

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区O₃浓度变化.....王占山,李云婷,安欣欣,李倩,孙乃迪,王步英,潘锦秀(1)

南京北郊黑碳气溶胶的来源解析.....肖思晗,于兴娜,朱彬,何稼祺,吕睿,沙丹丹(9)

电镀厂周边大气PM₁₀中重金属季节性分布特征及生态风险评价.....赵珍丽,赵委托,黄庭,程胜高,余葱葱,尹伊梦(18)

广西玉林市大气PM₁₀和PM_{2.5}中有机碳和元素碳污染特征分析.....黄炯丽,陈志明,莫招育,李宏姣,杨俊超,刘慧琳,毛敬英,梁桂云,张达标,吴熊平,郝爽(27)

青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征.....张瑞峰,祁建华,丁雪,谢丹丹(38)

大气环境分区管理:以广东省为例.....杨柳林,李敏辉,廖程浩,曾武涛,张晖,张永波(49)

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别:以南京为例.....温爽,王桥,李云梅,朱利,吕恒,雷少华,丁潇蕾,苗松(57)

基于SWAT模型的流域河道硝酸盐δ¹⁵N和δ¹⁸O模拟.....王康,冉宁,林忠兵,周祖昊(68)

程河流域非点源污染负荷估算及其控制对策.....陈学凯,刘晓波,彭文启,董飞,黄智华,冯顺新,王若男(77)

陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价.....余葱葱,赵委托,高小峰,程胜高,谢地,马鹏途(89)

天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价.....张新波,宋姿,张丹,刘楠楠,李楠,温海涛(99)

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响.....王琼,李乃稳,李磊,李龙国,苟思,杨凌肖(109)

以HKUST-1为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明B.....陈卫平,彭程伟,杨阳,吴玉梅(117)

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险.....姚宏,卢双,张旭,裴晋,鲁垠涛(123)

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征.....周健,李春辉,张志永,胡红青,万成炎,胡莲,潘晓洁(130)

磷酸盐对铁锰复合氧化物膜去除地表水中氨氮的影响.....卓瑞双,黄廷林,张瑞峰,文刚(137)

K₂S₂O₈强化g-C₃N₄薄膜光电催化降解Cu(CN)₂并同步回收Cu.....党聪哲,李一兵,王彦斌,赵旭(145)

以HKUST-1为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明B.....蒲嘉懿,万金泉,王艳,马邕文,武书彬(152)

氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能.....马亚红,黄婉婷,刁开盛,李鹏飞,谭学才,董慧岭,覃方夸,雷福厚,刘绍刚(161)

铁锰泥除砷颗粒吸附剂对As(V)的吸附去除.....曾辉平,吕赛赛,杨航,尹灿,曹瑞华,王艳菊,李冬,张杰(170)

水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态.....马玉玲,马杰,陈雅丽,雷梅,郭华明,翁莉萍,李永涛(179)

阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响.....任爽,孟昭福,王腾,张洋,田凯,刘伟,闫东旭(187)

典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征.....赵雪,张子峰,祝富杰,李一凡,马万里(195)

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响.....许雯佳,戚小英(202)

环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性.....戴琦,刘锐,舒小铭,张永明,陈吕军(212)

AAO工艺低氧条件下的运行及其模拟.....曹特特,王林,李咏梅(219)

磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复.....顾澄伟,陈方敏,李祥,张程锦(227)

碳源对污水处理厂SAD工艺小试的影响.....李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(232)

容积负荷对ABR-MBR工艺反硝化除磷性能的影响.....吕亮,尤雯,韦佳敏,吴鹏,沈耀良(239)

DNBF-O₃-GAC组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物.....钟丽燕,郝瑞霞,王卫东,万京京,朱晓霞(247)

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响.....孙洪伟,陈翠忠,吴长峰,赵华南,于雪,方晓航(256)

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响.....周丰,王翻翻,钱飞跃,黄慧敏,沈耀良,周建民(263)

高含固污泥厌氧消化中Fe/S及pH对原位抑硫效率影响及其交互作用.....韩芸,曹玉芹,卓杨,王晓飞,韩雅婷,彭党聪(269)

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析.....刘甜甜,崔崇威,赫俊国,唐建(276)

去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气.....卢怡清,许颖,董滨,戴晓虎(284)

污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价.....王丰,李润东,李彦龙,赵云斌,杨天华(292)

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的CH₄和N₂O通量日变化特征.....杨平,谭立山,黄佳芳,何清华,全川(300)

3种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响.....武岩,红梅,林立龙,刘梅,刘宇杰(310)

有机替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及N₂O排放的影响.....侯苗苗,吕凤莲,张弘毅,周应田,路国艳, Ayaz Muhammad,黎青慧,杨学云,张树兰(321)

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应:¹³C-CO₂脉冲标记.....陈珊,祝贞科,袁红朝,王久荣,彭佩钦,葛体达,吴金水(331)

陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征.....兰志龙,赵英,张建国,李会杰,司炳成,焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial(339)

不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响.....邹娟,胡学玉,张阳阳,陈窈君,王向前,刘扬(348)

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响.....徐国鑫,王子芳,高明,田冬,黄容,刘江,黎嘉成(355)

县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估.....李锦芬,瞿明凯,刘刚,黄标(363)

基于改进LUR模型的区域土壤重金属空间分布预测.....曾菁菁,沈春竹,周生路,陆春峰,金志丰,朱雁(371)

沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析.....李嘉康,宋雪英,魏建兵,王颖怡,李玉双,郑学昊(379)

磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化模拟铅镉污染土壤.....赵庆圆,李小明,杨麒,陈灿,钟振宇,钟宇,陈飞,陈寻峰,王祥(389)

