

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖逍 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制

王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞*

(河海大学环境学院, 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 底栖生物膜是河流生态系统重要的初级生产者, 能够对外界环境变化做出迅速响应, 在河流碳循环过程中扮演重要角色。然而, 人们对于污水处理厂尾水受纳河流底栖生物膜细菌群落与水溶性有机质 (water-soluble organic matter, WSOM) 的特征及内在联系的认识还十分有限。本研究使用 16S rRNA 高通量测序、紫外可见光谱和三维荧光-平行因子分析解析代表性污水处理厂尾水受纳区底栖生物膜细菌群落和 WSOM 的特征。结果表明, 底栖生物膜 WSOM 中识别出两种类腐殖质组分和一种色氨酸类蛋白组分, 其中大分子类腐殖质在底栖生物膜 WSOM 中占据优势地位。尾水区底栖生物膜细菌群落的均匀度及多样性沿程提高, 相较于未受污染的上游区, 污染源头区和污染下游区生物膜细菌群落结构更加稳定。发色水溶性有机质 (colored water-soluble organic matter, CWSOM)、有机质芳香性和分子量是影响尾水区底栖生物膜细菌群落变化的主要因素, 其中芳香性色氨酸类蛋白对生物膜细菌群落变化的解释度最高 (34%)。共现网络揭示了细菌群落与 WSOM 组分之间复杂的相互关系, Proteobacteria 和 Halobacterota 通过碳循环过程参与生物膜 WSOM 的新陈代谢, 生物膜细菌群落与 WSOM 的组成将以一种动态变化的模式对尾水排放做出响应。本研究为探寻尾水受纳区水生态变化的指示标志提供了新的思路。

关键词: 尾水排放; 底栖生物膜; 细菌群落; 水溶性有机质; 共现网络

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5826-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104078

Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River

WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, LI Yi, WANG Long-fei*

(Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Benthic biofilms, which respond rapidly to environmental alterations, are important primary producers and play an important role in the carbon cycle in riverine ecosystems. However, there is limited knowledge on the characteristics and linkages between water-soluble organic matter (WSOM) and bacterial communities in the benthic biofilm along the effluent-receiving river. In this study, an integrated use of 16S rRNA high-throughput sequencing, UV-vis spectroscopy, and EEM-PARAFAC analysis were employed to characterize WSOM and bacterial communities in benthic biofilm, and their relationships were investigated through a co-occurrence network. Two humic-like fractions and one tryptophan-like protein fraction were identified, with macromolecular humic fractions dominating the benthic WSOM. The uniformity and diversity of the benthic biofilm bacterial community increased along the effluent-receiving river, and the biofilm bacterial community structure in the downstream area of WWTP was more stable compared to that in the upstream area. Colored water-soluble organic matter, aromaticity, and molecular weight of organic matter were proven predominant factors influencing the benthic biofilm bacterial community, with aromatic tryptophan-like proteins explaining the highest change (34%) in the biofilm bacterial community. The co-occurrence network shows the complex relationships in the bacterial communities. The phylum of Proteobacteria and Halobacterota participate in the metabolism of biofilm WSOM through carbon cycling. The composition of the biofilm bacterial community and WSOM respond to effluent discharge in a dynamically changing pattern. This study provides a new insight for exploring ecological indicators responding to effluent discharge.

Key words: effluent discharge; benthic biofilms; bacterial communities; water-soluble organic matter; co-occurrence network

随着城市化进程的不断加快,河道、内湖的生态健康受到外源输入的影响日益严重,污水处理厂是重要的外源输入之一^[1]。污水厂的处理工艺无法完全去除的营养盐和有害物质,随尾水排放进入自然水体^[2,3],可能导致受纳水体营养物质富集而产生富营养化^[4],改变河流生态系统水生生物群落的结构及功能^[5,6]。底栖生物膜是周丛生物和有机碎屑的集合,构成了河流食物网的基础部分,是河流生态系统生物地球化学循环中至关重要的调控单元^[7]。底栖生物膜是河流中最先对尾水排放做出响应的生物集合,能够捕捉河湖历史污染信息,吸收存储河流

中历史排放事件释放的污染物^[8,9],是重要的污染指示标志和河湖水质变化的“吹哨者”,常被用作评估水生环境生态变化的指示标志。

生物膜的结构和功能很大程度上取决于周丛生物群落及有机质的组成。水溶性有机质 (water-soluble organic matter, WSOM) 是生物膜有机质中最活跃的成分,也是异养菌和藻类等微生物代谢过程

收稿日期: 2021-04-08; 修订日期: 2021-05-15

基金项目: 河海大学中央高校基本科研业务费项目 (B210202054)

作者简介: 王钰涛 (1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为溶解性有机质-微生物环境相互作用, E-mail: yubao15@163.com

* 通信作者, E-mail: lfwang@hhu.edu.cn

中可利用有机物的重要来源^[10,11],在塑造生物膜微生物群落方面发挥重要作用^[12,13].尾水排放可提高底栖生物膜的胞外酶活性,进而将复杂有机物转化为简单有机质,促进微生物的吸收利用过程^[14].了解细菌群落组成与 DOM 组成之间的关系对阐明河流生态系统中的碳循环过程至关重要,目前已有较多学者关注河流^[15,16]和湖泊^[17,18]中溶解性有机质(DOM)与细菌群落的特征及其内在联系.然而对于河流底栖生物膜细菌群落与 WSOM 特征的关注仍然较少.解析尾水受纳区底栖生物膜细菌群落与 WSOM 的特征及相互作用机制,对明晰尾水区底栖生物膜在河流碳循环中发挥的作用和揭示尾水区生态环境演替过程具有重要的科学意义.本研究通过探究尾水受纳区底栖生物膜细菌群落与 WSOM 特征及其内在联系,以期为探索尾水受纳区生态系统的污染指示标志提供新的思路.

1 材料与方法

1.1 采样区域与样品采集

选择南京市江宁区城北污水处理厂尾水受纳河段作为研究区域(31.96°N, 118.84°E).城北污水处理厂位于江宁区东山街道土山路西侧,主要收集东山老城区、岔路地区、上坊地区的居民生活污水,主体污水处理工艺采用鼓风曝气氧化沟形式的 A²/O,污水处理量 4 万 m³·d⁻¹,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)》一级 A 标准.

于 2019 年 12 月对研究区域底栖生物膜进行采样.采样区域以污水厂排污口为分界线,将排污口上游 1 km 河段定义为上游区(在排污口上游 0.5 km 和 1 km 处设置采样点 B2 和 B1),反映未受污水厂尾水排放影响的河流状况;将排污口下游 0.5 km 河段定义为受尾水排放严重影响的污染源头区(排污口处为采样点 A0,排污口下游 0.2 km 和 0.5 km 设置采样点 A1 和 A2);污染源头区下游 2.5 km 河段定义为受尾水排放影响较小的污染下游区(排污口下游 1、1.5、2 和 3 km 设置采样点 A3、A4、A5 和 A6).采样点位如图 1 所示.

