

黑土地耕地质量认知理论研究综述

汤怀志, 刘湘君, 李保国, 黄元仿*

(中国农业大学土地科学与技术学院, 农业农村部华北耕地保护重点实验室, 北京 100193)

摘要:东北黑土地是地球上珍贵的土壤资源,也是我国粮食生产的核心区与“压舱石”。近几十年来黑土地耕地质量下降、“变薄、变瘦、变硬”问题突出,传统理论方法难以有效指导黑土地耕地质量调查评价、保护监测与治理实践,因此构建新的黑土地耕地质量认知理论方法已经成为社会共识和紧迫需求。系统梳理了耕地质量理论发展,结合黑土地耕地质量存在的紧迫问题,从土壤肥力、产能和功能等方面总结了多维度综合认知进展,提出黑土地耕地质量认知“以生产力为基础、土壤健康为趋势”的总体特征;立足黑土地系统的特殊性与复杂性,阐述了土壤属性、立地条件、生态环境、生产保障、经济社会等要素组成和关联,回顾了核心要素及其特征指标构建研究进展,认为黑土层厚度和土壤有机质等特色指标、土壤微生物多样性等新兴指标、土壤紧实度和土壤颜色等可快速获取指标为关注热点,促进理论研究更加注重框架的系统全面和关键特征的深度挖掘;在认知理论发展引领下,黑土地耕地质量的多功能框架构建、时空演替驱动因素和多源大数据融合研究成为3个重点方向,结合人工智能的黑土地耕地质量研究快速兴起。未来,推动黑土地耕地质量理论成果转化应用,仍需深化其对粮食现实产量与长期产能的解析能力,基于系统认知新范式的多尺度智能模型与大数据驱动决策支持将成为实现黑土地智慧管理和保护修复有效落地的关键路径。

关键词:黑土地;耕地质量;认知理论;多要素;多功能;大数据

doi: 10.13304/j.nykjdb.2025.0800

中图分类号:S151.9

文献标志码:A

文章编号:1008-0864(2025)12-0161-12

A Review of Cognitive Theories on Cultivated Land Quality in Black Soil Region

TANG Huaizhi, LIU Xiangjun, LI Baoguo, HUANG Yuanfang*

(Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The black soil in Northeast China is a globally precious soil resource, serving as the core region and the ballast for national grain production. In recent decades, the cultivated land quality in black soil region has declined markedly, characterized by soil thinning, nutrient depletion and compaction. These issues have rendered traditional theories and methods inadequate for effectively guiding investigation, evaluation, monitoring and management of black soil quality. Developing a new cognitive framework and methodology for black soil quality, which centered on enhancing grain productivity and promoting sustainable utilization, has become a shared societal goal and an urgent research priority. The theoretical evolution of cultivated land quality were systematically reviewed, in response to the pressing challenges in black soil regions, and advances were summarized in multi-dimensional cognition encompassing soil fertility, productivity and functionality. It identified the overarching characteristic of black soil quality cognition as “productivity as the foundation and soil health as the trajectory”. Building on the unique characteristics and complexity of black soil system, the composition and interconnections were elaborated on soil properties, site characteristics, ecological environment, production support and socio-economic factors, and progress was reviewed in developing core elements and their representative indicators. It highlighted that characteristic indicators (e.g., black soil layer thickness and soil organic matter), emerging indicators (e.g., soil

收稿日期:2025-09-30; 接受日期:2025-11-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1500201)。

联系方式:汤怀志 E-mail:tanghz@cau.edu.cn; *通信作者 黄元仿 E-mail:yfhuang@cau.edu.cn

microbial diversity) and rapidly measurable indicators (e.g., soil compaction and color) have become frontier research hotspots, driving theoretical studies toward greater systemic integration and deeper exploration of key features. Guided by advances in cognitive frameworks, 3 major research directions had emerged, including development of multifunctional frameworks for black soil quality, analysis of spatiotemporal evolution drivers and fusion of multi-source big data. In addition, research integrating artificial intelligence with black soil quality assessment was expanding rapidly. Future efforts to translate theoretical achievements in black soil quality into practice must prioritize bridging the gap between actual grain yields and long-term productivity potential. Multi-scale intelligent models grounded in new paradigm of systemic cognition, integrated with big data-driven decision-support systems, were expected to provide key pathways for the precision management, conservation, and restoration of black soil.

Keywords: black soil; cultivated land quality; cognitive theories; multi-factor; multi-functional; big data

中国东北黑土地是全球4大黑土分布区之一,横跨黑龙江省、吉林省、辽宁省及内蒙古自治区的东四盟地区^[1],其面积占全国耕地面积的1/4,贡献了全国1/4的粮食产量,承担着1/3的商品粮调出任务^[2]。长期的高强度利用使黑土地面临着“变薄、变瘦、变硬”等退化问题,严重威胁国家粮食安全和生态安全。国家高度重视黑土地保护及其耕地质量提升工作,《中华人民共和国黑土地保护法》等法律法规和《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》《国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025)》等规划明确要持续提升黑土地耕地质量,加强黑土地耕地质量保护与监测。“十四五”时期,科学技术部、农业农村部、中国科学院等多部门部署了“黑土地保护与利用科技创新”“黑土粮仓科技会战”等一系列重大科研项目,专设黑土地耕地质量研究任务,重点突破耕地质量调查评价监测等科技难题。国际上“土壤健康”“生态系统服务”与“智慧农业”等新兴理念不断发展,促进了我国耕地质量研究的纵深发展,体现出从短期粮食增产向长期系统稳定、从单一要素向多要素综合、从经验诊断到大数据智能感知等认知转型特征^[3-5]。因此,本文聚焦黑土地耕地质量认知理论,系统梳理耕地质量与黑土地耕地质量认知的发展历程并提炼核心内涵;分析土壤属性、立地条件、生态环境、生产保障与经济社会5大要素及其关键指标,从耕地质量多功能、时空演替驱动因素和大数据融合等方面系统介绍黑土地耕地质量评价的框架和方法,以期在黑土地保护与评价提供参考依据。

