

长期施肥红壤矿物颗粒结合有机碳储量及其固定速率

佟小刚^{1,2}, 王伯仁¹, 徐明岗¹, 张文菊¹

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081; 2.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:采用物理分组方法分析了长期不同施肥模式下红壤耕层(0~20 cm)不同大小矿物颗粒结合态有机碳储量差异及其固定速率。结果表明,与不施肥相比,长期施肥均显著增加了耕层土壤砂粒、粗粉粒、细粉粒及粗黏粒结合有机碳的储量,且以配施有机肥(M、NPKM和1.5NPKM)效果最显著,固碳速率分别达到0.13~0.24、0.19~0.23、0.05~0.16及0.12~0.36 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;施化肥(NPK、NP、N)和秸秆还田(NPKS)有利于增加细黏粒有机碳储量,且固碳速率高于配施有机肥,分别达到0.08~0.13和0.11 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。17 a有机肥配施有利于增加固存于粗粉粒(30.5%)和粗黏粒(30.7%)中的有机碳;而秸秆还田(NPKS)和化肥施用下,有利于增加固存于粗粉粒(32.9%)和细黏粒(42.9%)中的有机碳,说明无论化肥配施还是有机无机配施,红壤粗粉粒是固定新增有机碳的主要组分,而长期配施有机肥是提升红壤各级颗粒有机碳库的较好施肥模式。

关键词:长期施肥;有机碳;储量;土壤颗粒;红壤

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2584-06

Change Characteristics of Organic Carbon Stocks and Sequestration Rate of Particle-size Fractions in Red Soil Under Long-term Fertilizations

TONG Xiao-gang^{1,2}, WANG Bo-ren¹, XU Ming-gang¹, ZHANG Wen-ju¹

(1.Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China; 2.College of Resource and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: The density fractionation scheme was used to study change characteristics of organic carbon stocks and sequestration rate of particle-size fractions in red soil under long-term fertilization. Our results showed that compared to non-fertilization (CK), long-term fertilization significantly increased the organic carbon stock that combined with sand (S), coarse silt (CS), fine silt (FS), and coarse clay (CC). Especially, applications with manure (M, NPKM, 1.5NPKM) showed highest carbon sequestration rate in S-OC (0.13~0.24 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), CS (0.19~0.23 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), FS (0.05~0.16 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), and CC (0.12~0.36 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), respectively. Applications of chemical fertilizers (NPK, NP, N) and straw incorporation were more effective to increase organic carbon in FC and the carbon sequestration rate were 0.08~0.13 and 0.11 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively, which were higher than the rates of applications with manure. Applications with manure were apt to sequester more organic carbon in the CS (30.5%) and CC (30.7%) particles. However, application of straw incorporation (NPKS) and chemical fertilizers sequestered more organic carbon in CS (32.9%) and FC (42.9%) particles. Therefore, CS was the main carbon pool that sequestered organic carbon in red soil under long-term fertilization. Moreover, long-term application with manure was helpful fertilization practices to increase organic carbon in all particle-size fractions of red soil.

Keywords: long-term fertilization; organic carbon; reserves; particle-size fractions; red soil

收稿日期:2009-09-13

基金项目:国家自然科学基金(40871148);“十一五”国家重点科技支撑计划项目(2006BAD02A14, 2006BAD05B09);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2009-17)