底栖生物膜采集的具体方法如下^[19]:捞取采样点附近大小相似且附着生物膜的石块,使用无菌刮刀将石头上附着生物膜刮下,收集至无菌不锈钢容器中.每个采样点采集约 50 g 湿重底栖生物膜样品.所有样品放入含有冰袋的样品储存箱中保存,尽快运回实验室处理分析.

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理

每个采样点采集 2 g 湿重的生物膜样品分别装

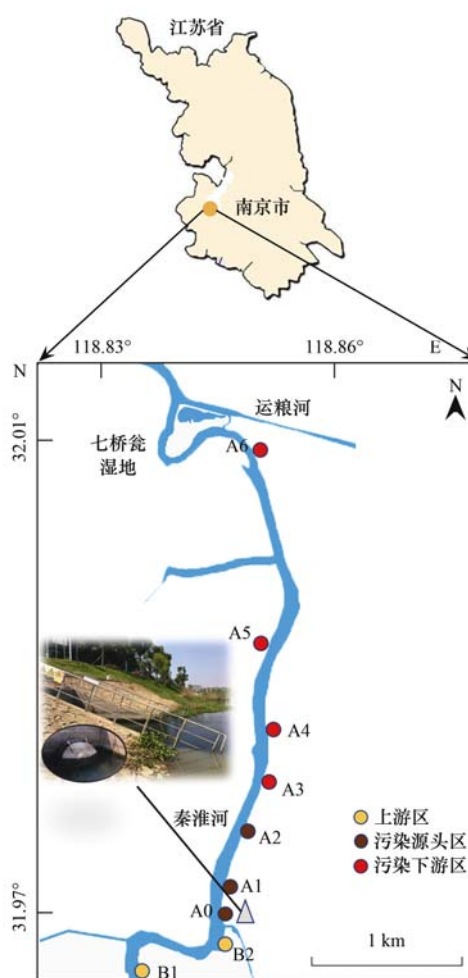


图 1 尾水受纳河流采样点布置示意

Fig. 1 Sampling sites in the representative effluent water-receiving river

入 2 mL 聚丙烯离心管中,转移到 -80℃ 冰箱内进行暂时保存,用于 DNA 提取及 PCR 扩增.将每个采样点采集的约 40 g 湿生物膜进行冷冻干燥处理(Christ ALPHA 1-2 LD plus,德国 Marin Christ 公司).对冷冻干燥后的生物膜样品进行研磨,过 100 目筛去除杂质后密封保存备用.

1.2.2 生物膜 WSOM 提取及有机碳含量测定

采用浸提-离心法提取生物膜 WSOM.将经过预处理的生物膜样品按照物料:水(g:g)=1:2的比例装入灭菌后的锥形瓶中,在 20℃ 下恒温振荡 16 h.将浸出液转移至 50 mL 灭菌离心管中,在 4000 r·min⁻¹下离心 30 min,取上清液并用 0.45 μm 无菌醋酸纤维滤膜过滤,滤液即为生物膜样品的 WSOM,置于 -4℃ 保存待测^[11,20].使用总有机碳分析仪(Multi N/C2100,德国耶拿分析仪器股份公司)对 WSOM 中的 DOC 含量进行检测.每个样品平行检测 3 次,数据以平均值 ± 标准差形式记录.

1.2.3 光谱检测

用荧光分光光度计(F7000,日立,日本)测量

WSOM 三维荧光光谱 (EEMs), 光电倍增管电压为 700 V, 信噪比为 110. 设置的激发波长 (E_x) 和发射波长 (E_m) 的扫描范围在 200 ~ 600 nm, 中间间隔为 5 nm, 积分时间为 0.1 s. 采用 Milli-Q 水作空白对照, 对数据进行去除内滤效应以及一阶/二阶瑞利、拉曼散射等校正操作. 使用 MATLAB (R2016a) 软件调用 DOM Fluor 工具箱进行平行因子 (PARAFAC) 分析.

将荧光强度进行拉曼归一化, 所得的相对荧光强度以拉曼单位表示 (R. U.). UV-vis 光谱采用紫外-可见分光光度计 (UV6000, 上海元析仪器有限公司) 测量. 在 200 ~ 700 nm 范围内测定样品的吸光度, 扫描间隔为 1 nm, 原始光谱扣除 Milli-Q 水光谱值进行校正, 每个样品平行检测 3 次. 根据原始光谱计算相关特征参数, 如表 1 所示. 结果以平均值 $\pm$ 标准差形式表示.

表 1 紫外-可见吸收光谱特征参数及环境意义

Table 1 UV-vis derived absorption spectra parameters and environmental meanings

参数	计算公式	公式参数	环境意义
$a_{(355)}$	$a_{(A)} = 2.303 \cdot A_{(A)} / l$	$A_{(A)}$ 为波长 λ 处吸光度, l 为光程路径 (m)	发色基团 (colored water-soluble organic matter, CWSOM) 的相对浓度 ^[21]
SUVA ₂₈₀	$SUVA_{280} = a_{(280)} / DOC$	$a_{(280)}$ 为波长 280 nm 吸收系数, DOC 为溶解性有机碳 (ng·g ⁻¹)	表征 DOM 芳香性, 值越大, 芳香性越高 ^[21]
E_{254}/E_{204}	$E_{254}/E_{204} = a_{(254)} / a_{(204)}$	$a_{(254)}$ 为波长 254 nm 吸收系数, $a_{(204)}$ 为波长 204 nm 吸收系数 λ_0 为参照波长 (nm)	表征 DOM 疏水性, 值越大, 疏水性越高 ^[22]
S_R	$a_{(A)} = A_{(\lambda_0)} \exp[S_{(A_0 - \lambda)}]$ $S_R = S_{(275 \sim 295)} / S_{(350 \sim 400)}$	$S_{(275 \sim 295)}$ 和 $S_{(350 \sim 400)}$ 分别为 275 ~ 295 nm 和 350 ~ 400 nm 波段的光谱斜率	表征 DOM 分子量, 值越大, 表明分子量越小 ^[21]

1.2.4 生物膜 DNA 提取及 PCR 扩增

使用 FastDNA Spin Kit 试剂盒 (Q-BIOgene, Carlsbad, CA) 对样品 DNA 进行提取, 并对 DNA 进行琼脂糖凝胶电泳检测. 初测合格的 DNA 送至上海凌恩生物科技有限公司进行高通量测序. 测序引物为 341F (5'-GCT AYG GGR BGC ASC AG-3') 及 806R (5'-GGA CTA CNN GGG TAT CTA AT-3'), 对目标样品 16S rRNA 的 V3 ~ V4 区域进行扩增. 扩增结束后, 用 1% 琼脂糖凝胶电泳对 PCR 扩增产物进行检测. 在 Illumina MiSeq 上以扩增产物为模板制备测序文库. 对测序结果开展质量检测, 将超过 75% 扩增子长度的 Illumina 双端引物的条形码和引物进行裁剪, 并使用 Flash v1.2.7 进行合并后获得最终的微生物基因序列信息.

