土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

DOI: 10.11766/trxb202606040286 **CSTR: 32215.14.trxb202606040286**

梁梦，单欣雨，冯喆，王一鑫，康龙，吴克宁. 基于地球关键带理论的东北黑土区耕地资源韧性评价及分区[J]. 土壤学报，2026，

LIANG Meng, SHAN Xinyu, FENG Zhe, WANG Yixin, KANG Long, WU Kening. Cultivated Land Resource Resilience Evaluation and Zoning in the Northeast Black Soil Region Based on the Earth's Critical Zone Theory[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

基于地球关键带理论的东北黑土区耕地资源韧性评价及分区 *

梁 梦[1]，单欣雨[1]，冯 喆[1,2†]，王一鑫[1]，康 龙[1]，吴克宁[1,2]

（1. 中国地质大学（北京）土地科学技术学院，北京 100083；2. 自然资源部土地整治重点实验室，北京 100035）

摘 要：东北黑土区是我国重要的粮食生产基地，但长期高强度利用及自然因素影响，导致该区域黑土退化问题日益严峻，严重威胁了耕地的可持续生产能力。在此背景下，科学量化耕地资源系统抵御干扰、维持平衡的能力，并评估其所承受的外部压力至关重要。以地球关键带理论为基础，构建涵盖大气圈、土壤圈、生物圈、岩石圈、水圈的五维耕地韧性评价体系。同时，从生产、经济、生态三个维度评估社会经济扰动压力，并采用二维图论聚类法进行韧性-扰动联合分区，针对不同分区提出差异化管控策略。结果表明：东北黑土区耕地韧性总体较高但空间分异显著，呈“东北高、西南低”格局；区域总体社会经济扰动差异显著，呈“北低南高”分布特征。研究将黑土区划分为资源投入区、重点提升区、优化利用区、稳产保育区、整治改善区和生态防控区六类，提出差异化分区管控策略，为黑土地保护与可持续利用提供科学依据。本研究明晰了地球关键带与耕地资源韧性作用理论框架，构建了“地表-地下”联动的韧性评价指标体系，确定了韧性-扰动分区框架，研究结果可为保障粮食安全与黑土地保护提供指导。

关键词：地球关键带；耕地资源韧性；二维图论聚类法；分区管控；东北黑土区

中图分类号：F301.2 **文献标志码**：A

Cultivated Land Resource Resilience Evaluation and Zoning in the Northeast Black Soil Region Based on the Earth's Critical Zone Theory

LIANG Meng[1], SHAN Xinyu[1], FENG Zhe[1,2†], WANG Yixin[1], KANG Long[1], WU Kening[1,2]

(1. *School of Land Science and Technology, China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*; 2. *Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing* 100035, *China*)

Abstract: 【Objective】The northeast black soil region is an important grain production base in China. However, due to long-term high-intensity utilization and the influence of natural factors, the problem of black soil degradation in this region has become increasingly severe, seriously threatening the sustainable production capacity of the cultivated land. Against this background, it is crucial to scientifically quantify the ability of the cultivated land resource system to resist interference and maintain balance, and to assess the external pressure it is bearing. 【Method】 This study is based on the theory of the Earth's Critical Zone and constructs a five-dimensional evaluation system for the resilience of cultivated land covering the atmosphere,

* 国家重点研发计划项目（2023YFD1500104）资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1500104)

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhefeng@cugb.edu.cn

作者简介：梁 梦（2001—），女，河南郑州市人，硕士研究生，主要研究方向为耕地保护。E-mail：2446252399@qq.com

收稿日期：2026–06–04；收到修改稿日期：2026–10–30；网络首发日期（www.cnki.net）：202 – –

soil, biosphere, lithosphere, and hydrosphere. At the same time, it assesses the socio-economic disturbance pressure from the three dimensions of production, economy, and ecology, and uses the two-dimensional graph theory clustering method to conduct joint zoning of resilience and disturbance, proposing differentiated control strategies for different zones. 【Result】 The results show that the resilience of cultivated land in the northeast black soil region is generally high but shows significant spatial differentiation, presenting a pattern of "high in the northeast and low in the southwest". The overall socio-economic disturbance in the region is significantly different, showing a distribution characteristic of "low in the north and high in the south". The black soil region is divided into six categories: resource input area, key improvement area, optimized utilization area, stable production and conservation area, improvement and rectification area, and ecological control area, and differentiated zoning control strategies are proposed, providing a scientific basis for the protection and sustainable utilization of black soil. 【Conclusion】 This study clarifies the theoretical framework of the role of the Earth's Critical Zone and the resilience of cultivated land resources, constructs a linkage "above-ground-underground" resilience evaluation index system, determines the resilience-disturbance zoning framework. The research results can provide guidance for ensuring food security and protecting black soil.

Key words: Earth's Critical Zone; Resilience of cultivated land resources; Two-dimensional graph theory clustering; Zoning control; Northeast black soil region

粮食安全事关国家安全，耕地资源是粮食安全问题的核心[1]。黑土土层深厚、肥力优越，物产与作物资源丰富[2]。东北黑土区水土禀赋优良，是提升农业产能、保障区域农业可持续发展的关键[3]。但受全球气候变暖、自然灾害频发、人类活动等因素影响，黑土层出现“薄、瘦、硬”、有机质含量下降、水土流失加剧和土壤污染等问题[4]。因此，增强抵御外界风险冲击的韧性能力对于维持耕地资源系统的稳定性至关重要。

耕地系统是一个自然过程与人类活动交织的复合系统，其稳定性既取决于系统自身抵御、适应及恢复扰动的内在能力，也受制于外部扰动施加的持续胁迫与冲击，二者共同决定系统演化方向与状态。“韧性”最初由 Holling[5]提出，指系统在受到干扰后恢复到平衡状态的能力。耕地资源韧性主要体现为耕地资源系统的内生动力通过自我调节和适应，抵御外界环境变化的冲击，从而保持系统的稳定性和功能的完整性[6]。目前，不同学者从不同角度开展耕地韧性研究。Wang 等[7]基于“投入—反馈”视角评估了辽宁省耕地系统韧性；Miao 等[8]基于“压力—状态—响应”模型，从发生过程角度评估了齐齐哈尔的耕地韧性；Jing 等[9]考虑了土壤类型和土壤容重，评估了干旱胁迫下玉米种植区的韧性情况，研究了表层土壤性质对耕地韧性的作用；孟丽君等[10]基于耕地表象韧性和潜在韧性两方面评价了曲周县耕地利用系统韧性，提到了地下水资源失衡影响耕地潜在韧性。这些研究均强化了耕地资源自然属性的基础性作用，但是耕地韧性并不完全由地表可见要素决定，而是依赖于从大气到岩石各部分的协同运作。忽略多圈层互馈对耕地资源系统稳定性的系统性支撑，会导致评价结果难以揭示系统在垂直尺度上的真实韧性演化机制。

