

保护性耕作对农田碳效应影响研究进展

张海林, 孙国峰, 陈继康, 陈 阜

(中国农业大学农学与生物技术学院/农业部农作制度重点开放实验室, 北京 100193)

摘要: 土壤碳循环在全球气候变暖上具有重要的作用, 也越来越受到人们的关注。保护性耕作具有减少土壤侵蚀、提高秸秆利用效率和增加土壤有机质等特点, 对土壤碳汇效应具有重要的影响。国内外在保护性耕作上对土壤碳循环等方面取得了丰硕的成果。随着保护性耕作碳循环方面研究的深入, 人们对保护性耕作的农田碳效应及其机制的认识也越来越深入。本文对国内外保护性耕作对农田碳效应的影响进行了比较客观详尽的阐述, 并在此基础上提出了未来本领域的研究重点, 以期对中国开展相关的研究提供借鉴。

关键词: 保护性耕作; 碳固定; 碳排放; 碳汇

Advances in Research on Effects of Conservation Tillage on Soil Carbon

ZHANG Hai-lin, SUN Guo-feng, CHEN Ji-kang, CHEN Fu

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University/Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture, Beijing 100193)

Abstract: Soil carbon cycle plays an important role in global warming and concerns for it have been increased. Conservation tillage could reduce soil erosion, enhance residue utilization, and increase SOC, which influence soil carbon sequestration greatly. Lots of achievements in soil carbon cycle of conservation tillage have been made in the past years. With the deep studies, the understanding of mechanism of tillage effects on soil carbon has become more and more clearly and thoroughly. The effects of conservation tillage on carbon were reviewed objectively and in detail in this paper. Future trends and advices were also proposed on further researches in this field in China.

Key words: conservation tillage; soil carbon sequestration; soil carbon emissions; soil carbon sink

大气中温室气体浓度的增加引起全球气候变暖问题日趋严重, 碳循环已成为全球的研究热点, 人们正在努力寻求减少 CO₂ 等温室气体排放及实现碳汇功能的有效措施。人类耕种、施肥、灌溉等管理活动对农业土壤中碳的质和量具有重要的影响, 从而进一步影响到区域及全球环境。

土壤耕作是重要的农事活动之一, 不同的耕作措施由于其对土壤的扰动程度和作用强度不同, 对土壤碳效应影响程度不一样。保护性耕作通过减少对土壤的扰动, 增加地表覆盖, 改变了农田地表微地形状态, 进一步影响了农田土壤生态效应, 如降低土壤有机质矿化的速率, 增加土壤有机碳含量, 减少温室气体排

放^[1-2]。研究表明, 通过采用保护性耕作和其它农田管理措施, 大约 60%~70% 的损失碳可被重新固定, 全球范围内, 如果采用保护性耕作等碳管理措施, 每年从大气中吸收固定的碳量为 0.4~1.2 Pg, 相当于全球每年排放量的 5%~15%; Kern 等估计, 到 2020 年, 如果美国 57% 的耕地采用保护性耕作技术, 美国土壤的碳收集能力达到 80~129 Tg, 如果 76% 的可耕地采用保护性耕作措施, 美国土壤的碳收集能力将达到 286~468 Tg^[3]。但随着人们对碳循环和保护性耕作研究的深入, 也有不少学者对保护性耕作的固碳效应持保留或者否定的态度, Lal 课题组在最近研究表明, 保护性耕作对表层土壤具有固碳效应, 但对深层土壤

收稿日期: 2009-03-05; 接受日期: 2009-07-23

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAD15B01, 2007BAD89B08)、2008 年公益性行业(农业)科研专项(200803028)

作者简介: 张海林(1973-), 男, 内蒙古牙克石人, 副教授, 博士, 研究方向为保护性耕作与农田生态。Tel: 010-62733316; E-mail: hailin@cau.edu.cn

