

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

PM₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用

陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳

(兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 对收集到的我国 35 个城市的 PM₁₀ 有效实测源成分谱进行系统聚类, 应用系统聚类和方差分析方法, 对源成分谱进行聚类和区域的划分. 对聚为一类的各城市源成分谱进行主成分分析, 所得主成分得分系数作为权重, 加权运算建立可替代源成分谱. 利用 R 、 CD 以及 CMB 模型解析所得源贡献值的相对误差, 评价所建立的可替代源成分谱的合理性及可行性. 得到 6 种污染源的 13 个可替代源成分谱, 煤烟尘与扬尘各三类, 土壤风沙尘、钢铁尘与建筑水泥尘各两类, 机动车尾气尘一类. 煤烟尘与钢铁尘可以直接进行替代; 建筑水泥尘不存在明显区域特征; 机动车尾气尘由于数据代表性不足, 建议采用实测源成分谱; 土壤风沙尘与扬尘的替代标准有待进一步的研究.

关键词: 可替代源成分谱; 聚类分析; 方差分析; 主成分分析; 模型验证; PM₁₀

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4078-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.006

Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM₁₀

CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, WANG Fang

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to establish the replaceable source profile for different regions, the effective source profiles of different source types in 35 cities were collected. The source profiles of the same kind were clustered to the appropriate classes by hierarchical cluster analysis. Variance analysis was used to evaluate the rationality of clustering results that were applied to the regional division of source profile. The replaceable source profiles were established based on the weighting sum of the calculating component scores which were obtained by principal components method. The reasonability and feasibility of the established replaceable source profiles were evaluated using correlation coefficient (R), coefficient of divergence (CD) and relative error (RE) of source contributions apportioned by CMB model between the determined and replaceable source profiles. A total of 13 replaceable source profiles were obtained for six kinds of pollutant sources, including three kinds each of coal fly ash dust and re-suspended dust, two kinds each of soil dust, metal smelt dust and construction cement dust, and one kind of vehicle exhaust dust. The replaceable source profiles of coal combustion fly ash and metal smelt dust could be directly used for source apportionment. There was no obvious regional division for construction cement dust profiles. Source profile of vehicle exhaust dust was suggested to be determined due to the lack of representative source data. More work needs to be done on the replaceable source profiles of soil dust and re-suspended dust.

Key words: replaceable source profiles; cluster analysis; variance analysis; principal components analysis; model verification; PM₁₀

大气颗粒物已成为我国城市空气污染的主要组分, 其中空气动力学直径小于等于 10 μm 的可吸入颗粒物 (PM₁₀) 本身含有有毒有害物质, 且由于粒径小, 容易吸附有毒有害物质而对人类的健康危害更大^[1]. 2013 年, 国际癌症研究机构将大气颗粒物确定为致癌物质^[2]. 可吸入颗粒物来源复杂, 准确的识别其来源及对环境的贡献^[3], 是制定科学合理的污染防治措施和有效地控制颗粒物污染的重要前提.

CMB 模型是目前被广泛应用的颗粒物源解析模型之一^[4], 而源成分谱确定的合理性和准确性直接关系到解析结果的可靠性^[5]. 不同区域的不同源成分谱既有差异性^[6~9] 又有相似性, 因此, 在没有源成分谱的地区可借用其它地区的源成分谱进行源解析^[10,11]. 然而, 实际大气中颗粒物的来源相当复杂,

在无实测源成分谱的地区, 只有借用合理的可替代源成分谱, 才能得到符合实际的结果. 相关系数 R 与分歧系数 CD (coefficient of divergence) 已被用于源成分谱可替代的判断^[12~15], 目前尚无统一的确定可替代源成分谱的判断标准. 此外, 在同一地区同类污染源的实测分析中, 尚无较好的方法处理存在差异的各采样点源成分谱, 从而得到具有地区代表性的源成分谱. 因此, 本研究收集了不同地区的实测源成分谱, 对于有可能替代的污染源类 (包括土壤风沙尘、建筑尘、钢铁尘和机动车尾气尘等), 拟用聚类分析、方差分析以及主成分分析的方法建立

收稿日期: 2014-04-28; 修订日期: 2014-06-23

基金项目: 甘肃省科技攻关项目 (1204FKCA130); 半干旱气候变化教育部重点实验室 (兰州大学) 开放课题项目

作者简介: 陈强 (1969 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为环境化学、大气化学, E-mail: chenqhqh@lzu.edu.cn

