

红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析*

李忠佩¹ 吴大付²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 河南科技学院, 河南新乡 453003)

摘 要 平衡状态时的土壤有机碳含量水平确定对于正确评价土壤的固碳潜力和制定合理的有机物质分配措施有重要意义。本文通过比较红壤典型地区不同时期水稻土有机碳含量变化、不同利用年限水稻土有机碳含量动态、以及有机碳输入输出量状况, 分析红壤水稻土有机碳库的平衡值, 进而估计较大区域内水稻土的固碳潜力。过去 20 余年来江西省余江县水稻土的有机碳含量总体呈上升趋势, 但高产水稻土的有机碳含量稳定在 18.5 g kg^{-1} ; 水耕利用 30 a, 土壤有机碳含量达到 $19.0 (\pm 1.20) \text{ g kg}^{-1}$, 其后变化幅度很小; 若使目前的较高形成量水平达到平衡, 则土壤有机碳含量为 $19.2 (\pm 1.10) \text{ g kg}^{-1}$ 。综合分析, 在较高生产力水平条件下, 红壤水稻土有机碳的平衡值为 $18 \sim 20 \text{ g kg}^{-1}$, 平均为 $19.0 \pm 1.0 \text{ g kg}^{-1}$ 。过去 20 余年来, 江西省余江县水稻土有机碳储量增加了 $6955 (\pm 116) \text{ kg hm}^{-2}$ 。据此计算我国亚热带地区水稻土过去 20 年固定大气 CO_2 量 $555.1 (\pm 88.7) \text{ Tg}$, 其作为碳汇的作用是相当明显的。目前仍有相当面积的水稻土其有机碳含量低于平衡水平, 估计还可平均固碳 $5150 (\pm 1063) \text{ kg hm}^{-2}$ 。据此, 若保持现实较高生产力水平, 则我国亚热带地区水稻土未来可新固定大气 CO_2 量 $411.0 (\pm 84.7) \text{ Tg}$ 。

关键词 红壤水稻土; 有机碳; 平衡值; 固碳潜力; 亚热带

中图分类号 S153.6

文献标识码 A

20 世纪 50 年代以来, 大气 CO_2 浓度增加引起全球气候变暖成为了受到普遍重视的热点问题。政府和社会公众都在努力寻求各种措施以期有效控制温室气体浓度增加的趋势。由于工业 CO_2 排放尚未找到有效的替代技术途径, 通过农业措施重新收集与固定能源排放的碳便成为国际上共同努力的方向。发达国家自 2002 年以来纷纷启动国家或国际综合研究项目分析耕地土壤的固碳潜力及其实现的途径, 以作为制定 CO_2 排放清单及提出减排配额的依据^[1]。国际社会和科学界均认为耕地土壤碳收集是经济和环境双赢战略或者是唯一在气候控制努力上没有遗憾的技术。

目前, 对全球和区域尺度耕地土壤固碳潜力的研究已经进行了较多的工作^[2~4]。一些研究者还根据长期试验资料分析不同农业措施(轮作、施肥和耕作)下土壤有机碳库变化以估计耕地土壤的固碳潜力和速率^[5,6]。但是, 这些研究主要以发达国家旱地保护性耕作中土壤有机碳增加的趋势为依据^[7]。

对于我国耕地土壤类型和农作方式的巨大特异性而言, 这些估计的方法以及依据的相关参数并不适用。而我国关于耕地土壤固碳潜力的研究还很薄弱, 已有的结果非常粗略^[8]。

水田土壤是我国最主要的耕作土壤类型, 其中约 90% 分布在热带亚热带地区。前期的研究表明^[9], 该类型土壤是大气 CO_2 的汇。但其固碳潜力如何, 目前明确的结果尚少^[10]。本文通过比较典型地区不同时期水稻土有机碳含量变化、不同利用年限水稻土有机碳含量动态以及有机碳输入输出量状况, 分析水稻土有机碳库的平衡值, 进而估计较大区域内水稻土的固碳潜力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择江西省余江县作为本项研究的典型区域。该县位于江西省东北部, 地处东经 $116^{\circ}41' \sim 117^{\circ}09'$,

