

DOI: 10.11766/trxb202404210164

CSTR: 32215.14.trxb202404210164

田芷源, 卢慧中, 马瑞, 赵艳, 梁音. 东北黑土区耕地侵蚀退化空间分异特征[J]. 土壤学报, 2025, 62 (4): 931–945.

TIAN Zhiyuan, LU Huizhong, MA Rui, ZHAO Yan, LIANG Yin. Spatial Differentiation Characteristics of Soil Erosion and Degradation in Black Soil Cropland of Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (4): 931–945.

东北黑土区耕地侵蚀退化空间分异特征^{*}

田芷源¹, 卢慧中², 马瑞^{1, 3}, 赵艳^{1, 3}, 梁音^{1†}

(1. 土壤与农业可持续发展重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2. 水灾害防御全国重点实验室(南京水利科学研究院), 南京 210029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤侵蚀是引发黑土地退化的重要原因, 目前仍缺乏有关东北黑土区耕地侵蚀退化的综合评价。厘清黑土区侵蚀退化空间分异特征及侵蚀退化类型, 将有利于因地制宜实施黑土地保护与修复技术模式。本文基于东北地区土种调查和土系调查土壤样点理化性质, 构建了土壤质量综合指数, 并使用环境协变量和随机森林模型反演得到1980年和2010年90 m分辨率的耕地质量空间分布图。同时考虑不同侵蚀营力及强度和土壤质量退化程度划分出15种黑土地侵蚀退化类型。结果表明: 东北黑土区约1/3耕地发生侵蚀退化, 其中水蚀退化面积广且程度严重, 最典型的是水蚀轻度-退化严重类型, 分布在大兴安岭东侧、小兴安岭北部、松嫩平原南部及长白山北部; 风蚀退化以风蚀重度-退化轻微类型为主, 分布在松辽平原中部及科尔沁沙地; 融蚀退化所占耕地面积较少且程度轻微, 集中分布于大兴安岭西部山麓。整体而言, 黑土地土壤质量越高, 土壤退化程度越严重, 受到重度侵蚀的影响较大, 水蚀导致的耕地退化最为严重。针对空间分布各异的侵蚀退化类型应推广差异化的黑土地保护与可持续利用技术。

关键词: 黑土地; 耕地质量; 土壤侵蚀; 随机森林模型; 空间分布

中图分类号: S152 文献标志码: A

Spatial Differentiation Characteristics of Soil Erosion and Degradation in Black Soil Cropland of Northeast China

TIAN Zhiyuan¹, LU Huizhong², MA Rui^{1, 3}, ZHAO Yan^{1, 3}, LIANG Yin^{1†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 211135, China; 2. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Soil erosion is a significant cause of degradation in black soil. To make matters worse, there is little or no comprehensive evaluation of soil erosion-degradation in black soil cropland in Northeast China. Thus, clarifying the spatial differentiation characteristics of soil erosion and degradation, as well as the different soil erosion-degradation types will be conducive to the implementation of soil protection and restoration technologies tailored to local conditions. [Method] Based on

* 国家重点研发计划项目(2021YFD1500801)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFD1500801)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yliang@issas.ac.cn

作者简介: 田芷源(1991—), 女, 湖南怀化人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀退化与制图研究。Email: tianzhiyuan@issas.ac.cn

收稿日期: 2024-04-21; 收到修改稿日期: 2024-09-10; 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-10-23

the physical and chemical properties of soil samples collected during two periods of soil survey, the soil species survey in the 1980s and the soil series survey in the 2010s, a comprehensive soil quality index was constructed in this paper via principal component analysis, considering soil thickness, soil organic matter content, total nitrogen content, total phosphorus content, total potassium content, pH value, and bulk density. The spatial distribution maps of soil properties in the 1980s and 2010s were created with a 90 m resolution using environmental covariates and the random forest model. Fuzzy membership functions were built to evaluate soil quality, and soil degradation was the difference between the quality from these two periods. A total of 15 erosion-degradation types of black soil were classified based on two aspects: the intensity of soil erosion types and the degree of soil quality degradation. **【Result】** The results showed that about one-third of the cropland in Northeast China experienced erosion-degradation. Among them, water erosion is extensive and causes serious degradation. The most typical type was mild water erosion-serious degradation (occupying 23.7% of erosion croplands), which was distributed in the east of the Great Khingan Mountains, the north of the Lesser Khingan Mountains, the south of the Songnen Plain, and the north of the Changbai Mountains. Other types include mild water erosion-light degradation (16.4%), severe water erosion-serious degradation (14.1%), mild water erosion-no obvious degradation (7.4%), severe water erosion-light degradation (6.8%), and severe water erosion-no obvious degradation (3.1%). Additionally, the main type of wind erosion was severe wind erosion-light degradation type (10.1%), which was distributed in the middle of the Songliao Plain and Horqin Sandy Land. This was followed by mild wind erosion-light degradation (8.3%), severe wind erosion-serious degradation (3.2%), mild wind erosion-serious degradation (2.3%), mild wind erosion-no obvious degradation (1.9%), and severe wind erosion-serious degradation (1.3%). The land area of freeze-thaw erosion-degradation types was small (1.4%), having mild intensity and concentrated in the western foothills of the Great Khingan Mountains. **【Conclusion】** Overall, our study reveals that the higher the quality of black soil, the more likely it is to suffer serious degradation, which is greatly influenced by severe erosion. Also, the degradation caused by water erosion was the most serious. According to the different spatial distribution of erosion-degradation types, distinct black soil protection and sustainable utilization technologies should be promoted.

Key words: Black soil; Soil quality; Soil erosion; Random forest model; Spatial distribution

中国东北部是世界四大黑土区之一，由于含有疏松肥沃的腐殖质表土层而成为优质的耕地^[1]。该区域粮食产量和粮食调出量分别占全国总量的 1/4 和 1/3。自 20 世纪中叶以来，大范围土地被开垦，坡耕地成为侵蚀的主要策源地。近 1/5 黑土地正在发生水土流失，造成土层被剥蚀、土壤养分流失以及侵蚀沟扩张带来耕地破碎化等问题^[2-3]。土壤侵蚀引起的耕地质量下降与作物产量相关^[4]，亟需对黑土地进行保护利用。

据前人研究，近几十年来东北黑土区耕地水蚀呈现先增后减的趋势，风蚀和冻融侵蚀整体减缓^[5-6]，同时耕地质量退化严重^[7]。土壤侵蚀与耕作活动是影响黑土地土壤质量下降的重要因素。黑土耕地质量和侵蚀速率的空间变化呈现负相关趋势^[8-9]，侵蚀导致土壤养分空间再分配失衡^[10]。另一方面，长期耕作促进坡耕地径流的“沟渠效应”从而加速黑土侵蚀退化^[11]，通过优化作物覆盖和农田管理措施可以减少耕地土壤流失量^[12]。侵蚀与耕地退化变异息息

相关，但目前缺乏有关黑土区侵蚀退化情况的综合研究。从管理口径来看，自然资源部及农业农村部门关注耕地质量及地力评价；水利部门着重侵蚀类型及强度调查，尚未形成针对黑土地侵蚀退化的区域性评价成果。

在东北黑土区，有关耕地侵蚀退化的研究大多集中在坡面及流域尺度^[8, 13]，或仅对土层厚度、有机质进行单一指标分析^[10, 14]，有关大面积尺度土壤侵蚀造成耕地质量退化的综合研究较为薄弱。以黑龙江省为例，学者曾根据退化强度将黑土退化分为初级阶段、发展阶段与危害阶段^[15]，但仅考虑了土壤肥力指标。根据侵蚀土壤发展过程与属性特点，前人曾提出一套南方土壤侵蚀退化评价体系，包括物理退化、化学退化和生物退化指标^[16]，这与耕地质量监测常用指标分类一致。土壤退化指数可以定量反映土壤质量退化程度，利用模糊数学方法确定各指标权重后被广泛应用于土壤评价^[8, 17]。近年来针对阻控侵蚀退化发展出一系列黑土农田保护性耕

作技术, 但这些措施实施于不同农田下效益存在差异^[18-21], 因此开展黑土地侵蚀退化分类型评价十分必要。

针对以上问题, 本文以黑土耕地为研究对象, 通过收集两个时期土壤调查样点的性质及土壤侵蚀数据, 运用随机森林模型反演、土壤质量综合指数构建等方法, 对黑土区侵蚀退化进行分类分级, 探讨不同侵蚀类型下土壤退化特征的差异, 明确不同侵蚀退化类型的空间分布, 以期为黑土地保护与侵蚀退化阻控技术分区施策提供参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

