

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)

北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)

上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印 (1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪 (1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)

1株 *Arthrobacter arilaitensis* 菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)

海洋菌株 γ 3 的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)

《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响

王兴栋¹, 林景江¹, 李智伟¹, 赵焕平², 余广炜¹, 汪印^{1*}

(1. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市污染物转化重点实验室, 厦门 361021; 2. 台湾中原大学生物环境工程系, 中坜 32023)

摘要: 研究了水热法预处理城市污泥时反应时间对污泥脱水性能和污泥中 N、P、K 元素及重金属迁移行为的影响。结果表明, 在 160℃ 的温度下, 随着水热反应时间(30 ~ 120 min)的增加, 污泥脱水性能明显提高, 污泥中的 N 元素向水热液中转移量逐渐增加, P 元素几乎全部残留在固相中。虽然 K 元素较 P 易转移到液相中, 但多数 K 元素(57% ~ 62%) 还是残留在污泥固相中。重金属的迁移和元素本身的性质有关, 其随着水热处理时间的增加而呈现出不一致的迁移规律: 相对于原污泥, Cu、Zn、Cr 和 Pb 的含量在脱水污泥中增加程度明显, As 增加缓慢, 而对于 Ni 和 Cd 则先低于原污泥中重金属含量, 而后随着水热处理时间的延长不断增加。

关键词: 污泥; 水热处理; 脱水性能; 氮; 磷; 钾; 重金属

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1048-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.033

Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge

WANG Xing-dong¹, LIN Jing-jiang¹, LI Zhi-wei¹, CHAO Huan-ping², YU Guang-wei¹, WANG Yin^{1*}

(1. Key Laboratory of Urban Pollutant Conversion, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Department of Bioenvironmental Engineering, Chung Yuan Christian University, Chung-Li 32023, China)

Abstract: Hydrothermal treatment (HTT) of sewage sludge was conducted, focusing on the influence of HTT time on the dewaterability of sludge and transformations of elements N, P, K and heavy metals. The results showed that at a hydrothermal temperature of 160℃, with HTT time increasing from 30 to 120 min, the sludge dewatering performance was significantly improved. The transfer rate of N element in the sludge transferring to aqueous product increased gradually. Almost all of P element remained in the solid phase, and most of K element (57% - 62%) was still in the solid phase although it was more easily transferred to the liquid phase than P element. The transferring behavior of heavy metals during the HTT related to their own properties, and their transferring behaviors were different with the increase of HTT time. Compared with the raw sludge, the contents of Cu, Zn, Cr and Pb in the dewatered sludge increased significantly, As increased slowly, while Ni and Cd were first lower than those in raw sludge, and then increased with the prolonging HTT time.

Key words: sewage sludge; hydrothermal treatment; dewaterability; nitrogen; phosphorus; potassium; heavy metals

随着我国经济和城镇化进程的快速发展, 城市污泥发生量迅速增加, 对环境的压力也越来越大。目前污泥的处置方式主要是填埋、焚烧和堆肥, 但由于城市污泥含水率高、脱水性能差和重金属含量高原因^[1], 致使 60% 左右的污泥仍未得到有效处理处置。另一方面, 由于城市污泥中含有大量的有机物和 N、P、K 等对植物生长有益的营养成分, 它又是一种廉价的可利用资源^[2, 3]。因此如何有效提高城市污泥脱水性能和固化重金属是污泥资源化利用的关键问题。

水热处理作为一种高效的污泥脱水技术受到越来越多的关注。水热处理技术是通过高温高压饱和蒸汽作用使污泥颗粒碰撞几率增大, 使微生物细胞破碎、破坏胶体结构, 束缚水含量显著降低并析出为自由水, 最终使污泥的脱水性能得到大幅提高。

目前国外系统开展污泥水热脱水应用研究的代表之一是日本东京工业大学的吉川邦夫 (Yoshikawa Kunio) 教授团队^[4-9]。该团队研究得到的最佳水热处理工艺条件是: 反应终温在 170 ~ 190℃ 范围内和反应时间为 30 min^[8], 利用板框压滤机可以将水热处理后的污泥含水量降至 50% 以下, 压滤后的污泥自然风干 24 h 后含水量低于 20%, 而且污泥经水热处理后所得固体中碳含量和热值均随着水热反应终温和反应时间的递增而增加。国内的典型代表, 清华大学王伟教授团队详细分析了水热改性污泥水分

