

东北黑土地地球化学调查研究进展与展望

翟富荣¹, 梁 帅^{2,3}, 戴慧敏^{2,3}

1. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 3. 中国地质调查局 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 东北黑土地是世界四大黑土区之一, 以高有机质和高肥力而著称, 在保障国家粮食安全中具有举足轻重的地位。东北平原大地构造位置上属于欧亚板块大陆边缘活动带, 经历了多期复杂地质作用和环境演化过程, 逐渐形成如今的黑土地。黑土矿物组分主要包括伊利石、蛭石、高岭石和蒙脱石。黑土地被开垦后农田化过程中存在黑土退化、地质调查方法不统一、基础地质研究薄弱、综合研究不足等主要地质问题。目前主要通过土地质量地球化学调查、遥感等技术手段, 已在黑土地质量状况、土地质量限制因子及其交互作用机理、黑土形成时代及其环境、黑土地关键带-空-地一体化调查方法、富硒土地资源筛选等领域取得重要研究进展。今后地质工作者应在长观基地监测与国际联合公关、黑土地修复地质方案研究与实践、元素地球化学循环机制研究、黑土形成演化理论、土地资源“双评价”技术方法等方面加强探索及综合研究, 确保黑土可持续利用。

关键词: 黑土地; 土地质量调查; 地球化学; 松辽平原; 中国东北

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyz.2020.06.001

GEOCHEMICAL SURVEY OF BLACK LAND IN NORTHEAST CHINA: Progress and Prospect

ZHAI Fu-rong¹, LIANG Shuai^{2,3}, DAI Hui-min^{2,3}

1. Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Shenyang 110034, China; 2. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, CGS, Shenyang 110034, China

Abstract: The black land in Northeast China, as one of the significant four black soil areas in the world, known for high organic matter and high fertility, plays a pivotal role in ensuring national food security. The Northeast Plain is tectonically located in the active zone of Eurasia Plate continental margin, undergoing multistage complex geological process and environmental evolution and gradually forming the present black land. The mineral compositions of black soil mainly include illite, vermiculite, kaolinite and montmorillonite. With black soil degradation in the land transferring process into farmland after reclamation, there are also some major geological problems such as disunified geological survey methods, weak basic geological study and inadequate comprehensive research. At present, by means of land quality geochemical survey and RS technology, significant progress has achieved in the fields of black land quality, land quality limiting factors and interaction mechanism, black soil formation time and environment, integrated

收稿日期:2020-08-31;修回日期:2020-09-13. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520),“典型地区 1:5 万土地质量调查及成果转化应用研究”(DD20190520-04).

作者简介:翟富荣(1981—),女,硕士,高级工程师,从事生态地质和遥感地质综合研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街 31 号, E-mail://zfr750@163.com

通信作者:梁帅(1986—),男,博士,高级工程师,从事基础地质和生态地质调查研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail://ls476476@163.com

satellite-aero-ground survey methods for key area of black land and screening of selenium-rich land resources. The future exploration and research should focus on long-term observation base monitoring with international cooperation, geological program for black land restoration, elemental geochemical cycle mechanism, black soil formation and evolution theory, and land resources “double evaluation” techniques to ensure the sustainable utilization of black soil.

Key words: black land; land quality survey; geochemistry; Songliao Plain; Northeast China

0 引言

黑土地是耕地资源中最宝贵的土壤资源,是世界公认最肥沃的土壤,具有质地疏松、肥力高、持续供肥能力强等特点^[1]. 黑土地资源非常有限,全世界仅有四大黑土区,分别为乌克兰的乌克兰平原、美国的密西西比平原、中国的东北平原以及南美洲阿根廷至乌拉圭的潘帕斯草原^[2]. 黑土的形成极为缓慢,每形成 1 cm 厚的黑土需要大约 200~400 a 的时间^[3]. 据统计,东北黑土地提供了全国约 33% 的玉米产量和约 50% 的大豆产量^[4],对国家粮食安全战略起到举足轻重的作用,被誉为国家粮食安全的“稳压器”和“压舱石”^[5-6],其土地质量状况、生产力水平、土壤问题及其影响因素备受学者的关注. 黑土地质量不仅与土壤理化性质、人类活动相关,还与成土母质、地形地貌条件、形成演化过程有密切关系^[7-9].