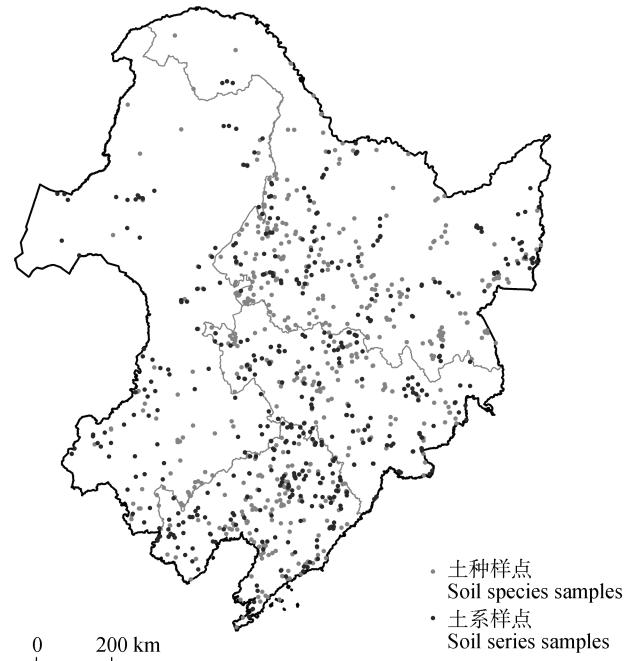
东北黑土区涵盖黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区“东四盟”(呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市), 是我国最重要的商品粮基地。该区种植的农作物以玉米、水稻、大豆为主, 熟制为一年一熟, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年均积温为 $1\ 500\sim3\ 400^{\circ}\text{C}$, 作物生长季降雨量集中在 $400\sim600\ \text{mm}$ 。东北黑土区耕地面积为 $37.5\ \text{万 km}^2$, 主要分布在松嫩平原、三江平原、辽河平原及周围低山丘陵地带。

1.2 数据来源

研究使用的基础数据包括东北黑土区土壤调查、土壤侵蚀以及环境变量数据。

(1) 土壤调查数据。①通过查阅《黑龙江土种》、《吉林土壤》、《辽宁土种志》、《内蒙古土种志》及《中国东北土壤》书籍, 收集了 20 世纪 80 年代前后完成的土种调查数据, 一共包含 621 个样点; ②通过查阅《中国土系志·黑龙江卷》、《中国土系志·吉林卷》、《中国土系志·辽宁卷》及《中国土系志·内蒙古卷》书籍, 收集了 2010 年左右完成的土系调查数据, 一共包含 473 个黑土区样点(图 1)。收集资料包括采样经纬度或采样位置(结合行政区划及卫星影像图根据位置描述确定样点的经纬度坐标)等基础信息, 以及有机质或有机碳、全氮、全磷、全钾、pH(H_2O)、容重、土层厚度($\leq 2\ \text{mm}$ 的土壤物质体积 $>25\%$ 的所有土层)等土壤性质数据。

(2) 土壤侵蚀数据。使用 1997—2000 年完成的全国第二次水土流失遥感调查成果, 1: 10 万比例尺分省份土壤侵蚀强度分级图(下载于国家地球系统科学数据中心 <https://www.geodata.cn>)。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站 GS (2024) 0650 号的标准地图制作, 底图边界无修改。下同

Note: The map is made based on the standard map with the approval number GS (2024) 0650 downloaded from the standard map service website of the National Administration of Surveying, Mapping, and Geographic Information, and the base map is not modified, and the same as below.

图 1 东北黑土区土壤调查样点分布图

Fig. 1 Location of soil survey samples in the black soil region of Northeast China

(3) 环境变量数据。①土地利用类型来源于欧空局发布的 2020 年 $10\ \text{m}$ 分辨率土地分类数据 (<https://esa-worldcover.org/>); ②气象数据来源于全球气候数据库 1970—2010 年约 $1\ \text{km}$ 分辨率的生物气象变量 (<https://www.worldclim.org/>); ③地表温度数据来源于美国宇航局 2016—2020 年 $1\ \text{km}$ 分辨率的 MOD11A1/MYD11A1 L3 产品; ④植被及光谱数据来源于美国宇航局 2000—2020 年 $250\ \text{m}$ 分辨率的 MOD13Q1/MYD13Q1 L3 产品; ⑤地形数据来源于 2000 年所获得的 $90\ \text{m}$ 分辨率 SRTM 数字高程模型; ⑥母岩数据来源于 2012 年发布的约 $1\ \text{km}$ 分辨率的 GLiM 产品(<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.788537>)。

1.3 数据处理

采用加权平均方法提取各样点 $0\sim30\ \text{cm}$ 土壤性质, 当土体厚度小于 $30\ \text{cm}$ 时则以实际厚度进行

加权平均(有14个土种样点,1个土系样点)。为计算权重,本文对土壤性质指标进行了标准化处理,计算方法如下:

$$z = (x - \bar{x}) / \sigma \quad (1)$$

式中,z为标准化数值;x为指标的原数值; \bar{x} 为原数值平均值; σ 为原数值标准差。

同时,对环境变量进行投影转换及重采样处理,将各变量空间分辨率统一为90 m,投影统一为Albers等积圆锥投影。各样点环境变量数值根据经纬度坐标从栅格图层中提取。

1.4 土壤质量综合指数

本文采用隶属函数和主成分分析方法将多项土

壤理化性质指标归纳为土壤质量综合指数。黑土退化主要表现为变薄、变瘦和变硬3个方面,由此选择土体厚度(薄)、有机质、全氮、全磷、全钾含量、pH(瘦)和容重(硬)指标用以表征土壤质量。首先为各指标建立隶属函数,除pH与容重为峰值型函数^[22]外,其余指标均为戒上型函数。指标最小值与最大值为采样数据集的5%、95%,最适值取值参考前人研究共识。使用主成分分析法,选择特征值大于1的主成分计算各指标综合得分系数(方差与载荷之积累计后除以方差之和)并归一化至(0,1]区间,归一化后综合得分系数占总系数的比例即为指标权重。结果显示有机质、全氮和全磷含量的权重较大,其次为土体厚度,全钾、容重及pH的贡献较小(表1)。

表1 建立土壤质量综合指数所选取指标的隶属函数参数及权重

Table 1 The membership function parameters and weight of selected indicators for building comprehensive soil quality index

| 指标 Indices | 隶属函数参数 Parameters of membership function | | | | 权重 Weight |
|---|---|--------------------|--------------------|------------------|--------------|
| | 最小值 ^① | 最适值下限 ^② | 最适值上限 ^③ | 最大值 ^④ | |
| 土体厚度 Soil thickness/cm | 40 | — | — | 170 | 0.141 |
| 有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹) | 5.0 | — | — | 87.1 | 0.220 |
| 全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹) | 0.39 | — | — | 4.91 | 0.215 |
| 全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹) | 0.13 | — | — | 1.45 | 0.199 |
| 全钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹) | 10.8 | — | — | 34.6 | 0.063 |
| pH | 5.3 | 6.5 | 7.5 | 8.6 | 0.082 |
| 容重 Bulk density/(g·cm ⁻³) | 0.81 | 1.2 | 1.3 | 1.6 | 0.080 |

①Minimum, ②The lower limit of the optimum value, ③The upper limit of the optimum value, ④Maximum

土壤质量综合指数计算公式如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n K_i \times C_i \quad (2)$$

式中,SQI表示土壤质量综合指数,取值为0~1; K_i 表示第*i*个评价指标的隶属度,由隶属函数计算所得; C_i 表示第*i*个评价指标的权重;*i*等于7。

1.5 土壤质量空间反演

本文采用随机森林回归模型反演土壤理化性质的空间分布格局。随机森林两个关键参数设置为*n_{tree}*=500,*m_{try}*=22。保持两个时期各指标建模方式一致,基于样点的生物气象指标、昼夜地表温度、植被指数、光谱特征、高程及衍生地形参数、母岩类型等

环境变量,建立起土壤理化性质预测模型。模型对于两个时期土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、pH和容重预测*R²*分别为0.38~0.43、0.27~0.37、0.35~0.38、0.56~0.62及0.25~0.45;对土体厚度(0.20~0.31)和全钾含量预测的*R²*(0.17~0.21)偏低。以建模时对应的环境因子分布图作为因变量,使用随机森林回归模型进行空间预测。在土地利用类型为耕地的基础上,输出东北黑土区土壤性质分布图,空间分辨率为90 m×90 m。利用各指标图层及权重,使用式(2)进一步计算获得两期土壤质量综合指数空间分布图,记为SQI₁₉₈₀和SQI₂₀₁₀。

