

农田土壤有机碳的影响因素及其研究

李小涵¹, 郝明德^{1,2}, 王朝辉¹, 李利利¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 大气温室效应气体 N_2O 、 CO_2 增多与全球气温变暖有着密切的关系, 由于农业活动导致的碳排放量占碳总排放量的 25%, 因此研究农田土壤有机碳的影响因素, 对增加农田碳素固定和保持, 减少由于不合理的土地使用而导致大量 CO_2 的排放, 维持农业和生物圈生态系统的可持续发展有着重要意义。本文分析了温度、水分、土地开垦、休闲和撩荒、耕翻、轮作、秸秆还田、肥料管理等对土壤有机碳的影响。减少翻耕次数, 增加秸秆还田, 优化氮、磷、钾等养分用量及配比, 是提高农田, 尤其是旱地农田土壤有机碳含量, 培肥、改良土壤的重要途径。

关键词: 土壤; 有机碳; 耕作; 水分; 养分; 地表覆盖

中图分类号: S154.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7601(2008)03-0176-06

土壤有机碳指进入土壤的各种动植物残体、微生物体及其分解、合成的有机物质中的碳。陆地生态系统碳循环是全球碳循环的重要组成部分, 而土壤碳库是地球陆地生态系统中最大的碳贮藏库。据估计, 全球以有机质形式贮存在土壤中的碳大约有 1 200~ 1 500 Pg^[1], 相当于地表生物群落碳素存贮总量(500~ 600 Pg)的 2~ 3 倍, 大气碳素总量(750 Pg)的 2 倍^[2]。土壤无机碳的数量也很大, 为 700~ 1 000 Pg, 但它的更新周期以千年为尺度^[3]。土壤有机碳却不同, 由于受土壤和生物生命活动的影响, 特别是农业土壤由于受到人类生产活动的影响, 其数量和生物活性处在不断的变化之中, 是全球碳库中的最活跃部分之一。在农田土壤中, 有机碳主要来源于以各种形式进入土壤的有机物料, 尤其是不同形式进入土壤的农作物残体占主要地位, 如秸秆、残茬、粪肥、厩肥、翻压的绿肥等, 达 80% 以上。土壤有机碳数量及其生物活性的变化, 不仅影响土壤肥力, 而且还可以通过多种途径影响土壤向大气释放或固持大气中的 CO_2 , 从而影响土壤与大气之间的碳素平衡^[4]。

从 19 世纪中叶到 21 世纪初, 大气中的温室效应气体 CO_2 浓度由从 280 mg/L 上升到了 365 mg/L, 其中 1990~ 1999 年间, CO_2 浓度的增加速率为每年 0.9~ 2.8 mg/L^[5]。按这一趋势估计, 到 2050 年大气中的 CO_2 浓度将升高到 560 mg/L, 北温带湿润气候地区的土壤有机碳将因此减少约 7%^[6]。

从全球范围来看, 农业是温室效应气体的一个重要来源, 农业活动导致碳的排放量占碳的总排放量的 25%^[7]。在我国的研究工作表明, 到 2050 年, 南方地区年均气温将升高 1.0~ 1.5 e, 西北地区升高 2.5~ 3.0 e^[8]; 到 2099 年西北地区可能升高 2.79~ 4.50 e^[9]。农业生态系统每年通过农作物生长可以大量固定大气中的碳素, 但这部分进入农业生态系统的碳素又会有大约 90% 通过各种转化途径返回大气。除在农产品中累积外, 仅有一小部分以有机碳的形式存在于土壤中。因此, 加强土壤碳库管理, 增加土壤对大气碳素的固定和保持, 降低土壤的 CO_2 排放量, 缓解全球温室效应, 对农业和整个生物圈生态系统的可持续发展都有重要意义。农业土壤中的有机碳及其变化一直是农业与生态环境科学领域研究的热点问题。本文就影响农业土壤有机碳及其变化的人为、环境因素与调控方面的研究工作进行总结, 并对应该进一步研究的问题进行了分析。