地球关键带（Earth's Critical Zone）理论强调从植被冠层直至地下水甚至基岩的连续体研究[11]，关注物质能量在垂向上的迁移、转化与反馈过程，能够从机理上揭示耕地系统在面对环境变化时的响应与适应能力。将关键带理论引入耕地资源韧性评价可以提供覆盖“地表-地下”全维度的系统视角，显著增强了评价指标体系的完整性与科学性。不同于传统评价仅关注地表土壤属性或单一圈层要素，关键带视角更有利于揭示多圈层之间的垂向耦合如何产生单圈层分析无法发现的韧性调控机制。本文基于关键带理论构建东北黑土区耕地韧性评价体系，突出自然本底要素的系统整合，有助于弥补传统评价中“重地表轻地下”的局限，增强对黑土区耕地系统垂直过程与韧性机制的理解。

耕地韧性的提升有利于保障农业生产能力的持续性和稳定性，支撑粮食生产的可持续发展。耕地系统不仅处于地球关键带多重过程的交汇节点，其健康与稳定更直接关系到水土资源的可持续利用和农业生态服务功能的发挥[12]。通过系统整合深层水文、母质特性及多圈层互馈等关键约束因素，

可以更全面、深入地评价和解析耕地韧性。因此，厘清地球关键带多圈层耦合效应对全面探究黑土区耕地韧性的作用机制有重要意义。

耕地资源所面临的压力并不只来源于耕地的自然属性，人为活动所带来的一系列生产、经济与生态变化也会形成不可忽视的外部社会经济扰动。这种扰动会给耕地造成持续性冲击，从而影响耕地资源的韧性。在社会经济扰动所带来的冲击下，耕地生产功能受到显著影响[13]；区域农业经济也面临资本投入减少、财政保障弱化和产业地位下降等系统性风险[14]；同时，化肥、农药和农膜的施用改变了土壤的特性，加剧了农业污染风险[15]。基于此，本研究将耕地自然本底韧性水平与外部社会经济扰动强度有效整合，进行空间匹配与聚类划分，实现从“一刀切”管理向“分区施策”的转变。通过量化关键带赋予的自然韧性本底与社会经济扰动压力的空间关系，耦合分析耕地系统的内在属性与外部变量，划分差异化保护利用单元。选取东北黑土区为研究区，立足地球关键带理论，解析水、土、气、生、岩多圈层耦合对耕地韧性的作用机理，构建耕地韧性研究框架；剖析耕地韧性空间分异规律，结合外部扰动完成分区，依据各区问题提出差异化管控对策，为当地耕地管护、粮食安全与农业可持续发展提供支撑。

1 研究方法

1.1 基于地球关键带理论的耕地资源韧性评价及指标体系构建

地球关键带指近地表非均质环境体系，岩石、土壤、水体、大气与生物在此产生繁复交互作用，既维系自然生境状态，也把控着生命存续所需资源的供给能力[16]。由此可见，地球关键带不仅关注土壤圈、水圈、生物圈、大气圈和岩石圈的相互作用，还强调了这些圈层之间的物质和能量交换过程[12]（图 1）。

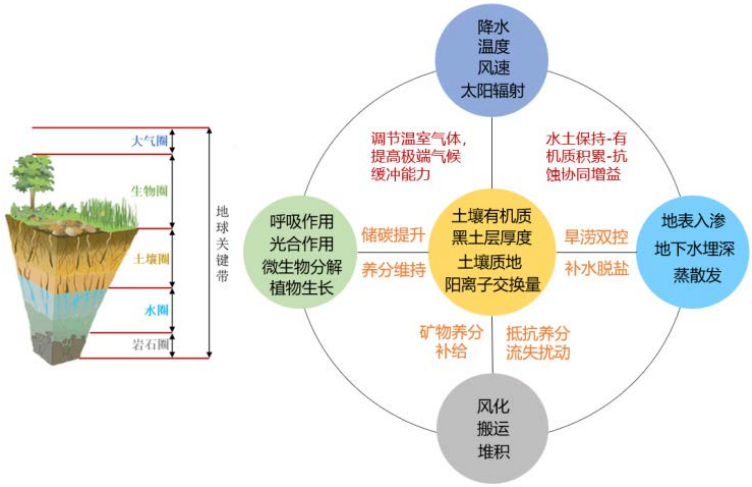


图 1　地球关键带构成耕地资源韧性的基础

Fig. 1 The Earth's Critical Zone forms the foundation for the cultivated land resource resilience

依据地球关键带理论所强调的“植被冠层—土壤—风化层—地下水”垂向连续体及其多圈层物质能量耦合过程，将耕地资源韧性解构为大气、土壤、生物、岩石、水五个圈层，自“地表”到“地下”构建评价指标体系。大气圈选取降水量与≥10 ℃积温，表征水热条件对土壤发育与作物生长的基础性调控[17-18]；土壤圈选取土壤有机质、土壤质地、阳离子交换量、土壤 pH 与黑土层厚度五项，分别对应养分循环与缓冲、抗蚀与恢复、保肥保墒、养分有效性与退化判别等韧性功能[19-23]；生物圈选取土壤微生物多样性，体现养分转化、抗逆与污染物降解能力[24-27]；岩石圈选取地形起伏度与母质类型，表征侵蚀风险与矿物养分供给[27-28]；水圈选取地下水埋深，反映抗旱缓冲与次生盐渍化防

