

长期施肥对红壤稻田耕层土壤碳储量的影响

陈安磊¹, 谢小立¹, 陈惟财¹, 王凯荣², 高超³

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 青岛农业大学农业生态与环境健康研究所, 青岛 266109; 3. 湖北省水土保持监测中心, 武汉 430071)

摘要:以红壤性稻田土壤为对象, 研究了长期施肥(1990~2006年)对稻田表层土壤碳储量及固碳潜力的影响, 讨论了耕层厚度变化对碳储量估算及处理间差异的影响. 研究发现, 与长期施用化肥相比, 有机物的循环利用能显著提高红壤性稻田土壤碳储量, 其碳储量为 57.7~66.2 t/hm², 比试验前高出 18.7~27.2 t/hm², 而长期施用化肥碳储量提高幅度平均为 5.4 t/hm². 红壤性稻田土壤饱和固碳量为 84.0 t/hm², 与目前碳储量相比还有 17.8~43.7 t/hm²的固碳潜力. 研究证实, 土壤碳储量与土壤容重和表层土壤厚度的变化密切相关, 以 20 cm 或 23 cm 作为统计厚度估算表层土壤的碳储量将分别低估 20.6% 和 11.3%, 其中有机物施用处理碳储量低估幅度最大(分别为 26.8% 和 18.9%); 另外, 用相同统计厚度进行碳储量估算减小了不同施肥处理间的差异. 从稻田土壤碳储量及固碳潜力来考虑, 有机物配合化肥施用是红壤稻田较优的施肥方式.

关键词: 施肥模式; 红壤稻田; 耕层; 土壤碳储量; 土壤容重

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1267-06

Effect of Long-term Fertilization on Soil Plough Layer Carbon Storage in a Reddish Paddy Soil

CHEN An-lei¹, XIE Xiao-li¹, CHEN Wei-cai¹, WANG Kai-rong², GAO Chao³

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Institute of Agriculture Ecological and Environmental Health, Qingdao Agriculture University, Qingdao 266109, China; 3. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Hubei, Wuhan 430071, China)

Abstract: With a reddish paddy soil as test materials, soil profile nitrogen storage in long-term different fertilization system(1990-2006) have been investigated. The result indicated that recycling of organic matter significantly increased the soil profile C storage(ranged from 57.7 to 66.2 t/hm²), and it was increased by 18.7-27.2 t/hm² compared with the soil profile C storage of 1990. But it was increased by 5.4 t/hm² with only application of chemical fertilizers. Saturated carbon storage of paddy soils was 84.0 t/hm², and the C sequestration potential ranged from 17.8-43.7 t/hm² compared with the current soil profile carbon storage. The result showed that there was a significant relationship between soil bulk density and depth changes of profile soil. The organic C storage would be greatly underestimated by 20.6% or 11.3% if we only take 20 cm or 23 cm as the standard depth in the estimating method for organic C storage, it also would be underestimated the difference of treatments. The combined application of chemical fertilizer and organic matter is optimal for agricultural field based on soil organic C storage and the carbon sequestration potential.

Key words: fertilization systems; reddish paddy; plough layer; soil carbon storage; soil bulk density

大气 CO₂ 浓度增加引起全球气候变暖是人类目前面临的最严重的环境问题之一. 解决气候变暖问题的根本措施之一是减少温室气体的人为排放, 增加生态系统的固碳量. 土壤碳库是地球表层系统中最大的碳库, 其中土壤有机碳库约是大气碳库的 2 倍^[1], 其呼吸排放的 CO₂ 是土壤碳与大气 CO₂ 快速交换的主要形式^[2], 因此实现土壤有机碳的稳定以及增加其碳汇是减缓大气 CO₂ 浓度增加的重要途径. IPCC 报告指出农业是当前具有很大减排潜力和缓冲能力的陆地生态系统, 其减排自然总潜力中 93% 来自减少土壤 CO₂ 释放(即固定土壤碳)^[3], 因此通过耕地土壤进行碳收集成为全球土壤学界的研究热点^[4].