碳影响不大,甚至有降低的趋势^[4]。从国际上的研究看,保护性耕作对农田碳的影响研究主要集中在微观的农田土壤有机碳含量、碳分布、碳组分变化及碳排放和宏观的农田系统碳排放量及碳汇潜力上。本文对国内外保护性耕作的有关碳效应的研究进行总结归纳,以期对中国开展相关研究具有借鉴意义。

1 保护性耕作的内涵

关于保护性耕作的概念,国内外学者观点还不完全一致。国外典型的概念是美国保护性技术信息中心(CTIC)提出以覆盖度为主要标准,指在一季作物之后地表留茬覆盖至少为30%为保护性耕作,如免耕、垄作^[5]。但不少国家将免耕、保护性耕作、保护性农作制和保护性农业经常混用。FAO虽然指出保护性耕作是保护性农业的主体技术,在保护性农业中具有重要的作用,却没有明确提出保护性耕作的概念。中国关于保护性耕作的认识也不统一。高旺盛比较归纳了6种国内关于保护性耕作的不同认识,根据中国的国情提出了保护性耕作的概念,并指出其核心技术是土壤少免耕、地表微地形改造技术及地表覆盖技术^[6]。保护性耕作是相对传统耕作而言,因此,凡是减少了耕作次数、减少了耕作面积,增加了地表覆盖度的耕作措施均可纳入保护性耕作,如少免耕、覆盖耕作、垄作、深松及等高耕作等。虽然国内外关于保护性耕作的概念尚不统一,但其独特的保土、保水、培肥、省工省力等特点使其在全球范围内得到了广泛的推广。目前,据CTIC统计2007年美国保护性耕作已占耕种面积的41.8%(免耕、垄作和覆盖耕作,不含少耕),并呈逐年上升的趋势^[7];而加拿大、澳大利亚、欧洲及非洲保护性耕作的面积也在不断的扩大;中国保护性耕作的面积也在逐年上升,据农业部农机化司统计目前中国保护性耕作技术(主要指机械化保护性耕作技术)实施面积突破 $2.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[8],刘巽浩认为中国各类单项的保护性耕作(广义)面积可能已达 $1.3 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[9]。随着保护性耕作技术的不断完善,其已成为可持续农业的主要技术之一,被国际上很多学者认为是固碳减排的重要技术。

2 保护性耕作对土壤碳的影响

2.1 保护性耕作对农田碳含量的影响

耕作方式对表层土壤有机碳有较强的影响,传统耕作由于对土壤的翻动作用,土壤好气性微生物增加,有机碳迅速矿化,而保护性耕作减少了对土壤的扰动,

加上地表残茬的作用,减少了表土有机碳的流失,增加了表层有机碳的含量。大量研究表明,保护性耕作可以增加表层土壤有机碳的含量,而对于保护性耕作是否可以增加深层土壤有机碳含量国际上观点并不一致,有学者研究认为,和传统耕作相比,少、免耕通常增加的土壤有机碳主要集中在土壤表层几厘米深度,并不总是引起整个土体土壤有机碳的增加^[10-11],表现出明显的层化现象,即土壤表层有机碳含量高,随着深度的增加而有机碳含量下降,甚至出现较低的水平。庄恒扬等在沿江砂壤土上进行少、免耕试验后指出,少、免耕5年后,全耕层有机质含量在不同耕作处理下无显著性差异,但在层次分布上两种处理都表现出表层富集^[12]。Baker等研究认为,目前大多数保护性耕作的研究取样方法对结果可能影响很大,如今绝大多数发表的论文认为保护性耕作能够增加碳汇,但取样深度通常为30 cm左右,而作物根系往往要比这深得多^[13]。

另外,关于土壤有机碳含量是否随保护性耕作的年限增长而持续变化的现象,由于试验年限问题,国内外研究并无定论,有学者认为短期内保护性耕作对土壤有机碳变化幅度不大,耕作方式对土壤有机碳没有较大的影响,West等指出免耕处理在3~5年对有机碳的积累仅限于表层(<10 cm),免耕固碳的滞后效应使得免耕5~10年后才能有明显的土壤碳固定^[14-15]。Sampson等通过数据收集计算得出,任何一个农业生态系统的耕作方式改变,在前20年中土壤碳都以稳定的速率积累,后20年碳积累速率成直线下滑,最终达到一个碳积累的速率为零的另一个稳定状态^[16]。中国在保护性耕作方面的试验时间均较短,土壤有机碳的波动较大,无法提供较有说服力的数据。