可替代源成分谱,利用 R 、CD 以及 CMB 模型对其替代合理性及可行性进行评价,提供可靠的可替代源成分谱的建立方法,以期为今后的城市大气颗粒物源解析研究提供基础数据。

1 源成分谱数据的收集

依据冯银厂^[12]及文献[16]对源的定义和采样方式的要求,收集到 2000~2012 年我国 35 个城市 6 类污染源 89 个 PM₁₀ 有效实测源成分谱。化学成分包括金属元素(Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Pb)、水溶性离子(Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺)以及 TC 与 OC 等 22 种。

2 数据处理方法

应用系统聚类方法中样本间的平方欧式距离来衡量各城市源成分谱间的相似度,绘制聚类谱系图,根据聚类结果对源成分谱进行区域划分,并应用方差分析评价类与类之间差异的显著性以及聚类划分区域的可行性。对聚为一类的源成分谱进行主成分分析,依据主成分对应特征值

大小(>1)以及方差贡献率大小(>85%)确定主成分的个数,并以回归法计算所得各城市源成分谱的主成分得分系数作为权重,加和得到可替代源成分谱。利用 R 与 CD 值以及 CMB 模型进行替代合理性及可行性的评价。

3 可替代源成分谱的建立方法

3.1 源成分谱的聚类

以煤烟尘为例进行说明:煤烟尘采样为除尘器下载灰及烟道飞灰,对收集到的 19 组源成分谱进行聚类得到三类源。其中,天津、泰安和济南的聚类结果与对应地域划分不一致,天津与第Ⅱ和Ⅲ类的相关性分别为 0.861 和 0.876,但进一步聚类可进入第Ⅲ类;泰安与第Ⅱ和Ⅲ类的相关性分别为 0.897 和 0.883,且可与南京、宁波共同聚到第Ⅱ类;济南与第Ⅱ和Ⅲ类的相关性分别为 0.920 和 0.947,可与日照共同聚到第Ⅱ类。因此,天津归入第Ⅲ类,泰安与济南归入第Ⅱ类。采用相同的方法对六类污染源进行聚类分析处理,得到各类源成分谱的聚类结果见表 1。

表 1 源成分谱聚类结果
Table 1 Results of cluster analysis for source profiles

源类型	源数量	分类	包含城市	对应区域	$\overline{R}^{3)}$
煤烟尘	19 个	I	乌鲁木齐、太原、长治、沈阳	—	0.961
		II	南京、泰安、宁波、无锡、济南、日照	东部沿海	0.904
		III	鞍山、抚顺、葫芦岛、石家庄、天津、安阳、北京、银川、成都	东北、华北、西北及西南地区	0.916
土壤风沙尘	13 个	I	乌鲁木齐、安阳、石家庄、北京、邯郸、长治	西北及华北地区	0.968
		II	南京、徐州、日照、杭州、沈阳、抚顺、成都	东部沿海、东北及西南地区	0.922
建筑水泥尘	20 个	I	成都、重庆、南昌、南京、杭州、徐州、泰安、北京、石家庄、抚顺 ¹⁾	—	0.917
		II	日照、无锡、宁波、邯郸、长治、葫芦岛、鞍山、沈阳、香港	—	0.913
钢铁尘	11 个	I	乌鲁木齐、太原、北京、石家庄、成都	西北、华北及西南地区	0.870
		II	济南、无锡、南昌、徐州、沈阳、抚顺	东部沿海及东北地区	0.854
机动车尾气尘	4 个	I	无锡、深圳、天津、乌鲁木齐 ²⁾ 、银川 ²⁾ 、太原 ²⁾ 、安阳 ²⁾ 、天津 ²⁾ 、济南 ²⁾	—	0.874
扬尘	21 个	I	杭州、无锡、济南、泰安、日照、宁波、徐州、北京、太原、石家庄、邯郸、安阳、天津、成都	东部沿海、华北及西南地区	0.914
		II	榆林、盐池、环县、洛川、西安	西北地区	0.947
		III	乌鲁木齐 ¹⁾	乌鲁木齐	0.986

1) 该城市有两组相同类型的源成分谱; 2) 6 个城市机动车尾气尘的均值源成分谱; 3) 表示 R 值均通过了显著性水平 $\alpha=0.01$ 的检验

本课题组的研究^[17]认为相关系数 R 可以作为源能否替代及源替代敏感性水平的判断参数。同一类中源成分谱数据的相关系数均值 $\overline{R}$ 均大于 0.8(见表 1),说明聚为一类的源中不同城市的源成分谱间的相关度较高。

