

林地土壤中黑碳的出现及分布特点

刘兆云, 章明奎

(浙江大学 环境与资源学院 浙江省亚热带土壤与植物营养重点研究实验室, 浙江 杭州 310029)

摘要: 黑碳是生物质不完全燃烧残留于自然界的碳形态, 是土壤中高度稳定的有机碳, 对土壤碳库形成具有重要贡献。为了解森林土壤中黑碳的分布特点, 以浙江省为例, 采样分析了亚热带林地土壤中黑碳的数量、对土壤碳库的贡献及其在土壤剖面中的分布特征。结果表明, 林地土壤中普遍存在黑碳, 枯枝落叶层、表土层(0~10 cm)和亚表层(10~20 cm)黑碳质量分数分别为 0.27~67.63, 0.83~22.42 和 0.27~8.72 g·kg⁻¹, 分别占有机碳总量的 0.12%~13.14%, 1.87%~21.40% 和 3.31%~27.13%。火灾发生对林地表层土壤黑碳数量有较大的影响, 近期(40 a 内)发生过火灾的样区枯枝落叶层和表土层黑碳质量分数明显高于近期没有发生过火灾的土壤($P<0.05$)。因此, 表层土壤中黑碳数量在一定程度上可反映林地火灾发生的情况。黑碳在地表可发生侧向迁移, 但垂直迁移相对较小, 土壤中黑碳的积累量在山坡坡脚区域明显高于坡顶和上坡。残积母质发育的土壤中, 黑碳主要集中在表层土壤; 但坡积母质发育的土壤中, 剖面中下部也有较多的黑碳积累。土壤中黑碳颗粒大小呈随剖面深度增加而减小的趋势。表 5 参 14

关键词: 土壤学; 林地土壤; 黑碳; 积累; 亚热带

中图分类号: S714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2009)03-0341-05

Black carbon occurrence and distribution in forest soils in Zhejiang Province, China

LIU Zhao-yun, ZHANG Ming-kui

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, Zhejiang, China)

Abstract: To characterize soil black carbon storage and distribution in Zhejiang Province, China, litter, surface soil(0-10 cm), and subsurface soil(10-20 cm) samples were collected from forest soils at 60 sites with or without wildfire histories. Results showed that mean content of black carbon in litter, surface soils and subsurface soils were 3.96, 6.91, and 3.39 g·kg⁻¹, in that order, accounting for 0.96%, 8.07%, and 11.82% of the soil total organic carbon, respectively. From 40 sites experiencing fire events within the last 40 years, black carbon in the litter and 0-10 cm soils was significantly higher than soils without a record of fire ($P<0.05$), whereas in the 10-20 cm soils fire events had no major impact on black carbon content ($P<0.05$). On slopes, accumulation of black carbon was generally higher on the lower part compared to the top and upper part. In soil developed from residual deposits, proportion of black carbon in total organic carbon was greater in the 0-10 cm layer and decreased significantly with increasing profile depth ($P<0.05$). However, in soil developed from slope deposits, high black carbon levels were noted in 30-80 cm, and the proportion of black carbon in total organic carbon increased significantly with increasing depths ($P<0.05$). Content of black carbon in clay fractions was higher than that of non-clay fractions, and size of soil black carbon particles became smaller with increasing depth. [Ch, 5 tab. 14 ref.]

收稿日期: 2008-09-22; 修回日期: 2008-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40771090); 浙江大学曹光彪高科技发展基金资助项目(2008RC007)

作者简介: 刘兆云, 博士研究生, 从事土壤学研究。E-mail: liuzhaoyun87313@163.com。通信作者: 章明奎, 教授, 博士, 从事土壤与环境等研究。E-mail: mkzhang@zju.edu.cn