1.6 退化程度量化及分级

土壤退化指数SDI由两个时期SQI相减所得,

其值域区间为(-1, 1)。为明确东北黑土区土壤退化的分级特征,体现区域空间差异性,土壤退化指数进一步被划分为未发生明显退化、发生轻微退化及发生明显退化3种程度。以阈值法对SDI进行分级,分级阈值考虑各等级的面积占比情况,通过前期分析发现当划分区间为(-1, -0.05), (-0.05, 0.05]以及(0.05, 1)时分级最为合理,退化程度由重到轻面积占比分别为39%、44%和17%。

1.7 土壤侵蚀划分方法

土壤侵蚀根据主要侵蚀营力划分为水力侵蚀、风力侵蚀和冻融侵蚀3种类型,在此基础上根据土壤侵蚀模数进一步划定土壤侵蚀强度。依据中华人民共和国行业标准《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),东北黑土区土壤侵蚀模数 $<200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 为微度侵蚀, $200 \sim 2500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 为轻度侵蚀, $2500 \sim 5000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 为中度侵蚀, $5000 \sim 8000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 为强烈侵蚀, $8000 \sim 15000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 为极强烈侵蚀, $>15000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 为剧烈侵蚀。由于水田的田面坡度较为平整,一般认为无侵蚀发生,本文评价侵蚀退化仅考虑旱地。

1.8 侵蚀退化分类方法

对东北黑土区划分侵蚀退化类型时,划分依据为主要侵蚀营力、土壤侵蚀强度及退化程度,其中侵蚀强度为中度及以上者归纳为重度侵蚀。黑土地侵蚀退化被划分为水蚀轻度-退化不明显、水蚀轻度-退化轻微、水蚀轻度-退化严重;水蚀重度-退化不明显、水蚀重度-退化轻微、水蚀重度-退化严重;风蚀轻度-退化不明显、风蚀轻度-退化轻微、风蚀轻度-退化严重;风蚀重度-退化不明显、风蚀重度-退化轻微、风蚀重度-退化严重;融蚀轻度-退化不明显、融蚀轻度-退化轻微、融蚀轻度-退化严重15种类型。

2 结 果

2.1 土壤退化空间分布特征

基于东北黑土区1980—2010年土壤质量变化情况对耕地土壤退化程度进行评估。针对本文构建土壤质量综合指数所包含的7个评价指标,利用两期土壤调查数据获得土壤理化性质空间分布图。参考农业农村部印发的东北区耕地质量监测指标分级标准将各土壤性质由高到低分为5级,结果如图2

所示。同一指标在两个时期分布规律较为相似,不同土壤理化性质存在一定区域差异性,但均表现出明显的退化特征。

为具体了解黑土地土壤理化性质变化,本文将2010年与1980年差值除以1980年本底值计算得到每种指标的变化幅度(表2)。土壤理化性质在两期数据中基本保持不变($\pm 5\%$)的田块面积占总耕地面积的6.4%~59.9%,其中有机质和全磷含量变化最大,其次为全氮、土体厚度与全钾含量,容重与pH在两期土壤调查中相对稳定。这与前人所报道的典型黑土地区1980—2000年之间pH变化小、磷含量变化大的结果吻合^[23]。东北黑土区有机质含量主要呈现减少趋势,近60%田块的有机质减少幅度超过25%,1/4以上田块的有机质减少幅度为5%~25%,这与Wang等^[24]报道近64%东北黑土区农田土壤有机碳含量呈负向变化的结果相似。土体厚度呈现降低的变化趋势,变化幅度大多在(-25%)~(-5)%之间,这与侵蚀导致土壤被剥离有关^[3]。容重变化则以增加为主,且增加幅度集中在5%~25%,其原因可能是机械耕作造成压实,加之水蚀退化直接导致容重增大、风蚀退化通过抬升犁底层间接影响容重^[11, 25]。黑土酸缓冲容量较高^[26],因此pH较为稳定。全氮、全磷、全钾或减少或增加且幅度较大,部分地区由于侵蚀严重养分含量会迅速下降,另一部分地区受人为影响长期施用化肥显著提升了土壤养分含量^[25]。

基于表1所列土壤质量综合指数参数,依据7项土壤理化性质指标对研究区1980年到2010年的土壤退化程度进行评估。黑土地耕地质量空间分布结果如图3所示,耕地质量呈现从中间向两边、由南向北退化程度愈发严重的趋势,其中三江平原和松嫩平原北部的土壤质量最高,辽河平原及周围山地丘陵区土壤质量较低,这与李超等^[27]对东北地区耕地土壤质量的分析结果相近。土壤退化指数的分布规律则略有不同,各省份退化程度由高到低分别为:内蒙古东四盟>黑龙江省>吉林省>辽宁省,这与前人提出典型黑土区由南向北、由西向东退化严重的演变趋势一致^[28]。值得注意的是,东北黑土区大部分耕地土壤质量退化较为明显,辽河平原质量不降反升。本文及前人研究结果均显示辽宁省有机质含量降低且土壤发生酸化^[29],但pH降低后正好处于合适水平,加之肥料持续投入带来全磷、全钾

含量提升, 土壤质量出现整体向好的趋势。相关分析显示, 土壤退化指数与1980年土壤质量综合指数的相关系数为-0.71, 表明东北黑土区土壤质量越高, 越容易发生土壤退化。

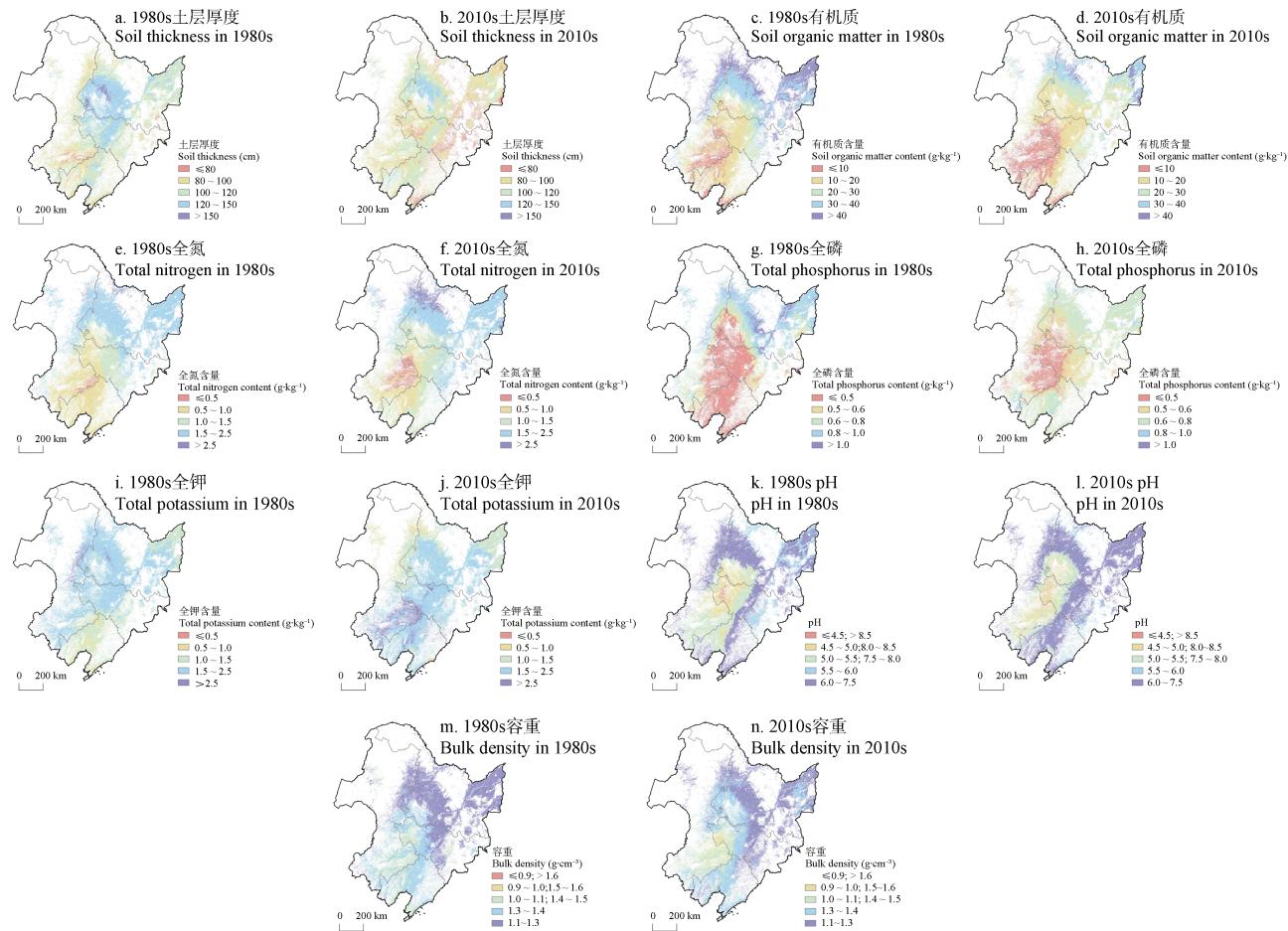


图2 东北黑土区1980年及2010年耕地土壤性质空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of cropland soil properties in the black soil region of Northeast China between 1980 and 2010

