

黑土地耕地质量评价研究进展与展望

裴久渤^{1§}, 史佳卉^{1§}, 汪景宽¹, 张佳宝²

(1.沈阳农业大学土地与环境学院,沈阳 110866; 2.中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

摘要:东北黑土地作为保障我国粮食安全的“压舱石”,其质量评价对维护国家粮食安全和农业可持续发展至关重要。系统综述了黑土地耕地质量评价的研究进展,涵盖了理论框架、指标体系、技术方法及实践应用。在理论层面,评价范式从早期的土壤肥力生产力评价,逐步发展为以土壤质量为核心的综合功能评估,进而演进为关注生态系统服务的土壤健康评价,体现了从单一生产功能向多维生态功能的认知深化。在方法层面,评价指标由简单的地力因素扩展为多因素综合体系;数据获取从传统地面调查转向“天-空-地”一体化协同观测,融合遥感、无人机与物联网技术,提升了数据效率与精度;评价方法也由定性、定量向机器学习等智能模型发展,实现了更精准的量化评估与空间制图。同时总结了评价成果在耕地质量提升、粮食产能预测与生态环境保护等方面的应用,构建了“耕地质量-粮食产能”概念模型,为划定保护红线提供了依据,未来黑土地评价将朝着更加精准、动态化与智能化的方向发展。

关键词:东北黑土地;指标体系;评价方法;土壤健康;粮食安全

doi: 10.13304/j.nykjdb.2025.0799

中图分类号: S151.9

文献标志码: A

文章编号: 1008-0864(2025)12-0211-16

Research Progress and Prospect of the Cultivated Land Quality Evaluation in Black Soil

PEI Jiubo^{1§}, SHI Jiahui^{1§}, WANG Jingkuan¹, ZHANG Jiabao²

(1.College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: As the cornerstone safeguarding China's food security, the quality assessment of Northeast China's black soil is crucial for maintaining national food security and sustainable agricultural development. The research progress were systematically reviewed in evaluating the quality of black soil farmland, covering theoretical frameworks, indicator systems, technical methodologies and practical applications. Theoretically, evaluation paradigms have evolved from early assessments of soil fertility and productivity to comprehensive functional evaluations centered on soil quality, and further to soil health assessments focusing on ecosystem services. This progression reflected a deepening understanding shifting from singular productive functions to multidimensional ecological functions. Methodologically, evaluation indicators have expanded from simple soil fertility factors to multi-factor integrated systems. Data acquisition has shifted from traditional ground surveys to integrated “space-air-ground” collaborative observation, leveraging remote sensing, unmanned aerial vehicles, and internet of things technologies to enhance data efficiency and accuracy. Evaluation methods have also evolved from qualitative and quantitative approaches to intelligent models like machine learning, enabling more precise quantitative assessments and spatial mapping. Furthermore, the application of evaluation outcomes were summarized in enhancing farmland quality, forecasting grain production capacity and protecting the ecological environment. It constructed a conceptual model linking “farmland quality to grain production capacity”, providing basis for delineating protected red lines. In the future, black soil evaluations should move toward greater precision, dynamism and intelligence.

收稿日期: 2025-09-30; **接受日期:** 2025-11-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500204); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2203198); 中央引导地方科技发展资金项目(2025ZY0011)。

联系方式: §裴久渤和史佳卉为共同第一作者。裴久渤 E-mail: peijiubo@syau.edu.cn; 史佳卉 E-mail: sjh010719@163.com

Keywords: northeast black soil; indicator system; evaluation method; soil health; food security

耕地是粮食生产的命根子,是中华民族永续发展的根基^[1]。对耕地质量进行科学合理评价,不仅是精准农业的基础,更是服务于国家粮食安全、生态安全乃至国防安全的重大战略需求。一个国家的耕地质量直接关系到其粮食产能的稳定性、农业政策的科学性以及国土资源的可持续利用能力。纵观新中国发展史,国家对耕地质量的调查与摸底工作始终高度重视。新中国成立初期,为全面查清我国土地资源基础数据,建立了土地调查、统计和登记制度,开展了大规模的土壤概查^[2];并于1979年启动了第二次全国土壤普查,这是具有里程碑意义的行动,它系统性地查清了我国土壤的类型、分布、肥力等基本属性,初步构建了耕地地力评价体系,为改革开放后农业的飞速发展乃至国家粮食产能的稳步提升奠定了坚实的数据基础^[3]。然而,历经数十年的高强度利用,我国耕地资源正面临着“数量红线”与“质量底线”的双重压力。在此背景下,国家层面连续出台了一系列重磅政策,将耕地质量保护提升至战略高度。从《耕地质量调查监测与评价办法》的出台到《全国耕地质量等级情况公报》的定期发布,再到《国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025年)》的部署,以及《中华人民共和国黑土地保护法》的正式颁布实施,这一从制度规范到具体行动、从专项规划到法律保障的政策演进过程,反映了国家守护耕地的坚定意志^[4]。特别是于2022年启动的第三次全国土壤普查,其核心目标是全面查明我国土壤质量家底,为守住耕地红线、保障粮食安全、优化农业生产布局、保护生态环境提供支撑,更为我国未来黑土地耕地质量的精准评价与科学管理奠定了基础,推动了相关工作进入全新阶段^[5]。

在众多农业利用类型中,黑土地被誉为“耕地中的大熊猫”,有着不可替代的战略地位。东北黑土区作为我国最重要的商品粮基地与粮食战略保障区,其粮食产出直接关系到国家的粮食安全^[6]。但不容忽视的是,长期透支性利用正导致这片沃土面临“变薄、变瘦、变硬、变酸”的退化风险,严重威胁其生产功能和生态功能的可持续性。因此,针对黑土地开展专门化、精准化的耕地质量评价,其必要性与紧迫性尤为突出。这不仅是落实《黑土地保护法》、实施国家黑土地保护工程的先

行基础,更是准确诊断黑土退化病因、评估保护措施成效、预警未来演变趋势的核心科技手段^[7]。

在此背景下,深入开展黑土地耕地质量评价研究具有重要现实意义。不仅是落实国家黑土地保护战略的迫切需求,更是科学应对黑土地退化挑战、精准识别退化问题并寻求解决方案的内在要求;也是推进农业现代化、实现黑土地可持续利用的必然选择。因此,系统梳理黑土地耕地质量评价的理论方法进展,总结实践经验,展望未来发展方向,对于推动黑土地保护工作具有重要理论价值和实践意义。本研究从评价理论体系的演进、评价指标体系的构建、评价方法进展以及实践应用等方面进行系统综述,以期为我国黑土地保护与质量提升提供学术参考。

1 耕地质量评价理论体系的演进

1.1 耕地质量认知变化

对耕地质量的认知,经历了一个从静态属性到动态系统的根本性转变。传统观点将耕地质量视为一个相对静态的属性集合,其核心是土壤的物理、化学性质(如有机质含量、pH、质地、养分速效含量)的度量^[8]。在这种认知下,耕地质量评价的本质是对这些属性进行测量、分级与汇总,耕地被简化为一个被动的、均质的“养分仓库”^[9]。现代土壤学与生态学理论则强调,耕地是一个复杂的、开放的动态生命系统。其质量并非固有属性的简单加和,而是自然成土因素(母质、气候、生物、地形、时间)与人类活动(耕作、施肥、灌溉、轮作等)长期、复杂互动下所涌现出的系统功能与整体状态^[10]。这个系统内部存在着复杂的生物地球化学循环与反馈机制。例如,土壤有机质的动态变化驱动着微生物群落的组成与活性,后者又通过分解与固持过程调控土壤养分的有效性,进而影响作物生长与根系分泌物,最终反作用于土壤结构的形成与有机质的积累与分解^[11]。因此,现代耕地质量概念具有3个鲜明特征:动态性(随管理和环境而演变)、系统性(各要素间存在非线性关联)和功能性(其价值体现在维持生产力、净化环境、调控水文等生态系统服务上)^[12]。这种从“静态对象”到“动态系统”的认知跃迁迫切要求评

价方法必须具备处理时序数据、解析复杂关联、乃至模拟系统行为的能力。因此,耕地质量评估的演进是一个逐步深化和拓展的过程,它反映了人们对耕地质量概念理解的深化和评价方法的不断完善^[13]。