稻田作为特殊的人工湿地系统对于抵抗大气 CO₂ 浓度的升高起着不可忽视的作用^[5]. 我国水稻土 90% 分布在热带和亚热带地区, 目前研究结果表明与旱地土壤相比水稻土有机碳含量水平较高^[6,7], 具有明显的固碳潜力^[8-10]. 研究认为土壤粘粒含量、团聚体形成的物理保护及化学键的稳定化是土壤固碳的重要机制^[11-14], 认识到土壤-作物-微生物相互作用可能是稻田生态系统固碳机制的特异性问题^[15]. 积极施用有机肥及推广秸秆还田、少耕免耕、

收稿日期: 2008-06-13; 修订日期: 2008-08-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB121106); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-423); 湖南省自然科学基金项目(08JJ3090)

作者简介: 陈安磊(1977~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: alchen@isa.ac.cn

合理施肥等措施能提高稻田土壤的有机碳含量,增加土壤的碳储量^[9,16].但目前关于稻田碳积累趋势中涉及的稳定容量的土壤机制、固碳过程与农作系统过程的关系的认识还严重不足,这制约了对水稻土固碳自然潜力的评估^[15].特别是涉及土壤容重及耕层厚度的变化及差异性对碳储量的估算的影响研究较少,忽略了这种差异及其与有机碳含量之间的相互关系可能减小了目前稻田土壤碳储量的估算值及其固碳自然潜力的评估精度.

土壤容重、有机碳含量和耕层厚度是计算土壤碳储量的重要参数.旱地长期定位研究表明长期有机肥施用土壤容重明显降低^[16],稻田在长期不同耕作条件土壤容重理论上应该有显著的变化,伴随着耕层土壤厚度的变化,目前对于稻田表层土壤碳储量的估算通常以 20 cm 作为标准厚度来研究稻田表层土壤碳储量,虽然采用同一厚度有利于比较不同生态系统、不同措施对表层土壤碳储量的差异,但可能减小了长期不同耕作等措施下土壤碳储量估算精度及不同处理之间的差异.本研究拟通过试验前后土壤容重的变化校正各施肥措施下表层土壤厚度,比较校正统计厚度与常用统计厚度对碳储量估算值及其差异的影响,寻求较合理的统计厚度以提高稻田表层土壤碳储量的估算精度,并利用 SCNC 模型模拟了红壤稻田有机肥配施化肥措施下土壤的固碳潜力,以期选取稻田土壤碳的减排措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验地介绍

试验地点在中国科学院桃源农业生态试验站内,该地区年平均降雨量 1 440 mm,年平均气温 16.5℃,日照时数 1 520 h.供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土(中国土壤系统分类:筒育水耕人为土;FAO/Uneso:Hydrgric Anthrosols).试验开始于 1990 年施肥制度长期定位试验田,种植制度为双季稻.试验开始时土壤基本肥力性状为:有机碳 15.4 g/kg,全氮 1.88 g/kg,pH 5.74,土壤容重 1.25 g/cm³.

1.2 试验设计

本研究共选用大田试验的 8 个处理:①不施化肥,收获物全部移出系统(CK);②不施化肥,收获物中养分循环利用(C);③施化肥 N,收获物移出系统(N);④在施化肥 N 的基础上,收获物中养分循环利用(N+C);⑤施化肥 N、P,收获物移出系统(NP);⑥在施化肥 N、P 的基础上,收获物中养分循环利用

(NP+C);⑦施化肥 N、P、K,收获物移出系统(NPK);⑧在施化肥 N、P、K 的基础上,收获物中养分循环利用(NPK+C).收获物中养分循环利用简称 C.大田试验每处理 3 次重复,随机区组排列.有“C”处理冬季种植紫云英(*Astragalus sinicus* L.),春耕时将紫云英翻压入泥作早稻基肥;早晚稻稻草全部直接还田;生产稻谷的 50%(1994 年以前为 80%)以及全部空秕谷粉碎后喂猪,猪粪尿作为第 2 年的早稻基肥.供试化肥为尿素(N:45%)、过磷酸钙(P₂O₅:12%)和氯化钾(K₂O:60%).施肥情况:1990~1996 年为 N 262.5 kg/hm²、P 39.3 kg/hm²、K 137.0 kg/hm²;1997~2006 年为 N 182.3 kg/hm²、P 39.3 kg/hm²、K 197.2 kg/hm².

