

序

黑土是保障国家粮食安全不可或缺的战略资源。其深厚肥沃的土层与优越的耕作特性，承载着我国重要商品粮基地的产出重任，为端稳“中国饭碗”做出了历史性贡献。然而，当前我们也必须清醒地认识到，这片珍贵的土地正面临着黑土层变薄、结构退化、肥力下降等一系列严峻挑战。

党和国家始终高度重视黑土地保护，将其置于国家粮食安全与生态安全的战略高度予以部署。《中华人民共和国黑土地保护法》的颁布实施，以及《东北黑土地保护规划纲要（2017—2030年）》的持续推进，标志着黑土地保护已全面步入法治化、系统化的新阶段。正在审议中的《中华人民共和国耕地保护和质量提升法》也彰显了国家在耕地质量建设上的坚定决心。在此背景下，如何科学认知、准确评价并有效提升黑土地质量，已成为摆在农业科技工作者与管理实践者面前的关键课题。

《黑土地耕地质量系统认知与调查评价》一书的出版，恰逢其时。该书紧紧围绕“黑土地耕地质量是什么、受何影响、如何评价、何以提升”这一主线，在融会国内外相关理论与方法的基础上，构建了一套以产能为核心、功能为骨架、全要素协同的认知框架。书中系统阐述了土壤属性、生态环境、生产保障与社会经济等多维因子对黑土地质量的综合影响，更创造性地提出了“功能导向与退化威胁相结合”的评价指标体系，直面黑土层变薄、结构障碍、养分下降、侵蚀加剧等现实问题。

尤为值得称道的是，该书在方法论上实现了重要突破，将遥感反演、空间建模、机器学习等现代技术与传统调查深度融合，构建了多尺度、动态化的评价路径，并在东北全域及典型区域开展了富有说服力的示范应用。书中对黑土层厚度、土壤生物多样性等特色指标的深入探索，推动耕地质量评价从单一的肥力指标，迈向涵盖土壤健康、生态功能与可持续性的系统维度。全书结构严谨、内容扎实，体现了从理论到实践、从认知到应用的完整逻辑链条，展现了黑土地质量评价向科学化、精细化、智慧化迈进的清晰方向。

该书不仅是黑土地研究领域的一项重要学术成果，更是面向国家需求、回应现实问题的务实之作。相信该书的出版，必将为从事土壤、资源、环境、农业及相关领域的科研人员、管理人员和技术工作者提供重要参考，也为推动黑土地保护与农业可持续发展注入新的思想动力。期待该书能唤起更多人对黑土地的关注、理解与行动，共同守护好这方宝贵的土地，让其永续滋养中华民族的未来。

李保国

2026年3月

前 言

黑土是地球上最适宜农业生产的土壤类型之一。深厚的黑土层和优良的土壤性状，使其成为我国东北地区农业生产的核心资源。随着国家对粮食安全的高度重视，黑土地的保护与可持续利用已上升为中国式农业农村现代化的重要议题。近年来，受长期高强度耕作利用、气候变化等因素影响，黑土地出现了“变薄、变瘦、变硬”等问题，面临着肥力下降、结构退化等严峻挑战。耕地质量评价是黑土地科学保护与精准管理的重要基础，其科学性与系统性直接关系到政策措施的针对性与有效性。面向黑土地开展高质量、多维度的耕地质量评价，是落实“藏粮于地、藏粮于技”战略的迫切需求。如何科学评估和提升黑土地耕地质量，已成为保障国家粮食安全和生态安全的关键问题。

本书依托中国农业大学牵头承担的国家重点研发计划课题“黑土地耕地质量大数据认知系统与综合评价体系构建”（2021YFD1500201），基于黑土地耕地质量系统认知理论、评价指标体系、大数据调查评价技术与多尺度应用示范等研究成果撰写而成。全书共9章：第1章为黑土地与黑土地耕地质量，详细介绍了黑土地的地理分布、土壤特性及耕地质量的现状与演变过程，分析了黑土地保护利用在保障粮食安全中的战略地位与面临的现实挑战；第2章为黑土地耕地质量认知理论与方法，提出以产能为核心，兼顾生态与社会经济等功能的耕地质量认知框架，并探讨大数据驱动下的认知路径；第3章为黑土地耕地质量全要素分析与关键指标时空演变，通过全要素分析，揭示土壤属性、立地条件及社会经济等要素对耕地质量的多维影响和要素表征指标的空间分布；第4章为黑土地耕地质量评价指标体系与评价方法，创新构建了以“功能+威胁”为核心的评价指标体系，系统阐述了阈值设定、隶属度计算与权重确定等关键方法，形成了科学完整的评价技术体系；第5章为黑土地耕地质量大数据调查评价方法与技术，探讨了大数据驱动的调查评价技术，提升了数据获取、标准化处理与数字制图的科学性与准确性；第6章为黑土地耕地质量多尺度调查评价应用，验证了评价体系在不同空间尺度下的适用性与差异化特征；第7章为特色指标在黑土地耕地质量评价中的应用，创新引入黑土

层厚度和微生物多样性两项关键指标，建立了区域特色与生态功能并重的评价路径，拓宽了耕地质量评价的理论外延；第8章为黑土地耕地质量评价技术验证与应用，通过粮食产量的空间对比分析，验证了评价结果与耕地生产力的耦合关系，为耕地质量提升技术模式提供了理论依据；第9章为黑土地耕地质量调查评价与提升建议，结合全书研究成果，提出黑土地耕地质量保护与提升的对策建议，为未来黑土地的科学管理与政策制定提供了实施路径。