1.2 土壤肥力理论

土壤肥力理论是耕地质量评价最早的理论基础,也是耕地质量影响粮食安全的核心理论基础,其核心思想是将土壤视为作物生长的“养分库”,重点评估土壤供给作物所需养分和水分的能量^[14]。这一理论的形成和发展经历了漫长的历史过程,从早期的经验性认识到系统的理论体系,为现代农业发展奠定了重要基础。土壤肥力主要关注土壤的物理和化学属性。其中,物理属性主要包括土壤质地、结构、孔隙度、持水能力等,这些因素直接影响根系的生长和水气的调节;化学属性则侧重于氮、磷、钾等大量元素的含量和有效性,以及土壤 pH、阳离子交换量等基础化学特性^[5]。该理论将土壤肥力定义为土壤为植物生长提供所需养分的能力,强调土壤作为作物营养来源的基本功能^[15]。在评价指标方面,土壤肥力理论主要采用可量化的理化指标,包括:①土壤有机质含量,作为土壤养分储备的重要指标;②氮、磷、钾等大量元素的速效含量,直接反映土壤供肥能力;③土壤 pH,影响养分有效性的关键因素;④土壤质地和结构,决定土壤保水保肥能力的基础指标。这些指标通过实验室分析即可获得,具有较强的可操作性和可比性^[16]。在评价方法上,土壤肥力理论主要采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和指数和法。通过建立指标体系确定各指标的权重,最后计算土壤肥力综合指数。这种方法简单易行,在农业生产中得到了广泛应用。然而,这种评价方法也存在明显局限,如过度依赖理化指标,忽视了土壤生物学特性;偏重静态评价,难以反映土壤肥力的动态变化;缺乏对土壤环境功能的考量等^[17]。土壤肥力理论对农业生产实践产生了深远影响,基于该理论的测土配方施肥技术在全球范围内推广,显著提高了肥料利用效率;土壤肥力分级标准的制定,为耕地质量保护和提升提供了依据。但是,随着可持续农业理念的深入,该理论的局限性也逐渐显现,促使研究者寻求更全面的评价理论^[18]。

1.3 土壤质量理论

土壤质量理论是在传统土壤肥力理论基础上发展起来的更全面的评价理论,它不再将土壤仅视为作物生产的介质,而是将土壤视为一个动态的、完整的生态系统,强调土壤在维持生态系统功能和促进动植物健康方面的综合能力^[19]。这一理论的提出,标志着土壤评价从单一“生产功能导向”向“生产力-环境-生态”多功能综合评估的重要转变。土壤质量理论包含 3 个维度:一是土壤的生产功能,即维持作物生产力的能力;二是土壤的环境功能,包括调节水分循环、过滤污染物、分解有毒物质等;三是土壤的生态功能,促进生物多样性、维持生态平衡等。这种多维度的理解使土壤质量评价超越了传统的肥力概念,转向更系统的生态系统服务视角^[20]。随着土壤退化、面源污染、生物多样性丧失等问题的加剧,单纯依靠土壤肥力指标已无法全面评估土壤的状况^[21]。将土壤的环境功能和生态功能纳入评价范畴,形成了“生产力-环境-健康”三位一体的理论框架^[22]。在评价指标体系构建方面,土壤质量理论建立了包括物理、化学和生物学指标的完整体系,实现了从静态性质描述到动态功能表征的跨越。物理指标除传统的质地、容重外,还增加了团聚体稳定性、入渗速率、通气孔隙等;化学指标在常规养分基础上,补充了重金属含量、农药残留及盐分组成等环境风险检测指标;最大的突破是引入了生物学指标,如微生物生物量碳氮、土壤呼吸速率、土壤酶活性及微生物群落多样性等,这些指标能更灵敏地反映土壤健康状况^[23]。在评价方法上,土壤质量理论采用了更综合的多变量分析方法,主要包括:①土壤质量指数法(soil quality index, SQI),通过主成分分析确定指标权重,综合评估土壤质量,土壤质量指数法的完善使不同土壤类型和土地利用方式间的质量比较成为可能;②动态监测法,通过长期定位观测揭示土壤质量演变规律。这些方法能够更好地捕捉土壤质量的复杂性和动态性^[24]。土壤质量理论在实践中取得了显著成效。其中,最小数据集(minimum dataset, MDS)概念的提出与应用,通过统计学方法筛选能够灵敏反映土壤变化的关键指标,在保证科学的前提下简化了评价流程,解决了全面评价与操作可行性之间的矛盾;此外,基于动态监测网络土壤质量动态评

估系统与预警系统的建立为土壤退化早期预警和决策提供了有力工具^[25]。

1.4 土壤健康理论

土壤健康理论的引入标志着土壤质量评价理念的一次飞跃,其核心是强调土壤的生物活性和生态功能^[26-27]。这一转变使评价范畴从单一的生产功能拓展至对土壤污染状况(如重金属、农药残留)、土壤生物特性(如微生物群落结构、土壤动物多样性)以及环境承载力的综合考量,标志着评价重心从土壤质量向土壤健康的过渡^[28]。土壤健康理论有3个核心要义:一是强调生命属性,认为土壤是依赖生物及其生态过程维系功能的活体系统;二是注重土壤的恢复力和抗逆性,即土壤在遭受干扰后恢复其功能的能力;三是关注土壤与更大尺度生态系统的关联,强调土壤在调节全球气候变化中的作用。这种整体论的观点使土壤健康理论具有更强的系统性和前瞻性^[29-30]。在评价指标体系上,土壤健康理论更突出生物学指标的重要性。除了土壤质量理论中的基础指标外,特别强调土壤微生物多样性(包括细菌、真菌群落结构)、土壤食物网复杂度(反映生态系统的稳定性)和土壤呼吸熵(表征土壤生物活性)。这些指标能更早地预警土壤生态系统的变化^[31]。在评价方法上,土壤健康理论引入了更多创新性的方法,包括:①分子生物学技术,如宏基因组学用于分析土壤微生物群落及其功能基因;②稳定同位素技术,利用¹³C、¹⁵N追踪养分循环路径,定量描述养分在“土壤-植物-微生物”系统中的真实周转路径与速率;③空间信息技术,结合高光谱遥感、无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)与地理信息系统(geographic information system, GIS)实现区域尺度土壤健康属性的空间格局制图与动态监测;④参与式评价方法,将农户的本土知识与管理经验纳入评价框架,提升评价结果的在地可接受性与管理指导价值^[32-33]。这些方法的应用使土壤健康评价更加精准和全面^[33]。在此基础上,生态系统服务理论进一步拓宽了评价的视野,它要求评价工作不仅要关注耕地的供给服务(如粮食生产),还要评估其调节服务(如气候调节、水源涵养)、支持服务(如养分循环、生物多样性)以及文化服务(农耕景观美学)等^[34]。此外,可持续发展理论为评价提供了价值导向,强调需要在满足当代人粮食需

求的同时,不损害后代满足其需求的能力,从而将耕地资源的永续利用纳入评价框架^[35]。

2 耕地质量评价指标体系的构建

评价指标体系是将理论转化为实践的关键桥梁,其构建的科学性与适用性决定了评价结果的可靠性^[36]。我国耕地质量评价指标体系的发展,是一个从简单到复杂、从单一到综合、从普适到区域化的动态过程(图1)。

2.1 选取指标

早期耕地质量评价的核心是土壤肥力或地力。指标选取多侧重于土壤的单一理化性质,尤其是与作物产量直接相关的土壤养分状况,如有机质、全氮、速效磷和速效钾等^[37]。这种“以肥为纲”的指标选取模式反映了当时以追求粮食高产为首要目标的现实需求,其评价体系简单、易于操作,但无法全面反映耕地的综合生产能力与可持续性^[38]。随着土壤科学和生态学理论的发展,评价指标经历了根本性转变,从关注单一属性发展到构建包含理化性状、养分状况、环境健康、生物特性和立地条件的多层次、多因素指标体系^[39]。理化性状是土壤物理和基础化学属性的体现,包括土壤质地、土层厚度(特别是黑土层厚度)、土壤容重、孔隙度和pH等。黑土层厚度被视为黑土地健康最核心的指标,其退化直接关联土壤肥力的丧失^[40]。养分状况在传统氮、磷、钾基础上,应进一步关注中微量元素的丰缺以及养分的平衡性,避免单一元素过量或不足造成的障碍。环境健康是评估土壤的环境胁迫与污染风险,包括土壤重金属含量、水土流失强度等^[9]。这在农业集约化程度较高的黑土区尤为重要。生物特性是表征土壤健康状况和生态系统功能的关键指标。土壤微生物量碳氮、土壤酶活性以及蚯蚓等土壤动物的数量与多样性等指标被逐步纳入评价体系,这标志着评价理念从侧重供给功能的土壤肥力向关注系统整体状态的土壤健康深化。立地条件主要包括地形地貌(坡度、坡向)、气候条件(积温、降水)、灌溉条件和排水条件等,这些外部环境因素影响着耕地质量评价的准确性。这种综合性的指标体系构建模式,能够更全面、更深刻地揭示黑土地生态系统的结构、功能与演变规律,为指导黑土地的保护与可持续利用提供了科学依据。其构建模式可概括为图2。

