环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.11
第41卷 第11期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第11期
2020年11月15日

目 次

中国工业源挥发性有机物排放清单 …… 梁小明，孙西勃，徐建铁，叶代启，陈来国(4767)
中国水泥排放清单及分布特征 …… 汤铃，薛晓达，伯鑫，郭静，王鹏，翟文慧，崔维庚，汪寿阳，李时蓓，董广霞(4776)
环境空气 $PM_{2.5}$ 化学组分监测数据审核指标的建立：以长三角地区为例 …… 张哲，乔利平，周敏，朱书慧，郭会琴，王红丽，楼晟荣，陶士康，陈长虹(4786)
南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 …… 张毓秀，于兴娜，刘偲嘉，安俊琳，张程(4803)
郑州市 $PM_{2.5}$ 化学组分的季节变化特征及来源解析 …… 张剑飞，姜楠，段时光，孙有昌，郝祺，张瑞芹(4813)
山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素特征、来源及健康风险评估 …… 李雪梅，牟玲，田妹，郑利荣，李杨勇(4825)
2000～2019年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征 …… 夏晓圣，汪军红，宋伟东，程先富(4832)
北京地区偏南风和偏东风条件下污染特征差异 …… 尹晓梅，乔林，朱晓婉，郭恒，刘湘雪，熊亚军(4844)
基于天气背景天津大气污染输送特征分析 …… 蔡子颖，杨旭，韩素芹，姚青，刘敬乐(4855)
基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 …… 吴进，李琛，马志强，孙兆彬，朱晓婉，董璠(4864)
基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 …… 孙佳宁，谢绍东(4874)
芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 …… 高亢，章慧，刘梦迪，赵晓宇，吴婷，贾其娜(4885)
密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 …… 张微微，李晓娜，王超，赵春桥，史瑞双(4895)
北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 …… 陈吉吉，郭婧，徐蘇士，陶蕾，荆红卫(4905)
2009～2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 …… 辛华荣，朱广伟，王雪松，李骏，陆隽(4914)
雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 …… 张宏鑫，吴亚，罗炜宇，陈雯，刘怀庆(4924)
基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 …… 孙厚云，卫晓锋，贾凤超，李多杰，李健，李霞，殷志强(4936)
会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价 …… 李军，邹胜章，梁永平，林永生，周长松，赵一(4948)
太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 …… 张文浩，赵铎霖，王晓毓，郝强州，李喜梅，高鹏程(4958)
强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 …… 连心桥，朱广伟，杨文斌，朱梦圆，许海(4970)
长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 …… 苏超，崔严(4981)
嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价 …… 杨延梅，赵航晨，孟睿，何连生，赵昊，杜士林，丁婷婷(4989)
污水处理厂对漓江桂林市区河段淡水生物中微塑料累积的影响 …… 谢沅汕，张清科，张漓杉，钟山，刘俊勇，侯晓映，王华，冯静培，梁祖鸿，陈舞阳(4999)
村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 …… 卢亚楠，郭雅妮，王坤，陆伟东，王拓，柴玉峰，柳蒙蒙，钟慧，陈梅雪，魏源送(5008)
冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 …… 朱金山，秦海兰，孙启耀，王宝珍，高润霞，郭锐利，李武斌(5016)
水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 …… 王彤，文刚，黄廷林，司凡，王晨旭，路林超，林薇(5027)
长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 …… 韩文杰，吴迪，周家中，何强，阚渝姣(5037)
类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 …… 郭芳，顾继光，赵剑，余华章，肖利娟(5050)
基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 …… 李玲玲，李云梅，吕恒，徐杰，杨子谦，毕顺，许佳峰(5060)
纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 …… 潘阳，牛承鑫，支忠祥，王建辉，陆雪琴，戴金金，甄广印，孙彤彤，康娜英(5073)
温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N_2O 释放的影响 …… 王丝可，于恒，左剑恶(5082)
以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A^2/O 污染物去除特性 …… 荣懿，邵劲博，于优城，石烜，金鹏康(5089)
不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 …… 张杰，劳会妹，李冬，魏子清(5097)
中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 …… 田中科，王芬，闫钊(5106)
基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 …… 韩琳，徐夕博(5114)
再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 …… 沈城，刘馥雯，吴健，黄沈发，王敏，黄波涛(5125)
有机改性蒙脱土对萘的吸附机制和影响因子 …… 侯静雯，施维林，高娟(5133)
硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 …… 李义纯，陈勇，唐明灯，李林峰，林晓扬，王艳红，许迪豪，艾绍英(5143)
叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 …… 闫秀秀，徐应明，王林，陶雪莹，孙约兵，梁学峰(5151)
重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 …… 王晓宇，韩辉(5160)
油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 …… 赵颖颖，李虹川，胡宏祥，薛中俊，刘娜，吴孟君(5168)
氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响 …… 张薇，倪邦，许秀春，杨轩，孟凡乔(5176)
生物质炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化 …… 曹坤坤，张沙沙，胡学玉，黄洋(5185)
铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 …… 贾彤，郭婷艳，王瑞宏，柴宝峰(5193)
典型水环境微生物源异嗅物研究进展 …… 张海涵，苗雨甜，黄廷林，刘凯文，刘祥，黄鑫，杨尚业，司凡，李程遥(5201)
广告：国家微生物科学数据中心 …… (前插)
《环境科学》征订启事(4785)　《环境科学》征稿简则(4947)　信息(5015，5124，5132)

环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第11期 2020年11月
Vol.41, No.11 Nov., 2020

中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响

田中科, 王芬*, 闫钊
(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 通过分析中温厌氧消化+机械脱水以及热水解预处理+高温厌氧消化工艺过程中重金属含量与形态的变化,研究了中温厌氧消化与高温厌氧消化工艺对污泥重金属风险、形态及稳定性的影响. 结果表明,中温厌氧消化工艺增加了污泥中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量,重金属污染等级和潜在生态风险增强. 高温厌氧消化工艺降低了污泥 Cd 和 Cr 的含量,重金属污染等级和潜在生态风险降低. 其中,N 厂污泥主要致污染金属为 Cd 和 Zn,S 厂污泥主要致污染金属为 Cd; Cd 是 6 种重金属风险系数最高的,是污泥潜在生态危害的最大贡献者. 中温厌氧消化后,污泥中 Cd、Ni、Pb 和 Zn 的可还原态和可氧化态所占质量分数之和降低; Cd、Cr、Cu 和 Ni 的残渣态所占质量分数降低. 可见,中温厌氧消化后,污泥重金属的潜在毒性和稳定态向直接毒性转化. 高温厌氧消化后,污泥 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的可交换态所占质量分数降低; Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的残渣态所占质量分数亦降低,可见,高温厌氧消化后,重金属的直接毒性和稳定态向潜在毒性转化.

