

文章编号: 0455-2059(2015)01-0044-06

对热光反射法测量黑碳的误差校正

穆燕, 秦小光

中国科学院地质与地球物理研究所 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029

摘要: 通过对3种不同类型样品的黑碳测量, 获取热光反射法测量黑碳时的误差校正方法, 得到3点结论: 截距的产生可能和仪器有关, 但不是系统误差, 和样品特性有关, 与样品量无关; 对气溶胶样品来说, 所测碳含量与样品量有很好的线性相关关系, 截距产生的误差对结果的影响不容忽视, 采用不同样品量求结果与样品量线性相关直线斜率的方式获得黑碳是有必要的; 截距产生的误差对样品中黑碳含量的测量有影响, 但不影响其在序列上的变化趋势。

关键词: 热光反射法; 气溶胶; 黑碳; 有机碳

中图分类号: P69; P40

文献标识码: A

doi: 10.13885/j.issn.0455-2059.2015.01.007

A non-negligible bias of the thermaloptical reflectance method in carbon measurement and its correction

Mu Yan, Qin Xiao-guang

Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Three different type samples were chosen to measure the BC content by the TOR method and the conclusions were that the the intercept of regression line between the BC content and the sample mass might be relative with the instrument and the sample characteristics. Any systematic error that occurred had no nothing to do with the sample mass; for aerosol samples, there were good relationships between the BC content and the sample mass. The error caused by the intercept could not be neglected. So it was necessary to use the slope of regression line between the BC content and the sample mass as the BC content result and the intercept might influence the BC results; it did not affect the trend in the sequence.

Key words: thermal-optical reflectance (TOR) method; aerosol; black carbon; organic carbon

黑碳是生物质和化石燃料不完全燃烧的一种产物, 代表了一个从部分焦化物质到石墨和煤烟颗粒的连续统一体, 其中碳元素占一半以上, 其他主要元素为氢和氧^[1-4]。黑碳颗粒普遍存在于地球环境中: 从悬浮的大气气溶胶, 到海洋、河流、湖泊、土壤沉积物及雪冰中^[5-8]。在地球演化过程中, 其潜在的重要性得到了越来越多的认识^[9]。

Goldberg^[10]认为黑碳包括了从部分焦化的木炭屑到挥发性组分重新聚合成高度石墨化的烟炱颗粒。由气相组成的亚微米级的细小颗粒称为烟

炱; 能反映燃烧物质结构或燃烧过程性质的几十微米的较大颗粒称为焦炭(图1)。

大气气溶胶是影响气候变化的重要因素^[11-12], 黑碳气溶胶通过直接和间接两种效应作用到大气辐射强迫过程中。通过直接效应改变地—气系统辐射平衡, 并且其直接辐射强迫作用已经超过CH₄, 成为大气中导致温室效应的仅次于CO₂的第2大重要成分^[13-15]。

与温室气体CO₂相比, 亚微米的黑碳颗粒在空气中滞留时间要短的多, 大概只有几天到几周,

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172158, 40472094, 40024202); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB950200); 中国科学院战略重点研究项目(XDA05120502); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q1-03)

作者简介: 穆燕(1983-), 女, 河南许昌人, 博士研究生, e-mail: muyan@mail.iggcas.ac.cn, 研究方向为古气候与全球变化;

秦小光(1963-), 男, 贵州贵阳人, 副研究员, 博士, e-mail: xiaoguangqin@mail.iggcas.ac.cn, 研究方向为过去全球变化与碳循环及黄土粉尘空气动力学与古大气动力环境, 通信联系人。

有很大一部分颗粒沉降成为土壤和其他沉积物中的一部分^[2,16]。因此,沉积物中的黑碳颗粒也有着不同的指示意义:毫米级颗粒(木炭),搬运距离通常在火源100 m以内,能反映一定范围的火烧情况^[17],经常性的被地质学家用作恢复地质时期野火发生或者植被重建的工具^[18-19];而微米级颗粒(烟炱),在没有被氧化和水洗的情况下,几个月后仍然滞留在大气中^[17],反映的是大气状况^[20],有研究者用它来示踪化石燃料使用历史或者历史时期的能量结构^[19,21]。

