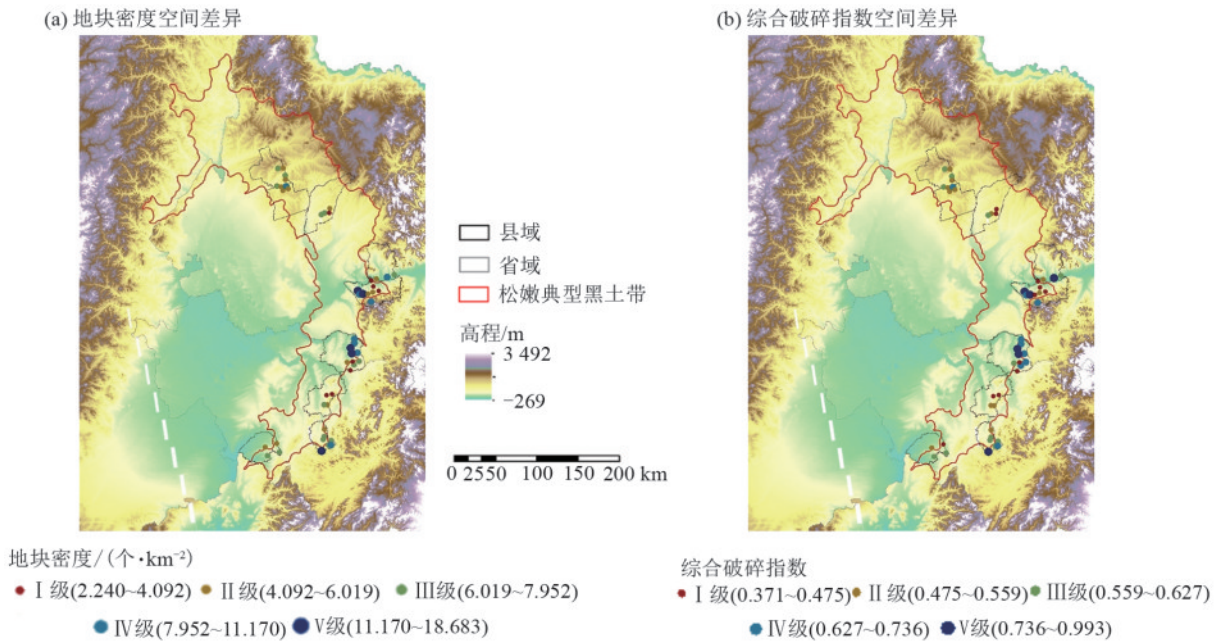


图 3 耕地破碎度空间差异

Fig. 3 Spatial differences in fragmentation degree of cultivated land

表 3 破碎度指标与影响因素的秩相关系数

Table 3 Spearman rank correlation coefficients between fragmentation indicators and influencing factors

影响因素	平均地块面积 (MPS)	地块密度 (PD)	边界密度指数 (ED)	分离度指数 (DIVISION)	破碎化指数 (FS)	综合破碎指数 ( $F_i$ )
耕地面积比例	0.580**	-0.166	0.058	-0.622**	-0.456**	-0.157
林地面积比例	-0.563**	0.195	-0.030	0.582**	0.352*	0.186
道路面积比例	-0.055	0.163	0.324*	-0.028	-0.011	0.197
小流域平均坡度	-0.374**	0.022	-0.028**	-0.298*	0.508**	0.053
侵蚀沟密度	-0.204	0.211	0.269	-0.092	0.521**	0.234
多年平均降水量	-0.260	0.203	0.302*	0.017	0.501**	0.220

注:\*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著;\*\*表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