控[29]。本文以五圈层垂直耦合为主线，构建覆盖关键带全维度的耕地资源韧性评价指标体系，实现指标体系的连续性与系统性。

1.2 指标分级标准及权重确定

构建“韧性-扰动”联合分区框架（图 2），采用层次分析法计算耕地韧性指标（表 1）和社会经济扰动指标权重（表 2）。

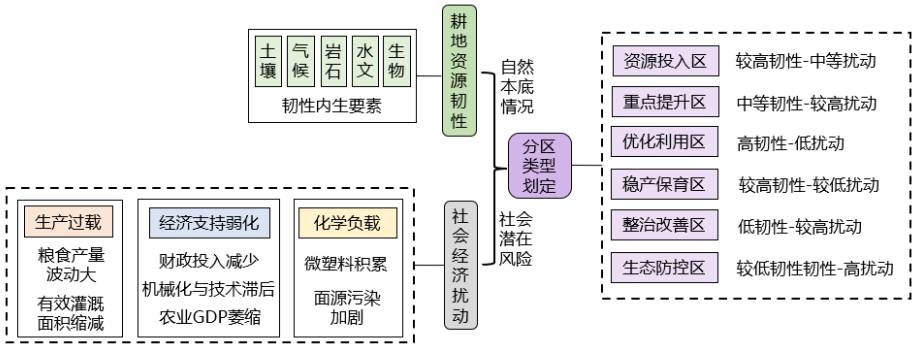


图 2　韧性-扰动分区框架

Fig. 2 Resilience-disturbance zoning framework

土壤、气候、生物和水文指标分别处于关键带中的土壤圈、大气圈、生物圈以及水圈，其决定了区域的水热条件，体现黑土资源的理化性质与肥力特征，反映区域生态系统的完整性。对于上述指标的分级参考相关文献[17-18,23,27,29-30]和《耕地质量等级》（GB/T 33469-2016）、《农用地质量分等规程》（GB/T 28407-2012）等相关标准，采用 0~100 分打分法，建立评价因子分级标准。母岩母质位于关键带的岩石圈，反映区域地质地貌基底特征，是黑土资源空间分异的重要地质基础。本文依据不同种类岩石风化速率、风化产物的厚度、营养元素、保水能力、肥力及相关文献[28]来划分。

社会经济指标来源于 2020 年东北黑土区各县的社会经济数据。将社会经济数据根据经验公式赋值到耕地图斑上[31]，对各指标采用分位数分级法划分等级，即一级 100 分、二级 80 分、三级 60 分、四级 40 分和五级 20 分。社会经济数据与地块 NDVI 值之间显著相关，因此可基于 NDVI 值将社会经济统计数据分配给耕地栅格，进行空间化处理：

$$B_i = \frac{B_{\mathrm{sum}}}{\mathrm{NDVI}_{\mathrm{sum}}} \times \mathrm{NDVI}_i \tag{1}$$

式中，B_i为第i个栅格的社会经济数据估计值；B_{sum}为各县社会经济数据年平均值；$\mathrm{NDVI}_{\mathrm{sum}}$ 为对应尺度各县耕地像元的 NDVI 之和；NDVI_i为第i个栅格的 NDVI 值。

耕地资源韧性评价和社会经济扰动评价综合指数均采用加权求和法：

$$C_1 = \sum_{i=1}^{n} A_i \omega_i \tag{2}$$

式中，C_1为综合评价指数；A_i为第i项指标的得分；ω_i为第 i 项指标的权重；n 为评价指标数量（n=1,2,3...）；i 为指标序号。

表 1　耕地资源韧性指标分级及权重

Table 1 Evaluation index assignment and weight of cultivated land resource resilience

准则层 Criterion layer	圈层作用 Functional roles of spheres	指标层 Indicator layer	权重 Weight	分值 Score					
				100	90	80	70	60	20

		黑土层厚度/cm	0.2475	≥60		30~60		20~30	＜20
		土壤有机质/(g·kg^{-1})	0.182	≥40	30~40	20~30	10~20	6~10	＜6
土壤圈 Pedosphere	各圈层核心交汇处[32]	土壤质地	0.1228	壤土		黏土		砂土	砾质土
		土壤 pH	0.0713	6.5~7.5	5~6.5 或 7.5~8.5		4~5 或 8.5~9.5		≥9.5 或＜4
		阳离子交换量/(cmol·kg^{-1})	0.0496	≥20	15~20	10~15	6~10	3~6	≤3
生物圈 Biosphere	共同参与养分循环[19]	土壤生物多样性	0.0478	丰富				一般	不丰富
大气圈 Atmosphere	驱动能量交换与物质循环[12]	年均降水量/mm	0.1016	≥800	600~800	400~600		250~400	≤250
		≥10 ℃积温/℃	0.0981	≥3 200	2 800~3 200	2 400~2 800	2 000~2 400	1 600~2 000	＜1 600
水圈 Hydrosphere	物质与能量交换的核心载体[33]	地下水埋深/m	0.0341	≥20		5~20		0~5	
		地形起伏度/m	0.0226	≥20		20~30	30~50	50~100	＞100
岩石圈 Lithosphere	补给矿质养分，抵抗养分流失扰动[34]	母岩母质	0.0226	冲积物、湖积物、海积物等松散沉积物	砂岩、粉砂岩、页岩等碎屑沉积物和流纹岩、安山岩、片麻岩、板岩等	玄武岩	花岗岩	石灰岩	石英岩等酸性变质岩

表 2　社会经济扰动评价指标体系

Table 2 Social and economic disturbance evaluation index system

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	韧性指向 Implications for resilience	单位 Unit	计算方法或数据来源 Calculation method or data source	权重 Weight	属性 Indicator direction
社会经济扰动 Social and economic disturbances	生产扰动	粮食生产波动性[35]	反映耕地持续生产的稳定性与抵抗外部扰动的能力	%	（当年粮食产量-上年粮食产量）/当年粮食产量×100	0.25	+
		有效灌溉面积[36]	反映耕地旱涝抵御能力	1 000 hm^2	各地市统计年鉴	0.17	-

	单位面积产量[37]	反映耕地综合生产承载力	kg·hm^{-2}	粮食总产量/粮食播种面积	0.05	-
	农业机械化水平[7]	反映农业作业适应与恢复能力	kW·hm^{-2}	农业机械化总功率/县耕地面积	0.04	-
经济扰动	农业对 GDP 的贡献[35]	衡量产业支撑度与农业经济重要性	%	农业产值/GDP	0.08	-
	农林水财政支出[8]	体现政策保障强度与耕地经济管控水平	万元	各地市统计年鉴	0.03	-
	单位耕地化肥施用量[38]	体现对外部养分的依赖度与地力负荷强度	kg·hm^{-2}	县级化肥总量/县级耕地面积	0.23	+
生态扰动	单位耕地农用塑料薄膜使用量[38]	衡量耕地水土保育水平和生态污染压力	kg·hm^{-2}	县级农膜总量/县级耕地面积	0.11	+
	单位耕地农药施用量[38]	衡量病虫防御能力与生态调控水平	kg·hm^{-2}	县级农药总量/县级耕地面积	0.04	+

