

2000—2024 年黑土区退化耕地识别与时空变化特征

牛佳程^{1,2} 汤怀志^{1,2} 樊德昊^{1,2} 许洪滔³ 武 珺^{1,2} 何遇山³
王志鹏^{1,2} 梁梦茵⁴

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 农业农村部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193;
3. 内蒙古自治区农田建设服务中心, 呼和浩特 010010; 4. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

摘要: 黑土区是保障国家粮食安全的基石, 由于过度利用和管护不当, 黑土区耕地产生了退化问题。受限于数据获取难、处理流程复杂等问题, 黑土区退化耕地时空变化特征尚未达成共识。本文基于 SDG15.3.1 框架, 选取土地生产力、土地覆被、土壤有机碳指标, 以 2000 年为基准期, 运用 Trends. Earth 工具系统识别并分析了 2005、2010、2015、2020、2024 年黑土区退化耕地时空变化特征, 并与黑土区退化评估相关研究进行对比验证。结果表明, 2000—2024 年, 黑土地退化耕地持续下降, 呈阶段性变化特征, 从 30.76% 降至 16.96%, 降幅达 13.80 个百分点, 区域耕地退化态势总体有所缓解, 仍有 16.96% 的耕地存在退化问题, 主要集中于松嫩平原区北部与中部、三江平原区东北部及大小兴安岭沿麓区西南部。从子指标来看, 土地生产力退化耕地占比从 19.16% 降至 4.21%, 土地覆被指标从 14.05% 降至 10.74%, 而土壤有机碳退化耕地占比从 1.44% 升至 8.85%。从退化趋势空间分布来看, 保持稳定 (53.54%) 与恢复趋势 (40.49%) 耕地占主体, 仅 5.97% 的耕地呈加剧退化趋势, 退化耕地空间分布范围趋于收敛且重心整体向西南偏移。对比验证结果表明, 识别结果与已有农田退化、土壤侵蚀、黑土层减薄及耕地质量退化研究结论基本一致, 结果具有较好可靠性。总体而言, 2000—2024 年黑土区退化问题有所缓解, 但仍有近五分之一耕地存在退化问题, 局部区域退化风险依然突出。未来应立足黑土区耕地退化区域分异特征实施差异化治理, 以保障黑土地可持续利用和粮食安全。

关键词: 退化耕地; 黑土区; 可持续发展目标; 时空变化

中图分类号: F301.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)20-0031-10 OSID: 

Identification and Spatiotemporal Variation Characteristics of Degraded Cultivated Land in Black Soil Region from 2000 to 2024

Niu Jiacheng^{1,2} Tang Huaizhi^{1,2} Fan Dehao^{1,2} Xu Hongtao³ Wu Jun^{1,2} He Yushan³
Wang Zhipeng^{1,2} Liang Mengyin⁴

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China
2. North China Key Laboratory of Cultivated Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China
3. Inner Mongolia Autonomous Region Farmland Construction Service Center, Hohhot 010010, China
4. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: As a pillar of national food security, the black soil region faces cultivated land degradation from overuse and mismanagement, yet a consensus on its spatiotemporal dynamics remains elusive due to data and methodological constraints. Based on the SDG15.3.1 framework, the land productivity, land cover, and soil organic carbon were selected as indicators, taking the year of 2000 as the baseline period, and the Trends. Earth tool was used to systematically identify and analyze the spatiotemporal variation characteristics of degraded cultivated land in the black soil region in 2005, 2010, 2015, 2020, and 2024, and comparatively validated the results against relevant studies on degradation assessment in the black soil region. The results showed that: from 2000 to 2024, the proportion of degraded cultivated land declined from 30.76% to 16.96%, representing a decrease of 13.80 percentage points, although marked stage-specific variations were observed. The overall trend of cultivated land degradation in the region was

alleviated to some extent, but 16.96% of the cultivated land still had degradation problems, mainly concentrated in the northern and central parts of the Songnen Plain, the northeastern part of the Sanjiang Plain, and the southwestern part of foothills of Greater and Lesser Khingan Mountains. From the perspective of sub-indicators, the proportion of degraded cultivated land in terms of land productivity was decreased from 19.16% to 4.21%, the proportion of degraded cultivated land in terms of land cover was decreased from 14.05% to 10.74%, and the proportion of degraded cultivated land in terms of soil organic carbon was increased from 1.44% to 8.85%. From the perspective of the spatial distribution of degradation trends, cultivated land with stable trends (53.54%) and recovery trends (40.49%) accounted for the majority, while only 5.97% of the cultivated land showed an aggravated degradation trend. The spatial distribution range of degraded cultivated land tended to converge, and the center of gravity shifted southwestward overall. Comparative validation showed that the identification results were generally consistent with previous findings on cultivated land degradation, soil erosion, black soil layer thinning, and cultivated land quality degradation, indicating good reliability. Overall, black soil degradation eased between 2000 and 2024, yet nearly one-fifth of cultivated land remained degraded with localized risks. Differentiated governance was thus required to safeguard black soil sustainability and food security.

Key words: degraded cultivated land; black soil region; sustainable development goal; spatiotemporal change

0 引言

黑土地是我国粮食安全的压舱石。黑土地主要分布在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古东四盟,总面积达 $1.24 \times 10^6 \text{ km}^2$,因肥力高、适耕性强,被誉为耕地中的“大熊猫”^[1-2]。据统计,黑土地粮食产量占全国的 1/4,商品量占全国的 1/4,调出量占全国的 1/3,为国家粮食安全做出了重要贡献^[3]。然而,在长期高强度利用下,黑土地重用轻养,耕作、轮作、施肥不合理,加之风蚀、水蚀、冻融的影响,黑土地产生了“变薄、变瘦、变硬”的退化问题,影响黑土地粮食生产与可持续利用^[4-6]。然而,由于黑土区耕地退化复杂性,退化耕地时空变化特征尚不清晰。识别并解析退化耕地时空变化特征可为退化治理提供依据,对于保障国家粮食安全具有重要意义。

已有诸多学者针对黑土地退化问题开展了研究。Li 等^[7]从全球黑土区视角总结了黑土退化现状、驱动因素及保护措施,指出土壤侵蚀和养分损失是全球黑土区面临的共性问题。田芷源等^[8]针对黑土区耕地土壤侵蚀问题,构建了土壤退化指标评价体系,解析了 1980—2010 年土壤侵蚀导致的退化耕地分布。张娜丽等^[9]以黑龙江省嫩江、海伦、宾县研究区典型坡耕地为研究对象,构建了土壤抗性指数、土壤退化指数、土壤质量指数和相对土壤质量指数,分析了坡耕地的退化状况。Tang 等^[10]梳理了黑土区耕地退化类型,针对不同类型筛选了表征指标,评价了黑土区耕地面临的退化风险。刘凯等^[11]针对黑土层厚度指标,采集 61 处典型土壤剖面,对比分析了第 2 次土壤普查以来黑土层厚度退化状