表2 1980—2010年东北黑土区耕地土壤性质变化幅度

Table 2 The amount of change in the cropland soil properties in the black soil region of Northeast China from 1980 to 2010/%

| 指标 Indices | < (-25%) | (-25%) ~ (-5%) | (-5%) ~ 5% | 5%~25% | >25% |
|-------------------------|----------|----------------|------------|--------|-------|
| 土体厚度 Soil thickness | 18.65 | 54.15 | 14.36 | 11.19 | 1.64 |
| 有机质 Soil organic matter | 58.86 | 27.57 | 6.40 | 4.59 | 2.58 |
| 全氮 Total nitrogen | 11.90 | 20.53 | 19.02 | 25.84 | 22.70 |
| 全磷 Total phosphorus | 18.77 | 29.54 | 6.34 | 12.85 | 32.50 |
| 全钾 Total potassium | 10.05 | 27.75 | 21.88 | 22.37 | 17.94 |
| pH | 0.05 | 18.69 | 59.94 | 21.32 | 0.003 |
| 容重 Bulk density | 0.002 | 10.16 | 51.77 | 37.93 | 0.15 |

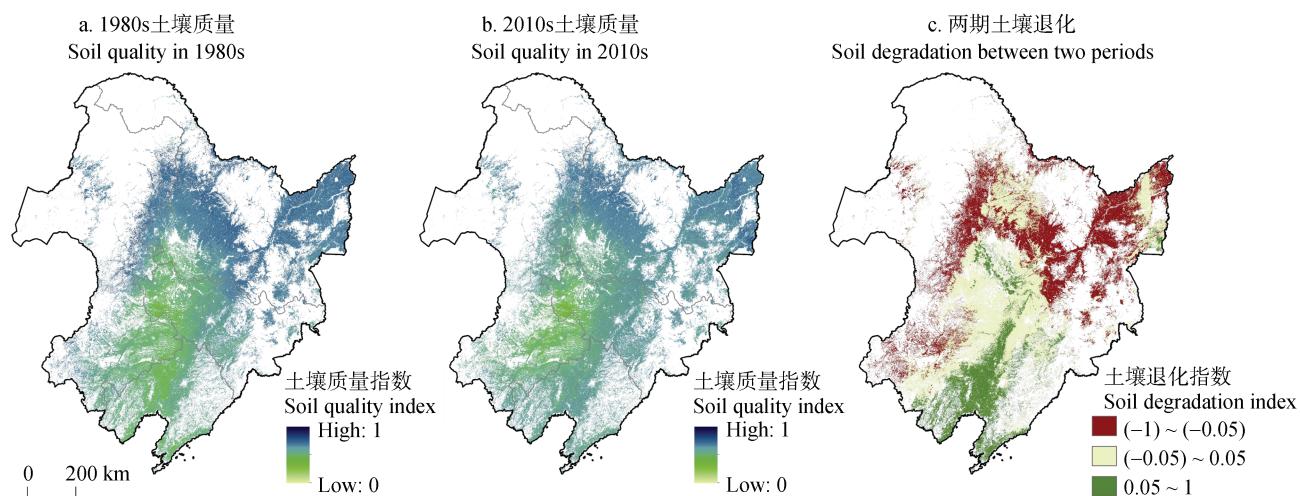


图 3 东北黑土区耕地土壤质量指数及土壤退化指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil quality index and soil degradation index in cropland of the black soil region of Northeast China

管三江平原到兴凯湖地区耕地垦殖率较高,但由于该地区地形平坦、大部分为水田,并无明显侵蚀发生,土壤侵蚀主要集中在坡度较缓的漫川漫岗区和坡度较陡的低山丘陵区。黑土地土壤侵蚀类型以水蚀为主,分布在松嫩平原,大、小兴安岭及长白山脉向平原过渡区,风蚀主要发生在松辽平原西部、科尔沁沙地与呼伦贝尔高原,发生冻融侵蚀的耕地较少,集中分布于大兴安岭西部山地(图4)。东北黑土区存在多种复合侵蚀类型,多营力发生时间更替和空间叠加共同驱动坡耕地的侵蚀过程^[30],尽管

已形成部分研究成果^[31],但目前缺乏成熟的复合侵蚀空间分布研究,因此本文仍以主导营力(水力、风力、冻融)划分侵蚀类型。

从不同侵蚀强度耕地面积统计结果来看,黑龙江省和内蒙古东四盟耕地侵蚀面积远大于吉林省和辽宁省(表3)。其中,黑龙江省水力侵蚀问题突出,占耕地侵蚀面积的近九成,侵蚀强度以轻度水蚀为主(59%),兼有部分中度水蚀(28%)和中度风蚀(7%);吉林省水力侵蚀和风力侵蚀各占约1/2,风力侵蚀比例为四省之最,侵蚀强度以水蚀轻度

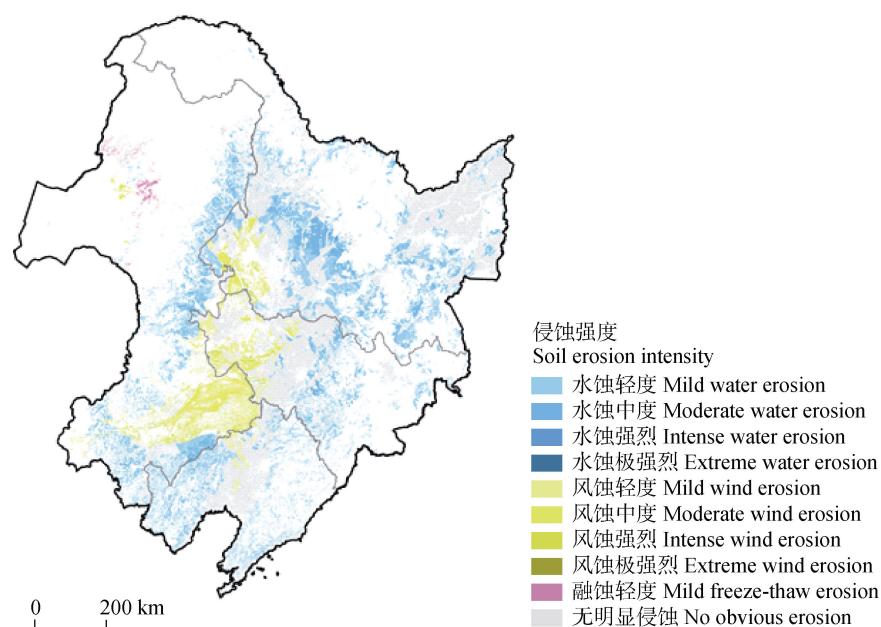


图 4 东北黑土区耕地侵蚀强度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil erosion intensity in cropland of the black soil region of Northeast China

表3 东北黑土区各省份耕地侵蚀强度面积统计

Table 3 Area statistics of soil erosion intensity in cropland of black soil region of Northeast China at provincial level/ (10^4 km^2)

| 省份 Province | 耕地侵 蚀面积 Area of cropland erosion | 侵蚀类型 Soil erosion types | | | | | | | | | |
|------------------|--|----------------------------|----------------|---------------|----------------|--------------------|----------------|---------------|----------------|-----------------------------|--|
| | | 水蚀 Water erosion | | | | 风蚀 Wind erosion | | | | 冻融侵蚀 Freeze-thaw erosion | |
| | | 轻度 Mild | 中度 Moderate | 强烈 Intense | 极强烈 Extreme | 轻度 Mild | 中度 Moderate | 强烈 Intense | 极强烈 Extreme | 轻度 Mild | |
| | | Mild | Moderate | Intense | Extreme | Mild | Moderate | Intense | Extreme | Mild | |
| 黑龙江 ^① | 5.47 | 3.20 | 1.52 | 0.13 | 0.00 | 0.13 | 0.38 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | |
| 吉林 ^② | 1.94 | 0.61 | 0.31 | 0.09 | 0.00 | 0.55 | 0.25 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | |
| 辽宁 ^③ | 1.67 | 1.11 | 0.26 | 0.03 | 0.00 | 0.20 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | |
| 内蒙古 ^④ | 4.43 | 1.50 | 0.84 | 0.06 | 0.00 | 0.80 | 0.86 | 0.16 | 0.03 | 0.18 | |
| 合计 Total | 13.51 | 6.42 | 2.93 | 0.32 | 0.00 | 1.67 | 1.54 | 0.41 | 0.04 | 0.18 | |

① Heilongjiang, ② Jilin, ③ Liaoning, ④ 内蒙古自治区仅包含呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市东四盟在内 The Inner Mongolia Autonomous Region only includes the Hulunbeier City, Hinggan League, Tongliao City and Chifeng City.