Key words: pedology; forest soil; black carbon; accumulation; subtropics

黑碳是化石燃料或生物有机体不完全燃烧形成的一种含有芳香环的高聚物,广泛存在于大气、土壤、沉积物、岩石和水体中^[1-3],其含碳高于一般的有机物,因颜色呈黑色,故称黑碳。由于黑碳的高度芳香化结构,具有较高的生物和化学稳定性,对土壤碳的积累有重要贡献。近年来的一些研究初步表明,土壤中黑碳占土壤有机碳相当高的比例,高的可占土壤有机碳的60%,被认为是陆地碳库的重要组成部分^[3-5]。另外,因黑碳具有较高的比表面积和羧基、羟基、酚羟基等多种功能团,它具有较强的吸附能力和保肥功能,能吸持环境中的污染物质,对保持土壤肥力有重要作用^[6-8]。然而,有关黑碳作为土壤碳库的重要性还没有受到足够的重视,很少把黑碳作为陆地碳库的重要组分进行分析,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。目前,中国对森林土壤有机质的研究主要集中在有机总碳、腐殖酸及可溶性有机碳等方面^[9-10],对林地土壤黑碳的数量、分布及其对土壤碳库的贡献知之甚少。笔者以浙江省为例,研究了亚热带林地土壤中黑碳的积累、对土壤碳库的贡献及其在土壤剖面中的分布特点。

1 材料与方法

1.1 研究土样

选择浙江省境内典型林地(年平均气温为15.0~18.0℃,年降水量1100~1900mm),采集了表层土样和剖面土样。表层土样按采样地近40a来是否发生过火灾(通过访问当地居民获得),分为2类:一类为未发生过火灾的土壤,共43个采样点(其中15个样点的植被为阔叶林,28个样点的植被为针叶林,主要为马尾松*Pinus massoniana*,采集了枯枝落叶层样32个(其余11个样点因无枯枝落叶层样而没有采集)、表层样(0~10cm)43个和亚表层样(10~20cm)43个。另一类为近40a内有发生过火灾历史的采样点,共17个(其中6个样点的植被为阔叶林,11个样点的植被为针叶林),采集了枯枝落叶层样6个(另11个样点因无枯枝落叶物没有采集)、表层样(0~10cm)17个和亚表层样(10~20cm)17个。另在某一于2004年发生过火灾的丘陵坡地,按坡位(坡顶、上坡、中坡和坡脚)各选择了3个采样点采集枯枝落叶层样、表土样(0~10cm)和亚表层样(10~20cm)。剖面样共采集6个,其中3个为残积母质(分别为花岗岩、凝灰岩和玄武岩),另3个为花岗岩、凝灰岩和玄武岩坡积物发育的土壤,采样深度为0~10,10~20,20~30,30~40,40~50,50~60,60~70和70~80cm。

1.2 分析方法

采集的土样(包括枯枝落叶样)经室内风干后,过2.00mm土筛。然后,各取约50g样品,进一步磨细过0.15mm塑料土筛,供总有机碳和黑碳的测定。有机碳总量采用重铬酸钾外加热法测定;黑碳为用0.1mol·L⁻¹重铬酸钾+2.0mol·L⁻¹硫酸在55℃下氧化60h后残余的碳^[11],用总碳与以上可氧化的碳量差值计算。测定方法简述如下:称2份各约0.5g左右过0.15mm筛土样分别置于硬质试管中,加入0.1mol·L⁻¹重铬酸钾+2.0mol·L⁻¹硫酸混合液25.0mL,在55℃水浴中加热60h,用标准硫酸亚铁滴定法测定残余的重铬酸量,计算被氧化的有机碳量;另称2份过0.15mm筛土样用常规法测定有机碳总量,两者的差值即为黑碳质量分数。

2 结果与讨论

2.1 土壤黑碳的总量范围

供试林地土壤黑碳质量分数有较大的差异(表1),枯枝落叶层、表土层(0~10cm)和亚表层(10~20cm)黑碳质量分数分为0.27~67.63,0.83~22.42和0.27~8.72g·kg⁻¹,平均分别为3.96,6.91和3.39g·kg⁻¹,平均质量分数以0~10cm土层最高,一般是表土层(0~10cm)高于枯枝落叶层,这与Deluca等^[3]报道的一致。表中数据可知,近40a中是否发生过火灾对土壤中黑碳积累有较大的影响,发生过火灾地区枯枝落叶层和表土层黑碳质量分数明显高于近期没有发生过火灾的土壤,差异达到显著水平($P<0.05$),以枯枝落叶层尤为明显。这表明土壤黑碳作为火灾发生的遗留物可记录林地火灾的发生,