况。宋戈等^[12]基于质量与生态互馈视角,构建了耕地退化机理模型,量化分析了下辽河平原耕地退化的时空特征。王世豪等^[13]针对土壤侵蚀问题,设计了水蚀、风蚀评估算法,计算得到 2000—2020 年黑土区耕地侵蚀分布。近年来,黑土地保护与退化研究进一步拓展到退化识别算法、保护措施效应和生态价值评估等方面,相关研究从土壤理化性质、微生物过程、生态系统服务等角度,揭示了黑土地退化多维影响及保护利用重要性^[14-15]。尽管黑土区耕地退化相关研究已积累一定成果,但受限于数据获取难、处理流程复杂等现实因素,现有研究多局限于单年份数据或时间间隔过大,难以全面、准确地刻画黑土区耕地退化的动态演变特征^[16]。因此,开展长时序下黑土区退化耕地识别研究,对于系统揭示耕地退化规律具有重要现实意义。

近年来,SDG15.3.1 框架的提出为退化土地识别奠定了良好基础。2015 年 10 月《联合国防治荒漠化公约》提出了退化中性概念,将其作为可持续发展目标 (Sustainable development goal, SDG) 15.3 中的一部分。SDG15.3.1 提出,可从土地生产力、土地利用、碳储量 3 方面评估土地退化。Bari 等^[17]运用该框架评估了孟加拉国库尔纳省土地退化情况,Leginio 等^[18]在 SDG15.3.1 框架基础上进行了改进,采用年度最大 NDVI (Normalized difference vegetation index) 替代年均 NDVI 评估了意大利南部土地退化情况。胡智博等^[19]基于 SDG15.3.1 框架,运用一元线性回归与趋势分析方法,对比 2002—2008 年和 2009—2015 年典型黑土区耕地退化状况。近年来,SDG15.3.1 框架在土地退化监测

中应用不断拓展,主要体现在流程优化、内涵扩展等方面。Ghosh 等^[20] 基于 SEPAL 平台改进了 SDG15.3.1 土地退化监测流程,整合 Landsat、Sentinel-2、MODIS 等多源遥感数据开展土地生产力、土地覆被和碳储量评估,提高了不同区域退化监测结果的可比性与可推广性。Zhou 等^[21] 基于 SDG15.3.1 框架构建了可用于衡量土地退化与土地恢复的退化指数,进一步增强了框架定量表达能力。Zhang 等^[22] 则将生态韧性纳入 SDG15.3.1 框架,拓展了土地退化评价生态学内涵。总体来看,SDG15.3.1 框架正由单一的退化识别工具,逐步发展为融合多源数据、支持区域适配和综合评价的可复用监测框架。

为了获取长时序下黑土区退化耕地时空变化特征,本文以黑土区耕地为研究对象,以 2000 年为基准,基于 SDG15.3.1 框架评估 2005、2010、2015、2020、2024 年黑土区退化耕地,并分析黑土区耕地范围土地生产力、土地覆被、土壤有机碳指标时空变化特征,并将识别结果与黑土区退化评估相关研究进行对比验证。以期为黑土区退化耕地精准治理和分区管控提供依据,并为保障黑土区耕地可持续利用提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

选取我国黑土区为研究区(48°~55°N,115°~135°E),总耕地面积 $3.749\,27 \times 10^7\text{ hm}^2$,如图 1 所示(审图号:GS(2022)1873)。粮食产量占我国粮食总产量的 25%,被誉为我国粮食安全的“稳定器”和“压舱石”。黑土区三面环山,大部分山地海拔为 1 000~1 500 m,中部为东北平原,包括松嫩平原、三江平原和辽河平原。该区处于中温带,少部分在寒温带和暖温带,冬季寒冷漫长,夏季温暖而短促,年均温度为 -4~10℃。降雨集中多以暴雨形式出现,7—9 月降雨量占年降水量的 70% 左右,年平均降雨量 400~700 mm。邓小明等^[23] 根据地形地貌、水热

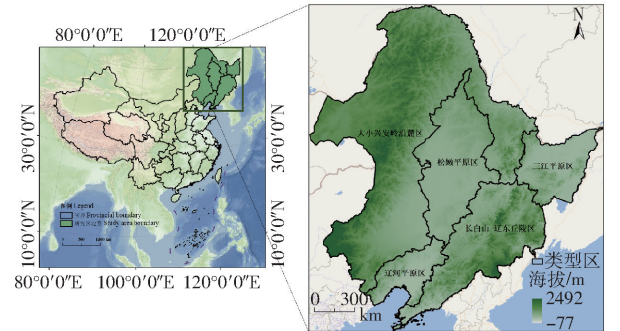


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

条件、种植制度、土壤退化问题等因素,将黑土区划分为松嫩平原区、三江平原区、辽河平原区、长白山—辽东丘陵区、大小兴安岭沿麓区 5 个类型区。

1.2 数据来源与处理

NDVI 数据来源于 MOD13Q1 数据集(<https://www.earthdata.nasa.gov>),空间分辨率为 250 m,采用 2000—2024 年年均 NDVI 参与计算。土地利用数据来源于文献[24],采用 2000、2005、2010、2015、2020、2024 年土地利用数据参与计算,数据空间分辨率为 30 m。土壤有机碳数据来源于用于陆面模拟的中国土壤数据集第二版(<https://www.tpdc.ac.cn/>),数据空间分辨率为 250 m。

以 2000 年为基准,计算 2005、2010、2015、2020、2024 年共 5 期退化结果。首先将上述数据投影定义为 WGS_1984_UTM_Zone_51N,采用最邻近法将像元统一处理为 250 m。对土地利用数据进行重分类,分为耕地、林地、草地、水体、人工地类、未利用地、湿地 7 类。在计算得到土地生产力、土地覆被、土壤有机碳、退化结果后,提取 2005、2010、2015、2020、2024 年耕地数据,将退化结果裁剪至耕地范围。

2 研究方法

2.1 黑土区土地退化识别算法

SDG15.3.1 框架明确从土地生产力、土地覆被、土壤有机碳等子指标开展土地退化评估,保护国际基金会、隆德大学与美国国家航空航天局基于该框架完善了土地退化识别算法,并研发了 Trends. Earth 评估工具^[25]。运用该工具对黑土区耕地范围内的土地生产力、土地覆被及土壤有机碳指标进行定量评估。Trends. Earth 算法如图 2(“-”表示退化,“0”表示稳定,“+”表示改善)所示。