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响.....封文利,郭朝晖,史磊,肖细元,韩晓晴,冉洪珍,薛清华(399)

典型土壤双季稻对Cd吸收累积差异.....李欣阳,龙坚,王树兵,陈齐,董霞,蒋凯,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(406)

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征.....张曼胤,李梦洁,崔丽娟,王贺年,郭子良,徐卫刚,魏圆云,杨思,肖红叶(415)

硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响.....代军帅,左小虎,王明霞,姚炎红,周志峰(422)

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响.....王伟华,刘毅,唐海明,孙志龙,李宝珍,葛体达,吴金水(430)

海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较.....张玉,米铁柱,甄毓,陈焯,付璐璐,王勋功(438)

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系.....袁丽娟,廖且根,张莉,张大文,罗林广,刘聚涛(450)

畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征.....张昊,王盼亮,杨清香,俞宁(460)

烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响.....章骅,于思源,邵立明,何晶晶(467)

《环境科学》征稿简则(17) 《环境科学》征订启事(26) 信息(160, 255, 338)

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析

刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国*, 唐建

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 随着城镇化的加速, 浑河流域贮存污泥堆积量逐年增加, 对环境产生潜在而长期的威胁. 为了实现贮存污泥的资源化、无害化处理, 开展了贮存污泥成分特征及其随时间变化规律分析. 本研究分析了基本理化性质[含水率、pH、挥发性有机物(VS)、总碱度]、营养元素指标(TC、TN、C/N、TK、TP)、微生物组成、重金属含量及形态等指标. 结果表明 VS 及各种营养元素含量均呈现下降的趋势; 含水率规律性不明显; pH 稳定在 7 左右; 细菌在微生物中占绝对优势, 约占 90%, 厌氧微生物含量增加; Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 等重金属含量及形态并未呈现明显的规律性变化, 重金属形态主要以残渣态等稳定态存在; Cu 的含量超过 GB 4284-1984 中 Cu 的最高限值, 因此贮存污泥农用风险较大.

关键词: 贮存污泥; 污泥特征; 变化规律; 农用风险; 资源化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0276-08 DOI: 10.13227/j.hjcx.201702121

Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin

LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo*, TANG Jian

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the accumulation of storage sludge in the Hunhe River Basin has increased year by year, creating a potential and long-term threat to the environment. In order to realize the resource-saving and harmless treatment of storage sludge, the composition of storage sludge and the evolution rule were analyzed and researched. The basic physicochemical properties (water content, pH, volatile organic compounds (VS), and total alkalinity), nutrient index (TC, TN, C/N, TK, and TP), microbial composition, and heavy metal contents and fraction were analyzed. The results showed the VS and various nutrient element contents decreased with the prolongation of storage time, and changes in water content were not obvious, which was independent of the storage time and only relevant to natural conditions. The pH was maintained at around 7, and the bacteria predominated in microorganisms, accounting for about 90%. The content of anaerobic microorganisms increased. The contents and fractions of Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd, As, and Hg did not change significantly, but the content of Cu was higher than the Chinese standard for agricultural utilization (GB 4284-1984). Therefore, there is a larger risk of storage sludge for agricultural use. Therefore, the analysis of the composition and evolution of storage sludge in the Hunhe River Basin is of great significance for further resource treatment of sludge.

Key words: storage sludge; sludge characteristics; evolution law; agricultural risk; resource utilization

贮存污泥是指污水厂排放的污泥运至污泥填埋场的污泥坑中,并在污泥填埋坑中经过长时间的堆置所形成的污泥,堆置时间最长的可达十年. 贮存污泥产量增加与污水厂中伴生污泥产量及污泥管理措施密切相关. 在城镇化的快速进程中,污水处理能力增强,伴生的污泥产量不断增加,已突破 3 000 万 t·a⁻¹ (含水率 80% 计)^[1,2]. 目前,超过 50% 的城市污泥仍未做到无害化处理并且在环境中堆放^[1,2],导致贮存污泥产量逐年增加并且大量堆积. 沈抚连接带在快速城镇化进程中,导致贮存污泥大量堆积于浑河流域河流沿岸的污泥填埋场中. 这些污泥含有大量的有机质和丰富的氮、磷、钾等营养元素^[3,4],同时还含有重金属、病原菌等有害物,不加处理会对大气、土壤、地下水等产生污染,甚至威胁周边居民的身体健康,同时也是对资源的浪

费^[2]. 因此开展贮存污泥的污染特征分析,对实现贮存污泥资源化利用及严寒地区快速城镇化流域内贮存污泥的处理处置具有重要的技术支持和指导意义.

目前关于城市污泥性质研究的报道较多^[5-7],主要对污泥中的有机质、营养物质含量及重金属进行了分析,为了解国内城市污泥的性质提供了重要信息,对后续污泥的处理处置具有重要的指导意义. 然而贮存污泥在贮存过程中,其性质会发生变化,与原污泥有较大的差异^[8],但是对于贮存污泥性质研

收稿日期: 2017-02-21; 修订日期: 2017-07-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07202-011)

作者简介: 刘甜甜(1987~),女,博士研究生,主要研究方向为污泥资源化, E-mail: tian080816@163.com

* 通信作者, E-mail: junguohe@263.net

究及利用方面并未见相关报道,鉴于贮存污泥特性及其有害物质含量直接影响污泥的利用方式,因此对浑河流域沿岸的贮存污泥特性进行采样分析,以期为后续贮存污泥的处理处置提供参考。

1 材料与方法

1.1 污泥来源及采样方法

实验所需贮存污泥取自沈阳浑河流域某污泥填埋场,污泥填埋场位置见图 1。污泥填埋坑位置分布见图 2,各填埋坑具体填埋情况见表 1,在每年的 1、4、7、10 月选取其中 6 个坑(2、4、5、6、8、10)进行采样分析。采样时利用专业的打井钻孔设备采用梅花形法取样技术在污泥填埋坑中心及距离中心 10 m 远的半径内 4 个点(共计 5 个采样点)且深度