1.2.5 测序分析

使用 QIIME2 (v2018.6; Quantitative Insights Into Microbial Ecology) 对微生物基因序列信息进行分析. 在切除序列的引物片段后, 调用 DADA2 算法进行质量过滤、去噪、拼接和去嵌合体, 得到具有 99% 相似度的扩增子序列变异 (Amplicon Sequence Variants, ASVs). 调用 classify-sklearn 算法, 参照 Silva 数据库 (Release132, <http://www.arb-silva.de/>) 对每个 ASVs 的特征序列进行物种注释.

1.3 数据分析

采用 R Studio (v. 3.4.2; <http://www.r-project.org/>) 进行细菌群落的 α 多样性分析、冗余分析 (RDA) 和方差分解分析 (VPA). 基于 Bray-Curtis 距离绘制非度量多维尺度 (NMDS) 排序图, 使用相似性分析 (ANOSIM) 进行群落差异检验. 以细菌门水

平相对丰度绘制柱状堆积图. 基于斯皮尔曼相关系数对生物膜 WSOM 紫外可见特征参数及荧光组分进行相关性分析. 使用 Origin 9.1 软件绘制生物膜 WSOM 光谱参数变化图. 使用 Gephi 软件 (<http://gephi.github.io/>) 绘制网络分析图.

2 结果与讨论

2.1 尾水接纳区底栖生物膜 WSOM 性质

2.1.1 生物膜 WSOM、CWSOM 浓度与相关性分析

DOC 和 $a_{(355)}$ 分别代表底栖生物膜 WSOM 浓度和 CWSOM 相对浓度. ω (WSOM) 的平均值 (以 C 计, 下同) 为 152.4 mg·g⁻¹ [图 2 (a)], 与 Schmidt 等^[23] 报道的土壤 ω (WSOM) 水平类似, 表明底栖生物膜是河流生态系统中重要的碳库. 排污口处 ω (WSOM) 和 ω (CWSOM) 增加, 在污染源头区逐渐下降, 污染下游区的 ω (WSOM) 和 ω (CWSOM) 与污染源头区和上游区存在显著差异 (ANOVA, $P < 0.05$). 生物膜具有存储河流历史排放物质的功能^[8,9], 外源输入的有机质会被生物膜存储在 WSOM 中且不断累积, 可能会部分记录和反映历史污染情况. CDOM 是 DOM 的重要组成部分, 在水体有机质相关研究中, Brezonik 等^[24] 和 Spencer 等^[25] 的研究分别发现, 在湖泊和以针叶林为主的河流中 DOM 浓度与发色溶解性有机质浓度 (CDOM) 呈现显著正相关, DOM 和 CDOM 之间的交融混合使它们的变化趋势相同, 从而呈现显著的正相关关系, 因此可将 CDOM 作为表征 DOM 的有效指标^[26]. 本研究中, 尾水区底栖生物膜中 ω (WSOM) 与 ω (CWSOM) 也呈现显著正相关 ($R^2 = 0.93$, $P <$

0.01),表明 CWSOM 可以作为表征生物膜 WSOM 的有效指标,开展进一步地光谱研究。

2.1.2 紫外可见光谱特征参数沿程变化

底栖生物膜 WSOM 紫外可见光谱特征参数变化如图 2(b)所示,相关光谱特征参数在尾水受纳河流不同区域不存在显著差异(ANOVA, $P > 0.05$)。 E_{254}/E_{204} 和 S_R 与 WSOM 和 CWSOM 浓度的变化趋势相似。在 A^2/O 处理过程中,反硝化作用受到抑制,使污水中高疏水性蛋白含量增加^[27],但由于其已被生物降解的特点,导致了污染源头区生物膜 WSOM 疏水性沿程下降。Park 等^[28]的研究报道在污水处理过程中,低分子量组分容易被生物降解有效去除,而高分子量组分被稳定储存,随尾水排放进入自然水体。尾水区底栖生物膜 WSOM 的 S_R 值处于 0.30~0.75 的较低水平,与 Yu 等^[15]的研究结论类似,说明大分子有机质在尾水受纳区底栖生物膜中占据优势地位。除上游区 B2 点位外,生物膜 WSOM 的芳香性整体水平较为稳定,这是由于在 A^2/O 的废水处理过程中,非芳香族组分被选择性去除,而芳香族组分被保存在尾水中,携带

芳香组分的尾水为河流带来了丰富的芳香碳、酚类和含共轭双键的物质^[15],影响底栖生物膜 WSOM 的组成。且芳香性物质相对稳定性更高,不易被微生物降解^[15,29],在底栖生物膜中可稳定储存。

2.1.3 荧光组分的组成及分布

使用 PARAFAC 解析生物膜 WSOM 的荧光组分,经残差分析和对半分析验证,确定 3 组分模型为最适模型(图 3),该模型可解释 EEM 光谱中大于 96% 的变异度。将平行因子分析识别出的模型与 Openfluor 数据库中的其他模型按 94% 的相似度进行匹配识别,结果如表 2 所示。C1 组分是陆源类腐殖质,易光解,且生物可利用性较差,其中 2 个激发波长分别指示紫外光区类富里酸和可见光区类富里酸,与 DOM 中的羰基和羧基相关,一般指示外源输入^[30,31]。C2 组分为陆源或海洋类腐殖质,该组分与土著微生物的活动密切相关,易被微生物循环利用^[32,33]。C3 组分为色氨酸类蛋白,通常以游离分子的形式结合在肽或腐殖质结构中,与微生物降解及人为活动排放有关^[34~36]。

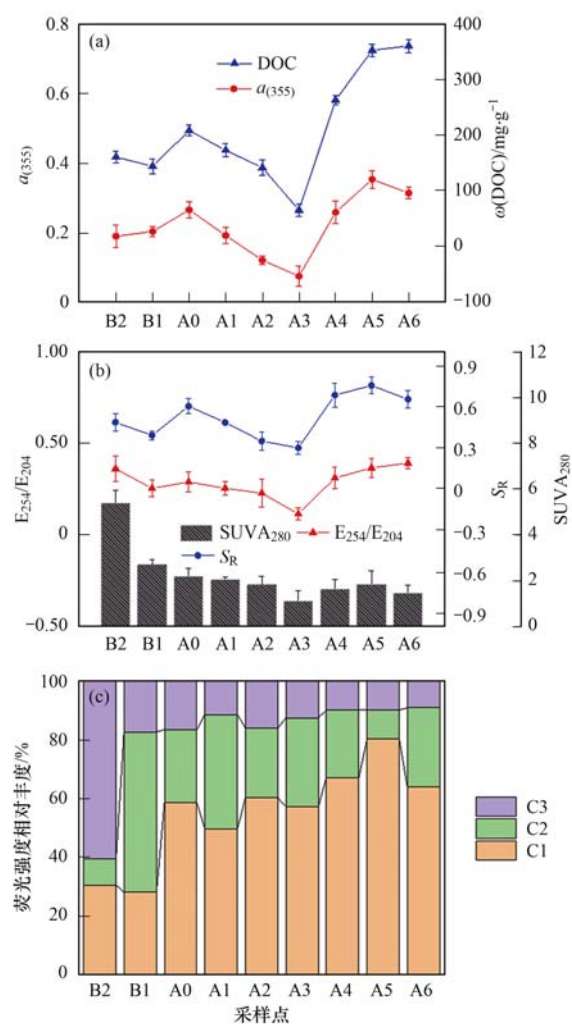
表 2 PARAFAC 识别出的 3 种荧光组分在 Openfluor 数据库中的匹配信息

