

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM_{2.5}污染特征与浓度控制效果 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM_{2.5}和PM₁₀中元素组成特征及重污染成因分析 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 康宝荣, 刘立志, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO₄²⁻化学特征及来源 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N₂O产生特征 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM_{2.5}毒性 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律

何晶晶^{1,2,3}, 张昊昊^{1,3}, 仇俊杰^{1,3}, 邵立明^{1,2,3}, 吕凡^{1,3*}

(1. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092; 2. 住房和城乡建设部村镇建设司, 农村生活垃圾处理技术与培训中心, 上海 200092; 3. 同济大学固体废物处理与资源化研究所, 上海 200092)

摘要: 生物炭广泛应用于环境污染修复、土壤改良和废物生物转化过程, 但其中的可浸出物质可能在应用过程中释放, 对反应体系和环境造成不利影响。以厌氧消化不同阶段的模拟溶液(蒸馏水、缓冲盐溶液、甲醇和腐殖酸溶液)为浸提剂, 采用高分辨液质联用仪, 研究了不同浸提剂条件下生物炭浸出液的溶解性有机物组成。生物炭各浸出液中共检测到536种有效物质, 其中有100种物质与标准物质数据库高度匹配。结果表明, 这100种物质的相对分子质量分布在109~458范围内, 平均相对分子质量为290.2, 涵盖苯酚类、芳香酸类、芳香醛和酮类、脂肪酸类等物质。相比传统研究方法采用的蒸馏水, 生物炭在厌氧培养常用缓冲盐溶液中多浸出了3种脂肪酸和4种芳香族物质; 甲醇浸出液中的物质类别最丰富, 共计71种, 其中包括大量的酚类和有机酸类物质; 腐殖酸溶液浸取过程中, 部分腐殖酸, 包括醇和脂肪酸类物质会被生物炭吸附, 但腐殖酸同时促进了生物炭中酚类物质的浸出, 总体可被检测出的有机物种类减少了41.7%。

关键词: 生物炭; 浸提剂; 浸出液; 厌氧消化; 溶解性有机物(DOM)

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3833-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901143

Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents

HE Pin-jing^{1,2,3}, ZHANG Hao-hao^{1,3}, QIU Jun-jie^{1,3}, SHAO Li-ming^{1,2,3}, LÜ Fan^{1,3*}

(1. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China; 2. Centre for the Technology Research and Training on Household Waste in Small Towns & Rural Area, Ministry of Housing Urban-Rural Development, Shanghai 200092, China; 3. Institute of Waste Treatment and Reclamation, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Biochar is widely used in environmental pollution remediation, soil improvement, and biotransformation of waste. However, the leachable substances within biochar may leach out during the application process, causing detrimental effects to the reaction system and the environment. Here, the simulated solutions (distilled water, buffer salt solution, methanol, and humic acid solution) at different stages of anaerobic digestion were used as the extracting agents, and high-resolution liquid chromatography-mass spectrometry was used to study the dissolved organic composition of biochar leachates. A total of 536 effective substances were detected in the biochar leachates, of which 100 substances were highly matched to the standard substance database. The molecular weights of these 100 substances, which included phenols, aromatic acids, aromatic aldehydes and ketones, aliphatic acids, and other substances, were in the range of 109-458 and averaged 290.2. The buffer salt solution, which is commonly used for anaerobic culturing, extracted three additional aliphatic acids and four additional aromatic substances from biochar than distilled water as used in traditional research methods; the leachate of methanol contained the most diverse compounds—71 in total—including a large number of phenols and organic acids. Some humic acid organic substances are adsorbed by biochar during the leaching by humic acid, including alcohols and aliphatic acids, but humic acid still promoted the leaching of phenolic substances, while the total number of substances that were detected was reduced by 41.7%.

Key words: biochar; extracting agents; leachate; anaerobic digestion; dissolved organic matters (DOM)

生物炭是一种富含碳的细粒多孔物质, 是指生物物质在无氧或缺氧及相对较低温(250~700℃)条件下热解的产物^[1,2]。其来源广泛, 木材废物、玉米棒等农业废弃物、茶叶废料、动物粪便、城市污泥等废弃生物质都可作为生物炭的原材料^[3,4]。

由于生物炭来源广, 比表面积相对较大, 表面官能团丰富, 近年来广泛应用于土壤改良、储能、环境污染修复等场合^[5-8], 以及厌氧消化和好氧堆肥等废物生物转化过程^[9]。Lü等^[10]和Luo等^[11]发现投加生物炭可以有效缓解厌氧消化过程中的氨抑制和酸抑制; 粒径为75 μm的生物炭, 可缩短反应迟滞期38.0%, 提高最大产甲烷速率70.6%。