2.1.1 子指标计算

2.1.1.1 土地生产力

从生产力趋势、生产力状态、生产力表现 3 个维度综合表征土地生产力水平,先计算 3 项子指标,再依据既定的判断规则评估土地生产力退化状况。指标含义及计算方法为:

(1)生产力趋势,表征初级生产力随时间的变化速率。通过拟合 NDVI 像元值与年份线性回归关系,选取 Mann-Kendall 非参数检验中 $p < 0.05$ 的显著变化结果为有效数据,其中趋势呈正向变化表示土地状况潜在改善,负向变化表示土地存在潜在退化趋势。

(2)生产力状态,反映初级生产力在基线期与对比期的相对变化。将基线期、对比期的 NDVI 数

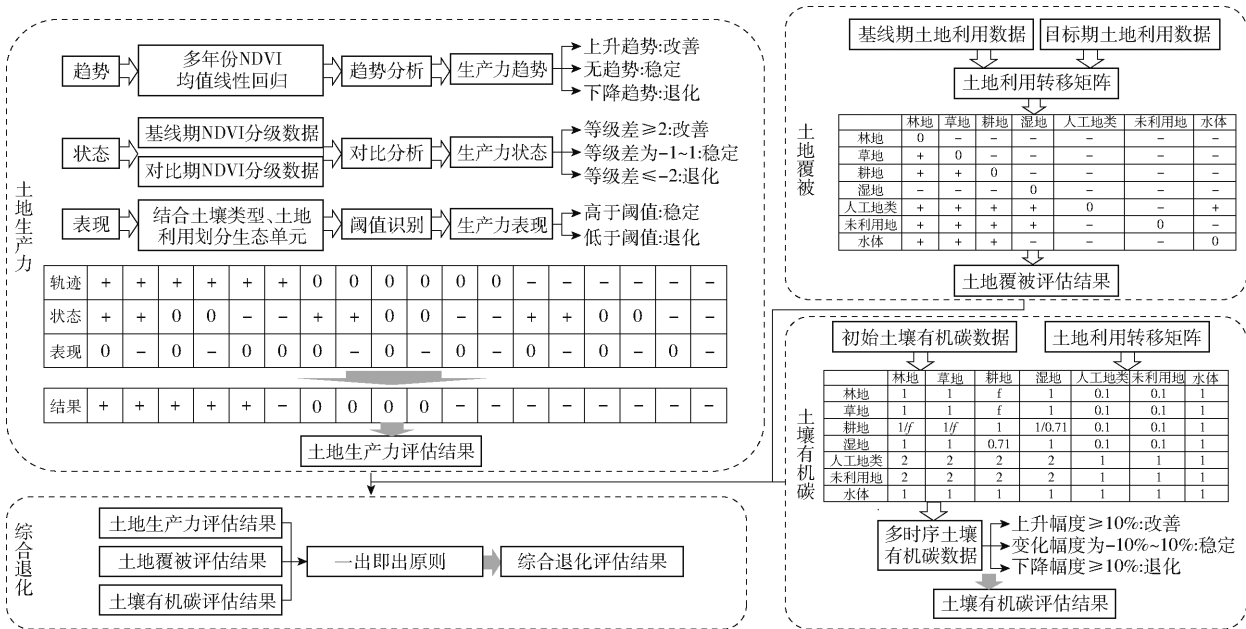


图2 Trends. Earth 退化识别算法

Fig. 2 Trends. Earth degradation identification algorithm

据各自等分为 10 个等级并做差值运算,若等级差异小于等于 -2,判定该像元初级生产力存在潜在退化;若等级差异大于等于 2,判定为潜在改善;若等级差异介于 -1~1,则判定为生产力状态稳定。

(3)生产力表现,体现初级生产力在不同空间单元频率分布特征。Trends. Earth 工具基于土地利用与土壤类型数据自动划分评价单元,以各单元内 NDVI 累计 90% 分位数作为该单元最大生产力,若某像元平均 NDVI 低于单元最大生产力的 50%,则判定该像元存在潜在退化。

基于上述方法,以 2000 年为基准,计算得到 2005、2010、2015、2020、2024 年黑土区耕地的生产力趋势、生产力状态与生产力表现数据,并依据图 2 的判定规则,完成黑土区耕地土地生产力退化状况的识别。

2.1.1.2 土地覆被

根据 2000—2024 年黑土区耕地数据变化及相关文献,定义并构建了适用于黑土区耕地覆被退化的转移矩阵(具体判定规则见图 2 中土地覆被指标相关内容),并将其嵌入 Trends. Earth 工具。以 2000 年为基准,对黑土区 2005、2010、2015、2020、2024 年的土地利用数据进行处理,最终计算得到各期黑土区耕地土地覆被退化评估结果。

2.1.1.3 土壤有机碳

由于长时序、全域覆盖的土壤有机碳实测数据难以获取,借助 Trends. Earth 工具,基于土地利用变化特征推演土壤有机碳的退化状况。具体计算流程为:以单期土壤有机碳数据为基准,先核算研究时段内土地利用变化情况,依据 Trends. Earth 工具确定

的土地利用系数(图 2)与土地利用变化数据相匹配,将匹配后土地利用系数与初始土壤有机碳数据相乘,得到土壤有机碳动态变化数据。将变化数据与初始数据对比,若土壤有机碳含量下降超过 10%,则将该区域认定为潜在退化区域;若提升 10% 以上,则判定为潜在改善区域;土壤有机碳含量变化幅度为 -10%~10%,则将该区域认定为稳定区域。

考虑土壤有机碳变化速率存在气候区分异特征,Trends. Earth 工具为不同气候区设置了差异化校正因子(f)以保障计算结果合理性,其中温带干旱区 $f=0.80$ 、温带湿润区 $f=0.69$ 、热带干旱区 $f=0.58$ 、热带湿润区 $f=0.48$ 、热带山地 $f=0.64$ 。因黑土区绝大部分区域隶属于温带湿润区,将校正因子 f 设定为 0.69,以 2000 年为基准,完成 2005、2010、2015、2020、2024 年黑土区耕地土壤有机碳退化状况定量计算。

2.1.2 耕地退化计算

基于计算得到的多期土地生产力、土地覆被、土壤有机碳退化数据,在同一期计算结果中采用一出即出原则对 3 项子指标进行综合判定。该原则下,若同一像元在土地生产力、土地覆被、土壤有机碳任一子指标中表现为退化状况,则将该像元识别为耕地潜在退化区域,基于此得到 2005、2010、2015、2020、2024 年黑土区耕地退化评估结果。

