

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化

姚利¹, 刘进^{1,2}, 潘月鹏^{1*}, 田世丽¹, 王振波³, 韦霞⁴, 张国忠¹, 周保华², 王跃思¹

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 济南大学资源与环境学院, 济南 250022; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 云南省气象局, 昆明 650000)

摘要: 为了解大气颗粒物和重金属铅(Pb)干沉降通量的变化规律, 采用聚氨酯泡沫膜片为代用面联合干湿沉降自动观测设备, 于2013年12月~2014年11月在北京城区采集了颗粒物干沉降, 利用微波消解和电感耦合等离子体质谱仪对样品中全量Pb和水溶性Pb进行了测试分析。结果表明, 北京大气颗粒物和Pb干沉降通量分别为 $0.84 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $7.56 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 呈现出春季>冬季>秋季~夏季的特征。大气颗粒物中水溶性Pb干沉降通量为 $3.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 占Pb干沉降总量的43%, 这一比例呈现出冬春季高于夏秋季的特征。人为源排放不仅增加了大气颗粒物和Pb的干沉降通量, 也改变了水溶性Pb干沉降通量的季节分布。研究结果对科学评估重金属沉降的生态影响和健康效应提供了科学基础, 同时凸显了消减人为源重金属排放的重要性。

关键词: 大气污染; 颗粒物; 干沉降; 铅; 溶解性

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0423-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201601132

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing

YAO Li¹, LIU Jin^{1,2}, PAN Yue-peng^{1*}, TIAN Shi-li¹, WANG Zhen-bo³, WEI Xia⁴, ZHANG Guo-zhong¹, ZHOU Bao-hua², WANG Yue-si¹

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Yunnan Meteorological Bureau, Kunming 650000, China)

Abstract: To investigate the dry deposition pattern of particulate matter and lead in urban Beijing, dry deposited particles were collected based on a surrogate surface between December 2013 and November 2014 and subjected to elemental analysis by using microwave digestion and inductively coupled plasma mass spectrometry. The results showed that dry deposition fluxes of particle mass and total lead were $0.84 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and $7.56 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively, with a seasonal trend of spring > winter > autumn ~ summer, exhibiting a similar temporal pattern to that of coarse particles. In addition, dry deposition flux of water-soluble lead was $3.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. It was found that the ratio of soluble fraction to total lead in dry deposited particles reached up to 43%, coinciding with a seasonal variation of ambient sulfur dioxide. The findings highlighted the anthropogenic imprints on the dry deposition flux of particles and heavy metals as well as the solubility of lead. This study also provides a first-hand dataset that can be used to assess ecological and environmental impacts of dry deposited lead, and an up-to-date scientific basis for the crafting abatement strategies to further reduce emission of heavy metals in China.

Key words: air pollution; particulate matter; dry deposition; lead; solubility

大气颗粒物因其对人体健康的潜在威胁, 及其在全球气候和环境变化中的重要影响而备受关注。除了在大气中的扩散和传输, 干湿沉降是颗粒物被清除出大气的最终途径^[1]。虽然干湿沉降会降低颗粒物在大气中的积累量, 有利于改善大气环境质量, 但大量化学物质也伴随着沉降物进入到地表, 影响生态系统和人体健康^[2]。相比于研究较多的湿沉降^[3], 国际上尚未形成广泛认可的干沉降观测技术规范, 有关大气颗粒物干沉降的研究相对缺乏^[4]。代用面是采集大气颗粒物干沉降的常用方法, 因为操作简单方便而得到了较多应用^[5]。对于大多数元

素而言, 它们的干沉降通量都大于湿沉降; 但锌、镍、镉和铅(Pb)等重金属的干沉降量是否大于湿沉降量却有较大的空间差异^[4]。因此, 研究大气颗粒物及化学组分的干沉降通量对深入理解大气污染现状、自净机制及其生态环境效应具有重要意义。

在颗粒物的化学构成中, 有机碳、硫酸盐、硝

收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41405144); 国家重点研发计划项目(2016YFD0800302); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB417101)

