

DOI: 10.11766/trxb202102280114

韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58 (6): 1341–1358.

HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu. Research Perspectives and Footprint of Utilization and Protection of Black Soil in Northeast China. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (6): 1341–1358.

东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望*

韩晓增, 邹文秀

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081)

摘 要: 中国东北黑土是世界上最肥沃、垦殖时间较短的土壤类型之一, 在保障国家粮食安全中具有非常重要的地位。本文在总结东北黑土地概况(定义、分布、土壤类型和垦殖时间)的基础上, 梳理了东北黑土地的研究足迹, 并提出了未来东北黑土地科技研发的方向。东北黑土地包括黑土、黑钙土、草甸土、白浆土、暗棕壤和棕壤 6 种土壤类型, 主要分布在辽河平原、松嫩平原和三江平原。自然黑土肥力较高, 但是开垦后受生态系统改变和人类活动的双重驱动, 土壤肥力发了巨大变化, 土壤有机质含量在垦殖初期(约 30 a)迅速下降, 开垦 50 a 后下降速度趋于稳定; 侵蚀区黑土层受风蚀和水蚀等影响出现了不同程度的流失。有机培肥、轮作、等高种植等技术措施已经被广泛应用于黑土培肥与水土流失防治。黑土层是黑土地的标志性土层, 是黑土地肥力的核心。基于黑土层保护的东北黑土地保护利用建议从以下 3 方面开展科学研究: (1) 解析人类活动下的黑土层厚度及颜色变化过程和驱动机制, 探索现代农业管理方式下维持和增加黑土层厚度的技术途径; (2) 针对东北黑土地 6 种土壤类型耕地限制粮食生产能力的主控因子, 因地制宜建立以“肥沃耕层构建”、“障碍性土层消减”和“控蚀固土增肥”为核心的东北黑土地保护利用技术模式, 研发相关配套技术, 探索模式的适应性及应用效果和机理; (3) 以长坡为研究对象建立水土流失观测场, 集中研发坡耕地控制面蚀和沟蚀的新技术和新模式。

关键词: 东北黑土地; 研究足迹; 黑土层; 土壤有机质; 肥沃耕层; 障碍消减

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Research Perspectives and Footprint of Utilization and Protection of Black Soil in Northeast China

HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu

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

Abstract: Black soils in Northeast China, reclaimed in recent 60~200 years, is one of the most productive soils in the world, and plays a vital role in guaranteeing national food security. Based on the summarized general situation of black soils in Northeast China including definition, distribution, soil types and reclamation span, this review presents a research footprint for black soils in the recent 70 years and raises future research orientations. Black soils including mollisol, chernozem, meadow soil, albic soil,

* 中国科学院野外台站联盟项目(KFJ-SW-YW035-4)、黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA19B101, GA19B105)、国家自然科学基金项目(41771327)资助 Supported by the Field Station Union Project of Chinese Academy of Sciences (No. KFJ-SW-YW035-4), Applied Technology Research and Development Program of Heilongjiang (Nos. GA19B101, GA19B105), The Natural Science Foundation of China (No. 41771327)

作者简介: 韩晓增(1957—), 男, 辽宁人, 研究员, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: xzhan@iga.ac.cn

收稿日期: 2021-02-28; 修改稿日期: 2021-03-30; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-04-19

dark brown soil, and brown soil are dominantly distributed in Liaohe plain, Songnen plain, and Sanjiang plain. The soil fertility under virgin land is relatively high but underwent great changed under the combined role of ecological system change and human activity. Also, the soil organic matter (SOM) sharply decreased during the early period (0-30 a) of black soils reclamation, then the decrease rate of SOM tended to reach stability after 50 years of reclamation. Black soil layer loss observed in eroded regions resulted from water erosion and wind erosion. The organic amendment, rotation, and contouring cropping were extensively adopted to enhance soil fertility and control soil erosion. The black soil layer is the landmark layer in black soils and is the core of soil fertility. Given black soil layer protection, the following suggestions can play a key role in the protection and utilization of black soil: (1) reveal the change processes of thickness and color in black soil layer and the driving mechanism and explore approaches that maintain and increase black soil layer thickness in current agronomic practices; (2) integrate building patterns of protection and utilization of black soil according to the local conditions. Consider conditions such as the core of fertile cultivated layer, barriers layer subduction and conservation of water and soil based on the dominant factor limiting black soils' productivity, and deeply mining the adaptation, effect and mechanism of the patterns; (3) establish monitoring sites on the long slopes in the slope cropland and focus on new technologies research related to controlling soil erosion.

Key words: Black soil in Northeast; Research footprint; Black soil layer; Soil organic matter; Fertile cultivated layer; Barriers layer subduction

中国东北黑土地主要分布在辽河平原、松嫩平原和三江平原 (38°43'N~53°33'N, 115°31'E~135°05'E), 从东到西 1 600 km, 从南到北 1 400 km 范围内, 是世界三大黑土带之一^[1-2]。自然黑土是在第三纪、第四纪更新世或者全新世的砂砾和黏土层上发育的土壤, 区域内独特的气候、水文条件和植被类型为土壤中腐殖质的积累奠定了基础, 形成了深厚肥沃的黑土层^[3], 黑土成为世界上最肥沃的土壤之一。东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地, 耕地面积 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[4], 占全国的 1/4; 粮食总量占全国的 1/4, 商品粮占全国的 1/4, 调出量占全国的 1/3^[5]。东北地区由于气候冷凉, 土地开垦时间较短, 土壤表层普遍存在黑色或暗黑色的腐殖质, 民间俗称“黑土地”。虽然自然土壤比较肥沃, 但是黑土开垦后经历了轮耕休耕期、人畜低强度利用期和机械化高强度利用期^[6], 用养失调和土壤侵蚀导致黑土自然肥力逐年下降, 黑土发生退化, 主要表现在黑土层中有机质锐减、耕作层变薄、犁底层增厚, 物理性质恶化, 生物功能退化等^[6-8], 加之东北区域内部分土壤类型存在原生障碍(如白浆土的白浆层、黑钙土的钙积层), 影响了东北黑土区农业可持续发展和粮食产能的稳定与提升, 威胁了东北黑土地在国家粮食安全中发挥的“压仓石”和“稳压器”作用。对东北黑土地开展保护利用, 全面提升黑土地耕地地力已经成为当前亟需解决的重大问题, 已经引起了国家领导人的高度重视。习近平总书记 2016

年、2018 年和 2020 年在东北视察时, 均对黑土地保护作出了重要指示, 强调“要采取工程、农艺、生物等多种措施, 将黑土地保护好、利用好”; “坚持用养结合, 综合施策”; “要保护好黑土地, 这是‘耕地中的大熊猫’”。“黑土地保护”的实质是保护黑土地的黑土层, 把“黑土地利用好”的实质是创造一个深厚肥沃的耕层, 稳定和提高作物产量。为此, 理论上有必要将黑土地的定义、分布和垦殖前后变化以及黑土地保护利用的相关研究进展进行梳理和总结。鉴于此, 笔者根据 40 余年在东北黑土地的研究工作和经验, 系统梳理了近 70 年东北黑土地保护利用的研究足迹, 总结分析东北黑土地的主要科学和技术研究进展, 探讨了未来的重点研究方向, 为下一步黑土地保护利用的科学研究和技术研发提供参考, 同时也将为开展“东北黑土地保护利用”国家行动计划的制定和实施提供科学依据, 为农业生产提供指导意见。

1 黑土地概况

1.1 黑土地的定义与分布

“黑土地”是农民对黑土的俗称。东北地区是我国土地开垦较晚的区域, 开垦初期农民将一犁深 (15~18 cm) 目测为黑色、松软的土壤称为黑土地, 涵盖了黑土、黑钙土、草甸土、白浆土和暗棕壤等^[9], 其分布的行政区域包括辽宁省、吉林省、黑龙江省

和内蒙古自治区的东四盟（赤峰市、通辽市、呼伦贝尔市和兴安盟），土地面积 124.4 万 km²^[10]。由于成土母质、气候、地形和植被等的多样性，东北地区土类有 32 个^[11]，占全国土壤类型总数的 70%。自然土壤黑土层（A 层）厚度与区域内气候条件密切相关，其中分布在光热资源丰富的干旱和半干旱地区的土壤类型 A 层较薄，开垦后由自然土壤转变为耕作土壤后，A 层中的黑色腐殖质迅速被分解，A 层的黑色逐渐消失，接近淋溶层（B 层）的颜色，部分土壤类型 A 层颜色逐渐转变为成土母质颜色，例如棕壤^[2]。在东北北部和东部，由于生长季雨热同季，夏季植被茂盛生长，积累了大量有机物质，冬季漫长而寒冷，微生物活动受限，有利于有机物质积累，土壤有机质积累大于分解，形成了深厚的黑土层。形成于此环境中的土壤类型虽然开垦多年，但是 A 层依然表现为黑色或暗黑色，黑土即是典型代表^[2]。在上述具有独特黑土层的土壤类型中，大部分呈复区分布在松嫩平原、三江平原和辽河平原。为了更好地管理黑土地，研究学者提出了黑土区的概念，先后将黑土、黑钙土分布区域合并为黑土区，后又将草甸土并入。由于概念不清，黑土区的范围和面积一直比较模糊^[9]。2004 年初，由黑龙江省农业科学院和中国科学院南京土壤研究所组织东北地区科研院所和大专院校的专家实施了科技部的“东北黑土资源利用现状及发展战略研究”项目。该项研究首次综合学术界、政府部门和农民的意见，根据土壤肥力属性，将东北黑土区的土壤类型划为：黑土、黑钙土、草甸土、白浆土、暗棕壤和棕壤 6 种土壤类型^[12]。在 2017 年，农业农村部联合国家发展改革委、财政部、国土资源部、环境保护部和水利部发布了《东北黑土地保护规划纲要（2017—2030 年）》^[5]，在“纲要”中定义了黑土地，是指拥有黑色或暗黑色腐殖质表土层的土地，是一种性状好、肥力高、适宜农耕的优质土地，明确了“黑土地”等同于“黑土区”。至此，东北黑土区和黑土地的定义得到了统一。根据第二次全国土壤普查和农业农村部“全国耕地地力调查与质量评价试点”的数据，确定黑土地面积为 2.6 × 10⁷ hm²^[4]，占东北区耕地面积的 72%（表 1）。

