

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果

董梦珂, 李怀正*, 徐一啸

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 通过在传统污泥干化湿地中投加蚯蚓, 研究了蚯蚓人工湿地处理污泥技术的可操作性; 同时研究了不同污泥负荷 48、65、80 $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、不同蚯蚓投放密度 0、0.43、0.54、0.65 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以及不同进泥频率等工况条件下, 该模拟湿地装置表层污泥的脱水和稳定化效果。结果表明, 通过设置入土深度为 10 mm 的挡板, 能够提供蚯蚓在进泥期间的栖身之所, 保证蚯蚓湿地的正常运行; 蚯蚓的加入能够显著改善人工湿地污泥干化和稳定化的效能, 使表层污泥脱氢酶活性 (dehydrogenase activity, DHA) 更低, 含水率和 VS 分别下降了 15% 和 10% 左右, 并且在 0.65 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的蚯蚓投放密度下, 蚯蚓人工湿地的稳定化效果最好。随着污泥负荷的增加以及进泥频率的降低, 蚯蚓人工湿地运行效能会变差。

关键词: 人工湿地; 污泥干化床; 蚯蚓; 污泥脱水; 污泥稳定化

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1159-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201609212

Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions

DONG Meng-ke, LI Huai-zheng*, XU Yi-xiao

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The feasibility of a new sludge treatment technology of earthworm constructed wetlands was tested by adding earthworm into the traditional sludge drying reed beds. The dewatering and stabilization effects of the upper layer sludge were tested under different sludge loading rates of 48, 65, 80 $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, different earthworm stocking densities of 0, 0.43, 0.54, 0.65 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and different sludge loading frequencies. The results indicated that it was feasible to provide a shelter for earthworm during the loading period by setting a damper with a buried depth of 10 mm. The addition of earthworm could effectively improve the dewatering and stabilization effects of earthworm constructed wetlands, by lowering the DHA and decreasing the moisture content and VS of sludge by 15% and 10% respectively. The stabilization effects of earthworm constructed wetlands reached the best under the stocking density of 0.65 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$. With the increase of sludge loading rate and decrease of loading frequency, the running efficiency of earthworm constructed wetlands would be worse.

Key words: constructed wetlands; sludge drying reed beds; earthworm; sludge dewatering; sludge stabilization

随着我国农村生活污水处理进程的持续加快和对环保要求的逐渐提高, 农村生活污水处理设施的数量和处理能力逐年增加, 产生的剩余污泥量也日益增多。加强农村生活污水和污泥的管理, 是改善农村生态环境和防止农业面源污染的重要措施, 而污泥有效、安全地处理和处置已成为影响农村污水处理设施正常运行和发展的瓶颈^[1]。

由于农村地区污水处理规模小, 污泥产生量小, 农用消耗快, 添置专门的装置进行污泥处理处置是不现实的^[2]。而人工湿地处理污泥技术作为土地利用的一种, 结合了垂直潜流人工湿地技术和污泥干化床技术^[3], 充分利用植物、微生物、阳光和风等自然的力量, 对污泥进行稳定化的同时, 形成肥料产品, 具有耗能低、运行费用低、处理效果佳等优点, 尤其适用于农村地区^[4,5]。该技术起源于欧洲, 并在过去的 30 年中, 在许多国家都取得了成功并不断得到改进, 尤其在丹麦和法国^[6,7]。

尽管人工湿地处理污泥技术在国内外的应用已十分普遍, 但还存在处理周期较长, 污泥稳定化效果有限, 回田利用率较低等问题。为了提高农村污泥的农化性质, 有研究提出蚯蚓堆肥的污泥处理技术^[8,9], 并获得了适合农用的堆肥产物, 为村镇小型分散型污水厂的污泥处理提供了更实际有效的方法。此技术目前的研究还停留在静态处理的阶段, 因此, 可以考虑将蚯蚓堆肥技术应用到污泥干化湿地中, 实现动态连续处理污泥的完整系统。由于蚯蚓对生存环境含水率的要求较高, 因而通过分析蚯蚓人工湿地中表层污泥理化性质的变化, 研究设计出一种强化污泥处理的蚯蚓人工湿地技术非常有必要。

收稿日期: 2016-09-26; 修订日期: 2016-11-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07312-001-005)

作者简介: 董梦珂 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农村面源污染控制, E-mail: wuxiannie402@163.com

* 通信作者, E-mail: lihz@tongji.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验在实验室条件下进行,装置为矩形,尺寸(长×宽×高)为200 mm×100 mm×400 mm,有机玻璃材质,便于观察蚯蚓活动。底层铺设粒径为0.5~2 mm的粗砂,厚度为10 cm。运行期间反应器用塑料薄膜覆盖保湿,深色覆盖物避光。装置分为栖息区和活动区两个部分,利用挡板隔开。栖息区填有5 cm厚度的泥土,适宜蚯蚓的生长和繁殖,具体见图1。与传统的人工湿地装置不同,本实验装置内增加了一定高度的挡板,其主要目的是在进泥期间,为蚯蚓提供一个逃逸和临时栖息的空间,防止蚯蚓因高含水率的环境而产生不适应。因此在正式开展实验之前,需要进行预实验以考察挡板的设置对蚯蚓生存的影响,从而判断挡板设置的必要性。