* 中国科学院知识创新工程重大方向项目(KZCX1-SW-01-05)和国家自然科学基金项目(40471066)资助

作者简介: 李忠佩(1962~), 男, 汉族, 广西临桂县人, 硕士, 研究员。主要从事土壤生物化学及土壤生态学研究, 发表论文 70 余篇。

E-mail: zhpli@mail.issas.ac.cn

收稿日期: 2005-05-18; 收到修改稿日期: 2005-09-02

北纬 $28^{\circ}04' \sim 28^{\circ}37'$; 属亚热带季风气候区, 雨热同季, 光照充足, 年均温 17.6°C , 10°C 积温 6500°C , 年均降雨量 1766 mm , 年日照时数 1809 h , 无霜期 262 d 。全县国土总面积 927 km^2 , 其中丘陵面积占 78.2% , 平原占 21.8% ; 1998 年全县耕地面积 20400 hm^2 , 其中水田占 85% , 人均耕地面积 0.06 hm^2 , 农作方式以双季稻为主。其气候、土壤、地形地貌等自然条件和轮作制、生产力水平等社会经济状况在我国南方亚热带地区具有较为典型的代表性^[11]。

1.2 试验方法与样品采集

本项研究采用比较第二次土壤普查以来 20 余年间余江县水稻土有机碳含量变化、观测不同利用年限水稻土有机碳含量动态、以及分析水稻土有机碳库输入输出量状况的方法, 估计水稻土有机碳库的平衡值。

参照第二次土壤普查资料记载(余江县土壤志, 资料), 并有第二次土壤普查参加人员的参与, 在江西省余江县的所有 14 个乡镇, 选择代表性土壤类型和肥力水平的水田对应田块(101 块), 于 2002 年晚稻收获后进行采样, 每一田块均多点混合采集 $0 \sim 20\text{ cm}$ 土壤样品。同时, 为了着重比较 20 余年间高产水稻土有机碳的含量变化, 还在每个乡镇有针对性增加 $2 \sim 3$ 块高产水田的样品采集。样品经风干, 挑去肉眼可见的植物残体, 过 60 目筛备用。

通过调查比较, 选择不同利用年限的红壤水稻土进行采样。采样田块包含自荒草地开垦后种植水稻 3 a、10 a、15 a、30 a 和 80 a 的水田, 田块之间相距最大不超过 500 m , 均处于较高的地形部位, 灌排水状况良好, 历史背景相近, 施肥管理措施类似, 轮作制度为双季稻。于晚稻收割后的秋冬季节, 田面完全落干水分, 在选定的田块按 $0 \sim 10\text{ cm}$ 、 $10 \sim 20\text{ cm}$ 土层采集土样, 每一利用年限田块随机采 3 个样点。同时选择邻近的荒草地进行相同采样, 以作本底对照, 表示种植水稻 0 a 处理。样品经风干、挑去细根、磨细备用。

依据氮通量的质量平衡原理^[12,13], 通过布置田间试验小区估测不同土壤条件下有机碳矿化量的变化, 建立土壤有机碳矿化量与含量变化之间的数量关系。根据研究区域的实际调查资料, 估计农田有机物质的进入量和土壤有机质的形成量。进而计算当达到与土壤有机质形成量相当的矿化量时的土壤有机碳含量, 是为平衡状态时的土壤有机碳含量。

1.3 分析方法

为了与第二次土壤普查的结果进行比较, 土壤

有机碳含量用重铬酸钾容量法、全氮用开氏法测定^[14]。

2 结果与讨论

2.1 晚近 20 余年来余江县水稻土有机碳和全氮含量变化

江西省余江县的水稻土主要发育于第三纪红砂岩风化物、第四纪红色粘土以及河流冲积物等母质类型, 粘粒和铁铝含量相对较高^[15]; 自 20 世纪 80 年代以来, 农业政策调整和管理技术改善极大地促进了农业生产的发展, 水稻平均单产提高了近 50% ; 这些方面决定了区域土壤有机碳含量的变化动态。分析结果表明(表 1), 1980 年余江县水稻土有机碳和全氮含量为 $6.2 \sim 20.4\text{ g kg}^{-1}$ 和 $0.87 \sim 2.40\text{ g kg}^{-1}$, 算术平均值分别为 14.6 g kg^{-1} 和 1.41 g kg^{-1} ; 2002 年水稻土有机碳和全氮含量为 $5.5 \sim 29.4\text{ g kg}^{-1}$ 和 $0.70 \sim 3.13\text{ g kg}^{-1}$, 算术平均值分别为 17.8 g kg^{-1} 和 1.86 g kg^{-1} 。2002 年与 1980 年比较, 余江县水稻土有机碳含量增减 $-7.4 \sim 18.4\text{ g kg}^{-1}$, 总计增加 3.20 g kg^{-1} ; 全氮含量增减 $-1.08 \sim 1.94\text{ g kg}^{-1}$, 总计增加 0.45 g kg^{-1} 。其中, 68% 的样点土壤有机碳含量增加, 平均增加 6.59 g kg^{-1} ; 32% 的样点有机碳含量下降, 平均下降 3.92 g kg^{-1} 。但全氮的增减情况略有差异, 74% 的样点含量增加, 只有 26% 的样点含量下降。