本书凝聚了集体智慧与付出。课题研究得到国家重点研发计划项目跟踪专家的全程指导。在课题研究与书稿撰写过程中，得到了沈阳农业大学、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、吉林省农业科学院等合作单位以及中国科学院南京土壤研究所、北京市农林科学院等其他课题牵头单位领导和专家的大力支持。课题示范应用工作得到了吉林省梨树县农业技术推广总站、吉林省公主岭市农业技术推广总站、中国农业大学吉林梨树实验站、黑龙江玖成农业发展集团有限公司等单位及所在地相关政府部门的关心与协助。在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正！

黄元仿

2026年2月

目 录

序

前言

第 1 章 黑土地与黑土地耕地质量	1
1.1 黑土地概况	1
1.1.1 黑土地定义及其分布	1
1.1.2 黑土地禀赋条件	4
1.1.3 黑土地质量现状	7
1.2 黑土地耕地质量调查评价	8
1.2.1 国外耕地质量调查评价发展动态	8
1.2.2 国内耕地质量调查评价探索与进展	12
1.2.3 黑土地耕地质量调查评价实践	15
1.3 “十四五”耕地质量评价研究与本书思路框架	18
第 2 章 黑土地耕地质量认知理论与方法	21
2.1 现有耕地质量认知体系的不足	21
2.2 以产能为核心的系统认知框架	24
2.2.1 基本认知内容	24
2.2.2 系统认知框架	26
2.2.3 认知场景与需求分析	28
2.3 从大数据视角认知耕地质量	30
2.3.1 耕地质量的多功能认知	30
2.3.2 大数据认知理论基础	32
2.3.3 大数据驱动的系统认知体系	34

2.4 本章小结	38
第3章 黑土地耕地质量全要素分析与关键指标时空演变	39
3.1 黑土地耕地质量全要素分析	39
3.1.1 全要素认知视角下的耕地质量	39
3.1.2 关键要素指标与粮食产量的关系	41
3.2 黑土地耕地质量要素及表征指标	46
3.2.1 土壤属性要素及表征指标	48
3.2.2 立地条件要素及表征指标	50
3.2.3 其他要素及表征指标	51
3.3 黑土地耕地质量要素指标的空间分布特征	53
3.3.1 土壤属性要素指标的空间分布	53
3.3.2 立地条件要素指标的空间分布	58
3.3.3 其他要素指标的空间分布	61
3.4 本章小结	63
第4章 黑土地耕地质量评价指标体系与评价方法	65
4.1 现有耕地质量评价体系的借鉴与继承	65
4.2 黑土地耕地质量评价指标体系构建	69
4.2.1 “功能+威胁”体系框架构建	69
4.2.2 评价指标的筛选	72
4.2.3 评价指标体系的形成	76
4.3 黑土地耕地质量评价方法	79
4.3.1 指标阈值划定与隶属度计算	80
4.3.2 主客观结合的权重确定路径	82
4.3.3 耕地质量综合评价与分等	87
4.4 本章小结	90
第5章 黑土地耕地质量大数据调查评价方法与技术	91
5.1 评价尺度划分与数据获取	91
5.1.1 渔网结合小波分析的评价尺度划分方法	91
5.1.2 拉丁超立方体抽样数据获取方法	93

5.1.3	特色指标数据获取方法	97
5.2	数据标准化处理技术	100
5.2.1	连续小波变换的有机碳高光谱反演	100
5.2.2	竞争性自适应重加权采样的波段筛选	104
5.2.3	多源数据融合生成评价图斑	106
5.3	大数据分析技术在耕地质量评价中的应用	108
5.3.1	基于 Apriori 算法的关联规律挖掘	108
5.3.2	多种机器学习算法的降维技术	113
5.4	评价数据的数字制图表达	117
5.4.1	基于机器学习的有机质数字制图	117
5.4.2	黑土层厚度数字制图	123
5.5	本章小结	129
第 6 章	黑土地耕地质量多尺度调查评价应用	130
6.1	东北黑土地耕地质量“功能+威胁”综合评价	130
6.1.1	数据来源与评价方法	130
6.1.2	评价结果分析	133
6.1.3	不同土壤类型的评价结果对比	145
6.2	吉林省耕地质量综合评价	146
6.2.1	数据来源与评价方法	147
6.2.2	评价结果分析	149
6.2.3	不同土壤类型的评价结果对比	150
6.3	典型县域耕地质量评价与对比分析	152
6.3.1	数据来源与评价方法	152
6.3.2	评价结果分析	155
6.3.3	不同土壤类型的评价结果对比	159
6.4	本章小结	161
第 7 章	特色指标在黑土地耕地质量评价中的应用	162
7.1	黑土层厚度指标的引入	162
7.1.1	数据获取与处理方法	163

