

不同方式处理污泥对废弃矿区土壤微生物的影响

杨长明¹, 牛京会¹, 王德顺², 范博博¹

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 巢湖市岗岭污水处理厂, 安徽 巢湖 238000)

摘要: 为寻找适合巢湖流域的污泥处理处置方式及满足废弃矿区土壤修复对有机改良基质的需求,通过盆栽试验研究了添加脱水污泥(DS)、好氧发酵污泥(AFS)和厌氧消化污泥(ADS)后对巢湖流域废弃矿区土壤基本理化性质及微生物特性的影响。结果表明,添加上述3种不同方式处理的污泥均能明显提高废弃矿区土壤的有机质和氮、磷养分含量,pH值均有不同程度降低,而土壤电导率(EC)均明显增加,但仍低于植物正常生长的限值;同时,添加处理后的污泥可以显著增加土壤微生物生物量碳、氮含量,并促进脱氢酶、转化酶、磷酸酶和脲酶的活性。3种不同方式处理的污泥对废弃矿区土壤的质量具有不同程度的改善效果,且以好氧发酵污泥的改良效果最佳。

关键词: 巢湖流域; 废弃矿区土壤; 脱水污泥; 好氧发酵污泥; 厌氧消化污泥; 微生物特性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0114-06

Effect of Sludge Treated by Different Methods on Soil Microorganisms in Abandoned Mining Areas

YANG Chang-ming¹, NIU Jing-hui¹, WANG De-shun², FAN Bo-bo¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Gangling Wastewater Treatment Plant, Chaohu 238000, China)

Abstract: In order to find suitable treatment and disposal methods of sewage sludge as well as meeting the demand of organic improved matrix for soil remediation of abandoned mining areas in Chaohu Lake Basin, a pot experiment was conducted to explore the effects of adding dewatered sludge (DS), aerobic fermentation sludge (AFS) and anaerobic digestion sludge (ADS) on basic physicochemical properties and microbial characteristics of soil in an abandoned mining area. The organic matter, nitrogen and phosphorus nutrients contents of the abandoned mining soil could be significantly increased by adding sludge that treated by different methods. The pH values decreased in varying degrees. The values of electrical conductivity (EC) increased significantly, but it was still lower than the normal limit for plant growth. At the same time, the soil microbial biomass carbon and nitrogen contents were significantly increased by adding the treated sludge, and the activities of dehydrogenase, invertase, phosphatase and urease were promoted. It could be seen that the sludge treated by three different methods had different degrees of improvement effect on the soil quality of the abandoned mining areas, and the AFS had the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07603-003); 上海市科学技术委员会科研计划项目(课题)“绿色技术银行示范应用研究”(16dz1206601)

best improvement effect.

Key words: Chaohu Lake Basin; soil of abandoned mining area; dewatered sludge; aerobic fermentation sludge; anaerobic digestion sludge; microbial characteristics

为治理巢湖的水体环境,目前整个巢湖流域加大了城市管网和污水处理厂的改造和建设,提高了污水处理效率和处理能力^[1],这导致污泥产量急剧增加。市政污泥是污水处理过程中产生的主要副产物之一,是由砂子、微生物残体等无机和有机物质组成的复杂残余物^[2]。另外,重金属、寄生虫卵和病原体等微观物质吸附在以上复杂残余物上^[3]。为解决污泥引起的一系列环境问题,需采用单一或者复合方法对污泥进行稳定化处理,并寻找合适的污泥处置途径,目前国内外对污泥的处理技术主要有浓缩、脱水、好氧发酵和厌氧消化等^[4],污泥处置则以土地利用的方式为主^[5]。

