

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 Xiaozeng, Li Na. Research Progress of Black Soil in Northeast China. Scientia Geographica Sinica,2018,38(7):1032-1041.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.07.004

中国东北黑土地研究进展与展望

韩晓增,李娜

(中国科学院东北地理与农业生态研究所,黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要:东北黑土区是世界四大片黑土区之一,它以高有机质和高肥力而著称,不仅是东北农业发展的基础,也是中国的粮仓,在保障国家粮食安全中具有举足轻重的地位。针对东北黑土自身的特色和面临的问题,首先描述了东北黑土地形成的条件及自然黑土的属性特征;其次阐述了黑土被开垦后农田化过程中土壤属性和肥力的演化情况,土壤有机质大幅度下降,土壤肥力降低,已严重影响东北黑土地农业的可持续发展;在此基础上分析了黑土区耕作土壤不同保护途径及其对土壤肥力的影响机制;最后展望了未来黑土地理论研究的侧重点:应加大新技术、新方法和跨学科交叉理论的研究,培育更适合东北黑土地气候条件的高产优质作物品种,并结合目前黑土地保护的技术调控模式,优化作物种植模式,提升作物品质和产量,提高黑土区农业的综合生产力和竞争力、保证黑土区农业的永续利用。

关键词:土壤有机质;土壤肥力;农田化过程;作物轮作;秸秆还田技术;东北黑土

中图分类号:S151 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2018)07-1032-10

中国东北黑土地是指有黑色或暗黑色腐殖质表土层的一类土地,其土壤类型按中国土壤发生分类主要包括黑土、黑钙土、白浆土、草甸土、暗棕壤、棕壤等^[1],这一类土壤性状好、肥力高,是适宜农耕的优质土地。中国的黑土地主要分布在东北平原,北起大兴安岭,南至辽宁省南部,西到内蒙古东部的大兴安岭山地边缘,东至乌苏里江和图们江,行政区域涉及辽宁、吉林、黑龙江以及内蒙古东部的部分地区。据第二次全国土地调查数据和县域耕地质量调查评价结果,东北典型黑土区耕地面积约 $1.85 \times 10^7 \text{hm}^2$,其中:黑龙江省 $1.04 \times 10^7 \text{hm}^2$ 、吉林省 $4.6 \times 10^6 \text{hm}^2$ 、辽宁省 $1.87 \times 10^6 \text{hm}^2$ 和内蒙古自治区 $1.67 \times 10^6 \text{hm}^2$ ^[2-4]。

中国东北黑土地是世界四大黑土区之一,以土壤有机质含量高而著称。中国东北黑土地耕地面积占东北黑土区耕地面积的50.6%(www.chinahlj.cn),占中国耕地面积的10.0%,作为稀缺资源,且具有独特的自然属性,一直是国内外学者关

注和研究的热点。但自20世纪50年代大规模开垦以来,东北黑土区逐渐由林草自然生态系统演变为人工农田生态系统。长期的高强度利用,加之土壤侵蚀,黑土地自然肥力逐年下降^[5],包括土壤表层有机质含量显著下降,耕作层变浅、犁底层变硬,土壤的理化性状与生态功能严重退化,东北黑土区由“生态功能区”逐渐变成了“生态脆弱区”^[6],严重影响东北地区农业的持续发展,东北黑土地的粮食生产能力在国家层面上“压仓石”的作用存在动摇风险。保护黑土地,提升黑土地耕地质量,实施东北黑土区水土流失综合治理刻不容缓,这也是守住“谷物基本自给、口粮绝对安全”战略底线的重要保障。

党中央、国务院高度重视东北黑土地保护,明确提出要采取有效措施保护好这块珍贵的黑土地。按照《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》《全国农业现代化规划(2016-2020年)》《全国农业可持续发展规划(2015-2030年)》《农业

收稿日期:2018-05-15; **修订日期:**2018-06-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300802-01)、中国科学院前沿科学重点计划项目(QYZDB-SSW-SYS02)、中国科学院青年创新促进会项目(2016211)、中国科学院东北地理与农业生态研究所优秀青年人才项目资助。[Foundation: National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300802-01), Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (QYZDB-SSW-SYS02), Youth Innovation Promotion Association, CAS (2016211), Excellent Young Talent Program of Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS.]

作者简介:韩晓增(1957-),男,辽宁瓦房店人,研究员,主要从事黑土地保护研究与示范方面的研究。E-mail: xzhan@iga.ac.cn

环境突出问题治理总体规划(2014-2018年)》的要求,农业农村部会同国家发展改革委员会、财政部、国土资源部、环境保护部、水利部于2017年发布了《东北黑土地保护规划纲要(2017-2030年)》(http://journal.cnews.net/nybgb/2017n/dqq/xygh/86820_20180131023745.html)。该纲要明确指出黑土地保护的重要性和紧迫性,并针对黑土地的现状和问题,因地制宜的提出了黑土地保护的技术模式和保障措施。在推进这一纲要实施过程中,需要建立切实保护黑土地质量的技术模式和相关制度体系,而加强黑土地地力提升方面的基础理论研究可为此提供重要支撑。本文通过综述自然黑土地的形成条件和自然属性,分析黑土地开垦后的农田化过程中土壤属性的变化特征和现状,阐明黑土地地力提升的调控措施及其在黑土地保护上的成效,并展望了未来科学研究的发展方向 and 侧重点,以期为中国东北黑土地的保护和可持续利用提供科学依据。

1 东北黑土地的形成条件及自然属性特征

东北黑土地地处中纬度亚洲大陆东部,属中温带大陆性季风气候。该区域年降水量500~650 mm左右,主要集中在4~9月的作物生长季,占全年降水总量的80%~90%左右。年均气温-5~4℃,自北向南温度逐渐升高。夏季温暖湿润,生长季雨热同期;冬季严寒少雪,土壤冻结深且延续时间长,季节性冻层明显。该地区独特的气候条件,形成了茂密的草原化草甸和森林植被,每年10月中下旬气温迅速转冷而结冰,土壤中的微生物活动受到抑制,土壤表层有机物质积累大于分解,为土壤积累腐殖质创造了有利条件,形成了深厚肥沃的黑土层。根据黑土地北部大兴安岭东坡呼伦贝尔盟第二次土壤普查结果^[7],未开垦前的典型自然黑土的黑土层厚度为20~40 cm,草甸黑土22~48 cm,白浆黑土25~50 cm。黑土开垦后,坡面水土流失,加上黑土经历由生土变熟土的必然过程,黑土层在一定程度上变薄。根据第二次土壤普查结果^[8],不同耕地的黑土层厚度所占比例为:薄层(黑土层厚度<30 cm)占39.8%,中层(黑土层厚度30~60 cm)占40.8%,厚层(黑土层厚度>60 cm)占19.4%。

