

湿地中黑碳的研究进展

何佳宝^{1,2}, 高传宇¹, 吕宪国¹, 王国平^{1*}

(1. 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 黑碳是生物质或化石燃料不完全燃烧产生的含碳物质。湿地, 特别是泥炭地, 是忠实记录和反映古环境信息的理想地质档案之一, 研究湿地中的黑碳, 对探讨湿地中稳定性碳的储量、长时间尺度的火活动及其与气候和植物变化的关系具有重要意义。综述了湿地中黑碳的来源及其适用的测量方法; 与其它沉积环境相比, 湿地环境中黑碳含量特征及其与有机质之间的关系; 总结了湿地中黑碳的储量及其影响因素; 分析了其与火活动、气候和植物变化的关系; 结合当前国内外研究现状, 展望了未来湿地中黑碳研究的方向。

关键词: 黑碳; 湿地; 进展

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 1672-5948(2016)01-082-07

黑碳(black carbon)是化石燃料或生物质不完全燃烧的产物^[1], 因其全球产生量和耐高温的特性^[2], 使其广泛存在于各种环境介质中, 如空气、土壤、湖泊、冰川和泥炭地等^[3-7], 并且可以稳定保存数千年。因此, 作为火活动的直接产物, 黑碳可以用于重建区域的火历史^[8,9]。近年来, 黑碳研究逐步开展。研究表明, 长时间尺度的黑碳研究可以重建历史时期的气候变化、人类活动强度和土地利用情况^[10,11]。随着人类活动的发展, 特别是工业革命以来, 经济发展和人口增加促使化石燃料等含碳物质大量使用, 造成黑碳气溶胶的排放量持续增加^[3,12], 大量的黑碳被释放到大气中, 导致其大气背景值显著增加^[13], 是仅次于二氧化碳的增温组分^[14]。与沉积物中炭屑、多环芳烃等物质的对比, 为分析黑碳来源和传播提供了依据^[5]。同时, 黑碳对海洋循环和土壤的碳储存也有重要影响^[15,16]。在中国, 有关黑碳的研究起步较晚, 且研究多集中在湖泊、黄土、森林沉积物中的黑炭, 对湿地环境中的黑碳研究工作有待更广泛、更深入的开展。本文从湿地中黑碳的来源、特点和测量方法以及其与有机质和污染物的关系、湿地中黑碳的含量和储量及其影响因素以及其与火活动、气候和植物变化的关系, 评述当前湿地沉积物中黑碳的研究进展。

1 黑碳的来源和特点

目前, 还没有明确且标准的黑碳定义。这是由于黑碳燃烧过程的复杂性, 导致燃烧产物的多样性和不确定性, 多认为黑碳是化石燃料或生物质不完全燃烧的产物, 也是有机碳库中重要的组成部分, 对估算全球碳储量至关重要^[13,17-21]。湿地环境中的黑碳可能来源于工业污染、交通污染和森林大火等^[22]。每年全球燃烧可以产生 50~270 Tg 黑碳, 其中 80% 来源于生物质燃烧^[23]。黑碳颗粒具有高度的惰性, 可以长期存在于海洋、湖泊、土壤和冰芯中^[2,6,24,25]。在大气中, 黑碳以气溶胶的形式, 可以在城市地区停留约 1 h, 而在相对未污染的上对流层, 其停留时间可达 7.85 d^[26], 并随大气传播到上百公里以外, 通过干湿沉降作用, 使其在土壤^[4]、海洋^[27]、冰川^[28]等环境介质中沉积下来。

2 黑碳的测量方法

由于黑碳定义的不明确性, 使得测量黑碳含量的方法也有多种, 所得结果往往也不同, 而且由于黑碳存在环境的不同, 其测量方法也有所侧重(表 1)。常用的测量黑碳含量的方法是化学氧化法和热化学方法。与化学氧化方法相比, 热化学