7.1.2 黑土层厚度替代耕层厚度的评价结果分析	165
7.2 微生物多样性指标的引入	168
7.2.1 数据获取与处理方法	168
7.2.2 纳入微生物多样性指标的评价结果分析	170
7.3 本章小结	172
第 8 章 黑土地耕地质量评价技术验证与应用	173
8.1 耕地质量与产量的关联关系	173
8.1.1 黑土地耕地质量与产量变化	173
8.1.2 吉林省耕地质量与粮食产量变化	174
8.1.3 典型县域耕地质量与产量变化及动态关联	176
8.2 耕地质量评价应用与提升技术模式	180
8.2.1 耕地质量评价技术应用	180
8.2.2 耕地质量提升技术模式	191
8.3 本章小结	203
第 9 章 黑土地耕地质量调查评价与提升建议	204
9.1 黑土地耕地质量调查评价的理论价值与实践意义	204
9.2 黑土地耕地质量调查评价的技术发展方向	208
9.3 黑土地耕地质量调查评价的管理政策建议	210
参考文献	213
附录	218
附录 1 德国 Muencheberg 土壤质量定级系统	218
附录 2 欧盟土壤环境质量监测指标体系	222
附录 3 美国土地评价与立地分析系统	223
附录 4 黑土地耕地质量评价指标体系构建指南	226

第1章

黑土地与黑土地耕地质量

黑土是大自然馈赠给人类最珍贵的土壤宝藏，是全球最具农业价值的土壤类型之一。深厚的暗黑色腐殖质层是黑土最醒目的标志，万年生命循环与物质积累造就了这一生态奇迹。黑土的形成过程极为漫长，在气候演变、植被更替、生物降解和土壤微生物活动的长期作用下，最终塑造了这片富饶的土地，使其成为地球上最适宜农作物生长的土壤之一。本章旨在阐述黑土地的基本情况，系统梳理与黑土地耕地质量相关的研究背景，介绍黑土地的地理分布、土壤特性及其在农业生产中的关键作用，深入分析其形成过程与生产力水平的内在关联，全面回顾国内外耕地质量评价的研究进展，重点梳理黑土地耕地质量认知、调查评价方法及演变规律。在此基础上，本章还将阐述当前黑土地耕地质量评价研究中存在的问题与不足，为后续章节提出与优化黑土地耕地质量评价方法奠定理论基础。

1.1 黑土地概况

1.1.1 黑土地定义及其分布

黑土地是指具有黑色或暗黑色腐殖质表土层、性状好、肥力高的耕地（赵恩全等，

2025)。腐殖质在土壤养分储存与释放中扮演关键角色,能够持续供给植物生长所需的氮、磷、钾等元素,同时提升土壤的保水性和通气性,为作物提供有利的生长环境。典型的黑土地具有以下关键特征:①土壤肥力优越,有机质含量高,黑土层厚,具有良好的养分供应能力。②物理结构良好,保水保肥能力强,团粒结构发达,孔隙度高,既能保持水分和养分,又能保持良好的透气性,适宜农作物根系生长。③生物活性高,微生物种群丰富,黑土富含多种有益微生物,能促进有机质分解与养分循环,提高土壤生物活性。④气候适宜,光热资源充足。黑土地多分布在温带大陆性气候区,四季分明,夏季光照充足,昼夜温差大,有利于作物生长和产量提升。黑土地在全球以及中国的地理分布情况如下。

1. 全球黑土地分布

目前,全球仅有四大黑土地分布区,分别位于乌克兰平原、美国密西西比河流域、阿根廷潘帕斯草原和中国东北平原,占全球不到 7% 的陆地面积,但承载着全球超过 1/4 的粮食生产 (Li et al., 2025)。乌克兰平原的黑土地是全球分布范围最广、土壤质量最优的黑土地,素有“欧洲粮仓”之美称,总面积达 190 万 km^2 。该地区主要种植小麦、玉米、向日葵和大豆,农业机械化水平高,农产品出口量巨大,在全球市场中占据重要地位;美国的黑土地主要分布在密西西比河流域,其中包括伊利诺伊州、艾奥瓦州、明尼苏达州、内布拉斯加州等农业核心区,总面积约 120 万 km^2 。美国黑土地是全球最发达的现代化农业区之一,主要种植玉米、大豆和小麦,并以农业管理高效、农业技术精准(如卫星监测、精准施肥、无人机喷洒)和大规模农场化经营模式闻名于世。阿根廷的黑土地主要分布在潘帕斯草原,为典型的“红化黑土”,是世界上最主要的红化黑土分布区,总面积为 89 万 km^2 。该地区地形平坦,是南美洲优质的草场和重要的农业区,开垦后的耕地主要种植小麦、玉米、大豆和油菜。中国的黑土地主要分布在东北平原,总面积达 125 万 km^2 ,是我国最重要的商品粮生产基地,主要种植玉米、水稻和大豆,对保障我国的粮食生产安全具有重要意义。

2. 中国黑土地分布

我国的黑土地主要分布在东北平原,本书称作东北黑土地或黑土区,包括黑龙江省、吉林省、辽宁省及内蒙古自治区的赤峰市、呼伦贝尔市、通辽市和兴安盟(俗称东四盟市)($115^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$, $38^{\circ}\text{N}\sim 53^{\circ}\text{N}$) [图 1-1 (b)]。包括市级行政单元 56 个,县(市、区、旗)级行政单元 307 个(表 1-1),涵盖黑土、黑钙土、白浆土、草甸土、暗棕壤、棕壤等多种土壤类型。第三次全国国土调查数据统计显示,东北黑土地的总面积约为 124.86 万 km^2 ,其中耕地面积 35.83 万 km^2 。黑土层的厚度在 30~100 cm,有机质含量