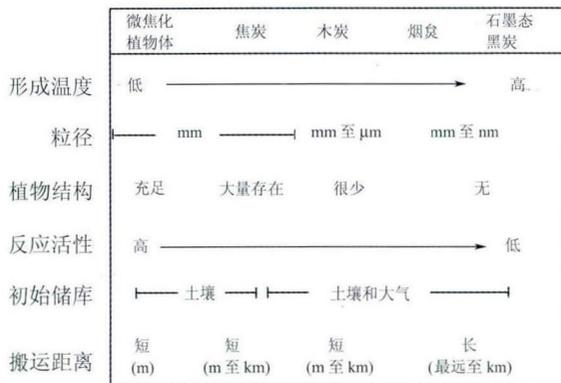


图1 黑碳各组分的理化性质

Figure 1 The black carbon combustion continuum

黑碳颗粒藉由风力和流水作用,搬运到土壤、湖泊和海洋等环境中。它的分布主要依赖于黑碳的产出量及随后沉积、保留至地质环境中^[5,22-26],是源区植被、气候及风力作用的综合产物,也为研究大陆气候提供了重要的前景依据^[27]。

越来越多的研究表明,黑碳对全球碳库的贡献使其在全球碳氧的生物地球化学循环中发挥着重要作用^[28]。由于植被及其他木质燃料的燃烧过程使地球上的碳从相对快速的生物-大气碳循环向长周期的地质碳循环转化,所以黑碳是大气 CO_2 碳汇的重要组成部分^[29-33];由于其化学和微生物惰性,土壤和沉积物中黑碳的更新周期很长,其保留时间可达数百万年,这一性质对地球碳循环产生了巨大的影响,可能是全球碳库中“丢失的碳”的重要组成部分^[19,29,32]。

目前,黑碳测量方法的研究已经取得显著的成果,包括光学法^[7,32,34]、化学氧化法^[2,8-9,35-37]、热氧化法^[8-9,32,35,38-39]、显微观察法^[8,40],等等。

热光反射法根据黑碳的热稳定性高于有机碳的特点,采用分步的方式氧化有机碳(不加氧)和黑碳(加氧),进行碳定量。该方法主要用于气溶胶黑碳的测量研究^[7,34,41],Han等^[42]将该方法用于土壤和沉积物的黑碳研究,并通过将同一个样品

多次测量的方式获得仪器的测量精度。但是我们在沉积物黑碳热光反射法的测量研究中发现,仍存在一种测量误差会严重影响黑碳的测量结果,本文通过3种不同的样品(炭屑、气溶胶及标准溶液)分别对给误差进行验证并对误差进行校正。

1 样品与方法

1.1 确定3种不同样品的样品量

1) KHP (Potassium hydrogen phthalate) 标准溶液

称取一定量的苯二甲酸氢钾,用去离子水制成质量浓度为 $1.802 \text{ C}\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的溶液。用KHP溶液共测量5次,取样量分别为3, 5, 10, 15, 20 μL 。

2) 炭屑物质

该炭屑样品是由干枯树枝的不完全燃烧生成的。枯枝燃烧以后,放入玛瑙坩埚中碾磨,分别取0.2, 1.21, 2.14, 3.28 mg碾磨后的炭屑样品放入50 mL离心管中,加去离子水均匀过滤在石英滤膜上。样品膜的有效面积是 10.7 cm^2 ,样品膜上单位面积的样品量分别是18.7, 113, 200, $306.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (单位面积样品量 $(\mu\text{g}/\text{cm}^2) = \text{称取的样品量}(\text{mg}) \times 1000 / 10.7 \text{ cm}^2$)。

