



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 赵建宁, 刘红梅, 谭炳昌, 王慧, 王明亮, 黄进, 张小福

引用本文:

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 等. 农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 340–352.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0329>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展

沈晓琳, 王丽丽, 汪洋, 王明亮, 杨殿林, 赵建宁, 李刚, 轩清霞, 王亮

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 361–370 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0496>

长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征

高洪军, 张卫建, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 422–430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0103>

覆盖作物不同利用方式对猕猴桃园土壤微生物群落结构的影响

李青梅, 张玲玲, 赵建宁, 张艳军, 刘红梅, 王华玲, 王慧, 杨殿林, 张凡, 翁昌明

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 319–325 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0627>

不同植物种植对矿区复垦土壤微生物多样性的影响

张变华, 靳东升, 张强, 郇春花, 李建华, 籍晟煜

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 355–360 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0304>

茶园多植物覆盖种植对土壤酶活性和有机碳矿化特征的影响

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 沈晓琳, 赵建宁, 王慧, 黄进, 张小福

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 371–380 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0605>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

汪 洋, 杨殿林, 王丽丽, 等. 农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 340–352.
WANG Yang, YANG Dian-lin, WANG Li-li, et al. Effects of farmland management measures on soil organic carbon turnover and microorganisms[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 340–352.



开放科学 OSID

农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响

汪 洋^{1,2}, 杨殿林^{1,2}, 王丽丽^{1,2*}, 赵建宁^{1,2}, 刘红梅^{1,2}, 谭炳昌^{1,2}, 王 慧^{1,2},
王明亮^{1,3}, 黄 进⁴, 张小福⁵

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业农村部产地环境污染防治重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191; 3. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384; 4. 十堰市农业科学院果茶研究所, 湖北 十堰, 442000; 5. 十堰市经济作物研究所, 湖北 十堰, 442714)

摘 要: 农田管理措施对农田生态系统碳循环影响显著, 进而制约土壤肥力、农业生产及粮食安全, 影响气候变化和环境健康。本文综述了不同农田管理措施(施肥方式、种植制度、耕作模式)对农田土壤有机碳、含碳温室气体排放和土壤微生物的影响。发现有机肥与无机肥配施情景下土壤有机碳增速最快, 且施肥量与土壤碳库存在阈值效应; 有机肥的施用增加了土壤中 CO₂ 排放通量, 磷、钾两种肥料的施用与施用氮肥相比更能降低农田土壤排放温室气体产生的全球增温潜势; 提高有机肥和磷肥的施用比例有利于土壤中微生物丰富度的提高和微生物量碳的积累。种植结构和种植密度均会影响农田土壤的碳储量, 种植结构对农田生态系统温室气体排放影响显著, 轮作和间作的种植模式与传统单一作物种植相比可有效减少农田含碳温室气体的排放, 同时, 轮作与连作相比更有利于土壤微生物多样性的增加。保护性耕作措施有利于农田土壤固碳效率的提高, 可降低农田温室气体的排放, 且对微生物活性、多样性、群落结构以及碳源利用情况均有积极影响。最后总结了国际主流碳模型在农田生态系统的应用概况, 并提出了未来发展展望。

关键词: 农田管理措施; 土壤碳储量; 含碳温室气体; 土壤微生物; 模型

中图分类号: S153.6; S154.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2020)03-0340-13 doi: 10.13254/j.jare.2018.0329

Effects of farmland management measures on soil organic carbon turnover and microorganisms

WANG Yang^{1,2}, YANG Dian-lin^{1,2}, WANG Li-li^{1,2*}, ZHAO Jian-ning^{1,2}, LIU Hong-mei^{1,2}, TAN Bing-chang^{1,2}, WANG Hui^{1,2},
WANG Ming-liang^{1,3}, HUANG Jin⁴, ZHANG Xiao-fu⁵

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Key Laboratory of Origin Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Agro-product Safety, Tianjin 300191, China; 3. College of Agronomy & Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 4. Tea Research Institute, Shiyan Academy of Agricultural Sciences, Shiyan 442000, China; 5. Economic Crop Research Institute of Shiyan City, Shiyan 442714, China)

Abstract: Farmland management measures can have a significant impact on the carbon cycle of farmland ecosystems, which can affect soil fertility, agricultural production, and food security, and more broadly, climate change and environmental health. In this paper, the effects of different farmland management measures (fertilization methods, planting systems, and farming models) on soil organic carbon, greenhouse gas emissions, and soil microorganisms were reviewed. The increase in soil organic carbon was fastest when organic and inorganic fertilizer

收稿日期: 2018-11-21 录用日期: 2019-05-27

作者简介: 汪 洋 (1994—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事生物多样性研究。E-mail: 1242455050@qq.com

*通信作者: 王丽丽 E-mail: lili0229ok@126.com

基金项目: 国家重点研发计划课题子课题(2016YFD0201009); 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTX2016015); 天津市自然科学基金项目(18JCYBJC23000); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2018-szjj-wll)

Project supported: Subproject of National Key R&D Plan (2016YFD0201009); Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS (CAAS-XTX2016015); The Natural Science Foundation of Tianjin (18JCYBJC23000); Special Fund for Basic Scientific Research Operation of Central Public Welfare Research Institutes (2018-szjj-wll)

were applied. Moreover, there was a threshold effect between the amount of fertilizer applied and the soil carbon inventory. The application of organic fertilizer increased the CO_2 emissions flux in the soil, and the application of phosphorus and potassium fertilizers reduced the globe warming potential of farmland soil more than nitrogen fertilizer. Increasing the application ratio of organic fertilizer to phosphate fertilizer was beneficial, leading to an increase in microbial richness in the soil and accumulation of microbial biomass carbon. Planting structure and planting density both affected the carbon storage of farmland soil, and planting structure had a significant impact on greenhouse gas emissions in farmland ecosystems. Compared with traditional monoculture planting, crop rotation and intercropping could effectively reduce the greenhouse gas emissions of farmland. At the same time, crop rotation was more conducive to increasing soil microbial diversity than continuous cropping. Conservation tillage improved the efficiency of farmland soil carbon, reduced greenhouse gas emissions, and had a positive impact on microbial activity, diversity, community structure, and carbon source utilization. Finally, we summarized the application of international mainstream carbon models to farmland ecosystems, and present future development prospects.

Key words: farm management measures; soil carbon reserves; greenhouse gases; edaphon; model

碳在地球表层的循环转化是地球重要的物质循环,也是最基本的物质循环,深入研究土壤碳素的内在转化模式及其相关微生物机理过程,对于认识土壤碳素转化规律、开展合理种植模式、评估氮肥的环境效应以及减少温室气体排放等具有极其重要的科学和实践意义^[1]。

随着气候变化的加剧,农田生态系统温室气体(CO_2 和 CH_4)排放已成为近年来科学关注的热点,据2006年联合国粮农组织(FAO)统计,全球种植业温室气体排放占人类造成的温室气体排放总量的30%,是重要的温室气体排放源^[2]。《京都议定书》中提出,经济发展过程中的碳排放可以通过生态系统碳库的增加得到补偿,农田土壤碳库作为陆地生态系统中唯一可以短时间内受人为干扰和调节的碳库,对于人为调控生态系统碳平衡具有重要的意义^[3]。

农田生态系统土壤有机碳来源于原始植被残留、农作物残体及人为施加的有机物料^[4]。其循环过程包括碳的固定、储存和释放三部分,农作物通过光合作用从大气碳库中吸收 CO_2 转化为有机碳储存于植物碳库,通过凋落物和秸秆根茬进入土壤,该过程中碳素从植物碳库进入土壤碳库,其中涉及到的重要耕作模式为秸秆还田,同时作物和土壤的呼吸作用又将碳素从植物碳库和土壤碳库释放至大气碳库。特别要指出的是,农田生态系统为人工生态系统,所以人类活动对农田生态系统的碳循环产生了不可忽视的影响^[5]。

农田土地利用和土壤管理方式的变化影响土壤结构及土壤有机碳的稳定机制^[6-7]。加强农田生态系统相关管理措施、改善种植模式对土壤有机碳的固定及碳损失的减少具有重要意义。土壤有机碳和水分在不同的耕作方式下通常会有很大的变化^[8],这是因

