

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, 熊浩徽, 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)	

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¹, 陈德珍^{1*}, 戴晓虎²

(1. 同济大学热能与环境工程研究所, 上海 201804; 2. 城市污染控制国家工程研究中心(同济大学), 上海 200092)

摘要: 提出一种污泥预植重金属炭化后固定的概念, 并以重金属 Cu 为代表, 以 CuCl_2 的形式植入; 研究了在不同 Cu 预植浓度、不同温度下炭化后污泥本身以及额外添加的重金属在炭中的保留率以及稳定特性, 同时采用不同的浸出方法, 确定与污泥炭最终处置目标相关的最大可预植量。结果表明, 在污泥中 Cu 的预植量为 0.5% (质量分数, 以 Cu 元素计) 时, 经过热解炭化, 90% 以上的 Cu 都保留在污泥炭中, 其固定效果与温度有关, 400℃ 以上时, 炭化温度越高, Cu 越容易浸出。在污泥中预植重金属 Cu 存在最大容量限制, 最大可预植量与污泥炭最终处置目标有关, 若选择在卫生填埋场进行填埋, 则 Cu 的预植量不宜超过 0.5%。本研究提供了一种污泥包裹其他含重金属的废料共炭化实现无害化的新思路, 从而达到用污泥治废的效果。

关键词: 污泥; 重金属 Cu; 预植; 炭化; 稳定化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4359-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.044

Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char

DOU Xiao-min¹, CHEN De-zhen¹, DAI Xiao-hu²

(1. Thermal & Environment Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. National Engineering Research Center for Urban Pollution Control, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this research, a new method for sewage sludge (SS) disposal was introduced, by which heavy metals were implanted into sewage sludge before pyrolysis. Cu was adopted as the representative of heavy metals to test this process and was implanted in the form of CuCl_2 . Effects of Cu implanting concentration and reaction temperature on the residual ratio and immobilization of heavy metals in pyrolysis char were studied. Meanwhile, two leaching methods were employed with the purpose to determine the maximum capacity of heavy metal immobilization in the char. The primary research results showed that when the Cu implanting concentration was 0.5% (mass fraction), more than 90% of Cu remained in the char after carbonization, and the leachability of heavy metals in the char was related to pyrolysis temperature. Cu leaching from the char increased with increasing pyrolysis temperature. There was also a limitation for Cu implanting concentration in the sewage sludge, which was determined by the destination of the pyrolyzed char. If it went to sanitary landfill, the limitation would be 0.5%. The primary results showed that sewage sludge could be kneaded with other wastes containing heavy metals before pyrolysis to achieve co-processing.

Key words: sewage sludge; heavy metal Cu; implant; carbonization; immobilization

随着污水处理率的提高, 污泥的产量逐年增长, 成为目前废弃物处置焦点问题之一。污泥中的有害物质尤其是重金属是阻碍污泥无害化、资源化处理的重要因素^[1~4]。近年来污泥的热解炭化处理被广泛关注, 炭化作为一种焚烧的替代方法, 只留下比焚烧灰渣稍多的炭。所谓“炭化”, 是不供氧加热、以获得炭为目的的一种热解过程, 挥发分可以在线燃烧提供部分或者全部所需热量。一些学者就污泥热解产生的炭对稳定重金属的效果进行过研究, 发现污泥炭中的重金属比原始污泥中的形态更加稳定^[5~7], 污泥炭化后形成的污泥炭中重金属不易浸出^[7~10]。但是已有的研究主要集中于炭化固定污泥本身含有的重金属^[11~13], 而对于在污泥中额外添加的重金属通过炭化能否实现稳定化的研究很少报道。

本研究提出一种污泥重金属预植的概念, 即将

重金属盐或含重金属的废物预先加入到未处理的污泥中, 利用稠糊态的污泥与含重金属废物的良好捏合而使重金属植入污泥的组织结构中, 以期将预植后的污泥通过炭化方法实现污泥本身重金属以及后添加的重金属的固定、达到处置某些含有重金属危废的效果。此外, 利用污泥制造廉价活性炭或者催化剂的研究过程中通常需要负载一些重金属以达到活化的目的^[14~16], 而当这些廉价活性炭或者催化剂失效后所含的重金属是否引发额外的污染也是需要关注的问题, 以期这类廉价活性炭或者催化剂的制备以及废弃后的处理提供借鉴。