1.2 黑土地的土壤类型与垦殖时间

1.2.1 黑土地的土壤类型 根据《东北黑土地保护规划纲要（2017—2030 年）》^[5]的规定，黑土地的

土壤类型包括黑土、黑钙土、草甸土、白浆土、暗棕壤和棕壤等 6 种土类，每种土壤类型的典型剖面见图 1，每种土壤类型^[2]的特点如下：

黑土。黑土是东北黑土地的代表性土类，主要分布在松嫩平原，即黑龙江、吉林两省和内蒙古的兴安盟及呼伦贝尔市。自然黑土主要植被类型是草原化草甸，在成土过程中由于气候寒冷、生长季短，雨热同季，植被生长茂盛，冬季漫长寒冷，土壤有机质积累大于分解，加之黄土状沉积母质以黏土矿物为主，有利于形成腐殖质含量高低不等的黑土层（A）^[2]。按照黑土层厚度可以将黑土划分为薄层黑土（<30 cm）、中厚层黑土（30~60 cm）、厚层黑土（>60 cm），其中薄层黑土和中厚层黑土占 95% 以上。

表 1 东北黑土区 6 种土壤类型的耕地面积^[4]

Table 1 Arable area of 6 soil types in the black soil region in Northeast China

土壤类型	面积	占比
Soil types	Area/ (×10 ⁴ hm ²)	Percent/%
黑土 Mollisol	476	18.29
黑钙土 Chernozem	370	14.22
草甸土 Meadow soil	705	27.08
白浆土 Albic soil	232	8.91
暗棕壤 Dark brown soil	600	23.05
棕壤 Brown soil	220	8.45
合计 Total	2 603	—

黑钙土。黑钙土主要分布在松嫩平原西部，大兴安岭东西两侧和松辽分水岭地区。气候为半干旱季风气候区，植被为草甸草原，母质为中新生代的河湖沉积物，地形为低平原，海拔高度在 150~200 m。黑钙土 A 层在 50~80 cm，有机质含量较低（1.5%~2.5%），保水能力差；B 层石灰反应强烈。贫瘠和石灰反应是限制黑钙土作物高产稳产的主要因素。

草甸土。草甸土是一种非地带性土壤，在东北地区均有分布，但是主要分布在三江平原。草甸土的显著特点是土壤剖面上仅有 A 层和 C 层，A 层深度介于 20~50 cm 之间，也有少数深达 100 cm 以上。草甸土的典型成土地形特点是地势低洼、排水不畅，地下水可以补给土壤表层，土壤表层常年含水量为

田间持水量的 70%~90%，部分时段土壤会达到饱和状态甚至地表出现积水。区域内草甸植物生长旺盛，表层土壤有机质积累大于分解，黑土层较厚。

白浆土。白浆土是东北地区重要的耕作土壤之一，主要分布在黑龙江省三江平原和吉林省的东部。分布区域属于半湿润和湿润气候，母质以第四纪河湖黏土沉积物为主，地形主要是低平原、河谷阶地和山前洪积台地等，地下水埋藏 8~10 m，植被以喜湿植物为主，如苔草和小叶樟。白浆土剖面结构比较特殊，A 层厚度介于 50~70 cm 之间，但黑土层较薄，约 15 cm，下层即为白浆层（Aw 层），厚度为 15~30 cm。白浆层是一种障碍土层，呈酸性、贫瘠，物理性状极差，湿润时几乎不能透水，干时坚硬，不利于作物根系生长。

暗棕壤。暗棕壤是在温带湿润森林植被下发育

的土壤，主要分布在大兴安岭东坡和环小兴安岭、张广才岭、长白山浅山区向平原过渡区域，海拔高度小于 1 200 m。母质以花岗岩为主，其次是玄武岩、砂岩和砾岩。暗棕壤剖面结构为 A 层较薄，厚度介于 15~20 cm 之间，AB 过渡层浅薄，厚度介于 5~10 cm 之间，土壤贫瘠，多为坡耕地。暗棕壤是东北耕地面积最大的一个土类。

棕壤。棕壤主要分布在暖温带湿润、半湿润海洋性季风气候区，植被类型主要为阔叶林，母质以基岩风化物为主，其次为坡积物、洪积物和冲积物。棕壤是黑土地中最特殊的土壤类型，其剖面结构中的 A 层不存在黑色土层，A 层干时呈亮黄棕色，湿时呈浊棕色。A 层有机质含量较低，一般为 10.0~20.0 g·kg⁻¹；B 层发育不明显，A 层和 C 层可明显区分^[13-14]。全层砂粒含量较高，土壤比较贫瘠。



图 1 东北黑土地 6 种土壤类型的典型剖面

Fig. 1 Typical soil profiles of 6 soil types in black soil region in Northeast China

1.2.2 东北黑土地垦殖时间 自然黑土开垦为耕作土壤后，由于生态系统的改变，土壤的一些属性在短期内发生了显著快速的变化^[6]；农田生态系统稳定后这些属性的变化速度变得缓慢，在良好农业管理措施下，土壤属性会向肥沃土壤方向演化^[3]。东北黑土地开垦时间较晚，至今还存在少数不典型的和碎片化分布的自然土壤。分布在辽河平原的黑土地的开发可以追溯到公元 1660 年（距今 360 a）。当时辽河中下游平原的棕壤在清朝开始解禁，被垦殖的耕地面积为 3 333 hm²，至 1780 年（距今 240 a）开垦面积达到了 2.33×10⁵ hm²，至 1890 年辽河上游棕壤的开垦进入盛期^[15]。因此，可以认定辽河平原棕壤的平均开垦时间约为 200 年。松嫩平原北纬 45°以南的黑土（松嫩平原南部），于 1860 年开始大规模解禁垦殖，至 1900 年进入了开垦的盛期^[15]；因

此，可以认定松嫩平原南部黑土平均开垦时间约为 150 a。北纬 45°以北地区的黑土、白浆土、黑钙土和草甸土（松嫩平原北部），具有一定开垦规模的时间始于 1900 年，至 1945 年形成了一定开发规模^[16]，至此该区域耕地的开垦时间可以认定约 100 a^[17]。三江平原白浆土的开垦始于 1700 年，到 1800 年开垦了约 1.33×10⁴ hm²，1800—1930 年开垦面积增加至 4.67×10⁵ hm²，1945—1950 年被开垦耕地面积约增加至 7.87×10⁵ hm²，土壤类型已由白浆土扩增至草甸土和暗棕壤。1950—1960 年为解放后大开荒的第一阶段，耕地面积扩大至 1.53×10⁶ hm²；三江平原共经历了四次大开荒，至 2000 年垦殖耕地面积已达 4.00×10⁶ hm²^[17]，宜农耕地垦殖完成。从这个过程看，三江平原的白浆土、草甸土和暗棕壤的耕地实际利用年限可以认定为 60 a 左右。

2 黑土地的土壤属性研究足迹

2.1 黑土地开垦前后土壤有机质变化

由于东北黑土地开垦时间较短, 目前仍然能够找到少量残存的自然土壤, 学者们通过对比自然土壤和耕作土壤发现耕作黑土肥力发生了巨大变化^[6-7, 18-21], 于是东北黑土地严重退化就成了“共识”。实际上黑土地由自然土壤向耕作土壤转变过程中, 一些土壤属性的变化是由生态系统改变所驱动的, 还有一些土壤属性与农艺措施有关^[6, 22]。当前亟需解决的黑土地退化阻控和保护利用的核心问题, 是探索优化农艺措施来实现黑土地保护性利用的目标。黑土地的肥沃核心是具有深厚肥沃的黑土层和土壤中富含有机质, 其他属性均为这两个属性所调控。

黑土地 6 种土壤类型的自然土壤和开垦初期 A 层有机质含量差异较大^[2]。黑土从南部吉林公主岭到北部黑龙江右岸, 黑土层有机质含量逐渐升高, 南部吉林德惠黑土有机质含量为 $22.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23], 黑龙江哈尔滨(北纬 45°) 以北到北安、嫩江黑土有机质含量在 $56.2 \sim 95.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[2, 24]。三江平原自然草甸土 A 层有机质为 $107.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最高可达到 $244.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[25]; 松嫩平原北部草甸土 A 层有机质含量为 $59.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[25]; 据统计黑龙江省(第二次土壤普查的 605 个土壤剖面)和吉林省(第二次土壤普查的 285 个土壤剖面)草甸土 A 层土壤有机质的平均含量分别为 $41.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[26]和 $22.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[27]。三江平原是典型白浆土的主要分布区域, 自然植被下白浆土(3 个典型剖面)A 层有机质平均含量为 $97.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中最高值为 $137.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[28]; 曾昭顺等^[29]1963 年在松嫩平原和三江平原的典型白浆土区域调查时发现白浆土 A 层有机质含量在 $89.5 \sim 91.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。黑钙土 A 层有机质含量在 $30.0 \sim 80.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间; 山麓剥蚀平原的森林草原地区也存在少量 A 层有机质含量在 $80.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上的黑钙土^[2, 30]。暗棕壤 A 层有机质含量在 $53.6 \sim 101.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[2], 长白山山麓 2 个暗棕壤典型剖面 A 层有机质含量分别为 $51.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $73.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[31]。分布在辽河平原的棕壤, 由于区域内水热条件良好, 加之垦殖时间较长, 基本没有自然土壤; 部分区域看似自然土壤, 但开垦时也是次生植被类型而非原始植被, 次生植被下棕壤 A

层有机质含量在 $10.0 \sim 30.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[2]。因此, 东北黑土地无论是自然土壤还是开垦初期的耕地, A 层土壤有机质含量均较高, 加之母质以黏土矿物为主, 土壤表层均显为黑色或暗黑色。