由于长期高强度开发利用,加之沟蚀、肥料药物使用等自然和人为因素影响^[10],黑土地资源退化严重,黑土层变薄,土壤有机质不断减少,土壤持续盐碱化、沙漠化,生态功能退化^[11-12],东北黑土区由原来的“生态功能区”演变成如今的“生态脆弱区”,耕地质量情况每况愈下,严重影响农业的可持续发展. 面临如此众多的黑土地问题和复杂成因,加强黑土地质量地球化学调查研究,以查清东北黑土地资源数量、质量和生态状况,跟踪黑土地质量变化趋势,探索黑土地最适宜的可持续利用方式,对国家粮食安全保障、东北地区生态文明建设、现代农业发展至关重要^[13]. 近年来,国家有关部委就黑土地产粮安全、黑土地可持续发展、黑土地利用与保护等问题相继颁布了一系列有关东北黑土地利用与保护的 policy^[14-16],提出“深入实施藏粮于地、藏粮于技战略,统筹山水林田湖草系统治理,加大东北黑土地保护力度”的措施.

东北黑土地作为世界四大黑土资源分布区之一,在保障区域生态环境安全、国家粮食安全和农业可持

续发展中发挥着不可替代的重要作用. 依据第三次全国土地调查成果,开展地块尺度的土地质量地球化学调查评价工作,建立地块级的土地质量地球化学档案,是满足新形势下土地资源管理工作不断精细化、标准化、科学化,实现土地“数量、质量、生态”三位一体综合管护的必然要求^[17],是“三深一土”科技创新战略的重要部分,对保障国家粮食安全、推进绿色农业发展具有重要意义.

1 东北黑土地资源概况

东北地区一般指黑龙江、吉林、辽宁 3 省和内蒙古自治区呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市,总面积 $124.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,介于北纬 $40^\circ 25' \sim 48^\circ 40'$ 、东经 $118^\circ 40' \sim 128^\circ 00'$ 之间. 大地构造位置上属于欧亚板块大陆边缘活动带,区内第四系地层发育齐全,自下更新统至全新统均有出露,共划分出第四纪冲积、坡洪积、冲洪积、火山堆积和湖沼堆积等 12 种成因类型. 区域第四纪地质环境是在前第四纪地质环境的基础上,经历了多期复杂地质作用和环境演化过程,塑造出现今的第四纪地质环境景观.

东北地区受寒温带季风气候影响,逐渐形成了深厚腐殖质层,导致土壤普遍呈暗色,俗称“黑土地”^[18],土壤类型有黑土、黑钙土、白浆土、草甸土、暗棕壤、棕壤、沼泽土、褐土等,其中典型黑土区分布面积约 $17 \times 10^4 \text{ km}^2$,以新月状分布于松辽平原东部的黑龙江、吉林两省高平原区(图 1),少量分布在三江平原. 土地利用类型主要为耕地、林地、草地、城镇、林草混杂地及未利用地,其中耕地占 67.22%,以旱田为主,水田次之^[19-20]. 农作物主要为玉米、大豆、水稻、马铃薯.

