

稻田转变为旱地下土壤有机碳含量及其组分的变化特征

黄山¹, 芮雯奕¹, 彭现宪¹, 刘武仁², 张卫建^{1,3}

(1. 南京农业大学应用生态研究所, 南京 210095; 2. 吉林省农业科学院, 长春 130124; 3. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 采用土壤有机碳(SOC)物理分组与¹³C自然丰度相结合技术, 研究了稻田长期(19 a)转换为旱地(玉米地)后土壤有机碳及其组分的响应特征, 以及不同有机碳组分的周转和更新速率。结果表明, 长期种植旱地作物后, 农田土壤有机碳和总氮含量显著下降。相同历史背景下, 稻田土壤总有机碳(TOC)和总氮(TN)的浓度分别比玉米地高 76.7% 和 47.6%。水稻土包裹态颗粒有机质(oPOM)和矿物结合有机质(MOM)在土壤中的浓度均是玉米地的 2 倍, 但游离态颗粒有机质(fPOM)差异不显著。稻田土壤 oPOM 和 MOM 自身碳的浓度均显著高于玉米地, fPOM 则相反。特别是 oPOM 组分, 稻田是玉米地的近 6 倍。表明水稻土团聚体保护碳的能力高于旱地。稻田转换为玉米地 19 a 后, 各组分 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著升高。fPOM、oPOM 和 MOM 中来自玉米新碳的比例分别达到了 54.6%、24.7% 和 19.0%, 平均驻留时间(MRT)依次增大, 分别达到 24、67 和 90 a。上述结果进一步证明了稻田土壤比旱地更具固碳潜力, 其优势主要体现在土壤中 oPOM 和 MOM 组分碳的富积。

关键词: 土地利用; 稻田土壤; 土壤碳固定; 土壤有机碳组分; $\delta^{13}\text{C}$; 全球变化

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1146-06

Responses of Soil Organic Carbon Content and Fractions to Land-Use Conversion from Paddy Field to Upland

HUANG Shan¹, RUI Wen-yi¹, PENG Xian-xian¹, LIU Wu-ren², ZHANG Wei-jian^{1,3}

(1. Institute of Applied Ecology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130124, China; 3. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Natural ¹³C abundance determination method coupled with physical fractionation of soil organic carbon (SOC) was used to evaluate the responses of SOC and its fractions to long-term land-use conversion from paddy field to upland field (corn cultivation). Results showed that land-use conversion from paddy field to upland field led to significant decreases in the contents of SOC and total nitrogen (TN). Concentrations of total organic carbon (TOC) and TN were respectively greater by 76.7% and 47.6% in the paddy field than those in the corn field. Concentrations of occluded particulate organic matter (oPOM) and mineral-associated organic matter (MOM) on a whole soil basis were two times higher in the paddy field than those in the upland field, while no significant difference was found in free particulate organic matter (fPOM). Carbon concentrations of oPOM and MOM fractions on their own weight basis were significantly greater in the paddy field than those in the upland field, especially the oPOM fraction, which was 6 times higher in the former than that in the latter. It could be concluded that SOC protection exerted by soil aggregates in paddy soil was greater than that in upland soil. After a 19-year conversion from paddy field to corn field, $\delta^{13}\text{C}$ values of SOC fractions significantly increased. Maize-derived carbon (C) accounted for 54.6%, 24.7%, and 19.0% in fPOM, oPOM and MOM, respectively. Mean residence time (MRT) of the initial rice-derived C increased in the order fPOM (24 a) < oPOM (67 a) < MOM (90 a). The above results further indicate that paddy field soil owns greater capability of carbon sequestration than upland soil mainly through increasing the contents of oPOM and MOM in the fractions of SOC.

