

黑碳在杉木人工林土壤不同组分中的分配规律研究^①

尹云锋, 杨玉盛*, 高人, 郭剑芬, 马红亮, 邱敬, 李又芳

(湿润亚热带生态地理过程省部共建教育部重点实验室, 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 黑碳(BC)是土壤惰性C库的重要组成部分,在土壤C循环中占有重要地位。本文利用相对密度分组方法研究BC在杉木人工林土壤不同组分中的分配规律。结果表明:杉木人工林土壤轻组分中黑碳(LFBC)含量为0.05~0.64 g/kg,而重组分中黑碳(HFBC)含量为0.23~1.09 g/kg。LFBC/BC的比例为12.9%~37.5%,HFBC/BC的比例为62.5%~87.1%,表明BC主要存在重组分中。但是,LFBC含量占轻组有机碳(LFOC)含量的比例(LFBC/LFOC)为4.0%~27.9%,而HFBC含量占重组有机碳(HFOC)含量的比例(HFBC/HFOC)仅为6.5%~8.9%,前者比例大多高于后者,说明轻组分中不仅存在BC,而且BC占该组分C库的比例较高。

关键词: 相对密度分组;黑碳;杉木人工林;轻组;重组

中图分类号: S153; S154

森林土壤C库占全球土壤C库的73%,在全球土壤C循环中占有重要地位^[1]。目前,我国森林面积为1.75亿hm²,居世界第5位,其中人工林面积已达0.53亿hm²,居世界首位,特别是杉木人工林,栽培面积已达0.12亿hm²^[2]。人工林不仅提供了大量的商品用材,而且在维护区域生态环境方面发挥着重要的作用^[3]。由于人工林受人为活动干扰剧烈,对区域和全球的C循环具有重要影响。我国南方在人工林经营过程中往往采用火烧处理^[4-5],而火烧不仅向大气中排放了大量的CO₂,同时也产生了一部分极为稳定的黑碳(Black Carbon, BC)。已有研究表明,BC/SOC的比例为5%~45%^[6-7]。目前,国内外对大气气溶胶、海洋沉积物和雪冰中的BC已有大量研究^[8-11],但对土壤中的BC研究则相对较少,特别是BC在土壤不同组分中的分配规律研究还鲜见报道。本研究旨在探讨BC在人工林土壤不同组分中的分配规律,为深入开展土壤BC的稳定性研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于全国杉木中心产区福建省南平市王台镇溪后村安曹下(26°28' N, 117°57' E),属武夷山系

南伸支脉,平均海拔200 m左右。该区年平均降水量1669 mm,年蒸发量1413 mm,年平均气温为19.3℃,属中亚热带湿润季风气候区。试验地土壤均为燕山晚期白云母岩中细粒花岗岩发育的红壤,质地为砾质轻壤土。本文选择4种林分土壤进行研究,即老龄杉木丰产林、采伐迹地、1代杉木林和2代杉木林。老龄杉木丰产林的前茬为天然阔叶林,1918年10月进行砍树、劈草和炼山,翌年立春后插杉,调查时为88年生,林分密度750株/hm²,除了中幼龄时进行过常规抚育管理和间伐措施外,历史上未受到大的自然或人为干扰,是世界上现存杉木人工林中年龄和单位面积蓄积量最大的林分之一。采伐迹地与老龄杉木丰产林毗邻,在2006年1月部分老龄杉木丰产林被皆伐和火烧,面积约0.5 hm²左右。1代杉木林与老龄杉木丰产林毗邻,1966年在杂木林采伐迹地上用一年生实生杉木苗营造,调查时林龄为41年,植株密度1316株/hm²;2代杉木林与1代杉木林毗邻,于1967年在一代杉木林采伐迹地上用实生杉木苗营造,同时不规则保留某些生长健壮的一代树桩萌芽条,组成实生和萌芽共有的林分,调查时林龄为40年,植株密度1312株/hm²。

1.2 样品采集

^①基金项目:国家自然科学基金项目(40801087)、中国博士后科学基金项目(20060400735)、福建省自然科学基金项目(2007J0348)和福建省青年科技人才创新项目(2006F3036)资助。

* 通讯作者(geoyys@fjnu.edu.cn)