收稿日期: 2015-06-10; 修订日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271209 和 41571191)和国家重大科学研究计划项目(2012CB956103)资助。

作者简介: 何佳宝(1988-), 女, 吉林省长春人, 硕士研究生, 主要从事湿地环境研究。E-mail: hejiabao@iga.ac.cn

*通讯作者: 王国平, 研究员。E-mail: wangguoping@neigae.ac.cn

方法能够更有效地去除较低温下产生的炭屑,提高测量结果中黑炭的百分比^[10];但同时,也会破坏部分生成的黑炭(1 000 °C 以下产生)^[11],尤其对于泥炭地中的黑炭,其来源可以分为自然火和人为火,而自然火的发生温度为 800 °C 左右^[29],因此该方法不适用于测量泥炭地中的黑炭含量。而对于一般的化学氧化方法,湿地中,特别是泥炭地中,土壤有机质含量高,普通的化学氧化方法也不能很好的去除土壤中的有机质,因此,用化学氧化方法测量湿地土壤中的黑炭含量也不完全合适。使用传统的重铬酸钾氧化法分析测定三江平原泥炭土中的黑炭含量发现,干扰最终黑炭测量结果的原因是 NaOH 溶液不能将泥炭土中的有机质完全去除^[3]。因此,对原有的重铬酸钾氧化法进行了改进,在原方法的基础上增加了一次 NaOH 溶液使用,这样既可以达到去除有机质的目的,又可以保证下一步对干酪根的去,排除部分非热解生成的碳对最终黑炭含量的结果干扰,更准确地测量出泥炭土中黑炭的含量。

表 1 用 4 种测量方法得到的 3 种环境中黑炭含量与有机质含量的比值^[1]

Table 1 The ratios of contents of black carbon and organic carbon measured by 4 kinds of methods in three environmental conditions^[1]

环境	黑炭含量与有机质含量的比值(%)			
	热氧化法	重铬酸钾氧化法	热光透射/反射法	苯丙氨酸标记法
大气	3.7~14.3	16~50	16~50	3.7~14.3
水体	12.8~22.6	11.3~39.0	9.9~48.7	2.0~8.6
土壤	1.2~8.7	3.5~19.4	约 30	约 20

3 湿地中的黑炭

3.1 湿地中黑炭含量特征及其与有机质和污染物之间的关系

土壤中的黑炭含量与有机质含量之间有一定联系。对阿拉斯加黑云杉林土壤的研究结果表明,黑炭含量在表面矿化的土壤中为(0.34±0.09) kg/cm²^[30]。对斯洛文尼亚高山湖泊沉积物中的黑炭研究表明,在偏远高山湖泊,黑炭质量比最高可达 20 mg/g,而在亚高山区沉积物中黑炭的质量比则低于 5 mg/g^[24]。对新英格兰大陆架黑炭通量的研究指出,黑炭质量比为 0.11~6.60 mg/g^[31]。对于水体沉积物而言,其中的黑炭现代沉积过程受化

石燃料燃烧影响,且其含量变化趋势与这些地区的化石燃料燃烧的发展历史相关。对中国黄土高原土壤分析结果显示,以干质量为基准,土壤有机碳质量比范围为 0.31~51.81 g/kg,平均值为 6.54 g/kg^[32],并发现在中国黄土高原西、南、东和中部土壤有机质含量都大于北部,这是因为北部相较于其它地区经济发展较落后,且与沙漠相邻;利用热光透射/反射法估算出的黑炭质量比为 0.02~5.50 g/kg,粘质黄土区的土壤有机质含量高于黄土和沙黄土区。对 400 a 来中国南海西沙群岛黑炭沉积通量研究发现,3 个沉积剖面的黑炭质量比在 0.016~2.950 mg/g^[13]之间,与有机物含量和 ²¹⁰Pb 含量显著相关,该区黑炭主要来源于大气沉降;在 400 a 期间,20 世纪以前的黑炭含量较低,1900 年之后其开始增加,20 世纪 70 年代达到最大值;在近 30 a,黑炭含量在减小,可能是因为能源结构的改变和污染控制技术的发展。对三江平原泥炭土中黑炭的研究结果显示,黑炭含量变化情况与文献[13]的研究结果相似,而平均黑炭质量比为 24.3 mg/g 碳,最高可达 61.2 mg/g 碳^[3]。可以看出,湿地土壤中的黑炭含量明显高于黄土、森林和湖泊的沉积物,这可能与湿地土壤的高有机质环境有关,利于湿地中沉积物质的保存和累积。