Table 2 Peak assignments of three components from PARAFAC analysis based on Openfluor database				
组分	激发波长(E_x)/nm	发射波长(E_m)/nm	类型	文献
C1	360/280	450	陆源类腐殖质	[29,30]
C2	300	400	陆源或海洋类腐殖质	[31,32]
C3	290	370	色氨酸类蛋白	[33,35]

WSOM 荧光组分在尾水区沿程变化情况如图 2(c)所示。结果显示 C1 组分占比逐渐增加。据报道在以污水排放为主要补给的河流中,高分子腐殖质物质在水体 DOM 中占据优势地位^[1],这可能是导致尾水区底栖生物膜 WSOM 中类腐殖质含量较大的主要原因。疏水性有机物主要由大分子类腐殖质组成,而亲水性有机物主要由低分子量的多糖、蛋白质和氨基酸组成^[15],因此尽管生物膜 WSOM 的疏水性在下降,仍以高疏水性、高分子量的类腐殖质物质为主。斯皮尔曼相关性分析的结果显示 $SUVA_{280}$ 与 C3 组分呈显著正相关($R^2 = 0.97, P < 0.01$)。色氨酸类蛋白本身具备良好的芳香性质,且芳香结构稳定性较高,因此 C3 组分在底栖生物膜 WSOM 中占比稳定。DOC 与 S_R 、 E_{254}/E_{204} 和 $a_{(355)}$ 之间存在显著的正相关关系($R^2 > 0.8, P < 0.05$), S_R 与 E_{254}/E_{204} 和 $a_{(355)}$ 也存在显著的正相关关系($R^2 > 0.8, P < 0.05$),说明生物膜 WSOM 的组成可能受到不同性质有机质的影响,同时不同性质的有机质之间可能存在相互作用^[35],具体的作用方式需开展进一步研究。

2.2 生物膜细菌群落特征

基于 16S rRNA 的测序结果,在 18 个样品中共得到 7 852 个 ASVs。使用 QIIME2 对每个样品中的所有 ASVs 进行物种注释,发现污染源头区和污染下游区的样品相较于上游区共增加了 23 门、49 纲、89 目、107 科和 173 属。所有样品共发现 59 个门分类水平上的细菌群落。变形菌门(Proteobacteria)为绝对的优势菌门,占总细菌序列的 33.64%,其次为拟杆菌门(Bacteroidota, 10.01%)、酸杆菌门(Acidobacteriota, 8.79%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 6.14%)和粘球菌门(Myxococcota, 5.50%)。不同采样点位处细菌菌门的相对丰度存在差异[图 4(a)]。变形菌门(Proteobacteria)和疣微菌门(Verrucomicrobiota)在尾水区的相对丰度占比较大。变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)和酸杆菌门(Acidobacteriota)是河流沉积物环境中的优势菌群,也是河流氮、碳循环过程的重要参与者^[36]。变形菌门(Proteobacteria)的分布受到河流中脂类和腐殖质类 DOM 的影响。拟杆菌门(Bacteroidota)具有分解纤维素、淀粉多糖和碳水化



(a)WSOM 和 CWSOM 的浓度沿程变化,(b)紫外可见光谱特征参数沿程变化,(c)各荧光组分荧光强度相对丰度

图2 尾水区底栖生物膜 WSOM 光谱分析

Fig. 2 Spectroscopic analysis of WSOM in benthic biofilms

合物的功能,能使复杂化合物和不稳定有机质发生再矿化作用.疣微菌门(Verrucomicrobiota)也与类腐殖质物质的降解密切相关,常参与河湖水体中N-乙酰氨基葡萄糖(NAG)的降解^[37,38].尾水区底栖生物膜细菌群落的优势菌群相对稳定,为其参与河流的生物地球化学循环提供了良好的条件.

底栖生物膜细菌群落的α多样性指数如表3所示. Coverage 指数都在0.999以上,说明测序结果能够很好反映研究区域细菌群落的真实情况. Shannon 指数综合反映了细菌群落的丰富度及均匀度,其数值可以反映物种的多样性;Pielou指数则展