除了以上所述水稻产量显著提高导致有机物质归还量增加以外, 该县水田有施用农家肥和种植绿肥(紫云英)的传统, 也是造成水田土壤有机碳含量增加的原因。其实, 从 20 世纪 60 年代以来的 40 余年, 该县水稻土有机碳含量一直呈增加趋势。但后 20 年的增长幅度(22%) 已明显小于前 20 年(约 50%)^[15]。

对比 1980 年和 2002 年余江县高肥力水稻土有机碳含量的差异可以看出(表 2), 虽经 20 多年耕种利用, 但 70% 以上的供试田块的土壤有机碳含量变化幅度小于 20% 。考虑到土壤的空间异质性特点, 这样的变化幅度下可以认为土壤有机碳含量保持稳定。只有鳊泥田的土壤有机碳含量增加较明显。所有供试田块平均, 1980 年和 2002 年土壤有机碳含量分别为 $17.6(\pm 1.47)\text{ g kg}^{-1}$ 和 $18.7(\pm 4.10)\text{ g kg}^{-1}$, 两者差异仅为 1.1 g kg^{-1} , 明显小于全县所有水稻土总体变化幅度。特别是有机碳含量在 18.5 g kg^{-1} 的土壤, 变化的幅度很小。显然, 尽管高产水田管理和

施肥水平较高,但土壤有机碳的增加量较小。田间实际调查结果,余江县高产水稻土的单产水平保持在 $9\ 000 \sim 10\ 500\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,20 余年来变化的幅度较

小,有机肥料的施用量基本保持稳定。据此可以判断,余江县高产水稻土有机碳库的输入输出量处于平衡状态。

表 1 1980~2002 年江西省余江县水田土壤有机碳和全氮含量变化

Table 1 Changes in soil organic C and total N contents of paddy fields in Yujiang County of Jiangxi Province in 1980~2002

项目		土壤有机碳	全氮
Items		Soil organic C	Total N
1980 年含量 Content in 1980 ($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)		14.6 \pm 3.14	1.41 \pm 0.30
2002 年含量 Content in 2002 ($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)		17.8 \pm 5.45	1.86 \pm 0.55
2002 年与 1980 年比较	含量增加的情况 That for increase	样点数 Samples 69	75
	增加幅度 Range ($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)	0.23~18.4	0.05~1.94
	平均值 Average ($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)	6.59	0.72
Comparison of content in 2002 to that in 1980	含量下降的情况 That for decrease	样点数 Samples 32	26
	下降幅度 Range ($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)	0.06~7.4	0.01~1.08
	平均值 Average ($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)	3.92	0.36
2002 年含量 - 1980 年含量 Content in 2002 minus that in 1980		3.20	0.45

表 2 1980~2002 年江西省余江县高肥力水稻土有机碳和全氮含量变化

Table 2 Changes in soil organic C and total N contents ($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$) of paddy fields high in productivity in Yujiang County of Jiangxi Province in 1980~2002