2.2 退化趋势分析

采用泰尔-森检验计算黑土区耕地退化趋势。泰尔-森检验是一种基于非参数统计理论的趋势检验方法^[26-27],用于分析变量随时间或空间变化趋势

及显著性,本质是通过计算数据点对斜率中值确定趋势线,稳健性较强,对数据中的异常值、离群点不敏感,且无需满足正态分布假设,广泛适用于地理、生态、环境等领域的时空趋势分析。采用泰尔-森检验分析多期退化结果,得到 2000—2024 年耕地退化趋势,并划分为加剧趋势、保持稳定、恢复趋势 3 类。由于退化识别结果基于 2005、2010、2015、2020、2024 年 5 个阶段性节点开展,时间序列长度相对有限,采用泰尔-森检验识别 2000—2024 年多期退化结果的总体方向性变化,作为阶段性变化和空间格局判别的辅助依据,并结合各期退化评估结果、子指标变化及重心迁移特征综合解释。

2.3 退化耕地重心分析模型

重心分析是空间统计学中用于揭示地理要素空间分布格局、集中趋势及演化规律的核心方法^[28],通过量化地理要素的空间中心位置,反映要素在研究区域内的分布均衡性与迁移特征。对于地理要素,重心可理解为在理想状态下,将研究区域内所有要素视为具有一定质量(属性权重)的质点时,能够使整个系统保持平衡的虚拟中心点。核心计算原理基于加权平均模型,计算式为

$$X_g = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i X_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \tag{1}$$

$$Y_g = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i Y_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \tag{2}$$

式中 X_i, Y_i ——第 i 个地理要素几何中心坐标
 W_i ——第 i 个要素属性权重
 n ——研究区域内地理要素总数量
 S_i ——第 i 个地理单元耕地面积

基于 Arcgis 10.7 实现重心分析,量化 2000—2024 年耕地退化重心移动轨迹。

3 研究结果

3.1 黑土区耕地退化评估结果

黑土区耕地退化评估结果时空演变特征如图 3 所示。2000—2024 年黑土区退化耕地呈阶段性变化特征,从 30.76% 降至 16.96%,表明黑土区耕地退化态势得到有效遏制。截至 2024 年,黑土区仍有 16.96% 的耕地存在退化问题,这些耕地主要集中于松嫩平原区北部和中部、三江平原区东北部、大小兴安岭沿麓区西南部。

分时段来看,2005 年退化耕地占比为研究期峰

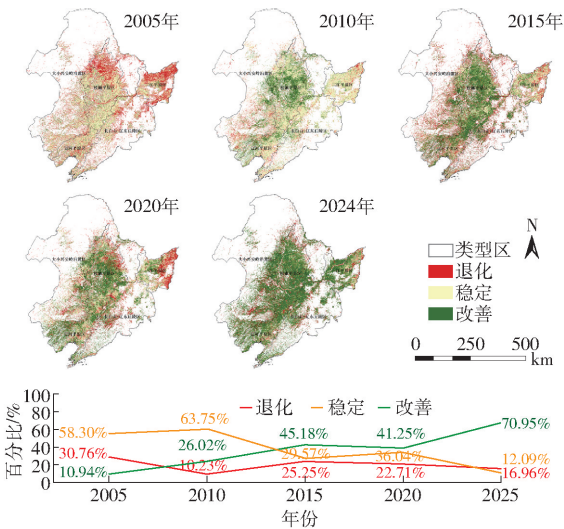


图 3 以 2000 年为基准的黑土区耕地退化评估结果
Fig. 3 Results of degradation assessment of cultivated land in black soil region based on 2000

值(30.76%),退化范围广布,主要集中于松嫩平原区北部、三江平原区北部及南部,在辽河平原区中部、长白山-辽东丘陵区西北部与大小兴安岭沿麓区西南部也有显著分布。2010 年,退化占比大幅下降至 10.23%,较 2005 年下降 20.53 个百分点,松嫩平原区北部与三江平原区南部的退化态势明显好转,退化耕地主要分布在三江平原区东北部、长白山-辽东丘陵区中部及大小兴安岭沿麓区西南部。2015 年,退化耕地占比出现显著反弹,回升至 25.25%,较 2010 年上升 15.02 个百分点,各类型区退化面积均有不同程度增加,退化耕地分布的范围更为广泛。该现象可能受到气候波动、农业生产强度提高和土地利用变化的共同影响。2010—2015 年黑土区气候波动明显,温度和降水异常会影响作物长势及 NDVI 变化,从而影响土地生产力判定^[29]。同时,肥料、农药等投入增加反映出耕地利用强度持续提高,可能加快了土壤养分消耗和有机碳损失^[30-31]。此外,2010—2015 年土地覆被退化占比由 6.67% 升至 16.47%,也在一定程度上影响了耕地退化。此后,随着国家及地方层面黑土地保护政策相继出台与落地,保护性耕作等关键技术的大力推广,耕地退化态势得到有效控制^[32]。这一政策效应在 2020 年与 2024 年评估结果中得到印证,退化占比持续降至 22.71% (较 2015 年下降 2.54 个百分点) 与 16.96% (较 2020 年下降 5.75 个百分点),松嫩平原区北部、三江平原区东部及辽河平原区中部的退化耕地面积显著缩减。

研究结果表明黑土区耕地退化具有显著的区域分异特征,主要集中在松嫩平原区、三江平原区、大小兴安岭沿麓区等地。这一现象可能是由于松嫩平

原区为典型黑土区,长期连作与粗放耕作导致耕地退化,而风蚀、冻融交替作用进一步加剧了退化^[33]。三江平原区以种植水稻为主,东北部冷湿气候易引发土壤潜育化,障碍土层的存在制约了耕地生产能力^[34]。大小兴安岭沿麓区西南部则以坡耕地为主,风蚀、水蚀作用强烈,加之化肥施用失衡,导致黑土层变薄、土壤肥力下降^[35]。

3.2 黑土区耕地退化子指标评估结果

黑土区耕地土地生产力指标评估结果如图 4 所示。2000—2024 年,该指标退化耕地占比呈波动下降变化趋势,从 19.16%降至 4.21%,表明黑土区耕地土地生产力整体实现恢复,这一结果也可从稳定、改善耕地占比的变化得到印证。具体来看,2005 年该指标退化耕地占比最高,为 19.16%,退化区域主要分布于松嫩平原区北部、三江平原区北部和东南部、辽河平原区中部、长白山—辽东丘陵区西北部。2010 年退化耕地占比大幅下降至 4.59%,较 2005 年下降 14.57 个百分点,退化耕地的分布范围显著收缩,主要分布于大小兴安岭沿麓区西南部,其他类型区退化耕地明显减少。2010 年退化耕地占比大幅下降,可能与前期干旱扰动后的生产力恢复有关。2000—2005 年黑土区农业干旱事件频发,可能影响了 2005 年部分耕地的植被生长状况和土地生产力评估结果^[36-37]。2010 年部分区域作物长势和植被覆盖有所恢复,使更多耕地像元表现为稳定或改善,进而导致土地生产力退化占比下降。2015 年,该指标的退化耕地占比略有回升,为 5.29%,较 2010 年上升 0.70 个百分点,新增退化耕地集中在三江平原区东北部和辽河平原区中部。2020 年退化耕地占比再度大幅提升至 12.80%,较 2015 年上升 7.51 个百分点,松嫩平原区东北部、三江平原区东部、长白