作者简介:佟小刚(1979—),男,锡伯族,新疆伊犁人,博士,主要从事土壤肥力方面的研究。

通讯作者:徐明岗 E-mail:mgxu@caas.ac.cn

农业土壤碳库作为陆地循环系统中最活跃的碳库,被认为是具有巨大能力和潜力缓解全球大气 CO₂ 温室效应的碳汇^[1-2]。增加农业土壤碳固定,不仅可使退化土壤得到修复,增加土壤肥力,提高作物生产力^[3],而且可作为有效的、具有中长期利益的 CO₂ 减排廉价途径^[4]。因此,农业土壤碳固定途径、容量、过程及机理已成为当前土壤和全球变化研究的重点和热点问题^[5-7]。目前已有大量有关土壤固碳中有机碳库变化的研究报道,已经认识到保护性耕作^[8]、秸秆还田^[9]、施用有机肥^[10]等可以显著增加农业土壤碳库,并且进一步认为施肥可能是具备提高农业土壤碳库最大潜力的直接而有效的措施^[11-12]。但土壤有机碳既有存在于土壤团聚体间活性的自由或轻组碳组分,还有团聚体中物理保护的碳组分^[13]及与矿物颗粒结合的惰性碳^[14],因此,单是土壤总碳库变化并不能很好地揭示不同农业措施下土壤中有机碳转化、积累的过程和机制。国外对这些碳组分库的保护、结合和稳定等特点已有较多报道,认为这些处于土壤不同结构或组成位置中的碳组分具有不同的功能和性质,对土壤碳固定起到不同的作用^[6]。如不同大小矿物颗粒通过配位体交换、氢键及疏水键等作用吸附固持了土壤中 50%~100% 的有机碳^[15],对土壤固碳起着重要作用。与砂粒结合的有机碳功能上属于活性有机碳库,被称为颗粒有机碳(particulate organic carbon,POC),它是其他矿物颗粒结合有机碳的源^[16]。多数研究还认为土壤有机碳主要集中于黏粒上,特别是粗黏粒上^[17-18],但也有研究报道细粉粒有机碳所占的比例最高^[15,19]。施用有机肥、与豆科轮作等措施也都可以显著增加不同大小矿物颗粒结合有机碳库,施化肥(特别是单施氮肥)则影响较小^[14-15,17]。可见只有首先准确对土壤有机碳中不同的组分容量和分布变化进行测定和分析,才能进一步揭示土壤碳循环的机制及碳库的动态过程。目前,国内研究主要集中于施肥对土壤不同粒级团聚体内有机碳的影响上^[20-22],对长期施肥下土壤不同大小矿物颗粒结合有机碳组分的变化还知之甚少。本文对长期不同施肥下的旱地红壤当年和历史土样不同大小矿物颗粒进行分组,观测各级颗粒有机碳储量、固定速率及固定碳再分配状况,从而为选择有效提升红壤碳库的固碳措施及揭示不同施肥下红壤有机碳周转及固存机制提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

供试土壤为壤质红壤,采自中国农业科学院湖南

祁阳(东经 111°52',北纬 26°45')肥料长期试验站,是我国亚热带地区具有富铝化特征的地带性土壤,成土母质为第四纪红土。该肥料试验起始于 1990 年,起始时耕层土壤(0~20 cm)基本性质为:有机碳 7.47 g·kg⁻¹,全氮 1.07 g·kg⁻¹,全磷(P₂O₅)1.03 g·kg⁻¹,有效氮 79 mg·kg⁻¹,速效磷 10.8 mg·kg⁻¹,速效钾 122.0 mg·kg⁻¹,pH 5.1,土壤容重 1.25 g·cm⁻³。土壤矿物颗粒组成为:砂粒 11.9 %、粗粉粒 35.0 %、细粉粒 10.9 %、粗黏粒 30.4 %及细黏粒 10.6 %。

本研究选择 8 个处理:①不施肥(CK),②单施氮肥(N),③氮、磷肥配施(NP),④氮、磷、钾肥配施(NPK),⑤氮、磷、钾化肥与有机肥配施(NPKM),⑥氮、磷、钾+作物秸秆还田(NPKS),⑦单施有机肥(M),⑧增量氮、磷、钾+增量有机肥(1.5NPKM)。每个处理 2 次重复,每小区面积 196 m²。种植方式均为小麦-玉米轮作,一年两熟。施肥量为每年每公顷 N 300 kg、P₂O₅ 120 kg、K₂O 120 kg,有机氮与无机氮之比为 7:3。施用有机肥的处理只考虑其中的氮与其他处理相同,不考虑磷、钾养分,有机肥为猪粪。秸秆还田为每季作物秸秆的一半还田,未考虑其养分。肥料在整地之前全部以基肥的形式施入。土样于 2007 年 9 月采集,采样深度 0~20 cm,每小区重复 3 次。土壤历史样品采用保存的试验初始时土样。土壤采集后在室内风干、磨碎,过 2 mm 筛备用。在研磨过程中弃去大于 2 mm 的有机物和砂砾。