Awasthi等^[12]将生物炭投加到好氧堆肥体系, 发现生物炭不仅缩短了反应的嗜热期, 而且减少了CH₄和N₂O等温室气体的排放。

但是, 由于复杂的高温制备过程, 生物炭可能会残留一些有毒有害物质, 如痕量金属、多环芳烃(PAHs)、挥发性有机物(VOCs), 以及被羟基和羧基取代的小分子芳香族化合物等^[4, 6, 13-15]。生物炭

收稿日期: 2019-01-16; 修订日期: 2019-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100603)

作者简介: 何晶晶(1962~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为固体废物处理处置与资源化利用过程、技术和理论, E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lvfan.rhodes@tongji.edu.cn

表面残留的化合物种类主要与生物质原料和热解温度有关^[15-17]。Oleszczuk 等发现^[18]，采用甲苯提取 4 种不同原料制得生物炭表面的 PAHs 总量相差较大，范围为 1 124 ~ 28 339 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，当生物炭提取物 PAHs 总量越高时，与之接触的甲壳类动物大型蚤死亡率越高，最高可达 80%。Smith 等^[19]用蒸馏水浸出松木生物炭，并将生物炭浸出液用于培养水生光合微生物蓝绿藻类，发现浸出液对微生物的生长表现出了明显的抑制作用。因此，在厌氧消化等生物反应过程中，生物炭中的有毒有害物质若被浸出，可能会对反应体系中的微生物产生危害。另外，如果这些有毒有害物质进入沼渣、沼液等处理残余物，当残余物用于后续土地利用时也可能造成不利的环境影响。

目前，大量关于生物炭浸出液成分及其相关毒性的研究多聚焦于生物炭在蒸馏水或甲苯中的浸出^[14, 18-20]，鲜有研究关注在实际不同环境应用体系中的溶解性有机物 (dissolved organic matters, DOM) 组成。而在厌氧消化^[21]、发酵产氢^[22, 23]过程中，随着反应的进行，在中期阶段可能会产生挥发性脂肪酸 (VFAs)、醇类等中间产物，在反应后期会累积腐殖质等物质。Zheng 等^[24]研究了在厌氧消化过程中 29 种可生物降解固体废物光谱特性的演变规律，结果表明，在产甲烷过程结束后，沼液中富里酸类化合物荧光峰的丰度提高了 0.01 ~ 0.54 倍，说明厌氧消化系统生成了一定量的腐殖类物质。Tang 等^[25]的研究发现，在厌氧消化过程中污泥中的腐殖质成分发生了再聚合，能提供更多芳香族富电子位点从而形成新的腐殖质聚合物，在厌氧消化后期腐殖酸浓度达到最高。因此，生物炭在厌氧消化过程中的实际应用环境较为复杂，仅以蒸馏水或甲苯作为浸提剂不足以正确评估生物炭可能造成的影响。另外，传统研究中测试浸出液中有有机物组成的方法，常见有气质联用 (GC-MS)^[14]、¹³C 核磁共振、红外光谱^[20]等。而大分子化合物沸点高，难以气化，从而不能通过 GC-MS 被检测到。因此，GC-MS 检测到的物质大多为小分子物质，忽略了大分子物质和复杂物质的存在；¹³C 核磁共振、红外光谱^[20]等手段虽然能提供一些结构信息，但无法准确鉴别物质成分。

本文以 4 种浸提剂模拟厌氧消化不同阶段的液相环境，采用高分辨液质联用仪的鉴定方法，探究了生物炭在厌氧消化不同典型反应阶段浸出液中溶解性有机物的分子成分，以研讨生物炭浸出液化合物组成可能对反应过程产生的影响。

1 材料与方法

1.1 生物炭

本实验用生物炭为购自大连群芳园艺公司的果木炭，热解温度为 400 ~ 500℃。原始尺寸为 8 ~ 12 mm，使用前进行破碎筛分得到粒径为 1 ~ 2 mm 的生物炭颗粒。

1.2 浸出过程

采用 4 种代表厌氧消化典型液相环境的浸提剂，包括作为反应体系初始阶段的水和缓冲盐溶液，作为反应中期的甲醇和作为反应后期的腐殖酸 (humic acid, HA) 溶液。

1.2.1 浸提剂

HA 溶液：将 HA 固体 (购自上海巨枫化学科技有限公司)，用 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶解，然后用 HCl 调节 pH 到 5.0；HA 溶液用 0.45 μm 滤膜过滤，滤液保存于 4℃ 冰箱作为储备液。

缓冲盐溶液：参考 Lin 等^[26]启动厌氧消化批次反应的方法，配制代表厌氧消化初期液相环境的缓冲盐溶液，其组成包括 0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.53 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4Cl 、0.075 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、2.77 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ K_2HPO_4 、2.8 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 和 0.02 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{FeCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。

