

土壤有机碳及其影响因素

李典友, 章玉成

皖西学院环境与旅游学院, 安徽 六安

Email: 13155399737@163.com

收稿日期: 2020年10月2日; 录用日期: 2020年10月14日; 发布日期: 2020年10月21日

摘要

文章综述了土壤有机碳的赋存状态及其变化对地球碳汇的影响, 重点分析了影响土壤有机碳的气候、土层深度、母质、地形、粘粒含量、时间、植被等因子的作用; 提出了增强土壤有机碳库存的措施, 主要有保护性耕作、提高土壤微生物的活性、施肥管理、退化土壤修复、灌溉等, 预测了未来土壤有机碳研究的主要方向。

关键词

土壤有机碳, 地球碳汇, 碳平衡

Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors

Dianyou Li, Yucheng Zhang

School of Environment and Tourism, West Anhui University, Liu'an Anhui

Email: 13155399737@163.com

Received: Oct. 2nd, 2020; accepted: Oct. 14th, 2020; published: Oct. 21st, 2020

Abstract

This paper summarized the occurrence of soil organic carbon and its change on the impact of the earth's carbon sink, focused on the impact of climate, soil depth, parent material, topography, clay content, time, vegetation and other factors on soil organic carbon storage, and put forward measures to enhance soil organic carbon inventory, including conservation tillage, improving soil microbial activity, fertilization management, remediation of degraded soil, irrigation, etc. The main research directions of soil organic carbon in the future are predicted.

文章引用: 李典友, 章玉成. 土壤有机碳及其影响因素[J]. 农业科学, 2020, 10(10): 803-810.

DOI: 10.12677/hjas.2020.1010123

Keywords

Soil Organic Carbon, Global Carbon Sink, Carbon Balance

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤作为陆地生态系统的重要组成部分,是碳元素的主要交换与贮存库。据相关研究估算,土壤对大气CO₂的贡献是燃烧化石燃料的10倍[1][2]。与其他用途的土壤相比,农田土壤碳库更为活跃,更容易受人类活动的强烈干扰,但同时也能够在规定时间内进行自我调节[3]。

由于全球范围内长时间的农业开垦,破坏了土壤与大气碳库间的碳平衡,同时还导致农田土壤有机碳以二氧化碳的形式排放到大气中[4],从而造成温室气体含量增加。所以国内外学者越来越重视农田土壤在碳固定中的作用[5]。

农田土壤有机碳储量还是判断其土壤质量的重要指标之一,其含量降低一方面造成农田的可持续利用性降低,另一方面还会可以导致农田土壤生态系统退化[6]。

基于以上认识,深入研究农田土壤有机碳库及其影响因素对全球生态系统碳平衡以及农田土壤利用的可持续性均具有非常重要的意义与价值。

2. 土壤碳库存量与土壤有机碳储量

2.1. 土壤碳库

土壤碳含量变化及土壤碳库变化规律预测已成为当前全球气候变化研究的热点之一。在全球碳循环中,陆地生态系统中的碳库起着重要的作用。陆地生态系统碳库主要以3种形式存在:植物碳库、凋落物碳库和土壤碳库[7]。全球陆地植被碳库碳总量在420~830 Pg之间,凋落物碳库碳总量在70~150 Pg之间[1]。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,对全球气候变化和人类生存环境有着重要的影响。土壤碳库(SCP) 1 m土层内碳储量约为3300 Pg (1 Gt = 10⁹ t = 10¹⁵ g = 1 Pg) [8],土壤碳库包括土壤有机碳库(SOCP)和土壤无机碳库(SICP),SCP中SOCP和SICP分别为1555 Pg和1750 Pg [2]。也有学者估计,全球陆地土壤碳库量为1300~2000 pg,是陆地植被碳库的1.5~3倍,是全球大气碳库的2倍多[7]。

