

武夷山土壤有机碳和黑碳的分配规律研究

薛丽佳, 高人*, 杨玉盛, 尹云锋, 马红亮, 刘燕萍

(湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

关键词: 武夷山; 土壤有机碳; 黑碳

中图分类号: S714

文献标识码: A

Distribution Pattern of Organic Carbon and Black Carbon from Different Soils in Wuyi Mountains

XUE Li-jia, GAO Ren, YANG Yu-sheng, YIN Yun-feng, MA Hong-liang, LIU Yan-ping

(Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process of the Ministry of Education, Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: The objective of this study is to investigate the distribution pattern of organic carbon and black carbon in soils of Wuyi Mountains. The results indicated that the contents of organic carbon in 2000–250 μm fraction, 250–50 μm fraction and <50 μm fraction ranged from 7.16 to 78.78 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1.48 to 10.30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 0.58 to 3.86 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. The contents of black carbon in corresponding fraction varied from 0.58 to 22.19 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 0.11 to 3.57 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 0.07 to 0.87 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which indicated that the organic carbon and black carbon were mainly presented in 2000–250 μm fraction. The regression analysis showed that there was a significant linear or logarithmic relationship between soil organic carbon and black carbon in corresponding fractions and whole soil, and the proportion of black carbon to organic carbon was 6%–35% in different soils. The data also suggested that the black carbon had a high relative content in <50 μm fraction of red soil, yellowish red and yellow soil, but in 250–50 μm fraction of meadow soil.

Key word: Wuyi Mountains; soil organic carbon; black carbon

土壤是陆地生态系统最大的碳库,其贮存的有机碳占整个陆地生态系统碳库的2/3,约为植物碳库的3倍或大气碳库的2倍,是全球碳循环非常重要的组成部分^[1-2]。因此土壤有机碳库及其变化,对大气二氧化碳浓度影响巨大,从而以温室效应影响全球气候变化。土壤有机碳不仅对全球气候变化有着重要的影响,也为植被的生长和繁殖提供了必不可少的碳源,在维持土壤良好的物理结构方面起了重要作用,是评价土壤肥力的一个重要指标。我国山地面积达 $6.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,约占国土总面积的67.7%^[3]。山地土壤有机碳作为肥力的指标和土壤

质量评价的依据,一直是学者们研究的热点。目前,对我国山地土壤碳循环研究已有大量报道^[4-7]。

黑碳是生物质或化石燃料不完全燃烧所形成的碳物质,普遍存在于土壤和沉积物中^[8],具有高度的惰性,作为土壤碳库的重要组分,其含量的高低可能直接影响土壤有机质的组成、质量和物理化学、生物学性质^[9]。目前,国内外对大气气溶胶、海洋沉积物和雪冰中的黑碳已有大量研究^[10-13],随着对黑碳研究的不断深入,国内已有学者对城市和林地土壤黑碳分布进行研究^[14-16],但是,关于山地土壤不同粒级中黑碳的分配规律研究还未见报道,有关黑碳对

收稿日期: 2010-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(40801087,31070549)和福建省自然科学基金(2010J01248)资助

作者简介: 薛丽佳(1986—),女,黑龙江人,硕士,从事森林土壤碳循环研究. E-mail:xlj0455@126.com

*通讯作者: 高人(1963—),男,教授,从事森林生态系统碳、氮循环方面研究. E-mail:r.gao@hotmail.com

土壤碳库的重要性还没有得到全面的重视,这在一定程度上影响了陆地生态系统中土壤碳库及其长期变化的深入研究^[15]。土壤黑碳的研究能为土壤碳库及对土壤的生态功能进行正确评价提供重要的数据支持。本文研究武夷山土壤不同粒级中有机碳和黑碳的分配规律,旨在为山地土壤碳库研究提供科学依据。