关键词: 中温厌氧消化; 高温厌氧消化; 重金属; 形态与稳定性; 潜在生态危害
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)11-5106-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202003166

Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge

TIAN Zhong-ke, WANG Fen*, YAN Zhao
(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Anaerobic digestion is widely used for sewage sludge stabilization. Different anaerobic digestion methods have different impacts on the speciation and stability of heavy metals in sludge. This study investigated the response of the speciation and stability of heavy metals in sludge to the treatment of mesophilic anaerobic digestion-mechanical dewatering and thermal hydrolysis pre-treatment-thermophilic anaerobic digestion. The results showed that the process of mesophilic anaerobic digestion increased the contents of Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn in the sludge, increasing its contamination level and potential ecological risks. In contrast, the thermophilic anaerobic digestion process increased the contents of Cd, Cr, and Pb in the sludge, reducing the level of heavy metal contamination and potential ecological risks. It was found that the main contaminated metals were Cd and Zn in Plant N and Cd in Plant S. Cd has the highest risk factor and is the highest risk contributor to the potential ecological risk of all the types of sludge. The sum of reducible and the exchangeable fractions of Cd, Ni, Pb, and Zn reduced, and the residual fraction of Cd, Cr, Cu, and Ni decreased after mesophilic anaerobic digestion. This indicated that the process of mesophilic anaerobic digestion changed the proportion of potential toxicity and steady state of the heavy metals into direct toxicity. After thermophilic anaerobic digestion, the exchangeable proportion of Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn decreased, and the steady state of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn decreased. After the thermophilic anaerobic digestion process, the proportions of bio-availability and mobility of heavy metals therefore decreased, and the proportions of steady state also reduced. The potential toxicity increased.

Key words: mesophilic anaerobic digestion; thermophilic anaerobic digestion; heavy metal; speciation and stability; potential ecological risk

我国城镇污水处理厂的规模及其处理过程产生的污泥量逐年增加[1],污泥的处理处置问题日益突出. 厌氧消化是污泥稳定化的主要手段,消化后的污泥进行土地利用是重要的污泥处置方式[2]. 污泥土地利用的主要限制因素是其重金属含量较高,进入土壤环境不容易被生物分解,一旦进入食物链富集将会给人类健康造成威胁[3,4]. 重金属分析和评价有利于客观和真实地了解污泥的污染特征和污染程度,为污泥的资源化和无害化利用提供科学依据[5].

有研究表明,重金属的环境行为在很大程度上取决于其特定化学形式与状态[6]. 厌氧消化过程可以改变污泥中重金属的形态,Dong 等[7]进行小试高固体中温厌氧消化实验,发现中温厌氧消化过程提高了重金属含量,Pb、Zn、Cu、Ni 和 Cr 含量经消化后增加了大约 50%,同时降低了 Pb 的生物有效性; Dabrowska 等[8]研究了生产规模高温厌氧消化工艺进出泥中重金属 Zn、Cu、Ni、Cd、Pb 和 Cr 的形态

收稿日期: 2020-03-15; **修订日期**: 2020-05-16
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106)
作者简介: 田中科(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为污泥资源化,E-mail: 739554535@qq.com
* 通信作者,E-mail: wangfen@tju.edu.cn

变化，结果表明高温厌氧消化后，除 Ni 外，所有重金属的可交换态含量均未显著改变，Zn、Cd、Cr 和 Cu 的可氧化态含量大幅度提升，而 Pb 的残渣态含量提升最高，高温厌氧消化有利于形成更稳定的重金属化学形态；Zhang 等[9]分析了中试规模的热水解和高温厌氧消化对剩余污泥中主要重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 形态的影响，结果发现，热水解和厌氧消化极大地提高了污泥中重金属的总体稳定性. 热水解后，稳定状态下 Cd 的含量提高 76.4%，Hg、Cr、Zn 和 Ni 的稳定性略有变化，重金属的形态趋于保持稳定. 陈泾涛等[10]对某污水处理厂的剩余污泥进行了 21 d 中温序批式厌氧消化实验，结果表明污泥中重金属形态改变不明显，Pb 和 Hg 主要以稳定态存在，Ni、Cu、Cr 和 As 主要以不稳定态存在.

本文研究了城镇污水处理厂污泥中温厌氧消化前后与高温厌氧消化前后污泥中重金属的总量及形态变化，探究了两种厌氧消化方式对重金属毒性的影响，并用单因子和内梅罗综合污染指数评估了污泥重金属的污染等级，而且评估了污泥重金属的潜在生态风险，以期为污泥处理处置路线的优化提供依据.

1　材料与方法

1.1　样品采集

本研究的污泥样品采自两座污泥消化厂，其中污泥消化厂一（N 厂）采用中温厌氧消化 + 机械脱水工艺，分别采集消化池进泥（$N\text{-}MAD_{in}$）、消化池出泥（$N\text{-}MAD_{out}$）和脱水污泥（N-DW）进行分析；污泥消化厂二（S 厂）采用热水解预处理 + 高温厌氧消化工艺，分别采集热水解预处理前污泥（S-RS）、热水解预处理后的高温厌氧消化进泥（$S\text{-}TAD_{in}$）和高温厌氧消化出泥（$S\text{-}TAD_{out}$）进行分析. 采集的污泥样品中有机物含量（VS/TS，挥发性固体/总固体）如表 1 所示. 污泥样品采回后，在 80℃ 烘箱中烘干 24 h，后用四分法取 10 g 污泥样品，用球磨机研磨后过 100 目尼龙筛，置于自封袋中常温保存备用[11].