为,耕作过程中表层的土壤充分混合,干湿交替的频率和强度增加,土壤的通气性及孔性变好^[9],土壤水分及其温度状况均得到一定的改善^[10],微生物活性提高^[9],加速土壤有机碳的分解。不同种植制度可以改变土壤微团聚体和黏粉粒有机碳占土壤总有机碳的比重,土壤微团聚体和黏粉粒可以对有机碳产生物理和化学保护,从而增加农田土壤有机碳的稳定性^[11]。农田作物种植密度的改变会影响根系的密度,从而对土壤根际微生物的数量和活性产生影响,进而影响微生物的碳利用率;另外,根茬的密度变化会影响作物向农田中输入有机质的含量,从而影响土壤有机碳含量^[12]。研究不同种植模式对土壤理化性质及有机碳质量的影响,有利于优化农田种植模式,实现可持续发展。集约化农业生产过程中,氮肥的过量施用引发的环境负效应已经严重制约了农业的可持续发展,这就对我国农业提高资源利用率,增加土壤碳汇提出了新的要求^[13],施肥方式的优化对满足这一要求具有重要意义。土壤呼吸是大气 CO_2 排放的重要来源之一,主要包括根系自养呼吸以及土壤微生物的异养呼吸,其中施肥是影响土壤呼吸的重要因素^[14]。施肥影响农田土壤固碳的机制主要有两个方面:一方面,对作物的营养环境进行改善,提高作物的光合效率,进而使作物的生物量增加,提高了植物残体对农田土壤的输入,增加了土壤有机碳的输入;另一方面,施肥可以影响农田土壤中微生物的数量、活性以及种群分布,进而影响其呼吸作用,对农田土壤碳排放产生影响^[15]。

研究表明,碳循环在水-土-气-生相互作用下的重要纽带为土壤 CO_2 ^[16-18]。可降解有机碳在地下水中的溶解率很低,化能自养型微生物为了满足自身所需的碳源,需要吸收 CO_2 或无机碳,且在土壤含碳量逐

年变化中,深层土壤碳库通过土壤剖面的侧向气体排泄(主要是 CO_2)及降雨-入渗-排泄过程密切地与大气进行碳交换,为较活跃的碳库^[18]。此外,土壤微生物区系(数量、多样性及种群结构等)在推动土壤有机碳周转及温室气体排放方面发挥着重要作用。微生物的生物量能够在一定程度上反映土壤有机碳中具有活性的部分的含量^[19],同时具有活性的碳的输入可以促进微生物的分解转化及残留物的稳定^[20]。因此,研究不同农田管理措施背景下农田生态系统微生物动态对了解农田土壤碳周转动态具有重要意义。

由于碳周转过程对农田管理措施的反馈机制具有复杂性,模型被认为是研究农田生态系统碳循环及碳周转过程最有效的手段^[21]。生态系统碳模型的产生是从20世纪中期开始的^[22],发展经历了三个阶段:20世纪六七十年代的碳平衡模型,20世纪80年代的植被-气候关系模型,以及20世纪90年代至今生物地球化学循环模型。文中笔者主要综述了国内外的主流碳模型,以及国外碳模型在国内的应用现状,并提出发展的不足和建议。

本文从不同的农田管理措施着手,对不同农田管理措施下土壤有机碳周转及微生物变化的研究现状进行总结,并提出了未来发展方向。

1 农田管理措施对土壤碳储量的影响

农田土壤有机碳库是陆地土壤碳库的重要组成部分^[23],对农田土壤有机碳的研究已成为全球气候变化研究的重点^[24]。土壤有机碳是土壤肥力的核心物质,农田种植管理措施通过影响土壤物理、化学、生物性质影响土壤有机碳的动态,进而影响土壤肥力^[25-26]。

1.1 施肥方式对农田土壤碳储量的影响

土壤有机碳和作物产量表现为协同效应^[27],尤其在作物产量和施肥水平较低的情况下,施肥可以通过增加作物产量来提高土壤有机碳的含量^[28]。有研究证明,适度的灌溉和施肥可以帮助改善非洲小型农业土壤的碳储量^[29],这一结论在澳大利亚的牧场土壤中也得到证实^[30]。但过量使用氮肥可能降低土壤有机碳含量^[31],也就是说土壤有机碳库与施氮量存在阈值效应。

不同的施肥方式对土壤碳库积累的影响存在差异。黄晶等^[32]研究表明无机肥配施有机肥的方式会促进农田生态系统的碳汇功能。田康等^[33]的研究结果显示,不同施肥措施均能提高农田碳储量,但是不同处理措施下土壤有机碳的增幅不同,其中有机肥与

无机肥配施土壤有机碳增速最快($0.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$),而单施磷肥增速最慢($0.032 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)。

不同的碳组分变化对不同施肥处理的响应存在差异。钟杨权威^[34]的研究表明,不同施肥处理下轻组分碳和重组分碳含量差异不明显,但是可溶性碳在氮量较高的处理中显著降低,且在深层土壤中变化比较明显;而易氧化碳含量在施氮量 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理达到峰值,之后随施氮量的增加易氧化碳含量开始降低,与可溶性碳相反,该变化在浅层土壤中更为突出。

从以上论述得出,不同的施肥方式影响了土壤碳库的积累速度,对不同碳组分变化的影响也存在差异,但施肥量与土壤碳库存在阈值效应,应注意合理施肥,过量施肥并不利于农田土壤碳库的积累。

1.2 种植制度对农田土壤碳储量的影响

种植制度主要包括种植方式和种植密度。种植方式的改变是影响农田碳储量变化的一个重要因素^[35]。以绿洲土壤有机碳为例,不同种植方式主要是对土壤总有机碳(TOC)、活性有机碳(AOC)和惰性有机碳(NOC)产生影响^[36]。近年来,绿洲区内大量种植制种玉米,而普通玉米和小麦的种植比例大幅下降,这种方式影响了农田碳储量^[37]。主要原因是与普通玉米相比,当地制种玉米的秸秆主要运至养牛场或者饲养自家奶牛,且制种玉米的种植密度比普通玉米低,所以导致农田地上部分有机质归还量降低,土壤中TOC、AOC、NOC的含量随之降低^[37]。而相比小麦来讲,虽然制种玉米地有机质的归还量变化不大,但是玉米根茬归还到土壤后形成的土壤有机质高于小麦根茬,所以土壤中TOC、AOC、NOC的含量会相应升高^[38-39]。有研究发现,随着种植密度的增加农田土壤碳素含量呈现先升高后降低的趋势,如赵海超^[40]以春玉米为例研究了种植密度对农田碳储量的影响,发现低密度玉米种植有利于累积犁底层土壤有机碳,而高密度玉米种植有利于耕层土壤碳素积累。

因此,合理的种植方式和种植密度均有利于农田土壤碳储量的增加,调整农田产业结构是增加农田碳储量的有效途径。

1.3 耕作模式对农田土壤碳储量的影响

Lal等^[41]对全球碳固定进行了分析,揭示了改变农田管理措施对土壤碳固定的影响,并强调了免耕的影响。有研究指出,免耕有利于我国华北平原小麦-玉米两熟农田生态系统土壤有机碳储量的累积^[42],在美国的俄亥俄州免耕玉米地的有机碳含量比常规耕作高35%~46%,说明免耕的耕作模式提高了土壤有

机碳含量,是农田土壤固碳的重要措施^[43]。

与其他农田管理措施相比,秸秆还田是增加土壤有机碳最有效的措施^[44-45],在印度等土壤有机碳水平较低的发展中国家表现更为明显^[46]。

另外,笔者重点关注了不同耕作模式对农田生态系统碳收支平衡的影响。其中,秸秆还田与否是影响农田生态系统成为碳源还是碳汇的重要因素^[47]。冬小麦-夏玉米的农田生态系统在免耕秸秆覆盖的保护性耕作措施下比传统耕作模式碳排放减少 168.78 kg C·hm⁻²,提高了农田的固碳效率,且免耕秸秆覆盖减少了机械投入,增加了小麦-玉米农田生态系统经济效益^[48]。