(31%)、水蚀中度(16%)和风蚀轻度(28%)、风蚀中度(13%)为主；辽宁省以水力侵蚀为主，其中轻度水蚀占66%，中度水蚀占16%，并存在少量轻度风蚀耕地(12%)；内蒙古东四盟水蚀、风蚀及冻融侵蚀均有分布，侵蚀强度以轻度(56%)和中度(38%)为主，黑土区几乎全部冻融侵蚀面积存在于内蒙古地区。由于强烈及以上侵蚀强度面积较少，因此本文仅区分了轻度及重度(中度及以上侵蚀强度)两种等级进一步划分侵蚀退化分区。

2.3 东北侵蚀退化类型空间分布

东北黑土区侵蚀退化类型通过叠加土壤侵蚀强度(水蚀轻度、水蚀重度、风蚀轻度、风蚀重度、融蚀轻度)和土壤退化程度(不明显、轻微、严重)所确定，共划分为15种类型。由不同类型空间分布图看出(图5)，东北黑土区侵蚀退化以水蚀轻度-退化严重类型为主，占侵蚀耕地面积的23.7%，分布在大兴安岭东部、小兴安岭北部、松嫩平原南部及长白山北部；其次为水蚀轻度-退化轻微、水蚀重度-退化严重和风蚀重度-退化轻微类型，面积占比分别为16.4%、14.1%和10.1%，分布在大兴安岭南侧、松嫩平原北部与小兴安岭交汇处至长白山沿线，大兴安岭东北侧、小兴安岭与松嫩平原及长白山交界处，松辽平原中部及科尔沁沙地；部分田块

属于风蚀轻度-退化轻微(8.3%)、水蚀轻度-退化不明显(7.4%)和水蚀重度-退化轻微类型(6.8%)，同时有少量田块为风蚀重度-退化严重(3.2%)、水蚀重度-退化不明显(3.1%)、风蚀轻度-退化严重(2.3%)、风蚀轻度-退化不明显(1.9%)和风蚀重度-退化不明显(1.3%)类型，3种冻融侵蚀退化类型的面积占比仅为1.4%，分布于大兴安岭西部山麓。综合东北黑土区15种耕地侵蚀退化类型的空间分布，如图6所示。

东北黑土地侵蚀类型多样且造成的退化程度不一，在相同侵蚀类型下不同侵蚀强度具有相似的退化程度(图7)。当存在水蚀轻度和水蚀重度时，耕地退化面积均随退化程度变强而增多。相较于无明显侵蚀耕地，退化不明显和退化轻微耕地的面积占比降低，退化严重的面积占比升高，表明水蚀加剧了耕地退化程度。发生风蚀轻度和风蚀重度时，退化轻微的耕地面积突出，退化不明显和退化严重的耕地面积占比均降低，表明风蚀使得耕地退化向轻微程度集中。发生融蚀轻度退化的耕地面积与无明显侵蚀耕地的规律相似，退化轻微和退化严重的耕地面积较多，退化不明显耕地最少。总体而言，侵蚀类型而非侵蚀强度是影响黑土地退化程度分异的主要因素，其中水蚀导致耕地退化最为严重。

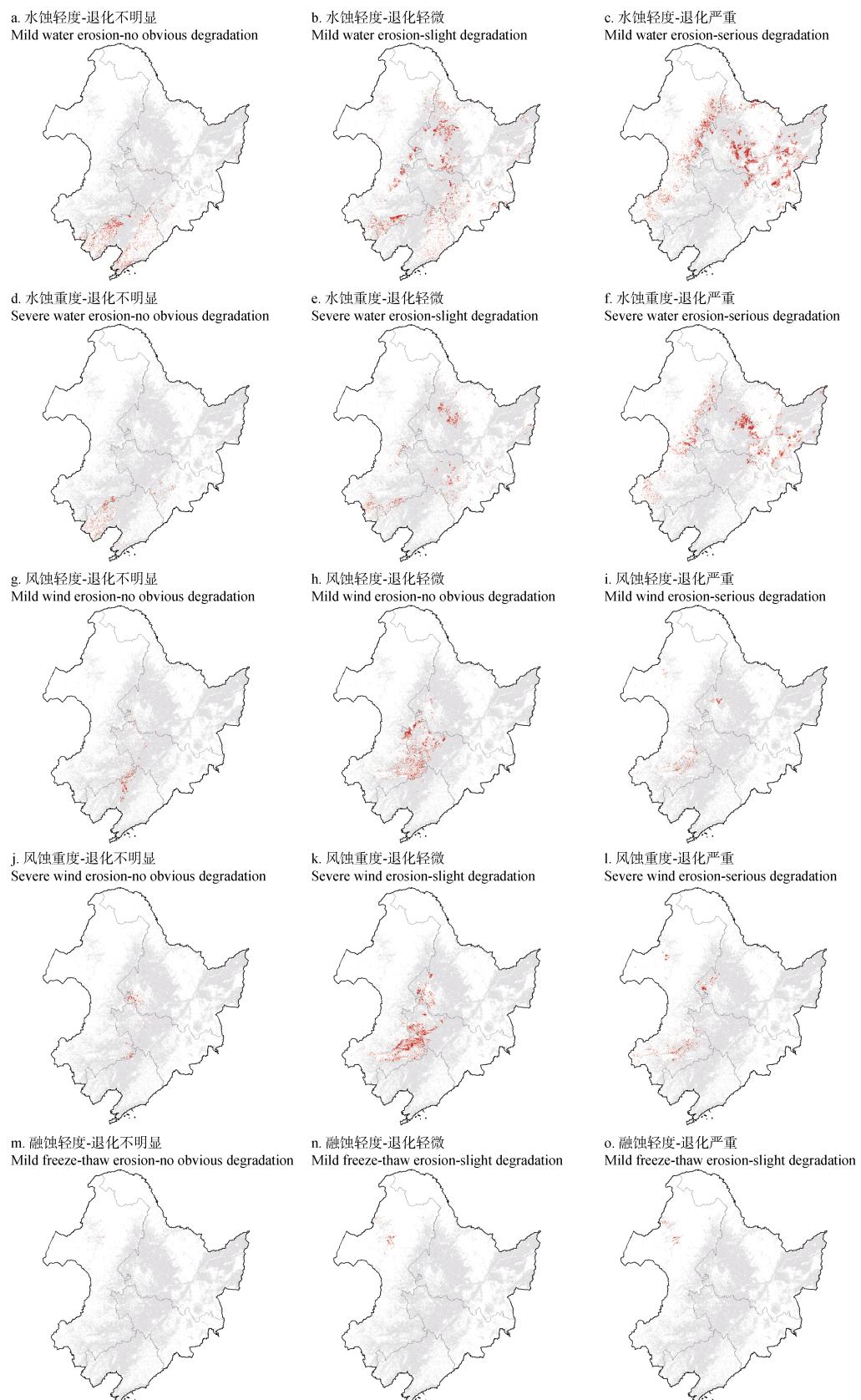


图 5 东北黑土区 15 种耕地侵蚀退化类型空间分布

Fig. 5 Fifteen soil erosion-degradation types distributions of cropland in the black soil region of Northeast China