收稿日期: 2014-04-13; 修订日期: 2014-06-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063504)

作者简介: 窦晓敏(1989~), 女, 硕士, 主要研究方向为污泥热解稳定重金属, E-mail: doudxiaomin912@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chendezhen@tongji.edu.cn

本研究以污泥中含量较高的重金属 Cu 为代表,重点考察了污泥在不同预植浓度、不同炭化温度、不同浸出方法等条件下,重金属的保留以及稳定特性.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与制备

污泥取自上海市某污水处理厂,为生活污水污泥,初始含水率为 83.8%. 污泥的工业分析和元素分析见表 1,污泥本身所含的重金属含量见表 2,可见污泥中的重金属以 Zn 和 Cu 为代表;本例中 As 含量偏高.

表 1 污泥(干基)的元素分析、工业分析和热值

Table 1 Proximate, ultimate analysis and heating values of SS (dry basis)

工业分析/%				元素分析/%				热值
灰分(A)	挥发分(V)	水分(M)	固定碳(FC)	C	H	O	N	$Q_{\text{net}}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
27.28	63.56	0	9.16	37.53	5.85	19.88	5.37	15.65

表 2 污泥中重金属含量(以干污泥计)/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Contents of heavy metals in the sludge(dried SS)/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

重金属种类	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
含量	1.179 7	N. D. ¹⁾	0.029 7	0.925 6	0.024 5	0.057 5	2.956 9

1) N. D. 表示未检出

1.2 炭化实验

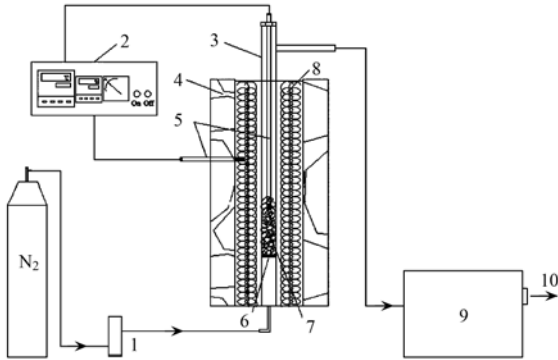
污泥炭化实验台如图 1 所示,由管式电加热炉、管式不锈钢反应器、温度控制器、挥发分燃烧装置等组成. 污泥在管式不锈钢反应器 3 中进行炭化,反应器一端设有充氮气口,另一端为出气口. 在充氮气管上装有流量计 1,以便控制通入的保护气的流量. 温控装置 2 采用 XST-191 数显温度调节仪,通过电压调节反应器中温度上升的快慢. 挥发分燃烧室 9 用于处理污泥炭化过程中产生的挥发性物质.

实验时将预植入 CuCl_2 的污泥干燥后在管式炉内进行炭化,每次用料 100 g 左右. 在炭化过程中整个系统通氮气保护,以维持惰性环境. 样品在炭化炉内升到设定温度时保温,使样品在该温度下充分炭化,直到不再产生挥发分. 炭化过程中产生的挥发分(油气)直接通入挥发分燃烧室中进行燃烧,燃烧后的尾气净化排出.

1.3 重金属浓度测试

为了检测样品中的重金属含量,对污泥及其污泥炭作消解预处理. 实验采用四酸($\text{HNO}_3\text{-HCl-HF-}$

预植重金属时,选用重金属 Cu 为代表,因为 Cu 不存在 Zn 那样酸碱两性溶出行为,对 pH 值不那么敏感,初步选作评价炭对重金属的固定效果的代表较合适. 采用易挥发的 $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (国药集团,分析纯),作为污泥中预植重金属 Cu 的来源,以便同时检验炭化过程中重金属的挥发程度. $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 易溶于水,在添加时,根据实验添加量,配成 CuCl_2 水溶液后,与污泥混合,并用转速为 $700\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 D2004W 型旋涡搅拌机搅拌约 1 h,使添加的 Cu 与污泥充分捏合,制成包裹有额外重金属 Cu 的污泥样品. 炭化前先将样品置于 105°C 的干燥箱中干燥至恒重.