3) 气溶胶样品膜

本研究选用2011年采集的黑碳气溶胶样品,样品都在室内采集,无风向和人为影响。首先随机选出5个黑碳气溶胶用于方法的验证,然后将方法用于黑碳气溶胶样品序列的研究。

对黄土样品来说,所测得的碳含量与样品量的线性回归曲线不经过原点,而是存在一个明显的截距。对于气溶胶样品来说,由于空气中的气溶胶随时间的变化而不同,所以要想得到样品相同而样品量不同的气溶胶样品膜是不可能实现的。为了实现气溶胶样品相同而样品量不同,本论文采用一个气溶胶样品测3次,依次增加送入样品炉中 0.526 cm^2 小膜片的数量来实现样品量的逐步增加,也就是说,小膜片数量的增加意味着样品量的增加。

1.2 测量方法

热光反射法所用仪器为DRI模型2001热/光碳分析仪。3种不同样品的上机测量过程稍有差异。

对于KHP标准溶液,每次上机测量时,将一定体积的溶液滴在烧干净的 0.526 cm^2 的小膜片上,送入样品炉,在启动程序测量之前先将溶液吹干,然后测量;对于炭屑样品膜,在一个样品膜上取

下一个 0.526 cm^2 小膜片,送入样品炉中,测量;对于气溶胶样品,上机测量时,通过增加送入样品炉中 0.526 cm^2 小膜片的数量来实现样品量的逐步增加,具体过程如下:

1) 在一个样品膜上取下一个 0.526 cm^2 小膜片,送入样品炉中,测量。

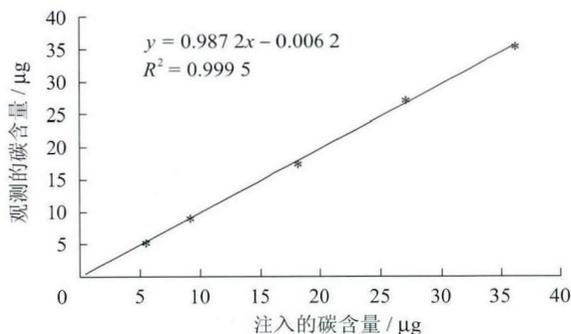
2) 同样的气溶胶样品膜,再同时取下两个相同的小样品膜片,同时放入石英舟,然后送入样品炉测量。

3) 前两次测量结束后,再在相同的样品膜上同时取下3个相同的小膜片,和2)一样,同时放入石英舟中,再送入样品炉测量。

2 结果

2.1 KHP 标准溶液的结果

KHP 的分子式为 $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$, 本研究所测得的结果为总含碳量。如图2所示,所测得的碳含量与加入的样品量有很好的线性相关关系。线性回归直线的截距接近于零,不足以给测量结果带来偏差。



横轴代表蔗糖溶液中含碳量的理论值,

纵轴代表蔗糖溶液中含碳量的测量值

图2 所测得的总碳量与实际总碳量的关系图

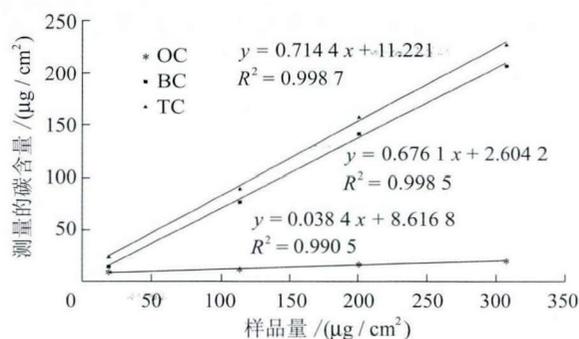
Figure 2 Relationship between the measured carbon and injected total carbon

2.2 炭屑样品的结果

如图3所示,所测得的结果与样品量有着很好的线性相关关系,其回归曲线却存在一个较大的截距,黑碳、有机碳和总碳含量的截距不同,有机碳结果的截距要远远大于黑碳结果的截距,总碳的截距为前两者截距之和。样品量越小,截距对结果的影响就越显著。

