

红壤典型区不同类型土壤有机碳组分构成及空间分异研究^①

张忠启^{1,2}, 于东升^{1,4*}, 潘剑君³, 张海东^{1,4}, 史学正^{1,4}, 王 宁¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 江苏师范大学城市与环境学院, 江苏徐州 221116; 3 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 4 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 以江西省东乡县为研究区, 基于土壤有机碳三库(活性、缓性和惰性碳库)一级动力学理论, 通过 22 个土壤样品的实验室呼吸培养实验, 计算了各土壤亚类的碳组分含量及占总有机碳的比例, 并借助全县 229 个采样点获得了东乡县的活性、缓性和惰性有机碳的空间分布图。分析结果表明, 淹育、潜育、潜育型水稻土和红壤的活性碳含量分别为 0.54、0.72、0.72 和 0.33 g/kg, 分别占其总有机碳含量的 2.78%、2.83%、2.91% 和 2.57%; 缓性碳含量分别为 7.57、9.79、12.34 和 4.72 g/kg, 分别占总有机碳含量的 41.09%、45.25%、46.24% 和 37.12%; 惰性碳含量分别为 10.36、11.22、13.49 和 7.67 g/kg, 分别占总有机碳含量的 60.31%、56.13%、51.92% 和 50.67%。在空间分布上, 活性、缓性和惰性碳含量均呈现由东南向西北减少趋势。分析表明水稻土各亚类活性和缓性碳含量高于红壤, 说明水稻土不仅是该地区固碳的主要类型, 也是较大的潜在碳排放源。红壤的惰性碳尽管比例最高, 但总有机碳含量较低, 其土壤固碳能力有待进一步提高。

关键词: 土壤有机碳库; 土壤类型; 土壤有机碳组分; 南方红壤丘陵区

中图分类号: S155

土壤有机碳库是土壤肥力的重要指标, 也是陆地生态系统最大的活跃性碳库, 其较小波动即可对大气二氧化碳浓度甚至全球碳平衡产生重大影响^[1-2]。当前土壤有机碳库已成为各国土壤学研究的热点问题。土壤有机碳的分解动态及其碳库是复杂多变的, 有较易分解的部分, 有较难分解的部分, 也有极难分解的部分, 依据其分解速率和稳定性可将其划分为活性碳库、缓性碳库和惰性碳库^[3-4]。不同有机碳组分占土壤碳库的比例不同, 其分解程度和矿化难易度亦表现不同^[5]。弄清土壤碳库的组分构成及其空间分布特征, 是深入研究土壤碳库变化机制和制定合理农业管理措施的关键。

近些年来, 国内外关于土壤有机碳组分的研究日益增多, 也取得了一些进展^[6-9]。但相对于土壤有机碳库的总量估算及空间变异性研究, 土壤有机碳组分的研究还不够深入。我国地域辽阔, 区域自然条件和人为活动差异大, 导致区域土壤有机碳库形状有较大差异^[10-11], 为对区域土壤有机碳进行有效管理和调控, 必须加强区域土壤有机碳组分及其空间变异特征

研究。中国南方红壤区面积约 118 km², 该地区不仅人口稠密, 也是我国重要的粮食生产区。由于该区域地形复杂, 土壤类型多变, 土壤有机碳具有较强的空间变异性, 其土壤有机碳组分构成及各组分的空间变异特征仍不明确。鉴于此, 本研究选择中国南方红壤丘陵区——江西省东乡县为例, 运用三库一级动力学理论, 结合土壤样品的实验室培养数据, 拟合得到不同土壤类型的活性、缓性和惰性有机碳组分构成及分解特征, 进而得到县域各碳组分空间分布规律, 以为深入理解红壤区土壤碳演变以及合理农业和环境管理措施的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江西省东乡县地处 116°20′~116°51′ E, 28°02′~28°30′N, 是江西省东北山区向鄱阳湖平原过渡地段, 总面积约为 1 270 km²(图 1)。该县属亚热带湿润季风气候, 气候温和, 光热充足, 雨量充沛, 无霜期长, 年平均温度 17.7℃, 年降水量 1 712 mm。地形以低丘为主,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201213)、中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05050507)和土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(0812201231)资助。

* 通讯作者(dshyu@issas.ac.cn)

作者简介: 张忠启(1978—), 男, 江苏丰县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤资源与环境方面的研究。E-mail: zhangzq128@126.com