因此,免耕秸秆还田的保护性耕作模式是增加农田土壤碳储量的有效手段,应该得到推广。然而,单一的耕作模式并不利于农田土壤的可持续发展,对于不同的土壤和环境所适合的耕作模式不同。目前,农田土壤有机碳对耕作管理模式的相关研究还具有不确定性,有待于进一步开展相关深入的研究,以探索多种合理的耕作模式。

2 农田管理措施对含碳温室气体排放的影响

农田生态系统是温室气体重要的排放源,FAO (2014)报道指出,来自农业源的温室气体排放已从2001年的47亿t CO₂当量,增加到2011年的53亿t,以0.6亿t·a⁻¹的速度在增加,且来自种植业、畜牧业等农业源的排放量还在持续增加。早在2000年,Schlesinger等^[49]就指出常规耕作会导致农田生态系统CO₂排放增加。我国农业源温室气体总排放量为158 557.3万t CO₂当量,比1980年增长52.0%^[50],以2000年为例,其农业源排放量占全球总排放量的17%^[51],对全球农业源温室气体贡献较高。美国罗代尔研究所始于1981年的一项长期研究表明,有机农业具有较高的能源使用效率和经济效益,常规农业比有机农业多排放40%的温室气体^[52]。基于农田温室气体排放持续增加的严峻性,笔者着重从施肥方式、种植制度、耕作模式三个角度总结农田管理措施对农田温室气体的影响。

2.1 施肥方式对农田含碳温室气体排放的影响

我国华北平原太行山前冬小麦农田土壤是CO₂的排放源^[53],而施肥和灌溉是引起各处理温室气体排放差异的主要原因,且增施氮肥以及灌溉能够促进土壤CO₂的生成和排放^[54]。这一结论在伊朗的大豆实验中同样成立,该试验表明施肥处理的大豆田CO₂排

放水平高于非施肥处理^[55]。

黄淮海平原小麦-玉米轮作实验表明有机肥的施用可以增加土壤中CO₂的释放,其原因是施加有机肥改善了土壤的理化性质^[56]。小麦、玉米季的有机肥无机肥配合施用处理农田均表现为CO₂的“汇”^[32]。

不同肥料的施加对温室气体影响不同,有研究显示高P和高K浓度、产量及其可用性与低CO₂产生率相关,而高C和高N产量与高CH₄产生率有关,较高的C:K和N:K与增长的CO₂排放量呈正相关,而有效P和CH₄产量呈负相关。平均来说,沿海地区有效P含量、pH和盐分比内陆地区更高,有效C:P和CO₂产生率较内陆地区低,而且沿海稻田CH₄排放量比内陆稻田略低^[57]。

另外,有机肥已被证明能促进农业土壤中CH₄的吸收,荷兰的一项研究显示通过堆肥改良获得了最优的温室气体平衡^[58],该研究认为堆肥的营养成分并不十分丰富,当作为单一肥料施用时,可能会导致作物产量下降。因此将堆肥与更富营养的有机改良剂(污泥、沼液)结合使用,可以在保持作物产量和减少温室气体排放之间进行权衡^[58]。

所以应该适量提高磷、钾两种肥料的施用而降低氮肥的施用,以降低农田含碳温室气体的排放,同时结合经济效益,探究最佳施用比例,减缓温室效应。

2.2 种植制度对农田含碳温室气体排放的影响

国内关于种植制度对农田含碳温室气体的影响研究主要集中在长江中下游的水田,对旱地的研究还不成熟,有待于进一步研究。不同的种植制度下农田温室气体排放表现出明显的差异,通过对不同种植制度的比较,有利于选择最佳的种植模式减少当地农田温室气体的排放,在实现经济效益的同时提高环境效益^[59-62]。

展茗^[59]在湖北开展的研究中通过设置三种稻作模式(稻鸭复合种养-RD、间歇灌溉-RW、常规淹水灌溉-CK)研究了稻田温室气体碳排放的差异,发现虽然RD、RW与CK相比都能显著降低CH₄排放量,但是RW降幅更大,达到36.9%,而RD降低了19.95%,但是,RW模式的CO₂排放却比RD和CK增长了29.4%,所以综合考虑认为稻鸭复合种养的模式更有利于减少该地区的温室气体排放。

江长胜^[60]在川中丘陵区的研究中发现水稻种植本身会促进稻田CH₄的排放,有水稻种植的冬灌田的CH₄排放是无水稻种植的冬灌田的3倍,但是不同的种植制度可以减缓这一效应,与常规冬灌田相比,采

用冬灌田强化栽培、稻-麦轮作和稻-油轮作的种植方式均能降低稻田 CH_4 排放量,其中稻-油轮作降幅最大,达到57.8%。

而美国的一项研究也证明,轮作可以减少农田 CO_2 的排放,玉米大豆轮作与单独的大豆或者玉米连作相比,能减少温室气体排放,且能增加产量^[61]。

改变传统作物布局有利于江汉平原地区稻田温室效应的降低,新型种植模式的全球增温潜势(Globe warming potential, GWP)均显著低于同条件下的传统模式,西瓜-玉米套作、稻虾混作和薏苡单作模式夏季排放的 CO_2 、 CH_4 产生的全球增温潜势分别为水稻单作的18.97%和57.96%^[62]。

综上,发展轮作和间作的种植模式与传统单一作物种植相比可有效减少农田含碳温室气体的排放,而且不同作物的组合种植对含碳温室气体排放的降幅不同,应对不同种植方案进行筛选,综合经济效益和环境效益选取最优方案。

2.3 耕作模式对农田含碳温室气体排放的影响

秸秆还田可直接导致含碳温室气体排放的年度差异。Lal^[63]报道指出耕作措施、化肥施用、杀虫剂施用、灌溉、作物播种收获过程的机械作业、秸秆还田管理等农田耕作措施均对温室气体的排放具有重要的影响。可见,发展合理的农田耕作模式,是有效减缓农田生态系统温室气体排放的重要举措。

秸秆还田和保护性耕作措施下,农田依然表现为 CO_2 和 CH_4 的“源”。在日本七个行政区的实验表明,北方由于休耕时期气温低,水稻收获后留下的秸秆、根茬、根系分解缓慢,在水下种植时期,这些残留成了 CH_4 产生的基质,因此增加了 CH_4 产生量,表现为 CH_4 排放的“源”^[64]。秸秆覆盖和垄作处理虽然增加了土壤的固碳能力,但同时也增加了土壤投入碳的排放^[46],而且秸秆覆盖有利于 CO_2 的排放,全量还田比不还田高14.4%^[65],综合表现为农田生态系统含碳温室气体排放的“源”。

但与传统耕作模式相比,保护性耕作措施有利于降低农田生态系统的温室效应。有研究证明,常规耕作总温室效应均大于保护性耕作,免耕温室效应最小,常规耕作秸秆覆盖量最大^[66]。王丙文^[65]研究发现常规耕作农田 CO_2 年度排放平均比保护性耕作多 $2.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, CO_2 排在保护性耕作农田全年总温室效应中占97.4%,而 CH_4 的排放只占0.27%。

所以降低农田温室气体的温室效应,主要是降低农田 CO_2 的排放,保护性耕作具有优势,可有效地降

低农田生态系统的温室效应。

3 农田管理措施对土壤微生物的影响

土壤生物多样性,特别是土壤微生物多样性已成为近年来农田生态系统研究的一个热点^[67],已有众多研究利用分子生物学方法研究微生物的种群动态,以揭示土壤生物在土壤质量特别是土壤健康乃至生态功能保育中的作用。Paul等^[68]基于21年的长期研究结果提出,欧洲有机农业提升了土壤肥力和微生物多样性,土壤微生物是土壤碳循环的重要参与者,探讨施肥、秸秆还田、种植模式等农业措施下的土壤微生物过程,对揭示土壤碳素循环及转化利用模式具有重要的科学意义。