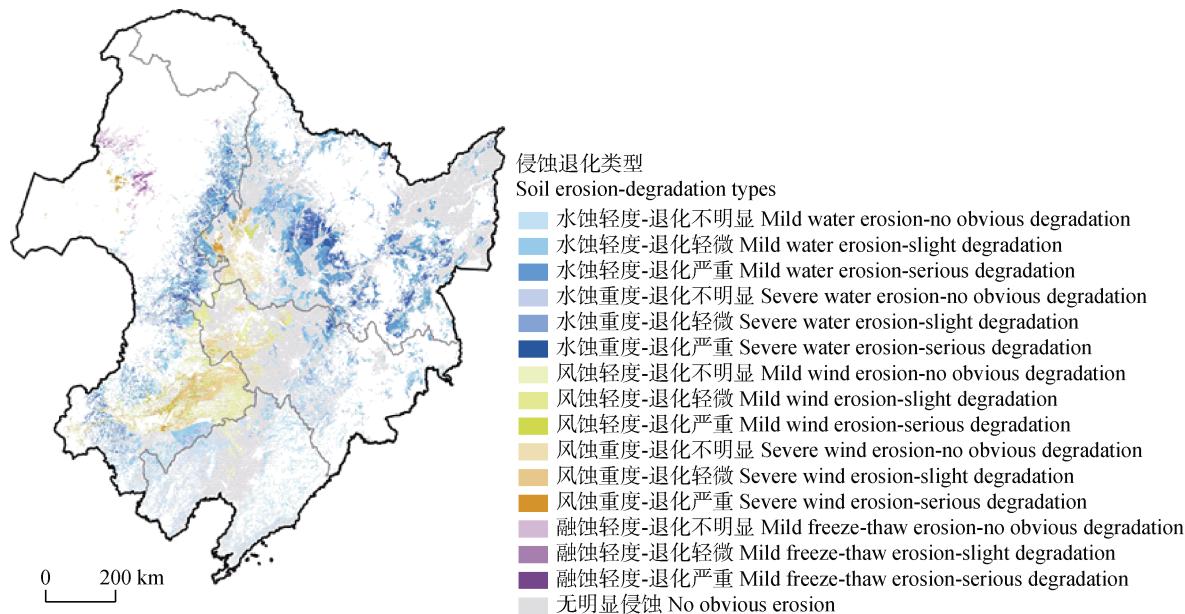


图 6 东北黑土区耕地侵蚀退化类型空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of soil erosion-degradation types in cropland of the black soil region of Northeast China

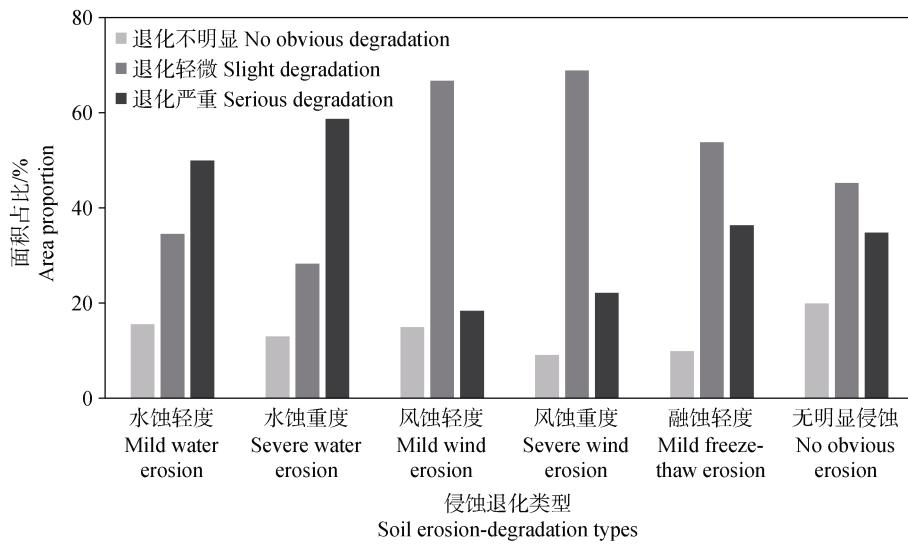


图 7 东北黑土区不同侵蚀退化类型下的耕地面积占比

Fig. 7 Area proportion of croplands in different soil erosion-degradation types of the black soil region of Northeast China

3 讨 论

3.1 耕地质量退化的空间分异

侵蚀并非造成耕地质量退化的唯一原因。即使无明显侵蚀发生，黑土区仍存在近 1/2 耕地退化轻微，1/3 耕地退化严重（图 7）。这部分耕地退化可能与土地利用方式改变及耕作活动等因素有关。土地利用方式改变是导致土壤退化的重要原因，比如

三江平原大部分耕地土壤质量下降严重，但并不是由侵蚀所造成的，而是与 1950 年以后大规模沼泽湿地被开垦为耕地有关^[32]。耕作活动通过降低土壤团聚体稳定性导致土壤退化，侵蚀则通过减少有机质含量和增加土壤可蚀性引发退化过程^[33]。

由 2.1 结果可知，东北黑土区土壤质量越高，土壤退化程度越严重。进一步分析各个侵蚀退化类型下原本耕地质量平均值。从表 4 来看，1980 年冻

融侵蚀类型的土壤质量最高，其次为发生水蚀的地区，风蚀地区的土壤质量最低。一般而言，侵蚀重度地区较侵蚀轻度地区的土壤质量更高；退化程度

严重地区的土壤质量大于退化轻微地区，大于退化不明显地区。由此可见，耕地质量越高，侵蚀退化越严重，可能与这些地区耕地利用强度更大有关。

表 4 东北黑土区耕地侵蚀退化类型 1980 年的土壤质量指数统计

Table 4 Soil quality index in 1980 of different soil erosion-degradation types in the black soil region of Northeast China

| 侵蚀退化类型 Soil erosion-degradation types | 轻度-退化不明显 Mild-no obvious degradation | 轻度-退化轻微 Mild-slight degradation | 轻度-退化严重 Mild-serious degradation | 重度-退化不明显 Severe-no obvious degradation | 重度-退化轻微 Severe-slight degradation | 重度-退化严重 Severe-serious degradation |
|--|--|---------------------------------------|--|--|---|--|
| 水力侵蚀 ^① | 0.2444 | 0.3626 | 0.4940 | 0.2409 | 0.3868 | 0.5073 |
| 风力侵蚀 ^② | 0.1940 | 0.2052 | 0.2864 | 0.2013 | 0.2108 | 0.3256 |
| 冻融侵蚀 ^③ | 0.4505 | 0.4862 | 0.5073 | — | — | — |

① Water erosion, ② Wind erosion, ③ Freeze-thaw erosion

3.2 影响土壤侵蚀退化的因素

造成东北地区土壤发生侵蚀退化的因素有很多。从自然因素来看，坡度是影响侵蚀退化的先决条件^[21, 34]，侵蚀尤其是沟蚀作用会进一步加大地面坡度和高差。其次，东北气候呈现暖干化趋势，前人提出气候变化会加速黑土侵蚀退化^[35]，但有学者通过量化分析发现，气候变化对于农田侵蚀加剧的影响较小，人为活动是引发坡耕地侵蚀加剧的主要因素^[36]。耕作措施、种植制度等人为因素显著影响侵蚀强度并与土壤质量退化密切相关^[31]。开垦年限是影响侵蚀退化的一个重要因素^[37]，与土壤结构退化密切相关^[38]。此外，黑土地一部分耕地质量不降反升，可能与 2000 年以后辽宁省等地大量的施肥投入有关^[39]。

东北黑土区发展了一系列侵蚀退化阻控技术，包括保护性耕作、优化种植方式、增加覆盖作物、粮草轮作和侵蚀沟复垦等在内的措施，陆续实施于 2003 年以后。本文研究时间尺度为 1980 年到 2010 年左右，未能充分反映近年来黑土地保护利用的成效。有学者研究发现，2008—2018 年间东北平原典型黑土区中西部和西北部地带的耕地质量上升明显，南部和东北部耕地质量有所下降，其空间差异与区域内土地利用强度及黑土地保护治理措施有关^[40]。侵蚀退化是随时间变化的动态过程^[41]，目前黑土地保护修复技术应用效果初显^[42]，不同侵蚀退化类型的长期变化趋势有待深入研究。

3.3 侵蚀退化评价指标与方法展望

由于缺少采样范围全面、长历时可对比的土壤生物数据，本文未能将土壤酶及微生物等相关指标纳入土壤退化评价体系。采用文献研究和以空代时的方法，作者收集了中英文文献及学位论文中有关黑土性质变异的部分数据，通过加入对土壤生物性质的考虑，重新构建了包含生物指标在内的土壤质量综合指数，分别增加包括土壤酶活性^[43-44]、土壤微生物数量等指标^[45-46]。假设各指标权重一致，从包含和未包含生物指标两方面开展土壤质量评价。结果如图 8 所示，两种土壤质量综合指数之间存在高度相关性，决定系数 R^2 分别为 0.96、0.68、0.83 和 0.70。由此可见，基于土壤理化指标所构建的区域尺度黑土质量评价结果具有一定的可信性，但仍需关注与土壤养分循环密切相关的土壤酶及微生物指标。