1 影响农田土壤有机碳的因素

1.1 温度

温度是控制土壤微生物活性及有机质分解速率的关键因素。温度升高将导致微生物种群增长, 从而促进土壤有机碳分解。很小的土壤温度变化就会使土壤成为大气 CO_2 的重要源^[10]。在平均温度为 5 e 时, 温度每上升 1 e 会引起全球范围内 10% 的土

收稿日期: 2007-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671107 和 30370843); 中科院知识创新方向性项目(KSCX2-YW-424-3, KSCX1-YW-15-04); 国家科技支撑项目(2006BAD05B07); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0852)

作者简介: 李小涵(1971), 女, 陕西永寿人, 主要从事土壤碳氮方面的研究。E-mail: lxh-hx12005@tom.com.

通讯作者: 王朝辉, E-mail: W2zhaohui@263.net.

壤有机质丧失^[11], 相当于 1.1~ 33.8 Pg 碳释放大气中^[12]。而且温度每升高 10e, 土壤有机质的分解速度会加快 2 倍^[13, 14]。但也有研究表明, 在年平均温度介于 10~ 20e 的区域, 温度上升将导致土壤有机碳蓄量增加^[15]。但随着温度继续升高, 土壤碳的矿化率又会增加^[16], 在平均温度为 30e 时, 温度每升高 1e 会使得有机碳损失 3%^[11]; 温度高于 36e 的条件下, 继续升高温度对有机碳分解的促进作用又会降低^[14]。吴金水^[8]等预测, 由于温度升高, 到 2050 年我国亚热带和黄土高原地区农田土壤有机碳积累量将减少 3.6%~ 10.9%。虽然黄土高原地区的气候条件较有利于土壤有机碳的积累, 减少幅度会略低于亚热带地区, 但由于新鲜有机碳的输入量有限, 土壤有机碳的积累水平仍然较低。

1.2 水分

水分是影响土壤有机碳的另一重要因素。干湿交替季节, 由于土壤团聚体崩溃, 团粒内部受保护的有机碳被暴露出来, 土壤呼吸强度会在极短的时间内大幅度提高, 使有机碳矿化分解量增加。干燥或干旱会引起部分土壤微生物死亡, 在一定程度上加速或减缓有机碳的分解速率, 改变土壤中的有机碳储量; 降雨后, 土壤微生物量会激增, 促进微生物的活性增强, 激发土壤呼吸迅速增强^[17, 18]。降雨对土壤呼吸速率的影响又因土壤温度状况而异^[19], 两者的综合作用决定了土壤碳库的变化方向和大小^[20]。适宜的气温和土壤水分含量有利于激发微生物活性, 促进土壤有机碳分解, 使土壤有机碳周转率加快, 积累量减少。但从长远来看, 降水适宜会促进植物生长, 提高植物生物量, 促进土壤有机碳增加和累积。自然植被条件下, 每 1 mm 降雨所导致的 0~ 10 cm 土层有机碳增加速率可达一般农田的 2 倍^[21, 22]。在干旱与半干旱农业区, 补充灌溉、增加降水的收集、就地入渗与保持, 对提高植物生物量和土壤有机碳固持有重要意义; 但在湿润地区, 排水通常会引起土壤温度升高, 提高有机质的降解速率, 导致土壤有机碳含量降低^[23]。

不少研究证明, 旱地和淹水土壤有机物质分解存在显著的差异, 原因主要是前者为好气分解, 后者是嫌气分解。好气呼吸由于释放能量高, 土壤有机物质分解快; 嫌气分解的发酵过程所释放的能量远低于好气分解, 有机质降解慢^[24]。

1.3 土地开垦

影响土壤有机碳固定的因素很多。除自然因素外, 土地利用的方式及其程度、变化是影响土壤有机碳库数量、组成及转化速率的另一重要因素^[25, 41]。

如西北黄土高原区, 农田土壤有机质含量仅为 5.9~ 11.5 g/kg^[26], 远低于东北地区的农田土壤及南方水田土壤。除气候因素外, 历史上长期的掠夺式经营管理是重要原因: 乱垦滥伐、过度放牧、水土流失、土地沙化都加剧了自然生态系统的生物量减少, 土壤有机碳库降解加速, 土壤有机碳含量降低。