收稿日期: 2015-08-21; 修订日期: 2015-10-16

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-16); 厦门市科技创新平台项目 (3502Z2013018); 福建省工业引导性重点项目 (2015H0044)

作者简介: 王兴栋 (1985 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥资源化利用, E-mail: xdwang@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: yinwang@iue.ac.cn

布特性与脱水性能的变化关系,发现在 170℃ 下水热改性的污泥压滤脱水后含水率可降低至 50% 左右^[10~12],在 10 t·d⁻¹ 的示范工程上运行 18 个月发现 180℃ 下反应 30 min 后的市政污泥经板框压滤后直接脱水到 37% 左右. 另一方面,孙雪萍等^[13]研究污泥热水解前后 Zn、Cu、Cd 和 Pb 的形态分布时发现,经热水解后的污泥中重金属主要存在于固相中,且主要以残渣态形式存在,迁移性较水解前有明显的降低. Liang 等^[14]也发现经水热处理后污泥中的重金属主要保留在固相中. 由此可见,水热处理技术不但能够显著提高污泥的脱水性能,还具有使污泥中的重金属以残渣态存在的倾向. 但是,目前的污泥水热脱水实验研究和中试基本都在相对较高的水热反应终温(180~200℃)下开展,会导致运行成本偏高,特别

是污泥中的营养元素 N、P 及 K 在水热处理过程中的迁移行为还未见有系统的研究报道.

因此,本文在较低的水热反应终温 160℃ 下,研究水热处理时间对污泥脱水性能影响,系统考察了污泥中 N、P、K 在水热处理过程中从固相向液相中的迁移规律,以及 Zn、Cu、Pb、Cr、Ni、Cd 和 As 重金属的迁移行为.

1 材料与方法

1.1 实验材料

原污泥(含水率 85.25%)采自厦门市某污水处理厂,污水厂采用 DE 氧化沟处理工艺,污泥处理采用重力浓缩后离心脱水. 污泥在搅拌机上高速均质化后于 4℃ 冰柜中保存待用. 实验污泥的基本性质见表 1.

表 1 试验污泥的物化性质¹⁾

Table 1 Properties of the sewage sludge sample

工业分析/%			元素分析/%					HHVs /MJ·kg ⁻¹
VM	Ash	FC	C	H	N	S	O ²⁾	
44.71	48.23	7.07	24.67	4.65	4.51	0.95	20.52	11.61

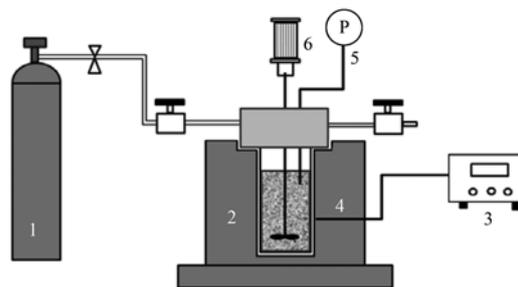
1) 原料为不含水的干污泥粉; 2) O 元素含量用差减法计算

1.2 水热实验装置及方法

污泥水热处理(hydrothermal treatment, HTT)实验在 2 L 的高压反应釜内(河南巩义市英峪博研仪器设备厂,FCF-2L 型)进行,装置示意图如图 1 所示. 污泥水热处理方法为:称取样品污泥 1.3 kg(记为 m_1)转移到高压反应釜中,反应釜升温前,通入 99.99% 的氩气以排除其中氧气,形成惰性气氛,然后拧紧气阀,使反应釜处于密闭状态. 在反应过程中,采用电加热的方式在 200 r·min⁻¹ 的搅拌速度下使物料升温,待反应釜中心温度升至设定温度 160℃ (0.8 MPa),维持一定恒温时间(分别为 30、60、90 和 120 min)后关闭电源并降温到室温. 打开反应釜收集釜内的水热处理产物,利用板框压滤机(山东景津环保设备有限公司,XAYG0.6/250-U 型)将液体与固体压滤分离,操作条件为 10 MPa 下压滤 10 min. 压滤所得的固相产物在鼓风箱中 105℃ 恒温烘干至恒质量(记为 m_2),计算固体回收率($\alpha = [m_2 / (m_1 \times 0.8525)] \times 100$,以%计). 再将干燥固体研磨后过 0.15 mm 筛子,保存于干燥箱中备用.