甲醇：购自 Sigma, HPLC, >99.9%。

1.2.2 浸出实验

取 10 g 破碎筛分后的生物炭颗粒于 500 mL 浸提剂中，在 25℃、150 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速下振荡 72 h。浸出液用 0.45 μm 混合纤维素酯滤膜过滤，滤液保存于 4℃ 冰箱作为储备液。

1.3 测试指标与分析方法

用固相萃取法提取在不同浸提剂中生物炭的 DOM，采用高分辨液相色谱质谱联用仪测试浸出液中 DOM 的组成。

1.3.1 固相萃取

固相萃取流程参考 Dittmar 等^[27]萃取海水中 DOM 的方法。首先，用甲醇活化固相萃取小柱 (安捷伦, Bond Elut-PPL, 100 mg, 3 mL)，然后，使浸出液匀速流过萃取柱，流速不超过 40 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ；其后，用 pH = 2 的 HCl 清洗萃取小柱，除去柱内的盐分，并用空气干燥 5 min；最后，用甲醇洗脱萃取小柱，得萃取后的浸出液。除了将 4 种浸出液进行固相萃取之外，将 4 种空白浸提剂也分别进行固相萃取，并进行后续测试，作为生物炭浸出前浸提剂的系统空白，以扣除实验流程带来的误差。每种工况设置 3 平行。

1.3.2 仪器测试

仪器: 采用高分辨液相色谱质谱联用仪(Q-Exactive plus, Thermo), 分别用电喷雾正离子模式[ESI(+)]和电喷雾负离子模式[ESI(-)]测试浸出液中的 DOM, 测试前仪器用校准溶液进行外部校准。

液相条件: 扫描质量范围为 100 ~ 1 500 m/z , 分辨率为 70 000, 进样量为 5 μL , 流速为 0.3 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 选取甲醇和乙酸溶液为流动相。

1.3.3 软件分析

使用 Past3 软件(<http://folk.uio.no/ohammer/past/>), 对不同浸出液中 DOM 利用进行主成分分析, 以比较 DOM 之间的差异. 利用 Compounds discover 2.1(Thermo) 软件将 DOM 与物质数据库进

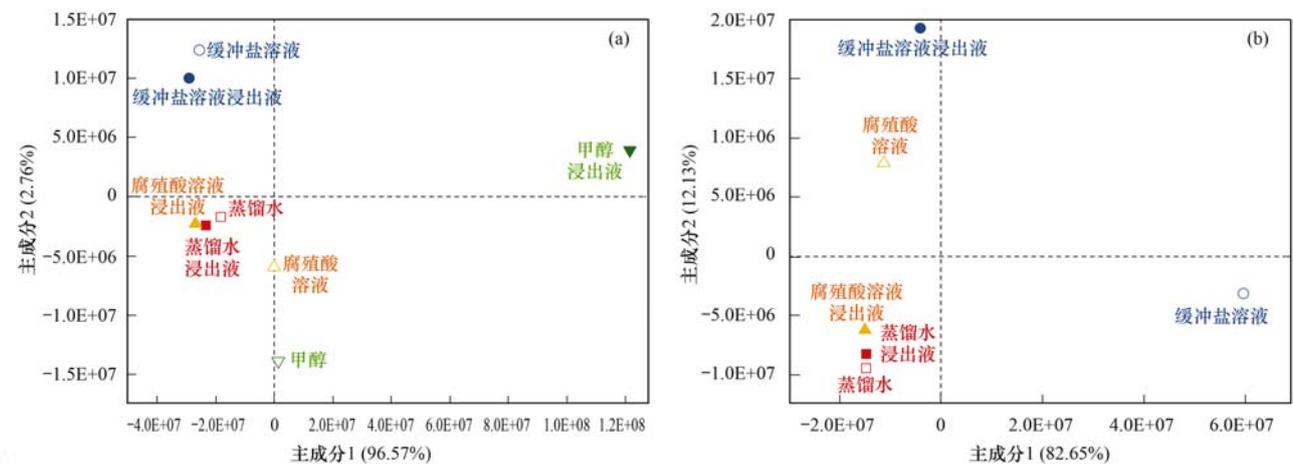
行对比检索, 以鉴别 DOM 成分。

2 结果与分析

结合电喷雾正离子[ESI(+)]和负离子[ESI(-)]两种模式下的原始数据, 共检测到 2 690 种物质. 对原始数据进行数据筛选, 3 个平行中至少有两平行检测到的物质才认为有效, 剔除无效数据^[28], 剩下共有 536 种物质。

2.1 不同浸提剂体系 DOM 主成分分析

对不同浸出液进行基于 Bray-Curtis 距离的主成分分析(principle component analysis, PCA), 如图 1(a)所示, 不同样品间的差异程度通过点与点间的距离体现^[29]。