黑土地开垦后土壤中的植物残体在微生物的作用下迅速分解, 有机质积累条件被破坏, 土壤有机质含量迅速下降^[6, 32]。黑土从自然土壤到相对稳定的耕作土壤大约经过了 30 a 的土地利用方式转换期, 被称作垦殖初期。该时期耕作层土壤有机质含量在东北北部以每年 $1.5\% \sim 2.6\%$ 、南部以 $0.5\% \sim 0.7\%$ 的速度下降(表 2)^[22]。到了稳定利用时期, 土壤有机质含量平均每年下降速度为 0.1% 左右, 此时土壤有机质含量的下降对作物产量影响比较显著, 据统计耕层土壤有机质含量每年下降 0.5% , 作物产量减少 15% ^[22]。黑土地开垦 50 a 后土壤有机质的下降速度趋于稳定, 为 $0.06\% \cdot \text{a}^{-1}$ 左右(表 2)。根据能够查阅到的相关文献, 白浆土开垦初期也出现了土壤有机质迅速下降的现象, 开垦前 $10 \sim 15 \text{ a}$ 下降速度为 $2.90\% \cdot \text{a}^{-1} \sim 2.97\% \cdot \text{a}^{-1}$, 开垦后的 $41 \sim 50 \text{ a}$ 下降速度为 0.25% (表 2)。关于草甸土开垦过程中土壤有机质含量变化的研究均集中在三江平原, 在开垦前 5 a 下降速度为 $10.61\% \cdot \text{a}^{-1}$, $6 \sim 15 \text{ a}$ 和 $16 \sim 25 \text{ a}$ 间每年下降速度分别为 5.35% 和 3.76% (表 2); 军川农场和 290 农场的草甸土在开垦 30 a 间有机质含量每年下降速度分别为 2.78% 和 2.97% 之间^[19]。根据宋达泉^[33]的报道, 淋溶黑钙土有机质在开垦前 20 a 的下降速度为 $3.6\% \cdot \text{a}^{-1}$ 。目前未查阅到暗棕壤和棕壤土壤有机质随开垦年限变化的相关文献, 但是根据设立在典型暗棕壤和棕壤分布区的长期定位试验分析了它们在利用过程中土壤有机质的变化过程^[34]。长期监测数据显示在常规种植条件下(仅施用化肥)暗棕壤 34 a 间耕层土壤有机质下降了 8.00% , 下降速度为 $0.23\% \cdot \text{a}^{-1}$, 棕壤 33 a 间耕层土壤有机质下降了 6.91% , 下降速度为 $0.21\% \cdot \text{a}^{-1}$ 。张之一^[32]通过分析 11 篇参考文献的 33 对黑土垦殖前后土壤有机质变化的数据, 也证实了黑土开垦后 $3 \sim 5 \text{ a}$ 间, 耕层土壤有机质发生了快速下降现象, 然后呈缓慢下降, 达到一定年限后, 如果农艺措施未发生变化, 基本呈维持状态。东北黑土地 6 种土类非侵蚀区黑土层有机质含量或者耕层土壤有机质随开垦时间变化表现出相同的趋势^[35]。

表 2 东北黑土地土壤有机质下降速度

Table 2 Decreased rate of soil organic matter of black soils in Northeast China

黑土 Mollisol				白浆土 Albic soil				草甸土 Meadow soil			
地点	作者	开垦时间	下降速度	地点	作者	开垦时间	下降速度	地点	作者	开垦时间	下降速度
Study	Authors	Cultivated	Decreased	Study	Authors	Cultivated	Decreased	Study sites	Authors	Cultivated	Decreased
sites		duration/a	rate/ (%·a ⁻¹)	sites		duration/a	rate/ (%·a ⁻¹)			duration/a	rate/ (%·10 a ⁻¹)
赵光农场	沈善敏 ^[20]	0~4	4.1	密山	张之一等 ^[36]	0~15	2.90	虎林	刘兴土等 ^[19]	0~5	10.61
		5~15	1.1			16~30	0.41			6~15	5.35
		16~40	0.16							16~25	3.76
	韩晓增等 ^[6]	0~10	2.6	853 农场	依艳丽等 ^[37]	0~30	0.94			0~25	3.14
		11~20	1.1			31~40	1.96				
		21~30	0.6			41~50	0.25	军川农场	刘兴土等 ^[19]	0~30	2.78
		31~50	0.3								
		51~100	0.06								
	北安 李庆民等 ^[38]	0~20	1.8	850 农场	赵玉萍等 ^[39]	0~10	2.97	290 农场	刘兴土等 ^[19]	0~30	2.97
		20~40	0.7			11~20	2.41				
		汪景宽等 ^[21]	0~10								
		11~40	0.89								
德惠	刘景双等 ^[18]	41~100	0.59								
		0~5	1.3								
		6~20	0.46								
		21~30	0.13								
		31~40	0.069								
		41~50	0.069								
		51~100	0.068								
		101~130	0.064								

2.2 东北黑土地非侵蚀区黑土层变化

黑土层厚度是评价黑土地土壤肥力的重要指标之一，学者们普遍将黑土地开垦后黑土层变薄^[40-41]归因于水蚀和风蚀，但是在非侵蚀区，如松嫩平原和三江平原低洼易涝地区，黑土层是如何变薄的呢？鲜有文献对这一问题进行深入剖析。据参加了 20 世纪 50 年代黑龙江流域和三江平原调查、黑龙江省第一次和第二次土壤调查的张之一^[42]分析，对东北黑土地非侵蚀区黑土层变薄的部分报道与事实不符。产生误解的原因有两个，一是土壤容重。自然黑土的黑土层结构良好，植被根系多，疏松多孔，其最小容重为 0.6 g·cm⁻³^[43]，一般在 0.8~0.9 g·cm⁻³

之间^[42]；自然白浆土黑土层容重在 0.54~0.76 g·cm⁻³之间^[29, 35]；而第二次土壤普查时黑土和白浆土耕地黑土层的平均容重分别为 1.11 g·cm⁻³ 和 1.08 g·cm⁻³^[26]。如果按照自然黑土的黑土层度为 30 cm（相当于薄层黑土）、容重为 0.75 g·cm⁻³ 计算，耕地土壤的黑土层厚度就变成了 20.3 cm，黑土层厚度减小了 32.2%，与张之一^[42]的研究结果相近，按照相同方法计算白浆土的黑土层厚度减小了 40%。二是成土条件。东北地区成土条件差异较大，自然黑土的黑土层厚度由南至北逐渐增加^[2]。以黑土为例，划分了薄层黑土、中厚层黑土和厚层黑土，这就说明，自然土壤根据成土条件不同会发育成不同厚度

的黑土层^[26]。目前，东北地区耕作黑土的黑土层也存在同样的分布规律。关于非侵蚀区黑土层厚度的研究建议未来集中在以下两个方面，（1）现有研究结论大部分基于时间换空间的方法获得^[7]，缺乏可比性，建议建立黑土层厚度定位监测点，开展长期观测研究；（2）提出能够量化黑土层厚度变化的科学分析方法，传统的黑土层厚度判定依靠挖掘剖面，然后人为划定黑土层界面，需要大量的时间和人力；虽然现在很多专家通过土钻测定黑土层厚度能够节约一定的时间和成本，但是由于土壤的空间异质性较大，该方法的误差就更大，这些误差远远超过了黑土层厚度的变化值。

2.3 侵蚀区域黑土层变化

东北黑土区典型的地貌特征为漫川漫岗。根据国土调查数据，黑龙江省 2°以上坡耕地占总耕地面积的 23.4%，其中 2°~6°坡耕地占坡耕地总面积的 77.7%^[44]；吉林省 2°以上的坡耕地占总耕地面积的 28.1%，其中 2°~6°坡耕地占坡耕地总面积的 60.1%^[45]；内蒙古自治区 2°以上的坡耕地占总耕地面积的 31.8%，其中 2°~6°坡耕地占坡耕地总面积的 90.8%^[46]；由此推论东北黑土地坡耕地主要由 300~1 000 m 坡长、2°~6°坡度的坡耕地所组成^[47]。

根据水土流失监测点的观测结果，黑龙江省海伦和宾县 9°坡耕地土层流失厚度分别为 1.2 mm·a⁻¹^[48]和 1.5 mm·a⁻¹^[49]，而克山、拜泉和甘南县 5°坡耕地土层流失厚度分别为 1.6 mm·a⁻¹、2.2 mm·a⁻¹和 2.1 mm·a⁻¹^[50]（表 3）。在辽宁省铁岭棕壤区长达 11 a 的监测结果显示，坡度、作物覆盖和种植方式是影响土层流失速度的最主要因素。不同坡

度坡耕地土层流失速度表现为裸地>玉米和大豆顺坡种植>玉米和大豆等高种植（表 4），6°、10°和 15°坡的平均土层流失量分别为 0.37 mm·a⁻¹、0.83 mm·a⁻¹和 1.70 mm·a⁻¹。但是上述数据是试验小区观测数据，仅在一定程度上代表实际情况。Yang 等^[51]采用 RUSLE 模型(Revised Universal Soil Loss Equation) 估算了吉林德惠和榆树黑土层流失速率并预测了黑土层消失时间，分析发现黑土层流失的速度与土壤类型等密切相关。吉林榆树中厚层、薄层和破皮黄黑土的黑土层流失速度分别为 0.48 mm·a⁻¹、1.13 mm·a⁻¹和 2.00 mm·a⁻¹，德惠中厚层、薄层和破皮黄黑土的黑土层流失速度分别为 0.35 mm·a⁻¹、0.99 mm·a⁻¹和 1.73 mm·a⁻¹；根据预测中厚黑土、薄层黑土和破皮黄黑土层在榆树消失的时间分别为 839 a、221 a 和 50 a，在德惠消失的时间分别为 1 130 a、252 a 和 58 a。因此，东北黑土地水土流失对黑土层厚度的影响没有郑北鹰和朱伟光等报道那样严重^[52]。

¹³⁷Cs 示踪也是一种重要的研究水土流失量的方法^[54-56]。杨维鸽等^[57]采用 ¹³⁷Cs 分析了东北中部黑龙江省宾县坡耕地侵蚀特点，发现黑土坡耕地侵蚀特点为坡面侵蚀坡脚沉积，不同坡面部位侵蚀率不同，坡面平均侵蚀率为 2.4 mm·a⁻¹，坡脚沉积率为 1.2 mm·a⁻¹。在东北黑土区南部的吉林省德惠市黑土坡面平均侵蚀速率为 1.8 mm·a⁻¹，坡脚沉积率为 2.0 mm·a⁻¹^[58]。通过分析东北黑土地半干旱区 2 个坡面水蚀和风蚀的复合侵蚀量发现，坡面水蚀分别为 2.0 mm·a⁻¹和 1.7 mm·a⁻¹，风蚀分别为 0.5 mm·a⁻¹和 1.0 mm·a⁻¹^[59]。张晓平等^[60]通过系统分析

表 3 黑龙江省侵蚀区黑土层流失厚度

Table 3 Loss thickness of black soil layer in Heilongjiang Province				
地点	观测时间	坡度	坡长	流失厚度
Monitoring sites	Monitoring duration/a	Slope degree /°	Slope length/m	Loss thickness/(mm·a ⁻¹)
海伦 Hailun ^[48]	5	9	20	1.2*
宾县 Binxian ^[49]	5	9	20	1.5**
克山 Keshan ^[50]	7	5	20	1.6***
拜泉 Baiquan ^[50]	7	5	20	2.2***
甘南 Gannan ^[50]	7	5	20	2.1***

注：*连续三年观测平均值，**连续四年观测平均值，***连续七年观测平均值，黑土层流失厚度均按照容重 1.2 g·cm⁻³ 计算。根据侵蚀模数进行转换，下同。Note: *Mean value of experimental three years, ** Mean value of experimental four years, *** Mean value of experimental seven years; black soil loss thickness was estimated using the bulk density of 1.2 g·cm⁻³.

