

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究

陈颖军^{1,2}, 蔡伟伟^{1,3}, 黄国培^{1,3}, 李军², 张干²

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003; 2. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 采集了我国主要的黑碳排放源(生物质燃烧、民用燃煤和机动车尾气)的烟尘样品, 分析烟尘中黑碳(BC)和总碳(TC)与原始燃料的稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$), 对比各种 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的关联性, 评估运用 $\delta^{13}\text{C}$ 技术进行 BC 源解析的潜力。结果表明: ①3 种典型排放源烟尘样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 与燃料有较好的一致性, 且不同排放源的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 变化范围之间有比较明显的差别: 生物质燃料除玉米秸(C_4 植物, $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 为 -13.62‰) 显著不同外, C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 平均值为 $-26.49\text{‰} \pm 1.17\text{‰}$; 烟煤的平均值为 $-23.46\text{‰} \pm 0.37\text{‰}$; 机动车尾气(包括柴油车和汽油车)的平均值为 $-25.17\text{‰} \pm 0.40\text{‰}$ 。②各种排放源的 BC 形成过程存在程度各异的碳同位素分馏, C_4 植物(玉米秸)燃烧过程分馏作用较明显(BC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 相对燃料负偏 1.62‰), 而 C_3 植物和民用煤燃烧过程的分馏较小(分别正偏 0.63‰ 和 0.52‰)。③BC 的纯化手段(CTO-375 方法)对生物质烟尘的 $\delta^{13}\text{C}$ 有一定的影响(BC 和 TC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 相差约为 0.50‰), 对化石燃料烟尘没有影响。上述典型排放源的 $\delta^{13}\text{C}$ 数据库可为 BC 源解析提供依据。

关键词: 黑碳; 稳定碳同位素; 生物质燃烧; 民用燃煤; 机动车尾气

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0673-06

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China

CHEN Ying-jun^{1,2}, CAI Wei-wei^{1,3}, HUANG Guo-pe^{1,3}, LI Jun², ZHANG Gan²

(1. Key Laboratory of Costal Zone Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Smoke particles from the three typical BC emission sources (biomass burning, household coal combustion, and vehicular exhaust) were collected and analyzed for stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) of black carbon (BC), total carbon (TC), as well as the original fuels. The results show that corn stalk (a typical C_4 plant, -13.62‰) has the highest $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ value, and the average values for C_3 plants, bituminous coals, and vehicle exhaust are $-26.49\text{‰} \pm 1.17\text{‰}$, $-23.46\text{‰} \pm 0.37\text{‰}$, and $-25.17\text{‰} \pm 0.40\text{‰}$, respectively. $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ values from the three sources are similar to the corresponding fuels, and the ranges of these values are different from each other. Carbon fractionation occurs during the process of BC formation. $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ for C_4 plant (corn stalk) is lower than that of the fuel by 1.62‰ , while the values for C_3 plants and coals are higher than that of the fuels by 0.63‰ and 0.52‰ , respectively. CTO-375 method, which is used to extract BC from TC, affects the stable carbon isotope of smokes from biomass burning to some extent (the difference between $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ is nearly 0.50‰), but has little effect on fossil fuel smokes. This $\delta^{13}\text{C}$ database for typical emission sources provides scientific information on BC source apportionment.

Key words: black carbon (BC); stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$); biomass burning; household coal combustion; vehicular exhaust

黑碳气溶胶 (black carbon, BC) 是当今气候和环境研究领域共同关注的热点, 涉及到全球和区域气候变化^[1]、环境污染 (如大气灰霾) 和健康危害等^[2] 诸多问题。BC 主要来源于生物质和化石燃料的不完全燃烧过程。我国是 BC 排放大国, 约占全球排放量的 20%^[3]。大量的 BC 排放不仅对我国的气候和环境造成了严重的负面影响^[4,5], 而且由于跨境传输使得我国在国际环境争端中备受责难^[6]。