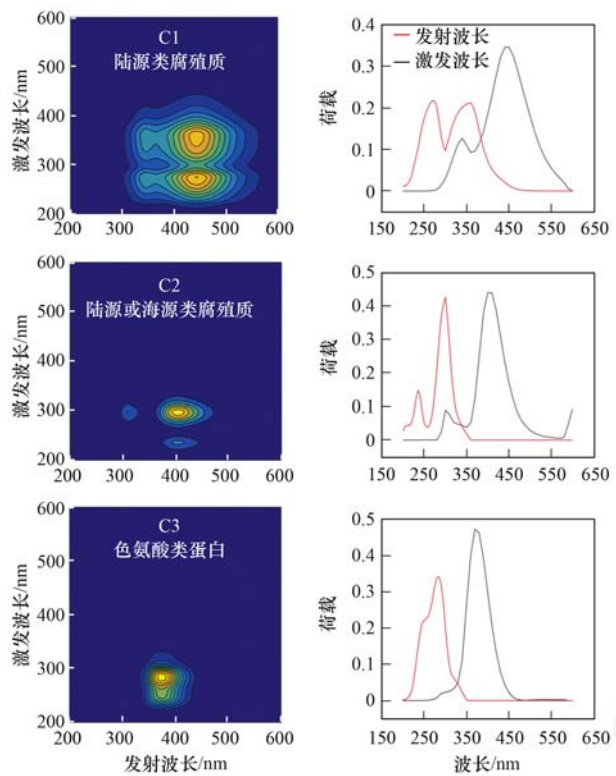


图3 PARAFAC 识别出的3种荧光组分及其激发与发射荷载

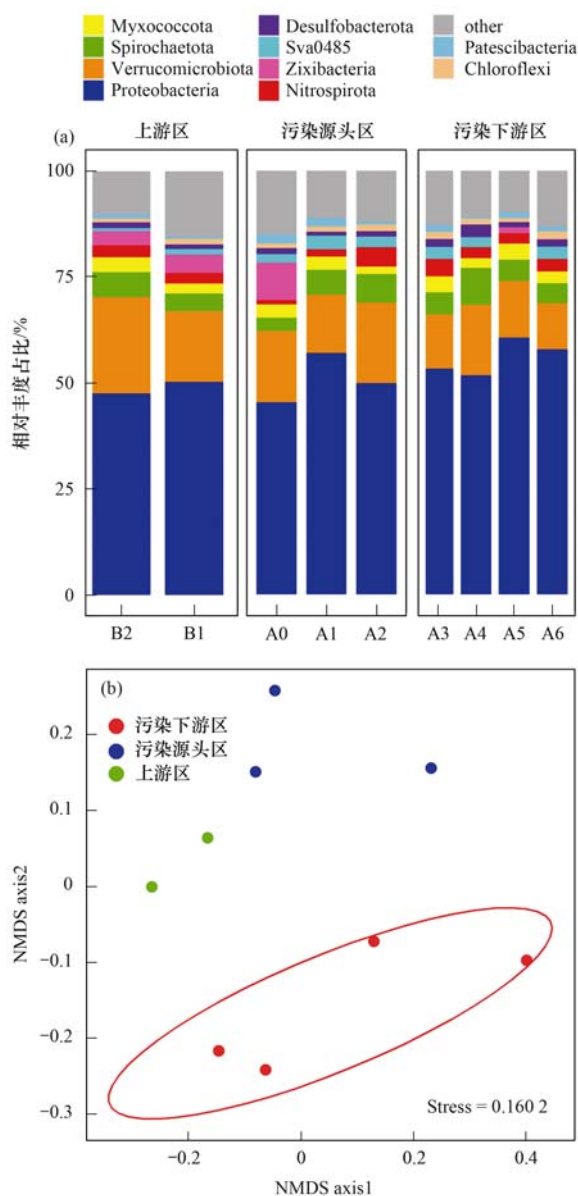
Fig. 3 Three main fluorescent components and their excitation and emission loadings determined via PARAFAC analysis

示了细菌群落的均匀度变化情况. Shannon 指数的范围在7.93~8.46之间,在尾水区呈现:污染下游区>污染源头区>上游区的变化趋势,说明底栖生物膜细菌群落多样性在尾水区沿程增加,这与Drury等^[39]的研究结论相悖.尾水排放对受纳水体的影响可能存在两面性,Drury等^[39]的研究中大流量的尾水排放及沿线多氯联苯(PCBs)和多环芳烃(PAHs)等有毒物质的人为输入是导致其底栖细菌群落多样性下降的主要原因.而在本研究中,尾水来自处理生活污水的中型污水厂,营养物含量较高且有毒物质较少,为生物膜细菌群落提供了更加适宜的生存环境,促进其生长与繁殖. Pielou 指数在污染源头区和污染下游区高于上游区,说明受尾水排放影响的区域底栖生物膜细菌群落组成更加均匀,多样性及均匀度的增加使尾水受纳区生物膜细菌群落的结构更加稳定^[15]. Perujo等^[40]的研究也发现污水厂下游的生物膜细菌群落能适应尾水排放的环境压力并有效利用输入的外源有机质.

表3 底栖生物膜细菌群落α多样性指数

Table 3 The α diversity of bacterial community in benthic biofilms

指数	B2	B1	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Shannon	7.93	8.06	7.93	8.25	8.37	8.33	8.46	8.28	8.31
Pielou	0.88	0.89	0.91	0.93	0.92	0.93	0.92	0.94	0.92
Coverage	0.999 5	0.999 7	0.999 9	0.999 6	0.999 4	0.999 6	0.999 8	0.999 8	0.999 6



(a) 生物膜细菌群落门水平相对丰度堆积;

(b) 基于 Bray-Curtis 距离的 NMDS 排序

图 4 尾水区底栖生物膜细菌群落多样性分析

Fig. 4 Analysis of bacterial community diversity in benthic biofilms

使用非度量多维尺度分析研究尾水区不同区域底栖生物膜细菌群落的差异,发现同组的样品之间出现一定的聚集趋势,细菌群落结构相似,而不同组的样品之间则存在较大的距离[图 4(b)].尾水区中不同区域的底栖生物膜细菌群落受尾水排放的影响不同,有形成各自独特的群落结构的趋势.但是经 ANOSIM 检验后发现不同区域的细菌群落之间无显著差异($R=0.23$, $P=0.88$).细菌群落的差异通常体现在大范围或长时间的取样^[41],本研究中细菌群落未能形成差异可能主要归因于尾水区采样区域受限.

