

冯喆, 王一鑫, 康龙, 裴伟, 梁梦, 陈安琪, 吴克宁. 基于地球关键带理论的耕地土壤安全评价——以黑龙江绥化市为例[J]. 土壤学报, 2025,

FENG Zhe, WANG Yixin, KANG Long, PEI Wei, LIANG Meng, CHEN Anqi, WU Kening. Cultivated Land Soil Security Evaluation Based on the Earth's Critical Zone Theory: A Case Study of Suihua City[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

基于地球关键带理论的耕地土壤安全评价 *

——以黑龙江绥化市为例

冯 喆^{1,2}, 王一鑫¹, 康 龙¹, 裴 伟¹, 梁 梦¹, 陈安琪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. 自然资源部国土整治重点实验室, 北京 100035)

摘要: 东北黑土区是中国重要的商品粮生产基地, 确保东北黑土区的土壤安全是保障国家粮食供应与促进资源永续利用的前提。然而, 现有评价体系缺乏对地球关键带多圈层互动机制方面的整合, 难以量化自然基底与人类活动的协同效应, 制约了东北黑土区耕地资源可持续利用的系统性决策。本研究聚焦黑土典型区域绥化市, 以地球关键带理论为指导, 构建了“状态 (C1)-性能 (C2)-资本 (C3)-关联性 (C4)”四维评价体系, 从土壤物理、化学、生物性质等方面选取 17 项指标(如黑土层厚度、阳离子交换量、土壤有机质含量等), 刻画绥化市耕地土壤安全格局, 并结合随机森林模型揭示地球关键带要素对土壤安全的影响机制。结果表明: (1) C1 状态分值呈现东北高西南低的空间分异特征; C2 分值整体较高; C3 资本分值的空间特征与 C1 相反, 呈现出东北低西南高的空间分异特征; C4 在空间上没有明显的规律。(2) 土壤安全综合分值为 54.3~88.4(平均值 77.7), 84.9% 的耕地处于中度安全及以上水平, 较高安全度区域(56.5%)集中于北林区、安达市和海伦市, 临界及不安全区域(15.1%)主要分布于庆安县和明水县。

(3) 17 项指标的平均均方误差增加值(%IncMSE)为 1.3%, 黑土层厚度和土壤有机碳含量的%IncMSE 分别为 10.7% 和 3.7%, 特征重要性远超其他指标。综上, 文章基于地球关键带圈层互动理论所构建的四维评价体系可量化自然基底与人类活动的相互作用, 阐明黑土区土壤安全的地球关键带圈层响应机制, 为黑土区耕地资源的可持续管理提供了系统性决策工具。

关键词: 土壤安全; 地球关键带; 随机森林; 黑土地保护; 绥化市

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

Cultivated Land Soil Security Evaluation Based on the Earth's Critical Zone Theory: A Case Study of Suihua City

FENG Zhe^{1,2}, WANG Yixin¹, KANG Long¹, PEI Wei¹, LIANG Meng¹, CHEN Anqi¹, WU Kening^{1,2}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Land

* 科技部黑土专项重点研发计划(2023YFD1500104)、国家自然科学基金重点项目(42430705)和国家自然科学基金项目(42171261)资助
Supported by the Black Soil Special Key Research and Development Plan (No. 2023YFD1500104), the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 42430705), and the National Natural Science Foundation of China (No. 42171261)

作者简介: 冯 喆(1984—), 男, 北京人, 博士, 副教授, 主要从事土壤资源方向研究。E-mail: zhefeng@cugb.edu.cn

收稿日期: 2025-03-25; 收到修改稿日期: 2025-05-24; 网络首发日期 (www.cnki.net):

Remediation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: **【Objective】** Ensuring the security of soils in the Northeast Black Soil Region, a critical commodity grain production base in China, is essential for safeguarding the national food supply and promoting sustainable resource utilization. However, existing evaluation systems lack a comprehensive integration of multi-sphere interaction mechanisms within the Earth's critical zone, making it difficult to quantify the synergistic effects of natural substrates and human activities. Thus, this study aims to address this gap by developing a systematic decision-making tool for the sustainable management of cultivated land resources in the Northeast Black Soil Region. **【Method】** This study focused on Suihua City, a typical black soil region, and constructed a four-dimensional evaluation system of "Condition (C1)-Capability (C2)-Capital (C3)-Connectivity (C4)" guided by the Earth's critical zone theory. Seventeen indicators (such as black soil layer thickness, cation exchange capacity, soil organic matter content, etc.) were selected from aspects including soil physical, chemical, and biological properties to characterize the cultivated land soil security pattern of Suihua City. Also, the influencing mechanism of Earth's critical zone elements on soil security was evaluated by combining with the Random Forest model. **【Result】** The results showed that: (1) The C1 state scores exhibited a spatial variation with higher values in the northeast and lower values in the southwest; C2 scores were generally high; C3 capital scores showed an opposite spatial pattern to C1, with lower values in the northeast and higher values in the southwest; and C4 scores did not display a clear spatial pattern. (2) The comprehensive soil security scores ranged from 54.3 to 88.4 (average of 77.7), with 84.9% of cultivated land classified as moderately secure or higher. Higher security regions (56.5%) were concentrated in Beilin District, Anda City, and Hailun City, while critical and insecure regions (15.1%) were mainly distributed in Qing'an County and Mingshui County. (3) The average means square error increase (%IncMSE) for the 17 indicators was 1.3%, with black soil layer thickness and soil organic carbon content having %IncMSE values of 10.7% and 3.7%, respectively, significantly higher than other indicators. **【Conclusion】** The results of the study demonstrate that the four-dimensional evaluation framework rooted in the Earth's critical zone theory effectively quantifies the interplay between natural substrates and anthropogenic activities. This approach elucidates the response mechanisms of soil security within the multi-layered structure of the critical zone, offering a systematic decision-making tool for sustainable management of cultivated land resources in black soil regions. These findings provide actionable insights for balancing agricultural productivity with ecological sustainability in ecologically fragile agroecosystems.