为 1 m 左右的位置进行打孔取样,并将样品混合均匀以备分析;新鲜的脱水污泥来自于沈阳北部污水处理厂,具体性质见表 2。取样之后置于 4℃ 冰箱中储存备用。

图例 □ 大气评价范围 □ 已拆迁居民区 ▲ 环境保护目标



红色位置为污泥填埋场;黄色位置为环境保护目标

图 1 污泥填埋场位置示意

Fig. 1 Location of sludge storage landfill

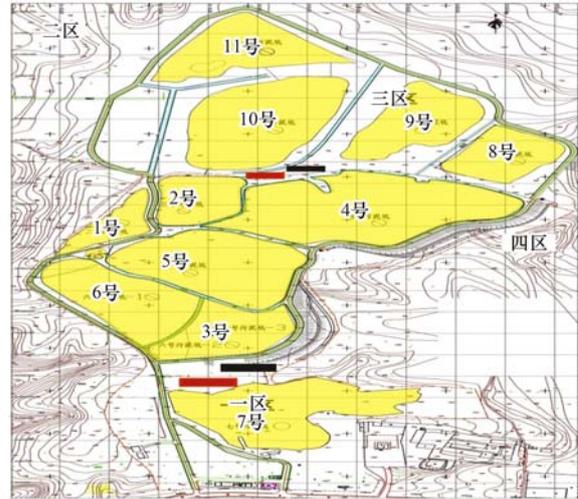


图 2 各污泥填埋坑分布示意

Fig. 2 Distribution map of sludge landfill pit

1.2 实验分析项目及检测方法

含水率:将约 20 g 污泥样品放在 105℃ 烘箱中干燥 2 h,直至恒重,通过样品前后的质量差计算含水率^[9]。

挥发性固体(VS):将污泥样品烘干后置于马弗炉中于 550℃ 灼烧 5~6 h 后称重^[9]。

pH:将污泥样品加入无二氧化碳水浸泡并于室温下振荡 4 h 后离心,取上清液测量 pH 值^[9]。

总碱度:将污泥样品振荡提取,得到浸出液用标

表 1 污泥填埋场各填埋坑情况

Table 1 Conditions in the sludge landfill pit

坑号	使用情况	坑周最低标高 /m	坑底最低标高 /m	堆泥表面积 /m ²	容积/m ³
1	封场,表层植被	122.6	99.1	500	3 900
2	表层污泥,不再接受新泥	125.2	99.1	6 000	87 600
3	表层污泥,不再接受新泥	119.5	99.1	10 000	106 400
4	表层污泥,不再接受新泥	114.4	99.1	42 000	323 200
5	表层污泥,不再接受新泥	115	99.1	30 000	240 600
6	表层污泥,不再接受新泥	113.3	99.1	34 000	242 900
7	待使用	105.6	99.1	30 000	0
8	表层污泥,不再接受新泥	112.6	99.1	23 000	156 500
9	表层污泥,不再接受新泥	114.7	99.1	18 000	142 400
10	表层污泥,不再接受新泥	114.4	99.1	20 000	154 900
11	表层污泥,不再接受新泥	114.5	99.1	20 000	155 900
合计(除 7 号坑)				233 500	1 614 300

表 2 实验污泥基本情况

Table 2 Basic analysis of experimental sludge

填埋坑号	2	4	5	6	8	10	北污
贮存时间/月	82	70	64	58	46	34	0

准酸溶液滴定浸出液至规定的 pH 值^[9].

TC 和 TN 的测定方法:风干的污泥样品粉碎后过 200 目筛,精密称取一定量的过筛的样品,采用元素分析仪进行测定^[10].

NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度:用 $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液按 1:10 的比例浸提污泥,用 $0.45 \mu\text{m}$ 的微孔滤膜真空抽滤浸提液,然后用连续流动化学分析仪测定滤液中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的浓度^[11~13].

微生物组成鉴定(磷脂脂肪酸分析):实验方法

主要参照 MIDI 操作手册,即在培养基上 28°C 恒温培养细菌 24 h 后取菌,通过提取和分离细菌细胞膜中的磷脂脂肪酸(PLFA),甲基化后进行气相色谱鉴定分析^[14,15].

K、P 元素及重金属(Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg)含量分析:湿法消解后采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定^[9,16].

重金属形态分析:采用改进的 BCR 顺序浸提法浸提后,用 ICP-AES 测定,具体提取步骤如表 3^[17~20].

表 3 改进 BCR 提取法分析流程^[20]

Table 3 Analytical flow for the modified BCR extraction process

步骤	提取试剂	污泥:溶液 (质量:体积)	实验条件	元素形态
1	$0.11 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HAc	1:40	室温振荡 16 h	可交换态
2	$0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (经 HNO_3 酸化至 $\text{pH}=2$)	1:40	室温振荡 16 h	可还原态
3	30% H_2O_2 (经 HNO_3 酸化至 $\text{pH} 2\sim 3$) NH_4Ac , $\text{pH}=2$	1:10	室温间歇振荡 1 h, 85°C 水浴振荡 2 h	可氧化态
		1:50	室温振荡提取 16 h	
4	HNO_3 H_2O_2 HF	1:4	对前三步所剩余的残渣 在 160°C 进行消解	残渣态
		1:2		
		1:1		