1.3 产物分析

实验样品的工业分析参照《煤的工业分析方法》(GB/T 212-2001)^[15]进行. C、H、N、S 用元素分析仪(vario MAX,德国)测定^[16]. 水热液的氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)和硝态氮



1. 氩气钢瓶; 2. 加热系统; 3. 显示器及控制装置;
4. 电热偶; 5. 压力表; 6. 磁力搅拌装置

图 1 水热处理实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the hydrothermal treatment apparatus

(NO₃⁻-N)检测分别采用纳氏试剂法、重氮化偶合法和麝香草本法完成,水热液的总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解后再采用紫外分光光度法测定. 实验样品中的常量元素,包括 K 和 P 等,通过 ICP-OES (Perkin-Elmer Optima 7000 DV, Downers Grove, IL)测定. 微量重金属元素,包括 Zn、Cu、Cr、Ni、Pb、As 和 Cd 等,通过 ICP-MS (Agilent Technologies, 7500CX, Santa, Clara, CA)测定. 为了能够满足 ICP-OES 与 ICP-MS 对样品的要求,对约 0.2 g 左右的样品在微波消解系统上(CEM-Mars, V. 194A05)进行 HNO₃/HClO₄ 消解^[17],从而得到浓度均一的液态样本. 实验样品中磷的形态的测定采用 SEM 法测定,SEM 法^[18]将所提取的磷分为 5 种:总磷

(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、非磷灰石无机磷(NaOH-P)和磷灰石无机磷(HCl-P)。

2 结果与讨论

2.1 水热处理时间对污泥脱水性能的影响

为了降低工程上水热处理成本,本研究试图在相对较低的水热处理温度 160℃ 下,通过优化处理时间来达到较好的污泥脱水性能。图 2 为污泥在 160℃ 下不同水热处理时间处理后的脱水性能变化。与其他研究者相似^[19],污泥含水率均随水热处理时间延长而降低。从中可知,水热处理后的污泥经压滤脱水后含水率在 30 min 时为 53.46%,60 min 时降低到 43.17%,60 min 以上污泥含水率下降缓慢,120 min 时含水率降至 36.63%,因此污泥在 160℃ 下的最佳水热处理时间为 60 min。Jiang 等^[8]研究发现,污泥在最佳水热工艺条件(190℃ 和 30 min 时间)下处理所得污泥液经机械脱水后含水率大约在 55% 左右。Neyens 等^[20]也报道了相类似的结果。而本研究在适合水热工艺条件(160℃ 和 60 min 时间)下处理经板框压滤后的污泥含水率能够降到接近 40%,这个程度的含水污泥已经可以满足后续资源化利用,如作为燃料的要求。其原因可能是各污泥的性质有所不同所致。

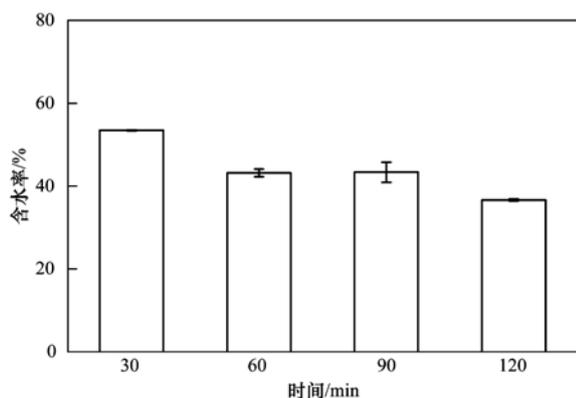


图 2 水热处理时间对污泥脱水性能的影响

Fig. 2 Effect of the HTT time on the dehydration performance of sewage sludge

2.2 水热处理时间对污泥中氮磷钾的影响

2.2.1 水热处理时间对 N 元素迁移的影响

污泥中氮的存在形态主要是蛋白质氮^[21],其次是吡啶氮。表 2 为污泥水热处理后固相产物的元素分析。对照表 1 发现,经水热处理后固相产物中 N 元素含量较原污泥均有降低,并随着水热处理时间的增加而递减。水热处理时间为 60 min 时的 N 元素含量为 3.07%,比原污泥中的 4.51% 降低了

31.82%。原因为蛋白质在高温高压下首先水解为氨基酸,氨基酸再经过一系列反应分解为氨等含氮类化合物进入液相^[22]。并随着水热时间的延长,蛋白质和氨基酸的分解量逐渐增加,更多的氨等含氮类化合物进入液相。

