

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

**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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 ..... 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 ..... 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属健康风险评价 ..... 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM<sub>2.5</sub> 中二次水溶性无机离子污染特征 ..... 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 ..... 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 ..... 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 ..... 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 ..... 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO<sub>2</sub> 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 ..... 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放因子研究 ..... 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 ..... 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N<sub>2</sub>O 的分布和海-气交换通量 ..... 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 ..... 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 ..... 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 ..... 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 ..... 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 ..... 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 ..... 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 ..... 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对底泥中汞释放及活化的影响 ..... 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 ..... 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 ..... 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 ..... 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 ..... 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 ..... 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 ..... 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 ..... 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 ..... 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 ..... 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 ..... 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 ..... 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 ..... 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 ..... 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 ..... 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 ..... 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 ..... 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 ..... 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 ..... 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 ..... 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 ..... 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 ..... 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 ..... 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO<sub>2</sub> 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 ..... 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 ..... 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 ..... 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 ..... (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

# 北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染

白莉萍, 齐洪涛, 伏亚萍, 李萍

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

**摘要:** 研究了北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥(以 A、B 型表示)的营养含量变化和重金属污染状况。结果表明, A、B 型堆肥污泥的 pH、营养成分、微量元素和重金属含量因污泥来源和年份而异。其中, A 型堆肥污泥不同年份的有机质平均值为 203 338.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 达到了《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009)和《城镇污水处理厂污泥处置-土地改良用泥质》(GB/T 24600-2009)中的标准要求, 但未达到《城镇污水处理厂污泥处置-园林绿化用泥质》(GB/T 23486-2009)中的标准; 而 B 型堆肥污泥不同年份的有机质平均值为 298 531.5 mg·kg<sup>-1</sup>, A、B 型堆肥污泥不同年份的 pH 平均值分别为 7.1 和 7.2 以及氮磷钾总养分(N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O)平均值分别为 41 111.7 mg·kg<sup>-1</sup> 和 65 901.5 mg·kg<sup>-1</sup>, 均达到以上各城镇污水处理厂污泥处置类型的标准限值要求。除了 Hg、Ni 含量存在超标现象外, A、B 型堆肥污泥中的重金属含量均低于我国最为严格的《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》中 A 级污泥的标准限值。总体而言, 北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥在今后的农用、土地改良以及园林绿化处置中, 存在潜在的 Hg、Ni 环境污染状况, 须优先关注。

**关键词:** 堆肥污泥; 营养成分; 微量元素; 重金属污染; 北京地区

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4648-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.031

## Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region

BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, LI Ping

(Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration China, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Changes of nutrient contents and heavy metal pollutions in composted sewage sludge from different municipal wastewater treatment plants (as represented by CSS-A and CSS-B, respectively) in Beijing region were investigated. The results showed that the pH values, nutrient contents, trace elements and heavy metals in CSS-A and CSS-B depended on the sludge resources and particular years. The average of organic matter content in different years (203 338.0 mg·kg<sup>-1</sup>) from CSS-A met both the requirement of sludge quality standard for agricultural use (CJ/T 309-2009) and land improvement (GB/T 24600-2009) in China except the permitted limit of sludge quality standards for garden or park use (GB/T 23486-2009) in China. Moreover, the average of organic matter in different years (298 531.5 mg·kg<sup>-1</sup>) from CSS-B and the averages of pH values (7.1 and 7.2, respectively) and NPK concentrations (41 111.7 mg·kg<sup>-1</sup> and 65 901.5 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively) in different years from CSS-A and CSS-B all met the requirements of sludge quality standards for the above-mentioned disposal types of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants. The contents of heavy metals in CSS-A and CSS-B except Hg and Ni were below the permitted limits of the A-class sludge quality standard for agricultural use (CJ/T 309-2009), being the most stringent standards in China. It was suggested that composted sewage sludge from different municipal wastewater treatment plants in Beijing region use as a fertilizer in agriculture, land improvement, and garden or park, but the top concern about potential environmental pollution of Hg and Ni should be considered.

