

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响

楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华*

(浙江大学环境工程系, 杭州 310058)

摘要: 针对废弃菌糠的循环利用工艺, 选取杏鲍菇菌糠、平菇菌糠、菌糠有机肥等具有阶段代表性的样品, 测定其营养组分、元素含量, 分析菌糠在连续栽培和废弃菌糠堆肥处置过程中成分的变化, 同时分析了菌糠/菌糠有机肥的重金属环境风险评估及淋溶状态下对环境可能的影响。结果表明, 连续栽培后菌糠中水分下降 13.8%, 蛋白质、糖类则分别上升 32.9% 和 20.4%, 仍剩余大量营养物质; 废菌糠堆肥后蛋白质、糖类分别下降 50% 和 79%, 木质素、纤维素、半纤维素无明显变化, C/N 比下降, 总腐殖酸量增加 18.6%。通过重金属含量的测定, 确定菌糠/菌糠有机肥中的 As、Hg、Pb、Cd、Cr 等重金属指标均低于我国《NY525-2012 有机肥料》的限值标准。菌糠/菌糠有机肥所含氮、磷、有机物均有淋出趋势, 其中有机肥的氮、有机物淋失累积量相比菌糠下降 15.0% 和 62.8%。

关键词: 废弃菌糠; 营养成分; 元素含量; 重金属含量; 有机物淋失

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0397-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.051

Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact

LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, FU Rui-qi, LIU Yu, XU Xin-hua*

(Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Nutrition components and elements analysis of spent mushroom substrates/composts (SMS/SMC) during a cyclic utilization were performed to state the compositional variation during reutilization and composting process. Environmental risk assessment of heavy metals and other pollutants were also taken into consideration. The results showed that the water consumption during reutilization reached 13.8%; while the protein and polysaccharide contents increased by 32.9% and 20.4%, respectively, suggesting that SMS still had a lot of nutrients. After composting disposal, however, the protein and polysaccharide contents decreased by 50% and 79%, respectively, while the lignin, cellulose and hemicellulose contents didn't show a significant difference; the C/N ratio decreased; the total humic acid content increased by 18.6%, all of which means that the composting process made great contributions to organic degradation. The heavy metal analysis showed that As, Hg, Pb, Cd, Cr concentrations in organic compost met the requirement of limit standard (NY525-2012). In addition, the results of column leaching test showed that N, P and organics in both SMS and SMC had a possibility of leaching loss, and the accumulation of TN and COD in SMC leachate decreased by 15.0% and 62.8%, respectively, compared to SMS group.

Key words: spent mushroom substrate; nutrients; elements content; heavy metal content; leaching loss of organics

我国是世界上最大的食用菌生产国, 每年产量达 2 260 万 t, 约占世界总产量的 75% 以上^[1]。为了保证出菇效率和成本, 流水线化的生产常在食用菌成熟收获后, 将不再具备生产能力的废弃菌糠舍弃^[2]。由于我国正逐步形成规模化和产业化的食用菌生产, 废弃菌糠的数量也正在急剧增加^[3]。传统的菌糠处置方法主要为直接丢弃或是就地焚烧, 可能导致腐烂恶臭或空气污染, 对环境造成了不良影响。且废弃菌糠中往往含有丰富的有机质、氮素以及其他营养元素^[4], 直接丢弃或焚烧也是一种极大的资源浪费。国内外关于菌糠资源利用化的研究一直在进行中。尽管研究者提出了废弃菌糠作为栽培基质^[5~7]、土壤修复剂^[7~9]以及生物质燃料^[10,11]的潜力, 堆肥仍是大批量菌糠处置最被认可的方法。针对生产过程产生的大量废弃菌糠, 某公司开发了

食用菌连续栽培、堆积发酵制备有机堆肥的综合利用流程, 避免了传统的填埋、焚烧处置, 实现了废弃菌糠的循环利用。目前, 国内外关于废弃菌糠综合利用的研究尚少见。本研究基于废弃菌糠循环利用工艺, 选取了具有代表性的节点样品, 重点考察了样品间成分的变化规律, 并通过重金属含量测定、土柱淋洗实验分析了各样品对环境的影响, 以期循环工艺的可行性提供理论支持。