随着今后新的野外调查与监测工作展开，尤其是包括生物调查在内的第三次土壤普查数据的获取，可以为更长时期及更全面的黑土地侵蚀退化评价与预测提供可能。与此同时，基于遥感技术在耕地质量相关指标定量反演方面的积累，为快速、准确获得黑土区大范围耕地质量信息提供了重要手段^[47]。由于自然驱动力在短时间内相对稳定，后续研究还需进一步关注人为活动与自然因素的交互作用如何影响侵蚀退化的变化趋势，比如量化不同条件下耕作活动加速土壤侵蚀进而造成耕地质量退化的贡献等。

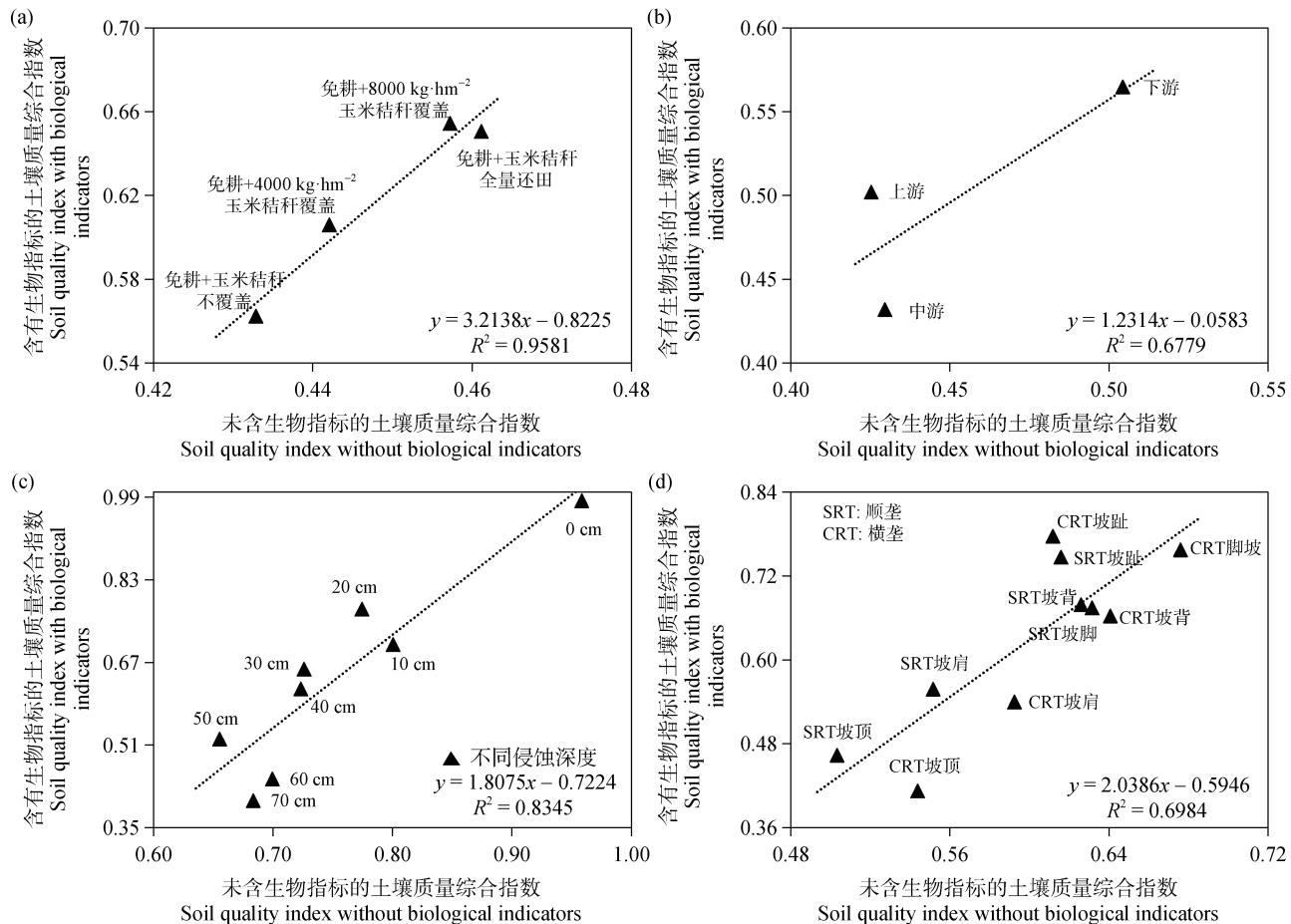


图 8 基于文献收集的两种土壤质量综合指数相关性

Fig. 8 Relationships between two soil quality indexes based on literature

4 结 论

1980—2010 年间,东北黑土区土体厚度和有机质含量出现降低的变化趋势,容重变化以增加为主,pH 较为稳定,全氮、全磷、全钾或减少或增加且幅度较大。耕地质量呈现从中间向两边、由南向北退化程度愈发严重的趋势。土壤质量退化程度从高到低分别为内蒙古东四盟、黑龙江省、吉林省和辽宁省。黑土退化程度与土壤本身的质量高低有关($r = -0.71$)。黑土地土壤侵蚀类型以水蚀为主,发生轻度水蚀的耕地面积最大(48%),其次为中度水蚀(22%),而轻度风蚀及中度风蚀面积接近(11%~12%),发生冻融侵蚀的耕地较少(1.4%)。其中,黑龙江省和辽宁省水蚀问题突出,内蒙古东四盟和吉林省水蚀和风蚀均占有一定比例,黑土区几乎全部冻融侵蚀耕地存在于内蒙古地区。黑土地侵蚀退化类型以水蚀轻度-退化严重为主(24%),其次为

水蚀轻度-退化轻微(16%)、水蚀重度-退化严重(14%)和风蚀重度-退化轻微类型(10%)。侵蚀营力是影响黑土地退化程度分异的主要因素,其中水蚀导致的耕地退化最为严重。包括坡度和气候在内的自然因素及耕作活动、保护利用技术等人为因素与侵蚀退化分异密切相关。在后续评价工作中,还需关注土壤酶及微生物等重要指标。

参考文献 (References)

- [1] Liu X B, Lee Burras C, Kravchenko Y S, et al. Overview of Mollisols in the world: Distribution, land use and management[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92 (3): 383—402.
- [2] Chinese Academy of Sciences. White paper on Northeast Blackland (2020) [R/OL]. (2021-07-09) [2024-01-18]. https://www.cas.cn/yw/202107/t20210709_4797892.shtml. [中国科学院. 东北黑土地白皮书 (2020) [R/OL]. (2021-07-09) [2024-01-18]. [https://www.cas.cn/yw/202107/t20210709_4797892.shtml.\]](https://www.cas.cn/yw/202107/t20210709_4797892.shtml)

- [3] 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. [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.]
- [4] Yang W G, Zheng F L, Han Y, et al. Investigating spatial distribution of soil quality index and its impacts on corn yield in a cultivated catchment of the Chinese Mollisol region[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80 (2): 317—327.
- [5] Wang S H, Xu X L, Cao W. 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. [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.]
- [6] Zhai Y Y, Fang H Y. Spatiotemporal variations of freeze-thaw erosion risk during 1991–2020 in the black soil region, northeastern China[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110149.
- [7] Zhang Y. Study on the dynamic change of cultivated land quantity and quality in three typical black soil areas of Northeast China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. [张滢. 东北三省典型黑土区耕地数量与质量动态变化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.]
- [8] Zhang J Q, Zheng F L, Li Z, et al. A novel optimal data set approach for erosion - impacted soil quality assessments - A case - study of an agricultural catchment in the Chernozem region of Northeast China[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(7): 1062—1075.
- [9] Mo S H. Assessing impacts of soil erosion on soil quality in sloping farmland of Chinese Mollisol region[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2023. [莫帅豪. 典型东北黑土区农地侵蚀对土壤质量的影响评价[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2023.]
- [10] Wang S C, Wang Z Q, Heinonsalo J, et al. Soil organic carbon stocks and dynamics in a mollisol region: A 1980s–2010s study[J]. Science of the Total Environment, 2022, 807: 150910.
- [11] Huang Y T, Chen J X, Gao Y H, et al. Effects of long-term tillage on hydraulic properties of typical black soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (4): 998—1008. [黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淏, 等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 998—1008.]
- [12] Wan W, Liu Z, Li B G, et al. Evaluating soil erosion by introducing crop residue cover and anthropogenic disturbance intensity into cropland C-factor calculation: Novel estimations from a cropland-dominant region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 219: 105343.
- [13] Sun H M, Yang Z, Li X M, et al. Assessment of the cultivated land quality in the black soil region of Northeast China based on the field scale[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195 (12): 1508.
- [14] Xu W X, Yang X K, Cui B, et al. Analysis of the soil thickness and the degradation degree of the typical slope farmland in the black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19 (3): 28—36. [许文旭, 杨献坤, 崔斌, 等. 东北黑土区典型坡耕地土层厚度及退化程度分析[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19 (3): 28—36.]
- [15] Meng K, Liu Y J. Analysis on the retrogressive stages and intensity of Terra near[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2008, 24 (4): 476—479, 484. [孟凯, 刘月杰. 黑土退化阶段与强度分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24 (4): 476—479, 484.]
- [16] Shi D M, Wei Q P, Liang Y, et al. Study on degradation index system of eroded soils in Southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14 (3): 1—9. [史德明, 韦启潘, 梁音, 等. 中国南方侵蚀土壤退化指标体系研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14 (3): 1—9.]
- [17] Zhang J Z, Li Y Z, Li Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 603—616. [张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 603—616.]
- [18] Jiang F H, Qian Y Q, Guo Z C, et al. Evaluating the regional suitability of conservation tillage and deep tillage based on crop yield in the black soil of Northeast China: A meta-analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (4): 935—952. [蒋发辉, 钱泳其, 郭自春, 等. 基于Meta分析评价东北黑土地保护性耕作与深耕的区域适宜性: 以作物产量为例[J]. 土壤学报, 2022, 59 (4): 935—952.]
- [19] Wang C S, Zhang G H, Chen S Q, et al. Effect of straw incorporation on controlling runoff and soil erosion in cropland with different land degradation degrees[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35 (2): 717—731.
- [20] Zhang Q, Qin W, Cao W H, et al. Response of erosion reduction effect of typical soil and water conservation measures in cropland to rainfall and slope gradient changes and their applicable range in the Chinese Mollisols Region, Northeast China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11 (2): 251—262.
- [21] Dai Z S, Zhang Y, Wei Y J, et al. Impacts of long-term organic manure inputs on cultivated soils with various degradation degrees[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 236: 105950.