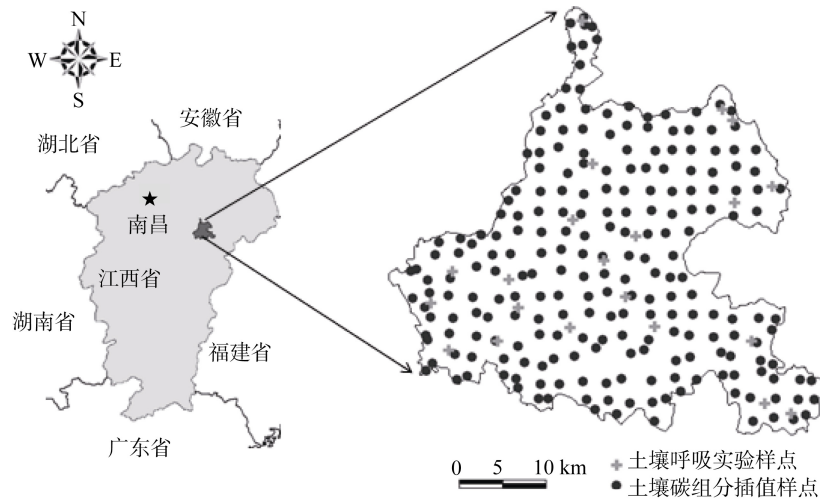


图 1 研究区及土壤采样点位置示意图

Fig. 1 Location of study area and distribution of sampling points

南北多高丘，丘陵面积占 51%，平原岗地占 49%。全县土壤类型以红壤和水稻土两土类为主，其中水稻土主要包括淹育、潜育和潜育型水稻土 3 个亚类，红壤土类主要包括红壤 1 个亚类。土地利用方式以水田、旱地、林地为主(中国土地利用数据库)。成土母质有第四纪红色黏土、泥质岩类风化物、红砂岩类风化物、石英岩类风化物和花岗岩类风化物等^[12]。主要作物有水稻、花生、红薯、芝麻和油菜等。

1.2 土壤样品采集

本研究采集的土壤样品由两部分组成，共计 248 个。首先，在全县范围内均匀布设 22 个土壤采样点，包括了全县主要的土壤亚类类型，即淹育型、潜育型、潜育型水稻土及红壤，且每个亚类的土壤样品数不低于 3 个(表 1)，将此样品用于土壤呼吸培养，进而对土壤活性碳库和缓效性碳库大小及周转时间进行计算和拟合。其次，在东乡县范围内通过 2.5 km × 2.5 km 网格采集样品 226 个，所采集样品均是在靠近网格中心点，用于进行土壤碳组分的空间预测，获得碳组分的空间分布图。所有土壤样品采集均为表层土壤(0~20 cm)，采样时用 GPS 记录每个采样点的经纬度，并描述各样点的土壤类型、土地利用和管理措施等相关信息。所有土壤样品均在 2009 年和 2010 年底农作物收割后采集。去除土壤样品中的动植物残体后，经风干、研磨，分别过 20 目和 100 目筛备用。

1.3 土壤有机碳测定方法与碳库计算拟合

土壤有机质用低温外加热重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)氧化-滴定法测定^[13]，土壤有机质含量除以 1.724 得到土壤有机碳含量。土壤惰性碳含量用酸水解法测定^[5,14]。称取过 20 目风干土样 100 g 于呼吸瓶内，调节瓶内土壤含水量至最大持水量的 70%，密封放置于 25

的恒温培养箱中，在黑暗条件下培养 3 个月，培养期间需定时通气。一定时间间隔后，在转出的吸收碱液中加入过量 $BaCl_2$ ，然后以酚酞作为指示剂，用已知浓度的 HCl 中和未耗尽的 NaOH，通过消耗的 HCl 量计算出 CO_2 的数量，进而推算出有机碳分解量。结合土壤呼吸培养数据和常规测定数据，运用三库一级动力学方程对土壤活性碳库和缓效性碳库大小及周转时间进行拟合^[5,15]：

$$C_{socr} = C_a \times \exp(-K_a \times t) + C_s \times \exp(-K_s \times t) + C_r \times \exp(-K_r \times t) \quad (1)$$

式中： C_{socr} 是 t 时刻的有机碳含量； C_a 、 C_s 和 C_r 分别表示土壤有机碳中活性、缓性和惰性碳含量(g/kg)； K_a 、 K_s 和 K_r 分别表示活性、缓性和惰性碳库的分解速率(d^{-1})，均与平均驻留时间(MRT)成倒数关系。为消除实验室培养温度与田间实际温度之间存在差异对各碳库周转时间的影响，需对其进行转换： $MRT_{lab} = MRT_{field}/Q_{10}$ ，其中 $Q_{10} = 2^{[(25-MAT)/10]}$ (注：MAT 为研究区年平均温度)。