1 资源利用工艺及供试样品

1.1 食用菌菌糠循环利用工艺

某食用菌生产公司对食用菌菌糠的循环利用工

收稿日期: 2015-07-27; 修订日期: 2015-08-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC16B03)

作者简介: 楼子墨(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物资源化, E-mail: 21314090@zju.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xuxinhua@zju.edu.cn

艺如图 1 所示. 在杏鲍菇出菇后, 选取无杂菌污染的杏鲍菇菌糠晒干, 并按照杏鲍菇菌糠: 杂木屑: 麸皮: 石膏 = 40: 4: 5: 1 的比例配制成平菇栽培料, 经过灭菌接种, 收获平菇, 完成菌糠二次利用过程. 平菇菌糠作为二次利用废料, 经粉碎、搅拌、接种、好氧发酵 3 个月后得到成品菌糠有机肥.

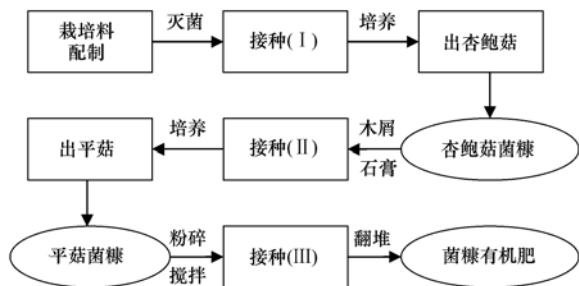


图 1 循环工艺流程示意

Fig. 1 Flow diagram of cyclic utilization

1.2 供试样品

针对循环工艺流程中杏鲍菇菌糠、平菇菌糠、菌糠有机肥等三阶段物料, 依照梅花形布点法确定采样点, 从物料堆中分别取 5 kg 样品, 并用四分法缩分出 100 g, 去除附着在菌糠上肉眼可见的食用菌子实体, 经风干、碾碎、过 80 目筛备用.

1.3 测试方法

pH 值测定通过 Mettler Toledo 台式 pH 计测量样品的水浸提液 (1: 5) 确定; EC 值和 TDS (总溶解性固体, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 值由 DDBJ-350 雷磁电导率仪测定样品的水浸出液 (1: 5) 确定; 多糖的测定采用苯酚-硫酸法^[12]; 蛋白质的测定采用考马斯亮蓝法测定^[13]; 灰分含量采用马弗炉煅烧获得; 纤维素、木质素和半纤维素的测定采用 Van-Soest 洗涤法确定, 用 ADL (酸性洗涤木质素) 表示木质素含量, 用 ADF (酸性洗涤纤维) - ADL (酸性洗涤木质素) 表示纤维素含量, 用 NDF (中性洗涤纤维) - ADF (酸性洗涤纤维) 表示半纤维素含量; 总腐殖酸的测定采用焦磷酸钠提取滴定法测定^[14]; C、H、N 元素的测定采用 ThermoFinnigan Flash EA 1112 型元素分析仪; Cu、Zn、Cr、Cd 等金属元素由消解-电感耦合等离子体质谱仪测定.

1.4 土柱淋洗实验

采用土柱淋洗法来评价废弃菌糠堆积/施用造成的环境影响. 供试土壤采自农田表层土 (0 ~ 15 cm), 经晒干过 20 目筛后备用. 土柱为 PVC (聚氯乙烯) 材质圆柱, 土壤装填量为 600 g, 菌糠/菌糠有机肥施加量均按照一般施肥量的 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[15] 换

算 (基于测定的菌糠/菌糠有机肥氮含量), 装填完毕后置于恒温培养箱中 25°C 下培养, 并用称重法保持土壤含水率为 10%. 参考某香菇栽培基地的降雨量, 分别在 7、14、21、28、35、42、49 d 用体积为 320 mL 的去离子水进行淋溶实验, 检测淋洗液中 TN、TP 以及 COD 的浓度变化.

1.5 形态表征

采用 Nicolet Nexus 670 型红外分光光度计, 制备 1: 100 KBr 盐片, 按照 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围对 3 种样品进行 FTIR 分析. 采用 Hitachi 公司的 TM-1000 型扫描电子显微镜及其所带 EDX 能谱仪对样品表观形态及元素含量进行分析.