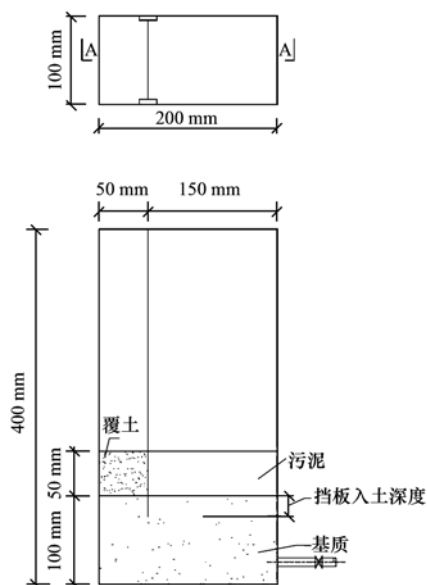


图1 实验装置平面及A-A剖面示意

Fig. 1 Plane graph and A-A profiles of experimental device

1.2 实验材料

根据《上海市农村生活污水处理指南》,农村生活污水处理过程产生的污泥,按来源不同,主要分为:化粪池污泥、腐殖污泥和氧化塘污泥等。本实验采用的污泥取自上海曲阳水厂二沉池污泥,与腐殖活性污泥和氧化塘污泥性质相近,其进泥特性如下:平均pH为6.7,含水率为99.2%,VS(%TS)平均含量为71.0%±7.5%。污泥渗滤液COD平均含量(134±34) mg·L⁻¹,氨氮平均含量(12.47±

4.00) mg·L⁻¹, TN平均含量(22.11±10.09) mg·L⁻¹, TP平均含量(12.57±3.39) mg·L⁻¹。

本实验所用蚯蚓购自江苏省句容市某蚯蚓养殖基地,品种为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)。此蚓种适应性强,繁殖率高,饲养广泛,适合生活在温度15~25℃、湿度70%~80%、pH值6.5~7.5的土壤环境中,国内外有关蚯蚓处理污泥的实验多采用此品种^[10]。

1.3 研究方法

1.3.1 实验方法

本实验一共设置了8个工况,每个工况设置2个平行,均采用间歇式进泥方式。进泥负荷根据Nielsen等^[11]的研究,采用高、中、低:80、65、48 kg·(m²·a)⁻¹这3种不同负荷;投放密度根据蚯蚓每天能消化自身重量一半的废物计算^[12],采用高、中、低:0.65、0.54、0.43 kg·m⁻²这3种不同密度。相关研究发现,剩余污泥在投入湿地后的3 d内,含水率会迅速下降,达到70%左右^[13]。而蚯蚓的最佳生存环境正是在湿度70%~80%的土壤中,因此实验安排在首次投泥3 d后开始投加蚯蚓。实验所用蚯蚓投入湿地装置前需要经过一个月的提前驯化,其驯化方法参考了Sonowal等^[14]的研究。

各装置在平均室温为25℃的实验室条件下同时进行,自2016年3月1日开始进泥,进泥周期为7 d,进泥体积根据进泥日总固体含量和进泥负荷计算确定。为了方便对各影响因素单独比较分析,本研究按照控制变量法设计实验工况,其中1号工况为不投加蚯蚓的对照组,其余工况分别依据不同的污泥投加负荷、蚯蚓投加密度以及进泥频率进行设计,各工况的参数条件具体见表1。

1.3.2 样品采集与分析

实验时间为5个月,每两周对1 cm厚度的表层污泥取样一次,重复取3次后进行混合。采集后的污泥样品分为两份,一部分鲜样直接测定含水率和VS含量,另一部分先进行冷冻干燥,再研磨过100目筛后用于测定脱氢酶活性。实验进行时,同步测定环境温度和湿度。含水率和VS采用CJT 221-2005《城市污水处理厂污泥检验方法》^[15]中的重量法进行测定,脱氢酶活性采用TTC分光光度法测定^[16]。

本实验结果均用Origin 8.0软件绘图,采用SPSS 17.0统计软件,One-Way ANOVA分析不同工况间的差异性,置信区间定为95%。

表 1 各工况参数条件
Table 1 Parameters of each working condition

工况号	污泥负荷/kg·(m ² ·a) ⁻¹	每周进泥量/L	蚯蚓投加量/g	蚯蚓密度/kg·m ⁻²	进泥频率 ¹⁾
1	65	2.6	0	0	小时进泥
2	48	2.0	8.6	0.43	小时进泥
3	65	2.6	8.6	0.43	小时进泥
4	65	2.6	10.8	0.54	小时进泥
5	65	2.6	13	0.65	小时进泥
6	80	3.3	8.6	0.43	小时进泥
7	65	2.6	8.6	0.43	单次进泥
8	65	2.6	8.6	0.43	双次进泥