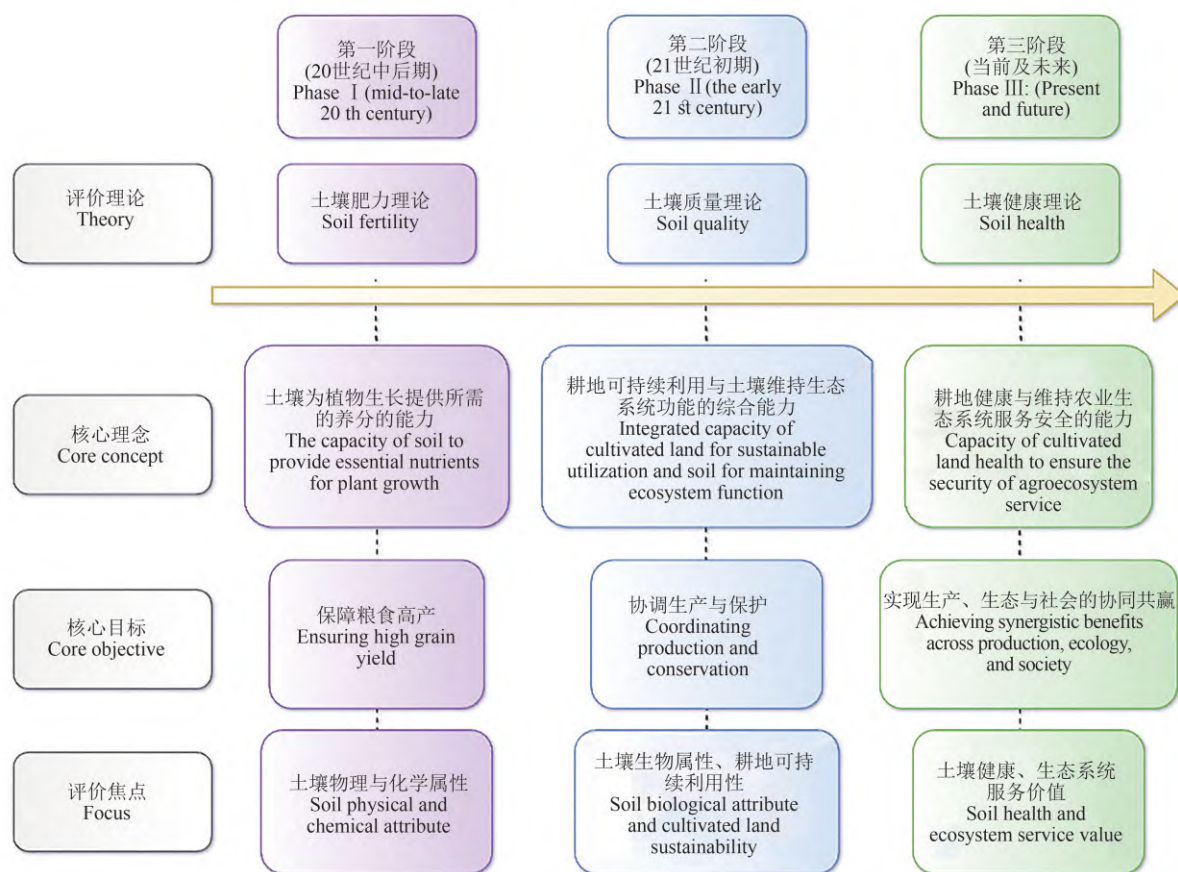


图1 评价理论演进

Fig. 1 Evolution of evaluation theories

2.2 确定指标权重及隶属度

在耕地质量评价指标体系中,权重的确定是影响评价结果科学性和准确性的关键环节。《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)^[41]为权重确定提供了技术依据和方法指导。该标准通过系统研究和实践验证,建立了一套完整的权重确定方法体系。权重的确定主要包括以下几个步骤。首先,基于德尔菲法进行多轮专家咨询,收集领域内专家对各指标相对重要性的判断,涉及土壤学、农业资源与环境、土地管理等领域的权威专家,通过设计科学的咨询问卷,获取专家对指标间相对重要性的专业判断;其次,采用层次分析法构建判断矩阵,将专家的定性判断转化为定量分析,在构建判断矩阵时,要求专家按照1~9标度法对指标进行两两比较,确保判断的一致性比率(consistency ratio, CR)小于0.1,以保证判断矩阵的逻辑一致性。权重确定还需考虑不同区域的特点。例如,对于东北区,需特别强调耕层厚度、土壤酸碱度等

指标的权重。这一过程充分考虑了指标对耕地质量的实际贡献度。在东北区耕地质量评价指标体系中,土壤理化性状和立地条件通常被赋予较高权重,耕层质地和地形部位是权重较高的2个指标。权重确定过程中还引入了主成分分析法、熵权法等客观赋权方法作为辅助验证。通过对比主观赋权法和客观赋权法的结果进行必要的调整和优化,最终形成既符合专业判断又反映数据特征的权重体系。这种主客观相结合的权重确定方法,大大提高了评价结果的科学性和可靠性。

在耕地质量评价中,指标隶属度的确定是实现从定量实测值到定性质量等级转换的关键步骤。该过程主要依据模糊数学原理,通过构建隶属度函数,将各指标的实际测量值映射到[0,1]区间,以刻画其隶属于不同质量等级的程度,需依据国家标准并结合区域实际,确定各指标的分级阈值。例如,东北黑土区耕层厚度常划分为 ≥ 25 、[20, 25)、[15, 20)、 < 15 cm共4个等级。随后,根据指标特性



图2 黑土地耕地质量评价指标体系构建

Fig. 2 Framework of evaluation indicator system for cultivated land quality of black soil

选择相应的隶属函数类型,对于值越大、越优的指标(如有机质含量、耕层厚度)采用戒上型函数;对于值越小越优的指标(如土壤容重)采用戒下型函数;对于存在适宜区间的指标(如pH)采用峰型函数;部分指标也可采用在阈值区间内线性变化的直线型函数。关键参数的确定需综合国家标准、地方实践与研究成果,例如设定黑土区有机质含量 $\geq 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时隶属度为1(最优),pH在6.0~7.5区间内隶属度最高。确定函数后,将各评价单元指标的实测值代入,即可计算其对各质量等级的隶属度。在实际应用中,还需针对东北黑土区的土壤、气候与耕作特点进行参数的本地化校正。将计算得到的指标隶属度与通过层次分析法、主成分分析法等方法确定的指标权重相结合,采用模糊综合评价或加权求和模型计算耕地质量的综合指数,并据此划定最终的质量等级,从而完成科学、综合的质量评价。

2.3 耕地质量综合指数计算

东北黑土地耕地质量综合指数的构建采用多指标综合评价体系,基于气候、立地、剖面、土壤养

分、土壤理化性状和土壤管理6大类13项指标,通过特尔斐法与层次分析法相结合确定各指标权重,并利用隶属函数法对定量和定性指标进行标准化处理,最终运用累加法计算综合指数,再依据累积频率曲线划分为10个质量等级^[42]。与国标方法相比,主成分分析法侧重于降维和客观赋权,适用于指标间相关性较高的情形,但可能会弱化黑土地特有的土壤管理及立地条件等关键要素;模糊综合评价法能处理指标模糊性与不确定性,适用于界限不清的黑土地退化评价,但对权重确定的主观依赖性较强。进行黑土地耕地质量评价时,可以在保留专家经验(反映区域特殊性)的同时,兼顾指标标准化与权重科学分配,尤其适用于黑土地这种自然条件复杂、土壤类型多样、且需统筹自然属性与人为管理因素的综合质量评价,具有良好的适用性和可操作性。

3 耕地质量评价方法的进展

评价方法的进步是驱动耕地质量评价从经验定性走向模型定量、从静态描述走向动态预测的

核心引擎^[43]。这一进程不仅依赖于数学工具与计算技术的升级,更深刻地植根于对耕地质量本体认知的深化,二者相互促进,共同构成了评价科学化发展脉络。

3.1 指标获取技术进展

评价指标的获取技术决定了数据源的精度、尺度和效率,是评价工作从理论走向实践的核心环节^[44]。该领域经历了从依赖传统实地采样到运用现代对地观测技术的革命性变迁(图3)。传统的指标获取方法主要依赖于地面调查。研究人员通过挖掘土壤剖面直接观察和描述土壤的结构、质地等形态特征,通过规范的网格法或随机布点法采集土壤样品,送至实验室进行理化分析,以获取土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH、阳离子交换量等核心理化指标。这种方法的优势在于结果精度高,被视为衡量土壤属性的基准参考,常作为验证其他反演方法准确性的依据^[45]。然而,若想获得区域尺度的空间分布信息,需要布设大量采样点,不仅工作量大、周期长,而且具有破坏性。更重要的是,基于离散点的数据难以真实、连续地反映土壤属性在空间上的异质性,存在尺度效应问题,难以实现大面积同步监测,无法满足大范围、动态评价的需求^[46]。

遥感、物联网与近地传感技术的发展为耕地质量指标获取带来了革命性变化,实现了对植被指数、土壤水分、地表温度、地形地貌及土壤有机质等多类指标的快速、无损与大范围反演^[47]。当前,单一技术手段在覆盖范围、分辨率或观测要素上存在局限,而“天-空-地”一体化立体观测体系通过整合不同平台的传感器优势,已成为实现农田系统多要素同步感知的重要途径。在“天基”层面,卫星遥感可周期性获取大范围地表信息,郑曼迪等^[48]指出,微波遥感能穿透植被,反演土壤水分,且不受云雨影响,适用于全球或区域尺度监测,但其空间分辨率较低(通常>1 km);光学遥感(如Sentinel-2等)则可提供高空间分辨率的植被指数,用于间接评估作物长势与生物量,但在植被茂密或云覆盖条件下受限。在“空基”层面,航空及无人机遥感填补了卫星与地面观测之间的尺度缺口。王梦迪等^[49]利用无人机高光谱影像,结合连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)与遗传算法(genetic algorithm, GA)进行特征优