2 结果与分析

2.1 废弃菌糠营养成分的变化

表 1 为废弃菌糠/有机肥的理化性质、营养成分测定结果. 其中杏鲍菇菌糠和平菇菌糠分别代表两种菌菇栽培后的产物, 菌糠有机肥则是菌糠堆肥后产物.

含水率结果显示, 菌糠中的水分经二次利用下降了 13.8%, 这是由于平菇的种植和出菇期均消耗了大量的水分. pH 值与 TDS 的波动在二次利用过程中变化微小, 均不超过 7%, 且数值与 Zhang 等^[6] 在研究中的测定值类似. 平菇菌糠中的蛋白质和多糖含量相比杏鲍菇菌糠分别增加了 32.9% 和 20.4%, 这与 Li 等^[16] 的发现类似, 可以解释为平菇菌糠中残留了部分平菇子实体形成过程中合成的物质. 木质素、纤维素以及半纤维素在平菇生长的过程中降解缓慢, 分别变化了 21.6%、16.1%、2.8%, 是菌糠中难以利用的部分. 元素测定结果显示平菇子实体的碳氮比和某些研究者提到的类似^[17,18], 且平菇的种植会消耗培养料中的碳元素.

对比平菇菌糠和有机肥可知堆肥过程引起的变化. 腐熟后的菌糠有机肥中蛋白质和多糖成分显著下降了 50% 和 79%, 证实了菌糠中的有机质易被微生物降解的理论^[19]. 木质素、纤维素以及半纤维素含量无明显变化, 说明它们难以被微生物降解利用. 和已有研究对比^[20,21], 本研究中的菌糠有机肥灰分、木质素、纤维素、半纤维素含量更低, 生物可降解性更好. Zhu 等^[19] 在研究中提到菌糠有机肥能支持微生物的生长, 增加微生物活性, 从而增加有机物的腐殖化程度, 这与表 1 显示的总腐殖酸含量增加一致.

表 1 废弃菌糠/菌糠有机肥的理化性质及营养成分

成分	杏鲍菇菌糠	平菇菌糠	菌糠有机肥	文献参考值	
				菌糠	菌糠肥料
含水率/%	56.1	42.3	41.6	—	66.7 ^[22]
pH	5.8	6.2	7.2	5.28 ^[6] ; 7.98; 8.25 ^[23]	6.8 ^[20] ; 6.5 ^[22]
TDS/mg·L ⁻¹	21.8	22.5	18.2	—	—
多糖/mg·g ⁻¹	7.3	9.7	2.0	—	—
蛋白质/mg·g ⁻¹	18.6	22.4	11.2	5~11 ^[16]	—
灰分/%	11.0	14.3	12.7	27.5 ^[17]	—
木质素/%	14.8	11.6	12.1	—	25 ^[20] ; 24.43 ^[21]
纤维素/%	34.7	29.1	29.8	—	38 ^[20]
半纤维素/%	7.1	7.3	7.0	—	19 ^[20]
总腐殖酸/%	—	11.8	14.0	—	—
C/%	37.1	32.1	15.3	30.5; 43.2 ^[18] ; 29; 51 ^[6]	31.5 ^[22]
H/%	5.2	4.4	2.1	—	—
N/%	2.6	1.7	1.1	2.18; 1.16 ^[18] ; 1.8; 0.6 ^[6] ; 1.1 ^[5] ; 2.2; 1.8 ^[23]	2.1 ^[20]
C/N	14.6	18.4	13.6	13.8; 40.6 ^[18] ; 15; 86 ^[6] ; 17.6 ^[17]	18 ^[20] ; 17.2 ^[22]

2.2 菌糠/有机肥的形态表征研究

2.2.1 红外光谱图(FT-IR)分析

图 2 显示了 3 种样品的傅里叶红外光谱. 对比文献[24]可知,3 种样品的谱图中纤维素的特征峰值都非常明显. 图 2 中的主要特征峰包括:3 420 cm⁻¹处的—OH 官能团峰和—NH 基团峰^[25](很可能与菌糠/菌糠有机肥中的蛋白质有关);2 920 cm⁻¹处的脂肪族 C—H 键伸缩峰;1 647 cm⁻¹处—COOH官能团的 C=O 双键峰;1 323 cm⁻¹处的 C—N 单键峰^[26](可能来源于胺类,或是氨基化合物)以及1 049 cm⁻¹处的 C—O 单键峰^[27](可能来自于多糖类). 对比 3 种样品的图谱并没有发现信号峰的增加与减少,但菌糠有机肥样品在1 049 cm⁻¹和3 420 cm⁻¹处的信号强度显著变弱,这证实了堆肥过程中有机物的大量降解.