作者简介: 姚利(1983~), 女, 博士, 主要研究方向为大气干湿沉降, E-mail: yaoli05@mail.iap.ac.cn

* 通信作者, E-mail: panyuepeng@mail.iap.ac.cn

酸盐、铵盐和矿尘是主要成分^[6],金属元素所占比例约3%^[7,8].大气颗粒物中重金属含量虽然较低,但因其生理毒性较大,是危害人体健康的重要组分.其中,Pb可对人体神经系统和血液系统产生毒性作用,影响儿童智力和生长发育^[9],世界卫生组织规定大气中Pb的浓度不超过 $500\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$.悬浮在大气中的Pb同时存在于细颗粒物和粗颗粒物中,细颗粒物中的Pb可以随呼吸进入人体直接影响人体健康或者通过区域传输最终被湿清除;而粗颗粒物中的Pb更多的是通过大气干沉降被去除,进入地表后通过生态系统的食物链传递间接影响人体健康^[4].随着我国大气污染的日趋严重,准确量化大气Pb通过干沉降向水体、土壤和植被的输入量非常重要.另外,重金属的毒性与其溶解性直接相关^[10],量化水溶性Pb的干沉降通量是科学评估其生态影响和健康效应的科学基础.国内外对全量重金属干沉降通量的季节变化及空间特征研究较多,但对水溶性金属干沉降的讨论主要集中在Al和Fe元素上面^[11],对水溶性Pb干沉降的研究鲜见报道.本研究以北京为我国大气污染的典型城市代表,通过外场观测和实验室分析,量化大气颗粒物、全量及水溶性重金属Pb的干沉降通量并分析其季节变化,以期为深入理解我国大气重金属污染的现状提供有益参考,也为评估大气污染对生态环境的影响提供科学基础.

1 材料与方法

1.1 采样点介绍

外场观测实验设置在中国科学院大气物理研究所铁塔分部院内($39^{\circ}58'\text{N}$, $116^{\circ}22'\text{E}$),地处北京市区北三环路和北四环路之间的元大都公园内,北100 m为东西走向的北土城西路,东200 m为南北走向的G6高速.为避开地面扬尘的直接影响,采样点设置于办公楼顶(高16 m),四周100 m内植被分布较多,无高大建筑和明显的局地排放源,能够代表周围的大气环境.

1.2 采样与分析方法

采样设备由APS-2B型干湿沉降自动观测仪(青岛崂山电子仪器总厂)和集尘缸(直径15 cm,高30 cm)组成,降雨开始10 s内干沉降采集自动停止,以最大限度地减少湿沉降的影响.集尘缸中放置聚氨酯泡沫膜片(PUF膜,直径15 cm,厚1.35 cm)采集颗粒物干沉降.

为获得完整的季节变化规律,观测实验自2013

年12月开始,至2014年11月结束,每月采集一次样品.PUF膜在采样前后置于恒温恒湿箱中48 h(平衡条件:相对湿度50%, 25°C),然后用十万分之一分析天平称重,差减法计算所采集的降尘量,再根据采样面积和时间计算颗粒物干沉降通量.

为分析干沉降化学组成,首先用塑料剪刀剪下6片载有10 mg左右干沉降物质的PUF膜样品,称重后将其中3片(3次重复)转移到微波消解罐中,依次加入6 mL HNO_3 (Merck)、2 mL H_2O_2 (Merck)和0.2 mL HF(Merck),采用逐步升温的方式进行微波消解(CEM-MARS, CEM Corporation, Matthews, NC, USA),消解液用去离子水定容至50 mL使用ICP/MS(Agilent 7500ce, Agilent Technologies, Tokyo, Japan)进行Pb元素全量分析.将另外3片剪下的PUF样品置于PET瓶中,加入40 mL去离子水($18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$),超声30 min浸提干沉降中的水溶性成分,过滤后加入1% HNO_3 使用ICP/MS测量水溶性Pb含量.实验分析过程质量控制和质量保障技术方法见文献[4].

2 结果与讨论

2.1 颗粒物干沉降通量变化特征

2.1.1 季节变化

图1给出了2013年12月~2014年11月大气颗粒物干沉降通量的逐月变化结果.可以看出,大气颗粒物干沉降通量观测最高值出现在4月,为 $12.4\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{month})^{-1}$;最低值出现在7月,为 $3.5\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{month})^{-1}$.总体上,观测期间春季和冬季干沉降通量较高,夏季和秋季比较接近,呈现出春季>冬季>秋季~夏季的特征.干沉降在春季出现最高值与国内研究结果基本一致,主要原因是北方春季气候干燥、沙尘频发,风速较大也使城市扬尘增多^[12].从干沉降通量的季节变化图1(a)可以看出,干沉降通量季节变化特征与 PM_{10} 浓度变化特征更为接近(相比于 $\text{PM}_{2.5}$),表明干沉降通量更多受到粗颗粒物($\text{PM}_{2.5-10}$)浓度季节变化的控制^[4].除了排放源强度的季节变化,气象条件的自然演变是颗粒物浓度及沉降通量季节变化的主要原因,如春季强劲西北风携带的沙尘和夏季降水对颗粒物的有效清除^[4,6],导致春季观测结果明显高于夏季.