类型 Types	样本数 Samples number		1980 年 In 1980		2002 年 In 2002	
			土壤有机碳 Soil organic C	全氮 Total N	土壤有机碳 Soil organic C	全氮 Total N
红砂泥田	7	幅度 Range	15.5~19.8	1.48~1.98	14.0~20.3	1.69~2.38
		平均值 \pm 标准差 Mean \pm SD	17.3 \pm 1.45	1.65 \pm 0.16	17.8 \pm 2.08	1.98 \pm 0.26
潮砂泥田	6	幅度 Range	16.9~20.4	1.39~2.80	14.2~19.5	1.54~2.13
		平均值 \pm 标准差 Mean \pm SD	18.8 \pm 1.38	1.95 \pm 0.54	16.8 \pm 2.06	1.83 \pm 0.25
鳝泥田	8	幅度 Range	16.3~20.0	1.36~1.78	17.4~30.2	1.92~3.52
		平均值 \pm 标准差 Mean \pm SD	17.4 \pm 1.15	1.53 \pm 0.15	22.2 \pm 4.02	2.62 \pm 0.54
黄泥田	8	幅度 Range	15.1~17.9	1.41~2.20	14.4~21.5	1.34~3.13
		平均值 \pm 标准差 Mean \pm SD	16.7 \pm 1.10	1.61 \pm 0.25	17.3 \pm 5.28	1.90 \pm 0.65
乌红砂泥田	3	幅度 Range	16.4~19.8	1.51~1.87	16.0~22.7	1.55~2.49
		平均值 \pm 标准差 Mean \pm SD	18.7 \pm 1.96	1.75 \pm 0.21	18.7 \pm 3.54	1.96 \pm 0.48

Fe-leach-Stagnic Anthrosols; Haplic Stagnic Anthrosols; Gleyic Stagnic Anthrosols; Fe-accumul-Stagnic Anthrosols; Fe-leach-Stagnic Anthrosols

综合所有样点结果的统计分析表明(图 1),20 余年来余江县水稻土有机碳含量的变化与 1980 年的背景值有极显著的负相关关系,背景含量越高,增加幅度越小,拟合方程: $Y = -0.943\ 3X + 17.45$ ($R^2 = 0.276\ 4^{**}$, $n = 133$),式中 Y 为 20 余年来水稻土有机碳变化量($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$), X 为 1980 年水稻土有机碳含量($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)。由此式可知,当 $Y = 0$ 时, $X = 18.5$ ($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$),意即从总体上存在这样的趋势,该区域水

稻土有机碳含量为 $18.5\ \text{g}\ \text{kg}^{-1}$ 时,将会基本保持稳定。

20 余年来余江县水稻土全氮含量增加的幅度亦随 1980 年的背景含量而变化,拟合方程: $Y = -1.139\ 3X + 2.142\ 8$ ($R^2 = 0.308\ 1^{**}$, $n = 133$),式中 Y 为 20 余年来水稻土全氮的变化量($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$), X 为 1980 年水稻土全氮含量($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)。比较而言(表 1、表 2),20 余年来余江县水稻土全氮含量增加

的幅度大于有机碳含量,导致全县水稻土的 C/N 比总体呈下降趋势,从 1980 年的 10.5 (± 1.38) 到 2002 年的 9.5 (± 1.14),变化的幅度亦与 1980 年的背景值有极显著的负相关关系: $Y = -0.88X + 8.277$ ($R^2 = 0.5355^{**}$, $n = 133$), 式中 Y 为 20 余年来水稻土 C/N 变化值, X 为 1980 年水稻土 C/N 比。全氮含量和 C/N 比变化反映了晚近 20 多年来快速增加的氮肥施用导致了水稻土碳、氮周转速率的差异,这可能会对土壤有机碳的储存以及养分和能量的循环产生明显的影响^[16]。