研究表明, 草地土壤被开垦种植作物 6 年后, 其有机质含量明显降低, 同时硝态氮的含量却达到了连续种植作物 60 年的土壤硝态氮水平, 说明开垦后土壤的有机质矿化加速, 在向大气释放大量 CO₂ 的同时, 形成了大量矿质态氮并累积于土壤中; 而长期种植作物的土壤在退耕还草 5 年后, 由于耕作频率减少、植物地下部生物量及还田的残茬增加, 土壤表层的有机碳含量明显升高, 特别是在砂质土壤上, 表层土壤的有机碳和氮达到甚至高于原始草地的水平^[27, 28]。

1.4 休闲和撩荒

休闲和撩荒主要通过植被的自然演替来恢复土壤肥力。但土地休闲, 特别是夏季休闲也会引起土壤有机碳含量降低。主要原因在于夏季温度较高, 土壤微生物活性增强, 这时休闲不但不能给土壤增加新的作物残体, 还使有机质的降解加速^[29, 30]。就撩荒而言, 如果开垦地在撩荒前破坏非常严重, 土壤有机碳的自然恢复将极为有限。有研究表明^[31]: 轮作后撩荒 45 年, 碳损失 89%, 氮损失 75%, 而要恢复到开垦以前状态的 95%, 则碳需要 230 年, 氮需要 180 年。增加土地覆盖和作物残茬还田可降低土壤侵蚀, 改善有机质和养分循环, 最终为植物创造更有利的生长环境。降水少的旱地, 夏季休闲常会因地表无植被覆盖, 在风蚀作用下造成土壤有机碳大量损失。连续 12 年的田间定位试验表明, 与小麦) 休闲种植方式相比, 小麦) 玉米) 谷子连作可使 0~ 10 cm 土壤的有机碳含量提高 20%^[32, 33]。说明减少休闲时间, 提高作物播种指数是增加土壤有机碳存贮量的一种有效方式。

1.5 耕翻

耕翻会改善土壤通气性, 增强微生物活动, 增加土壤有机质与空气的接触面积, 因此通常会导致土壤有机碳降解过程加速。在连续免耕 9 年的小麦地上进行的试验表明, 每年在小麦播种前耕翻 0~ 15 cm 深的土壤, 经过 3 年后土壤有机碳比仍保持免耕的土壤降低了 5.6%^[34]。免耕 10 年的土壤上, 连续 2 年 20~ 25 cm 的耕作后也发现有有机碳降低了 5.0%^[35]。在旱地土壤上, 12 年的长期轮作定位试验表明, 免耕使土壤每年大约固定碳素 233

kg/hm², 少耕每年固碳 25 kg/hm², 传统耕作使土壤碳素减少 141 kg/hm² [33]。但在连续 9 年种植春小麦的地块上发现, 浅耕 5~7.5 cm 可有效防治杂草, 且对小麦籽粒产量、蛋白质含量无不良影响, 更无迹象表明对土壤有机质、生物量碳及氮素矿化有明显影响 [36]。

传统的耕作方式破坏土壤团聚结构, 改变土壤的通气性和孔性, 使其温度、水分状况得以改善, 从而使微生物活性提高, 加速了土壤有机碳的分解。免耕不搅动土壤, 土壤团聚体数量和稳定性有所增加, 且减少了团聚体内部有机质的分解。在长期免耕的情况下, 土壤耕层变浅, 植物残体及连年施入的有机肥也会积累于表土, 可供植物、微生物维持生命的能量充足, 植物根系多集中于表土层, 根的残茬及大量的根系分泌物也加剧了微生物的繁衍, 从而使土壤表层有机碳含量增加显著 [37], 但不利于根系深扎, 因此免耕一段时间后, 需进行一次深耕 [38]。