1 黑土地耕地质量概念内涵

1.1 耕地质量

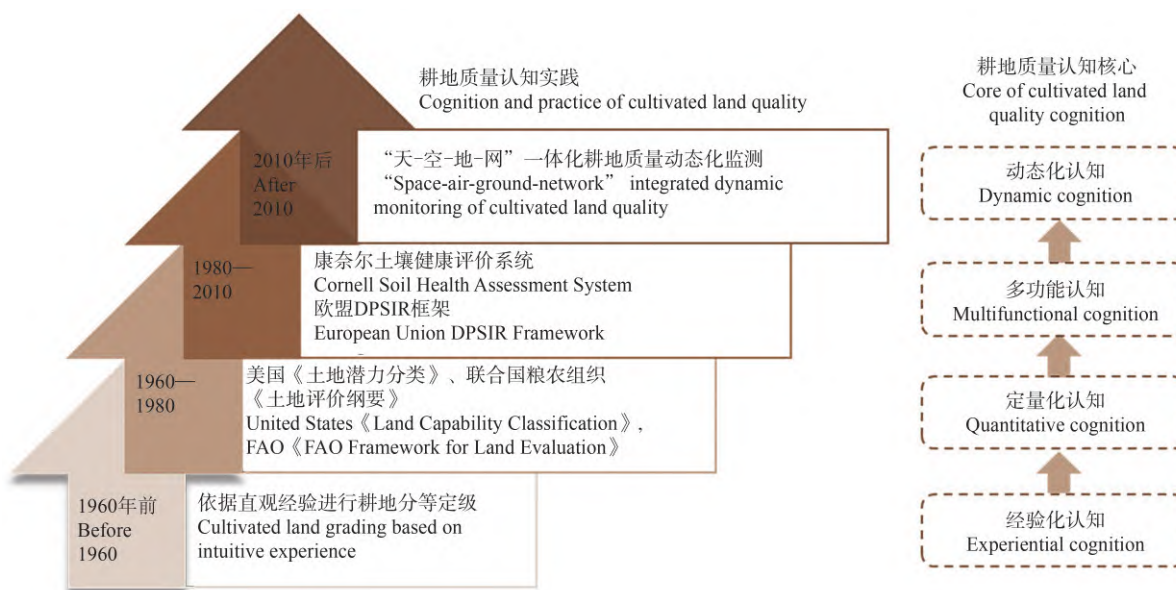
耕地质量认知起源于土壤学,早期主要聚焦

于耕地肥力,即耕地为农作物提供并协调水分、养分、空气和热量的能力;随着20世纪80年代联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)土地评价框架的确立,耕地质量内涵逐渐从单一的生产力范畴扩展为涵盖自然、利用、经济、生态等多维度的综合评价体系^[6]。我国国家标准《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)^[7]和《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)^[8]顺应了这一趋势,将耕地质量认知扩展为受光热、地形、土壤、人类活动及生物要素等“天、地、人、生”多因素共同影响的生产能力与可持续性的整体表征。另外,随着联合国可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)的提出与生态系统服务(ecosystem services, ES)理念的兴起,耕地质量在可持续发展中的重要性日益凸显,强调耕地不仅承担粮食生产功能,还在水源保护、生物多样性维持、气候调节等生态环境功能中发挥关键作用,这些功能是维护“生产-生态”系统协同的重要基础^[9]。

除耕地质量外,土壤肥力、土壤质量、土壤健康与土壤安全等概念也强调土壤在社会、生态系统和农业中的功能。这些概念间相互联系,但在目标上又有所区别。土壤肥力相对狭义,通常指土壤支持植物生长并提供必要养分和水分的能力^[10],是耕地质量中“生产能力”的重要组成部分。但相比耕地质量,其只聚焦于土壤理化性质,而忽视了耕地的管理条件与生态功能。土壤质量概念与耕地质量相近,但土壤质量的服务对象未聚焦到耕地,更多强调土壤在特定土地利用或生态系统中的作用,特别是在维持生物生产力、促进环境质量以及支持植物、动物与人类健康方面的能力。张福锁院士团队提出,土壤健康要进一步扩展到土壤功能的视野,指土壤作为维

持植物、动物和人类生存的重要生态系统的持续能力^[11-12]。相比早期的耕地质量概念,加入了土壤的生态能力与可持续性,但随着耕地质量内涵的深化,土壤健康被逐步纳入耕地质量评价中来。土壤安全作为新兴概念,将土壤视为一个整体生态系统,强调土壤资源的状态、功能以及制度保障,通常应用于涵盖人文、资本和法律层面的土壤管理政策中。耕地质量^[13-14]与其他相关概念相比,更关注耕地资源本底及其利用过程中的

性状变化,其概念与内涵也非一成不变,人类对耕地质量的认知仍随着理论发展与科技革新而演化。耕地质量认知的发展历程折射出了人类对土地资源科学理解的深化与拓展。从早期依赖经验判断土壤肥瘦到逐步形成以试验分析和制度化分类为基础的科学体系,再到多学科融合,兼顾生产与生态的综合评价,即国内外对于耕地质量的认知在不断深化,其内涵也不断丰富(图1)。



注:依据文献[11]改编绘制。

Note: Adapted and drawn based on reference [11].

图1 耕地质量认知的发展

Fig. 1 Development of cultivated land quality cognition

耕地质量最初依赖于直观经验进行分等定级评价,而随着实验室分析技术的普及,耕地质量评价进入量化阶段。土壤属性成为表征耕地质量的主要要素^[15]。目前,已建立了较成熟的评价框架,如美国的《土地潜力分类》(Land Capability Classification, LCC)^[16]、德国 Muencheberg 土壤质量等级系统结合“功能+威胁”系统^[17]以及联合国的《土地评价纲要》(Framework for Land Evaluation)^[18]。我国的系统性认知起步稍晚,虽然也经历了2次全国土壤普查^[19],但受国家粮食安全需求的驱动,我国早期的质量评价认知更强调与“粮食产量”的直接挂钩,核心是建立以土壤肥力和限制因子为基础的评价体系。总体而言,这一奠基阶段的耕地质量认知本质是将耕地质量

与土壤肥力和人为管理措施联系起来,服务于产能分级的静态评价。20世纪80年代后,随着工业化推进和可持续发展理念的兴起,耕地质量的认知范式发生了根本性转变^[20]。耕地除粮食生产功能外,还承担着水源涵养、污染物净化、生物多样性维持等多重生态和环境功能^[14]。

伴随着土壤健康概念的兴起,耕地质量认知不再局限于生产力,而开始转向对土壤质量和土壤健康的综合评价。

国际上,康奈尔大学健康研究团队开发的康奈尔土壤健康评价体系(Cornell Soil Health Assessment System)^[21]体现了这种从“单一产能”向“综合功能”的认知转型。进入21世纪,我国的耕地质量认知也发生了明显转变,开始广泛关注耕

地的生态修复、环境净化和社会服务功能^[14,22],此阶段耕地质量认知虽然仍以产能为核心,但也向着生产、生态、经济等多功能发展。徐明岗等^[23]提出建立基于气候类型、土壤类型、作物类型、管理方式等多层级评价指标体系,有助于进一步完善评价系统。目前,伴随大数据时代到来,耕地质量认知正经历第二次转变,由“静态评估”转向“动态监测”^[24]。耕地作为一个动态演变的系统,仅靠定期普查已无法满足精准保护的需求。因此,耕地质量开始转向“天-空-地-网”一体化监测和遥感与样点数据的时空融合分析。张文才等^[25]基于“连续性、抗逆性、高产性、稳产性、生态性”为核心的监测理论框架,构建了多维度耕地质量监测体系,依次设计了“天-空-地-网”一体化监测技术路径。耕地质量认知的第二次转变推动耕地质量从静态评价向动态监测的综合升级。