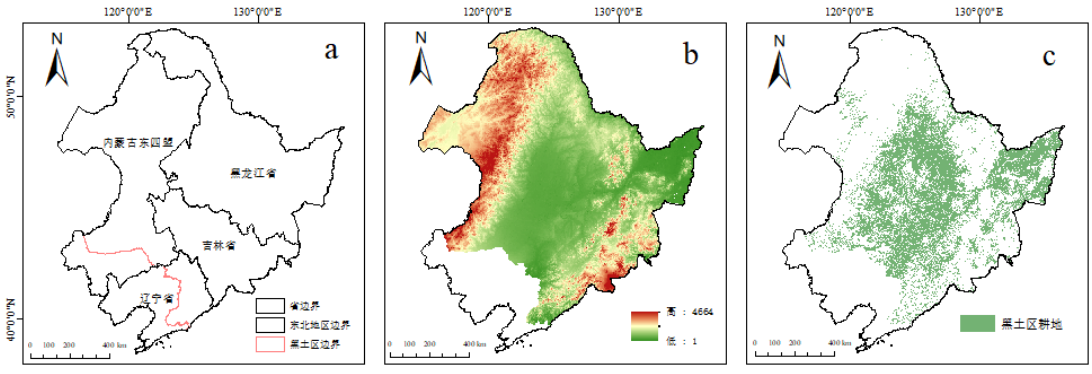
1.3 二维图论聚类法

采用二维图论聚类法进行分区。与传统聚类方法相比，该方法既可以保证各分区内部单元的指标特征相对一致，同时也能保障分区的连续性与完整性[39]。通过构建基于地理空间位置的无向加权图模型，引入加权连通网络 G=(V, E, D)实现区域的划分[40]。

以东北黑土区 174 个行政单元中心点为分区样本，选取耕地韧性、社会经济扰动两类指标，借助 Kruskal 算法构建最小树，依据“组内差异小、组间差异大”的原则，确定最优分割变量阈值，将最小生成树划分为 *m* 个子树。在 *m* 值（分区数量）的选取方面，主要综合考虑了以下两方面判据：（1）根据分区内部一致性、各分区间差异性的原则进行分割，将在主干线两侧同一分支线上的行政单元视为同一分区，发现可划分为 6 个区域，进而得到二维图论树分区结果；（2）结合东北黑土区实际的地理分布格局与黑土保护规划分区参照并参考相关文献发现，6 个分区的命名和边界兼具统计合理性与政策指导意义[40-41]。据此拟定分区差异化管护方案。

1.4 研究区概况

东北黑土区位于中国东北部（38°43′N—53°33′N，118°53′E—135°05′E），包括吉林省、辽宁省、黑龙江省和内蒙古东部的呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市（图 3a），属于温带大陆性季风气候，雨热同季，降水主要集中在夏季，年均降水量分布在 400~1 200 mm。区域内地形地貌丰富（图 3b），耕地多数集中在松嫩平原、三江平原、辽河平原和大兴安岭山前平原[41]（图 3c）。黑土区土壤类型多样，耕地土壤腐殖质层深厚，土壤肥沃，适宜农耕。



注：a），b）和 c）分别为东北黑土区范围、东北黑土区数字高程模型 DEM 和东北黑土区耕地分布。Note: a), b), and c) represent the

geographical extent of the northeast black soil region (BSR), the digital elevation model (DEM) of the northeast black soil region, and the spatial distribution of cultivated land within the northeast black soil region, respectively.

图 3　研究区概况

Fig. 3 Overview of the study area

1.5 数据来源

所用数据包括土地利用数据、气候数据、岩性数据、DEM 数据、土壤数据、各级行政区划数据等地理信息数据和社会经济统计数据（表 3），统一将栅格数据重采样为 1 km 分辨率。

表 3　数据来源及空间分辨率

Table 3 Data sources and spatial resolutions

数据类型 Data type	具体数据 Data item	分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data source
土地利用数据 Land use data	耕地数据	30 m	国家地球系统科学数据中心
气候数据 Climate data	年降水量	1 km	国家地球系统科学数据中心
	≥10 ℃积温	500 m	地球资源数据云平台的中国气象背景数据
岩性数据 Lithological data	SOTER岩型	1 km	Soil and Terrain (SOTER) database
DEM数据 DEM data	地形起伏度	30 m	地理空间数据云平台
土壤数据 Soil data	土壤有机质、阳离子交换量、土壤质地	1 km	中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集（2010—2018）
黑土层厚度 Black soil layer thickness data	—	250 m	中国科学院南京土壤研究所根据土系志解译所得
行政区划数据 Administrative boundary data	省市县边界		中国科学院资源环境科学数据中心
生物多样性数据 Soil biodiversity data	—	10 km	European Soil Data Centre (ESDAC)平台
地下水埋深数据 Groundwater table depth data	—	1.25 km	Fan等[29]
社会经济数据 Socioeconomic data	粮食产量、粮食播种面积、有效灌溉面积、农业机械总功率、农林水财政支出、地区生产总值、化肥施用量、农药使用量、农用塑料薄膜施用量		2021年《黑龙江省统计年鉴》、《吉林省统计年鉴》、《辽宁省统计年鉴》、《内蒙古统计年鉴》及各县市统计年鉴