1.6 轮作

轮作是指在同一块耕地上将不同类型的作物, 按一定顺序在一定年限内循环种植。轮作能够改变进入土壤的作物残茬, 有利于控制杂草和病虫害防治, 与保护性耕作技术结合, 还能够改善土壤物理特性, 减少土壤侵蚀。轮作是增加土壤有机质含量, 提高土壤肥力的重要措施。

由于轮作改变了作物残体或根系的数量、种类, 从而影响到土壤有机碳的固定、矿化, 以及土壤有机碳的数量 [39]。对小麦-牧草轮作系统的研究表明, 随着牧草种植次数增加, 土壤有机碳含量呈现出增高趋势 [40], 豆科) 禾本科植物轮作能较快地增加土壤有机碳的贮存 [41]。因此, 选择一些具有高的生物量或高 C/N 的植物与作物轮作, 可增加进入土壤的根茬或残体数量, 减少土壤水分的地表蒸发, 使土壤的持水和保水能力增强, 从而增加土壤有机碳的固定。这对保持和提高农业生态系统的可持续发展能力非常重要。陈福兴等 [42] 对湘南地区油菜) 早稻) 晚稻, 黑麦草) 早稻) 晚稻, 紫云英) 早稻) 晚稻 3 种轮作方式进行了 10 年的长期定位试验研究, 发现 3 种轮作结合茎秆还田, 土壤有机质含量都有增加, 土壤蓄存的氮素也随之增加。但邹焱 [43] 等在洞庭湖地区的研究表明, 单一种植水稻的水田, 土壤有机碳和氮含量最高; 水旱油菜轮作 15 年后土壤有机碳平均下降 11.19%, 全氮下降 10.33%; 水田改旱地, 栽种苧麻 1~5 年后有机碳含量下降了 35.57%, 全氮下降 31.61%。也有研究发现, 无论耕作方式如何, 作物轮作或休闲均不能提高土壤有机碳的含

量 [34, 40]。

1.7 秸秆还田

土壤有机碳含量由有机碳输入和输出之间的平衡决定。有机肥施入和秸秆还田是农田土壤有机物料输入的主要途径。秸秆和残茬等作物残体覆盖地表可反射太阳光线, 避免阳光直接照射地表, 从而使土壤温度变化缓和, 在春夏季节通常会偏低, 而秋冬季节又偏高。长期田间试验发现, 秋冬季节作物残茬覆盖的土壤 2.5, 5.0 和 10 cm 深处的温度比无覆盖对照处理高出 3.9~5.3 e [44]。同时, 由于秸秆覆盖于地表, 减少了作物残体与土壤有机质的接触, 加之与土壤内部相比, 地表的微气象条件并不利于有机残体的降解, 从而碳及其它养分从有机残体到土壤, 再到植物的循环利用速率明显降低。另外秸秆覆盖所引起的春夏季节地表温度降低, 也会阻止表层土壤的有机碳降解。在一种植大麦的田块, 持续免耕和秸秆还田 11 年后发现, 0~15 cm 表层土壤的有机碳存贮量由 4 mg/hm² 增加到了 10 mg/hm², 有机碳含量增加了 14%~31% [45]。另一长期定位试验也表明, 与不覆盖秸秆相比, 秸秆覆盖使土壤的有机碳贮量提高 5~7 mg/hm² [46]。大量工作证明, 每年至少应向土壤归还 2~4 mg/hm², 才可以维持土壤碳库的收支平衡 [47]。对连续 5 年地表覆盖秸秆的土壤进行测定表明, 土壤有机碳库增加的同时, 0~15 cm 的土壤水分也比无覆盖对照也高出 7.2% [48]。