选,实现了田块尺度土壤含水量的高精度估算,展示了无人机平台在获取厘米级分辨率光谱数据方面的独特优势。Tang等^[50]基于高分六号遥感影像,提取光谱与地形指数,借助随机森林(random forest, RF)模型实现了耕地质量的空间反演,体现了高分辨率光学遥感在农田属性制图中的应用潜力。在“地基”层面,物联网传感器网络可对土壤水分、温度、电导率等参数进行连续、定点监测,为模型校准与验证提供真值数据。车载或手持高光谱、电磁感应等移动传感平台能在田间实现亚米级分辨率的快速扫描,进一步丰富了地面观测的数据维度和密度。在数据融合与反演方法上,机器学习(machine learning, ML)算法已成为整合多源数据、建立复杂非线性关系的关键工具。不同算法各有优劣, Lin等^[51]在反演土壤有机质时,采用梯度提升机模型(XGBoost),并针对不同土壤类型(黑土、白浆土、草甸土)建立分样本回归模型,提升了预测精度,显示了算法在区分土壤背景影响上的优势。王梦迪等^[49]系统比较了偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)、支持向量机(support vector machine, SVM)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)、随机森林和XGBoost在估算土壤水分中的表现,发现偏最小二乘回归和人工神经网络模型在采用db4小波特征时精度最高,而随机森林和XGBoost在小样本条件下表现相对一般,揭示了算法性能对数据特征与样本量的依赖性。未来,通过进一步融合多时相遥感数据、集成过程模型(procedural model, PM)与机器学习算法,为黑土地耕地质量的精准、动态评价与管理奠定了坚实的数据基础。

3.2 评价方法的演进

在评价的早期阶段,为了将定性经验转化为可计算的量化结果,一系列经典的数理统计方法被引入。层次分析法与德尔菲法是通过构造判断矩阵和多轮专家咨询,系统化地整合领域专家的知识 and 经验,将指标间的相对重要性量化,从而确定各指标的权重^[52]。这类方法的核心贡献在于为复杂的决策问题提供了结构化的分析框架,实现了从纯定性描述到半定量分析的重要跨越。该方法在金昌市的实证应用中,依据国家标准构建评价体系,结合模糊隶属函数处理指标,评价该市耕地质量平均等级为1.56,以一、二等地为主,整体

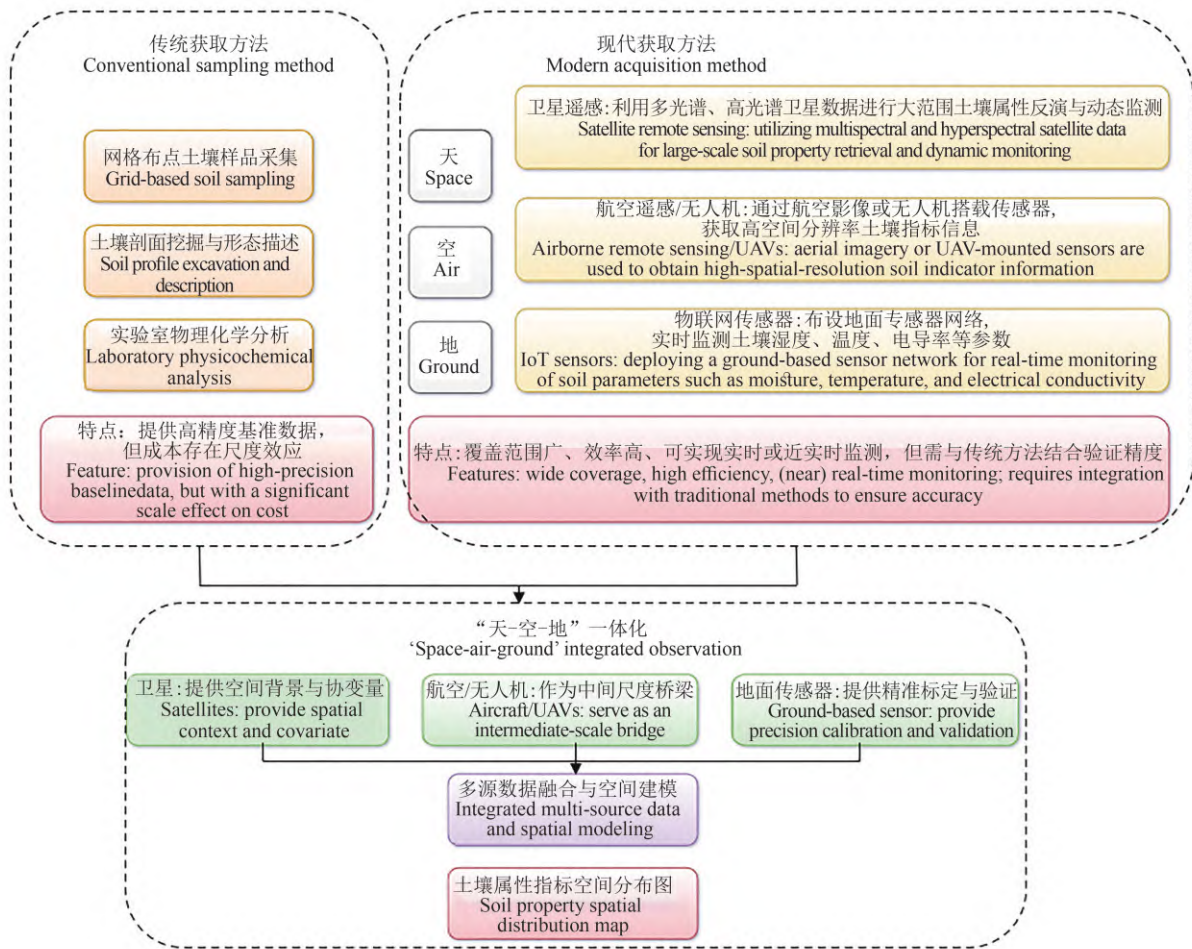


图3 指标获取技术对比

Fig. 3 Comparison of indicator acquisition technologies

质量较好,表明能有效识别土壤养分的空间分异^[53],实现了从主观经验到半定量权重的关键跨越,但其权重确定高度依赖专家经验,主观性强。模糊综合评价法则针对耕地质量等级边界模糊的特点,通过隶属度函数处理“中等”与“高等”等模糊概念,更真实地反映了土壤属性的连续变化,减少了传统硬性分级带来的信息损失。然而,它与层次分析法等方法多基于线性假设,难以刻画各指标与耕地质量之间复杂的非线性关系。为克服主观局限性,CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)等客观赋权法被引入,通过数学方法计算指标变异性和冲突性来确定权重。在呼和浩特市的应用表明,该方法修正了层次分析法的主观性,结合地理信息系统进行空间化评价,得出耕地平均质量等级为5.84,空间上呈“中部高、东南低”的分布^[54]。与国标法相比,该方法的指标选取更全面(如增加田块面积、道路通达

度),权重确定更客观,评价结果更贴合实际障碍因素的空间分布,适用于指标数据齐全、样本量较大的评价体系。这些经典方法为耕地质量评价的定量化奠定了坚实基础,但其局限性也较为明显,如主观依赖性较强(权重确定依赖于专家经验),且难以捕捉和表达指标与最终质量之间复杂的非线性关系。

随着数据获取与计算能力的发展,机器学习方法因其处理高维、非线性数据的能力,逐渐成为研究热点^[55]。以随机森林等为代表的学习算法,因其对数据分布假设宽松、能够高效处理混合类型数据而得到广泛应用,并在实际研究中展现出显著优势。王丽等^[56]在湖北省襄州区基于地形、土壤、社会经济与生态4类共14项指标构建评价体系,对比了随机森林、后向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)和熵权法(entropy weight method, EW)3种模型,结果显示,

随机森林模型的各项评价指标均最优,其决定系数(R^2)达0.814 5,平均绝对误差(mean absolute error, MAE)为0.009,均方根误差(root-mean-square error, RMSE)为0.012,显著优于其他方法,表明随机森林在挖掘指标非线性关系、自动量化贡献度方面具有明显优势。冯博^[57]在山东莱芜区的研究中,采用7类29种算法进行训练,发现中等高斯支持向量机在测试集上分类准确率达94.2%,最终耕地质量评价总体准确率为90.3%。相比传统方法,机器学习避免了主观赋权,能自主学习复杂关系,展现出强大的拟合与预测能力,是未来智能化评价的重要方向。随着数据类型的拓展,深度学习模型在耕地质量评价中也展现出独