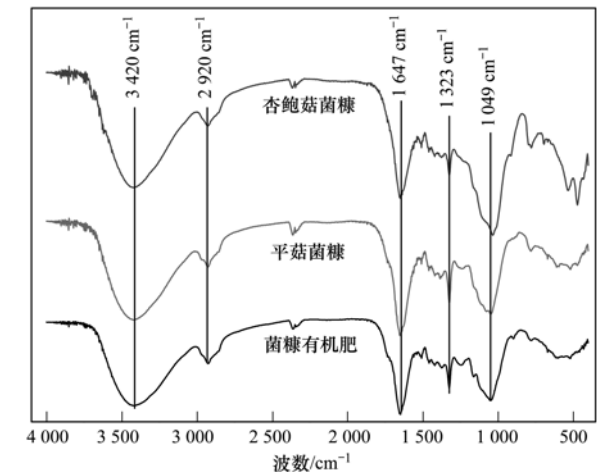


图 2 菌糠/菌糠有机肥的红外光谱图

Fig. 2 FT-IR spectra of spent mushroom substrate/compost

2.2.2 扫描电镜(SEM)及能谱(EDX)分析

菌糠/菌糠有机肥的扫描电镜图片如图 3 所示. 观察可知,杏鲍菇菌糠表面的纤维结构呈现无定形态,这可能是由于样品经过了研磨. 而平菇菌糠的表面存在较多孔状结构,这与 Yan 等^[28]在研究中的发现一致,是由平菇降解利用菌糠中的木质纤维素形成,且这些孔的直径多在 2~3 μm,属于大孔. 菌糠有机肥的表面相比前两者更粗糙,颗粒化、腐殖化程度大. 在每个样品表面随机抽取 4 点做 EDX 能谱分析可得到样品表面各元素质量分数(%)和相应的原子数百分比(%). 通过 SPSS 20.0 对平行样进行显著性差异分析,得到表 2. 从中可以看出,3 种样品中均存在显著性差异($P<0.05$)的元素有 C、O、Si、K 等,其中 O/C 原子比的差异明显,即菌糠有机肥 $O/C_{ratio}(0.80)>$ 平菇菌糠 $O/C_{ratio}(0.48)>$ 杏鲍菇菌糠 $O/C_{ratio}(0.40)$. O/C 原子比和 H/C 原子比均为芳构化和缩聚过程的重要指标^[29], Ko 等^[30]将 O/C 原子比的上升解释为菌糠堆肥过程中芳香族化合物的累积. N 元素含量的显著性差异分析说明平菇会吸收菌糠中的 N 素,而堆肥过程中 N 素的损失很少,保氮措施做得较好. 平菇菌糠中 Ca 和 S 元素的大量增加对应循环工艺中石膏的添加. Na、Mg、Al 等元素含量均无显著性差异或是含量 $<1\%$.

2.3 菌糠/有机肥重金属含量及风险评估

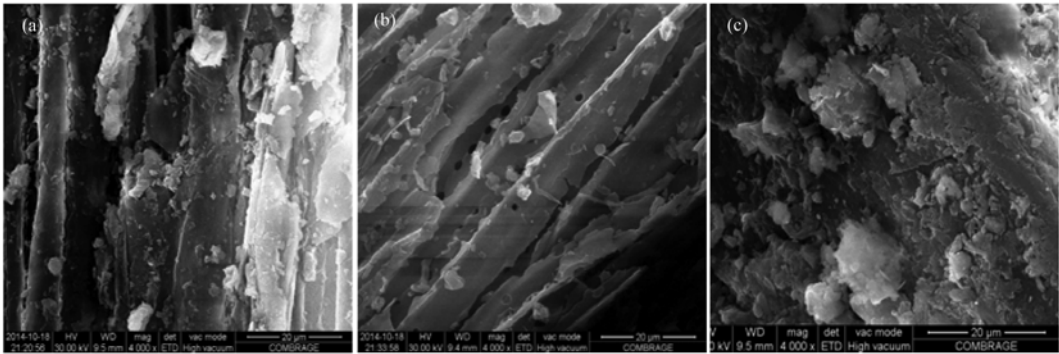
有机肥中含有重金属,而重金属的超标可能造成施用土地的污染. 重金属测定分析结果如表 3 所示. 对比有机肥料国标 NY525-2012 可知,标准仅对