1.2 黑土地耕地质量认知的特殊性

黑土地在保障国家安全与维护区域生态平衡中具有重要地位,其耕地质量认知发展不仅体现了我国耕地质量认知由单一产能向综合评价的转变。早期黑土地耕地质量认知延续了传统的土壤学认知,侧重于定性或定量描述耕地的高产、高肥力的特征,并逐步过渡到全面的系统评价,如汪景宽等^[26]对不同开垦年限黑土耕地质量的评价;马强等^[27]分析了土壤理化性质的空间分布。这种静态认知是必要的基础,但它无法回答“质量下降过程”这一核心问题,难以支撑退化防控的现实。进入21世纪后,在黑土地退化问题逐渐加剧的背景下^[28],黑土地耕地质量认知由生产导向转向生态保护与退化防控,形成集“产能、生态功能与社会服务”于一体的多功能融合体系^[29]。从黑土地“变薄、变瘦、变硬”的退化风险出发,耕地质量评价内容已不仅包括土壤肥力与管理水平,还涵盖碳储存能力、土壤结构稳定性、生态环境承载力与社会可持续利用水平。而随着遥感技术与智能算法的普及,黑土地耕地质量评价走向智能化与动态化。赵宁博等^[30]利用航空高光谱反演评价指标构建了耕地质量综合评价模型,模型评价结果与地面验证结果的一致率达到97.6%。Wang等^[31]构建了耕地系统韧性评估框架,开展了2000—2019年黑土区耕地韧性评价。这些研究突破了传统静态评价模式的局限,为黑土地耕地质量的动态监测与保

护提供了重要支持。

长期高强度开发利用导致黑土地出现的“变薄、变瘦、变硬”问题日益严峻,这一严峻现实迫使学界和政策界开始反思传统的静态评估模式,为应对黑土地退化和未来风险管理需求,以可持续利用为理论基础的耕地质量动态认知成为主流。黑土地耕地质量认知从关注生产力属性扩展到关注动态退化风险,并进一步拓展到多功能与健康为核心的耕地质量系统认知,理论研究也从土壤本身扩展到“水土气生”生态系统,并强调通过人为干预或工程技术手段恢复或提升黑土地耕地质量。这一趋势推动了黑土地耕地质量评价体系的转变,为完善黑土地保护政策和技术规范、构建全国耕地质量评价体系提供了具有区域特色的经验参考。

2 黑土地耕地质量的构成要素与关键指标

2.1 核心构成要素分析

科学地认知和评价黑土地耕地质量需先明确其内涵构成。黑土地耕地质量并非单一维度,而是由土壤属性、立地条件、生态环境、生产保障与经济社会等多个核心要素构成的复杂系统^[32]。

土壤属性是耕地质量的内在基础,决定了土壤的物理结构、化学性质和生物活性,进而共同调控水分渗透、养分储存与释放、根系发育等关键过程^[33-34]。肥沃的土壤通常结构疏松、有机质丰富,能够有效保水保肥。然而,不合理的利用导致黑土地出现土壤酸化、有机质含量下降、土壤板结等问题,破坏了其优良的物理结构,降低了养分有效性,抑制了微生物活性,直接影响黑土地的生产力^[28]。

立地条件主要指耕地所处的自然地理环境,包括地形地貌、空间位置及周边景观特征。地形坡度、海拔、地表起伏等指标直接影响水土资源的分布与利用效率。徐英德等^[35]将东北黑土地等划分为6大类型区,这一分类综合考虑了区域的地形地貌和主要土壤分布特征。在黑土地的坡耕地,立地条件是决定土壤侵蚀速率的关键因素,直接关系到“变薄”问题的严重程度^[1]。地块的连通性、形状等也影响着大型农机的作业效率和保护性耕作技术的应用成本^[36]。

生态环境变化通过生物地球化学循环、生态服

务功能及外部环境胁迫影响耕地质量^[37],对黑土地产生双向调控作用。健康的生态系统对黑土地至关重要,它们能有效维持区域气候、水文过程、拦截径流、减少风蚀水蚀,为土壤生物提供栖息地,从而促进有机质分解和养分循环^[38]。东北地区具有季节性干旱、冻融侵蚀等气候特点,以及可能存在的农药化肥残留和新兴污染物等都会对黑土地脆弱的生态平衡构成威胁,加速其功能退化^[39]。

生产保障能力反映了人类通过技术和管理手段对黑土地的干预水平,是影响黑土地退化与修复的关键人为因素^[28]。灌排设施的完善程度决定了其稳产能力^[40];机械化水平影响作业效率,但不当操作会加剧土壤压实^[41];施肥策略不仅影响当季产量,更关系到土壤养分的长期平衡与酸化风险^[28];而耕作制度的选择会直接影响黑土地有机

质的消耗与积累速率以及土壤结构的健康状况^[42-43]。

经济社会因素通过资源配置、政策导向和主体行为间接影响黑土地质量^[1]。在东北黑土地,追求短期经济效益可能导致掠夺式经营,加速地力透支;农村劳动力结构变化、土地流转规模与稳定性则影响保护性耕作等新技术的被采纳意愿与实施效果^[44];国家和地方的生态补偿、保护性耕作补贴等政策激励是引导农户参与黑土地保护的关键外部驱动力^[45]。

2.2 关键指标挖掘

基于核心构成要素,识别出关键指标,进而建立准确、全面的耕地质量评价指标体系,如表1所示。

表1 耕地质量评价指标体系
Table 1 Indicator system for cultivated land quality evaluation

要素 Factor	指标 Indicator
土壤属性 Soil property	有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH、有效土层厚度、耕层厚度、黑土层厚度、耕层质地、质地构型、土壤容重等 Organic matter, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, pH, effective soil layer thickness, arable layer thickness, thickness of black soil layer, arable layer texture, texture configuration, soil bulk density etc.
立地条件 Site characteristic	地形部位、海拔、坡度、坡向、地貌类型、成土母质、侵蚀强度、农田林网化程度等 Terrain position, elevation, slope gradient, slope aspect, landform type, soil parent material, erosion intensity, degree of field forest network, etc.
生态环境 Ecological environment	积温、降雨量、干燥度、归一化植被指数、生物多样性、清洁程度等 Accumulated temperature, rainfall, aridity, normalized difference vegetation index, biodiversity, cleaning level etc.
生产保障 Production support	灌溉能力、排水能力、轮作制度、田块集中度、秸秆还田率等 Irrigation capacity, drainage capacity, crop rotation system, field concentration degree, straw return rate, etc.
经济社会 Economic society	人均GDP、农村劳动力教育水平、农产品价格、肥料投入率、农药投入率等 Per capita GDP, education level of rural labor force, agricultural product price, fertilizer input rate, pesticide input rate, etc.