作物秸秆及土壤的水分情况也是影响秸秆还田效果的重要因素。在 24 e 条件下 [49], 当土壤含水量为 300 g/kg 和 500 g/kg 时, 小麦秸秆有机碳分解较快, 而在 200 g/kg 和淹水条件下则分解较慢。在旱田和水田的比较试验中发现, 在稻田使用有机肥后, 土壤有机质增加, 而旱地无明显增加 [50]。这可能是由于水田嫌气条件下植物残体和土壤有机质的分解速率低于旱地好气条件。但也有试验表明淹水土壤中秸秆和厩肥的有机碳年矿化量显著高于旱地 [4]。

1.8 肥料管理

肥料管理对土壤有机碳的影响较为复杂。因土壤类型、管理方法、栽培模式和作物种植的类型而变化 [51, 28]。长期不施肥或单施氮肥, 土壤中有机碳会有下降趋势, 但此后经过一段时间渐渐趋于平衡。这可能是作物根茬以有机物的形态归还给土壤, 使土壤有机碳在逐渐降低的过程中趋于平衡 [38]。连续进行 23 年的小麦多点长期定位试验表明, 当氮肥用量较低时, 土壤有机碳含量没有明显增加, 只有当

氮肥用量超过作物最大产量所要求的施肥量时, 土壤有机碳含量才表现出明显的增加^[52]。氮肥种类不同对土壤有机碳的影响亦不相同。22 年的凤梨草地长期定位试验结果表明, 施用硝酸铵增加土壤有机碳的效果明显优于尿素, 这可能和硝酸铵施于地表后氨的挥发损失少, 作物吸收多, 牧草生物量增加数量大有关^[53]。

施肥不仅改变土壤有机碳的数量, 还影响土壤有机碳的组成。长达 27 年的牧草试验还发现, 在草地土壤上长期施用氮肥可增加土壤对大气碳素的固定, 土壤有机碳及其轻质部分均随施氮量增加而呈二次曲线增加, 其中轻质有机碳的增加速率要比有机碳总体增加快, 说明轻质有机碳对氮肥的反应更敏感, 可作为外源氮素对土壤碳库影响的指标^[54]。在北美大草原硫缺乏地区, 氮硫同时施用不仅可以提高土壤的有机碳含量, 同时还使轻质有机碳、土壤有机氮 (Soil Organic N) 及轻质有机氮 (light fraction organic N) 明显增加^[55]。田间长期定位试验还表明, 土壤有机质的 C/N 比在施氮量低时随氮肥用量增加而升高; 施肥量高时反而降低, 说明少量的氮肥投入会引起土壤有机质矿化的激发效应, 促进有机碳降解, 释放出较多的 CO₂, 以及可供作物吸收利用的矿质态氮^[52, 38]。

2 有待于进一步研究的问题

土壤碳库的动态平衡是土壤肥力保持和提高的重要内容, 直接影响作物产量^[56]。土壤有机质按密度可分为重质和轻质, 轻质有机质主要由大的、未分解的植物根系、落叶和植物残体碎片组成, 可能还包括真菌的菌丝, 孢子, 种子, 木炭和动物残骸。含有丰富的碳和氮, 既为土壤微生物的活动提供能量来源, 也是作物养分的主要氮素来源。大量资料表明: 轻质有机质对培肥土壤、增加土壤团粒结构有着非常重要的作用。不合理的农耕措施导致了土壤轻质有机质的大量损失。在我国北方旱地, 收获后焚烧作物根茬、秸秆已成普遍现象, 不仅使本来已被植物固定的 CO₂ 重新释放到大气, 造成了农田土壤有机碳源的大量损失。因此应注重秸秆直接或粉碎还田, 增加农田土壤有机物料输入, 提高土壤有机碳含量。休闲或频繁翻耕可导致更多的土壤有机碳被矿化, 以 CO₂ 形式排放到大气中去; 轮作是增加土壤有机质含量, 提高土壤肥力的重要措施。因此, 缩短休闲时间, 改荒地农田、林地或草地, 根据各地情况选择适宜的轮作作物, 并结合免耕措施, 既能减少碳的排放, 又利于不断改良和培肥土壤, 增加土壤养