2 结果与讨论

2.1 污泥基本理化性质随时间变化

2.1.1 贮存污泥含水率和 VS 的变化分析

图 3 主要考察了污泥在贮存过程中含水率及 VS 随贮存时间的变化情况。

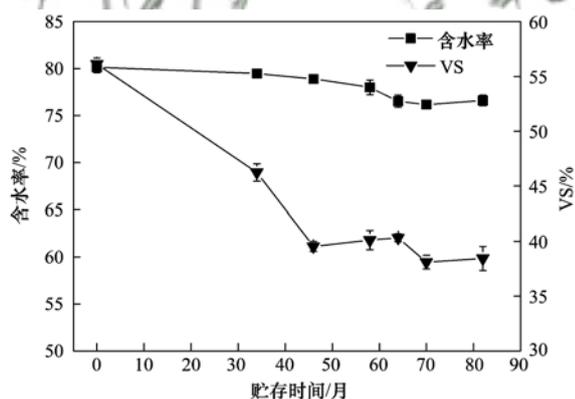


图 3 含水率和 VS 随时间变化

Fig. 3 Change of water content and VS with storage time

可以发现贮存污泥的含水率呈现起伏的变化趋势,由最初的 $80.14\% \pm 0.56\%$ 到最后的 $76.61\% \pm 0.53\%$,没有明显的规律性.这是由于贮存污泥露天放置,在此过程中受雨雪、蒸发等自然条件影响明显,同时微生物在此过程中进行生长、繁殖产热的生物热也会使水分减少,故含水率变化是自然降

水、蒸发以及微生物综合作用的结果.因此含水率的变化很难呈现一定的规律性.

从图 3 还可发现 VS 含量呈现下降趋势,直至最后趋于稳定.由最初的 $56.14\% \pm 0.55\%$ 降至 $38.45\% \pm 1.11\%$.由于在贮存污泥中含有大量的微生物,微生物进行生命活动所需要的营养物质皆由贮存污泥中的有机物提供,因此随着贮存时间的延长,导致 VS 含量不断减少.另外由于有机物的减少使污泥中微生物数量减少,故对有机物降解作用降低,从而使 VS 最后趋于稳定.

由于贮存污泥有机物含量明显低于新鲜污泥的含量,故后续对贮存污泥进行生物处理(如生物干化、好氧堆肥)时,必须添加合适的调理剂以提高其有机物含量^[21~23].

2.1.2 贮存污泥 pH 及总碱度的分析

图 4 主要呈现了 pH 及总碱度的变化情况.

pH 和总碱度在整个过程中变化类似,先增加后降低. pH 由最初的 7.12 ± 0.04 降至最终的 6.88 ± 0.09 ,总碱度由 $(14.26 \pm 0.48) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 变为 $(8.05 \pm 0.59) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.造成此种现象的原因可能是由于在贮存初期含氮化合物的氨化作用占主导,产生大量的氨气不能及时挥发,导致 pH 及总碱度升高,之后微生物在厌氧条件下进行新陈代谢产生小分子有机酸^[24,25],使 pH 及污泥总碱度降低,类似于堆肥过

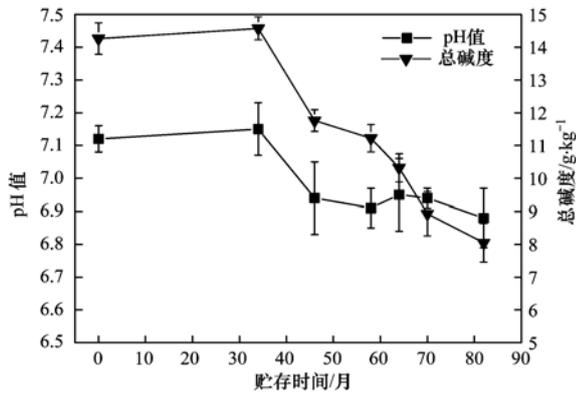


图4 pH和总碱度随时间变化规律

Fig. 4 Change of pH and total alkalinity with time

程中物料的酸化现象^[10]. 通过分析发现 pH 始终维持在 7 左右, 且对堆肥微生物来说最适宜的 pH 是 5.5 ~ 8.5^[26], 故为贮存污泥的后续处理创造了较好的条件.

2.2 污泥中营养元素随时间的变化

2.2.1 TC 及 TN 的变化

TC 是指污泥中总含碳量, 其含量的变化主要由有机碳降解及无机碳变化造成. TN 的变化主要来自含氮化合物的分解. 图 5 主要考察了 TC 以及 TN 的变化情况.

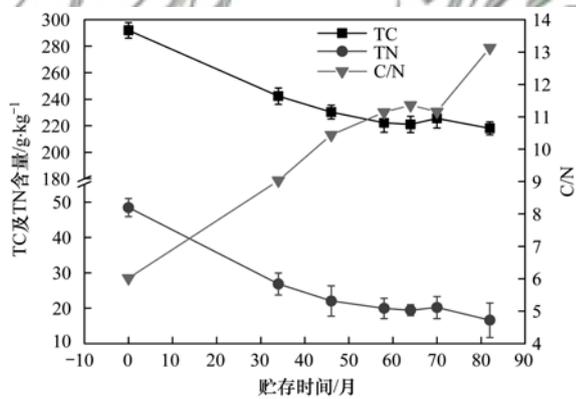


图5 TC及TN随时间变化规律

Fig. 5 Variation of TC and TN ratio with time

从图 5 中可以发现 TC 含量总体呈现下降趋势, 由最初的 $(291.95 \pm 5.89) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $(218.10 \pm 4.87) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 由于贮存污泥中含有大量微生物, 使污泥中的有机碳被分解, 碳源得以释放, 因此含量呈现下降. 同样 TN 含量逐渐减少, 由最初的 $(48.45 \pm 2.55) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减少至最后的 $(16.61 \pm 4.88) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 说明在此过程中始终伴随着氮素的损失. 同时可以发现 C/N 值随着贮存时间的延长逐渐升高, 由 6.02 升至最后的 13.13, 说明在此过程中氮素损失程度高于碳素. Nakasaki 等^[24] 和李秀金^[26]

的研究发现堆肥时 C/N 适宜范围为 25:1 ~ 35:1, 因此当贮存污泥进行后续堆肥、生物干化等资源化处理时需要加入高 C/N 值的废物(秸秆、木屑、稻壳等)调节.