表 2 菌糠/菌糠有机肥的能谱分析¹⁾

Table 2 EDX analysis of spent mushroom substrate/compost

元素	元素的质量分数/%			原子数百分比/%		
	杏鲍菇菌糠	平菇菌糠	菌糠有机肥	杏鲍菇菌糠	平菇菌糠	菌糠有机肥
C	60.60±0.80 a	52.78±0.39 b	40.50±1.45 c	67.80±0.81 a	62.36±0.51 b	50.03±1.62 c
N	4.31±0.08 a	3.86±0.20 b	3.76±0.15 bc	4.13±0.07 a	3.91±0.21 b	3.98±0.15 bc
O	31.95±1.13 c	34.03±1.02 b	43.22±1.72 a	26.83±0.98 c	30.18±0.89 b	40.09±1.72 a
Na	0.25±0.05 a	0.11±0.06 b	—	0.15±0.02 a	0.07±0.04 b	—
Mg	0.37±0.04 a	0.38±0.06 a	0.36±0.03 a	0.20±0.02 a	0.22±0.03 a	0.22±0.02 a
Al	0.16±0.02 a	0.22±0.02 a	1.86±0.24 b	0.08±0.01 a	0.11±0.01 a	1.03±0.14 b
Si	0.29±0.01 c	0.60±0.07 b	5.97±0.12 a	0.14±0.01 c	0.30±0.04 b	3.15±0.06 a
P	0.16±0.03 b	0.26±0.03 a	0.14±0.04 ab	0.07±0.01 b	0.12±0.01 a	0.07±0.02 ab
S	0.14±0.02 b	0.40±0.03 a	0.14±0.00 bc	0.06±0.01 b	0.18±0.02 a	0.06±0.00 bc
Cl	0.13±0.02 b	0.21±0.03 a	0.11±0.02 bc	0.05±0.01 b	0.08±0.01 a	0.05±0.01 bc
K	0.42±0.01 c	0.47±0.03 b	1.08±0.03 a	0.15±0.01 c	0.17±0.01 b	0.41±0.01 a
Ca	1.38±0.32 c	6.75±0.28 a	1.70±0.18 bc	0.46±0.11 c	2.39±0.10 a	0.63±0.07 bc
Fe	0.20±0.00 c	0.31±0.02 b	1.24±0.07 a	0.05±0.00 c	0.08±0.01 b	0.33±0.02 a

1)表中数据为平均值±标准差(n=4); a、b、c表示不同样品元素含量有显著性差异(P<0.05)



(a) 杏鲍菇菌糠; (b) 平菇菌糠; (c) 菌糠有机肥

图 3 菌糠/菌糠有机肥表面扫描电镜图

Fig. 3 Scanning electron microscopy of the surface of spent mushroom substrate/compost

砷、汞、铅、镉、铬等 5 项指标做出了安全限值规定,而菌糠/菌糠有机肥均能符合要求,即能够安全施用,不会在施用过程中对环境造成风险. 其中,3 种样品铅元素的含量虽低于国标限值,但与标准较接近. 参考欧洲各国的堆肥重金属限值标准可知,堆肥中的铅限量处在 65 ~ 150 mg·kg⁻¹ 区间内,即本

研究中菌糠/有机肥的铅含量符合大多数国家(比利时、荷兰、德国、加拿大等)标准^[31].