Key words: land-use conversion; paddy field soil; soil carbon sequestration; soil organic carbon fractions; $\delta^{13}\text{C}$; global change

土地利用方式对陆地生态系统碳循环和全球气候变化影响显著。工业革命以来, 大气 CO₂ 等温室气体浓度的快速升高已经引发了一系列的全球环境问题^[1]。人类活动导致的 CO₂ 释放中约有 35% 来自于土地利用的改变, 成为仅次于化石燃料燃烧的第二大 CO₂ 排放源^[2]。土地利用变化一方面通过植被的变化来改变地上部生物量碳库^[3,4]; 另一方面, 通过改变地上部有机物向地下输入的数量和质量以及

土壤有机质的分解速率, 从而导致土壤碳库的变化^[5,6]。而后者可能对全球碳循环产生更大的影响, 因为土壤有机碳库是陆地生态系统最大的活跃性碳

收稿日期: 2008-04-23; 修订日期: 2008-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB118601); 国家自然科学基金项目(30571094); 教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-05-0492); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD15B02)

作者简介: 黄山(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为全球变化生态学, E-mail: ncqyfz@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zwj@njau.edu.cn

库,约为大气碳库和陆地生态系统地上生物量碳库的 2~3 倍^[7].因此,土壤碳库的微小波动将可能对大气 CO₂ 浓度甚至全球碳平衡产生重大影响^[8].

土壤有机碳(SOC)由一系列复杂有机物组成.不同有机碳组分的物理、化学属性各异,分解程度、矿化难易及对土壤干扰的响应也不同^[9,10].许多研究发现,采用土壤有机碳物理分组结合¹³C自然丰度技术,可以研究不同结构和功能碳库的周转及其对环境变化的响应特征,从而增强人类对土壤有机碳库动态的认识^[11].在土地利用变化有关的土壤碳库评价上,特别是森林与农田、草地与农田、森林与草地之间的转换方面已经得到了广泛应用^[12~16].但在不同农田土地利用转变方面,尤其是水田与旱地的转换上则鲜有报道.而此 2 种截然不同的土地利用方式在土壤有机碳周转及保护方面存在很大差异^[17].大量研究表明水稻土有机碳含量显著高于相同生态区的旱地土壤,而且固碳潜力大^[18~20].因此,本研究的目的是:①明确稻田长期改种玉米后土壤有机碳及其组分的变化特征;②了解土地利用转变下不同有机碳组分的周转和更新速率,以期阐明水田和旱地土壤在有机碳积累、周转和保护机制上的差异.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验区位于吉林省公主岭市吉林省农科院水稻科学研究所试验基地(43°30'N, 124°48'E).试验区年平均气温 5.6℃,年平均降雨量 562 mm.试验地在 1987 年前一直种植水稻,之后部分农田转换为旱地,并一直种植玉米,土壤类型为淡黑钙土.第二次全国土壤普查吉林省淡黑钙土耕层的基本性质为:有机碳 9.6 g·kg⁻¹,总氮 1.2 g·kg⁻¹,pH 8.2,黏粒含量(< 2 μm)209.6 g·kg⁻¹.以此为本研究土地利用转换初始时的土壤基本性质提供参考.玉米、水稻均为长期一熟制连作,田间管理按照当地常规生产水平进行.每年作物收获后,茎秆不还田,作物根茬翻入土中作有机肥,无其它外源有机物输入.

1.2 土壤和植株样品采集

试验于 2007 年 4 月,分别在一直种植水稻的稻田和转换为玉米地的旱地上采集耕层土壤(0~15 cm)样品.每小区 6 点取样,并混匀作为 1 个混合样,4 次重复.同时,收集玉米和水稻植株秸秆,用于稳定性同位素δ¹³C测定.所采稻田和玉米田土壤 pH 分别为 7.2 和 6.6,黏粒含量分别是 246.8 g·kg⁻¹和

260.2 g·kg⁻¹.

