

黑土农田土壤有机碳演变研究进展*

高崇升 王建国

(中国科学院东北地理与农业生态研究所 中国科学院黑土区农业生态重点实验室 海伦农田生态系统
国家野外观测研究站 哈尔滨 150081)

摘 要 在我国,由于国家粮食安全的需要,关注黑土、研究黑土的人越来越多,尤其是黑土可持续利用及其与环境的关系已成为当今研究的热点问题。黑土研究领域中最活跃的部分是黑土农田土壤有机质(碳)的研究。基于此,本文依据有关文献资料,简述了我国黑土的分布、黑土开垦历史、农田土壤有机碳的演变及其在农业上的贡献,系统分析了国内外农田土壤碳研究的方法及其进展,指出了开展我国黑土农田土壤碳演变及其预测研究的现实意义及其潜在价值,建议未来应侧重黑土农田土壤有机碳的变化与调控方面的研究,即在黑土农田土壤有机碳的定向培育技术、指标体系和量化表征评估方法、预测模型等方面有所突破,最终形成黑土农田土壤有机碳保护和利用的理论和方法。

关键词 黑土 土壤有机碳 土壤有机质 演变

中图分类号: S158.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)06-1468-07

A review of researches on evolution of soil organic carbon in mollisols farmland

GAO Chong-Sheng, WANG Jian-Guo

(Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Chinese Academy of Sciences; National Observation Station of Hailun Agroecology System, Harbin 150081, China)

Abstract At present, more and more people in China are concerned with mollisols with the need of food safety and agricultural sustainability. The studies concerning Chinese mollisols has become a hot topic. Moreover, soil organic matter (carbon) of Chinese mollisols is the hottest issue for scholars. Therefore, this paper described mollisols distribution, reclamation history, organic carbon evolution and specific contribution to agriculture in China; systematically analyzed study methodologies of farmland soil organic carbon. The significance of researches on evolution and prediction of soil organic carbon for Chinese mollisols was discussed. Finally, future studies on soil organic matter (carbon) in mollisols were suggested. The review showed that future research should be focused on change and management of soil organic carbon in mollisols farmland to establish theory and method of protection and utilization of soil organic carbon, such as fertility control technology, evaluation method and prediction model.

Key words Mollisols, Soil organic carbon, Soil organic matter, Evolution

(Received Mar. 21, 2011; accepted Aug. 31, 2011)

1 我国黑土分布及其土壤碳的基本特征

全球而言,在欧亚大陆的中温带和寒温带地区,草原土壤大致成纬向分布于45°~55°N之间,约占全球非冰陆地面积的7%。多数草原土壤分布在温带,基于其表层土壤高有机质含量和盐基饱和的特点,在土壤分类上称之为软土^[1]。而黑土即为软土的一种。一般认为,世界上有三大片黑土:一是分布在乌克兰大平原,二是分布在北美洲密西西比河流域,

三是分布于我国松辽流域的东北黑土区。也有人认为世界上还有一片黑土在南美洲的阿根廷。

我国东北黑土区是重要的商品粮基地,素有“粮仓”之称,粮食商品率高达60%以上,为全国提供三分之一的商品粮,生产的大豆占全国总产量的50%以上,玉米占全国总产量的30%以上。

东北黑土区总面积 $703\times10^4\text{ hm}^2$,绝大部分分布在黑龙江和吉林两省(面积 $593\times10^4\text{ hm}^2$,其中耕地 $444\times10^4\text{ hm}^2$)。本区位于北纬43°~48°N、东经124°~

* 国家自然科学基金面上项目(31070399)资助

高崇升(1963~),男,汉族,研究方向为农业生态学。E-mail: csgao@neigae.hrb.ac.cn

收稿日期: 2011-03-21 接受日期: 2011-08-31

127°E 的范围内, 北起黑龙江省的嫩江县, 南至辽宁省的昌图县, 呈北宽南窄的带状分布, 南北长约 900 km, 东西宽约 300 km, 分布地形为起伏漫岗。本区年平均气温为 0.5~6.0 °C, 夏季温暖, 冬季严寒, 土壤冻结深, 时间长; 年降雨量 500~600 mm, 绝大部分集中在生长季(4~9 月), 干燥度 ≤ 1 。因此, 在上述气候条件下, 东北黑土区形成了以杂类草群落为主的草原化草甸植物(五花草塘)的原始植被, 覆盖度为 100%^[2-3]。本区开垦历史较短, 南部开垦 200 年左右, 而北部开垦只有 50 年左右, 中部开垦 100 年左右, 但垦殖指数较高^[4]。开垦后, 黑土物理、化学及生物学性状改变, 土壤有机物归还量相对较少, 黑土土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)水平下降。黑土区春季风大, 夏季降水集中, 致使风蚀、水蚀严重, 也加剧了黑土土壤质量的下降, 从而使生态环境受到了极大的威胁。对此, 土壤学、农学、环境学和生态学等相关学科的研究人员开展了大量的研究工作。开垦前, 黑土主要受自然条件影响, 原始植被生产力较高, 植物生物量全部归还土壤, SOC 含量较高, 但有关研究与报道不多。已有研究表明, 嫩江地区开垦前 SOC 含量在 33.0~44.1 g·kg⁻¹ 之间^[5-7], 克山-北安地区 SOC 含量在 45.0~74.2 g·kg⁻¹ 之间^[8-9]。就土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量而言, 黑龙江省黑土开垦前 SOM 含量可达 80~100 g·kg⁻¹, 甚至更高, 民谚称黑土区为“榛材岗, 艾蒿塘, 不上粪, 也打粮”的地方^[10]。黑龙江省的调查结果表明, 黑土 SOC 储量开垦 20 年减少 4.28%, 开垦 40 年减少 5.88%。