**Key words:** composted sewage sludge; nutrient; trace elements; heavy metal pollutions; Beijing region

随着城市化进程的加快, 污水处理厂的普及, 城市污泥(指城市污水厂处理废水过程中产生的固体废物)产生量迅猛增长。据统计, 2010 年北京地区产污泥总量为 3 800 t·d<sup>-1</sup> (含水率为 80%), 预计 2015 年污泥产量将达 5 000 t·d<sup>-1</sup>。目前, 进行堆肥和建材利用等处置和资源化利用的污泥不足 50%<sup>[1]</sup>。而其余污泥, 尚无稳定、可靠、安全的消纳处置途径, 存在着污泥二次污染的严重隐患和环境风险。因此, 如此巨大的污泥量已成为亟待解决的、

无法回避的重大城市环境问题。

一般而言, 城市污泥富含有机质和有效营养成分, 对土壤修复或改良均有积极或长期的作用<sup>[2, 3]</sup>, 即改善土壤理化性质, 增加土壤有机质、氮和磷等营养成分, 且改良作用因污泥类型而异<sup>[4]</sup>。特别是

收稿日期: 2014-04-15; 修订日期: 2014-07-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFRI-FEEP201106)

作者简介: 白莉萍(1969~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为环境生态学, E-mail: blp95@126.com

污泥富含磷,且无机磷和非磷灰石无机磷是污泥中磷的主要成分,而磷是有限且不可替代的资源,即污泥不仅可发挥较高的植物利用率,而且对环境可进行磷的修复<sup>[5,6]</sup>。另外,污泥用于土壤修复,可满足资源的有效再循环,为贫瘠或退化土壤提供有机质等营养成分,既有利于退化生境的重建,也有益于环境的可持续发展<sup>[7]</sup>。譬如,在退化森林生态系统施用污泥,改良土壤的同时,有效促进树木生长并改善林下灌草层植被<sup>[8]</sup>。

目前,污泥的堆肥处置已成为一条重要的处置途径,且作为有机肥料,业已成为一种普遍措施。在北京市污泥处理处置方式中,水泥厂焚烧约占 31%,污泥用于土地修复的规划比例尚且不足,约为 47%<sup>[11]</sup>。在估算北京市城市污泥处理处置方式成本的基础上(包括填埋、焚烧及堆肥等),填埋仍是北京市的主要处置方式,但所占比例将逐渐下降,而堆肥则经济可行,将是污泥处理处置技术的主要发展方向<sup>[9]</sup>。

然而,污泥含有的营养成分和重金属在土壤中积累,可能对环境造成的污染风险已备受关注<sup>[10~16]</sup>,尤其重金属是影响污泥最终处置的主要因素<sup>[15]</sup>。譬如,杨树幼苗施用堆肥污泥,随着污泥施用量的增加,土壤重金属 Cu 和 Zn 含量大为增加<sup>[17]</sup>;而且在长期施用污泥的土壤中,一些土壤重金属(譬如 Cu、Mn、Zn)的形态会产生变化,且存在潜在的 Cu 污染风险<sup>[18]</sup>。而且,不同来源的污泥,其营养元素或重金属全量存在着很大的差异<sup>[14,15]</sup>。因此,为了准确评估污泥风险,以便能真实反映污泥益处和潜在的环境危害,不仅要搞清污泥中的营养成分和重金属含量,而且有必要对污泥分情况或逐个进行评估<sup>[14]</sup>。

鉴于此,本研究对来自北京地区不同城镇污水处理厂污泥,通过两种堆肥技术/工艺,探讨堆肥污泥的营养成分和微量元素的变化,并分析重金属含量变化及其环境污染状况,以期为城市污泥合理、有效地处置提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料和堆肥方式

#### 1.1.1 污泥来源和条垛式堆肥技术

于 2008、2010 年同季采集(均在夏季),初始城市污泥均来自北京高碑店、卢沟桥及吴家村污水处理厂的混合污泥,并进行条垛式堆肥处理,温度 50~60℃,之后浓缩、脱水,大约 25~30 d 后成为腐熟