分, 保墒增收。

为了追求产量, 大量、过量施肥的问题在我国相当普遍。这首先导致的是粮食品质问题, 如粮食的蛋白质和其他养分含量的变化与平衡、蔬菜的硝态氮累积等^[57]。其次是环境问题, 如土壤有机碳氮矿化、氮素残留、氨挥发、CO₂ 与 N₂O 排放等等^[57~59]。因此合理的养分投入不仅是提高作物产量, 改善作物品质的重要因素, 也是影响土壤生产力提高与生态环境可持续发展的重要措施。由于水分是影响农作物生产的关键环境因子, 确定合理的氮、磷、钾等养分用量及配比必须和土壤水分联系起来, 才能发挥两者最大的增产效果^[60]。关于养分和水分的相互作用已有一些报道, 但涉及的内容主要是水分养分交互作用与作物增产的关系^[61], 而较少涉及水分养分交互作用的环境效应, 特别是水分养分耦合对土壤有机碳固定的影响, 土壤碳库变化对水分养分生物有效性及其增产效应的影响。进一步从兼顾作物高产和农业可持续发展的角度出发, 研究水分养分耦合与土壤有机碳平衡的关系, 对增强土壤的固碳能力, 提高作物水分、养分利用效率, 在维持作物稳产高产的基础上, 实现农业生产与生态环境的可持续发展有重要意义。

参考文献:

- [1] Bolin B, Fung I. The carbon cycle revisited[A]. Ojima D Modeling the earth system[C]. UCAR, Boulder, CO, 1992. 151) 164.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298: 156) 159.
- [3] Lal R, Kimble J, Levine E, et al. World Soils and greenhouse effect: An overview[A]. Lal R, Kimble J, Levine E & Stewart BA. Soils and Global Change. Advances in Soil Science[C]. Boca Raton: Lewis Publishers CRC Press, 1995. 1) 7.
- [4] 朱培立, 黄东迈, 余晓鹤, 等. ¹⁴C 标记秸秆和根茬在淹水及早地土壤中的矿化特征[J]. 土壤通报, 1994, 25(7): 67) 70.
- [5] 林而达, 李玉娥, 郭李萍, 等. 中国农业土壤固碳潜力与气候环境[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] IPCC. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide[A]. Climate Change: The Scientific Basis[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 185) 237.
- [7] Kem J S, Johnson M G. Study projects conversion to year 2020 and accompanying reductions in soil organic carbon and fossil fuel emissions[J]. Past Fluid Journal, 1993, 1(3): 11) 13.
- [8] 吴金水, 童成立, 刘守龙. 亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的影响[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 131) 137.
- [9] 赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 26) 34.