已有研究^[22]表明,黑土通常具有如下特征:土质疏松多孔;土壤结构性较好,腐殖质层多为粒状和团状结构;腐殖质层厚度为 30~70 cm,腐殖质以胡敏酸(HA)和胡敏素(HM)为主,其中胡敏酸的相对体积质

小^[26];水浸液的 pH 值为 5.5~6.5,个别表土层较高,其交换能力较强,一般以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主^[24]。

2 黑土地存在的地质问题

东北平原属于继承性第四纪沉积盆地,早更新世古湖泊南北贯通,沉积的砂层、砂砾石层结构松散,具有赋水层性质;中更新世湖积黏土和亚黏土是区内黑土形成的主要母质;晚更新世形成的湖积砂层是区内荒漠化形成的地质基础;早—中全新世湖沼环境沉积的泥炭和淤泥层、中全新世形成的黑土层是区内农作物生长的有利土壤;晚全新世松辽平原整体抬升,导致黑土退化、古湖消失、荒漠化发育,河流强烈下蚀,形成槽型河谷,尤其是晚更新世晚期—全新世早期长岭弧形断隆的形成,不但使区内地质环境发生重要的改变,也为区内生态环境恶化埋藏了隐因^[27-29]。特殊的地形、地貌条件和第四纪地质历史时期形成的丰富的砂、粉砂和黏土,是松辽平原沙化、盐渍化的基础,近代干旱、多风的气候条件,以及人类活动的叠加,使沙化、盐渍化和由此引起的黑土地水土流失、盐碱板结和养分失衡,正在由“肥、厚、软”向“瘦、薄、硬”转变,成为东北平原主要的生态环境问题^[30-31]。主要存在的地质问题如下。

1) 黑土地退化持续加剧

东北黑土地开发具有时间短、过程快、强度大等特征,南部地区开发约 210 a,北部地区约 60 a,中部开发约 100 a^[32]。在各种不利的自然因素和人类活动对土壤的不合理利用影响下,黑土地自然肥力逐年下降,包括土壤表层有机质含量显著下降,耕作层变薄,犁底层变硬,养分库容偏低,土壤理化性状恶化,土壤污染与生态功能严重退化^[13]。

2) 黑土地质调查方法不统一

由于黑土较高的土壤肥力,对国家粮食安全起着至关重要的决定作用,世界四大黑土区有关国家相继开展了有关土壤的系列地质调查研究工作。但目前各国调查方法不统一,不利于开展区域间黑土的形成演化、土地质量、土地承载力评价的对比研究工作,较大程度上制约了全球黑土地关键带地质生态调查技术方法的融合与发展。

3) 黑土地基础地质研究薄弱

成土母岩(母质)对土壤元素的含量及分布特征、

土壤养分含量状况、土壤理化性质、土壤机械组成、土壤质地和土壤容重等性质具有决定性影响。韩晓增等人认为东北平原黑土地的成土母质主要为黄土及红土堆积物、冲积—洪积物、河湖相沉积物和淤积物、现代残积物等 4 种^[23]。因传统地质工作主要侧重于矿产领域,弱化了第四纪基础地质研究,加之东北平原第四纪地层(沉积物)覆盖较厚,其形成演化过程和黏土矿物学等地质内容研究程度相对较低,一定程度制约了对于黑土的母质条件、形成环境、分布特征、厚度变化、有机质及元素地球化学变化等关键科学问题的认知水平。

4) 黑土地系统综合研究不足

黑土地以往研究主体单一,以土壤圈为主,涉及学科主要为土壤学。随着黑土地研究的不断深入,岩石圈、水圈、生物圈和大气圈对黑土的形成演化均产生重要影响。今后应按照地质调查“三大转变”的要求,运用地球系统科学理论开展黑土地的研究工作,在地球科学、地球化学基础上,逐步融合地理科学、气象科学、水文科学、土壤学、生物科学等学科,实现深度交叉融合,开展以黑土形成演化、土壤元素迁移转化、健康地质、生态风险评估为重点的地球关键带的综合调查研究。