的干污泥。然后风干、碾碎,过筛,把污泥中的较大块物体等进行细化,经过筛选使之粒度达到 60~80 目,备用测定。以上以 A 型堆肥污泥表示。

#### 1.1.2 污泥来源和高速活性堆肥工艺

于 2012、2013 年同季采集(均在春季),初始城市污泥均来自北京市昌平区南口污水处理厂的污泥,并采用一种高速活性堆肥工艺进行处理(high-rate recovery of organic solid wastes system, HiRos System)。该工艺采用机械热化学稳定及活化法,处理工艺中的所有反应釜、储槽、传送器等均为密闭系统,在高温高压下,完全杀菌及杀寄生虫性、并可分解有毒有机化合物,有效去除重金属危害,从而将有机固体废弃物转化为无味无臭、高品质的有机肥。之后再进一步风干、碾碎及过筛,把污泥中的较大块物体等进行细化,经过筛选使之粒度达到 60~80 目,备用测定。以上以 B 型堆肥污泥表示。

## 1.2 测定方法

供试 A、B 型堆肥污泥的理化性质均采用常规测定方法<sup>[19]</sup>; pH 采用 pH 酸度计法(HANNA, pH211 酸度计);汞(Hg)、砷(As)含量的测定采用原子荧光光度计测定(AFS3000,北京科创海光仪器有限公司);全磷、全钾及 Cu、Zn 和 Cd 等其他金属或元素含量的测定均采用酸溶-等离子发射光谱法测定(等离子发射光谱仪 IRIS Intrepid II XSP,美国 Thermo 公司)。每个测定项目均设置 3 个重复,最后算平均值,并以干基表示。以上测定在国家林业局森林生态环境重点实验室进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆肥污泥的营养含量

如表 1 和表 2 所示,在 A 型(条垛式)和 B 型(高速活性)堆肥污泥中均含有可观的营养含量,且不同类型堆肥污泥和年份间的各项营养指标均表现出较大的差异。A、B 型污泥的有机质、全氮、全磷和氮磷钾总养分(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O)与往年相较均有所增加,譬如 A 型污泥的氮磷钾总养分在 2010 年较 2008 年增加了 15.6%,B 型污泥的氮磷钾总养分在 2013 年较 2012 年增加了 29.7%;而 A 型污泥的速效氮和全钾与往年相较则表现为减少,譬如 A 型污泥的速效氮含量在 2010 年较 2008 年减少了 50.7%,与之相反的是 B 型污泥的速效氮和全钾则比往年都有所增加。

由表 1 和表 2 所示,A、B 型堆肥污泥不同年份

的 pH 平均值分别为 7.1 和 7.2, 有机质的平均值分别为  $203\ 338.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $298\ 531.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 氮磷钾总养分 (即  $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ ) 平均值分别为  $41\ 111.7\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $65\ 901.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 以上 A、B 型污泥各项营养指标的平均值与表 3 比较而言, A 型堆肥污泥的有机质含量达到了《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009) 中 A、B 级污

泥和《城镇污水处理厂污泥处置-土地改良用泥质》(GB/T 24600-2009) 的标准要求, 但未达到《城镇污水处理厂污泥处置-园林绿化用泥质》(GB/T 23486-2009) 中的有机质标准要求, 而 A 型污泥的 pH 和氮磷钾总养分以及 B 型污泥的 pH、有机质含量和氮磷钾总养分均符合各城镇污水处理厂污泥处置类型的标准限值要求 (见表 3).

表 1 条垛式堆肥污泥 (A 型) 的营养含量<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 1 Contents of nutrients in windrow composting sewage sludge/mg·kg<sup>-1</sup>

年份	pH	有机质	速效氮	全 N	全 P	全 K	氮磷钾 (N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + K <sub>2</sub> O)
2008	7.2 ± 0.0	179 941.4 ± 476.1	2 468.5 ± 31.5	13 797.4 ± 60.6	8 576.5 ± 158.4	3 890.9 ± 31.8	38 141.6
2010	7.0 ± 0.0	226 734.6 ± 894.7	1 217.9 ± 18.1	16 169.7 ± 97.8	10 732.0 ± 58.8	2 751.4 ± 6.6	44 081.8
平均	7.1	203 338.0	1 843.2	14 983.6	9 654.3	3 321.2	41 111.7

1) 结果为 3 个重复测定值的平均值 ± 标准偏差, 以干基表示, 下同

表 2 高速活性堆肥污泥 (B 型) 的营养含量/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 2 Contents of nutrients in HiRos System/mg·kg<sup>-1</sup>