2.3 气溶胶样品的结果

在所有待分析的气溶胶样品中,随机选出5个样品,分别编号为A, B, C, D, E, 分析所得黑碳(Black carbon, BC)、有机碳(Organic carbon, OC)和总碳含量(Total carbon, TC)与样品量的关系。



横轴代表了炭屑样品的称量值,

纵轴代表了炭屑样品中OC、BC和TC的测量值

图3 所测得的总碳量与实际总碳量的关系图

Figure 3 Relationship between the measured carbon content and the sample mass

对于所有的样品来说,所测得的黑碳、有机碳和总碳与样品量之间有着很好的相关关系,如表1所示。理论上讲,其回归曲线应该经过坐标原点,也就是说截距应该为零,因为当样品量为零时,所测得结果也为零。但是,大部分结果都存在一个很大的截距。对于不同的样品,黑碳、有机碳和总碳的截距不同,且有正有负。截距的产生可能与仪器有关而不是系统误差,与样品的性质有关而与样品量无关。目前对产生截距的原因还不清楚,但截距给黑碳、有机碳测量结果带来严重的偏差是毫无疑问的。

由于回归曲线代表了所测得结果与送入样品炉的小膜片数之间的相关关系,所以斜率即为该气溶胶样品的测量结果,该结果已经排除截距带来的影响。截距与斜率的比值为由于截距的产生所带来的测量误差。对于总碳结果,由截距产生的误差为5%~21%,对于有机碳,由截距产生误差为4%~23%。截距对黑碳结果的影响,最小值约为10%,而最大值高达32%(表1)。总之,用热光反射法测量黑碳时,由截距引起的误差严重影响黑碳的测量结果,是不能忽略的。

2.4 气溶胶样品序列的结果

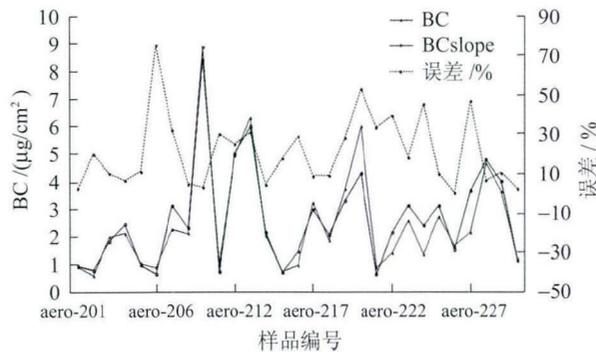
对于气溶胶样品来说,用热光反射法测量黑碳,由截距带来的误差是不可忽视的,但是该截距误差在变化趋势上的影响,还是一个未知。本研究同时选用一个月内连续采集所得30个气溶胶样品(aero-201~230)。用两种测量过程对30个样品进行测量,方法1:常规方法,在样品膜上取下 0.526 cm^2 的小膜片后,放在石英舟上送入样品炉中,所测得结果即为所求的结果;方法2:斜率方法,每一个样品膜测3次,每次送入样品炉中的小膜片数分别为1, 2, 3, 然后求出所得结果与膜片数的线性相关

关系,斜率即为排除了截距影响的该气溶胶样品的结果.

表1 所测BC, OC和TC与样品量之间的线性关系
Table 1 Relationship between the measured BC, OC and TOC and sample mass (punch number), respectively

样品	项目	方程	R ²	误差/%
A	TC	$y = 11.26x - 2.29$	0.999 8	20.3
	OC	$y = 10.05x - 2.30$	1.000 0	22.9
	BC	$y = 1.21x - 0.013$	0.994 2	1.1
B	TC	$y = 10.665x - 0.90$	0.988 1	8.4
	OC	$y = 9.43x - 0.90$	0.986 4	22.9
	BC	$y = 1.21x - 0.13$	0.997 6	1.1
C	TC	$y = 12.21x - 0.67$	1.000 0	5.5
	OC	$y = 10.46x - 0.46$	0.999 9	4.4
	BC	$y = 1.76x - 0.20$	0.999 7	11.6
D	TC	$y = 9.634x - 1.43$	0.999 5	14.8
	OC	$y = 8.8x - 1.16$	0.999 2	13.2
	BC	$y = 0.835x - 0.27$	0.999 0	32.3
E	TC	$y = 19.35x - 4.04$	0.999 0	20.9
	OC	$y = 15.69x - 2.87$	0.998 4	18.3
	BC	$y = 3.66x - 1.17$	1.000 0	32.0

