

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM_{2.5} 分布影响因素及交互效应 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣改性剂对城市污泥重金属稳定化 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 陈莹, 刘汉燧, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入响应

居琪¹, 章奇^{1,2}, 曹驰程¹, 白雷雷³, 张晖^{1*}

(1. 东南大学公共卫生学院, 环境医学工程教育部重点实验室, 南京 210009; 2. 湖州市疾病预防控制中心, 湖州 313000; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 全球气候变化和蓝藻水华暴发造成湖泊生源、陆源天然有机质(NOM)输入显著增加,以太湖藻型湖湾为例,考察沉积物中微生物群落的活性、组成及功能对不同浓度藻源有机质(POM)和陆源腐殖酸(HA)的响应特征。三维荧光分析显示POM化学多样性较高,包含易降解的类蛋白(50%)和难降解的类腐殖质组分(50%),而类腐殖质占HA荧光组分的97%。两个月的微宇宙实验表明,对于同种NOM,沉积物中微生物矿化作用随NOM浓度升高而增强;但POM组中有机碳去除量显著高于同等浓度的HA组。胞外聚合物分析显示NOM输入有利于微生物分泌蛋白质和多糖,提高了微生物群落的聚集度和稳定性;酶活分析表明POM对脲酶、脱氢酶等有机物代谢酶的激发效应强于HA,形成了代谢更活跃的微生物群落。同时,NOM输入(尤其是POM)提高了微生物群落的物种多样性,增加了Proteobacteria和Bacteroidetes等参与有机物分解的菌群丰度,上调了与代谢相关的KEGG功能基因丰度。以上结果表明湖泊沉积物中微生物群落的活性和功能与NOM的来源和浓度有关。

关键词: 天然有机质(NOM); 蓝藻水华; 沉积物; 微生物群落; 代谢活性

中图分类号: X172; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3263-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.202011205

Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments

JU Qi¹, ZHANG Qi^{1,2}, CAO Chi-cheng¹, BAI Lei-lei³, ZHANG Hui^{1*}

(1. Key Laboratory of Environmental Medicine Engineering, Ministry of Education, School of Public Health, Southeast University, Nanjing 210009, China; 2. Center for Disease Control and Prevention of Huzhou, Huzhou 313000, China; 3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Increased loads of biogenic and terrestrial natural organic matter into freshwater lakes are projected to be a major consequence of global climate change and cyanobacterial blooms. In this study, the effects of phytoplankton-derived organic matter (POM) and terrestrial humic acid (HA) on the activity, composition, and function of the microbial community in Lake Taihu sediments were investigated. Fluorescent spectra demonstrated that POM with high chemodiversity was composed of labile protein-like components (50%) and recalcitrant humic-like components (50%), while humic-like substances accounted for 97% of HA. Over two-month periods, the organic carbon mineralization in sediments was enhanced owing to increasing NOM concentrations; however, the carbon consumption in POM-amended sediments was significantly higher than that in sediments amended with the same concentrations of HA. Analysis of extracellular polymeric substances indicated that NOM input improved the microbial secretion of proteins and polysaccharides, increasing the aggregation and stability of the microbial community. The amendment of POM also stimulated the activity of organic matter metabolic enzymes, promoting microbial activity. Moreover, 16S rRNA gene sequencing suggested that the mineralization of NOM (especially POM) increased the diversity of the microbial community, favored the survival of Proteobacteria and Bacteroidetes, and upregulated the function genes of organic matter metabolism. These results suggest that the composition and function of microbial community in sediments were associated with the origin, composition, and concentration of NOM input.

Key words: natural organic matter(NOM); cyanobacterial bloom; sediments; microbial community; metabolic activity

沉积物是湖泊生态系统中各种物质富集和储存的载体,沉积物中的物质循环和能量流动由微生物驱动,与群落组成和代谢功能密切相关^[1]。微生物将可利用有机质分解为无机营养释放至水体中,对湖泊中碳、氮、硫等元素的生物地球化学循环过程具有重要作用^[1]。微生物对湖泊环境的变化具有高度敏感性并且能够快速做出反应,表现为微生物群落结构、功能上的改变^[2]。有研究发现,新鲜有机质的输入可刺激微生物代谢活性,影响微生物群落的结构及功能,从而影响整个生态系统的稳定^[3]。

天然有机质(natural organic matter, NOM)是湖泊环境中异养微生物最重要的生长基质和能量来源,按其来源可分为生源NOM和陆源NOM。其中陆源NOM一般以腐殖质为主,而生源NOM富含蛋白质、氨基酸以及糖类等高生物活性物质^[4]。近年来,

收稿日期: 2020-11-23; 修订日期: 2021-01-08

基金项目: 江苏高等教育质量保障与评价2020项目; 东南大学教学研究项目(2019-129)

作者简介: 居琪(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染控制, E-mail: juqi_juqi@163.com

* 通信作者, E-mail: 13851553232@163.com

随气候变化和富营养化加剧,全球范围内淡水湖泊频繁暴发蓝藻水华,蓝藻残体沉降和分解释放大量的生源性物质进入沉积物^[5].这些生源 NOM 一方面可以为微生物生长代谢提供丰富碳源,提高微生物分解活性;另一方面也可激发沉积物有机碳的再矿化,减少碳固存^[3].因此,生源、陆源 NOM 的动态输入可能会对沉积物中微生物群落产生不同的影响.Li 等^[6]的研究发现藻类有机物和腐殖质输入提高了水生环境中微生物群落的生产力及适应性,且以藻类有机物为生长基质的微生物群落代谢活性更强.然而,目前关于有机质输入引起的微生物群落代谢活性变化的研究主要集中在海洋和沿海沉积物中^[3,7],而湖泊生态体系中不同来源的有机质对沉积物微生物群落代谢活性、结构及功能的影响研究较少.