3 黑土地地球化学调查研究进展

自 1999 年以来,中国地质调查局沈阳地质调查中心及东北四省(区)地调院等单位利用中央和地方财政资金,在东北黑土区按照统一的技术标准和技术方法开展 1:25 万土地质量地球化学调查工作,同时在重点地区开展了 1:5 万土地质量地球化学调查评价及成果转化应用研究工作。调查成果为东北黑土地资源管理保护、土壤污染防治、农业种植结构调整、特色优质农产品开发、土地良性永续利用、生态文明建设及脱贫攻坚等领域发挥了重要支撑作用^[27],为制定东北黑土地资源“十四五发展规划”提供了科学准确的基础大数据。取得研究进展如下。

1) 基本查明土地质量状况

调查获得高精度土壤元素分析数据 900 余万个,是东北地区长期以来最为系统、精度最高的土壤 54 项元素和指标数据,对东北黑土地质量状况进行了准确判断。东北黑土地基本无重金属污染,土壤质量优越,

适合大规模发展绿色农业,提高农产品经济附加值。松辽平原无重金属污染风险土壤 $38.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占松辽平原已完成调查区的 97.43%。绿色食品产地适宜区广泛分布,可种植绿色食品耕地面积 $38.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 96.77%。一等(优质,土壤环境清洁、土壤养分丰富至较丰富)土壤 $12.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占松辽平原调查的 32.29%;二等(良好,土壤环境清洁、土壤养分中等)土壤 $14.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 35.43%;三等(中等,土壤环境清洁、土壤养分较缺乏或土壤环境轻微污染、土壤养分丰富至较缺乏)土壤 $12.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 31.30%^[33]。三江平原无重金属污染风险土壤 $6.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占三江平原调查的 99.25%, 绿色食品产地土壤适宜区为 $6.26 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 98.79%。土壤质量以一等和二等为主,二者之和为 $6.17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占调查的 97.53%^[33]。

2) 初步揭示黑土质量限制因子及其交互作用机理

初步揭示东北黑土地土壤肥力和环境质量空间变异特征,为农业种植结构调整、绿色食品基地建设、污染土壤修复提供了依据。当前黑土地土壤有机质呈下降趋势,局部地区 pH 值升高,酸化、盐碱化及沙漠化等问题明显^[23, 34-36]。黑土有机质含量减少是土地质量退化的最重要的特征之一,而有机质减少又与土壤质地退化、结构破坏及颗粒组成变化有密切关系^[37]。以不同尺度(1:25 万、1:5 万)研究了黑土的元素组成、元素有效量、元素形态、元素迁移转化过程与肥力、环境质量的关系,初步建立模型进行定量半定量的表达,来阐明黑土质量演变趋势。典型黑土区耕地有机质的分布总体呈现由北向南逐渐降低、东部高西部低的趋势,有机质平均含量为 26.57×10^{-3} , 并发现各土壤发生层中胡敏酸、胡敏素含量自北向南逐渐下降,而富里酸逐渐增高^[37]。pH 值由东向西逐渐增加,而南北方向未呈现出明显规律,平均值为 6.42, 总体呈弱酸性。总体上,有机质与 pH 值呈负相关性^[12]。黑土有机碳(SOC)和全氮(TN)的分布受外界因素和内部因素共同作用,外部因素如受纬度影响的水热条件对 SOC 和 TN 的分布起了决定性作用,而内部因素如土壤质地对 SOC 和 TN 含量有重要影响^[38]。宋运红等人利用松辽平原表层土壤的两期地球化学调查数据对比分析,结果显示 35 年来松辽平原耕地土壤全氮含量空间分布规律基本一致,土壤全氮平均值从 1.530×10^{-3} (1982 年)下降至 1.451×10^{-3} (2018 年),下降了 5.16%, 下降比较显