该模型中变量 C_{socr} 和 C_r 为实验测得，惰性碳(C_r)平均驻留时间太长且不容易获得，一般假定土壤惰性碳的平均驻留时间为 1000 年，已知东乡县年平均温度为 17.6，可知 MRT_{lab} 为 599 a， K_r 为 4.58×10^{-6} 。未知参数为 C_a 、 K_a 和 K_s (C_s 可用方程 $C_s = C_{socr} - C_r - C_a$ 代替以减少参数)可基于 99 天的土壤培养数据及已知数据，在软件 SAS9.0 中拟合得出，进而得到各土壤有机碳库组分大小及分解速率。

1.4 土壤有机碳库各组分空间分析

通过 22 个土壤样品的实验数据求得各土壤类型的碳组分含量比例，按土壤类型计算出 226 个土壤样点的活性、缓性和惰性碳的含量，进而通过地统计学

的克里格(Kriging)方法获得各土壤碳库的空间分布图,克里格方法原理及计算公式见相关参考文献[11,16]。本研究中土壤有机碳及各碳组分的统计分析在SPSS软件下完成,各碳组分的空间分布图在GS+和ArcGIS9.3软件下共同完成。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量的统计描述

表1是248个样点土壤有机碳含量的描述性统计。可以看出,248个样点的土壤有机碳均值为20.82 g/kg,变异系数为0.32,属于中等变异水平。淹育型、潜育

型、潜育型水稻土和红壤4种土壤亚类的有机碳均值分别为18.43、21.61、26.60和12.72 g/kg,水稻土3种亚类的有机碳含量均大幅高于红壤。其中潜育型水稻土有机碳含量最高,红壤含量最低,前者为后者的两倍多。从各亚类有机碳的变异系数可以看出,红壤亚类的有机碳含量变异系数最高,潜育型水稻土最低,红壤亚类高于水稻土各亚类有机碳变异系数,表明红壤有机碳含量的波动性最大,这与红壤区已有的研究结果一致^[11,17],其原因主要为红壤利用方式的多样性。从统计结果来看,所有样点土壤有机碳含量呈正态分布。

表1 不同土壤类型土壤有机碳含量的描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of SOC in various soil types

土壤类型	样点数	最小值 (g/kg)	最大值 (g/kg)	均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数	偏度系数	峰度系数
淹育型水稻土	29	1.22	4.05	18.43	0.50	0.27		
潜育型水稻土	173	0.55	3.80	21.61	0.62	0.29		
潜育型水稻土	22	1.81	3.42	26.60	0.58	0.22		
红壤	24	0.31	2.47	12.72	0.53	0.41		
合计/平均	248	0.31	4.05	20.82	0.68	0.33	-0.07	0.02

2.2 不同土壤类型碳库组分大小及分解特征

据22个样品的实验室呼吸培养实验数据及总土壤有机碳含量值可计算出各有机碳组分的含量及占总有机碳的比例(表2)。从全部实验样点来看,活性、缓性和惰性碳组分含量分别为0.58、8.59和11.62 g/kg,

分别占总有机碳均值(20.79 g/kg)的2.79%、41.32%和55.89%。其中活性碳所占比重较小,而缓性和惰性碳组分两者之和占了总有机碳的绝对比重,这对土壤有机碳稳定较为有利,该结果与陈锦盈等^[5]和史学军等^[15]的研究结果较为一致。

表2 土壤活性、缓性和惰性有机碳含量(g/kg)及占总有机碳的比例(%)
Table 2 Contents of active, slow, and passive SOC and the corresponding proportions in total SOC

指标	样点数量	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
活性碳(C_a)	22	0.22	1.29	0.58	0.27	0.47
缓性碳(C_s)	22	2.16	16.26	8.59	3.46	0.40
惰性碳(C_t)	22	5.02	30.08	11.62	5.93	0.51
C_a/C_{soc}	22	1.70	3.90	2.79	0.69	0.24
C_s/C_{soc}	22	24.70	59.90	41.32	11.23	0.26
C_t/C_{soc}	22	37.40	72.90	55.89	11.33	0.21