表 1　污泥样品中有机物含量

Table 1　Organic content of the sludge samples

污泥样品	$N\text{-}MAD_{in}$	$N\text{-}MAD_{out}$	N-DW	S-RS	$S\text{-}TAD_{in}$	$S\text{-}TAD_{out}$
VS/TS/%	50.2	43.5	44.2	42.8	43.0	34.4

1.2　样品的处理与测试

1.2.1　重金属总量分析

取 0.500 g 样品放入消解罐中，加入 20 mL 王水（50% HCl: 浓 HNO_3 的比例为 3∶1）使用电热消解仪（DigiBlock EHD20）在 180℃ 加热至 5 mL 左右，冷却后加入少量去离子水，过 0.45 μm 膜过滤，用 1% 的 HNO_3 定容至 100 mL，放入 4℃ 冰箱保存待测[12,13]. 使用 ICP-OES（iCAP 700 SERIES）检测重金属含量，两个平行样.

1.2.2　污泥重金属形态分析

采用欧共体修正的 BCR 顺序提取法[14]分析重金属的形态. ①可交换态：称取 0.500 g 污泥样品至 50 mL 离心管，加入 20 mL 0.11 $mol\cdot L^{-1}$ 乙酸，并在室温下振荡 16 h. 之后 4 000 $r\cdot min^{-1}$ 离心 20 min，倾析和通过 0.45 μm 膜过滤将提取物与固体残余物分离；②可还原态：将 20 mL 新制备的 0.1 $mol\cdot L^{-1}$ 羟胺盐酸盐加入到①的残余物中，并在室温下振荡再悬浮 16 h. 如上所述将提取物与固相分离；③可氧化态：将 5 mL 30% 双氧水加入到②的残余物中，室温下振荡 1 h，然后在 85℃ 下加热至体积减少至约 3 mL. 加入另外 5 mL 的 30% 双氧水并在 85℃ 下继续消化直至体积减少至 1 mL；然后冷却样品. 最后，加入 20 mL 1 $mol\cdot L^{-1}$ 乙酸铵并在室温下振荡 16 h. 如上所述将提取物与固相分离. ④残渣态：总量减去其他 3 种形态之和得到.

1.3　分析与评价方法

1.3.1　污泥重金属污染评价

单因子指数法：单因子指数法是以土壤元素背景值为评价标准来评价单个重金属元素的污染程度，该模型能反映各个污染物的污染程度，是国内外普遍采用的方法之一[15,16]，其计算公式为：

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中，P_i 为样品中污染物 i 的环境质量指数；C_i 为污染物 i 的实测含量（$mg\cdot kg^{-1}$）；S_i 为污染物 i 的环境质量标准（$mg\cdot kg^{-1}$）. 重金属的 S_i 值见表 2，污泥重金属污染等级划分见表 3.

表 2　农用污泥重金属含量限值1)

Table 2　Pollution risk screening value of agricultural sludge

项目	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
含量限值/$mg\cdot kg^{-1}$	3	500	500	100	300	1200

1）重金属含量限值的选取依据为《农用污泥污染物控制标准》（GB 4284-2018）

内梅罗综合污染指数法：该方法将不同重金属所占的权重值纳入计算，反映了所有重金属的综合污染状况，也突出了污染最严重的污染物给环境造成的危害[17]，其计算公式为：

$$P = \sqrt{\frac{(P_{i\max})^2 + (P_{i\mathrm{ave}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中,P 为样品的综合污染指数; $P_{i\max}$ 为 i 样品污染物单污染指数中的最大值; $P_{i\mathrm{ave}}$ 为 i 样品所有污染物单污染指数平均值.

1.3.2 污泥重金属潜在生态风险评价

污泥重金属潜在生态风险评价采用文献[18]提出的评价方法,该方法综合考虑了多元素协同作用、毒性水平、污染浓度及环境对重金属污染敏感性等因素,已成为目前污泥重金属污染质量评价应用广泛的一种方法[19,20]. 计算公式为:

$$\mathrm{RI} = \sum_{i=1}^{m} E_{\mathrm{r}}^{i} = \sum_{i=1}^{m} T_{\mathrm{r}}^{i} \times \frac{C^{i}}{C_{\mathrm{n}}^{i}} \quad (3)$$

式中,RI 为样品中多种重金属潜在生态危害指数,反映多种重金属的综合潜在生态危害程度; E_{r}^{i} 为重金属 i 的潜在生态危害指数,反映重金属的潜在生态危害程度; C^{i} 为重金属 i 含量实测值($\mathrm{mg \cdot kg^{-1}}$); C_{n}^{i} 为重金属 i 含量参比值($\mathrm{mg \cdot kg^{-1}}$); T_{r}^{i} 为重金属的毒性系数,反映重金属的毒性水平和生物对其污染的敏感程度.

不同 RI 值和 E_{r}^{i} 值对应的潜在生态危害等级见表 4.

表 3 污泥重金属污染分级标准

Table 3 Classification criteria for sludge heavy metal pollution

等级划分	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_i \leqslant 0.7$	$P \leqslant 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leqslant 1.0$	$0.7 < P \leqslant 1.0$	警戒线	较清洁
3	$1.0 < P_i \leqslant 2.0$	$1.0 < P \leqslant 2.0$	轻度污染	轻微污染
4	$2.0 < P_i \leqslant 3.0$	$2.0 < P \leqslant 3.0$	中度污染	中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P > 3.0$	重度污染	污染严重

表 4 潜在生态风险水平的划分

Table 4 Classification standard of E_{r}^{i} and RI

等级划分	潜在生态危害指数		潜在生态危害程度
1	$E_{\mathrm{r}}^{i} < 40$	$\mathrm{RI} < 150$	轻微
2	$40 \leqslant E_{\mathrm{r}}^{i} < 80$	$150 \leqslant \mathrm{RI} < 300$	中等
3	$80 \leqslant E_{\mathrm{r}}^{i} < 160$	$300 \leqslant \mathrm{RI} < 600$	强
4	$160 \leqslant E_{\mathrm{r}}^{i} < 320$	$600 \leqslant \mathrm{RI} < 1\,200$	很强
5	$E_{\mathrm{r}}^{i} \geqslant 320$	$\mathrm{RI} \geqslant 1\,200$	极强

为方便与其他研究结果相比较,污染指数取自 Hakanson[18] 提出的重金属 i 含量参比值和毒性系数,由于其未提供元素 Ni 的评价参比值,用《农用泥质标准》(GB 4284-2018)A 级标准代替. 重金属含量参比值及毒性效应系数见表 5.