3.2 聚类结果的方差分析

对三类煤烟尘源成分谱进行方差分析,得到

$P_{TC}=8.73 \times 10^{-5}$, $P_{OC}=2.85 \times 10^{-6}$,未通过概率临界值为 0.05 的假设,表明聚类划分的Ⅲ类源成分谱在 TC 与 OC 的质量分数上存在显著性差异;其余 20 种化学成分对应 P 值均大于 0.05,通过假设,Ⅲ类源成分谱在这 20 种化学成分含量上无显著性差异。且应用最小显著法(LSD)进行Ⅲ类源成分谱的多重方差分析,结果表明 TC 在Ⅲ类源成分谱的两

两比较上均存在显著性差异($P < 0.05$),OC 在源类间的显著差异性则体现在第 I 和 II、III 类之间, $P_{I \& II} = 3.17 \times 10^{-6}$, $P_{I \& III} = 1.53 \times 10^{-6}$, $P_{II \& III} = 0.917$,说明第 II 与 III 类源成分谱在 OC 的质量分数上相似度较高,不存在差异。

3.3 聚类结果的主成分分析

运用主成分分析方法对第 II 类煤烟尘的 6 个源成分谱进行主成分的提取,得到 KMO 检验值为 0.65, Bartlett 球形检验中 P 值为 1.45×10^{-13} ^[18],特征值 $\lambda_1 = 5.47 (> 1)$,且提取 1 个主成分的方差

贡献率为 91.10% ($> 85\%$),能够较大程度地集中反映第 II 类煤烟尘源成分谱的特征。并将计算得到的主成分得分系数作为各城市源成分谱的权重进行加和,得到可替代煤烟尘源成分谱 II 的方程: $F = 0.179 \times \text{南京} + 0.179 \times \text{宁波} + 0.167 \times \text{无锡} + 0.176 \times \text{日照} + 0.173 \times \text{济南} + 0.174 \times \text{泰安}$ 。

6 类污染源的共计 13 类聚类结果的主成分分析计算结果,以及可替代源成分谱与聚类结果中各城市源成分谱的 R 与 CD 计算值见表 2。

表 2 主成分分析结果及可替代源成分谱与聚类结果中各城市源成分谱的 R 与 CD 值

Table 2 Results of principal components analysis and R&CD of cluster analysis for source profiles from different cities									
源类型	分类	主成分分析结果				可替代源成分谱与聚类结果中各城市源成分谱比较			
		检验参数值		主成分分析		R		CD	
		KMO 检验	Bartlett 球形检验概率 P	特征值 (λ_1)	累积方差贡献/%	分布范围	均值	分布范围	均值
煤烟尘	I	0.82	5.04×10^{-75}	3.96	98.99	(0.948, 0.988)	0.977	(0.226, 0.444)	0.308
	II	0.65	1.45×10^{-13}	5.47	91.10	(0.885, 0.976)	0.937	(0.262, 0.390)	0.327
	III	0.67	3.7×10^{-59}	8.18	90.90	(0.907, 0.980)	0.947	(0.319, 0.489)	0.403
土壤风沙尘	I	0.80	6.04×10^{-81}	5.97	99.48	(0.973, 0.992)	0.981	(0.144, 0.436)	0.281
	II	0.57	0.5×10^{-11}	6.35	90.72	(0.926, 0.979)	0.949	(0.298, 0.472)	0.388
建筑水泥尘	I	—	—	10.91	99.20	(0.848, 1.000)	0.903	(0.367, 0.585)	0.470
	II	0.52	4.54×10^{-77}	8.93	99.27	(0.892, 0.986)	0.944	(0.179, 0.390)	0.279
钢铁尘	I	0.76	2.19×10^{-65}	4.77	95.45	(0.875, 0.970)	0.943	(0.261, 0.510)	0.413
	II	0.81	1.91×10^{-39}	5.97	99.55	(0.776, 0.986)	0.923	(0.283, 0.435)	0.369
机动车尾气尘	I	0.75	1.83×10^{-52}	3.95	98.74	(0.861, 0.946)	0.905	(0.402, 0.606)	0.454
扬尘	I	0.61	2.7×10^{-115}	13.07	93.33	(0.888, 0.989)	0.946	(0.209, 0.471)	0.336
	II	0.65	3.58×10^{-79}	4.88	97.64	(0.941, 0.990)	0.966	(0.140, 0.297)	0.238
	III	—	—	—	—	(0.992, 0.998)	0.995	(0.077, 0.234)	0.155