黑龙江省第 2 次土壤普查结果表明, 黑土耕层 SOM 含量在 25~65 g·kg⁻¹, 北部地区新垦的黑土耕地 SOM 含量可达 65 g·kg⁻¹, 而南部地区有的黑土老耕地 SOM 含量不足 30 g·kg⁻¹, 全省黑土 0~20 cm 耕层 SOM 含量平均为 43.2 g·kg⁻¹^[12]。吉林省第 2 次土壤普查结果表明, 黑土 SOM 含量一般在 20~30 g·kg⁻¹ 之间, 高的可达 40 g·kg⁻¹ 以上^[3]。黑土 SOC 在不同地区、开垦时间和黑土类型间存在显著差异, 大体上呈从北向南逐渐减低的趋势。一些水土流失严重的地区, SOC 甚至更低。草地开垦为农田后, 加快了 SOC 的分解, 耕作对 SOC 的另一重要影响就是加剧了土壤侵蚀。由于黑土区多为波状起伏的漫岗, 加之耕作管理不善, 水土流失已比较严重, 尤其一些坡耕地黑土层每年减少可达 0.4~0.5 cm, 黑土层由开垦初期的 60~70 cm 减少到 20~30 cm, 土壤侵蚀已成为黑土 SOC 含量下降的重要原因。目前东北黑土水土流失面积占黑土区总面积的 37.9%, 主要发生在坡耕地, 不同强度的土壤侵蚀将使黑土层变薄, 逐渐发展为黑黄土、破皮黄黑土, 最后心土裸露, 成为露黄土,

因此土壤侵蚀能够导致土壤有机碳的大量损失。

农田生态系统土壤 SOC 含量不仅是决定土壤肥力的关键因素, 而且还与全球碳循环密切相关。土地利用和肥料管理方式的改变是土壤碳库变化及大气-土壤系统碳循环与碳收支平衡的重要影响因子。因此, 开展黑土农田土壤碳演变及其预测研究, 对于改善黑土农田生态系统管理方式, 提高系统可持续生产能力, 增强黑土农田生态系统的碳固定功能, 缓解大气 CO₂ 浓度升高和全球变暖具有重要作用。

2 农田土壤有机碳演变研究及其进展

农业利用下土壤有机碳库的演变一直是农业与全球变化关系的重要研究内容。从我国农业发展的历史和国家土壤肥力长期监测网络的试验资料可以充分认识到, 粮食生产的基础是耕地, 根本是地力, 关键是有有机质(碳)。因此, 农业经营方式所带来的对陆地生态系统土壤碳库的影响一直受到国内外科学界的关注, 这一领域的科学问题已成为当前研究的热点^[11-12]。

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库。全球 1 m 深土层 SOC 贮量约是陆地植被碳贮量的 3 倍, 是大气碳贮量的 2 倍^[13]。每年通过陆地生物圈周转的碳约 60 Gt, 土壤对大气 CO₂ 年通量的贡献是燃烧化石燃料贡献量的 10 倍^[14], 因此, 土壤有机碳库较小幅度的变化就可能导致大气中 CO₂ 浓度较大的波动。SOC 是反映土壤质量或土壤健康的一个重要指标, 直接影响土壤肥力和作物产量的高低^[15]。因此, 增加土壤有机碳库储量对减缓温室效应、增加作物产量和促进农业可持续发展具有重要的作用和意义。

国内外对农田 SOC 及其演变研究主要侧重两个方面。一方面, SOC 是陆地生态系统重要的碳库, 是大气中 CO₂ 巨大的源或汇, 对全球碳素循环的平衡起着重要作用, 所以从国际外交层面而言, 目前农业土壤碳汇潜力及其技术条件研究已成为国际环境谈判的筹码。另一方面, SOC 是土壤有机质的重要组成部分, 在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面均起着极其重要的作用, 即 SOC 影响着土壤的物理、化学及生物学性质, 同时也是土壤质量的一个关键属性, 有些学者甚至建议将其作为土壤质量和土壤生产力的最重要的单一指示物^[16]。因此, 就如何提高 SOC 水平, 培育和提高耕地生产力将成为另一研究重点。