2.2 不同利用年限红壤水稻土有机碳和全氮含量动态

水稻土主要分布在热带亚热带地区,大多是由荒地或旱地经平整翻耕并在种植水稻或以植稻为主的耕作制下,土壤经常处于淹水还原、排水氧化、水耕粘闭,以及大量施用有机肥等频繁的人为活动影响下形成的。在正常的管理措施下,随着利用年限的延长,水稻土的熟化程度不断提高,并最终达到高的肥力水平。因此,不同利用年限水稻土的有机碳和全氮含量变化反映了水耕熟化过程中土壤有机质的积累动态和演变趋势。结果表明^[17],在水耕条件下,土壤有机碳和全氮的积累过程可大致分为快速增长和趋于稳定阶段,这两个阶段以利用 30 a 为界限。在前 30 a,其增加趋势与利用年限(t)呈极显著的直线相关,相关方程式:0~10 cm 和 10~20 cm 土壤有机碳 (g kg^{-1}) 分别为 $C = 0.5189t + 4.5126$ ($R^2 = 0.9514^{**}$, $n = 5$) 和 $C = 0.5328t + 2.2797$ ($R^2 = 0.9781^{**}$, $n = 5$), 全氮 (g kg^{-1}) 分别为: $N = 0.0407t + 0.4504$ ($R^2 = 0.9523^{**}$, $n = 5$) 和 $N = 0.0408t + 0.2986$ ($R^2 = 0.9826^{**}$, $n = 5$)。经过 30 a 水耕利用,0~10 cm 和 10~20 cm 土壤有机碳含量分别为 19.6 (± 1.51) g kg^{-1} 和 18.1 (± 1.45) g kg^{-1} , 全氮含量为 1.62 (± 0.09) g kg^{-1} 和 1.50 (± 0.14) g kg^{-1} ,均已达到高度熟化红壤水稻土的含量水平。其后,土壤有机碳和全氮含量随利用年限延长而增长的速度明显减慢,趋于稳定。统计分析结果表明,利用 30 a 的水田土壤有机碳和全氮含量与利用 0 a、3 a、10 a、15 a 的水田均有显著差异 ($p < 0.05$),但与利用 80 a 的水田没有显著差异。因此,从不同利用年限红壤水稻土有机碳和全氮含量变化的趋势可以推断,按现在的正常管理利用水平,由荒地开垦的新水田约需 30 a 的时间才能形成相对稳定的高度熟化的水稻土,达到平衡状态时其表层土壤有机碳含量约为 19.0 (± 1.20) g kg^{-1} 。

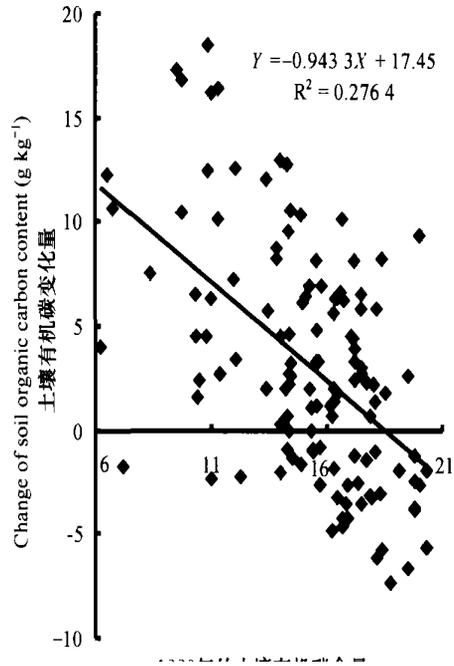


图 1 近 20 余年来余江县水稻土有机碳变化量与 1980 年背景含量的关系

Fig. 1 Relationship between the change in soil organic C in the past over 20 years and the content of soil organic C in 1980

2.3 根据红壤水稻土有机碳形成量水平估算的平衡状态土壤有机碳含量

土壤有机质含量的动态变化是由系统输入和输出量的相对大小决定,当系统的输入量大于输出量时,土壤有机质得到积累,土壤有机碳含量将不断提高。同时,随着土壤有机碳含量的提高,其矿化量也不断增加,最终,土壤有机碳的矿化量与形成量相当,土壤有机碳库达到平衡状态。

一定的有机物质进入量和土壤有机质形成量水平条件下,达到平衡状态时的土壤有机碳含量可以通过以下步骤进行估计:(1)通过实际调查,确定农田有机物质的进入量和土壤有机质的形成量;(2)布置田间小区观测试验,建立土壤有机碳的矿化量和土壤有机碳含量的数量关系;(3)矿化量 = 形成量,矿化量 (kg hm^{-2}) = 耕层土重 \times 土壤有机碳含量 \times 矿化率 (%);将(1)、(2)项的有关数据代入,得到一个一元二次方程,求解此方程的根,即为平衡状态时的土壤有机碳含量。

根据红壤区的调查结果^[9],现实生产条件下较高肥力水平水田土壤有机碳的年形成量为 1 060 (± 97) kg hm^{-2} 。田间小区试验观测结果显示^[11],红壤水稻土有机碳矿化率 (Y , %) 与有机碳含量 (X ,

g kg^{-1})呈极显著相关(图2): $Y=0.9677+0.0798X$ ($R^2=0.8189^{**}$, $n=10$)。根据以上参数和数量关系(参考文献[15]资料,容重取 1.1,耕层厚度 20 cm),可以建立以下方程: $1.76X^2+21.3X-1060=0$,其中 X 即为平衡时的土壤有机碳含量。求解方程,得到平衡时 0~20 cm 土壤有机碳含量值: $X=19.2(\pm 1.10)\text{g kg}^{-1}$ 。