近年来,巢湖流域乃至全国对矿产资源持续、大量、粗放式开采,导致矿区及附近的表层或深层土壤受损严重,土壤容重、入渗率、有机质、氮和磷等理化性质恶化,土壤中微生物量、微生物多样性及酶活性大大降低,使矿区失去了生产价值和社会服务功能等^[6]。微生物在土壤生态系统中的作用显著,可通过多种酶促生化反应促进有机质和养分在生态系统中的分解、转化和循环,微生物特性对土壤环境的变化比土壤物理或化学性质更敏感^[7-8],微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)以及关键酶活性等微生物特性可以作为评价土壤质量的敏感指标。目前逐渐推广施用土壤改良剂的废弃矿区土壤生态修复技术,所以对土壤改良有机质的需求量巨大。考虑到污泥中的氮、磷及有机质含量较高,可以将污泥资源化利用与废弃矿山生态修复相结合。

笔者将巢湖市岗岭污水厂的脱水污泥、好氧发酵污泥和厌氧消化污泥分别添加于废弃矿区土壤中,以微生物特性的变化情况来分析不同方式处理污泥对废弃矿区土壤质量的改良效果,以此来评价巢湖市乃至整个巢湖流域市政污泥资源化利用与当地废弃矿山生态修复发挥协同效应的可行性,并为最终解决当地市政污泥及废弃矿山的修复问题提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用废弃矿区土壤采自巢湖市散兵镇大黄

山废弃矿区,其基本理化指标见表1。可见,该矿区土壤的pH值明显偏高,有机质、TN、TP、碱解氮和速效磷的含量明显偏低,该废弃矿山土壤环境难以维持动植物和微生物的生长繁殖,不利于后期植被恢复和生态修复。

表1 供试材料基本理化性质

Tab. 1 Basic physicochemical properties of tested materials

项 目	废弃矿区土壤	脱水污泥	好氧发酵污泥	厌氧消化污泥
pH 值	8.90	7.57	5.62	7.10
电导率(EC)/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	86.3	1 437	929	1 633
有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.141	—	—	—
VS : TS/%	—	24	39	29
TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.11	7.44	6.28	8.41
TP/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.06	5.32	7.24	7.16
碱解氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	42.03	672.53	588.94	603.22
速效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	10.11	786.55	163.21	179.86

试验使用的脱水污泥、好氧发酵污泥和厌氧消化污泥均来自岗岭污水处理厂水专项污泥研究基地,其基本理化指标也列于表1。3种供试污泥中的氮、磷养分含量明显高于供试土壤,挥发性固体的含量也较高,pH值呈现弱酸或弱碱性,并且重金属含量较低(数据未列出),可以满足《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)和《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》(CJ/T 309—2009)规定的要求,具有土地利用价值,可以用于土地改良。

采用盆栽试验,花盆顶部尺寸为:长×宽=43 cm×20 cm。分别将以上3种过10目筛的脱水污泥、好氧发酵污泥和厌氧消化污泥与废弃矿区土壤样品按照3:10的质量比混匀后装入盆中,在土层表面以下1~2 cm处均匀播洒3.44 g高羊茅草植物种子(按40 g/m²的播种量)^[9],盆栽试验在温室大棚中进行,试验期间维持塑料盆中土壤含水量为最大持水量的80%,试验时间为2017年10月—2018年1月。

1.2 样品采集与分析方法

1.2.1 样品采集

试验期间,每月首日从各处理盆栽中相同点位

采集表层土壤,剔除掉其中的植物残体和根系,将新鲜土样冷冻保存,用来分析微生物特性随时间的动态变化。

1.2.2 分析方法

土壤和污泥的 pH 值、电导率采用电极法测定;污泥 VS/TS 采用称重法测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法(NY/T 1121.6—2006)测定,用测得的有机碳值乘以转换系数(1.724),间接测得土壤有机质含量;土壤和污泥的 TP 浓度采用碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632—2011)测定;土壤和污泥的 TN 浓度采用凯氏法(HJ 717—2014)测定;土壤和污泥的碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤和污泥的速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法(HJ 704—2014)测定。

土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量采用氯仿熏蒸法-K₂SO₄溶液提取法测定^[10]。关于土壤关键酶活性的测定,采用 TTC 比色法测定脱氢酶活性,单位为 mg/(g·d);采用苯酚-次氯酸钠比色法测定脲酶活性,以 24 h 后 1 g 土壤中产生的 NH₃-N 质量来计算,单位为 mg/(g·d);利用蔗糖作为基质,以葡萄糖与 3,5-二硝基水杨酸生成的黄色物质来计算转化酶活性,单位为 mg/(g·d);采用磷酸苯二钠比色法测定磷酸酶