黑土地在高强度利用下正面临着“变薄、变瘦、变硬”等退化问题。第二次土壤普查显示,黑龙江省和吉林省已有近4成耕地退化为黑土层<30 cm的“薄层黑土”。在自然条件下,需200~400年才能形成1 cm黑土,如今黑土层正以年均1~2 cm的速度被剥蚀^[46];长期“重用轻养”的粗放农业管理措施,使黑土地耕作层的有机质含量下降约30%,部分地区甚至下降了50%^[34];过量的化肥、农药投入导致土壤酸化和土壤板结,部分地区土壤容重甚至超过1.4 g·cm⁻³^[35]。耕作层厚度、土

壤有机质和土壤容重等是表征黑土地退化的关键指标,其中,耕作层厚度决定了土壤肥力水平与可持续耕作潜力;土壤有机质是黑土地肥力的核心,其含量直接关联养分供给能力与土壤结构稳定性;土壤容重可直观表征土壤板结程度以及作物根系发育与水肥传导效率,三者协同,为黑土地退化解析及修复措施制定提供关键依据。

部分黑土地耕地质量评价研究是用耕作层厚度来表征黑土地“变薄”。姚东恒等^[8]遵循国家标准,利用特尔菲法选取了16个指标,建立了东北

典型黑土区耕地质量评价指标体系。刘湘君等^[40]根据梨树县耕地实际情况,构建了以产能为核心的耕地质量评价指标体系,厚度指标选择了耕作层厚度和有效土层厚度。耕作层厚度受耕作时翻耕深度的影响较大,在东北地区,广泛使用的为铧式犁,故耕作层厚度不是“变薄”而是“变厚”。有效土层厚度的获取较困难,作为黑土地质量特征指标的难度较大。黑土层厚度能客观反映黑土地土壤的养分状况,是判定黑土类型的重要指标^[47-48];还有研究基于黑土地“破皮黄”现象尝试用“土壤颜色”作为快速识别指标,为长时间序列、大空间范围的黑土地变化监测提供了新路径。李骞等^[49]基于黑土厚度和土壤理化性质的野外调查,构建了用黑土层厚度评价土壤生产力的方法。Tang等^[50]基于主、客观结合的指标筛选方法,形成了由3个层级包含黑土层厚度、有机质和容重等18个指标所组成的黑土地耕地质量综合评价指标体系。但也有研究没有完全选取关键指标来构成评价指标体系,Wang等^[51]在东北黑土地全区构建了土壤性质、耕地生产力、生态环境和社会经济的耕地质量评价框架,其仅选择了土壤有机质含量,而忽略了土壤容重和黑土层厚度。王建华等^[52]在黑龙江省海伦市选用PSR(pressure-state-response)模型,将包括耕地环境压力、耕地现状质量以及土地利用类型在内的多个指标整合成一个综合评价体系,其选择的关键指标包括有效土层厚度和有机质含量。赵建军等^[53]结合吉林省耕地实际情况,选取了海拔、坡度、积温、土壤肥力指数、农业现代化水平、粮食单产、年降雨量作为评价指标,构建了吉林省耕地质量的评价指标体系。

综上所述,现有研究的评价框架由于针对不同东北黑土地地区而有所不同,大多评价指标体系难以刻画黑土地“隐性特征”的退化,如生物多样性锐减、养分循环与净化功能面临的危机等。鉴于此,朱永官院士团队明确了土壤生物多样性在土壤健康维持与调控中具有重要作用^[54],可为建立更科学全面的土壤健康评估指标和土壤健康调控与培育技术研发提供依据。Niu等^[55]尝试绘制了东北黑土地土壤的微生物多样性分布。刘雅杰等^[56]对黑土地的微生物多样性进行了评价,并且该指标是该区域农业生产的主要障碍因子。对于可快速获取的指标,冉恩华等^[57]提出,土壤紧实

度可表征土壤压实程度,可用于构建全面包含土壤物理学和土壤力学指标耕地质量评价体系。Lu等^[58]开发了土壤颜色反演的方法,发现了土壤颜色和土壤有机质相关性较高,可以作为耕地质量评价指标。这些前沿探索证明了新型指标的有效性,为构建更全面的评价指标体系提供了重要参考。

3 黑土地耕地质量评价的框架与方法

当前黑土地耕地质量研究主要聚焦黑土地多功能框架构建、时空演替驱动因素、大数据融合与处理等方向。

3.1 多功能框架构建

随着研究的不断深入,人们逐渐意识到耕地系统是自然生态系统与人类社会经济系统紧密结合的半自然的生态系统,不仅要满足粮食生产的需求,还要提供生态功能以保障耕地可持续利用。近年来,黑土地研究不再局限于单一的生产功能,而是逐步向土壤养分维持、生物多样性等多功能拓展。

傅伯杰院士团队构建了生产力、碳储量、土壤水分和养分的生态系统多功能框架,揭示了旱地生态系统的多功能性与人类管理之间的关系^[59]。Zhang等^[60]从耕地供需视角分析了多尺度、多功能耕地供需关系。胡月明等^[61]理清了耕地质量、耕地资源演进过程,基于“要素-功能-价值”系统认知框架提出了耕地“生产-生态-生活”功能协同转换关系,构建了“二维要素-三重功能-多元价值”的耕地资源认知系统。叶思菁等^[62]在此认知框架基础上进行了深化,基于地理空间视角,将耕地质量划分为自然层、生计层、制度层、意识层,对应到生态系统服务、生产与社会保障等功能。Tang等^[50]构建了“功能+威胁”的耕地质量综合评价框架,从初级生产力、土壤养分和维持、基础设施调节、生物多样性供给、节本增效等功能及土壤侵蚀、养分下降等多方面评估黑土地耕地质量,为黑土地耕地可持续利用提供支撑。Liu等^[63]从生产、社会保障、生态、文化等功能开展了耕地多功能权衡/协同研究,发现这些功能具有正向的协同作用。耕地多功能框架研究当前仍处于发展和完善阶段,尽管由于认知视角、关注功能不同在认知框架上未达成共识,但快速推动了黑土地耕地质量评价从单一产能视角向涵盖生态维系、社会服

务等多功能系统性认知框架深刻转变,不仅深化了对黑土地复杂人地耦合机制的理解,也为协调保护与利用矛盾、实现可持续发展提供了理论依据与方法支撑。

3.2 时空演替驱动因素

耕地是半人工、半生态的复杂系统,其质量时空演替驱动因素受气候、土壤、地形、农业管理等多种要素的影响。由于各驱动因素间存在复杂的交互作用,且不同时空尺度下主导因子存在显著差异,如何精准解析各要素的贡献机制与耦合效应始终是耕地质量研究领域亟待突破的核心难题。