为了研究 BC 的环境行为 (如大气传输过程) 和控制减排措施, 需要定性和定量地解析 BC 的来源。然而目前针对 BC 的源解析方法非常少见^[7,8]。稳定碳同位素技术 ($\delta^{13}\text{C}$) 作为一种很有潜力的源解析手

段在近年来受到了越来越多的重视^[9~13]。例如, Cao 等^[9] 对我国 14 个城市大气细粒子 ($\text{PM}_{2.5}$) 中 BC 和有机碳 (OC) 的 $\delta^{13}\text{C}$ 进行了分析, 证实民用燃煤是北方城市冬季大气中 BC 的重要来源; 同时, 该研究也指出, 为了更准确地研究碳质气溶胶和 BC 的来源, 需要尽快建立各种 BC 排放源的 $\delta^{13}\text{C}$ 数据库。本研究通过构建我国典型排放源烟尘样品及其原始燃料的 $\delta^{13}\text{C}$ 数据库, 为评估 $\delta^{13}\text{C}$ 技术作为 BC 源解析研

收稿日期: 2011-04-20; 修订日期: 2011-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41073064); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-QN210); 有机地球化学国家重点实验室开放基金项目 (OGL-200804)

作者简介: 陈颖军 (1971 ~), 男, 研究员, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: yjchen@yic.ac.cn

究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 典型排放源的选择

根据现有的我国黑碳排放清单^[3,14~18],民用煤和生物质燃烧是最大的 BC 排放源,各占排放总量的 43%^[15];机动车尾气的贡献约为 10% (以柴油车为主)^[14]。这 3 类排放源构成了我国 BC 排放的主体。此外,民用燃煤的 BC 排放因子受煤种的地质成熟度的影响显著,差异可达 3 个数量级以上^[19~22];我国生物质燃烧量的 90% 来自农作物秸秆和木材^[23],其中,稻秆、麦秆和玉米秆占秸秆总量的 80% 以上^[24]。

因此,本文选择了 3 类 BC 排放源:① 8 种生物质:稻秆、麦秆、玉米秆、豆秆、棉秆、杨木、柳木和松木;② 4 种民用煤:陕西榆林(YL)高挥发份烟煤、河北磁县(CX)和山西中阳(ZY)中挥发份烟煤、山西长治(CZ)低挥发份烟煤;③ 机动车尾气:不同功率的柴油车(农用三轮车、公交车、大型播种机、重型卡车等)和汽油车(桑塔纳 2000 型)。

1.2 烟尘样品的采集和 BC 的分离纯化

各种生物质和煤块在普通民用炉灶内分别燃烧,收集烟囱内壁吸附的烟尘样品。更换燃料时将烟囱内壁清扫干净,防止相互污染。机动车烟尘样品直接从尾气管内壁采集,同种车型采集 3~5 辆进行混合。样品采集后密封于棕色玻璃瓶内冷冻保存。共采集 17 个烟尘样品。

采用化学热氧化法(CTO-375)作为烟尘样品中 BC 的分离纯化手段^[26],步骤如下:取一定量的冻干磨匀的烟尘样品,薄铺于干净的玻璃皿中,置入管式加热炉,保持洁净空气流通,逐步升温到 $375^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,灼烧 24 h,去除烟尘中的 OC,得到纯化的 BC 样品。

1.3 稳定碳同位素测定

样品的稳定碳同位素分析在同济大学海洋地质国家重点实验室的稳定同位素质谱仪(Finnigan Delta plus XP)上完成。采用 Pee Dee Belemnite(PDB)国际标准。经 5 次重复测量,该仪器的分析误差 $\leq 0.3\text{‰}$ 。采用下列公式计算各样品的稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$):