2.2. 土壤有机碳储量

土壤有机碳库是指全球土壤中有机碳的总量。土壤有机碳主要分布于上层1 m深度以内,一些主要的热带土壤,如变性土、铁铝土和淋溶土上层1 m内的有机碳含量,分别占2 m深度范围总有机碳量的53%、69%和82% [7]。全球土壤有机碳总量可达1270 Gt。全球土壤上层1 m内的有机碳含量为1220 Gt,相当于总现存生物量(自然植被和作物)的1.5倍;在热带广泛分布的厚层土壤中,1 m以下有机碳储量达50 Gt。全球土壤有机碳每年分解释放到大气中的CO₂达到0.1~5.4 Pg/a,土壤有机碳库0.1%的变化将导致大气圈CO₂浓度1 mg/L的变化[9]。全球大气分室中的碳总量约为712 Pg,土壤有机质分室中的碳总量约为2500 Pg [10]。土壤中以有机质形式存在的碳是大气中的3倍多。土壤中有有机质的分解将在极大程度上影响大气CO₂浓度,与全球气温上升有直接关系[11]。

3. 影响土壤有机碳储量的因素

《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[12]。

人类在砍伐森林、开垦草地成为农田过程中, 使大量有机碳以 CO_2 形式排放到大气中。在大部分热带和亚热带土壤中, 有机碳的短期变化多局限于上层 30~50 cm [13]。土壤有机碳库主要集中分布与土壤表层部分, 因此很容易受外界侵蚀作用而发生明显的变化。在全球变化背景下, 表层土壤有机碳受到气温、降水变化的直接影响, 其含量变化将对全球大气 CO_2 (740 GtC [14])产生重要影响[14]。从宏观尺度上看, 土壤的有机碳含量依赖于气候、土层深度、时间、母质、黏粒含量、植被、地形等因子[15]。

3.1. 气候因素

气候是最重要的因子, 因为它决定了土壤环境的温度、植被的种类、光合物质生成量和土壤中微生物的活动强度, 因此对土壤有机碳的固定和矿化、分解排放过程有极大的影响。从整体上讲, 潮湿的气候导致森林植被地形成和灰土、淋溶土的发育, 而半干旱气候导致草原植被地形成和软土的发育[16]。

3.2. 土层深度

在其他因素稳定的情况下, 随着土壤深度的增加, 有机碳的年龄随之增大, 土壤有机碳含量在土层不同深度有较大差异, 往往深层土壤的有机碳含量虽少但更稳定。表层土壤各影响因素比较活跃, 虽然有机碳含量较高, 但变化较快。

3.3. 母质

母质通过影响土壤的通气性、透水性甚至土壤温度, 影响土壤中有有机物的腐殖化过程及矿化过程, 最终影响土壤有机碳含量。尤其是土壤粘粒对土壤有机质含量具有重要影响, 一方面表现在提高土壤有效水含量, 促进植物生长, 从而增加有机物的输入量; 另一方面粘粒具有比表面积和电荷密度很大等特性, 能够较强的吸附土壤中的有机物质, 并与之形成有机-无机复合体, 降低微生物对土壤有机质的分解, 这种作用被称作粘粒对土壤有机质的物理保护作用, 这一作用得到较多的试验验证[16]。

3.4. 地形

不同海拔高度土壤有机碳库含量有所差异, 原因比较复杂, 其影响因素既包括生物因素的改变, 如参与有机碳矿化过程的土壤动物和土壤微生物区系与种类组成的改变, 以及植被类型改变后凋落物性质的改变, 也包括非生物因素的间接影响, 如土壤温湿度、土壤质地等物理和化学性质的改变等。

3.5. 黏粒含量

已有研究表明, 粘粒对土壤有机碳有很好的保护作用, 由于土壤粘粒具有很大的比表面积与电荷密度, 对土壤有机碳有较强的吸附能力, 并能与大分子有机物质(特别是腐殖质)形成较稳固的有机无机复合体, 而这些复合体还能形成更稳固的团聚体结构, 增强有机碳的积累作用[9]。粘粒含量主要是影响基质的水/气状况以及营养物质的可给性和微生物的活性, 其含量影响外源有机物(有机化合物、植物残体)及其转化产物的分解速率或稳定性[17] [18]。

3.6. 时间

土壤有机碳的含量是一个不断累积的过程, 随着时间的不断增加, 土壤有机碳含量发生相应的变化。

有机碳的形成累积过程也是由快变慢的, 开始时候比较迅速, 以后逐渐变慢, 并最终达到一个平衡值。Stevenson 认为, 土壤有机碳的积累在头几年很迅速, 以后逐渐变慢, 并最终达到平衡。细母质土壤中这一过程需要 110 年, 而粗母质土壤中则需要 1500 年[16]。