由于黑炭比表面积大,吸附能力强,是有机质的良好载体,同时也可以吸附其它有机污染物和重金属,提高它们在湿地中的含量^[33]。如中国南海西沙群岛沉积物中的黑炭含量与有机质含量显著相关^[13]。对典型偏远高山湖泊和亚高山区的湖泊沉积物中的黑炭研究指出,相比于工业化时期,污染物的释放可能是导致 20 世纪数十年时间里黑炭含量减少的主要原因^[24]。实验发现,增加水稻田中的黑炭含量,可以提高黑炭对 Cu、Pb 和 Cd 的吸附及一些有机农药的固定,提高土壤的有机质含量,对改善土壤质量发挥重要的环境作用^[34,35]。目前,尽管对湿地环境中的黑炭研究还较少,但借鉴其它沉积环境研究的结果发现,黑炭含量与有机质含量显著正相关,增加黑炭含量可以提高其对有机质和污染物的吸附,而有机质的存在使其更易稳定,不易发生迁移作用。因此,使黑炭在湿地环境表现出了高于其它沉积环境的含量特征。

3.2 湿地中黑炭储量及其影响因素

沉积物中最老的黑炭被发现于美国宾夕法尼亚泥盆系和石炭系的交界处^[36],表明黑炭是化学

性质不活泼的物质。作为一类含碳的颗粒物,黑碳被认为是全球碳循环的重要组成部分^[17,18,37-39]。而对占地球五分之一面积的湿地中黑碳的储量进行估算,对研究全球碳循环至关重要。据估计,每年全球燃烧可以产生 50~270 Tg 黑碳,其中 80% 来源于生物质燃烧^[23]。每一次大火后,有超过 80% 的炭屑颗粒在原地沉积下来,细小的黑碳气溶胶在大气中被搬运到远离燃烧地的土壤或水体中沉积下来,在土壤或沉积物有机碳中占有一定的比例(2%~18%),而在北方森林和泥炭地中,这一比值可高达 20%~40%^[40-42]。由于黑碳的惰性,其埋藏后受到光化学反应和微生物作用很小,这意味着黑碳可以长期存在于环境中^[43],因而黑碳埋藏的固碳潜力十分巨大^[44]。生物质燃烧作为全球重要碳汇之一,按每年燃烧生物质碳的 1% 计算,在每年燃烧及植物再生条件下,100 a 后产生的黑碳量为 30.5 Gt,大气中 CO₂ 的净含量可减少 4.1%^[37,45]。一项新的研究表明,有控制地燃烧泥炭沼泽可能是捕获大气中碳的好方法,关键是只将泥炭沼泽表层植物烧掉而转化为大量的黑碳,而不烧至泥炭层(所谓“冷烧”),长期积水或地表过湿的泥炭沼泽易满足该条件。经计算机模拟,研究人员发现,如果控制火烧被应用于这个优化过程中,沼泽可以比其自然过程多吸收 20%~30% 的碳^[46]。尽管泥炭地的面积仅约占全球土地面积的 3%~4%,但它却持有 540 Gt 碳,分别占全球碳总储量的 1.5%,以及陆地植物和土壤碳储量的 25%~30%^[47]。