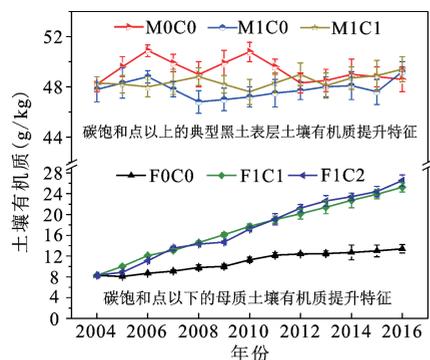
黑土地的成土母质主要有4种:①黄土及红土堆积物;②冲积-洪积物;③河湖相沉积物和

淤积物;④现代残积物。此外,次生砂砾质残积物、砂质风积物也是一些土壤的成土母质^[9]。黑土的成土母质是粘土、亚粘土,所以机械组成也比较粘细、均匀一致,并以粗粉砂(0.05~0.01 mm)和粘粒为主,黑土母质一般无碳酸盐反应,只是在少数黑土与黑钙土过渡地带,有时在土层下部有石灰反应。草甸土主要分布在山前冲积洪积台地的下部或台地之间地势低平的地方,其成土母质主要是冲积物、洪冲积物及黄土状沉积物。白浆化黑土分布于波状平原漫岗上部以及丘陵缓坡低洼处,母质层为富含锈斑的黄土状粘土母质层^[9]。黑钙土母质主要由地形决定,在台地分布区主要是由花岗岩、玄武岩等残积物所构成,在盆地分布区由河湖沉积物组成。棕壤、暗棕壤的母质主要是现代硅铝质残积物,在低丘陵和平原高地也有第四纪红土和黄土状沉积物。黑土地由于母质组成不同,形成了A层(黑土层)的肥沃属性相近,B和C层有明显差异的多样性土壤^[9]。

在开垦前,自然黑土表层土壤有机质含量较高,但不同地区存在差异,土壤有机质的最高含量为75.1 g/kg,最低含量为29.0 g/kg,加权平均含量为58.6 g/kg^[9,10],全氮含量最高为3.97 g/kg,最低为2.85 g/kg,水解氮和有效磷变化范围较大,分别为73.5~160.0 g/kg和9.38~5.06 g/kg,土壤pH值变化范围为5.8~6.2。基于中国科学院海陵国家生态实验站内以空间换时间的黑土母质熟化长期定位实验,将黑土表层2 m以下的成土母质取出,放置于地表进行土壤有机质提升定位试验,研究黑土发育最初期土壤有机质的变化特征,发现连续13 a定量的豆粉或地上秸秆全量还田处理后,土壤有机质含量比母质土壤增加了3倍,而同样处理的表层黑土在秸秆全还田13 a后,有机质含量却变化不显著(图1)^[11]。该项研究说明黑土有机质含量小于1%时,土壤处于碳饥饿状态,有机肥施用后,土壤呈固碳状态,有机质含量逐渐增加的同时,土壤有机质的化学结构也向着表层黑土方向发展;黑土有机质含量高于4.5%时,土壤有机质水平较高,只有大剂量施用有机物料后,土壤才能固持少量的碳^[11]。

2 东北黑土农田化过程中黑土属性变化特征

东北黑土地开发时间短、过程快。南部地区开发约210 a,北部地区约60 a,中部开发约100 a^[12]。



M0C0无肥;M1C0化肥;M1C1化肥+地上秸秆;F0C0无肥;
F1C1化肥+定量豆粉和玉米秸秆;F1C2化肥+地上秸秆+籽粒
图1 有机物料施用对典型黑土和黑土母质熟化土壤有机
质含量的影响

Fig.1 The effects of organic amendments on the soil organic matter
content in typical Mollisol and the soils developed from parent
material of Mollisol

以中部为例,百年间东北黑土地经历了自然土壤-草原化草甸植被、轮耕休耕期、农田人畜低强度开发期和机械化高强度开发期。地上植被覆盖经历了自然植被、作物-荒草、玉米(*Zea mays*)-大豆(*Glycine max*)-小麦(*Triticum aestivum*l)(轮作覆盖)和玉米-大豆(轮作覆盖)过程。概括而言,自然黑土向农田黑土转化大体分形成期、开垦期和稳定利用期3个时期,进一步划分为开垦初期的增肥过程,开垦期肥力变化的急升、缓升和慢升过程,稳定利用期的提升、维持和退化过程^[13]。目前的黑土已进入到相对较稳定的利用期,此时期土壤肥力的退化、维持和提升,主要依赖于不同的土地利用方式和农田管理措施。

2.1 土壤有机质和肥力变化特征

2.1.1 黑土地开垦期土壤有机质变化及肥力特征

黑土地开垦初期,农田作物代替了自然植被,作物收获后的地上部分被移出土壤生态系统,进入土壤中的有机物质减少,土壤有机质积累大于分解的过程消失,导致土壤有机质在开垦后下降速度非常快,北部地区黑土地有机质平均每年下降1.5%~2.6%,南部黑土地有机质平均每年下降0.5%~0.7%^[14]。和典型黑土有机质变化特征一样,赵玉萍等发现白浆土开垦后,土壤有机质含量也显著下降。黑土层开垦后的前10 a每年下降速率为0.029 3%,后10 a每年下降速率为0.024 1%^[15]。此时期黑土表层未腐解和半腐解的有机物快速分解,枯枝落叶层有机质分解调整了作物生长需要