表 4 辽宁省坡长 20 m 坡耕地黑土层流失厚度^[53]

Table 4 Loss thickness of black soil layer on the slope cropland with a slope length of 20 m

坡度 Slope	植被 Vegetation types	耕作方式 Tillage	流失厚度 Loss thickness / (mm·a ⁻¹)
6°	裸地 Bareland	无 No tillage	0.6
	玉米和大豆* Maize and Soybean	顺坡 Downhill	0.3
	玉米和大豆*Maize and Soybean	等高 Contour	0.2
10°	裸地 Bareland	无 No tillage	1.3
	玉米和大豆*Maize and Soybean	顺坡 Downhill	0.7
	玉米和大豆*Maize and Soybean	等高 Contour	0.5
15°	裸地 Bareland	无 No tillage	2.7
	玉米和大豆*Maize and Soybean	顺坡 Downhill	1.3
	玉米和大豆*Maize and Soybean	等高 Contour	1.1

注：*玉米和大豆轮作。Note: Rotation of maize and soybean.

一级河道上的嫩江江桥、大莱、松花江哈尔滨三个水文观测站的多年平均含沙量、输沙量和输沙模数后发现，黑土水蚀迁移的土壤大部分沉积在五级河道的河漫滩上，形成草甸土和沼泽土，极少量进入到四级和三级河道的河漫滩上，基本上没有在一、二级河道沉积。

综合分析长期定位观测场的监测数据^[50]和¹³⁷Cs 的计算数据^[54, 56]，以一个自然小流域的完整坡地为基本单元，分析了土壤流失与沉积后认定东北黑土地中的坡耕地土层流失速度为 0.5~1.5 mm·a⁻¹，平均 1.0 mm·a⁻¹ 比较符合区域的实际情况。1997 年水利部颁布了《土壤侵蚀分类分级标准》，提出了东北黑土地允许土壤流失标准为 200 t·km⁻²·a⁻¹，相当于 0.16 mm·a⁻¹（按照土壤容重为 1.2 g·cm⁻³ 转换）^[61]。部分学者采用勘察和访问农户的方法获得了黑土地侵蚀率为 4.2 mm·a⁻¹^[62]，不具有代表性。更有学者夸张地表述，“据调查 20 世纪 50 年代黑土地黑土层厚度为 60~70 cm，现在一般只有 20~30 cm”^[63]。事实上在 20 世纪 50 年代的土壤调查中，没有文献报道坡耕地的黑土层能达到 60~70 cm。坡地中的自然黑土均属于薄层黑土，黑土层厚度小于 30 cm^[2]。

东北地区的风蚀主要发生在西部半干旱区以及半干旱和半湿润区交错带，黑土地 6 种土壤类型中全部的黑钙土、部分棕壤和薄层黑土分布在这个区域。在辽西北风沙半干旱区的研究发现，玉米秸秆

覆盖风蚀度较对照减少 4.2 cm^[64]。虽然李胜龙等^[65]利用野外集沙仪定点监测了黑土的风蚀特征，但是仅关注耕作方式和地表覆盖对输沙量的影响，而关于黑土层受风蚀影响的田间实地监测研究鲜有报道。现有大部分研究基于调查估算和室内模拟的方法获得了风蚀对黑土层厚度影响的相关数据^[66]，但是这部分结果与实际差距较大。通过¹³⁷Cs 间接测定了风蚀对土壤的搬运作用在 0.5~1.0 mm·a⁻¹ 的范围内^[67]。大风和沙尘暴能间接预测风蚀发生的趋势，通过分析嫩江、克山、海伦、哈尔滨、长春和四平 1951—2000 年间大风发生的日数发现，大风主要发生在 3—5 月份，从大风发生日数年际间变化能够发现东北黑土区南部长春和四平的年大风日数表现为下降趋势，中北部哈尔滨、海伦和嫩江的年大风日数 1980 年后有增加的趋势；而沙尘暴呈现了明显的变少趋势^[68]，是因大风日数的变化趋势影响了沙尘暴日数的变化趋势。迟文峰等^[69]研究发现极端天气沙尘暴次数减少和年平均风速降低与土壤风蚀下降显著相关。从大风日数和沙尘暴发生日数的时间变化序列分析，克山、海伦、哈尔滨、长春和四平的风蚀环境在减弱。

土壤侵蚀一直是热点问题，也是黑土地保护的焦点问题。目前从黑土侵蚀的相关研究来看，存在着碎片化和缺少野外长期精准监测等问题，一些重要参数是学者们估计和推算出来的，然后互相引用形成了“虚拟”的流行数据。

3 讨 论

3.1 黑土地保护与土壤培育

3.1.1 坡耕地水土流失的治理技术 坡耕地自然黑土层较薄 (<30 cm), 垦殖后在土壤侵蚀和过度垦殖的双重影响下土壤肥力迅速降低。为了恢复坡耕地土壤肥力, 早在 20 世纪 50 和 60 年代大量学者们就关注了坡耕地治理。陈景岚^[70]在 1965 年提出了在坡耕地修土梯田用以控制水土流失, 梯田是东北地区首先实施的一项坡耕地治理技术。据黑龙江省克山实验站和吉林省辽源水保站的观测结果显示, 梯田起到了良好的控蚀效果^[2]。基于水土保持的耕作方法的研究一直是水土流失治理技术研发的热点方向。在 6°以下的坡耕地, 学者们提出了等高耕作、横坡作垄、带状间作、粮草轮作、垄向区田、深松蓄水和保护性耕作等控蚀、保水、固土技术^[2]。采用横坡作垄和植物篱技术措施地表径流量分别减少了 50%~80%和 90%, 深松耕法可以减小 94%的水蚀, 营造农田防护林风速可以降低 25%, 有效控制风蚀^[71]。在东北黑土区中部海伦的研究发现, 免耕和横坡垄作年径流量分别较传统耕作减少 97.7%和 96.8%, 侵蚀模数分别减少 98.9%和 99.2%^[48]。赵雨森和魏永霞^[72]的研究发现覆膜+垄向区田、免耕秸秆覆盖和垄向区田也能够有效控制黑土坡耕地水土流失。坡面治理主要采取从上至下挖截流沟、建荒山荒坡灌木梗、栽种水保林、疏林草地生态修复、修水平梯田、地埂植物带、改垄等技术措施; 沟道治理主要采取了修建谷坊和塘坝以及侵蚀沟秸秆填埋等工程措施^[73]。黑土侵蚀地区的坡耕地治理技术发展相对缓慢, 20 世纪 50 和 60 年代研发的技术模式^[2]一直沿用至今。具有原始创新的能大面积推广应用的新技术较少, 风蚀区和水蚀区相比, 创新性技术就更少, 在未来的研究中有待加强。

3.1.2 非侵蚀地区黑土地保育技术 东北黑土地非侵蚀区的保育技术主要从耕作土壤管理角度出发, 利用农业生产的秸秆、畜禽粪污等废弃物无害化后施入土壤中, 补充黑土层有机质损失, 保持黑土层有机质不下降或者缓慢上升。丁瑞兴和刘树桐^[43]、韩晓增和邹文秀^[22]认为黑土地开垦一定年限后需要开展培肥工作, 以维持和提升土壤耕地地

力, 土壤培肥措施除了耕作外, 主要还包括有机肥施用和轮作等途径。黑土比较肥沃, 土壤培肥相关研究起步较晚。1988 年王兆荣等^[74]报道了在东北中部的黑土经过 2 a 农家肥施用后, 土壤有机质提高了 9.6%~22.3%, 同时表现出了随着农家肥施用量增加土壤有机质含量增加的趋势。与对照区相比, 有机肥、作物秸秆和牧草还田 5 a 后黑土有机质分别增加了 19.8%、16.5%和 10.4%^[75]。东北黑土带上德惠^[76]、公主岭^[77]、哈尔滨^[34]和海伦^[78](从南到北)的长期定位试验研究均表明长期有机培肥能够显著增加土壤有机质含量(表 5)。在东北黑土区南部德惠经 9 a 有机培肥土壤有机质含量增加了 11.0%~12.4%, 公主岭经 38 a 有机培肥有机质含量增加了 14.4%~31.1%; 中部哈尔滨经 32 a 有机培肥土壤有机质增加了 8.3%, 海伦经过 10 a 有机培肥土壤有机质增加了 13.3%。土壤有机质的增加与有机物料投入的种类和投入量密切相关。值得关注的是在东北黑土区中部中厚层黑土区海伦的长期定位试验研究还发现采用试验田的粮食喂猪, 秸秆垫圈与猪粪尿沤制有机肥还田, 实行循环生产, 土壤有机质含量经过 27 a 累计增加了 7.4%^[79], 证明了农业生产的废弃物无害化处理后 80%以上还田可以保证耕作土壤有机质不降低或者缓慢上升^[34], 进一步验证了在东北黑土区开展种养结合循环生产的可能性。基于分布在黑龙江(13 个)和吉林(4 个)的 17 个国家级黑土长期监测点的数据分析, 自 1988 年以来, 监测区黑土有机质含量总体上呈上升趋势, 其中 1988—1997 年监测初期土壤有机质含量略有下降, 1998—2013 年有机质含量呈上升趋势^[80]。长期有机肥施用不仅能够增加有机质含量, 还能够影响有机质的组成。姜岩等^[81]在 1965 年报道了施用有机肥能够增加黑土中有效态的胡敏酸物质, 促进土壤团粒结构的形成, 增加土壤中有效态养分含量。吴景贵等^[82]研究发现施用玉米秸秆和有机肥能够显著增加土壤胡敏酸中脂肪族结构成分, 单施有机肥显著增加土壤胡敏酸中羟基含量, 添加秸秆游离羧基含量显著增多。秸秆和有机肥施用后土壤中富啡酸的甲基、亚甲基和次甲基结构成分显著增加, 游离羧基含量也显著增多; 不同培肥方式对黑土胡敏酸和富啡酸的元素组成有较大影响^[82]。

表 5 长期黑土培肥对土壤有机质含量的影响

Table 5 Effects of organic amendment on soil organic matter contents based on long-term experiments