- [10] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change[J]. *Science*, 1996, 272: 393) 396.
- [11] Miko U F K. The temperature dependence of SOM decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 753) 760.
- [12] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic, edaphic and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycle*, 1994, 8:279) 293.
- [13] Ladd J N, Oades J M, Amato M. Microbial biomass formed from ^{14}C , ^{15}N - labelled plant material decomposing in soils in the field [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, 13: 119) 126.
- [14] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 农田土壤有机碳动态模拟模型的建立[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(5): 532) 536.
- [15] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 727) 734.
- [16] Andersen M K, Jensen L S. Low soil temperature effects on short-term gross N mineralization-immobilization turnover after incorporation of a green manure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 511) 521.
- [17] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture[J]. *Soil Biol Biochem*, 1983, 15: 447) 453.
- [18] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 25(5): 972) 978.
- [19] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *Bot Rev*, 1977, 43: 449) 528.
- [20] 杨昕, 王明星, 黄耀. 地气间碳通量气候响应的模拟Ⅱ. 近百年来气候变化[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 270) 277.
- [21] Dalal R C, Chan K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereals belt [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39: 435) 464.
- [22] Anderson J M. Soil and climate change [J]. *Adv Ecol Res*, 1992, 22: 188) 210.
- [23] Lal R, Kimble J M. Conservation tillage for carbon sequestration [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 243) 253.
- [24] 黄东迈, 朱培立, 王志明, 等. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑[J]. *土壤学报*, 1998, 35(4): 482) 491.
- [25] Malhi S S, Brandt S, Gill K S. Cultivation and grassland type effects on light fraction and total organic C and N in a Dark Brown Chernozemic soil [J]. *Can J Soil Sci*, 2003, 83: 145) 153.
- [26] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 363) 393.
- [27] Reeder J D, Schuman G E, Bowman R A. Soil C and N changes on conservation reserve program lands in the Central Great Plains [J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47: 339) 349.
- [28] Conant R T, Paustian K, Elliot E T. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon [J]. *Ecol Appl*, 2001, 11: 343) 355.
- [29] Bowman R A, Vigil M F, Nielsen D C, et al. Soil organic matter changes in intensively cropped dryland systems [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63: 186) 191.
- [30] Campbell C A, Zentner R P, Liang B C, et al. Organic C accumulation in soil over 30 year in semiarid southwestern Saskatchewan—Effect of crop rotations and fertilizers [J]. *Can J Soil Sci*, 2000, 80: 179) 192.
- [31] Knops J M H, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment [J]. *Ecology*, 2000, 81(1): 88) 89.
- [32] Sherrod L A, Peterson G A, Westfall D G, et al. Cropping Intensity Enhances Soil Organic Carbon and Nitrogen in a No-Till Agroecosystem [J]. *Soil Sci Soc Am. J*, 2003, 67: 1533) 1543.
- [33] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Tillage, Nitrogen, and Cropping System Effects on Soil Carbon Sequestration [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2002, 66: 906) 912.
- [34] Campbell C A, Mconkey B G, Zentner R P, et al. Tillage and crop rotation effects on soil organic C and N in a coarse-textured Typic Haploboroll in southwestern Saskatchewan [J]. *Soil and Tillage Research*, 1996, 37(1): 3) 14.
- [35] Lal R, Logan T J, Fausey N R. Long-term tillage effects on a Mollic Ochraqualf in north-west Ohio III. soil nutrient profile [J]. *Soil Tillage Res*, 1990, 15: 371) 382.
- [36] Campbell C A, Thomas A G, Biederbeck V O, et al. Converting from no-tillage to pre-seeding tillage: Influence on weeds, spring wheat grain yields and N, and soil quality [J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 46: 175) 185.
- [37] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89) 96.
- [38] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 549) 552.
- [39] Hao Y, Lal R, Owens L B, et al. Effect of crop land management and slope position on soil organic carbon pool at the North Appalachian Experimental Watersheds [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 68(2): 133) 142.
- [40] Grace P R, Oades J M, Keith H, et al. Trends in wheat yields and soil organic carbon in the permanent rotation trial at the Waite Agricultural Research Institute, South Australia [J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1995, 35: 857) 864.
- [41] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化 [J]. *土壤通报*, 2000, 31(5): 193) 196.
- [42] 陈福兴, 张马祥, 邹长明, 等. 不同轮作方式对培肥地力的作用 [J]. *土壤通报*, 1996, 27(2): 70) 72.
- [43] 邹焱, 苏以荣, 路鹏, 等. 洞庭湖区不同耕种方式下水稻土壤有机碳、全氮和全磷含量状况 [J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 671) 674.
- [44] Malhi S S, Nyborg M. Influence of various factors on the relative effectiveness of autumn versus spring applied N [A]. Bajwa, M. S. *Proceedings of the International Symposium on Nutrient Management for Sustainable Productivity*, Vol. 1 [C]. Ludhiana, Punjab, India: Department of Soils, Punjab Agricultural University, 1992. 355) 365.