在土壤本身特性和外在环境因子的共同作用下^[48],土壤里积累的碳只有少部分稳定的可以保存起来^[49],这种碳被称为稳定性碳。因具有极强的芳香性而赋予其很强的抗分解能力,黑碳可在沉积物中保存千年甚至万年以上,是稳定性碳的重要组成部分,对研究土壤碳库至关重要。但是,土壤中的黑碳也并非不能减少,在复杂多变的土壤环境中,黑碳的平均留存时间尽管很长,其降解过程尽管十分缓慢,但最终一定会不可避免的发生^[50]。尽管有关湿地中黑碳降解的研究还很少,但其它水体和土壤的研究也可以为其提供一定的方向和借鉴。对阿拉斯加北方森林和冰川河流的研究指出,溶解性黑碳(DBC)含量与溶解性有机碳(DOC)含量正相关,且溶解性黑碳含量在二者中所占比例受黑碳来源的影响(森林火活动/化石燃

料燃烧)^[51]。在海洋中黑碳存在着广泛的降解作用,在 10~20 ka 间,其降解率可达 64%,该速率与颗粒粒径、化学组成、环境背景以及时间间隔有关,表明黑碳是可分解的^[52]。土壤中黑碳的储量会随温度的升高而减少,进而影响黑碳的固碳潜力^[50]。还有研究表明,黑碳不仅不会促进土壤外源有机质的分解,相反能增强它们与土壤团聚体的结合,使之更加稳定^[53]。因此,通过以上研究,并结合湿地环境中黑碳含量与有机质含量之间的关系研究,可以从影响有机碳固碳潜力的因素中得到影响湿地中黑碳固碳潜力因素的启发。

通过碳与土壤组分结合来提高耕地土壤的含碳量,在沙含量较低的森林矿化层,通过与金属 Fe、Al 以及小颗粒等组分结合,形成配合物,从而提高土壤含碳量;而在沙含量较高地区,则不利于碳的固定^[54]。研究表明,灰化会使土壤有机碳在森林矿物底层土中沉积,提高土壤固碳潜力^[55];随着温度的升高,根际的微生物-植物作用加强,系统中的溶解有机碳含量增加,易随径流排出,减少碳储量^[56]。不同温度条件下,生物质和化石燃料的生成物组成不同,形成不同组成比例的黑碳。同时,温度也对水分蒸发有直接影响。降水主要通过影响大气湿沉降影响含碳物质的输入,含碳的小颗粒物如黑碳,可在大气中存在几天到几周^[18],随降水进入地表,影响区域碳输入。同时,降水也对非封闭区域的径流输出作用有重要影响,因此,它既可以增加区域的固碳潜力也可以使之减少。高纬度地区的沼泽对气候的响应要比低纬度地区沼泽敏感,是大气中二氧化碳的重要吸收地,特别是对温度的响应,影响着全球碳循环和气候变暖^[57]。因此,温度、土壤物质组分、降水等都可能对湿地中的黑碳的固碳潜力有影响,从而影响二氧化碳含量和全球尺度上的碳循环,对全球气候变化过程至关重要。

3.3 湿地中黑碳与火活动、气候和植物变化的关系

黑碳最终将在各种地质沉积物中保存下来,是源区植被、气候及风力作用的综合产物,这也为研究地球过去的气候与环境状况提供了新的途径^[18]。湿地,特别是沼泽,作为地球表层功能独特的生态系统,与其它生态系统相比,在沼泽形成、发育、时空演化及分异等方面存在明显差异,而作为古环境的“信息库”的泥炭沼泽,研究泥炭沼泽中的黑碳沉积过程及其变化规律,对探讨几万年来气