(a) 4 种浸出液及其对应浸提剂 DOM 差异; (b) 蒸馏水、缓冲盐溶液和 HA 溶液浸出液及其对应浸提剂 DOM 差异

图 1 不同浸出液中 DOM 组成主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis on DOM composition in different leachates

从图 1(a)中可以看出, 主成分 1 的占比为 96.57%, 而主成分 2 的占比仅为 2.76%. 因此, 主成分 1 在 DOM 中所占比重较大, DOM 组成差异主要由横轴的差距体现. 蒸馏水浸出液和缓冲盐浸出液与对应空白相距较近, 即物质组成较为相似; HA 溶液与 HA 溶液浸出液的距离相对较远, 这说明 HA 溶液和 HA 溶液浸出液之间 DOM 组成存在差异; 距离最远的是甲醇和甲醇浸出液, 即甲醇浸出液中 DOM 组成与甲醇有着较大差异。

由于甲醇的浸出液与甲醇空白之间的差异太大, 可能会影响其它组别之间的比较. 因此, 将甲醇空白及甲醇浸出液从主成分分析图中去除, 对比剩余组别之间的差异. 图 1(b)列出了除甲醇浸出液外的 3 个浸出液及其空白的主成分分析图. 从图中可以看出, 蒸馏水浸出液和蒸馏水空白距离极为接近, 说明生物炭在蒸馏水中浸出的 DOM 相对较少; 缓冲盐溶液浸出液和缓冲盐溶液空白距离最远, 即相比蒸馏水, 缓冲盐溶液能浸出更多的 DOM; HA 溶液浸出液和 HA 溶液空白在水平距离

上基本无差异, 但在主成分 2 差异较大。

2.2 不同浸出液的 DOM 分子特征

在正离子模式[ESI(+)]的测试结果中, 生物炭浸出液共检索到 419 种物质, 在负离子模式[ESI(-)]共检测到 117 种物质. 结合 ESI(+)和 ESI(-)的质谱分析结果, 可得到浸出液中所有 DOM 的分子式. 依据分子式中 H/C 和 O/C 原子个数比的大小, 可将物质分为不饱和烃、木质素、脂类和脂肪族及蛋白质类物质, 绘制成 Van Krevelen 图^[30]. 按此分类, 在蒸馏水和缓冲盐溶液中生物炭的浸出液 DOM 分布如图 2 所示。

HA 原溶液和生物炭的 HA 溶液浸出液中 DOM 组成和分布如图 3 所示. 从中可以看出, 投加生物炭到 HA 溶液中后, 溶液中 DOM 物质数量有所减少, 从 113 种减少到 47 种, 主要为木质素和脂类物质减少, 这与图 1 的结果相一致。

图 4 是生物炭在甲醇浸出液中 DOM 的组成. 可以看到, 甲醇浸出液中 DOM 各个种类有机物的数量相比其它浸出液都大幅增加, 尤其是脂类、木

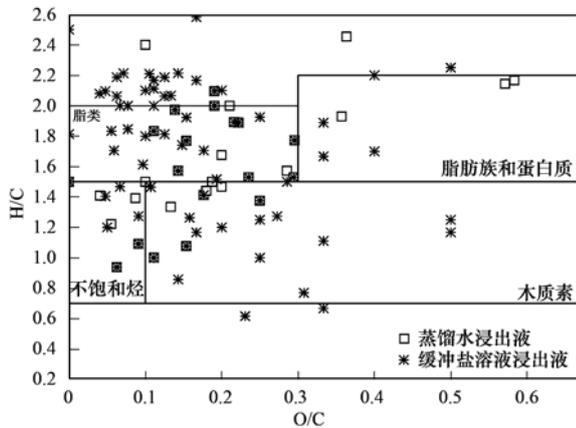


图2 生物炭在蒸馏水和缓冲盐溶液浸出液 DOM 的 Van Krevelen 图

Fig. 2 Van Krevelen diagram of DOM in the water and the buffer salt solution leachates of biochar

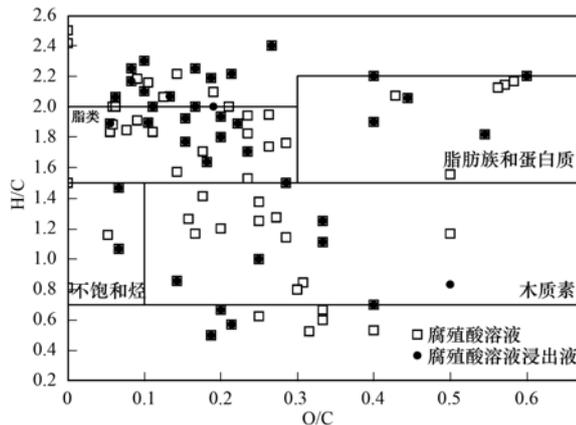


图3 HA 溶液和 HA 溶液浸出液中 DOM 的 Van Krevelen 图

Fig. 3 Van Krevelen diagram of DOM in the humic acid solution and the humic acid solution leachate of biochar