年份	pH	有机质	速效氮	全 N	全 P	全 K	氮磷钾 (N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + K <sub>2</sub> O)
2012	7.4 ± 0.0	294 315.4 ± 673.8	2 674.6 ± 23.7	13 571.0 ± 145.1	17 903.9 ± 74.4	2 309.7 ± 126.6	57 388.9
2013	7.0 ± 0.0	302 747.5 ± 625.2	3 356.6 ± 47.3	18 738.2 ± 96.4	22 720.8 ± 296.2	2 988.5 ± 18.8	74 414.1
平均	7.2	298 531.5	3 015.6	16 154.6	20 312.4	2 649.1	65 901.5

表 3 城镇污水处理厂污泥处置类型的营养标准

Table 3 Standards of nutrients in disposal types of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants

项目	农用泥质 (CJ/T 309-2009)		土地改良用泥质 (GB/T 24600-2009)		园林绿化用泥质 (GB/T 23486-2009)	
	A 级污泥	B 级污泥	酸性土壤 (pH < 6.5)	中性和碱性土壤 (pH ≥ 6.5)	酸性土壤 (pH < 6.5)	中性和碱性土壤 (pH ≥ 6.5)
pH	5.5 ~ 9		5.5 ~ 10		6.5 ~ 8.5	5.5 ~ 7.8
有机质含量	≥ 200 g·kg <sup>-1</sup> (≥ 200 000 mg·kg <sup>-1</sup> )		≥ 10% (≥ 100 000 mg·kg <sup>-1</sup> )		≥ 25% (≥ 250 000 mg·kg <sup>-1</sup> )	
氮磷钾含量 (N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + K <sub>2</sub> O)	≥ 30 g·kg <sup>-1</sup> (≥ 30 000 mg·kg <sup>-1</sup> )		≥ 1% (≥ 10 000 mg·kg <sup>-1</sup> )		≥ 3% (≥ 30 000 mg·kg <sup>-1</sup> )	

## 2.2 堆肥污泥的营养元素含量和重金属污染

由表 4 和表 5 所示, A、B 型堆肥污泥中不仅含有丰富的营养元素, 同时也含有诸多重金属, 而且不同年份间的各元素/金属总量均呈现明显的差异. 2010 年与 2008 年比较而言, A 型污泥中 Cu、Zn、Ca、Fe、Mg 和 Na 的总量均表现为增加, 而 Mn 则有所减少; 2013 年与 2012 年相较而言, B 型污泥中的 Cu、Zn、Ca、Na、Al、Cd、Cr、

Hg、S 的总量均明显增加, 而 Mn、As、B、Pb、Fe、Ni、Mg 总量则有所减少. 另外, 各金属/元素的总量在 A、B 型污泥中亦呈现较大的差异. 譬如, A 型污泥不同年份的 Zn、Fe 总量平均值较 B 型污泥的分别高出  $85.9\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $1\ 913.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 而 B 型污泥不同年份的 Mn、Mg 总量平均值较 A 型污泥的分别高出  $819.3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $8\ 827.1\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

表 4 条垛堆肥污泥 (A 型) 的重金属和元素总量/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 4 Contents of heavy metals and elements in windrow composting sewage sludge/mg·kg<sup>-1</sup>

年份	Cu	Mn	Zn	Ca	Fe	Mg	Na
2008	183.4 ± 9.1	432.1 ± 5.9	781.5 ± 16.8	37 190.1 ± 383.7	23 589.7 ± 277.2	4 330.6 ± 23.2	299.0 ± 10.7
2010	193.6 ± 1.0	392.4 ± 9.3	1 010.7 ± 19.1	63 064.7 ± 963.3	27 735.6 ± 116.1	8 672.3 ± 16.0	496.9 ± 2.9
平均	188.5	412.3	896.1	50 127.4	25 662.7	6 501.5	398.0
年份	Al	Cd	Cr	Pb	As	B	S
2008	—	—	—	—	—	—	—
2010	16 752.9 ± 106.0	2.9 ± 0.3	82.0 ± 8.8	105.1 ± 10.0	17.0 ± 1.2	42.1 ± 1.2	13 996.5 ± 121.7
平均	16 752.9	2.9	82.0	105.1	17.0	42.1	13 996.5