1.3 测试分析方法

土壤有机碳,植株、厩肥和绿肥碳含量测定采用重铬酸钾-硫酸容量法;土壤容重测定采用环刀法,于春耕前测定.年际有机碳归还量为多年平均值,分为自然归还量(根茬和凋落物)和人工归还量(绿肥、稻草和厩肥)两部分,其中凋落物为早晚稻生育期间各 7 次田间收集量.处理 CK、C、N、N+C、NP、NP+C、NPK 和 NPK+C 年际有机碳归还量分别为 1 368、6 367、1 702、7 271、1 982、7 846、2 192 和 8 436 kg/hm².

1.4 表层土壤厚度估算方法

大田试验观测结果和土壤容重的研究结果都表明耕层(表层)土壤的厚度发生了变化,因此有必要对耕层(表层)土壤厚度进行估算.1990 年耕层土壤厚度本底值为 20 cm,根据容重值计算出 1990 年 0~20 cm 耕层土壤重量本底值,除以各年土壤容重值,结果为各施肥处理表层土壤厚度的估算值.另外实际测定了不同施肥处理 2008 年的耕层土壤厚度来验证最近年份估算结果的准确度.

1.5 表层土壤碳储量及固碳潜力的估算方法

土壤饱和固碳量为在有机碳固定投入量条件下土壤有机碳周转达到平衡时的储量,用 SCNC 模型估算^[9,17].固碳潜力为土壤饱和固碳量与土壤有机碳储量现状之间的差值,计算方法为:

$$C_p = C_s - C_0 \tag{1}$$

式中, C_p 为固碳潜力(t/hm²), C_s 为土壤饱和固碳量(t/hm²), C_0 为土壤有机碳储量现状(t/hm²).

$$C_0 = 0.1 \times D_i \times B_i \times O_i \tag{2}$$

式中, D_i 为表层土壤厚度(cm), B_i 为表层土壤的容重(g/cm³), O_i 为表层土壤有机碳含量(g/kg).

采用相对误差法评价模拟的准确程度,通过下式计算模拟值与实测值相对误差 E (模拟相对误差):

$$E = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - P_i)}{Q_i}$$

(3)

式中, E 为模拟相对误差, Q_i 为土壤有机碳实测值 (g/kg), P_i 为预测值 (g/kg), n 为样本容量.

1.6 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SAS 6.12 软件进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤有机碳含量及土壤容量的影响

长期不同施肥处理稻田土壤有机碳含量和土壤容重都产生了显著差异(图 1、表 1).从 1990 ~ 2006

年土壤有机碳的变化趋势来看,施用有机肥与仅施用化肥相比更能有效提高土壤有机碳含量.方差分析表明, 17 a 有机物循环利用处理有机碳含量都显著高于仅施化肥或不施肥处理 ($p < 0.05$),与试验初相比 17 a 有机物还田处理土壤有机碳含量平均提高了 61.0%,长期不施任何肥料(CK 处理)土壤有机碳含量并没有降低,与试验前相比提高了 5.8%,随着 NPK 肥配合程度的提高土壤有机碳提高量有上升趋势,N、NP 和 NPK 处理土壤有机碳含量分别提高了 12.3%、16.2%和 22.7%.另外,年际土壤有机碳含量的方差分析表明,NP + C 和 NPK + C 处理有机碳归还量较大,约 9 a 后对土壤有机碳的提高效应达到显著水平,而有机碳归还量略小的 C 和 N + C 处理约 13 a 后产生显著效应 ($p < 0.05$).可见有机碳的年际归还量较大是稻田土壤有机碳含量提高的主要原因,两者呈显著的正相关关系 ($r = 0.980^{**}$, $n = 8$).