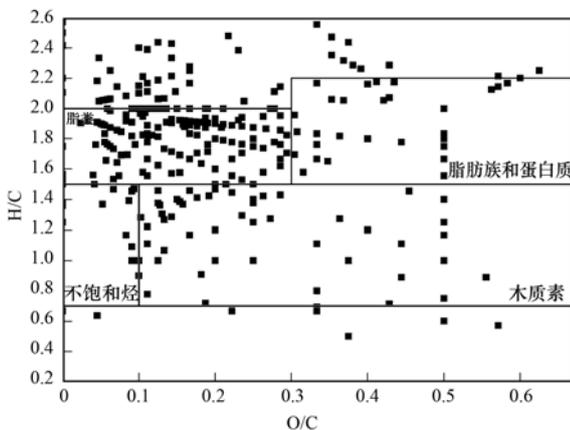


图4 生物炭在甲醇浸出液中 DOM 的 Van Krevelen 图

Fig. 4 Van Krevelen diagram of DOM in the methanol leachate of biochar

质素、脂肪族及蛋白质类物质的数量，一共检测到 381 种物质。

2.3 不同浸出液的 DOM 结构特征

不同于 2.2 节按 DOM 分子式中 H/C 和 O/C 的

原子数个数比值差异对物质进行分类，本节将测得物质质谱谱图与参考物质数据库 mzCloud (www.mzCloud.org) 进行对比检索，保留匹配度超过 70% 的物质，剩下共有 100 种物质。将这 100 种物质按结构进行分类，主要可分为芳香族化合物和脂肪族化合物。芳香族化合物主要包括酚、芳香酸、芳香醛和酮、芳香酯和其它化合物，其它化合物包括芳香醇、芳香醚和一些结构复杂的芳香族物质；脂肪族化合物包括脂肪酸、酯、醇和其它化合物，其它化合物包括酮、酰胺、杂环化合物等物质。检测到的 DOM 相对分子质量分布在 109 ~ 458 范围内，平均相对分子质量为 290.2。

图 5 和图 6 分别为各个浸出液中芳香族化合物和脂肪族化合物种类的数量。在脂肪酸和芳香族化合物的其它物质这两个类别中，缓冲盐溶液比蒸馏水多浸出了 7 种物质。甲醇浸出液在每个类别的 DOM 数量都是最多的，尤其是脂肪酸和芳香酸这两类物质的数量远多于其它浸出液。HA 溶液浸出液中的 DOM 在每个类别的数量都略少于 HA 溶液，总体共少了 10 种物质。