表 5 不同重金属的含量参比值及毒性效应系数

Table 5 Reference C_{n}^{i} and toxic coefficient T_{r}^{i} of different heavy metals

污染指数	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
$C_{\mathrm{n}}^{i}/\mathrm{mg \cdot kg^{-1}}$	1.0	90	50	100	70	175
T_{r}^{i}	30	2	5	5	5	1

2 结果与讨论

2.1 污泥重金属污染水平分析

由图 1 可知,N 厂污泥 6 种重金属的含量顺序为 Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > Cd,S 厂污泥重金属的含量顺序为 Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > Cd,而且 S 厂污泥的重金属平均含量普遍低于 N 厂.

N 厂污泥经过中温厌氧消化之后,重金属的含量明显上升,Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量分别上升 26.6%、83.6%、16.9%、89.0% 和 17.0%,说明污泥经过中温厌氧消化后重金属得以富集. 这是因为在厌氧消化过程中,随着有机物被降解,污泥的 VS/TS 值下降,导致单位质量污泥中重金属含量增大; 而机械脱水过程对 N 厂污泥重金属的含量的影响不明显,脱水后重金属含量几乎不变,这是因为污泥脱水处理过程,只是投加了少量聚丙烯酰胺(PAM),并未对总量产生影响.

S 厂污泥经过热水解处理之后 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量分别提高了 63.5%、32.8%、39.7% 和 34.6%,主要是因为热水解后,污泥质量下降,重金属的总量不变,导致含量升高. 王兴栋等[21] 研究了热水解预处理城市污泥对重金属含量的影响,结果表明,与原污泥相比,脱水污泥中 Cu、Zn、Cd、Cr、Ni 和 Pb 的含量在水热处理之后均有不同程度地增加.

另外,高温厌氧消化后 S 厂污泥中 Cd、Cr 和 Pb 的含量分别提高了 42.6%、7.3% 和 81.6%,高温厌氧消化降低了污泥的 VS/TS 值,使重金属含量升高[7]; 但同时重金属 Cu、Ni 和 Zn 的含量分别下降了 28.2%、22.7% 和 21.8%,这有待长期取样检测,

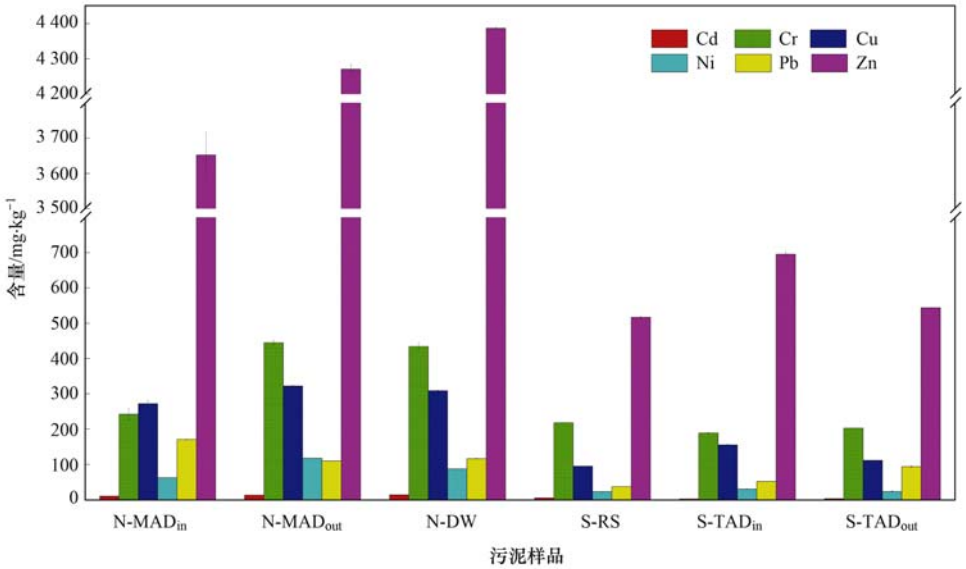


图 1　各个污泥样品中重金属含量

Fig. 1　Heavy metal content in each sludge sample

更深入地研究重金属含量变化趋势以及降低原因.

采用单因子和内梅罗综合污染指数法对污泥重金属污染程度进行评估,结果如表 6 所示. 消化池进泥的 P 值为 2.60,污染等级为中度污染,经中温厌氧消化后 P 值变为 3.30,污染等级为重度污染. 单因子指数结果显示,N 厂污泥的主要致污染因子为 Zn 和 Cd,均为重度污染. 消化池出泥的 P 值上升,是因为中温厌氧消化后 Zn 和 Cd 的含量增加.

由表 6 可知,热水解预处理前污泥、热水解处理后的高温厌氧消化进泥和高温厌氧消化出泥的 P 值分别为 1.29、0.58 和 0.78,污染等级分别为轻度污染、安全和警戒线. S 厂污泥的主要致污染因子为 Cd,污染程度为轻度污染. 热水解导致 P 值下降,主要原因是热水解后 Cd 的含量下降. P 值显示,高温厌氧消化后,S 厂污泥的污染等级没有显著变化.

表 6　重金属污染指数及污染等级[1)]

Table 6　Pollution index of heavy metals in sewage sludge and grading of potential pollution levels