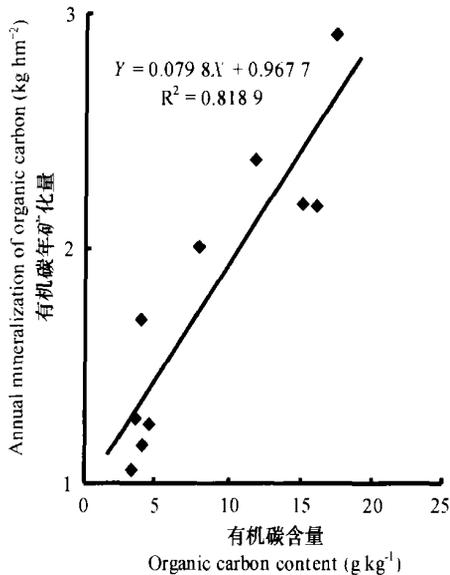


图2 红壤水稻土有机碳含量与其年矿化量的关系

Fig. 2 Relationship between soil organic C content and annual mineralization of C in paddy soils

2.4 红壤水稻土的固碳潜力

从1980年的土壤有机质含量分布情况看,本项研究所确定的样点具有代表性^[15]。根据1980~2002年20余年前后余江县水稻土各级有机质含量分布的变化,以及不同类型水稻土的有机质含量变化(有机质含量分级和水稻土分类均参照第二次土壤普查方法^[15]),可以计算该县近20余年来水稻土的固碳量。结果表明,按各级有机质含量分布面积计算,余江县0~20 cm土层水稻土有机碳储量1980年为 $5.82(\pm 0.55) \times 10^8 \text{ kg}$,2002年为 $6.94(\pm 0.65) \times 10^8 \text{ kg}$,20余年来增加了 $1.12(\pm 0.10) \times 10^8 \text{ kg}$,平均每 hm^2 增加 $5879(\pm 525) \text{ kg}$;而按不同类型水稻土的面积分布及有机质含量变化计算,则1980年的有机碳储量为 $6.19(\pm 1.14) \times 10^8 \text{ kg}$,2002年为 $7.19(\pm 1.38) \times 10^8 \text{ kg}$,20余年来增加了 $1.00(\pm 0.24) \times 10^8 \text{ kg}$,平均每公顷增加了 $5249(\pm 1260) \text{ kg}$ 。综合以上两种方法的结果,余江县20余年来0~20 cm水稻土有机碳储量增加了 $5564(\pm 893) \text{ kg hm}^{-2}$ 。

由于江西省余江县的自然和社会经济条件在我国亚热带地区有一定的代表性,据此计算我国亚热带地区水稻土(根据1995年公布的水田面积数据^[18])近20年来0~20 cm土层约固碳 $121.1(\pm 19.4) \text{ Tg}$ 。若按20余年间0~20 cm土壤有机碳变化量约占全剖面(0~100 cm)变化量的80%^[19],则亚热带地区水稻土固碳 $151.4(\pm 24.2) \text{ Tg}$,相当于固定大气 CO_2 量 $555.1(\pm 88.7) \text{ Tg}$ 。可见,近几十年来我国亚热带地区水稻土可能已发挥显著的碳汇作用。