候变化规律、古植被和古地理环境具有重要意义^[58]。

黑炭的难熔特性和它只产生于火的燃烧过程的特点,使其成为大火事件的指示物,可忠实记录植物的火烧历史。在对加拿大东部北方外围冰原泥炭地的研究指出,泥炭地对火灾的响应没有高山森林那么敏感^[59]。尽管目前对湿地中黑炭的研究还非常有限,但是通过借鉴其它沉积类型中黑炭的分析,对未来湿地环境中黑炭的研究工作提供了重要帮助。火活动会使黑炭含量增加^[60,61]。通过测量过去 18 a 的黑炭沉积通量变化,并结合炭屑和汞通量变化,认为由于火烧和强烈的人类冶金活动,巴西亚马逊地区森林不断减少,生态系统逐渐转变为农牧业生态系统^[11]。对中国黄土过去两个冰期的黑炭研究发现,黑炭沉积速率与冰期—间冰期循环密切相关,冰期的冷干气候条件会引起地区自然火的发生^[4]。而在全新世晚期,由于强烈的人类活动干扰,人类对土地の利用,对火活动的频率和强度影响显著。通过对北美极端气候变化的研究认为,黑炭与火活动关系密切,同时火的强度还会受干物质量的影响^[62]。由于生物质的燃烧也可以产生黑炭,因此通过对黑炭含量和沉积通量的分析,可以研究区域植物的变化情况。分析长时间尺度的黑炭沉积含量和通量,可以研究人类活动对研究区域的影响。根据燃烧物质的干湿状况和气体排放情况,可以区分自然火和人为火^[63],且人类活动干扰强烈地区的黑炭沉积通量明显高于经济欠发达地区^[64]。因此,火活动、气候和植物三者是相互关联和相互作用的,共同影响区域黑炭沉积特征。而处于水陆交汇的湿地生态系统,对其黑炭沉积的分析也可以尝试与火活动、气候和植物结合起来。例如,人口和耕地面积的增加是导致三江平原泥炭地黑炭沉积通量增加的主要人为因素^[3]。

4 展 望

黑炭与人类生产和生活活动息息相关,是仅次于二氧化碳的增温组分。近年来,黑炭在环境中的持续增加,引起了全球广泛关注。未来对湿地环境中黑炭的研究应该更加深入和全面。首先,亟待解决的问题是黑炭的定义和测量分析方法,由于实验条件及时间的限制,未来对湿地中黑炭含量的测定,应该尝试寻求操作更加简便、测量精度更加准确、成本也更加低廉的测量方法;其

次,黑炭的降解机制也是未来需要解决的问题之一;再次,黑炭作为有机质和一些污染物的良好载体,对其环境效应的分析还有待深入和加强;然后,应该综合多学科、多角度分析湿地中黑炭的源与汇,更加准确地估算湿地中的黑炭储量,这对全球稳定性碳的循环起着不可忽视的作用;最后,黑炭与火活动、气候、植物的关系,是分析湿地中黑炭沉积特征的依据,未来还应该综合运用其它物理、化学和生物代用指标,从机理上分析三者之间的相互作用和关系,尝试从三者之间的变化情况分析湿地的形成与演化。

参考文献

- [1] Hammes K, Schmidt M W I, Smernik R J, *et al.* Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, **21**(3).
- [2] Zhang J. Effect of Black Carbon in Soil and Sediment on Organic Chemical Sorption and Carbon Sequestration[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **668**: 194-198.
- [3] Gao C, Lin Q, Zhang S, *et al.* Historical trends of atmospheric black carbon on Sanjiang Plain as reconstructed from a 150-year peat record[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**.
- [4] 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): 9-19.
- [5] Han Y M, Wei C, Bandowe B A M, *et al.* Elemental carbon and polycyclic aromatic compounds in a 150-year sediment core from Lake Qinghai, Tibetan Plateau, China: Influence of regional and local sources and transport pathways[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(7): 4176-4183.
- [6] Ruppel M M, Isaksson I, Ström J, *et al.* Increase in elemental carbon values between 1970 and 2004 observed in a 300-year ice core from Holtedahlfonna (Svalbard)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(20): 11447-11460.
- [7] 刘子刚, 王铭, 马学慧. 世界泥炭地有机碳储量和有机碳密度[J]. *湿地科学*, 2014, **12**(3): 279-285.
- [8] Lehndorff E, Linstädter J, Kehl M, *et al.* Fire history reconstruction from Black Carbon analysis in Holocene cave sediments at Ifri Oudadane, Northeastern Morocco[J]. *The Holocene*, 2015, **25**(2): 398-402.
- [9] Tan Z, Han Y, Cao J, *et al.* Holocene wildfire history and human activity from high-resolution charcoal and elemental black carbon records in the Guanzhong Basin of the Loess Plateau, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, **109**: 76-87.