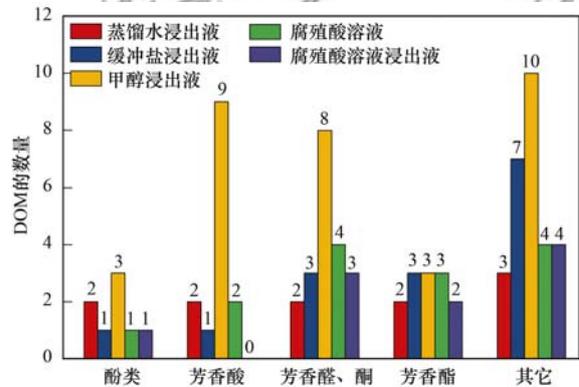


图5 不同浸出液中的芳香族化合物数量

Fig. 5 Number of aromatic compounds in different leachates

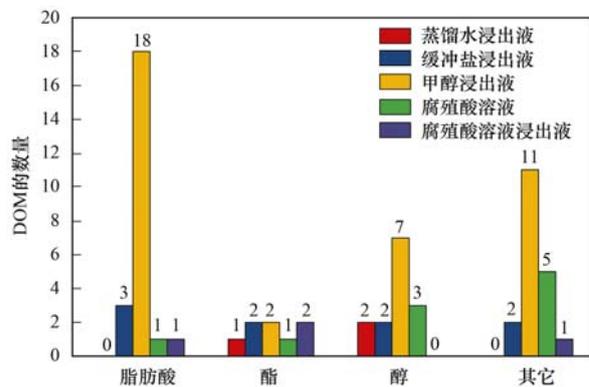


图6 不同浸出液中的脂肪族化合物数量

Fig. 6 Number of aliphatic compounds in different leachates

不同浸出液中物质的含量存在差异，表 1 列出了各浸出液中相对丰度较高几种物质的峰面积。尽管图 3 显示 HA 溶液中部分木质素和脂类物质被生

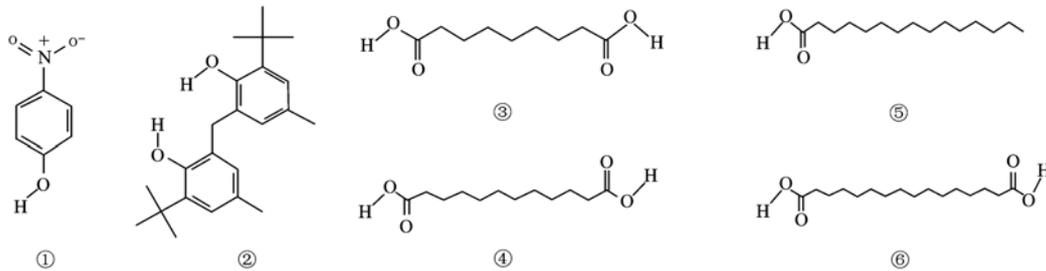
物炭吸附, 但从表 1 中可以看出, 生物炭在 HA 溶液中仍有部分物质浸出, 如 4-硝基苯酚等。

表 1 各浸出液中部分物质的峰面积

Table 1 Peak area of some substances in each leachate

结构式	DOM 成分	样品				
		蒸馏水浸出液	缓冲盐溶液浸出液	甲醇浸出液	HA 溶液	HA 浸出液
①	4-硝基苯酚	/ ¹⁾	/	/	/	2.96E+05
②	4-甲基-6-叔丁基苯酚	2.55E+05	/	1.22E+07	/	/
③	壬二酸	/	/	2.20E+06	/	/
④	十二烷二酸	/	/	6.01E+05	/	/
⑤	十五烷二酸	/	/	4.96E+05	/	/
⑥	十六烷二酸	/	/	7.84E+07	/	/

1) “/”表示浸出液中没有该组分



3 讨论

3.1 蒸馏水与缓冲盐溶液条件下的浸出

在固相萃取过程中, 尽管空白对照会不可避免地遭受污染, 但其所含 DOM 物质极少, 所以, 可以认为蒸馏水和缓冲盐溶液中不含 DOM. 因此, 图 2 浸出液中的 DOM 均来自生物炭. 从中可以看出, 两种浸出液中的 DOM 物质种类近似, 多为脂类、木质素和不饱和烃类物质; 但是, 缓冲盐溶液浸出的 DOM 有 93 种物质, 多于蒸馏水浸出液中的 37 种物质, 这与图 1(b) 主成分分析的结果一致. 造成这种现象的原因, 可能是缓冲盐溶液中的金属离子与生物炭上的有机物竞争生物炭表面吸附位点^[31], 即在浸出过程中金属离子可能占据了生物炭表面的吸附位点, 而使得生物炭上的有机物溶解到溶液中. 图 5 和图 6 中, 在脂肪酸和芳香族化合物的其它物质这两个类别中, 缓冲盐溶液比蒸馏水多浸出了 7 种物质, 与图 2 的结论一致.

目前, 大量研究用生物炭在蒸馏水的浸出液来评估生物炭浸出液的毒性, 而实际应用场合如厌氧消化初始阶段的环境可能会浸出更多物质, 给反应过程带来更复杂的影响. 由于缓冲盐溶液浸出液中 DOM 组成复杂, 物质类别分布较为均匀, 没有明显的高浸出组分, 给反应带来的影响是未知的, 比如是否浸出的 DOM 化合物反而起到了电子传递介体的有益作用. 因此, 生物炭在厌氧消化初期的浸出液带来的实际影响尚需要进行毒性研究进一步确认.

3.2 甲醇条件下的浸出

厌氧消化中期阶段可能会产生挥发性脂肪酸 (VFAs) 和醇类等中间产物. 甲醇极性很强, 相较乙醇可以溶解更多的化合物. Patra 等^[32]的研究发现用甲醇提取丁香和大蒜相比乙醇和水有更好的提取效果. 因此, 选择甲醇为浸提剂可以浸出更多的 DOM. 乙酸是厌氧消化中期最常见的挥发性脂肪酸, 其极性与甲醇相近, 但由于其余组别固相萃取最后以甲醇为溶剂, 为减小误差和减少溶剂转化时的损失, 本文选择甲醇为浸提剂. 实际的厌氧消化环境中, 甲醇浓度最高约为 100 ~ 200 mg·L⁻¹^[23, 33], 本研究选用纯甲醇为浸提剂是为了获得最多的可浸出 DOM 种类, 即为了评估生物炭的 DOM 最大可浸出程度. 因此, 甲醇浸出也是其它组别的对照组. 从图 4 与图 2、3 的对比中可以看出, 作为厌氧消化反应中期的代表性醇类浸提剂, 甲醇比反应初期的蒸馏水和缓冲盐溶液浸出了更多的 DOM 种类. 造成这种现象的原因, 可能是生物炭中 DOM 在甲醇中的辛醇-水分配系数大于蒸馏水和缓冲盐溶液, 有机物更易在甲醇中溶解.