表 1 黑碳在林地土壤中的积累

Table 1 Black carbon accumulated in the forest soils

项 目	土 层	火灾区			非火灾区			全部		
		样本数	范围	平均值	样本数	范围	平均值	样本数	范围	平均值
黑碳质量分 数/(g·kg ⁻¹)	枯叶层	6	2.78 ~ 67.63	17.43**	32	0.27 ~ 3.42	1.43	38	0.27 ~ 67.63	3.96
	表土层	17	1.03 ~ 22.42	9.63*	43	0.83 ~ 12.32	5.83	60	0.83 ~ 22.42	6.91
	亚表层	17	0.27 ~ 8.72	3.27	43	0.32 ~ 7.74	3.44	60	0.27 ~ 8.72	3.39
占有有机总碳 的/%	枯叶层	6	0.63 ~ 13.14	3.59**	32	0.12 ~ 0.74	0.47	38	0.12 ~ 13.14	0.96
	表土层	17	2.28 ~ 21.44	9.63	43	1.87 ~ 17.65	7.46	60	1.87 ~ 21.44	8.07
	亚表层	17	3.31 ~ 27.13	10.31	43	4.44 ~ 22.82	12.42	60	3.31 ~ 27.13	11.82

说明：* 和 ** 分别代表火灾区与非火灾区之间差异显著。

可指示森林发生火灾的历史。但近期是否发生火灾对亚表层黑碳积累并无明显影响，这说明深层土壤黑碳积累是历史上火灾长期作用的结果，受近期火灾发生的影响相对较小。

枯枝落叶层、表土层(0 ~ 10 cm)和亚表层(10 ~ 20 cm)黑碳质量分数占有有机碳总量的比例有很大的变化，分别为 0.12% ~ 13.14%，1.87% ~ 21.40%和 3.31% ~ 27.13%，平均分别为 0.96%，8.07%和 11.82%。不同林地土壤因发生火灾历史的不同，黑碳积累可有较大的差异。其中在近 40 a 发生过火灾的枯枝落叶层中仍可保留较高比例的黑碳，其表土层(0 ~ 10 cm)黑碳比例也略高于未发生过火灾的土壤。而是否发生过火灾同样对亚表层(10 ~ 20 cm)黑碳质量分数占有有机碳总量的比例影响不大。

林分对土壤中黑碳的积累也有一定的影响(表 2)，无论是 0 ~ 10 cm 还是 10 ~ 20 cm 的土层，土壤黑碳的平均质量分数一般阔叶林高于针叶林，但两者之间没有达到显著的差异。与农业土壤相比，林地土壤黑碳的积累较高，但黑碳占有有机总碳的比例略低。

2.2 地形部位对黑碳积累的影响

表 3 为某一近期发生过火灾的丘陵坡地上按坡位(坡顶、上坡、中坡和坡脚)各选择了 3 个采样点采集枯枝落叶层样、表土样(0 ~ 10 cm)和亚表层样(10 ~ 20 cm)的黑碳分析结果。从中可知，无论是枯枝落叶层，还是表土层(0 ~ 10 cm)和亚表层(10 ~ 20 cm)，土壤中黑碳积累与地形位置有关，积累量由高至低依次为坡脚 > 中坡 > 上坡 > 坡顶。坡脚和中坡处表层土壤中积累的黑碳较多可能有两方面的原因：一是坡脚和中坡处林地生物量较大，火灾期间产生的黑碳也较多；二是上坡和坡顶处火灾形成的黑碳在雨季易发生流失或向低处迁移^[12]。田间观察也表明，发生火灾后暴雨形成的径流中常有较多的黑碳。

2.3 黑碳在土壤剖面中的垂直分布特征

表 4 为黑碳在 3 个残积母质和 3 个坡积母质发育土壤中的剖面垂直分布的结果。从中可知，在残积母质发育的土壤中，黑碳主要集中分布在表层土壤；自上而下呈明显的下降。Carcaillet^[13]和 Lynch

表 2 林分对土壤中黑碳积累的影响

Table 2 Effects of forest types on black carbon accumulated in the forest soils

土 层	火灾区黑碳/(g·kg ⁻¹)		非火灾区黑碳/(g·kg ⁻¹)	
	阔叶林	针叶林	阔叶林	针叶林
表土层	10.59	9.11	6.34	5.56
亚表层	3.53	3.13	3.66	3.32