$$\delta^{13}\text{C} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

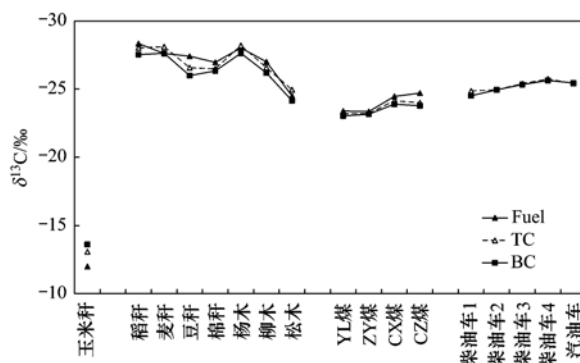
式中, R_{sample} 和 R_{standard} 分别代表样品和标准物质中的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值。测定 $\delta^{13}\text{C}$ 的样品包括:12 个经过粉碎磨匀的生物质和煤的原样($\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$)、17 个烟尘样

品($\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$)、17 个 BC 样品($\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$)。7 个重复样的分析结果表明数据具有良好的平行性(相对标准偏差 $< 0.77\%$)。

2 结果与讨论

2.1 典型排放源烟尘中 BC 和 TC 及燃料的稳定碳同位素组成

图 1 给出了本实验涉及的 17 个烟尘样品的黑碳(BC)、总碳(TC)和原始燃料(Fuel)的稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的分析结果。可以看出,生物质燃料和民用煤燃烧烟尘中的 BC 和 TC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$)对其原始燃料的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 均有较好的继承性(此次没有对机动车燃用的柴油和汽油的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 进行分析),而且三类烟尘样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 均有相对较小的变化范围,可以通过 $\delta^{13}\text{C}$ 较好地地区分来源。具体情况如下。



柴油车 1~4 分别指农用三轮车、公交车、重型卡车和大型播种机

图 1 典型排放源烟尘样品中 BC、TC 及原始燃料的 $\delta^{13}\text{C}$

Fig. 1 $\delta^{13}\text{C}$ values of BC and TC in smokes from typical emission sources and their original fuels

在生物质燃料中,玉米秸(典型 C_4 植物)的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 为 -12.00‰ ;其余 7 种生物质都属于 C_3 植物, $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 的变化范围为 $-28.34\text{‰} \sim -24.49\text{‰}$,平均为 -27.12‰ 。这种由于光合作用途径的不同所导致的 C_3 和 C_4 植物间 $\delta^{13}\text{C}$ 的显著差异与文献[27]的结果一致。在生物质燃烧烟尘中,玉米秸产生 BC 和 TC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$)分别为 -13.62‰ 和 -13.09‰ ;而 7 种 C_3 类型生物质燃烧产物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 平均值($\pm$ 标准偏差)分别为 $-26.49\text{‰} \pm 1.17\text{‰}$ 和 $-26.99\text{‰} \pm 1.11\text{‰}$,表现出对各自 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 的继承性。值得注意的是:松木(本实验为落叶松、红松和白松的平均值)及其燃烧烟尘的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均明显高出其它 C_3 植物,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 分别为 -24.49‰ 、 -24.14‰ 和 -24.95‰ ,

比其它 6 种 C_3 植物的平均值分别高 3.07‰、2.74‰和 2.38‰。Stuiver 等^[28]在研究各种乔木的 $\delta^{13}C$ 值与纬度的相关性时,曾报道针叶植物的 $\delta^{13}C$ 比裸子植物平均高 3.0‰^[28],与本研究的数据相符。

从图 1 还可以看出,与各种生物质之间 $\delta^{13}C$ 变化较大的情况相比,不同功率的机动车类型和不同成熟度的煤种之间 $\delta^{13}C_{Fuel}$ 、 $\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$ 均具有较小的变化范围。柴油车尾气(4 种平均)的 $\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$ 值分别为 $-25.10‰ \pm 0.42‰$ 和 $-25.23‰ \pm 0.35‰$,汽油车尾气则分别为 $-25.45‰$ 和 $-25.41‰$,比柴油车尾气略微偏轻(但差异不显著);因此本研究的机动车尾气 BC 和 TC 的 $\delta^{13}C$ 平均值分别为 $-25.17‰ \pm 0.40‰$ 和 $-25.27‰ \pm 0.32‰$ 。4 种烟煤的 $\delta^{13}C_{Fuel}$ 、 $\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$ 平均值分别为 $-23.97‰ \pm 0.62‰$ 、 $-23.46‰ \pm 0.37‰$ 和 $-23.63‰ \pm 0.44‰$ 。此外,三类烟尘的 $\delta^{13}C$ 呈现逐渐增高的趋势(图 1)。以 $\delta^{13}C_{BC}$ 为例,民用燃煤烟尘比机动车尾气高 1.71‰,比 C_3 生物质燃烧烟尘高 3.03‰。