根据图 5 和图 6 物质结构分类结果, 表明甲醇浸出液在芳香族化合物和脂肪族化合物中每个类别的 DOM 数量都是最多的, 尤其是脂肪酸和芳香酸这两类物质的数量远多于其它浸出液. Buss 等^[14]和 Hao 等^[6]在用蒸馏水浸出生物炭和水热炭的相关研究中也检测到了大量的有机酸和酚类物质, 并提到这些物质可能会对微生物的生长造成威胁. 因此, 在厌氧消化中期生成大量中间产物醇的环境

下,大量的有机酸、酚类和其它有机物可能会从生物炭表面浸出,前二者可能会对厌氧反应体系中的微生物形成抑制。所以,生物炭浸出液在反应中期可能产生比初期更大的危害。

3.3 腐殖酸

从图3可以看出,投加生物炭到HA溶液后,溶液中的DOM物质数量从113种减少到47种,这可能是由于生物炭的吸附作用,即由于生物炭丰富的孔隙,HA溶液中部分物质被吸附到生物炭表面^[34]。图5和图6中,HA溶液浸出液中的DOM在芳香族化合物和脂肪族化合物中每个类别的数量都略少于HA溶液,这与图3的结果是一致的。

Buss等^[14]用蒸馏水浸出生物炭,采用气相色谱-质谱联用(6890 GC-5975c MS, Agilent)测试浸出液成分,发现浸出液中主要包括醇、小分子脂肪酸、酚类和多环芳烃(PAHs)等共34种物质,相对分子质量分布在32~278范围内。与Buss等的研究结论相比,本文测得的物质共100种,相对分子质量分布在109~458范围内,物质的相对分子质量总体要更大,且种类更多。与其重合的物质种类主要包括酚、脂肪酸、醇和酮等物质,在这些物质中,本文测得的物质种类相对分子质量更大,且数量更多。例如,脂肪酸类中,其研究主要包含甲酸、乙酸、丙酸和丁酸共4种酸,相对分子质量范围为46~88,而本文中的脂肪酸类物质主要包括壬二酸、十二烷二酸、十五烷酸和十六烷二酸等21种相对分子质量更大的脂肪酸,相对分子质量分布在131~392范围内。因此,传统的气相质谱测试方法测得的物质结构较为简单,可能低估了生物炭浸出液中DOM组成的复杂性。

4 结论

(1)在厌氧消化不同阶段,生物炭浸出液中的DOM组成存在较大差异。与目前大量研究所使用的蒸馏水浸出液相比,代表厌氧消化初期环境的缓冲盐溶液能浸出生物炭中更多的脂肪酸和一些芳香族化合物;代表厌氧消化中期环境的甲醇溶液溶剂浸出了大量的有机酸和苯酚类物质,已有研究证明有机酸和苯酚类物质会对微生物形成抑制;在代表厌氧消化后期环境的HA溶液中,尽管生物炭能吸附部分木质素类物质,但是仍有毒性强的酚类物质浸出。

(2)本文结果表明,应关注生物炭在环境及农业等相关修复场合应用的安全性。尽管生物炭表现出了优异的环境修复改善性能,但应用生物炭后的浸出液及残余物也可能给反应过程带来不确定性,

给后续应用带来环境风险。因此,后续研究和应用时应充分考虑生物炭浸出的DOM在其中所起的作用。

参考文献:

- [1] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science, technology and implementation (2nd ed.) [M]. London: Routledge, 2015.
- [2] Manyà J J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(15): 7939-7954.
- [3] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. Plant and Soil, 2010, **327**(1-2): 235-246.
- [4] Zielińska A, Oleszczuk P. The conversion of sewage sludge into biochar reduces polycyclic aromatic hydrocarbon content and ecotoxicity but increases trace metal content [J]. Biomass and Bioenergy, 2015, **75**: 235-244.
- [5] 赵华轩, 郎印海. 磁性生物炭对水中CIP和OFL的吸附行为和机制 [J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3729-3735.
Zhao H X, Lang Y H. Behaviors and mechanisms of CIP and OFL adsorption by magnetic biochar [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3729-3735.
- [6] Hao S L, Zhu X D, Liu Y C, et al. Production temperature effects on the structure of hydrochar-derived dissolved organic matter and associated toxicity [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(13): 7486-7495.
- [7] Gai X P, Wang H Y, Liu J, et al. Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate [J]. PLoS One, 2014, **9**(12): e113888.
- [8] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 [J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 355-362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 355-362.
- [9] Zhang J N, Lü F, Shao L M, et al. The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 2014, **168**: 252-258.
- [10] Lü F, Luo C H, Shao L M, et al. Biochar alleviates combined stress of ammonium and acids by firstly enriching *Methanosaeta* and then *Methanosarcina* [J]. Water Research, 2016, **90**: 34-43.
- [11] Luo C H, Lü F, Shao L M, et al. Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes [J]. Water Research, 2015, **68**: 710-718.
- [12] Awasthi M K, Wang M J, Chen H Y, et al. Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting [J]. Bioresource Technology, 2017, **224**: 428-438.
- [13] Keiluweit M, Kleber M, Sparrow M A, et al. Solvent-extractable polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar: influence of pyrolysis temperature and feedstock [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(17): 9333-9341.
- [14] Buss W, Mašek O, Graham M, et al. Inherent organic compounds in biochar--their content, composition and potential toxic effects [J]. Journal of Environmental Management, 2015, **156**: 150-157.