Key words: Soil security; Earth's critical zone; Random forest; Black soil protection; Suihua City

作为地球陆地生态系统的基石，土壤承载着矿物质、有机质、水气复合体系及生物群落的和谐共生，其质量的优劣直接决定了耕地系统的生态服务功能与生物生产力的高低^[1]。东北黑土区由于土地肥沃、地域辽阔成为我国重要的商品粮基地，被誉为粮食生产与供给的“稳压器”。但过度利用、土壤侵蚀引发的水土流失与土壤污染导致土地退化，这不仅威胁着粮食安全，也严重制约着资源的可持续利用和生态环境的平衡^[2-3]。因此，确保东北黑土区耕地土壤安全，对于保障国家粮食供应、促进资源永续利用以及维护生态系统的稳定具有至关重要的意义。

土壤安全是指保护和改善世界土壤资源以生产食物、纤维和淡水，促进能源和气候可持续性，以及维护生物多样性和生态系统的整体保护，是一个受可持续发展推动的整体概念^[4-5]。与过去土壤肥力、土壤质量、土壤健康等土壤评价概念相比，土壤安全的概念更加宽泛，其评价结果更有利于进行土壤保护^[6-9]。当前国际土壤安全研究已显现从单一要素分析向系统科学综合的转型趋势^[10]，McBratney 等^[5]提出的“5C”理论（性能 Capability、状态 Condition、资本 Capital、关联性 Connectivity 和政策法规 Codification），解构了土壤安全的抽象概念，使得土壤安全量化路径得到明确。相关学者^[11-12]以澳大利亚的塔斯马尼亚（Tasmania）、中国中东部地区为研究区，采用数字土壤评估（Digital Soil Assessment, DSA）方法，进一步将土壤安全的五个维度量化，论证了空间量化土壤安全的可行性。张小丹^[13]根据土壤安全的定义引申出耕地安全的定义，构建了基于“5C”的耕地安全评价指标

体系。整体上,目前对于土壤安全评价的研究案例较少,且集中于农业土壤的表层系统,而深层土壤在水文循环、养分迁移、碳储能力和抗侵蚀性等方面仍发挥着关键的调控作用^[14-15],现有研究无法很好解决以土壤为核心的立体圈层系统的农业利用问题。

地球关键带(Earth's critical zone)指从地球表面到地下水的区域,并包括大气圈、水圈、土壤圈和生物圈等关键组成部分^[14-16]。在地球关键带的宏观框架下,土壤圈层扮演着至关重要的角色,它是连接岩石圈、水圈、大气圈和生物圈的纽带^[17],明确了地球表层系统的空间框架。目前少有在土壤安全中融入地球关键带理论的研究,这可能会忽视关键带组分的互馈机制,导致管理决策缺乏系统性^[18]。地球关键带科学所提供的整体性框架能够定量化描述土壤过程以及阐明环境变化如何影响土壤过程,而这样的理论框架将丰富土壤安全评价的研究内容与角度^[19]。

绥化市位于黑龙江省中部,地处松嫩平原典型黑土区和世界黄金玉米带、黄金奶源带和优质大豆生产带,耕地土质肥沃,是我国东北地区重要的农业区^[20]。绥化市不仅承担着国家“粮仓”功能,其黑土退化问题也集中反映了东北黑土区面临的共性挑战。目前对绥化市土壤的研究主要集中在耕地质量与土壤地球化学评价等方面,对该区域的土壤安全评价研究尚不充分。本研究以地球关键带理论和“5C”理论框架的前“4C”为支撑,选取17项指标构建了一套合理的耕地土壤安全评价指标体系,结合随机森林模型揭示指标重要性特征,对该地区的土壤安全格局及特点进行了系统性剖析,旨在促进区域土壤资源合理配置以及可持续利用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

绥化市($45^{\circ}3' \sim 48^{\circ}02'N$, $124^{\circ}13' \sim 128^{\circ}30'E$)位于黑龙江省中南部,总面积为 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,辖北林、肇东、安达、海伦、绥棱、青冈、庆安、兰西、望奎、明水10个县级行政单元。绥化市属于寒温带大陆性季风气候,雨热同期,年平均气温 3.4°C ,年平均降水量 511.2 mm ,年平均日照时数2644 h;地势东北高、西南低;境内河流密布,水系发达;土壤类型以草甸土、黑土、黑钙土和暗棕壤为主^[21],土质优良,适宜作物种植;土地利用类型以耕地为主,现有耕地总面积约 $1.90 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (2023年),占全市面积的54.29%,盛产玉米、水稻、大豆等农作物,一年一熟。绥化市的区位、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)状况如图1所示。

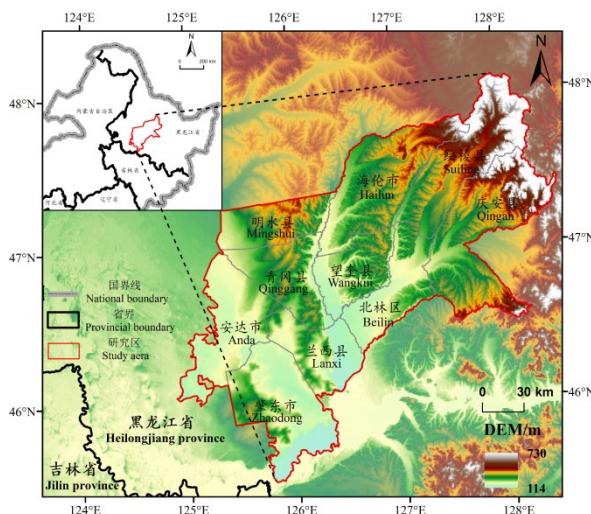


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源与预处理

本研究所需数据包括土地利用、归一化植被指数 (NDVI)、土壤理化性质、社会经济等数据, 具体来源见表 1。其中, 通过对研究区土壤类型图进行矢量化处理获取土壤类型数据。数据处理及绘图主要在 ArcGIS 10.8 和 ENVI 5.3 中进行。本文所有数据的投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_51N。

表 1 数据来源及其精度

Table 1 Data source and its accuracy

数据 Data	数据集 Data set	数据精度 Accuracy	数据来源 Data source
年均降水量	中国 1 km 分辨率年降水量数据 (2001–2020 年)	1 km	国家科技资源共享服务平台-国家地球 系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)
归一化植被指数 (NDVI)	中国月度植被指数 (NDVI) 空间 分布数据集 ^[22]	1 km	资源环境科学数据注册与出版系统
土壤侵蚀	中国土壤侵蚀空间分布数据	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
土壤容重、全氮、全磷、全 钾、pH、阳离子交换量、土 壤质地、有机碳含量、土壤 有机质含量	中国高分辨率国家土壤信息格网 基本属性数据集 (2010–2018 年) ^[23–24]	1 km	国家科技资源共享服务平台-国家地球 系统科学数据中心-土壤分中心 (http://soil.geodata.cn)
土壤电导率、土壤可交换钠 百分比	世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database v 1.2, HWSD) ^[25]	1 km	联合国粮农组织 (http://www.fao.org)
成土母质	中国 1:100 万土壤与地形数据库	1:100 万	土壤与地形 (SOTER) 数据库 (https://www.isric.org/explore/soter)
地下水埋深	全球地下水位深度数据集	1.25 km	Fan 等 ^[26]
黑土层厚度	东北地区黑土层厚度数据集	250 m	中国科学院南京土壤研究所
数字高程模型 (DEM)	DEM		地理空间数据云
Landsat 8 遥感影像	Landsat 8 OLI_TIRS 卫星数字产 品	90 m	(http://www.gscloud.cn)
主要农作物产量 化肥施用折纯量 农用机械总动力	《黑龙江统计年鉴》2018–2020 年		黑龙江省政府官网、绥化市政府官网