1.3 土壤有机碳物理分组

土壤有机碳物理分组参考 Golchin 等^[21]和 Cambardella 等^[22]的方法进行.具体过程如下:取 10 g 过 2 mm 筛的风干土,倒进装有 30 mL NaI 溶液(1.6 g·cm⁻³)的容积为 50 mL 的离心管中,用手轻摇 5 次,再用 5 mL NaI 溶液冲洗离心管壁.静置 30 min 后,离心 1 h(5 000 r·min⁻¹).将悬液吸至 5 μm 筛上,加去离子水抽滤,彻底去除 NaI(AgNO₃ 检测无白色沉淀),获得游离态颗粒有机质(fPOM).离心管底部重组用 50 mL 去离子水冲 2 遍,加 0.5% 的六偏磷酸钠 30 mL,振荡 18 h(180 r·min⁻¹),过 53 μm 筛,筛上组分即为包裹态颗粒有机质(oPOM).过筛组分离心 10 min(5 000 r·min⁻¹),倒掉上清液即得矿物结合有机质(MOM).所有组分于 50℃烘干.fPOM 和 oPOM 组分经检测无碳酸盐,MOM 组分加 50 mL 0.1 mol·L⁻¹ 盐酸,振荡 16 h 去除其中的碳酸盐^[23].

1.4 样品分析

由于 fPOM 数量较少,加之仪器分析的要求,上述有机碳分组过程重复 1 次,2 次样品分别用于碳氮(Elementar Vario Max 元素分析仪,德国)和稳定性同位素¹³C自然丰度(MAT251 型同位素质谱仪,德国)测定.¹³C丰度值以相对于国际标准 V-PDB(Vienna-Pee Dee Belemnite limestone)的形式表示:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{sam}}/R_{\text{std}}) - 1] \times 1\,000 \quad (1)$$

式中, $R = (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})$, R_{sam} 为样品中的相对丰度, R_{std} 为标准样品的相对丰度.

稻田改种玉米 19 a 后,各有机碳组分中来自玉米新碳的比例可以通过公式(2)^[24]求得:

$$C_m(\%) = (\delta_m - \delta_r)/(\delta_m - \delta_r) \times 100 \quad (2)$$

式中, C_m 为各组分中来自玉米新碳的百分比, δ_m 、 δ_r 分别为玉米田和水稻田各有机碳组分δ¹³C值, δ_m 、 δ_r 分别是玉米和水稻植株根和叶δ¹³C的平均值(分别为 -11.16‰、-28.91‰).

各有机碳组分中,来自原有水稻的碳的平均驻留时间(MRT)可以通过公式(3)^[11]计算:

$$\text{MRT}(\text{a}) = -t/\ln(C_i/C_0) \quad (3)$$

式中, t 为转换的时间长度, C_i 为水稻田转换为玉米种植 19 a 后,各组分中来自原有水稻的碳的比例(1 - C_m), C_0 为一直种植水稻的稻田各组分中来自于水稻的碳的比例(100%).

1.5 数据分析

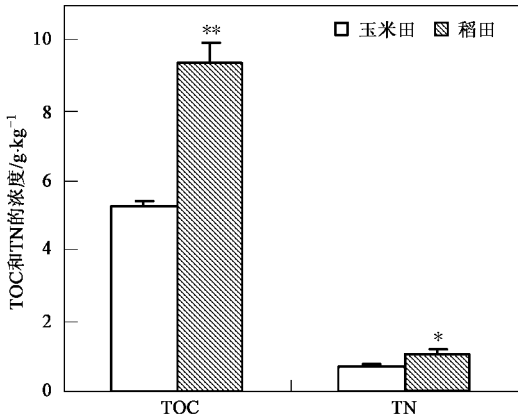
统计分析采用 SPSS 11.5 软件进行,于 $p < 0.05$

水平上进行统计显著性检验.

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳和总氮

稻田长期种植玉米后,农田土壤总有机碳(TOC)和总氮(TN)的浓度差异显著(图1).一直种植水稻的稻田土壤 TOC 和 TN 的浓度分别比转换为玉米地后的旱地土壤高 76.7%和 47.6%,表明稻田改为玉米地后,土壤有机碳与总氮显著下降.Cai^[19]对中国东南部土壤的研究表明,水田平均土壤有机碳的浓度是同生态区旱地的 2 倍.另有研究发现,全国水平上水田土壤有机碳的平均含量比旱地高 11.5%~57.5%^[25].对改种玉米 3 a 后的稻田的监测也表明,水田转变成旱地后,耕层土壤有机碳分解加速,碳含量快速减少^[17].稻田土壤 C/N 显著高于玉米地,分别达到 9.2 和 7.5,说明同样氮水平下,稻田土壤能固定更多的有机碳.土壤 C/N 一方面与外源有机物输入的质量(水稻和玉米植株有机碳输入的差异)有关;另外,不同土壤环境条件下有机碳分解过程和受保护的 水平不同,也会引起土壤 C/N 的变化,稻田特殊的厌氧环境有利于碳的固定和保护^[20].