太湖作为中国典型富营养化淡水湖泊,近二十年来频繁发生以铜绿微囊藻为主的蓝藻水华现象^[8].本文以太湖藻型湖湾为研究对象,分别以藻源有机质(phytoplankton-derived dissolved organic matter, POM)和腐殖酸(humic acid, HA)为典型生源、陆源 NOM,比较两种 NOM 输入对沉积物中微生物矿化作用、胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)分泌和分解酶活性等微生物群落代谢活性的影响,以及微生物群落组成和结构功能的变化.本研究有助于加深理解 NOM 输入,特别是蓝藻水华产生的 NOM 对湖泊生态系统稳定性的影响.

1 材料与方 法

1.1 样品采集及制备

2019 年 7 月在太湖藻型湖湾(梅梁湾)用柱状采样器采集 3 份表层沉积物(0~15 cm)混匀,过 2 mm 筛去除碎石、贝类等大颗粒物.在相同点位采集铜绿微囊藻和表层湖水,将蓝藻冻干后称取 1 g 加入到 1 L 过滤湖水(0.7 μm)中,室温下避光振荡 5 d 以模拟 POM 释放,然后将混合液离心、过滤,冻干滤液得到 POM.将 1 g 标准 HA(sigma-aldrich)溶解到 0.01 mol·L⁻¹ 氢氧化钠溶液中,调整 pH 值至 7.0,过滤后冻干滤液得到 HA.

1.2 NOM 输入模拟实验

称取 10 g 新鲜沉积物(干重)到 250 mL 培养瓶中,添加适量 NOM 充分混匀.根据 NOM 种类和添加量设置 4 个实验组和 1 个对照组:① 1 mg·g⁻¹ (以 C 计,下同) POM (POM₁ 组),② 3 mg·g⁻¹ 的 POM (POM₃ 组),③ 1 mg·g⁻¹ 的 HA (HA₁ 组),④ 3 mg·g⁻¹ 的 HA (HA₃ 组),⑤ 不添加 NOM 的对照组

(N 组).NOM 添加量分别占沉积物原始总有机碳(total organic carbon, TOC)含量的 15% 和 40%,这与已有报道的太湖沉积物中生源 NOM 平均占 34% 相近^[9].用通气橡胶塞封住瓶口,25℃ 条件下避光培养.分别在第 30 和 60d 进行破坏性取样,一部分样品直接用于 EPS、酶活分析;一部分样品经冻干后用于 TOC 分析及 DNA 提取.每个处理组设置两个培养瓶,每瓶取两个平行样,共计 4 个平行样.

1.3 NOM 表征

采用固体 TOC 分析仪(O. I. Analytical Co, 美国)测定沉积物和 NOM 的 TOC 浓度.为比较 POM 和 HA 的组成结构,分别将 POM 和 HA 溶于水(浓度为 15 mg·L⁻¹),通过 UV-Vis 光谱仪(UV-2550, 岛津)和荧光光谱仪(F-7000, 日立)采集吸收光谱和荧光光谱.吸收光谱的波长为 200~800 nm,间隔 1 nm,狭缝宽度 1 nm,按文献[10]方法计算 SUVA₂₅₄ 和光谱斜率比 S_r.三维荧光光谱(EEM)的激发光源为 700 V 氙灯,激发波长(E_x)和发射波长(E_m)分别为 250 nm~550 nm 和 200 nm~450 nm,增量分别为 1 nm 和 5 nm,扫描速度 2400 nm·min⁻¹,激发和发射狭缝带宽均为 5 nm,以 Milli-Q 水作为空白对照消除拉曼散射影响,同时对瑞利散射效应和内滤效应进行校正,按文献方法计算 BIX 和 FI^[10].使用 MATLAB 的 drEEM 工具箱进行平行因子分析(PARAFAC)^[11],识别荧光因子并计算 F_{max},以其表征荧光组分的浓度.

1.4 酶活、EPS 及 DNA 提取及分析

使用土壤酶活性检测试剂盒(Solarbio 科技公司,北京,中国)分析细胞酶活性,分别采用氯化三苯基四氮唑比色法和二乙酸荧光素(fluorescein diacetate, FDA)比色法测定土壤脱氢酶(dehydrogenase, DHA)和 FDA 水解酶的活性,采用靛酚蓝比色法测定土壤脲酶(urease, UA)活性,采用钨蓝比色法测定土壤中性蛋白酶(neutral protease, NPA)活性.其中,DHA 能够反映微生物的生物量及其对有机物的降解能力^[12],FDA 水解酶能灵敏地反映微生物的代谢活性^[13],UA 与氮循环密切相关,其活性与微生物量呈正相关^[14],NPA 参与胞外蛋白分解,并为微生物提供氮源^[15].

采用离子交换树脂法提取胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)^[16],首先将 2 g 沉积物(湿重)离心 10 min 弃去上清,以消除添加的 NOM 对 EPS 提取的影响^[17],然后悬浮于体积分数为 0.05% 的 NaCl 溶液中,离心后得到胶体态 EPS(colloidal EPS, C-EPS).将剩余沉积物重新溶解于含有 Dowex 50wx8(200~400 目, sigma-aldrich, 密

苏里州,美国)的 NaCl 溶液中,离心得到结合态 EPS (bound EPS, B-EPS). 分别采用改良的 Lowry 法和蒽酮-硫酸法测定 EPS 中蛋白质和多糖的浓度^[17].