表 2 水热处理后污泥固相产物的元素分析

Table 2 Ultimate elemental analysis of HTT sludge

时间/min	元素分析/%				
	C	H	N	S	O ¹⁾
30	20.87	3.87	3.19	0.88	13.09
60	20.65	3.69	3.07	0.82	14.40
90	20.37	3.76	3.01	0.87	13.51
120	19.98	3.70	2.84	0.87	12.63

1) O 元素含量用差减法计算

水热液中总氮(TN)一般包括无机氮和有机氮(Org-N),无机氮又包括氨氮(NH_4^+ -N)、亚硝酸盐氮(NO_2^- -N)和硝酸盐氮(NO_3^- -N)。本研究中亚硝酸盐氮(NO_2^- -N)采用重氮化偶合法测定,其检测下限是 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。本研究水热液中亚硝酸盐氮浓度低于检出值,因为具有一定还原性的 NO_2^- 不稳定,在水热过程中少量的 NO_2^- 氧化为 NO_3^- 。表 3 给出了不同水热处理时间后所得水热液中总氮、氨氮和硝酸盐氮的变化情况,其中有机氮(N-Org)的浓度是由总氮浓度减去无机氮浓度计算所得。可以看出,随着水热处理时间的增加,水热液中总氮浓度不断增加,例如当处理时间由 30 min 增加到 120 min 时,水热液中总氮浓度由 $3788 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $5637 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这与之前固体产物中氮元素含量不断降低的结果相吻合。氨氮浓度在 60 min 前基本保持不变,但在 120 min 时有所增加。是因为蛋白质水解所得的氨基酸与糖类物质的水解物发生 Maillard 反应,并生成含氮杂环化合物。蛋白质氮是污泥中氮的主要存在形态,处理时间增加使更多的蛋白质水解为氨基酸并进一步转化为氨氮等化合物,致使氨氮浓度增加。硝酸盐氮的浓度远低于总氮和氨氮的浓度,在 $87 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化,说明水热处理时间对硝酸盐氮浓度影响不大。有机氮浓度的增加

表 3 水热液中的 N 元素的组成分析

Table 3 Compositional analysis of N contents in aqueous product

时间/min	N 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
	TN	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	Org-N
30	3788	1513	100	2175
60	4917	1500	107	3310
90	5420	1530	87	3803
120	5637	1695	120	3822

是由于 Maillard 反应产生的含氮杂环化合物和吡啶氮水解所得可溶性含氮有机物不断增加所致。

从图 3(a) 所示的水热处理后 N 元素在污泥固相和液相中的分布发现, 污泥中 N 元素从固相转移到液相中的量随着水热处理时间的增加而增大, 转移率从 30 min 的 39.85% 增加到 120 min 的 53.38%。