的氮、磷和钾比例,土壤肥力得到短暂提高,有利于农业土壤的形成,更有利于作物生长。这个过程大约持续10 a,称为开垦期的土壤肥力急升过程。特点是土壤有机质含量减少,肥力上升,作物产量提高。随着土壤有机质的进一步分解,土壤养分含量继续降低,但有机质下降的速度较开垦初期减慢,到后来逐渐趋于相对稳定。从开垦50~200 a,平均每10 a下降0.05~0.11 g/kg,而在开垦130~200 a,黑土有机碳含量几乎没有变化^[2,16-19]。此过程以土壤有机质为核心形成的土壤团聚结构随之减少,加之人畜踩踏和机械压实等作用,土壤团聚结构大部分消失,母质土壤中的粘土层属性开始主导土壤的物理过程,使得土壤水、热、气不协调,限制作物旺盛生长,土壤肥力降低,甚至出现黑土肥力退化现象。在农田管理系统中,如果施用充足的有机肥和适量的化肥,部分黑土肥力会缓慢提高;在实行禾本科作物和固氮豆科作物轮作的条件下,施用适量化肥,部分黑土肥力得到了保持;而大部分黑土由于长期种植耗地作物和过量施用化肥,已出现严重退化,必须通过大剂量施用化肥和频繁耕作解决黑土地生产力低下的问题。

在地形相同的自然土壤和开垦100 a的耕地条件下,生态系统类型决定2 m剖面内的土壤有机质含量及分布特征^[19]。在0~40 cm土层内土壤有机质含量表现为自然土壤>耕作土壤,2种土地利用方式间差异显著。在表层0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层中,耕作土壤较自然土壤有机质含量分别降低了16.5%、8.8%和8.1%。黑土剖面40 cm以下土层的土壤有机质差异不显著。开垦后的耕作黑土,由于表层土壤有机质矿化量大于积累量,导致原黑土层中有机质含量降低,表观上表现为由黑变黄,实际是土壤中的腐殖化物质在减少。黑土腐殖质层随着开垦年限逐渐浅薄,自然黑土腐殖质层厚度一般在30~70 cm之间,小于30 cm的比较少见。第二次土壤普查结果显示已有40%的黑土面积腐殖质层厚度不足30 cm^[15]。

2.1.2 黑土地稳定利用期土壤有机质变化和肥力特征

目前,黑土地已经进入到稳定利用期。在此过程中,土壤退化过程导致土壤有机质含量仍在降低,但是被保存下来的有机质受到团聚体结构和矿物组分的物理性保护作用,在一定范围内保持稳定。据测算^[6],黑土开垦40 a有机质下降1/2

左右,开垦 70~80 a 有机质下降 2/3。进入稳定利用期后,东北黑土地土壤有机质下降缓慢,每 10 a 下降 0.6~1.4 g/kg。在黑土地开垦后的 50~100 a 内,黑龙江省中部和吉林中部的黑土有机质平均每年下降速度为 1.0 g/kg(图 2)。黑土地的北部地区,有机质含量平均值在 35.6~43.2 g/kg,黑土地的南部地区,如辽河平原多数地区土壤有机质含量已降到 20 g/kg 以下。汪景宽等的研究表明,黑龙江省中部典型黑土地地区在 1980~2000 年间,土壤有机质降低了 22.26%^[12];徐艳等研究了 1980~2000 年中国黑土区土壤有机质的变化,发现黑龙江省北安、海伦和吉林省公主岭 3 个典型黑土区土壤有机质明显降低^[20];陆访仪等利用遥感影像研究黑土中部海伦市土壤有机质含量的变化,发现土壤有机质呈下降趋势,较 1981 年,2008 年土壤有机质平均下降超过 10 g/kg,全氮降幅在 0.5 g/kg 左右^[21]。

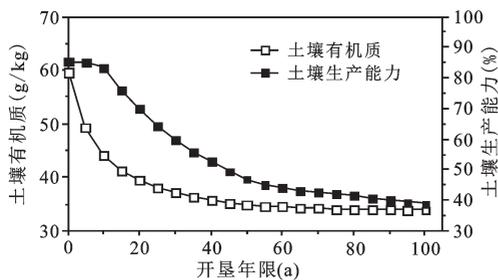


图2 土壤有机质含量和生产能力随开垦时间的变化

Fig.2 The change of soil organic matter and yield productivity with time of reclamation

20 世纪 50 年代前,土壤肥力主要依靠有机肥、休耕或具有固氮功能的豆科作物轮作维持,土壤肥力处于周期性恢复;到 60 年代末,化肥开始施用,黑土地的保育被忽视,出现了高产、高化肥、高农药的“三高”现象,导致黑土地有机质含量锐减,影响了土壤的供肥能力和物理属性。黑土地北部区域有机质含量降低到一定程度后,土壤出现退化,土壤自然生产能力将低于 50%(图 2)。同时土壤调控水、热、气的的能力显著减小,农业生产中必须通过频繁耕作来解决土壤物理问题。

2.2 黑土地开垦后土壤团聚体稳定性变化特征

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其稳定性在维持土壤物理结构、协调土壤水气平衡、影响土壤微生物活性、促进植物根系在土体中生长方

面发挥着重要作用,是影响土壤肥力和土壤可持续利用的重要方面。未开垦的原始黑土地通常具有良好的结构性状,土壤中大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量较高。但黑土一经开垦,随着土壤有机质含量下降,土壤团聚体水稳性也明显降低;开垦 40 a 以后,两者的变化逐渐趋于稳定和平缓。水稳性团聚体的稳定性和大于 0.25 mm 水稳性土壤团聚体含量均与有机质含量呈显著正相关^[22]。黑土被开垦后,人类活动和生态环境的改变使土壤中的大团聚体不断破碎,土壤有机质的物理保护减少,微生物活动加剧使土壤中有机物质分解速率增强,土壤有机碳的矿化速率比开垦前明显增大,而补充的有机物数量不足,入不敷出导致黑土地开垦后土壤有机质含量下降迅速。也有研究认为黑土被开垦后,土壤团聚体的主要胶结物质——腐殖质不断的被分解利用,最终影响土壤团聚体水稳性^[23]。

2.3 黑土地开垦后土壤水分性质的演变特征

东北黑土区土壤水分循环方式为大气-土壤-作物。该区域是典型的雨养农业区,大气降水是旱作农田水分的唯一来源,地下水对作物需水没有供给^[24]。黑土地大部分土类的土体质地比较均匀,粘粒含量较高,土壤具有较好的蓄水供水能力。1 m 土体的田间持水量为 350~420 mm,平均为 387 mm,相当于全年降水量的 70.4%;土壤饱和持水量为 460~610 mm,平均为 576 mm,相当于全年降水量的 104.7%^[25]。