1.3 基于地球关键带理论的土壤安全评价指标体系构建

地球关键带作为一个复杂的自然反应器, 包含了岩石、土壤、水、空气和生物等要素, 并受到气候、地形和人为活动等多重因素的影响^[19–27–28]。其作为地表生命与地质过程交织的复杂系统, 其圈层间的相互作用深刻塑造了土壤安全的四大维度——状态、性能、资本与关联性。如表 2 所示, 大气圈 (Atmosphere) 通过气候调控与物质沉降, 直接影响土壤的“性能”维度 (如碳氮循环效率) 与“资本”维度 (如大气 CO₂转化为土壤有机质的潜力)^[29]; 而土壤圈 (Pedosphere) 作为系统的功能枢纽, 通过碳氮磷元素的界面迁移与转化, 驱动能量分配与信息传递的级联调控, 成为四大维度的核心^[14–30]。岩石圈 (Lithosphere) 的矿物风化通过释放养分间接支撑土壤“资本”积累, 水圈 (Hydrosphere) 的水文循环则通过调节土壤湿度与溶质运移, 强化“关联性”维度的空间连通性^[31]。生物圈 (Biosphere) 的微生物与植物根系活动, 则进一步将土壤“性能”与生态系统服务紧密耦合^[32]。

本文基于地球关键带理论, 在现有的土壤安全评价指标体系基础上, 结合当地情况进行了修订, 围绕四大维度, 提出了本文的土壤安全评价指标体系。

表 2 地球关键带各圈层与四大维度的相关性

Table 2 The correlation between the layers of the Earth's critical zone and four dimensions

地球关键带	四大维度 Four dimensions
-------	----------------------

Earth's critical zone	状态 Condition	性能 Capability	资本 Capital	关联性 Connectivity
大气圈 Atmosphere	○	√	√	
生物圈 Biosphere	√	○	√	√
岩石圈 Lithosphere	○	√		
土壤圈 Pedosphere	√	√	√	
水圈 Hydrosphere	○	√	√	√

注:“√”表示直接影响,“○”表示间接影响。总结自文献[28-35]。Note: “√” indicates direct impact, “○” indicates indirect impact.

Table summary from literature[28-35].

第一个维度,状态。土壤状态与土壤经短时间内管理所表现出的性质有关,通常选择土壤的物理、化学和生物性质来评估^[19],对土壤的耕作性能、肥力、生产力等方面具有重要影响,也是土壤质量状况的表现,通常可以将其理解为“土壤健康”,衡量的是短期管理下的土壤性质。

第二个维度,性能。土壤性能衡量长时间尺度上形成的较为稳定的土壤特性,即土壤能做什么,可通过土壤适宜性表征,同时受土壤胁迫的影响。考虑到本文研究对象为耕地土壤,即土壤用途已经明确,在对性能这一维度进行量化时,仅考虑土壤胁迫指标。

第三个维度,资本。土壤资本即为土壤提供的自然、社会经济、生态等价值,量化价值更有助于引起对土壤保护的重视。对于耕地,一般考虑其自然资本和经济资本。将自然资本视为其碳储能力^[36],而经济资本则以其粮食生产能力表征。

第四个维度,关联性。关联性是指土壤管理者是否采取了恰当的措施以促进耕地土壤效用最大化,体现为人类对耕地采取的措施,如防止土壤退化、提升土壤功能,包括基础设施建设和田间管理水平等。

结合已有研究^[11-13, 17-19, 29-31],构建绥化市耕地土壤安全评价指标体系,如表3所示。

表3 绥化市耕地土壤安全评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of arable land soil security in Suihua City

准则层 Criterion layer	因素层 Factor layer	指标层 Index layer	代码 Code
状态 Condition (C1)	物理性质	表层土壤质地 ^[37]	X1
		土壤容重/(g·cm ⁻³) ^[38]	X2
		成土母质	X3
		地下水埋深/m	X4
		黑土层厚度/cm	X5
化学性质		全氮/(g·kg ⁻¹) ^[13]	X6
		全磷/(g·kg ⁻¹) ^[13]	X7
		全钾/(g·kg ⁻¹) ^[13]	X8
		土壤 pH ^[39]	X9
性能 Capability (C2)	生物性质	阳离子交换量/(c mol·kg ⁻¹) ^[38]	X10
	土壤胁迫	土壤有机质含量/(g·kg ⁻¹) ^[39]	X11
		土壤侵蚀 ^[37]	X12
		土壤盐渍化 ^[37]	X13
资本 Capital (C3)	自然资本	土壤有机碳含量/(g·kg ⁻¹) ^[36]	X14
	经济资本	年平均农作物产量/(kg·a ⁻¹) ^[36]	X15
关联性 Connectivity (C4)	田间管理水平	年平均化肥施用折纯量/(t·a ⁻¹)	X16
		年平均农用机械总动力/(kW·a ⁻¹)	X17

1.4 指标赋值及权重确定

土壤指标的分级赋值参考《耕地质量等级》^[37]、《第三次全国土壤普查耕地质量等级评价技术规范》^[40]等划分。土壤有机碳(SOC)和社会经济数据采用极值归一化处理,将其值归一化为[0, 100]。四个维度采用相同权重,同一维度内各指标采用层次分析法确定权重,如表4所示。