表 3 不同坡位土壤中黑碳的差异

Table 3 Change of black carbon accumulation in the soils as a function of slope position

样 品	不同坡位黑碳质量分数/(g·kg ⁻¹)			
	坡顶	上坡	中坡	下坡
枯叶层	3.15 c	13.46 b	21.27 a	26.34 a
表土层	1.36 c	3.74 ab	6.78 b	14.63 a
亚表层	0.53 c	0.64 c	1.63 b	5.68 a

说明：同一列中英文字母相同者差异不显著，n = 3。

等^[14]的研究也表明,土壤中黑碳主要分布在0~30 cm的土层内,其中0~10 cm的土层中黑碳积累量可占整个土壤的70%以上,冻融交替、干湿交替和动物活动等可促进黑碳向下迁移。但从本研究可知,在没有受外部扰动的残积母质发育的土壤中,黑碳垂直迁移较弱,少量黑碳的垂直迁移可能与土体内优势流有关。而在坡积母质发育的土壤中,剖面中下部也有较多的黑碳积累,这显然与这些剖面发生多次堆积有关。深层土壤中积累的黑碳形成时间较早,而表层中积累的黑碳形成时间较短。

在残积母质发育的土壤中,黑碳占总有机碳的比例随剖面深度的增加而下降,而在坡积母质发育的土壤中则相反。残积母质发育土壤中黑碳占总有机碳的比例随剖面深度下降而降低也说明了黑碳沿垂直方向的迁移较弱,主要积累在表层;而坡积母质剖面较深处部分的黑碳主要是早期积累的,黑碳占有有机碳总量的相对比例有随剖面深度的增加而增加的趋势,说明了黑碳相对于其他有机组分较稳定。

表4 不同母质类型土壤剖面中黑碳垂直剖面分布的变化

Table 4 Vertical distribution of black carbon in the soil profile as affected by parent materials

深度/cm	残积母质土壤黑碳/(g·kg ⁻¹)			坡积母质土壤黑碳/(g·kg ⁻¹)		
	剖面1(花岗岩)	剖面2(凝灰岩)	剖面3(玄武岩)	剖面4(花岗岩)	剖面5(凝灰岩)	剖面6(玄武岩)
0~10	11.46(6.7)	5.64(3.4)	7.46(2.8)	9.43(7.7)	10.66(4.6)	6.38(3.6)
10~20	9.74(7.1)	2.27(5.6)	3.63(2.6)	5.46(8.6)	4.32(6.3)	2.74(5.4)
20~30	3.27(5.3)	0.78(2.7)	1.22(3.4)	3.38(8.3)	5.87(3.8)	1.63(7.1)
30~40	1.64(3.8)	0.14(3.1)	0.46(1.6)	4.16(9.4)	6.37(7.4)	3.49(5.8)
40~50	0.32(4.5)	0.22(1.6)	0.32(0.5)	2.73(7.1)	2.13(6.8)	2.27(9.4)
50~60	0.54(1.3)	0.28(0.8)	0.17(1.3)	4.53(10.6)	3.64(7.9)	0.68(7.6)
60~70	0.28(2.2)	0.21(1.3)	0.11(0.6)	3.18(17.4)	0.63(9.8)	1.13(10.8)
70~80	0.33(1.8)	0.19(0.5)	0(0)	1.67(21.3)	1.18(11.4)	0.39(9.6)

说明:括号内数据为黑碳占土壤有机碳的比例(%)。

表5为黑碳在坡积物母质发育土壤中不同颗粒级组分中的分布。结果表明,土壤中黑碳主要分布在0.020~0.002 mm和<0.002 mm中,在2.00~0.02 mm中的相对比例较低,并随剖面加深而下降,说明土壤中黑碳颗粒大小呈随剖面深度增加而减小的趋势。随着时间的增加,原先形成的黑碳逐渐变成颗粒较小的黑碳,其原因可能与物理作用有关。