为刻画侵蚀沟密度与其他因子的交互效应对耕地综合破碎指数的影响,建立多元线性回归模型,并引入侵蚀沟密度与各因子的交互项,模型  $R^2=0.438$ ,对耕地破碎度具有中等解释力。在所有交互项中,仅“侵蚀沟密度×道路面积比例”的回归系数达到显著水平( $p=0.044$ ),说明道路网络对侵蚀沟造成的耕地破碎具有明显的“放大效应”,加剧侵蚀沟对耕地空间完整性的负面影响,岭回归进一步验证此结论。标准化回归系数的绝对值排序显示,“侵蚀沟密度×道路面积比例”是贡献最大的因子,其次为“侵蚀沟密度×林地面积比例”,而道路面积比例、小流域平均坡度和侵蚀沟密度本身也具有较高的权重。

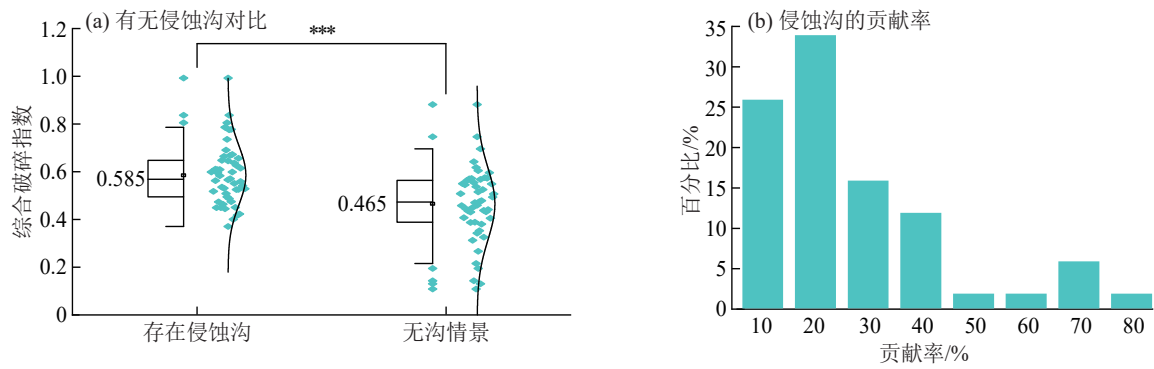
### 2.3 侵蚀沟对耕地破碎化的贡献率

为进一步分析侵蚀沟对耕地破碎化的影响,设置耕地中侵蚀沟去除的情景,对比有无侵蚀沟情景下破碎化情况的差异。由图 4a 可知, $t$  检验表明,有沟时的耕地破碎度显著高于无沟假设时的破碎度。

侵蚀沟的贡献率变化为 3.8%~72.8%(图 4b),60% 的小流域侵蚀沟贡献率 < 20%,表明大部分样本的贡献率较低,贡献率在 20%~50% 的小流域占比 30%,>50% 的小流域占比 10%。

为进一步揭示侵蚀沟对破碎化影响的空间特征,采用自然断点法将研究区的侵蚀沟密度分为 5 级(图 5a)。其中, I~V 级占比分别为 26%、24%、20%、14%、16%。结果显示,侵蚀沟密度较大区域主要分布在中部的宾县和南部的双阳区。同时,侵蚀沟对破碎化的贡献率也存在空间差异,中部地区的贡献率普遍大于其他地区(图 5b)。

侵蚀沟对耕地破碎化的贡献率随侵蚀沟密度增加呈显著线性增长( $p<0.01$ ),同时,随着综合破碎化程度的增加,侵蚀沟对破碎化的贡献趋于减弱,但在统计上并不显著(图 6)。从单项破碎化指标来看,侵蚀沟的贡献率与分离度指数呈显著负相关( $p<0.01$ ),与平均地块面积和破碎化指数呈显著正相关( $p<0.05$ )。



注:\*\*\*表示  $p \leq 0.001$ 。

图 4 有无侵蚀沟时耕地破碎度对比及侵蚀沟贡献率的频数分布

Fig. 4 Comparison of fragmentation degree with or without gullies and frequency distribution of contribution rate of gullies