活性,以 24 h 后 1 g 土壤释放的酚质量(mg)来表示^[11],单位为 mg/(g·d)。

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 统计软件处理试验数据,所有数据通过 ANOVA 变异分析程序进行统计分析,采用邓肯新复检验法对添加不同方式处理污泥的废弃矿区土壤理化指标和微生物特征指标进行差异显著性分析,当 $P < 0.05$ 时视为显著。

2 结果与分析

2.1 不同方式处理污泥对土壤理化性质的影响

不同方式处理污泥对土壤基本理化性质的影响见表 2。可以看出,添加不同方式处理的污泥后,土壤 pH 值均降低,添加脱水、好氧发酵和厌氧消化污泥的土壤电导率分别增加至 908、552 和 1 144 $\mu\text{S}/\text{cm}$,但是均低于植物正常生长要求的电导率限值(1 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$),添加好氧发酵污泥的土壤中 EC 值增幅最小。添加脱水、好氧发酵和厌氧消化污泥土壤的有机质分别为 25.6、32.1 和 33.3 g/kg,分别为对照组的 14.7、18.4 和 19.1 倍,可见添加好氧发酵和厌氧消化污泥对土壤有机质含量的提高更为显著。根据中国土壤养分指标分级标准,添加污泥后土壤的总氮、碱解氮和速效磷等级为“很肥沃”或“较肥沃”,说明添加处理后的污泥可以改善土壤的营养状况。

表 2 添加不同方式处理污泥对废弃矿区土壤基本理化性质的影响

Tab. 2 Effect of different treated sludge on physicochemical properties of abandoned mining area soil

项 目	pH 值 (土:水=1:2.5)	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	8.89	117.2	1.83	0.13	38.44	8.96
DS	7.97	908.1	25.6	2.31	231.2	243
AFS	8.16	552.4	32.1	1.96	206.1	56.0
ADS	7.94	1 144	33.3	2.60	210.4	60.8

注: CK 表示对照组,DS、AFS、ADS 分别表示添加脱水污泥、好氧发酵污泥和厌氧消化污泥的土壤。

2.2 不同方式处理污泥对 MBC 和 MBN 的影响

试验过程中,对照组土壤和添加不同方式处理污泥的土壤中 MBC 和 MBN 的变化如图 1 所示。可以看出,废弃矿区土壤有机质和氮、磷养分含量较低,土壤理化性质严重恶化,微生物生长环境不佳,微生物繁殖活动受到极大的影响,导致土壤 MBC 和 MBN 均偏低。微生物繁殖受限、生化反应过程少、土壤关键酶活性较差,导致土壤生态系统无法正常循环。有研究表明,土壤中 MBC 和 MBN 会随着土壤性质的改善而增加。添加处理污泥土壤中的 MBC 和 MBN 明显高于对照组,反应初期,添加脱

水、好氧发酵和厌氧消化污泥土壤的 MBC 分别增加了 38.2%、124.8% 和 132.2%,MBN 分别增加了 53.3%、60.2% 和 64.3%,可见添加好氧发酵污泥和厌氧消化污泥的土壤中 MBC 和 MBN 增加的幅度较大。这是由于土壤中的微生物主要以异养型为主^[12],土壤微生物生物量与有机质之间存在正相关性,微生物生物量会随着有机质含量的增加而增大,添加不同方式处理污泥后大量的有机质和氮、磷养分进入土壤,为微生物提供了丰富的能源,促进了微生物的新陈代谢活动,增加了其对碳、氮的固持,从而提高了土壤的 MBC 和 MBN^[13]。