1 研究区概况

福建省武夷山脉位于闽赣交界,地理坐标为 $117^{\circ}27' \sim 117^{\circ}51' E, 27^{\circ}33' \sim 27^{\circ}54' N$,山脉总体走向呈东北-西南向,大致与我国东南部海岸线平行,长约550 km,平均海拔1 000~1 100 m,主峰黄岗山2 158 m,是我国东南部大陆的最高峰,素有“华东屋脊”之称。该区年均气温 $13 \sim 19^{\circ}C$,年均降水量1 700~3 100 mm,年均相对湿度70%~85%以上;土壤类型依次为红壤(海拔700 m以下)、黄红壤(海拔700~1 050 m)、黄壤(海拔1 050~1 900 m)、黄壤性草甸土和山地草甸土(海拔1 900 m以上)。

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集

在武夷山不同海拔处选取典型土壤剖面表层,同一海拔选择3个土壤剖面(表1)。采样深度为0~15 cm,样品采集时间为2008年6月。土样采好自然风干后,拣去石块、残根等杂物,过2 mm筛备用。土壤粒级分组简单步骤如下:分别称取50.00 g土样,同一海拔的土壤混成一个样,用筛分仪(EML200 digital plus T, Germany)将全土分为 $2\ 000 \sim 250 \mu m$ 、 $250 \sim 50 \mu m$ 和 $< 50 \mu m$ 3个粒级,然后分别测定有机碳和黑碳含量。

表1 土壤采样点基本情况

样本编号	土壤类型	采样地点	海拔高度/m	植被类型
1	红壤	黄坑	310	常绿阔叶林
2	黄红壤	庙湾	920	常绿阔叶林
3	黄壤	桐木关	1 050	针阔叶混交林
4	黄壤	25 km处	1 850	山地矮林
5	黄壤性草甸土	黄岗山顶	2 100	山地草甸
6	山地草甸土	黄岗山顶	2 150	山地草甸

2.2 土壤黑碳和有机碳含量测定

土壤黑碳分离和测定方法参照文献^[17]。具体步骤如下:①称取过0.25 mm筛的烘干土样5.000 0

g加入50 mLHF(10%)于100 mL塑料离心管中,置于振荡机上振荡2 h;②离心机3 000转离心后去除上层液,再加入50 mL HF,继续振荡2 h,这个过程重复5次;③第5次HF处理后,离心,去除上清液,加入50 mL蒸馏水,将离心管置于漩涡混合仪上搅拌1 min,然后离心,去除上清液,这一过程也重复5次;④第5次水洗后,离心弃除上清液,将离心管置于 $60^{\circ}C$ 恒温烘箱中烘48 h,称质量,过0.149 mm筛;⑤称取烘干并过0.149 mm筛的样品0.300 0 g于100 mL离心管中,加入30 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7:2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液,用超声波分散器分散30 min后放入水浴锅中 $55 \pm 1^{\circ}C$ 反应12 h,再置于超声分散器分散30 min,继续水浴12 h,整个过程重复5次,氧化时间共60 h;⑥反应完毕,离心,去除上清液,加入50 mL蒸馏水,将离心管置于漩涡混合仪上搅拌1 min,然后离心,去除上清液,这一过程同样重复5次。第5次水洗后,离心去除上清液后,将离心管置于 $60^{\circ}C$ 恒温烘箱中烘48 h,称质量,离心管中的剩余物质即为黑碳实验样品。

土壤黑碳含量用CN元素分析仪(Elementar Vario EL III, Elementar, Germany)测定,单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化法。

2.3 统计分析

数据分析工作借助EXCEL2003和SPSS13.0统计软件进行。

3 结果与分析

3.1 不同粒级土壤有机碳含量

由图1可以看出, $< 50 \mu m$ 粒级在全土中的质量分数最低,为3.52%~9.92%, $250 \sim 50 \mu m$ 粒级在全土中的质量分数居中,可达10.06%~17.79%,而 $2\ 000 \sim 250 \mu m$ 粒级在全土中的质量分数最高,可达72.75%~86.42%。呈现了粒级越粗,质量分数越大的变化规律。