Li等^[64]基于净初级生产力的人类占用框架,估算了2001—2015年黑龙江省的耕地利用时空演化格局,采用空间自相关分析、相关分析识别耕地质量变化的驱动因素,发现化肥、农药和农用塑料制品显著影响耕地可持续利用。Wang等^[31]基于韧性理论构建了耕地质量评估框架,采用秩和比综合评价法分析了2000—2019年辽宁省及其各市的耕地质量变化,发现不同尺度下的耕地质量驱动因素不同。Gao等^[65]针对黑土地耕地退化驱动因素复杂多样、相互耦合交织的难题,研制了地理交叉收敛映射空间因果推断模型,从时间变化和空间差异解析了耕地质量退化的原因。Liao等^[66]整合GEE(google earth engine)、机器学习和Shapley分析构建了耕地质量退化驱动因素识别框架,提出了基于植被的恢复解决方案,包括深根作物、轮作和间作以及秸秆掺入,以解决不同类型的耕地质量退化问题。驱动因素阈值同样是学者们关注的焦点,Song等^[67]在吉林省西部建立了综合生态风险评估模型,采用约束线法和弹性分析分析了驱动因素对耕地质量变化的响应阈值。Liu等^[68]以辽宁省昌图县为典型区,分析了自然因素、景观因素对土壤有机碳变化的响应阈值,发现景观因素对土壤有机碳变化以交互作用为主。尽管诸多学者开展了黑土地耕地质量时空变化驱动因素分析的研究,但黑土地耕地质量变化是一个多因素耦合驱动的复杂过程。未来需进一步从多因素视角出发,深化耕地质量时空演替驱动因素的识别方法,为黑土地耕地改良、治理措施提供依据。

3.3 大数据融合与处理

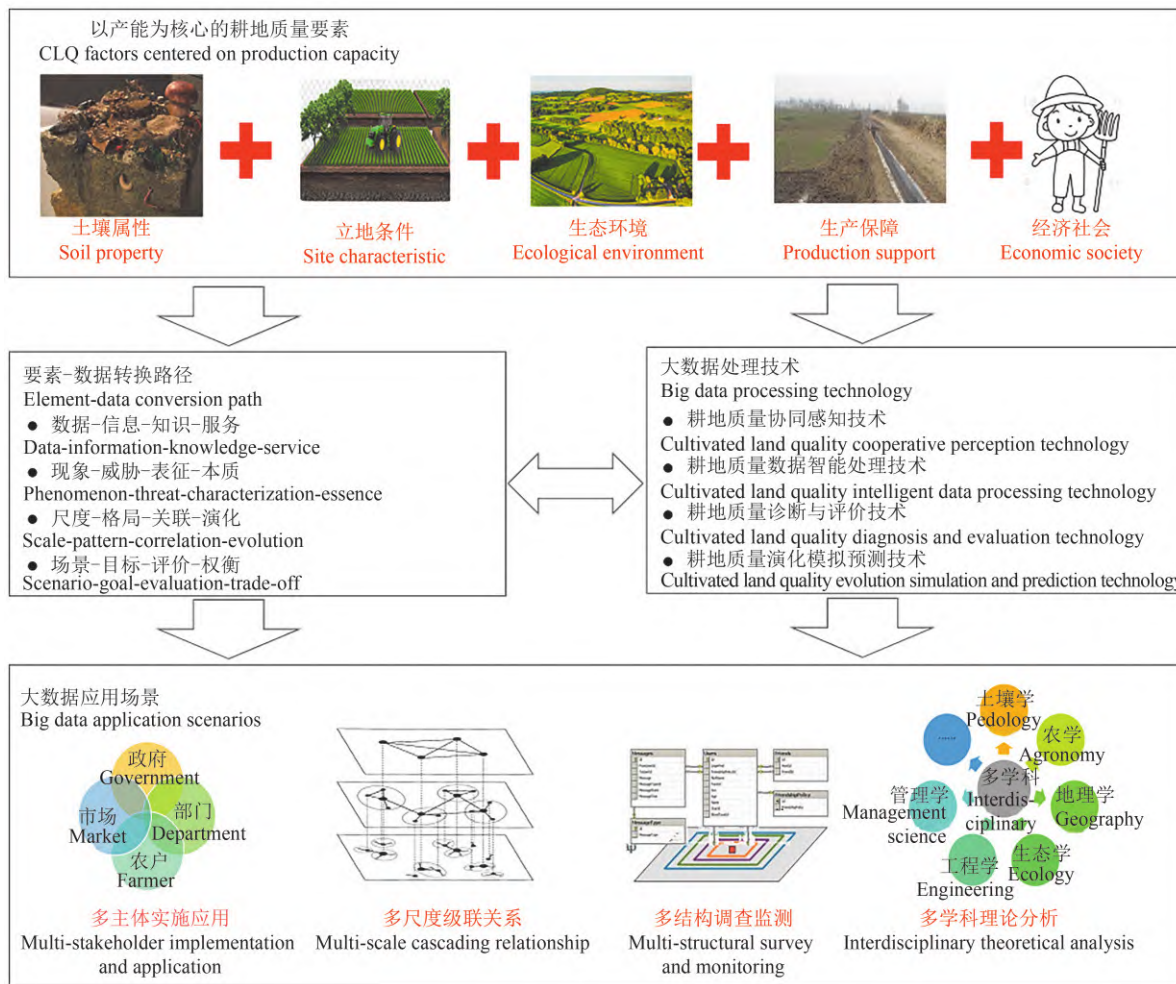
随着地面调查、原位监测、空天遥感、经济社

会大数据以及高通量测序等新兴检测技术的快速发展,传统以实地采样为主要获取手段的少数因子“小数据”评价正在向“空天地网”多源数据融合的数据驱动方向发展,耕地质量的部分数据已经呈现出大规模、多样化、动态性的大数据特征。

Yao等^[69]基于分布式技术研制了耕地大数据处理方法,能够实现数据预处理、分布式R树索引、空间范围查询、基于地图瓦片金字塔模型可视化等功能。Babaeian等^[70]在2021年建立了一套基于遥感影像、无人机影像、田间监测一体化数据监测体系,将土壤湿度监测误差降低至 $0.02\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。Wei等^[71]结合人工智能构建了“天-空-地-网”粮食产量监测技术框架,对作物产量进行了相对精确的估计。Zeng等^[72]使用土壤水分成品数据集、原位监测等耕地质量大数据开展了多源数据融合,发现多源数据融合提升了原有数据精度,更能表征耕地质量变化。基于机器学习、人工智能等技术的大数据融合、处理方法丰富了耕地质量研究技术方法。Tang等^[32]从大数据视角建立了黑土地耕地质量大数据处理技术体系,提出了要素-数据转换路径,建立了耕地质量协同感知、智能处理、诊断评价、模拟预测分析技术体系,为分析耕地质量大数据提供了技术路径(图2)。由于耕地质量认知、评价目的、评价对象和实践应用场景等基本关系尚不清晰,耕地质量数据特征和适用技术方法不健全、不匹配的问题突出,未来人工智能技术,尤其是大模型与深度学习算法,可以通过对海量耕地质量数据的自主学习与推理,为黑土地的智慧化保护、精准化治理提供智能的决策支持与技术。

4 展望

黑土地耕地质量的科学认知体系正逐步完善,它历经了从经验化判断到量化评价、从单一产能导向到多要素、多功能融合,从静态评估到“天-空-地-网”动态监测的多阶段演进,在要素解析、关键指标挖掘、多功能框架探索、驱动机制分析及大数据融合等方面取得了明显进展,人工智能的引入将进一步推动黑土地耕地质量认知向更高精度和更强解析能力发展。未来研究应破解当前“一刀切”指标体系,亟需优化耕地质量指标,攻关耕地质量指标快速感知技术,进一步推动耕



注:依据文献[32]改编绘制。

Note: Adapted and drawn based on reference [32].