作者简介:尹云锋(1975—),男,黑龙江人,博士,副教授,主要从事土壤碳循环研究。E-mail: yunfengyin@163.com

2006 年 7 月在 4 种林分中各选择 3 块典型标准样地, 面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$, 在每一样地内按 S 形布设 5 个点, 按 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 分层取样, 相同层次混合, 去除石砾和根系, 自然风干后过 2 mm 和 0.25 mm 备用。

1.3 样品分析

土壤重组的分离方法参照文献[12], 重液为 NaI 溶液, 相对密度为 1.80 g/cm^3 。全土和重组中的 BC 分离和测定方法参照文献[13-14], 具体步骤如下: ①称取过 0.25 mm 筛的烘干土样 5.0000 g 加入 25 ml HF (10%) 于 100 ml 塑料离心管中, 置于振荡机上振荡 2 h; ②3000 r/min 离心后去除上清液, 再加入 25 ml HF (10%), 继续置于振荡机上振荡 2 h, 这一过程重复 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, 再加入 50 ml 蒸馏水, 将离心管置于漩涡混合仪上搅拌 1 min, 这一过程重复 5 次; ④第 5 次水洗后, 离心, 弃除上清液, 将离心管置于 60°C 恒温烘箱中烘 48 h, 称重; ⑤称取过 0.25 mm 筛 HF 处理的烘干土样 0.1500 g 于 100 ml 塑料离心管中, 加入 15 ml 0.1 mol/L $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$: 2 mol/L H_2SO_4 溶液, 在超声波分散器中分散 30 min 后放入水浴锅中 $55^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 反应 12 h, 再置于超声分散器中分散 30 min, 继续放入水浴锅中反

应 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, 继续加入 50 ml 蒸馏水, 再将离心管置于漩涡混合仪上搅拌 1 min, 这一过程重复 5 次。第 5 次水洗后, 离心, 弃除上清液, 将离心管置于 60°C 恒温烘箱中烘 48 h, 称重, 离心管中剩余物即为 BC 样品。

土壤有机碳 (SOC)、重组有机碳 (HFOC)、全土黑碳 (BC) 和重组分中黑碳 (HFBC) 含量用元素分析仪 (vario macro CHN, Elementar) 测定, 而轻组有机碳 (LFOC) 含量和轻组分中黑碳 (LFBC) 含量由全土的减去重组分的, 单位均换算成 g/kg 土。

2 结果与分析

2.1 杉木人工林土壤中 LFOC 和 HFOC 含量

由表 1 可见, 在杉木人工林土壤中 LFOC 和 HFOC 平均含量均随土壤剖面深度的下降而呈降低的变化趋势, LFOC 含量范围为 0.26 ~ 2.98 g/kg, 而 HFOC 含量范围为 2.94 ~ 13.17 g/kg。方差分析表明, LFOC 和 HFOC 差异主要在 0~20 和 20~40 cm 土层, 而 40 cm 以下土层的差异并不显著。FOC/SOC 的比例为 8.4% ~ 19.3%, 而 HFOC/SOC 的比例为 80.7% ~ 91.6%, 表明 SOC 主要存在重组分中。

表 1 土壤中 LFOC 和 HFOC 的含量 (g/kg)

Table 1 LFOC and HFOC contents in soils of Chinese fir plantation

土层深度 (cm)	LFOC		LFOC/SOC (%)	HFOC		HFOC/SOC (%)
	范围	平均值		范围	平均值	
0~20	1.18~5.01	2.98 ± 1.04 a	18.5	9.74~16.20	13.17 ± 2.33 a	81.5
20~40	0.73~2.25	1.46 ± 0.50 b	19.3	3.09~8.52	6.09 ± 1.61 b	80.7
40~60	0.05~1.14	0.54 ± 0.34 c	11.9	2.93~5.66	4.07 ± 0.90 c	88.1
60~80	0.07~0.45	0.32 ± 0.20 c	8.4	1.90~4.93	3.16 ± 0.80 c	91.6
80~100	0.05~0.55	0.26 ± 0.15 c	8.8	2.12~4.27	2.94 ± 0.81 c	91.2