在相同降水量条件下,以自然土壤 1 m 土层储水量为对照,开垦为农田的土壤经过 2 a、8 a、15 a、30 a、50 a 和 100 a 的耕作后,1 m 土层土壤储水量分别下降 20.4%、20.6%、22.6%、27.2%、29.3% 和 27.3%。在夏季干旱期观测到 0~1 m 自然土壤的储水量为 409 mm,而开垦了 2~100 a 的耕作土壤 1 m 土体的储水量下降了 19.7~29.9%^[13]。土壤孔隙结构的改变是导致土壤水分储蓄能力变化的主要因素。开垦 40 a 的黑土土壤容重由 0.79 g/cm³ 增加到 1.06 g/cm³,总孔隙度由开垦前的 69.7% 下降到 58.9%,开垦 100 a 后的耕作土壤孔隙度下降到 51.3%,土壤的田间持水量由 57.7% 下降到 41.9%^[26]。随着开垦时间延长,土壤中大团聚体含量降低,土壤黏重,导水孔隙锐减,限制了土壤剖面中吸收大气降水的速度,土壤持水通气能力下降,且逐渐酸化,土壤理化性质恶化。

3 黑土地农田保护途经及调控机制

20世纪70年代以前,东北黑土地主要依靠大量施用有机肥和轮作来保护黑土地肥力和土壤生产力;70年代后,由于化肥的大量施用,特别是80年代后取消了计划种植而导致作物连作现象频发,致使黑土表层腐殖化物质含量锐减,加上水土流失,土壤肥力迅速下降。为保护东北黑土区国家商品粮生产基地的地位,国家先后开展了黑土地保护试点工程、沃土工程、测土配方施肥工作,提出的相关调控措施在黑土地保护中发挥了积极作用。目前,针对黑土地农田现状,调控黑土的措施主要包括作物轮作调控、耕作措施调控、秸秆还田调控和施有机肥调控措施。

3.1 轮作对土壤肥力的影响

东北黑土地地区主栽作物是玉米、大豆和水稻。为一年一熟制,以旱地作物轮作为主,单纯的玉米连作和大豆连作现象也普遍存在。大豆连作增加了土壤中土传病虫害的发生,加长加大了土壤有害生物链和生物网,导致土壤生物肥力下降,大豆产量也明显降低。大豆连作影响土壤中有效养分的转化利用,随着连作年限的增加,土壤中全氮、碱解氮含量有所增加,但速效磷、速效钾、Mn、Zn含量降低,pH值下降,造成土壤酸化和养分的偏耗,大豆减产^[27]。大豆连作1 a、2 a和3 a后,大豆产量分别降低了12.9%、18.9%和31.9%^[20]。与大豆-玉米轮作和玉米-大豆-小麦轮作相比,大豆连作分别降低了5.5%和29.6%的大豆产量^[28]。在东北黑土区,玉米连作现象也十分普遍,有的已长达30 a以上。一般认为,在同一田上多年连续种植同一种作物会带来诸多不良后果^[29]。玉米长期连作后玉米产量随连作年限的延长而呈逐年递减的趋势^[30]。在北部土壤有机质含量较高地区,玉米连作导致黑土地表层土壤有机质含量下降,土壤基础肥力降低,海伦站内玉米连作21 a后土壤有机质含量下降了15.6%,土壤容重增加了16.3%^[31]。

长期田间实践证明,在东北黑土区实行作物轮作更有利于黑土地保护。豆科作物自身具有很强的固氮能力,全球豆科作物年固氮量高达 $1.3 \times 10^8 \text{ t}$ ^[32],与禾本科作物如玉米进行轮作,可显著改善土壤的物理属性,提高土壤有机质含量和作物产量。在吉林公主岭的黑钙土上进行的轮作和连作实验,与玉米连作和大豆连作相比,作物轮作

处理能提高土壤团聚体的稳定性,改善土壤结构,并增加了耕作层土壤有机碳的稳定性^[33]。同时,作物轮作还能有效控制杂草生长,破坏病虫的生命周期,减轻大豆根腐病和孢囊线虫病,增加大豆根部有效根瘤2.4~3.1倍,有助于提高作物产量。米豆轮作的大豆比连作大豆的根腐病减轻,大豆孢囊线虫病也得到减轻^[34]。在海伦站内进行了21 a的定位试验表明^[35],大豆-玉米轮作比连作玉米土壤有机质含量提高了15.6%,土壤有机质由46.3 g/kg提高到54.9 g/kg。同时,玉米-大豆轮作的大豆茬比玉米茬土壤容重降低了16.3%,大于0.25 mm的土壤水稳性团聚体提高了21.4%,土壤水分含量提高了21.5%,速效磷含量提高了16.3%。如果以连作玉米的产量为100%,大豆和玉米两区轮作使玉米增产8.8%;玉米-大豆-小麦三区种植,玉米增产14.1%。黑龙江省农业科学院土壤肥料研究所18 a定位试验结果表明^[29],大豆-玉米轮作时,大豆单产比连作2 a的高26.5%,比连作15 a的高21.2%。长期轮作,除了改变土壤有机质的数量性状,对土壤有机质的组分化学结构也有显著影响,轮作后土壤不同粒级团聚体结合有机质的能力增强,特别是游离态轻组有机质含量增加。轮作后黑土及各粒径团聚体中芳香碳含量增加,而脂肪族碳、多糖碳含量减少,氧化性降低,土壤有机质的化学稳定性增强^[35]。

3.2 有机肥还田对土壤肥力的影响

自2015年开始,农业部正式启动“减肥减药”行动,力争实现农作物化肥、农药使用量零增长。适量减少化肥的使用量、增加有机肥的使用量势在必行。土壤施入有机肥可提高土壤养分含量、改善土壤肥力属性,提高黑土表层腐殖化物质含量,有利于黑土层的保育,同时,有机肥进入土壤可降低土壤容重,增加土壤的孔隙度和通气性,土壤微生物活性增强,极大程度的维持了土壤有机质的平衡,提高土壤有机质的储量^[36,37]。但提高的程度与有机肥的施用年限、施用量和施用种类密切相关。基于10 a以上长期施用不同量有机肥对土壤有机质影响的研究表明,单施有机肥使土壤有机质呈增加趋势,但有机肥种类不同对有机质的影响也不同,秸秆的效果优于猪粪,猪粪的效果又优于堆肥,绿肥的效果较差^[38,39]。Ding等利用海伦站长期定位实验研究了连续10 a不同猪粪施用量的农田黑土有机碳库储量,发现与不施肥处