2 结 果

2.1 耕地资源韧性空间格局

东北黑土区耕地资源韧性均值为 82.95，韧性分值处于 50.21~96.01，总体韧性水平较高。但其空间分布不均衡，大致呈现“东北高、西南低”的分布特点（图 4）。采用自然断点法分级，将研究区分为高、较高、中等、较低和低韧性区。高韧性区占比 21.28%，集中于松嫩平原、三江平原东北部。该区域黑土土层深厚、有机质含量高、土壤抗蚀和储肥能力较强，水热条件利于耕地稳产。较高韧性区占 52.38%，位于两大平原中西部腹地，区域内壤土广、土壤多为中性，生物多样性较好，黑土层厚超 30 cm，自然条件优良。中等韧性区占 13.84%，沿较高韧性区呈带状分布，水热条件影响显著，土壤条件偏弱。较低韧性区占 11.87%，集中在研究区西南部，涉及多地。该区域降水变率大、春旱多发、地下水埋深浅，盐渍化隐患削弱系统缓冲力。该区域黑土层偏薄、土质偏砂、母质为花岗岩风化物，土壤团聚与保肥性能较差、有机质与阳离子交换量不足、地形起伏大。低韧性区仅占 0.62%，零散分布于较低韧性区周边，土壤偏砂、黑土层薄、母质难风化、有机质含量低，土壤条件最差。总体而言，高值区松散母质易风化，配合微生物固碳优化土壤蓄水；低值区主要受制于土层较薄、有机质含量低及地形起伏较大等因素，水土流失严重，破坏农田碳氮循环。

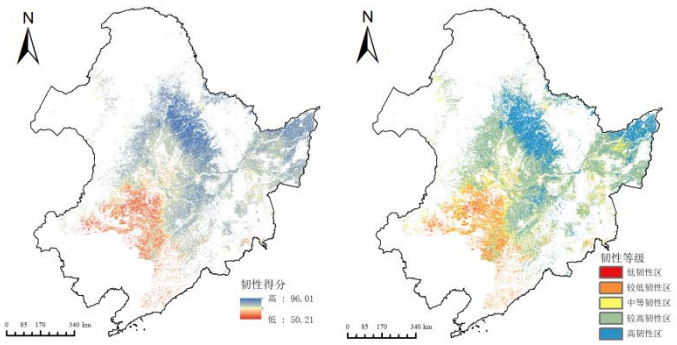


图 4　东北黑土区耕地资源韧性水平

Fig. 4 Level of cultivated land resource resilience in the BSR

2.2 社会经济扰动空间格局

东北黑土区生产、经济、生态扰动水平空间差异性显著（图 5）。从生产扰动看，空间格局呈现东北扰动低、西南扰动高的分布特点，大庆市、绥化市、哈尔滨市和双鸭山市扰动程度显著低于其他地区，说明粮食生产较为稳定，生产条件良好。从经济扰动看，扰动低值区呈月牙形分布，高值区主要分布在辽宁中部及吉林南部城市周边区域。从生态扰动看，总体呈现北低南高的分布特点，扰动高值在全域比重较大，主要集中于吉林中南部至辽东山地区一带。

社会经济扰动分值处在 37.52~91.24，区域总体扰动差异大，呈现出北低南高的分布格局特征（图 6）。采用自然断点法将研究区分为高、较高、中等、较低和低扰动区。低和较低扰动区分别占全域面积的 21.41%和 31.19%，这些地区耕地系统面临压力不高，主要得益于松嫩平原和三江平原规模化农业的集约管理以及高强度财政投入。中等区域占 24.30%。较高扰动和高扰动区占比分别为 16.92%和 6.17%，这些地区受单位化肥使用量等因素影响，生态扰动剧烈。

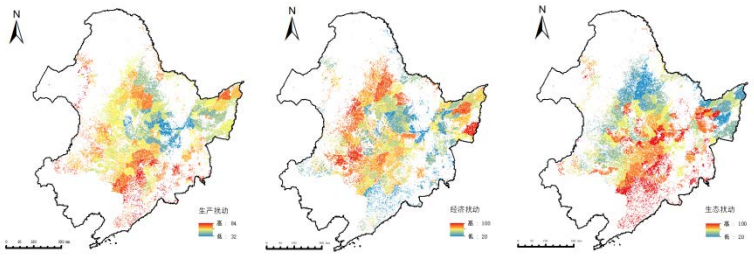


图 5　生产-经济-生态扰动水平

Fig. 5 Production-economic-ecological disturbance level

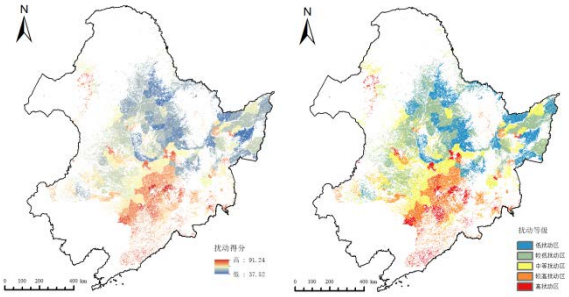


图 6　社会经济扰动水平

Fig. 6 Social and economic disturbance level

2.3 韧性-扰动分区结果与特征

根据分区内同质、区域间异质性的原则进行分割，主干线两侧同一分支线上的行政单元视为同一分区，得到二维图论树分区结果（图 7）。174 个研究单元共生成 173 个无回路连接边，各个研究单元之间的距离权值范围为 0.021 6~0.154 8。结合地理位置及耕地分布情况，根据各分区的韧性和扰动特征，将东北黑土区划分为 6 个类型区，包括资源投入区（I）、重点提升区（II）、优化利用区（III）、稳产保育区（IV）、整治改善区（V）和生态防控区（VI），并确定韧性-扰动分区方案（图 8）。

资源投入区位于东北黑土区北部，耕地面积占全域耕地面积 3%，开垦耕地比例最小，以缓坡耕地为主。该区韧性处于较高水平（84.74），土壤有机质含量高，黑土层厚度适中，能有效防止侵蚀。扰动处于中等水平（56.11），由高到低依次为生产扰动（64.75）、生态扰动（54.26）和经济扰动（43.11），粮食产量波动较大，有效灌溉面积不足。

重点提升区位于东北黑土区西北部，耕地面积在东北黑土区耕地总面积中所占比例最高,为 24%。该区域由于雨季径流导致耕层变薄，黑土层流失，土壤保肥能力较弱，因此韧性受到影响，处于中等水平（82.04）。扰动处于较高水平（59.88），由高到低依次为经济扰动（63.44）、生态扰动（59.67）、生产扰动（58.15）。

优化利用区位于东北黑土区中部，松嫩平原东北部。耕地面积占比 21%，土壤类型以黑土为主。该区域总体韧性水平最高（87.76），能够有效抵抗土壤水蚀风险。扰动水平最低（51.16），由高到低依次为经济扰动（59.10）、生产扰动（51.98）、生态扰动（45.55）。区域内政策保障力度大，生产系统稳定，生态负荷低，总体社会经济压力较小。