3.7. 植被

植被是影响土壤有机碳含量的直接因素, 不同的植被类型对土壤有机碳的碳汇碳源有不同的影响, 植物有机碳的来源很大一部分是植被的根系分泌物以及残落物。草原土壤的腐殖质含量通常较高, 超过其它通气良好的土壤, 因此, 草原生态系统含有较多的有机碳; 荒漠、半荒漠和某些热带土壤的腐殖质含量最低[19] [20]。如果草地退化或者林地砍伐, 势必会降低土壤有机碳含量。

4. 提高农田土壤有机碳储量的措施

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[21]。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[22]。

研究表明农田土壤碳储量大约为 140~170 Pg, 占到全球陆地土壤碳储量的 10%左右, 在全球陆地碳循环中发挥着重要的作用[23]。土壤有机碳分解是指有机碳在土壤微生物(包括部分动物)、土壤酶的参与下分解和转化的过程[24]。土壤有机碳分解释放 CO_2 的过程被称为碳矿化, 它反映了土壤有机碳从有机物变成无机物(CO_2)的过程[25] [26]。

4.1. 保护性耕作

土壤固碳是指通过采用相应管理措施提高土壤中有机和无机碳含量, 将大气中的 CO_2 固持在土壤碳库中, 而目前农田土壤固碳的研究主要集中在土壤有机碳[27]。传统耕作方式使土壤有机碳失去保护暴露出来, 加速土壤有机碳的分解, 而土壤有机碳含量的减少将直接导致土壤肥力下降, 影响农业生产力和土壤固碳能力。土壤有机碳库的平衡由输入和输出两方面的因素共同决定。因此, 土壤固碳可以通过以下两类途径来实现。1) 通过提高作物的生物量来增加土壤碳库输入; 2) 通过减少干扰等途径降低农田土壤碳的分解[28], 保护性耕作即通过这 2 类途径来促进土壤有机碳的积累和提高土壤固碳能力[29]。张四海[30]对有机碳库的储量受农业耕作措施的影响研究表明, 保护性耕作在表层土壤中能提高作物根系生物量 1.0%~142.9%; 增加土壤微生物的生物量 2.2%~140%。免耕还显著降低土壤的呼吸强度, 在 0.9%~72.6% 之间, 从而减少碳的损失。免耕还提高了土壤团聚体数量, 从而有利于有机碳在土壤中的固持。

4.2. 提高土壤微生物活性

土壤微生物是有机物的主要分解者, 在陆地生态系统碳循环中扮演着重要角色, 土壤微生物活性与底物性质和环境因子密切相关, 环境条件的改变对微生物的分解活动影响很大。由于土壤呼吸在全球陆地生态系统碳收支中起着举足轻重的作用, 因而土壤呼吸发生的任何变化都将进一步影响到全球碳循环。土壤微生物活性是评价土壤呼吸的主要指标[30], 微生物活性提高[31]加速土壤有机碳的分解。影响土壤微生物活性的因素很多, 主要包括来自有机物自身的物理化学性质和非生物环境因子、生物因子以及人类活动等。一般认为土壤微生物是有机物的主要分解者, 土壤动物在多数情况下主要起一种破碎作用[32]。了解土壤微生物对有机物分解的影响特征及其与环境因子之间的关系, 对于预测陆地生态系统碳循环变化具有重要意义[33]。