理相比,化肥配施不同猪粪施入量(7.5 kg/hm², 15.5 kg/hm²和22.5 kg/hm²)的表层土壤碳库分别增加12.5%,14.5%和18.2%,且猪粪施入量越大,土壤有机质中惰性碳库含量越高,说明来源于猪粪的有机质已经快速进入到土壤惰性有机碳库中,增加了土壤肥力的稳定性^[37]。李欣伦等研究了化肥分别配施鸡粪、牛粪、猪粪和秸秆还田条件下黑土肥力指标和作物产量的影响,发现与不施肥处理相比,化肥配施禽畜粪污和秸秆均提高了土壤有机质含量,以化肥配施猪粪处理土壤有机质含量提升最显著,从29.09 g/kg提升到35.27 g/kg。同时,施用猪粪处理土壤容重最小,田间持水量最大,玉米增产1.0 t/hm²^[40]。有机肥对黑土地的保护作用主要表现在“质”和“量”的差异。施用有机肥,除了增加土壤有机质的碳库容量,土壤富里酸的分子结构向复杂化方向发展,脂肪性和芳香性增强^[41]。有机培肥后,土壤有机质的糖类化合物和脂类化合物等化学结构增加,土壤的碳周转时间缩短。长期定位实验的研究证明当有机肥的有机质含量大于70.0%(烘干基),施用量在6±1.5 t/hm²以上时,连续施用3 a,黑土地土壤有机质含量能增加0.9~1.8 g/kg以上,0~35 cm黑土地表层土壤腐殖化物质增加36.0%以上。有机肥的有机质含量和施用量小于上述阈值,则不能提升黑土层腐殖化物质的含量,仅能改善土壤某些肥力属性,实现短期增产的目的^[42]。但是,从理论上来说,土壤有机质含量不可能无休止增长下去,任何一种土壤类型在其自然气候条件和栽培模式下,都应达到自身相应的动态平衡点并在这一水平下保持相对稳定。Hoosfield试验田每年投入35 t/hm²猪粪,已持续100多年,其土壤有机碳依然在不断增长之中,尚未达到平衡^[43]。高有机质的东北黑土连续投入15 a的22.5 t/hm²猪粪后,土壤有机质含量仍在缓慢增加。黑土地有机质的饱和点,还有待进一步深入研究。

但由于禽畜粪污等有机肥中可能含有重金属或寄生病原菌等污染物质,如果前处理不当,施入土壤后,对土壤造成污染,使土壤中重金属不断累积,土壤受到污染,作物的品质也相应降低^[44]。在农业上使用有机肥时,应多加注意。

3.3 秸秆还田对土壤肥力的影响

在东北黑土地地区,秸秆还田方式主要包括秸秆覆盖还田、混土还田和秸秆离田沤制有机肥还

田3种方式。以上秸秆还田技术的初衷均是将产自土壤本身的有机物直接还田,既减少了不必要的资源浪费和劳动力,又减少了秸秆焚烧造成的环境污染,也可改善土壤物理结构,使土壤有机质和速效养分含量增加,土壤的水、肥、气、热状况向良性方向转化,有利于作物的生长发育。

中国黑土区最早的秸秆覆盖还田技术由刘武仁于1999年提出^[45],建议将玉米宽窄行播种、条带间隔深松、玉米秸秆全量还田方式改为条带间隔覆盖,该技术明显改善了土壤理化性状,增加了土壤孔隙度,调节土壤的三相,使土壤有机质、全量养分和速效养分含量显著提高,作物产量增产11.2%左右。借鉴北美洲保护性耕作经验,秸秆免耕全覆盖的保护性耕作技术于2002年引入到中国东北^[46],与常规耕作技术相比,保护性耕作可减少土壤侵蚀90%以上,可有效控制水土流失。且秸秆腐解后的有机物质能快进入到土壤表层,表土有机质和微生物量碳含量和酶活性迅速提高^[47,48]。

秸秆混土还田包括玉米秸秆深混、碎混和深埋3种技术途径。将秸秆深混到20~35 cm的土层中,秸秆腐殖化系数达到0.13以上,半腐解物残存率提高了16.7%;将秸秆均匀混合于0~35 cm全耕层,秸秆的腐殖化系数可达到0.17以上,半腐解物的含量提高了16.9%^[26,49]。以上2种秸秆混土方式不仅打破了传统耕作下的犁底层,将秸秆加入到土壤亚耕层,土壤的保水能力增强,并快速提升了亚耕层土壤有机质含量,作物产量提高;在东北北部,玉米秸秆连续还田3 a,黑土0~35 cm全耕层土壤有机质含量可增加1.47 g/kg,在南部地区可增加0.74 g/kg,平均增加29%以上。

韩晓增研究员及其团队自2005年开始肥沃耕层构建技术研究(<https://www.tuli.com/read-39422.html>),该技术体系目前已成功应用于东北黑土区,实现了黑土地保护与可持续生产并行的效果。该技术将0~35 cm土层旋转90°±30°,再将秸秆均匀深混到0~35 cm土层之中,实行3次肥沃耕层构建后,0~35 cm土层中每个位点的土壤位置互换一次,新加入的秸秆和有机肥在土壤全层均匀分布,有利于黑土表层有机质的增补和更新^[50]。也可用优质有机肥替代秸秆,或秸秆配合优质有机肥深混到0~35 cm的土层中^①。肥沃耕层构建后黑土表层的蓄水能力提升,土壤饱和含水量达到210 mm

① 耕地肥沃耕层构建技术规程,2017。

以上,田间持水能力达到 140 mm 以上,可保证 99% 的单次大气降水全部储存于土壤中^[51,52],该技术可有效调节区域性年际间和季节间的降水不均问题。同时,由于该项操作是在秋季作物收获后进行,通过土层互换,土壤病原菌和虫卵置于土壤表面,经过冻融和太阳紫外线照射,部分病原菌和虫卵死亡,可有效减轻次年病虫害发生。