3.4 可替代源成分谱的验证

3.4.1 可替代煤烟尘的验证

可替代煤烟尘源成分谱 II 与 6 个城市煤烟尘源成分谱间的相关系数在 0.885 ~ 0.976 之间(见表 2)。Wilson 等^[19]认为高度的相关性并不能够完全保证成分谱的一致性。分歧系数 CD 也可以被用来判断成分谱的相关性^[13,20,21],不同的研究给出的判断标准存在

差异^[13~15]。可替代煤烟尘源成分谱 II 与 6 个城市煤烟尘源成分谱间的 CD 值均处在 (0.2, 0.5) 的区间内,说明源成分谱间存在有相似性^[14]。

此外,以无锡市^[22]实测源成分谱解析所得各源贡献值作为标准值,对可替代煤烟尘源成分谱 I、II 与 III 替代后的模型解析结果进行准确性地比较,结果见表 3。

表 3 可替代煤烟尘源成分谱替代源解析结果

Table 3 Results of source apportionment between determined and replaceable source profiles of coal fly ash dust								
结果	实测源的解析结果 (标准值)		可替代煤烟尘源成分谱 I 的解析结果		可替代煤烟尘源成分谱 II 的解析结果		可替代煤烟尘源成分谱 III 的解析结果	
	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	T-stat	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	T-stat	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	T-stat	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	T-stat
土壤风沙尘	29.87	3.46	34.83	6.07	24.54	1.98	35.53	4.06
建筑水泥尘	15.05	5.06	16.15	6.73	14.68	4.77	16.39	6.78
煤烟尘	24.77	2.08	13.84	1.80	28.05	1.52	8.77	0.83
钢铁尘	1.76	2.49	1.47	2.40	1.63	2.59	1.33	1.71
机动车尾气尘	11.37	5.37	11.82	4.70	11.33	3.48	14.55	7.14
硫酸盐	9.31	6.74	8.93	6.03	8.68	6.05	9.02	6.47
硝酸盐	5.00	6.89	4.99	6.88	4.99	6.87	4.94	6.84
合计	97.13	—	92.03	—	93.9	—	90.5	—
R^2	1		0.99		0.99		0.99	
χ^2	0		0.36		0.21		0.46	
质量分数/%	86.5		81.9		83.6		80.6	

由表 3 可知,可替代煤烟尘源成分谱替代后的解析结果均通过了 CMB 模型的拟合优度诊断, $\chi^2_{II} < \chi^2_I < \chi^2_{III}$, 替代解析后质量分数与标准值

最接近. 分别计算可替代煤烟尘源成分谱替代解析结果与标准值间的相对误差 (relative error, RE), 见图 1.

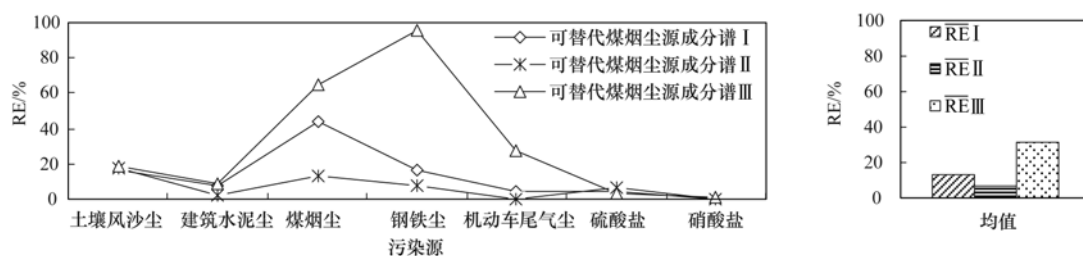


图 1 可替代煤烟尘源成分谱替代后各源贡献值与标准值的 RE

Fig. 1 RE of source contribution between determined and replaceable source profiles of coal fly ash dust

由图 1 可知, $\overline{RE}_{煤烟尘 II} = 6.87\%$, 且有 $RE_{max} = 17.85\%$ (土壤风沙尘). 可替代煤烟尘源成分谱 I 与 III 替代后, $\overline{RE}_{煤烟尘 I} = 13.2\%$, $\overline{RE}_{煤烟尘 III} = 21.32\%$, 且替代后土壤风沙尘、煤烟尘、钢铁尘与机动车尾气尘的贡献存在较大的误差. 可替代煤烟尘源成分谱 II 的替代要优于可替代煤烟尘源成分谱 I 与 III 的替代. 可见, 可替代煤烟尘源成分谱 II 的

替代解析结果最准确, 说明由系统聚类与主成分分析确定的可替代煤烟尘源成分谱是合理的, 也说明这样的区域划分是可行的.