2.2.2 氮元素的变化

全氮是污泥中各种形态氮素的总和, 氮素的固定和释放是氮素转化的两个主要方面. 图 6 呈现了贮存污泥中各种形式的氮素随贮存时间的变化情况.

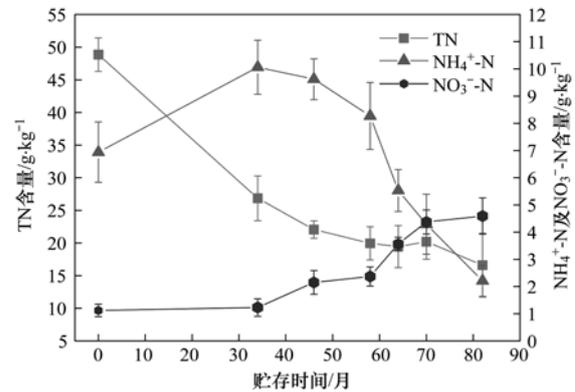


图6 氮元素随时间的变化规律

Fig. 6 Variation of nitrogen with time

从图 6 可以发现 NH_4^+ -N 含量先逐渐上升, 后持续减少, 最初为 $(6.94 \pm 1.11) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在第 34 个月达到最大值 $(10.06 \pm 0.99) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最后降至 $(2.21 \pm 0.57) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. NO_3^- -N 含量在此过程中表现出与 NH_4^+ -N 相反的趋势, 含量呈现轻微的上升趋势, 增加幅度有限. 这主要是由于在初期, 有机氮不断被微生物分解为铵态氮, 因此铵态氮含量出现短暂上升. 之后铵态氮转化为氨气挥发, 以及硝化细菌的硝化作用, 使得铵态氮含量下降, 硝态氮含量呈现上升^[26, 27]. 同时在贮存初期较低的 C/N 比, 意味着氮素过量, 使得氮素很容易转化为氨气挥发而导致氮素损失^[27]. 同时随着贮存时间延长局部缺氧会导致硝态氮的反硝化作用加强, 进一步导致氮素损失.

2.2.3 磷钾元素含量变化

除碳氮元素外, 污泥中还含有大量的磷、钾等植物养分^[3, 4]. 全磷包括无机磷和有机磷, 污泥中磷主要以无机磷(如 P_2O_5) 的形式存在于生物体内^[28]. 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)^[1]. 图 7 主要对磷、钾元素的变化情况进行了分析.

从图 7 中可以发现总磷(TP)逐渐减少, 由最初的 $(35.02 \pm 1.21) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至最终的 $(23.79 \pm$

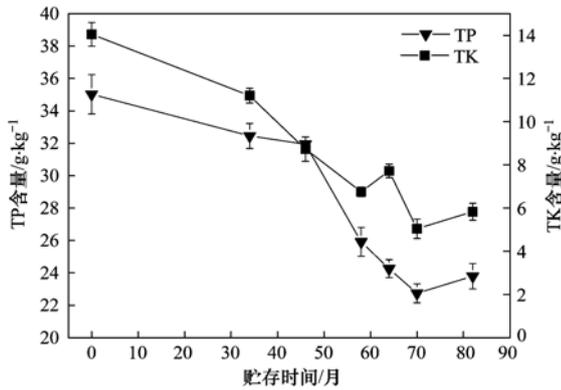


图7 TP和TK含量变化情况

Fig. 7 Variation of TP and TK content with time

0.78) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 由于不溶性的磷酸盐在微生物降解产生的VFAs(如乙酸、丙酸等)作用下溶解,形成可溶性的磷酸盐(磷的有效化),从而促进磷从污泥固相中向雨水等的释放,最终经渗滤流失,故污泥中磷的总量不断减少^[24, 27]. 同时研究发现当 $\omega(\text{N}):\omega(\text{P}) < 10:1$ 时^[27],磷的同化会停止. 由图6和图7可发现 $\omega(\text{N}):\omega(\text{P}) < 10:1$,所以在贮存污泥中不存在磷的同化现象,故磷的减少均来自不溶性磷酸盐的转化.

总钾(TK)含量在此过程中含量持续减少. 说明贮存污泥在贮存过程中会使污泥中的水溶性钾以及代换性钾随降雨过程逐渐溶解于雨水中,并且随着贮存时间的增加,非代换性钾也缓慢转换为代换性钾^[1]. 因此液相中钾含量逐渐升高,固相(污泥)中的钾含量逐渐减少.

2.3 微生物组成变化

贮存污泥成分复杂,含有大量的微生物,细菌、真菌、放线菌以原生动物等均可出现在污泥中^[29],图8呈现了污泥中不同微生物种类的变化趋势以及

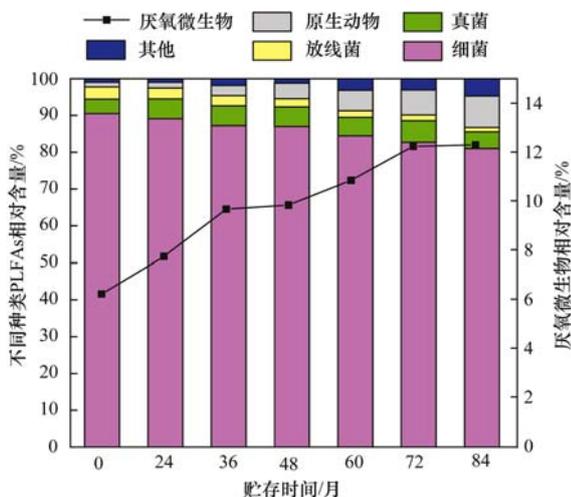


图8 微生物种类随贮存时间的变化

Fig. 8 Variation of microbial species with time

厌氧微生物的变化趋势.