图2 黑土地耕地质量大数据处理技术

Fig. 2 Big data processing technology for cultivated land quality of black soil

地质量认知理论向实践转化,突破其对粮食产量与产能的精准解析能力,特别是组成要素的尺度适应性问题。在田块尺度,需加强土壤物理、化学、生物等指标的监测与机理挖掘;在区域尺度,应融合多源数据,结合土壤类型、耕地利用类型数据与遥感影像数据,实现区域耕地质量快速评估和动态跟踪。通过多尺度耦合揭示“变薄、变瘦、变硬”退化过程的驱动机制与阈值响应,构建耕地质量动态模拟与预警模型,推动耕地质量评价从“现状诊断”向“未来风险预警”转变。

黑土地保护利用是一项复杂的系统工程,亟需打破学科界限,促进土壤学、自然资源学、土地工程学、生态学与信息科学的交叉融合,以系统认知理论为指导,探索不同保护性耕作模式与激励措施下的黑土地耕地质量提升与可持续利用路

径,推动黑土地研究从单一的“质量评价”向“智慧管理”与“精准决策”的新范式转型,为落实“藏粮于地”战略、实现国家粮食安全与生态安全的“双安”目标提供科学支撑。

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 X Z, ZOU W X. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China [J]. Bull. Chin. Acad. Sci., 2018, 33(2): 206-212.

[2] 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.
LI B G, LIU Z, HUANG F, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China [J]. Bull. Chin. Acad. Sci., 2021, 36(10): 1184-1193.

- [3] HE M, XIONG X, WANG L, *et al.* A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils [J/OL]. *J. Hazard. Mater.*, 2021, 414: 125378 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378>.
- [4] JANZEN H H, JANZEN D W, GREGORICH E G. The 'soil health' metaphor: illuminating or illusory? [J/OL]. *Soil Biol. Biochem.*, 2021, 159: 108167 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108167>.
- [5] QIAO L, WANG X, SMITH P, *et al.* Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change [J]. *Nat. Clim. Change*, 2022, 12(6): 574-580.
- [6] 奉婷, 张凤荣, 李灿, 等. 基于耕地质量综合评价的县域基本农田空间布局[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 200-210, F0003.
FENG T, ZHANG F R, LI C, *et al.* Spatial distribution of prime farmland based on cultivated land quality comprehensive evaluation at county scale [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2014, 30(1): 200-210, F0003.
- [7] 李团胜, 张艳, 闫颖, 等. 基于农用地分等成果的陕西周至县耕地粮食生产能力测算[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 193-198.
LI T S, ZHANG Y, YAN Y, *et al.* Calculation of farmland grain potential productivity of Zhouzhi county based on agricultural land classification [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2012, 28(15): 193-198.
- [8] 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(中英文)*, 2020, 28(1): 104-114.
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]. *Chin. J. Eco-Agric.*, 2020, 28(1): 104-114.
- [9] LEHMANN J, BOSSIO D A, KÖGEL-KNABNER I, *et al.* The concept and future prospects of soil health [J]. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2020, 1(10): 544-553.
- [10] TANG L. Soil fertility, plant nutrition and nutrient management [J/OL]. *Plants*, 2025, 14(1): 34 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/plants14010034>.
- [11] 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.
ZHANG J Z, LI Y Z, LI Y, *et al.* Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2022, 59(3): 603-616.
- [12] 张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 879-891.
ZHANG J Z, WANG G Z, LI Y Z, *et al.* Re-thinking the establishment of the farmland soil health assessment system [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2024, 61(4): 879-891.
- [13] 沈仁芳, 陈美军, 孔祥斌, 等. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1210-1217.
SHEN R F, CHEN M J, KONG X B, *et al.* Conception and evaluation of quality of arable land and strategies for its management [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2012, 49(6): 1210-1217.
- [14] 杜国明, 刘彦随, 于凤荣, 等. 耕地质量观的演变与再认识[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 243-249.
DU G M, LIU Y S, YU F R, *et al.* Evolution of concepts of cultivated land quality and recognition [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2016, 32(14): 243-249.
- [15] HOLLIDAY G H, DEUEL L E. Glossary of soil science terms [J]. *SSSA*, 1975, 5:9 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000050009x>.
- [16] KLINGEBIEL A A, MONTGOMERY P H. Land-capability classification: agriculture handbook No. 210 [J]. *US Department Agric.*, 1961, 1:165-178.
- [17] MUELLER L, SCHINDLER U, SHEPHERD T G, *et al.* The muencheberg soil quality rating for assessing the quality of global farmland [C]// *Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia*. Cham: Springer International Publishing, 2013: 235-248.
- [18] 李文娟. 土地评价方法概述[J]. *农业区划*, 1989, 10(1): 45-50.
- [19] 鲁明星, 贺立源, 吴礼树. 我国耕地地力评价研究进展[J]. *生态环境*, 2006, 15(4): 866-871.
LU M X, HE L Y, WU L S. Fertility evaluation of cultivated land in China: a review [J]. *Ecol. Environ.*, 2006, 15(4): 866-871.
- [20] LARSON W E, PIERCE F J. Conservation and enhancement of soil quality [J]. *Environ. Sci. Agric. Food Sci.*, 1991, 3:268-379.
- [21] 盛丰. 康奈尔土壤健康评价系统及其应用[J]. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1289-1296.
SHENG F. Introduction and application of Cornell soil health assessment [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2014, 45(6): 1289-1296.
- [22] 孔祥斌, 张蚌蚌, 温良友, 等. 基于要素-过程-功能的耕地质量理论认识及其研究趋势[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(9): 14-20.
KONG X B, ZHANG B B, WEN L Y, *et al.* Theoretical framework and research trends of cultivated land quality based on elements-process-function [J]. *China Land Sci.*, 2018, 32(9): 14-20.
- [23] 徐明岗, 段英华, 白珊珊, 等. 基于长期定位试验的土壤健康研究与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7): 1253-1261.
XU M G, DUAN Y H, BAI S S, *et al.* Research and prospects for soil health based on long-term experiments in arable land of China [J]. *J. Plant Nutr. Fert.*, 2024, 30(7): 1253-1261.
- [24] 杨继文, 赵鹏飞, 滕浩, 等. 耕地质量遥感监测的研究进展及展望[J]. *智慧农业导刊*, 2025, 5(8): 60-64.
- [25] 张文才, 赵晶, 陈文广, 等. “五性”协同的“天-空-地-网”一体化耕地质量监测体系构建[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(13): 12-21.
ZHANG W C, ZHAO J, CHEN W G, *et al.* Construction of an integrated “space-air-ground-network” cultivated land quality monitoring system based on five key characteristics [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2025, 41(13): 12-21.
- [26] 汪景宽, 王铁宇, 张旭东, 等. 黑土土壤质量演变初探 I: 不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律[J]. *沈阳农业大学学报*, 2002, 33(1): 43-47.
WANG J K, WANG T Y, ZHANG X D, *et al.* An approach to the changes of black soil quality (I): changes of the indices of black soil with the year(s) of reclamation [J]. *J. Shenyang*