项目		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	综合污染指数 P
含量/mg·kg⁻¹	N-MAD$_{in}$	10.2	242.3	272.1	62.3	170.6	3 652.0	
	NMAD$_{out}$	12.9	444.8	322.2	117.7	109.6	4 271.0	
	N-DW	13.7	434.0	308.7	87.5	116.4	4 387.0	
	S-RS	5.2	218.1	95.0	22.8	37.0	516.7	
	S-TAD$_{in}$	2.1	189.0	155.3	30.3	51.7	695.3	
	S-TAD$_{out}$	3.0	202.9	111.5	23.4	93.8	543.8	
P_i	N-MAD$_{in}$	3.39	0.48	0.54	0.62	0.57	3.04	2.60
	N-MAD$_{out}$	4.29	0.89	0.64	1.18	0.37	3.56	3.30
	N-DW	4.57	0.87	0.62	0.87	0.39	3.66	3.48
	S-RS	1.74	0.44	0.19	0.23	0.12	0.43	1.29
	S-TAD$_{in}$	0.71	0.38	0.31	0.30	0.17	0.58	0.58
	S-TAD$_{out}$	1.01	0.41	0.22	0.23	0.31	0.45	0.78
污染等级	N-MAD$_{in}$	重度污染	安全	安全	安全	安全	重度污染	中度污染
	N-MAD$_{out}$	重度污染	警戒线	安全	轻度污染	安全	重度污染	重度污染
	N-DW	重度污染	警戒线	安全	警戒线	安全	重度污染	重度污染
	S-RS	轻度污染	安全	安全	安全	安全	安全	轻度污染
	S-TAD$_{in}$	轻度污染	安全	安全	安全	安全	安全	安全
	S-TAD$_{out}$	轻度污染	安全	安全	安全	安全	安全	警戒线

1)表内数值为均值

涂剑成等[22]分析了我国东北地区 7 个城市污水处理厂脱水污泥中 Cu、Zn、Cr、Ni 和 Mn 的含量,7 个污水厂污泥的 P 值分别为 7.1、5.1、6.7、4.0、12.2、8.0 和 5.0,污染等级全部为重度污染. 杨妍妍等[23]考察了北京城市中心区 8 家污水处理厂污泥中 8 种重金属(Cd、Cr、Cu、Zn、Pb、

As、Hg 和 Ni)污染状况,P 值为 51.4,污染等级为重度污染. 李清芳等[24]测定了重庆市黔江排水有限公司污水处理厂脱水污泥中 Zn、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、As、Cd 和 Hg 的含量,并采用内梅罗综合污染指数法对污泥中 9 种重金属生态风险进行评价,P 值为 0.63,污染等级为安全. Tytła[25]评价了波兰西里西亚省某城市污水处理厂污泥的重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Hg)污染等级,结果显示,污泥中重金属的 P 值为 1.08,污染等级为轻微污染. 可以看出,污泥污染程度不一,这可能与进水水质有关.

2.2 潜在生态风险评估

污泥中重金属的潜在生态风险系数(E_r^i)及综合生态危害指数(RI)如表 7 所示.

表 7 污泥中重金属潜在生态风险指数及危害程度[1)]

Table 7 Potential ecological risk index and degree of heavy metals in sludge

重金属	E_r^i(均值)						潜在生态危害程度					
	N-MAD$_{in}$	N-MAD$_{out}$	N-DW	S-RS	S-TAD$_{in}$	S-TAD$_{out}$	N-MAD$_{in}$	N-MAD$_{out}$	N-DW	S-RS	S-TAD$_{in}$	S-TAD$_{out}$
Cd	305.10	386.10	411.30	156.90	63.45	90.45	很强	极强	极强	强	中等	强
Cr	5.38	9.88	9.64	4.85	4.20	4.51	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
Cu	27.56	32.22	31.22	9.50	15.53	11.15	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
Ni	3.12	5.89	4.37	1.14	1.52	1.17	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
Pb	12.19	7.83	8.31	2.64	3.69	6.70	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
Zn	20.87	24.41	25.07	2.95	3.97	3.11	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
RI	374.22	466.33	489.91	177.98	92.36	117.09	强	强	强	中等	轻微	轻微

N 厂的 3 种污泥潜在生态危害程度为强. 消化池进泥的 RI 值为 374.22,其中 Cd 的潜在生态危害指数为 305.10,潜在生态危害程度为很强,表明消化池进泥中主要的潜在生态危害来源于 Cd. 经中温厌氧消化后,消化池出泥的 RI 值为 466.33,而 Cd 的潜在生态危害指数变为 386.10,潜在生态危害程度为极强,可以看出中温厌氧消化后 Cd 含量提高,从而加剧了 N 厂污泥的潜在生态危害程度. 机械脱水后污泥的 RI 值升至 489.91,潜在生态危害程度为强. 机械脱水后,脱水污泥中重金属含量基本无变化(表 6 和图 1),脱水污泥 RI 值上升是毒性系数最大的 Cd 和 Zn 含量上升造成的.

热水解预处理前污泥的 RI 值为 177.98,潜在生态危害程度为中等,Cd 的潜在生态风险指数最高为 156.90,潜在生态危害程度为强. 热水解后高温厌氧消化进泥的 RI 值降至 92.36,潜在生态危害程度为轻微,主要的生态危害仍然来源于 Cd,其潜在生态危害指数为 63.45,热水解降低了 Cd 的含量导致污泥的潜在生态危害指数降低. 经高温热水解后,高温厌氧消化出泥的 RI 值升至 117.09,潜在生态危害程度为轻微,其中 Cd 的潜在生态危害指数为 90.45. 高温厌氧消化轻微增加了热水解预处理后污泥中的重金属含量,导致污泥的 RI 值略有上升. 但总的来说,热水解 + 高温厌氧消化降低了 S 厂污泥的潜在生态危害程度,其由中等降为轻微.

2.3 重金属形态分析

重金属的生物利用度和生物毒性在很大程度上取决于其化学形态[26]. 其中,可交换态易被生物吸收,具有较高的迁移率,是最不稳定的重金属形态,对生物的毒性最强,称为直接毒性; 可还原态和可氧化态在还原和氧化环境中可被转化为对生物有效的形式,从而危害环境,被称为潜在毒性; 重金属的残渣态通常被认为是惰性的部分,不参与化学反应,不随外部环境的变化而改变,被称为稳定态[27,28].