2.2 保护性耕作对农田碳组分的影响

关于保护性耕作对土壤碳含量的影响,不少学者认为短期内效应并不十分明显,但耕作方式对有机碳组分的变化影响较大,进而影响了土壤质量和生产力。Dalal将土壤有机碳分为活跃碳库、非活跃碳库和惰性碳库,他认为农业生产措施(如土壤耕作管理、植物残体或有机物料的还田等)引起土壤碳库的最初变化主要是易分解、矿化,即活性碳部分^[17]。一些研究发现,土壤活性有机碳对耕作方式和秸秆还田的反应更为迅速^[18-19]。尽管这部分碳素占全碳的比例很小,但对土壤碳素的转化很重要,且与土壤生产力密切相关^[17]。李琳等分析了华北平原保护性耕作对土壤不同层次的总碳、活性碳的影响,结果表明,旋耕和翻耕

提高了土壤活性碳含量，免耕则降低土壤活性碳含量^[20]。伍芬琳等对南方双季稻区的研究表明活性碳均随土层的增加而减少，活性碳分层受秸秆还田影响大，秸秆还田和少免耕提高 0~20 cm 土层土壤活性碳的含量^[21]。许多研究认为轻组有机碳或颗粒有机碳对土壤耕作比较敏感，是反映在不同农田管理措施下土壤质量变化较好的指标，对于准确评价保护性耕作影响土壤碳过程具有重要意义^[22]。近来一些研究者应用土壤有机质物理分组和同位素 ^{14}C 方法研究了耕作方式对碳组分的影响，研究表明耕作方式主要影响的是土壤有机碳组分中分解相对快的部分（轻组有机碳和颗粒有机碳）^[23]。因此，系统深入的研究保护性耕作对农田土壤有机碳组分的影响有利于揭示耕作措施对土壤生产力影响的内在机制。

2.3 保护性耕作对农田温室气体 (CO_2 和 CH_4) 的影响

一般认为少、免耕等保护性耕作措施减少了土壤的扰动，土壤原有结构得到了保持，减少了土壤碳氧化程度，会降低温室气体的排放，可大大降低土壤碳汇的强度。关于耕作措施对 CO_2 和 CH_4 的排放的研究主要集中在排放特征（日变化、季节变化）、排放量及影响排放的因素方面。

一般认为采取保护性耕作会减少 CO_2 的排放，Reicosky 等认为频繁的耕作特别是采用有壁犁耕作会导致土壤有机碳的大量损失， CO_2 释放量增加，而免耕则有效的控制土壤有机碳的损失，降低 CO_2 的释放量^[24]。李琳等对华北冬小麦农田不同耕作方式 CO_2 排放通量进行原位测定， CO_2 排放通量平均表现为翻耕 > 旋耕 > 免耕^[25]；Álvaro-Fuentes 等在地中海半干旱地区的研究表明，少耕和免耕可以在耕作的初期（0~48 h）及中期（从耕作操作起的几天内）降低 CO_2 的排放量，特别是免耕降低的幅度较大^[26]。但美国德克萨斯州的耕作试验表明，常规耕作转变为免耕后虽然可以使土壤碳储量增加，而免耕以 CO_2 形式释放的碳与常规耕作相同甚至更多，他们认为免耕保持了土壤湿度，增加土壤容重并提高了地温，而耕作会使土壤迅速变干、疏松且散失更多的热量，长期耕作也会使土壤产生 CO_2 的底物土壤有机碳减少，从而引起常规耕作农田比免耕田释放较少 CO_2 ^[27]。

CH_4 是大气中重要的温室气体之一，受人类活动的影响，大气中 CH_4 的浓度正以每年 1% 的速度持续增加^[28]。不少研究表明，保护性耕作可以降低 CH_4 的排放量^[21,29]，但其在旱地生态系统的排放很少。Eleder 等在美国俄亥俄州小麦玉米轮作系统研究表明， CH_4