耕作措施的变化可以通过影响土壤团聚体的物理特性等土壤性状,使土壤微生物的生境发生改变,进而影响其参与的碳循环过程。例如,研究表明有机农业系统普遍表现出较高的生物多样性和土壤微生物量,对碳素物质有较强的分解转化能力^[69]。农田耕作管理措施通过影响微生物数量及种群结构,来影响土壤微生物对土壤有机碳的积累和转化,基于Lavelle等^[70]和Wall等^[71]的模型理念,可以说,不同时间空间维度微生物过程的叠加决定着农田土壤固碳过程,土壤地下微生物的活性控制着土壤有机碳的稳定性^[72]。同时,土壤微生物较其他土壤肥力指标更能及时、敏感地反映土壤受到扰动后的物理、化学性质及生物学特性的细微变化,土壤微生物是评价农田管理措施的早期灵敏指标^[73],是正确了解不同管理措施对农田碳循环过程影响的先决条件。

3.1 施肥方式对土壤微生物的影响

不同的施肥方式对土壤微生物的种类、数量以及丰富度的影响是不同的。

有研究显示,有机肥单施或有机肥无机肥配合施用的施肥模式比单施化肥更能增加土壤的微生物量碳含量,且该变化随着种植年限的延长会更加明显^[74],主要原因是有机肥的施加改善了土壤的理化性质,增加了土壤有机碳的含量,为微生物创造了更加适宜的生存环境,从而增加了微生物量碳的含量^[75]。这一结论在西班牙东南部的柑橘园实验以及印度北部的小麦田实验也得到证实^[76-77]。

有机肥和无机肥配施的比例不同对土壤微生物的丰富度影响也不相同,在双季稻的主产区,采用大麦-双季稻种植方式,30%有机肥+70%化肥(LOM)、60%有机肥+40%化肥(HOM)、化肥(MF)、秸秆还田+

化肥(RF)、无肥对照(CK)的五种施肥模式,在大麦成熟期 Richness 和 Shannon 指数大小顺序均表现为 HOM>LOM>RF>CK>MF,说明有机肥比例的提高有利于土壤中微生物的丰富度提高。且该实验还表明氨基酸类和糖类为各施肥处理大麦根际土壤微生物群落利用的主要碳源,不同施肥处理的土壤微生物碳源利用的种类存在明显的差异^[78]。

此外磷素的施用对土壤微生物的特性有显著影响。梁楚涛等^[79]在黄土高原丘陵区进行不同施肥处理发现,在耕作层中,只施氮肥对土壤微生物特性的影响很不明显;而单施磷肥对微生物呼吸强度及部分磷脂脂肪酸含量的影响比率为11.4%~54.0%。西南大学紫色土肥力的实验也发现,当土壤磷素严重缺乏时,水旱轮作水稻土壤的 Chloroflexi 相对丰度也会显著下降^[80]。

综上所述,长期氮磷有机肥混施有助于提高土壤微生物的特性,应该适量提高有机肥和磷肥的施用比例,进而改善农田生态系统的稳定性和健康水平。

3.2 种植制度对土壤微生物的影响

不同的种植制度会对土壤微生物的群落结构和生物多样性产生影响。

连作是目前我国农业生产主要的种植制度,张洋等^[81]在黄瓜连作的实验中发现,黄瓜根际微生物的数量会随着连作茬数的增加而呈现增长的趋势,但其多样性和丰富度却会随着连种茬数的增加而降低。随着连作茬数的增加,连作障碍的表现也会越来越明显。吴宏亮等^[82]在砂田西瓜连作的种植中发现了这一现象,并针对这一现象设计了研究西瓜连作(对照)和西瓜-花豆、西瓜-辣椒、西瓜-南瓜3种轮作方式对砂田土壤微生物群落和理化性状影响的实验,发现与对照相比3种轮作方式均能克服西瓜的连作障碍,可通过改善土壤微生物的区系结构增加土壤微生物的多样性,其中以西瓜-辣椒轮作效果最为明显。

关于不同种植制度对生物多样性的影响,罗影^[83]在甘肃设置了胡麻-小麦轮作、胡麻||小麦间作、胡麻连作和撂荒处理4种处理模式,研究发现细菌的 Shannon 指数表现为轮作>撂荒>间作>连作,真菌的 Shannon 指数表现为轮作>间作>撂荒>连作。所以对于微生物的多样性而言,轮作是比连作更有利的种植制度,另外,滁菊小麦的轮作实验以及苜蓿和作物的轮作实验均证明,轮作与连作相比更有利于提高微生物量碳的含量^[84-85]。

单从轮作来讲,不同的轮作结构对土壤微生物的

影响也不相同,这一结论在吴宏亮等^[82]的西瓜轮作实验中已有体现。

不同种植制度短时间内对土壤微生物的群落结构以及多样性影响不显著,但在长期实验中表现了显著影响^[86],因此种植制度对农田土壤微生物的影响与实验周期长短密切相关。

所以,间作和轮作均可提高土壤中微生物的多样性,且轮作效果比间作更显著,不同的轮作模式对微生物的种类影响不同,但是这些影响在短期内并不显著,需要长时间轮作才能显现。

3.3 耕作模式对土壤微生物的影响

保护性耕作与传统耕作相比对微生物的整体活性、生物多样性、群落结构以及碳源利用情况均有积极影响。

有研究显示,底土耕作和秸秆还田改善了土壤的基本理化性质和生物学特性,促进了土壤有机碳含量的增加,显著提高了土壤微生物碳源的代谢功能和代谢多样性,最终解决土壤退化问题^[87]。

张旭^[88]基于长期定位实验发现,免耕秸秆覆盖能够显著提高土壤微生物的整体活性,作物播前和收后土壤微生物的整体活性在各处理下表现为免耕秸秆覆盖>免耕>传统耕作秸秆还田>传统耕作。秸秆还田显著增加了土壤微生物的生物多样性及其数量,并对其群落结构组成产生影响。但是,在玉米-冬小麦-大豆的轮作中发现,该影响受作物类型和生育期的调节^[89]。另外,保护性耕作对土壤微生物数量的影响也与土层深度有关,深松和免耕主要有利于提高0~10 cm的微生物数量,而对10~20 cm土层没有显著影响^[90]。加拿大的一项覆盖作物研究显示,免耕仅在0~5 cm土层中增加了土壤的微生物量碳^[91]。

免耕秸秆覆盖可以显著提高土壤微生物对碳源的利用能力,在玉米-冬小麦-大豆的轮作中,免耕措施下玉米和冬小麦种植期土壤微生物对氨基酸类、聚合物类、羧酸类以及糖类碳源的利用能力得到提高,而秸秆覆盖显著提高了大豆根际土壤微生物对胺/氨基化合物类和羧酸类碳源的利用率^[89]。

所以,保护性耕作措施有利于微生物数量、活性以及生物多样性的增加,这一影响受作物类型和生育期的调节,保护性耕作也可提高微生物对碳源的利用能力。

4 国际主流碳模型在我国应用概况

迄今为止,国际主流碳模型主要有:①英国洛桑

实验室 Jenkinson 1977 年开发的 RothC 模型^[92], 该模型能较好地模拟不同施肥模式对农田有机碳的变化, 该模型的主要优点是所需参数简单易得^[93], 但是对于秸秆还田后土壤有机碳的变化, 该模型的估测值偏高^[94]; ②美国科罗拉多州立大学 Parton 等 1987 年开发的 CENTURY 模型^[95], 该模型基于生态过程, 对不同情境下土壤有机碳的变化都可以预测, 结果相对精确, 但是该模型比较复杂, 所需参数多且不易获取, 且受区域尺度限制, 适用于空间度较小的土壤有机碳的推測^[96]; ③美国 New Hampshire 大学李长生 1992 年开发的 DNDC 模型^[97]; ④隶属澳大利亚联邦科学与工业组织和昆士兰州政府的农业生产系统研究组 (Agricultural Production System and Industrial Research Unit, APSRU) 1996 年开发的 APSIM 模型^[98], APSIM 模型可以在复杂的条件下敏感地预测作物生产效益和经济风险, 但是模型系统庞大复杂^[99]; ⑤美国德克萨斯农工大学黑土地研究中心和美国农业部草地、土壤和水分研究所 1983 年共同研发的 EPIC 模型^[100], 该模型可用于分析农田土壤中碳储量的年变化^[101], 但是对极端变化的天气敏感性较差^[102]。