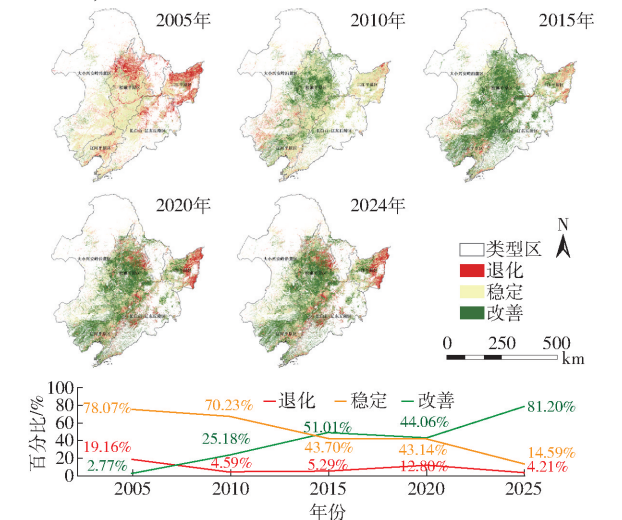


图 4 以 2000 年为基准的黑土区耕地土地生产力评估结果
Fig. 4 Evaluation results of land productivity assessment of cultivated land in black soil region based on 2000

山—辽东丘陵区成为新增退化耕地的主要分布区,辽河平原区中部、大小兴安岭沿麓区西南部也有少量分布。2024 年退化耕地占比呈显著下降趋势,降至 4.21%,较 2020 年下降 8.59 个百分点,松嫩平原区东北部、三江平原区东部的退化耕地大幅减少,此时退化耕地主要分布于松嫩平原区南部、三江平原区东北部、辽河平原区中部,长白山—辽东丘陵区西北部、大小兴安岭沿麓区西南部仍有少量分布。

从土地覆被指标看,2000—2024 年黑土区耕地退化占比无明显规律性变化趋势,呈小幅下降态势,从 14.05%下降至 10.74%。该指标退化与改善的耕地占比均在 20% 左右。耕地覆被状态以稳定为主,且退化耕地无明显空间集聚特征,这可能与黑土区土地管控政策实施、人口流动与土地流转等因素相关。具体来看,在 2000—2024 年各时期内,土地覆被指标退化耕地占比分别为 14.05%、6.67%、16.47%、9.45%、10.74%,各时段占比变幅较大(图 5)。其中,2010 年退化耕地占比较 2005 年下降 7.38 个百分点;2015 年占比大幅回升 9.80 个百分点,达到研究期内最高值;2020 年占比再次下降 7.02 个百分点,2024 年则小幅回升 1.29 个百分点。空间分布上,该指标退化耕地在黑土区零散分布。

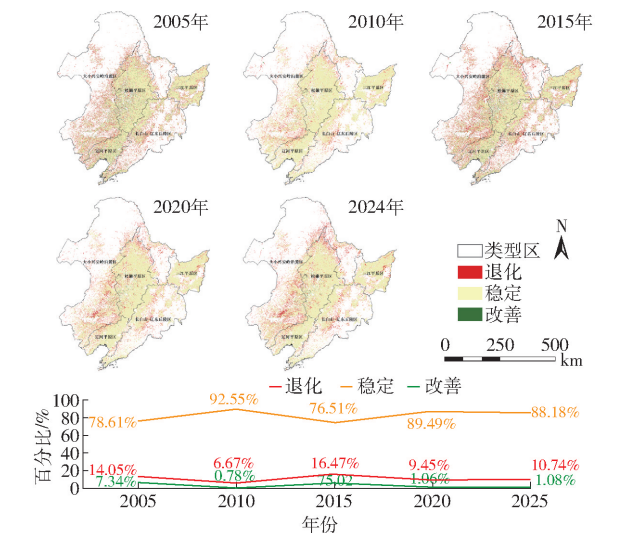


图 5 以 2000 年为基准的黑土区耕地土地覆被评估结果
Fig. 5 Evaluation results of land cover assessment of cultivated land in black soil region based on 2000

2000—2024 年,黑土区耕地土壤有机碳指标退化耕地占比持续上升(图 6),从 1.44% 上升至 8.85%,该指标下的退化耕地主要分布于松嫩平原区东北部、长白山—辽东丘陵区中部及大小兴安岭沿麓区西南部。具体来看,2005、2010 年该指标退化耕地占比均处于较低水平,分别为 1.44%、0.77%。2015 年占比大幅提升至 10.32%,较 2010 年提升 9.55 个百分点,退化区域集中在松嫩平原区东北

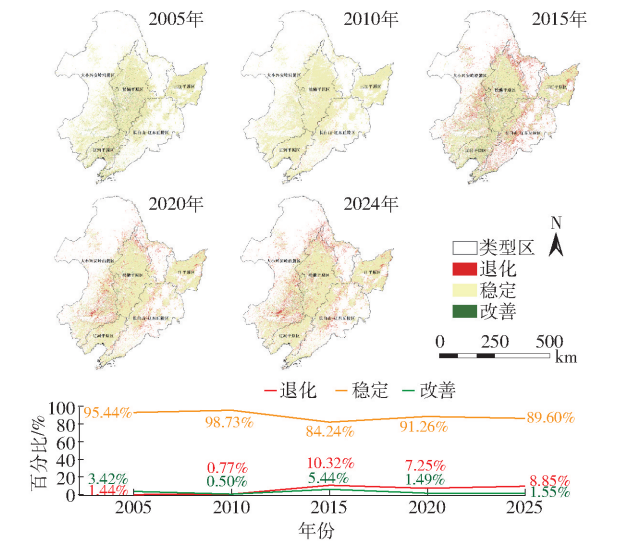


图 6 以 2000 年为基准的黑土区耕地土壤有机碳评估结果
Fig. 6 Evaluation results of soil organic carbon in cultivated land in black soil region based on 2000