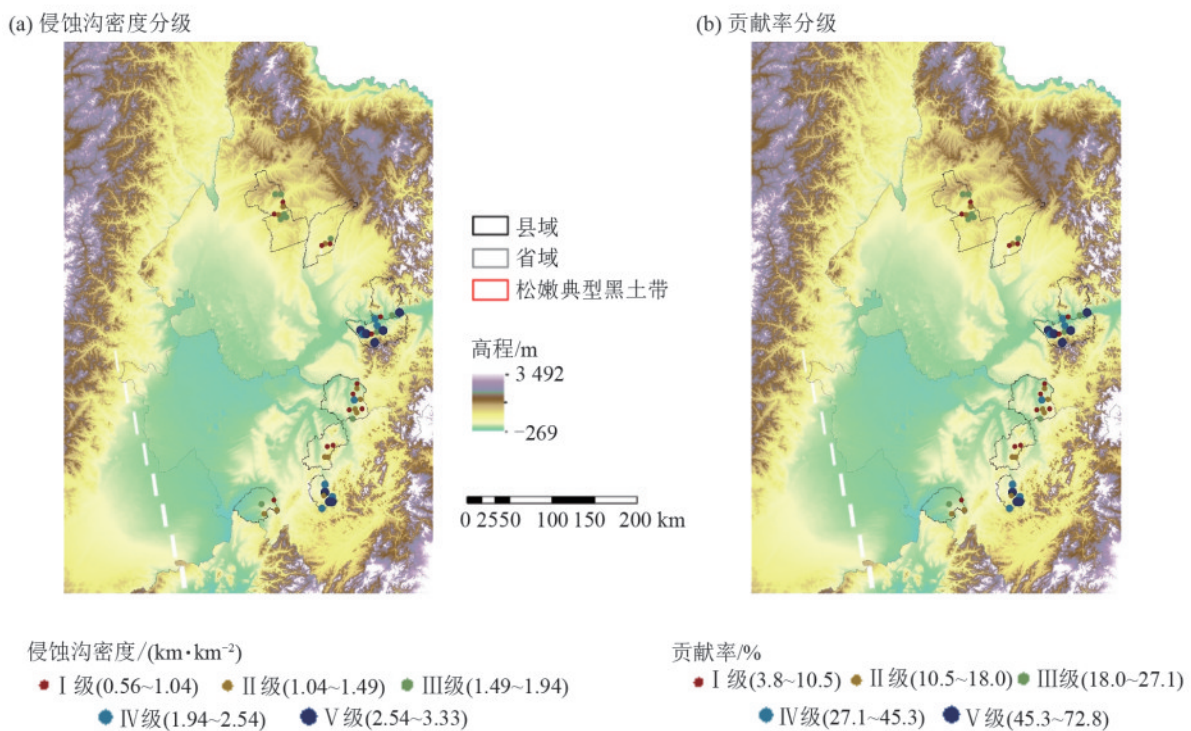


图 5 采用自然断点法对调查流域侵蚀沟密度和贡献率分级结果

Fig. 5 Classification results of gully density and contribution rate in surveyed watersheds using natural breakpoint method