1) 单次进泥:按污泥负荷计算得到的每周进泥量,进泥一次;小时进泥:按污泥负荷计算得到的每周进泥量,等分为 5 份,每 5 h 进泥一次;双次进泥:按污泥负荷计算得到的每周进泥量,等分为两份,每天进泥一次

2 结果与讨论

2.1 挡板的设置对蚯蚓存活情况的影响

通过预实验考察挡板设置的必要性并确定最合适的挡板入土深度. 该实验在中等负荷 65 kg·(m²·a)⁻¹下进行,共 3 套反应装置,分别研究了 50、30、10 mm 不同挡板入土深度下,装置运行结束前后蚯蚓生物量及数量的变化,具体统计结果见表 2,实验时间为一个月. 本研究发现,各装置内的蚯蚓数量基本未发生变化,按照挡板深度从大到小,蚯蚓生物量分别增长了 41.39%、22.72% 和 42.59%. 各装置中蚯蚓死亡率较低且蚯蚓平均体重均有不同程度的增长,说明蚯蚓能够适应在该实验装置中生存. 而挡板两侧蚯蚓数量分布的情况表

明,挡板的入土深度对蚯蚓在两区域间的迁移有一定影响. 实验结束时,距离最后一次进泥已经有一周的时间,污泥平均含水率已达到 80% 以下,适合蚯蚓的生长环境. 理论上蚯蚓应该大部分集中在活动区,但 50 mm 和 30 mm 的挡板设置深度下,蚯蚓半数都还在栖息区. 通过已有的研究发现,赤子爱胜蚓属于表居型蚯蚓^[17],活动区域主要集中在土壤上层表面. 装置运行前期,蚯蚓在污泥层较薄的情况下进入了栖息区,而随着污泥厚度的增加导致蚯蚓进入栖息区后不再回到活动区处理新鲜污泥,因此大部分仍处于栖息区;而 10 mm 的挡板设置深度下,蚯蚓能够全部转移,并且蚯蚓增长量也最高,说明此条件下蚯蚓处理效率较高. 因此,选择 10 mm 作为最佳挡板入土深度应用于后续实验.

表 2 蚯蚓生物量及数量统计结果
Table 2 Statistical results of earthworm biomass and quantities

挡板入土深度/mm	投入蚯蚓生物量/g	运行结束后蚯蚓数量/条		运行结束后蚯蚓增长量/%
		栖息区	活动区	
50	8.64	8	8	41.39
30	8.67	8	6	22.72
10	8.64	0	16	42.59

2.2 进泥负荷对污泥性质的变化影响

2、3 和 6 号工况分别模拟了 48、65、80 kg·(m²·a)⁻¹这 3 种污泥负荷下蚯蚓湿地的运行状况. 通过比较图 2 中 1、2、3、6 号工况下污泥含水率和 VS 含量随进泥周期的变化发现,随着运行周期的增加,表层污泥含水率和 VS 均呈现先逐渐增大后趋于稳定的变化规律. 这是因为初始阶段过滤基质渗透性能最好,污泥干化效果也最好. 但随着进泥周期的增长,污泥逐渐堆积,渗透层的厚度也在增长,干化效率随之降低^[18],最后与环境湿度达到一个平衡,趋于稳定. 同时,由于污泥中有机物的累

积,VS 含量也会升高,但在蚯蚓的作用下,污泥中的有机物会被分解,最终趋于稳定^[19].
据图 3 研究发现,1、2、3 和 6 号工况表层污泥含水率和 VS 含量的平均值分别为 87.9%±4.4%、83.6%±8.9%、86.0%±4.5%、87.3%±1.3% 和 64.6%±6.8%、56.4%±17.5%、58.4%±12.8%、59.9%±6.0%. 结果表明,不同污泥负荷对表层污泥的干化和稳定化效果存在显著差异($P<0.05$). 随污泥负荷的增长,表层干化污泥含水率逐渐增高,VS 含量也有所升高,这是因为高负荷下的污泥会引起堵塞并影响氧传递^[20]. 同时研究发现,6 号工况含水率和