3.4.2 其它各类污染源的验证

相同的方法分别将每一类可替代源成分谱代替实测源成分谱, 进行 CMB 模型解析, 所得可替代源贡献与标准值的 RE 及 $\overline{RE}$ 见图 2.

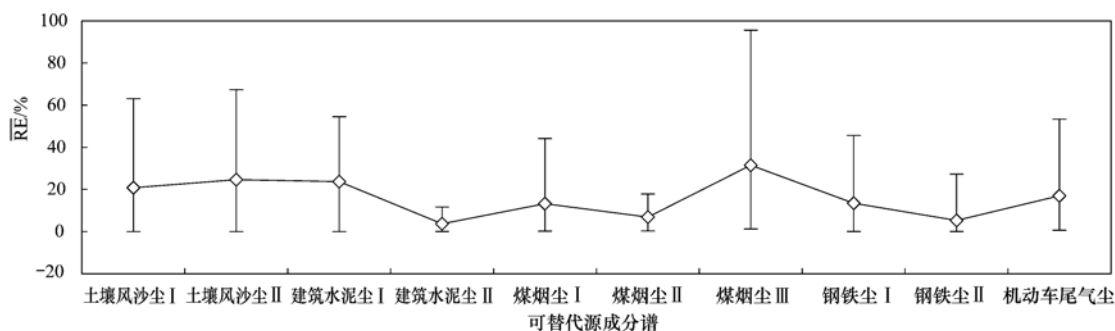


图 2 各类可替代源成分谱替代解析结果与标准值的 $\overline{RE}$

Fig. 2 $\overline{RE}$ of source contribution for the replaceable source profiles of each kind of pollutant source

由图 2 可知, 可替代建筑水泥尘源成分谱 II、煤烟尘源成分谱 II 与钢铁尘源成分谱 II 替代解析后, $\overline{RE}$ 均小于 10% ($\overline{RE}_{建筑水泥 II} = 3.71\%$ 、 $\overline{RE}_{煤烟尘 II} = 6.87\%$ 、 $\overline{RE}_{钢铁尘 II} = 5.29\%$), 且 $RE_{max} < 30\%$, 这说明污染源区域划分是合理的. $\overline{RE}_{土壤风沙尘 I} = 20.85\%$, $\overline{RE}_{土壤风沙尘 II} = 24.65\%$, 说明这两类可替代源成分谱的替代对解析结果的影响水平相近. 机动车尾气尘替代后 $\overline{RE} = 16.97\%$, 且 RE 范围为 (0.62%, 53.3%), 误差较大的主要为煤烟尘与机动车尾气尘, 说明可替代机动车尾气尘的替代会导致这两类源的质量贡献发生较大的变化, 原因可能为源成分谱间的共线性作用^[23]及其它因素的影响.

4 可替代源成分谱的建立及特征分析

由表 2 可知, 可替代源成分谱与对应聚类结果

中各城市的源成分谱间均表现出较高的相关性, $\overline{R}$ 均大于 0.9, $\overline{CD}$ 均处于 (0.1, 0.5) 的区间范围内, 说明建立的可替代源成分谱与对应聚类结果中各城市的源成分谱具有相似性. 对聚为一类的各城市源成分谱进行主成分分析, 得到所有源类可替代源成分谱见图 3.