高，土壤肥力强。根据东北黑土地的水热条件、地形地貌、土壤类型、种植方式等因素，按照反映区域差异性并归纳共同性的原则，将东北黑土地划分为松嫩平原区、三江平原区、辽河平原区、长白山辽东区、西部风沙区和大小兴安岭区 6 个类型区（徐英德等，2023）[图 1-1（c）]。其中，松嫩平原区地处松花江和嫩江冲积平原，包含市级行政单元 10 个，县（市、区、旗）级行政单元 69 个，耕地面积 10.76 万 km^2 ；三江平原区位于黑龙江、乌苏里江和松花江三江汇流处的冲积平原，包含市级行政单元 6 个，县（市、区、旗）级行政单元 30 个，耕地面积 6.68 万 km^2 ；辽河平原区位于以辽河流域为主体的中部和下部冲积平原，包含市级行政单元 11 个，县（市、区、旗）级行政单元 72 个，耕地面积 3.53 万 km^2 ；长白山辽东区位于黑土区东南部长白山山脉沿线，包含市级行政单元 17 个，县（市、区、旗）级行政单元 72 个，耕地面积 6.46 万 km^2 ；西部风沙区主要位于内蒙古自治区的东四盟市和吉林省、辽宁省西部的部分地区，包含市级行政单元 6 个，县（市、区、旗）级行政单元 53 个，耕地面积 5.36 万 km^2 ；大小兴安岭区主要位于黑龙江省中部、西北部以及内蒙古自治区的东北部，包含市级行政单元 6 个，县（市、区、旗）级行政单元 11 个，耕地面积 3.04 万 km^2 。