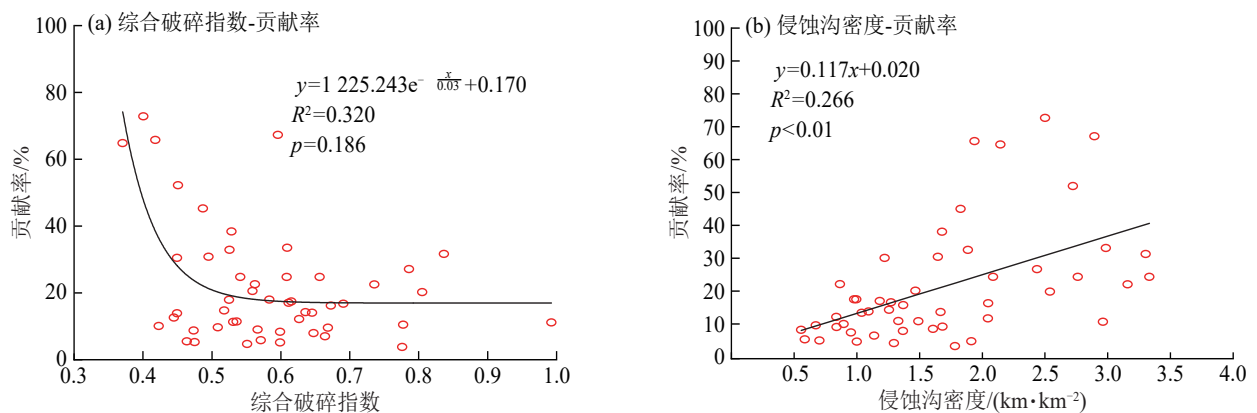


图 6 侵蚀沟对耕地破碎化的贡献率与耕地综合破碎指数和侵蚀沟密度的关系

Fig. 6 Relationship of contribution rate of gully erosion to cultivated land fragmentation with comprehensive fragmentation index of cultivated land and gully density

### 3 讨论

张定祥等<sup>[30]</sup>基于30 m土地利用栅格计算全国耕地破碎度,其中东北黑土区破碎度较低;杜国明等<sup>[7]</sup>基于全国第三次土地调查1:5 000地理数据库计算的黑土区拜泉县破碎指数多低于0.434,本文计算典型黑土分布区耕地的破碎化指数平均值为0.466,二者具有可比性。与我国其他地区相比,典型黑土分布区耕地破碎化程度低于华北平原的河北省<sup>[11]</sup>及南方丘陵区的江西省<sup>[31]</sup>。与东部浙江省<sup>[26]</sup>相比,虽然破碎化指数略高,但从地块密度和边界密度指数等指标看,黑土区的耕地破碎化程度更低。因此,松嫩典型黑土分布区虽存在破碎化,但与其他地区相比程度较轻,是由于黑土区地势总体平坦,坡度较小,地块不易被自然条件切割。黑土区长期采用大面积连续耕作和地块整治措施,普遍采用机械耕作,使耕地能够保持较完整的形态。

坡度较大的地区更容易出现耕地破碎化的情况<sup>[11]</sup>。林带和道路通过改变耕地的空间格局,对破碎化具有重要影响<sup>[13]</sup>。本研究表明,松嫩典型黑土区耕地破碎化指数的主要影响因素包括侵蚀沟密度、平均坡度、降水量、耕地面积比例和林地面积比例。侵蚀沟密度与道路相互作用,使破碎化程度显著提升。侵蚀沟密度的贡献率随侵蚀沟密度的增大而增大。值得注意的是,在破碎化程度较低的区域,侵蚀沟对破碎化的贡献率更高,而当耕地破碎化达到较高水平时,侵蚀沟对破碎化的影响减弱。总体来看,约60%的小流域中,侵蚀沟贡献率低于20%,仅约10%的小流域中,贡献率超过50%。表明大多数小流域的破碎化情况受到多种因素的共同影响,侵蚀沟的作用有限,而在中部侵蚀沟密度较高的区域,侵蚀沟的影响最为显著。

本文虽然揭示侵蚀沟对耕地破碎化的影响,但仍存在一定局限性。首先,样本覆盖范围有限,难以充分反映区域内耕地破碎化空间异质性;其次,缺乏对侵蚀沟发育与耕地破碎化演变的长期动态分析。未来研究可在更大空间范围和多时相数据基础上,开展侵蚀沟发育及耕地破碎化演变的时空动态分析,深入探讨其作用机制,为黑土区农田整治和可持续农业生产提供科学依据。

### 4 结论

1)松嫩典型黑土分布区耕地破碎化程度处于中等水平,平均地块面积为2.962~35.715 hm<sup>2</sup>,地块密度为2.2~18.7个/km<sup>2</sup>,边界密度指数为72.1~229.5 m/hm<sup>2</sup>,