著;黑钙土、黑土、水稻土中全氮含量显著下降,白浆土、盐碱土中含量也有降低;35 年来松辽平原全氮含量下降主要与黑土的垦殖程度有关^[39]。

3) 重新厘定黑土形成时代及其环境

在沈阳地质调查中心主持的“全球黑土地关键带土地资源演化机制与可持续利用(IGCP665)”课题实施过程中,宋运红等人利用有机碳 AMS ^{14}C 定年技术,对海伦地区 2 个典型黑土剖面的土壤样品进行测试分析,获得黑土最新年龄为 $260 \pm 20 \text{ a}$,最老年龄为 $7850 \pm 50 \text{ a}$,证明黑土是全新世的产物,为进一步探讨黑土形成和古气候环境提供了重要的理论依据^[40]。戴慧敏等人根据不同层位孢粉类型及含量的变化,并结合 ^{14}C 年龄,将海伦地区典型黑土剖面孢粉化石自下而上可划分为 2 个孢粉组合,下部孢粉组合以具刺类菊科-蒿属-紫草科-松属为代表,上部孢粉组合以松属-苋科-蒿属为代表,提出海伦地区典型黑土主要形成于全新世 7400 a 以来的温暖期,形成于松嫩平原温暖半湿润的气候,植被以草本灌木为主的草原植被^[33]。

4) 创新提出“关键带”概念,实现天空地一体化调查方法技术创新

沈阳地质调查中心创新提出了“黑土地关键带”概念与研究思路,并率先将卫星遥感、航空高光谱遥感、地面土壤光谱测量及地球化学测量的“天-空-地一体化”调查方法应用于土地质量调查与监测,总结编写了黑土地关键带地质生态“天-空-地一体化调查技术规范”,为开展国际黑土地关键带地质生态调查(BASGES)提供了重要参考^[33],有效提升了我国黑土地研究水平。

5) 圈定富硒等特色土地资源远景区

东北黑土地整体以足硒为主要特征^[41],土壤硒均以硒中等含量(适量)为主,占调查区面积的 60.0%。在黑龙江省海伦、宝清地区及辽宁省丹东山前和滨海平原区等地圈定大面积集中连片绿色富硒土地资源远景区,在部分远景区内开展 1:5 万土地质量地球化学调查和富硒土地环境评价,圈定无污染风险的绿色富硒土地 $1.16 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在三江平原东部宝清-富锦地区、松辽平原海伦-绥棱地区、辽宁丹东地区、吉林辉南-靖宇地区^[33]。

6) 助力地方脱贫攻坚服务经济发展

实现了一批成果转化服务:沈阳地质调查中心向自然资源部耕地保护监督司提交了《中国地质调查局关于东北黑土地质量的调查报告》,向黑龙江省提交了《关于立足黑龙江省加快推进东北黑土地保护开发利用的建议》和《有效保护黑土地,促进有机农业发展的建议》,助推海伦、建三江等市县打造物联网+农业模式,支撑地方脱贫攻坚和经济发展^[33]。

4 黑土地研究展望

土地质量是土壤肥力质量、环境质量和生物健康质量的综合量度,是土壤维持生产力、环境净化能力以及保障生物健康能力的集中体现,也是现代地球化学领域的研究热点。笔者认为,应全面开展黑土地质量地球化学专业调查评价,运用天-空-地一体化生态调查技术,建立黑土质量长期观测基地,为黑土质量动态变化监测与永续利用提供数据支撑;以“第三次全国土地调查”成果为基础,以县域为基本评价单位开展黑土质量数字化管控服务体系建设,加强黑土地保护与退化防治研究。以下几方面的研究工作十分必要。

1) 开展长观基地监测与国际合作

黑土为非均质的混合物,与所处环境各种因子的关系非常紧密,且土壤属性的变化是一个非常缓慢的过程,短期的农田管理措施很难证明土壤属性的变化,对黑土属性变化的描述需要定点长期观测获得,未来的研究应借助更多的野外长期观测基地的实验与监测,并实现数据互联,以保证对黑土属性的判断和预测更加科学可靠。依据“全球黑土地关键带”“国际黑土地协会”“中国地质调查局黑土地演化与生态效应重点实验室”等科研平台,在东北地区试点选择 1~2 种黑土土壤类型开展标准物质研制工作,探索应用于全球黑土地关键带分析测试工作的可行性,为全球黑土地关键带统一采样方法、统一分析测试方法及消除系统误差提供支撑。联合美国、俄罗斯、乌克兰等国家的黑土研究机构,开展全球黑土地关键带天-空-地一体化综合研究与集成。