这些模型在我国都有应用: 在北方旱作地区, 目前主要应用 RothC 模型^[92]; 西北部干旱区主要应用的是 CENTURY 模型^[95]和 EPIC 模型^[100-101]; 东部旱作农田主要应用 CENTURY 模型; 东北地区使用的模型种类较多, 主要是 APSIM 模型^[103]、DNDC 模型^[97]、EPIC 模型^[100]; 另外东北黑土和潮土也应用 RothC 模型^[104], 东北黑土和冻融层主要应用 CENTURY 模型^[105-106]; 华北平原地区主要应用 CENTURY 模型^[107]、DNDC 模型^[108]、APSIM 模型^[98]、EPIC 模型^[100]; 黄土高原地区主要应用 RothC 模型^[109]、DNDC 模型^[110]、APSIM 模型^[111]、EPIC 模型^[102]; 华东地区和西南地区主要应用 DNDC 模型^[112]、EPIC 模型^[100]; 中南地区主要应用 RothC 模型^[113]、CENTURY 模型^[107]和 EPIC 模型^[100]。关于温室气体的监测, 笔者重点关注了 DNDC 模型, 发现 DNDC 模型能较好地模拟 CH_4 排放峰值的变化规律, 但对于其季节累积排放量观测结果不太理想, 明显低于田间观测值, 当田间施氮量不足或者完全不施氮时, 模拟效果较差^[66]。

国外碳循环模型的开发已经日趋成熟, 在我国的应用也越来越广泛, 但是由于国内外在气候、环境、水文、耕作模式、施肥方面的差异, 国外的碳循环模型在我国并不能完全适用。20 世纪 80 年代以来我国的学者在陆地生态系统碳循环方面也做出了一些成果, 其

中以静态模型的开发为主, 其中适用于农田生态系统的主要有黄耀的 Agro-C 模型^[114], 动态模型主要是在国外模型的基础上做出修改以更好地适用于我国的陆地生态系统, 其中适用于农田生态系统的代表模型是童成立的 SCNC 模型^[115]。Agro-C 模型主要用于农田土壤有机碳的年均增加量和密度增加速率^[116], 但是由于其简化碳流动的方法并不恰当, 导致实际应用时模拟值与农田土壤真实值之间产生偏差^[117]。SCNC 模型主要用于模拟旱地和水田不同管理措施下土壤有机碳 (SOC) 的动态变化, 其中对旱地模拟的准确性显著高于水田, 尤其对排水能力差、地下水位高的稻田模拟效果比较不理想^[118]。

就目前碳循环的研究现状来看, 笔者认为应着重加强对农田生态系统碳循环动态模型的研究, 以便观测农田生态系统有机碳含量的动态变化。对于国外模型的应用, 更应该考虑其具体使用地点的综合情况, 结合我国农田生态系统特点对模型进行完善, 以达到更有效的模拟效果。

5 展望

有机肥和无机肥配合施用是目前比较科学的施肥方式, 间作、轮作与单作相比, 在维持生态系统稳定性方面更占优势, 免耕和秸秆覆盖的保护性耕作模式无论对增加农田土壤碳储量, 还是减少温室气体的排放, 以及提升土壤微生物的整体活性、生物多样性、群落结构、碳源利用率均有积极影响。目前我国关于农田生态系统碳循环的研究已经取得较大的进步, 研究体系日趋完善。然而, 虽然农田生态系统是一个人工生态系统, 但它与自然环境息息相关, 这就注定了其研究的复杂性。关于农田生态系统碳循环的研究, 笔者认为在以下几方面尚存在不确定性, 并提出了下一步的研究展望:

(1) 施肥量与土壤碳库之间的关系研究不够全面。目前关于土壤碳库与施肥的研究主要集中于探究施肥方式与土壤碳库之间的关系, 而关于施肥量与土壤碳库之间的定量研究较少且不够全面。施肥量与土壤碳库存在阈值效应, 且不同类型土壤对施肥量的响应存在差异, 可以结合模型模拟的方法针对不同类型土壤进行分析, 探究其最适施肥量以指导农业生产。

(2) 碳循环模型对土壤有机碳的定量研究不足。当前的碳循环模型更注重土壤有机碳定性研究, 而土壤有机碳的定量研究模型更有实用价值, 应进一步探

索。另外不同类型的农田对土壤有机碳含量变化的响应是不同的,碳循环模型也应进一步分类,探索适用于不同类型土壤更为具体的碳循环模型。

(3)碳循环研究成果转化为经济效益的研究较少。碳循环和粮食产量息息相关,但是关于它们之间联系的研究较少,今后的研究中,应该着重探讨碳循环与经济效益之间关系,并切实制定提高经济效益的方法,指导生产实践。

(4)缺乏统一的观测方法,研究成果共享性较差。目前碳通量的主流观测方法主要有透明箱法和涡度相关法,另外还有大型蒸渗仪方法和波文比-能量平衡方法等,不同的观测方法所得出的结论之间存在误差,不具有可比性,且共享性较差,应该加强合作,建立统一的观测方法和网络链接,保证数据资料的共享性和连续性,为农田生态系统碳循环的研究提供可靠的数据基础。

参考文献:

- [1] 吕军杰,李俊红,檀尊社,等. 垄作覆盖下小麦、玉米产量、土壤碳素转化及水分研究[J]. 河南农业科学, 2012, 41(2): 68-72.
LÜ Jun-jie, LI Jun-hong, TAN Zun-she, et al. Study on wheat and corn yields, soil carbon and water under ridge culture with straw mulch[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(2): 68-72.
- [2] 闵继胜,胡 浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 21-27.
MIN Ji-sheng, HU Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21-27.
- [3] 姜蓝齐,臧淑英,张丽娟,等. 松嫩平原农田土壤有机碳变化及固碳潜力估算[J]. 生态学报, 2017, 37(21):7068-7081.
JIANG Lan-qi, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, et al. Temporal and spatial variations of organic carbon and evaluation of carbon sequestration potential in the agricultural topsoil of the Songnen Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 37(21): 7068-7081.
- [4] 徐 梦,李晓亮,蔡晓布,等. 藏东南地区不同土地利用方式下土壤有机碳组分及周转变化特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(19):3714-3725.
XU Meng, LI Xiao-liang, CAI Xiao-bu, et al. Impact of land use type on soil organic carbon fractionation and turnover in southeastern Tibet [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(19):3714-3725.
- [5] 张 赛,王龙昌. 全球变化背景下农田生态系统碳循环研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(1):4-9.
ZHANG Sai, WANG Long-chang. Review on carbon cycling of farmland ecosystem under the context of global changes[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(1):4-9.
- [6] Mendham D S, Heagney E C, Corbeels M, et al. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36:1067-1074.
- [7] Bu R, Lu J, Ren T, et al. Particulate organic matter affects soil nitrogen mineralization under two crop rotation systems[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(12): e0143835.
- [8] 王健波. 耕作方式对旱地冬小麦土壤有机碳转化及水分利用影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2014.
WANG Jian-bo. Effects of different tillage practices on soil organic carbon transformation and water use of winter wheat in dryland winter wheat[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [9] 贾凤梅,张淑花,魏雅冬. 不同耕作方式下玉米农田土壤养分及土壤微生物活性变化[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5):112-117.
JIA Feng-mei, ZHANG Shu-hua, WEI Ya-dong. Variation of soil nutrients and soil microbial activities of different tillage systems in farmland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 25(5):112-117.
- [10] 张 洋,王鸿斌. 不同耕作模式对黑土区土壤理化性质及玉米生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 58-64.
ZHANG Yang, WANG Hong-bin. Effects of different tillage patterns on soil physical and chemical properties and growth of maize[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(18): 58-64.
- [11] 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 Xian-xian. Difference in physical and chemical properties and organic carbon stability of black soil between cropping system in northeast China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [12] 赵海超,刘景辉,张星杰. 春玉米种植密度对土壤有机碳组分的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1051-1056.
ZHAO Hai-chao, LIU Jing-hui, ZHANG Xing-jie. Effect of planting density of spring corn on organic carbon fractions of soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6):1051-1056.
- [13] 韩 笑. 农田管理措施对土壤碳库和温室气体排放的影响[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
HAN Xiao. Effects of agricultural practices on soil carbon stocks and greenhouse gas emissions[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [14] 林 晓. 长期不同施肥对稻-麦轮作紫色土 CO₂ 排放及有机质好氧矿化分解的影响[D]. 重庆:西南大学, 2016.
LIN Xiao. Effects of long-term fertilization on CO₂ emission and decomposition of SOM from a rice-wheat rotated purple soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [15] 曹丽花,刘合满,杨东升. 农田土壤固碳潜力的影响因素及其调控(综述)[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10):16-20.
CAO Li-hua, LIU He-man, YANG Dong-sheng. Factors affecting soil carbon sequestration potential in farmland and their regulation [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(10):16-20.
- [16] 郑 蔚. 模拟增温和氮添加对亚热带杉木幼林不同深度土壤 CO₂ 排放和微生物群落与酶活性的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2017.
ZHENG Wei. Effects of simulated warming and nitrogen addition on soil CO₂ emission, microbial communities and activity at different depths in a young subtropical Chinese fir forest[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017.