排放量很少，各耕作处理差异不大^[30]。而稻田却被认为是 CH_4 的主要人为排放源之一^[31]，据研究每年约有 $(20\sim 100) \times 10^{12}$ g 的 CH_4 从水稻田排放到大气中，约占全球总排放量的 4%~19%^[32]。Shao 等在中国西南地区研究采取保护性耕作后， CH_4 排放量明显降低；伍芬琳等在中国双季稻区研究也取得了类似的结论^[33]。保护性耕作降低 CH_4 排放的原因主要是由于保护性耕作可以维持土壤的原状结构，有利于提高 CH_4 氧化菌的氧化能力，从而降低了 CH_4 的排放量。Kessavaidu 在小麦-休耕的试验，对土壤进行免耕后，土壤 CH_4 氧化速率均高于翻耕的土壤，而翻耕后整地的话， CH_4 氧化速率再降低 60%~70%^[34]，因此，保护性耕作可提高 CH_4 的氧化能力，减少土壤 CH_4 汇排放^[35-36]。另外，对于水田保护性耕作来说，大部分秸秆是位于水面，可以在表层进行有氧条件的腐解，其产物在土壤氧化层中还原产生 CH_4 量较少，从而降低了 CH_4 的释放量。陈苇等研究表明秸秆不同还田方式对 CH_4 排放具有重要的影响，稻草翻施使稻田甲烷排放量上升 51.11%，而采用稻草表施的方法 CH_4 排放量仅增加 33.98%^[37]。

关于农田温室气体的排放，同国际上相比，中国的相关研究尚有一定的差距，特别是关于保护性耕作下温室气体的排放的研究还处于起步阶段，其影响因素及机制方面还需要深入研究。

3 保护性耕作对农田固碳潜力及其生态系统碳排放量的影响

3.1 保护性耕作对农田固碳潜力的影响

保护性耕作由于减少了土壤扰动，增加了地表覆盖，提高了土壤耕层有机碳含量，减少了碳排放，很多科学家认为保护性耕作具有碳汇效应，同时保护性耕作还可以节约化石燃料，为土壤起到间接固碳的效果。Lal 估计，如果全球耕地实行保护性耕作后，土壤有机碳含量预计到 2020 年可以增加至 $5.37 \times 10^8 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[38-39]。2005 年以“中国全球环境变化研究”为主题的香山科学会议得到如下共识：20 世纪 80 年代以来中国农田土壤有机碳库基本上呈增长趋势；这种增长趋势的主导因素是秸秆还田，保护性耕作和其它措施的配合^[40]。邱建军等运用农业生态系统生物地球化学模型（DNDC），估算北方农牧交错带内蒙古自治区耕地土壤碳储量研究其平衡状况后提出免耕、休耕等保护性耕作措施有助于土壤有机碳的积累^[41]。

芮雯奕等对长江三角洲水田耕层土壤保护性耕作制度的土壤碳收集效应进行了初步估算,结果表明,油菜面积的扩大、小麦的少免耕和作物秸秆的还田有利于碳增汇^[42]。

但关于保护性耕作是否能增加土壤碳汇效应,学术上也有一定的争议,保护性耕作土壤有机碳的层化现象在评价其固碳潜力上可能会有重要的影响。Baker指出保护性耕作虽然优点突出,但目前的研究还不足以证明保护性耕作有利于碳增汇,Lal课题组也提出取样深度对保护性耕作碳汇效应的客观评价有一定的影响^[4]。因此正确评价保护性耕作对土壤固碳潜力或者碳汇效应,还应在试验和分析方法上进行探讨。