特价值。卷积神经网络能够从遥感影像、高光谱等多源数据中自动提取空间特征,实现端到端的质量评价。然而,这类模型通常依赖大量标注数据,且模型可解释性相对较弱,在实际应用中需结合具体数据条件进行选择。当前,耕地质量评价方法的前沿趋势正朝着数据驱动与机理模型融合的方向发展^[43],时空统计模型能够有效刻画耕地质量在空间与时间上的动态变化^[58],而结合机器学习与过程模型的融合建模框架,既能利用数据驱动方法挖掘复杂关系,又能借助机理模型阐释土壤水分、养分循环等内在过程,从而在预测精度与机理可解释性之间取得平衡,为耕地质量动态模拟与智慧管理提供支撑(图4)。

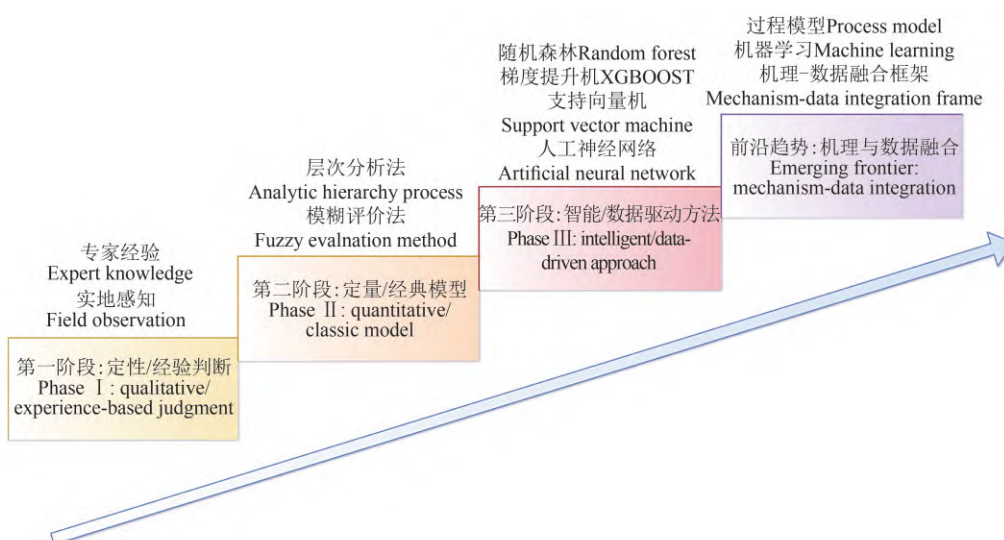


图4 评价方法演进图

Fig. 4 Evolution of evaluation methods

4 耕地质量评价的应用

耕地质量评价的最终价值在于指导实践的应用效能。在黑土地保护与管理的具体实践中,其应用成果主要体现在以下3大方面。

4.1 在耕地质量提升方面的应用

耕地质量评价在明确质量现状的基础上,为核心障碍因子诊断与精准改良提供了关键的数据支撑。评价工作通过系统分析土壤理化性状和养分状况等指标,能够精准识别导致特定区域耕地质量低下的主导障碍类型,如物理结构退化(耕层变浅、容重增加)、化学养分失衡(有机质下降、土壤酸化和盐碱化)或生物活性衰退等,从而推动土

壤改良从“一刀切”向“因土施策”转变。刘子旋等^[58]对梨树县的研究发现,该区域存在灌溉能力不足、土壤质地不佳、耕层厚度薄的问题,据此提出了深耕还土、增施有机肥、加强该地灌溉设施建设与水资源优化配置的措施。刘湘君等^[59]对三江平原典型的白浆土进行评价,揭示了其“上轻下黏”的障碍层结构是制约根系下扎的瓶颈,从而指导了以深松深耕打破犁底层为核心的物理改良技术推广。此外,通过评价土壤有机质及其活性的空间变异,可以精准划定秸秆深翻还田和有机肥施用的优先区域与适宜用量,显著提升了有机培肥的效率和效益,为实现黑土地精准培肥与可持续利用提供了科学依据。

在技术推广层面,耕地质量评价为保护性耕作技术的优化配置提供了重要参考。通过分析不同区域土壤结构和生物学特性,可以科学判定免耕、覆盖耕作等保护性耕作技术的适宜区域,并针对具体地块设计配套技术方案。例如,在土壤侵蚀严重区域重点推广秸秆覆盖技术,在土壤紧实区域配套深松措施,实现了保护性耕作技术的本地化应用和优化配置。在宏观战略层面,耕地质量评价为高标准农田建设的科学规划与全过程管理提供了量化依据。在规划阶段,评价成果通过将耕地质量等级与空间图斑相结合,能够优先将质量提升潜力大、集中连片的中产田区域纳入建设范围,确保投资效益最大化;同时,评价揭示的限制因子直接决定了高标准农田建设的工程设计内容和农艺措施配套,如在侵蚀高风险区重点布局坡改梯工程,在排水不畅区域配套建设暗管排涝系统。在建设后评估阶段,通过对比建设前后同一地块的耕地质量综合指数及其关键指标的变化,从而科学评估高标准农田建设在土壤培肥、结构改良等方面的实际效果,为优化后续项目的技术模式提供直接证据。这种“评价-规划-建设-评估”的一体化应用模式有效提升了高标准农田建设的精准性和实效性,为实施“藏粮于地”战略奠定坚实基础。

4.2 在粮食产能评估方面的应用

耕地质量评价通过构建涵盖土壤理化性状、养分状况、农田管理及立地条件的多维指标体系,为粮食产能评估提供科学依据^[60-61]。通过耕地质量评价能够精准量化区域耕地的理论产能,并识别制约产能的关键限制因子,为差异化土地管理提供靶向指导。例如,刘学等^[62]从耕地质量与粮食产能的定量关系角度出发,基于特尔斐法和函数拟合方法,构建了黄淮海区耕地质量等级与粮食单产之间的函数模型,并结合县域耕地面积数据评估了区域粮食产能及空间分布特征,结果表明,耕地质量与粮食单产之间呈显著正相关,为该区域耕地保育与产能提升策略的制定提供了科学依据。在空间规划层面,评价成果是划定永久基本农田与实施耕地占补平衡的核心依据,保障优质耕地数量与质量安全。蔡琼等^[63]基于湖南省宁远县的案例指出,耕地质量与产能的耦合协调分析能够有效识别产能滞后区域,为提升耕地利用

效率提供具体路径。因此,耕地质量评价不仅为落实“藏粮于地”战略奠定了坚实基础,也为全面提升国家粮食安全保障能力提供了系统性的方法支撑。

厘清耕地质量与粮食产量之间的关系,是评价工作最直接、最重要的应用之一。通过实地调查与数据分析可以建立黑土地耕地质量综合指数与粮食产能之间的关系模型。研究表明,二者通常呈现一种非线性的正相关关系^[64-66]。在耕地质量等级较低的区域,曲线斜率较大,微小的质量改善便能带来产量的显著提升,这些区域是耕地质量提升与保护工程效益最高的重点整治提升区;而在耕地质量较高的区域,曲线趋于平缓,此时质量提升对产量的影响减弱,气候条件与田间管理措施等因素更为突出^[67],这些区域是维持高产稳产、防止质量退化的核心保护区。基于这种关系,提出“耕地质量-粮食产能”概念模型(图5)。高等级耕地区域是核心保护区,应坚决防止非农化、非粮化占用。重点在于保持和培育地力,通过精准施肥、保护性耕作、生态循环农业等方式,维持土壤健康与可持续生产能力,确保其核心产能可持续发展。持续改良区域应大力推广普及科学的耕作、施肥与灌溉技术,稳步、持续地改良土壤,提升耕地质量等级,从而有效且高效地增加粮食产能。低等级耕地是重点整治提升区,存在明显的限制性障碍因子,且处于产能曲线的“起步加速”阶段,单位质量提升带来的产能增益显著。应优先调查识别具体障碍因子,然后采取针对性的工程、生物和农艺措施进行综合治理,快速改善基础地力,实现耕地质量的跨越式提升。例如,通过空间分析发现某片区域产量低下主要与耕层浅薄有关,那么保护性耕作、深松等措施就成为该区域的优先选择。更重要的是,它可以为划定耕地质量保护红线提供科学依据。通过设定与特定产量水平(如维持基本口粮安全所需的产量)相对应的耕地质量等级指数阈值,可以在地图上明确标示出需要重点保护和禁止占用的优质耕地以及需要迫切投入进行改良的中低产田。这为实施最严格的耕地保护制度、优化高标准农田建设布局、以及制定差别化的耕地资源管理政策提供了直接、量化的决策支持。