从各土壤类型来看,淹育、潜育和潜育型水稻土的活性碳含量分别为0.54、0.72和0.72 g/kg(图2),分别占其总有机碳含量的比例分别为2.78%、2.83%和2.91%(图3),均高于红壤亚类含量(0.33 g/kg)及比例(2.57%)。同样地,3种水稻土亚类的缓性碳含量分别为7.57、9.79和12.34 g/kg,其比例分别为41.09%、45.25%和46.42%,也不同程度的高于红壤亚类(4.72 g/kg, 37.12%),表明水稻土各亚类碳排放能力强于红壤,是南方红壤区耕地的主要碳排放土壤类型,需要通过农业管理措施不断输入有机质来维持其土壤碳平衡。

从各土壤亚类的情性碳含量来看,红壤情性碳含量(7.67 g/kg)低于淹育型(10.36 g/kg)、潜育型(11.22 g/kg)和潜育型水稻土(13.49 g/kg),但其所占红壤总有机碳比例最高(60.31%),其次是淹育型水稻土(56.12%),而潜育型和潜育型水稻土均低于前两者,分别51.92%和50.67%。总的来看,情性碳含量其比重均超过了各自土壤有机碳总量的一半,这对土壤碳库的稳定发挥了重要作用。

从各亚类土壤呼吸的碳排放速率来看(图4),在培养初期的3天内,土壤有机碳分解速率快速达到最大值,

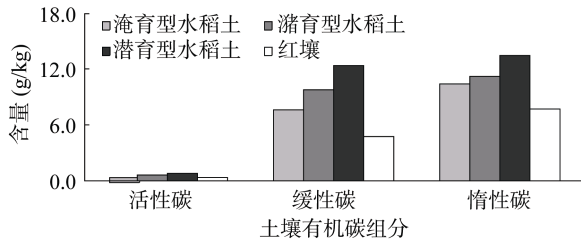


图 2 研究区不同土壤亚类活性、缓性和惰性碳含量
Fig. 2 Contents of carbon fractions in various soil subgroups in study area

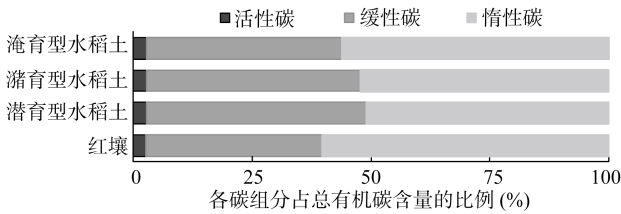


图 3 各土壤亚类有机碳组分占其总有机碳含量的比例
Fig. 3 Proportions of SOC fraction contents in total SOC for various soil subgroups

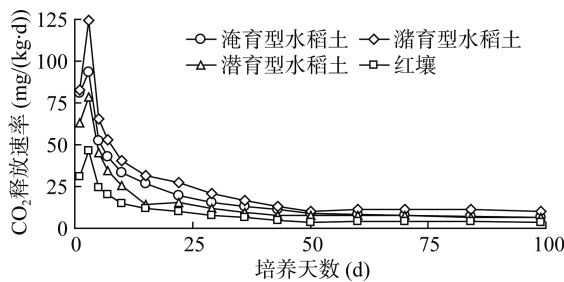


图 4 不同土壤亚类碳组分分解速率
Fig. 4 Decomposition rates of SOC fractions in various soil subgroups

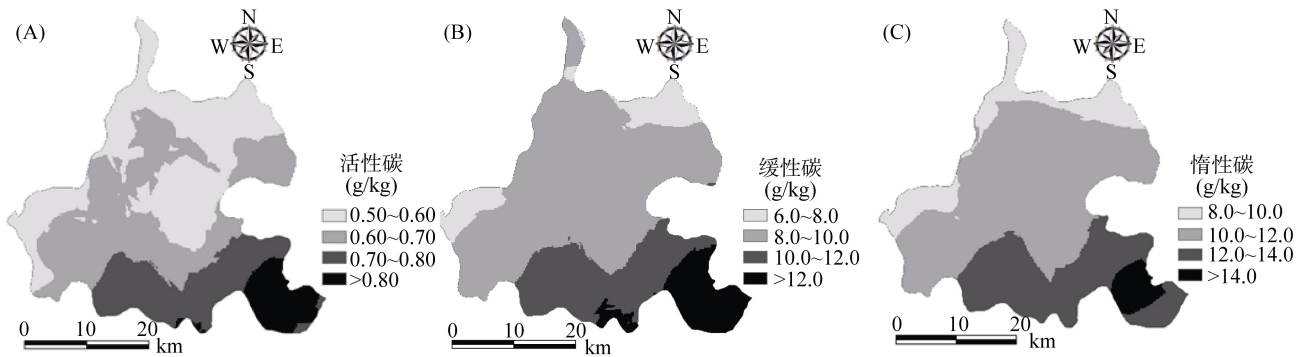


图 5 不同土壤亚类活性(A)、缓性(B)和惰性碳(C)空间分布图
Fig. 5 Spatial distributions of active (A), slow (B) and inert SOC (C) in the study area