2.1.2 与其它地区的比较

表1汇总了北京与国内外部分地区干沉降通量的观测结果.对比分为2个时间段,一个是2010~2014年,另一个是2001~2002年.在本文观测期

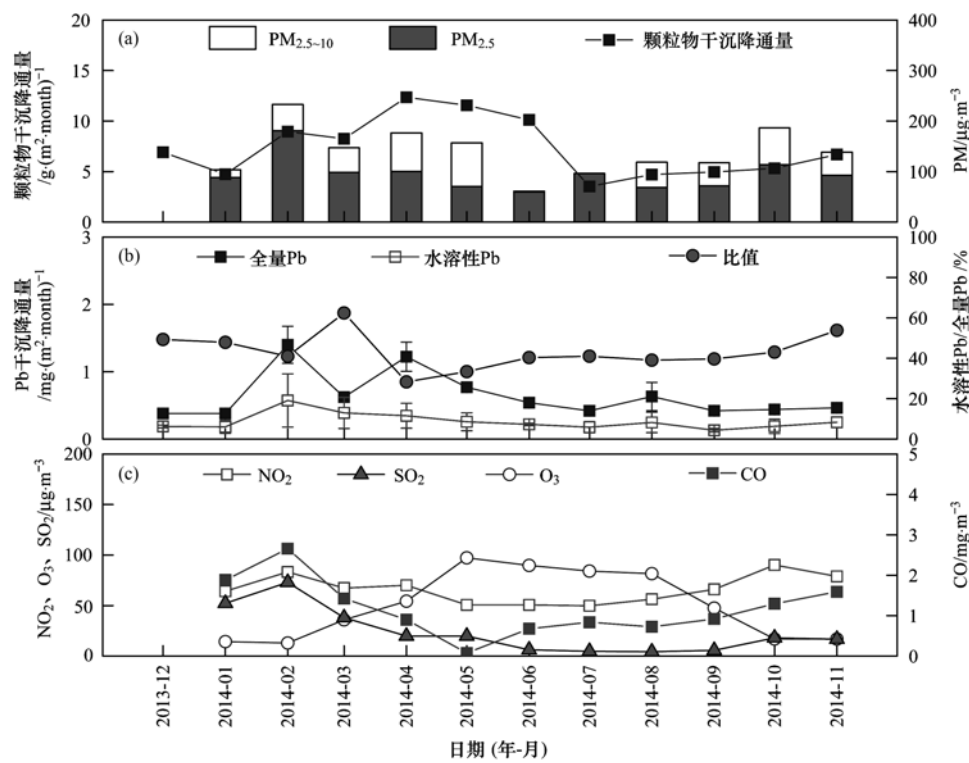


图1 大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及大气污染物浓度逐月变化

Fig. 1 Monthly variations of atmospheric particulates, dry deposition fluxes of heavy metal lead, and the concentration of atmospheric pollutants measured in urban Beijing

间,北京地区颗粒物沉降通量为 $0.84\text{ t}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 低于国家降尘量参考限值 $[11.1\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{month})^{-1}$, 约合 $1.33\text{ t}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}]$,但高于同时段的伊朗阿巴里和菲如兹库、西班牙大加纳利岛和红海、阿卡巴湾等地区的观测结果,是西班牙大加纳利岛的4.2倍(表1).北京2001~2002年的观测结果高于同时段的美国新不伦瑞克和新泽西以及山东青岛,是美国新泽西年沉降通量的6.6倍,是青岛地区的3.8倍(表1).大气干沉降在一定程度上指示着大气粗颗粒物的污染程度,与空气中粗颗粒物污染状况密切相关.整体而言,北京颗粒物干沉降通量高于国内外观测结果,这与局地较高的颗粒物浓度有一定关系.