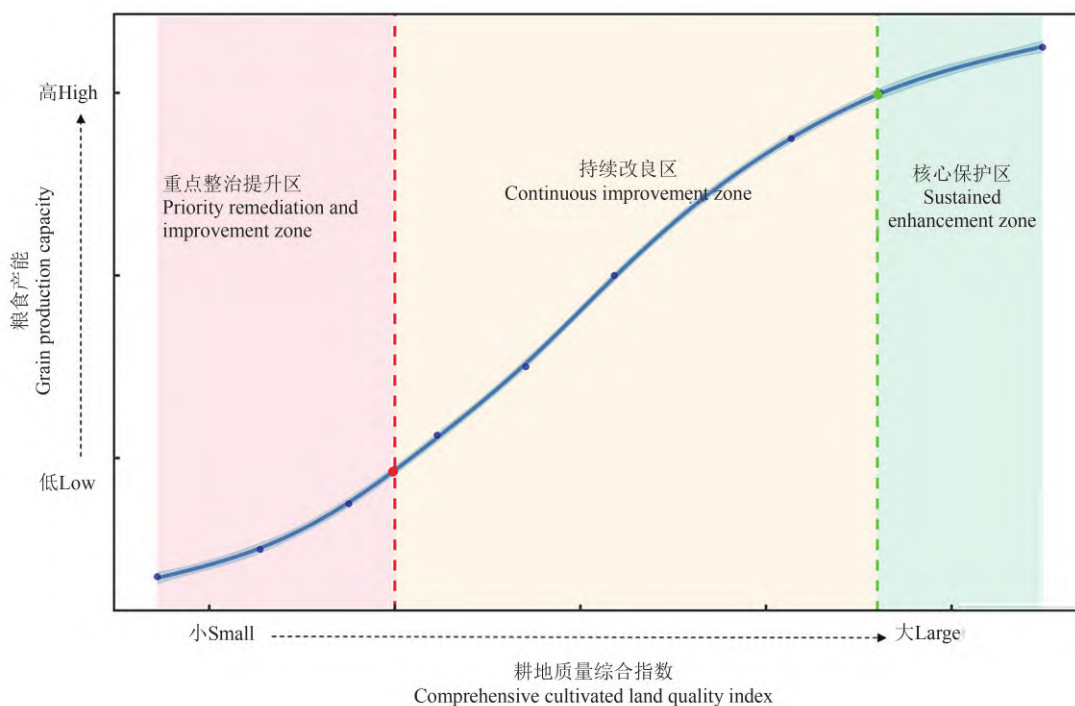


图5 “耕地质量-粮食产能”概念模型

Fig. 5 Conceptual model of “farm land quality and grain production capacity”

4.3 在生态环境方面的应用

随着生态文明建设的深入推进,耕地质量评价在生态环境保护领域的应用日益凸显。东北黑土地作为我国重要的商品粮基地,高强度集约化农业生产伴随着化肥、农药的过量投入,导致氮、磷等营养元素在土壤中大量盈余,已成为潜在的面污染源^[68]。耕地质量评价通过系统监测土壤中的氮、磷养分表观平衡、土壤农药残留负荷以及土壤生态风险指数,能够精准识别出水土环境中污染物迁移与转化的高风险区域^[69]。这为实施精准农业变量施肥、建设农田生态缓冲带与生态沟渠等源头控制与过程拦截措施提供了直接的空间决策依据,从而在保障粮食产量的前提下,最大限度地减少农业活动对周边水体的环境胁迫。同时,耕地质量评价是监测土壤碳库动态的核心手段。东北黑土地是全球陆地上重要的土壤碳库之一,其有机碳含量的变化直接影响大气温室气体浓度。因此,耕地质量评价是监测和评估黑土碳库动态、服务国家“双碳”战略的核心手段。通过定期、规范的质量评价,可以精确量化黑土地土壤有机碳储量的时空演变趋势。更为重要的是,通过设置长期定位试验与空间替代时间序列分析,评价工作能够科学评估不同农田管理实践(如秸

秆深翻还田、免耕覆盖、有机肥施用等)的固碳速率与减排潜力。这为构建国家尺度的农业碳排放清单、开发和认证农业碳汇项目提供了不可或缺的本底数据与方法学基础,直接支撑了农业领域应对气候变化的政策制定与技术路径选择。此外,通过引入生物指标,评价工作可以衡量农田生态系统的生物多样性水平,反映农业活动的生态影响。这些评价成果直接服务于黑土地保护的生态红线划定,确保重要的生态功能区域得到严格保护,指导农业绿色发展,推动形成资源节约、环境友好的农业生产方式,并为生态补偿政策的制定提供量化依据,实现对耕地生态保护行为的精准激励。

5 展望

黑土地耕地质量评价的研究与实践历程在理论体系、方法技术和实践应用3个方面均取得了长足的进步。在理论上,已从经典的土壤肥力论,发展为融合土壤健康、生态系统服务与可持续发展的综合理论框架。在方法上,评价指标从单一走向综合,数据获取从点状实测走向“天-空-地”一体化感知,评价方法也从依赖经验的定性半定

量方法,演进为以机器学习为代表的智能化数据挖掘模型。在应用上,评价成果已深度融入耕地质量提升、粮食产能评估、生态环境保护与农业政策制定等多个层面。黑土地耕地质量评价已发展成为一门深度交叉的学科领域,为理解和保护这片珍贵资源提供了核心的科技支撑。展望未来,面向国家黑土地保护的重大战略需求和前沿科技的发展浪潮,黑土地耕地质量评价将朝着以下方向深化发展。

①构建多维度、动态化与区域适应的评价指标体系。未来的评价指标体系将突破当前以静态理化属性为主的框架,向多维度、动态化和区域适应的方向深化发展。首先,推动指标体系更全面地融合土壤健康的核心内涵,通过显著提升生物特性指标(如微生物多样性)的权重,构建涵盖“物理-化学-生物-环境”的完整评价维度;其次,着力开发能够敏感响应管理措施和气候变化的动态指标,建立基于过程的评价标准,以精准捕捉土壤质量的演变趋势;最后,充分考量黑土区内部的地带性分异与退化类型差异,在统一的国家标准框架下,建立区域特异性指标库与差异化阈值,从而确保评价结果既能服务于全国层面的统一比对,又能精准指导地方实践。

②发展机理与数据双驱动的智能评价方法。黑土地耕地质量评价评价方法将迎来从“统计相关”到“因果机理”的范式升级。通过将过程机理模型与人工智能深度耦合,构建机理与数据双驱动的建模框架。在此框架下,机理模型负责阐释土壤水分运移、碳氮循环、污染物迁移等内在过程,确保模型的机理可解释性;而人工智能(artificial intelligence, AI)模型则负责从海量“天-空-地”数据中挖掘复杂模式、优化参数并进行高精度预测。这一融合将催生出新一代的黑土地数字孪生系统,能够在虚拟空间中对不同气候情景与管理策略下的土壤质量长期演变进行模拟与推演,从而实现管理方案的先优化后实施。

③实现基于“天-空-地-网”的耕地质量实时感知与预警。依托卫星遥感、无人机与地面物联网传感器构成的协同观测网络,构建黑土地耕地质量的“神经感知系统”。这一系统将实现对关键质量指标的全天候、全要素、高频率感知,彻底改变当前依赖周期性人工调查的现状。在此基础

上,通过构建基于机器学习、强化学习的质量动态预测模型,并设定如有机质衰减速率、耕层阈值等早期预警指标^[70],对潜在的退化风险(如肥力衰退、盐碱化、侵蚀加剧)进行自动识别与分级预警,从而推动耕地质量监管从事后评价向事前预警、事中监控的根本性转变。

④推动评价成果向差异化管控与智慧决策的精准落地。评价的最终价值在于指导生产实践。未来,评价成果必须与具体的保护修复行动和管理决策无缝衔接。基于高精度评价图与诊断结果,为不同农户、不同田块生成“一地一策”的精准管理处方,包括变量施肥、保护性耕作方案、有机培肥计划等。通过将评价结果深度嵌入到精准农业作业系统与高标准农田管理平台,可直接驱动智能农机执行差异化作业,实现“评估-决策-执行”的闭环,彻底改变“均质化管理”的粗放模式,最大化土地生产潜力和资源利用效率。

⑤健全国家标准体系并深化评价结果的政策赋能。为确保评价工作的规范性与成果的权威性,亟需建立并完善一套统一、规范、科学的黑土地耕地质量评价国家标准体系。该体系应明确核心指标的定义、监测方法、质量分级阈值与数据交换协议。更为关键的是,必须强力推动评价结果向政策工具的转化。通过将评价结果与“田长制”绩效考核、耕地保护生态补偿、农业保险保费厘定及生态产品价值核算等政策机制深度挂钩,使其成为衡量保护成效、分配财政资金、落实管理责任的核心依据,从而真正激活评价成果在宏观治理与微观管理中的生命力,形成以评促建、以评促管的可持续发展长效机制。

参 考 文 献

- [1] 习近平. 人不负耕地, 耕地定不负人[N]. 人民日报, 2022-04-25.
- [2] 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.
- [3] 杨补勤. 摸清土壤底码实行科学种田——迎接第二次全国性土壤普查[J]. 湖北农业科学, 1979(3): 1-3.
- [4] 姚东恒, 党昱灏, 孔祥斌. 我国黑土地调查监测现状思考[J]. 中国土地, 2021(4): 28-31.
- [5] 刘顺国, 徐英德, 裴久渤, 等. 以土壤普查成果助推黑土地