1.2 不同大小矿物颗粒结合有机碳的分离与测定

采用改进的 Anderson 等^[18]和武天云等^[23]的分组方法:称取 10 g 风干土样于 250 mL 烧杯,加水 100 mL,在超声波发生器清洗槽中超声分散 30 min,然后将分散悬浮液冲洗过 53 μm 筛,直至洗出液变清亮为止。过筛得到 53~2 000 μm 的砂粒(S:sand)和部分植物残体。过 53 μm 筛的黏粉粒根据 Stokes 定律计算每一个粒级颗粒分离的离心时间,用离心机对洗出液进行离心。通过不同的离心速度和离心时间分离得到粗粉粒(5~53 μm,CS:coarse silt)、细粉粒(2~5 μm,FS:fine silt)、粗黏粒(0.2~2 μm,CC:coarse clay)和细黏粒(<0.2 μm,FC:fine clay)。离心过程中粗粉粒和粗黏粒为离心管底部沉淀,直接转移至铝盒;细粉粒和细黏粒为悬液,采用 0.2 mol·L⁻¹ CaCl₂ 絮凝,再离心收集。以上砂粒、粉粒及黏粒的分级基本以美国农业部为准。各组分转移至铝盒后,先在水浴锅上蒸干,然后置于烘箱内,60 °C 下 12 h 烘干。烘干后各组分磨细过 0.25 mm 筛,采用重铬酸钾法测定有机碳含量。

1.3 数据分析

试验结果统计与分析采用 Excel 和 SPSS 软件进行,所有数据测定结果均以平均值表示。不同施肥处理矿物颗粒有机碳含量、固定速率和分配比例采用邓肯法进行差异显著性检验($P<0.05$)。不同施肥各有机碳组分固定速率按下式计算:

固定速率=(当年土样某有机碳组分储量试验初始时对应有机碳组分储量)/试验年限

不同施肥固定的总有机碳在各组分的分配比例按下式计算:

分配比例(%)=(2007年某有机碳组分储量-1990年对应有机碳组分储量)/(2007年总有机碳储量-1990年总有机碳储量) $\times 100\%$

2 结果与分析

2.1 红壤矿物颗粒结合有机碳储量的差异

表 1 显示长期不同施肥 17 a 后各级矿物颗粒结合有机碳储量的变化状况。

与不施肥相比,长期施用化肥(NPK、NP、N)砂粒、粗粉粒、细粉粒、粗黏粒及细黏粒有机碳分别显著提高了 0.6~1.3 倍、0.2~0.6 倍、0.4 倍、0.2~0.3 倍及 0.8~1.0 倍。特别是施用化肥细黏粒有机碳储量平均比配施有机肥(M、NPKM 和 1.5NPKM)显著高 0.5 倍,说明施用化肥有利于细黏粒有机碳的增加,并且单施氮肥(N)表现出比氮磷配施(NP)和平衡施用化肥(NPK)更显著的效果。长期秸秆还田(NPKS)红壤

各级矿物颗粒有机碳均有显著增加,但与施化肥相比,秸秆还田整体上并没有表现出显著的促进矿物颗粒有机碳的作用,如在细粉粒有机碳上二者并无显著差异,在粗粉上秸秆还田有机碳储量还低于施用化肥处理,可见秸秆还田与化肥配施下,秸秆还田直接向土壤输入大量有机物也不能凸现其增加红壤有机碳的作用。除单施有机肥细黏粒有机碳含量与不施肥无显著差异外,配施有机肥砂粒、粗粉粒、细粉粒、粗黏粒及细黏粒有机碳分别显著提高了 2.0~3.0 倍、1.0~1.5 倍、0.6~1.1 倍、0.5~1.0 倍及 0.3~0.4 倍,同时不同有机肥处理间各级矿物颗粒有机碳储量表现为 1.5NPKM>NPKM>M。不同施肥下各级矿物颗粒有机碳相比,在平均增幅上表现出砂粒有机碳最大,是其他矿物颗粒有机碳的 2.2~3.4 倍,说明该组分有机碳对施肥响应最敏感;在平均储量上以粗黏粒最高,其他矿物颗粒间并无显著差异,可见粗黏粒是红壤固存有机碳的主要矿物颗粒组分。

2.2 红壤矿物颗粒结合有机碳固定速率的变化

红壤各级矿物颗粒有机碳随不同施肥持续施用固碳速率变化差异较大(图 1)。不施肥仅粗粉粒有机碳以年均 0.02 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的速率呈现增加的趋势,其余矿物颗粒有机碳均呈显著下降趋势,说明不施肥下红壤中较细颗粒固持的惰性有机碳也会被消耗损失。持续施用化肥对细粉粒和粗黏粒有机碳影响较小;粗粉粒和细黏粒有机碳均呈显著增加趋势,年均固碳速率分别为 0.06~0.12 和 0.08~0.11 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$;单施氮肥砂粒有机碳略呈下降趋势,而氮磷配施和平衡施用化肥则使其分别以年均 0.02 和 0.06 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的固碳速率显著上升。持续秸秆还田使得粗粉粒、粗黏粒和细黏粒分别以年均 0.05、0.05、0.11 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的固碳速率显著上升,对于砂粒和细粉粒有机碳仅能维持基本稳定。除单施有机肥使得细黏粒有机碳以年均 0.04 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 固碳速率显著下降外,持续配施有机肥后砂粒、粗粉粒、细粉粒及粗黏粒的年均固碳速率分别达到 0.13~0.24 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、0.19~0.027 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、0.05~0.16 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 及 0.12~0.36 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。高量有机肥配施(1.5NPKM)下各组分有机碳固定速率均显著高于常量有机肥配施,表现出更有效增加红壤有机碳库的作用。