采用 PowerSoil DNA 试剂盒 (Mo Bio Laboratories, Carlsbad, CA) 按规定流程提取沉积物样品 DNA, 并使用 515F 和 907R 通用细菌引物对 16S rRNA V4-V5 片段进行 PCR 扩增. PCR 反应条件为: 95°C 预变性 2 min, 95°C 变性 30 s, 55°C 退火 30 s, 72°C 延伸 30 s, 循环 30 次, 最后 72°C 延伸 5 min. 通过琼脂糖凝胶电泳纯化扩增产物, 并由美吉生物公司 (中国上海) 进行 Illumina MiSeq (Illumina, San Diego, USA) 高通量测序. 采用 QIIME 软件对原始 DNA 序列进行质量控制去除低质量序列, 采用 RDP classifier 贝叶斯算法按照 97% 的相似度进行 OTU 分类, 并在门、属水平统计各样品的微生物群落组成. 应用 MOTHUR 软件, 计算 α 多样性 (Shannon 指数). 根据物种丰度信息和 KEGG 数据库 (Kyoto Encyclopedia of Genes and Genome) 进一步预测微生物群落的基因功能.

1.5 统计分析

使用 SPSS 软件 (22.0 版本) 计算平均值和标准差. 采用单因素方差分析 (ANOVA) 检验不同处理组中 TOC 矿化、酶活性、EPS 分泌等差异. $P < 0.05$ 时认为具有显著性. 通过 Spearman 相关性分析微生物群落组成与 NOM 荧光组分的相关性.

2 结果与讨论

2.1 NOM 表征

UV-Vis 和 EEM 是表征 NOM 的组成和结构的

最常用方法. 如图 1(a) 所示, 由于 HA 高度腐殖化, 而 POM 降解历史较短, 新鲜度高, 故 HA 的吸收光谱高于 POM. 同样, HA 的 S_{254} 值 [$15.20 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$] 远高于 POM [$0.23 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$], 意味着 POM 在 254 nm 处主要为无吸收的小分子脂肪族物质, 而 HA 为芳香族化合物^[18]. 光谱斜率比 S_R 与 NOM 分子量通常呈反比, 故 POM 的 S_R 值较低说明蓝藻释放的生源性物质比腐殖质的平均分子量更高, 与前人的研究结果一致^[19]. POM 的 BIX (0.70) 和 FI (2.90) 值均高于 HA (0.35 和 1.43), 与 POM 的生源性一致^[10]. EEM-PARAFAC 分析共得到 5 个荧光组分 (图 2), 其中组分 C1 在 $E_x/E_m = 230(275)/332 \text{ nm}$ 处有两个荧光峰, 对应于类蛋白质 T 峰, 可归为类色氨酸荧光组分; 组分 C2 在 $E_x/E_m = 230(265)/302 \text{ nm}$ 处存在荧光峰, 对应于类蛋白质 B 峰, 可归为类酪氨酸荧光组分; 组分 C3 在 $E_x/E_m = 250(310)/420 \text{ nm}$ 处存在荧光峰, 可表征为藻类、微生物产生的生源性类腐殖质; 组分 C4 在 $E_x/E_m = 265/450 \text{ nm}$ 处中存在荧光峰, 与类腐殖质 A 峰相似, 归为类腐殖酸物质; 组分 C5 在 $E_x/E_m = 270(330)/450 \text{ nm}$ 处存在荧光峰, 与类腐殖质 C 峰相似, 归为类富里酸物质^[20]. 虽然一般认为类腐殖质峰 A 和 C 来自陆源, 但有研究在藻类释放液中发现了类似的荧光峰, 与已有的研究结果一致^[21]. 相较而言, POM 中类蛋白组分 C1 和 C2 约占总荧光组分的 50%, 而 HA 中类腐殖质组分 C3、C4、C5 占总荧光组分的 97% [图 1(b)]. 总体而言, 蓝藻残体释放的有机物成分更为复杂且腐殖度较低, 对沉积物中微生物群落的调控作用可能区别于陆源 NOM.

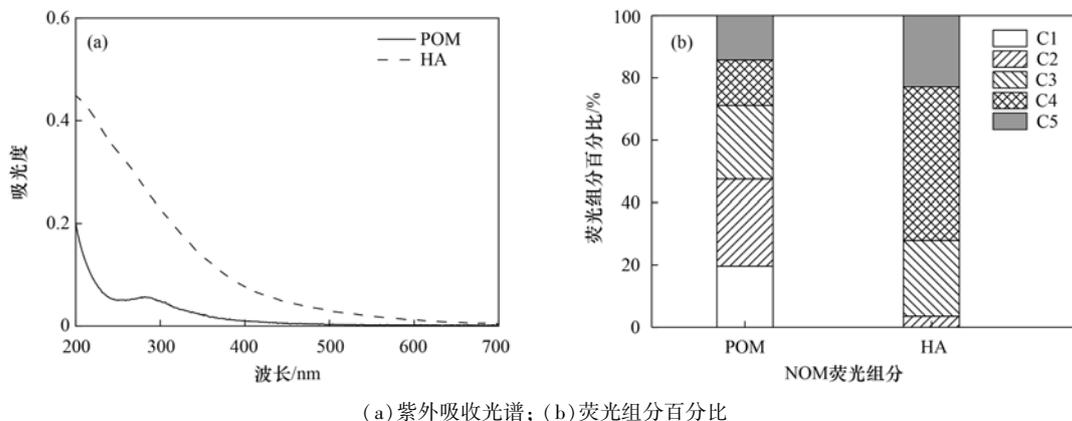


图 1 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ POM 和 HA 的紫外吸收光谱及 EEM-PARAFAC 荧光组分百分比

Fig. 1 UV absorption spectra of POM and HA at $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and the percentage of EEM-PARAFAC fluorescent components

2.2 NOM 输入对微生物群落代谢活性的影响

2.2.1 NOM 输入对有机碳矿化作用的影响

NOM 添加后, 沉积物中 TOC 含量变化如图 3(a) 所示. 与对照相比, 除 HA₁ 组外, 其余处理组

TOC 去除量均显著升高 ($P < 0.05$), 说明 NOM 增强了沉积物中微生物对碳的消耗, 但不同处理组中矿化程度不同. 对于相同 NOM 而言, TOC 去除量随 NOM 浓度升高而升高; 而对于同等浓度的 NOM,