成土母质以第四纪红黏土为主，部分地区为红砂岩红壤，耕地多为坡耕旱地，水土流失相对严重，土层较薄，耕作方式也较为粗放，农户重视程度不够，农业投入少，土壤肥力较差，各有机碳组分含量远低于其他地区。

3 结论

土壤类型是影响土壤有机碳含量的重要因子，中

之后分解速率快速下降，至培养时间 30 天左右，有机碳分解基本达到稳定状态，之后有机碳分解变得极为缓慢。该土壤有机碳分解速率变化与土壤微生物活性及土壤中易分解碳组分含量有较大关系。培养初期由于调节土壤含水量，土壤微生物活性迅速增强，加快有机碳矿化速率，土壤中易分解的简单有机物迅速被分解转化为 CO₂ 和 H₂O，从而使土壤有机碳分解速率达到最大。随着易分解的活性有机碳含量逐渐减少，有机碳分解速率也逐步下降。活性碳分解完后，缓性碳库中的部分有机碳随着土壤呼吸作用有小部分逐步释放进入活性碳库，维持较低水平的有机碳分解速率^[5]。在各土壤亚类中，由于淹育、潜育和潜育型水稻土总有机碳含量及各组分含量均大幅高于红壤，在培养过程中水稻土各亚类的 CO₂ 释放速率高于红壤亚类。

2.3 不同土壤有机碳组分的空间分布

基于 22 个各类型土壤采样点的呼吸培养实验及拟合得到的各碳组分含量比例，估算得到全县 226 个网格采样点的各碳组分含量，进而得到全县范围内各碳组分含量的空间分布(图 5)。从图中可以看出，活性、缓性和惰性碳均呈现东南部含量较高，西北部地区偏低的趋势。东南部地区的土壤母质多以泥质岩风化物为主，土层较厚，利用方式以水田为主，是该县主要的粮食产区。由于土壤肥沃，粮食产量高，历来受到当地农户的重视，长期保持较高的农业投入，因此有机碳含量高于其他地区。北部和西部地区多为山地，

国南方红壤丘陵区水稻土各亚类与红壤亚类的有机碳含量差异明显。从各碳组分含量来看，各土壤亚类的活性碳组分含量均为最小，惰性碳组分含量最大。由于红壤亚类有机碳含量远低于淹育、潜育和潜育型水稻土，其活性、缓性和惰性碳含量均大幅低于后三者；从各碳组分占总有机碳的比例来看，各亚类活性碳组分构成比例均较低，为 2.57%~2.91%，其中潜

育型水稻土最高,红壤最低;缓性碳组分构成比例为 37.12%~46.42%,亦为潜育型水稻土最高,红壤最低。惰性碳组分构成比例为 50.67%~60.31%,均超过总有机碳的一半,其中红壤的比例最高,潜育型水稻土最低。从各土壤碳组分的空间分布来看,活性、缓性和惰性碳组分均为东南含量高而西北含量少,这与土壤总有机碳含量的空间分布一致。研究结果表明水稻土不仅是红壤区耕地土壤固碳的主要土壤类型,也是较大的潜在碳排放土壤类型,如何维持其土壤有机碳平衡是土壤固碳减排的关键。其中,潜育型水稻土由于活性和缓性碳比例最高,其碳排放潜力较大;而潜育型水稻土不仅活性和缓性碳含量较高,且在南方红壤区分布最广,因此这两种水稻土亚类有机碳含量的变化更值得关注。红壤虽然惰性碳含量比例最高,但其总有机碳含量较低,目前其对土壤固碳能力的贡献有待提高,故重视红壤坡耕地肥力培育,增加有机质投入,提高土壤有机碳含量,是红壤丘陵区增加土壤固碳的重要途径。

参考文献:

- [1] 上官魁星, 吴金水, 周脚根, 朱捍华. 县域尺度土壤有机碳储量估算的样点密度优化[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 41-48
- [2] 田康, 赵永存, 邢喆, 孙维侠, 黄标, 胡文友. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究——基于长期试验点的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 433-440
- [3] Parton WJ, Schimel DS, Cole CV. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987(51): 1 173-1 179
- [4] 孟静娟, 史学军, 潘剑君, 黄礼辉, 雷学成, 史学正, 孙波, 李忠佩. 农业利用方式对土壤有机碳库大小及周转的影响研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 145-148
- [5] 陈锦盈, 孙波, 李忠佩, 李海鹰, 潘剑君. 不同土地利用类型土壤有机碳各库大小及分解动态[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 91-95
- [6] Shao YH, Pan JJ, Sun B. Effect of a long-term organic manure application on the different available carbons in red soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006(1): 125-127
- [7] 方华军, 杨学明, 张晓平, 梁爱珍, 申艳. 坡耕地黑土活性有机碳空间分布及生物有效性[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 59-63
- [8] 庞学勇, 包维楷, 吴宁. 森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(3): 390-398
- [9] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 长期施肥对红壤不同形态碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006 14(1): 125-127
- [10] 吴乐知, 蔡祖聪. 中国土壤有机质含量变异性与空间尺度的关系[J]. 地球科学进展, 2006, 21(9): 965-972
- [11] 张忠启, 史学正, 于东升, 王世航, 徐胜祥. 南方红壤丘陵区土壤有机质和全氮含量的空间预测研究[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5 338-5 345
- [12] 江西省土壤普查办公室. 江西土壤[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991: 14-16
- [13] Nelson DW, Sommers LE. Total carbon, organic carbon, and organic matter // Page AL, Miller RH, Keeney DR. Methods of Soil Analysis, Part 2-chemical and Microbiological Properties [M]. ASA-SSSA, Madison, WI, 1982: 539-594
- [14] Silveira ML, Comerford NB, Reddy KR, Cooper, WT, El-Rifai H. Characterization of soil organic carbon pools by acid hydrolysis[J]. Geoderma, 2008, 144(1/2): 405-414
- [15] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 杨志强, 张黎明, 孙波, 李忠佩. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(6): 1 832-1 837
- [16] Wang YQ, Zhang XC, Huang CQ. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2009, 150(1/2): 141-149
- [17] 罗明, 潘先章, 孙波, 宗良纲. 江西余江县土壤有机质含量的时空变异规律研究[J]. 土壤, 2008, 40(3): 403-406

Study on Soil Organic Carbon Components and Its Spatial Variability of Different Soil Types in Hilly Red Soil Region

ZHANG Zhong-qi^{1,2}, YU Dong-sheng^{1,4*}, PAN Jian-jun³, ZHANG Hai-dong^{1,4},
SHI Xue-zheng^{1,4}, WANG Ning¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *College of Urban and Environmental Sciences, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu* 221116, China; 3 *College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, China; 4 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China)

Abstract: Taking Dongxiang County of Jiangxi Province as a study area, the contents of active, slow, inert soil organic carbon (SOC) and the corresponding proportions of total SOC were analyzed in the soil subgroups on the basis of the three pool theory of SOC and the culture experiments of soil respiration experiments, and then the distribution contours of three SOC fractions of active, slow and inert SOC were obtained with the proportion data aforementioned and another 229 samples collected by grids throughout Dongxiang County. The results showed that the active SOC contents of the four subgroups of Submergenic, Hydragric, Gleyed paddy soil and red soil were 0.54, 0.72, 0.72 and 0.33 g/kg, and the corresponding proportions in total SOC were 2.78%, 2.83%, 2.91% and 2.57%, respectively. The slow SOC contents of four subgroups were 7.57, 9.79, 12.34 and 4.72 g/kg, and the corresponding proportions in total SOC were 41.09%, 45.25%, 46.24% and 37.12%, respectively. The inert SOC contents of four subgroups were 10.36, 11.22, 13.49 and 7.67 g/kg, and the corresponding proportions were 60.31%, 56.13% , 51.92% and 50.67%, respectively. From the spatial distribution, the contents of active, slow, inert SOC were all decreased from southeast to northwest in Dongxiang County. The contents of active and slow SOC contents of the three subgroups of paddy soil were all higher than that of red soil subgroup. This indicates that the paddy soil is not only the main soil type to carbon sequestration, but also a potential carbon source in hilly red soil region of southern China. The total SOC of red soil is very low, although with higher inert SOC content proportion, and its carbon sequestration ability need to be further improved.

Key words: Soil organic carbon (SOC) pool; Soil type; SOC fractions; Hilly red soil region in Southern China