- [10]Thevenon F, Williamson D, Bard E, *et al.* Combining charcoal and elemental black carbon analysis in sedimentary archives: Implications for past fire regimes, the pyrogenic carbon cycle, and the human-climate interactions[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, **72**(4): 381-389.
- [11]Cordeiro R C, Turcq B, Ribeiro M G, *et al.* Forest fire indicators and mercury deposition in an intense land use change region in the Brazilian Amazon (Alta Floresta, MT)[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **293**(1): 247-256.
- [12]Bao K, Shen J, Wang G, *et al.* Anthropogenic Black Carbon Emission Increase during the Last 150 Years at Coastal Jiangsu, China[J]. *PloS One*, 2015, **10**(7): e0129680.
- [13]Liu X, Xu L, Sun L, *et al.* A 400-year record of black carbon flux in the Xisha archipelago, South China Sea and its implication[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(10): 2205-2212.
- [14]Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2002, **107**(D19): ACH16-1-ACH16-22.
- [15]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.
- [16]Simpson M J, Hatcher P G. Overestimates of black carbon in soils and sediments[J]. *Naturwissenschaften*, 2004, **91**(9): 436-440.
- [17]Goldberg E. *Black carbon in the environment*[M]. New York: Wiley and Sons, 1985.
- [18]曹军骥, 占长林. 黑碳在全球气候和环境系统中的作用及其在相关研究中的意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, **33**(2): 177-184.
- [19]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.
- [20]Masiello C A, Druffel E R M. Black carbon in deep-sea sediments[J]. *Science*, 1998, **280**(5371): 1911-1913.
- [21]Edmondson J L, Stott I, Potter J, *et al.* Black carbon contribution to organic carbon stocks in urban soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(14): 8339-8346.
- [22]黄佳鸣, 王晓旭, 王阳, 等. 地表灰尘中黑碳含量的研究[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2012, **38**(1): 91-96.
- [23]Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **370**(1): 190-206.
- [24]Muri G, Cermelj B, Faganeli J, *et al.* Black carbon in Slovenian alpine lacustrine sediments[J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1225-1234.
- [25]Coppola A I, Ziolkowski L A, Masiello C A, *et al.* Aged black carbon in marine sediments and sinking particles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(7): 2427-2433.
- [26]Gelencsr A. *Carbonaceous Aerosol*[M]. New York: Springer-Verlag, 2005.
- [27]Suman D O, Kuhlbusch T A J, Lim B. Marine sediments: a reservoir for black carbon and their use as spatial and temporal records of combustion[M]//*Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*. Springer Berlin Heidelberg, 1997: 271-293.
- [28]Randerson J T, Liu H, Flanner M G, *et al.* The impact of boreal forest fire on climate warming[J]. *Science*, 2006, **314**(5802): 1130-1132.
- [29]Matt Davies G. *Understanding Fire Regimes and the Ecological Effects of Fire*[M]//Belcher C M. *Fire Phenomena and the Earth System: An Interdisciplinary Guide to Fire Science*. Oxford: John Wiley & Sons, 2013.
- [30]Kane E S, Hockaday W C, Turetsky M R, *et al.* Topographic controls on black carbon accumulation in Alaskan black spruce forest soils: implications for organic matter dynamics[J]. *Biogeochemistry*, 2010, **100**(1-3): 39-56.
- [31]Gustafsson Ö, Gschwend 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.
- [32]Zhan C, Cao J, Han Y, *et al.* Spatial distributions and sequestrations of organic carbon and black carbon in soils from the Chinese loess plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **465**: 255-266.
- [33]Zhang A, Cui L, Pan G, *et al.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(4): 469-475.
- [34]Zhang A, Bian R, Pan G, *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, **127**: 153-160.
- [35]Jiang J, Xu R, Jiang T, *et al.* Immobilization of Cu (II), Pb (II) and Cd (II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **229**: 145-150.
- [36]Cope M J, Chaloner W G. Fossil charcoal as evidence of past atmospheric composition[J]. *Nature*, 1980, **283**: 647-649.
- [37]Kuhlbusch T A J. Enhanced: Black carbon and the carbon cycle [J]. *Science*, 1998, **280**(5371): 1903-1904.
- [38]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.
- [39]唐杨, 韩贵琳, 徐志方. 黑碳研究进展[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(1): 98-108.
- [40]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.