从图8中可以看出细菌数量占有绝对优势,约占总微生物数量的90%左右. 其他几类微生物总量约占10%左右. 同时可以发现细菌数量呈现下降的趋势,这主要是由于随着有机物逐渐消耗,可供细菌利用的营养物质变少,导致许多细菌死亡. 真菌数量相对比较稳定,始终处于4%~5%左右,可能是由于细菌的大量消亡,导致微生物总体数量减少. 放线菌逐渐减少,到贮存后期,几乎检测不到放线菌的存在,这说明放线菌不适合在极端条件下生存繁殖^[27]. 但是原生动物却在整个过程中逐渐增加,从最初的几乎检测不到至最后可到8.56%. 出现此种现象的原因可能主要是原生动物可以进行腐生性营养^[26, 27],当细菌、真菌、放线菌等微生物因营养物质匮乏死亡后,原生动物可以吞食其机体进行自身的生命活动. 此外还可以发现厌氧微生物的含量呈现上升的趋势,从6.21%增加到12.29%,说明在贮存过程中污泥内部的厌氧区域在逐渐增大.

2.4 重金属总量及形态变化规律

2.4.1 重金属总量变化趋势分析

表4对Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg等重金属含量进行了分析,并与不同国家和地区的国家标准进行了对比,为后续の利用提供借鉴.

从表4中可以发现污泥中不同重金属元素含量存在很大差异,Cu、Zn是其中主要的重金属,其中Cu含量可达 $800\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284-1984)^[30]中Cu的最高限值($\text{pH}\geq 6.5$ 时最高限值为 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),因此污泥农用风险较大. Cd、As、Hg含量很少,含量仅为 $3\sim 17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 同时可以发现我国污泥农用重金属标准与其他国家及地区比起来相对更加严格,尤其是对于欧盟和法国,我国污泥中重金属含量均满足欧盟及法国的标准.

不同重金属元素变化趋势也有差异. Cu、Zn、Cd、As、Hg含量始终处于比较稳定的范围,贮存时间并未对其产生明显的影响,这是由于这些重金属主要以氧化态、残渣态等稳定态存在(见图9),故在污泥中不易发生迁移转化. Cr逐渐减少,可能是由于Cr主要以可交换态和可还原态形式存在于污泥中,易随降水等发生迁移. Ni在贮存过程中含量呈现先上升后下降的趋势,Pb的变化趋势与Ni相似,这可能由于重金属主要以残渣态形式存在于污泥中(见图9).