部、长白山-辽东丘陵区中部、大小兴安岭沿麓区西南部,三江平原区、辽河平原区仅有少量分布。出现这一问题的原因,可能是由于黑土区耕地利用强度的增加,2010—2015 年黑土区玉米、水稻产量增长近 2 倍,消耗的土壤有机碳显著增加^[38]。2020 年退化耕地占比略下降,降至 7.25%,较 2015 年下降 3.07 个百分点,松嫩平原区东北部、长白山-辽东丘陵区中部、大小兴安岭沿麓区西南部的退化耕地面积均有所减少。2024 年该指标下退化耕地占比小幅回升至 8.85%,较 2020 年上升 1.60 个百分点,退化区域分布在松嫩平原区北部、长白山-辽东丘陵区西北部及大小兴安岭沿麓区西南部。这可能是由于黑土地保护相关法律、政策文件的实施,2015 至今,国家、地方政府先后出台了《中华人民共和国黑土地保护法》《东北黑土地保护性耕作行动计划

(2020—2025 年)》《国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025 年)》等文件,明确黑土地保护目标,研发秸秆还田等黑土地保护措施,在一定程度上降低了土壤有机碳退化问题^[39]。

3.3 黑土区耕地退化时空变化特征

基于 2000—2024 年黑土区耕地退化评估结果,进一步分析了黑土区耕地退化趋势的空间分布、退化耕地标准差椭圆分布及重心迁移特征,结果如图 7 所示。从退化趋势的空间分布来看(图 7a),黑土区耕地退化,以保持稳定(53.54%)和恢复趋势(40.49%)为主体类型,仅有 5.97% 的耕地呈退化加剧趋势。空间分布上,保持稳定与恢复趋势耕地在松嫩平原区、三江平原区分布更为集中,反映这两大类型区的耕地退化状况已得到明显改善;而长白山-辽东丘陵区、辽河平原区、大小兴安岭沿麓区的退化加剧耕地占比相对较高,分别达 7.45%、7.19% 和 7.11%,表明 3 个区域耕地仍面临较高的退化风险。这一结果与田芷源等^[8]、Liu 等^[40] 的研究结果接近。

黑土区退化耕地的标准差椭圆分布及重心迁移轨迹如图 7b 所示。结果显示,退化耕地空间分布主轴总体呈“东北—西南”方向,扩展趋势主要沿该轴向发展。对比 2000 年与 2024 年,标准差椭圆面积由 $5.343 \times 10^5 \text{ km}^2$ 减至 $5.057 \times 10^5 \text{ km}^2$,累计降幅达 5.35%,反映出退化耕地的整体分布范围更加集中。从形态变化看,长半轴由 514.92 km 缩短至 502.82 km,降幅为 2.35%;短半轴由 330.32 km 缩短至 320.15 km,降幅为 3.08%,表明退化耕地在东北—西南方向上空间延展程度均有所下降。研究期间,椭圆转角角度由 52.63° 降至 46.21° ,退化耕地的扩张方向整体向西南偏转。20 年间,退

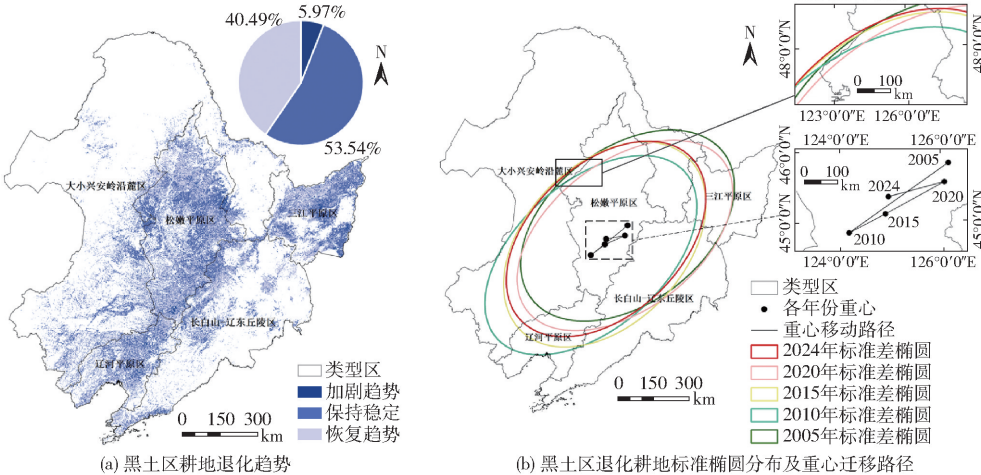


图 7 2000—2024 年黑土区耕地退化趋势、退化耕地标准差椭圆分布及重心迁移路径

Fig. 7 Degradation trend of cultivated land in black soil, standard deviation ellipse distribution of degraded cultivated land and transfer path of gravity center from 2000 to 2024

化耕地重心始终坐落于松嫩平原区南部,迁移轨迹如下:2010 年重心向西南迁移 208.72 km;2015 年转而向东北迁移 74.04 km;2000—2020 年持续向东北迁移 94.46 km;2024 年再次向西南迁移 81.55 km。综合来看,退化趋势空间分布与退化耕地重心分析结果一致,2000—2024 年退化耕地重心总体呈向西南移动趋势,意味着该方向的退化耕地面积相对增加,尤其是辽河平原区与大小兴安岭沿麓区西南部。

3.4 黑土区耕地退化评估结果对比验证

为进一步验证基于 SDG15.3.1 框架和 Trends. Earth 工具识别结果可靠性,从退化面积占比、空间分布格局和变化趋势 3 个方面,将评估结果与已有研究成果及黑土地保护利用资料进行对比。从退化面积来看,2005—2024 年黑土区退化耕地占比由 30.76% 降至 16.96%,总体呈下降趋势,黑土区耕地退化态势有所缓解。该结果与胡智博等^[19]基于 LDN 框架对东北典型黑土区农田退化的评估结论基本一致,其研究表明,2002—2015 年东北典型黑土区农田退化面积占比由 5.52% 降至 5.32%,恢复区面积占比由 6.90% 提至 17.40%,农田整体质量有所提高。尽管二者在研究范围、时间尺度和数据来源上存在差异,但均反映东北黑土区耕地或农田退化总体趋于缓解的变化方向。

从空间分布格局来看,本文识别的退化耕地主要集中在松嫩平原区、三江平原区、大小兴安岭沿麓区及辽河平原区等区域,与已有研究关于黑土区侵蚀退化、黑土层变薄和耕地质量风险区的空间认识基本吻合。田芷源等^[8]指出,东北黑土区约 1/3 耕地发生侵蚀退化,水蚀退化广泛分布于大兴安岭东侧、小兴安岭北部、松嫩平原南部和长白山北部,风蚀退化主要分布于松辽平原中部及科尔沁沙地。王世豪等^[13]研究表明,2000—2020 年东北黑土区耕地水蚀和风蚀均存在明显空间差异,其中长白山和辽河平原水蚀较为严重,辽河平原、大兴安岭和松嫩平原风蚀较为突出。刘凯等^[11]对黑土层厚度实地调查结果也表明,近 40 年东北黑土区黑土层厚度平均减少 12 cm,吉林、辽宁等区域黑土层减薄较为明显。这些研究从耕地质量退化和土壤侵蚀角度,验证了本文退化耕地空间集聚格局的合理性。