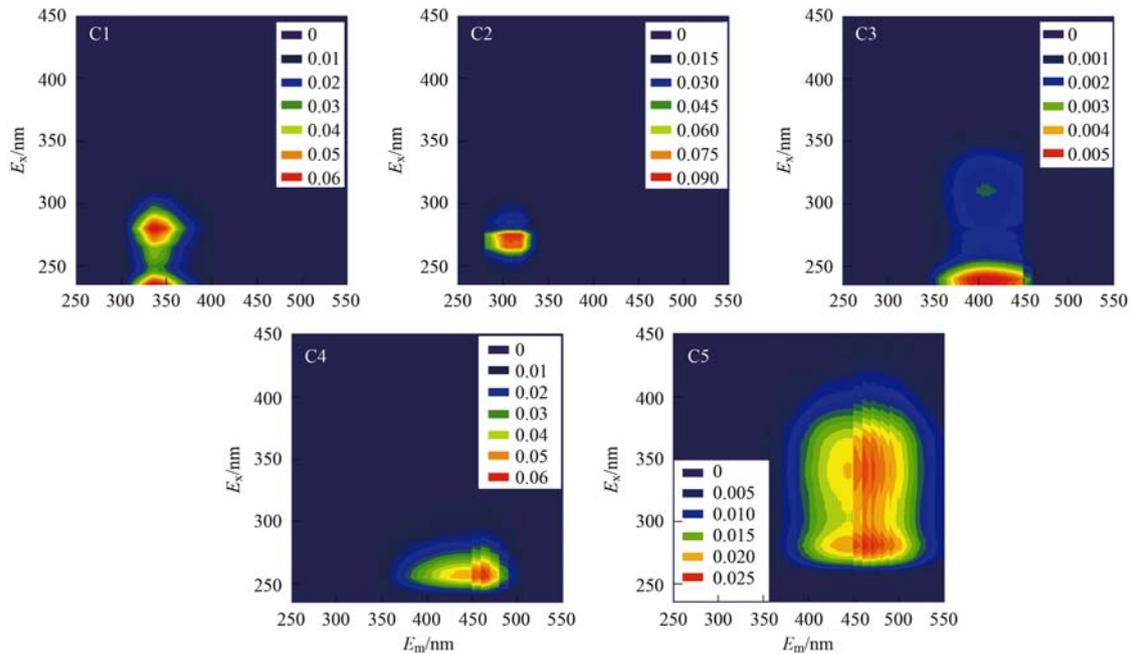


图2 运用 PARAFAC 模型分离的 NOM 荧光组分

Fig. 2 Fluorescent spectra of EEM-PARAFAC POM components in NOM

POM 组中 TOC 去除量显著高于 HA 组. 具体而言, TOC 去除量大小顺序为 POM_3 组 $> HA_3$ 组 $\approx POM_1$ 组 $> HA_1$ 组 $\approx N$ 组, 其中 POM_3 组约为对照组的 3.2 倍, 而添加 $3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ HA 与 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ POM 组中 TOC 去除量相似, 说明 POM 中微生物可分解组分的含量约为 HA 的 3 倍. 进一步分析 NOM 荧光组分的变化[图 3(b)和 3(c)], 对于相同 NOM, 荧光组分的去除率随培养时间而升高, 但随 NOM 浓度升高而降低; 在同等浓度的 NOM 处理组之间, 相同荧光组分的去除结果相似; 组分 C1 和 C2 的去除率显著高于 C3、C4 和 C5. 这表明沉积物中 TOC 矿化主要与 NOM 中类蛋白质组分的分解有关, 而类腐殖质组分的贡献较小. 与类腐殖质相比, 类蛋白组分的生物活性更高, 更易被微生物利用. 有研究表明蓝藻水华区域湖水中类蛋白质组分的生物可利用性高达 77%, 而生源类腐殖质组分的生物可利用性也高于陆源类腐殖质^[22].

2.2.2 NOM 输入对微生物酶活性的影响

NOM 输入后微生物群落中 DHA 活性变化如图 4(a)所示. 培养 30 d 后, 除 HA_3 组外, 各 NOM 处理组中 DHA 活性均显著高于对照组. 其中, 添加 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 POM 和 HA 分别使 DHA 活性从 $0.20 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 增至 $0.76 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.42 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$, 而添加 $3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 POM 促进效果最强. 培养 60 d 后, 各处理组中 DHA 活性均发生不同程度的降低, 但 POM_1 、 POM_3 和 HA_1 组仍显著高于对照组. 如图 4(b)所示, 培养 30 d 后, 添加 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 NOM 对 FDA 活

性的影响较弱, 而 POM_3 和 HA_3 组中 FDA 活性分别是 POM_1 和 HA_1 组的 2.2 倍和 1.8 倍. 培养 60 d 后, 各处理组中 FDA 活性变化较小. UA 活性变化如图 4(c)所示, 培养 30 d 后, UA 活性随 NOM 浓度升高而升高, 且 POM 输入对 UA 活性的促进作用显著高于 HA. 培养 60 d 后, 各处理组 UA 活性接近, 均显著高于对照组. NPA 活性变化趋势与 UA 相似[图 4(d)], $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 POM 和 HA 组中 NPA 活性接近, 而 $3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 POM 组 NPA 活性显著高于 HA 组. 60 天后各组 NPA 活性与对照组无显著差别. 以上结果表明, NOM 可以在短期内提高微生物的酶活性, 且促进作用取决于 NOM 的种类和浓度.