可替代煤烟尘源成分谱 I 适用于乌鲁木齐、长治、太原与沈阳, 源成分谱 II 适用于东部沿海地区, 源成分谱 III 适用于东北、华北、西北及西南地区. 三类可替代源成分谱中 TC 与 OC 存在显著性差异. 煤烟尘中的 OC 主要来源于煤的不完全燃烧^[24], 计算得到 $OC/TC_{煤烟尘 I} = 0.91$, $OC/TC_{煤烟尘 II} = 0.54$, $OC/TC_{煤烟尘 III} = 0.75$, 说明这 3 个区域煤质的差别较大. 比较煤烟尘与其它源类间的差异, 主要体现在 Al、Si 的相对含量及 TC、OC 上. 三类可替代煤烟

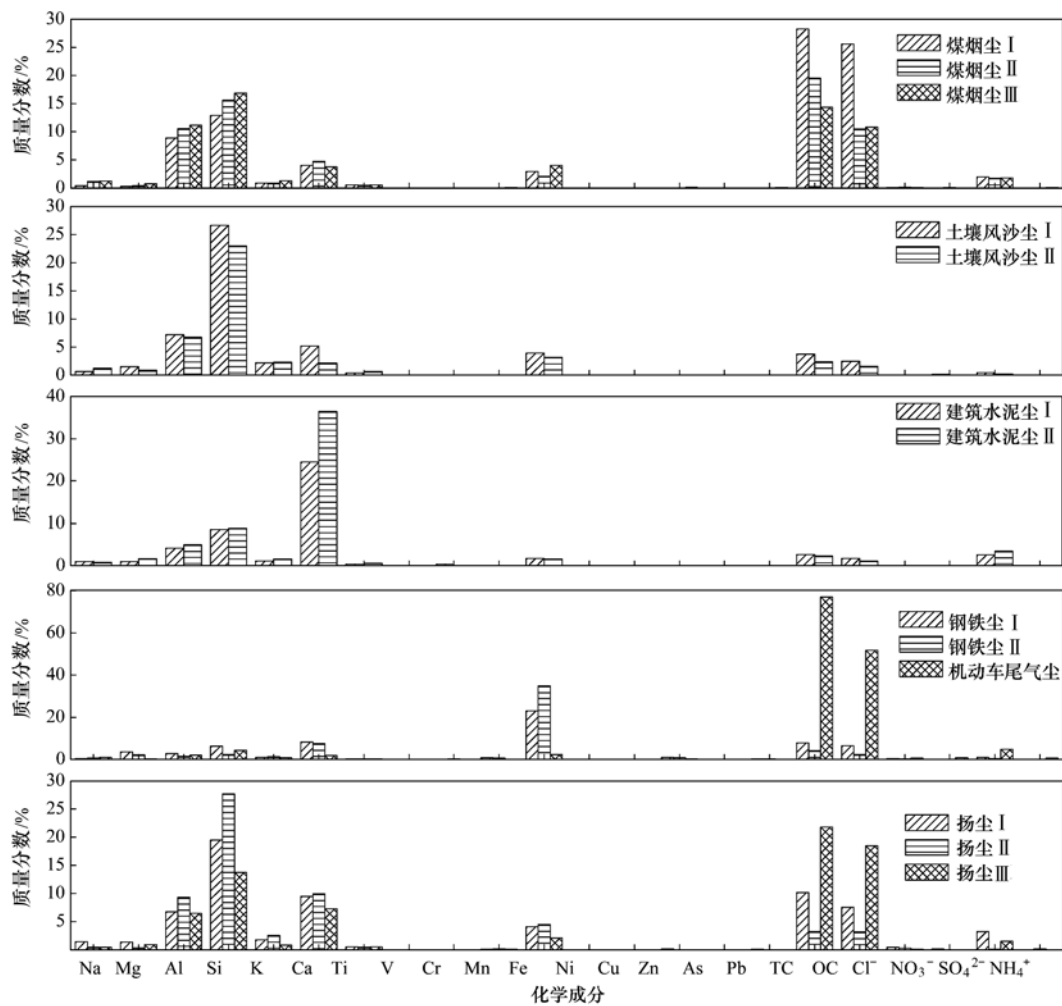


图3 可替代源成分谱图

Fig. 3 Replaceable source profiles of six major source types

尘的 Si/Al 分布范围为(1.45, 1.51), 与戴树桂所得(1.06, 1.41)及 Rahn 的研究结果(1.43, 1.65)^[25] 相近。

可替代土壤风沙尘源成分谱 I 适用于西北与华北, 源成分谱 II 适用于东部沿海、东北及西南地区。两类可替代源成分谱中 Si、Al、Ca、Fe 等地壳元素均占较大比重, 且为土壤风沙尘与其它源类化学组成的主要差异。方差分析结果表明两类区域可替代源成分谱在地壳性元素(Na、Mg、Al、Si、Ca 和 Ti)、金属元素(Cu 和 Pb)以及铵根离子的质量分数上具有差异性, 推测可能是由于农业生产作业(如施肥、喷撒农药、污水灌溉等)^[26] 及人为活动(如道路交通对土壤中重金属含量的贡献)^[27,28] 影响不同导致的。且有 $\text{Si}/\text{Al}_{\text{土壤风沙尘 I}} = 3.76$, $\text{Si}/\text{Al}_{\text{土壤风沙尘 II}} = 3.56$, 与戴树桂的结论($\text{Si}/\text{Al}_{\text{风沙尘}} = 3.68$)^[25] 基本一致。