表4 耕地土壤安全评价指标赋值及权重

Table 4 Evaluation index assignment and weight of cultivated land soil security

指标及其权重 Indicator and weight	分值 Score								
	100	90	80	70	60	50	40	30	20
表层土壤质地 (0.203)	壤土、粉壤土	黏壤土	黏土、粉黏土						砂土
BD (0.057)	1.14~1.26		1.00~1.14; 1.26~1.30		<1.00; ≥1.30				
成土母质 (0.109)		风成物	河积物	湖积物	安山岩	片麻岩	花岗岩		
地下水埋深 (0.040)	≤5		5~15		15~25		25~45		≥45
黑土层厚度 (0.276)	≥100	80~100	60~80	≤60					
TN (0.018)	≥2	1.5~2		1~1.5	0.75~1		<0.75		
TP (0.018)	≥1	0.8~1		0.6~0.8	0.4~0.6		<0.4		
TK (0.018)	≥25	20~25		15~20	10~15		<10		
土壤 pH (0.080)	6.0~7.9		5.5~6.0; 7.9~ 8.5		5.0~5.5; 8.5~9.0		4.5~5.0		<4.5; ≥9.0
CEC (0.028)	≥20			10~20			<10		
SOM (0.153)	≥40	30~40	20~30	10~20	6~10	<6			
土壤侵蚀 (0.700)		微度		轻度		中度	强度	极强	剧烈
土壤盐渍化 (0.300)		轻度			中度			强度	
SOC (0.500)				0~100					
年平均农作物产 量 (0.500)				0~100					
年平均化肥施用 折纯量 (0.500)				0~100					
年平均农用机械 总动力 (0.500)				0~100					

注: BD: 土壤容重; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; CEC: 阳离子交换量; SOM: 土壤有机质; SOC: 土壤有机碳。下同。

Note: BD: Bulk density; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; CEC: Cation exchange capacity; SOM: Soil organic matter; SOC: Soil organic carbon. The same below.

具体的指标计算过程如下:

(1) 土壤侵蚀情况参考《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007) [41]确定绥化市处于水力侵蚀区, 按照平均侵蚀模数($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)将土壤侵蚀强度划分为6个级别: 微度、轻度、中度、强度、极强度、剧烈。使用通用土壤流失方程(RUSLE) [21]即式(1)计算土壤侵蚀:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中, A为土壤侵蚀模数($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); R为降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$); K为土壤可蚀性因子($t \cdot hm^{-2} \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$); L为坡长因子, 无量纲; S为坡度因子, 无量纲; C为植被覆盖因子, 无量纲; P为水土保持措施因子, 无量纲。

(2) 土壤盐渍化情况根据《第三次全国土壤普查耕地质量等级评价技术规范》, 东北地区的耕地盐渍化程度可根据交换性钠($cmol \cdot kg^{-1}$)占阳离子交换量的百分比(ESP, %)得到碱化度, 依据碱化度的大小将盐渍化程度分为轻度(I级)、中度(II级)、强度(III级)。

(3) 社会经济指标是将2017、2018、2019三年绥化市各县的社会经济数据, 之后将其分配到栅格单元中, 并计算年平均值。分配方法参考Quarmby等[42]提出的经验公式即式(2):

$$B_i = \frac{B_{sum}}{NDVI_{sum}} \times NDVI_i \quad (2)$$

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; $NDVI_{sum}$ 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。其中, 社会经济数据包括年平均农作物产量、年平均化肥施用折纯量、年平均农用机械总动力。

(4) 四个维度的评价结果 (C) 采取加权求和即式 (3) 的方式计算。

$$C_a = \sum_{i=1}^n D_i \omega_i \quad (3)$$

式中, D 为指标得分, ω 为指标权重, n 为指标数量 ($n=1, 2, 3, \dots$; $a=1, 2, 3, 4$)。

耕地土壤安全综合分值采用广义均值法^[13]即式 (4) 计算:

$$Y = \sqrt[m]{\frac{\sum_{i=1}^4 C_i^m}{4}} \quad (4)$$

式中, Y 为耕地土壤安全综合分值; C_i 为各维度分值, $i=1, 2, 3, 4$; $m=1, 2, 3$, 分别为算术平均值、二次平均值和三次平均值, 这三次均值的平均值即为评价单元最终的耕地土壤安全综合分值, 并根据其平均值 (X) 和标准差 (S) 划分耕地土壤安全等级, 具体等级划分标准如表 5 所示。

表 5 耕地土壤安全等级划分标准

Table 5 Classification standard of cultivated land soil security

安全级别 Security level	划分标准 Classification standard
高度安全 Highly secure	$Y > X + S$
中度到高度安全 Moderately to highly secure	$X < Y \leq X + S$
中度安全 Moderately secure	$X - S < Y \leq X$
临界安全 Marginally secure	$X - 3S < Y \leq X - S$
不安全 Insecure	$Y \leq X - 3S$

1.5 特征重要性分析

随机森林 (Random Forest) 模型作为一种集成学习算法, 在提升模型泛化能力的同时兼具显著的计算效率优势, 通过对大量分类树的汇总提高了模型的预测精度, 因此在当代机器学习领域展现出显著竞争力^[43]。其核心机理在于: 模型构建过程中, 各决策树节点分裂时采用的特征变量对模型输出的方差产生异质性影响, 根据基尼不纯度降低程度与袋外数据 (Out-of-Bag, OOB) 估计相结合的特征重要性评估方法, 可量化分析各特征变量在模型预测中的贡献度。本研究采用随机森林模型对耕地土壤安全评价指标进行特征重要性分析, 分析过程在 R 4.4.3 中利用 “randomForest” 包进行。

2 结果

2.1 绥化市耕地土壤安全四大维度分值

绥化市耕地土壤安全综合评价结果及空间分异特征如图 2 所示。在土壤状态维度 (C1) 分析中, 评价分值范围为 56.9~78.6 (平均值 68.8), 空间分异呈现西南低、东北高的方位性特征。研究区东北部地域土壤状态保持相对优良态势, 相较之下, 西南部安达市、青冈县等区域为低值区 (低于均值 11.3%)。在土壤性能维度 (C2) 分析中, 耕地土壤性能分值范围为 58.0~90.0 (平均值 88.13), 整体分值较高。绥化市各县耕地以微度侵蚀为主, 总体而言水土保持状况良好, 对耕作负面影响较小。绝大部分耕地土壤盐渍化程度为轻度, 对植物吸收土壤水分影响较小。整体来看, 研究区耕地土壤所受胁迫程度较低, 对作物生长负面影响较小。

在土壤资本维度 (C3) 方面, 耕地土壤资本分值范围在 23.2~100.0 (平均值 68.5), 在空间上呈从西南向东北先升后降的分布特征, 安达市、青冈县和肇东市整体水平相对较高, 绥棱县与庆安县整体水平最低。在土壤关联性维度 (C4) 方面, 耕地土壤关联性分值范围在 1.4~76.7 (平均值 61.7)。