2) 加大黑土地修复地质方案研究与实践

探索土壤肥力质量、环境质量和健康质量的土壤质量表征理论及量化表达的指标体系,以土壤肥力质量的演变为重点,对出现有机质退化、污染的土地,实施保护修复。依据地球科学系统理论,制定地质修复

方案,为东北黑土地的永续利用提供强有力的理论和技术支撑。中国地质调查局水文地质环境地质研究所成功将生物质电厂灰渣制成重金属污染土壤的钝化剂,取得了对镉、镍、铅等重金属较好的钝化效果,成本低廉、效果稳定,而且可改良土壤,增加作物产量;中国地质调查局地质实验测试中心首创性提出了“根系微地球化学障”修复模式和修复技术,改善修复工艺,显著降低修复成本;浙江省地质调查院开展了利用环境矿物材料进行污染土壤修复和改良的试点研究,取得明显成效,为浙江省污染耕地的安全利用和土壤污染修复提供了技术支持^[42];中国科学院地质与地球物理研究所利用矿物质与有机质和微生物结合在一起的特性,有效控制了土壤的物理、化学、生物学性能,尤其是矿物胶体,实现土壤矿物修复^[43]。

3) 加强元素地球化学循环机制研究

加强土壤圈内外物质交换的过程、强度、机制及其对环境的胁迫的研究,以及土壤圈层界面间物质交换的规律及其对全球变化、水质污染、动植物健康影响的研究,以阐明土壤圈内部和圈层界面的物质循环与交换过程对土壤质量的影响机理,为农业清洁生产、污染土壤修复、全球气候变化预测、水体污染防治和土壤质量持续管理提供理论依据。如旱地农业促进镉等有毒元素通过土-岩界面进入作物,抛荒则有利于有毒元素向表面聚集,而天然林和人工森林植被则把有毒元素以生物或非生物的方式固定在土-岩界面上^[37]。

4) 完善黑土形成演化理论

在全球大规模开垦背景下,多学科、多方法强化全球气候变化与人类活动下黑土地的形成、演化及其发展趋势,对全球黑土资源的可持续利用和人类社会的可持续发展具有不可低估的现实意义^[24]。应依据地球系统科学理论,探讨基于成土母质的黑土地划分方案的可行性,对比东北黑土地与俄罗斯、美国黑土地的成因差异,加强黑土地矿物组成、有机质来源、形成环境演化、地层序列与年代学等关键性地质问题的研究。通过开展遥感地质、地球化学、水文地质、基础地质调查,全面推进全球黑土地关键带地质生态调查研究,实现全球黑土地关键带土壤地球化学、遥感地质等填图,开展全球黑土地关键带土地资源演化机制与可持续利用研究。

5) 探索土地资源“双评价”技术方法

随着生态文明建设的深入推进,资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(双评价)工作受到高度重视。2019年自然资源部印发《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》(送审稿)^[44]。应以此为依据,探索从资源、社会、经济、生态等多系统、多领域、多层次耦合的角度开展黑土地资源环境承载力和开发适应性评价工作。探索利用探地雷达、地球化学调查(土壤剖面)、高光谱遥感等多学科技术手段,评价东北地区黑土分布及分区特征、黑土厚度及垂向特征、黑土减薄规模及趋势,为黑土地的保护与利用提供支撑。

6) 加快地质调查成果转化

以“第三次全国土地调查”成果为基础,建议以县域为基本评价单位开展黑土质量数字化管控服务体系,加快富硒等特色土地资源规划与开发。地质调查科技成果转化不仅可以促进科技成果产业化、商品化,同时也是地方经济以及其他相关科研工作快速发展的助推剂,可有效提高解决资源、环境和地球系统科学等问题的能力和水平。