分离度指数为0.921~0.999,破碎化指数为0.349~0.589。破碎化程度最高的地区分布在中部。

2)耕地破碎化指数的主要影响因素包括侵蚀沟密度、平均坡度、降水量、耕地面积比例和林地面积比例。侵蚀沟密度与道路面积比例的交互作用是对耕地综合破碎指数贡献最大的因子。道路网络对侵蚀沟造成的耕地破碎具有明显的“放大效应”,加剧侵蚀沟对耕地空间完整性的负面影响。

3)侵蚀沟的存在加剧耕地破碎化,其贡献率与侵蚀沟密度呈显著正相关。约10%的小流域中侵蚀沟成为耕地破碎化的主导因素,贡献率超过50%。在耕地破碎化程度较低的区域,侵蚀沟对破碎化的贡献率更高,而当耕地破碎化达到较高水平时,侵蚀沟对破碎化的影响较弱。

#### 参考文献:

- [1] 杨帆, 巩子瑞, 郭明明, 等. 东北漫川漫岗黑土区典型农业小流域切沟沟头形态特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 1-8.  
YANG F, GONG Z R, GUO M M, et al. Morphological characteristics and influencing factors of gully heads in a typical agricultural watershed in rolling-hill black soil region of northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 1-8.
- [2] 孔令冉, 董雯昕, 杨天一, 等. 东北黑土区沟道侵蚀机理及防治研究进展[J]. 国土与自然资源研究, 2018(4): 1-4.  
KONG L R, DONG W X, YANG T Y, et al. Research progress of gully erosion mechanism and control in black soil region of northeast China[J]. Territory and Natural Resources Study, 2018(4): 1-4.
- [3] 姜义亮, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8207-8215.  
JIANG Y L, ZHENG F L, WEN L L, et al. An experimental study on the impacts of rainfall and inflow on hillslope soil erosion in typical black soil regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8207-8215.
- [4] YANG J C, ZHANG S W, CHANG L P, et al. Gully erosion regionalization of black soil area in northeastern China[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(1): 78-87.
- [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, 2024, 69(11): 1401-1405.  
ZHANG X Y, HU W, LI J Y, 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.
- [6] SU M Y, SUN K Y, DENG B Y, et al. Quantification and driving factors of cultivated land fragmentation in rapidly urbanizing area: A case study in Guangdong Province[J]. Remote Sensing, 2024, 16(14): e2633.
- [7] 杜国明, 张宇, 章尤琴. 东北黑土区典型县域耕地细碎化