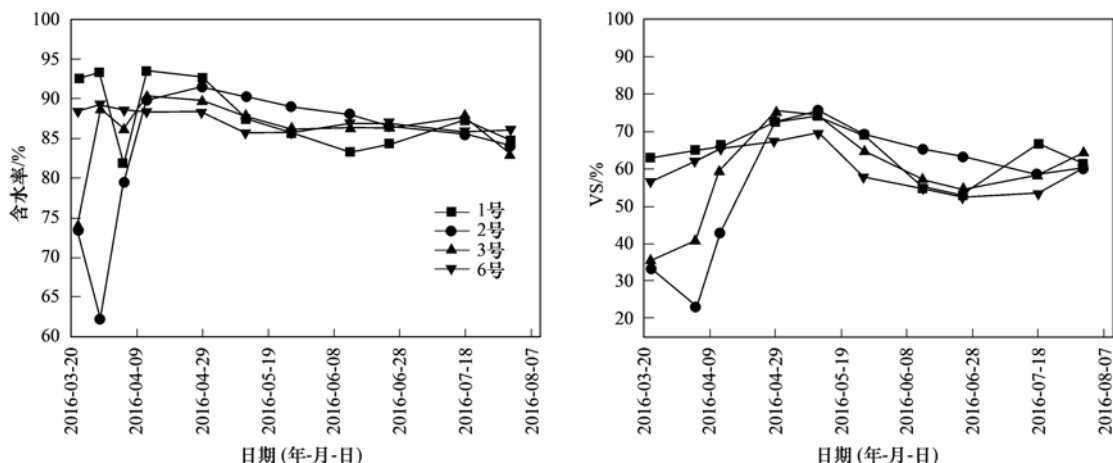


图2 不同污泥负荷下含水率和VS的变化

Fig. 2 Changes of moisture content and VS under different sludge loading

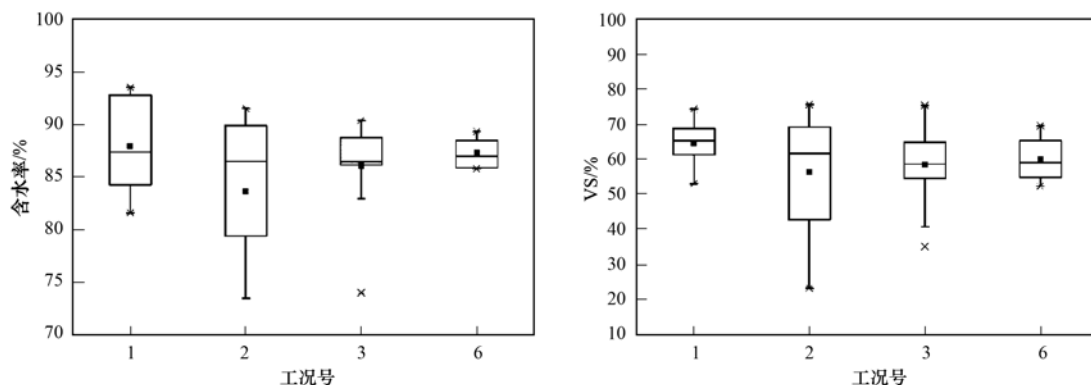


图3 不同污泥负荷下含水率和VS的分布情况

Fig. 3 Distribution of moisture content and VS under different sludge loading

VS变化比较平稳,这是因为随着污泥负荷的增加,污泥干化和稳定化速率减慢,变化幅度减弱,从而含水率和VS长期处于一个较高的水平,因此高负荷下对应的污泥含水率和VS较高,并且变化幅度较小。而1号对照工况在未投加蚯蚓且中等负荷条件下,其效果和高负荷工况相近。张志剑等^[21]的综述中提到,蚯蚓能够通过肠道消化分解作用,将废弃物基质转化为均匀且稳定的类腐殖质化合物。因此说明1号工况由于缺少蚯蚓的分解作用,同等条件下表层污泥干化稳定化效果较差。

脱氢酶活性(dehydrogenase activity, DHA)可以用来反映微生物活性大小,它是一种胞内酶,能参与有机物脱氢反应^[22]。图4所示的是不同污泥负荷下,各工况表层污泥DHA在5个月内的平均值。3种负荷下表层污泥DHA均存在显著差异($P < 0.05$),其中, $48 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 的污泥负荷下,表层污泥DHA最低。随着蚯蚓堆肥的进行,能够被微生物代谢的有机物越来越少,微生物活性也会减弱。一般来说,DHA越低,说明处理体系越稳定^[23]。从而

再次证明了随着污泥负荷的升高,蚯蚓人工湿地的污泥稳定化效果也会变差。

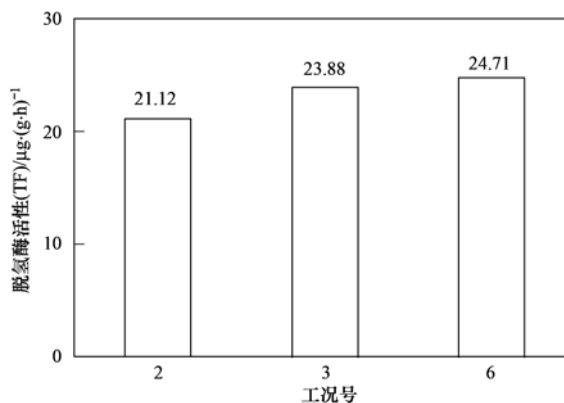


图4 不同污泥负荷下DHA平均值

Fig. 4 Average value of dehydrogenase activity under different sludge loading

2.3 蚯蚓密度对污泥性质的变化影响

1、3、4和5号工况分别模拟了不同蚯蚓投加密度下(0 、 0.43 、 0.54 、 $0.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)蚯蚓湿地的运行状况。同样地,通过比较图5中各工况污泥的含水率