4.3. 施肥管理

施肥影响农田土壤固碳的机制主要有以下两个方面：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[34]。Gijssman [35]等研究认为，在施用鸡积肥后的土壤分析表明，在所有团聚体中，1.2%有机碳是易于分解的，小于0.8%有机碳是被团聚体结构物理保护，97%以上有机碳是稳定部分。Aoyama [36]等发现施加有机肥能够增加在小与大团聚体中保护性碳，而NPK肥料对保护性碳没有影响。佟小刚[37]为探明我国典型农田土壤长期不同施肥下有机碳库的变化特征，选择红壤、中层黑土、厚层黑土、灰漠土、黑垆土及潮土6种不同气候区域的农田土壤，通过超声和离心法、湿筛和重液悬浮法及高锰酸钾氧化法分别得到不同大小颗粒有机碳库、团聚体有机碳库及氧化活性有机碳库，分析长期施肥下土壤有机碳库在含量、分布、时间序列及区域上的变化特征，同时分析不同有机碳库之间及其与土壤肥力的关系。17年连续长期配施有机肥(M、NPKM、1.5NPKM)，灰漠土和中层黑土中有机碳组分库均随施肥时间延长而显著增加，不同有机碳库年均增加量差异较大，其中砂粒有机碳库最高，平均达到 $0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ；细粘粒有机碳库最低，平均仅为 $0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。长期秸秆还田(NPKS)和撂荒(CK0)对土壤有机碳库时间序列变化表现出维持或是增加的作用。不同大小颗粒有机碳组分库、团聚体有机碳组分库、氧化活性有机碳库内部及其总有机碳之间均为相互促进增加的关系。微生物副产物是稳定土壤团聚体的重要胶结剂。稳定的团聚体为SOC提供了抗微生物分解的物理保护。

综上所述，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。

4.4. 退化土壤修复

农田土壤由于长期强烈的农业耕作，有机碳含量严重下降。就中国全国尺度来看，农田土壤有机碳含量($13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)只有非耕地($26.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的48.5%，耕作使有机碳减少了51.5% [38]。因此对耕作土壤进行修复也可以增加农田土壤碳汇效应。对耕作土壤可以通过退耕还林、还草和其他修复措施来实现[39]。若按R Lal等(1996)提出的假设全球土壤碳固存率为 0.25 tC/a ，则通过修复退化土壤带来的碳固存潜力为 0.025 t/a [40]。而有研究表明如果采用最佳管理措施，则修复退化土壤还可以有更高的固碳潜力[41]。R Lal (2002)根据我国农业土壤碳库资源判断提出我国农业土壤固碳最大潜力是退化土壤的恢复，其次才是农业耕作管理下的土壤固碳[41]。

4.5. 灌溉

灌溉作为农田管理措施中的一项重要内容，也是影响土壤有机碳库的重要因素[42]。国内外许多学者对此展开了一系列研究。有学者[43]研究认为灌溉是最具固碳潜力的农田管理措施，直接影响着农田土壤碳的输入、输出与碳储量[44]。Martens等[45]研究发现灌溉后农田土壤有机碳含量高于旱地和天然草地。Masto等[46]对印度半干旱地区小麦和水稻农田的研究也发现，灌溉可以增加表层0~15 cm土壤有机碳的含量。

5. 未来研究展望

土壤是仅次于海洋的全球第2大有机碳库，而农田土壤有机碳库也是地球表层系统中最大、最具有活动性的生态系统碳库之一，对维持全球碳平衡具有重要意义。研究农田土壤有机碳，对农作物的产量也具有重大的意义。

5.1. 加强农田土壤碳汇效应与机理研究

增强农田土壤碳汇效应是环境和经济双赢战略,但目前关于农田碳汇效益的研究还不多,今后需要加强研究,也可以积极开展促进增强碳汇效应措施研究。为农业生产中固碳减排生产应用提供理论依据。

5.2. 加强农田生态系统土壤不稳定碳库的研究

土壤呼吸作用的变化能显著地减缓或加剧大气中 CO₂ 的增加,进而影响气候变化。已知的影响土壤呼吸作用的直接因素是土壤环境,包括土壤质地、酸度、有机碳和水热条件等。已有研究表明土壤呼吸作用引起的土壤 CO₂ 通量释放的增加,主要源于那些最短更新时间的不稳定碳库。所以加强农田生态系统土壤不稳定碳库的研究,利于揭示土壤呼吸作用释放 CO₂ 的机理,进而对气候变化的研究具有重要意义。