- 空间格局及影响因素分析[J].农业现代化研究,2023,44(5):858-868.
- DU G M, ZHANG Y, ZHANG Y Q. The spatial pattern and influencing factors of cultivated land fragmentation in typical counties of the northeast black soil region[J].Research of Agricultural Modernization,2023,44(5):858-868.
- [8] 李鑫,欧名豪,马贤磊.基于景观指数的细碎化对耕地利用效率影响研究:以扬州市里下河区域为例[J].自然资源学报,2011,26(10):1758-1767.
- LI X, OU M H, MA X L. Analysis on impact of fragmentation based on landscape index to cultivated land use efficiency: A case on Lixiahe district in Yangzhou City [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(10): 1758-1767.
- [9] 台晓丽,肖武,张建勇,等.基于景观指数的巢湖流域各县区耕地细碎化研究[J].水土保持研究,2016,23(4):94-98.
- TAI X L, XIAO W, ZHANG J Y, et al. Research of cultivated land fragmentation at the township level of Chaohu basin based on landscape metrics[J].Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 94-98.
- [10] LIU J, JIN X B, XU W Y, et al. Influential factors and classification of cultivated land fragmentation, and implications for future land consolidation: A case study of Jiangsu Province in Eastern China[J].Land Use Policy, 2019, 88: e104185.
- [11] 孙晓兵,孔祥斌,温良友,等.华北集约化农区耕地细碎化特征及其整治模式研究:以河北曲周为例[J].农业现代化研究,2019,40(4):556-564.
- SUN X B, KONG X B, WEN L Y, et al. Farmland fragmentation and its managing models of the concentrated farmland in agricultural region of north China: A case study of Quzhou County in Hebei Province[J].Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(4): 556-564.
- [12] 陈培勇,陈风波.土地细碎化的起因及其影响的研究综述[J].中国土地科学,2011,25(9):90-96.
- CHEN P Y, CHEN F B. Literature review on the causes of land fragmentation and its effects[J].China Land Science, 2011, 25(9): 90-96.
- [13] XU M Y, NIU L, WANG X B, et al. Evolution of farmland landscape fragmentation and its driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Journal of Cleaner Production, 2023, 418: e138031.
- [14] 王念忠,沈波.东北黑土区侵蚀沟发展状况及其对粮食安全的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(5):7-10.
- WANG N Z, SHEN B. Development of gully erosion in northeast China and its effects on the national food security[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(5): 7-10.
- [15] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2021年)[R/OL]. 2021. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202510/t20251001\\_2067993.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202510/t20251001_2067993.html).
- CHINA. M O W R. China soil and water conservation bulletin(2021)[R/OL]. 2021. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202510/t20251001\\_2067993.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202510/t20251001_2067993.html).
- [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] 刘兆题,王春梅,李芹芳,等.松嫩黑土区农田道路切沟空间分布特征及其影响因素[J].水利水电技术(中英文),2024,55(10):197-210.
- LIU Z T, WANG C M, LI Q F, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of unpaved road gullies in the mollisol region of Songnen[J].Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(10): 197-210.
- [18] 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.
- DU G M, LEI G P, ZONG X D. Analysis on spatial pattern of gully erosion across typical black hilly region of northeast China[J].Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 94-97.
- [19] 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 G H, YANG Y, LIU Y N, 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.
- [20] 张俊彬,张岩,李坤衡,等.基于高分七号立体影像提取松嫩典型黑土区切沟和浅沟的精度分析[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(4):152-161.
- ZHANG J B, ZHANG Y, LI K H, et al. Accessing accuracy of extracting gully and ephemeral gully in the Songnen typical black soil region based on GF-7 satellite images[J].Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(4): 152-161.
- [21] 杜凤兰,田庆久,夏学齐,等.面向对象的地物分类法分析与评价[J].遥感技术与应用,2004,19(1):20-23.
- DU F L, TIAN Q J, XIA X Q, et al. Object-oriented image classification analysis and evaluation [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(1): 20-23.
- [22] JANSSEN L, van der WEL F. Accuracy assessment derived of satellite data: A review [J].Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60(4): 419-426.
- [23] 陈文彦,李婷,孙俊颖,等.广东省1990—2020年耕地景观破碎度时空变化特征及其驱动机制[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(8):1480-1491.
- CHEN W Y, LI T, SUN J Y, et al. The spatial-temporal changes of cropland fragmentation and its driving mechanisms in Guangdong Province from 1990 to 2020[J].Chinese

- Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(8):1480-1491.
- [24] 付刚,肖能文,乔梦萍,等.北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化[J].生态学报,2017,37(8):2551-2562. FU G, XIAO N W, QIAO M P, et al. Spatial-temporal changes of landscape fragmentation patterns in Beijing in the last two decades[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8):2551-2562.
- [25] PANG R R, XU H, ZHANG M Y, et al. Spatial correlation and impact mechanism analysis of cultivated land fragmentation and quality in the central plain of Liaoning Province, northeast China [J]. Land Degradation and Development, 2023, 34(15):4623-4634.
- [26] 陈帷胜,冯秀丽,马仁锋,等.耕地破碎度评价方法与实证研究:以浙江省宁波市为例[J].中国土地科学,2016,30(5):80-87. CHEN W S, FENG X L, MA R F, et al. Method of cultivated land fragmentation evaluation and empirical research: A case of Ningbo City in Zhejiang Province[J]. China Land Sciences, 2016, 30(5):80-87.
- [27] 黄梦佳,李月芬,李淑杰,等.耕地破碎度及空间相关性研究:以长春市九台区为例[J].东北师大学报(自然科学版),2019,51(2):123-129. HUANG M J, LI Y F, LI S J, et al. Study on the fragmentation degree and spatial correlation of cultivated land: A case of Jiutai in Changchun City [J]. Journal of
- Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2019, 51(2):123-129.
- [28] 王筱明.基于熵权法的济南市土地利用效益评价研究[J].水土保持研究,2008,15(2):96-98. WANG X M. Study of urban land use benefits assessment for ji'nan based on entropy-right method [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(2):96-98.
- [29] 宋孟斐,何伟军,安敏.长江经济带种植业面源污染多尺度特征及其与耕地破碎化的相关性[J].生态学报,2024,44(24):11387-11403. SONG M F, HE W J, AN M. Multi-scale characteristics of non-point source pollution in the planting industry and its correlation with fragmentation of cultivated land in the Yangtze River economic belt [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24):11387-11403.
- [30] 张定祥,王荣彬,张嘉.2020年中国1 km 网格耕地破碎度数据集[J].中国科学数据,2024,9(2):295-304. ZHANG D X, WANG R B, ZHANG J. A dataset of 1 km-grid cultivated land fragmentation in China(2020)[J]. China Scientific Data, 2024, 9(2):295-304.
- [31] 孙雁,刘友兆.基于细碎化的土地资源可持续利用评价:以江西分宜县为例[J].自然资源学报,2010,25(5):802-810. SUN Y, LIU Y Z. Evaluation of land use sustainability based on land fragmentation: A case on Fenyi County, Jiangxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(5):802-810.
- (上接第82页)
- [30] 李凯,窦森,韩晓增.长期不施肥土壤团聚体中胡敏素的分布特征[J].吉林农业科学,2013,38(2):52-54. LI K, DOU S, HAN X Z. Distribution characteristics of humin in soil aggregate without fertilization for long time[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2013, 38(2):52-54.
- [31] KIM J, KIM T H, PARK S R, et al. Factors controlling the distributions of dissolved organic matter in the East China Sea during summer[J]. Scientific Reports, 2020, 10:e11854.
- [32] FRAGOULI P G, ROULIA M, VASSILIADIS A A. Macromolecular size and architecture of humic substances used in the dyes' adsorptive removal from water and soil [J]. Agronomy, 2023, 13(12):e2926.
- [33] MOORE J A M, SULMAN B N, MAYES M A, et al. Plant roots stimulate the decomposition of complex, but not simple, soil carbon[J]. Functional Ecology, 2020, 34(4):899-910.
- [34] MCCARTHY J F, ILAVSKY J, JASTROW J D, et al. Protection of organic carbon in soil microaggregates via restructuring of aggregate porosity and filling of pores with accumulating organic matter[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(19):4725-4744.
- [35] HAN Z X, WU X P, GAO H Z, et al. Long-term conservation tillage increases soil organic carbon stability by modulating microbial nutrient limitations and aggregate protection[J]. Agronomy, 2025, 15(7):e1571.
- [36] LI Y, GU X Y, YONG T W, et al. A global synthesis reveals additive density design drives intercropping effects on soil N-cycling variables [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 191:e109318.
- [37] AN J F, WANG C H, YU J, et al. Characteristics of humic acid-iron colloid stability and its mechanism of binding with As(III)[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2025, 114(6):e90.
- [38] WEST J R, LAUER J G, WHITMAN T. Tillage homogenizes soil bacterial communities in microaggregate fractions by facilitating dispersal[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 186:e109181.