Widory^[29]对巴黎的 5 种煤及其相应的取暖锅炉燃煤烟尘进行碳同位素分析,结果表明:煤的 $\delta^{13}C_{Fuel}$ 值(平均为 $-23.6‰ \pm 0.7‰$)与本研究 4 种烟煤的平均值($-23.97‰ \pm 0.62‰$)一致,但烟气的 $\delta^{13}C_{TC}$ 值($-25‰ \sim -24‰$)略低于本研究数据($-23.63‰ \pm 0.44‰$),可能与燃烧温度有关。Cao 等^[9]最近对我国 14 个主要城市(北方和南方各 7 个)的大气 $PM_{2.5}$ 进行碳同位素分析,发现长春市和西安市冬季 $PM_{2.5}$ 中 $\delta^{13}C_{BC}$ 分别为 $-23.27‰$ 和 $-23.61‰$,与本研究燃煤数据($-23.46‰ \pm 0.37‰$)一致,而北方城市冬季平均 $\delta^{13}C_{BC}$ 值为 $-24.26‰$,介于本研究燃煤和机动车尾气之间,证实民用燃煤烟气对这些城市冬季大气污染的直接贡献^[31]。

对于机动车尾气,现有的文献数据表现出一定的区域性差异;而且从图 1 可以看出,柴油车功率对尾气烟尘的 $\delta^{13}C$ 也存在一定的影响:从小型三轮车到大型播种机,4 种柴油车的 $\delta^{13}C_{BC}$ 从 $-24.51‰$ 逐渐降低至 $-25.63‰$ 。Widory^[29]对巴黎的机动车尾气烟尘进行碳同位素分析,发现汽油车的 $\delta^{13}C_{TC}$ (平均为 $-24.8‰ \pm 0.1‰$)略高于本研究的数据,而柴油车的数值($-27.1‰ \pm 0.21‰$)显著偏低;加拿大某隧道内机动车尾气混合烟尘的 $\delta^{13}C_{BC}$ ($-27.5‰ \sim -26.5‰$)^[13]和杭州市机动车尾气数

据(柴油车和汽油车的 $\delta^{13}C_{BC}$ 分别为 $-26.5‰$ 和 $-25.8‰$)^[30]也不同程度地低于本文数据。然而,对 Cao 等^[9]报道的 14 个城市大气 $PM_{2.5}$ 中 $\delta^{13}C_{BC}$ 进一步考察,发现北方城市夏季大气(平均 $-25.98‰$)以及南方城市冬夏两季(平均值分别为 $-25.63‰$ 和 $-25.92‰$)均与本文数据很接近;考虑到周边地区生物质燃烧(如农田秸秆焚烧)对城市空气质量的影响^[32]可能造成 $\delta^{13}C_{BC}$ 略微偏负,这些数据说明本研究得到的机动车尾气的 $\delta^{13}C_{BC}$ 数据具有良好的代表性和适用性。