秸秆离田沤制有机肥还田是将秸秆破碎化后,经过密封沤制,待秸秆达到完全腐熟后进行还田,该方法可减少秸秆在土壤中的腐殖化过程和时间,较快速增加土壤有机质的含量和土壤肥力。同时,此方法生产的沼气还可充当燃料,缓解目前农村电力、燃料紧张的局面。

4 研究展望

黑土有机质含量比较高,其中土壤有机质的研究是重中之重。保护黑土地,实施“藏粮于地、藏粮于技”战略,必须加强黑土地保护,大力加强黑土地土壤有机质保护与退化恢复方面的理论研究,发展生态农业、循环农业、有机农业,提高东北粮食等农产品的质量效益和竞争力,为东北黑土地的永续利用提供强有力的理论和技术支撑,为国家粮食安全做出贡献。未来关于东北黑土地的研究应集中于以下几方面:

1) 土壤本身是不均质的混合物,与环境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说明土壤属性的变化,对黑土属性变化的描述需要长期实验证明,未来的研究应借助更多点的长期定位实验,并建立联网研究,以保证对黑土属性的预测和评估更加准确可靠。

2) 加强跨学科间科学的交叉模拟,开发利用数学和计算机模型,基于现有的气象监测数据和土壤基础数据,预测未来气候模式下大尺度土壤有机质和土壤肥力的动态变化,为国家战略需求和粮食储备提供必要的数据支持和预警。

3) 整合利用和开发先进的分析测试技术,如同位素示踪技术、同步辐射技术、热化学分析技术、微生物探针和基因芯片技术等,深入分析土壤有机质形成和稳定化过程中土壤生物化学过程及影响机制,为黑土地有机质提升和碳循环提供理论依据。

4) 进一步加强土壤团聚结构-有机质-微生

物之间耦合作用机制的研究,探求土壤有机质和团聚体周转的生物学调控机制,阐明土壤有机质生物学稳定机制。

5) 深入研究不同耕作、轮作、有机培肥和秸秆还田技术对土壤生物物理化学性质和土壤肥力的影响特征,因地制宜的优化出最适合当地条件的农田管理方式,提升土壤有机质含量,提高黑土地综合生产能力。

6) 在农田生态系统更多关注土壤改良、施肥和有机肥料对土壤质量的影响,今后要更加关注豆科作物,特别是禾本科-豆科作物轮作体系下不同作物残茬对土壤质量的影响机制。加强根际土壤圈内作物根系-土壤有机质-微生物相互作用关系的研究。

7) 加强分子育种科学的深入研究,培育出更适合东北黑土地气候条件的高产优质作物品种,实现节本增效、提质增效,提高东北粮食等农产品的质量效益和竞争力。

8) 重点开展黑土保育、土壤养分平衡、节水灌溉、旱作农业、保护性耕作、水土流失治理等方面研究,特别要集中攻关秸秆低温腐熟技术。

参考文献(References):

- [1] 刘春梅,张之一.我国东北地区黑土分布范围和面积的探讨[J].黑龙江农业科学,2006,(2):23-25. [Liu Chunmei, Zhang Zhiyi. Discussion of the area and distribution of black soils in Northeastern China. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2006, (2): 23-25.]
- [2] 韩贵清,杨林章.东北黑土资源利用现状及发展战略[M].北京:中国大地出版社,2009. [Han Guiqing, Yang Linzhang. The present situation and development strategy of black soil in Northeast China. Beijing: China Dadi Publishing House, 2009.]
- [3] 中国科学院林业土壤研究所.中国东北土壤[M].北京:科学出版社,1980. [Institute of Forestry Soils, Chinese Academy of Sciences. Soil in Northeast China. Beijing: Science Press, 1980.]
- [4] 何万云,张之一,林伯群.黑龙江土壤[M].北京:中国农业出版社,1992. [He Wanyun, Zhang Zhiyi, Lin Baiqun. Heilongjiang soil. Beijing: China Agriculture Press, 1992.]
- [5] 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 Environment, 2010, 56(2): 87-97.
- [6] 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,2016,16(1): 158-161. [Wei Dan, Kuang Enjun, Chi Fengqin et al. Status and protection strategy of black soil resources in Northeast of China. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016, 16(1): 158-161.]
- [7] 呼伦贝尔盟土壤普查办公室.呼伦贝尔土壤[M].呼和浩特:内