中国关于保护性耕作的固碳潜力的研究还比较少,从田块尺度多是研究耕层土壤有机碳的研究,由于时间尺度的限制,缺乏相应预测基础;而区域尺度上的研究由于限于土壤资料的限制,也没有过多的深入研究;另外,从研究方法上也有一定的局限性,目前对区域尺度碳汇潜力的评价多采用DNDC、Century和Epic模型等进行估算,但由于模型本身的限制,在保护性耕作领域上应用不多。关于保护性耕作的固碳潜力的研究成果,对于未来碳贸易及国际谈判具有重要的参考价值,因此需做深入的研究。

3.2 保护性耕作对农田生态系统碳排放量的影响

土壤耕作是农业生产系统主要的能耗过程,直接影响系统能流-碳流变化过程,对大气CO₂通量增加和土壤有机碳分解损失有着明显贡献。有学者将土壤的固碳减排和土壤耕作的能源利用及经济分析联系起来,从整个农田生态系统考虑碳排放。耕作措施的不同,机具的使用和用于农场机具的生产、运输和维修的能量消耗均不相同,CO₂的释放量也不相同。保护性耕作减少能源的消耗,同时可以减少机器的磨损,用保护性耕作可以节省23.8 kgC·hm⁻²·a⁻¹^[43]。West等提出了相对净碳释放方程即将农田投入换算成能量,并进一步折算出每项投入造成的碳释放系数,对耕作管理措施下农田生态系统对大气CO₂排放贡献进行了计算^[14-15]。他指出,如果将美国所有作物的耕作方式由传统耕作转为保护性耕作,系统净排放量降低,有利于固碳减排。目前,不少欧美国家已经开始利用农田碳排放的多少作为碳补贴依据,美国已有农民利用保护性耕作措施减少碳排放,然后通过碳贸易所进行交易。中国伍芬琳等借鉴该方法对中国华北平原保护性耕作条件下的农田生态系统的净碳释放量进行计算,结果表明,与传统耕作相比,保护性耕作可以降

低系统的净碳释放量^[44]。但从净碳释放研究看,在中国的部分折算系数还需要进行深入探讨,另外作为碳减排的补贴依据的研究还比较缺乏。

4 中国保护性耕作对农田碳库影响研究的重点与发展趋势

近年来,关于土壤碳循环的研究成为了全球生态学领域的热点,且取得了许多新的进展。从陆地生态系统来看,土壤碳循环的热点主要集中在陆地生态系统固碳减排的潜力、影响机制及区域尺度碳汇潜力和生态系统服务功能的可持续性上^[46]。作为保护性农业的主体技术,保护性耕作对农田碳库的维持和保护具有重要的影响。从中国目前的研究看,无论是微观研究还是宏观研究,同国际水平尚有一定的差距。微观上,保护性耕作对土壤有机碳的时空分布及碳排放的影响机制等方面存在较大差距。从保护性耕作技术效应本身看,其结果需要长期试验来验证,而中国保护性耕作长期定位试验同国外相比,年限均较短,所得结果具有一定的局限性;另外,保护性耕作改变了农田微气象特征,进而影响碳固定及其排放的因素,而目前中国对此的研究还多停留在表现现象,其内在影响机制研究还不够深入。宏观上,由于缺乏相关的基础的数据(如土壤普查数据),加之中国开展本方向的研究时间比较短,导致中国在保护性耕作固碳潜力、生产力及生态经济效应等方面研究不足,不能为相关碳排放及碳贸易等提供有效的依据;另外,相关研究方法还没有与国际接轨,特别是在模型模拟上。

因此,未来中国在保护性耕作的碳效应的研究应重点集中在以下几个方面。

(1)保护性耕作对农田土壤固碳的影响及其机制。关于保护性耕作是否具有碳汇功能目前仍存在争议。由于耕作方式对耕层土壤影响显著,而以往的取样多在表层或者30 cm土层以内,对于农田生态系统而言,由于耕作措施的改变,对土壤整个剖面的水分、养分、热量、微生物及根系的生长都有一定的影响,从而影响了土壤碳的平衡状况;另外,由于土壤碳循环涉及到土壤、作物、生物以及各理化措施,受到的影响因素很多,保护性耕作措施对其土壤碳的影响机制复杂,应结合土壤类型、种植制度、耕作措施等综合考虑保护性耕作对土壤碳库的影响机制来正确评价保护性耕作的固碳作用。