这一维度表征人类对耕地的管理和投入，在空间上无明显分布规律，庆安县水平最低，望奎县次之，其他县水平相对较高且差异不大。

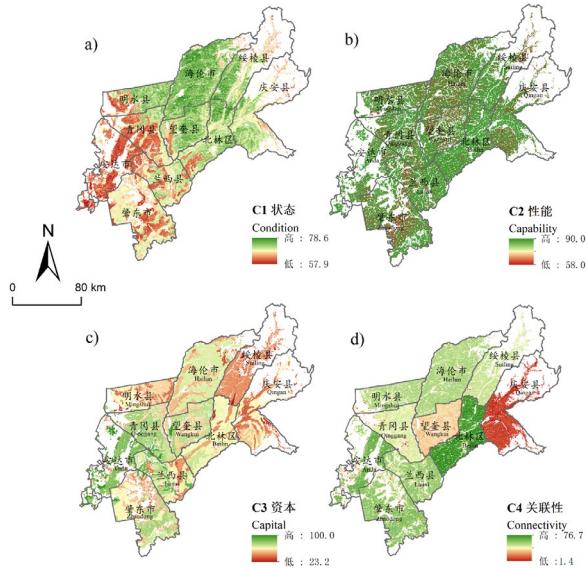


图 2 绥化市耕地土壤安全评价四大维度分值

Fig. 2 The scores of four dimensions of cultivated land soil security evaluation in Suihua City

2.2 绥化市耕地土壤安全状况分布

在综合分值方面，绥化市耕地土壤安全综合分值范围为 54.3~88.4(平均值 77.7)，标准差为 3.6。绥化市中部的北林区、西南部的安达市和北部的海伦市综合分值最高，而分值较低的耕地土壤则分布在庆安县中北部、明水县西部、绥棱县东北部，兰西县南部以及肇东市北部地区。

研究结果表明，绥化市耕地土壤安全水平整体较高，中部北林区、西部安达市和海伦市安全水平较其他地区更高，由西南向东北呈递减之势(图 3)。从分布来看，高度安全的耕地集中分布在北林区和安达市，海伦市也略有分布；中度到高度安全的耕地范围最广，主要集中在海伦市、青冈县和肇东市；中度安全的耕地主要集中在绥棱县，在明水县、望奎县、兰西县也有分布；临界安全分布较少，主要集中于庆安县；不安全的耕地最少，仅在明水县的西南部和庆安县部分地区有所分布。

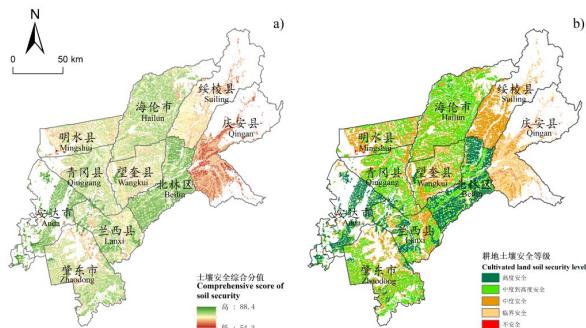


图 3 绥化市耕地土壤安全状况分布

Fig. 3 Distribution of soil security status of cultivated land in Suihua City

各县耕地土壤安全状况的面积及占比见表 6。整体而言，绥化市耕地土壤安全状况按照面积大小依次为：中度到高度安全、中度安全、高度安全、临界安全、不安全。中度安全及以上占比 84.9%，整体安全状况良好。具体到县域，除庆安县外均以中度到高度安全为主，前三个等级的面积占本县耕地比例均超过 80.0%。北林区、安达市和海伦市的耕地土壤安全状况最好，中度到高度安全和高度安全两个等级的耕地占比分别高达 94.2%、89.4% 和 72.1%。整体而言，绥化市土壤中度到高度安全的耕地面积最大 (783 910 hm²)，占全市耕地总面积的 41.3%；不安全的耕地最少 (10 793 hm²)，占

全市总耕地面积的 0.5%。高度安全的耕地面积为 288 782 hm², 占全市总耕地面积的 15.2%; 中度安全面积为 538 731 hm², 占全市总耕地面积的 28.4%; 临界安全面积为 277 550 hm², 占全市总耕地面积的 14.6%。

表 6 绥化市耕地土壤安全状况面积及占比

Table 6 The area and ratio of cultivated land soil security in Suihua City

行政单元 Administrative unit	高度安全 Highly secure		中度到高度安全 Moderately to highly secure		中度安全 Moderately secure		临界安全 Marginally secure		不安全 Insecure		总面积 Total area/hm ²
	面积 Area /hm ²	占比 Ratio/%	面积 Area /hm ²	占比 Ratio/%	面积 Area/hm ²	占比 Ratio/%	面积 Area/hm ²	占比 Ratio/%	面积 Area/hm ²	占比 Ratio/%	
北林区 Beilin	131 804	58.8	79 599	35.5	11 330	5.1	1 570	0.7	44	0.0	224 347
望奎县 Wangkui	3 541	2.2	67 851	42.0	72 250	44.7	17 978	11.1	49	0.0	161 669
兰西县 Lanxi	39 590	21.8	79 215	43.7	51 274	28.3	11 286	6.2	73	0.0	181 438
青冈县 Qinggang	7 379	4.3	112 194	64.9	45 037	26.1	8 088	4.7	121	0.1	172 819
庆安县 Qingan	0	0.0	0	0.0	27 849	15.7	142 278	80.2	7 366	4.2	177 493
明水县 Mingshui	142	0.1	55 390	38.9	63 765	44.8	21 806	15.3	1 325	0.9	142 428
绥棱县 Suiling	0	0.0	0	0.0	113 036	80.5	26 428	18.8	884	0.6	140 348
安达市 Anda	85 928	68.4	25 040	19.9	10 141	8.1	3 894	3.1	543	0.5	125 546
肇东市 Zhaodong	16 148	6.4	138 668	54.5	73 543	28.9	25 582	10.1	356	0.1	254 297
海伦市 Hailun	4 250	1.4	225 953	70.7	70 506	22.1	18 640	5.8	32	0.0	319 381
绥化市 Suihua	288 782	15.2	783 910	41.3	538 731	28.4	277 550	14.6	10 793	0.5	1 899 766

2.3 指标特征重要性

在随机森林模型结果中, 均方误差增加 (%IncMSE) 越大, 表明自变量对结果越重要^[44]。耕地土壤安全评价指标的特征重要性分析结果如图 4 所示, 所有指标 %IncMSE 值的平均值为 1.3%, 仅有四个指标超过了平均值, 分别为黑土层厚度、土壤有机碳含量、年平均农作物产量与表层土壤质地, 而且黑土层厚度和土壤有机碳含量的 %IncMSE 分别为 10.7% 和 3.7%, 远超其他指标。