试验地点 Study sites	土壤类型 Soil types	试验区间 Experimental years	有机肥种类	有机肥施用量	土壤有机质含量增加
			Organic	Rate of organic amendments	百分比
			manures	application/ (t·hm ⁻²)	Increased SOM content/%
海伦 Hailun ^[78]	中厚层黑土	2001—2011	猪粪	22.5	13.3
海伦 Hailun ^[22, 34]	中厚层黑土	1985—2015	农家肥	循环	7.4
哈尔滨 Harbin ^[34]	薄层黑土	1980—2011	马粪	37.2	8.3
公主岭 Gongzhuling ^[77]	薄层黑土	1980—2017	有机肥	30 和 60	14.4~31.1
德惠 Dehui ^[83]	薄层黑土	1982—1990	马粪、秸秆和 农家肥	马粪和秸秆 7.5, 农家肥 30	11.0~12.4

赵德林和王政本^[84]在 1982 年就提出了白浆土的培育方法,即采用大剂量有机肥施用、深耕与施肥相结合、豆科与禾本科轮作实现耕地“用”“养”协调的目标。崔顺吉等^[85]在 1982—1984 年连续向高、中和低肥力的白浆土施用 2.7 t·hm⁻² 有机肥,通过分析发现土壤有机质含量在高肥力土壤减少了 0.27%,在中肥力土壤减少了 0.03%,而在低肥力土壤增加了 2.4%,说明初始土壤有机质含量和有机物投入量是影响白浆土培肥效果的主要因素。连续 10 a 施用 25.5 t·hm⁻² 牛粪后白浆土有机质含量增加了 9.3%^[86]。陈恩凤等^[87]最早在 1960 年就通过研究证明了有机肥料在棕壤培肥上具有明显的效果。位于沈阳农业大学棕壤试验站内的长期定位试验研究结果表明,连续 33 a 施用有机肥后棕壤土壤有机质含量增加了 13.1%~19.5%^[34],有机质的增加量与投入量密切相关。武志杰等^[88]研究发现连续 3 a 有机物料施用后棕壤有机质含量增加了 3.1%~27.8%,不同有机物料对土壤有机质增加效果表现为秸秆>土粪>牛粪>根茬说明了较高 C/N 的有机物料还田对维持甚至提高土壤有机质含量效果更佳^[89]。黑龙江省农业科学院黑河分院于 1979 年在黑河典型暗棕壤区设立了长期定位试验,用以监测暗棕壤肥力对不同农艺措施的响应过程,研究结果表明每 3 a 施用 1 次 3 t·hm⁻² 麦秸能够遏制暗棕壤有机质含量下降,但是没有达到有效提升的效果^[88, 90-91],如果要显著提高暗棕壤的有机质含量,必须增加有机物料的投入量。有机物料施用对黑钙土的培肥效果也非常显

著,高同彬等^[92]在黑龙江省富裕的研究发现连续 2 a 施用腐熟牛粪和秸秆,黑钙土有机质含量分别增加了 18.4%和 10.5%;窦森^[93]在吉林黑钙土的研究中也得到了相似的结论,施用马粪、玉米秸秆和豆秸一年后土壤有机质增加了 18.3%,关于黑钙土长期培肥的研究没有发现更多的资料。在草甸土方面的研究发现,猪粪、绿肥(紫花苜蓿)和稻草连续 5 a 还田,土壤有机质含量增加了 8.1%~14.9%^[94]。

3.2 黑土层保育理念与技术模式

东北黑土地的显著特点是具有富含土壤有机质的黑色或者暗黑色的黑土层(A 层),但是垦殖后频繁耕作扰动导致黑土层中有机质锐减^[3]。为了阻控有机质减少和提升有机质含量,学者做了大量的研究工作^[77, 88, 95],但是从黑土层或者适宜耕层厚度角度考虑,黑土层保育的研究始于 2007 年,邹文秀等^[95]采用耕作的方法将秸秆、有机肥和化肥施入 0~20 cm 和 20~35 cm 土层,在 0~35 cm 的黑土层中土壤有机质、水分物理性质和生物学活性均取得了显著培育效果。中国科学院海伦农业生态实验站(海伦站)在东北黑土区中部设立了一个 35 a 的耕地恢复成自然草地景观的定位试验。基于该试验的研究结果表明农田生态系统恢复为自然生态系统后,土壤腐殖物质得到恢复,0~5 cm 黑土层土壤有机质已经由 54.0 g·kg⁻¹^[96]增加至 87.8 g·kg⁻¹^[97],增加了 62.6%;同时该层土壤颜色已接近自然土壤颜色。但是,同一地块相邻区域同步开展的不同经营制度试验研究结果表明,采用农田生产的粮食通过

畜牧过腹和秸秆垫圈还田技术模式后土壤有机质仅增加了 7.4%^[22], 而采用秸秆深混黑土层保护技术, 可以保持和提升 0~20 cm 黑土层有机质含量^[22]。海伦站连续 13 a 秸秆还田定位试验研究表明, 0~20 cm 黑土层土壤有机质由 44.5 g·kg⁻¹ 增加至 48.9 g·kg⁻¹, 增加了 9.9%^[98]。范围等^[99]在黑钙土上开展一个 2 a 试验研究表明, 秸秆均匀施入 0~20 cm 土层, 土壤有机质可以增加 27.8%。秸秆覆盖还田技术主要影响表层土壤有机质含量^[100], Li 等^[101]基于东北黑土区中部海伦连续 15 a 免耕秸秆覆盖定位试验研究发现, 与常规耕作(无秸秆还田)相比, 免耕仅提高了 0~5 cm 土层有机质含量(28.8%), 对 5~20 cm 土层有机质没有显著影响。在黑土区南部德惠, 孙冰洁等^[102]的研究发现连续 13 a 免耕秸秆覆盖后 0~5 cm 土层土壤有机质增加了 36.4%, 而翻耕-秸秆深混后 0~5 cm 和 5~10 cm 土层有机质含量分别增加了 6.4%和 7.5%。黑土区南部梨树的研究表明, 连续 5 a 免耕秸秆覆盖后 0~5 cm 和 5~15 cm 土层有机质含量增加了 37.8%和 8.2%^[103]。由此可见将能增加土壤有机质的有机物料放在土壤表面, 仅能提升 0~5 cm 或者 0~10 cm 土层的土壤有机质, 如果增加有机物料施入深度, 达到黑土层平均厚度(35 cm), 即可保育整个黑土层的土壤有机质不下降, 又可以提高有机物料的腐质化系数^[95]。

3.3 保护性耕作的优势与局限性

保护性耕作是指任何能够保证在播种后地表作物残留物覆盖率不低于 30%的耕作措施^[104], 免耕秸秆覆盖是典型的保护性耕作措施, 但是免耕无覆盖和少耕是否属于保护性耕作措施, 目前未有统一的定论^[105]。笔者认为, 保护性耕作应该是一切对土壤良好属性有保护作用的耕作措施的总称, 最典型保护性耕作措施是少、免耕^[105]。东北黑土区最早的少耕研究始于 1979 年, 吉林省少耕法机械化试验研究协作组在吉林省的榆树市、公主岭市的怀德县和南崴子镇均设置了包括连续翻耕、耙地和原垄卡种(免耕)等耕作方式在内的田间试验, 调查了耕作方式对作物产量和土壤属性的影响, 值得注意的是所有试验小区均具有深翻基础, 秸秆全部移除。研究结果表明免耕未表现出显著的作物增产效果, 由于播种机械的限制还存在玉米根茬影响播种质量导致缺苗的问题^[106]。免耕秸秆全覆盖还田相关研究是由杨学明^[104]于 2002 年开始的, 同时引进了免耕播种机

等农业机具并实现了国产化。免耕秸秆全覆盖还田对于保持土壤含水量、控制水土流失和减少秸秆焚烧保护生态环境等方面具有重要作用。但是, 秸秆覆盖后, 由于春季土壤解冻提温慢而影响了种子发芽出苗^[107], 同时还存在春季播种困难等问题, 限制了该项技术的应用。秸秆覆盖还田后在地表腐解, 腐解产物与土壤接触面积有限, 分解后以气体的形式直接进入大气, 或者在地表 0~5 cm 内富集, 影响土壤有机质在整个土层中的提升^[108]。间隔免耕-间隔覆盖技术最早是由吉林农业科学院刘武仁^[109]于 1999 年提出, 核心技术内容包括玉米宽窄行播种和条带间隔深松, 玉米秸秆全量还田方式为条带间隔覆盖。该项技术解决了春季土壤解冻提温慢、春季播种困难和易跑墒等问题, 但是限制提升耕层土壤有机质含量的问题仍然未得到有效解决。受土壤类型和积温的影响, 东北黑土区北部还存在免耕秸秆覆盖玉米减产的问题, Chen 等^[110]研究发现连续 7 a 免耕秸秆覆盖, 平地 and 坡耕地玉米分别减产 28.4%和 13.8%; 大豆生育期延后。其主要原因是免耕秸秆覆盖影响了春季播种质量和地温提升。张之一^[42]认为从美国引进的保护性耕作是防治土壤侵蚀很好的方法。但是美国的黑土土壤质地多为粉壤质, 而我国东北地区的黑土土壤质地较黏重, 在引进中, 应该注意结合中国的实际进行研究和改进。

4 问题与展望

4.1 黑土层保护的科技展望

在东北黑土地的 6 种土壤类型中, 垦殖时间较长的棕壤耕地已经失去了原始黑土层, 按发生分类的黑土层是耕作层或者受耕作影响的亚耕层; 白浆土和暗棕壤垦殖前自然土壤的黑土层比较浅薄, 由于开垦时间较晚和位于东北北部的冷凉和低山丘陵区, 目前仍然残存着少量浅薄黑土层; 黑钙土分布在热量相对较高的半干旱地区, 黑土层中有机质减少已经导致土壤黑色变淡。东北黑土区以北纬 45°为界, 南部黑土层较薄, 北部还存在中厚黑土层, 大部分黑土层在 30 cm 以上, 有机质含量 35 g·kg⁻¹ 以上; 草甸土黑土层及其有机质含量与中厚黑土相似。由此可见, 科学上需要明确目前还存在黑土层的耕地, 在现有农业管理方式下是否能够得到保持? 自然土壤黑土层形成过程在科学上基本清晰,

但是人类活动驱动下的黑土层厚度以及颜色等变化过程需要进一步的剖析和预测。在预测黑土层的变化方向和速度时,还需要阐明土壤有机质在黑土层中的变化过程与调控机制,揭示黑土层有机质与黏土矿物形成有机无机复合体的功能与机制。集中科研力量研发中厚层黑土保育的原创性技术和以原创性技术为核心的技术模式,在纬度 45°以北的黑土带上建立大于 4 万 km² 黑土层保护区,实现中厚层黑土的永续利用。