2.1.3 年际变化

图2(a)给出了北京地区1999~2014年大气颗粒物浓度和干沉降通量统计结果.可以看出,近十几年来北京大气降尘量由 $1.86\text{ t}\cdot(\text{hm}\cdot\text{a})^{-1}$ 持续性下降到 $0.84\text{ t}\cdot(\text{hm}\cdot\text{a})^{-1}$,大气中颗粒物浓度也呈总体下降趋势.基于1999~2014年颗粒物干沉降通量、 PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$ 年均数据,分别对颗粒物干沉降与 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 进行线性拟合后,从图2(b)可以看出,颗粒物干沉降通量的年际变化规律与 PM_{10} 的相

表1 国内外部分地区大气颗粒物干沉降通量/ $\text{t}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

Table 1 Atmospheric particle mass dry deposition fluxes within and outside China/ $\text{t}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

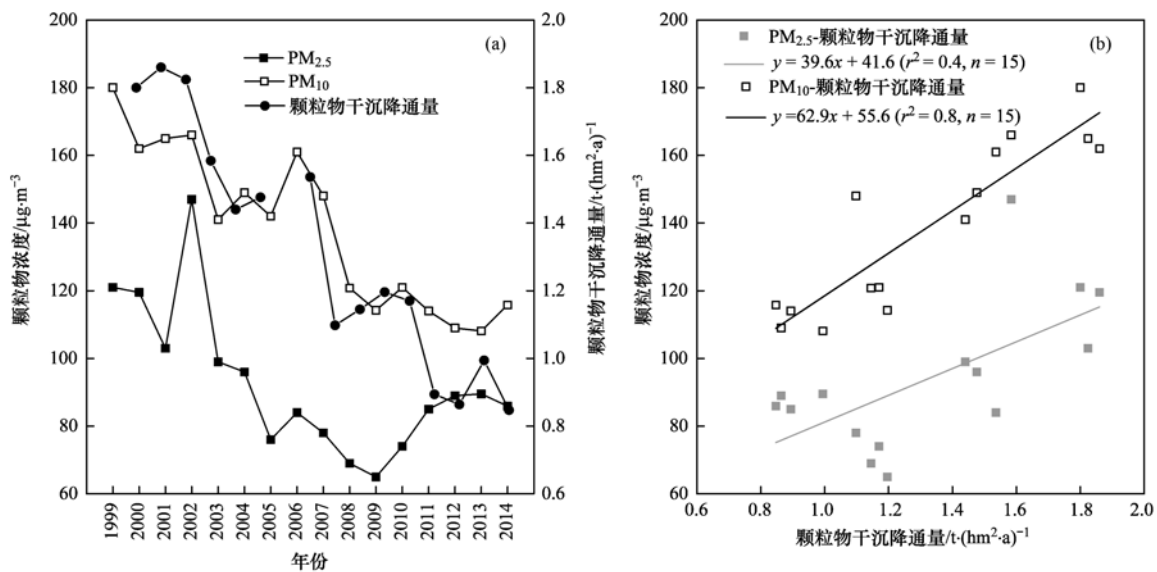
地点	观测年份	平均值	文献
北京	2014	0.84	本研究
北京	2001~2002	1.51	[12]
青岛	2001~2002	0.40	[12]
美国新不伦瑞克	2001~2002	0.36	[13]
美国新泽西	2001~2002	0.23	[13]
伊朗阿巴里	2010~2011	0.58	[14]
伊朗菲如兹库	2010~2011	0.45	[14]
伊朗瓦拉明	2010~2011	0.87	[14]
约旦阿卡巴湾、红海	2012	0.35	[15]
西班牙大加纳利岛	2009~2012	0.20	[15]

似性要高于 $\text{PM}_{2.5}$ (r^2 分别为0.8和0.4, $P<0.05$),这主要是由于干沉降更容易受到粗粒子的影响^[4].基于图2(b),可以建立年际尺度上颗粒物浓度与干沉降通量的经验公式,即 $y=62.9x+55.6$,进而利用 PM_{10} 年均浓度估算干沉降通量.

2.2 颗粒物中全量Pb干沉降通量变化特征

2.2.1 季节变化

图1(b)给出了北京2013年12月~2014年11月年大气颗粒物Pb干沉降通量的逐月变化情况.