目前在农田 SOC 及其演变研究过程中, 对农田 SOC 含量提高的机制已经有了比较一致的认识。SOC 含量及其动态主要取决于土壤中有机质(作物残茬等)的输入与降解之间的平衡, 大部分农田 SOC 含量与有机质输入呈线性相关。在人类耕种、施肥、

灌溉等管理活动影响下, 农业土壤碳库的质和量迅速变化。这种变化改变了土壤肥力及作物产量。土壤耕层的碳主要以有机物形式存在。农作物收割后, 根和枯枝败叶回归土壤, 并被微生物分解和同化; 这些土壤微生物死亡后, 转化为多种组分的腐殖质, 其中活性部分的腐殖质可进一步被微生物利用和分解, 直至最后变成比较稳定的惰性腐殖质。农业生态系统的碳循环比较复杂, 主要包括: 有机碳在作物体内的分配、饲养堆腐过程中的碳循环、有机残体在土壤中的分解过程和土壤微生物体碳的循环周转等, 这些过程直接关系到农业生态系统中可进入土壤碳库的有机碳资源。土壤有机碳库的消长和更新以及土壤作为有机碳的储存库在改善土壤肥力方面起着重要作用^[17]。

自有人类历史以来, 人类对农业的介入包括清除地上植被、开垦草地、耕种、以一年生农作物代替多年生植被以及施肥等活动, 这些都会影响土壤碳库的演变。研究表明, 自然植被下(森林、草地)的生态系统转变为农田生态系统后, 农业管理措施产生的扰动加速了SOC的分解, 导致SOC含量下降。在开垦后的最初几年, SOC下降非常快, 然后逐渐变慢, 最后达到一个新的稳定状态。例如, 由草地或森林生态系统转变成为农田生态系统后 50~100 年, SOC水平要比最初低 50%~60%^[18]。Houghton 等^[19]估算了 1850~1980 年 130 年间由于开垦导致的温带 SOC 含量下降, 而且发现在一些粮食生产压力较大的地区, 由于侵蚀和养分损失导致土地退化。相反, 如果投入足够的能量和技术支持, 如选用高产作物品种、施肥、灌溉、加强残茬管理和减少耕作等, 能够减少 SOC 损失, 提高管理区域的 SOC 含量, 可以使土壤碳库增加。这些措施在美国已经显现了明显的效果, 估计 20 世纪 80 年代其农田 SOC 每年增加 0.14 PgC。IPCC 估算, 通过适当的农业管理措施, 每年能使土壤碳库提高 0.4~0.9 PgC, 持续 50 年, 土壤碳库累积增加 24~43 PgC。改进能源效率和利用农作物进行能源生产, 50 年内农田土壤可以累积增加 16~68 PgC。在假定的理想土壤管理措施下, 温带现存耕地的 SOC 升高水平可达 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 这一升高水平相当于这些土壤的 SOC 升高 10%^[20]。所以农业管理措施是 SOC 演变过程中最重要的驱动因子。

我国过去对农业土壤碳进行了长期研究, 但目标是提高土壤肥力, 很少把土壤碳循环与全球变化联系起来。近年来, 土壤碳储量与大气温室效应关系已经受到土壤学家的关注, 不足的是研究工作仅局限于不同生态系统中 SOC 储量的调查和统计理论

方法研究, 忽视了对影响 SOC 储量的农业管理措施和自然因素的研究。而后者是探索提高 SOC 储量和土壤肥力以维持农业可持续发展的关键^[21-22]。

我国的相关研究结果表明, 农田 SOC 演变在很大程度上受诸如耕作、轮作、施肥等农业措施的影响, 其中施肥的影响最大。施肥主要通过两条途径影响 SOC 演变: 一是提高农作物生物产量, 增加土壤中残茬和根的输入; 二是影响土壤微生物的数量和活性, 进而影响 SOC 生物降解过程^[23]。王胜佳等^[24]对多熟制稻田有机质平衡的长期定位研究结果表明, 在 26 年连续施用有机肥过程中, SOC 含量处于持续上升之中, 但后期增长缓慢, 增长速率趋于平稳; 同时, 土壤易氧化有机质和活性有机质数量大幅度提高, 说明 SOC 的代谢强度和养分供应能力有了很大提高。沈宏与曹志洪^[25]研究了长期施肥对农田土壤碳库的影响, 发现长期施用有机肥和有机无机肥配合施用后, SOM、微生物量碳、易氧化碳、可矿化碳含量均明显升高。李忠佩等^[26]进行的田间模拟不同农业施肥制度试验结果表明, 施磷肥以及在此基础上有机物质还田可以明显增加系统有机质的输入量以及养分回田量, 致使 SOM 形成量大于矿化量, 有机质积累速度加快, 有机物质循环再利用, 可在 3 年内提高 SOM 含量 $4\sim 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。王旭东等^[27]的研究结果表明, 21 年不施肥导致 SOM 下降 $1.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 单施化肥基本可以维持 SOM 水平, 而有机肥的施用可明显提高 SOM 含量。同时有机肥的施用使 SOM 的氧化稳定性降低^[28]。李海波等^[29]认为, 长期施肥影响碳、氮在土壤及其各分室内的分布和动态变化。农田不施肥, 有机质显著下降; 单施化肥或高量化肥可使有机碳、氮库保持稳定或小幅波动; 化肥和有机肥配合施用则能提高有机质含量, 改善土壤质量, 提高土壤肥力, 保持土地可持续利用。