1. 流量计; 2. 温度控制器; 3. 不锈钢管式反应器; 4. 保温陶瓷棉; 5. 热电偶; 6. 布风板; 7. 污泥样品; 8. 电加热层; 9. 挥发分燃烧室; 10. 尾气(CO_2 、 H_2O 等排放)

图 1 污泥热解实验装置示意

Fig. 1 Diagram of pyrolysis equipment

HClO_4) 微波消解法以实现固相的全消解,使用 Milestone ETHOS 1 微波消解仪,该微波消解仪具有消解速度快、操作简便安全、样品重现性好、同时可消解多个样品等优点.

消解前将样品风干,取一定量置于研钵中研细,过 100 目筛. 称取 $0.3\text{ g}(\pm 0.001\text{ g})$ 磨细的样品于聚

四氟乙烯消解罐中, 分别加入 5 mL HNO₃、4 mL HCl 及 3 mL HF, 于室温下放置 0.5 h. 然后将其装入高温消解罐中, 拧紧盖子, 放入微波消解仪中, 按照一定的升温顺序完成操作, 待温度降到 80℃ 以下时, 取出消解罐, 将样品置于聚四氟乙烯坩埚中, 加入 2 mL HClO₄, 在电热板上加热到 130℃ 赶酸, 至一定程度再加 1:1 硝酸 5 mL 微热, 最后得到澄清的液体, 定容于 100 mL 的容量瓶中, 待测定其中重金属的含量. 消解实验中每个样品均设有 2 个平行样.

1.4 浸出实验

本研究中样品的浸出毒性鉴别方法采用两种: 国家标准 HJ/T 299-2007^[17] 和 HJ/T 300-2007^[18]. HJ/T 299-2007 规定的方法适用于固体废物及其再利用产物的浸出毒性鉴别; 而 HJ/T 300-2007 规定的方法适用于检验样品是否可以进入卫生填埋场. 经过此双浸出方法的检验可以评价重金属的稳定效果, 并判定污泥植入重金属的炭是否适合再利用或者进入卫生填埋场. 浸出实验中每个样品均设有 2

个平行样.

样品浸出或消解处理后的溶液使用 ICP-Agilent720ES 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP, Agilent Technologies, Inc. USA) 检测, 每个样品测量 2 次. 由于挥发分在燃烧前有油分、在燃烧后体积膨胀, 难以准确测量它所携带的重金属量, 所以采用测量污泥和炭中重金属的含量并用质量平衡的方法来确定炭化过程中重金属的挥发量.

2 结果与分析

2.1 污泥中预植重金属 Cu 的稳定化容量

为了探索污泥对于 Cu 最大的可稳定容量及稳定效果, 污泥预植 Cu 时, CuCl₂·2H₂O 添加量由少到多依次进行实验. 表 3 表示污泥在炭化终温为 650℃、Cu 的预植的质量分数(干污泥中 Cu 元素的含量) 从 0.1% ~3.0% 条件下, 7 种重金属的浸出特征. 除植入 Cu 外, 其它重金属本来存在于污泥中.

表 3 不同 Cu 预植量的污泥热解炭(650℃) 重金属浸出/mg·L⁻¹

Table 3 Heavy metal leaching from char (650℃) obtained from SS implanted with different concentrations of Cu /mg·L ⁻¹								
浸出方法	Cu 元素在污泥中的 质量分数(干基)/%	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
HJ/T299	0.0	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	0.1	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	0.5	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	0.6	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	0.8	N. D.	N. D.	N. D.	0.005 3 ±0.000 2	0.025 5 ±0.001 0	N. D.	N. D.
	1.0	N. D.	N. D.	N. D.	0.005 0 ±0.000 2	0.019 8 ±0.000 8	N. D.	N. D.
	2.0	N. D.	N. D.	N. D.	0.005 9 ±0.000 2	0.024 8 ±0.001 0	N. D.	N. D.
	3.0	N. D.	N. D.	N. D.	0.006 2 ±0.000 2	0.026 1 ±0.001 0	N. D.	N. D.
GB 5085. 3-2007 ¹⁾		5	1	5	100	5	5	100
HJ/T300	0.0	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	0.1	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	0.5	N. D.	N. D.	N. D.	18.946 6 ±0.600 0	N. D.	N. D.	0.384 9 ±0.008 0
	0.6	0.012 0 ±0.000 4	N. D.	N. D.	42.002 3 ±1.100 0	0.081 7 ±0.002 0	N. D.	0.546 3 ±0.010 0
	0.8	0.002 7 ±0.000 1	N. D.	N. D.	48.613 5 ±1.900 0	0.125 5 ±0.003 0	N. D.	0.318 2 ±0.010 0
	1.0	0.013 5 ±0.000 4	N. D.	N. D.	51.372 5 ±1.800 0	0.095 7 ±0.003 0	N. D.	0.407 4 ±0.015 0
	2.0	0.046 4 ±0.000 8	N. D.	N. D.	136.574 1 ±2.000 0	0.026 6 ±0.001 0	N. D.	0.596 0 ±0.010 0
	3.0	0.047 4 ±0.001 0	N. D.	N. D.	174.214 4 ±2.500 0	0.025 3 ±0.001 0	N. D.	0.588 0 ±0.015 0
GB 16889-2008 ²⁾		0.3	0.15	4.5	40	0.5	0.25	100