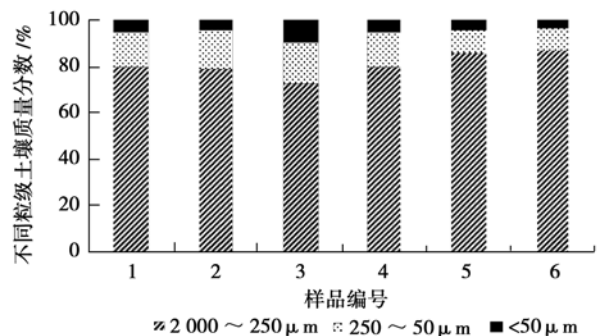


图1 不同样本土壤不同粒级颗粒质量分数

由表2可见,3个粒级土壤呈现了粒级越细,有机碳含量越低的变化规律。2 000~250 μm 粒级土壤有机碳含量是3个粒级里面最高的,可达7.16~78.78 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为38.29 \pm 26.92 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;其次是250~50 μm ,可达1.48~10.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均

值为6.94 \pm 3.06 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; <50 μm 粒级有机碳含量是3个粒级中含量最低的,可达0.58~3.94 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为2.70 \pm 1.29 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这说明有机碳主要存在于2 000~250 μm 粒级土壤中。

表2 不同粒级土壤有机碳含量分配

样品编号	总有机碳含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	不同粒级土壤有机碳含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
		2 000~250 μm	250~50 μm	<50 μm
1	10.48	7.16	1.48	0.58
2	45.62	33.25	7.92	1.99
3	32.51	22.99	6.32	3.34
4	35.12	25.12	6.64	2.50
5	76.39	62.45	9.00	3.94
6	96.84	78.78	10.30	3.86
(平均值)	49.49 \pm 31.61	38.29 \pm 26.92 a	6.94 \pm 3.06 b	2.70 \pm 1.29 c

注:不同字母表示同一行数据之间达到显著差异($P < 0.05$)。下同。

3.2 不同粒级土壤黑碳含量

由表3可知,3个粒级土壤黑碳含量随粒级的降低呈现出逐渐降低的趋势。<50 μm 粒级土壤黑碳含量是3个粒级中最低的介于0.07~0.87 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为0.49 \pm 0.26 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;250~50

μm 粒级黑碳含量较高,为0.11~3.57 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为1.33 \pm 1.28 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;2 000~250 μm 粒级含量最高,为0.58~22.19 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为6.88 \pm 8.58 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明黑碳主要存在于2 000~250 μm 粒级土壤中。

表3 不同粒级土壤黑碳含量分配

样品编号	全土中黑碳含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	不同粒级黑碳含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
		2 000~250 μm	250~50 μm	<50 μm
1	0.80	0.58	0.11	0.07
2	4.83	1.86	0.84	0.44
3	3.30	2.14	0.66	0.54
4	4.17	2.44	0.67	0.40
5	15.22	12.08	2.11	0.61
6	27.94	22.19	3.57	0.87
(平均值)	9.38 \pm 10.36	6.88 \pm 8.58a	1.33 \pm 1.28b	0.49 \pm 0.26c

3.3 不同粒级土壤中有有机碳与黑碳的关系

回归分析表明,3个粒级土壤有机碳和黑碳含量都达到显著水平(图2),而全土有机碳与黑碳含

量也达到了显著水平,确定系数 R^2 为0.914 2($P = 0.00$)。

由表4可见,在3种粒级土壤中,<50 μm 粒级

表4 土壤中黑碳与有机碳含量比例

样品编号	全土黑碳占总有机碳比例/%	不同粒级土壤中黑碳占有有机碳比例/%		
		2 000~250 μm	250~50 μm	<50 μm
1	7.61	8.16	7.19	12.11
2	10.58	5.60	10.66	22.26
3	10.14	9.32	10.45	16.05
4	11.89	9.72	10.08	16.07
5	19.92	19.35	23.40	15.45
6	28.85	28.16	34.64	22.61
(平均值)	14.83 \pm 8.04	13.39 \pm 8.62a	16.07 \pm 10.72a	17.43 \pm 4.15a