比利时、荷兰及德国等欧洲国家对堆肥中的重金属作了更严格的限值规定^[31]. 对比可知菌糠/菌糠有机肥中的铜和锌含量符合比利时(铜: 90 mg·kg⁻¹; 锌: 300 mg·kg⁻¹)与德国标准(铜: 100

表 3 废弃菌糠/菌糠有机肥的重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 3 Heavy metal contents of spent mushroom substrate/compost/mg·kg⁻¹

元素	杏鲍菇菌糠	平菇菌糠	菌糠有机肥	NY525-2012	文献参考值	
					菌糠	菌糠肥料
As	2.3	2.5	3	15	—	—
Cd	1	2.6	2.8	3	0.5 ^[32]	6.2 ^[20]
Cr	15.7	12.8	15.2	150	—	0.21 ^[20]
Cu	19.7	25.7	25.3	—	29 ^[23]	54 ^[20]
Ni	6.2	10.4	7.9	—	—	5.8 ^[20]
Pb	47.7	48.9	49.4	50	9 ^[32]	10.4 ^[20]
Zn	124.9	127.7	97	—	145 ^[23]	220 ^[26]

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 锌: $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 仅略高于荷兰最高标准(铜: $25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 锌: $75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 镍则低于最低限值(镍: $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。许多研究者在各自的研究中也考察了菌糠/菌糠有机肥中的重金属含量, 然而基于不同的食用菌种类, 培养料的初始配比不尽相同, 重金属的含量也呈现不同水平。

2.4 土柱淋洗条件下菌糠/菌糠有机肥对环境的影响

对淋出液中测定的总氮, 总磷, 以及 COD 含量进行累计, 得到图 4。对比空白土柱, 发现 3 个指标累计量均有大幅上升, 即菌糠/菌糠有机肥中的氮素, 磷素以及有机物都会在淋洗条件下溶出。就氮

素而言, 平菇菌糠组比杏鲍菇菌糠上升 6%, 并无明显差别; 而有机肥比平菇菌糠下降 15%, 说明堆肥过程有利于氮素在土壤中的固定。对于磷素, 累计淋失量顺序为: 杏鲍菇菌糠 > 平菇菌糠 > 菌糠有机肥, 说明循环利用过程使磷素转变为不易淋失的状态。COD 的淋失率相差较大, 扣除空白组后, 平菇菌糠组仍比杏鲍菇菌糠组上升 111.5%, 这可能归因于平菇在生长过程中把有机物降解成为易于随水迁移的小分子导致。而有机肥组的 COD 累积量却比平菇菌糠组下降 62.8%, 说明堆肥降解有机物的作用明显。