1997~2007年 PM_{10} 浓度和颗粒物干沉降通量、2010~2012年颗粒物干沉降通量、2010~2013年 PM_{10} 、2013~2014年 $PM_{2.5}$ 数据引自北京市环境公报; 1999年 $PM_{2.5}$ 引自文献[16], 2000~2004、2011~2012年 $PM_{2.5}$ 数据引自文献[17], 2005~2010年 $PM_{2.5}$ 数据引自文献[18]; 2013~2014年颗粒物干沉降通量和2014年 PM_{10} 为本研究结果

图2 北京市1999~2014年大气颗粒物质量浓度及其干沉降通量

Fig. 2 Concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ and particle mass dry deposition fluxes of Beijing during 1999-2014

可以看出,与北京颗粒物干沉降通量的季节变化规律较为相似,冬春季的Pb沉降总量高于夏秋季,最高值出现在2月 $[1.40 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{month})^{-1}]$,这可能与采暖期燃煤排放有关,同期较高的 SO_2 浓度也可佐证[图1(c)]. 4月的Pb沉降通量的次高值可能是受到了沙尘影响,沙尘传输导致该月份颗粒物干沉降量也达到观测期间的最高值. Pb干沉降量最低值出现在7月 $[0.4 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{month})^{-1}]$,主要与雨水的湿清除较多有关.

2.2.2 与其它地区的比较

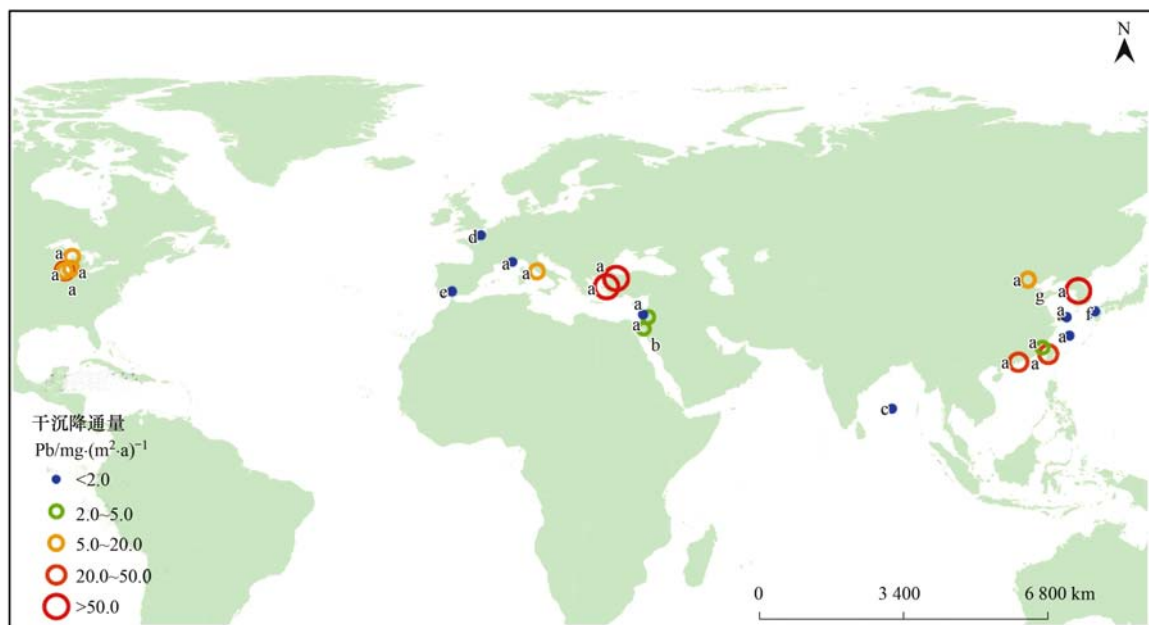
观测期间,北京大气颗粒物Pb干沉降通量为 $7.56 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,比2008~2010年观测结果 $[13.2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 下降了近40%^[4]. 为深入了解北京Pb沉降通量的污染水平,图3给出了国内外Pb干沉降通量的统计结果. 可以看出,Pb沉降量在全球空间上变化范围较大 $[(0.04 \sim 80.30) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$. 与国内研究结果相比,北京Pb沉降通量高于福建兴化湾、黄海、东海等地区,低于台湾、香港的观测结果(图3). 与国外报道结果相比,北京Pb沉降通量高于红海、孟加拉湾、安曼、法国卡普菲拉、西班牙安达卢西亚,但低于朝鲜和韩国、意大利以及美国芝加哥等地区(图3).