2.3 生物膜细菌群落与 WSOM 关系研究

2.3.1 生物膜 WSOM 对生物膜细菌群落变化的贡献

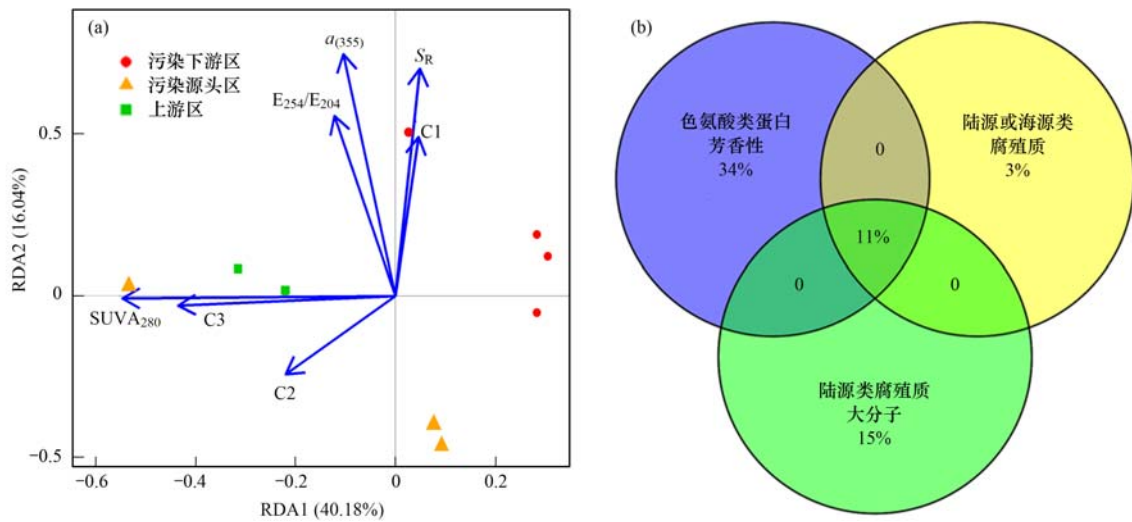
使用去趋势对应分析(DCA)对生物膜细菌群

落变化及环境因素进行检验,结果显示最大梯度长度 <3 ,因此选择 RDA 对环境因子与细菌群落变化之间的相关性做进一步地研究.将生物膜 WSOM 特征参数及荧光组分作为环境因子进行冗余分析[图 5(a)],RDA 第一轴和第二轴分别能够为细菌群落的变化提供 40.18% 和 16.04% 的解释度. C3 组分与 $SUVA_{280}$ 、C1 组分和 S_R 关系密切,说明色氨酸类蛋白芳香性较强,而类腐殖质则以大分子物质为主,这与前文中叙述的荧光组分所具有的光谱性质结论相同. RDA 结果表明 CWSOM [$a_{(355)}$]、芳香性($SUVA_{280}$)和分子量(S_R)是影响尾水区底栖生物膜细菌群落变化的 3 个主要因素[图 5(a)].为了进一步探索何种 WSOM 在影响生物膜细菌群落变化上起主导作用,使用 VPA 分析探究大分子类腐殖质、陆源或海源类腐殖质和芳香性色氨酸类蛋白这 3 类 WSOM 对生物膜细菌群落组成变化的贡献度.结果显示芳香性色氨酸类蛋白对细菌群落的变化贡献度最大[图 5(b)],达到 34%,其次是大分子类腐殖质(15%)和陆源或海源类腐殖质(3%),三者相互作用下对细菌群落的贡献度为 11%.综上所述,在尾水受纳河流中,不同性质的生物膜 WSOM 是驱动生物膜细菌群落组成发生变化的关键因素.

以往的研究常关注于浮游细菌结构与 DOM 特性之间的关联,群落结构的变化通常取决于对外源 DOM 的利用效率和浮游细菌自身的降解能力^[16].Wear 等^[42]研究了美国黑水河口湾中 DOM 性质,发现生物利用度、光谱斜率、分子组成和来源等因素可以显著影响水中细菌群落组成. Zhang 等^[13]的研究发现太湖全湖区陆源腐殖质和色氨酸在时间水平上与细菌群落的变化显著相关. Melo 等^[14]的研究报道了亚马逊河漫滩的洪水能够调节 DOM 的来源与芳香性,进而在 DOM 性质与细菌群落组成之间构建紧密的联系.生物膜内部的细菌具有更多的胞外酶和更适宜的物质吸收环境,同时生物膜基质还为细菌对有机质的吸收利用提供了良好的载体^[7,12].尽管腐殖质是生物膜有机质的主要成分,但其生物可利用性差,不易被细菌使用,因而对群落变化的贡献度低于更易于被微生物分解使用的色氨酸类蛋白^[14].在河流生态系统中,微生物在对类蛋白质物质的分解利用的同时也产生腐殖质类物质^[18],故生物膜细菌群落与 WSOM 的组成处于一个动态变化之中.细菌群落组成会对有机质组分的变化做出反馈,能够适应且高效利用外来有机质的细菌群落将成为尾水区底栖生物膜细菌中的优势群体.

2.3.2 生物膜 WSOM 与细菌群落的共现网络分析

基于斯皮尔曼相关系数构建 ASVs 和 WSOM 组



(a) WSOM 与细菌群落变化的冗余分析, (b) WSOM 对细菌群落变化的方差分解分析

图 5 细菌群落变化的冗余分析与方差分解分析

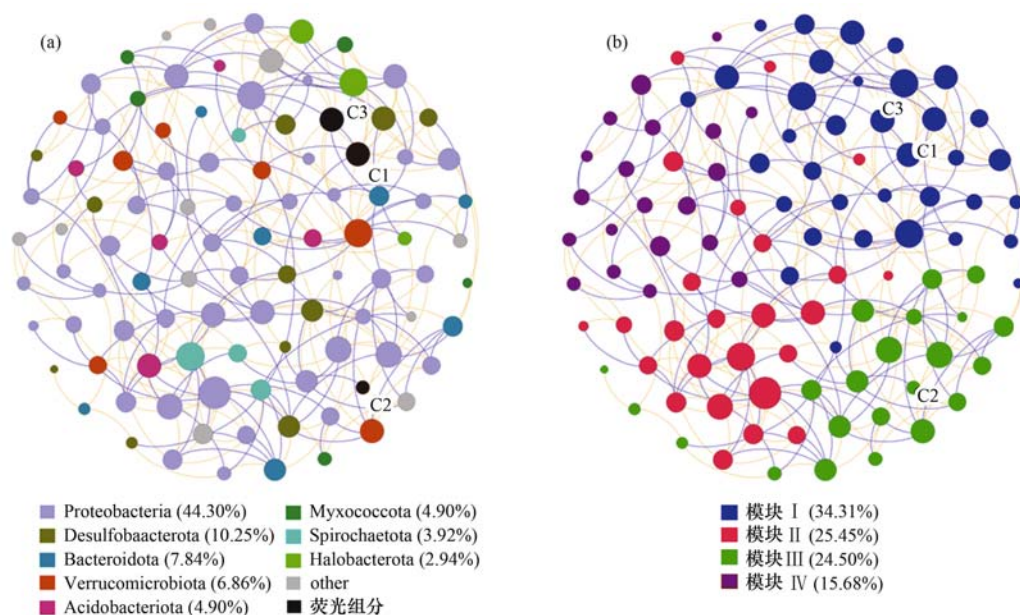
Fig. 5 Redundancy analysis and variance decomposition analysis of bacterial community changes

分的共现网络以进一步探究细菌群落与 WSOM 之间的深层联系. 筛选显著相关的边 ($R^2 > 0.6$, $P < 0.05$) 构建共现网络, 网络中共有 102 个节点和 304 条边, 其中正负相关的边占比相当 (53.6% 和 46.3%), 说明细菌群落内部及其与 WSOM 组分之间存在复杂的相互关系. 网络中的优势菌门为 Proteobacteria (44.3%)、Desulfobacterota (10.3%)、Bacteroidota (7.8%) 和 Verrucomicrobiota (6.9%). 将网络进行模块化处理后, 共形成 4 个模块, 模块化度为 0.51, 大于 0.4, 表明网络具有良好的模块化结构. 网络中形成的 4 个模块占比分别为 34.3%、25.5%、24.5% 和 15.7%, 每个模块中包含了不同的 ASVs 和 WSOM, C2 组分属于模块 I, 与 Proteobacteria、Bacteroidota、Spirochaetota 和 Desulfobacterota 关系密切; 模块 III 则聚集了 Proteobacteria、Bacteroidota、Verrucomicrobiota、Halobacterota、Desulfobacterota、类腐殖质组分 C1 与色氨酸类蛋白 C3.