表5 高速活性堆肥污泥(B型)的重金属和元素总量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$   
Table 5 Contents of heavy metals and elements in HiRos System/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

年份	Cu	Mn	Zn	Ca	As	B	Na	Al
2012	135.2 ± 7.6	1 521.3 ± 23.3	755.0 ± 16.1	37 768.2 ± 135.8	10.4 ± 0.1	81.6 ± 0.1	1 042.2 ± 50.9	18 187.1 ± 256.9
2013	241.9 ± 1.4	941.8 ± 3.5	865.4 ± 2.8	114 916.3 ± 418.7	5.4 ± 0.1	78.7 ± 0.4	1 270.1 ± 2.0	18 732.7 ± 47.1
平均	188.6	1 231.6	810.2	76 342.3	7.9	80.2	1 156.2	18 459.9
年份	Cd	Cr	Pb	Fe	Hg	Ni	S	Mg
2012	2.6 ± 0.1	130.1 ± 9.6	70.5 ± 0.5	25 050.3 ± 453.5	7.1 ± 0.1	372.8 ± 11.8	4 561.7 ± 89.3	15 571.5 ± 177.8
2013	3.0 ± 0.1	150.0 ± 1.0	67.9 ± 0.2	22 449.0 ± 60.9	18.4 ± 0.1	120.0 ± 1.0	5 323.3 ± 57.1	15 085.6 ± 27.9
平均	2.8	140.1	69.2	23 749.7	12.8	246.4	4 987.5	15 328.6

从不同污泥处置类型中重金属的控制限值可知(见表6),我国的《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009)中A级污泥的标准限值,在各种污泥处置类型中是最为严格的.由表4和表5所示,A、B型堆肥污泥不同年份的Cu总量平均值分别为 $188.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $183.4 \sim 193.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和 $188.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $135.2 \sim 241.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )以及Zn总量平均值分别为 $896.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $781.5 \sim 1 010.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和 $810.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $755.0 \sim 865.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),与我国城镇污水处理厂污泥处置类型的标准限值比较得知(见表6),其不仅符合《城镇污水处理厂污泥处置-土地改良用泥质》(GB/T 24600-2009)和《城镇污水处理厂污泥处置-园林绿化用泥质》(GB/T 23486-2009)中的Cu、Zn总量的标准限值要求,而且远低于最为严格的《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009)中A级污泥的标准限值(即总Cu <  $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和总Zn <  $1 500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

A型堆肥污泥中的Cd、Cr、Pb、As和B的总量(仅为2010年数值)分别为2.9、82.0、105.1、17.0和 $42.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (见表4);如表5所示,B型堆肥污泥不同年份的Cd总量平均值为 $2.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $2.6 \sim 3.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、Cr总量平均值为 $140.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $130.1 \sim 150.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、Pb总量平均值为 $69.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $67.9 \sim 70.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、As总量平均值为 $7.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $5.4 \sim 10.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )以及B总量平均值为 $80.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $78.7 \sim 81.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).上述A、B型污泥中的重金属含量与表6中的标准限值比较得知,各金属总量均达到了我国各类型污泥处置的标准限值要求(见表6),其中包括达到最为严格的《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009)中A级污泥的标准限值要求(即总Cd <  $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总Cr <  $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总Pb <  $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总As <  $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

但是,B型堆肥污泥的Hg、Ni总量存在超标的情形,且不同年份间存在明显的差异(见表5).具体而言,B型污泥不同年份的Hg总量平均值为 $12.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以及2012年的Hg总量为 $7.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,符合《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009)中B级污泥的标准限值要求(即总Hg <  $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),以及《城镇污水处理厂污泥处置-土地改良用泥质》(GB/T 24600-2009)和《城镇污水处理厂污泥处置-园林绿化用泥质》(GB/T 23486-2009)中的中性和碱性土壤( $\text{pH} \geq 6.5$ )的标准限值要求(即总Hg <  $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),但其它的标准限值要求则不符合(见表6);Hg总量在2013年为 $18.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对任何污泥处置类型中的限值要求均不符合.另外,B型污泥2013年的Ni总量为 $120.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,符合《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009)中B级污泥的标准限值要求(即总Ni <  $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),以及《城镇污水处理厂污泥处置-土地改良用泥质》(GB/T 24600-2009)和《城镇污水处理厂污泥处置-园林绿化用泥质》(GB/T 23486-2009)中的中性和碱性土壤( $\text{pH} \geq 6.5$ )的标准限值要求(即总Ni <  $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),但其它的标准限值要求均不符合(见表6);B型污泥不同年份的Ni总量平均值为 $246.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和2012年为 $372.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (见表5),均不符合任何污泥处置类型中的限值要求(见表6).