从以上可以看出, 多数研究侧重不同施肥制度对 SOC 演变的影响, 而将 SOC 演变并对其预测结合起来进行分析与研究的不多。

3 土壤有机碳演变研究方法及其进展

起初, 人们对 SOC 动态变化只进行简单的定性或量化的描述^[25], 近 20 年来, 随着计算机的普及应用, 土壤科学工作者结合长期定位试验, 成功地应用模型对 SOC 的变化动态进行了预测^[30]。有学者认为, 没有数学或数学模型, 对生物地球化学循环的理解只能局限于定性的理解, 而应用数学或数学模型则使这种理解由定性理解上升为定量理解的水平; 同时, 这些模型还可与全球变化研究相联系, 定量的理解生物

地球化学循环在地球的过去和未来中的作用^[1]。

运用计算机技术建立农田 SOC 动态模型对于合理施肥培肥、提高耕地质量、促进农业的可持续发展具有重要的现实意义。利用有效的试验数据, 对所建模型进行检验是模型研究过程中的重要环节, 并应用所建模型对农田 SOC 动态进行预测和科学管理是模型研究的主要目的之一^[31]。

世界上应用的模型有几十个用于模拟 SOC 动态变化、估算 SOC 储量及土壤碳排放, 对于揭示 SOC 动态变化机理、明确剩余的陆地碳汇和研究陆地生态系统碳循环具有重要的意义。

其中, 比较有影响力的模型有: CANDY (Carbon-Nitrogen-Dynamics)模型, 是一个多模型模块系统, 同时也是模型参数测量值、初始值、天气和土壤管理数据的数据库系统; DNDC(DeNitrification and DeComposition)模型, 主要用于预测土壤环境对农田土壤中反硝化过程和分解过程 CO_2 、 N_2O 、 NO 释放的影响; NCSOIL 模型主要模拟土壤微生物和有机组分的氮、碳流量。

在众多模型中, ROTHC 模型和 CENTURY 模型——尤其是 CENTURY 模型, 是以模拟土壤有机质积累分解为主的比较有影响的模型, 因其兼顾模拟环境因子、农业管理措施等 SOM 的多重影响因素, 所以在欧美等国家被广泛应用。

ROTHC 模型是依据著名的英国洛桑实验站的大量长期田间试验数据, 由 Jenkinson 与 Rayner(1977)建立的。该模型包括 5 个分室: 易分解植物残体(decomposable plant material, DPM)、难分解植物残体(resistant plant material, RPM)、微生物量(microbial biomass, BIO)、物理稳定性有机质(physically stabilized organic matter, POM)、化学稳定性有机质(chemically stabilized organic matter, COM)。杨学明等^[32]曾利用 ROTHC 模型对黑土区南部的玉米连作长期定位试验进行了模拟与预测, 获得了比较理想的结果。

CENTURY 模型是美国科罗拉多州立大学 Parton 等建立的, 起初用于模拟草地生态系统的碳、氮、磷、硫等元素的长期演变过程, 后加以改进, 其应用扩展到稀树草原、森林、农业等生态系统中^[33]。CENTURY 模型基于土壤结构, 综合考虑到降水、气温等气候驱动因子, 模拟植被、枯落物及 SOM 各库之间和库内的碳、氮、磷、硫养分循环, 常被用于草地、森林、农田等生态系统下 SOM 的原始积累和人为扰动下的 SOM 动态研究。CENTURY 模型包括土壤有机质、土壤水分和植物生产力亚模型。该模型是一种用来研究化学物质从环境到生物然后再回到环境的生物地球化学循环过程的生物地球化学模

型, 是生态系统物质循环的一种重要研究方法, 往往可以纠正和弥补野外观测和室内试验等方法产生的漏洞和局限性^[34]。同时, 该模型还是一种过程模型, 可以将生物地球化学循环的全过程或多个过程综合考虑, 并建立它们之间的联系, 形成一系列模型的集合^[35]。当然, 与其他模型一样, CENTURY 模型既有其自身的优势, 也有其不足, 例如, SOM 子模型与其他子模型相关联, 虽然增加了该模型对不同条件的适应性, 但同时也增加了复杂性^[36-37]。图 1 显示了 CENTURY 模型 SOM 子模型的基本结构^[33]。