1) GB 5085. 3-2007 参见文献[19], HJ/T299 是 GB 5085. 3-2007 指定的用于危险废物鉴别的浸出方法; 2) GB 16889-2008 参见文献[20], HJ/T300 是 GB 16889-2008 指定的固体废物进入生活垃圾填埋场入场标准的浸出方法

由表 3 可见, 依据 HJ/T 299 浸出方法和 GB 5085. 3-2007 标准, Cu 在污泥中的植入量直到 3.0% 都是安全的, 不属于危险废物. 而采用 HJ/T 300 浸出方法、依据 GB 16889-2008 的标准, 各重金属的浸出量更大, Cu 在污泥中的植入量直到 0.6% 以后就不再安全, 不能进入卫生填埋场. HJ/T 300

浸出方法更严格, 这主要是因为 HJ/T 300 是以醋酸/醋酸钠缓冲溶液为浸提剂, 其络合作用对金属浸出的影响明显, 且浸出后体系的酸度变化幅度较小, 即一直保持较高的酸性, 有利于金属的浸出^[21, 22]. 另一方面, 液固比较大, 也比较容易浸出. 但是 Cd 和 Cr 在两种浸出标准下都没有检测到浸出

量,这是因为它们的含量本来较低.

表 3 的数据表明在污泥炭中重金属 Cu 浸出量都随着污泥中 Cu 的预植量的增加而增大,但是预植量上限与污泥炭的去向有关. 以 650℃ 的污泥热解炭为例,如果用来固定含 Cu 的废物,Cu 的预植量直到 3.0%,污泥炭都不属于危险废物;而污泥炭要进入卫生填埋场,则 Cu 元素的预植量不宜超过 0.5%.

此外,从表 3 中浸出结果来看,在 HJ/T 300 浸出实验中,As 的浸出浓度随 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 添加量增加而呈现出较明显的增加,可能的原因是 Cu 的加入对污泥本身含有的 As 有一定的排挤作用. 而污泥中 Cu 的预植量的变化对于其它重金属的炭化稳定效果无规律性影响. 植入的重金属对污泥本身含有的重金属是否存在排挤等影响以及作用机制,仍有待后续的研究探索.

2.2 不同温度污泥炭中重金属的保留率

上述研究表明: Cu 的预植量在一定范围内,通过炭化后保留在污泥炭中的重金属可以实现稳定化. 但是预植重金属后的污泥,在炭化过程中,污泥炭中重金属的保留情况如何,需进一步研究. 需要注意的是,为了方便比较重金属在炭化前后保留情况,不同炭化温度下污泥炭中重金属的含量已经根据污泥炭

的产率(如表 4)换算为在对应污泥干基中的含量. 表 5 为 Cu 的预植量 0.5% 时,在温度为 400~800℃ 下炭化得到污泥炭中重金属的保留情况.