污泥在长期的贮存过程中各种重金属的总量并

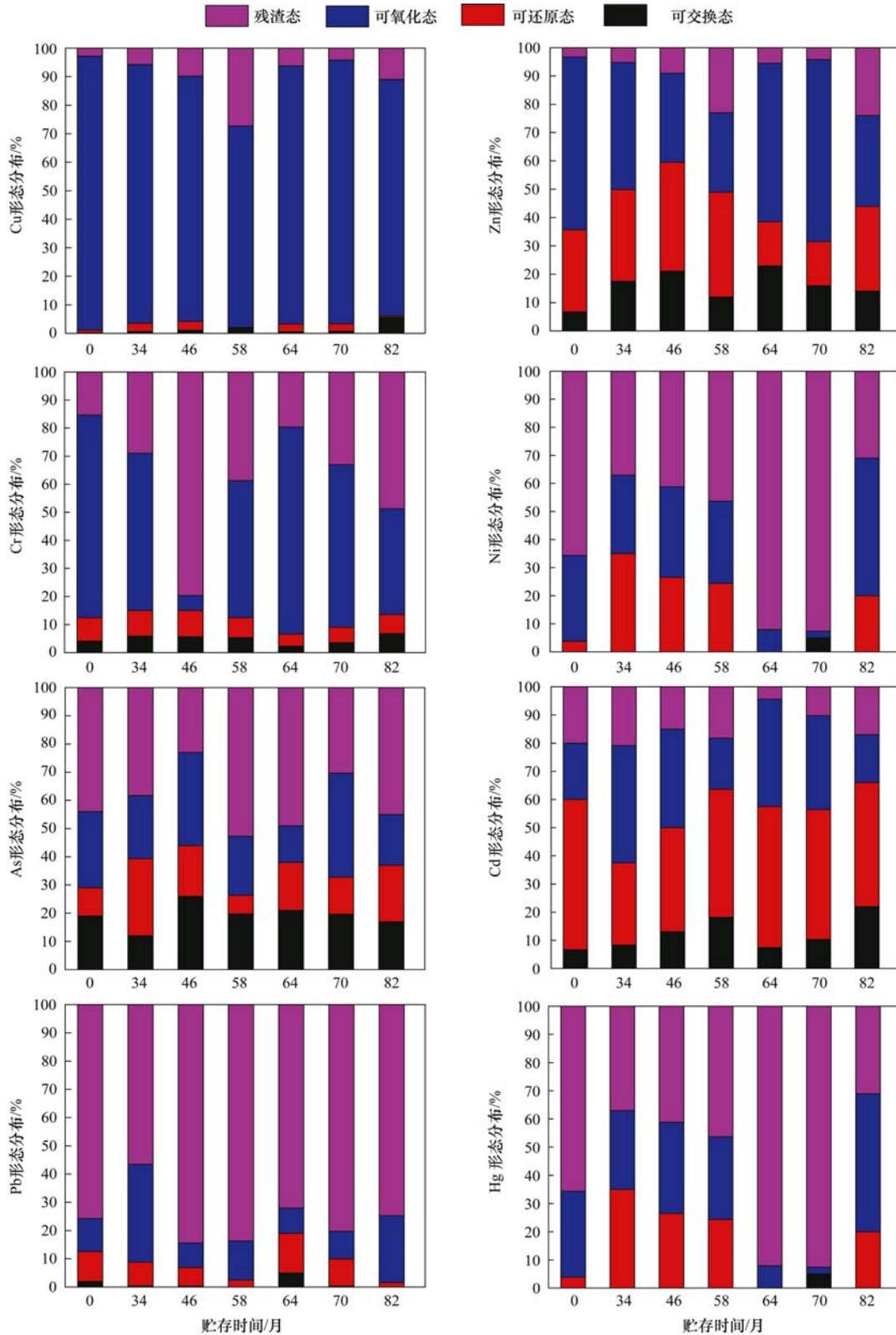


图9 重金属形态随时间的变化

Fig. 9 Variation of heavy metal fraction with time

没有发生明显的变化,均在一定的范围内波动,说明在贮存过程中重金属比较稳定,没有发生明显的迁移转化,这可能是由于污泥在贮存过程中并没有地

表植物生长,因此氧化态、残渣态重金属并未被植物吸收利用^[27],仅降水的影响不足以对重金属的总量产生明显的影响。

表 4 不同贮存时间下各种重金属的含量变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 4 Variation of heavy metal total content with time/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

贮存时间/月	重金属种类							
	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	As	Hg
0	821.11 ± 2.21	818.62 ± 1.16	100.01 ± 3.57	25.72 ± 1.10	37.73 ± 1.23	2.52 ± 0.32	12.51 ± 0.99	4.72 ± 0.44
34	811.22 ± 1.92	818.61 ± 0.78	50.62 ± 1.29	62.91 ± 3.19	72.90 ± 0.41	2.41 ± 0.98	11.40 ± 0.85	5.31 ± 0.67
46	809.71 ± 0.98	767.12 ± 0.67	55.40 ± 2.10	66.11 ± 0.75	56.20 ± 2.56	4.31 ± 1.10	9.01 ± 0.78	4.92 ± 0.55
58	832.12 ± 5.39	806.80 ± 1.18	45.28 ± 0.76	40.22 ± 0.56	34.65 ± 0.89	2.13 ± 0.11	9.12 ± 1.10	4.23 ± 0.48
64	826.62 ± 7.27	827.36 ± 5.68	40.31 ± 1.18	55.51 ± 0.96	55.53 ± 3.67	3.82 ± 0.78	10.13 ± 0.77	4.41 ± 0.49
70	815.13 ± 7.12	822.15 ± 6.65	44.43 ± 2.17	84.80 ± 1.79	48.82 ± 1.22	3.81 ± 0.67	12.22 ± 0.79	3.84 ± 0.33
82	799.41 ± 0.78	810.72 ± 3.79	34.33 ± 0.89	48.54 ± 1.21	36.55 ± 1.11	2.82 ± 0.55	8.24 ± 0.57	3.52 ± 0.19
GB 4284-1984 (pH < 6.5)	250	500	600	100	300	5	75	5
GB 4284-1984 (pH ≥ 6.5)	500	1000	1000	200	1000	20	75	15
欧盟标准	1750	4000	1000	400	1200	40	—	25
法国标准	1000	3000	1000	200	800	15	—	10
德国标准	800	2500	900	200	900	10	—	8

2.4.2 重金属形态变化趋势分析

重金属在不同贮存时间下形态分布情况结果如图 9,从中可以发现不同重金属形态变化不同,Cu 主要以氧化态存在,说明 Cu 在贮存污泥中的存在状态很稳定,且不易被植物吸收利用^[31]; Zn 各形态的含量大小分布为:可氧化态 > 可还原态 > 可交换态 > 残渣态,残渣态含量总体呈现增加的趋势,说明随着贮存时间的增加 Zn 朝着更加稳定的形态转变; Cd 的主要形态为可氧化态和残渣态,可交换态和可还原态在贮存过程中逐渐减少,说明 Cd 主要以不可利用形态存在,且逐渐向稳定的形态转变; Ni 的含量在贮存污泥中并不高,主要存在形态为残渣态; Cr 的含量同样很低,从其形态分布来看可还原态含量最高,残渣态含量始终比较稳定,可交换态含量逐渐增加,说明 Cr 在污泥中的稳定性不高; Pb 主要以残渣态形态存在,说明 Pb 的性质很稳定,不易发生迁移转换。同 Cd 一样,As、Hg 含量也很低,且残渣态含量最高,说明在污泥中均以比较稳定的形态存在。

可以发现各种形态之间的转化并不明显,且大部分的重金属始终以比较稳定的可氧化态和残渣态形态存在,并未发现可交换态等不稳定态向较稳定的可氧化态及残渣态大幅度转变,说明贮存时间对重金属形态变化影响并不显著。

3 结论

(1)对浑河流域内贮存污泥性质及演变规律分析表明,pH 在贮存过程中未产生明显波动,稳定在 7 左右,含水率变化无明显规律性,其与贮存时间无关,主要与外界降雨、蒸发等自然条件有关。

(2)贮存污泥中含有丰富的有机质,氮、磷、钾

含量丰富,但是其含量均随着贮存时间增加逐渐减少,明显低于新鲜污泥。

(3)随着贮存时间的增加,污泥中的厌氧微生物增加,但总的微生物呈现减少趋势,细菌仍占绝对优势。

(4)Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 等重金属含量及形态在贮存过程中并未发生明显规律性变化,大部分重金属均以可氧化态及残渣态比较稳定的形态存在,不易被植物吸收利用。

(5)我国污泥农用标准严于其他国家和地区的标准,Cu 含量超过 GB 4284-1984 中 Cu 的最高限值,因此贮存污泥农用在我国具有一定的风险。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201103/P020110518575321092122.pdf>, 2011-03.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 赵影,龚繁,柯龙,等. 城市污水厂生化污泥成分分析及脱水效果分析[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(4): 81-84.