和 VS 变化发现,随着运行周期的增加,表层污泥含水率和 VS 均呈现先逐渐增大后趋于稳定的变化规律. 根据图 6 的结果,1、3、4 和 5 号工况表层污泥含水率和 VS 含量的平均值分别为 $87.9\% \pm 4.4\%$ 、 $86.0\% \pm 4.5\%$ 、 $85.3\% \pm 4.0\%$ 、 $86.1\% \pm 4.4\%$ 和 $64.6\% \pm 6.8\%$ 、 $58.5\% \pm 12.8\%$ 、 $58.7\% \pm 9.9\%$ 、 61.4%

$\pm 7.2\%$. 其中,未投加蚯蚓的 1 号对照工况与其他工况组相比存在显著性差异($P < 0.05$),含水率和 VS 均最高,且数据更为分散,变化波动较大,这是由于缺少蚯蚓的情况下,装置含水率主要受外部条件影响,随气温和空气湿度波动变化^[24]. 而投加蚯蚓的装置含水率数据分布较为集中,蚯蚓处理污泥后产生的蚯

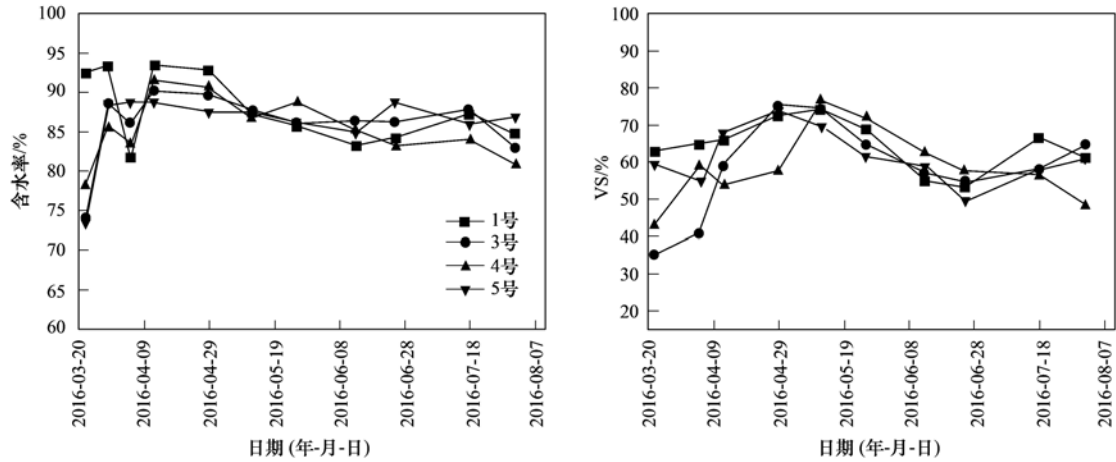


图 5 不同蚯蚓密度下含水率和 VS 的变化

Fig. 5 Changes of moisture content and VS under different stocking densities

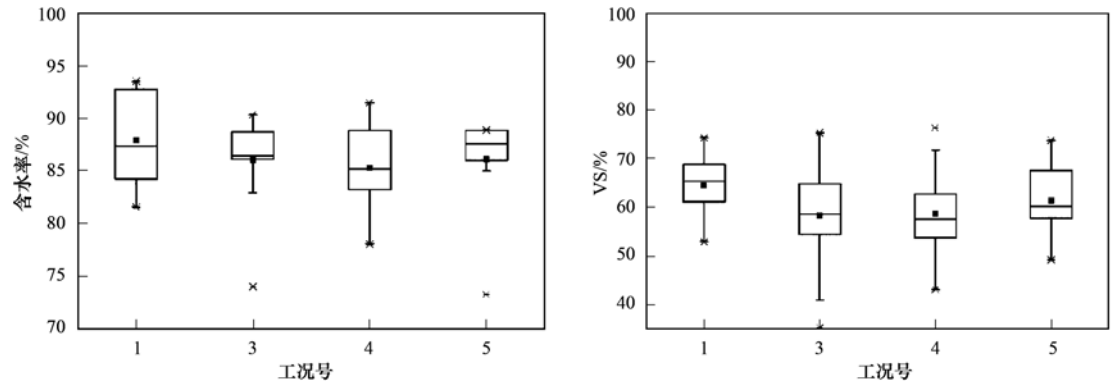


图 6 不同蚯蚓密度下含水率和 VS 的分布情况

Fig. 6 Distribution of moisture content and VS under different stocking densities

蚓粪具有较好的持水性,减慢了水分的蒸发,为蚯蚓提供适宜的湿度环境^[25].