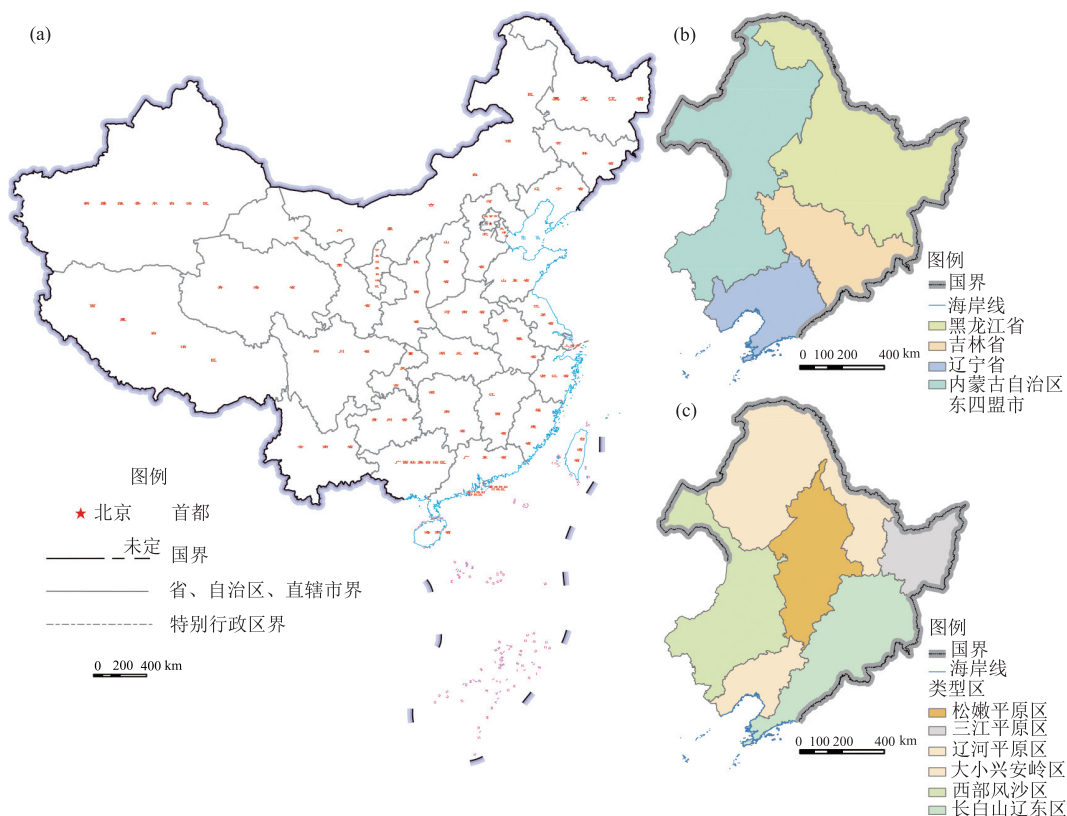


图 1-1 东北黑土地在中国的对应位置 (a) 与省域划分 (b) 和类型区域 (c) 划分



表 1-1 东北黑土地不同类型区包含的行政区

类型区	省级行政区	市、县（市、区、旗）级行政区
松嫩平原区	黑龙江省	齐齐哈尔市、大庆市、黑河市（五大连池、北安、嫩江）、绥化市（北林、安达、明水、望奎、海伦、肇东、青冈、兰西）、哈尔滨市（主要市区、双城、木兰、巴彦）
	吉林省	松原市、长春市（农安、德惠）、白城市（镇赉、大安）、四平市（市区、梨树、公主岭、双辽）
	内蒙古自治区	呼伦贝尔市（莫力达瓦达斡尔）
三江平原区	黑龙江省	鹤岗市、佳木斯市、七台河市、双鸭山市、哈尔滨市（依兰）、鸡西市（主要市区、密山、虎林、鸡东）
辽河平原区	辽宁省	阜新市、葫芦岛市、锦州市、盘锦市、沈阳市、鞍山市（市区、台安、海城）、朝阳市（市区、朝阳县、北票）、抚顺市（望花、顺城）、辽阳市（主要市区、灯塔、辽阳县）、铁岭市（市区、铁岭县、昌图县、调兵山市、开原市）、营口市
长白山辽东区	黑龙江省	牡丹江市、哈尔滨市（阿城区、五常、宾县、延寿、方正、尚志）、鸡西市（梨树、麻山）
	吉林省	白山市、吉林市、辽源市、四平市（伊通）、通化市、延边、长春市（市区、榆树）
	辽宁省	本溪市、大连市、丹东市、鞍山市（岫岩）、抚顺市（新抚、东洲、抚顺、新宾、清原）、辽阳市（弓长岭、辽阳）、铁岭市（西丰）
西部风沙区	吉林省	白城市（市区、通榆、洮南）
	辽宁省	朝阳市（建平、喀左）
	内蒙古自治区	赤峰市、兴安盟、通辽市、呼伦贝尔市（扎赉诺尔、新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗）
大小兴安岭区	黑龙江省	大兴安岭地区、伊春市、哈尔滨市（通河）、黑河市（市区、孙吴、逊克）、绥化市（庆安、绥棱）
	内蒙古自治区	呼伦贝尔市（海拉尔区、阿荣、鄂伦春、鄂温克、陈巴尔虎、牙克石、扎兰屯、额尔古纳、根河）

1.1.2 黑土地禀赋条件

1. 自然条件

1) 气候类型

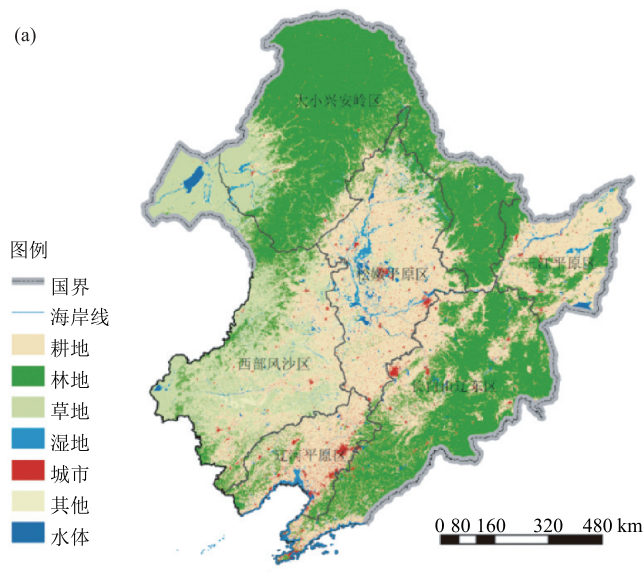
东北黑土地位于温带大陆性季风气候区，兼具湿润与半干旱特征，冬季长且寒冷干燥。从北到南跨越寒温带、中温带和暖温带，整体以中温带为主。从东到西则呈现湿润区、半湿润区与半干旱区的过渡分布。年平均气温为-1~9℃，年平均降水量为 500~800 mm，其中 60%~70%的降水集中在 6~9 月的作物生长季，“雨热同期”特征明显（Gao et al., 2023）。黑土地夏季温暖湿润，冬季严寒少雪，土壤冻结深度大且持续时间长，季节性冻层发育明显。这种独特的气候不仅塑造了茂密的草原化草甸和森林植被，还通过抑制冬季微生物活动，促使土壤表层的有机质积累，为黑土层的形成奠定了基础。

2) 地形地貌与土地利用

东北黑土地的地形地貌呈“簸箕状”，西部以大兴安岭山脉为屏障，北部和东部分别为小兴安岭山脉和长白山山脉，中部则是由松嫩平原和辽河平原共同构成的东北平原[图 1-2 (a)]。平原区地势平坦辽阔，土层深厚，是典型黑土的分布区。地形单元主要由山地（大兴安岭、小兴安岭、长白山）、平原（松嫩平原、辽河平原、三江平原）以及低山丘陵（大兴安岭北段与小兴安岭交界带）构成。微地貌特征以山麓平原和山前洪积阶地为主，波状漫岗地形广泛分布，坡度一般在 $1^{\circ}\sim 5^{\circ}$ （Ma et al., 2023）。土地利用方面，耕地约占黑土地总面积的 30%，林地占约 40%，草地占约 10%，三者合计达全区总土地面积的 80%。其中，松嫩平原凭借其平坦的地形和肥沃的黑土，为大规模农业开发提供了良好的基础条件。

3) 土壤类型

黑土地的土壤类型丰富，兼具地带性与非地带性特征，自东南向西北依次为棕壤、褐土、暗棕壤、黑土、灰色森林土、黑钙土、栗钙土等地带性土壤，同时交错分布草甸土（主要分布于山前台地下部）、白浆土（波状平原漫岗上部）、沼泽土（三江平原洼地）等非地带性土壤[图 1-2 (b)]。黑土作为典型代表，在自然条件下厚度可达到近 100 cm（罗方舟等，2025），质地均匀，有机质丰富。然而，随着开垦后水土流失和耕作熟化，黑土层开始逐渐变薄。黑土主要发育于黄土及红土堆积物、冲积-洪积物、河湖相沉积物等不同母质中。黑钙土母质在台地以花岗岩和玄武岩残积物为主，盆地则以河湖沉积物为主；草甸土多由冲积物、洪积物或黄土状沉积物发育而成；暗棕壤和棕壤主要形成于现代硅铝质残积物，局部夹杂第四纪红土。