微生物分泌的水解酶类和氧化还原酶类是沉积物中最活跃的有机成分之一, 通过酶促作用广泛参与有机质的分解和矿化^[23]. 因此, 酶活性是反映沉积物中微生物生物量及代谢活性的关键指标. 作为碳代谢过程中关键的氧化还原酶类, DHA 在微生物的呼吸作用中作为中间电子载体将电子和氢转移到最终的电子受体氧^[24]. POM 组中有机碳矿化更为剧烈, 微生物呼吸作用和氧化还原反应更强, 因此 DHA 活性更高. FDA 可被多种非专一性酶类水解生成稳定的荧光素, 是表征环境中微生物活性的重要生物学指标^[13]. NOM 输入后 FDA 活性升高, 表明 NOM 增强了微生物群落的代谢活性, 特别是 POM_3 组中 (FDA 活性最高) 微生物群落最为活跃. NOM 中丰富的含氮化合物 (如蛋白质、肽和氨基酸) 是细菌的有效氮源, 故参与氮转化的 UA 活性升高. 同

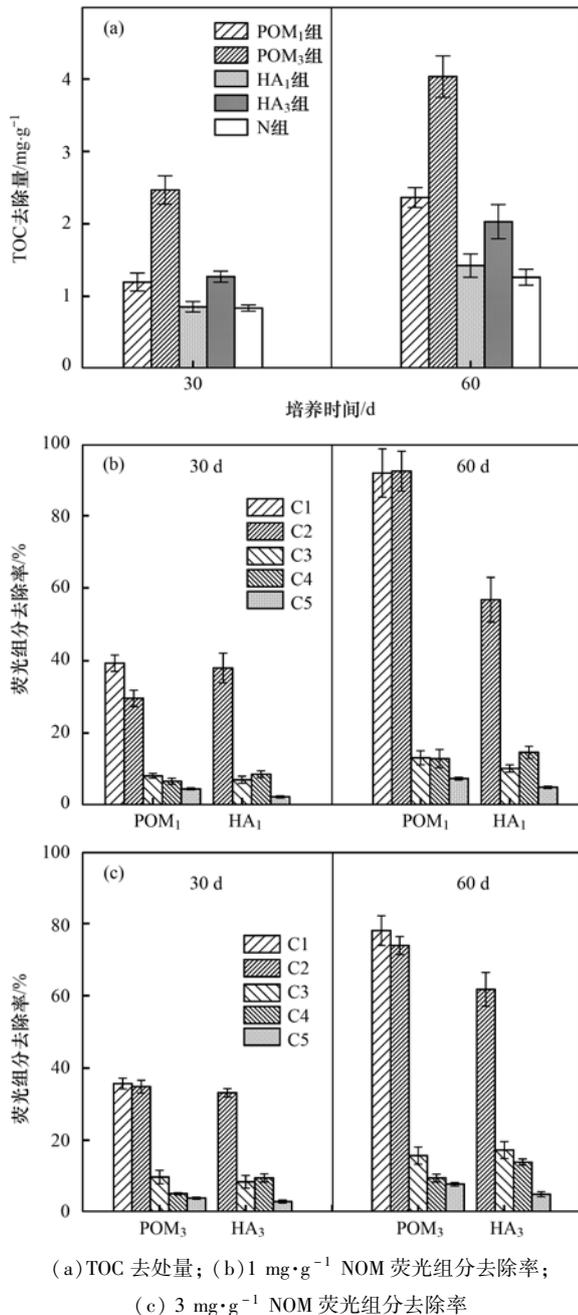


图3 NOM 输入对沉积物有机碳含量的影响

Fig. 3 Changes in sediments organic carbon after NOM input

时,前人在酶活性与微生物数量的相关性分析中发现 UA 活性与细菌数量呈正相关^[25]. 因此, NOM 输入不仅促进了沉积物中氮的循环,而且提高了微生物生物量. 由于大多数沉积物微生物都能产生蛋白酶水解肽键^[15],因而 POM 中的蛋白组分增强了 NPA 活性,但随着有机质逐渐矿化, NPA 活性降低. 总的来说,酶活分析表明 NOM 输入提高了沉积物中微生物的生物量和有机物代谢能力,且 POM 的促进作用更强.

2.2.3 NOM 输入对微生物分泌 EPS 的影响

如图 5(a) 所示,各处理组 C-EPS 中蛋白浓度与对照相比无显著性差异(除 POM₃ 组外),而 B-EPS

中蛋白浓度变化较为显著($P < 0.05$). 在第 30 d, POM₃ 组中 B-EPS 的蛋白质含量最高,而第 60 d 时, HA₃ 组中 B-EPS 的蛋白质含量与 POM₃ 组无显著差异. 总体而言,添加 POM 对 C-EPS、B-EPS 中蛋白质分泌均有促进作用,且与 NOM 浓度呈正相关,而 HA 仅对 B-EPS 中蛋白质分泌具有促进作用. 多糖方面,添加 1 mg·g⁻¹ 的 POM 和 HA 对 C-EPS 中多糖浓度的影响不大,但 NOM 添加量为 3 mg·g⁻¹ 时, C-EPS 中多糖浓度明显提高[图 5(b)]. 不同浓度的 POM 和 HA 对 B-EPS 中多糖分泌均具有促进作用,并且促进作用随 NOM 添加量的升高而增强. 在第 30 d, POM 对 B-EPS 中多糖生成的促进强于相同浓度的 HA; 而第 60 d 时, POM 与 HA 对 B-EPS 中多糖分泌的影响相似.

EPS 是由微生物自身代谢、细胞脱落或裂解死亡产生的一类复杂高分子物质,包括 C-EPS 和 B-EPS 两层,与微生物群落的代谢活性密切相关^[26]. 随着微生物分解转化更多的 NOM,大量的代谢产物以 EPS 的形式分泌,故 NOM 矿化更剧烈的 POM 处理组中 EPS 浓度更高. 然而,HA 处理组中 B-EPS 的最终浓度与 POM 组中相近,这可能是由于 HA 比表面积大,且对 EPS 中的脂肪族、芳香族和羧基官能团具有很强的亲和力,使得更多的 EPS 结合在细胞表面^[27]. EPS 对于微生物群落稳定性具有重要作用, EPS 增加有利于生物膜的形成及微生物定殖,加强微生物之间的信息交流,进而提高整个微生物群落对有机物的代谢能力^[26].