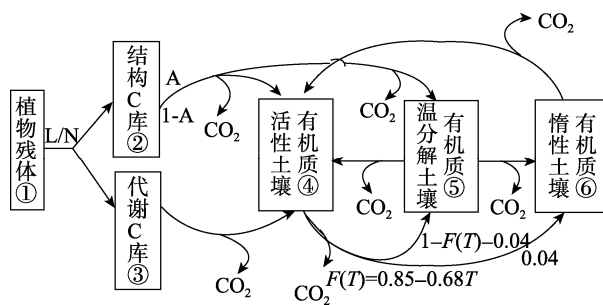


图 1 CENTURY 土壤有机质子模型结构简图

Fig. 1 Structure map of SOM sub-model in CENTURY Model
① Plant residue, ② Structural C, ③ Metabolic C, ④ Active soil C, ⑤ Slow soil C, ⑥ Passive soil C.

从图 1 可以看出, CENTURY 模型以多分室的建模思想为指导, 将 SOM 划分为 3 个部分: 活性 SOM(active SOM), 包括活的微生物及微生物产物, 周转时间为 1~5 年, 全部活性有机质库大约是活微生物生物量的 2~3 倍; 慢分解 SOM(slow SOM), 包括难分解的有机物和土壤固定的微生物产物, 周转时间在 20~40 年, 或者更长些; 惰性 SOM(passive SOM), 极难分解, 周转时间长达 200~1500 年, 甚至更长。前 3 个库是与矿质土壤共存的有机质库, 还有 3 个库则是矿质土层之上的纯有机质库: 地表凋落残体库, 包括枯死生物量和动物粪便; 地下凋落残体库, 包括死亡根系、动物残体及其代谢产物; 地表微生物碳库。凋落物残体碳库又可分为不易分解的、周转时间在 1~5 年的结构库(structural pool)和易分解的、周转时间在 0.1~1 年的代谢库(metabolic pool)。

CENTURY 模型结构相对复杂, 同时也有一定规律可循。在计算有机质的分解和积累过程中, 既充分考虑了碳素的输入输出, 又侧重了微生物在碳转化的作用, 同时也将对其影响较大的环境因素纳入模型, 显著地增强了其应用的空间范围和生态种类。

CENTURY 模型与 ROTHC 模型比较, 可以成功地模拟农田土壤中有机质的转化及营养元素的循

环。Kelly 等^[38]利用 CENTURY 模型成功地预测美国一块黑土长期定位试验地的土壤碳动态,认为该模型是对生态系统研究尤其是对土壤碳动态研究非常有用的工具。Montreal^[39]利用 CENTURY 模型对加拿大连作小麦长期定位试验 SOC 和土壤有机氮(soil organic nitrogen, SON)数十年的变化进行了模拟,得出变化量在 10%以内,土壤管理措施和侵蚀影响土壤碳达到新的平衡状态所需要的时间。Parton 等^[40]利用 CENTURY 模型用于模拟美国俄勒冈州的一块小麦-休闲-秸秆还田的轮作长期试验田的 SOC 演变时,其模拟值与实测值具有极高的相关性。Schwenke^[41]利用 CENTURY 模型对澳大利亚昆士兰州的维帕(Weipa)在目前和恢复性管理措施下土壤碳氮的长期演变趋势进行了预测,结果表明:100 年后,土壤碳达到新的平衡状态,含量占 47%的惰性碳在此期间几乎不发生变化,大部分增加的土壤碳发生在慢性有机质部分,尽管土壤碳的活性部分发生了大量变化,但在 50 年后达到了平衡。Smith 等^[42]利用世界上 7 个地点长期定位试验的数据对 CENTURY 模型进行了检验,结果表明:该模型可以模拟所有农林生态系统 SOC 的变化。需要指出的是,纵观国外的研究结果,利用 CENTURY 模型较精确地对土壤碳进行预测,都是与长期定位试验相结合。

我国 CENTURY 模型应用于农林生态系统要晚于国外,多集中在 21 世纪初。黄忠良^[43]运用 CENTURY 模型模拟管理措施对鼎湖山森林土壤碳氮的影响,结果证明,CENTURY 模型可用于森林土壤碳氮演替的模拟;Jiang 等^[44]利用 CENTURY 模型模拟我国大兴安岭地区 3 处代表性的针叶林生态系统,发现 CENTURY 模型可以模拟针叶林生态系统的碳变化趋势,并据此提出了相应的管理策略;蒋延玲等^[45]利用 CENTURY 模型对兴安落叶林不同管理条件下的碳的动态变化进行了模拟,也获得了比较理想的结果;申卫军等^[46]利用 CENTURY 模型对南亚热带鹤山 3 种主要人工林生态系统碳氮的演变进行了模拟,模拟结果基本准确地反映了 3 种主要人工林生态系统碳、氮积累的动态行为,获得了良好的拟合效果;高鲁鹏等^[47-48]利用 CENTURY 模型对黑土有机碳的动态变化进行了预测,模型模拟结果与已发表的实测结果比较接近,可以为进一步研究开垦后黑土有机碳变化提供依据。