### 3 讨论

城市污泥通过制肥,不仅可解决农田、园林及绿地急需的有机肥料的来源问题,同时也能寻求城市污泥的合理处置途径,并成为最有效的资源化途径之一.近年来,我国污泥资源化处置技术投产项目显著上升,其中农业对污泥制肥的吸纳量很大,且污泥制肥资源化处置技术的应用已占30%,具有较好的发展前景<sup>[20]</sup>.已有研究表明,污泥经堆肥处理后,可使污泥中腐殖质含量增加,而腐殖质因含有多

表 6 我国城镇污水处理厂污泥处置类型的重金属控制限/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$   
Table 6 Permit limits of heavy metals in the sludge quality standards for disposal types of sewage  
sludge from municipal wastewater treatment plants in China/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	农用泥质(CJ/T 309-2009)		土地改良用泥质(GB/T 24600-2009)		园林绿化用泥质(GB/T 23486-2009)	
	A 级污泥	B 级污泥	pH < 6.5	pH $\geq$ 6.5	pH < 6.5	pH $\geq$ 6.5
Cd	<3	<15	5	20	<5	<20
Hg	<3	<15	5	15	<5	<15
Pb	<300	<1 000	300	1 000	<300	<1 000
Cr	<500	<1 000	600	1 000	<600	<1 000
As	<30	<75	75	75	<75	<75
Cu	<500	<1 500	800	1 500	<800	<1 500
Zn	<1 500	<3 000	2 000	4 000	<2 000	<4 000
Ni	<100	<200	100	200	<100	<200
B	—	—	100	150	<150	<150

种多样的官能团从而吸附重金属,或者改变重金属的化学形态,促使污泥中重金属稳定化,即大多数重金属以稳定残渣态或以残渣态和有机结合态兼具的形式存在,从而降低生物毒性和土壤的污染风险<sup>[21~24]</sup>。特别是堆肥污泥相较其它处理方式(譬如厌氧消化和颗粒污泥)而言,堆肥过程更有利于降低 Mn、Ni 及 Zn 等的有效性<sup>[25]</sup>。由此说明,堆肥处理是降低污泥在农田、土地改良及园林绿化中重金属污染风险的重要途径。

北京不同城镇污水处理厂堆肥污泥(即 A、B 型),不仅含有较为丰富的有机质和植物所需的氮、磷等多种营养元素及微量元素,而且污泥的一些营养成分/元素诸如有机质、全氮、全磷和氮磷钾总养分等含量与往年相比均有所增加。据马学文等<sup>[26]</sup>对全国范围 111 个城市共 193 个污水处理厂污泥营养含量的调查可知,有机质、氮、磷、钾的平均含量分别为 41.15%、3.02%、1.57%、0.69%,除了北京地区 A、B 型堆肥污泥的磷含量平均值与全国平均水平基本相当外,其有机质、氮和钾含量均低于全国平均水平,但 A、B 型污泥的有机质、氮、磷含量比往年均有所增加则与全国的略增走向是一致的。

在 B 型堆肥污泥中,Cu 含量比往年有所增加,而 Pb 含量则比往年有所减少。这与我国城市污泥中 Cu、Pb 含量在短期的趋势一致<sup>[26]</sup>。但是,从长期而言,我国城市污水处理厂污泥中 Cu 含量则是下降趋势<sup>[27]</sup>。除 Hg、Ni 有超标现象外,A、B 型污泥的其他重金属含量均低于我国最为严格的《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009)中 A 级污泥的标准限值,这与姚金玲等<sup>[11]</sup>对我国东北、华北、华东和西北地区 116 家污水处理厂污泥的研究结果一致。另据张丽丽等<sup>[27]</sup>对我国城市污