4.2 肥沃耕层的理论与实践

在东北黑土区浅薄型黑土层的耕地上,基于实现耕地园田化(高标准农田)的目标,研发肥沃耕层构建理论和原创性技术。浅薄型黑土层的黑土一部分是在自然成土过程中形成的,还有一部分是垦殖过程中由于人类活动导致的^[2]。对于浅薄型黑土层的耕地,在现有耕作方式下是否能够通过新技术应用恢复至中厚型黑土层的耕地?目前没有相关报道。研究学者仅在土壤有机质缓慢上升或部分地区略有下降进行了碎片化的报道^[34]。我国东北黑土地和国际上同类地区耕地承载的保障粮食安全的重要性不同,东北黑土地在保障我国粮食安全中具有非常重要的战略地位。因此,研究浅薄型黑土层耕地的肥沃耕层理论、新技术、标准和应用模式是推动黑土地耕地地力提升和实现粮食高产稳产的核心。

4.3 障碍性土层消减

白浆土在成土过程中由于黏粒的悬浮迁移和干湿交替导致在黑土层以下形成了白浆层^[26]。白浆层质地黏重,有明显的淀积黏土膜,具有黏、瘦、硬、酸等特点,是典型的障碍层次。白浆土黑土层浅薄,肥力较低;白浆层影响土壤中水、热、气的流通和养分释放以及作物根系的生长发育,是东北黑土地中的低产土壤类型。针对白浆层障碍消减的技术研发,取得了包括心土培肥在内的一系列研究成果^[84],对白浆层障碍消减起到了显著作用,但是机械和成本限制了该项技术在白浆层障碍消减中的应用。目前,农业生产上急需可操作性强、成本低的白浆土障碍消减技术和模式。

4.4 侵蚀区控蚀增肥的科技展望

1) 水蚀。黑土坡耕地水蚀过程研究比较清楚,但是控制水蚀技术的研发及阻控机理研究相对缓慢,目前生产上仍然沿用 20 世纪 50—60 年代的技

术^[2]。由于黑土坡耕地的典型地形是漫川漫岗,其特点是坡度小、坡面长,一些坡耕地水土流失监测小区的坡长介于 20~30 m 之间^[52],因此观测数据与实际有一定差距。坡耕地水蚀分为面蚀和沟蚀,面蚀控制技术以固土保水为主,沟蚀控制技术以拦水截土为主,但是缺乏坡耕地整体排水系统的科学研究。相关的拦水截土技术均无法控制水不流动,因此需要针对黑土地的特殊地形、地貌条件,因地制宜研发坡耕地区域排水技术,形成完善的排水系统。由此看来,黑土区坡耕地急需建立以长坡为研究对象的水土流失长期观测场,重点研究坡耕地区域内系统降能排水技术和沟蚀控制技术;集中攻关坡耕地控制面蚀的新技术和新模式。

2) 风蚀。在东北黑土地的 6 种土壤类型中黑钙土位于半干旱风蚀区,余下的 5 种土壤类型主要分布在半湿润和湿润区域,风蚀主要发生在春天。由于东北黑土地的风蚀程度低于我国典型风蚀区域,所以进一步研究黑土地区域内气候特征、植被覆盖度、地面粗糙度和种植方式对耕地风蚀的影响程度和阈值是非常重要的。在东北黑土区设立风蚀监测站点,形成监测网络,进行实时观测,对制定防风蚀技术对策和指导技术应用具有非常重要的科学价值。在此基础上,研究容忍风蚀量和风蚀土壤迁移及沉降规律,为风蚀控制技术研发提供科学数据和技术支撑。根据黑土区季节性风蚀特点,研发具有早春快生的农田防护林新树种和地面覆盖作物新品种是这个地区首先需要解决的问题。免耕覆盖技术必须解决防止秸秆被风吹失的技术问题,建立综合土壤防风蚀技术体系,提出可操作性强,能够应用的综合防风蚀模式。

参考文献 (References)

- [1] Liu X B, Lee Burras C, Kravchenko Y S, et al. Overview of Mollisols in the world: Distribution, land use and management[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92 (3): 383—402.
- [2] Institute of Forest soil, Chinese Academy of Sciences. Soils in Northeast China [M]. Beijing: Science Press, 1980. [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.]
- [3] Han X Z, Li N. Research progress of black soil in northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38 (7): 1032—1041. [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.]
- [4] Xin J S, Wang J K, Xue Y D. Dongbei Heituqu Gengdi Zhiliang Pingjia[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017. [辛景树, 汪景宽, 薛彦东. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.]
- [5] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Outline of Northeast Black Soil Protection Plan (2017—2030), http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm. [中华人民共和国农业农村部. 东北黑土地保护规划纲要 (2017—2030 年), http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm.]
- [6] Han X Z, Wang S Y, Song C Y, et al. Effects of land use and cover change on ecological environment in black soil region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25 (2): 203—208. [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.]
- [7] Yu L, Zhang B. The degradation situations of black soil in China and its prevention and counter measures[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2004, 18 (1): 99—103. [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.]
- [8] Zou W X, Han X Z, Lu X C, et al. Effects of the construction of fertile and cultivated upland soil layer on soil fertility and maize yield in black soil region in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31 (12): 4134—4146. [邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 肥沃耕层构建对东北黑土区旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31 (12): 4134—4146.]
- [9] Liu C M, Zhang Z Y. Discussion of the area and distribution of black soils in northeastern China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2006 (2): 23—25. [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.]
- [10] Han X Z, Yan C Q. Regulation and properties of soil water in farmland in Northeast China[M]. Beijing: Science Press, 2005. [韩晓增, 颜春起. 中国东北农田土壤水分属性及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [11] Gong Z T, Zhao Q G, Zeng Z S, et al. Draft of soil classification in China[J]. Soils, 1978, 10(5): 168—169. [龚子同, 赵其国, 曾昭顺, 等. 中国土壤分类暂行草案[J]. 土壤, 1978, 10 (5): 168—169.]
- [12] Yang L Z, Han G Q. Development strategy and utilization status of black soil resource[M]. Beijing: China Land Press, 2009. [杨林章, 韩贵清. 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.]
- [13] Hesung Y, Li Q. China Soils[M]. Beijing: Science Press, 1978. [熊毅, 李庆奎. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1978.]
- [14] Zhu X M. Distribution and properties of main soils in Northeast Heilongjiang Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 1952 (1): 1—6. [朱显謨. 黑龙江东部主要土壤的性质及其分布[J]. 土壤学报, 1952 (1): 1—6.]
- [15] Li W, Zhang P Y, Song Y X. Analysis on land development and causes in northeast China during Qing Dynasty[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25 (1): 7—16. [李为, 张平宇, 宋玉祥. 清代东北地区土地开发及其动因分析[J]. 地理科学, 2005, 25 (1): 7—16.]
- [16] Tao Y. The evolution of ecological environment after reclamation in the great northern wilderness[J]. Chinese Journal of Ecology, 1983, 2 (1): 23—25, 41. [陶炎. 北大荒开垦后生态环境的演变[J]. 生态学杂志, 1983, 2 (1): 23—25, 41.]
- [17] Group of Environmental protection and resource utilization of China wetland. Review of development history of Sanjiang plain [J]. Territory & Natural Resources Study, 1998 (1): 15—19. [《中国湿地资源开发与环境保护研究》课题组. 三江平原开发历史回顾[J]. 国土与自然资源研究, 1998 (1): 15—19.]
- [18] Liu J S, Yu J B, Wang J D, et al. Temporal-spatial variation law of organic carbon content in typical black soil on Songliao plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23 (6): 668—673. [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.]
- [19] Liu X T, Ma X H. Influence of large-scale reclamation on natural environment and regional environmental protection in the Sanjiang Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20 (1): 14—19. [刘兴土, 马学慧. 三江平原大面积开荒对自然环境影响及区域生态环境保护[J]. 地理科学, 2000, 20 (1): 14—19.]
- [20] Shen S M. Relationship between soil nutrients and aggregate stability after black soil reclamation [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1981, 12 (2): 32—34. [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): 32—34.]
- [21] Wang J K, Wang T Y, Zhang X D, et al. An approach to the changes of black soil quality (I)—changes of the indices of black soil with the year(s) of reclamation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33 (1): 43—47. [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.]
- [22] Han X Z, Zou W X. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in northeast China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 206—212. [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.]
- [23] Yu J B, Liu J S, Wang J D, et al. Organic carbon variation law of black soil during different tillage period[J].

- Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (1): 27—30. [于君宝, 刘景双, 王金达, 等. 不同开垦年限黑土有机碳变化规律[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 27—30.]
- [24] Ding Z X, Wang Z R. Properties and components of humus in black soil and albic soil. Journal of Northeast Agricultural University, 1959, 3—4 (7): 135—143. [丁瑞兴, 王兆荣. 黑土和白浆土的腐殖质组成及性质[J]. 东北农学院学报, 1959, 3—4 (7): 135—143.]
- [25] Wu Z H. Compared study of humus properties for black soil, dark meadow soil and albic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1959 (2): 135—144. [吴志华. 黑土、暗色草甸土、白浆土腐殖质性质的比较研究[J]. 土壤学报, 1959 (2): 135—144.]
- [26] He W Y. Heilongjiang Soils[M]. Beijing: China Agriculture press, 1992. [何万云. 黑龙江土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1992.]
- [27] Jiang Y. Jilin Soils[M]. Beijing: China Agriculture press, 1998. [姜岩. 吉林土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.]
- [28] Xing B S, Zhang Z Y, Xu Q. Pedogenetic characteristics of albic soils in the three river plain, Heilongjiang Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31 (1): 95—104. [邢宝山, 张之一, 徐琪. 三江平原白浆土发生学特性[J]. 土壤学报, 1994, 31 (1): 95—104.]
- [29] Zeng Z S, Zhuang J P, Li M P. On the genesis and classification of paichang soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 1963, 11 (2): 111—129. [曾昭顺, 庄季屏, 李美平. 论白浆土的形成和分类问题[J]. 土壤学报, 1963, 11 (2): 111—129.]
- [30] Ding R X. Soil nutrients status of black soil and chernozem in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1979, 10 (4): 14—19, 26. [丁瑞兴. 黑龙江省几种黑土和黑钙土的养分状况[J]. 土壤通报, 1979, 10 (4): 14—19, 26.]
- [31] Lin B Q, Liang S H, Hu K M, et al. Forest soil in west slope of Changbaishan[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1963 (2): 61—80. [林伯群, 梁式弘, 胡开敏, 等. 长白山西坡的森林土壤[J]. 东北林业大学学报, 1963 (2): 61—80.]
- [32] Zhang Z Y. The changed of soil organic matter after cultivated in Heilongjiang Province[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010, 22 (1): 1—4. [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.]
- [33] Song D Q. Chernozem in Northeast China [J]. Bulletin of Biology, 1955 (4): 40—44, 2. [宋达泉. 我国东北的黑钙土[J]. 生物学通报, 1955 (4): 40—44, 2.]
- [34] Xu M G, Zhang W J, Huang S M. The evolution of soil fertility in China[M] 2ed. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [徐明岗, 张文菊, 黄绍敏. 中国土壤肥力演变[M]. 2 版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.]
- [35] Su D C. Discussion of soil fertility of albic soil after reclamation[J]. Soils, 1978, 10 (3): 92—95. [苏德昶. 白浆土垦殖后肥力现状初步探讨[J]. 土壤, 1978, 10 (3): 92—95.]
- [36] Zhang Z Y, Zhang Y F, Zhu X C. Change of soil organic matter quantity and components in albic soil after reclamation[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 1983 (2): 73—77. [张之一, 张元福, 朱玺纯. 白浆土开垦后土壤有机质的数量及其组成的变化[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1983 (2): 73—77.]
- [37] Yi Y L, Wan X X, Shen Y, et al. Baijiang soil fertility changes under different land use type and reclamation years[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43 (4): 449—455. [依艳丽, 万晓晓, 沈月, 等. 不同利用方式及不同开垦年限白浆土的肥力变化[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43 (4): 449—455.]
- [38] Li Q M, Yin D L. The characteristics of variation of black soil fertility in relation to the properties of soil colloidal complex[J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19 (4): 351—359. [李庆民, 尹达龙. 黑土肥力变化特点及其与土壤复合胶体性质的关系[J]. 土壤学报, 1982, 19 (4): 351—359.]
- [39] Zhao Y P, Duan W D, Xia R J. Preliminary research on the degradation rate of organic substances after cultivation of planosol[J]. Journal of China Agricultural University, 1983 (3): 59—66. [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 (3): 59—66.]
- [40] Lu J L. Phaeozem degradation and sustainable agriculture in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15 (2): 53—55, 67. [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.]
- [41] Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (2): 66—70. [范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (2): 66—70.]
- [42] Zhang Z Y. The thickness changes of Ah horizon after the phaeozems cultivated[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010, 22 (5): 1—3. [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.]
- [43] Ding R X, Liu S T. A study on the fertility of black soil after reclamation[J]. Acta Pedologica Sinica, 1980, 17 (1): 20—32. [丁瑞兴, 刘树桐. 黑土开垦后肥力演变的研究[J]. 土壤学报, 1980, 17 (1): 20—32.]
- [44] Department of Natural Resources of Heilongjiang province. Bulletin of main data achievement related to second land survey in Heilongjiang province[J]. Natural Resource in Heilongjiang province, 2014 (7): 27. [黑

- 龙江省自然资源厅. 关于黑龙江省第二次土地调查主要数据成果的公报[J]. 黑龙江国土资源, 2014(7): 27.]
- [45] Department of Natural Resources of Jilin province. Bulletin of main data achievement related to second land survey in Jilin province. http://zrzy.jl.gov.cn/zwgk/tzgg/201708/t20170821_5187395.html. [吉林省自然资源厅. 关于吉林省第二次土地调查主要数据成果的公报. http://zrzy.jl.gov.cn/zwgk/tzgg/201708/t20170821_5187395.html.]
- [46] Department of Natural Resources of Inner Mongolia. Bulletin of main data achievement related to second land survey in Inner Mongolia. http://zrzy.nmg.gov.cn/xxgk/tztg/201408/z20140813_232459.html. [内蒙古自然资源厅. 关于内蒙古自治区第二次土地调查主要数据成果的公报 [EB/OL]. http://zrzy.nmg.gov.cn/xxgk/tztg/201408/z20140813_232459.html.]
- [47] Zhao Y Y. Soil erosion issues in Keshan and Baiquan zone in Heilongjiang Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 1966, 3 (1): 96—99. [赵一宇. 黑龙江省克山拜泉地区土壤侵蚀问题[J]. 土壤学报, 1966, 3 (1): 96—99.]
- [48] Zhang S L, Zhang X Y, Liu X B, et al. Tillage effect on soil erosion in typical black soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23 (3): 11—15. [张少良, 张兴义, 刘晓冰, 等. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23 (3): 11—15.]
- [49] Wang B, Zheng F L, Wang Y X. Adaptability analysis on soil erodibility models in typical thin layer black soil area of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (6): 126—131. [王彬, 郑粉莉, 王玉玺. 东北典型薄层黑土区土壤可蚀性模型适用性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (6): 126—131.]
- [50] Zhai W F, Xu L S. Study on the soil erodibility K-value in the typical black region of northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42 (5): 1209—1213. [翟伟峰, 许林书. 东北典型黑土区土壤可蚀性 K 值研究[J]. 土壤通报, 2011, 42 (5): 1209—1213.]
- [51] Yang X M, Zhang X P, Deng W, et al. Black soil degradation by rainfall erosion in Jilin, China[J]. Land Degradation & Development, 2003, 14 (4): 409—420.
- [52] Zheng B Y, Zhu W G. Can black soil disappear from Northeast China in 50 years? [N]. Guangming Ribao, 2001-1-12 (B1). [郑北鹰, 朱伟光. 东北黑土地会 50 年内消失吗? [N]. 光明日报, 2001-1-12 (B1).]
- [53] Sun J H, Yang Y G, Zhang B J, et al. Hilly field erosion regulation in low mountain region of northern Liaoning[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4 (4): 65—74. [孙景华, 杨玉阁, 张本家, 等. 辽北低山丘陵区坡耕地水土流失规律研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4 (4): 65—74.]
- [54] An J, Zheng F L, Wang B. Using ^{137}Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, Northeast China[J]. Catena, 2014, 123: 243—251.
- [55] Fang H Y, Sun L Y, Qi D L, et al. Using ^{137}Cs technique to quantify soil erosion and deposition rates in an agricultural catchment in the black soil region, Northeast China[J]. Geomorphology, 2012, 169/170: 142—150.
- [56] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Using ^{137}Cs tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in northeast China[J]. Pedosphere, 2006, 16 (2): 201—209.
- [57] Yang W G, Zheng F L, Wang Z L, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (3): 572—581. [杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53 (3): 572—581.]
- [58] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Study on soil erosion and deposition of black soils on a sloping cultivated land using ^{137}Cs tracer method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (6): 1376—1382. [方华军, 杨学明, 张晓平, 等. ^{137}Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征 [J]. 生态学报, 2005, 25 (6): 1376—1382.]
- [59] Wang Y, Yang M Y, Liu P L. Contribution partition of water and wind erosion on cultivated slopes in northeast black soil region of China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24 (4): 790—795. [王禹, 杨明义, 刘普灵. 东北黑土区坡耕地水蚀与风蚀速率的定量区分[J]. 核农学报, 2010, 24 (4): 790—795.]
- [60] Zhang X P, Liang A Z, Shen Y, et al. Erosion characteristics of black soils in northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26 (6): 687—692. [张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点 [J]. 地理科学, 2006, 26 (6): 687—692.]
- [61] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards of the Classification of Soil Erosion in China[S]. [中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准[S].]
- [62] Cui W H, Xin Y J, Yu C X. Soil erosion in the black soil area to the east of the great Xingan mountains in Hulunbuir[J]. Soils, 2005, 37 (4): 439—446. [崔文华, 辛亚军, 于彩娟. 呼伦贝尔市大兴安岭东麓黑土区土壤侵蚀研究[J]. 土壤, 2005, 37 (4): 439—446.]
- [63] Liu B Y. Issue discussion of sustainable utilization and soil degradation in typical black soil region [J]. Soil and Water Conservation in China, 2003 (12): 31—32. [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): 31—32.]

- [64] Wang H X, Wang H X, Cai L F, et al. Study of cropping system related to control wind erosion by peanut [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2016 (5): 37—39. [王海新, 王慧新, 蔡立夫, 等. 花生防风蚀种植技术研究[J]. 辽宁农业科学, 2016 (5): 37—39.]
- [65] Li S L, Li H P, Lin Y, et al. Effects of tillage methods on wind erosion in farmland of northeastern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33 (4): 110—118, 220. [李胜龙, 李和平, 林艺, 等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (4): 110—118, 220.]
- [66] Lin Y, Li H P, Xiao B. Influencing factors of wind erosion and their quantitative relationships with erosion rate in black soil area of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (4): 44—50. [林艺, 李和平, 肖波. 东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (4): 44—50.]
- [67] Wang Y. Investigating the soil erosion rates on the cultivated slopes in the northeast black soil region of China using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements[D]. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 2010. [王禹. ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 复合示踪研究东北黑土区坡耕地土壤侵蚀速率[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.]
- [68] Yang X, Guo J F, Liu H H, et al. Soil wind erosion environment in black soil region in northeastern China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26 (4): 4443—4448. [杨新, 郭江峰, 刘洪鹤, 等. 东北典型黑土区土壤风蚀环境分析[J]. 地理科学, 2006, 26 (4): 4443—4448.]
- [69] Chi W F, Bai W K, Liu Z J, et al. Wind erosion in Inner Mongolia Plateau using the revised wind erosion equation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27 (6): 1024—1033. [迟文峰, 白文科, 刘正佳, 等. 基于 RWEQ 模型的内蒙古高原土壤风蚀研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27 (6): 1024—1033.]
- [70] Chen J L. Methods of constructing terrace in slope cropland[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 1965 (5): 19—20. [陈景岚. 坡耕地修土梯田的方法[J]. 辽宁农业科学, 1965 (5): 19—20.]
- [71] Xie J. Treatment and soil erosion status in the center of Heilongjiang Province[J]. Soils, 1990, 22 (3): 128—132. [谢军. 黑龙江省中部地区土壤侵蚀状况及其治理[J]. 土壤, 1990, 22 (3): 128—132.]
- [72] Zhao Y S, Wei Y X. Soil and water conservation effects of protective tillage measures on sloping farmland[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7 (3): 86—90. [赵雨森, 魏永霞. 坡耕地保护性耕作措施的水土保持效应[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7 (3): 86—90.]
- [73] Chen G, Fan H F, Chen H S, et al. Benefits of sediment reduction of soil conservation practices in the black region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4 (6): 13—17. [陈光, 范海峰, 陈浩生, 等. 东北黑土区水土保持措施减沙效益监测[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4 (6): 13—17.]
- [74] Wang Z R, Jia H, Wu X Q. Study on changes of black soil, fertility after application of farm manure[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 1989, 20 (1): 1—6. [王兆荣, 贾宏, 吴秀清. 培肥后的黑土肥力变化研究[J]. 东北农学院学报, 1989, 20 (1): 1—6.]
- [75] Wang Z R, Liu Y L, Hou Z T, et al. Location study of fertilizing effect in black soil I Changes in soil organic matter and organo—mineral complexes[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 1992, 23 (3): 215—219. [王兆荣, 刘永利, 侯中田, 等. 黑土培肥效果的定位研究 I 土壤有机质及有机无机复合胶体的变化[J]. 东北农学院学报, 1992, 23 (3): 215—219.]
- [76] Sun H D, Li J, Shang H X, et al. Location monitor of black soil fertility and fertilizer effect first report—effect of inorganic fertilizer and organic amendments on soil fertility and crop yield[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 1991, 16 (3): 42—45, 8. [孙宏德, 李军, 尚惠贤, 等. 黑土肥力和肥料效益定位监测研究 第 1 报. 有机无机肥配合施用的培肥增产效果[J]. 吉林农业科学, 1991, 16 (3): 42—45, 8.]
- [77] Zhang X Z, Gao H J, Peng C, et al. Variation trend of soil organic carbon, total nitrogen and the stability of maize yield in black soil under long-term organic fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25 (9): 1473—1481. [张秀芝, 高洪军, 彭畅, 等. 长期有机培肥黑土有机碳、全氮及玉米产量稳定性的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (9): 1473—1481.]
- [78] Liang Y. Effect of organic amendments application on dynamics, fractions and structural properties of soil organic matter in black soil[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agro-ecology, Chinese Academy of Sciences, 2012. [梁尧. 有机培肥对黑土有机质消长及其组分与结构的影响[D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2012.]
- [79] Han X Z, Wang S Y, Veneman P L M, et al. Change of organic carbon content and its fractions in black soil under long-term application of chemical fertilizers and recycled organic manure[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37 (7/8): 1127—1137.
- [80] Kang R F, Ren Y, Wu H J, et al. Changes in the nutrients and fertility of black soil over 26 years in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49 (11): 2113—2125. [康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49 (11): 2113—2125.]