4 黑土碳演变的研究进展

黑土农田方面的研究主要分为以下几个阶段:

20 世纪 50 年代,以宋达泉、曾昭顺、邱凤琼等先生为代表的科学家们研究了黑土的理化特征,揭

示了黑土的一些重要特性,为后人研究黑土奠定了理论基础^[8,49]。

20 世纪 60~70 年代,以曾昭顺、沈善敏等先生为代表的科学家们研究了黑土养分有效性与水分有效性问题,探讨了黑土开垦后土壤团聚体水稳性变化的一般规律及其对于作物养分供应的影响,就黑土区的主要作物如小麦、大豆、玉米等的自然水分供给能力、春季干旱对作物生长的影响和危害机制及其对策等给予了科学的回答,对指导当时的粮食生产起到了一定的推动作用^[50-51]。

20 世纪 80 年代后,以黑龙江省农业科学院的李庆民先生、吉林省农业科学院孙宏德先生等为代表的科研人员重点研究了黑土培肥的途径与措施,与生产实际联系紧密,侧重于应用研究^[52-54]。

20 世纪 80 年代中期至 90 年代,以中国科学院海伦农业生态实验站科研人员代表的研究者通过一系列长期定位试验,系统地开展了黑土养分、水分变化规律和特征及提高利用效率的途径等基础应用研究,同时对施肥与 SOM 的关系等进行了有益的探索,进一步丰富了黑土研究的内涵^[10,55-67]。在黑土 SOC 研究上,比较典型的是:刘鸿翔等^[55,57-58]采用模拟养分循环开展长期定位试验的方法,先是对黑土区不同养分循环结构农业经营制度进行了比较研究,继而通过作物产量指标,进行 13 年中长期田间试验,随后通过养分指标,计算了 1985~1999 年试验期间各模拟施肥模型的作物移出养分量 and 施肥输入养分量,结果表明:有机-无机相结合的农业制度包括传统农业与“石油农业”两者之长,是黑土农田 SOC 得以维持或提高、进而保证土地生产力的的优选农业制度。

本世纪以来,更多的学者注重了黑土 SOC 的研究。为探讨 SOC 与其他养分之间的关系,赵丽娟等^[65]针对北部中厚黑土,进一步研究了典型黑土长期施肥及养分再循环的 SOC 组分的变化,认为无肥、单纯施氮肥或磷肥和原始的有机循环农业不能保持黑土 SOC, SOC 呈下降趋势,而合理化肥施肥与化肥加有机肥模式使黑土 SOC 保持稳定或略有增加;李海波等^[29]在同一地点,通过另一长期定位试验,发现施肥影响碳、氮在土壤及其各分室内的分布和动态变化,即农田不施肥,黑土 SOC 显著下降,而化肥和有机肥配合施用则能提高黑土 SOC 含量,改善土壤质量,提高土壤肥力,保持土地可持续利用。在宏观研究上,汪景宽等^[68]通过大量样品和数据采集,分析了最近 20 年来东北典型黑土地区土壤肥力质量主要指标——pH、有机质、速效磷、速效钾和黏

粒的变化情况,认为该地区整体上 SOC 呈下降趋势,土壤肥力质量明显降低。此外,王洋等^[69-70]针对南部薄层黑土进行了培肥措施与肥力评价等方面的研究,结果表明:该土壤保肥、耐肥性能好,但土壤肥力严重退化,因此,在施肥上应遵循增施有机肥,增氮、控磷、保钾,配合施用中微量元素的原则,保持黑土的持续生产能力;应用秸秆腐解剂可快速堆腐秸秆,黑土农田施用充分腐熟的秸秆肥配施氮、磷、钾化肥,耕层土壤平均年提高 SOC $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

然而,针对黑土土壤碳演变及其预测研究则不多。高鲁鹏等^[47-48]曾利用 CENTURY 模型对黑土 SOC 的动态变化进行了预测,模型模拟结果与已发表的实测结果比较接近,具有一定的参考价值。尽管其选择的黑土区的地点具有一定代表性,但在各个地点获取的数据连续性不够、且均衡性较差,从而影响了预测的确定性,所以进一步加强此方面的研究就显得十分必要。

5 展望

进入 21 世纪以来,随着商品粮基地建设与国家粮食安全的需要,关注黑土、研究黑土的人越来越多,尤其是黑土可持续利用及其与环境的关系已成为当今研究的热点问题。因此,开展黑土农田土壤碳演变及其预测的研究,具有以下潜在的应用价值:

(1)预测黑土农田土壤有机碳的变化。根据当地气候、土壤条件及农作方式(包括土地利用方式和有机肥施用等),预测若干年内土壤有机碳含量变化,并估算出同期内 CO_2 排放量,这对研究农田土壤有机碳分解对气候变化的响应具有重要意义。

(2)指导农田土壤的保育。对于黑土来讲,要使其有机碳含量在某个时段内(如 20 年、30 年等)维持或提高至某一水平,通过预测则可计算出需要施加多少有机物料方可实现给定目标。

(3)预测中国东北平地黑土在不同情境下的长期发展趋势,以此作为科学管理依据。

(4)回答“东北黑土会消失吗?”、“多少年会消失”等社会关心的问题。

综上,今后应侧重黑土农田 SOC 变化与调控方面的研究,如黑土农田 SOC 的时空变异、数量的保持与定向培育,评估和监控黑土农田 SOC 的指标体系和量化表征理论,黑土农田 SOC 动态数据库和时空分异的预测模型,黑土农田 SOC 保护和利用的理论和方法,等等。

参考文献

[1] 韩兴国,程维信. 养分的生物地球化学循环[M]//刘建国.

- 当代生态学博论. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 73-100
- [2] 何万云. 黑龙江土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992: 149-179
- [3] 姜岩. 吉林土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 145-164
- [4] 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
- [5] 丁瑞兴, 王兆荣. 黑土和白浆土的腐殖质组成与性质[J]. 东北农学院学报, 1963(3): 35-37
- [6] 党连超. 东北黑土的农化性状及其变化[M]//中国科学院林业土壤研究所[M]. 土壤肥力研究文集. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1984: 61-66
- [7] 高子勤. 土壤有机质在黑土有机无机复合体中的状态的研究[M]//中国科学院林业土壤研究所. 土壤肥力研究文集. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1984: 17-27
- [8] 邱凤琼, 周礼恺, 陈恩凤, 等. 东北黑土有机质和酶活性与土壤肥力的关系[J]. 土壤学报, 1981, 18(3): 244-254
- [9] 王明珠, 赵其国, 熊国炎, 等. 黑土的肥力特性及其演变[J]. 土壤, 1979, 10(6): 137-144
- [10] 王建国. 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
- [11] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-392
- [12] 赵生才. 我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势——第 236 次香山科学会议侧记[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 5-15
- [13] Lal R. Soil processes and greenhouse effect[M]//Lal R. Methods for assessment of soil degradation. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998: 119-212
- [14] Schlesinger W H. An overview of the carbon cycle[M]//Lal R, Kimble J M, Levine E. Soil and global change. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995: 9-25
- [15] Doran J W, Jones A J, Arshad M A, et al. Determinants of soil quality and health[M]//Lal R. Soil quality and soil erosion. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1999: 17-36
- [16] Johnston A. Soil fertility and soil organic matter[M]//Wilson W. Advances in soil organic matter research: The impact on agriculture and the environment. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1991: 299-314
- [17] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998
- [18] Cole C V, Flach K, Lee J. Agricultural sources and sinks of carbon[J]. Water Air and Soil Pollution, 1993, 70: 111-122
- [19] Houghton R, Hackler L, Lawrence K. The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change[J]. Science, 1999, 285: 574-478
- [20] IPCC. Climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- [21] 曲建升, 孙成权, 张志强, 等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 980-987
- [22] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 土壤, 2000, 32(1): 11-17
- [23] 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]. 土壤学报, 2003, 40(2): 246-251
- [24] 王胜佳, 陈义, 李实焯. 多熟制稻田土壤有机质平衡的定位研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 9-15
- [25] 沈宏, 曹志洪. 温室气体及其生态效应[J]. 生态农业研究, 1998, 6(3): 21-24
- [26] 李忠佩, 唐永良, 石华, 等. 不同轮作措施下瘠薄红壤中碳氮累积特征[J]. 中国农业科学, 2002, 35(10): 1236-1242
- [27] 王旭东, 张一平, 吕家珑. 不同施肥条件对土壤有机质及