- [45] Nyborg M, Solberg E D, Malhi S S, et al. Fertilization N, crop residue, and tillage alter soil C and N content in a decade [A]. Lal R, Kimble J, Levine E and Steward B A. Soil Management and Greenhouse Effect. Advance in Soil Science [C]. Boca Raton, FL: Lewis Publisher, CRC Press, 1995. 93) 100.
- [46] Campbell C A, Biederbeck V O, Zentner R P, et al. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem [J]. Can J Soil Sci, 1991, 71: 363) 376.
- [47] Paustain K, Bobertson G P, Elliott E T. Management impact on carbon storage and gas fluxes (CO_2 , CH_4) in midlatitude cropland [A]. Lal R, Kimble J, Levine E and Steward B A. Soil Management and Greenhouse Effect. Advance in Soil Science [C]. Boca Raton, FL: Lewis Publisher, CRC Press, 1995. 69) 83.
- [48] Malhi S S, O. Sullivan P A. Soil temperature, moisture and compaction under zero and conventional tillage in central Alberta [J]. Soil Tillage Res, 1990, 17: 167) 172.
- [49] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农田土壤有机碳分解的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 709) 714.
- [50] Ponnampetuma F N. Straw as source of nutrients for wetland rice [A]. Organic Matter and Rice [C]. IRRI publication, 1984. 117) 136.
- [51] Belanger G, Richards J E, Angers D A. Longterm fertilization effects on soil carbon under permanent swards [J]. Can J Soil Sci, 1999, 79: 99) 102.
- [52] Raun W R, Johnson G V, Phillips S B, et al. Effect of long term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma [J]. Soil and Tillage Research, 1998, 47: 323) 330.
- [53] Malhi S S, Harapiak J T, Nyborg M, et al. Autumn and spring applications of ammonium nitrate and urea to bromegrass influence total and light fraction organic C in a Black Chernozem soil [J]. Can J Soil Sci, 2002, 82: 211) 217.
- [54] Malhi S S, Harapiak J T, Nyborg M, et al. Total and light fraction organic C in a thin Black Chernozemic grassland soil as affected by 27 annual applications of six rates of fertilizer N [J]. Nutrient Cycling Agroecosystems, 2003, 66: 33) 41.
- [55] Nyborg M, Malhi S S, Solberg E D, et al. Carbon storage and light fraction C in a grassland Dark Gray chernozem soil as influenced by N and S fertilization [J]. Can J Soil Sci, 1999, 79: 317) 320.
- [56] 曹志洪, 朱永官, 廖海秋, 等. 苏南稻麦两熟制下土壤养分平衡与培肥的长期试验 [J]. 土壤, 1995, 27(2): 60) 63.
- [57] Wang ZH, Li SX. Effects of N and P fertilization on plant growth and nitrate accumulation in vegetables [J]. Plant Nutr, 2004, 27(3): 539) 556.
- [58] Baggs E M, Watson C A, Rees R M. The fate of nitrogen from incorporated cover crop and green manure [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystem, 2000, 56: 153) 163.
- [59] Xing G X. N_2O emission from cropland in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52: 249) 254.
- [60] Frederick J M, Camberato J J. Water and nitrogen effects on winter wheat in the southeastern coastal plain: I. Grain Yield and Kernel traits [J]. Agron J, 1995, 87: 521) 526.
- [61] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果 [J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 38) 46.

Factors affecting soil organic carbon in cropland and their regulation

LI Xiaohan¹, HAO Mingde^{1,2}, WANG Zhaohui¹, LI Lili¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The increase of greenhouse gas, such as N_2O and CO_2 has been proved to be the main factors leading global warming effects. Emission of CO_2 caused by agricultural production is found to account for 25% of the total carbon emission. Therefore, investigations of factors affecting soil organic C are of great importance for increasing C sequestration and retention in agricultural soil system, decreasing C emission caused unreasonable land utilization, and ensuring the sustainable development of agricultural and biospherical ecosystems. This paper discussed effects from factors, such as temperature, water, land reclamation, fallowing, tillage, rotation, straw retention, and fertilizer management, in order to rationalize land use and management. Reduce of tillage, increase of crop straw retention, and optimization of N, P and K fertilizer rate and ratio are proved to be an important ways to increase soil organic C content and its fertility and quality.

Keywords: soil; organic carbon; tillage; water; nutrient; soil surface mulching