2.3 红壤不同矿物颗粒结合有机碳的分配比例

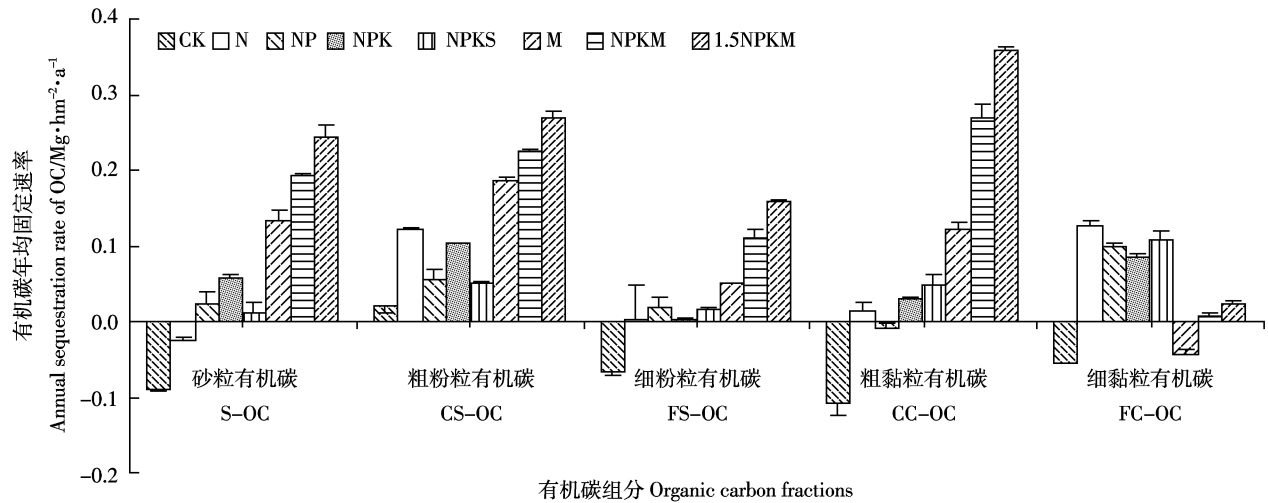
图 2 显示持续施肥 17 a 后不同施肥措施增加的有机碳在各级矿物颗粒中的分配状况。可以看出,整体上配施有机肥与施用化肥和秸秆还田固定有机碳分配比例可分为两大类:施用有机肥对细黏粒结合的

表 1 长期施肥红壤耕层(0~20 cm)不同大小
矿物颗粒结合有机碳储量
Table 1 Organic carbon stocks of particle-size fractions(0~20 cm)
in Red soil under long-term fertilizations($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	砂粒 有机碳 S-OC	粗粉粒 有机碳 CS-OC	细粉粒 有机碳 FS-OC	粗黏粒 有机碳 CC-OC	细黏粒 有机碳 FC-OC
CK	1.88g	2.77g	3.38f	8.00g	3.13f
N	2.99f	4.47e	4.59d	10.08ef	6.20a
NP	3.79e	3.35f	4.86d	9.67f	5.74b
NPK	4.38e	4.16e	4.58d	10.33de	5.50c
NPKS	3.61e	3.24f	4.79d	10.67d	5.89b
M	5.68c	5.57c	5.41c	11.91c	3.32f
NPKM	6.67b	6.22b	6.40b	14.39b	4.19e
1.5NPKM	7.53a	6.95a	7.22a	15.91a	4.46d

注:表中同列数字后不同字母表示不同施肥处理间在 5%水平下差异显著。下同。

Values in same column followed by a different letter are significant difference at 5% level among the treatments. The same as below.