- 科学保护与利用[J]. 土壤通报, 2024, 55(4): 1185-1190.
- LIU S G, XU Y D, PEI J B, *et al.*. Promoting the scientific protection and utilization of black soil through the third national soil survey results [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2024, 55(4): 1185-1190.
- [6] 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. Ecol. Agric.*, 2020, 28(1): 104-114.
- [7] 韩晓增, 邹文秀, 杨帆. 东北黑土地保护利用取得的主要成绩、面临挑战与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1194-1202.
- HAN X Z, ZOU W X, YANG F. Main achievements, challenges, and recommendations of black soil conservation and utilization in China [J]. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 2021, 36(10): 1194-1202.
- [8] 孙晓兵, 孔祥斌, 张青璞, 等. 基于指标综合特征的耕地遗传质量和动态质量评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 254-265.
- SUN X B, KONG X B, ZHANG Q P, *et al.*. Evaluation of inherent quality and dynamic quality of cultivated land based on comprehensive characteristics of indexes [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2020, 36(22): 254-265.
- [9] 张娜, 杜国明, 张瑞. 面向现代农业发展的黑土地质量理论解析[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 926-938.
- ZHANG N, DU G M, ZHANG R. Theoretical analysis of black soil quality for the development of modern agriculture [J]. *Resour. Sci.*, 2023, 45(5): 926-938.
- [10] 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.
- [11] COTRUFO M F, LAVALLEE J M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: a synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration [C]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 1-66.
- [12] 施釉超, 金晓斌, 韩博, 等. 面向资源认知变化的耕地评价研究进展与展望[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 237-250.
- SHI Y C, JIN X B, HAN B, *et al.*. Progress and future directions in cultivated land assessment research: a focus on changes in resource cognition [J]. *J. China Agric. Univ.*, 2024, 29(8): 237-250.
- [13] 杜国明, 闫佳秋, 张娜, 等. 面向多元主体需求的耕地质量体系新认知[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 212-222.
- DU G M, YAN J Q, ZHANG N, *et al.*. New cognition of the cultivated land quality system for the needs of multiple subject [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2023, 39(1): 212-222.
- [14] 房娜娜, 刘凯, 刘国栋, 等. 黑土肥力质量评价的生物指标研究进展[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 518-524, 542.
- FANG N N, LIU K, LIU G D, *et al.*. Research progress on biological indicators of black soil fertility quality evaluation [J]. *Geol. Resour.*, 2020, 29(6): 518-524, 542.
- [15] PALACINO B, ASCASO S, VALERO A, *et al.*. Regeneration costs of topsoil fertility: an exergy indicator of agricultural impacts [J/OL]. *J. Environ. Manage.*, 2024, 369: 122297 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122297>.
- [16] CHAUDHRY H, VASAVA H B, CHEN S, *et al.*. Evaluating the soil quality index using three methods to assess soil fertility [J/OL]. *Sensors*, 2024, 24(3): 864 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/s24030864>.
- [17] 李颖慧, 姜小三, 王振华, 等. 基于土壤肥力和重金属污染风险的农用地土壤质量综合评价研究: 以山东省博兴县为例[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1052-1062.
- LI Y H, JIANG X S, WANG Z H, *et al.*. Comprehensive evaluation of soil quality of agricultural land based on soil fertility and heavy metal pollution risk: a case study of Boxing county, Shandong province [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2021, 52(5): 1052-1062.
- [18] 宁建凤, 李彤, 曾瑞锬, 等. 珠三角赤红壤常年菜地土壤肥力质量评价[J]. 草业学报, 2024, 33(5): 25-40.
- NING J F, LI T, ZENG R K, *et al.*. Soil fertility in perennial vegetable fields in the latosolic red soil zone of the Pearl River Delta [J]. *Acta Pratac. Sin.*, 2024, 33(5): 25-40.
- [19] 王怀嵩, 张涛. 农业土壤健康评价体系研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(9): 1093-1100.
- WANG H S, ZHANG T. Research progress of agricultural soil health evaluation system [J]. *J. Ecol. Rural. Environ.*, 2022, 38(9): 1093-1100.
- [20] DRENNING P. Soil functions and ecosystem services: a literature review (Part 2/2) [J]. *Chalmers Univ. Technol.*, 2021 (2): 10-15.
- [21] REN Q, LIU G, LIU C, *et al.*. Soil quality evaluation and driving factor analysis of *Hippophae rhamnoides* plantations in coal mine reclamation areas based on different restoration durations [J/OL]. *Forests*, 2023, 14(7): 1425 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/f14071425>.
- [22] SALAM S B, SHUBHAM, KAUSHAL S. Soil management assessment framework for optimizing soil quality [J]. *Int. J. Res. Agron.*, 2024, 7(11): 1-6.
- [23] TOOR G S, YANG Y Y, DAS S, *et al.*. Soil health in agricultural ecosystems: current status and future perspectives [J]. *Adv. Agron.*, 2021, 168: 157-201.
- [24] PRASAD V, YADAV M B N, RUNDAN V, *et al.*. Assessment of soil quality of selected districts of kaleshwaram project command area of telangana state, India [J]. *Int. J. Environ. Clim. Change*, 2023, 13(7): 646-659.
- [25] 王艺霖, 梁尧, 蔡红光, 等. 基于最小数据集的不同有机物料还田黑土土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 68-75.
- WANG Y L, LIANG Y, CAI H G, *et al.*. Soil quality evaluation of black soil under different returning treatments of organic materials based on minimum data set [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2024, 55(1): 68-75.
- [26] 王亲, 董炜华, 李晓强, 等. 土壤健康评价的研究进展[J]. 现代农业研究, 2022, 28(7): 10-12.
- WANG Q, DONG W H, LI X Q, *et al.*. Advances in soil health

- assessment [J]. *Mod. Agric. Res.*, 2022, 28(7): 10-12.
- [27] HARRIS J A, EVANS D L, MOONEY S J. A new theory for soil health [J/OL]. *Eur. J. Soil Sci.*, 2022, 73(4): e13292 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1111/ejss.13292>.
- [28] 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.
- [29] 杨颖, 郭志英, 潘恺, 等. 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 461-475.
YANG Y, GUO Z Y, PAN K, *et al.*. Farmland soil health assessment based on ecosystem multi-functionality [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2022, 59(2): 461-475.
- [30] 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.
- [31] 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]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2024, 30(7): 1253-1261.
- [32] 任凤玲, 王谦. 我国土壤健康研究现状与展望[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(5): 1403-1411.
REN F L, WANG Q. Current status and prospects of soil health research in China [J]. *J. Environ. Eng. Technol.*, 2024, 14(5): 1403-1411.
- [33] WU Q, CONGREVES K A. A soil health scoring framework for arable cropping systems in Saskatchewan, Canada [J]. *Can. J. Soil. Sci.*, 2022, 102(2): 341-358.
- [34] 黄海潮, 雷鸣, 孔祥斌, 等. 中国耕地空间格局变化及其生态系统服务价值响应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 339-348.
HUANG H C, LEI M, KONG X B, *et al.*. Spatial pattern change of cultivated land and response of ecosystem service value in China [J]. *Res. Soil Water Conserv.*, 2022, 29(1): 339-348.
- [35] LI L, LYU X, ZHANG A, *et al.*. Sustainable intensification of farmers' cultivated land use: theoretical framework, level measurement, and response to land rights confirmation [J]. *Resour. Sci.*, 2022, 44(6): 1168-1180.
- [36] 熊强, 郑亮, 江进辉. 中国耕地功能转型时空分异及形成机理[J]. *湖北农业科学*, 2024, 63(2): 94-100, 110.
XIONG Q, ZHENG L, JIANG J H. Spation-temporal differentiation and formation mechanism of cultivated land function transformation in China [J]. *Hubei Agric. Sci.*, 2024, 63(2): 94-100, 110.
- [37] 裴小龙, 韩小龙, 钱建利, 等. 自然资源综合观测视角下的土壤肥力评价指标[J]. *资源科学*, 2020, 42(10): 1953-1964.
PEI X L, HAN X L, QIAN J L, *et al.*. Soil fertility assessment indicators from the perspective of natural resources comprehensive observation [J]. *Resour. Sci.*, 2020, 42(10): 1953-1964.
- [38] 孙晓兵, 蔡为民, 孔祥斌, 等. 基于多元主体协同的县域耕地质量调控模式与整治时序分区[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(21): 232-245.
SUN X B, CAI W M, KONG X B, *et al.*. Quality regulation pattern and consolidation time zone of county-level cultivated land based on multi agent collaboration [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2023, 39(21): 232-245.
- [39] SUN H, YANG Z, LI X, *et al.*. Assessment of the cultivated land quality in the black soil region of Northeast China based on the field scale [J/OL]. *Environ. Monit. Assess.*, 2023, 195(12): 1508 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12099-4>.
- [40] 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.
- [41] 任意, 曾衍德, 何才文, 等. 耕地质量等级:GB/T 33469—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [42] 曹野. 东北地区耕地质量等级评价与现状分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
CAO Y. Cultivated land quality evaluation and present situation analysis in Northeast China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [43] 何新莹, 聂艳, 王朴, 等. 基于改进灰靶模型的耕地质量评价方法与实证[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1007-1016.
HE X Y, NIE Y, WANG P, *et al.*. Cultivated land quality evaluation method and demonstration based on Improved grey target model [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2023, 60(4): 1007-1016.
- [44] 张超, 高璐璐, 郑文聚, 等. 遥感技术获取耕地质量评价指标的研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 1-13.
ZHANG C, GAO L L, YUN W J, *et al.*. Research progress on obtaining cultivated land quality evaluation indexes by remote sensing [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.*, 2022, 53(1): 1-13.
- [45] 郭倩, 王会利, 王晓晴, 等. 基于智能手机图像颜色参数的土壤有机质估测[J]. *土壤通报*, 2024, 55(4): 932-943.
GUO Q, WANG H L, WANG X Q, *et al.*. Estimation of soil organic matter based on color parameters of smartphone images [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2024, 55(4): 932-943.
- [46] XU J, TIAN H, XIAO J, *et al.*. Effects of close-to-nature forest management on carbon stocks in *Pinus tabulaeformis* plantations in northern China [J/OL]. *Front. For. Glob. Change*, 2025, 7: 1495771 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1495771>.
- [47] 姜芸, 王军, 杨继文. 基于遥感技术的黑土区耕地质量评价指标体系研究进展分析[J]. *测绘工程*, 2023, 32(1): 1-7, 13.
JIANG Y, WANG J, YANG J W. Research progress analysis of black soil region cultivated land quality evaluation index by remote sensing [J]. *Eng. Surv. Mapp.*, 2023, 32(1): 1-7, 13.
- [48] 郑曼迪, 刘忠, 许昭辉, 等. 基于微波遥感的土壤水分反演估算研究进展[J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 16-28.
ZHENG M D, LIU Z, XU Z H, *et al.*. Research progress of soil moisture estimation based on microwave remote sensing [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2024, 61(1): 16-28.
- [49] 王梦迪, 何莉, 刘潜, 等. 基于小麦冠层无人机高光谱影像的农田土壤含水率估算[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(6):