参考文献:

- [1]魏丹,杨谦,迟凤琴. 东北黑土区土壤资源现状与存在问题[J]. 黑龙江农业科学, 2006(6): 69-72.
- [2]张之一. 关于世界黑土分布的探讨[J]. 黑龙江农业科学, 2010(4): 59-60.
- [3]韩长斌. 加强东北黑土地保护推进农业绿色发展[N]. 人民日报, 2018-02-05(007).
- [4]Hao C L, Xiao W H, Zhou Y Y, et al. Phosphorus balance in typical rainfield of black soil region in Northeast China [J]. Geosciences Journal, 2019, 23(4): 637-648.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]崔明, 张旭东, 蔡强国, 等. 东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J]. 地理研究, 2008, 27(3): 527-535.
- [8]方洪宾, 赵福岳, 姜琦刚, 等. 松辽平原第四纪地质环境与黑土退化[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 4-5.
- [9]梁尧, 韩晓增, 丁雪丽. 东北黑土有机质组分与结构的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(6): 888-897.
- [10]Dong Y F, Wu Y Q, Qin W, et al. The gully erosion rates in the black soil region of northeastern China: Induced by different processes and indicated by different indexes[J]. CATENA, 2019, 182: 104146.
- [11]刘丙友. 典型黑土区土壤退化及可持续利用问题探讨[J]. 中国水土保持, 2003(12): 28-29.
- [12]刘忆莹, 裴久渤, 汪景宽. 东北典型黑土区耕地有机质与 pH 的空间分布规律及其相互关系[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 738-743.
- [13]Liu X B, Zhang X Y, Wang Y X, et al. Soil degradation: A problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. Plant, Soil and Environment, 2010, 56(2): 87-97.
- [14]http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm.
- [15]http://www.moa.gov.cn/ztzl/yhwj2018/spbd/201802/t20180205_6136480.htm.
- [16]http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/202003/t20200318_6339304.htm.
- [17]彭敏, 李括, 刘飞, 等. 东北平原区地块尺度土地质量地球化学评价合理采样密度研究[J]. 物探与化探, 2019, 43(2): 338-350.
- [18]赵玉明, 程立平, 梁亚红, 等. 东北黑土区演化历程及范围界定研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 765-775.
- [19]刘驰, 戴慧敏, 冯静, 等. 中华人民共和国多目标区域地球化学图集——松辽平原中南部地区[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [20]戴慧敏, 刘驰, 宫传东, 等. 东北平原土壤碳库构成及其与土壤性质的关系[J]. 第四纪研究, 2013, 33(5): 986-994.
- [21]http://blog.sina.com.cn/s/blog_17494ae420102yh71.html.
- [22]魏丹, 孟凯. 中国东北黑土[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [23]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.
- [24]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.
- [25]于磊, 张柏. 中国黑土退化现状与防治对策[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 99-103.
- [26]黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 307.
- [27]方洪宾, 赵福岳, 姜琦刚, 等. 松辽平原第四纪地质环境与黑土退化[M]. 北京市: 地质出版社, 2009: 225.
- [28]孙建中, 张镇洪. 松辽第四纪[M]. 香港: 中国评论学术出版社, 2007: 297.
- [29]赵福岳. 松辽平原第四纪地质历史演化规律研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(S1): 152-158.
- [30]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.
- [31]鲁彩艳, 陈欣, 史奕, 等. 东北黑土资源质量变化特征研究概述[J]. 农业系统科学与综合研究, 2005, 21(3): 182-184, 189.
- [32]韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 土地利用/覆盖变化对黑土生态环境的影响[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 203-208.