对于BC结果来说(图4),两种测量计算过程所得结果的变化趋势仍然相似,和OC结果不同的是,大部分样品两种方法所得结果的变化都很大.大约有70%的样品由于截距产生的误差大于10%,而由于样品不均匀性造成的误差只有6%.总体来说,最小的误差值接近0,最大值高达80%,BC的误差要高于OC的误差.



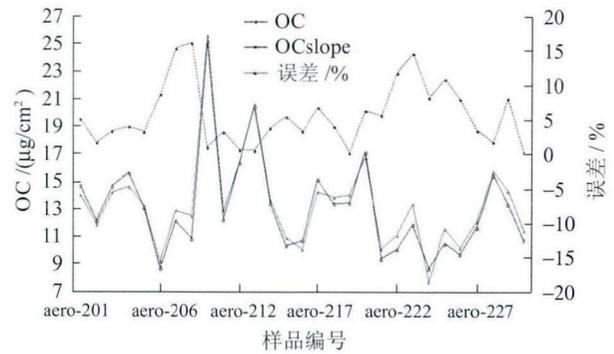
BCslope 即为一个样品测3次求斜率的方法所得BC结果,误差(%)为截距与斜率的比值,代表了截距产生的误差大小
图4 两种方法所得BC结果及截距对其的影响

Figure 4 Measured BC results and the effect of intercept on BC results by two methods

如图5所示,两种测量计算过程所得结果具有相同的变化趋势,但是具体到每一个样品,OC结果的变化还是比较明显.对于所测样品来说,误差的大小变化没有一定的规律,与所得的OC含量没有正相关或者负相关的关系,误差大小的平均值接近6%,最小值小于1%,最大值为17%.

总之,截距对于测量结果的影响比较大,尤其

对于黑碳结果来说,由截距产生的误差基本在10%~50%之间变化,但是两种方式所得结果在时间序列上的变化趋势是一致的.



OCslope 为一个样品测3次求斜率的方法所得OC结果,误差(%)为截距与斜率的比值,代表截距产生的误差

图5 两种方法所得OC结果及截距产生的误差
Figure 5 Measured OC results and the effect of intercept on BC results by two methods

3 讨论

1) 截距的产生: 首先经过稳定性检测保证仪器的运行正常. 理论上讲,对于同一个黄土样品制成的样品量不同的样品膜,所测得的碳含量与样品量应该呈线性相关,其回归曲线应该经过原点,也就是说曲线截距为零.

KHP溶液的结果也确实证明了这个理论.对于KHP样品来说,所测得碳含量与所用的样品量线性相关,其回归直线的截距也接近于零(图2),这说明仪器并不存在明显的系统误差.对于碳屑样品,结果却存在明显的截距(图3).

对于气溶胶样品,通过增加每一次送入样品炉中的小膜片数,来实现样品量的依次增加.由于所有的小膜片都来自同一个气溶胶样品膜,所以膜片的增加也意味着样品量的增加.理论上讲,每一次所测得的结果与膜片数也就是样品量线性相关,其线性回归曲线经过原点.然而,所有样品的黑碳、有机碳和总碳含量结果与样品量的线性回归曲线都不经过原点.由截距产生的误差也严重影响了所测得的碳含量结果.

如图4-5所示,对于绝大部分样品,由截距产生的误差都超过了10%,且与该样品的碳含量无关.因此,截距的产生是和仪器有关但不是系统误差,和样品特性有关,与样品量无关.