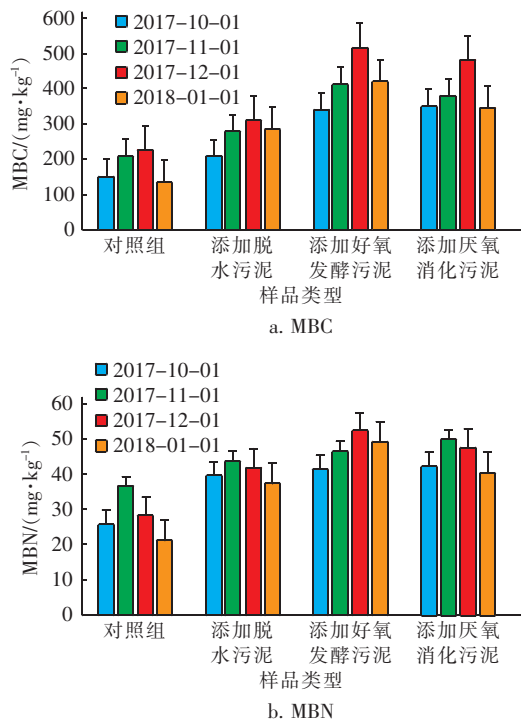


图 1 添加不同方式处理污泥对 MBC 和 MBN 的影响
Fig. 1 Effect of different treated sludge on MBC and MBN

在整个试验过程中, MBC 和 MBN 均先升高后降低, 分别进行至第 4 个月和第 3 个月时, 各土壤中的 MBC 和 MBN 含量明显降低, 但整个过程中添加不同方式处理污泥土壤的 MBC 和 MBN 含量均高于对照组。这是由于试验前期添加污泥增加了有机质、总氮和碱解氮等营养物质的含量, 为土壤微生物提供了丰富的能源, 促进了微生物的新陈代谢活动, 增加了对碳、氮的固持, 土壤的 MBC 和 MBN 得以提高。试验后期, 土壤中的有机质和氮、磷养分被高羊茅草植物、微生物吸收利用, 养分含量下降, 微生物对碳、氮固持作用的减弱和土壤供碳、氮能力的下降导致 MBC 和 MBN 降低。综合来看, 不同方式处理污泥对土壤具有改良作用, 且添加好氧发酵污泥的处理效果更佳。

2.3 添加不同污泥后土壤关键酶活性的变化

土壤酶参与土壤中各种生物化学过程, 如腐殖质的分解与合成, 动植物残体和微生物残体的分解及其合成有机化合物的水解与转化, 某些无机化合物的氧化、还原反应等。土壤酶的活性大致反映了某一种土壤生态状况下生物化学过程的相对强度, 可作为判断土壤生物化学过程强度及评价土壤肥力的指标之一。土壤酶易受环境中物理、化学和生物

性质的影响, 一方面可以反映土壤微生物的总体活性, 另一方面也可以敏感反映土壤质量的变化^[14-15]。添加不同处理方式污泥后废弃矿区土壤中关键酶活性的动态变化见表 3。可以看出, 整个试验过程中, 对照组土壤和添加不同污泥的土壤中脱氢酶、转化酶、脲酶和磷酸酶的活性随着时间的延长呈现先上升后下降的变化趋势, 后期下降的原因可能是进入严冬后温度较低, 再加上植物枯黄, 导致土壤酶活性下降, 但是整个试验阶段添加不同方式处理污泥土壤的酶活性始终显著高于对照组。

表 3 添加不同方式处理污泥后废弃矿区土壤中关键酶活性的动态变化

Tab. 3 Dynamic change of key enzyme activities of abandoned mining area soil after adding sludge treated by different methods

日期	试验编号	脱氢酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	转化酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	磷酸酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
2017-10-01	CK	2.86	11.40	0.29	0.38
	DS	3.19	12.10	0.38	0.51
	AFS	4.25	14.57	0.52	0.73
	ADS	4.10	14.10	0.61	0.68
2017-11-01	CK	3.52	16.83	0.39	0.56
	DS	4.11	21.42	0.42	0.63
	AFS	6.89	28.07	0.66	0.83
	ADS	5.45	24.27	0.59	0.79
2017-12-01	CK	3.23	13.57	0.33	0.39
	DS	4.42	24.67	0.46	0.66
	AFS	7.53	36.67	0.79	0.93
	ADS	5.90	34.10	0.55	0.81
2018-01-01	CK	2.57	9.65	0.22	0.31
	DS	4.39	20.50	0.44	0.53
	AFS	7.36	29.13	0.68	0.82
	ADS	5.80	25.53	0.47	0.65