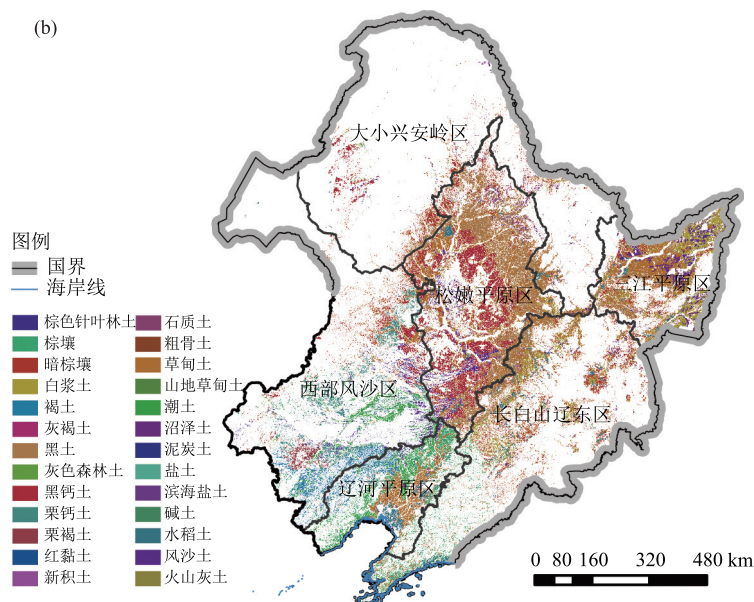


图 1-2 黑土区土地利用类型图 (a) 与黑土地土壤类型图 (b)

2. 社会资源与保护政策

1) 人口概况

第七次全国人口普查数据显示, 辽宁省、吉林省、黑龙江省以及内蒙古自治区东四盟市常住人口合计约 1.1 亿人, 尽管与第六次全国人口普查数据相比, 这一地区的总人口呈现出一定的负增长趋势, 但整体人口规模仍保持稳定, 为区域的持续发展提供了充足的人力资源。具体来看, 辽宁省的人口约为 4259 万人, 吉林省为 2407 万人, 黑龙江省为 3185 万人, 内蒙古自治区东四盟市为 1041 万人。地区的城镇化进程较为快速, 尤其是辽宁省, 城镇化率达到 73.51%, 远高于全国平均水平 (66.16%)。黑龙江省的城镇化率为 67.11%, 同样高于全国平均水平, 吉林省的城镇化率为 64.72%。

2) 黑土地保护政策

为有效保护黑土地, 提升耕地质量, 我国系统推进了多项黑土地保护政策。2004 年, 国务院颁布《中共中央 国务院关于进一步加强农村工作提高农业综合生产能力若干政策的意见》, 明确提出“加强南方丘陵红土区、东北黑土漫岗区 and 西南石漠化区的水土流失综合治理。切实防治耕地和水污染”。自 2015 年以来, 中央一号文件多次强调耕地质量保护和保护性耕作, 在黑土地推广相关技术和试点措施, 彰显了国家层面的高度重视。在此基础上, 2017 年农业部门会同发展改革委等 6 部门联合印发的《东北黑土地保护规划纲要 (2017—2030 年)》为黑土地保护设定了长期目标与总体框架。2020 年农业农村部、财政部发布的《东北黑土地保护性耕作行动计划 (2020—2025 年)》明

确了技术路径；2021年由农业农村部等7部门联合印发的《国家黑土地保护工程实施方案（2021—2025年）》进一步量化了“十四五”时期的核心任务指标，明确提出实施黑土耕地保护利用面积1亿亩（含标准化示范面积1800万亩）的目标任务；2022年《中华人民共和国黑土地保护法》的颁布与实施，标志着中国的黑土地保护工作全面进入法治化轨道，为这一珍贵资源的永续利用提供了最高层级的法律保障。