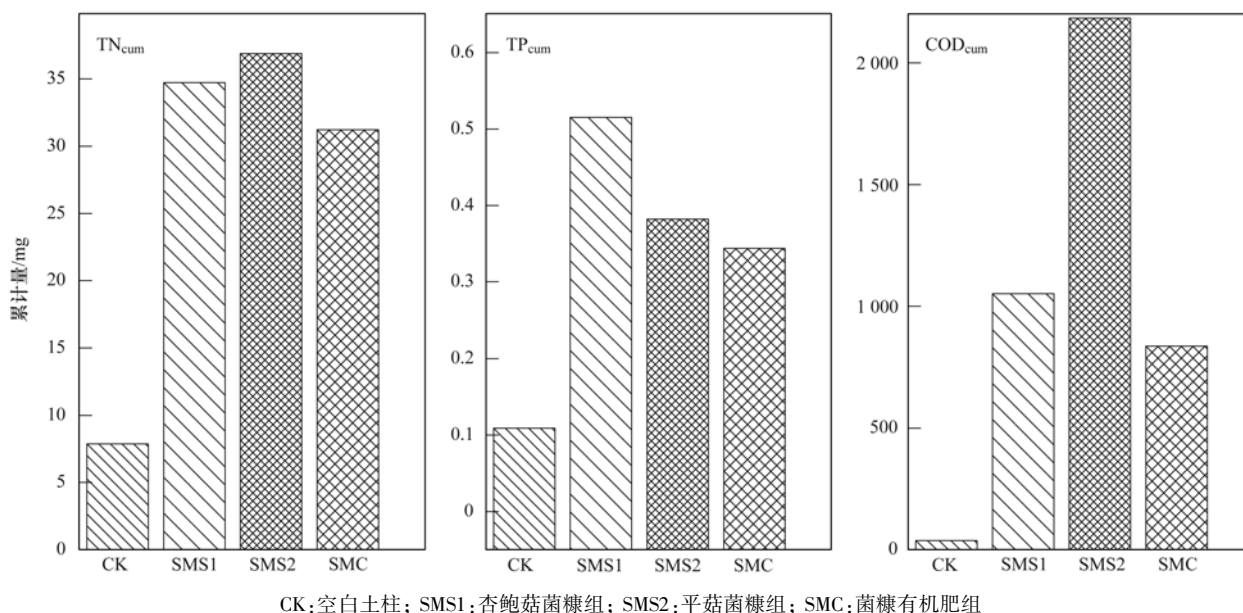


图 4 淋出液中成分累计量

Fig. 4 Cumulative components in leachate

综上, 菌糠/菌糠有机肥中所含重金属含量达标, 对环境的影响主要在于氮磷和有机物等可能会引起水体富营养化的物质。菌糠/菌糠有机肥在使用过程中有机物溶出的问题仍待解决, 目前的办法主要为堆放自然风化^[33]。

3 结论

(1) 平菇出菇后, 菌糠中的水分下降明显, pH 值与 TDS 的变化不大, 而多糖、蛋白质等有机物的含量增加。经堆肥后, 菌糠有机肥所含多糖、蛋白质由于微生物的分解下降明显, 而木质素、纤维素以及半纤维素难以降解利用, 变化不明显。

(2) 红外光谱, 扫描电镜及能谱检测证实了堆肥过程中有机物的大量减少, 从表观形态上看, 菌糠有机肥的表面呈现腐殖化、颗粒化。从元素角度分析, 菌糠/菌糠有机肥的 C、O、Si、K 等元素含量有

显著差异。

(3) 经样品测试, 比对标准可知, 菌糠/菌糠有机肥中 As、Hg、Pb、Cd、Cr 等 5 项重金属含量均达到 NY525-2012 有机肥料国标要求, 还田施用不存在重金属污染风险。

(4) 土柱淋洗实验表明菌糠/菌糠有机肥中的氮磷元素与有机物均有溶出趋势, 在实际施用中存在释放污染物的可能, 但菌糠有机肥的氮和有机物累计淋出量较菌糠均显著下降。

参考文献:

- [1] 胡晓婧, 藏婷婷, 顾海东, 等. 平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 669-677.
- [2] 邹德勋, 潘斯亮, 黄芳, 等. 菌糠资源化技术[J]. 北方园艺, 2010, (19): 182-185.
- [3] 宫福臣. 平菇菌糠饲料成分的分析及营养价值评定[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013. 1-2.
- [4] Curtis J, Suess A. Report: Value-added strategies for spent