- [15] Kloss S, Zehetner F, Dellantonio A, *et al.* Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(4): 990-1000.
- [16] Lyu H H, He Y H, Tang J C, *et al.* Effect of pyrolysis temperature on potential toxicity of biochar if applied to the environment[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 1-7.
- [17] Zhao L, Cao X D, Mašek O, *et al.* Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **256-257**: 1-9.
- [18] Oleszczuk P, Joško I, Kuśmierz M. Biochar properties regarding to contaminants content and ecotoxicological assessment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **260**: 375-382.
- [19] Smith C R, Buzan E M, Lee J W. Potential impact of biochar water-extractable substances on environmental sustainability[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2013, **1**(1): 118-126.
- [20] Qu X L, Fu H Y, Mao J D, *et al.* Chemical and structural properties of dissolved black carbon released from biochars[J]. *Carbon*, 2016, **96**: 759-767.
- [21] He P J, Lü F, Shao L M, *et al.* Effect of alkali metal cation on the anaerobic hydrolysis and acidogenesis of vegetable waste[J]. *Environmental Technology*, 2006, **27**(3): 317-327.
- [22] Ghimire A, Frunzo L, Pirozzi F, *et al.* A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: process parameters and use of by-products[J]. *Applied Energy*, 2015, **144**: 73-95.
- [23] Sivaramakrishna D, Sreekanth D, Himabindu V, *et al.* Biological hydrogen production from probiotic wastewater as substrate by selectively enriched anaerobic mixed microflora[J]. *Renewable Energy*, 2009, **34**(3): 937-940.
- [24] Zheng W, Lü F, Phoungthong K, *et al.* Relationship between anaerobic digestion of biodegradable solid waste and spectral characteristics of the derived liquid digestate[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **161**(161): 69-77.
- [25] Tang Y F, Li X W, Dong B, *et al.* Effect of aromatic repolymerization of humic acid-like fraction on digestate phytotoxicity reduction during high-solid anaerobic digestion for stabilization treatment of sewage sludge[J]. *Water Research*, 2018, **143**: 436-444.
- [26] Lin Y C, Lü F, Shao L M, *et al.* Influence of bicarbonate buffer on the methanogenic pathway during thermophilic anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **137**: 245-253.
- [27] Dittmar T, Koch B, Hertkorn N, *et al.* A simple and efficient method for the solid-phase extraction of dissolved organic matter (SPE-DOM) from seawater[J]. *Limnology and Oceanography Methods*, 2008, **6**(6): 230-235.
- [28] Lucas J, Koester I, Wichels A, *et al.* Short-term dynamics of north sea bacterioplankton-dissolved organic matter coherence on molecular level[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**: 321.
- [29] Beals E W. Bray-curtis ordination: an effective strategy for analysis of multivariate ecological data [J]. *Advances in Ecological Research*, 1984, **14**: 1-55.
- [30] Yuan Z W, He C, Shi Q, *et al.* Molecular insights into the transformation of dissolved organic matter in landfill leachate concentrate during biodegradation and coagulation processes using ESI FT-ICR MS[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(14): 8110-8118.
- [31] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, *et al.* Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter[J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(8): 935-940.
- [32] Patra A K, Kamra D N, Agarwal N. Effect of spices on rumen fermentation, methanogenesis and protozoa counts in in vitro gas production test[J]. *International Congress Series*, 2006, **1293**: 176-179.
- [33] Revilla I, González-Sanjosé M L. Methanol release during fermentation of red grapes treated with pectolytic enzymes[J]. *Food Chemistry*, 1998, **63**(3): 307-312.
- [34] He P J, Yu Q F, Zhang H, *et al.* Removal of copper (II) by biochar mediated by dissolved organic matter [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 7091.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)