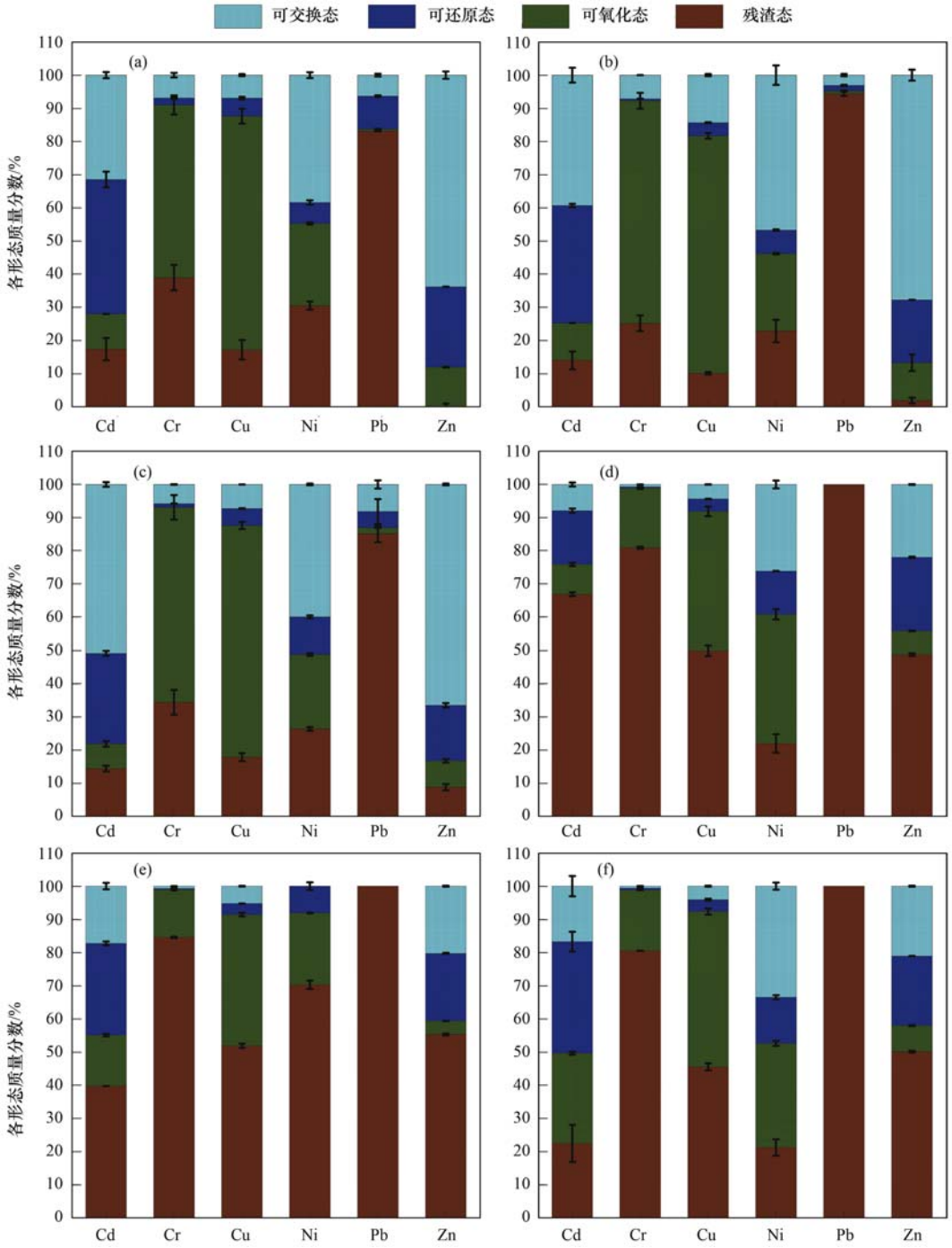
污泥重金属的 4 种形态所占质量分数如图 2 所示. 中温厌氧消化前[图 2(a)], Pb 主要以残渣态存在,性质稳定; Cr 和 Cu 的可还原态、可氧化态和残渣态所占质量分数较高,可交换态所占质量分数较低,Cr 和 Cu 的直接毒性较低,潜在毒性较高. Cd、Ni 和 Zn 的可交换态所占质量分数分别为 31.5%、38.4% 和 63.8%,表明 Cd、Ni 和 Zn 有较高的移动性和生物有效性.

中温消化后[图 2(b)],重金属的移动性和生物有效性增加,Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的可交换态质量分数分别提高了 7.9%、0.3%、7.5%、8.3% 和 3.9%. 消化池出泥中 Pb 主要以残渣态存在,Cr 和 Cu 可氧化态质量分数较高,Cd、Ni 和 Zn 可交换态的质量分数较高. 经过中温厌氧消化,污泥中 Cd、Ni、Pb 和 Zn 的可还原态和可氧化态质量分数之和分别降低 4.4%、0.7%、8.0% 和 5.8%; Cd、Cr、Cu 和 Ni 的残渣态质量分数分别降低 3.4%、14.0%、8.2% 和 7.7%. 重金属的形态变化表明,中温厌氧消化后,重金属的潜在毒性和稳定态质量分数降低,转化为直接毒性.

污泥脱水后[图 2(c)],各金属的形态也发生了变化. Cr、Cu、Ni 和 Zn 可交换态质量分数分别下降 1.3%、7.2%、6.8% 和 1.3%. 可见,污泥机械脱水过程降低了重金属的移动性和生物有效性,从而

降低了重金属的直接毒性. 同时,脱水后 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的残渣态质量分数呈现增长的趋势,分别增加了 0.5%、9.3%、8.8%、3.6% 和 7.0%,表明机械脱水后,重金属的稳定态质量分数有所提升. 但是机械脱水后,Ni 和 Pb 的可还原态与可氧化态的质量分数之和分别增加了 3.2% 和 4.2%,Cd、Cr、Cu 和 Zn 分别降低 12.0%、8.0%、11.6% 和 5.7%. 可见,机械脱水后重金属的化学形态由较活跃的可交换态向更加稳定的可还原态和可氧化态以及残渣态转化,直接毒性转化为潜在毒性或稳定态. 推测脱水过程中向污泥中投加的絮凝剂 PAM 改变了污泥结构,影响到重金属的浸出以及形态分布,从而影响到重金属的稳定性[29].

S 厂污泥在热水解预处理前[图 2(d)],重金属 Zn 的可交换态和残渣态的质量分数较高,直接毒性较大; Cd、Cr、Pb 主要以残渣态存在,可在环境中稳定存在,移动性和生物有效性低; Cu 和 Ni 主要分布形态为残渣态和可氧化态,主要是潜在毒性和



(a) N-MAD$_{in}$, (b) N-MAD$_{out}$, (c) N-DW, (d) S-RS, (e) S-TAD$_{in}$, (f) S-TAD$_{out}$

图 2　污泥样品中重金属形态分布

Fig. 2　Heavy metal speciation in the sludge samples

稳定态. 热水解预处理前污泥中,Ni 和 Zn 的可交换态质量分数较高,分别为 26.1% 和 22.0%.