- [22] Jiang B, Wang S T, Sun Z B, et al. Evaluation of cultivated land soil fertility based on membership function and principal component analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39 (2): 22—27. [姜冰, 王松涛, 孙增兵, 等. 基于隶属度函数和主成分分析的耕地土壤肥力评价[J]. 中国农学通报, 2023, 39 (2): 22—27.]
- [23] Wang J K, Li S Y, Zhang X D, et al. Spatial and temporal variability of soil quality in typical black soil area in Northeast China in 20 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15 (1): 19—24. [汪景宽, 李双异, 张旭东, 等. 20年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15 (1): 19—24.]
- [24] Wang X, Li S J, Wang L P, et al. Effects of cropland reclamation on soil organic carbon in China's black soil region over the past 35 years[J]. Global Change Biology, 2023, 29 (18): 5460—5477.
- [25] Chen P. Monitoring and evaluation of black soil deterioration in Jilin Province based on the 3S technology-A case of Dehui City[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2008. [陈鹏. 基于3S吉林省黑土退化监测与评价——以德惠市为例[D]. 长春: 东北师范大学, 2008.]
- [26] Meng H Q, Liu J, Xu M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (6): 1109—1116. [孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的pH演变[J]. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1109—1116.]
- [27] Li C, Zhao Y, Yang C C, et al. Spatial distribution characteristics of cultivated land soil conditions in Northeast China based on cultivated land resource quality classification[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55 (3): 601—609. [李超, 赵洋, 杨翠翠, 等. 基于耕地资源质量分类成果的东北地区耕地土壤条件空间分布特征[J]. 土壤通报, 2024, 55 (3): 601—609.]
- [28] Zhang S H, Sun L, Hakim J A, et al. Evaluation of the degradation degree of sloping cropland in typical black soil region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29 (2): 1—6. [张守昊, 孙蕾, Jamshidi Abdul Hakim, 等. 典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价[J]. 水土保持研究, 2022, 29 (2): 1—6.]
- [29] Bai S B, Pei J B, Li S Y, et al. Temporal and spatial dynamics of soil organic matter and pH in cultivated land of Liaoning Province during the past 30 years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47 (3): 636—644. [白树彬, 裴久渤, 李双异, 等. 30年来辽宁省耕地土壤有机质与pH时空动态变化[J]. 土壤通报, 2016, 47 (3): 636—644.]
- [30] Zheng F L, Zhang J Q, Liu G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39 (4): 314—319. [郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J]. 水土保持通报, 2019, 39 (4): 314—319.]
- [31] 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. [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.]
- [32] Song K S, Liu D W, Wang Z M, et al. Land use change in Sanjiang Plain and its driving forces analysis since 1954[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63 (1): 93—104. [宋开山, 刘殿伟, 王宗明, 等. 1954年以来三江平原土地利用变化及驱动力[J]. 地理学报, 2008, 63 (1): 93—104.]
- [33] Ma R, Tian Z Y, Zhao Y, et al. Response of soil quality degradation to cultivation and soil erosion: A case study in a Mollisol region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 242: 106159.
- [34] Zhang S H, Sun L, Jamshidi A H, et al. Status analysis of sloping cropland degradation in the black soil region of eastern Inner Mongolia [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23 (1): 140—149. [张守昊, 孙蕾, Jamshidi A H, 等. 蒙东黑土区坡耕地退化现状分析[J]. 中国水土保持科学, 2025, 23 (1): 140—149.]
- [35] Jia W X, Jiang Q G, Wang D Y. Analysis on the forms, controlling factors and evolution trends of black soils degradation in Northeastern China[J]. Hans Journal of Soil Science, 2016, 4 (4): 37—42. [贾维馨, 姜琦刚, 王冬艳. 中国东北黑土退化形式、自然控制因素及演变趋势[J]. 土壤科学, 2016, 4 (4): 37—42.]
- [36] Tang Q, Hua L, Cao Y F, et al. Human activities are the key driver of water erosion changes in northeastern China[J]. Land Degradation & Development, 2023, 35 (1): 62—75.
- [37] Han X Z, Zou W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (6): 1341—1358. [韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58 (6): 1341—1358.]
- [38] Peng J, Yang Q S, Zhang C Y, et al. Aggregate pore structure, stability characteristics, and biochemical properties induced by different cultivation durations in the Mollisol region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 233: 105797.
- [39] Pan D, Guo Q L, Kong F B. Spatial correlation pattern analysis of overuse fertilization about major grain crops in China from 2002 to 2015[J]. Journal of China

- Agricultural University, 2019, 24 (4): 187—201. [潘丹, 郭巧苓, 孔凡斌. 2002—2015年中国主要粮食作物过量施肥程度的空间关联格局分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24 (4): 187—201.]
- [40] Yao D H, Pei J B, Wang J K. Temporal-spatial changes in cultivated land quality in a black soil region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28 (1): 104—114. [姚东恒, 裴久渤, 汪景宽. 东北典型黑土区耕地质量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28 (1): 104—114.]
- [41] Wang S H, Xu X L, Huang L. Spatial and temporal variability of soil erosion in Northeast China from 2000 to 2020[J]. Remote Sensing, 2022, 15 (1): 225.
- [42] Lu C Y, Luo X W, Li H W, et al. Progress and suggestions of conservation tillage in China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26 (2): 103—112. [卢彩云, 罗锡文, 李洪文, 等. 我国保护性耕作的发展与政策建议[J]. 中国工程科学, 2024, 26 (2): 103—112.]
- [43] Cai L J. Effect of long-term residue mulching on organic carbon and microbial carbon metabolism in no-tillage black soil farmland[D]. Shenyang : Shenyang Agricultural Univertisy, 2023. [蔡丽君. 稼秆长期免耕覆盖对黑土有机碳和微生物碳代谢的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.]
- [44] Li M, Li X, Shi Y, et al. Soil enzyme activity mediated organic carbon mineralization due to soil erosion in long gentle sloping farmland in the black soil region[J]. Science of the Total Environment, 2024, 929: 172417.
- [45] Mo S H, Zheng F L, Feng Z Z, et al. Effects of soil erosion and deposition on the spatial distribution of soil microbial quantity in Mollisol area of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33 (3): 685—693. [莫帅豪, 郑粉莉, 冯志珍, 等. 典型黑土区侵蚀沉积对土壤微生物数量空间分布的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33 (3): 685—693.]
- [46] Hou S, Xin M X, Wang L, et al. The effects of erosion on the microbial populations and enzyme activity in black soil of Northeastern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (6): 295—301.
- [47] Jiang Y, Wang J, Yang J W. Research progress analysis of black soil region cultivated land quality evaluation index by remote sensing[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2023, 32 (1): 1—7, 13. [姜芸, 王军, 杨继文. 基于遥感技术的黑土区耕地质量评价指标体系研究进展分析[J]. 测绘工程, 2023, 32 (1): 1—7, 13.]

(责任编辑: 檀满枝)