2.3 NOM 输入对沉积物中微生物群落组成、功能的影响

2.3.1 NOM 输入对微生物群落组成的影响

沉积物中微生物群落在门水平的变化如图 6(a) 所示. 各组菌群分布较为相似,第 30 d 时,主要优势菌群为 Proteobacteria (27.6% ~ 42.8%), 其次是 Actinobacteria (15.5% ~ 20.8%)、Acidobacteria (6.8% ~ 14.1%). 与对照组相比,添加 NOM 后, Proteobacteria、Patenscibacteria 和 Firmicutes 的相对丰度增加,其中, POM₃ 组中 Proteobacteria 和 Nitrospira 丰度增加最为明显. 随着培养时间的延长, Proteobacteria 丰度进一步增加,同时 POM 组中 Bacteroidetes 相对丰度明显增加,而 HA 和 N 组中 Acidobacteria 丰度升高. 为明确微生物群落对 NOM 浓度和组成的响应,在纲水平上分析群落组成与 NOM 荧光组分浓度的相关性[图 6(b)]. 纲水平上主要优势菌群为 γ -Proteobacteria、 δ -Proteobacteria 和 Actinobacteria, 相对丰度占整个细菌群落的 42.2% ~ 53.8%. 其中 γ -Proteobacteria、 δ -Proteobacteria 和

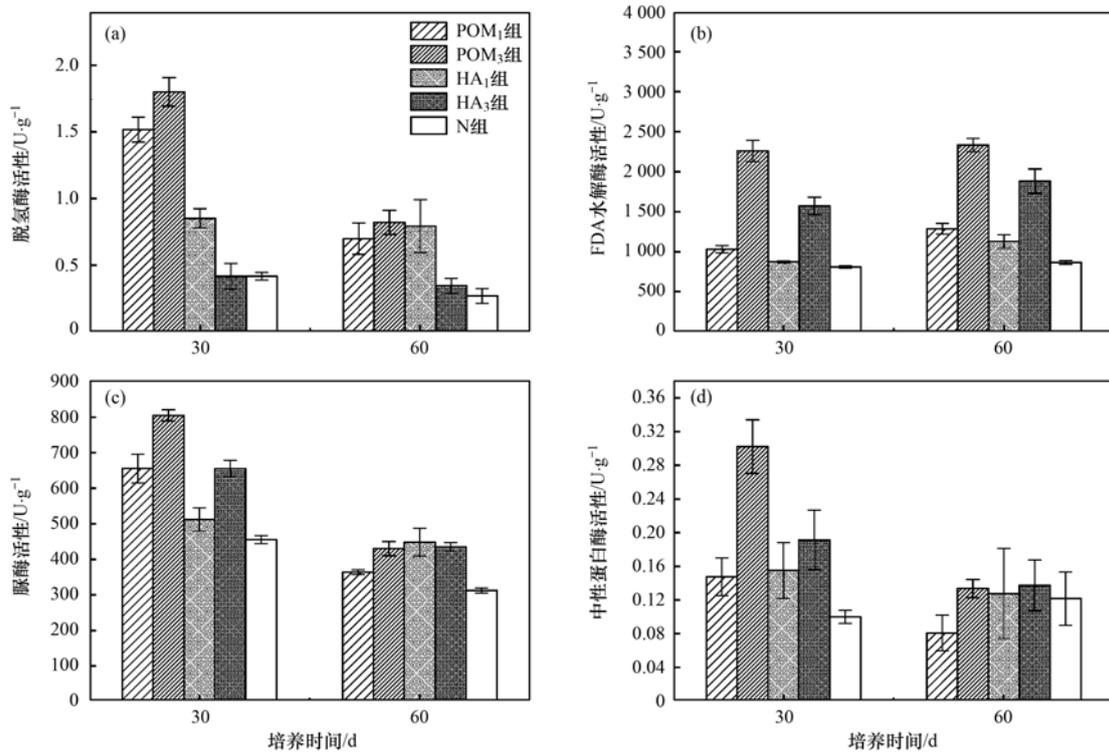


图 4 NOM 输入对沉积物微生物酶活性的影响

Fig. 4 Effects of NOM input on microbial enzyme activity in sediments

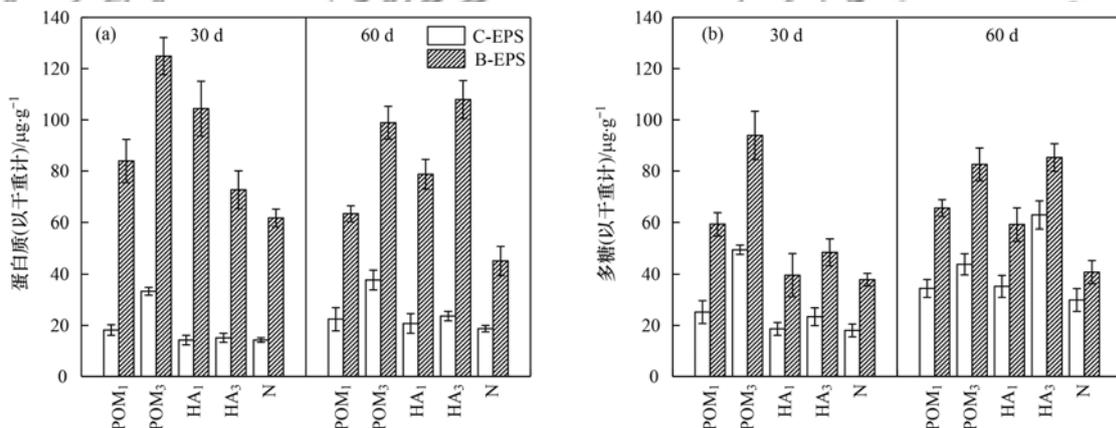


图 5 NOM 输入下沉积物微生物群落 EPS 中的蛋白质和多糖浓度

Fig. 5 Concentrations of protein and polysaccharide in the EPS of lake sediments amended with NOM

Nitrospira 与类蛋白组分(C1 和 C2)呈正相关,而 α -Proteobacteria、Bacteroidia 和 Ignavibacteria 不仅与 C1 和 C2 呈正相关,而且与 C4 负相关. Actinobacteria、Latescibacteria 和 Verruomicrobiae 与类蛋白组分呈负相关. 以上结果说明微生物群落演化与 NOM 的组成与活性有关.