- [17] 何 萌. 农田作物-土体单元的 CO₂净交换对土壤含水量变化的响应研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2017.
HE Meng. Study on the response of CO₂ net exchange of crop-soil unit to soil water content change[D]. Beijing: Chinese Academy of Water Resources and Hydropower Research, 2017.
- [18] 宋 超. 黄土典型堆积区包气带土壤 CO₂的变化特征、成因机制及其碳循环意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
SONG Chao. Characteristics and origin of soil CO₂ at unsaturated zone in loess tableland and its implication to carbon cycle[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017.
- [19] 王 宁, 王美菊, 李世兰, 等. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物生物量生长季动态的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1297-1305.
WANG Ning, WANG Mei-ju, LI Shi-lan, et al. Effects of precipitation variation on growing seasonal dynamics of soil microbial biomass in broadleaved Korean pine mixed forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5): 1297-1305.
- [20] 于 娜. 鼎湖山不同演替阶段土壤微生物群落结构及其与碳积累过程的关联[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.
YU Na. Microbial community structure in forest soils at different Dinghu Mountain and its association with carbon accumulation process [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [21] 刘 昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):1-9.
LIU Yu, CHEN Min-peng, CHEN Ji-ning. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3):1-9.
- [22] 王文佳, 冯 浩. 国外主要作物模型研究进展与存在问题[J]. 节水灌溉, 2012(8):63-68, 73.
WANG Wen-jia, FENG Hao. The progress and problems in the development of foreign crop models[J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(8): 63-68, 73.
- [23] Álvaro-Fuentes J, Easter M, Paustian K. Climate change effects on organic carbon storage in agricultural soils of northeastern Spain[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 155: 87-94.
- [24] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SCNC 模型检验[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1228-1233.
LIU Shou-long, TONG Cheng-li, WU Jin-shui, et al. Simulation of changes of soil organic carbon in paddy soils: SCNC model validation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1228-1233.
- [25] 张雪梅, 吕光辉, 杨晓东, 等. 农田耕种对土壤酶活性及土壤理化性质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2011(12):177-182.
ZHANG Xue-mei, LÜ Guang-hui, YANG Xiao-dong, et al. Effects of farmland cultivation on soil enzyme activities and soil physicochemical properties[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011(12): 177-182.
- [26] 姜 勇, 梁文举, 闻大中, 等. 免耕对农田土壤生物学特性的影响 [J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 347-351.
JIANG Yong, LIANG Wen-ju, WEN Da-zhong, et al. Effects of no-tillage on soil biological properties in farmlands: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 347-351.
- [27] Lal R. Food security in a changing climate[J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2013, 13(1): 8-21.
- [28] Alvarez R. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage[J]. *Soil Use and Management*, 2005, 21(1), 38-52.
- [29] Alavaisha E, Manzoni S, Lindborg R. Different agricultural practices affect soil carbon, nitrogen and phosphorous in Kilombero-Tanzania [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 234: 159-166.
- [30] Coonan E C, Richardson A E, Kirkby C A, et al. Soil carbon sequestration to depth in response to long-term phosphorus fertilization of grazed pasture[J]. *Geoderma*, 2019, 338: 226-235.
- [31] Triberti L A, Natri G, Giordani F, et al. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 29:13-20.
- [32] 黄 晶, 李冬初, 刘淑军, 等. 长期施肥下红壤旱地土壤 CO₂排放及碳平衡特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 602-610.
HUANG Jing, LI Dong-chu, LIU Shu-jun, et al. Characteristics of soil CO₂ emission and carbon balance under long-term fertilization in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18(3): 602-610.
- [33] 田 康, 赵永存, 徐向华, 等. 不同施肥下中国旱地土壤有机碳变化特征——基于定位试验数据的 Meta 分析[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3735-3743.
TIAN Kang, ZHAO Yong-cun, XU Xiang-hua, et al. A meta-analysis of field experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different fertilization treatments in uplands of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3735-3743.
- [34] 钟杨权威. 长期施氮对旱作麦田土壤碳库平衡及其稳定性影响机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
ZHONG Yang-quan-wei. The effects of long-term nitrogen fertilization on soil carbon balance and stability mechanism in wheat field[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [35] 汪张懿. 有机种植方式下农田土壤有机碳动态模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
WANG Zhang-yi. Modeling soil organic carbon dynamic changes in organic farming[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [36] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 黑河中游不同土地利用类型下土壤有机碳时空分布[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 66-72.
ZHANG Jun-hua, LI Guo-dong, NAN Zhong-ren, et al. Temporal and spatial distribution of soil organic carbon under different land uses in the middle reaches of Heihe River[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2009, 45(4): 66-72.
- [37] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 耕作历史和种植制度对绿洲农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2):196-203.
ZHANG Jun-hua, LI Guo-dong, NAN Zhong-ren, et al. Effects of cultivation history and cropping system on soil organic carbon and its components in oasis soils[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(2): 196-203.
- [38] 王周琼, 李述刚, 程心俊. 荒漠绿洲农田生态系统中养分循环[M].