Proteobacteria 广泛分布于各个模块[图 6(a)], 他们参与包括类腐殖质、类色氨酸在内的有机质的降解与生成. 研究证明 Proteobacteria 在水环境的有机碳代谢过程中发挥重要作用^[27]. 类腐殖质组分的降解或生成主要与 Proteobacteria、Desulfobacterota 和 Halobacterota 相关, 而 Proteobacteria、Bacteroidota 和 Halobacterota 则主要参与色氨酸类蛋白的新陈代谢[图 6(b)]. 大量研究已经证实 Proteobacteria 中的 α -Proteobacteria、 β -Proteobacteria、 γ -Proteobacteria 和 Bacteroidota、Verrucomicrobiota 与类腐殖质组分的降解或生成密切相关, Bacteroidota、 γ -Proteobacteria、Firmicutes 和

Actinobacteria 则主要参与色氨酸类物质的生消过程^[18,43]. 值得注意的是, 除 Proteobacteria 外, Halobacterota 也与 3 种荧光组分联系紧密. Halobacterota 是一种产甲烷古菌, 相较于其他常见的产甲烷菌门(如 Euryarchaeota 等)具有更多样化的底物摄取范围, 可利用如甲氧基芳香族化合物等外来底物, 是控制尾水区甲烷产生的关键环节, 在尾水区河流的碳循环过程中扮演重要角色^[44]. 共现网络展现了细菌群落之间复杂的相互关系, 生物膜 WSOM 是生物膜有机质中的最活跃部分, 其分布和动态变化与微生物的代谢物密切相关^[45]. Proteobacteria 和 Halobacterota 通过参与河流碳循环过程, 构建细菌群落与 WSOM 组分之间的紧密联系.

从属水平上看, 模块 II 中与 C1 和 C3 组分显著相关的 *Methanoregula* 属于 Halobacterota, 是已知的能参与直接种间电子转移的产甲烷古菌之一, 它能直接接收电子并将 CO_2 还原为 CH_4 , 参与河流碳循环过程^[46]. 模块 II 中的 *MNDI* 和 *Arenimonas* 都属于 Proteobacteria, *MNDI* 在土壤、地表水和地下水生态系统中都曾被高频率检出, 具有在好氧、厌氧等环境下进行多种物质代谢的功能^[47]; *Arenimonas* 能快速分解易降解有机物, 是一种生长速度较快的富营养指示菌^[48], 它们都能够更加适应尾水区的复杂环境条件, 在河流生态系统的生物地球化学循环过程中发挥重要作用. 共现网络分析证实尾水区底栖生物膜细菌群落与 WSOM 的组成将以动态变化的模式应对尾水中复杂不确定成分的冲击, 这种动态变化同样揭示了尾水排放对受纳水体造成的生态影响.



(a) 门水平细菌, (b) 不同类型的模块; 蓝色表示负相关, 橙色表示正相关; 节点大小与连接度成正比; 节点分别以门水平细菌与模块着色

图 6 生物膜中荧光组分和细菌 ASVs 基于斯皮尔曼相关系数构建的共现网络

Fig. 6 Co-occurrence network analysis between ASVs and three fluorescence components base on Spearman's correlation analysis

3 结论

(1) 尾水区底栖生物膜 WSOM 以大分子的类腐殖质为主, 芳香性色氨酸类蛋白在底栖生物膜 WSOM 中含量稳定, 不同性质的有机质可能影响底栖生物膜 WSOM 的组成。

(2) 受尾水排放影响的底栖生物膜细菌群落多样性和均匀度较高, 群落结构更加稳定。CWSOM、有机质芳香性和分子量是影响尾水区底栖生物膜细菌群落变化的主要因素, 其中芳香性色氨酸蛋白对细菌群落变化的解释度最高(34%)。

(3) 共现网络揭示生物膜细菌群落之间复杂的相互关系, Proteobacteria 和 Halobacterota 通过河流碳循环参与生物膜 WSOM 的新陈代谢, 构建起细菌群落与 WSOM 组分之间的紧密联系, 这种动态变化使底栖生物膜具有作为尾水区生态变化指示标志的潜力。

参考文献:

[1] Kamjunke N, Hertkorn N, Harir M, *et al.* Molecular change of dissolved organic matter and patterns of bacterial activity in a stream along a land-use gradient [J]. *Water Research*, 2019, **164**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114919.

[2] 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 等. 生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 809-814.

Zhao Z R, Zhang J Y, Li D, *et al.* Purification characteristics of urban tail water from sewage treatment plant by biofilm ecological floating bed [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 809-814.

[3] 杨钊, 李江, 张圣虎, 等. 贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3249-3256.

Yang Z, Li J, Zhang S H, *et al.* Pollution level and ecological risk of typical antibiotics in Guiyang wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3249-3256.

[4] Jiang L, Wu A Q, Fang D X, *et al.* Denitrification performance and microbial diversity using starch-polycaprolactone blends as external solid carbon source and biofilm carriers for advanced treatment [J]. *Chemosphere*, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126901.

[5] Rodríguez-Castillo T, Barquín J, Álvarez-Cabria M, *et al.* Effects of sewage effluents and seasonal changes on the metabolism of three Atlantic rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 1108-1118.

[6] Ribeiro R X, da Silva Brito R, Pereira A C, *et al.* Ecotoxicological assessment of effluents from Brazilian wastewater treatment plants using zebrafish embryotoxicity test: a multi-biomarker approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **735**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139036.

[7] Battin T J, Besemer K, Bengtsson M M, *et al.* The ecology and biogeochemistry of stream biofilms [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2016, **14**(4): 251-263.

[8] Pu Y, Ngan W Y, Yao Y, *et al.* Could benthic biofilm analyses be used as a reliable proxy for freshwater environmental health? [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 440-449.

[9] Hobbs W O, Collyard S A, Larson C, *et al.* Toxic burdens of freshwater biofilms and use as a source tracking tool in rivers and streams [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(19): 11102-11111.

[10] Chantigny M H, Harrison-Kirk T, Curtin D, *et al.* Temperature and duration of extraction affect the biochemical composition of soil water-extractable organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 161-166.

[11] Huang M K, Chai L W, Jiang D J, *et al.* Spatial patterns of soil fungal communities are driven by dissolved organic matter (DOM) quality in Semi-Arid regions [J]. *Microbial Ecology*, 2020, doi: 10.1007/s00248-020-01509-6.