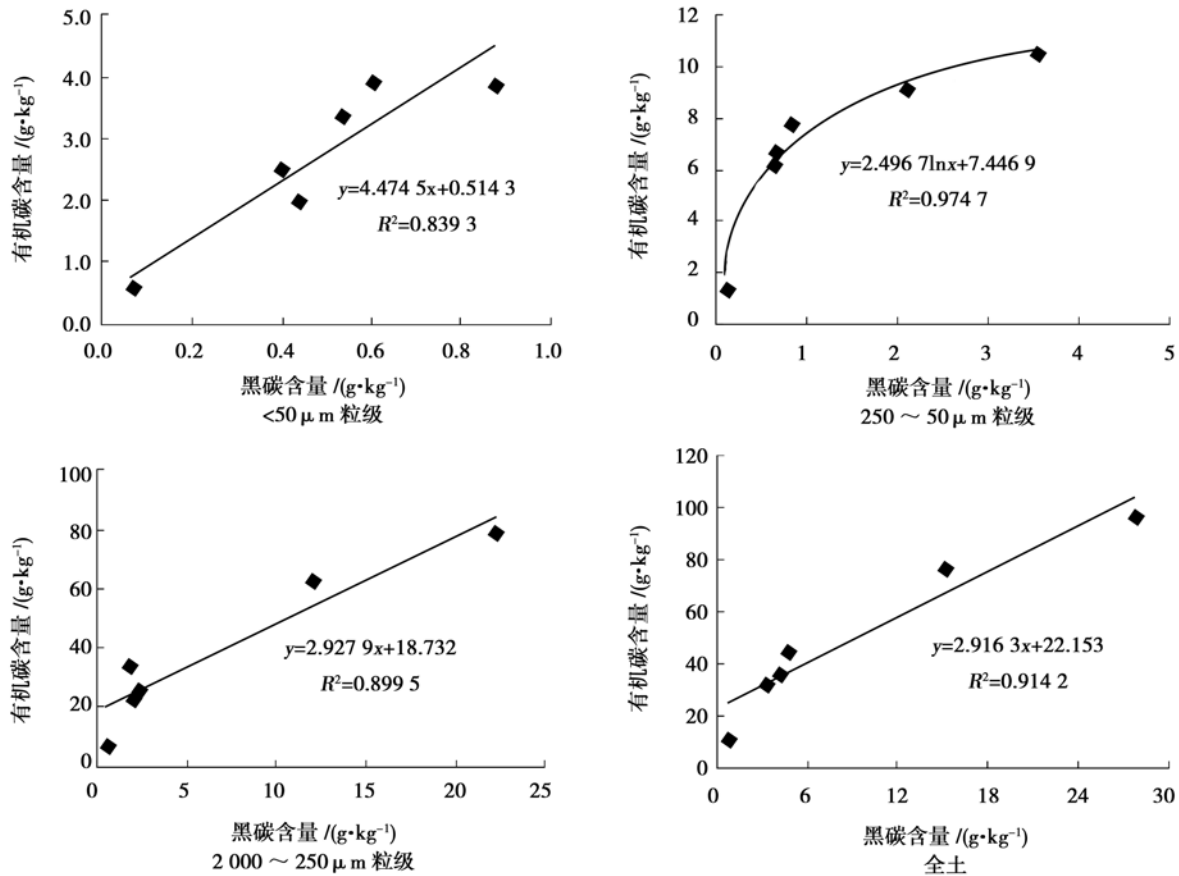


图2 不同粒级土壤黑碳与其有机碳含量的关系

的黑碳与有机碳含量比例为 12.11% ~ 22.61%，平均值为 $17.43\% \pm 4.15\%$ ， $250 \sim 50 \mu\text{m}$ 粒级的黑碳与有机碳含量比例为 7.19% ~ 34.64%，平均值为 $16.07\% \pm 10.72\%$ ， $2000 \sim 250 \mu\text{m}$ 粒级的黑碳与有机碳含量比例为 5.60% ~ 28.16%，平均值为 $13.39\% \pm 8.62\%$ 。全土的黑碳与有机碳含量比例为 7.61% ~ 28.85%，平均值为 $14.83\% \pm 8.04\%$ 。