本实验发现,投加蚯蚓的工况表层污泥含水率和 VS 平均值与供试污泥相比,分别下降了 15% 和 10% 左右. 而在 Iannelli 等^[26]关于人工湿地短期处理污泥的研究中,湿地表层 0 ~ 15 cm 厚度的污泥,其含水率和 VS 在 2 个月的处理时间内的变化值仅达到了 5% 和 3%. 并且通过分析图 7 中不同蚯蚓投放密度下装置内表层污泥的 DHA 发现,1 号工况表层污泥的 DHA 与其他工况组存在极显著差异($P < 0.01$),其平均值甚至达到了其他各蚯蚓湿地装置的两倍多. 其中,5 号工况表层污泥 DHA 最低,稳定性最好,此工况下蚯蚓放养密度为

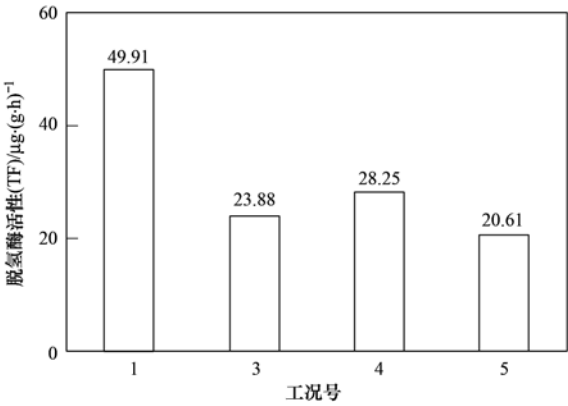


图 7 不同蚯蚓密度下 DHA 平均值

Fig. 7 Average value of dehydrogenase activity under different stocking densities

$0.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. 结果表明, 蚯蚓的加入能够有效改善人工湿地污泥干化和稳定化的效能, 并且在 $0.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的蚯蚓密度下, 蚯蚓人工湿地的稳定化效果最好.

2.4 进泥频率对污泥性质的变化影响

3、7 和 8 号工况分别模拟了小时进泥、单次

进泥和双次进泥不同进泥频率下蚯蚓湿地的运行状况. 根据图 8 和图 9 分析发现, 1、3、7 和 8 号工况表层污泥含水率和 VS 含量的平均值分别为 $87.9\% \pm 4.4\%$ 、 $86.0\% \pm 4.5\%$ 、 $86.8\% \pm 3.0\%$ 、 $86.4\% \pm 3.8\%$ 和 $64.6\% \pm 6.8\%$ 、 $58.5\% \pm 12.9\%$ 、 $60.7\% \pm 13.0\%$ 、 $62.3\% \pm 11.0\%$.