试验初始土壤砂粒、粗粉粒、细粉粒、粗黏粒及细黏粒有机碳储量分别为 1.36、0.96、1.81、3.93 及 1.62 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$

The stocks of organic carbon in S, CS, FS, CC and FC were 1.36, 0.96, 1.81, 3.93 and 1.62 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively

图 1 长期不同施肥各矿物颗粒的固碳速率

Figure 1 Organic carbon sequestration rate in different particle-size fractions under long-term fertilization

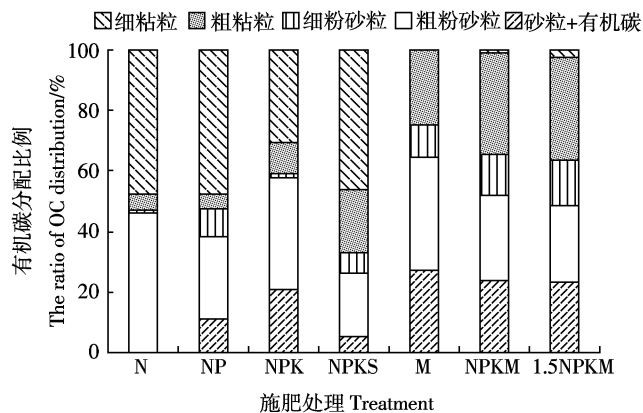


图 2 长期不同施肥固定的有机碳在各矿物颗粒中的分配比例

Figure 2 The distributed ratio of organic carbon sequestered by different long-term fertilization in particle-size fractions

有机碳基本无影响,分配比例仅为 0.9%~2.3%,各级矿物颗粒有机碳平均分配比例呈现粗黏粒(30.7%)>粗粉粒(30.5%)>砂粒(24.7%)>细粉粒(13.1%)>细黏粒(1.1%)。施用化肥和秸秆还田增加的有机碳 30.4%~46.0%固存在细黏粒中,各级矿物颗粒有机碳平均分配比例呈现细黏粒(42.9%)>粗粉粒(32.9%)>砂粒(12.3%)>粗黏粒(10.4%)>细粉粒(4.5%)。由此可见粗粉粒是红壤在长期施肥下固定新增有机碳的重要碳库。

3 讨论

不同大小矿物颗粒有机碳由于表面积和表面化

学性质不同,它们结合的有机碳的含量、组成、化学性质、抗分解能力存在本质的区别^[15],因而对施肥响应差异明显。砂粒有机碳主要是处于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时的或过渡的有机碳,因此对于农业管理措施十分敏感^[24]。本研究结果显示不同施肥均能显著增加砂粒有机碳储量。Wu 等^[14]亦报道长期施肥甘肃黑垆土砂粒中有机碳,在长期施用化肥和有机肥后显著增加,尤其是配施有机肥增加最明显,这与有机肥直接提供了与砂粒有机碳组成相近的有机质组分直接相关。同样输入有机物的配施秸秆处理虽然也能显著增加红壤中的砂粒有机碳,但却与施化肥效果接近。徐江兵等^[24]也得出南方红壤长期配施秸秆并不能增加土壤轻组有机碳,这可能与南方高温高湿下秸秆矿化分解迅速有关,同时施化肥也为微生物提供了氮源,从而增强微生物活动,使得秸秆分解加快,从而耗损。而单施化肥下,也是根茬分解较快,造成砂粒有机碳积累较少^[14]。另外,长期施肥下砂粒有机碳储量增幅是其他矿物颗粒有机碳的 2.2~3.4 倍,也说明其对施肥敏感的碳组分,可以作为表征土壤有机碳响应农业措施变化的指示碳库^[25]。

黏粉粒中吸附的有机碳主要是半腐殖化和完全腐殖化的有机碳,基本属于惰性有机碳组分,对于土壤固碳起着重要的作用^[6,14]。配施有机肥不仅直接外源输入有机碳,而且有机肥中的多聚糖、脂肪酸及芳香族化合物可以被矿物颗粒吸附^[26],因此使得不同大小黏粉粒结合有机碳含量均显著增加,且高量配施有

机肥下各级黏粉粒结合有机碳固定速率达到最高;秸秆还田和施化肥主要增加了粗粉粒和细黏粒有机碳,粗粉粒是新增有机碳向更细颗粒转移的中转站,其组成不止是腐殖质,还包括一些半分解的植物残体,因此比较细的矿物颗粒有机碳对施肥较更敏感。而细黏粒有机碳显著增加是因为化肥为微生物提供了直接的速效养分,加强了微生物活动,代谢分泌物增多,这些分泌物又直接由粗颗粒转移至细颗粒,导致细黏粒有机碳积累增加^[14]。不同黏粉粒间比较,粗黏粒有机碳储量最高,这一方面与其结合的有机碳是高度腐殖化有机碳,从而抗分解能力强有关,另一方面粗黏粒本在红壤汇总就占到了 30.4% 有关^[15],因此它对固持土壤原有碳库具有重要作用。而不同施肥都将固定有机碳统一高比例的分配在粗粉粒中,进一步说明粗粉粒是红壤固定新增有机碳的重要组分及其作为有机碳中转站的重要作用。