可替代建筑水泥尘源成分谱 I 与 II 在源类标识

物 Ca^[29] 上表现出显著差异性, 但区域划分不明显。建筑水泥尘的化学组成主要与各建筑工地所用水泥型号、建筑施工材料相关, 不同区域的城市若使用同产地同标号的水泥, 则源成分谱会表现出非常高的相似性, 因此建筑水泥尘源成分谱在应用时需要具体分析。

可替代钢铁尘源成分谱 I 与 II 中 Fe 的质量分数存在显著性差异, 适用于东部沿海及东北地区的源成分谱 II 中 Fe 的质量分数明显高于适用于西北、华北及西南地区的源成分谱 I。同时, Fe、Cu、Zn 和 Mn 等金属元素在钢铁尘源成分谱中的质量分数要明显高于其他类源成分谱, 方差分析结果也表明这几类金属元素在钢铁尘与其它源类间存在显著性差异, 因此可视作钢铁尘源成分谱的标识物。

可替代机动车尾气尘源成分谱中 TC、OC 所占质量分数最大, SO_4^{2-} 、Si、Al 等次之, 且 TC、OC 与 SO_4^{2-} 正是机动车燃油排放的特征物^[30]。然而国内

对机动车尾气尘源成分谱的研究工作较少,由于尾气采样方式及燃油水平、机动车运行状态、运行路况等的不统一,所收集到的这几组源成分谱数据存在一定的差异性,不能很好地代表全国范围内机动车尾气的化学组成排放特征,建议在具体源解析研究中对机动车尾气进行实测分析。

可替代扬尘源成分谱 I 适用于东部沿海、华北及西南地区,源成分谱 II 适用于西北地区,源成分谱 III 特指乌鲁木齐,三类可替代源成分谱间存在显著性差异。Si、Al、Ca 与 Fe 等地壳元素是黄土中的主要化学成分^[31],且源成分谱 II 对应城市均处于黄土高原,其中 Si、Al、Ca 与 Fe 的质量分数明显高于其他两个地区,说明源成分谱 II 中土壤扬尘所占比重更大,人为源作用的元素及二次颗粒物(如 TC、OC 与 SO₄²⁻)所占比重较低。而第 I 与 III 类区域可替代扬尘源成分谱中 TC 与 OC 的质量分数偏高,说明煤烟尘与机动车尾气尘等 TC、OC 排放量较大的人为源对扬尘的贡献更大,采集的扬尘源成分谱受人为活动影响较大。总结上述分析可知,扬尘源成分谱的标识物受到自然源与人为源的共同作用。

5 结论

(1)应用系统聚类和方差分析方法,对源成分谱进行聚类和区域的划分。将主成分分析计算聚为一类的各城市源成分谱的主成分得分系数作为权重,加权运算得到可替代源成分谱。利用 R 与 CD 值以及 CMB 模型解析所得源贡献值与标准值间的 RE 比较,评价所确定的可替代源成分谱合理性及可行性。同时,该方法也可用于同一区域相同污染源成分谱监测时各个采样源成分谱差异性的评价和处理,使获得的源成分谱更具有代表性。