4 结论与讨论

(1) 目前,对不同粒级土壤的肥力效应已有较多研究,并有不少研究表明土壤有机碳含量与土壤粘粉粒比例之间呈显著的正相关^[18-20]。李恋卿等^[21]对不同粒级土壤团聚体中有机碳含量进行研究,表明有机碳存储主要分布于 $2000 \sim 250 \mu\text{m}$ 粒级中。徐江兵等^[22]的研究也发现尽管 $>2000 \mu\text{m}$ 与 $2000 \sim 250 \mu\text{m}$ 大团聚体中有机碳含量差异不显著,但均显著高于 $250 \sim 53 \mu\text{m}$ 微团聚体有机碳含量。Six 等^[23]的研究认为较高层次的大团聚体是较低层次的团聚体加有机物等胶结而形成的,所以有机碳含量随着团聚体粒径的增大而增大,因此大团聚体比小团聚

体含有更多的新成有机物。Puget 等^[24]也认为大团聚体是由较新的有机物胶结较小的团聚体形成的,有机碳含量高于微团聚体。本研究与上述结论一致,即武夷山土壤有机碳主要存在于较大的 $2000 \sim 250 \mu\text{m}$ 粒级土壤中。

(2) 黑碳作为土壤中缓慢碳库的重要组成部分^[25-26],不仅是构筑土壤可持续利用的前提^[27],而且是大气中 CO_2 的重要碳汇,也可能是全球碳循环中“迷失碳”的重要组成部分^[28-29],其对环境的影响近年来已受到国内外研究者的关注。但目前国内外有关黑碳在土壤不同粒级中的分配规律研究报道还不多见。如 Brodowski^[30]的研究发现 $<53 \mu\text{m}$ 粒级土壤团聚体中黑碳浓度最高,并认为黑碳比其他土壤有机碳组分更容易嵌入土壤微团聚体中从而保护土壤有机质不被分解。本研究也证实了这一点,即 $<50 \mu\text{m}$ 粒级土壤黑碳浓度最高,但由于该粒级占全土的质量分数最小,从而导致该粒级黑碳含量最低,而 $2000 \sim 250 \mu\text{m}$ 粒级土壤中黑碳含量则最高(表 3)。