注: 同一列中不同字母代表差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

2.2 杉木人工林土壤中 LFBC 和 HFBC 含量

由表 2 可知, LFBC 含量随剖面深度的变化规律并不明显, 但 HFBC 含量则随剖面深度的增加而呈下降趋势。LFBC 和 HFBC 含量主要集中在 0~20 cm 土层。整个剖面内 LFBC 含量为 0.05 ~ 0.64 g/kg, 而 HFBC 含量为 0.23 ~ 1.09 g/kg。LFBC/BC 的比例为 12.9% ~ 37.5%, HFBC/BC 的比例为 62.5% ~ 87.1%, 说明 BC 主要存在重组分中。在杉木人工林土壤中,

BC/SOC 的比例为 6.0% ~ 10.9%, LFBC/LFOC 的比例为 4.0% ~ 27.9%, 而 HFBC/HFOC 的比例为 6.5% ~ 8.9%, 这说明轻组分中不仅存在 BC, 而且其比例较高 (表 3)。

3 讨论

相对密度分组方法是采用一定相对密度的溶液将土壤中较低相对密度的游离有机物质与较高相对密度

表2 土壤中 LFBC 和 HFBC 的含量 (g/kg)

Table 2 LFBC and HFBC contents in soils of Chinese fir plantation

土层深度 (cm)	LFBC		LFBC/BC (%)	HFBC		HFBC/BC (%)
	范围	平均值		范围	平均值	
0~20	0.46~0.85	0.64±0.12 a	37.5	0.73~1.42	1.09±0.24 a	62.5
20~40	0.01~0.11	0.05±0.03 b	12.9	0.31~0.47	0.38±0.05 b	87.1
40~60	0.01~0.08	0.05±0.03 b	15.3	0.25~0.39	0.32±0.05 bc	84.7
60~80	0.01~0.15	0.05±0.04 b	15.6	0.21~0.36	0.28±0.05 bc	84.4
80~100	0.02~0.12	0.07±0.04 b	22.5	0.15~0.28	0.23±0.04 c	77.5

表3 土壤中的 LFBC/LFOC 和 HFBC/HFOC

Table 3 LFBC/LFOC and HFBC/HFOC ratio
in soils of Chinese fir plantation

土层深度 (cm)	BC/SOC (%)	LFBC/LFOC (%)	HFBC/HFOC (%)
0~20	10.9	23.3	8.3
20~40	6.0	4.0	6.5
40~60	8.0	15.8	7.6
60~80	9.6	18.5	8.9
80~100	9.4	27.9	8.0

的有机无机复合体分离开来,游离的有机物质常称为轻组,而相对密度较高的有机无机复合体则称为重组^[15]。目前在SOC组分研究中这一方法已被广泛应用。尽管轻组部分仅占土壤质量的0.03%~8.2%,但它的含C量则是SOC的1%~85%^[16]。由于LFOC转化时间短,一般只有几周几十年,所以被认为是土壤中易分解的C库^[17],它对种植制度、耕作方式、施肥措施和土地利用以及气候变化的响应要比SOC敏感,是反映SOC库和土壤质量变化的敏感指标^[18-19]。而HFOC是指存在有机无机复合体中的有机C,一般占SOC的50%以上,同LFOC相比,该组分C周转较慢,对土壤肥力的保持和土壤C的固持具有重要意义^[12,18]。在本研究中,LFOC/SOC的比例为8.4%~19.3%,HFOC/SOC的比例为80.7%~91.6%,这与多数研究者的结论一致^[16-19]。

BC是生物质或化石燃料不完全燃烧的含C物质的连续统一体,是土壤中缓慢C库的重要组成部分^[20-22]。据估算,每年由生物质燃烧所形成的BC约0.05~0.20 Pg进入到土壤中^[10]。土壤BC是大气中CO₂的重要C汇,也可能是全球C收支中“missing carbon”的重要组成部分^[23]。目前,国内外的研究多集中在火烧频率^[24]、火烧强度^[25-26]、利用方式^[27-28]和施肥^[29]等因素对BC的影响方面,研究内容也涵盖了