表 4 污泥炭产率

Table 4 Yield of pyrolyzed char at different temperatures					
炭化温度/℃	400	500	600	700	800
污泥炭产率/%	55.4	52.3	50.4	48.4	47.9

从表 5 中可见,预植入 Cu 的污泥,当炭化温度在 400~800℃ 时,90% 以上的 Cu 都保留在污泥炭中,即使植入时采用了挥发性很强的 CuCl_2 ,这表明在炭化过程中,不仅污泥本身的重金属向固体中富集^[23],其中包裹的额外植入的重金属也会保留于热解炭中. 而其它重金属如 Cr、Ni、Pb、Zn,在 400~800℃ 的炭化范围内,也绝大部分保留在炭中,但是随着炭化温度的升高,重金属的保留率略有降低,这与张铺^[5]、宋学顶^[24]等研究的未进行预植处理的原污泥的炭化结果一致. 而对于 As,在 400℃ 时,98% 都保留在热解炭中,当温度达到 500℃ 以上时,As 的保留率只有 16% 左右,这与 As 在还原性气氛下的挥发性有关^[5, 25]. 如果希望 As 在过程中减少挥发,则可以采用较低的炭化温度,同时炭化产生的挥发分中所含的重金属需要采取措施捕捉.

表 5 重金属在不同温度炭中的含量(dried SS)和保留率

Table 5 Heavy metals residual concentration (dried SS) & ratio in chars prepared from SS carbonized at different temperatures												
工况	As		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	含量	保留率	含量	保留率	含量	保留率	含量	保留率	含量	保留率	含量	保留率
	/mg·g ⁻¹	/%	/mg·g ⁻¹	/%	/mg·g ⁻¹	/%	/mg·g ⁻¹	/%	/mg·g ⁻¹	/%	/mg·g ⁻¹	/%
干污泥 +0.5% Cu	1.182 0 ± 0.020 0	—	0.057 5 ± 0.002 0	—	5.921 0 ± 0.070 0	—	0.024 7 ± 0.006 0	—	0.057 1 ± 0.001 0	—	2.951 2 ± 0.060 0	—
400℃ 污泥炭	1.166 1 ± 0.020 0	98.7	0.056 2 ± 0.001 0	97.7	5.530 6 ± 0.090 0	93.4	0.024 1 ± 0.003 0	97.5	0.055 5 ± 0.001 0	97.2	2.944 3 ± 0.060 0	99.8
500℃ 污泥炭	0.199 8 ± 0.005 0	16.9	0.055 5 ± 0.001 0	96.6	5.525 9 ± 0.100 0	93.3	0.023 6 ± 0.005 0	95.5	0.055 0 ± 0.001 0	96.3	2.728 4 ± 0.070 0	92.4
600℃ 污泥炭	0.198 9 ± 0.004 0	16.8	0.055 3 ± 0.001 0	96.2	5.511 0 ± 0.130 0	93.1	0.022 7 ± 0.004 0	91.9	0.054 7 ± 0.001 0	95.8	2.6171 ± 0.0600	88.7
700℃ 污泥炭	0.184 8 ± 0.004 0	15.6	0.054 9 ± 0.001 0	95.4	5.428 6 ± 0.090 0	91.7	0.020 6 ± 0.004 0	83.4	0.054 5 ± 0.001 0	95.4	2.550 0 ± 0.080 0	86.4
800℃ 污泥炭	0.183 8 ± 0.006 0	15.5	0.054 5 ± 0.001 0	94.8	5.392 5 ± 0.090 0	91.1	0.018 1 ± 0.003 0	73.3	0.054 3 ± 0.001 0	95.1	2.523 4 ± 0.070 0	85.5

2.3 不同炭化温度所得污泥炭中重金属的浸出

Cu 的预植量为 0.5%,在温度 400~800℃ 下炭化所得炭中重金属的浸出结果见表 6.

由表 6 可见,污泥炭中 Cu 的浸出量与炭化温度有关. 按照危险废物的判断标准,Cu 的预植量为 0.5%,在温度 400~800℃ 下炭化得到污泥炭均不属于危险废物. 但是判断是否可以进入卫生填埋场

时,炭中重金属随炭化温度的升高浸出量增大,且当炭化温度达到 800℃ 时,Cu 浸出浓度超过《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)中的规定限值. 这与前人研究的对污泥炭浸出的研究结果有一定出入,He 等^[7]、Kistler 等^[26]的研究都表示,炭化温度较高条件下得到的热解炭,对重金属的稳定性更强. 这可能是由于随着炭化温度升高,得到

的污泥炭的比表面积增加,微孔面积也增加^[27]。然而一方面使用的浸出程序不同,例如文献中使用 TCLP 浸出方法,而这里采用了 HJ/T300 方法;另一方面预植处理后的污泥炭重金属含量大幅提高,所以形成的比表面积和微孔面积有可能有别于自然状态的污泥炭化,这将在后续的研究中继续探讨。