稳产保育区位于东北黑土区东部，耕地面积占比 20%，土壤类型以草甸土为主。该区域总体韧性水平高。生产、经济和生态扰动水平分别为 56.88、56.71 和 53.46。

整治改善区位于东北黑土区西南部，耕地面积比例为 15%，土壤类型主要为风沙土、棕壤和潮土，土壤有机质含量不高。该区域韧性得分最低，区域整体韧性较差；扰动压力大，经济扰动（68.46）为主、生产次之（63.95）、生态扰动较小（59.16）。

生态防控区位于东北黑土区东南部，耕地面积占比 16%，土壤类型主要为棕壤、暗棕壤、白浆土等。土壤有机质含量处于中等水平。韧性综合得分较低，扰动压力大，生态扰动严重（89.07），生产扰动水平较高（72.47），经济扰动水平较低（55.24）。

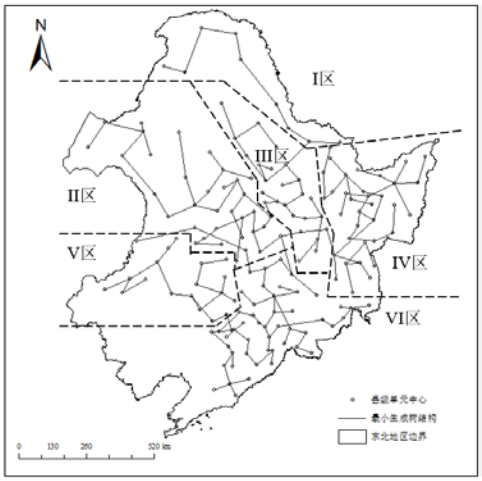


图 7　东北黑土区二维图论树

Fig. 7 Two-dimensional graph theory tree of the BSR

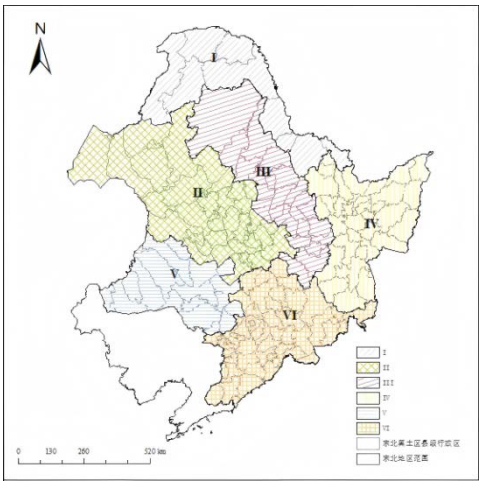


图 8　东北黑土区韧性-扰动分区结果

Fig. 8 Results of resilience-disturbance zoning in the BSR

3 讨 论

3.1 地球关键带视角下耕地资源韧性评价

东北黑土区耕地韧性空间分异格局的形成，是地球关键带各圈层要素协同作用的结果。就土壤圈而言，黑土层厚度是影响韧性空间分异的核心要素。黑土中含有丰富的腐殖质，而腐殖质往往具有极强的吸水能力。黑土层厚度越大，所包含的腐殖质总量也越多，进而具有更强的保水能力和保肥能力。同时，厚层黑土通常具有良好的团粒结构，其内部有大量毛管孔隙可以吸持有效水分供植物缓慢利用，而团粒之间有较大的非毛管孔隙，可以加速降水下渗，减少地表径流和蒸发损失。厚层黑土对酸碱和盐分有更强的缓冲能力，能稳定土壤 pH，避免因施肥不当导致的土壤酸化或次生盐渍化。综上，厚层黑土的保水保肥能力更强，可以有效抗旱抗瘠，增强耕地韧性，实现“以地养地”的可持续生产。因此，在土壤圈视角下，黑土层厚度较大的东北部耕地韧性高于黑土层厚度较小的西南部耕地。

就大气圈和水圈而言，松嫩平原东部和三江平原北部水热配置条件优越，抵御异常气候或灾害的能力较强。而西南部年降水量较少且地下水埋深较浅，春旱与盐渍化风险叠加，削弱了系统缓冲力[17-18,29]。就岩石圈而言，高韧性区主要分布在冲积物和湖积物等松散沉积物母质区，这些母质风化速率高、矿质养分补给持续，土壤快速更新能力强；而低韧性区多位于花岗岩和石灰岩等难风化母质区，土壤形成速率慢、养分本底不足，一旦表土流失，恢复时间较长[28,30]。就生物圈而言，黑土区土壤微生物多样性分布呈现明显的经度地带性，东部湿润区微生物功能群丰富度显著高于西部半干旱区。微生物通过物理-生物耦合机制构建土壤结构，增强土壤结构的稳定性，进而提高土壤的抗侵蚀水平。

通过地球关键带理论可以发现，各个圈层均有影响耕地韧性水平的重要因素，不同要素在研究区范围内的分布有显著的差异。韧性最高的东北部地区并非仅在某一个圈层上表现优异，而是五个圈层均处于高水平状态，共同塑造了该地区耕地的高韧性；反之，西南部低韧性区则表现出多圈层同时处于低水平的状态，单一圈层的改善难以单独提升韧性。

3.2 东北黑土区保护利用对策

建议立足关键带垂向耦合机理，针对制约耕地韧性的主导圈层因子与关键界面过程，对东北黑土区各圈层差异化调控。资源投入区：该区耕地以缓坡为主，可在缓坡修建阶梯条田，削弱地形影响；顺应大气圈水热格局，种植耐寒作物[40-42]。重点提升区：该区域呈现北部偏酸、南部偏碱的土壤 pH 空间异质性，可配套实施分区酸碱改良措施，北部增施生物炭调节酸性土壤，南部用石膏改良碱性土壤[43]，优化土壤养分有效性与微生物活性。优化利用区：该区内关键带多圈层本底优越、韧性水平最高，推行保护性耕作，加强耕地退化监测，保持并进一步发挥现有优势。稳产保育区：针对区域白浆层广泛分布及土壤生物活性较低的突出问题，重点推广秸秆深翻还田技术，搭配有机改良物料辅助改良[44]。通过改善土壤团粒结构，塑造适宜作物根系生长的土壤圈-生物圈结构与功能，强化耕地系统的内在韧性。整治改善区：该区生产条件较差，应将生态保护与产业发展相融合，依托当地农业资源发展优质粮食和特色经济作物，让农户从土地经营中获得稳定收益的同时，提高土壤改良与生态保护的资金投入。生态防控区：推行秸秆全量深翻还田，配套多项农艺技术实现提质节肥[42]，通过增碳固土强化土壤圈的缓冲与净化功能；推进高效低毒低残留农药及缓释肥料推广计划，结合区域土壤肥力状况与作物生长需求，提升肥料利用效率，减少农药化肥残留对土壤、水体及周边生态环境的污染风险[39]，保护关键带各圈层环境质量。