- Agric. Univ., 2002, 33(1): 43-47.
- [27] 马强, 宇万太, 赵少华, 等. 黑土农田土壤肥力质量综合评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1916-1920.
MA Q, YU W T, ZHAO S H, *et al.*. Comprehensive evaluation of cultivated black soil fertility [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(10): 1916-1920.
- [28] 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 X Z, LI N. Research progress of black soil in Northeast China [J]. Sci. Geogr. Sin., 2018, 38(7): 1032-1041.
- [29] 杨瑞珍, 陈印军. 东北地区耕地质量状况及变化态势分析[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(6): 19-24.
YANG R Z, CHEN Y J. Analysis of quality of cultivated and land change trend in northeast area [J]. Chin. J. Agric. Resour. Reg. Plan., 2014, 35(6): 19-24.
- [30] 赵宁博, 杨佳佳, 赵英俊, 等. 基于航空高光谱反演的黑土地质量综合评价研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(11): 88-98.
ZHAO N B, YANG J J, ZHAO Y J, *et al.*. Comprehensive evaluation of black soil quality based on aerial hyperspectral inversion [J]. J. Agric. Sci. Technol., 2021, 23(11): 88-98.
- [31] WANG Y, JIANG Y, ZHU G. 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]. Chin. Geogr. Sci., 2024, 34(1): 168-180.
- [32] TANG H, NIU J, NIU Z, *et al.*. System cognition and analytic technology of cultivated land quality from a data perspective [J]. Land, 2023, 12(1): 237 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/land12010237>.
- [33] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
LIU Z F, FU B J, LIU G H, *et al.*. Soil quality: concept, indicators and its assessment [J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(3): 901-913.
- [34] 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地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.
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]. Chin. J. Soil Sci., 2021, 52(3): 695-701.
- [35] 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 Y D, PEI J B, LI S Y, *et al.*. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of Northeast China [J]. Chin. J. Soil Sci., 2023, 54(2): 495-504.
- [36] 施釉超, 金晓斌, 梁鑫源, 等. 江苏省耕地集聚连通性时空特征与分类优化策略[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 238-248.
SHI Y C, JIN X B, LIANG X Y, *et al.*. Spatial-temporal characteristics and strategies for the classification and optimization of cultivated land agglomeration connectivity in Jiangsu province of China [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2024, 40(11): 238-248.
- [37] 于贵瑞, 王永生, 杨萌. 生态系统质量及其状态演变的生态学理论和评估方法之探索[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 865-877.
YU G R, WANG Y S, YANG M. Discussion on the ecological theory and assessment methods of ecosystem quality and its evolution [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2022, 33(4): 865-877.
- [38] 赵瑞, 吴克宁, 刘亚男, 等. 基于生态系统服务功能视角的县域尺度土壤健康评价[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 269-279.
ZHAO R, WU K N, LIU Y N, *et al.*. Soil health evaluation at a county level based on soil ecosystem service function [J]. Chin. J. Soil Sci., 2020, 51(2): 269-279.
- [39] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 50-54.
LI F P, LI J Y, XU Z X. The status quo of black soil degradation and water and soil loss in Northeast China [J]. Res. Soil Water Conserv., 2006, 13(3): 50-54.
- [40] 刘湘君, 刘长河, 徐圣贤, 等. 基于赋权-Topsis模型组合的梨树县耕地质量评价及障碍因子分析[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(10): 10-24.
LIU X J, LIU C H, XU S X, *et al.*. Cultivated land quality evaluation and obstacle factor analysis of Lishu county based on the weighting and Topsis model combination [J]. J. China Agric. Univ., 2025, 30(10): 10-24.
- [41] 王庆杰, 曹鑫鹏, 王超, 等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 1-15.
WANG Q J, CAO X P, WANG C, *et al.*. Research progress of No/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Mach., 2021, 52(10): 1-15.
- [42] 李保国, 任图生, 王贵满, 等. 黑土地保护梨树模式的时代意义与展望[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(10): 1-9.
LI B G, REN T S, WANG G M, *et al.*. Black soil conservation in Northeast China: significance and outlook of the Lishu model [J]. J. China Agric. Univ., 2025, 30(10): 1-9.
- [43] 王金武, 唐汉, 王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 1-21.
WANG J W, TANG H, WANG J F. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Mach., 2017, 48(5): 1-21.
- [44] 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.
LI B G, LIU Z, HUANG F, *et al.*. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China [J]. Bull. Chin. Acad. Sci., 2021, 36(10): 1184-1193.
- [45] 刘洪彬, 李顺婷, 吴梦瑶, 等. 耕地数量、质量、生态“三位一体”视角下我国东北黑土地保护现状及其实现路径选择研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 544-552.
LIU H B, LI S T, WU M Y, *et al.*. Current situation and perspectives of black soil protection from the integrated angle of quantity, quality, and ecology in Northeast China [J]. Chin. J. Soil Sci., 2021, 52(3): 544-552.
- [46] GONG H, MENG D, LI X, *et al.*. Soil degradation and food security coupled with global climate change in northeastern China [J]. Chin. Geogr. Sci., 2013, 23(5): 562-573.
- [47] 刘凯, 戴慧敏, 刘国栋, 等. 基于土壤有机碳含量的黑土层厚度预测及影响因素分析[J]. 物探与化探, 2024, 48(5): 1368-1376.