2.2.3 水溶性Pb干沉降通量季节变化特征

图1(b)也给出了2013年12月~2014年11月

大气颗粒物中水溶性Pb干沉降通量的逐月变化情况. 可以看出,水溶性Pb干沉降通量最高值出现在2月份,为 $0.57 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{month})^{-1}$;最低值出现在9月,为 $0.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{month})^{-1}$. 整体上,水溶性Pb干沉降通量的季节变化与全量Pb干沉降通量具有一致性(4月除外).

本研究期间,水溶性Pb干沉降通量为 $3.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,占Pb沉降总量的比例为43%,呈现出冬季(46%) > 秋季(44%) > 春季(41%) > 夏季(40%)的趋势. 这一趋势与北京 SO_2 浓度季节变化规律相似,表明燃煤排放不仅增加了Pb的干沉降量,也对颗粒物干沉降中Pb的水溶性存在重要影响. 已有研究发现,Pb等重金属的溶解性随着pH值的降低(从5.7降低到3.4)而逐渐升高^[11]. 另外,颗粒物来源也会影响金属元素的溶解性^[24]. 相比于自然源,人为源颗粒物中Pb的溶解性更高^[24],这可能是因为人为源粒子中金属主要是来自金属磨损或高温热蒸气凝结,且凝结于粒子表面,因而比自然源更不稳定^[25]. 由于燃煤排放的颗粒物粒径小、比表面积大,有利于颗粒物中Pb的溶出,再叠加上燃煤源 SO_2 等酸性气体在颗粒物表面的吸附而引起的酸性增加,进一步增加了重金属Pb的溶解性^[26].



a. 引自文献[4]; b. The Gulf of Aqaba, Red Sea, 2012 年数据引自文献[19]; c. Bay of Bengal, 2009 年数据引自文献[20]; d. The Marais Vernier, Bay of Seine, France, 2010 ~ 2012 年数据引自文献[21]; e. Andalusia, Spain, 2006 ~ 2009 年数据引自文献[22]; f. Matsuura, Japan, 2004 ~ 2006 年数据引自文献[23]; g. 本研究结果

图 3 国内外大气颗粒物 Pb 干沉降通量

Fig. 3 Atmospheric dry depositions fluxes of lead within and outside China

3 结论

(1) 北京城区 2013 年 12 月 ~ 2014 年 11 月大气颗粒物干沉降通量为 $0.84 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 呈现出春季 > 冬季 > 秋季 ~ 夏季的趋势, 并且在近 16 年来呈现阶段性下降的趋势, 与大气粗颗粒物浓度的年际变化趋势一致。

(2) 观测期间, 大气颗粒物 Pb 干沉降通量为 $7.56 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 呈现出春季 > 冬季 > 秋季 ~ 夏季的趋势, 季节变化受到排放源和气象条件的共同影响。通过对比国内外大气 Pb 干沉降通量, 北京观测值处于中等水平。

(3) 观测期间, 大气颗粒物水溶性 Pb 干沉降通量为 $3.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 占全量 Pb 干沉降通量的 43%, 该比例呈现出冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季的变化规律, 与 SO_2 季节分布具有一致性, 表明燃煤排放对 Pb 的溶解性具有重要影响。

参考文献:

[1] 彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 等. 重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2490-2496.
Peng Y L, Wang Y M, Qin C Q, *et al.* Concentrations and deposition fluxes of heavy metals in precipitation in Core Urban Areas, Chongqing[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2490-2496.

[2] 李晓燕, 张舒婷. 城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2274-2282.
Li X Y, Zhang S T. Seasonal provincial characteristics of vertical distribution of dust loadings and heavy metals near surface in city[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2274-2282.
[3] 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 等. 华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3712-3717.
Li Y M, Pan Y P, Wang Y S, *et al.* Chemical characteristics and sources of trace metals in precipitation collected from a typical industrial city in Northern China[J]. Environmental Science, 2012, **33**(11): 3712-3717.
[4] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(2): 951-972.
[5] 潘月鹏, 王跃思, 杨勇杰, 等. 区域大气颗粒物干沉降采集及金属元素分析方法[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 553-559.
Pan Y P, Wang Y S, Yang Y J, *et al.* Determination of trace metals in atmospheric dry deposition with a heavy matrix of PUF by inductively coupled plasma mass spectroscopy after microwave digestion[J]. Environmental Science, 2010, **31**(3): 553-559.
[6] Tian S L, Pan Y P, Wang Y S. Size-resolved source apportionment of particulate matter in urban Beijing during haze and non-haze episodes[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(1): 1-19.
[7] Pan Y P, Tian S L, Li X R, *et al.* Trace elements in particulate matter from metropolitan regions of Northern China: sources, concentrations and size distributions[J]. Science of the Total Environment, 2015, **537**: 9-22.