- [41]Cornelissen G, Gustafsson Ö, Bucheli T D, *et al.* Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(18): 6881-6895.
- [42]Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, **478** (7367): 49-56.
- [43]Shrestha G, Traina S J, Swanston C W. Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review[J]. *Sustainability*, 2010, **2**(1): 294-320.
- [44]Lovett R. Burying biomass to fight climate change[J]. *New Scientist*, 2008, **2654**: 32-35.
- [45]Ball R. Combustion of biomass as a global carbon sink[J]. *Open Thermodynamics Journal*, 2008, **2**: 106-108.
- [46]Reilly M. For Carbon Storage, Burn the Bogs?[N]. *Discovery News*, 2008-12-05.
- [47]Millennium Ecosystem Assessment (MA). *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis*[R]. World Resources Institute, Washington D C, 2005.
- [48]陈小红, 段争虎. 土壤碳素固定及其稳定性对土壤生产力和气候变化的影响研究[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(4): 765-772.
- [49]Six J, Conant R T, Paul E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, **241**(2): 155-176.
- [50]胡学玉, 易卿, 禹红红. 土壤生态系统中黑炭研究的几个关键问题[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(1): 153-158.
- [51]Ding Y, Yamashita Y, Jones J, *et al.* Dissolved black carbon in boreal forest and glacial rivers of central Alaska: assessment of biomass burning versus anthropogenic sources[J]. *Biogeochemistry*, 2015, **123**(1-2): 15-25.
- [52]Middelburg J J, Nieuwenhuize J, van Breugel P. Black carbon in marine sediments[J]. *Marine Chemistry*, 1999, **65**(3): 245-252.
- [53]Liang B, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(2): 206-213.
- [54]Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, **191**(1): 77-87.
- [55]Soucémariadin L N, Quideau S A, MacKenzie M D. Pyrogenic carbon stocks and storage mechanisms in podzolic soils of fire-affected Quebec black spruce forests[J]. *Geoderma*, 2014, **217**: 118-128.
- [56]Kane E S, Mazzoleni L R, Kratz C J, *et al.* Peat porewater dissolved organic carbon concentration and lability increase with warming: a field temperature manipulation experiment in a poor-fen[J]. *Biogeochemistry*, 2014, **119**(1-3): 161-178.
- [57]王宪伟, 李秀珍, 吕久俊, 等. 温度对大兴安岭北坡多年冻土湿地泥炭有机碳矿化的影响[J]. *第四纪研究*, 2010, **30**(3): 591-597.
- [58]王国平, 吕宪国. 沼泽湿地环境演变研究回顾与展望[J]. *地理科学*, 2008, **28**(3): 309-313.
- [59]Simon van Bellen, Garneau M, Ali A A, *et al.* Did fires drive Holocene carbon sequestration in boreal ombrotrophic peatlands of eastern Canada?[J]. *Quaternary Research*, 2012, **78**(1): 50-59.
- [60]Muri G, Wakeham S G, Faganeli J. Polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon in sediments of a remote alpine lake (Lake Planina, northwest Slovenia)[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(5): 1009-1016.
- [61]Yao J, Hockaday W C, Murray D B, *et al.* Changes in fire - derived soil black carbon storage in a subhumid woodland[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, **119**(9): 1807-1819.
- [62]Marlon J R, Bartlein P J, Walsh M K, *et al.* Wildfire responses to abrupt climate change in North America[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, **106**(8): 2519-2524.
- [63]Saamak C F. A shift from natural to human-driven fire regime: implications for trace-gas emissions[J]. *The Holocene*, 2001, **11** (3): 373-375.
- [64]Cong Z, Kang S, Gao S, *et al.* Historical trends of atmospheric black carbon on Tibetan Plateau as reconstructed from a 150-year lake sediment record[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(6): 2579-2586.