2.2 黑碳形成过程中的碳同位素分馏

BC 是生物质和化石燃料在不完全燃烧条件下形成的产物,因而能在较大程度上继承原始燃料的碳同位素组成;燃烧烟尘中的 TC(即 BC 和 OC 的总和)也具有类似情况(图 1)。然而,有机质在燃烧过程中会经历挥发和氧化阶段,这 2 个阶段都会产生一定程度的碳同位素分馏,而且燃烧温度越高同位素分馏越明显^[33]。一般而言,秸秆的燃烧温度在 200℃ 以下,木材的燃烧温度为 280 ~ 500℃,而化石燃料的燃烧温度可高达 1 100℃。因此,不同排放源的烟尘中 BC 和 TC 与原始燃料之间可能具有程度各异的碳同位素分馏。对这方面的考察将有助于更加准确地运用 $\delta^{13}C$ 技术进行 BC 和 TC 的源解析。

表 1 列出了本实验中各种排放源的燃料及烟尘中 BC 和 TC 的 $\delta^{13}C$ 值之间的差异。可以看出,对于生物质而言, C_4 和 C_3 植物之间再次表现出显著不同的同位素分馏效应:玉米秆燃烧后,烟尘中 BC 和 TC 比原始燃料进一步贫化 ^{13}C , $\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$ 比 $\delta^{13}C_{Fuel}$ 分别负偏 1.62‰和 1.09‰;而不同 C_3 植物的燃烧烟尘相对于燃料虽然存在正偏和负偏 2 种情况,但总体上变化不大或略微正偏,其 $\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$ 比 $\delta^{13}C_{Fuel}$ 平均正偏 0.63‰和 0.13‰。这与文献结果一致^[27,34,35]。例如,Turekian 等^[34]通过实验室模拟研究 C_4 和 C_3 植物在明火和焖烧状况下的同位素分馏效应,发现 C_3 植物的燃烧烟尘 $\delta^{13}C_{TC}$ 比燃料平均正偏 0.5‰, C_4 植物则负偏达 3.5‰。Das 等^[27]的研究则进一步证实燃烧过程对 C_3 植物的碳同位素分馏影响很小(甚至可以忽略),但对 C_4 植物的影响较大,且与 C_4 植物种类和燃烧温度相关。

民用燃煤的碳同位素分馏情况相对简单,表现为烟尘 $\delta^{13}C$ (包括 $\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$)比原煤 $\delta^{13}C$ 略微升高,分别正偏 0.52‰和 0.34‰(表 1)。同时,从表

1 还可以看出燃烧温度对民用燃煤的碳同位素分馏的影响. 例如, 在 4 种烟煤中长治 (CZ) 煤所含的挥发份最低, 因此在民用燃烧条件下自然燃烧温度最高, 这与本实验观察到的 CZ 煤燃烧过程中碳同位素分馏最为显著 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 分别比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 高 0.93‰和 0.71‰) 一致.

表 1 还列出了各种排放源烟尘中 BC 和 TC 的同位素组成的差异 (即 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{BC-TC}}$). 民用燃煤和机动车尾气烟尘中 BC 和 TC 之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异很小, 分别为 0.18‰和 0.10‰, 可以忽略不计; 但是, 生物质

燃烧烟尘的 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{BC-TC}}$ 差异较明显, 而且 C_4 植物 (玉米秸) 表现出与 C_3 植物相反的变化趋势: 前者烟尘中 BC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 比 TC 偏轻 0.53‰, 而后者平均偏重 0.50‰. BC 的纯化手段 (CTO-375 方法) 可以较好地解释生物质比化石燃料具有更大的 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{BC-TC}}$ 差异, 因为该方法采用 375℃ 的灼烧温度高于大多数生物质烟尘 (BC 和 TC) 的形成温度, 可能导致烟尘中稳定碳同位素的进一步分馏. 而对于 C_4 和 C_3 植物之间的不同表现, 目前还没有合理的解释, 有待更深入的研究.