2) 对误差的校正: 目前还没有一个有效的方法来消除截距对结果的影响. 本文采用测三次求斜率的方法取得结果. 具体的步骤是: 一个气溶胶样品膜,先取下一个0.526 cm²的小膜送入样品炉

进行测量,测量结束后再在同一个样品膜上取下两个同样的小膜片,叠加送入样品炉中进行测量,然后再取下3个同样的样品膜叠加送入样品炉中,得到所测结果与小膜片数(即样品量)的线性回归曲线,其斜率即为该气溶胶样品的结果。

在序列样品的测量中,截距对黑碳结果的误差影响比有机碳要大,对于黑碳结果来说,由截距产生的误差基本在10%~50%之间变化,但是误差矫正后的结果与原结果在趋势上的变化不大。也就是说,如果要确定具体某段时间某地点气溶胶中的黑碳和有机碳含量,就有必要消除截距可能带来的影响,采用一张气溶胶样品膜,测3次,每次用不同数量小膜片进行测量,最后求斜率的方法取得结果。如果要得到样品中黑碳含量在时间序列上的变化趋势,采用一张样品膜测一次的方式,取得结果。

4 结论

从KHP标准溶液、炭屑样品及气溶胶样品所得结果来看,截距的产生可能是和仪器有关,但不是系统误差,和样品特性有关,与样品量无关;

对气溶胶样品来说,所测碳含量与样品量有很好的线性相关关系,截距产生的误差对结果的影响不容忽视,因此,采用不同样品量求结果与样品量线性相关直线斜率的方式获得黑碳的含量是有必要的;

截距产生的误差对样品中黑碳含量的测量有影响,但不影响其在序列上的变化趋势。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所新生代室的王旭副研究员和崔琳琳工程师的指导和帮助。

参考文献

[1] Goldberg E D, Hodge V, Griffin J J, et al. Impact of fossil fuel combustion on the sediments of Lake Michigan[J]. *Environmental Science and Technology*, 1981, 15(4): 466-471.

[2] 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.

[3] 秦世广, 汤洁, 温玉璞. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J]. *气象*, 2001, 27(11): 3-7.

[4] Streets G D, Gupta S, Waldhoff T S. Black carbon emissions in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(25): 4281-4296.

[5] Masiello C A, Druffel E R M. Black carbon in deep-sea sediments[J]. *Science*, 1998, 280(5371): 1911-1913.

[6] Wang X, Peng P A, Ding Z L. Black carbon records in Chinese Loess Plateau over the last two glacial cycles and implications for paleofires[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 223(1/2): 9-19.

[7] Ahmeda T, Dutkiewicz V A, Shareef A, et al. Measurement of black carbon (BC) by an optical method and a thermal-optical method: intercomparison for four sites[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(40): 6305-6311.

[8] Poot A, Quik J T K, Veld H, et al. Quantification methods of black carbon: comparison of Rock-Eval analysis with traditional methods[J]. *Journal of Chromatography*, 2009, 1216(3): 613-622.

[9] Hsieh Y P, Bugna G C. Analysis of black carbon in sediments and soils using multi-element scanning thermal analysis (MESTA)[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(11): 1562-1571.

[10] Goldberg E D. Black carbon in the environment: properties and distribution[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.

[11] 李霞, 张镭, 曹贤洁. 2008年冬季兰州气溶胶辐射特性及地表辐射特征分析[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(5): 56-62.

[12] 冯岚, 张武, 向涛. 张掖地区春季大气气溶胶的光学特性[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(1): 62-68.

[13] 张美根, 徐永福, 张仁健, 等. 东亚地区春季黑碳气溶胶源排放及其浓度分布[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 46-51.

[14] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, 409: 695-697.

[15] Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon or organic matter, possibly the effective method of slowing global warming[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D19): 16.1-16.22.

[16] 穆燕, 秦小光, 刘嘉麒, 等. 黑碳的研究历史与现状[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(1): 143-155.

[17] Ogren J A, Charlson R J. Elemental carbon in the atmosphere: cycle and lifetime[J]. *Tellus*, 1983, 35B(4): 241-254.