- [81] Jiang Y, Li Q K, Wu S Q, et al. Effects organic manure application on soil fertility-organic manure application impacted renew and improvement of soil humus[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 1965(4): 59—64. [姜岩, 李庆昆, 吴素清, 等. 施用有机肥料对黑土的培肥作用——有机肥料对更新与改善土壤腐殖质“质的组成”的作用[J]. 吉林农业科学, 1965(4): 59—64.]
- [82] Wu J G, Ren J, Zhao X Y, et al. Morphology of humus in black soil as affected by fertilization method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 709—717. [吴景贵, 任军, 赵欣宇, 等. 不同培肥方式黑土腐殖质形态特征研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 709—717.]
- [83] Sun H D, Li J, Shang H X, et al. Location monitor of black soil fertility and fertilizer effect second report-effect of straw return in black soil[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 1992, 17(3): 40—42. [孙宏德, 李军, 尚惠贤, 等. 黑土肥力和肥料效益定位监测研究 第二报 黑土玉米秸秆还田效果的研究[J]. 吉林农业科学, 1992, 17(3): 40—42.]
- [84] Zhao D L, Wang Z B. Experience of improving albic soil in Hejiang zone in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1961(5): 54—57. [赵德林, 王政本. 黑龙江合江专区改造白浆土的经验[J]. 土壤通报, 1961(5): 54—57.]
- [85] Cui S J, Yao M, Liang J L, et al. Balance and enhance of soil organic matter in albic soil[J]. Soils and Fertilizers, 1989(1): 13—16. [崔顺吉, 姚敏, 梁嘉陵, 等. 白浆土土壤有机质变化规律及平衡提高措施的研究[J]. 土壤肥料, 1989(1): 13—16.]
- [86] Tian X P, Ji J H, Han X R. Effects of long-term application of fertilizers on the contents and oxidable stability of organic matter in albic soil[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2004, 16(2): 12—14. [田秀平, 姬景红, 韩晓日. 长期施肥对白浆土有机质含量及其氧化稳定性的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2004, 16(2): 12—14.]
- [87] Chen E F, Liu Q S, Qiu F Q, et al. Study of superiority of organic matter (II) Effects of organic matter application on soil fertility, microbiological activity and crop yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 1960(1): 3—14. [陈恩凤, 刘期松, 邱凤琼, 等. 有机肥料优越性的研究 (二) 施用有机肥料对土壤肥力、微生物活动、作物产量的作用[J]. 土壤学报, 1960(1): 3—14.]
- [88] Wu Z J, Zhang H J, Xu G S, et al. Effect of returning corn straw into soil on soil fertility[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5): 539—542. [武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 539—542.]
- [89] Whitbread A M, Blair G J, Lefroy R D B. Managing legume leys, residues and fertilisers to enhance the sustainability of wheat cropping systems in Australia: 1. The effects on wheat yields and nutrient balances[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 54(1/2): 63—75.
- [90] Qiu C, Han X Z, Lu X C, et al. Effects of maize straw incorporation on soil fertility and crop production in the black soil region of Northeast China[J]. Soils and Crops, 2020, 9(3): 277—286. [邱琛, 韩晓增, 陆欣春, 等. 东北黑土区玉米秸秆还田对土壤肥力及作物产量的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(3): 277—286.]
- [91] Cui X A, Chou J F, Dou S. Effects of long-time fertilization on crop yield and soil nutrients of dark brown earth[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2011, 33(5): 545—550. [崔喜安, 仇建飞, 窦森. 长期定位施肥对暗棕壤肥力和作物产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2011, 33(5): 545—550.]
- [92] Gao T B, Wang X J, Yu F Z, et al. Study on remediation of degenerated carbonate chernozem under inorganic fertilization combined with manure[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(5): 62—65. [高同彬, 王晓军, 于凤芝, 等. 有机无机肥配施对碳酸盐黑钙土的退化修复研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 62—65.]
- [93] Dou S. Effect of application of organic materials on improving soil fertility of chernozem[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1986, 8(4): 45—52, 109—110. [窦森. 有机物料对黑钙土的培肥作用[J]. 吉林农业大学学报, 1986, 8(4): 45—52, 109—110.]
- [94] Pan H L, Yu K W, Li H Z, et al. Efficacy of combining organic and chemical fertilizers in saline meadow rice soil[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2000, 31(2): 181—184. [潘贺玲, 于奎武, 李焕珍, 等. 有机无机肥配合施用对盐化草甸土的培肥效果[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(2): 181—184.]
- [95] Zou W X, Han X Z, Lu X C, et al. Effects of straw incorporated to different locations in soil profile on straw humification coefficient and maize yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 563—570. [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.]
- [96] Liu H X, Wang D L, Wang S Y, et al. Changes of crop yields and soil fertility under long term application of fertilizer and recycled nutrients in manure on a black soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 43—46. [刘鸿翔, 王德禄, 王守宇, 等. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力质量变化 I. 作物产量[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 43—46.]
- [97] You M Y, Han X Z, Chen X, et al. Effect of reduction of aggregate size on the priming effect in a Mollisol under different soil managements[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(4): 765—775.

- [98] Hao X X, Han X Z, Zou W X, et al. Changes in soil organic carbon and its fractions after 13 years of continuous straw return in a soybean—maize cropping system[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18 (6): 8267—8284.
- [99] Fan W, Wu J G, Li J M, et al. Effects of straw return on soil physico—chemical properties of chernozem in northeast China and maize yield therein[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (4): 835—846. [范围, 吴景贵, 李建明, 等. 秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (4): 835—846.]
- [100] Liang A Z, Yang X M, Zhang X P, et al. Changes in soil organic carbon stocks under 10-year conservation tillage on a Black soil in Northeast China[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2016, 154 (8): 1425—1436.
- [101] Li M, He P, Guo X L, et al. Fifteen-year no tillage of a Mollisol with residue retention indirectly affects topsoil bacterial community by altering soil properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104804.
- [102] Sun B J, Jia S X, Zhang X P, et al. Impact of tillage practices on microbial biomass carbon in top layer of black soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (1): 101—107. [孙冰洁, 贾淑霞, 张晓平, 等. 耕作方式对黑土表层土壤微生物生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26 (1): 101—107.]
- [103] Gao Y, Shao S, Zhang W, et al. Response of organic matter content and composition in black soil of northeast China to No-tillage straw mulching[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2020, 41 (1): 92—96. [高杨, 邵帅, 张威, 等. 东北黑土有机质含量和组分对免耕秸秆还田覆盖的响应[J]. *大连交通大学学报*, 2020, 41 (1): 92—96.]
- [104] Yang X M, Zhang X P, Fang H J, et al. Conservation tillage systems in North America and their significance for China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (2): 335—340. [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.]
- [105] Zhang H L, Gao W S, Chen F, et al. Prospects and present situation of conservation tillage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10 (1): 16—20. [张海林, 高旺盛, 陈阜, 等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10 (1): 16—20.]
- [106] He Q J, Hu Q H, Yang S Z. Experimental study of reduced tillage—Research report of no tillage and harrow[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 1982, 7 (1): 75—85. [何其镜, 胡庆浩, 杨士昭. 少耕法机械化的试验研究——原垄与耙耢播种试验报告[J]. *吉林农业科学*, 1982, 7 (1): 75—85.]
- [107] Jia S X, Liang A Z, Zhang S X, et al. Effect of tillage system on soil CO₂ flux, soil microbial community and maize (*Zea mays* L.) yield[J]. *Geoderma*, 2021, 384: 114813.
- [108] Zou W X, Han X Z, Lu X C, et al. Responses of soil organic matter and nutrients contents to corn stalk incorporated into different soil depths[J]. *Soils and Crops*, 2018, 7 (2): 139—147. [邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 玉米秸秆混合还田深度对土壤有机质及养分含量的影响[J]. *土壤与作物*, 2018, 7 (2): 139—147.]
- [109] Liu W R, Bian S F, Zheng J Y, et al. Preliminary report on the methods of maize stalks back to soil[J]. *Jilin Agricultural Sciences*, 2002, 27 (6): 38—40. [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.]
- [110] Chen Y, Liu S, Li H, et al. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115/116: 56—61.

(责任编辑: 檀满枝)