泥中重金属分布特征及变化规律的研究结果表明,近 10 年,污泥中 Ni、Cd、Hg 含量的超标倍数最高。这与本研究 B 型堆肥污泥中存在 Hg、Ni 超标现象相吻合。此外,来自北京不同污水处理厂的 A、B 型堆肥污泥,其营养和重金属/元素含量存在着明显的差异。即污泥的不同来源可能是主要原因<sup>[14, 15]</sup>;亦可能受其它因素诸如污水处理规模、处理工艺和运行条件以及污泥堆肥工艺的影响<sup>[11]</sup>。另有研究表明,污泥成分有时会因工艺过程和分析技术而产生显著的差异<sup>[28]</sup>。

而今后,北京地区 A、B 型堆肥污泥的资源化应用中,一方面,可能面临着潜在的 Hg、Ni 环境污染情况,需要优先关注;另一方面,则需要进一步探索污泥堆肥过程中重金属钝化的调控措施,从而最大限度地降低重金属的危害,譬如可利用铁氧化菌对一些重金属进行生物浸矿,可能是污泥制肥的一种可行策略<sup>[29]</sup>,以及在堆肥过程中加入石灰等物质亦能降低重金属的有效性<sup>[30, 31]</sup>。另外,除了污泥资源化应用中的重金属污染外,还有一些因素诸如粪大肠菌群菌、多环芳烃(PAHs)等影响着污泥处置类型的选择,而本研究未涉及这些方面,因此还需进一步研究和分析北京堆肥污泥中其他污染物的含量,从而进行合理、有效的污泥处置。

#### 4 结论

(1)北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥中的 pH、营养成分、微量元素和重金属含量在不同污泥来源(即 A、B 型)以及年份间存在着明显的差异。除了 A 型污泥不同年份的有机质平均值未达到《城镇污水处理厂污泥处置-园林绿化用泥质》(GB/T 23486-2009)中的标准要求外,其他 A、B 型堆肥污泥不同年份的营养指标平均值均达到各城镇污水

污水处理厂污泥处置类型(即农用、土地改良和园林绿化)的营养标准要求。

(2)除了 Hg、Ni 含量存在超标现象外,A、B 型堆肥污泥中的其它重金属含量均低于我国最为严格的《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质》(CJ/T 309-2009)中 A 级污泥的标准限值。总体而言,北京地区 A、B 型堆肥污泥在农用、土地改良以及园林绿化处置中,存在潜在的 Hg、Ni 环境污染状况,须优先关注。

致谢:感谢桂萌、韩克敏先生在收集样品过程中给予的大力帮助!