- 胡敏酸特性的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 1-9
- [28] Jenkinson D, Johnston A. Soil organic matter in the Hoosfield continuous barley experiment[J]. Rothamsted Experiment Station Report for 1976, 1977, Part 2: 87-101
- [29] 李海波, 韩晓增, 王凤. 长期施肥条件下土壤碳氮循环过程研究进展[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 384-388
- [30] Parton W, Ojima D, Schimel D. Models to evaluate soil organic matter storage and dynamics[M]//Carter M, Stewart B. Structure and organic matter storage in agricultural soils. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1996: 421-448
- [31] 刘世梁, 黄耀, 沈其荣, 等. 农田土壤有机碳动态模拟模型的检验与应用[J]. 中国农业科学, 2001, 31(6): 644-648
- [32] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 用 RothC-26.3 模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(71): 1318-1324
- [33] Parton W, Schimel D, Cole C. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1173-1179
- [34] 韩兴国, 李凌浩, 黄建辉. 生物地球化学概论[M]. 北京: 高等教育出版社; 海德堡: 施普林格出版社, 1999: 293-303, 72-75
- [35] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 等. 陆地生物地球化学模型的应用与发展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1703-1706
- [36] Yang L, Pan J. Dynamics models of soil organic carbon [J]. Journal of Forestry Research, 2003, 14(4): 323-330
- [37] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 等. 土壤有机质模型比较分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1804-1808
- [38] Kelly R, Parton W, Crocker G. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the Century Model[J]. Geoderma, 1997, 81: 75-90
- [39] Montreal C. An analysis of soil organic matter dynamics in relation to management, erosion and yield of wheat in long-term crop rotation plots[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1997, 77(4): 186-192
- [40] Parton W, Rasmussen P. Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY Model simulations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 530-536
- [41] Schwenke G. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa: III. Simulated long-term soil organic matter development[J]. Australian Journal of Soil Research, Special Issue: Soil Research for Mine Reclamation, 1998, 38(2): 47-53
- [42] Smith P, Smith J, Powlson D. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments[J]. Geoderma, 1997, 81: 153-225
- [43] 黄忠良. 运用 Century 模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 175-179
- [44] Jiang H, Michael J, Peng C. Modeling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169(1/2): 65-82
- [45] 蒋延玲, 周广胜. 兴安落叶松林碳平衡及管理活动影响研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 317-322
- [46] 申卫军, 彭少麟, 邱建国, 等. 南亚热带鹤山主要人工林生态系统 C、N 累积及分配格局的模拟研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 690-699
- [47] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 等. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化. I. 自然状态下土壤有机碳的积累[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 772-776
- [48] 高鲁鹏, 梁文举, 赵军, 等. 气候变化对黑土有机碳库影响模拟研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(2): 288-291
- [49] 宋达泉, 曾照顺. 黑龙江流域的土壤特征与东部地区农业发展远景[C]. 黑龙江流域综合考察学术报告(第2集). 1959
- [50] 沈善敏, 乔樵, 丁庆堂, 等. 东北北部黑土水分状况之研究. III. 黑土农业水分保证评价及春旱预测预报[J]. 土壤学报, 1980, 17(3): 203-215
- [51] 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(2): 32-34
- [52] 李庆民, 尹达龙. 高产黑土的培育措施及其效果[J]. 土壤通报, 1979(4): 39-40
- [53] 李庆民, 肖仲纯. 有机物质培肥黑土效果及其后效[J]. 土壤肥料, 1990(3): 11-13
- [54] 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(3): 41-45
- [55] 刘鸿翔, 王德禄, 张素君, 等. 松嫩平原黑土区不同养分循环结构农业经营制度比较研究[J]. 应用生态学报, 1994, 5(2): 148-151
- [56] 刘鸿翔, 王德禄, 王守宇, 等. 施肥制度改革对粮食生产发展贡献[J]. 农业系统科学与综合研究, 2000, 16(4): 260-262
- [57] 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
- [58] 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. III. 土壤养分收支[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1410-1412
- [59] 孟凯, 张兴义. 东北黑土区作物水分利用效率的研究[J]. 生态农业研究, 1999, 7(2): 32-35
- [60] 孟凯, 张兴义, 隋跃宇. 农田黑土水分调节能力分析[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 46-48
- [61] 孟凯, 张兴义, 隋跃宇, 等. 黑土农田水肥条件对作物产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 119-121
- [62] Liu X, Han X, Song C, et al. Soil organic carbon dynamics in black soils of China under different agricultural management systems[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 34: 973-984
- [63] Xing B, Liu X, Liu J, et al. Physical and chemical characteristics of a typical mollisol in China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35: 839-850
- [64] 隋跃宇, 张兴义, 焦晓光, 等. 长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 190-192
- [65] 赵丽娟, 韩晓增, 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变化. IV. 有机碳组分的变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 817-821
- [66] 王凤, 王树起, 韩晓增, 等. 不同植被覆盖类型黑土水分动态变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 256-260
- [67] 邹文秀, 韩晓增, 王守宇, 等. 干旱条件下黑土农田水分特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 677-680
- [68] 汪景宽, 李双异, 张旭东, 等. 20 年来东北典型黑土地地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 19-24
- [69] 王洋, 齐晓宁, 王其纯. 施用秸秆堆腐肥对黑土农田养分及玉米产量的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 132-134
- [70] 王洋, 齐晓宁. 德惠市农田黑土肥力评价及施肥措施研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 26-28