(2)保护性耕作对农田温室气体排放特征及其影

响机制。秸秆还田是保护性耕作的重要环节, 有研究表明秸秆还田会增加温室气体的排放, 特别是水田 CH_4 的排放量增加; 但也有研究认为, 与常规耕作相比, 保护性耕作秸秆的覆盖还田减少了秸秆与土壤的接触面积, 进而降低秸秆腐解速率, 加之, 保护性耕作降低了土壤扰动, 从而减少了温室气体的排放量。另外, 目前中国在温室气体排放上研究多偏重于排放特征, 而在因素上研究相对比较缺乏。因此, 保护性耕作对农田温室气体的减排效应如何评价? 影响排放减少或者增加的因素有哪些? 在搞清楚温室气体的排放特征的前提下, 如何控制其影响因素还需要进一步加强。

(3) 保护性耕作对农田土壤碳组分及其生产力的影响: 不少研究认为, 实施保护性耕作对土壤碳储量影响不大, 但耕作措施改变了农田土壤碳组分, 特别是颗粒性有机碳, 从而影响到作物的吸收利用, 进一步影响了作物产量和土壤生产力。耕作措施对土壤碳组分变化影响较大, 但中国在这方面的研究仍有差距, 需要深入研究。

(4) 区域保护性耕作碳汇潜力、碳减排效应及其生态系统服务价值的模拟。保护性耕作作为一项生态友好型技术, 具有“保水、培肥、省工、省力”等优势, 但从区域宏观尺度上, 保护性耕作的碳汇潜力及其生态系统服务价值如何, 需要通过大量的调查、模型模拟给出科学的回答, 为中国在碳减排国际谈判提供理论依据和支撑。另外, 从碳减排的潜力、碳贸易补贴等, 缺乏相应的理论依据。因此, 应加强区域保护性耕作碳减排效应的评价研究, 为碳减排补贴及碳交易谈判等提供理论依据。

References

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(11): 1623-1627.
- [2] 杨学明. 利用农业土壤固定有机碳—缓解全球变暖与提高土壤生产力. *土壤与环境*, 2000, 9(4): 311-315.
Yang X M. Carbon sequestration in farming land soils: an approach to buffer the global warming and to improve soil productivity. *Soil and Environmental Sciences*, 2009, 9(4): 311-315. (in Chinese)
- [3] Kern J S, Johnson M G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 200-210.
- [4] Blanco-Canqui H, Lal R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 693-701.
- [5] CTIC. Tillage type definitions. (2002-11-11) [2009-03-05] <http://www2.ctic.purdue.edu/Core4/CT/Definitions.html> 2002-11-11
- [6] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势. *中国农业科学*, 2007, 40(12): 2702-2708.
Gao W S. Development trends and basic principles of conservation tillage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(12): 2702-2708. (in Chinese)
- [7] CTIC. 2007 Amendment to the National Crop Residue Management Survey Summary.. (2008-08-28) [2009-03-05] http://www.conservationsinformation.org/pdf/National_Summary_2007_Amendment.pdf
- [8] 曹建军. 保护性耕作技术的推广应用及项目管理. (2009-03-05) [2009-04-17] <http://www.amic.agri.gov.cn/DesktopModules/Infos11/Infos/ThisInfo.aspx?ItemID=70650>, 2009, 4
Cao J J. Extension of conservation tillage and project management. (2009-03-05) [2009-04-17] <http://www.amic.agri.gov.cn/DesktopModules/Infos11/Infos/ThisInfo.aspx?ItemID=70650>, 2009, 4. (in Chinese)
- [9] 刘巽浩. 泛论我国保护性耕作的现状与前景. *农业现代化研究*, 2008, 29(2): 208-212.
Liu X H. Present pituation and prospect of conservation tillage in China. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, 29(2): 208-212. (in Chinese)
- [10] Yang X M, Wander M M. Tillage effects on soil organic carbon distribution and storage in a silt loam soil in Illinois. *Soil and Tillage Research*, 1999, 52(1/2): 1-9.
- [11] 张国盛, Chan K Y, Li G D, Heenan D P. 长期保护性耕作方式对农田表层土壤性质的影响. *生态学报*, 2008, 28(6): 2722-2728.
Zhang G S, Chan K Y, Li G D, Heenan D P. Long-term effects of tillage systems and rotation on selected soil properties in cropping zone of Southern NSW, Australia. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2722-2728. (in Chinese)
- [12] 庄恒扬, 刘世平, 沈新平, 陈后庆, 陆建飞. 长期少免耕对稻麦产量及土壤有机质与容重的影响. *中国农业科学*, 1999, 32(4): 39-44.
Zhuang H Y, Liu S P, Shen X P, Chen H Q, Lu J F. Effect of long-term minimal and zero tillages on rice and wheat yield, soil organic matter and bulk density. *Scientia Agricultura Sinica*, 1999, 32(4): 39-44. (in Chinese)
- [13] Baker J M, Ochsner T E, Venterea R T, Griffis T J. Tillage and soil carbon sequestration: what do we really know?. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1/4): 1-5.
- [14] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon

- emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91: 217-232.
- [15] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: Methodology for full carbon cycle analyses. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 439-444.
- [16] Sampson R N, Scholes R J. Additional human-induced activities//*Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. UK: Cambridge University Press, 2000.
- [17] Dalal R C, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: loss of organic carbon from different density fractions. *Australia Journal of Soil Research*, 1986, 24: 301-309.
- [18] 王 晶, 朱 平, 张 男, 解宏图, 张旭东. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响. *土壤通报*, 2003, 34(5): 394-397.
- Wang J, Zhu P, Zhang N, Xie H T, Zhang X D. Effect of fertilization on soil active C and C pool management index of black soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5): 394-397. (in Chinese)
- [19] 邹桂霞. 美国有关耕作措施对土壤有机碳影响的研究. *水土保持科技情报*, 2002, (5): 15-17.
- Zou G X. Studies of tillage effects on soil organic carbon in America. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2002, 5: 15-17. (in Chinese)
- [20] 李 琳, 李素娟, 张海林, 陈 阜. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 106-109.
- Li L, Li S J, Zhang H L, Chen F. Study on soil C pool management index of conservation tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 106-109. (in Chinese)
- [21] 伍芬琳, 张海林, 李 琳, 陈 阜, 黄凤球, 肖小平. 保护性耕作下双季稻农田甲烷排放特征及温室效应. *中国农业科学*, 2008, 41(9): 2703-2709.
- Wu F L, Zhang H L, Li L, Chen F, Huang F Q, Xiao X P. Characteristics of CH₄ emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2703-2709. (in Chinese)
- [22] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil and Tillage Research*, 2002, 63(3/4): 133-139.
- [23] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标. *生态环境*, 2003, 12(4): 500-504.
- Zhang J B, Song C C. The sensitive evaluation indicators of effects of land-use change on soil carbon pool. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 500-504. (in Chinese)
- [24] Reicosky D C, Lindstrom M J, Schumacher T E, Lobb D E, Malo D D. Tillage-induced CO₂ loss across an eroded landscape. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(2): 183-194.
- [25] 李 琳, 张海林, 陈 阜, 李素娟. 不同耕作措施下冬小麦生长季农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2765-2770.
- Li L, Zhang H L, Chen F, Li S J. CO₂ flux and its correlation with soil temperature in winter wheat growth season under different tillage measures. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2765-2770. (in Chinese)
- [26] Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C, López, M V, Arrúe J L. Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1/2): 331-341.
- [27] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. *Soil and Tillage Research*, 1995, 34: 41-60.
- [28] 李玉娥, 林而达. 土壤甲烷吸收汇研究进展. *地理科学进展*. 1999, 14(6): 614-617.
- Li Y E, Lin E D. Progress in study on methane uptake by aerobic soil. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(6): 614-617. (in Chinese)
- [29] 赵建波, 李增嘉, 迟淑筠, 宁堂原, 谷淑波, 裘立群, 王 芸, 江晓东. 保护性耕作条件下小麦田甲烷吸收及影响因素. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2490-2496.
- Zhao J B, Li Z J, Chi S J, Ning T Y, Gu S B, Qiu L Q, Wang Y, Jiang X D. CH₄ absorption and its affecting factors in a wheat field with conservation tillage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2490-2496. (in Chinese)
- [30] Elder J W, Lal R. Tillage effects on gaseous emissions from an intensively farmed organic soil in North Central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 2008, 98(1): 45-55.
- [31] 任万辉, 许 黎, 王振会. 中国稻田甲烷产生和排放研究 I. 产生和排放机理及其影响因子. *气象*, 2004, 30(6): 3-7.
- Ren W H, Xu L, Wang Z H. A review on study of methane emission from rice field in China I. mechanism and affecting factors. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(6): 3-7. (in Chinese)
- [32] Mer J L, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37: 25-50.
- [33] Shao J A, Huang X X, Gao M, Wei C F, Xie D T, Cai Z C. Response of CH₄ emission of paddy fields to land management practices at a microcosmic cultivation scale in China. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(4): 691-698.
- [34] Kessavalou A, Mosise A R, Doran J W. Fluxes of carbon dioxide,