4 结论

长期有机无机肥配施显著促进了红壤各级矿物颗粒有机碳的增加,并且高量有机肥配施显出更好的效果,说明增施有机肥对于增加红壤碳固定具有较大潜力。施用无机肥及无机肥与秸秆配施对增加各级矿物颗粒有机碳表现出类似的效果,它们都有利于增加细黏粒上的有机碳。不同矿物颗粒有机碳组分以砂粒有机碳对施肥最敏感,可以作为表征土壤有机碳响应农业措施变化的指示物。不同大小黏粉粒有机碳组分又以粗粉粒聚集了最高比例的新增有机碳,因此是长期施肥下红壤固定有机碳的重要碳库。

参考文献:

- [1] 潘根兴,周 萍,李恋卿,等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
PAN Gen-xing, ZHOU Ping, LI Lian-qing, et al. Core issues and research processes of soil science of sequestration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 327-337.
- [2] Triberti L, Nistri A, Giordani, et al. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland?[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 29: 13-20.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(11): 1623-1627.
- [4] Antle J, Capalbo S, Mooney S, et al. Sensitivity of carbon sequestration costs to soil carbon rates[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 413-422.
- [5] 曲建升,孙成权,张志强,等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 980-987.
QU Jian-sheng, SUN Cheng-quan, ZHANG Zhi-qiang, et al. Trends and advances of the global change studies on carbon cycle[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(6): 980-987.
- [6] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241: 155-176.
- [7] Lal R. Carbon management in agricultural soils[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12: 303-322.
- [8] Peterson G A, Halvorson A D, Havlin J L, et al. Reduced tillage and increasing cropping intensity in the Great Plains conserves soil C[J]. *Soil & Tillage Research*, 1998, 47: 207-218.
- [9] Freibauer A, Rounsevell M D A, Smith P, et al. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe[J]. *Geoderma*, 2004, 122: 1-23.
- [10] Kukal S S, Rehana-Rasool, Benbi D K. Soil organic carbon sequestration in relation to organic and inorganic fertilization in rice wheat and maize wheat systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 102: 87-92.
- [11] Smith P. Carbon sequestration in crop lands: The potential in Europe and the global context[J]. *Europe Journal of Agronomy*, 2004, 20: 229-236.
- [12] Sleutel S, Neve D S, Nèmeth 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]. *Europe Journal of Agronomy*, 2006, 25, 280-288.
- [13] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soilbiota and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79: 7-31.
- [14] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, et al. Influence of fertilization and organic amendments on organic-carbon fractions in Heilu soil on the loess plateau of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168: 100-107.
- [15] Schulten H R, Leinweber P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: Characteristics of particle-size fractions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 12: 81-88.
- [16] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777-783.
- [17] Diekow J, Meilniczuk J, Knicker H, et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of subtropical acrisol as influenced by long-term cropping systems and N fertilization[J]. *Plant and Soil*, 2005, 268: 319-328.
- [18] Anderson D W, Saggar S, Bettany J R, et al. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulfur[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45: 767-772.
- [19] Tiessen H, Stewart J W B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47: 509-514.
- [20] 李昌新,黄 山,彭现亮,等. 南方红壤稻田与旱地土壤有机碳及其组分的特征差异[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 606-611.
LI Chang-xin, HUANG Shan, PENG Xian-xian, et al. Differences in soil organic carbon fractions between paddy field and upland field in

- red soil region of south China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):606-611.
- [21] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(12):2961-2967.
- YUAN Ying-hong, LI Hui-xin, HUANG Qian-ru, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy top soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12):2961-2967.
- [22] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(9):1841-1848.
- SUN Tian-cong, LI Shi-qing, SHAO Ming-an. Effects of long-term fertilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9):1841-1848.
- [23] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 利用离心法进行土壤颗粒分级[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3):477-481.
- WU Tian-yun, Schoenau J J, LI Feng-min, et al. Soil particle size fractionation with centrifugation method[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3):477-481.
- [24] Mrabet R, Saberb N, El-brahia A, et al. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 57:225-235.
- [25] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 63(324):133-139.