* 表示玉米田和稻田之间差异达到显著水平($p < 0.05$),
* * 表示差异达到极显著水平($p < 0.01$),下同

图1 稻田和玉米田土壤总有机碳和总氮浓度的差异

Fig.1 Differences in the concentrations of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) between paddy field and corn field

2.2 各组分自身碳的浓度

一直种植水稻的稻田土壤 oPOM 和 MOM 自身碳的浓度均显著高于转换为玉米田的土壤(图2).特别是 oPOM 组分,稻田是玉米地的近 6 倍.MOM 差异较小,稻田比玉米地高 37.8%.而 fPOM 则相反,稻田土壤比玉米地低 15.8%.除玉米田 oPOM 和

MOM 差异不显著外,稻田和玉米地 fPOM、oPOM、MOM 自身碳的浓度均呈下降趋势,这与其他研究结果一致^[26].表明 fPOM、oPOM、MOM 的分解程度逐渐加深^[27].稻田和玉米地 oPOM 碳浓度的巨大差异,而且玉米地 oPOM 和 MOM 组分自身碳的浓度差异不显著,表明稻田土壤团聚体保护碳的能力显著高于旱地^[17].利用核磁共振光谱(¹³C NMR spectroscopy)研究显示,fPOM 化学组成与凋落物相似,表明 fPOM 组分主要来自于植物地上部及根系有机物的输入^[21].稻田 fPOM 碳的浓度较早地低可能是水稻和玉米植株不同的有机碳输入的数量和质量,以及不同土壤环境下有机质分解过程的差异共同作用的结果.

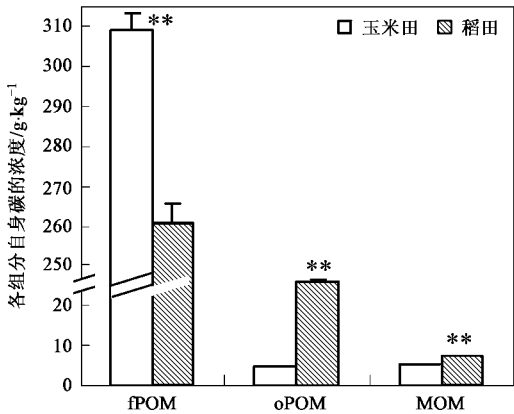


图2 各组分自身碳的浓度

Fig.2 Carbon concentrations of SOC fractions on their own weight basis

2.3 各碳组分在土壤中的浓度

一直种植水稻的稻田土壤 oPOM 和 MOM 组分碳在土壤中的浓度显著高于转换为玉米田的土壤,均是其近 2 倍,而 fPOM 组分差异不显著(图3).来自其它类型土地利用方式转变的研究表明,fPOM 和 oPOM 含量的差异可能是有机物输入的数量和质量的差异以及微生物活性不同的结果^[27].耕作过程降低土壤 fPOM 和 oPOM 的含量,集约化农作 35 a 后,森林损失了 95%的 fPOM,而受团聚体保护的 oPOM 下降则较为缓慢^[28].因此,稻田土壤有机碳显著高于旱地,可能主要是受团聚体和矿物保护的碳增加了,也就是说稻田土壤对有机碳的保护能力更强.另外,农田生态系统有机质自然归还水平较低,且本研究无有机肥施用,而 fPOM 主要受外源有机物输入的影响,这可能是造成稻田和玉米地 fPOM 含量差异不显著的原因.