从变化趋势来看,2000—2024 年黑土区耕地以稳定和恢复趋势为主,但局部区域仍存在退化加剧风险。这一结果与近年来黑土地保护实践及已有研究认识基本一致。《东北黑土地保护与利用报告(2021 年)》指出,东北黑土区持续推进保护性耕作、

秸秆还田和高标准农田建设,为黑土地退化治理和耕地质量提升提供了现实基础^[38],在一定程度上解释了本文识别出的整体稳定和恢复趋势。宋戈等^[12]对下辽河平原研究发现,耕地退化受自然条件和社会经济因素共同影响,具有明显的空间异质性和时间非平稳性;Zhou 等^[21]基于多源 LULC 数据融合开展的黑土区土地退化零增长评估也表明,1995—2020 年黑土区退化土地面积仍高于改善土地面积,区域尺度土地退化压力尚未完全消除。因此,本文识别的“整体恢复趋势与局部退化风险并存”格局,既反映黑土地保护措施持续推进下退化态势有所缓解,也说明不同区域自然条件、耕作强度和土地利用变化差异仍会导致局部退化风险持续存在。

4 结论

(1)2000—2024 年,黑土区退化耕地占比持续下降,呈阶段性变化特征,从 30.76% 降至 16.96%,区域耕地退化态势有所缓解。截至 2024 年仍有 16.96% 的耕地存在退化问题,且退化耕地空间分布具有集聚性,主要分布在松嫩平原区北部和中部、三江平原区东北部、大小兴安岭沿麓区西南部。

(2)从子指标来看,黑土区耕地各子指标退化特征差异显著。土地生产力指标退化耕地占比呈波动下降的变化趋势,从 19.16% 降至 4.21%,区域土地生产力实现明显恢复;土地覆被指标退化耕地占比无明显规律性变化,从 14.05% 降至 10.74%;土壤有机碳指标退化耕地占比持续上升,近年上升速率略有降低,从 1.44% 升至 8.85%,整体上升 7.41 个百分点,成为黑土区耕地退化的突出问题。

(3)从退化趋势空间分布来看,黑土区耕地以保持稳定(53.54%)和恢复趋势(40.49%)为主,仅有 5.97% 的耕地呈退化加剧趋势;退化耕地标准差椭圆主轴总体呈“东北—西南”走向,研究期间椭圆面积与半轴长度均有所缩减,退化耕地分布更趋集中,且其扩张方向与重心整体向西南偏移,反映出长白山—辽东丘陵区、辽河平原区、大小兴安岭沿麓区等区域的耕地仍面临较高的退化风险。

(4)对比验证结果表明,基于 SDG15.3.1 框架和 Trends. Earth 工具识别的退化耕地结果具有较好可靠性。识别出的退化面积变化方向、空间集聚格局和整体变化趋势,与已有农田退化评估、土壤侵蚀、黑土层减薄和耕地质量退化研究结果基本吻合,说明本文方法能够较好反映黑土区耕地退化时空变化特征。

参 考 文 献

[1] 韩晓增, 邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 206–212.
Han Xiaozeng, Zou Wenxiu. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 206–212. (in Chinese)

[2] 葛全胜, 王介勇, 朱会义. 统筹推进黑土地保护与乡村振兴: 内在逻辑、主要路径及政策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1175–1183.
Ge Quansheng, Wang Jieyong, Zhu Huiyi. Overall promotion of black soil protection and rural revitalization: internal logic, main routes and policy suggestions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1175–1183. (in Chinese)

[3] 韩长斌. 加强东北黑土地保护推进农业绿色发展[N]. 人民日报, 2018–02–07.

[4] 韩贵清, 杨林章. 东北黑土资源利用现状及发展战略[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.

[5] 孙波, 张旭东, 陆雅海, 等. 耕地地力提升与化肥养分高效利用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.

[6] 张佳宝, 孙波, 朱教君, 等. 黑土地保护利用与山水林田湖草沙系统的协调及生态屏障建设战略[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1155–1164.
Zhang Jiabao, Sun Bo, Zhu Jiaojun, et al. Black soil protection and utilization based on harmonization of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland-sandy land ecosystems and strategic construction of ecological barrier[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1155–1164. (in Chinese)

[7] Li R, Hu W Y, Jia Z J, et al. Soil degradation: a global threat to sustainable use of black soils[J]. Pedosphere, 2025, 35(1): 264–279.

[8] 田芷源, 卢慧中, 马瑞, 等. 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, et al. Spatial differentiation characteristics of soil erosion and degradation in black soil cropland of Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4): 931–945. (in Chinese)

[9] 张娜丽, 澹腾辉, 郭忠录, 等. 东北黑土带典型农田土壤质量退化评价[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 130–139.
Zhang Nali, Tan Tenghui, Guo Zhonglu, et al. Soil quality degradation evaluation of typical farmland in the black soil belt of Northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 130–139. (in Chinese)

[10] Tang H Z, Zhang Y Y, Liu Q, et al. Comprehensive evaluation of cultivated land quality in black soil of Northeast China: emphasizing functional diversity and risk management[J]. Appl. Sci., 2025, 15: 3753.

[11] 刘凯, 魏明辉, 戴慧敏, 等. 东北黑土区黑土层厚度的时空变化[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 434–442, 394.
Liu Kai, Wei Minghui, Dai Huimin, et al. Spatiotemporal variation of black soil layer thickness in black soil region of Northeast China[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 434–442, 394. (in Chinese)

[12] 宋戈, 蔡钊阳, 隋虹均, 等. 基于质量和生态互馈的下辽河平原耕地退化的影响机理及治理对策[J]. 农业工程学报, 2024, 40(17): 273–282.
Song Ge, Cai Zhaoyang, Sui Hongjun, et al. Influence mechanism and governance strategies of cultivated land degradation in Lower Liaohe Plain from the mutual feedback perspective of quality and ecology[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(17): 273–282. (in Chinese)

[13] 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)

[14] Sui J, Dai Y J. Analysis of conservation practices for black soil based on organic matter and nitrogen contents in the black soil region of Northeast China[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 20336.

[15] You J H, Huang X, Li H, et al. Evaluation of cultivated land ecosystem service value in the black soil region of Northeast China[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 20373.

[16] 王琦琪, 陈印军, 李然嫣. 东北黑土地保护评价指标体系研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(2): 42–47.
Wang Qiqi, Chen Yinjun, Li Ranyan. Evaluation index system of black soil protection in Northeast China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(2): 42–47. (in Chinese)

[17] Bari E, Chowdhury M A, Hossain M I, et al. Using remote sensing data to study anthropogenic land degradation in Khulna Division, Bangladesh for SDG indicator 15.3.1[J]. Heliyon, 2024, 10: e38363.