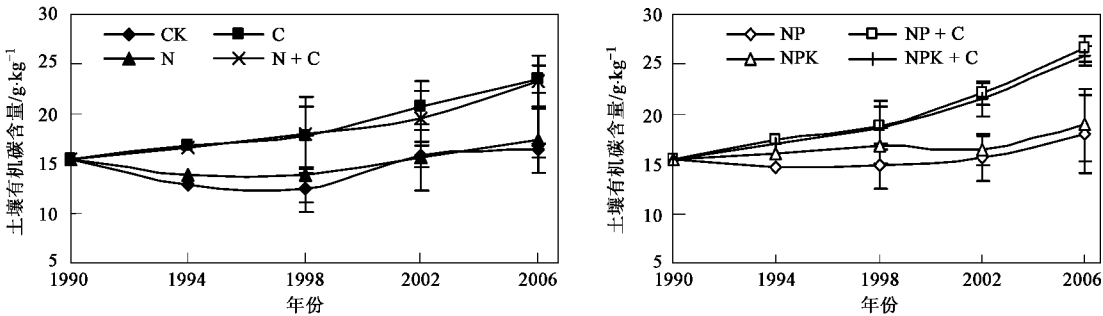


图 1 土壤有机碳含量
Fig.1 Contents of soil organic carbon

表 1 红壤稻田土壤碳储量¹⁾
Table 1 Soil organic C storage of paddy soils

处理	耕层土壤碳 储量/ t·hm ⁻²	土壤碳净累 积量/t·hm ⁻²	表层(0 ~ 20 cm)土壤碳 储量/t·hm ⁻²	耕层和表层土壤碳 储量相对误差/%	土壤容重 /g·cm ⁻³
CK	40.3 b	1.4	35.1 d	14.8	1.07 a
C	58.0 a	19.0	43.8 abc	32.4	0.93 b
N	43.1 b	4.1	37.2 d	15.9	1.07 a
N + C	57.7 a	18.7	40.7 bcd	41.8	0.88 b
NP	43.5 b	4.5	37.7 d	15.4	1.06 a
NP + C	66.2 a	27.2	47.3 a	40.0	0.89 b
NPK	46.6 b	7.6	38.4 cd	21.4	1.02 a
NPK + C	61.4 a	23.4	46.2 ab	32.9	0.89 b

1)同一列中不同英文字母表示 5% 的差异显著性;土壤容重为 2006 年数据

土壤容重是土壤碳储量精确估算的关键,长期耕作和不同施肥措施下土壤容重的差异性不可忽视.本长期定位试验表明, 17 a 稻作土壤容重基本上一一直处于下降态势(见图 2), 8 个处理平均降低

幅度为 15.8%,其中有机物还田处理降低幅度最大(平均为 28.0%).土壤容重年际动态分析表明,有机碳归还量较大的处理土壤容重在 5 a 后明显降低(降低幅度平均为 11.4%),其中 NP + C 和 NPK + C

处理降低幅度达到显著水平,长期仅施用化肥的 NP 和 NPK 处理土壤容重在 9 a 后显著降低,而有机碳归还量最小的 CK 和 N 处理约在 13 a 后才出现显著降低现象($p < 0.05$).潮土旱地定位试验也发现长期施肥土壤容重均有所下降,其中施用有机肥处理土壤容重下降幅度最大(12.3%)^[16],但远小于本稻田定位试验中施用有机肥处理的下降幅度,这与稻田

有机碳归还量较大有关.对 1990、1994、1998、2002 和 2006 年的土壤容重和有机质数据进行相关性分析,结果表明土壤容重与土壤有机质含量有显著的负相关关系($r = -0.881^{**}$, $n = 40$),而有机碳的年际归还量决定了本研究中土壤有机碳含量的大小,本研究中有机碳的年际自然归还量较大,最低约为 1.4 t/hm².