5.3. 加强对碳素的累积过程的研究

碳素营养是植物的生命基础。研究农田生态系统的碳循环,不仅要加强对土壤中有有机碳的研究,还要加强对农作物光合速率、碳素的累积过程的研究。

5.4. 加强生物因素对土壤有机碳的影响研究

生物因素是指参与分解的异养微生物和土壤动物群落的种类、数量、活性等。有机物的分解是在土壤微生物和土壤动物相互分工、相互促进下共同完成系统的物质循环过程。人为活动以及气候温度变化与土壤中生物活性的变化相结合的研究,对土壤有机碳的源汇效应具有重要影响。

5.5. 加强土地利用/土地覆盖变化(Land Use and Land Cover Change, LUCC)研究

对土壤有机碳的影响研究,国际上1996年通过的LUCC研究计划以五个中心问题为导向:1)近三百年来人类利用(human use)导致的土地覆盖的变化;2)人类土地利用发生变化的主要原因;3)土地利用的变化在今后50年如何改变土地覆盖;4)人类和生物物理的直接驱动力对特定类型土地利用可持续发展的影响;5)全球气候变化及生物地球化学变化与土地利用与覆盖之间的相互影响。目前已确定的有关研究重点是:①土地覆盖变化状况的评估;②全球土地利用与土地覆盖变化的建模与预测;③全球、区域和局地不同空间尺度土地利用和土地覆盖变化的不同驱动力之间的联系;④数据开发活动与数据信息系统。

基金项目

安徽省教育厅自然科学重点项目(KJ2017A404)。

参考文献

- [1] Yang, W., Patricia, C., Giorgio, C., *et al.* (2015) Influence of a CO₂ Long Term Exposure on the Mobilisation and Speciation of Metals in Soils. *Chemieder Erde-Geochemistry*, **75**, 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2015.10.003>
- [2] Roberto, M., Sara, M., Paola, B., *et al.* (2015) Organic Mulching, Irrigation and Fertilization Affect Soil CO₂ Emission and C Storage in Tomato Crop in the Mediterranean Environment. *Soil& Tillage Research*, **152**, 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.001>
- [3] 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): 384-394.
- [4] Lin, Z.B. and Zhang, R.D. (2012) Dynamics of Soil Organic Carbon under Uncertain Climate Change and Elevated Atmospheric CO₂. *Pedosphere*, **22**, 489-496. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60033-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60033-2)
- [5] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题: 兼谈开展中国水稻土有机碳固定研

- 究的建议[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(3): 100-109.
- [6] Dalal, R.C. and Chan, K.Y. (2001) Soil Organic Matter in Rain Fed Cropping Systems of the Australian Cereal Belt. *Australian Journal of Soil Research*, **39**, 435-464. <https://doi.org/10.1071/SR99042>
- [7] Sombroek, W.G., Nachtergaele, F.O. and Hebel, A. (1993) Amounts, Dynamic and Sequestering of Carbon in Tropical and Subtropical Soils. *Ambio*, **22**, 417-426.
- [8] Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. and Stewart, B.A. (1997) Soil Processes and the Carbon Cycle. CRC Press LLC, Boca Raton.
- [9] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16-191.
- [10] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 189-195.
- [11] Schlesinger, W.H. (1990) Evidence from Chrono Sequence Studies for a Low Carbon Storage Potential of Soils. *Nature*, **348**, 232-234. <https://doi.org/10.1038/348232a0>
- [12] 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.
- [13] Hard, J.W., Sundquist, E.T., Stallard, R.F., et al. (1992) Dynamics of Soil Carbon during Deglaciation of the Laurentide Ice Sheet. *Science*, **258**, 1921-1924.
- [14] 陈庆强, 沈承德, 易惟熙. 土壤碳循环研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(6): 555-562.
- [15] Jenny, H. (1980) The Soil Resource Origin and Behavior. Springer, New York, 325-390.
- [16] 任秀娥, 童成立, 孙中林. 温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2245-2250.
- [17] Tate, R.L. (1987) Soil Organic Matter: Biological and Ecological Effects. John Wiley & Sons, New York, 238-259.
- [18] Paul, E.A. and Clark, F.E. (1989) Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press Inc., New York, 1-31, 91-130.
- [19] 王发刚, 王启基, 王文颖, 等. 土壤有机碳研究进展[J]. 草业科学, 2008, 25(2): 48-54.
- [20] Bremer, E., Janzen, H.H. and Johnston, A.M. (1994) Sensitivity of Total, Light Fraction and Mineralizable Organic Matter to Management Practices in a Lethbridge Soil. *Canadian Journal of Soil Science*, **74**, 131-138. <https://doi.org/10.4141/cjss94-020>
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 张文菊, 徐明岗, 丛日环, 等. 长期施肥对我国典型农田土壤碳平衡的影响[M]//面向未来的土壤科学(下册), 2012: 1654-1657.
- [24] 唐英平. 土壤呼吸敏感性及其土壤有机碳分解速率的研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2008.
- [25] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 530-538.
- [26] 艾丽, 吴建国, 朱高, 等. 祁连山中部高山草甸土壤有机碳矿化及其影响因素研究[J]. 草业学报, 2007, 16(5): 22-33.
- [27] Lal, R. (2007) Carbon Management in Agricultural Soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **12**, 303-322. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-9036-7>
- [28] Lal, R. (2008) Carbon Sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **363**, 815-830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>
- [29] Naudin, K., Goz, E., Balarabe, O., et al. (2011) Impact of No Tillage and Mulching Practices on Cotton Production in North Cameroon: A Multi-Locational on Farm Assessment. *Soil and Tillage Research*, **108**, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.002>
- [30] 彭少麟. 热带亚热带恢复生态学研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 275-307.
- [31] 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.
- [32] 田兴军, 立石贵浩. 亚高山针叶林土壤动物和土壤微生物对针叶的分解作用[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 257-263.
- [33] 杨钙仁, 童成立, 张文菊, 等. 陆地碳循环中的微生物分解作用及其影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(4):