- nitrous oxide, and methane in grass sod and winter wheat-fallow tillage management. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(5): 1094-1104.
- [35] Hütsch B W. Tillage and land use effects on methane oxidation rates and their vertical profiles in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(3): 284-292.
- [36] Willison T W, Webster C P, Goulding K W T, Powlson D S. Methane oxidation in temperate soils: effective of land use and the chemical form of nitrogen fertilizer. *Chemosphere*, 1995, 30: 539-546.
- [37] 陈 苇, 卢婉芳, 段彬伍, Wassmann R, Lantin R S. 稻草还田对晚稻稻田甲烷排放的影响. *土壤学报*, 2002, 39(2): 170-176.
- Chen W, Lu W F, Duan B W, Wassmann R, Lantin R S. Effect of rice straw manure on methane emission in late-rice paddy fields. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 170-176. (in Chinese)
- [38] Lal R. Degradation and resilience of soils. *Philosophic Transactions of the Royal Society of London*, 1997, 352: 997-1010.
- [39] Lal R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 1997, 43: 81-107.
- [40] 潘根兴, 赵其国, 蔡祖聪. 《京都议定书》生效后我国耕地土壤碳循环研究若干问题. *中国基础科学*, 2005, (2): 12-18.
- Pan G X, Zhao Q G, Cai Z C. Issues on C cycling studies of cropland soils of China in commitment to Kyoto Protocol. *China Basic Science*, 2005, (2): 12-18. (in Chinese)
- [41] 邱建军, 唐华俊, LI C S. 北方农牧交错带耕地土壤有机碳储量变化模拟研究——以内蒙古自治区为例. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 86-88.
- Qiu J J, Tang H J, Li C S. Study on the situation of soil organic carbon storage in ecotone between agriculture and animal husbandry-A case study from inner Mongolia. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4): 86-88. (in Chinese)
- [42] 芮雯奕, 周 博, 张卫建. 长江三角洲水田保护性耕作制度的碳收集效应估算. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(2): 207-212.
- Rui W Y, Zhou B, Zhang W J. A brief assessment of carbon sequestration effects of conservation farming systems in paddy soils of Yangtze Delta Plain. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(2): 207-212. (in Chinese)
- [43] Kern J S, Johnson M G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 200-210.
- [44] 伍芬琳, 李 琳, 张海林, 陈 阜. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- Wu F L, Li L, Zhang H L, Chen F. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039. (in Chinese)
- [45] 潘根兴, 李恋卿, 郑聚锋, 张旭辉, 周 萍. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题. *土壤学报*, 2008, 45(5): 901-913.
- Pan G X, Li L Q, Zheng J F, Zhang X H, Zhou P. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 901-913. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)