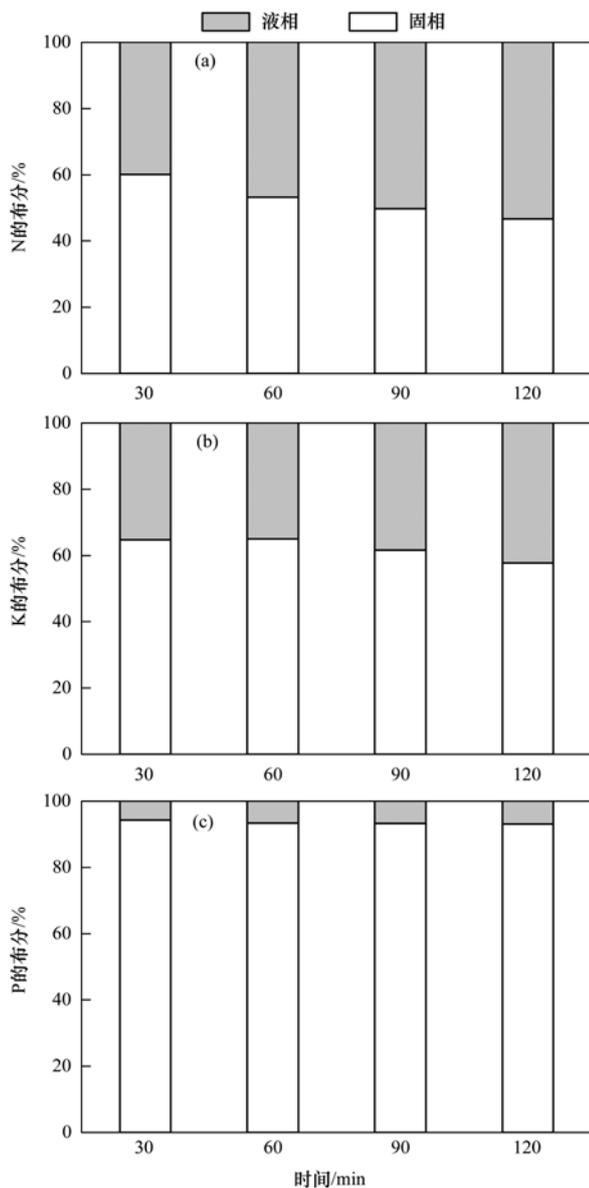


图 3 水热处理后污泥中的氮元素、钾元素和磷元素在固相和液相中的分布

Fig. 3 Element distribution in solid and liquid phases of sludge after HTT; N element; K element; P element

2.2.2 水热处理时间对 K 元素迁移的影响

污泥中钾的形态按照溶于水的难易程度可分为水溶性和代换性钾(速效性钾)、非代换性钾(缓效性钾)以及矿物质钾(难溶性钾)。图 4(a) 所示为水

热处理时间对污泥固体产物和水热液中 K 的浓度影响情况。可以看出, 经水热处理后, 固相产物中的 K 含量均低于原污泥固体中 K 的浓度。在 60 min 之前, 固体产物中 K 的浓度基本保持不变, 而后则逐渐缓慢降低。对应地, 水热液中 K 的浓度则随水热处理时间的增加逐渐缓慢增加, 例如从 30 min 时的 $0.46 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 120 min 时的 $0.54 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。说明在水热处理过程中, 污泥中速效性 K 几乎完全溶入水热液中, 且随着时间的增加, 缓效性 K 也缓慢转变为速效性 K 进入水热液。因此从图 3(b) 中不难看出, 污泥中 K 元素从固体产物转移到水热液的转移率随着时间的增加而缓慢增加, 但仍有 57.70% 以上 K 元素残留在固体产物中。

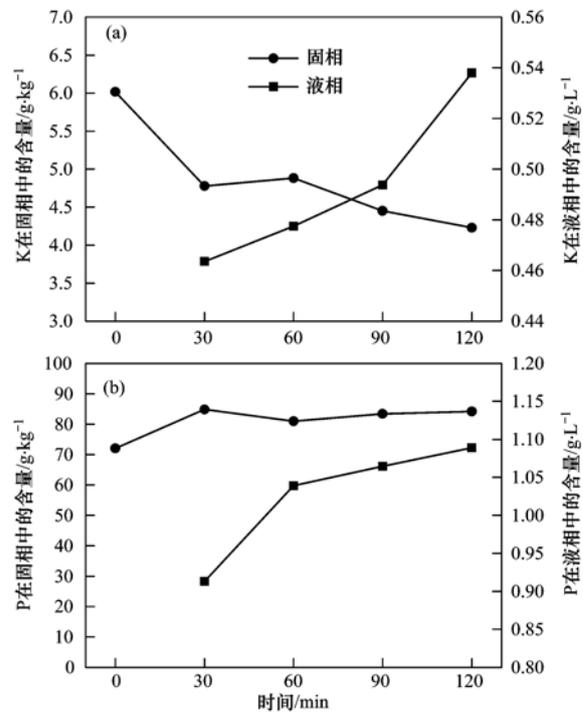


图 4 固体产物和水热液中钾和磷浓度的变化情况

Fig. 4 Concentration changes of K and P in solid and aqueous products

2.2.3 水热处理时间对 P 元素迁移的影响

污泥中 P 含量通常高达 1% ~ 10%, P 元素是污泥中营养元素的重要组成部分^[23]。若污泥作为肥料或者土壤改良剂长期施用会导致 P 在土壤中的大量富集, 增加生物可利用态 P 向地表水流失的风险。污泥中 P 的含量和稳定性决定 P 的环境风险性。非磷灰石无机磷(NaOH-P)与 Fe、Mn、Al 氧化物及其氢氧化物结合的磷, 属于不稳定态磷。磷灰石无机磷(HCl-P)一般为与 Ca 结合的稳定磷。有机磷(OP)由磷脂、DNA 和磷酸单酯组成, 并在环境中

呈现出不同的稳定性. Hamdan 等^[24]研究发现,与含有大量含氧羟基有机物结合的 OP 稳定性较差,而与含有烷基和芳香族有机物结合的 OP 稳定性较强. 通常 NaOH-P 和 OP 的含量之和可粗略认为是潜在的可释放 P,即生物有效 P. 生物有效 P 是指能够以溶解态磷酸盐释放,并被植物生长所吸收利用的那部分 P,也是易向地表水流失的 P.