- mushroom substrate in BC [R]. British Columbia; British Columbia Ministry of Agricultural and Lands, 2006. 12-13.
- [5] Medina E, Paredes C, Pérez-Murcia M D, *et al.* Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(18): 4227-4232.
- [6] Zhang R H, Duan Z Q, Li Z G. Use of spent mushroom substrate as growing media for tomato and cucumber seedlings [J]. *Pedosphere*, 2012, **22**(3): 333-342.
- [7] Ribas L C C, de Mendonça M M, Camellini C M, *et al.* Use of spent mushroom substrates from *Agaricus subrufescens* (syn. *A. blazei*, *A. brasiliensis*) and *Lentinula edodes* productions in the enrichment of a soil-based potting media for lettuce (*Lactuca sativa*) cultivation: growth promotion and soil bioremediation [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(20): 4750-4757.
- [8] Li X Z, Wu Y C, Lin X G, *et al.* Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil microcosms amended with mushroom cultivation substrate [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **47**(2): 191-197.
- [9] Herrero-Hernández E, Andrades M S, Marín-Benito J M, *et al.* Field-scale dissipation of tebuconazole in a vineyard soil amended with spent mushroom substrate and its potential environmental impact [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(6): 1480-1488.
- [10] Finney K N, Ryu C, Sharifi V N, *et al.* The reuse of spent mushroom compost and coal tailings for energy recovery: Comparison of thermal treatment technologies [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(1): 310-315.
- [11] Kapu N U S, Manning M, Hurley T B, *et al.* Surfactant-assisted pretreatment and enzymatic hydrolysis of spent mushroom compost for the production of sugars [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**(3): 399-405.
- [12] Masuko T, Minami A, Iwasaki N, *et al.* Carbohydrate analysis by a phenol-sulfuric acid method in microplate format [J]. *Analytical Biochemistry*, 2005, **339**(1): 69-72.
- [13] Sedmak J J, Grossberg S E. A rapid, sensitive, and versatile assay for protein using Coomassie brilliant blue G250 [J]. *Analytical Biochemistry*, 1977, **79**(1-2): 544-552.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 438-440.
- [15] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(9): 3041-3046.
- [16] Li X J, Pang Y Z, Zhang R H. Compositional changes of cottonseed hull substrate during *P. ostreatus* growth and the effects on the feeding value of the spent substrate [J]. *Bioresource Technology*, 2001, **80**(2): 157-161.
- [17] Guo M X, Chorover J. Solute release from weathering of spent mushroom substrate under controlled conditions [J]. *Compost Science & Utilization*, 2004, **12**(3): 225-234.
- [18] Paredes C, Medina E, Moral R, *et al.* Characterization of the different organic matter fractions of spent mushroom substrate [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, **40**(1-6): 150-161.
- [19] Zhu H J, Sun L F, Zhang Y F, *et al.* Conversion of spent mushroom substrate to biofertilizer using a stress-tolerant phosphate-solubilizing *Pichia farinose* FL7 [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **111**(5): 410-416.
- [20] Jordan S N, Mullen G J, Murphy M C. Composition variability of spent mushroom compost in Ireland [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(2): 411-418.
- [21] Sharma H S S. Compositional analysis of neutral detergent, acid detergent, lignin and humus fractions of mushroom compost [J]. *Thermochimica Acta*, 1996, **285**(2): 211-220.
- [22] Stewart D P C, Cameron K C, Cornforth I S, *et al.* Release of sulphate, potassium, calcium and magnesium from spent mushroom compost under laboratory conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **26**(2): 146-151.
- [23] Medina E, Paredes C, Bustamante M A, *et al.* Relationships between soil physico-chemical, chemical and biological properties in a soil amended with spent mushroom substrate [J]. *Geoderma*, 2012, **173-174**: 152-161.
- [24] Cao Y, Tan H M. Effects of cellulase on the modification of cellulose [J]. *Carbohydrate Research*, 2002, **337**(14): 1291-1296.
- [25] Toptas A, Demirege S, Ayan E M, *et al.* Spent mushroom compost as biosorbent for dye biosorption [J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, **42**(12): 1721-1728.
- [26] Law W M, Lau W N, Lo K L, *et al.* Removal of biocide pentachlorophenol in water system by the spent mushroom compost of *Pleurotus pulmonarius* [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(9): 1531-1537.
- [27] Tsui L, Juang M A. Effects of composing on sorption capacity of bagasse-based chars [J]. *Waste Management*, 2010, **30**(6): 995-999.
- [28] Yan T G, Wang L J. Adsorptive removal of methylene blue from aqueous solution by spent mushroom substrate: equilibrium, kinetics and thermodynamics [J]. *Bioresources*, 2013, **8**(3): 4722-4734.
- [29] Ngo P T, Rumpel C, Ngo Q A, *et al.* Biological and chemical reactivity and phosphorus forms of buffalo manure compost, vermicompost and their mixture with biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**: 401-407.
- [30] Ko H G, Park S H, Kim S H, *et al.* Detection and recovery of hydrolytic enzymes from spent compost of four mushroom species [J]. *Folia Microbiologica*, 2005, **50**(2): 103-106.
- [31] 李书田, 刘荣乐. 国内外关于有机肥料中重金属安全限量标准的现状与分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(增刊): 777-782.
- [32] Gerrits J P G. Composition, use and legislation of spent mushroom substrate in the Netherlands [J]. *Compost Science & Utilization*, 1994, **2**(3): 24-30.
- [33] Guo M X. Groundwater quality under the influence of spent mushroom substrate weathering [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2005, **7**(10): 1007-1012.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行