605-609.

- [34] 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.
- [35] Gijssman, A.J. and Sanz, J.I. (1998) Soil Organic Matter Pools in a Volcanic-Ash Soil under Fallow or Cultivation with Applied Chicken Manure. *European Journal of Soil Science*, **49**, 427-436. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.4930427.x>
- [36] Aoyama, M., Angers, D.A. and Dayegamiye, A.N. (1999) Particulate and Mineral Associated Organic Matter in Water-Stable Aggregates as Affected by Mineral Fertilizer and Manure Application. *Canadian Journal of Soil Science*, **79**, 295-302. <https://doi.org/10.4141/S98-049>
- [37] 佟小刚. 长期施肥下我国典型农田土壤有机碳库变化特征[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [38] 吴乐知, 蔡祖聪. 农业开垦对中国土壤有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 118-121.
- [39] Cole, V., Cerri, C., Minami, K., *et al.* (1995) Agricultural Options for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions. IPCC, Working Group 2, Cambridge University Press, Cambridge, 748-771.
- [40] 赵荣钦. 农田生态系统碳源/汇的时空差异及增汇技术研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2004: 1-55.
- [41] Vandenbygaart, A.J., Gregorich, E.G., Angers, D.A., *et al.* (2004) Uncertainty Analysis of Soil Organic Carbon Stock Change in Canadian Cropland from 1991 to 2001. *Global Change Biology*, **10**, 983-994. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00780.x>
- [42] Wang, Z.M., Zhang, B., Song, K.S., *et al.* (2010) Spatial Variability of Soil Organic Carbon under Maize Monoculture in the SongNen Plain, North East China. *Pedosphere*, **20**, 80-89. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(09\)60285-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(09)60285-X)
- [43] Follett, R.F. (2001) Soil Management Concepts and Carbon Sequestration in Cropland Soils. *Soil and Tillage Research*, **61**, 77-92. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00180-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00180-5)
- [44] Qian, Y., Follett, R.F. and Kimble, J.M. (2010) Soil Organic Carbon Input from Urban Turf Grasses. *Soil Science Society of America Journal*, **74**, 366-371. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0075>
- [45] Martens, U., Lal, R., Slater, B., *et al.* (2005) Atmospheric Carbon Mitigation Potential of Agricultural Management in the Southwestern USA. *Soil and Tillage Research*, **83**, 95-119. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.011>
- [46] Mastro, R., Chhonkar, P., Singh, D., *et al.* (2009) Changes in Soil Quality Indicators under Long-Term Sewage Irrigation in a Subtropical Environment. *Environmental Geology*, **56**, 1237-1243. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1223-2>