- 北京:科学出版社,2002:52-160.
- WANG Zhou-qiong, LI Shu-gang, CHENG Xin-jun. Nutrient cycling in farmland ecosystems in desert oases[M]. Beijing: Science Press, 2002: 52-160.
- [39] 中国农机学会农机化学会科技交流中心.农作物秸秆利用技术与设备[M].北京:中国农业出版社,1996:67-70.
- China Agricultural Machinery Association Agricultural Mechanization Society Science and Technology Exchange Center. Crop straw utilization technology and equipment[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996: 67-70.
- [40] 赵海超.农作措施对春玉米农田土壤有机碳影响机制研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- ZHAO Hai-chao. Study on the influence mechanism of agricultural measures on soil organic carbon in spring corn fields[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [41] Lal R, Griffin M, Apt J, et al. Managing soil carbon[J]. *Science*, 2004, 304(5669): 393.
- [42] Zhang M Y, Wang F J, Chen F, et al. Comparison of three tillage systems in the wheat-maize system on carbon sequestration in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 54: 101-107.
- [43] Nath A J, Lal R. Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north Appalachian region, USA[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(1):172-176.
- [44] Freibauer A, Rounsevell M D A, Smith P, et al. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe[J]. *Geoderma*, 2004, 122:1-23.
- [45] Smith P, Davies C A, Ogle S, et al. Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: Current capability and future vision[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18: 2089-2101.
- [46] Srinivasarao C, Lal R, Kundu S, et al. Soil carbon sequestration in rainfed production systems in the semiarid tropics of India[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 587-603.
- [47] 管奥涓.减量施氮与大豆间作对甜玉米农田生态系统碳氮循环特征的影响[D].广州:华南农业大学,2016.
- GUAN Ao-mei. Effects of reducing nitrogen application rates and soybean intercropping on carbon, nitrogen cycling of sweet corn field[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [48] 禄兴丽.保护性耕作措施下西北旱作麦玉两熟体系碳平衡及经济效益分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
- LU Xing-li. Carbon balance and economic benefit analysis of wheat-summer maize in the dryland of northwest China under conservation tillage[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [49] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):7-20.
- [50] 谭秋成.中国农业温室气体排放:现状及挑战[J].中国人口·资源与环境,2011,21(10):69-74.
- TAN Qiu-cheng. Greenhouse gas emission in China's agriculture: Situation and challenge[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(10): 69-74.
- [51] Liu Y X, Langer V, Høgh-Jensen H, et al. Life cycle assessment of fossil energy use and greenhouse gas emissions in Chinese pear production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18: 1423-1430.
- [52] Hepperly P R, Douds D J, Seidel R. The rodale institute farming systems trial 1981 to 2005: Long term analysis of organic and conventional maize and soybean cropping systems[M]//Raupp J, Pekrun C, Oltmanns M, et al. Long-term field experiments in organic farming. Berlin: Verlag Dr. H. J. Köster, 2006:15-31.
- [53] 宋利娜,张玉铭,胡春胜,等.华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J].中国生态农业学报,2013,21(3):297-307.
- SONG Li-na, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 297-307.
- [54] 薛 琰.氮肥类型、秸秆还田和灌溉方式对水稻氨挥发和温室气体排放的影响[D].扬州:扬州大学,2017.
- XUE Yan. Effects of nitrogen fertilizer types, straw residue and irrigation on paddy ammonia volatilization and greenhouse gas emissions [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [55] Langeroodi A S, Osipitan O A, Radicetti E. Benefits of sustainable management practices on mitigating greenhouse gas emissions in soybean crop (*Glycine max*) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1593-1601.
- [56] 徐炳成,梁银丽.黄土高原旱塬农田生态系统碳氮循环特征[J].生态农业研究,2000(2):44-48.
- XU Bing-cheng, LIANG Yin-li. Carbon and nitrogen cycling characteristics of dry farmland ecosystem on Loess Plateau[J]. *Study on Ecological Agriculture*, 2000(2):44-48.
- [57] Wang W Q, Sardans J, Wang C, et al. Relationships between the potential production of the greenhouse gases CO₂, CH₄ and N₂O and soil concentrations of C, N and P across 26 paddy fields in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 164: 458-467.
- [58] Brenzinger K, Drost S M, Korthals G, et al. Organic residue amendments to modulate greenhouse gas emissions from agricultural soils[J]. *Front Microbiol*, 2018, 9: 3035.
- [59] 展 茗.不同稻作模式稻田碳固定、碳排放和土壤有机碳变化机制研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
- ZHAN Ming. Studies on mechanisms of carbon sequestration, carbon emissions and soil organic carbon dynamics in different farming paddy fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [60] 江长胜.川中丘陵区农田生态系统主要温室气体排放研究[D].北京:中国科学院研究生院(大气物理研究所),2005.
- JIANG Chang-sheng. Study on emission of major greenhouse gases from agro-ecosystems in a central Sichuan hilly area of southwest China[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Atmospheric Physics), 2005.
- [61] Behnke G D, Zuber S M, Pittelkow C M, et al. Long-term crop rotation and tillage effects on soil greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 261: 62-70.
- [62] 龚世飞.江汉平原涝渍地不同种植模式对温室气体排放及土壤质

- 量影响的研究[D]. 荆州: 长江大学, 2016.
- GONG Shi-fei. Effects of different cropping patterns on greenhouse gases emissions and soil quality of waterlogged land in Jiangnan Plain [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2016.
- [63] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30: 981–990.
- [64] Katayanagi N, Fumoto T, Hayano M, et al. Estimation of total CH₄ emission from Japanese rice paddies using a new estimation method based on the DNDC-Rice simulation model[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 346–355.
- [65] 王丙文. 保护性耕作农田碳循环规律和调控研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- WANG Bing-wen. The rules and regulation of farmland carbon cycle under conservation tillage[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2013.
- [66] 赵建波. 保护性耕作对农田土壤生态因子及温室气体排放的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- ZHAO Jian-bo. Effects of conservation tillage on soil environment factors and the emission of greenhouse gas in the field[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2008.
- [67] Barrios E. Soil biota, ecosystem services and land productivity[J]. *Ecology and Economics*, 2007, 64(2): 269–285.
- [68] Paul M, Andreas F, David D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. *Science*, 2002, 296(5573): 1694–1697.
- [69] Andreas F, Hans-Rudolf O, Lucie G, et al. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 118: 273–284.
- [70] Lavelle P, Bignell D, Austen M, et al. Vulnerability of ecosystem services at different scales: Role of biodiversity and implications for management[C]//Wall D H. Sustaining biodiversity and functioning in soils and sediments. New York: Island Press, 2004.
- [71] Wall D H, Bardgett R D, Behan-Pelletier V, et al. Soil ecology and ecosystem services[M]. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- [72] Baldock J A, Masiello C A, Gelinas Y, et al. Cycling and composition of organic matter in terrestrial and marine ecosystems[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1): 39–64.
- [73] Sundermeier A P, Islam K R, Raut Y, et al. Continuous no-till impacts on soil biophysical carbon sequestration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(5): 1779–1788.
- [74] 王利民, 范平, 罗涛, 等. 培肥措施对茶园土壤碳组分和茶叶产量的影响[J]. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(1): 45–50.
- WANG Li-min, FAN Ping, LUO Tao, et al. Impacts of different fertilization treatments on soil carbon fractions and tea yields in yellow-red soil of tea plantations[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2018, 13(1): 45–50.
- [75] Wang L M, Huang D F, Lin X J, et al. Effect of fertilizer managements on soil quality and productivity in tea farms[J]. *Indian Horticulture Journal*, 2017, 7(1): 15–23.
- [76] Morugán-Coronado A, García-Orenes F, McMillan M, et al. The effect of moisture on soil microbial properties and nitrogen cyclers in Mediterranean sweet orange orchards under organic and inorganic fertilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 158–167.
- [77] Das S, Kumar N, Das R, et al. Long term impact of nutrient management options on yield, and nutrient uptake by soybean and soil properties under soybean (*Glycine max*)–wheat (*Triticum aestivum*) cropping system in the Indian Himalayas[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 89(3): 406–414.
- [78] 徐一兰, 唐海明, 程爱武, 等. 长期施肥对大麦-双季稻种植方式中大麦根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(2): 144–150.
- XU Yi-lan, TANG Hai-ming, CHENG Ai-wu, et al. Effects of different long-term fertilization treatments on rhizospheric soil microbial community functional diversity of paddy field in barley-double cropping rice system[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, 35(2): 144–150.
- [79] 梁楚涛, 张娇阳, 艾泽民, 等. 黄土丘陵区不同施肥处理对土壤微生物特性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 1–10.
- LIANG Chu-tao, ZHANG Jiao-yang, AI Ze-min, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial properties in the Loess hilly-gully region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 1–10.
- [80] 张宇亭. 长期施肥对土壤微生物多样性和抗生素抗性基因累积的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- ZHANG Yu-ting. The effect of long-term fertilization on soil microbial diversity and the accumulation of antibiotic resistance genes[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [81] 张洋, 李青, 梅丽娟, 等. 施肥方式对黄瓜连作土壤微生物区系及多样性的动态影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(14): 231–235.
- ZHANG Yang, LI Qing, MEI Li-juan, et al. Dynamic effects of fertilization on microbial flora and diversity of cucumber continuous cropping soil[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2017, 45(14): 231–235.
- [82] 吴宏亮, 康建宏, 陈阜, 等. 不同轮作模式对砂田土壤微生物区系及理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 674–680.
- WU Hong-liang, KANG Jian-hong, CHEN Fu, et al. Effect of different rotation patterns on soil microbial population and physiochemical properties under gravel-sand mulched field conditions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(6): 674–680.
- [83] 罗影. 不同种植模式对胡麻田土壤酶活性和土壤微生物群落结构及多样性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- LUO Ying. Effects of different flex cropping modes on soil enzymes activities and soil microbial community structure[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.
- [84] 肖新, 朱伟, 杜超, 等. 轮作与施肥对滁菊连作土壤微生物特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1779–1784.
- XIAO Xin, ZHU Wei, DU Chao, et al. Effects of crop rotation and bio-organic manure on soil microbial characteristics of chrysanthemum cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1779–1784.
- [85] Wang X L, Jia Y, Li X G, et al. Effects of land use on soil total and light fraction organic, and microbial biomass C and N in a semi-arid ecosystem of northwest China[J]. *Geoderma*, 2009, 153(1): 285–290.
- [86] 黄玥. 施肥和种植方式对烤烟、玉米根际微生物数量及细菌群