从图 4 中可以看出指标特征重要性大致可以分为四组: (1) 第一组为 X5 (黑土层厚度)、X14 (土壤有机碳含量), 它们对于耕地土壤安全分值贡献度较大, 重要性远超其他指标; (2) 第二组为 X1 (表层土壤质地)、X11 (土壤有机质含量)、X15 (年平均农作物产量), 这些指标的重要性相较第一组来说稍显逊色, 但对结果还是具有一定的影响力; (3) 第三组为 X2 (土壤容重)、X3 (成土母质)、X4 (地下水埋深)、X6 (全氮)、X7 (全磷)、X8 (全钾)、X9 (土壤 pH)、X16 (年平均化肥施用折纯量)、X17 (年平均农用机械总动力), 这些指标相较于前两组重要性要弱得多, 对结果的影响力比较小; (4) 第四组为 X4 (地下水埋深)、X10 (阳离子交换量)、X12 (土壤侵蚀)、X13 (土壤盐渍化), 这些指标的特征重要性近似且相对前三组而言最小, 对评价结果几乎没有影响。

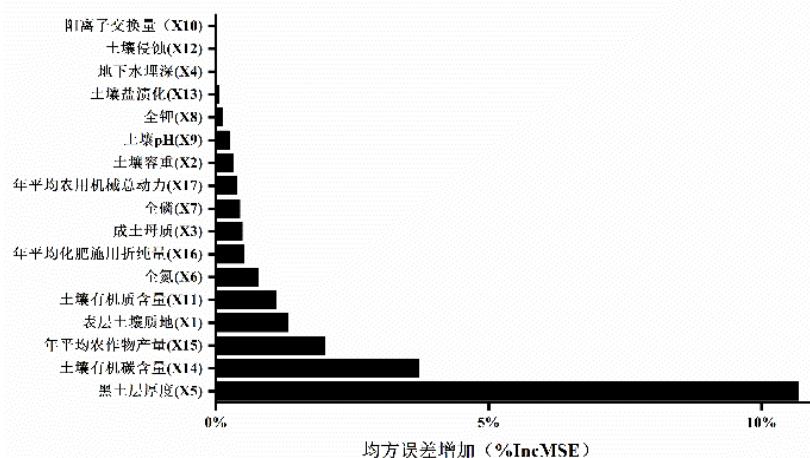


图 4 指标特征重要性排序
Fig. 4 Feature importance ranking

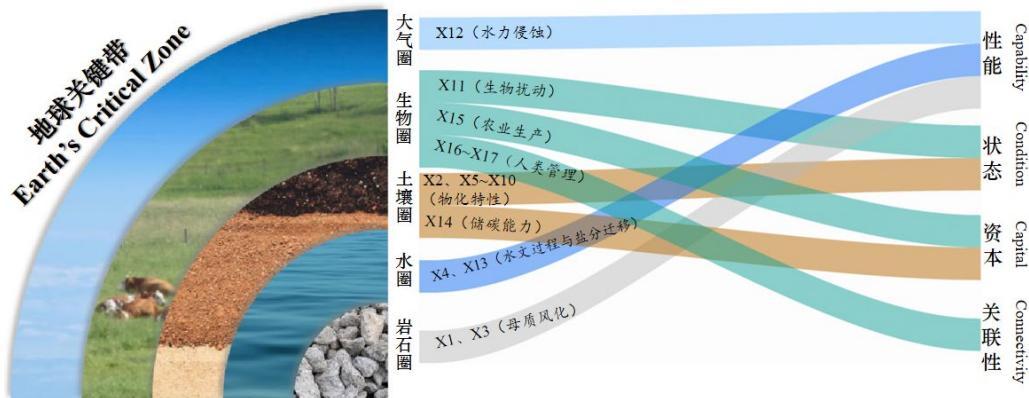
3 讨 论

3.1 地球关键带视角下的土壤安全评价：多圈层耦合与系统调控

本研究结果表明，绥化市耕地土壤安全在不同维度呈现出各异的空间分异特征。土壤状态维度 (C1) 呈现出西南低、东北高的空间分异。状态维度中，其物理性质指标反映了土壤孔隙结构与水汽传输效率，而化学性质受水岩界面反应速率与植物养分吸收与释放平衡的双重约束^[45]。绥化市西南部养分含量及土壤有机质的衰减，以及黑土层厚度的局部变薄与土壤有机质的加速耗竭形成显著空间关联，致使该区域养分持有能力等物理化学特性指标较中北部黑土典型耕作土壤呈现区域性衰减趋势。土壤性能维度 (C2) 的整体分值较高，大部分耕地所受胁迫程度较低，对作物生长负面影响较小。关键带内水、岩石、大气作用主导了土壤安全性能的时空分异。例如研究区中北部深厚的黑土层赋予了土壤强抗侵蚀性能。

土壤资本维度 (C3) 在空间上呈现从西南向东北先升后降的特征。土壤资本维度的空间分异，是关键带稳定性与人类活动共同作用的结果。关键带稳定性调控土壤碳储能力，东北部耕地表层土壤有机碳含量相对较低；而人类的农业生产活动差异，使得西南部县级行政区单位面积年平均农作物产量高于东北部，两者共同造成了研究区东北部资本分值较低的结果。土壤关联性维度 (C4) 在空间上无明显分布规律，这主要是因为人类对耕地的管理和投入受多种因素影响，包括政策、经济发展水平和农民认知等，不同县域的管理措施差异大，未呈现明显规律。

地球关键带理论通过整合岩石圈、水圈、生物圈等多界面交互作用，为土壤安全评价提供了系统性理论框架^[46]。土壤作为关键带的功能枢纽，其安全状态不仅直接反映关键带系统的整体稳定性与可持续性，更通过“状态-性能-资本-关联性”四维评价体系，将复杂的地球表层系统耦合关系转化为可量化的科学指标。这不仅有助于理解土壤安全状态形成的内在机制，也为理解土壤与关键带的互馈关系提供了可操作化工具（图 5）。这种耦合机制验证了朱永官等^[19]提出的土壤安全战略框架，即通过地球关键带科学实现“多尺度要素协同—多功能服务平衡”的土壤管理范式。



注: 改编自 Zhou 和 Gu^[47]。Note: Revised from Zhou and Gu^[47].