虽然稻田 oPOM 和 MOM 无论是自身碳的浓度

还是在土壤中的浓度均显著高于玉米田,但其在土壤 TOC 上的分布并无显著改变.稻田 oPOM 和 MOM 组分占其 TOC 的比例分别为 31.5%、58.3%,玉米田则分别达到 33.2%、61.9%.对土壤质地相似的草地和农田的比较研究也得出了类似的结论,oPOM 和 MOM 在 TOC 上的分布并无显著差异^[21].受土壤团聚体和矿物保护的 oPOM 和 MOM 腐殖化程度更高、有机碳更为稳定^[29].因此,稻田土壤固定的有机碳向 oPOM 和 MOM 组分的富积有利于稻田土壤有机碳的长期贮存.

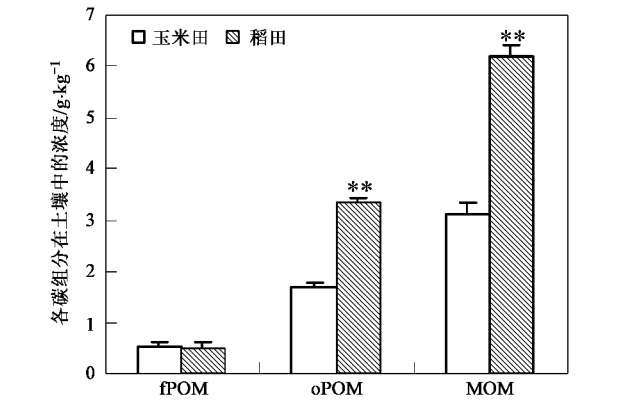


图3 各碳组分在土壤中的浓度

Fig.3 Carbon concentrations of SOC fractions on a whole soil basis

2.4 各组分 C/N

各有机碳组分 C/N 的差异趋势一致(图4).稻田 fPOM、oPOM 和 MOM 的 C/N 均显著高于玉米田.其中,oPOM 差异最大,MOM 的差异最小.如上所述,fPOM 的差异可能是外源有机物输入和土壤环境条件相互作用的结果,而稻田土壤 oPOM 和 MOM 组分较高的 C/N 可能更多的是与水稻土较强的保护碳的能力有关.同以往的研究一致^[27],无论是稻田还是玉米地,fPOM、oPOM 和 MOM 的 C/N 均依次下降.C/N 可以作为反映有机质分解程度的指标,研究表明无论是农田、草地或森林生态系统,土壤 fPOM、oPOM 和 MOM 的 C/N 均程下降趋势,反映出有机质分解和腐殖化程度逐渐加深^[15].针对玉米田土壤的 ¹³C NMR 研究清楚地显示了不同有机碳组分分解程度的差异.与 oPOM 和 MOM 组分相比,fPOM 所含的氧烷基碳的比例最高,而且氧烷基碳中含有相当数量的碳水化合物,表明 fPOM 还处于初始分解阶段.而 oPOM 组分比 fPOM 含有更多的烷基、羰基和芳香碳.与 oPOM 相比,MOM 组分具有更高比例的羰基和芳香碳,而氧烷基碳的比例较低^[21,26],在土壤中更为稳定.