3.3 研究局限性

本研究尚存多处局限：一是部分数据分辨率偏低，易影响各圈层在计算过程中的侧重程度，后续可融合多源数据、借助技术提升精度，进一步加强地球关键带理论的指导作用；二是所用数据均为静态数据，难以深入剖析动态演变规律，今后可针对东北黑土区特征，结合多类时序数据；三是岩石圈指标设置不够全面，未考量风化层厚度，风化层厚度对作物扎根深度与土壤抗侵蚀能力有显著影响，进而影响耕地韧性水平的高低，后续可依托地质勘测完善数据库深化研究；四是本文仅分析了韧性和扰动的空间分异特征，未对各分区的障碍因子进行量化研究，后续可运用障碍度模型和路径分析等方法识别关键限制因素；五是分区管控策略未验证落地适配性，不利于实际应用，后续可在实地开展田间校验与优化调整。

4 结 论

东北黑土区耕地资源韧性总体水平较高，空间分布呈现出“东北高、西南低”的特点。其中高、较高韧性区占比 73.66%，主要分布在松嫩-三江平原核心区；中低韧性区（26.34%）则沿西南方向分布。社会经济扰动分值处在 37.52～91.24，区域间扰动强度差异显著，呈现出北低南高的分布特征。生产、经济、生态扰动空间异质性突出，生产扰动呈现“东北低-西南高”的分布格局，经济扰动低值区呈“东部月牙形弧带”分布，生态扰动则呈“北低南高”的分布格局。依据韧性-扰动二维图论聚类结果，构建黑土区差异化分区治理体系，共分为 6 个区：资源投入区、重点提升区、优化利用区、稳产保育区、整治改善区以及生态防控区。

参考文献（References）

[1] Li B G, Liu Z, Huang F, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1184-1193. [李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓 保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184-1193.]

[2] Sui H J, Song G, Liu X R. Spatial and temporal differentiation of cultivated land quality degradation in a typical black soil region of Northeast China from the perspective of genetics and variation: A case study in Fujin City[J]. China Land Science, 2022, 36(10): 53-62. [隋虹均, 宋戈, 刘馨蕊. 遗传和变异视角下东北黑土区典型地域耕地质量退化时空分异——以富锦市为例[J]. 中国土地科学, 2022, 36(10): 53-62.]

[3] 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.]

[4] Du G M, Chai L J, Li Y H. Theoretical explanation and research framework of cultivated land use system[J]. Progress in Geography, 2022, 41(7): 1288-1299. [杜国明, 柴璐佳, 李玉恒. 耕地利用系统的理论解析与研究框架[J]. 地理科学进展, 2022, 41(7): 1288-1299.]

[5] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 1973, 4: 1-23.

[6] Li Y H, Huang H Q, Guo T B, et al. Research on cultivated land resilience of the black soil region in the Northeast China under multiple stresses and its implications: The study of Baiquan County, Heilongjiang Province[J]. China Land Science, 2022, 36(5): 71-79. [李玉恒, 黄惠倩, 郭桐冰, 等. 多重压力胁迫下东北黑土区耕地韧性研究及其启示——以黑龙江省拜泉县为例[J]. 中国土地科学, 2022, 36(5): 71-79.]

[7] Wang Y, Jiang Y T, Zhu G X. Spatio-temporal evaluation of multi-scale cultivated land system resilience in black soil region from 2000 to 2019: A case study of Liaoning Province, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2024, 34(1): 168-180.

[8] Miao X R, Li Z H, Wang M Y, et al. Measurement of cultivated land ecosystem resilience in black soil region of Northeast China under the background of cultivated land protection policy in China: Case study of Qiqihar City[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 140141.

[9] Jing L S, Weng B S, Yan D H, et al. Assessment of resilience in maize suitable planting areas under drought stress[J]. Agricultural Water Management, 2023, 277: 108096.

[10] Meng L J, Huang C, Chen X, et al. Evaluation of cultivated land system resilience of Quzhou County[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1949-1958. [孟丽君, 黄灿, 陈鑫, 等. 曲周县耕地利用系统韧性评价[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1949-1958.]

[11] National Research Council. Basic research opportunities in Earth science[M]. Washington: The National Academies Press, 2001.

[12] Zhang G L, Zhu Y G, Shao M A. Understanding sustainability of soil and water resources in a critical zone perspective[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2019, 49(12): 1945-1947. [张甘霖, 朱永官, 邵明安. 地球关键带过程与水土资源可持续利用的机理[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(12): 1945-1947.]

[13] Su H, Wu C F. Analysis of the influencing factors of the cultivated land resources value in black soil region based on the production-living-ecological functions: A case study in Keshan County, Heilongjiang Province[J]. China Land Science, 2020, 34(9): 77-85. [苏浩, 吴次芳. 基于“三生”功能的黑土区耕地资源价值影响因素分析——以黑龙江省克山县为例[J]. 中国土地科学, 2020, 34(9): 77-85.]

[14] Chen M Q, Wang J P, Qiu W, et al. Land resource misallocation in agricultural production: Basic understanding and governance strategies[J]. China Land Science, 2025, 39(4): 12-19. [陈美球, 王检萍, 邱薇, 等. 农业生产中土地资源错配：基本认知与治理策略[J]. 中国土地科学, 2025, 39(4): 12-19.]

[15] Lyu T G, Chen A Y, Fu S F, et al. Spatial correlation network evolution characteristics and driving factors of cultivated land system resilience in the major grain producing areas of the middle reaches of the Yangtze River[J]. China Land Science, 2025, 39(5): 107-119. [吕添贵, 陈安莹, 付舒斐, 等. 长江中游粮食主产区耕地系统韧性的空间关联网络演变特征及驱动因素[J]. 中国土地科学, 2025, 39(5): 107-119.]