试验结束时, 与对照组相比, 添加脱水污泥、好氧发酵污泥和厌氧消化污泥土壤的脱氢酶活性分别提高了 70.8%、186.4% 和 125.7%, 转化酶活性分别提高了 112.4%、201.8% 和 164.6%, 脲酶活性分别提高了 100.0%、209.1% 和 113.6%, 磷酸酶活性分别提高了 71.0%、164.5% 和 109.7%。可见, 添加好氧发酵污泥和厌氧消化污泥可以明显提高废弃矿区土壤中关键酶的活性, 从而有利于土壤生化过程的进行, 加速土壤中养分循环和有效养分的供给。同时还发现, 添加好氧发酵污泥和厌氧消化污泥对土壤中关键酶活性的增强效果明显高于脱水污泥,

且好氧发酵污泥对土壤酶活性的提升作用最显著,这也说明污泥经过好氧发酵后更适合作为废弃矿区土壤改良基质。

3 结论

① 添加不同方式处理的市政污泥可以明显缓解巢湖流域周边废弃矿区土壤 pH 值过高的问题,同时提升土壤有机质含量和氮、磷养分含量,特别是大大增加了有效养分的供给,这为后期废弃矿区植物恢复提供了良好的基质。但是,添加处理后的污泥明显增加了土壤的电导率,可能会导致土壤盐碱,需加强监控。

② 添加不同方式处理污泥显著增加了废弃矿区土壤中微生物生物量碳、氮,并提升了土壤中关键酶的活性,可以大大促进土壤的生化过程,加速养分循环和受损土壤的生态修复。通过比较发现,添加好氧发酵后的污泥对土壤微生物量碳、氮和活性的提升作用更为明显。

③ 通过好氧发酵稳定化处理后,可以实现巢湖市污泥资源化利用与当地废弃矿区生态修复协同效应,既可以解决巢湖流域污泥污染的问题,也可以改善废弃矿区土壤的环境质量,同时满足废弃矿区土壤修复对改良有机基质的需求。

参考文献:

- [1] 孟婷婷,陈厦,王玉辉. 巢湖流域水环境治理回顾及治理对策研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(4): 152-155.
Meng Tingting, Chen Sha, Wang Yuhui. Water pollution control process of Chao Lake basin and new suggestions [J]. Environmental Science and Management, 2016, 41 (4): 152-155 (in Chinese).
- [2] 张权,张有为,蒲港,等. 污泥处理现状及资源化利用研究综述[J]. 山西建筑,2018,44(6): 192-194.
Zhang Quan, Zhang Youwei, Pu Gang, et al. Review on present situation and utilization of sludge treatment [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44 (6): 192-194 (in Chinese).
- [3] Razaee F, Danesh S, Tavakkolizadeh M, et al. Investigating chemical, physical and mechanical properties of eco-cement produced using dry sewage sludge and traditional raw materials [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214: 749-757.
- [4] Villamil J A, Mohedano A F, Rodriguez J J, et al. Anaerobic co-digestion of the aqueous phase from hydrothermally treated waste activated sludge with primary sewage sludge. A kinetic study [J]. J Environ Manage, 2019, 231: 726-733.
- [5] 石丽娜,徐剑. 城市污水处理厂污泥的处理和处置 [J]. 环境与发展, 2018, 30(3): 39-40.
Shi Lina, Xu Jian. Municipal sewage treatment plant sludge treatment and disposal [J]. Environment and Development, 2018, 30(3): 39-40 (in Chinese).
- [6] 陈金辉. 矿山废弃地植被恢复方式对土壤性质的影响 [J]. 金属矿山, 2016(3): 147-150.
Chen Jinhui. Effect of mine wastelands vegetation on soil properties [J]. Metal Mine, 2016 (3): 147-150 (in Chinese).
- [7] Nannipieri P, Kandeler E, Ruggiero P. Enzyme Activities and Microbiological and Biochemical Processes in Soil [M]. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [8] Paz-Ferreiro J, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, et al. Biochemical properties in managed grassland soils in a temperate humid zone: modifications of soil quality as a consequence of intensive grassland use [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(7): 711-722.
- [9] 刘强,陈玲,黄游,等. 施用污泥堆肥对土壤环境及高羊茅生长的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 199-203.
Liu Qiang, Chen Ling, Huang You, et al. Effects of application of sewage sludge compost on soil environment and *Festuca arundinacea* Schreb [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28 (1): 199-203 (in Chinese).
- [10] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
Lin Xiangui. Principles and Methods of Soil Microbiology Research [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010 (in Chinese).
- [11] 杨长明,范博博,荆亚超. 厌氧消化污泥对退化苗圃土壤的改良效果研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2018, 46(1): 74-80.
Yang Changming, Fan Bobo, Jing Yachao. Effects of anaerobically digested sewage sludge addition on improvement of a degraded nursery garden soil [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2018, 46 (1): 74-80 (in Chinese).
- [12] 刘恩科,赵秉强,李秀英,等. 不同施肥制度土壤微生物量碳氮变化及细菌群落 16S rDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 分析 [J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1079-1085.