随着 NOM 中活性物质优先被微生物分解,群落中活性物质的分解者得到选择性富集. Proteobacteria 和 Bacteroidetes 属于富营养菌群,对有机物具有很强的代谢能力,在碳充足时可快速生长^[3]. 因此,富含类蛋白组分的 POM 更有利于 Proteobacteria 和 Bacteroidetes 富集. 类似研究也发现 Proteobacteria 和

Bacteroidetes 是太湖水体中类蛋白组分的主要分解者^[28]. 相反,Acidobacteria 作为贫营养菌群,擅长降解低活性基质,生长速率较慢^[29],故在 HA 和对照组中丰度更高. POM 中丰富的类蛋白质可作为微生物的氮源,提高 Nitrospira 的丰度,这与 UA 活性变化一致. 此外, α 多样性分析显示虽然添加 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 POM 和 HA 对微生物群落多样性的影响相近(平均 Shannon 指数均为 6.14,下同),但是 POM₃ 组中微生物群落多样性(6.22)高于 HA₃ 处理组(6.19),这与前人研究发现以藻源 NOM 为基质的生物膜多样性高于以 HA 为基质相一致^[6]. 如 EEM-PARAFAC 所示,HA 组分相对单一,而 POM 含有多种活性、非活性物

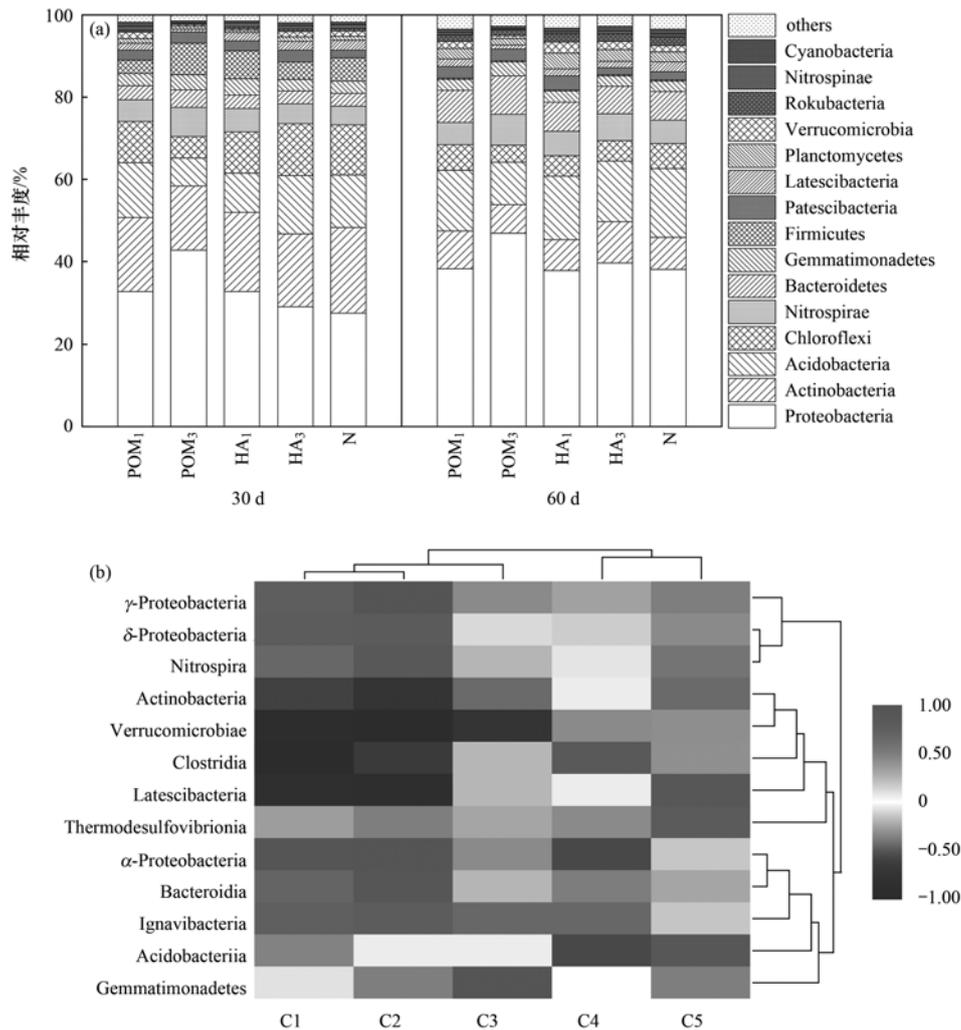


图 6 NOM 输入对沉积物中微生物群落组成的影响

Fig. 6 Effects of NOM input on microbial community composition in lake sediments

质,组成较为复杂,其代谢过程需要具有不同代谢功能的菌种共存.群落多样性提高意味着生态位不同的菌种之间存在更频繁的种间协作,进而提高了微生物群落对有机物的代谢弹性^[30].总体而言,POM 输入促使微生物群落向富营养化状态演化,进而加快了沉积物中的碳和氮循环.

2.3.2 NOM 输入对微生物群落功能的影响

利用 PICRUST 软件基于 KEGG 数据库预测微生物群落功能,NOM 输入引起微生物群落功能基因丰度的显著变化[图 7(a)].KEGG 代谢通路(一级水平)预测的功能基因中约 51% 与代谢有关,16% 与遗传信息处理有关,14% 与环境信息处理有关.