1.1.3 黑土地质量现状

黑土地被誉为“耕地中的大熊猫”，其既是保障国家粮食安全的战略资源，也是推动农业可持续发展的重要基石。黑土地的核心价值首先体现在其独特的自然禀赋上，其黑土层平均厚度可达30~100 cm，有机质含量高达40 g/kg，为作物的生长提供了充足的养分，造就了东北地区粮食单产比全国平均水平高15%~20%的生产优势。黑土地是我国重要的商品粮生产基地，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（图1-3），是国家粮食安全的坚实基础，是维护14亿人饭碗的“稳定器”与“压舱石”。此外，黑土地还具有强大的固碳潜力，在生态调节中扮演着关键角色。黑土的碳汇密度约为181.9 t/hm²，是全国其他地区土壤碳汇密度的2倍，土壤碳汇约为4 Gt，占全国土壤碳汇的5%（韩贵清，2021）。黑土的土壤有机碳含量在一定条件下仍具有十分显著的提升潜力，这种“藏碳于土”的生态功能，使黑土地成为实现“双碳”目标的重要阵地。然而，长期的高强度开发利用使黑土地出现“变薄”“变瘦”“变硬”等一系列问题，成为威胁国家粮食安全与区域生态安全的“隐形炸弹”。如何破解这一困局，既是落实“藏粮于地、藏粮于技”的核心命题，也是东北农业发展绿色转型的关键突破口。第二次全国土地调查显示，黑龙江、吉林两省已有近四成耕地为黑土层<30 cm的“薄层黑土”，其中吉林省内厚度不足20 cm的“破皮黄”面积达1030 km²，占该省黑土耕地的12.4%。自然条件下需200~400年才能形成的1 cm黑土，如今正以年均2~10 mm的速度被剥蚀。“条田化开垦”把三江平原沼泽湿地切割得支离破碎。遥感监测表明，湿地斑块密度净增2倍、斑块数量增加46%，破碎化的景观不仅削弱了生态屏障功能，还与风蚀、水蚀形成叠加效应，进一步加速了黑土流失。这一系列变化导致了黑土地的土壤肥力下降。监测数据显示，近60年来，黑土地耕作层土壤有机质含量下降了约1/3，部分地区下降了50%。松嫩平原0~20 cm土层的土壤有机碳含量较低，部分区域已降至10~15 g/kg。土壤有机碳密度平均下降6.71 Mg C/hm²（1Mg=10⁶g）（0~20 cm），区域总储量减少约0.32 Pg（1Pg=10¹⁵g）（Wang et al., 2023）。辽河平原多数地区的土壤有机质含量已降到20 g/kg以下。耕层土壤有机碳每降低1%，玉米、小麦

籽粒将潜在减产 2.5%~3.0%，黑土地“变瘦”对我国东北粮仓的持续稳产构成严重威胁。生态方面，东北黑土地长期“重产出、轻养护”的管理措施，导致耕地被高强度透支。化肥农药的过量投入使土壤微生物多样性锐减，养分循环、碳储存、缓冲、净化和水分调节功能全面退化。1985~2020 年长期定位监测显示，玉米连作使固氮菌和解磷细菌丰度下降超过 40%。1986~2001 年松嫩平原由于过度垦荒和放牧等人为影响，湿地面积减少了 38.81%，过度开垦导致植物群落结构、功能及土壤健康状况恶化。水稻北扩进一步增加了资源压力：2000~2020 年仅三江平原的水稻种植面积就增加了 219 万 hm^2 ，且种植区域仍在向高纬度地区扩张。目前 50% 以上的水稻灌溉依赖地下水，导致地下水开采量已持续超过补给量。黑土地的“水-碳-生物”联动危机正愈演愈烈。

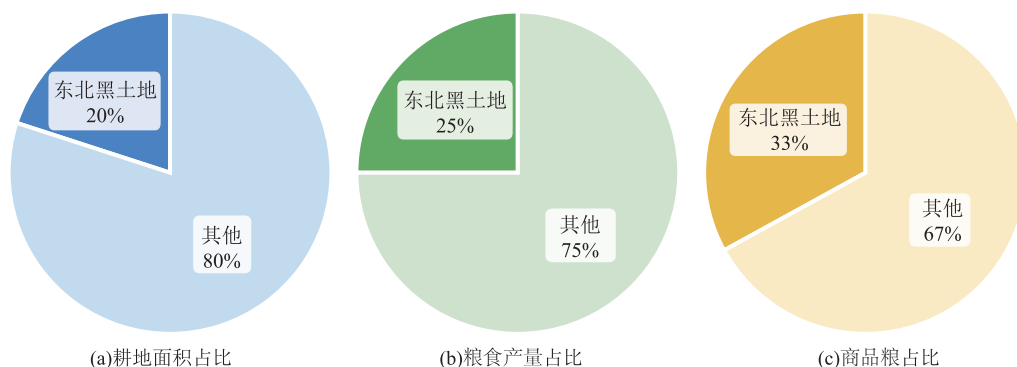


图 1-3 东北黑土地耕地面积、粮食产量和商品粮占全国的比例

黑土地保护是推动农业绿色发展、提高农产品竞争力的迫切需求。然而，现有耕地质量底数不清、变化不明，已成为科学保护与精准施策的关键瓶颈，唯有通过更系统的评价，才能准确识别退化区域与关键限制因子，为黑土地保护措施的制定与可持续管理模式的开发提供依据，实现粮食稳产增产与生态功能稳定的目标。长久以来，国内外均对耕地质量的内涵进行了不同程度的探索，并建立了各具特色的耕地质量评价体系。已有的概念内涵、方法和经验为黑土地保护提供了重要借鉴。因此，应首先系统梳理国内外耕地质量调查评价的研究进展，深化黑土地耕地质量的系统认知。

1.2 黑土地耕地质量调查评价

1.2.1 国外耕地质量调查评价发展动态

耕地质量调查评价的发展历程折射出人类对土地资源认知的深化与科学技术的演

进。从早期依赖经验判断，到逐步形成以实验室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，在不断积累实践经验的同时，也在重塑对耕地功能的理解。进入 21 世纪，数字化和智能化技术的广泛应用，更是推动耕地质量评价向实时化、动态化和系统化方向拓展。由此可见，耕地质量调查评价呈现出由直观经验到科学奠基，由定量分析到综合评价，再到智能监测的渐进演化过程，既包含理念的更新，也体现技术与方法的变革（图 1-4）。为了全面把握这一过程，可以将其划分为若干发展阶段进行梳理。