[18] Dai X, Boutton T W, Glaser B, et al. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1879-1881.

[19] Sun Xue-sun, Peng Ping-an, Song Jian-zhong, et al. Sedimentary record of black carbon in

- the Pearl River estuary and adjacent northern South China Sea[J]. *Geochemistry*, 2008, 23(12): 3464–3472.
- [20] Novakov T, Ramanathan V, Hansen J E, et al. Large historical changes of fossil-fuel black carbon aerosols[J]. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002, 30(6): 57.1–57.4.
- [21] Gustafsson Ö, Geschwend P M. The flux of black carbon to surface sediments on the New England continental shelf[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(3): 465–472.
- [22] Lim B, Cachier H. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous-Tertiary clays[J]. *Chemical Geology*, 1996, 131(1/4): 143–154.
- [23] Kuhlbusch T A J. Black carbon in soil, sediments, and ice cores[M]//*The Encyclopaedia of Environmental Analysis and Remediation*, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [24] Masiello C A. New directions in black carbon organic geochemistry[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/4): 201–213.
- [25] Dickens A F, Gélinas Y, Masiello C A, et al. Reburial of fossil organic carbon in marine sediments[J]. *Nature*, 2004, 427: 336–339.
- [26] Kim S K, Kaplan L A, Benner R, et al. Hydrogen deficient molecules in natural riverine water samples-evidence for existence for black carbon in DOM[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/4): 225–234.
- [27] Verardo D J, Ruddiman W F. Late Pleistocene charcoal in tropical Atlantic deep-sea sediments: climatic and geochemical significance[J]. *Geology*, 1996, 24(9): 855–857.
- [28] Gélinas Y, Prentice M K, Baldock A J, et al. An improved thermal oxidation method for the quantification of soot/graphitic black carbon in sediments and soils[J]. *Environmental Science Technology*, 2001, 35(17): 3519–3525.
- [29] Kuhlbusch T A J, Crutzen P J. Toward a global estimate of black carbon in residues of vegetation fires representing a sink of atmospheric CO₂ and a source of O₂[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 491–501.
- [30] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change[J]. *Science*, 1996, 272(5260): 392–396.
- [31] Middelburg J J, Nieuwenhuize J, Breugel van P. Black carbon in marine sediments[J]. *Marine Chemistry*, 1999, 65(3/4): 245–252.
- [32] Simpson J M, Hatcher G P. Overestimates of black carbon in soils and sediments[J]. *Die Naturwissenschaften*, 2004, 91(9): 436–440.
- [33] Hansen A D A, Rosen H, Novakov T. The aethalometer-an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles[J]. *The Science of the Total Environment*, 1984, 36(1): 191–196.
- [34] Saha A, Despiou S. Seasonal and diurnal variations of black carbon aerosols over a Mediterranean coastal zone[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 92(1): 27–41.
- [35] Schmidt W I M, Skjemstad O J, Czimeczik I C, et al. Comparative analysis of black carbon in soil[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(1): 163–167.
- [36] Rumpel C, Alexis M, Chabbi A, et al. Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture[J]. *Geoderma*, 2006, 130(1/2): 35–46.
- [37] 邱敬, 高人, 杨玉盛, 等. 土壤黑碳的研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2009, 4(1): 88–94.
- [38] Muri G, Cermelj B, Faganeli J, et al. Black carbon in Slovenian alpine lacustrine sediments[J]. *Chemosphere*, 2002, 46(8): 1225–1234.
- [39] Nguyen H T, Brown A R, Ball P W. An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel soot, wood char, and sediment[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(3): 217–234.
- [40] 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.
- [41] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, et al. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in US, air quality studies[J]. *Atmospheric Environment*, 1993, 27(8): 1185–1201.
- [42] Han Yong-ming, Cao Jun-ji, An Zhi-sheng, et al. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for quantification of elemental carbon in sediments[J]. *Chemosphere*, 2007, 69(4): 526–533.

(责任编辑: 张勇)