(下转第 532 页/Continued on Page 532)

- [2]党进谦,张新和,李靖. 水土保持与耕地资源持续利用[J]. 农业工程学报,2003,19(6):285-288.
- [3]杨佳佳,白磊,吴嵩. 黑龙江典型黑土区土壤侵蚀遥感监测技术研究[J]. 地质与资源,2019,28(2):193-199,183.
- [4]中华人民共和国农业部. 耕地质量保护与提升行动方案[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/shiyiqi/201712/t20171219_6103894.htm,2015-10-28.
- [5]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.
- [6]戴旭. ARC/INFO 软件系统在农业土地资源评价中的应用[J]. 自然资源学报,1988,3(1):69-77.
- [7]冷疏影,李秀彬. 土地质量指标体系国际研究的新进展[J]. 地理学报,1999,54(2):177-185.
- [8]聂艳,周勇,朱海燕. 基于 GIS 和 PSR 模型的农用地资源评价研究[J]. 水土保持学报,2004,18(2):92-96.
- [9]方琳娜. 基于 SPOT 多光谱影像和 GIS 的耕地质量评价研究——以山东省即墨市为例[D]. 泰安:山东农业大学,2007.
- [10]张锐,郑华伟,刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报,2013,33(16):5090-5100.
- [11]赵龙山,侯瑞,吴发启,等. 坡度对农业耕作措施水土保持作用的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3):69-72,78.
- [12]潘忠成,袁溪,李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):9-13.
- [13]陈卫平,杨阳,谢天,等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报,2018,55(2):261-272.
- [14]薛志斌,李玲,张少凯,等. 内梅罗指数法和复合指数法在土壤重金属污染风险评估中的对比研究[J]. 中国水土保持科学,2018,16(2):119-125.
- [15]张华,张甘霖. 土壤质量指标和评价方法[J]. 土壤,2001,33(6):326-330,333.
- [16]赵其国,孙波. 土壤质量与持续环境:1. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤,1997,29(3):113-120.
- [17]姚春生,张增祥,汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用,2004,19(6):473-478.
- [18]齐述华,王长耀,牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报,2003,7(5):420-427.
- [19]马芊红,张光辉,耿韧,等. 黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价[J]. 水土保持研究,2018,25(4):30-35,42.
- [20]易晨,李德成,张甘霖,等. 土壤厚度的划分标准与案例研究[J]. 土壤学报,2015,52(1):220-227.
- [21]邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.

(上接第 509 页/Continued from Page 509)

- [33]戴慧敏,赵君,刘国栋,等. 东北黑土地质量调查成果[J]. 地质与资源,2020,29(3):299.
- [34]魏丹,匡恩俊,迟凤琴,等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学,2016(1):158-161.
- [35]陆继龙. 我国黑土的退化问题及可持续农业[J]. 水土保持学报,2001,15(2):53-55,67.
- [36]段美惠,时小翠,王钰萱,等. 有效遏制黑土地退化的方法[J]. 黑龙江科学,2018,9(16):60-61.
- [37]曹志洪,周健民. 土壤质量演变规律与持续利用[J]. 中国科学院院刊,2002(1):45-46.
- [38]解宏图,郑立臣,何红波,等. 东北黑土有机碳、全氮空间分布特征[J]. 土壤通报,2006,37(6):1058-1061.
- [39]宋运红,刘凯,戴慧敏,等. 东北松辽平原 35 年来耕地土壤全氮时空变化最新报道[J/OL]. 中国地质. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191225.1612.004.html>.
- [40]宋运红,刘凯,戴慧敏,等. 东北松辽平原典型黑土-古土壤剖面 AMS 14C 年龄首次报道[J]. 中国地质. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191225.1615.006.html>.
- [41]戴慧敏,宫传东,董北,等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤学报,2015,52(6):1356-1364.
- [42]http://m.cgs.gov.cn/cgkx/201906/t20190625_485094.html.
- [43]http://www.cas.cn/cm/201607/t20160720_4569120.html.
- [44]http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html.