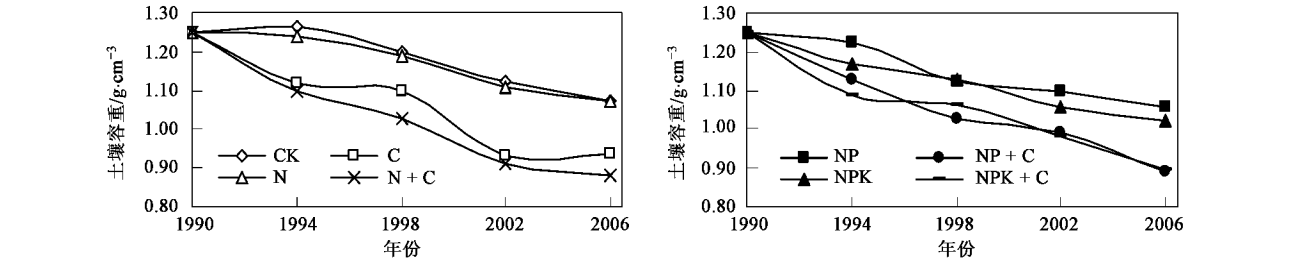


图 2 土壤容重
Fig.2 Soil bulk density

估算结果表明, 17 a 的稻作使得表层土壤厚度增加幅度在 3.1 ~ 8.4 cm 之间(平均为 5.4 cm), 其中施用有机物的处理变化最大(平均为 7.4 cm), 可见稻田表层土壤厚度对土壤容重的响应不可忽略. 土壤容重的变化直观地反映在大田表层土壤厚度上, 在实际观测中也发现了长期施用有机物的小区土壤表面明显高于长期施用化肥或不施肥的小区. 本定位实验田 2008 年的实际表层土壤厚度测定数据与 2006 年的表层土壤厚度计算值具有极显著的相关关系($r = 0.947^{**}$, $n = 8$), 相对误差为 8.0%. 可见根据容重的动态数据计算的表层土壤厚度数据可以用于稻田表层土壤碳储量变化研究, 为结果的可比性, 本研究中 1994、1998、2002 和 2006 年碳储量和固碳潜力的估算中都采用表层土壤厚度的计算值.

2.2 稻田表层土壤碳储量的变化

利用计算的表层土壤厚度作为统计厚度估算了不同施肥措施下稻田表层土壤的碳储量(公式 2). 估算结果表明, 长期不同施肥措施使得稻田土壤碳储量产生了显著差异($p < 0.05$)(见表 1). 长期施用化肥能提高耕层土壤碳储量, 与试验前相比平均提高量为 5.4 t/hm², 且有随着 N、P、K 肥配合程度提高而呈现增高的趋势, 但其碳储量与长期不施肥(CK)的土壤相比没有显著差异($p < 0.05$). 有机物还田或与化肥配合施用能显著提高表层土壤碳储量, 与试验前相比提高量为 18.7 ~ 27.2 t/hm².

碳储量研究多采用一致的土壤厚度, 如表层碳

储量的估算多采用 20 cm, 这忽略了耕层厚度对土壤容重变化的响应对碳储量估算的影响, 在估算中可能出现土壤有机碳提高而土壤碳储量降低的假象. 本研究按照 20 cm 的统计厚度对碳储量进行了估算, 结果表明采用相同土壤厚度(20 cm)估算碳储量将平均低估 20.6%, 其中有机物循环处理低估幅度最大(平均为 26.8%), 另外采用 20 cm 的统计厚度减小了有机物还田与化肥施用处理之间的碳储量统计学上的显著差异水平(见表 1). 采用 23 cm 的统计厚度也出现相似的问题, 碳储量平均低估 11.3%, 其中有机物循环处理平均低估 18.9%. 因此, 在比较或估算施肥等措施对土壤碳储量影响时, 有必要对表层土壤厚度变化进行估算, 特别是在土壤容重变化较大的情况下. 很多研究表明长期不同施肥等措施之间土壤有机碳含量或土壤容重发生显著差异, 但这种由土壤容重变化所引起的统计耕层厚度的差异对碳储量估算精度的影响报道较少, 因而还无法比较目前我国不同研究区域碳储量估算的误差.