- [8] Pan Y P, Wang Y S, Sun Y, *et al.* Size-resolved aerosol trace elements at a rural mountainous site in Northern China: importance of regional transport [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **461-462**: 761-771.
- [9] 肖锐, 李冰, 杨红霞, 等. 北京市大气颗粒物及其铅的来源识别和解析[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(6): 148-155.
Xiao R, Li B, Yang H X, *et al.* Source identification and apportionment of particulate matter and aerosol lead in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(6): 148-155.
- [10] Sahariah B, Goswami L, Farooqui I U, *et al.* Solubility, hydrogeochemical impact, and health assessment of toxic metals in municipal wastes of two differently populated cities [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **157**: 100-109.
- [11] Okubo A, Takeda S, Obata H. Atmospheric deposition of trace metals to the western North Pacific Ocean observed at coastal station in Japan[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **129-130**: 20-32.
- [12] 张仁健, 浦一芬, 徐永福, 等. 青岛大气气溶胶的浓度分布和干沉降的观测研究[J]. *气候与环境研究*, 2004, **9**(2): 390-395.
Zhang R J, Pu Y F, Xu Y F, *et al.* Observation on mass concentration and dry deposition of atmospheric aerosols in Qingdao[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004, **9**(2): 390-395.
- [13] Yi S M, Totten L A, Thota S, *et al.* Atmospheric dry deposition of trace elements measured around the urban and industrially impacted NY-NJ harbor[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6626-6637.
- [14] Javid M, Bahramifar N, Younesi H, *et al.* Dry deposition, seasonal variation and source interpretation of ionic species at Abali, Firouzkouh and Varamin, Tehran Province, Iran [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **157**: 74-90.
- [15] López-García P, Gelado-Caballero M D, Santana-Castellano D, *et al.* A three-year time-series of dust deposition flux measurements in Gran Canaria, Spain: a comparison of wet and dry surface deposition samplers[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 689-694.
- [16] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [17] Lv B L, Zhang B, Bai Y Q. A systematic analysis of PM_{2.5} in Beijing and its sources from 2000 to 2012 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 98-108.
- [18] Wang L L, Liu Z R, Sun Y, *et al.* Long-range transport and regional sources of PM_{2.5} in Beijing based on long-term observations from 2005 to 2010 [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **157**: 37-48.
- [19] Al-Taani A A, Rashdan M, Khashashneh S. Atmospheric dry deposition of mineral dust to the Gulf of Aqaba, Red Sea: rate and trace elements[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **92**(1-2): 252-258.
- [20] Srinivas B, Sarin M M. Atmospheric dry-deposition of mineral dust and anthropogenic trace metals to the Bay of Bengal[J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, **126**: 56-68.
- [21] Connan O, Maro D, Hébert D, *et al.* Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **67**: 394-403.
- [22] Montoya-Mayor R, Fernández-Espinoza A J, Seijo-Delgado I, *et al.* Determination of soluble ultra-trace metals and metalloids in rainwater and atmospheric deposition fluxes: a 2-year survey and assessment[J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(8): 882-891.
- [23] Sakata M, Asakura K. Atmospheric dry deposition of trace elements at a site on Asian-continent side of Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(5): 1075-1083.
- [24] Desboeufs K V, Sofikitis A, Losno R, *et al.* Dissolution and solubility of trace metals from natural and anthropogenic aerosol particulate matter[J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(2): 195-203.
- [25] Heal M R, Hibbs L R, Agius R M, *et al.* Total and water-soluble trace metal content of urban background PM₁₀, PM_{2.5} and black smoke in Edinburgh, UK[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(8): 1417-1430.
- [26] Jickells T D, An Z S, Andersen K K, *et al.* Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate[J]. *Science*, 2005, **308**(5718): 67-71.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172