热水解后[图 2(e)],高温厌氧消化进泥中的 Zn 的残渣态和可溶解态质量分数较高,Cd 主要以残渣态和可还原态的形式存在,Cr 和 Pb 主要以残渣态的形式存在,Cu 和 Ni 的主要存在形态为残渣态和可氧化态. 经过热水解,Ni 的迁移能力明显下降. 而且,热水解后 Ni 和 Zn 的可交换态的质量分数分别下降 26.1% 和 1.7%; Cd 和 Cu 的可交换态质量分数上升 9.3% 和 0.9%; Cr 和 Pb 的可交换态质量分数不变. 但是,经过热水解,高温厌氧消化进泥中 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的残渣态质量分数分别上升 3.6%、1.8%、8.2%、0.0% 和 6.4%; Cd 的残渣态质量分数下降 27.2%. 这表明,污泥热水解后,除 Cd 之外,重金属的稳定态质量分数都有上升. 与此同时,Cd 的可还原态与可氧化态的质量分数之和增加 17.9%; Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的可还原态与可氧化态的质量分数之和分别减少了 3.6%、2.7%、22.1%、0.0% 和 4.7%.

可见,热水解后,Cd 的稳定态向潜在毒性和直接毒性转化; Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的潜在毒性和直接毒性向稳定态转化. 章蕾[30]研究了污泥热水解温度对 Cu 和 Zn 的稳定性的影响,其研究结果表明热水解过程增加了 Cu 和 Zn 的稳定性,这与本文的结果一致.

污泥经高温厌氧消化后 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的可交换态质量分数分别降低 0.5%、0.1%、1.2%、0.0% 和 0.0% [图 2(f)],Ni 的可交换态质量分数上升 33.5%. 而 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的可还原态与可氧化态的质量分数之和分别增加 17.8%、4.1%、7.5%、15.5%、0.0% 和 4.4%; 同时,Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的残渣态质量分数分别降低了 4.9%、4.0%、6.3%、49.0%、0.0% 和 5.2%. 可见,高温厌氧消化后,污泥中重金属直接毒性降低,稳定态质量分数降低,潜在毒性升高.

3 结论

(1)中温厌氧消化工艺增加了 N 厂污泥中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量,增加了其污染等级和潜在生态风险. 高温厌氧消化工艺增加了 S 厂污泥 Cd 和 Cr 的含量,降低了重金属的污染等级和潜在生态风险.

(2)本监测结果表明,中温厌氧消化后,污泥重金属的可交换态质量分数升高,可还原态、可氧化态与残渣态的质量分数下降,重金属的潜在毒性和稳定态部分转化为直接毒性. 高温厌氧消化后,重金属的可还原态与残渣态质量分数下降,可还原态与可氧化态的质量分数分别有不同程度地提升,重金属的直接毒性和稳定态部分向潜在毒性转化.

参考文献:

[1] 王丰, 李润东, 李彦龙, 等. 污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 292-299.
Wang F, Li R D, Li Y L, *et al*. Comparison of different leaching methods for heavy metals in sludge fly ash and comprehensive toxicity evaluation[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 292-299.

[2] Shamsollahi H R, Alimohammadi M, Momeni S, *et al*. Assessment of the health risk induced by accumulated heavy metals from anaerobic digestion of biological sludge of the lettuce [J]. Biological Trace Element Research, 2019, **188**(2): 514-520.

[3] Amoah I D, Reddy P, Seidu R, *et al*. Concentration of soil-transmitted helminth eggs in sludge from South Africa and Senegal: a probabilistic estimation of infection risks associated with agricultural application [J]. Journal of Environmental Management, 2018, **206**: 1020-1027.

[4] Chen L M, Liao Y F, Ma X Q, *et al*. Effect of co-combusted sludge in waste incinerator on heavy metals chemical speciation and environmental risk of horizontal flue ash [J]. Waste Management, 2020, **102**: 645-654.

[5] Gu W H, Bai J F, Dong B, *et al*. Heavy metals speciation and its bioavailability in sewage sludge pyrolysis residue[J]. SN Applied Sciences, 2019, **1**(9): 1107.

[6] 李玉, 方文, 祁光霞, 等. 污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2786-2793.
Li Y, Fang W, Qi G X, *et al*. Changes in heavy metal speciation and release behavior before and after sludge composting under a phosphate-rich atmosphere[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2786-2793.

[7] Dong B, Liu X G, Dai L L, *et al*. Changes of heavy metal speciation during high-solid anaerobic digestion of sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 2013, **131**: 152-158.

[8] Dabrowska L, Rosińska A. Change of PCBs and forms of heavy metals in sewage sludge during thermophilic anaerobic digestion [J]. Chemosphere, 2012, **88**(2): 168-173.

[9] Zhang Q, Zhang L, Sang W J, *et al*. Chemical speciation of heavy metals in excess sludge treatment by thermal hydrolysis and anaerobic digestion process [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(27): 12770-12776.

[10] 陈泾涛, 唐治, 耿宇聪, 等. 厌氧消化对污泥中重金属及病原微生物的影响研究[J]. 中国沼气, 2015, **33**(3): 10-16.
Chen J T, Tang Z, Geng Y C, *et al*. Effects of anaerobic digestion on heavy metals and bacterial pathogens in sewage sludge[J]. China Biogas, 2015, **33**(3): 10-16.

[11] Yang T, Huang H J, Lai F Y. Pollution hazards of heavy metals in sewage sludge from four wastewater treatment plants in Nanchang, China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, **27**(10): 2249-2259.

[12] 李国刚, 吕怡冰, 付强. 土壤和固体废物污染物分析测试方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[13] 杨进. 土壤中金属元素分析的不同消解方法比较[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(S2): 184-188.
Yang J. Study on different acid digestion methods in the analysis of heavy metals in soil [J]. Environmental Science &

Technology, 2018, **41**(S2): 184-188.

[14] Wang X D, Li C X, Li Z W, *et al*. Effect of pyrolysis temperature on characteristics, chemical speciation and risk evaluation of heavy metals in biochar derived from textile dyeing sludge[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **168**: 45-52.