- Zhao Y, Gong F, Ke L, *et al.* Analysis on the composition and dewatering of biochemical sludge in urban sewage treatment plants [J]. *Environmental Science Survey*, 2015, **34**(4): 81-84.
- [6] 栾奕, 陈晨, 薛莲, 等. 城市污水厂污泥资源化利用途径的研究[J]. *资源节约与环保*, 2015, (4): 49.
- [7] 郭广慧, 杨军, 陈同斌, 等. 中国城市污泥的有机质和养分含量及其变化趋势[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(13): 120-121.
- Guo G H, Yang J, Chen T B, *et al.* Concentrations and variation of organic matter and nutrients in municipal sludge of China[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, **25**(13): 120-121.
- [8] Li X W, Dai X H, Yuan S J, *et al.* Thermal analysis and 454 pyrosequencing to evaluate the performance and mechanisms for deep stabilization and reduction of high-solid anaerobically digested sludge using biodrying process [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **175**: 245-253.
- [9] CJ/T 221-2005, 城市污水处理厂污泥检验方法[S].
- [10] 李云蓓. 碳源调控对污泥堆肥过程氮素损失的影响及其作用机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. 30-55.
- [11] 郑国砥, 高定, 陈同斌, 等. 污泥堆肥过程中氮素损失和氨气释放的动态与调控[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(11): 121-124.
- Zheng G D, Gao D, Chen T B, *et al.* Changes of nitrogen loss and ammonia emission during composting of municipal sludge and their control[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, **25**(11): 121-124.
- [12] Li R H, Wang J J, Zhang Z Q, *et al.* Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **121**: 362-368.
- [13] Zhang S H, Chen Z Q, Wen Q X, *et al.* Effectiveness of bulking agents for co-composting penicillin mycelial dreg (PMD) and sewage sludge in pilot-scale system[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(2): 1362-1370.
- [14] 吴愉萍. 基于磷脂脂肪酸(PLFA)分析技术的土壤微生物群落结构多样性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 30-35.
- [15] 喻曼, 肖华, 张棋, 等. PLFA法和DGGE法分析堆肥细菌群落变化[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(6): 1242-1247.
- Yu M, Xiao H, Zhang Q, *et al.* Changes of bacterial communities in composting by PLFA and DGGE methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(6): 1242-1247.
- [16] 唐瑶, 李碧清, 冯新, 等. 城市污泥重金属钝化试验研究[J]. *湖南生态科学学报*, 2015, **2**(1): 24-27.
- Tang Y, Li B Q, Feng X, *et al.* Experimental study on the inactivation of heavy metal in sewage sludge [J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2015, **2**(1): 24-27.
- [17] 孙西宁. 污泥堆肥过程中重金属形态变化的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. 11-15.
- [18] 张广川. 土壤中重金属形态的化学分析概述[J]. *世界有色金属*, 2016, (17): 148-149.
- Zhang G C. Chemical analysis of heavy metal speciation in soils [J]. *World Nonferrous Metals*, 2016, (17): 148-149.
- [19] 易蕾. 土壤中重金属形态的化学分析[J]. *化工管理*, 2013, (5): 206-207.
- [20] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 57-61.
- [21] Huiliñir C, Villegas M. Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge[J]. *Water Research*, 2015, **82**: 118-128.
- [22] Li X W, Dai X H, Dai L L, *et al.* Two-dimensional FTIR correlation spectroscopy reveals chemical changes in dissolved organic matter during the biodrying process of Raw Sludge and anaerobically digested sludge [J]. *RSC Advances*, 2015, **5**(100): 82087-82096.
- [23] Nomedá S, Valdas P, Chen S Y, *et al.* Variations of metal distribution in sewage sludge composting [J]. *Waste Management*, 2008, **28**(9): 1637-1644.
- [24] Nakasaki K, Ohtaki A, Takano H. Biodegradable plastic reduces ammonia emission during composting[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2000, **70**(2): 185-188.
- [25] Torkashvand A M. Influence of the molasses and office paper as carbonic amendments in municipal compost production [J]. *Biotechnology*, 2009, **8**(1): 114-119.
- [26] 李秀金. 固体废物处理与资源化[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [27] 李建政, 任南琪. 污染控制微生物生态学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [28] 孙连鹏, 谭锦欣, 叶挺进, 等. 剩余污泥中磷的回收利用[J]. *能源环境保护*, 2014, **28**(1): 8-12.
- Sun L P, Tan J X, Ye T J, *et al.* Recovery and utilization of phosphorus in excess sludge [J]. *Energy Environmental Protection*, 2014, **28**(1): 8-12.
- [29] Cai L, Chen T B, Gao D, *et al.* Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge [J]. *Water Research*, 2016, **90**: 44-51.
- [30] GB 4284-1984, 农用污泥中污染物控制标准[S].
- [31] 冯春, 杨光, 杜俊, 等. 污水污泥堆肥重金属总量及形态变化[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(1): 97-102.
- Feng C, Yang G, Du J, *et al.* Study on the changes of total contents and the status of heavy metals for sewage sludge composting[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(1): 97-102.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNBf-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)