表 1 各种燃料及其烟尘中 TC 和 BC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的差异

Table 1 Differences among $\delta^{13}\text{C}$ values of TC and BC in various smokes and their original fuels

排放源 (燃料)	稳定碳同位素分馏/‰			备注
	TC-Fuel ¹⁾	BC-Fuel ²⁾	BC-TC ³⁾	
玉米秆	-1.09	-1.62	-0.53	C_4 植物
稻秆	0.30	0.81	0.50	C_3 植物
麦秆	-0.49	-0.01	0.48	C_3 植物
豆秆	0.84	1.42	0.58	C_3 植物
棉秆	0.47	0.62	0.15	C_3 植物
杨木	-0.19	0.39	0.57	C_3 植物
柳木	0.43	0.82	0.39	C_3 植物
松木	-0.45	0.35	0.81	C_3 植物
平均	0.13	0.63	0.50	
YL 煤	0.19	0.36	0.17	高挥发份烟煤
ZY 煤	0.13	0.19	0.06	中挥发份烟煤
CX 煤	0.32	0.58	0.26	中挥发份烟煤
CZ 煤	0.71	0.93	0.22	低挥发份烟煤
平均	0.34	0.52	0.18	
柴油车 1			0.35	农用三轮车
柴油车 2			0.01	公交车
柴油车 3			0.06	重型卡车
柴油车 4			0.10	大型播种机
汽油车			-0.04	桑塔纳 2000 型
平均			0.10	

1) 为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 之差; 2) 为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 之差; 3) 为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 之差

3 结论

(1) 我国 3 种典型的 BC 排放源 (生物质燃烧、民用燃煤和机动车尾气) 烟尘样品的 $\delta^{13}\text{C}$ (包括 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$) 对原始燃料 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$) 均有较好的继承性, 且有相对清晰的变化范围, 因而可作为 BC 和 TC 源解析的依据; 生物质燃料中除玉米秸 (C_4 植物) 显著不同外, C_3 植物燃烧烟尘中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和

$\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 的平均值分别为 -26.49‰和 -26.99‰; 民用烟煤烟尘的平均值分别为 -23.46‰和 -23.63‰; 机动车尾气的平均值则分别为 -25.17‰和 -25.27‰.

(2) 不同排放源 BC 形成过程中的稳定碳同位素分馏程度与燃料类型和燃烧温度有关: C_4 植物 (玉米秸) 的燃烧烟尘相比原始燃料进一步贫化 $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Fuel}}$ 分别负偏 1.62‰和

1.09‰), 而 C_3 植物总体上轻微正偏 ($\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$ 比 $\delta^{13}C_{Fuel}$ 平均正偏 0.63‰ 和 0.13‰); 民用煤的平均情况与 C_3 植物相似 (分别正偏 0.52‰ 和 0.34‰), 但不同煤种之间有一定差异 (例如, 低挥发份烟煤的 $\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$ 比 $\delta^{13}C_{Fuel}$ 分别高 0.93‰ 和 0.71‰), 应引起重视。

(3) BC 的纯化手段 (CTO-375 方法) 对生物质燃烧烟尘的 $\delta^{13}C_{BC}$ 和 $\delta^{13}C_{TC}$ 有一定的影响 ($\Delta^{13}C_{BC-TC} \geq 0.5‰$), 但对化石燃料烟尘的影响可以忽略。