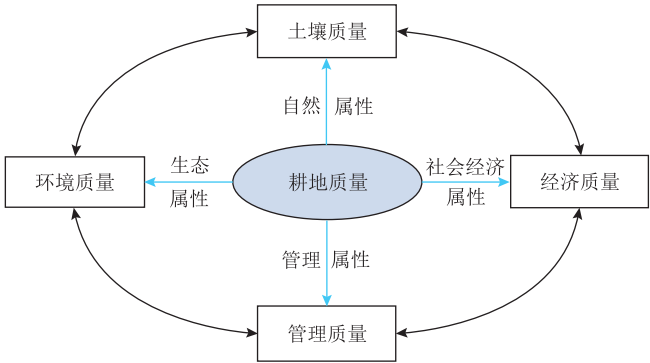


图 1-4 耕地质量内涵

1. 经验认知与科学奠基阶段

人类最初对耕地质量的认知主要依赖直观经验与农事实践：通过观察土壤的颜色和作物的长势来判断土壤肥力的高低，并在长期耕作中形成施肥、轮作与灌溉调控的经验体系。两河流域、尼罗河流域与中华文明均积累了以灌溉-排水-培肥为一体的田间管理经验。其中，尼罗河谷在调控水位、分洪与渠系建设方面的系统做法，为耕地质量维持与稳产提供了直接支撑，反映了早期农业社会“水土工程-作物栽培”维护耕地功能的朴素路径。18~19 世纪，欧洲和北美出版了大量农业手册、农业百科、期刊和年鉴，这些文献旨在将分散的田间经验系统化，并涵盖土壤管理、作物栽培与农业经营等内容。19 世纪，随着农业年鉴和期刊的增加，农业知识逐渐得到积累与传播。这些文献为后续农业史研究提供了宝贵的资料，并为农业知识的可比性与文献化奠定了基础。19 世纪后期，土壤学在理论与方法上迎来关键跃迁。俄罗斯学者瓦西里·瓦西里耶维奇·道库恰耶夫（Vasily V. Dokuchaev）通过大尺度的土壤野外调查，提出了将土壤视为一种独立的自然体的观点，强调土壤的形成与气候、植被、地形等成土因素密切相关，并首次系统描述了土壤剖面 and 成土过程的理论基础。他的思想为土壤分类、调查与制图等方法提供了核心理念，使土壤学从经验学科迈向现代自然科学，被普遍视为现代土壤科学的奠基

者之一 (Rusakova et al., 2022)。这一自然体范式使耕地质量的认知从对表象的经验判断上升为以成土环境与过程为核心的科学解释,为后续的标准化调查、区域制图与分类命名奠定了理论基础。在这一思想的影响下,耕地质量的系统调查与地图化表达迅速推进。1899 年起,美国农业部通过国家合作土壤调查体系(National Cooperative Soil Survey)在全国范围内开展县域尺度的土壤测绘和调查工作,在这一体系下形成了逐步标准化的调查程序和成果发布形式,包括统一的术语、规范的方法,以及包括土壤地图、调查报告和说明资料等多种成果。1899~2005 年,印刷版土壤调查报告一直是主要的信息来源;自 2005 年起,网页土壤调查(web soil survey)成为官方发布渠道,标志着土壤调查成果传播由制度化向持续化、信息化发展。这一阶段完成了从“经验性认知”向“科学化范式”的三重奠基:其一,确立“土壤为独立自然体”的学科视角(道库恰耶夫),将耕地质量的理解纳入成土环境与过程的解释框架;其二,建立以县域测绘与调查报告为核心的制度化调查体系,使耕地质量信息具备连续性与空间化表达;其三,通过手册与规范的逐步完备,实现野外观察-室内测试-标准化描述的有机衔接,为后续“定量化与制度化阶段”的分级评价与适宜性判定提供了坚实基础。

2. 定量化与制度化阶段

20 世纪,耕地质量调查评价开始进入一个全新的定量化与制度化阶段。实验室技术的发展使土壤理化性质的测定更标准,pH、有机质、养分含量、质地等指标成为评价土壤肥力与生产潜力的重要依据。这些定量指标的广泛采用,使得耕地质量评价从经验判断逐步转向科学量化。特别是在粮食安全需求与农业集约化快速发展的大背景下,对耕地质量的科学分级已经成为管理的重要工具。1961 年,美国农业部土壤保护局发布了《〈土地能力分类〉农业手册第 210 号》(Land Capability Classification, Agriculture Handbook No. 210),其由 A. A. Klingebiel 和 P. H. Montgomery 编制,该手册首次系统提出了 USDA 土地能力分类框架。该框架根据影响土地适宜耕种和管理的主要限制因素,将土地划分为 I~Ⅷ级,并通过子类反映如侵蚀危险、湿度等约束,体现了不同土壤在耕作适宜性和管理要求上的差异。该分类体系为后来土地利用规划、保护管理和土壤调查的标准化评价提供了基础。为了建立国际通用的评价体系,联合国粮食及农业组织(FAO,简称联合国粮农组织)于 1976 年发布了《土地评价纲要》(a Framework for Land Evaluation),提出了以土地适宜性分类为主体的评价思路。该框架推荐将土地划分为不同适宜性类别,如高度适宜(S1)、中等适宜(S2)、边缘适宜(S3)以及不适宜类别(如 N1、N2),并通过将土地特性与特定利用类型的要求相匹配来评估土地的