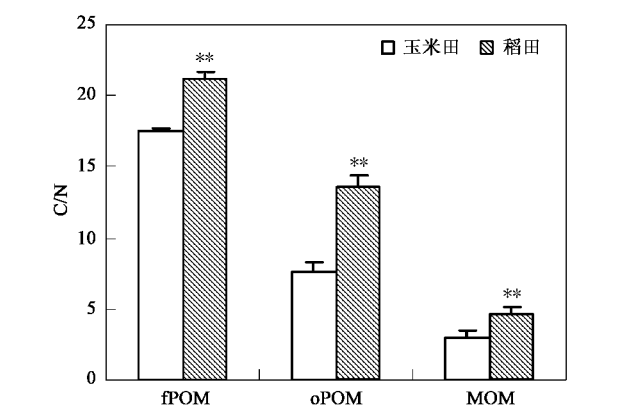


图4 各组分 C/N

Fig.4 C/N of SOC fractions

2.5 各组分 δ¹³C 和 MRT

稻田长期转换为玉米种植后,显著增加了¹³C在各有机碳组分中的丰度(表1).玉米田土壤 fPOM、oPOM 和 MOM 组分的δ¹³C值逐渐降低,水稻田则表现出相反的趋势,但 oPOM 和 MOM 差异不显著.稻田转换为玉米田 19 a 后,fPOM、oPOM 和 MOM 中来自玉米新碳的比例分别达到了 54.6%、24.7% 和 19.0%.通过¹³C 自然丰度计算出的平均驻留时间(MRT)显示,fPOM 具有最短的更新周期,而 MOM 最为稳定,更新周期达到 90 a.与 C/N 反映的一致,来自玉米新碳的比例和 MRT 均清楚地表明了各碳组分稳定性的差异.对森林与草地转换的研究也发现,fPOM、oPOM 和 MOM 的周转时间依次增大^[11].MOM 高的稳定性可能是其与土壤粘粒相互作用的结果,粘粒对有机碳的保护作用已被广泛证实^[30].Six 等^[31]的综合分析表明了土壤粘粒含量(包括 < 50 μm 的粉沙粒)与其碳容量的正相关关系,并且发现矿物类型也有明显影响.另外,MOM 的稳定性可能还与其自身的难降解性有关,因为生物可降解性较差的疏水性有机质更易被粘粒所吸附^[32].本研究表明,oPOM 的更新周期是 fPOM 的近 3 倍.团聚体的物理保护作用被认为是土壤有机碳稳定的重要机

表1 各组分 δ¹³C 和 MRT⁽¹⁾

有机碳组分	δ ¹³ C/‰		来自玉米新碳 的比例/%	MRT/a
	玉米田	稻田		
fPOM	-14.19** A	-23.89b	54.6A	24C
oPOM	-18.23** B	-22.61a	24.7B	67B
MOM	-19.49** C	-22.87a	19.0C	90A

1) ** 表示玉米田和稻田之间差异达到极显著水平($p < 0.01$);同一列中,不同小写字母表示差异达到显著水平($p < 0.05$),不同大写字母表示差异达到极显著水平($p < 0.01$)

制,且微团聚体的保护能力大于大团聚体^[31].另外,对黑龙江地区黑土的动态研究也显示,玉米种植导致土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈线性增加趋势,土壤总有机碳的半衰期达到 65 a^[33].

3 结论

(1)稻田转换为旱地后,土壤 TOC 和 TN 的浓度均显著下降.一直种植水稻的稻田土壤 TOC 和 TN 分别比转换为玉米地的土壤高 76.7% 和 47.6%.一直种植水稻的稻田土壤 oPOM 和 MOM 组分碳在土壤中的浓度也显著大于转换为玉米后的旱地土壤,差异均达到近 2 倍,但 fPOM 组分差异不显著.土壤中的有机碳向 oPOM 和 MOM 组分富积,有助于稻田土壤有机碳的稳定和长期贮存.

(2)稻田土壤 oPOM 和 MOM 自身碳的浓度均显著高于玉米田,fPOM 则相反.特别是 oPOM 组分,稻田是玉米田的近 6 倍.稻田各有机碳组分的 C/N 均高于玉米田,表明水稻土的固碳能力尤其是土壤团聚体的保护能力强于旱地.