3 讨论

3.1 土壤容重变化对碳储量估算的影响

土壤容重是土壤物理性质的综合指标, 是研究土壤碳储量的重要参数, 其数值大小受土壤有机质含量以及各种自然因素和人工管理措施的影响. 本研究表明施肥差异是稻田土壤容重变化的重要原因, 长期稻作土壤容重总的处于下降趋势, 熊云明

等^[18]对稻田轮作的研究中也发现随着耕种年限增加土壤容重总体呈下降趋势,但对有机质含量较高的三江平原湿地的研究表明,不同耕作年限的湿地土壤(0~20 cm)随着开垦时间的增加,土壤容重和比重逐渐增大^[19],这与随开垦时间的增加土壤有机碳含量逐年降低有关.南方红壤地区有机碳含量较低,施用有机肥、种植绿肥等措施对提高土壤有机碳含量和碳储量作用明显^[9,10],对改善土壤的物理性状有积极的作用.可见人工管理措施是稻田土壤容重变化的重要因素,土壤容重的变化必然会引起表层土壤厚度的变化.研究表明储碳层厚度的变异性是三江平原湿地有机碳储量估算不确定性的主要原因之一^[20],本研究中采用同一统计厚度(20 cm和23 cm)计算表层土壤碳储量,与用校正后耕层厚度计算的结果相比平均低估20.6%和11.3%,并且处理间碳储量的统计差异性减小.综合上述研究结果表明,忽略稻田表层土壤统计厚度的差异性会降低碳储量估算精度及处理间差异性的重要原因.

目前大部分的土壤容重变化及不同施肥等措施对农田土壤碳储量的影响多是通过长期定位试验进行研究的.长期试验田由于小区面积相对较小、水泥田埂等原因而多采用传统的牛耕或小型机械,故而同一块长期定位田耕作方式对土壤容重差异的产生贡献较小,主要的影响因素来自试验处理的差异.为保持长期试验的稳定性和可持续性不便于进行土壤剖面的实际调查,通过土壤容重的变化进行修正表层统计厚度的方法来提高稻田土壤碳储量的估算精度是可行的,但有可能忽略了稻田土壤犁底层形成及厚度变化对实际耕层厚度的影响.在便于使用机械的区域,机械耕作对土壤容重的影响还是比较大,特别使用大型机械耕作对土壤有压实作用,如按固定的土壤容重和耕层厚度也必然加大估算误差.到目前为止,本研究中除N+C和C处理的土壤容重降低幅度减缓外,其他处理降低幅度还较大,各处理达到平衡状态的差异也为提高固碳潜力的估算精度增加不确定性.

3.2 红壤性稻田土壤固碳潜力

本试验研究表明,系统内有机物循环配合化肥施用能显著提高稻田土壤有机质含量和土壤有机碳储量,这种施肥模式下稻田土壤还能固定多少碳值得关注,这对估算亚热带红壤稻田对减少温室气体排放的贡献有重要意义.

本研究利用SCNC模型模拟施肥处理土壤有机碳的变化,已有的研究结果表明SCNC模型适用绝

大多数稻田^[9,17].本研究应用其模拟了1994、1998、2002、2006年有机物还田处理(处理C、N+C、NP+C和NPK+C)土壤有机碳的变化,并用相对误差法对模拟结果进行了检验,结果表明模拟数据和测量数据的相对误差都在10%之内,其中50%的模拟相对误差在5%之内.模拟相对误差表明模拟结果可行,SCNC模型适用于本研究有机碳的模拟需要.

在模拟时间的90~100年内,有机物循环利用处理的土壤碳储量年际变化在0.10%~0.22%之间,基本达到平衡.模拟结果可以看出,土壤饱和固碳量随着有机碳的归还量增高而增加,有机碳归还量最高的处理(NPK+C)土壤饱和固碳量最大(84.0 t/hm²),相关性表明两者具有极显著的正相关关系.虽然目前稻田土壤碳储量较大,表现出碳“汇”功能,但有机物循环利用土壤碳储量占了饱和固碳的73.1%~88.5%,还具有较大的固碳潜力,与现在的固碳量相比红壤稻田还具有7.5~22.6 t/hm²的固碳潜力(平均为14.7 t/hm²),目前因长期施用化肥或不施肥导致的低碳储量在改变施肥方式后(施用有机肥、种植绿肥)将具有更大的固碳潜力,对我国农田碳的减排具有重要的意义.