[16] Yang S H, Song X D, Wu H Y, et al. A review and discussion on the Earth’s Critical Zone research: Status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 308-318. [杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 等. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 308-318.]

[17] Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. The climate regionalization in China for 1981–2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(30): 3088-3099. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981—2010 年中国气候区划[J]. 科学通报, 2013, 58(30): 3088-3099.]

[18] Du G M, Ma M Q, Zhang R, et al. Change of maize-soybean cropping patterns and its link with climate warming in Northeast China between 2000 and 2020[J]. Resources Science, 2024, 46(11): 2251-2262. [杜国明, 马梦琪, 张瑞, 等. 2000—2020 年东北地区玉米大豆种植格局演变及其气候驱动机理[J]. 资源科学, 2024, 46(11): 2251-2262.]

[19] Li T T, Yuan Y, Mou Z J, et al. Faster accumulation and greater contribution of glomalin to the soil organic carbon pool than amino sugars do under tropical coastal forest restoration[J]. Global Change Biology, 2023, 29(2): 533-546.

[20] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 1997, 43(1/2): 131-167.

[21] Song W, Zhang H Z, Zhao R, et al. Study on cultivated land quality evaluation from the perspective of farmland ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2022, 139: 108959.

[22] Khaledian Y, Brevik E C, Pereira P, et al. Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries[J]. Catena, 2017, 158: 194-200.

[23] Liu R X, Wang Z Q, Tan Y P. The thickness of black soil layer and its influencing factors in a small watershed of typical black soil region in Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 346-353, 361. [刘若轩, 王志强, 谭玉萍. 东北典型黑土区小流域黑土层厚度及影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 346-353, 361.]

[24] Hartmann M, Six J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(1): 4-18.

[25] Oades J M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure[J]. Geoderma, 1993, 56(1/2/3/4): 377-400.

[26] Kong Y L, Qin H, Zhu C Q, et al. Research progress on the mechanism by which soil microorganisms affect soil health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 331-347. [孔亚丽, 秦华, 朱春权, 等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 331-347.]

[27] Qiao Z, Xu X L. Assessment of soil erosion sensitivity and key factors identification in the wood-grass ecotone of Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(8): 1349-1361. [乔治, 徐新良. 东北林草交错区土壤侵蚀敏感性评价及关键因子识别[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1349-1361.]

[28] Lai F Y. On the relationship between parent rock lithology and soil erosion[J]. Soil and Water Conservation in China, 1989(7): 41-43. [赖发叶. 试论母岩岩性与土壤侵蚀的关系[J]. 中国水土保持, 1989(7): 41-43.]

[29] Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. Global patterns of groundwater table depth[J]. Science, 2013, 339(6122): 940-943.

[30] Qiu S J, Hao X Y, Zhao S C, et al. Causes of fertility decline and countermeasures for protection and utilization of upland black soil—An analysis from the perspective of nutrient resources high-efficient utilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(1): 1-11. [仇少君, 郝小雨, 赵士诚, 等. 黑土地肥力下降成因与保护利用对策——基于养分资源高效利用视角分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(1): 1-11.]

[31] Quarmby N A, Milnes M, Hindle T L, et al. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(2): 199-210.

[32] Brantley S L, Goldhaber M B, Ragnarsdottir K V. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone[J]. Elements, 2007, 3(5): 307-314.

[33] Li X Y, Ma Y J. Advances in Earth's Critical Zone science and hydropedology[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2016, 52(6): 731-737. [李小雁, 马育军. 地球关键带科学与水文土壤学研究进展[J]. 北京师范大学学报（自然科学版）, 2016, 52(6): 731-737.]

[34] Banwart S A, Nikolaidis N P, Zhu Y G, et al. Soil functions: Connecting Earth's critical zone[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019, 47: 333-359.

[35] Xu W Y, Jin X B, Liu J, et al. Spatiotemporal evolution and the detection of key drivers in the resilience of cultivated land system in major grain-producing regions of China[J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(15): 4712-4727.

[36] Yan M Y, Yang B H, Sheng S Y, et al. Evaluation of cropland system resilience to climate change at municipal scale through robustness, adaptability, and transformability: A case study of Hubei Province, China[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 943265.

[37] Zou S J, Zhang L, Huang X, et al. Early ecological security warning of cultivated lands using RF-MLP integration model: A case study on China's main grain-producing areas[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109059.

[38] Li L S, Pan P P, Wang Y, et al. Research on the cultivated land use system resilience under a safe and just space framework[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 380: 125006.

[39] Gai Z X, Wang Z T, Zhao Y H. Eco-efficiency and zoning of cultivated land use in three northeast provinces from perspective of low carbon[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(3): 622-632. [盖兆雪, 王子彤, 赵映慧. 低碳视角下东北三省耕地利用生态效率及分区研究[J]. 西南农业学报, 2024, 37(3): 622-632.]

[40] Zhou H, Lei G P, Yang X X, et al. Utilization zoning of reserve resources for cultivated land based on two-dimensional graph theory

clustering method at county scale[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 116-124. [周浩, 雷国平, 杨雪昕, 等. 基于两维图论的县域尺度耕地后备资源利用分区研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 116-124.]

[41] Wang J K, Xu X R, Pei J B, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695-701. [汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 695-701.]

[42] Liang A Z, Li L J, Zhu H. Protection and utilization of black land and making concerted and unremitting efforts for safeguarding food security promoted by sci-tech innovation—Countermeasures in conservation and rational utilization of black land[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 557-564. [梁爱珍, 李禄军, 祝惠. 科技创新推进黑土地保护与利用, 齐力维护国家粮食安全——用好养好黑土地的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 557-564.]

[43] Qu F C, Chen W P, Wang J J. Discussion on engineering treatment model for “Dryland” of saline-sodic soil in the Songnen Plain based on cause analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(20): 10113-10120. [曲风臣, 陈卫平, 王佳佳. 基于成因的松嫩平原苏打盐碱地“旱田”工程治理模式研究[J]. 生态学报, 2025, 45(20): 10113-10120.]

[44] Gao R M, Yan J, Han X Z, et al. Effects of returning organic materials to field on physical properties of albic soil and maize yield[J]. Soils and Crops, 2024, 13(3): 305-313. [高瑞敏, 严君, 韩晓增, 等. 有机物料还田对白浆土物理特性及玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2024, 13(3): 305-313.]

（责任编辑：卤 萱）