水热处理时间对污泥固体产物和水热液中 P 的浓度影响如图 4(b) 所示. 污泥固相产物中 P 的含量较原污泥固体中均有所增加,如在 60 min 时,固体产物中的 P 含量较原污泥固体中增加了 12.40%. 在处理时间范围内,固体产物中 P 的含量在 81.01 ~ 84.86 g·kg⁻¹ 之间变化,说明水热处理时间的增加对固体产物中 P 的含量影响不大. 而水热液中 P 的浓度有缓慢增加的趋势,例如从 30 min 时的 0.91 g·L⁻¹ 增加到 120 min 时的 1.09 g·L⁻¹,说明污泥中不稳定性 P 从固相转移到液相中的量有所增加. 这与固体产物中 P 的含量随处理时间增加而变化不大有点不一致. 可能是由于固体回收率随着水热处理时间的增加而降低所致,本文中处理时间 30、60、90 和 120 min 时对应的固体回收率分别为 82.87%、82.47%、81.03% 和 77.82%. 进一步从图 3(c) 中可知,污泥中 P 元素绝对量从固体产物转移到水热液中的比率随着时间缓慢增加,但有 93.06% 以上的 P 元素残留在固体产物中. 污泥在水热处理前,细胞内主要由无机元素和有机物组成,无机元素主要有 Na、Mg、Ca、P、K、Fe 等, P 元素较易与 Fe、Mn、Al 氧化物及其氢氧化物结合为沉淀物残留在固体中,而大量的 Na、Mg、K 等无机元素会随着细胞的破裂释放到液体中. 对于细胞中的有机物在水热过程中发生一系列反应,主要以小分子化合物(如氨氮等)进入液相. 可见水热处理时间对 P 元素的迁移影响不大.

图 5 为固体产物中各种形态 P 的分布情况. 经水热处理后,污泥固体中的 OP 和 HCl-P 所占 TP 的比例均降低,但水热处理时间的增加对其占比影响不大. 由此可见,污泥中的 P 在水热处理后虽然几乎全部富集在固体产物中,但是稳定性 P (NaOH-P) 占 TP 的比例有所增加,意味着水热处理有利于将部分不稳定性 P 转化为稳定性 P.

2.3 水热反应时间对污泥中重金属迁移的影响

污泥中的重金属是制约污泥资源化利用的重要因素,其在固相产物中的含量随水热处理时间的变化如图 6(a) 所示. 可以看出,随着水热处理时间的

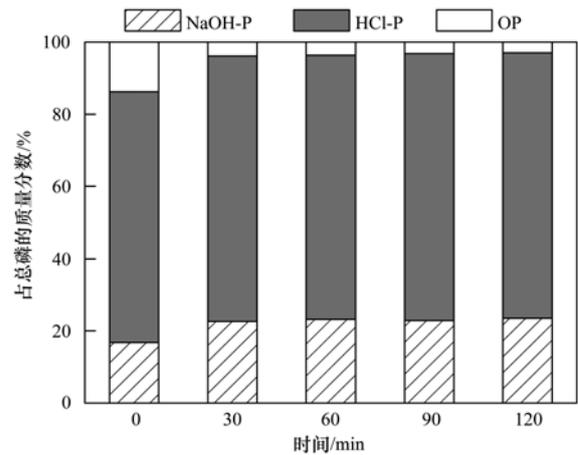


图 5 各种形态 P 在固体产物中的分布

Fig. 5 Distribution of different states of P in solid product

延长,污泥固相中的重金属含量呈现出不一致的变化规律:水热处理时间越长,Cu、Zn、Cr 和 Pb 在固相中的富集程度越高,相对于原污泥分别增加 23.87% ~ 25.38%、14.94% ~ 17.33%、12.25% ~ 23.85% 和 7.37% ~ 24.68%. As 的含量增加缓慢,相对于原污泥增加了 0.18% ~ 0.53%. 而对于 Ni 和 Cd 的含量在水热处理 90 min 之前均低于原污泥中的含量,随处理时间的继续延长出现增加趋势.