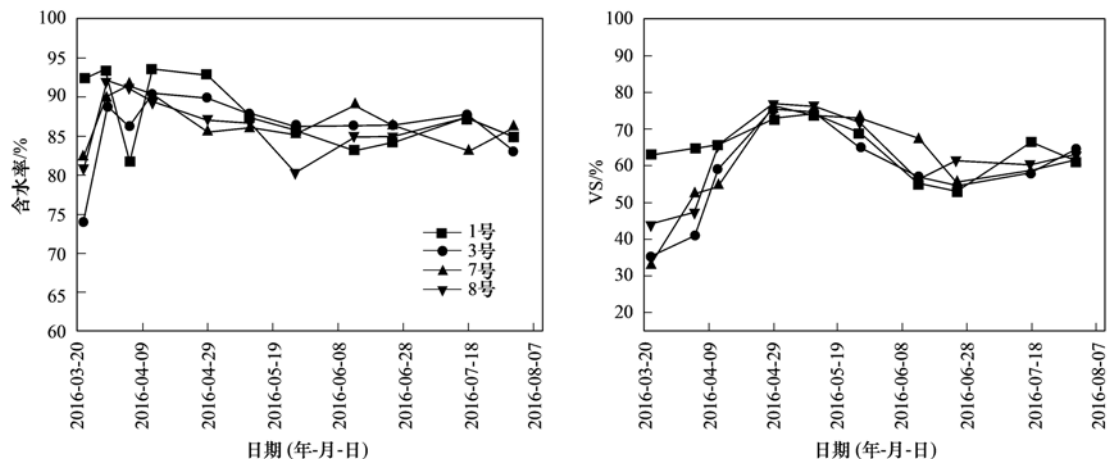


图 8 不同进泥频率下含水率和 VS 的变化

Fig. 8 Changes of moisture content and VS under different loading frequencies

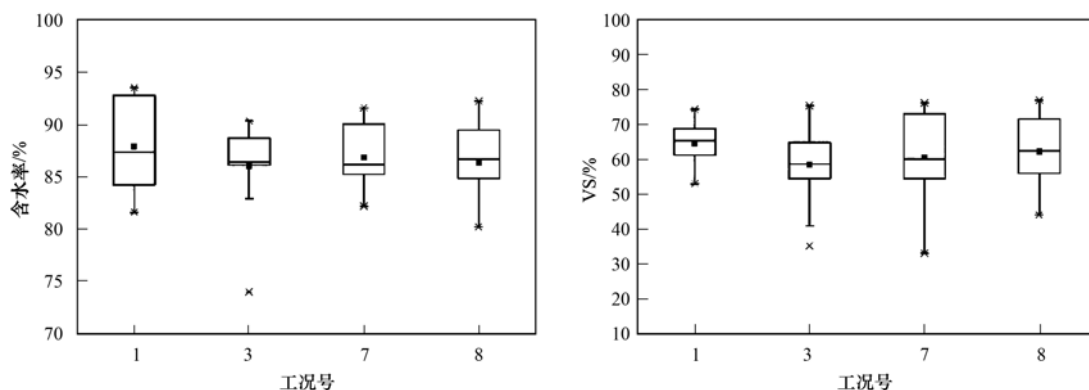


图 9 不同进泥频率下含水率和 VS 的分布情况

Fig. 9 Distribution of moisture content and VS under different loading frequencies

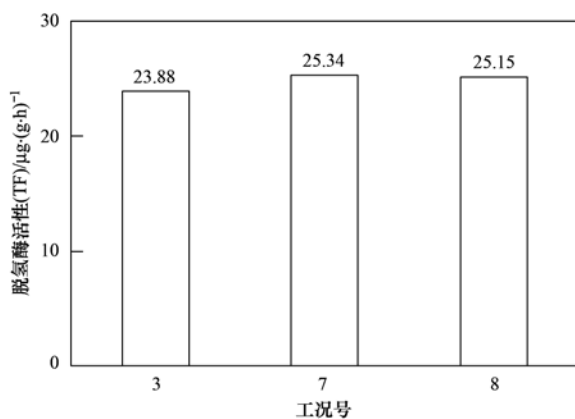


图 10 不同进泥频率下 DHA 平均值

Fig. 10 Average value of dehydrogenase activity under different loading frequencies

其中, 3 号为小时进泥工况, VS 含量平均值最低, 图 10 中所示的 DHA 也最低, 说明小时进泥方式下, 蚯蚓人工湿地稳定化效果最好. 而 7 号和 8 号 VS 含量则相对较高, 因为瞬时污泥负荷较大而导致污泥干化速度的减慢, 含水率下降速度减慢, 从而影响了蚯蚓的处理效果. 尤其 7 号装置数据分布更分散, 说明单次进泥的方式对蚯蚓活动的影响较大, 导致处理效果不够稳定, 变化幅度较大. 但从含水率平均值来看, 各进泥频率下表层污泥周期干化程度较为相似, 差异不明显 ($P > 0.05$), 说明不同的进泥频率对表层污泥的干化影响较小. 1 号作为未投加蚯蚓对照工况, 进泥方式也为小时进泥条件下, 其含水率和 VS 含量均为最

高,且变化幅度较小,说明蚯蚓在其他装置中的作用较明显,显著提高了有机物的分解以及干化的速度。

3 结论

(1)通过对传统人工湿地处理污泥装置加以改造,得到一种可行的蚯蚓湿地污泥处理方法。本研究通过设置入土深度为 10mm 的挡板,能够提供蚯蚓在进泥期间的栖身之所,保证蚯蚓湿地的正常运行。

(2)蚯蚓的投加对表层污泥的处理效果有显著性差异($P < 0.05$),蚯蚓的加入能够改善人工湿地污泥干化和稳定化的效能。与未投加蚯蚓的模拟湿地相比,其表层污泥 DHA 更低,含水率和 VS 平均减少量分别能达到 15% 和 10% 左右;并且在 $0.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的蚯蚓投加密度下,蚯蚓人工湿地的稳定化效果最好。

(3)不同污泥负荷对表层污泥干化稳定化程度有显著差异($P < 0.05$),随着污泥负荷的增加,蚯蚓湿地表层污泥干化和稳定化速率逐渐减慢;不同进泥频率对表层污泥周期干化程度无显著差异($P > 0.05$),但小时进泥方式下污泥稳定化程度较好。因此实际运行中,为了达到较好的污泥处理效果,设计污泥负荷应该控制在合理的范围内,并且应尽量提高进泥频率,减少单次进泥量。

参考文献:

- [1] 彭智平,李文英,黄继川,等. 农村城镇污泥处理和农用水技术规程[J]. 广东农业科学, 2010, 37(11): 83-84.
- [2] 李雄勇,常文越,张帆. 赤子爱胜蚓处理农村生活污水污泥的技术研究[J]. 科技创新导报, 2014, 11(4): 35-37, 41.
- [3] 杨小文,杜英豪. 污泥处理与资源化利用方案选择[J]. 中国给水排水, 2002, 18(4): 31-33.
- Yang X W, Du Y H. Options for sewage sludge treatment and reclamation for reuse[J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(4): 31-33.
- [4] 黄凌军,杜红,鲁承虎,等. 欧洲污泥干化焚烧处理技术的应用与发展趋势[J]. 给水排水, 2003, 29(11): 19-22.
- Huang L J, Du H, Lu C H, et al. Application and development of sludge drying and incineration in Europe[J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(11): 19-22.
- [5] 崔玉波,冉春秋,王芳,等. 干化床和芦苇床稳定污泥过程中的腐殖化特征[J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 305-309.
- Cui Y B, Ran C Q, Wang F, et al. Humification characteristics of stabilized sewage sludge in sludge drying bed and reed bed[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(1): 305-309.
- [6] Uggetti E, Ferrer I, Llorens E, et al. Sludge treatment wetlands: a review on the state of the art[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(9): 2905-2912.
- [7] Nielsen S, Bruun E W. Sludge quality after 10-20 years of treatment in reed bed systems[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 22(17): 12885-12891.
- [8] 臧兰兰. 蚯蚓堆肥对城市污泥农化性质的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- Zang L L. Effect of earthworm on sewage sludge at agricultural chemical characteristics [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014.
- [9] 陈学民,王惠,伏小勇,等. 赤子爱胜蚓处理污泥对其性质变化的影响[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1421-1425.
- Chen X M, Wang H, Fu X Y, et al. Effect of vermicomposting using *Eisenia foetida* on properties of sewage sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(6): 1421-1425.
- [10] Ali U, Sajid N, Khalid A, et al. A review on vermicomposting of organic wastes [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2015, 34(4): 1050-1062.
- [11] Nielsen S. Sludge treatment in wetland systems[A]. In: Dias V, Vymazal J (Eds.). International Seminar on the use Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Treatment wetland[C]. Lisbon-Portugal, 2003.
- [12] Haimi J, Huhta V. Capacity of various organic residues to support adequate earthworm biomass for vermicomposting[J]. Biology and Fertility of Soils, 1986, 2(1): 23-27.
- [13] Bianchi V, Peruzzi E, Masciandaro G, et al. Efficiency assessment of a reed bed pilot plant (*Phragmites australis*) for sludge stabilisation in Tuscany (Italy) [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(5): 779-785.
- [14] Sonowal P, Khwairakpam M, Kalamdhad A S. Stability analysis of dewatered sludge of pulp and paper mill during vermicomposting[J]. Waste and Biomass Valorization, 2014, 5(1): 19-26.
- [15] CJ/T 221-2005, 城市污水处理厂污泥检验方法[S].
- [16] Huang K, Li F S, Wei Y F, et al. Effects of earthworms on physicochemical properties and microbial profiles during vermicomposting of fresh fruit and vegetable wastes [J]. Bioresource Technology, 2014, 170: 45-52.
- [17] 胡安,朱维琴,陈林,等. 蚯蚓处理对土壤中重金属生物可利用性的影响[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2012, 11(4): 369-373.
- Hu A, Zhu W Q, Chen L, et al. Effects of earthworm disposal on the bioavailability of heavy metals in soil [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2012, 11(4): 369-373.
- [18] Uggetti E, Argilaga A, Ferrer I, et al. Dewatering model for optimal operation of sludge treatment wetlands [J]. Water Research, 2012, 46(2): 335-344.
- [19] Khwairakpam M, Bhargava R. Vermitechnology for sewage sludge recycling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2-3): 948-954.
- [20] Vincent J, Forquet N, Molle P, et al. Mechanical and hydraulic properties of sludge deposit on sludge drying reed beds (SDRBs): influence of sludge characteristics and loading rates [J]. Bioresource Technology, 2012, 116: 161-169.
- [21] 张志剑,刘萌,朱军. 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1679-1686.

- Zhang Z J, Liu M, Zhu J. Organic waste treatment by earthworm vermicomposting and larvae bioconversion: review and perspective[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1679-1686.
- [22] 伏小勇, 崔广宇, 陈学民, 等. 蚯蚓处理对污泥中微生物碳量及脱氢酶活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(1): 252-256.
- Fu X Y, Cui G Y, Chen X M, *et al.* Effects of earthworms on the microbial biomass carbon and dehydrogenase activity in decomposition treatment of sewage sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(1): 252-256.
- [23] Fernández-Gómez M J, Romero E, Nogales R. Feasibility of vermicomposting for vegetable greenhouse waste recycling[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(24): 9654-9660.
- [24] Stefanakis A I, Tsihrintzis V A. Effect of various design and operation parameters on performance of pilot-scale Sludge Drying Reed Beds[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **38**(1): 65-78.
- [25] 袁绍春, 张智, 王敏, 等. 蚯蚓处理污水污泥制取土壤改良剂[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(6): 2097-2103.
- Yuan S C, Zhang Z, Wang M, *et al.* Vermicomposting for conversion of sewage sludge to soil amendment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(6): 2097-2103.
- [26] Iannelli R, Nielsen S, Peruzzi E, *et al.* Short-term performance analysis of sludge treatment reed beds[J]. *Water Science and Technology*, 2013, **68**(7): 1520-1528.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016年10月12日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续15次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₃ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)