- 120-129.
WANG M D, HE L, LIU Q, *et al.* Estimating soil moisture contents of farmland using UAV hyperspectral images of wheat canopy [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2023, 39(6): 120-129.
- [50] TANG M, WANG Q, MEI S, *et al.* Research on the inversion model of cultivated land quality using high-resolution remote sensing data [J/OL]. *Agronomy*, 2023, 13(12): 2871 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122871>.
- [51] LIN N, LIU Y, LIU Q, *et al.* Inversion method of organic matter content of different types of soils in black soil area based on hyperspectral indices [J/OL]. *Open Geosci.*, 2024, 16: 20220739 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0739>.
- [52] 谭杰, 随顺涛, 高新, 等. 基于 Delphi-Fuzzy 丘陵地区农机服务质量评价体系研究[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(12): 255-262.
TAN J, SUI S T, GAO X, *et al.* Research on evaluation system of agricultural machinery service quality in hilly and mountainous areas based on Delphi-Fuzzy [J]. *J. Chin. Agric. Mech.*, 2023, 44(12): 255-262.
- [53] 郑铭宇, 蔡立群. 基于模糊数学方法的金昌市耕地质量评价及土壤养分空间特征分析[J]. *农学学报*, 2024, 14(7): 24-35.
ZHENG M Y, CAI L Q. Cultivated land quality evaluation and soil nutrient spatial characteristics analysis based on fuzzy mathematics method in Jinchang city [J]. *J. Agric.*, 2024, 14(7): 24-35.
- [54] 武岩, 刘宏金, 迟文峰, 等. 基于层次分析-客观赋权法的耕地质量等级评价方法研究与实证[J]. *中国土壤与肥料*, 2024 (4): 17-25.
WU Y, LIU H J, CHI W F, *et al.* Research and demonstration of cultivated land quality grade evaluation method based on AHP-CRITIC method [J]. *Soils Fert. Sci. China*, 2024(4): 17-25.
- [55] 张素荣, 汪大明, 杨俊泉, 等. 土壤中元素遥感定量反演研究进展与展望[J]. *中国地质*, 2024, 51(5): 1664-1675.
ZHANG S R, WANG D M, YANG J Q, *et al.* Quantitative remote sensing inversion of elements in soils: advances in research and future prospects [J]. *Geol. China*, 2024, 51(5): 1664-1675.
- [56] 王丽, 周勇, 李晴, 等. 基于随机森林的耕地质量评价智能模型及其应用研究[J]. *土壤学报*, 2022, 59(5): 1279-1292.
WANG L, ZHOU Y, LI Q, *et al.* An intelligent model of cultivated land quality evaluation based on random forest and its application [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2022, 59(5): 1279-1292.
- [57] 冯博. 基于模糊综合评价法和机器学习的耕地质量评价研究: 以莱芜区为例[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
FENG B. Study on cultivated land quality evaluation based on fuzzy comprehensive evaluation method and machine learning—take Laiwu district as an example [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023.
- [58] 刘子旋, 梁腾飞, 梁栋栋, 等. 基于 GTWR 模型的安徽省耕地利用效率影响因素时空分析[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(14): 117-124, 132.
LIU Z X, LIANG T F, LIANG D D, *et al.* Spatial and temporal analysis of factors affecting farmland utilization efficiency in Anhui province based on GTWR model [J]. *Hubei Agric. Sci.*, 2021, 60(14): 117-124, 132.
- [59] 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.
- [60] 董芳瑾, 张中彬, 蒋发辉, 等. 三江平原白浆土白浆层埋深与厚度空间分布格局及其驱动因素[J]. *土壤学报*, 2025, 62(2): 362-374.
DONG F J, ZHANG Z B, JIANG F H, *et al.* Spatial distribution of the buried depth and thickness of albic soil albic layer in Sanjiang plain and its influencing factors [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2025, 62(2): 362-374.
- [61] KANG L, ZHAO R, WU K, *et al.* Impacts of farming layer constructions on cultivated land quality under the cultivated land balance policy [J/OL]. *Agronomy*, 2021, 11(12): 2403 [2025-10-20]. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122403>.
- [62] 刘学, 李鑫, 张骏达, 等. 基于黄淮海地区耕地质量等级的粮食产能定量评估[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(6): 1251-1260.
LIU X, LI X, ZHANG J D, *et al.* Quantitative assessment of the relationship between cultivated land quality grades and grain production capacity in the Huang-Huai-Hai region of north China [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2025, 31(6): 1251-1260.
- [63] 蔡琼, 朱红梅, 肖婷. 耕地质量与耕地产能耦合度研究: 以湖南宁远县为例[J]. *上海国土资源*, 2022(2): 66-72.
CAI Q, ZHU H M, XIAO T. On coupling degree of cultivated land quality and productivity: a case study of Ningyuan county, Hunan province [J]. *Shanghai Land Resour.*, 2022(2): 66-72.
- [64] 李玉浩, 王红叶, 张骏达, 等. 华南区稻田耕地质量空间分布与产能提升潜力[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(10): 1613-1625.
LI Y H, WANG H Y, ZHANG J D, *et al.* Spatial distribution of cultivated land quality and potential for capacity improvement of paddy fields in South China [J]. *Chin. J. Eco-Agric.*, 2023, 31(10): 1613-1625.
- [65] 杨建波, 王朝晖, 邱士可, 等. 耕地分等因素对粮食产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 306-311.
YANG J B, WANG C H, QIU S K, *et al.* Influences of farmland classification factors on grain production [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2010, 26(4): 306-311.
- [66] 杨维鸽. 典型黑土区土壤侵蚀对土壤质量和玉米产量的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
YANG W G. Investigating the impacts of soil erosion on soil quality and corn yield in the typical black soil region [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [67] XU Y. Envirotyping for deciphering environmental impacts on crop plants [J]. *Theor. Appl. Genet.*, 2016, 129(4): 653-673.
- [68] ZHENG H, HUANG Y. Analysis and evaluation of sustainable utilization of cultivated land in China's black soil region based on open three-dimensional ecological footprint [J]. *Resour. Sci.*,

- 2024, 46(5): 1018-1031.
- [69] 陈信宇, 卞宏辰, 张文强, 等. 基于营养盐源-输过程的典型低山丘陵农业小流域风险空间识别与诊断研究[J]. 环境科学研究, 2025, 38(8): 1763-1771.
- CHEN X Y, BIAN H C, ZHANG W Q, *et al.* Spatial identification and diagnosis of risk in a typical low-mountain hilly agricultural watersheds based on nutrient source-transport processes [J]. Res. Environ. Sci., 2025, 38(8): 1763-1771.
- [70] 高佳, 朱耀辉, 赵荣荣. 中国黑土地保护: 政策演变、现实障碍与优化路径[J]. 东北大学学报(社会科学版), 2024, 26(1): 82-89.
- GAO J, ZHU Y H, ZHAO R R. Black soil protection in China: policy evolution, realistic obstacles and optimization paths [J]. J. Northeast. Univ. (Soc. Sci.), 2024, 26(1): 82-89.