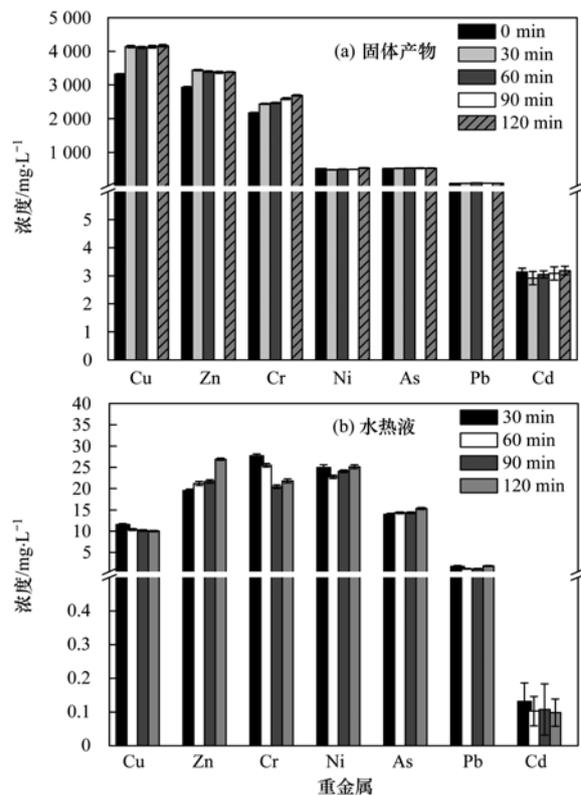


图 6 固体产物和水热液中重金属浓度的变化情况

Fig. 6 Concentration changes of heavy metals in solid product and aqueous product

由图 6(b) 可知, 水热液中重金属含量均低于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水热处理后进入液相中的重金属很少。

表 4 给出不同水热处理时间后污泥中的重金属在固相和液相中的质量分数。可以看出, 经水热处理后, 污泥中 Cu、Zn、Cr 和 Pb 有 90% 以上留在固相中, As 和 Cd 也有 80% 以上残留在固相中, 而 Ni 有 77% 以上留在固相中。有关研究发现, 污泥中重金属的分布与热处理过程和金属元素的特性等因素有关。Yoshida 等^[25] 在研究生活污泥炭化实验中发现低挥发分的 As 和 Hg 在炭化过程中易于挥发, 而高沸点的重金属如 Pb、Zn、Cu 等则保存在污泥炭中。本研究中, 可能由于水热处理温度较低, 因此污泥中重金属基本全部保留在污泥固相中, 并随着反应时间的增加呈现出不同的提高趋势。综上所述, 污泥中重金属在水热过程中的迁移行为与元素本身的性质有关。对于水热处理对重金属元素的固化作用和不同水热条件下的复杂变化, 将在今后的工作中进一步明确。

表 4 水热处理后污泥中的重金属在固相产物和水热液中的分布/%

Table 4 Heavy metals distribution in solid and aqueous products of sludge after HTT/%

元素	相态	时间/min			
		30	60	90	120
Cu	固相	98.45	98.63	98.64	98.63
	液相	1.55	1.37	1.36	1.37
Zn	固相	96.91	96.68	96.52	95.62
	液相	3.09	3.32	3.48	4.38
Cr	固相	93.99	94.62	95.76	95.54
	液相	6.01	5.38	4.24	4.46
Ni	固相	77.55	79.91	78.56	78.78
	液相	22.45	20.09	21.44	21.22
As	固相	86.93	87.12	86.78	85.72
	液相	13.07	12.88	13.22	14.28
Pb	固相	89.26	93.62	92.89	89.17
	液相	10.74	6.38	7.11	10.83
Cd	固相	79.78	84.36	83.61	84.92
	液相	20.22	15.64	16.39	15.08

3 结论

(1) 随着水热处理时间 (30 ~ 120 min) 的增加, 污泥脱水性能明显提高。在较适合水热工艺条件 (温度: 160°C , 时间: 60 min) 下处理经压滤后的污泥含水率能够降至 43.17%。

(2) 水热处理时间对污泥中 N 元素的迁移影响最大, 经水热处理后污泥中 N 元素从固相转移到液相中的转移率也不断增加; 污泥中 K 元素向水热液

中的转移率随时间的增加而缓慢增加, 但仍有 57.70% 以上 K 元素残留在固体产物中; 水热处理时间对 P 元素的迁移影响不大, 有 93.06% 以上的 P 残留在固体产物中, 水热处理有利于将部分不稳定性 P 转化为稳定性 P。