在水源有保证的条件下,水稻能够通过非共生固氮而获得生长需要的部分氮素以维持正常生长^[20],加上施肥和秸秆还田措施,大量的作物残体和其他有机物质归还使得每年形成的土壤有机质量保持较高水平^[21]。2002年江西省余江县水稻土有机碳含量的分布结果表明,仍有61.4%的面积尚未达到平衡状态的含量水平(19 g kg^{-1});其中,有机碳含量 $< 11.6 \text{ g kg}^{-1}$ 的占10.9%,这部分水田由于受水源限制,生产力水平低且提高较困难。而有机碳含量为 $11.6 \sim 19.0 \text{ g kg}^{-1}$ 的水田(占50.5%)水源有保证,生产力较高或提高到较高的可能性大,在正常的较高管理水平条件下,其土壤有机碳含量应有不同程度的提高,直至达到平衡状态。基于以上认识,假定这部分水田的土壤有机碳含量在未来较高生产力条件下都能提高到平衡水平,按其2002年的含量分布及各级分布中有机碳含量平均值,计算得到江西省余江县0~20 cm水稻土未来的固碳潜力为 $7.85(\pm 1.62) \times 10^7 \text{ kg}$,平均每 hm^2 固碳 $4120(\pm 850) \text{ kg}$ (全剖面则为 $5150(\pm 1063) \text{ kg}$)。并据此估算亚热带水稻土未来的固碳潜力为 $112.1(\pm 23.1) \text{ Tg}$,相当于能够新固定大气 CO_2 量 $411.0(\pm 84.7) \text{ Tg}$ 。这表明,亚热带水稻土未来作为碳汇的作用仍是非常重要的。

3 结论

由于管理和生产力水平明显改善使进入土壤的有机物质质量提高,过去20余年来江西省余江县水稻土的有机碳含量总体呈上升趋势,有机碳储量增加了 $6955(\pm 1116) \text{ kg hm}^{-2}$ 。据此计算我国亚热带地区水稻土过去20年固定大气 CO_2 量 $555.1(\pm 88.7) \text{ Tg}$,其作为碳汇的作用是相当明显的。在较高生产水平条件下,红壤水稻土有机碳的平衡值为 $18 \sim 20 \text{ g kg}^{-1}$,平均为 $19.0(\pm 1.0) \text{ g kg}^{-1}$ 。目前仍有相当面积的水稻土其有机碳含量低于平衡水平,估计还

可平均固碳 $5\ 150(\pm 1\ 063)\text{ kg hm}^{-2}$ 。据此,若保持现实较高生产力水平,则我国亚热带地区水稻土未来可新固定大气 CO_2 量 $411.0(\pm 84.7)\text{ Tg}$ 。因此,应当采取有效措施保持和提高农田土壤的有机物质归还量,扩大其固碳能力,充分发挥其在控制全球气候变暖趋势上的重要作用^[22]。

参考文献

- [1] Smith P, Powlson D S, Smith J U, *et al.* Meeting Europe's climate change commitments: Quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology*, 2000, 6: 525 ~ 539
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climatic change and food security. *Science*, 2004, 304:1 623 ~ 1 627
- [3] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66(6):1 930 ~ 1 946
- [4] Sa J C, Cerri C C, Dick W A, *et al.* Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65(5):1 486 ~ 1 499
- [5] West T O, Marland G. Net carbon flux from agriculture: Carbon emission, carbon sequestration, crop yield, and land-use change. *Biogeochemistry*, 2003, 63(1):73 ~ 78
- [6] Falloon P D, Smith P, Smith J U, *et al.* Regional estimates of carbon sequestration potential: Linking the Rothamsted Carbon Model to GIS databases. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(3):236 ~ 241
- [7] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context. *Europ. Agronomy*, 2004, 20:229 ~ 236
- [8] Lal R. Soil C sequestration in China through agricultural intensification and restoration of degraded and desertified soils. *Land Degradation & Development*, 2002, 13:469 ~ 478
- [9] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析. *土壤学报*, 2002, 39(3):351 ~ 360. Li Z P, Lin X X, Che Y P. Analysis for the balance of organic carbon pools and their tendency in typical arable soils of Eastern China (In Chinese). *Acta Pedologia Sinica*, 2002, 39(3):351 ~ 360
- [10] Pan G, Wu L, Li L, *et al.* Storage and sequestration potential of organic carbon in paddy soils of China. *Global Change Biology*, 2003, 10:79 ~ 82
- [11] Kyuma K. Soil resources and land use in tropical Asia. *Pedosphere*, 2003, 13(1):49 ~ 57
- [12] 李忠佩, 林心雄. 田间条件下红壤水稻土有机碳的矿化量研究. *土壤*, 2002, 34(6):310 ~ 314. Li Z P, Lin X X. Mineralization of organic carbon in paddy soils under field condition in red soil region (In Chinese). *Soils*, 2002, 34(6):310 ~ 314
- [13] 闫德智, 王德建. 土壤供氮能力研究方法进展. *土壤*, 2005, 37(1):20 ~ 24. Yan D Z, Wang D J. Methods for studying soil nitrogen supply capacity (In Chinese). *Soils*, 2005, 37(1):20 ~ 24
- [14] 文启孝主编. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社, 1984. Wen Q X. ed. *Methods for Soil Organic Matter Studies* (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1984
- [15] 江西省土地利用管理局, 江西省土壤普查办公室编. 江西土壤. 北京: 中国农业科技出版社, 1991. Administration Bureau of Land, Soil Survey Staff Office of Jiangxi Province. eds. *Soils of Jiangxi Province* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 1991
- [16] Goyal S, Chander K, Mundra M C, *et al.* Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions. *Biol. Fertil. Soils*, 1999, 29:196 ~ 200
- [17] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析. *土壤学报*, 2003, 40(3):344 ~ 352. Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, *et al.* Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China (In Chinese). *Acta Pedologia Sinica*, 2003, 40(3):344 ~ 352
- [18] 刘江, 何康主编. 中国农业年鉴(1995). 北京: 中国农业出版社, 1996. 546. Liu J, He K. eds. *Almanac of China's Agriculture in 1995* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 1996. 546
- [19] 李忠佩. 低丘红壤有机碳库的密度及变异. *土壤*, 2004, 36(3):292 ~ 297. Li Z P. Density of soil organic carbon pool and its variation in hilly red soil region (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(3):292 ~ 297
- [20] 朱兆良, 文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. Zhu Z L, Wen Q X. eds. *Nitrogen in Soils of China* (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Scientific and Technology Publishing House, 1992
- [21] 李忠佩. 红壤区耕地有机物质的利用现状与开发策略. *土壤与环境*, 1999, 8(2):148 ~ 152. Li Z P. The utilization and development strategies of organic material in cultivated land of red soil regions (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(2):148 ~ 152
- [22] Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, *et al.* Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in a rehabilitating ecosystem. *Pedosphere*, 2004, 14(4):501 ~ 508