3 结论

对位于亚热带地区的浙江省典型林地土壤中黑碳的研究表明,林地土壤枯枝落叶层、表土层(0~10 cm)和亚表层(10~20 cm)黑碳质量分数有

较大的变化,平均以0~10 cm土层最高。林地土壤黑碳的积累高于耕作农地。近40 a内发生过火灾的样区枯枝落叶层和表土层黑碳质量分数明显高于近期没有发生过火灾的土壤,但近期火灾是否发生对亚表层黑碳积累并无明显影响。地形位置对土壤中黑碳积累也有一定的影响,积累量在山坡坡脚

表5 黑碳在坡积物母质发育土壤中不同颗粒级组分中的分布

Table 5 Distribution of black carbon in different size particle fractions of the soils developed from slope deposit

深度/cm	黑碳在不同颗粒级中的分配/%		
	2.00~0.020	0.020~0.002	<0.002 mm
0~10	13	46	41
10~20	8	44	48
20~30	5	44	51
30~40	7	31	62
40~50	3	44	53
50~60	0	28	72
60~70	0	32	68
70~80	0	22	78

说明: n = 3。

区域明显高于坡顶和上坡。在残积母质发育的土壤中, 黑碳主要集中分布在表层土壤; 而在坡积母质发育的土壤中, 剖面中下部也有较多的黑碳积累。在坡积母质发育的土壤中, 黑碳占有机碳总量的相对比例随剖面深度的增加而增加, 土壤中黑碳颗粒大小呈随剖面深度增加而减小的趋势。

参考文献:

- [1] FORBES M S, RAISON R J, SKJEMSTAD J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems [J]. *Sci Total Environ*, 2006, **370** (1): 190 – 206.
- [2] PRESTON C M, SCHMIDT M W I. Black(pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions [J]. *Biogeosciences*, 2006, **3** (4): 397 – 420.
- [3] DELUCA T H, APLET G H. Charcoal and carbon storage in forest soils of the Rocky mountain west[J]. *Front Ecol Environ*, 2008, **6** (1): 18 – 24.
- [4] KUHLEBUSCH T A J, CRUTZEN P J. Toward a global estimate of black carbon residues of vegetation fires representing a sink of atmospheric CO₂ and a source of O₂ [J]. *Global Biogeochem Cycling*, 1995, **9** (2): 491 – 501.
- [5] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review[J]. *Mitigation Adapt Strat Global Change*, 2006, **11** (2): 403 – 427.
- [6] SANDER M, PIGNATELLO J. Characterization of charcoal adsorption sites for aromatic compounds: insights drawn from single solute and bi-solute competitive experiments [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, **39** (6): 1606 – 1615.
- [7] LIANG B, LEHMANN J, SOLOMON D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70** (5): 1719 – 1730.
- [8] DELUCA T H, MACKENZIE M D, GUNDALE M J, *et al.* Wildfire produced charcoal directly influences nitrogen cycling in forest ecosystems [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70** (2): 448 – 453.
- [9] 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响[J]. *林业科学*, 2002, **38** (6): 6 – 11.
JIANG Peikun, ZHOU Guomo, XU Qiufang. Effect of intensive cultivation of the carbon pool of soil in phyllostachy praecox stands [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38** (6): 6 – 11.
- [10] 常宗强, 冯起, 司建华, 等. 祁连山不同植被类型残体碳库贮量研究[J]. *山地学报*, 2007, **25** (6): 714 – 720.
CHANG Zongqiang, FENG Qi, SI Jianhua, *et al.* Carbon storage of plant debris under different types of vegetation in Qilian mountains [J]. *J Mt Sci*, 2007, **25** (6): 714 – 720.
- [11] AIKEN G R, MCKNIGHT D M, WERSHAW R L. *Humic Substances in Soils, Sediment and Water: Geochemistry, Isolation and Characterization*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985: 329 – 370.
- [12] CZIMCZIK C I, MASIELLO C A. Controls on black carbon storage in soils [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2007, **21** (3): 1029 – 1036.
- [13] CARCAILLET C. Are Holocene wood-charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? evidence from the Alps based on AMS¹⁴C dates [J]. *Holocene*, 2001, **11** (2): 231 – 242.
- [14] LYNCH J A, CLARK J S, STOCKS B J. Charcoal production, dispersal, and deposition from the Fort Providence experimental fire: interpreting fire regimes from charcoal records in boreal forests [J]. *Canadian J For Res*, 2004, **34** (8): 1642 – 1656.