图 5 地球关键带与土壤安全四维评价体系的关系

Fig. 5 The relationship between the Earth's critical zone and the four-dimensional evaluation system of soil security

3.2 绥化市耕地土壤安全格局的驱动因素

研究利用随机森林模型对绥化市耕地土壤安全评价指标进行了特征重要性分析, 从%IncMSE 这个衡量指标来看, 黑土层厚度和土壤有机碳含量对于耕地土壤安全分值贡献度最大, 重要性远超其他指标; 表层土壤质地、土壤有机质含量、年平均农作物产量次之, 对结果也具有一定影响力。基于地球关键带多圈层过程的系统联动特征, 这一结果与自然地理本底和人类活动调控紧密相关。

从自然因素来看, 黑土层是东北黑土区的重要特征, 其厚度直接关系到土壤的保水保肥能力和抗侵蚀性能^[48]。深厚的黑土层意味着更丰富的养分储备和更稳定的土壤结构, 能为作物生长提供良好的环境基础, 进而显著影响土壤安全分值。土壤有机碳含量影响着土壤的肥力、团聚体稳定性以及微生物活性等多个方面^[49]。高含量的土壤有机碳可以促进土壤形成良好的团粒结构, 提高土壤对生物和非生物胁迫的抵抗力, 所以在土壤安全评价中具有极高的重要性。

从人类活动角度分析, 年平均农作物产量反映了耕地的生产能力, 是人类利用土壤资源的直接成果体现。在长期的农业生产过程中, 人类通过合理的田间管理措施来提高产量, 而这些活动反过来也影响着土壤的性质和安全状况。例如, 科学的灌溉、施肥以及轮作制度有助于维持土壤的健康状态, 在提高农作物产量的同时, 保障了土壤安全^[50]。表层土壤质地则影响着土壤的耕作性能和水分、养分的保持与传输能力, 人类的耕作活动会改变表层土壤结构, 进而对土壤安全产生影响。如不合理的深耕或过度压实, 可能破坏土壤结构, 降低土壤的通气性和透水性, 影响土壤安全^[51]。

综合而言, 这种自然基底与人为干预的互动关系, 最终在地球关键带物质循环网络下, 形成了绥化市耕地土壤安全格局的空间分异特征。

3.3 研究局限性

本研究基于地球关键带理论构建的耕地土壤安全评价体系, 在拓展传统土壤安全研究维度方面做出了一定努力, 但仍存在一些局限性, 需在后续研究中深入探讨和改进。

首先, 在数据层面, 本研究的多源数据的时空分辨率存在异质性且部分土壤数据库尺度略微宏观, 这可能影响综合评价模型的精度。未来应借助高光谱遥感等先进技术, 获取高时空分辨率的土壤数据, 并有效融合不同来源、分辨率的数据, 结合土壤样点或剖面数据, 从而精准刻画土壤的动态变化; 其次, 随机森林模型虽有效识别了黑土层厚度、土壤有机碳含量等主导因子, 但对变量间非线性关系的解译仍显不足。后续研究可引入深度学习模型, 如神经网络等, 利用其强大的非线性拟合能力挖掘变量间潜在的复杂关系; 最后, 本研究使用“成土母质”这一指标时存在一些不确定性。研究中涉及的风积物、河冲积物、湖积物等成土母质, 通常厚度足够, 但对于岩石成土母质(如片麻岩、花岗岩等)其上的风化物厚度并未明确标注。由于目前数据的缺失, 难以准确评估这类岩石成土母质对土壤安全的贡献和影响程度。未来研究可通过开展野外实地调查, 运用地质勘探等技

术获取岩石成土母质风化厚度数据, 补充完善相关信息, 以提高土壤安全评价的准确性和可靠性。

4 结 论

基于地球关键带理论构建的“性能-状态-资本-关联性”四维评价体系, 绥化市耕地土壤安全综合评价分值为 54.3~88.4 (平均值 77.7), 84.9%的耕地处于中度安全以上状态, 空间分布上较高安全度区域集中于北林区、安达市和海伦市, 临界及不安全区域主要分布于庆安县和明水县。在各维度上, 状态维度 (C1) 呈现东北高西南低的空间分异特征, 性能维度 (C2) 整体分值较高, 资本维度 (C3) 与状态维度相反, 呈东北低西南高特征, 关联性维度 (C4) 空间分布无明显规律。随机森林模型结果显示, 黑土层厚度和土壤有机碳含量为影响土壤安全的关键驱动因子, 其重要性远超其他指标。研究证实, 基于地球关键带圈层互动理论的四维评价体系可量化自然基底与人类活动的相互作用, 能够有效解决现有土壤安全评价研究中难以解决的问题, 即以土壤为核心的立体圈层系统的农业利用问题。这为黑土区耕地资源可持续管理提供了系统性决策工具, 且强调了应针对区域异质性优化水土保持技术、强化生态补偿机制, 实现自然基底保护与农业集约化的动态平衡, 推动东北黑土区土壤资源的可持续利用。

参考文献 (References)

- [1] Gong Z T, Huang C M, Chen H Z, et al. Origination of the earth soil and its implications for the establishment of the earth inhabitability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1): 1-6. [龚子同, 黄成敏, 陈鸿昭, 等. 土壤起源与宜居地球的形成[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 1-6.]
- [2] Liu B Y, Yan B X, Shen B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 1-8. [刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.]
- [3] Shen R F, Wang C, Sun B. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of “Storing Grain in Land and Technology”[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 135-144. [沈仁芳, 王超, 孙波. “藏粮于地、藏粮于技” 战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 135-144.]
- [4] McBratney A, Minasny B, Wheeler I, et al. Frameworks for digital soil assessment[M]//Digital Soil Assessments and Beyond. Boca Raton: CRC Press, 2012: 9-14.
- [5] McBratney A, Field D J, Koch A. The dimensions of soil security[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 203-213.
- [6] Lehmann J, Bossio D A, Kögel-Knabner I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(10): 544-553.
- [7] Koch A, McBratney A, Lal R. Global soil week: Put soil security on the global agenda[J]. *Nature*, 2012, 492(7428): 186.
- [8] Basset C. Soil security: The cornerstone of national security in an era of global disruptions[J]. *Soil Security*, 2024, 16: 100154.
- [9] García-Gamero V, Vanwalleghem T, Peñuela A. Soil footprint: A simple indicator to communicate and quantify soil security[J]. *Soil Security*, 2024, 16: 100156.
- [10] Chen F, Li S J, Hao L Y, et al. Research progress on soil security assessment in farmlands and grasslands based on bibliometrics over the last four decades[J]. *Sustainability*, 2024, 16(1): 404.
- [11] Kidd D, Field D, McBratney A, et al. A preliminary spatial quantification of the soil security dimensions for Tasmania[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 184-200.
- [12] Yang R M, Minasny B, Ma Y X, et al. A preliminary soil security assessment of agricultural land in middle-eastern China[J]. *Soil Use and Management*, 2018, 34(4): 584-596.
- [13] Zhang X D. Study on arable land security assessment at county scale[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. [张小丹. 县域尺度耕地安全评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.]