森林^[24-26]、草地^[7,25]、农田^[6,29]、海洋^[11,23]和城市^[13]生态系统。研究表明,土壤中BC/SOC的比例为5%~45%^[6-7]。Rumpel等^[27]研究不同利用方式对土壤BC含量的影响,发现BC/SOC的比例在10%~15%范围内。何跃和张甘霖^[13]研究了南京城市土壤BC的来源及特征,发现BC/SOC比例为16%~46%。张履勤和章明奎^[28]研究土地利用方式对红壤和黄壤BC的影响,结果表明BC/SOC的比例为8%~26%。本研究结果与之吻合,即杉木人工林土壤BC/SOC的比例为6%~11%。目前,BC在土壤不同组分中的分配规律的研究报道尚不多见。本研究结果表明,BC主要存在重组分中,其比例在62.5%~87.1%范围内。Glaser等^[30]利用苯多环羟酸(BPCAs)方法研究了亚马逊河流域Terra Preta soils中BC在不同密度组分中的分配规律,结果发现LFBC含量介于0.1~2.1 g/kg之间(<2.0 g/cm³),且BC大多存在轻组分中。Brodowski等^[29]也采用苯多环羟酸方法研究了德国农田土壤BC对土壤腐殖质的贡献,结果表明BC主要存在轻组分中(<2.0 g/cm³)。这与本研究的结论有所不同,其原因主要在于采用的BC测定方法和选用重液的相对密度不同所致。本研究采用的是热化学氧化法,而Glaser等^[30]和Brodowski等^[29]采用的是分子标记法。目前国际上土壤BC的分离和测定方法尚未统一,对于同一样品采用不同方法获取的数值可能相差数十倍^[7,11],致使不同研究者的数据难以比较。另外,本研究中轻组和重组的界限划分采用重液的相对密度为1.8 g/cm³,即<1.8 g/cm³的组分为轻组,>1.8 g/cm³的组分为重组,而Glaser等^[30]和Brodowski等^[29]采用重液的相对密度为2.0 g/cm³和2.4 g/cm³,<2.0 g/cm³的组分为轻组,>2.4 g/cm³的组分为重组,而2.0~2.4 g/cm³为中间过渡组分。至今国际上在选择多大的相对密度来界定轻组和重组还没有明确的规定,选用不同相对密度的重液,获取的结果相差很大^[16]。

BC具有高度的耐分解特性,尽管目前对BC的

稳定性研究已有报道,但研究结论依然存在争议。Shindo^[31]在火山灰土中添加焦化的植物材料并进行 280 天培养,发现焦化的植物并没有降解的迹象。而 Hofrichter 等^[32]发现可以分解树干的真菌能够分解低级煤类物质,表明特殊的微生物可以将 BC 作为唯一 C 源。Hamer 等^[33]分别在橡树树干和玉米秸秆焚烧后的残留物中加入 ¹⁴C 标记葡萄糖,同时加入营养液并接种微生物,在 20℃ 下培养 60 天,结果表明,未添加葡萄糖的橡树树干焚烧产生的 BC 物质矿化了 0.26%,玉米秸秆焚烧产生的 BC 物质矿化了 0.78%,并且葡萄糖的加入促进了两类 BC 的分解。目前本研究仅对 BC 在杉木人工林土壤不同组分中的分配规律进行初步探讨,今后则是采用核磁共振和同位素技术对土壤 BC 的稳定性进行深入研究。

参考文献:

- [1] Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185-190
- [2] 方晰, 田大伦, 项文化, 闫文德, 康文星. 杉木人工林林地土壤 CO₂ 释放量及其影响因子的研究. *林业科学*, 2005, 41 (2): 1-7
- [3] 薛立, 向文静, 何跃君, 李燕, 吴敏, 徐燕, 屈明. 不同林地清理方式对杉木林土壤肥力的影响. *应用生态学报*, 2005, 16 (8): 1417-1421
- [4] Yang YS, Guo JF, Chen GS, Xie JS, Gao R, Li Z, Jin Z. Carbon and nitrogen pools in Chinese fir and evergreen broadleaved forests and changes associated with felling and burning in mid-subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 216: 216-226
- [5] Guo JF, Yang YS, Cheng GS, Xie JS, Lin P. Soil C and N pools in Chinese fir and evergreen broadleaf forests and their changes with slash burning in mid-subtropical China. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 56-63
- [6] Skjemstad JO, Reicosky DC, Wilts AR, McGowan JA. Charcoal carbon in U.S. agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1249-1255
- [7] Dai X, Boutton TW, Glaser B, Ansley RJ, Zech W. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1879-1881
- [8] Koelmans AA, Jonker MTO, Cornelissen G, Bucheli TD, Van Noort PCM, Gustafsson Ö. Black carbon: The reverse of its dark side. *Chemosphere*, 2006, 63: 365-377
- [9] Schmidt MWI. Carbon budget in the black. *Nature*, 2004, 427: 305-307
- [10] Kuhlbusch TAJ. Black carbon and the carbon cycle. *Science*, 1998, 280: 1903-1904
- [11] Masiello CA. New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 2004, 92: 201-213
- [12] Yin YF, Cai ZC. Equilibrium of organic matter in heavy fraction for three long-term experimental field soils in China. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 177-184
- [13] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析. *土壤学报*, 2006, 43(2): 177-182
- [14] Rumpel C, Chaplot V, Planchon O, Bernadou J, Valentin C, Mariotti A. Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture. *Catena*, 2006, 65: 30-40
- [15] Whalen JK, Bottomley PJ, Myrold DD. Carbon and nitrogen mineralization from light and heavy fraction additions to soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1345-1352
- [16] Christensen BT. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advance in Soil Science*, 1992, 20: 2-90
- [17] Janzen HH, Campbell CA, Brandt SA, Lafond GP, Townley-Smith L. Light fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1799-1806
- [18] Swanston CW, Caldwell BA, Homann PS, Ganio L, Sollins P. Carbon dynamics during a long-term incubation of separate and recombined density fractions from seven forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1121-1130
- [19] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 陈光水, 李旭. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响. *地理学报*, 2007, 62(11): 1123-1131
- [20] 张旭东, 梁超, 诸葛玉平, 姜勇, 解宏图, 何红波, 王晶. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用. *土壤通报*, 2003, 34(4): 349-355
- [21] 韩永明, 曹军骥. 环境中的黑碳及其全球生物地球化学循环. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(1): 125-132
- [22] Schmidt MWI, Noack AG. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-793
- [23] Masiello CA, Druffel ERM. Black carbon in deep-sea sediments. *Science*, 1998, 280: 1911-1913
- [24] Czimczik CI, Schmidt MWI, Schulze ED. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56: 417-428

- [25] Ansley RJ, Boutton TW, Skjemstad JO. Soil organic carbon and black carbon storage and dynamics under different fire regimes in temperate mixed-grass savanna. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20 (3): 1-11
- [26] Eckmeier E, Gerlach R, Skjemstad JO, Ehrmann O, Schmidt MWI. Minor changes in soil organic carbon and charcoal concentrations detected in a temperate deciduous forest a year after an experimental slash-and-burn. *Biogeosciences*, 2007, 4: 377-383
- [27] Rumpel C, Alexis M, Chabbi A, Chaplot V, Rasse DP, Valentin C, Mariotti A. Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture. *Geoderma*, 2006, 130: 35-46
- [28] 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. *土壤通报*, 2006, 37(4): 662-665
- [29] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, Zech W. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. *Geoderma*, 2007, 139: 220-228
- [30] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 669-678
- [31] Shindo H. Elementary composition, humus composition, and decomposition in soil of charred grassland plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37: 651-657
- [32] Hofrichter M, Ziegenhagen D, Sorge S, Ullrich R, Bublitz F, Fritsche W. Degradation of lignite (low-rank coal) by ligninolytic basidiomycetes and their manganese peroxidase system. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1999, 52: 78-84
- [33] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, Amelung W. Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation. *Organic Geochemistry*, 2004, 35: 823-830

Distribution of Black Carbon from Soil Different Fractions in Chinese Fir Plantation

YIN Yun-feng, YANG Yu-sheng, GAO Ren, GUO Jian-fen, MA Hong-liang, QIU Jing, LI You-fang

(Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process of the Ministry of Education,

College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Black carbon (BC), an important component in the inert carbon pool of soils, represents an appreciable sink of carbon in the global carbon cycle. The objective of this study was to investigate the distribution of BC from soil fractions in Chinese fir plantation. The results indicated that the contents of BC in light fraction (LFBC) and heavy fraction (HFBC) ranged from 0.05 to 0.64 g/kg and 0.23 to 1.09 g/kg respectively. The proportion of LFBC to BC varied from 12.9% to 37.5%, whereas that of HFBC to BC ranged between 62.5% and 87.1%, which indicated that the BC was mainly present in the heavy fraction. However, the LFBC/LFOC and HFBC/HFOC ratios were 4.0% ~ 27.9% and 6.5% ~ 8.9% respectively, which indicated that BC was an important constituent of C pool in light fraction.

Key words: Density fractionation, Black carbon, Chinese fir plantation, Light fraction, Heavy fraction