(3) 当前,对于黑碳的概念仍然没有十分确切的定义^[27,31],而黑碳和有机碳的分离又没有明显的界

限,使用不同的处理方法其区分界线也不同^[26],这也使黑碳与有机碳之间的关系成为研究的热点。研究表明,土壤中黑碳占有有机碳的比例为5%~45%^[13,32]。但是由于目前国际上土壤黑碳的分离和测定方法尚未统一,统一样品采用不同方法获取的数值可能相差数倍^[13,29]。因此,导致不同研究者的数据很难比较。为便于讨论,本文仅对与本研究选用相同的分离和测定方法获取的数据进行比较。Rumpel^[17]等研究不同利用方式对土壤黑碳含量的影响,发现黑碳与有机碳的比例在10%~15%范围内。尹云锋^[33]等研究皆伐火烧对杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)人工林土壤有机碳和黑碳的影响,发现黑碳与有机碳的比例为6%~13%。张履勤等^[34]研究土地利用方式对红壤和黄壤黑碳的影响,结果表明黑碳与有机碳的比例在8%~26%。在本研究中,武夷山土壤黑碳占有有机碳的比例为6%~35%,这与上述的研究结果吻合。另外,本研究也发现不同粒级的土壤有机碳与其黑碳含量呈现了显著的线性或对数关系,表明土壤有机碳固定过程中黑碳可能扮演着重要的作用,但有关的固定机制还不清楚,其原因还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil [J]. *Nature*, 1990, 48: 232-234
- [2] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, *et al.* The global carbon cycle [J]. *American Scientist*, 1990, 78(4): 310-326
- [3] 方精云,沈泽昊,崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容[J]. *生物多样性*, 2004, 12(1): 10-19
- [4] 田玉强,欧阳华,宋明华,等. 青藏高原样带高寒生态系统土壤有机碳分布及其影响因子[J]. *浙江大学学报:农业与生命科学版*, 2007, 33(4): 443-449
- [5] 陈庆强,孙彦敏,沈承德,等. 华南亚热带山地土壤有机质更新特征定量研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(2): 196-201
- [6] 阮宏华,姜志林,高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究[J]. *生态学杂志*, 1997, 16(6): 17-21
- [7] 吴建国,张小全,徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 593-599
- [8] Quéneá K, Derennea S, Rumpel C, *et al.* Black carbon yields and types in forest and cultivated sandy soils (Landes de Gascogne, France) as determined with different methods; Influence of change in land use [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(7): 1185-1189
- [9] Zhang G L, Yang F G, Zhao Y G, *et al.* Historical change of heavy metals in urban soils of Nanjing, China during the past 20 centuries [J]. *Environmental International*, 2005, 31(6): 913-919
- [10] Koelmans A A, Jonker M T O, Cornelissen G, *et al.* Black carbon: The reverse of its dark side [J]. *Chemosphere*, 2006, 63: 365-377
- [11] Schmidt M W I. Carbon budget in the black [J]. *Nature*, 2004, 427: 305-307
- [12] Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle [J]. *Science*, 1998, 280: 1903-1904
- [13] Masiello C A. New directions in black carbon organic geochemistry [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92: 201-213
- [14] 何跃,张甘霖,杨金玲,等. 城市化过程中黑碳的土壤记录及其环境指示意义[J]. *环境科学*, 2007, 28(10): 2369-2375
- [15] 刘兆云,章明奎. 林地土壤中黑碳的出现及分布特点[J]. *浙江林学院学报*, 2009, 26(3): 341-345
- [16] 尹云锋,杨玉盛,高人,等. 黑碳在杉木人工林土壤不同组分中的分配规律研究[J]. *土壤*, 2009, 41(4): 25-629
- [17] Rumpel C, Chaplot V, Planchon O, *et al.* Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture [J]. *Catena*, 2006, 65: 30-40
- [18] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management [J]. *Plant and Soil*, 1984, 76(1-3): 319-337
- [19] 吴庆标,王效科,张德平,等. 呼伦贝尔草原土壤粘粉粒组分对有机碳和全氮含量的影响[J]. *生态环境*, 2004, 13(4): 630-632
- [20] 赵世伟,苏静,吴金水. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 114-117
- [21] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. *土壤通报*, 2000, 31(5): 193-196
- [22] 徐江兵,李成亮,何园球,等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 675-682
- [23] Six J, Paustain K, Elliot E T, *et al.* Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681-689
- [24] Puget P, Chen C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595-605
- [25] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-793
- [26] 韩永明,曹军骥. 环境中的黑碳及其全球生物地球化学循环[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(1): 125-132
- [27] 张旭东,梁超,诸葛玉平,等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用[J]. *土壤通报*, 2003, 34(4): 349-355
- [28] Masiello C A, Drufel E R M. Black carbon in deep-sea sediments [J]. *Science*, 1998, 280: 1911-1913
- [29] Dai X, Boutton T W, Glaser B, *et al.* Black carbon in a temperate mixed-grass savanna [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1879-1881
- [30] Brodowski S, John B, Flessa H, *et al.* Aggregate-occluded black carbon in soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57: 539-546
- [31] Goldberg E D. *Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution* [M]. John Wiley, New York, 1985
- [32] Skjemstad J O, Reicosky D C, Megowan J A. Charcoal carbon in U.S. agricultural soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1249-1255
- [33] 尹云锋,杨玉盛,高人,等. 皆伐火烧对杉木人工林土壤有机碳和黑碳的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 352-355
- [34] 张履勤,章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 662-665