- [14] National Research Council, Commission on Geosciences, Resources, et al. Basic research opportunities in earth science[M]. Washington D C: National Academies Press, 2001.
- [15] 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.
- [16] Richter D D Jr, Mobley M L. Monitoring Earth's critical zone[J]. *Science*, 2009, 326(5956): 1067-1068.
- [17] Zhang L, Xia Y, Chen Q, et al. Research on soil ecosystem service assessment method based on Earth's Critical Zone science[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2021, 57(3): 345-356. [张丽, 夏炎, 陈琪, 等. 基于地球关键带科学的土壤生态系统服务评价方法研究[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2021, 57(3): 345-355.]
- [18] Banwart S A, Bernasconi S M, Blum W E H, et al. Soil functions in Earth's critical zone key results and conclusions[J]. *Advances in Agronomy*, 2017, 142: 1-27.
- [19] Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1859-1869. [朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报, 2015, 70(12): 1859-1869.]
- [20] Suihua News Network. Suihua overview[EB/OL]. (2017-03-20) [2025-03-11]. <https://suihua.dbw.cn/system/2006/03/31/050349579.shtml>. [绥化新闻网. 绥化概况[EB/OL]. (2017-03-20) [2025-03-11]. <https://suihua.dbw.cn/system/2006/03/31/050349579.shtml>.]
- [21] Zhang S H, Zhou L J, Zhang X P. Evaluation of soil erosion in Suihua City based on RUSLE and GIS[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(6): 1472-1475. [张淑花, 周利军, 张雪萍. 基于 RUSLE 和 GIS 的绥化市土壤侵蚀评估[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1472-1475.]
- [22] Xu X L. China Monthly Vegetation Index (NDVI) Spatial Distribution Dataset [DB/OL]. [2025-03-12] <http://www.resdata.com.cn/DataProduct/Detail/115>. [徐新良. 中国月度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集[DB/OL]. [2025-03-12] <http://www.resdata.com.cn/DataProduct/Detail/115>.]
- [23] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, et al. Mapping high resolution national soil information grids of China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(3): 328-340.
- [24] Liu F, Zhang G L, Song X D, et al. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114061.
- [25] Wieder R, Boehnert J, Bonan B, et al. Regridded Harmonized World Soil Database v1.2 [DB/OL]. [2025-03-12] <https://doi.org/10.3334/ORNLDAC/1247>.
- [26] Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. Global patterns of groundwater table depth[J]. *Science*, 2013, 339(6122): 940-943.
- [27] Li X L, Wu K N, Feng Z, et al. Research progress of land surface system classification: From land type to Earth's critical zone type[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(3): 531-542. [李晓亮, 吴克宁, 冯喆, 等. 陆地表层系统分类研究进展——从土地类型到地球关键带类型[J]. 地理科学进展, 2022, 41(3): 531-542.]
- [28] Lin H, Hopmans J W, Richter D D. Interdisciplinary sciences in a global network of critical zone observatories[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 781-785.
- [29] Berner R A. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 323-326.
- [30] Amundson R, Richter D D, Humphreys G S, et al. Coupling between biota and earth materials in the critical zone[J]. *Elements*, 2007, 3(5): 327-332.
- [31] Chorover J, Troch P A, Rasmussen C, et al. How water, carbon, and energy drive critical zone evolution: The Jemez-Santa Catalina Critical Zone Observatory[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 884-899.
- [32] 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.]
- [33] Banwart S, Bernasconi S M, Bloem J, et al. Soil processes and functions in critical zone observatories: Hypotheses and experimental design[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 974-987.
- [34] Yang S H, Zhang G L. What is the critical zone?[J]. *Science*, 2021, 73(5): 33-36, 4. [杨顺华, 张甘霖. 什么是地球关键带

- [J]. 科学, 2021, 73(5): 33-36, 4.]
- [35] Anderson S P, Blum J, Brantley S L, et al. Proposed initiative would study Earth's weathering engine[J]. Transactions American Geophysical Union, 2004, 85(28): 265-269.
- [36] Francos N, McBratney A B, Field D J, et al. Valuing and integrating soil roles in assessing the capital dimension of soil security: An Australian case study[J]. Soil Security, 2024, 16: 100141.
- [37] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Cultivated land quality grade: GB/T 33469—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. [国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 耕地质量等级: GB/T 33469—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.]
- [38] Lü Y Z, Li B G. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. [吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.]
- [39] Li X, Zhang W J, Wu L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043-3056. [李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043-3056.]
- [40] Office of the Third National Soil Census Leading Group of the State Council. Technical Specification for the Evaluation of Cultivated Land Quality Grade in the Third National Soil Census[S]. 2025. [国务院第三次全国土壤普查领导小组办公室. 第三次全国土壤普查耕地质量等级评价技术规范[S]. 2025.]
- [41] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. [中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.]
- [42] 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.
- [43] Li X H. Using "random forest" for classification and regression[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2013, 50(4): 1190-1197. [李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(4): 1190-1197.]
- [44] You J W, Zou B, Zhao X G, et al. Estimating ground-level NO₂ concentrations across China's mainland using random forests regression modeling[J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 969-979. [游介文, 邹滨, 赵秀阁, 等. 基于随机森林模型的中国近地面 NO₂ 浓度估算[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 969-979.]
- [45] Zhang G L, Zhu Y G, Shao M A. Mechanisms of Earth's critical zone processes and sustainable utilization of soil-water resources[J]. Science China Earth Sciences, 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.]
- [46] Zhang G L, Song X D, Wu K N. Classification method of Earth's critical zone and case studies in China[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51(10): 1681-1692. [张甘霖, 宋效东, 吴克宁. 地球关键带分类方法与中国案例研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(10): 1681-1692.]
- [47] Zhou Y, Gu B J. The impacts of human activities on earth critical zone[J]. Earth Critical Zone, 2024, 1(1): 100004.
- [48] 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发展展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341-1358.]
- [49] Luo M, Guo L, Zhang H T, et al. Characterization of spatial distribution of soil organic carbon in China based on environmental variables[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 48-59. [罗梅, 郭龙, 张海涛, 等. 基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 48-59.]
- [50] Li M C, Yang Y R, Huang X M, et al. Research progress on the effects of different tillage methods and straw returning on black soil[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(4): 1251-1258. [李漾池, 杨玉荣, 黄修梅, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对黑土地影响的研究进展[J]. 分子植物育种, 2024, 22(4): 1251-1258.]
- [51] Fu J, Ma R M, Jia Y F, et al. Research progress in the effects of mechanical compaction on soil properties and soil erosion in farmland[J].

Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(S1): 27-36. [付娟, 马仁明, 贾燕峰, 等. 机械压实对农田土壤性质及土壤侵蚀的影响研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 27-36.]

(责任编辑: 卢萍)