- 蒙古人民出版社,1991.[Hulunbeier League Soil Survey Office. Hulunbeier soil. Huhhot: Inner Mongolia People's Publishing House,1991.]
- [8] 张之一. 黑土开垦后黑土层厚度的变化[J].黑龙江八一农垦大学学报,2010,22(5): 1-3. [Zhang Zhiyi. The thickness changes of ah horizon after the phaeozems cultivated. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2010, 22(5): 1-3.]
- [9] 张之一. 黑龙江省土壤开垦后土壤有机质含量的变化[J].黑龙江八一农垦大学学报,2010,22(1):1-4. [Zhang Zhiyi. The changed of soil organic matter after cultivated in Heilongjiang Province. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2010, 22(1):1-4.]
- [10] 刘景双, 于君宝, 王金达, 等. 松辽平原黑土有机碳含量时空分异规律[J].地理科学,2003,23(6): 668-673. [Liu Jingshuang, Yu Junbao, Wang Jinda et al. Temporal-spatial variation law of organic carbon content in typical black soil on Songliao plain. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(6): 668-673.]
- [11] You M, Li N, Zou W et al. Increase in soil organic carbon in a mollisol following simulated initial development from parent material[J]. European Journal of Soil Science, 2017, 68(1): 39-47.
- [12] 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. [Han Xiaozeng, Wang Shouyu, Song Chunyu et al. Effects of land use and cover change on ecological environment in blank soil region. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 203-208.]
- [13] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土农田关键生态过程与调控[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,2011.[Han Xiaozeng, Li Na. The key ecosystem processes and regulations of agricultural Mollisols in Northeast China. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2011.]
- [14] 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 Xiaozeng, Zou Wenxiu. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 206-212.]
- [15] 赵玉萍, 段五得, 夏荣基. 白浆土开垦后有机物质下降速率的初步研究[J].北京农业大学学报,1983,9(3): 59-66. [Zhao Yuping, Duan Wude, Xia Rongji. Preliminary research on the degradation rate of organic substances after cultivation of planosol. Journal of Beijing Agricultural University, 1983, 9(3): 59-66.]
- [16] 辛刚, 颜丽, 汪景宽, 等. 不同开垦年限黑土有机质变化的研究[J].土壤通报,2002,33(5): 332-335. [Xin Gang, Yan Li, Wang Jingkuan et al. Changes of organic carbon in black soils with the different reclamation years. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(5): 332-335.]
- [17] 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 Jingkuan, Wang Tiewu, Zhang Xudong 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. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(1): 43-47.]
- [18] 汪景宽, 张旭东, 王铁宇, 等. 黑土土壤质量演变初探II——不同地区黑土中有机质,氮,硫和磷现状及变化规律[J].沈阳农业大学学报,2002,33(4): 270-273. [Wang Jingkuan, Zhang Xudong, Wang Tiewu et al. An approach to the changes of black soil quality (II): The status and changes of organic matter,total N,total S and total P in black soils(isohumols)in different areas. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(4): 270-273.]
- [19] 郝翔翔, 韩晓增, 李禄军, 等. 土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响[J].应用生态学报,2015,26(4):965-972. [Hao Xiangxiang, Han Xiaozeng, Li Lujun et al. Profile distribution and storage of soil organic carbon in a black soil as affected by land use types. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 965-972.]
- [20] 徐艳, 张凤荣, 汪景宽, 等. 20年来我国潮土区与黑土区土壤有机质变化的对比研究[J].土壤通报,2004,35(2):102-105.[Xu Yan, Zhang Fengrong, Wang Jingkuan et al. Temporal changes of soil organic matter in ustic cambisols and udic isohumols of China in recent twenty years. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(2): 102-105.]
- [21] 陆访仪, 赵永存, 黄标, 等. 近30年来海伦市耕地土壤有机质和全氮的时空演变[J].土壤,2012,44(1): 42-49. [Lu Fangyi, Zhao Yongcun, Huang Biao et al. Spatio-temporal variability of organic matter and total nitrogen contents in arable soils of Hailun City in past 30 years. Soils, 2012, 44(1): 42-49.]
- [22] 张孝存, 郑粉莉, 王彬, 等. 不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(5): 90-95. [Zhang Xiaocun, Zheng Fenli, Wang Bin et al. The relationships between aggregate water stability and soil organic matter of slope land with different reclamation years in black soil region. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2011, 39(5): 90-95.]
- [23] 沈善敏. 黑土开垦后土壤团聚体稳定性与土壤养分状况的关系[J].土壤通报,1981,12(2):20-32.[Shen Shanmin. The relationship between the stability of soil aggregate and soil nutrients after reclamation of mollisols. Chinese Journal of Soil Science, 1981, 12(2): 20-32.]
- [24] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 海伦地区黑土农田土壤水分动态平衡特征研究[J].农业系统科学与综合研究,2003,19(4): 252-255.[Han Xiaozeng, Wang Shouyu, Song Chunyu et al. Research of the feature of the dynamic balance on the soil moisture in farmland of black soil in Hailun district. System Sciences and Comprehensive in Agriculture, 2003, 19(4): 252-255.]
- [25] 王建国, 刘鸿翔, 孟凯, 等. 松嫩平原农业生态系统研究[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1996. [Wang Jianguo, Liu Hongxiang, Meng Kai et al. Study on agricultural ecosystem in Songnen Plain. Harbin: Harbin Engineering University Press,