(3)水稻改种玉米 19 a 后,农田土壤中各碳组分 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著升高.fPOM、oPOM 和 MOM 中来自玉米新碳的比例分别达到了 54.6%、24.7% 和 19.0%,平均驻留时间依次增大,分别为 24、67 和 90 a.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis [R]. Cambridge. Cambridge University Press, 2007.
- [2] Foley J A, Defries R, Asner G P, *et al.* Global consequences of land use [J]. *Science*, 2005, **309**:570-574.
- [3] Canadell J G, Pataki D. New advances in carbon cycle research [J]. *Trends Ecol Evol*, 2002, **17**:156-158.
- [4] Houghton R A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? [J]. *Glob Change Biol*, 2003, **9**:500-509.
- [5] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis [J]. *Glob Change Biol*, 2002, **8**:345-360.
- [6] Post W H, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential [J]. *Glob Change Biol*, 2000, **6**:317-327.
- [7] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. *Geoderma*, 2004, **123**:1-22.
- [8] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon [J]. *Nature*, 2000, **403**:301-304.
- [9] Baldock J A, Oades J M, Nelson P N, *et al.* Assessing the extent of decomposition of natural organic materials using solid-state ^{13}C NMR spectroscopy [J]. *Aust J Soil Res*, 1997, **35**:1061-1083.
- [10] Guggenberger G, Zech W, Haumaier L, *et al.* Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution ^{13}C NMR analysis [J]. *Eur J Soil Sci*, 1995, **46**:147-158.
- [11] Schwendenmann L, Pendall E. Effects of forest conversion into grassland on soil aggregate structure and carbon storage in Panama: Evidence from soil carbon fractionation and stable isotopes [J]. *Plant Soil*, 2006, **288**:217-232.
- [12] 刘启明,王世杰,朴河春,等. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的含量变化[J]. *环境科学*, 2002, **23**(3):75-78.
- [13] 刘启明,王世杰,朴河春,等. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的迁移和赋存规律[J]. *环境科学*, 2002, **23**(4):89-92.
- [14] Del Galdo I, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes [J]. *Glob Change Biol*, 2003, **9**:1204-1213.
- [15] Yamashita T, Flessa H, John B, *et al.* Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: Effect of land use [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**:3222-3234.
- [16] Desjardins T, Barros E, Sarrazin M, *et al.* Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2004, **103**:365-373.
- [17] 李志鹏,潘根兴,张旭辉. 改种玉米连续 3 年后稻田土壤有机碳分布和 ^{13}C 自然丰度变化[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(2):244-251.
- [18] 许信旺,潘根兴,侯鹏程. 不同土地利用对表层土壤有机碳密度的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(6):193-196.
- [19] Cai Z C. Effect of land use on organic carbon storage in soils in eastern China [J]. *Water Air Soil Pollut*, 1996, **91**:383-393.
- [20] Pan G X, Li L Q, Wu L S, *et al.* Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils [J]. *Glob Change Biol*, 2003, **10**:79-92.
- [21] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, *et al.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy [J]. *Aust J Soil Res*, 1994, **32**:285-309.
- [22] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, **56**:777-783.
- [23] Sleutel S, Neve S D, Németh T, *et al.* Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments [J]. *Eur J Agron*, 2006, **25**:280-288.
- [24] Solomon D, Fritzsche F, Lehmann J, *et al.* Soil organic matter dynamics in the subhumid agroecosystems of the Ethiopian highlands: Evidence from natural ^{13}C abundance and particle-size fractionation [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, **66**:969-978.
- [25] Guo L P, Lin E. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: A review of work in China [J]. *Chemosphere-Glob Change Sci*, 2001, **3**:413-418.
- [26] Helfrich M, Ludwig B, Buurman P, *et al.* Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as

revealed by solid-state ¹³C NMR spectroscopy [J]. Geoderma, 2006, **136**: 331-341.

[27] John B, Yamashita T, Ludwig B, *et al.* Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use [J]. Geoderma, 2005, **128**: 63-79.

[28] Besnard E, Chenu C, Balesdent J, *et al.* Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation [J]. Eur J Soil Sci, 1996, **47**: 495-503.

[29] Guggenberger G, Christensen B T, Zech W. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature [J]. Eur J Soil Sci, 1994, **45**: 449-458.

[30] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles [J]. Plant Soil, 1997, **191**: 77-87.

[31] Six J, Conant R T, Paul E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. Plant Soil, 2002, **241**: 155-176.

[32] Kaiser K, Zech W. Release of natural organic matter sorbed to oxides and a subsoil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1999, **63**: 1157-1166.

[33] Wang G H, Han X Z, Nakayama N, *et al.* Soil organic matter dynamics in lands continuously cultivated with maize and soybean in Heilongjiang Province, Northeast China: Estimation from natural ¹³C abundance [J]. Soil Sci Plant Nutr, 2006, **52**: 139-144.