表2 稻田有机物循环利用土壤饱和固碳量
Table 2 Saturated carbon storage of long-term cycling of organic carbon

处理	模拟相对 误差/%	饱和固碳量 /t·hm ⁻²	固碳潜力 /t·hm ⁻²
C	-5.1	65.5	7.5
N+C	3.0	73.7	16.0
NP+C	-1.2	78.7	12.5
NPK+C	5.2	84.0	22.6

稻田土壤是人为湿地土壤,土壤表层的有机碳含量普遍高于旱地土壤^[6,7],是我国当前固碳趋势明显和固碳潜力较大的特色耕作土壤^[9,21],稻田土壤年际新鲜有机碳归还量较大可能是我国稻田土壤有机碳普遍积累的主要原因.冬季种植绿肥、稻草和廐肥的还田等有利于提高有机碳还田量的措施对稻田土壤碳的积累都有积极作用,另外有效的施肥措施在提高水稻的产量及生物量的同时还提高了有机碳的自然还田量,研究认为稻田土壤还有较大的固碳潜力^[9,10],对我国农田碳储量的提高具有重要作用.但另一方面不可忽视我国稻谷播种面积的减少对农田碳储量的影响,中国统计年鉴统计结果表明我国稻谷播种总面积从1978~2005年下降了16.2%^[22],但由于单产的提高稻谷的总产量并没有下降.播种面积的减少固然有双季稻、多季稻改单季稻的因素,

但工业、建筑用地和土地种植方式的改变对稻田土壤的侵占是不争的事实.因此在采取有效措施提高现有稻田土壤碳储量的同时,还应采取措施保护现有的水稻耕作面积,为我国农田碳减排和我国的粮食安全提供保障.

4 结论

(1) 稻草、厩肥还田和冬季种植紫云英等措施能显著提高稻田土壤有机碳含量,土壤具有较高碳储量和固碳潜力.

(2) 采用同一表层土壤统计深度降低了不同施肥处理间的碳储量差异,低估稻田土壤的碳储量,因此在估算不同土地利用方式或耕作施肥措施对碳储量的影响时,要考虑容重变化对土壤统计厚度的影响.

参考文献:

[1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, **1**(1): 77-91.

[2] Valentini R, Mattenucci G, Dolman A J, *et al*. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. *Nature*, 2000, **404**: 861-865.

[3] Smith P, Martino D, Cai Z C, *et al*. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 2007, **118**(1-4): 6-28.

[4] 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[J]. *中国基础科学*, 2005, **7**(2): 12-18.

[5] Carter T R, Parry M L, Harasawa H. IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations [R]. United Kingdom: Camlbridge University Press, 1995.

[6] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.

[7] 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, 134.

[8] 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]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(1): 79-92.

[9] 刘守龙, 童成立, 张文菊, 等. 湖南省稻田表层土壤固碳潜力模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2006, **21**(1): 118-125.

[10] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(1): 46-52.

[11] Arrouays D, Saby N, Walter C, *et al*. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils[J]. *Soil Use Management*, 2006, **22**(1): 48-51.

[12] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2000, **32**(14): 2099-2103.

[13] 宋长青, 冷疏影. 21 世纪中国地理学综合研究的主要领域[J]. *地理学报*, 2005, **60**(4): 546-552.

[14] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. *地球科学进展*, 2003, **18**(4): 609-618.

[15] 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.

[16] 尹云锋, 蔡祖聪. 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响[J]. *土壤*, 2006, **38**(6): 745-749.

[17] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SCNC 模型检验[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(5): 1228-1233.

[18] 熊云明, 黄国勤, 王淑彬, 等. 稻田轮作对土壤理化性状和作物产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2004, **6**(4): 42-45.

[19] 袁兆华, 吕宪国, 周嘉. 三江平原旱田耕作对湿地土壤理化性质的累积影响初探[J]. *湿地科学*, 2006, **4**(2): 133-137.

[20] 张文菊, 吴金水, 童成立, 等. 三江平原湿地沉积有机碳密度和碳储量变异分析[J]. *自然资源学报*, 2005, **20**(4): 537-544.

[21] Song G H, Li L Q, Pan G X, *et al*. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, **74**(1): 47-62.

[22] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006. 476.