- 落的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- HUANG Yue. Influence of fertilization and cropping pattern on microbial numbers and bacteria community structures in flue-cured tobacco and maize soils[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [87] Hao M M, Hu H Y, Liu Z, et al. Shifts in microbial community and carbon sequestration in farmland soil under long-term conservation tillage and straw returning[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 136: 43–54.
- [88] 张 旭. 不同耕作措施对陇中黄土高原土壤微生物功能多样性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- ZHANG Xu. Effects of different tillage measures on soil microbial functional diversity of the Loess Plateau in central of Gansu[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [89] 杨 倩. 黄土高原保护性耕作下轮作系统根际土壤质量及其微生物机制[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- YANG Qian. Rhizospheric soil quality and its microbial mechanism of rotation system under conservation tillage on the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [90] 许皎皎. 不同耕作方式对麦-玉两熟农田耕层土壤质量及呼吸组分的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- XU Jiao-jiao. Effects of different tillage methods on topsoil quality and respiration components in wheat-maize crop system[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.
- [91] Lupwayi N Z, Clayton G W, O'Donovan J T, et al. Soil microbiological properties during decomposition of crop residues under conventional and zero tillage[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2004, 84 (4): 411–419.
- [92] Guo L, Falloon P, Coleman K, et al. Application of the RothC model to the results of long term experiments on typical upland soils in northern China[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23(1): 63–70.
- [93] 王金洲, 卢昌艾, 张金涛, 等. RothC模型模拟华北潮土区的土壤有机碳动态[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6):16–21, 49.
- WANG Jin-zhou, LU Chang-ai, ZHANG Jin-tao, et al. RothC model simulation of soil organic carbon dynamics of fluvo-aquic soil in northern China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6):16–21, 49.
- [94] 赵雅雯, 王金洲, 王士超, 等. 潮土区小麦、玉米残体对土壤有机碳的贡献——基于改进的 RothC 模型[J]. 中国农业科学, 2016, 49 (21):4160–4168.
- ZHAO Ya-wen, WANG Jin-zhou, WANG Shi-chao, et al. Contributions of wheat and corn residues to soil organic carbon under fluvo-aquic soil area: Based on the modified RothC model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4160–4168.
- [95] Xu W, Chen X, Luo G, et al. Using the CENTURY model to assess the impact of land reclamation and management practices in oasis agriculture on the dynamics of soil organic carbon in the arid region of north-western China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(1): 30–37.
- [96] 郝 博. 基于 CENTURY 模型的杉木人工林的生产力模拟研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- HAO Bo. The simulation of net primary productivity of typical Chinese fir plantation based on CENTURY model[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
- [97] Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. Estimates of N₂O emissions and mitigation potential from a spring maize field based on DNDC model[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(12): 2067–2078.
- [98] 王 琳, 郑有飞, 于 强, 等. APSIM 模型对华北平原小麦-玉米连作系统的适用性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2480–2486.
- WANG Lin, ZHENG You-fei, YU Qiang, et al. Applicability of Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) in simulating the production and water use of wheat-maize continuous cropping system in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (11): 2480–2486.
- [99] 张小伟. 基于 APSIM 模型不同水分处理对旱地春小麦生长发育的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- ZHANG Xiao-wei. Effects of different water treatments on growth and development of spring wheat in dryland based on APSIM model[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [100] Liu J. Modeling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity, and production in China[J]. *Irrigation Science*, 2007, 26(1): 21–33.
- [101] Li C S, Zhuang Y H, Froking S, et al. Modeling soil organic carbon change in croplands of China[J]. *Ecological Applications*, 2003, 13 (2): 327–336.
- [102] Wang X C, Li J, Naveed T M, et al. Validation of the EPIC model using a long-term experimental data on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Mathematical and Computer Modeling in Agriculture*, 2011, 54(3/4): 976–986.
- [103] 李 广, 黄高宝, Bellotti W, 等. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2655–2663.
- LI Guang, HUANG Gao-bao, Bellotti W, et al. Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the Loess hill-gullied region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5):2655–2663.
- [104] Yang X M, Zhang X P, Fang H J, et al. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of northeast China: RothC model simulations[J]. *Environmental Management*, 2003, 32(4): 459–465.
- [105] 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.
- GAO Lu-peng, LIANG Wen-ju, JIANG Yong, et al. Dynamics of organic C in black soil of northeast China, simulated by CENTURY model I. Accumulation of soil organic carbon under natural conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 772–776.
- [106] Gao C S, Wang J G, Zhang X Y, et al. The evolution of organic carbon in Chinese mollisol under different farming systems: Validation and prediction by using CENTURY model[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(12): 1490–1496.
- [107] 丛日环. 小麦-玉米轮作体系长期施肥下农田土壤碳氮相互作用关系研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- CONG Ri-huan. Soil carbon and nitrogen interactions in typical cropland under long-term fertilization in the wheat-corn cropping system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [108] Han J, Jia Z K, Wu W, et al. Modeling impacts of film mulching on

- rained crop yield in northern China with DNDC[J]. *Field Crops Research*, 2014, 155: 202-212.
- [109] Guo S L, Wu J S, Coleman K, et al. Soil organic carbon dynamics in a dryland cereal cropping system of the Loess Plateau under long-term nitrogen fertilizer applications[J]. *Plant Soil*, 2012, 353 (1/2): 321-332.
- [110] 马玉芳, 蔡立群, 张仁陟. 不同耕作措施下土壤有机碳含量的模拟研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1546-1554.
MA Yu-fang, CAI li-qun, ZHANG Ren-zhi. Study on the simulation of soil organic carbon content under different tillage modes[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9):1546-1554.
- [111] 杨 轩, 谭广洋, 沈禹颖. 秸秆还田对旱作冬小麦后茬土壤水分的影响及其 APSIM 模拟[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 609-614.
YANG Xuan, TAN Guang-yang, SHEN Yu-ying. Soil moisture content under stubble retention after dry-framing winter wheat harvest based on APSIM model[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(4):609-614.
- [112] 金 琳, 李玉娥, 高清竹, 等. DNDC 模拟中国 20 年农田管理土壤碳变化[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1081-1085.
JIN Lin, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Analysis of the change of soil carbon under cropland management in China between 1981 and 2000 by DNDC[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41 (5): 1081-1085.
- [113] 童成立, 吴金水, 向万胜, 等. 长江中游稻田土壤有机碳计算机模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2002(3): 229-233.
TONG Cheng-li, WU Jin-shui, XIANG Wan-sheng, et al. Simulating of organic carbon changes in paddy soils in the middle basin of Yangtze River[J]. *Resources and Environment of the Yangtze River Basin*, 2002(3):229-233.
- [114] Huang Y, Yu Y Q, Zhang W, et al. Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149: 106-129.
- [115] 童成立, 吴金水, 郭胜利, 等. 土壤有机碳周转 SCNC 模型的研究与开发[J]. 计算机与农业, 2001(12): 10-12.
TONG Cheng-li, WU Jin-shui, GUO Sheng-li, et al. Developing of SCNC model for soil organic carbon turnover[J]. *Computer and Agriculture*, 2001(12):10-12.
- [116] 黄 耀, 孙文娟, 张 稳, 等. 中国陆地生态系统土壤有机碳变化研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 577-586.
HUANG Yao, SUN Wen-juan, ZHANG Wen, et al. Soil organic carbon change in China's terrestrial ecosystem[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2010, 40 (7): 577-586.
- [117] Yu Y, Huang Y, Zhang W. Modeling soil organic carbon change in croplands of China, 1980-2009[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 82/83:115-128.
- [118] 刘晓芳, 李晓婷, 李立军, 等. 不同耕作方式下旱作农田土壤酶活性与有机碳的关系研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(13):106-112.
LIU Xiao-fang, LI Xiao-ting, LI Li-jun, et al. Relationship between soil organic carbon and enzyme activity in rain-fed field under different tillage methods[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 34(13):106-112.