Black Carbon in Wetlands: A Review

HE Jiabao^{1,2}, GAO Chuanyu¹, LU Xianguo¹, WANG Guoping¹

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, P.R.China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Black carbon, an important component of organic carbon, produced by incomplete combustion of biomass or fossil fuels. Black carbon was produced by natural and anthropogenic sources and emitted into atmosphere. As an important component of the atmospheric aerosols, the black carbon could transport to other regions through atmospheric transition, and deposited on the surface of the marine and terrestrial ecosystems. Wetlands covered 1/5 of the earth's surface, and regarded as an important stable carbon pool for global carbon cycle. The big surface areas of black carbon particles might lead several kinds of organic pollutants and micro-organism absorbed on black carbon particles. High contents of black carbon in the soil might change the soil environment and influence the carbon emission rates. Because the black carbon is more stable than other kinds of organic carbon, to estimate the contents of black carbon in the wetlands is essential for assess the importance of wetland carbon pool for global carbon cycle. Wetlands with peat accumulation are one kind of ideal deposition archives, and could be used to reconstruct palaeoenvironmental conditions. More and more studies were focused on the black carbon in the wetlands, and it is found that black carbon contents in the wetlands were influenced by fire activities, plants communities and climate conditions. The natural sources of the black carbon were mainly from local biomass combustion, and biomass combustion could lead both of black carbon contents and fluxes increasing. Therefore, the black carbon could be used to reconstructed wildfire activities during the historical period. The cool and drought climate condition could lead high frequency of wildfire. Cooling temperature could promote the plants growing and the wildfire was occurred at drought conditions, and led to the black carbon fluxes increased clearly during this period. With the long-term climate changing, the types and coverage of plants communities might also change, which could be reflected by the black carbon fluxes and other climate proxies. However, with the increasing of population and intensity of human activities, the proportions of the black carbon produced by human activity were increasing and human activities became the important influencing factor. The fossil fuels consumption increasing led to the black carbon contents and fluxes were increased rapidly and much higher than those in hundreds of years before. In recent 150 years, the black carbon produced by wildfire could be consider as the natural background, the peak values and trends of the black carbon fluxes could be used to reflected historical human activities (e.g. land reclamation, cooking). With more black carbon produced by human activities deposited in the wetlands ecosystem, the contents of black carbon in the wetlands increasing and might influence the carbon cycle in the wetlands. Hence, the black carbon research is important for carbon cycle, and could provide a guide to human in the future. In this paper, we reviewed the recently black carbon studies in wetlands, e.g. the black carbon sources, contents, measurements; compared the black carbon contents or fluxes in the wetlands with other ecosystem (e.g. lakes, forest soils). Based on this review, we want to let readers better to understand the black carbon in the wetlands and its environmental implication. For example, how the climate, plant communities influence on wildfire occurring frequency and the black carbon fluxes; the relationship of the black carbon and total organic carbon; and the implication of the black carbon on pyrolysis organic pollutants and soil environment. Based on the existed questions, propose some suggestions about how to research on black carbon in wetlands in the future.

Keywords: black carbon; wetlands; progress