[12] Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, *et al.* Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen

- deposition[J]. *Ecology*, 2000, **81**(9): 2359-2365.
- [13] Zhang W, Zhou Y Q, Jeppesen E, *et al.* Linking heterotrophic bacterioplankton community composition to the optical dynamics of dissolved organic matter in a large eutrophic Chinese lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **679**: 136-147.
- [14] de Melo M L, Kothawala D N, Bertilsson S, *et al.* Linking dissolved organic matter composition and bacterioplankton communities in an Amazon floodplain system[J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, **65**(1): 63-76.
- [15] Yu M D, Liu S J, Li G W, *et al.* Municipal wastewater effluent influences dissolved organic matter quality and microbial community composition in an urbanized stream[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135952.
- [16] Qiu L L, Cui H Y, Wu J Q, *et al.* Snowmelt-driven changes in dissolved organic matter and bacterioplankton communities in the Heilongjiang watershed of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **556**: 242-251.
- [17] Ávila M P, Brandão L P M, Brighenti L S, *et al.* Linking shifts in bacterial community with changes in dissolved organic matter pool in a tropical lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **672**: 990-1003.
- [18] Zhang L, Fang W K, Li X C, *et al.* Linking bacterial community shifts with changes in the dissolved organic matter pool in a eutrophic lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137387.
- [19] Biggs B J F, Kilroy C. Stream periphyton monitoring manual [M]. Christchurch, New Zealand: New Zealand Ministry for the Environment, 2000.
- [20] 王齐磊, 江韬, 赵铮, 等. 三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 879-887.
- Wang Q L, Jiang T, Zhao Z, *et al.* Ultraviolet-visible (UV-Vis) and fluorescence spectral characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) in typical agricultural watershed of three gorges reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 879-887.
- [21] 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 等. 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5318-5329.
- Liu Y Y, Sun H, Liu C, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in natural rivers of western Sichuan plateau[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5318-5329.
- [22] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 基于 UV-vis 和 EEMs 解析白洋淀冬季冰封期间隙水 DOM 的光谱特征及来源[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(2): 604-614.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spectral characteristics and sources of DOM in sediment interstitial water from Baiyangdian Lake in Xiong'an new area during the winter freezing period based on UV-vis and EEMs[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 604-614.
- [23] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, **478**(7367): 49-56.
- [24] Brezonik P L, Olmanson L G, Finlay J C, *et al.* Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **157**: 199-215.
- [25] Spencer R G M, Aiken G R, Butler K D, *et al.* Utilizing chromophoric dissolved organic matter measurements to derive export and reactivity of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean: a case study of the Yukon River, Alaska[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(6): L06401.
- [26] Zhu W Z, Zhang H H, Zhang J, *et al.* Seasonal variation in chromophoric dissolved organic matter and relationships among fluorescent components, absorption coefficients and dissolved organic carbon in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, **180**: 9-23.
- [27] Meng Y J, Wang M M, Guo B, *et al.* Characterization and C-, N-disinfection byproduct formation of dissolved organic matter in MBR and anaerobic-anoxic-oxic (AAO) processes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **315**: 243-250.
- [28] Park M H, Lee T H, Lee B M, *et al.* Spectroscopic and chromatographic characterization of wastewater organic matter from a biological treatment plant[J]. *Sensors*, 2010, **10**(1): 254-265.
- [29] Brogi S R, Balestra C, Casotti R, *et al.* Time resolved data unveils the complex DOM dynamics in a Mediterranean river[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **733**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139212.
- [30] Osburn C L, Wigdahl C R, Fritz S C, *et al.* Dissolved organic matter composition and photoreactivity in prairie lakes of the U. S. Great Plains[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, **56**(6): 2371-2390.
- [31] Kowalczyk P, Tilstone G H, Zabłocka M, *et al.* Composition of dissolved organic matter along an Atlantic Meridional Transect from fluorescence spectroscopy and Parallel Factor Analysis[J]. *Marine Chemistry*, 2013, **157**: 170-184.
- [32] Brogi S R, Jung J Y, Ha S Y, *et al.* Seasonal differences in dissolved organic matter properties and sources in an Arctic fjord: implications for future conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133740.
- [33] Zito P, Podgorski D C, Johnson J, *et al.* Molecular-level composition and acute toxicity of photosolubilized petrogenic carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(14): 8235-8243.
- [34] Li J C, Wang L Y, Geng J J, *et al.* Distribution and removal of fluorescent dissolved organic matter in 15 municipal wastewater treatment plants in China[J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126375.
- [35] Zhou Y Q, Li Y, Yao X L, *et al.* Response of chromophoric dissolved organic matter dynamics to tidal oscillations and anthropogenic disturbances in a large subtropical estuary [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **662**: 769-778.
- [36] Guo X P, Yang Y, Niu Z S, *et al.* Characteristics of microbial community indicate anthropogenic impact on the sediments along the Yangtze Estuary and its coastal area, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 306-314.
- [37] Li Y, Xu C, Zhang W L, *et al.* Response of bacterial community in composition and function to the various DOM at river confluences in the urban area[J]. *Water Research*, 2020, **169**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115293.
- [38] Tada Y, Grossart H P. Community shifts of actively growing lake bacteria after *N*-acetyl-glucosamine addition: improving the BrdU-FACS method[J]. *The ISME Journal*, 2014, **8**(2): 441-454.
- [39] Drury B, Rosi-Marshall E, Kelly J J. Wastewater treatment effluent reduces the abundance and diversity of benthic bacterial communities in urban and suburban rivers [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(6): 1897-1905.
- [40] Perujo N, Freixa A, Vivas Z, *et al.* Fluvial biofilms from upper

- and lower river reaches respond differently to wastewater treatment plant inputs[J]. *Hydrobiologia*, 2016, **765**(1): 169-183.
- [41] Huo Y, Bai Y H, Qu J H. Unravelling riverine microbial communities under wastewater treatment plant effluent discharge in large urban areas [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, **101**(17): 6755-6764.
- [42] Wear E K, Koepfler E T, Smith E M. Spatiotemporal variability in dissolved organic matter composition is more strongly related to bacterioplankton community composition than to metabolic capability in a blackwater estuarine system [J]. *Estuaries and Coasts*, 2014, **37**(1): 119-133.
- [43] Zhou L, Zhou Y Q, Hu Y, *et al.* Microbial production and consumption of dissolved organic matter in glacial ecosystems on the Tibetan Plateau[J]. *Water Research*, 2019, **160**: 18-28.
- [44] Lyu Z, Shao N N, Akinyemi T, *et al.* Methanogenesis [J]. *Current Biology*, 2018, **28**(13): R727-R732.
- [45] Lee Y K, Lee M H, Hur J. A new molecular weight (MW) descriptor of dissolved organic matter to represent the MW-dependent distribution of aromatic condensation: insights from biodegradation and pyrene binding experiments [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 169-176.
- [46] Li Y Q, Ma C J, Ma J F, *et al.* Promoting potential direct interspecies electron transfer (DIET) and methanogenesis with nitrogen and zinc doped carbon quantum dots [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **410**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124886.
- [47] Spain A M, Krumholz L R, Elshahed M S. Abundance, composition, diversity and novelty of soil *Proteobacteria* [J]. *The ISME Journal*, 2009, **3**(8): 992-1000.
- [48] Li X Z, Rui J P, Mao Y J, *et al.* Dynamics of the bacterial community structure in the rhizosphere of a maize cultivar [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **68**: 392-401.

《环境科学》连续 9 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2020 年 12 月 17 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2020 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2020 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 9 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)