[15] 何绪文, 房增强, 王宇翔, 等. 北京某污水处理厂污泥重金属污染特征、潜在生态风险及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(3): 1092-1098.
He X W, Fang Z Q, Wang Y X, *et al*. Pollution characteristics, potential ecological risk and health risk assessment of heavy metal in a sewage treatment plant in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(3): 1092-1098.

[16] 刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 等. 浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 276-283.
Liu T T, Cui C W, He J G, *et al*. Analysis of storage sludge composition characteristics and evolutionary regularity in the Hunhe River Basin[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 276-283.

[17] 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.
Bai L P, Qi H T, Fu Y P, *et al*. Nutrient contents and heavy metal pollutions in composted sewage sludge from different municipal wastewater treatment plants in Beijing region[J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4648-4654.

[18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[19] 贡恩伟, 曹红霞, 左桂云, 等. 开封县污水处理厂污泥资源化利用的潜在生态风险分析[J]. 化学研究, 2016, **27**(3): 312-317.
Gong E W, Cao H X, Zuo G Y, *et al*. Assessment of sludge utilization on potential ecological risk from the wastewater treatment plants in Kaifeng county[J]. Chemical Research, 2016, **27**(3): 312-317.

[20] 文竹, 李江, 王兴, 等. 贵州省污水处理厂污泥中重金属形态分布及其潜在生态风险评价[J]. 中国农村水利水电, 2016, (12): 67-73, 78.
Wen Z, Li J, Wang X, *et al*. Fractionation and environmental assessment of heavy metals in sewage sludge from municipal wastewater treatment plants of Guizhou province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, (12): 67-73, 78.

[21] 王兴栋, 林景江, 李智伟, 等. 水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1048-1054.
Wang X D, Lin J J, Li Z W, *et al*. Effects of hydrothermal treatment time on the transformations of N, P, K and heavy metals in sewage sludge[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1048-1054.

[22] 涂剑成, 赵庆良, 杨倩倩. 东北地区城市污水处理厂污泥中重金属的形态分布及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 689-695.
Tu J C, Zhao Q L, Yang Q Q, *et al*. Fractional distribution and assessment of potential ecological risk of heavy metals in municipal sludges from wastewater treatment plants in Northeast China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(3): 689-695.

[23] 杨妍妍, 李金香, 刘亚平, 等. 北京城市污水处理厂污泥中重金属污染状况及潜在生态风险分析[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(9): 1098-1102, 1107.

[24] 李清芳, 姚靖, 黄晓容, 等. 黔江区污水处理厂污泥中重金属生态风险评价与健康风险评估[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, **41**(3): 120-129.
Li Q F, Yao J, Huang X R, *et al*. Ecological risk Evaluation and health risk assessment on heavy metals in sludge of the sewage treatment plant in Qianjiang district[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, **41**(3): 120-129.

[25] Tytła M. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk in sewage sludge from municipal wastewater treatment plant located in the most industrialized region in Poland-case study[J]. International Journal of Environmental Research and Public, 2019, **16**(13): 2430.

[26] 叶涛, 黄丽, 张克强, 等. 皂角苷和柠檬酸联合对污泥中Cu、Pb和Zn的去除及其稳定性特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4850-4859.
Ye T, Huang L, Zhang K Q, *et al*. Evaluation of the combined removal of heavy metals by saponin and citric acid from municipal sewage sludges and metal stability features[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4850-4859.

[27] Peng J F, Song Y H, Yuan P, *et al*. The remediation of heavy metals contaminated sediment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 633-640.

[28] Wen J, Yi Y J, Zeng G M. Effects of modified zeolite on the removal and stabilization of heavy metals in contaminated lake sediment using BCR sequential extraction[J]. Journal of Environmental Management, 2016, **178**: 63-69.

[29] 黄翔峰, 叶广宇, 穆天帅, 等. 污泥厌氧消化过程中重金属稳定性研究进展[J]. 环境化学, 2017, **36**(9): 2005-2014.
Huang X F, Ye G Y, Mu T S, *et al*. Research progress of heavy metal stabilization during sludge anaerobic digestion[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(9): 2005-2014.

[30] 章蕾. 热水解预处理工艺条件对污泥中重金属Cu、Zn稳定性的影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
Zhang L. Research on the stability of heavy metals (Cu、Zn) in sludge with the pretreatment conditions of thermal hydrolysis[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 11
Environmental Science (monthly) Nov. 15, 2020

CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China ····· LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, *et al.* (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China ····· TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, *et al.* (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient $PM_{2.5}$: A Case Study of the Yangtze River Delta ····· ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, *et al.* (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area ····· ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, *et al.* (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Zhengzhou ····· ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, *et al.* (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town ····· LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, *et al.* (4825)
Spatio-temporal Evolution of $PM_{2.5}$ Concentration During 2000-2019 in China ····· XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, *et al.* (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing ····· YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, *et al.* (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background ····· CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, *et al.* (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification ····· WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, *et al.* (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data ····· SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu ····· GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, *et al.* (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir ··· ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, *et al.* (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer ····· CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, *et al.* (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018 ····· XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, *et al.* (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula ····· ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, *et al.* (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes ····· SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, *et al.* (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China ····· LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, *et al.* (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve ····· ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, *et al.* (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain ····· LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin ····· SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network ····· YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, *et al.* (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section ····· XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, *et al.* (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns ····· LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, *et al.* (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter ····· ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, *et al.* (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier ····· WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, *et al.* (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta ····· HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, *et al.* (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China ····· GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, *et al.* (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree ····· LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, *et al.* (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism ····· PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, *et al.* (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N_2O Release of ANAMMOX Process ····· WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A^2/O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source ····· RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, *et al.* (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules ····· ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, *et al.* (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge ····· TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics ····· HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites ····· SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, *et al.* (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors ····· HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System ····· LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, *et al.* (5143)
Effects of Intercropping of *Brassica chinenesis* L. and *Tagetes patula* L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants ····· YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, *et al.* (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides ····· WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation ····· ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, *et al.* (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China ····· ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, *et al.* (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure ····· CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, *et al.* (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for *Bothriochloa ischaemum* in Copper Tailings Area ····· JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, *et al.* (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems ····· ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, *et al.* (5201)