ORGANIC C CONTENT AT STEADY STATE AND POTENTIAL OF C SEQUESTRATION OF PADDY SOILS IN SUBTROPICAL CHINA

Li Zhongpei¹ Wu Dafu²

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China*)

Abstract Determination of soil organic C content at steady state is of important significance for evaluating potential of C sequestration of the soil and developing a measure for rational organic material utilization. In this study, change in soil organic C content of paddy fields in a typical red soil region over a period of time, dynamics of the organic C content in the paddy soils across a chronosequence of cultivation, and the input and output of soil organic C, were investigated in order to determine the organic C content at steady state and then potential of C sequestration in the paddy soils of subtropical China. In the past 20 years or so, soil organic C content of the paddy fields in Yujiang County of Jiangxi Province increased generally but it remained stably at 18.5 g kg^{-1} in paddy soils with high productivity. After 30 years of rice cultivation, soil C content of the paddy field reached to $19.0 (\pm 1.20) \text{ g kg}^{-1}$ and varied insignificantly afterwards. If the high level of soil organic C formed recently is settled in equilibrium, the soil organic C content will be $19.2 (\pm 1.10) \text{ g kg}^{-1}$. As a whole, at the present high level of productivity, the soil organic C content at steady state of paddy soils in subtropical China would be $18 \sim 20 \text{ g kg}^{-1}$ with an average of $19.0 (\pm 1.0) \text{ g kg}^{-1}$. In the past 20 years, the storage of organic C in the paddy soils of Yujiang County increased by $6\,955 (\pm 1\,116) \text{ kg hm}^{-2}$. Based on this, it was figured out that the paddy soils in subtropical China sequestered $555.1 (\pm 88.7) \text{ Tg}$ of atmospheric CO_2 in the past 20 years, demonstrating an important function as a sink of CO_2 . Today there are still large areas of paddy fields that have less soil organic C content than that at steady state. It is estimated that they could sequester on average $5\,150 (\pm 1\,063) \text{ kg hm}^{-2}$ more of carbon. Therefore, at the present high level of productivity, the paddy soils in subtropical China would sequester an extra of $411.0 (\pm 84.7) \text{ Tg}$ of atmospheric CO_2 in future.

Key words Paddy soils; Organic C; Content at steady state; Potential of C sequestration; Subtropical China