(3) 随着水热处理时间的增加, 污泥固体产物中的重金属含量呈现出不一致的变化规律: 相对于原污泥, Cu、Zn、Cr 和 Pb 的富集程度明显、有 90% 以上留在固相中; As 和 Cd 有 80% 以上残留在固相中, 而 Ni 有 77% 以上留在固相中。

参考文献:

- [1] 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**(3): 1345-1350.
- [2] Zhu Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in china and the UK[J]. Chemosphere, 2001, **42**(2): 221-225.
- [3] 白莉萍, 齐洪涛, 伏亚萍, 等. 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[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4648-4654.
- [4] Areprasert C, Zhao P T, Ma D C, *et al.* Alternative solid fuel production from paper sludge employing hydrothermal treatment [J]. Energy & Fuels, 2014, **28**(2): 1198-1206.
- [5] Zhao P T, Ge S F, Yoshikawa K. An orthogonal experimental study on solid fuel production from sewage sludge by employing steam explosion[J]. Applied Energy, 2013, **112**: 1213-1221.
- [6] Zhao P T, Shen Y F, Ge S F, *et al.* Clean solid biofuel production from high moisture content waste biomass employing hydrothermal treatment [J]. Applied Energy, 2014, **131**: 345-367.
- [7] Zhao P T, Shen Y F, Ge S F, *et al.* Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization [J]. Energy Conversion and Management, 2014, **78**: 815-821.
- [8] Jiang Z L, Meng D W, Mu H Y, *et al.* Experimental study on hydrothermal drying for sewage sludge in large-scale commercial plant [J]. Journal of Environmental Science and Engineering, 2011, **5**: 900-909.
- [9] Jiang Z L, Meng D W, Mu H Y, *et al.* Study on the hydrothermal drying technology of sewage sludge [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, **53**(1): 160-163.
- [10] 乔玮, 王伟, 黎攀, 等. 城市污水污泥微波热水解特性研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 152-157.
- [11] 王治军, 王伟, 高殿森, 等. 高温和中温 ASBR 处理热水解污泥的对比 [J]. 环境科学, 2005, **26**(2): 88-92.
- [12] 荀锐, 王伟, 乔玮. 水热改性污泥的水分布特征与脱水性能研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 851-856.
- [13] 孙雪萍, 王安亭, 李新豪, 等. 热水解法处理污泥过程中重金属的迁移规律 [J]. 中国给水排水, 2010, **26**(17): 66-68,

- 72.
- [14] Liang Y J, Chai L Y, Min X B, *et al.* Hydrothermal sulfidation and floatation treatment of heavy-metal-containing sludge for recovery and stabilization [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **217-218**: 307-314.
- [15] 薛香玉, 陈德珍, 戴晓虎, 等. 基于重金属安全性的污泥水热处理温度选择[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, **42**(12): 1879-1885, 1896.
- [16] Kumar V, Chopra A K. Accumulation and translocation of metals in soil and different parts of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) amended with sewage sludge [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, **92**(1): 103-108.
- [17] Khan S, Chao C, Waqas M, *et al.* Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(15): 8624-8632.
- [18] Xu D, Ding S M, Li B, *et al.* Speciation of organic phosphorus in a sediment profile of Lake Taihu I: Chemical forms and their transformation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(4): 637-644.
- [19] Ma H L, Chi Y, Yan J H, *et al.* Experimental study on thermal hydrolysis and dewatering characteristics of mechanically dewatered sewage sludge [J]. *Drying Technology*, 2011, **29**(14): 1741-1747.
- [20] Neyens E, Baeyens J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **98**(1-3): 51-67.
- [21] Chen Y G, Jiang S, Yuan H Y, *et al.* Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs [J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 683-689.
- [22] Rogalinski T, Herrmann S, Brunner G. Production of amino acids from bovine serum albumin by continuous sub-critical water hydrolysis [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2005, **36**(1): 49-58.
- [23] Plaza C, Sanz R, Clemente C, *et al.* Greenhouse evaluation of struvite and sludges from municipal wastewater treatment works as phosphorus sources for plants [J]. *Agricultural and Food Chemistry*, 2007, **55**(20): 8206-8212.
- [24] Hamdan R, El-Rifai H M, Cheesman A W, *et al.* Linking phosphorus sequestration to carbon humification in wetland soils by ³¹P and ¹³C NMR spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(9): 4775-4782.
- [25] Yoshida T, Antal M J Jr. Sewage sludge carbonization for terra preta applications [J]. *Energy & Fuels*, 2009, **23**(11): 5454-5459.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行