- LIU K, DAI H M, LIU G D, *et al.* Organic carbon content-based prediction and influencing factors of black soil layer thicknesses [J]. *Geophys. Geochem. Explor.*, 2024, 48(5): 1368-1376.
- [48] 张新荣, 焦洁钰. 黑土形成与演化研究现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 553-568.
- ZHANG X R, JIAO J Y. Formation and evolution of black soil [J]. *J. Jilin Univ. (Earth Sci.)*, 2020, 50(2): 553-568.
- [49] 李鹭, 段兴武. 利用黑土层厚度评价东北黑土区土壤生产力: 以鹤北小流域为例[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 154-159.
- LI A, DUAN X W. Productivity assessment for black soil region in northeastern China using black soil thickness: a case study of Hebei watershed [J]. *Bull. Soil Water Conserv.*, 2014, 34(1): 154-159.
- [50] TANG H, ZHANG Y, LIU Q, *et al.* Comprehensive evaluation of cultivated land quality in black soil of Northeast China: emphasizing functional diversity and risk management [J/OL]. *Appl. Sci.*, 2025, 15(7): 3757 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/app15073753>.
- [51] WANG M, LIU X, LIU Z, *et al.* Evaluation and driving force analysis of cultivated land quality in black soil region of Northeast China [J]. *Chin. Geogr. Sci.*, 2023, 33(4): 601-615.
- [52] 王建华, 陶培峰, 袁月, 等. PSR框架下的黑龙江省海伦市耕地质量评价[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 525-532.
- WANG J H, TAO P F, YUAN Y, *et al.* PSR-based evaluation of the cultivated land quality in Hailun city of Heilongjiang province [J]. *Geol. Resour.*, 2020, 29(6): 525-532.
- [53] 赵建军, 张洪岩, 王野乔, 等. 基于AHP和GIS的省级耕地质量评价研究: 以吉林省为例[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 70-75.
- ZHAO J J, ZHANG H Y, WANG Y Q, *et al.* Research on the quality evaluation of cultivated land in provincial area based on AHP and GIS: a case study in Jilin province [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2012, 43(1): 70-75.
- [54] 孙新, 李琪, 姚海凤, 等. 土壤动物与土壤健康[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1073-1083.
- SUN X, LI Q, YAO H F, *et al.* Soil fauna and soil health [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2021, 58(5): 1073-1083.
- [55] NIU J, TANG H, LIU Q, *et al.* Determinants of soil bacterial diversity in a black soil region in a large-scale area [J/OL]. *Land*, 2022, 11(5): 731 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/land11050731>.
- [56] 刘雅杰, 刘战勇, 张向前, 等. 大兴安岭南麓黑土区阿荣旗耕地质量评价与障碍因素分析[J]. 农学学报, 2024, 14(7): 58-66.
- LIU Y J, LIU Z Y, ZHANG X Q, *et al.* Evaluation of cultivated land quality and analysis of obstacle factors in arong banner black soil area at southern foot of daxing' an mountains [J]. *J. Agric.*, 2024, 14(7): 58-66.
- [57] 冉恩华, 彭伟, 郑月姮, 等. 农田土壤压实表征指标及其检测方法研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(5): 1008-1019.
- RAN E H, PENG W, ZHENG Y H, *et al.* Research advances on indicators and detecting methods of arable land compaction [J]. *J. Plant Nutr. Fert.*, 2024, 30(5): 1008-1019.
- [58] LU Y, WANG X, WANG M, *et al.* Soil color mapping based on Munsell system in the northeast of China [J/OL]. *Geoderma*, 2023, 439: 116669 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116669>.
- [59] NIU W, DING J, FU B, *et al.* Ecosystem multifunctionality is more related to the indirect effects than to the direct effects of human management in China' s drylands [J/OL]. *J. Environ. Manage.*, 2024, 368: 12225910 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122259>.
- [60] ZHANG S, HU W, LI M, *et al.* Multiscale research on spatial supply-demand mismatches and synergic strategies of multifunctional cultivated land [J/OL]. *J. Environ. Manage.*, 2021, 299: 113605 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113605>.
- [61] 胡月明, 杨颢, 邹润彦, 等. 耕地资源系统认知的演进与展望[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 937-945, 932.
- HU Y M, YANG H, ZOU R Y, *et al.* Evolution and prospect of systematic cognition on the cultivated land resources [J]. *J. Agric. Resour. Environ.*, 2021, 38(6): 937-945, 932.
- [62] 叶思菁, 宋长青, 高培超, 等. 地理空间视角下耕地资源新认知体系构建[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 225-240.
- YE S J, SONG C Q, GAO P C, *et al.* Construction of the new cognitive system for arable land resources from geospatial perspective [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2023, 39(9): 225-240.
- [63] LIU Y, WAN C, XU G, *et al.* Exploring the relationship and influencing factors of cultivated land multifunction in China from the perspective of trade-off/synergy [J/OL]. *Ecol. Indic.*, 2023, 149: 110171 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110171>.
- [64] LI X, WU K, YANG Q, *et al.* Quantitative assessment of cultivated land use intensity in Heilongjiang province, China, 2001-2015 [J/OL]. *Land Use Policy*, 2023, 125: 106505 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106505>.
- [65] GAO B, YANG J, CHEN Z, *et al.* Causal inference from cross-sectional earth system data with geographical convergent cross mapping [J/OL]. *Nat. Commun.*, 2023, 14: 5875 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41619-6>.
- [66] LIAO Y, YU Z, KUANG L, *et al.* Analysis of cultivated land degradation in Southern China: diagnostics, drivers, and restoration solutions [J/OL]. *Front. Plant Sci.*, 2025, 16: 1533855 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1533855>.
- [67] SONG Z, BAO Y, ZHANG J, *et al.* Threshold-determined ecological risk early warning models are effective tools for conservation strategies guiding [J/OL]. *J. Clean. Prod.*, 2024, 462: 142630 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142630>.
- [68] LIU X, LIN F, BIAN Z. Responses of farmland soil organic carbon to key natural and landscape factors: Threshold effects and nonlinearity [J/OL]. *J. Clean. Prod.*, 2025, 487: 144648 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144648>.
- [69] YAO X, MOKBEL M F, YE S, *et al.* LandQv2: a MapReduce-based system for processing arable land quality big data [J/OL]. *ISPRS Int. J. Geo Inf.*, 2018, 7(7): 271 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/ijgi7070271>.

- [70] BABAEIAN E, PAHEDING S, SIDDIQUE N, *et al.*. Estimation of root zone soil moisture from ground and remotely sensed soil information with multisensor data fusion and automated machine learning [J/OL]. *Remote. Sens. Environ.*, 2021, 260: 112434 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112434>.
- [71] WEI L, YANG H, NIU Y, *et al.*. Wheat biomass, yield, and straw-grain ratio estimation from multi-temporal UAV-based RGB and multispectral images [J]. *Biosyst. Eng.*, 2023, 234: 187-205.
- [72] ZENG J, YUAN X, JI P. The important role of reliable land surface model simulation in high-resolution multi-source soil moisture data fusion by machine learning [J/OL]. *J. Hydrol.*, 2024, 630: 130700 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130700>.