表 7 为未预植重金属的原污泥及其热解炭中重金属的浸出结果,与表 6 结果对比可见,除了 Cu 之

外,其他重金属的浸出结果相差不大,As、Cd、Cr、Ni、Pb 均未检测到浸出数据,说明污泥炭本身是稳定的,Zn 在 HJ/T300 浸出程序下有一定浸出,且在 700℃ 之前呈现浸出浓度随炭化温度升高而下降的趋势,这与前人报道的结果一致,且与表 4 中的数据相差不大,仅仅有微弱的增加;这表明污泥预植重金属 Cu 后进行炭化,对污泥本身含有的其他重金属的稳定效果影响不大,仅有微弱的浸出促进效果。

表 6 污泥和不同温度炭中的重金属浸出/mg·L⁻¹

Table 6 Heavy metals leaching from SS and SS chars prepared at different carbonization temperatures/mg·L ⁻¹								
浸出方法	工况	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
HJ/T 299	干污泥 + 0.5% Cu	0.005 1 ± 0.001 0	N. D.	0.042 6 ± 0.000 8	0.132 2 ± 0.002 0	0.002 1 ± 0.000 1	N. D.	0.121 5 ± 0.002 0
	400℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	500℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	600℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	700℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	800℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
GB 5085.3-2007		5	1	5	100	5	5	100
HJ/T 300	干污泥 + 0.5% Cu	0.151 3 ± 0.002 0	N. D.	N. D.	137.311 7 ± 2.000 0	0.337 7 ± 0.004	N. D.	3.877 8 ± 0.070 0
	400℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	1.882 6 ± 0.010 0	N. D.	N. D.	1.242 5 ± 0.020 0
	500℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	16.226 2 ± 0.300 0	N. D.	N. D.	0.609 7 ± 0.009 0
	600℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	18.567 2 ± 0.400 0	N. D.	N. D.	0.335 2 ± 0.008 0
	700℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	27.037 8 ± 0.700 0	N. D.	N. D.	0.389 3 ± 0.007 0
	800℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	49.719 1 ± 0.700 0	N. D.	N. D.	0.578 3 ± 0.011 0
GB16889-2008		0.3	0.15	4.5	40	0.5	0.25	100

表 7 原污泥及其热解炭中重金属浸出结果/mg·L⁻¹

Table 7 Heavy metals leaching from SS without implantation and the chars prepared at different pyrolysis temperatures/mg·L ⁻¹								
浸出方法	工况	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
HJ/T299	干污泥	0.046 8 ± 0.000 8	N. D.	0.048 9 ± 0.000 7	0.010 4 ± 0.000 4	0.001 8 ± 0.000 0	N. D.	0.109 3 ± 0.002 0
	400℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	500℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	600℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	700℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	800℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
HJ/T 300	干污泥	0.139 6 ± 0.002 0	N. D.	N. D.	1.759 1 ± 0.010 0	0.346 5 ± 0.004 0	N. D.	3.101 7 ± 0.090 0
	400℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.989 5 ± 0.010 0
	500℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.403 0 ± 0.006 0
	600℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.231 2 ± 0.007 0
	700℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.232 1 ± 0.005 0
	800℃ 污泥炭	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.307 8 ± 0.005 0

3 结论

(1)在 Cu 的预植量为污泥的 0.5% (干基)时,在 400 ~ 800℃ 的范围内,以挥发性的 CuCl₂ · 2H₂O 植入污泥中的 Cu 有 91% 以上保留在污泥炭中,且在 Cu 的预植量不宜超过污泥的 0.5% (干基)时,Cu 在污泥炭中能被有效固定;400 ~ 700℃ 的污泥炭满足进入卫生填埋厂的标准。Cu 的预植量达污

泥的 3% (干基)时,污泥炭中 Cu 的浸出远低于危险固废的限值。

(2)对于特定性质的污泥,Cu 的植入浓度存在最大容量限制,且受炭化温度的影响。以进入填埋场为目标,炭化温度越高,重金属稳定性越差。但是在实验的温度范围内,植入了 Cu 的污泥炭均不属于危险废物。初步的研究表明,Cu 的植入对污泥中本来存在的其它重金属的浸出仅有微弱促进效果。

参考文献:

- [1] Xu G R, Liu M W, Li G B. Stabilization of heavy metals in lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **260**: 74-81.
- [2] Zhu Y, Zeng G M, Zhang P Y, *et al.* Feasibility of bioleaching combined with Fenton-like reaction to remove heavy metals from sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **142**: 530-534.
- [3] Chen T, Yan B. Fixation and partitioning of heavy metals in slag after incineration of sewage sludge [J]. *Waste Management*, 2012, **32**(5): 957-964.
- [4] Li L, Xu Z R, Zhang C L, *et al.* Quantitative evaluation of heavy metals in solid residues from sub-and super-critical water gasification of sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **121**: 169-175.
- [5] 张铺, 李海滨, 赵增立. 温度对污泥热解底灰中重金属残留形态分布的影响[A]. 见: 2005 年中国生物质能技术与可持续发展研讨会论文集[C]. 济南, 2005.
- [6] 何益得. 污水污泥中重金属在热解过程中行为研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [7] He Y D, Zhai Y B, Li C T, *et al.* The fate of Cu, Zn, Pb and Cd during the pyrolysis of sewage sludge at different temperatures [J]. *Environmental Technology*, 2010, **31**(5): 567-574.
- [8] Lu H L, Zhang W H, Wang S Z, *et al.* Characterization of sewage sludge-derived biochars from different feedstocks and pyrolysis temperatures [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, **102**: 137-143.
- [9] Fang L, Yuan N N, Wu Y G, *et al.* Evolution of heavy metals leachability and speciation in residues of sewage sludge treated by microwave assisted pyrolysis [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **171-181**: 833-837.
- [10] 高静涵. 污泥基吸附剂制备及重金属铬浸出特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] Song F Y, Gu L, Zhu N W, *et al.* Leaching behavior of heavy metals from sewage sludge solidified by cement-based binders [J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(4): 344-350.
- [12] Hernandez A B, Ferrasse J H, Chaurand P, *et al.* Mineralogy and leachability of gasified sewage sludge solid residues [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **191**(1-3): 219-227.
- [13] 张双全, 周家珍, 李静云, 等. 城市污泥热解过程中重金属的形态转化模拟研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, **41**(6): 959-963.
- [14] 余兰兰, 钟秦. 活性炭污泥吸附剂的制备研究[J]. *环境化学*, 2005, **24**(4): 401-404.
- [15] 刘涛, 魏先勋, 翟云波, 等. 用城市污水处理厂剩余污泥制备脱硝催化剂[J]. *化工环保*, 2007, **27**(1): 84-88.
- [16] 彭亮, 李彩亭, 李彩霞, 等. 以污泥为载体的金属氧化物脱硝催化剂的研究[J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(4): 522-526.
- [17] HJ/T 299-2007, 固体废物浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸溶液法[S].
- [18] HJ/T 299-2007, 固体废物浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法[S].
- [19] GB 5085. 3-2007, 危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别[S].
- [20] GB 16889-2008, 生活垃圾填埋场污染控制标准[S].
- [21] Van der Sloot H A, Van Zomeren A, Rietra R P J J, *et al.* Integration of lab-scale testing, lysimeter studies and pilot scale monitoring of a predominantly inorganic waste landfill to reach sustainable landfill conditions [A]. In: 8th Waste Management and Landfill Symposium [C]. Cagliari, 2001. 255-264.
- [22] 刘锋, 王琪, 黄启飞, 等. 固体废物浸出毒性浸出方法标准研究[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(6): 9-15.
- [23] Marrero T W, McAulry P, Sutterlin W R, *et al.* Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge [J]. *Waste Management*, 2004, **24**(2): 193-198.
- [24] 宋学顶, 陈德珍, 王中慧, 等. 污水污泥裂解目标产物及残焦促进植物生长的研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2604-2609.
- [25] 周立祥, 沈其荣, 陈同斌, 等. 重金属及养分元素在城市污泥主要组分中的分配及其化学形态[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(3): 269-274.
- [26] Kistler R C, Wldmer F, Brunner P H. Behavior of chromium, nickel, copper, zinc, cadmium, mercury, and lead during the pyrolysis of sewage sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 1987, **21**(7): 704-708.
- [27] 宋学顶. 污泥热解工艺研究及污泥炭的利用[D]. 上海: 同济大学, 2013.

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