- 1996.]
- [26] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 等. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2996-3002. [Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, Wang Fengxian et al. Construction effect of fertile cultivated layer in black soil. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12): 2996-3002.]
- [27] 陈申宽, 黄复民, 郭桂清, 等. 大豆连作土壤肥力变化与有害生物发生的关系[J]. 土壤肥料科学, 2006, 22(7): 373-376. [Chen Shenkuan, Huang Fumin, Guo Guiqing et al. The relation between soil fertility caused by continuous soybean and the harmful livings. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(7): 373-376.]
- [28] 韩晓增, 胡国华, 邹文秀. 东北地区不同轮作方式下大豆产量对施钾的响应[J]. 土壤与作物, 2014, 3(4): 157-161. [Han Xiaozeng, Hu Guohua, Zou Wenxiu. The response of soybean grain yield to potassium fertilization under different crop rotations in black soil region of Northeast China. Soil and Crop, 2014, 3(4): 157-161.]
- [29] 中国作物学会全国耕作制度研究会筹备会. 耕作制度研究论文集[C]. 北京: 农业出版社, 1981: 9. [China Crop Association National Farming System Research Association. Proceedings of farming system research. Beijing: Agricultural Press, 1981: 9.]
- [30] 肖占文, 王多成, 闰吉治, 等. 不同连作年限对玉米制种产量及其农艺性状的影响[J]. 作物杂志, 2010, 2: 107-109. [Xiao Zhanwen, Wang Duocheng, Run Jizhi et al. Effect of continuous cropping on yield and agronomic and economic traits of corn seed production. Crops, 2010, 2: 107-109.]
- [31] 韩天富, 韩晓增. 走粮豆轮作均衡持续丰产的农业发展道路[J]. 大豆科技, 2016, 1: 1-3. [Han Tianfu, Han Xiaozeng. Taking the grain and soybean rotation as a balanced and sustained agricultural production road. Soybean Science & Technology, 2016, 1: 1-3.]
- [32] Herridge D F, Peoples M B, Boddey R M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems[J]. Plant and Soil, 2008, 311(1/2): 1-18.
- [33] 彭现宪. 长期不同种植模式下东北黑土理化性状和有机碳稳定性的差异研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. [Peng Xianxian. Differences in physical and chemical properties and organic carbon stability of black soil between cropping systems in Northeast China. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.]
- [34] 孙玉秋, 许艳丽, 李春杰, 等. 作物轮作系统对土壤中大豆胞囊线虫胞囊量和单胞囊卵量的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(2): 248-252. [Sun Yuqiu, Xu Yanli, Li Chunjie et al. Influence of cropping rotation systems on the volume of cysts and eggs in a single-syst of soybean cyst nematode. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2011, 27(2): 248-252.]
- [35] 张福韬, 乔云发, 苗淑杰, 等. 长期玉米连作下黑土各组分有机质化学结构特征[J]. 北京: 中国农业科学出版社, 2016, 49(10): 1913-1924. [Zhang Futao, Qiao Yunfa, Miao Shujie et al. Chemical structure characteristics of all fractionations in molli-
- sol organic matter under long-term continuous maize cropping. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(10): 1913-1924.]
- [36] Banger K, Toor G S, Biswas A et al. Soil organic carbon fractions after 16-years of applications of fertilizers and organic manure in a Typic Rhodalfs in semi-arid tropics[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86(3): 391-399.
- [37] Ding Xueli, Han Xiaozeng, Liang Yao et al. Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a mollisol in China[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 122: 36-41.
- [38] Kapkiyai J J, Karanja N K, Qureshi J N et al. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 1773-1782.
- [39] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 743-747. [Yang Jingcheng, Han Xingguo, Huang Jianhui et al. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(4): 743-747.]
- [40] 李欣伦, 屈晓泽, 李伟彤, 等. 有机肥与化肥配施对黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2017, 4: 45-48. [Li Xinlun, Qu Xiaozhe, Li Weitong et al. Effect of organic manure combined with chemical fertilizer on physicochemical properties and corn yield in black soils. Territory & Natural Resources Study, 2017, 4: 45-48.]
- [41] 刘艳丽. 添加有机物料后不同微生物对土壤腐殖质形成的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016. [Liu Yanli. Effect of different microbial upon the formation of soil humus after application organic materials. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.]
- [42] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 66-71. [Han Xiaozeng, Wang Fengxian, Wang Fengju et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 66-71.]
- [43] 沈善敏. 国外长期肥料试验(一)、(二)、(三)[J]. 土壤通报, 1984(2): 85-91; 1984(3): 134-138; 1984(4): 184-185. [Shen Shanmin. The long-term fertilizer experiments abroad (1), (2), (3). Chinese Journal of Soil Science, 1984(2): 85-91; 1984(3): 134-138; 1984(4): 184-185.]
- [44] 贾武霞, 文炯, 许望龙, 等. 我国部分城市畜禽粪便中重金属含量及形态分布[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 764-773. [Jia Wuxia, Wen Jiong, Xu Wanglong et al. Content and fractionation of heavy metals in livestock manures in some urban areas of China. Journal of Agro-environment Science, 2016, 35(4): 764-773.]
- [45] 刘武仁, 边少锋, 郑金玉, 等. 玉米秸秆还田方法试验研究初报[J]. 吉林农业科学, 2002, 27(6): 38-40. [Liu Wuren, Bian Shaofeng, Zheng Jinyu et al. Preliminary report on the methods of maize stalks back to soil. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2002, 27(6): 38-40.]
- [46] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 北美保护性耕作及对中国的意义

- [J].应用生态学报, 2004,15(2):335-340.[Yang Xueming, Zhang Xiaoping, Fang Huajun et al. Conservation tillage systems in North America and their significance for China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004,15(2): 335-340.]
- [47] Zhang Bin, Li Yuanjing, Ren Tusheng et al. Short-term effect of tillage and crop rotation on microbial community structure and enzyme activities of a clay loam soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(7): 1077-1085.
- [48] 孙冰洁. 不同耕作方式下土壤微生物在黑土有机碳固定中的作用研究[D].北京:中国科学院大学,2016.[Sun Bingjie. Effects of soil microorganisms on organic carbon sequestration in black soil under different tillage practices. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [49] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 施入不同土层的秸秆腐殖化特征及对玉米产量的影响[J].应用生态学报, 2017, 28(2): 563-570. [Zou Wenxiu, Han Xiaozeng, Lu Xinchun et al. Effects of straw incorporated to different locations in soil profile on straw humification coefficient and maize yield. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 563-570.]
- [50] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. 土壤与作物, 2015,4(4):145-150.[Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, Lu Xinchun et al. The soil cultivated layer in dry land and technical patterns in cultivating soil fertility. *Soil and Crop*, 2015, 4(4): 145-150.]
- [51] 邹文秀, 陆欣春, 韩晓增, 等. 耕作深度及秸秆还田对农田黑土土壤供水能力及作物产量的影响[J].土壤与作物, 2016 (3): 141-149. [Zou Wenxiu, Lu Xinchun, Han Xiaozeng et al. The impact of tillage depth and straw incorporation on crop yield and soil water supply in arable black soil. *Soils and Crops*, 2016 (3): 141-149.]
- [52] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 构建肥沃耕层对沙性土壤水物理性质及玉米产量的影响[J].土壤与作物, 2017(2):81-88. [Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, Lu Xinchun et al. Effects of constructed fertile layer on sandy soil physical properties and maize yield. *Soil and Crop*, 2017(2): 81-88.]

Research Progress of Black Soil in Northeast China

Han Xiaozeng, Li Na

(Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, Heilongjiang, China)

Abstract: The black soil region in Northeast China is one of the world's four black soil regions. It is well known for its high organic matter content and high fertility. It is not only the basis for the development of agriculture in Northeast China, but also the granary of China, which plays a decisive role in safeguarding the national food security. According to the characteristics and problems of black soil in Northeast China, this review first elucidates the forming conditions of the black soil and the natural characteristics. Secondly, we describe the evolution of soil properties and fertility in the process of the reclamation of black soil. The soil organic matter content and soil fertility decreased significantly, which have severely affected the sustainable development of agriculture in black soil region in Northeastern China. Based on this analysis, different protection pathways and their controlling mechanisms on soil fertility are analyzed. Future research on black soil should be emphasized on the development of new technologies, new methods, and cross-disciplinary theories to ascertain the evolutionary characteristics of soil fertility and their influencing factors. It is necessary to cultivate high-yield, high-quality crop varieties that are more suitable for the climatic conditions in Northeast China, to optimize the cropping system in combination with the current technological regulation pattern in this region, to improve the quality and yield of crops, to increase the overall productivity and competitiveness of agriculture soil, and finally to ensure the sustainable use of agriculture in the black soil region.

Key words: soil organic matter; soil fertility; process of farmland; crop rotation; crop residues returning; black soil in Northeast China