致谢: 本研究在样品分析过程中得到同济大学海洋地质国家重点实验室的李丽副教授和王慧老师的帮助, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1** (4): 221-227.
- [2] Chameides W L, Bergin M. Soot takes center stage [J]. *Science*, 2002, **297** (5590): 2214-2215.
- [3] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**: D14203.
- [4] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, **297** (5590): 2250-2253.
- [5] Chameides W L, Yu H, Liu S C, *et al.* Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: an opportunity to enhance crop yields in China through emission controls? [J]. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, **96** (24): 13623-13633.
- [6] Akimoto H. Global air quality and pollution[J]. *Science*, 2003, **302** (5651): 1716-1719.
- [7] Gustafsson Ö, Kurså M, Zencak Z, *et al.* Brown clouds over South Asia; biomass or fossil fuel combustion? [J]. *Science*, 2009, **323** (5913): 495-498.
- [8] Cao J J, Wu F, Chow J C, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5** (11): 3127-3137.
- [9] Cao J J, Chow J C, Tao J, *et al.* Stable carbon isotopes in aerosols from Chinese cities: influence of fossil fuels [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45** (6): 1359-1363.
- [10] Fisseha R, Saurer M, Jäggi M, *et al.* Determination of primary and secondary sources of organic acids and carbonaceous aerosols using stable carbon isotopes [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43** (2): 431-437.
- [11] Liu G, Zhang X X, Teng W L, *et al.* Isotopic composition of organic carbon and elemental carbon in $PM_{2.5}$ in Hangzhou, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52** (17): 2435-2437.
- [12] Ho K F, Lee S C, Cao J J, *et al.* Variability of organic and elemental carbon, water soluble organic carbon, and isotopes in Hong Kong[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6** (12): 4569-4576.
- [13] Huang L, Brook J R, Zhang W, *et al.* Stable isotope measurements of carbon fractions (OC/EC) in airborne particulate: a new dimension for source characterization and apportionment[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (15): 2690-2705.
- [14] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9** (14): 5131-5153.
- [15] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, *et al.* An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7** (16): 4419-4444.
- [16] Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (34): 6516-6527.
- [17] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108** (D21): 8809.
- [18] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, *et al.* Black carbon emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (25): 4281-4296.
- [19] Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, *et al.* Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39** (6): 1861-1867.
- [20] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**: L20815.
- [21] Zhi G R, Chen Y J, Feng Y L, *et al.* Emission characteristics of carbonaceous particles from various residential coal-stoves in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (9): 3310-3315.
- [22] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of black and organic carbon emission factors for household coal combustion in China; implication for emission reduction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (24): 9495-9500.
- [23] Yan X Y, Ohara T, Akimoto H. Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (27): 5262-5273.
- [24] Liu H, Jiang G M, Zhuang H Y, *et al.* Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: with special references of crop residues[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008, **12** (5): 1402-1418.
- [25] 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, **27A**(8): 1185-1201.
- [26] Elmquist M, Gustafsson O, Andersson P. Quantification of sedimentary black carbon using the chemothermal oxidation method; an evaluation of ex situ pretreatments and standard additions approaches [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2004, **2**: 417-427.
- [27] Das O, Wang Y, Hsieh Y P. Chemical and carbon isotopic characteristics of ash and smoke derived from burning of C₃ and C₄ grasses[J]. Organic Geochemistry, 2010, **41**(3): 263-269.
- [28] Stuiver M, Braziunas T F. Tree cellulose ¹³C/¹²C isotope ratios and climatic change[J]. Nature, 1987, **328**(6125): 58-60.
- [29] Widory D. Combustibles, fuels and their combustion products; a view through carbon isotopes [J]. Combustion Theory and Modelling, 2006, **10**(5): 831-841.
- [30] 刘刚, 姚祁芳, 杨辉. 汽车尾气烟尘中有机碳和元素碳的稳定同位素组成[J]. 环境与健康杂志, 2008, **25**(9): 822-823.
- [31] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**: D22S11.
- [32] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* Concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Shanghai for a 1-year period [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(4): 499-510.
- [33] Poole I, van Bergen P F, Kool J, *et al.* Molecular isotopic heterogeneity of fossil organic matter; implications for $\delta^{13}\text{C}_{\text{biomass}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{palaeoatmosphere}}$ proxies[J]. Organic Geochemistry, 2004, **35**(11-12): 1261-1274.
- [34] Turekian V C, Macko S, Ballentine D, *et al.* Causes of bulk carbon and nitrogen isotopic fractionations in the products of vegetation burns: laboratory studies [J]. Chemical Geology, 1998, **152**(1-2): 181-192.
- [35] Krull E S, Skjemstad J O, Graetz D, *et al.* ¹³C-depleted charcoal from C₄ grasses and the role of occluded carbon in phytoliths[J]. Organic Geochemistry, 2003, **34**(9): 1337-1352.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行