[18] Leginio M D, Agrillo A, Congedo L, et al. Analysis of trends in productivity metrics in assessing land degradation: a case study in the Campania region of Southern Italy[J]. Ecological Indicators, 2024, 161: 111962.

[19] 胡智博, 刘昱雯, 毛学刚. 栅格尺度中国东北典型黑土区农田退化程度评估[J]. 土壤通报, 2025, 56(1): 37–46.
Hu Zhibo, Liu Yuwen, Mao Xuegang. Assessment of farmland degradation degree in typical black soil areas of Northeast China at grid scale[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(1): 37–46. (in Chinese)

[20] Ghosh A, Gill T K, Manna S, et al. Monitoring sustainable development goal indicator 15.3.1 on land degradation using SEPAL: examples, challenges and prospects[J]. Land, 2024, 13(7): 1027.

[21] Zhou W T, Qiao G Y, Xu S X, et al. Land degradation neutrality assessment in China’s black soil region: integrating multi-source LULC data and innovative quantitative indicators[J]. Ecological Indicators, 2025, 181: 114448.

[22] Zhang C W, Hu H W, Hu S G. Integrating ecosystem resilience to revisit land degradation neutrality in China[J]. Land Degradation & Development, 2026, 10: 5279–5293.

[23] 邓小明, 张佳宝, 张辉, 等. 中国黑土地保护与利用科技创新战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2024.

- [24] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2024[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [25] Gomes A M N, Sousa A Md, Carvalho M W L, et al. Assessment of land degradation in the state of maranhão to support sustainable development goal 15.3.1 in the agricultural frontier of matopiba, Brazil[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2025, 14(9): 356.
- [26] 郑美君, 查元源, 杜帅. 黄土高原农业区蒸散发时空演变与环境因子贡献研究[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(8): 52–61.
Zheng Meijun, Zha Yuanyuan, Du Shuai. Spatiotemporal evolution of evapotranspiration and contribution of environmental factors in Loess Plateau agricultural region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(8): 52–61. (in Chinese)
- [27] 姜浩, 张寒博, 刘诚斌, 等. 基于温度-降水-植被综合干旱指数的长江流域干旱时空动态监测[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(8): 95–106, 119.
Jiang Hao, Zhang Hanbo, Liu Chengbin, et al. Spatiotemporal dynamics monitoring of drought in Yangtze River basin using temperature – precipitation – vegetation integrated dryness index (TPVDI) [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural machinery*, 2025, 56(8): 95–106, 119. (in Chinese)
- [28] 盖兆雪, 郑文璐, 王洪彦, 等. 气候变化下黑土区陆地生态系统碳储量时空格局与模拟[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(6): 303–316.
Gai Zhaoxue, Zheng Wenlu, Wang Hongyan, et al. Spatio-temporal pattern and simulation of terrestrial ecosystem carbon storage in black soil region under climate change[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(6): 303–316. (in Chinese)
- [29] 宋艳玲, 王建林, 田靳峰, 等. 气象干旱指数在东北春玉米干旱监测中的改进[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(1): 25–34.
Song Yanling, Wang Jianlin, Tian Jinfeng, et al. The spring maize drought index in Northeast China based on meteorological drought index[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30(1): 25–34. (in Chinese)
- [30] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. *地理科学*, 2018, 38(7): 1032–1041.
Han Xiaozeng, Li Na. Research progress of black soil in Northeast China[J]. *Geographical Science*, 2018, 38(7): 1032–1041. (in Chinese)
- [31] 陈绪昊, 高强, 陈新平, 等. 东北三省玉米生产资源投入和环境效应的时空特征[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(16): 3170–3184.
Chen Xuhao, Gao Qiang, Chen Xinping, et al. Temporal and spatial characteristics of resources input and environmental effects for maize production in the three Provinces of Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(16): 3170–3184. (in Chinese)
- [32] 李政宏, 吕晓, 杨伊涵, 等. 中国黑土地保护政策演进过程与特征的量化考察[J]. *土壤通报*, 2022, 53(4): 998–1008.
Li Zhenghong, Lü Xiao, Yang Yihan, et al. Evolution process and characteristics of protection policy for black soils in China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 998–1008. (in Chinese)
- [33] 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(2): 495–504.
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(2): 495–504. (in Chinese)
- [34] 杨春霞, 郑华, 欧阳志云. 三江平原土地利用变化、效应与驱动力[J]. *环境保护科学*, 2020, 46(5): 99–104.
Yang Chunxia, Zheng Hua, Ouyang Zhiyun. Changes, effect and driving forces of land use in Sanjiang Plain [J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(5): 99–104. (in Chinese)
- [35] 梁瑞, 郑粉莉, 王雪松, 等. 东北典型厚层黑土区坡耕地侵蚀对土壤质量的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(5): 147–157.
Liang Rui, Zheng Fenli, Wang Xuesong, et al. Effects of soil erosion on soil quality of slope croplands in typical thick-layer black soil region of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(5): 147–157. (in Chinese)
- [36] 刘玉莲, 李秀芬, 康恒元, 等. 1961—2023年黑龙江省多尺度干旱时空特征[J]. *干旱气象*, 2025, 43(2): 186–194.
Liu Yulian, Li Xiufen, Kang Hengyuan, et al. Multi-scale drought spatiotemporal characteristics in Heilongjiang Province from 1961 to 2023[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2025, 43(2): 186–194. (in Chinese)
- [37] 李玉恒, 成汶璟, 左文洁, 等. 东北黑土区农业干旱脆弱性及其应对策略研究: 以黑龙江省为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(4): 953–964.
Li Yuheng, Cheng Wenjing, Zuo Wenjie, et al. Agricultural vulnerability to drought in the black soil region of Northeast China and its adaptive strategy: Heilongjiang Province case study[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 953–964. (in Chinese)
- [38] 廖晓勇, 万小铭, 王介勇, 等. 东北黑土地保护与利用报告(2021)[R]. 北京: 中国科学院, 2022.
- [39] 张帆, 韩鹏, 贝金娣. 黑土地保护政策的变迁历程与演进特征[J]. *中国农业大学学报*, 2025, 30(1): 234–249.
Zhang Fan, Han Peng, Bei Jindi. Change process and evolution characteristics of the black soil protection policy[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(1): 234–249. (in Chinese)
- [40] Liu Y W, Wang C Y, Wang E H, et al. Raster scale farmland productivity assessment with multi-source data fusion: a case of typical black soil region in Northeast China[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(8): 1435.