#### 参考文献:

- [ 1 ] 邢永杰, 马伟芳, 陈国伟, 等. 北京市污泥处置现状及生态利用研究[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(4): 31-34.
- [ 2 ] Huang X L, Chen Y, Shenker M. Dynamics of phosphorus phytoavailability in soil amended with stabilized sewage sludge materials[J]. Geoderma, 2012, **170**: 144-153.
- [ 3 ] Roig N, Sierra J, Martí E, *et al.* Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, **158**: 41-48.
- [ 4 ] 卢振兰, 刘锐敏, 白莉萍, 等. 施用城市污泥对土壤生态系统影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 172-179.
- [ 5 ] Lederer J, Rechberger H. Comparative goal-oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options [J]. Waste Management, 2010, **30**(6): 1043-1056.
- [ 6 ] Xie C S, Zhao J, Tang J, *et al.* The phosphorus fractions and alkaline phosphatase activities in sludge [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2455-2461.
- [ 7 ] Andrés P, Mateos E, Tarrasón D, *et al.* Effects of digested, composted and thermally dried sewage sludge on soil microbiota and mesofauna[J]. Applied Soil Ecology, 2011, **48**(2): 236-242.
- [ 8 ] 李贵宝, 尹澄清, 林永标, 等. 城市污泥对退化森林生态系统土壤的人工熟化研究[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(2): 159-162.
- [ 9 ] 张义安, 高定, 陈同斌, 等. 城市污泥不同处理处置方式的成本和效益分析——以北京市为例[J]. 生态环境, 2006, **15**(2): 234-238.
- [ 10 ] 黄雅曦, 李季, 李国学, 等. 污泥资源化利用中控制重金属污染的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(1): 156-158.
- [ 11 ] 姚金玲, 王海燕, 于云江, 等. 城市污水处理厂污泥重金属污染状况及特征[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(6): 696-702.
- [ 12 ] 高定, 郑国砥, 陈同斌, 等. 城市污泥土地利用的重金属污染风险[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(15): 102-105.
- [ 13 ] 张灿, 陈虹, 余忆玄, 等. 我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1345-1350.
- [ 14 ] Oliver I W, McLaughlin M J, Merrington G. Temporal trends of total and potentially available element concentrations in sewage biosolids; a comparison of biosolid surveys conducted 18 years apart[J]. Science of the Total Environment, 2005, **337**(1-3): 139-145.
- [ 15 ] Wang C, Hu X, Chen M L, *et al.* Total concentrations and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in sewage sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, **119**(1-3): 245-249.
- [ 16 ] Yuan X Z, Huang H J, Zeng G M, *et al.* Total concentrations and chemical speciation of heavy metals in liquefaction residues of sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(5): 4104-4110.
- [ 17 ] 辛涛, 白莉萍, 宋金洪, 等. 施用城市污泥对杨树土壤化学特性及金属含量的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(11): 2722-2727.
- [ 18 ] Kidd P S, Domínguez-Rodríguez M J, Díez J, *et al.* Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge [J]. Chemosphere, 2007, **66**(8): 1458-1467.
- [ 19 ] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-110.
- [ 20 ] 杨瑶, 徐鹤, 尹建锋. 我国污水处理厂污泥资源化利用现状分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, **10**(5): 114-118.
- [ 21 ] 张雪英, 周顺桂, 周立祥, 等. 堆肥处理对污泥腐殖物质形态及其重金属分配的影响[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(1): 30-33.
- [ 22 ] 孙西宁, 张增强, 张永涛, 等. 污泥堆肥过程中重金属的形态变化研究——Sposito 浸提法 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(6): 2339-2344.
- [ 23 ] 林云琴, 周少奇. 城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态转化[J]. 生态环境, 2008, **17**(3): 940-943.
- [ 24 ] 孙西宁, 李艳霞, 张增强, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态变化[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(9): 1836-1841.
- [ 25 ] Walter I, Martínez F, Cala V. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses [J]. Environmental Pollution, 2006, **139**(3): 507-514.
- [ 26 ] 马学文, 翁焕新, 章金骏. 中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(8): 1306-1313.
- [ 27 ] 张丽丽, 李花粉, 苏德纯. 我国城市污水处理厂污泥中重金属分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 313-319.
- [ 28 ] Hoffmann G, Schingnitz D, Bilitewski B. Comparing different methods of analysing sewage sludge, dewatered sewage sludge and sewage sludge ash[J]. Desalination, 2010, **250**(1): 399-403.
- [ 29 ] Wen Y M, Cheng Y, Tang C X, *et al.* Bioleaching of heavy

- metals from sewage sludge using indigenous iron-oxidizing microorganisms[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, **13** (1): 166-175.
- [30] Wong J W C, Selvam A. Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(6): 980-986.
- [31] Wang X J, Chen L, Xia S Q, *et al.* Changes of Cu, Zn, and Ni chemical speciation in sewage sludge co-composted with sodium sulfide and lime[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(2): 156-160.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

**期刊:**作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

**图书:**作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

**会议文集:**作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

**学位论文:**作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

**报告:**作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

**专利:**专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:[hjcx@reces.ac.cn](mailto:hjcx@reces.ac.cn);网址:[www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn)

## CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing .....	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou .....	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM <sub>2.5</sub> and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan .....	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> in Urban Chengdu, China .....	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing .....	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing .....	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China .....	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region .....	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO <sub>2</sub> .....	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles .....	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion .....	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer .....	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River .....	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River .....	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins .....	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake .....	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas .....	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands .....	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body .....	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on the Release and Activation of Mercury in Sediment .....	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China .....	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park .....	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors .....	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater .....	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation .....	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment .....	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter .....	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge .....	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal .....	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region .....	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure .....	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong .....	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island .....	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO <sub>2</sub> and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates .....	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season .....	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain .....	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb .....	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site .....	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality .....	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years .....	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures .....	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO <sub>2</sub> Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry .....	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry .....	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

# 《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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