(2)得到 6 类污染源的 13 个可替代源成分谱,其中煤烟尘与扬尘各有三类,土壤风沙尘、钢铁尘与建筑水泥尘各有两类,机动车尾气尘为一类。煤烟尘与钢铁尘可以直接进行替代;两类可替代建筑水泥尘源成分谱没有很清晰的区域划分;机动车尾气尘由于数据代表性不足,建议采用实测源成分谱;此外土壤风沙尘与扬尘源成分谱的替代有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] Heal M R, Kumar P, Harrison R M. Particles, air quality, policy and health [J]. Chemical Society Reviews, 2012, **41** (19): 6606-6630.
- [2] International Agency for Research on Cancer, World Health Organization. IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths [EB/OL]. http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf, 2013.
- [3] Srimuruganandam B, Shiva Nagendra S M. Source characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} mass using a chemical mass balance model at urban roadside [J]. Science of the Total Environment, 2012, **433**: 8-19.
- [4] Viana M, Kuhlbusch T A J, Querol X, et al. Source apportionment of particulate matter in Europe: a review of methods and results [J]. Journal of Aerosol Science, 2008, **39** (10): 827-849.
- [5] 王淑兰,柴发合,周来东,等.成都市大气可吸入颗粒物来源解析研究[J].地理科学,2006, **26**(6): 717-721.
- [6] Lee E, Chan C K, Paatero P. Application of positive matrix factorization in source apportionment of particulate pollutants in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33** (19): 3201-3212.
- [7] Marmur A, Mulholland J A, Russell A G. Optimized variable source-profile approach for source apportionment [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(3): 493-505.
- [8] Song Y, Dai W, Shao M, et al. Comparison of receptor models for source apportionment of volatile organic compounds in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **156**(1): 174-183.
- [9] Watson J G, Chow J C, Fujita E M. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(9): 1567-1584.
- [10] 侯锡梅.我国北方地区五城市排放源成分谱的比较研究[D].天津:南开大学,2003.
- [11] 范莹.青岛市大气颗粒物的定量源解析[D].青岛:中国海洋大学,2006. 55-56.
- [12] 冯银厂.关于化学质量平衡(CMB)受体模型应用中若干技术问题的研究[D].天津:南开大学,2002. 43, 50-51, 53.
- [13] Wongphatarakul V, Friedlander S K, Pinto J P. A comparative study of PM_{2.5} ambient aerosol chemical databases [J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32** (24): 3926-3934.
- [14] 姬亚芹.城市空气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究[D].天津:南开大学,2006. 87-88.
- [15] Han B, Kong S F, Bai Z P, et al. Characterization of elemental species in PM_{2.5} samples collected in four cities of Northeast China [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010, **209** (1-4): 15-28.
- [16] 中国环境监测总站.《环境空气颗粒物源解析监测技术方法指南(试行)》[EB/OL]. http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news_39859.html, 2014-01-27.
- [17] 孙敬敏.污染源成分谱分析及CMB应用研究[D].兰州:兰州大学,2011. 35-36.
- [18] 陈平雁,黄浙明.SPSS10.0统计软件应用教程[M].北京:人民军医出版社,2002. 191.
- [19] Wilson J G, Kingham S, Pearce J, et al. A review of intraurban variations in particulate air pollution: Implications for epidemiological research [J]. Atmospheric Environment, 2005,

- 39(34): 6444-6462.
- [20] Shi G L, Feng Y C, Wu J H, *et al.* Source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban particulate matter of Tangshan, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2009, **9**(3): 309-315.
- [21] Pinto J P, Lefohn A S, Shadwick D S. Spatial variability of $PM_{2.5}$ in urban areas in the United States [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2004, **54**(4): 440-449.
- [22] 韩博, 冯银厂, 毕晓辉, 等. 无锡市区环境空气中 PM_{10} 来源解析[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(1): 35-39.
- [23] 史国良. 大气颗粒物来源解析复合受体模型的研究和应用 [D]. 天津: 南开大学, 2010. 12.
- [24] 张丹. 重庆市主城区可吸入颗粒物的来源解析 [D]. 重庆: 西南大学, 2007. 42.
- [25] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(4): 499-502.
- [26] 姬亚芹, 朱坦, 白志鹏, 等. 大气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究进展[J]. *城市环境与城市生态*, 2005, **18**(5): 3-5.
- [27] Moreno T, Querol X, Alastuey A, *et al.* Identification of chemical tracers in the characterisation and source apportionment of inhalable inorganic airborne particles: an overview [J]. *Biomarkers*, 2009, **14**(S1): 17-22.
- [28] Chen J H, Wang W, Liu H J, *et al.* Determination of road dust loadings and chemical characteristics using resuspension [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(3): 1693-1709.
- [29] 冯银厂, 吴建会, 朱坦, 等. 济南市环境空气中 TSP 和 PM_{10} 来源解析研究[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(2): 1-5.
- [30] Pant P, Harrison R M. Critical review of receptor modelling for particulate matter: a case study of India [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **49**: 1-12.
- [31] Liu D S. *Loess and the Environment* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1985. 65.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行