- Liu Enke, Zhao Bingqiang, Li Xiuying, *et al.* Microbial C and N biomass and soil community analysis using DGGE of 16S rDNA V3 fragment PCR products under different long-term fertilization systems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1079 – 1085 (in Chinese).
- [13] Zhang W J, Li R R, Ai X Y, *et al.* Enzyme activity and microbial biomass availability in artificial soils on rock-cut slopes restored with outside soil spray seeding (OSSS): Influence of topography and season [J]. *J Environ Manage*, 2018, 211: 287 – 295.
- [14] Li Y, Zhang L P, Fang S Z, *et al.* Variation of soil enzyme activity and microbial biomass in poplar plantations of different genotypes and stem spacings [J]. *J For Res*, 2018, 29(4): 963 – 972.
- [15] Bobulská L, Fazekašová D, Angelovicová L. Vertical profiles of soil properties and microbial activities in peatbog soils in Slovakia [J]. *Environ Process*, 2015, 2: 411 – 418.



作者简介: 杨长明 (1973 –), 男, 安徽巢湖人, 博士, 研究员, 主要研究方向为污泥稳定化与资源化利用及污染土壤修复。

E-mail: cmyang@ tongji. edu. cn

收稿日期: 2019 – 05 – 23

(上接第 113 页)

- Odour Compounds in Water with Aluminum Oxides [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese).
- [4] Dong Y M, Yang H X, He K, *et al.* β -MnO₂ nanowires: A novel ozonation catalyst for water treatment [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009, 85(3/4): 155 – 161.
- [5] Yin R L, Guo W Q, Zhou X J, *et al.* Enhanced sulfamethoxazole ozonation based on magnetic Fe₃O₄ nanoparticles by noble-metal-free catalysis: Catalytic performance and degradation mechanism [J]. *RSC Adv*, 2016, 6: 19265 – 19270.
- [6] Zhu H, Ma W C, Han H J, *et al.* Catalytic ozonation of quinoline using nano-MgO: Efficacy, pathways, mechanisms and its application to real biologically pretreated coal gasification wastewater [J]. *Chem Eng J*, 2017, 327: 91 – 99.
- [7] Yuan L, Shen J M, Chen Z L, *et al.* Role of Fe/pumice composition and structure in promoting ozonation reactions

[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, 180: 707 – 714.



作者简介: 韩洪军 (1955 –), 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 主要研究方向为煤化工废水零排放。

E-mail: han13946003379@163.com

收稿日期: 2019 – 05 – 23