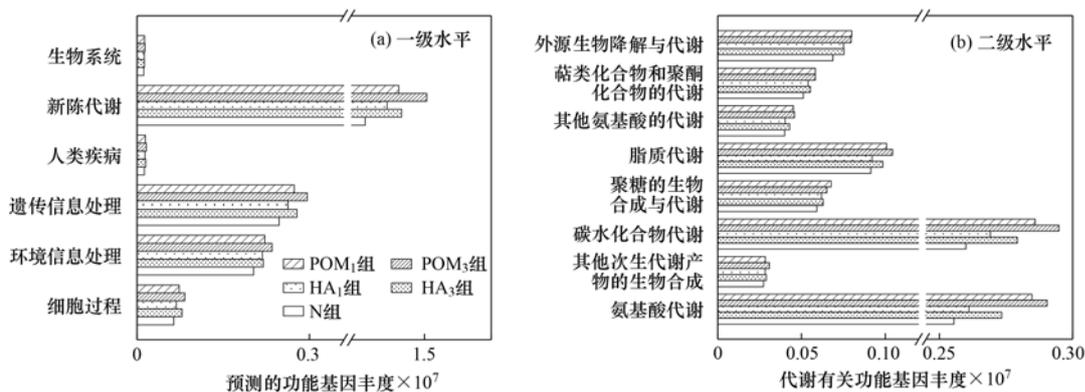


图 7 基于 KEGG 数据库预测的微生物群落功能基因丰度

Fig. 7 Functional gene abundance of microbial community predicted using the KEGG database

培养 60 d 后,各组之间功能基因丰度差异显著($P < 0.05$),特别是代谢功能基因丰度大小为 POM₃ 组 > HA₃ 组 > POM₁ 组 > HA₁ 组 > N 组. 对代谢功能基因进一步研究,发现碳水化合物代谢最为丰富,其次是氨基酸代谢、脂质代谢和外源化合物生物降解与代谢[图 7(b)]. 碳水化合物和氨基酸的代谢途径更强,说明 POM 组的碳转化和分解能力较高. POM 中类色氨酸和酪氨酸组分可能是驱动微生物代谢和生物合成的重要初级代谢物,而 HA 中高含量的类腐殖质组分产生的与碳水化合物和外源物质代谢相关的功能基因较少^[31]. 此外,POM 中的高分子量物质也可诱导脂质代谢相关功能基因的显著上调^[32]. 特别地,与外源化合物降解相关的基因丰度升高,意味着 NOM 输入可能增强了沉积物中有机污染物的分解潜力,这与前人研究发现蓝藻残体沉降加快了沉积物中多环芳烃的生物降解一致^[33]. 因此,POM 中活性物质的输入刺激了微生物群落的代谢功能,进而可能影响藻型湖湾沉积物中多种物质的生物地球化学循环.

3 结论

(1) 沉积物中微生物矿化作用随 NOM 浓度升高而增强,而 POM 对矿化的促进作用约为同等浓度陆源 HA 的 3 倍. 同时 POM 对碳、氮代谢相关酶活性的激发效应强于 HA,形成了代谢更为活跃的生物群落.

(2) HA 只对微生物分泌 B-EPS 具有促进作用,而 POM 显著提高了 C-EPS、B-EPS 中蛋白质和多糖的含量,提高了微生物群落的聚集度和稳定性.

(3) POM 不仅提高了沉积物中的微生物群落生物量和多样性,而且含有的类蛋白组分有利于 Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Nitrospira 等菌门的生长.

(4) NOM 输入提高了微生物群落中与代谢相关的功能基因丰度,特别是 POM 可能加快了藻型湖湾沉积物中碳、氮及有机污染物的生物地球化学循环.

参考文献:

[1] 李国强,薛林贵,莫天录,等. 湖泊沉积物微生物多样性研究方法的新进展[J]. 兰州交通大学学报, 2015, **34**(6): 12-16, 37.
Li G Q, Xue L G, Mo T L, *et al.* New progress of research methods for microbial diversity in lake sediment[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, **34**(6): 12-16, 37.
[2] 刘鹏远,陈庆彩,胡晓珂. 渤海湾湾口表层沉积物中的核心细菌群落结构及其对环境因子的响应[J]. 微生物学通报, 2018, **45**(9): 1940-1955.
Liu P Y, Chen Q C, Hu X K. Structure characteristics of core bacterial communities in surface sediments and analysis on their responses to environmental factors in the inlet of Bohai Bay[J].

Microbiology China, 2018, **45**(9): 1940-1955.
[3] Traving S J, Rowe O, Jakobsen N M, *et al.* The effect of increased loads of dissolved organic matter on estuarine microbial community composition and function [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, **8**, doi: 10.3389/fmicb.2017.00351.
[4] Bai L L, Zhang Q, Wang C H, *et al.* Effects of natural dissolved organic matter on the complexation and biodegradation of 17 α -ethinylestradiol in freshwater lakes[J]. Environmental Pollution, 2019, **246**: 782-789.
[5] 孙伟,巩小丽,陈煜,等. 太湖藻源溶解性有机质光化学降解研究[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 91-101.
Sun W, Gong X L, Chen Y, *et al.* Photochemical degradation of the algae-derived dissolved organic matter in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(1): 91-101.
[6] Li L, Jeon Y, Lee S H, *et al.* Dynamics of the physiochemical and community structures of biofilms under the influence of algal organic matter and humic substances [J]. Water Research, 2019, **158**: 136-145.
[7] Judd K E, Crump B C, Kling G W. Variation in dissolved organic matter controls bacterial production and community composition[J]. Ecology, 2006, **87**(8): 2068-2079.
[8] 吴晓东,孔繁翔,张晓峰,等. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1313-1318.
Wu X D, Kong F X, Zhang X F, *et al.* Comparison of overwintering and recruitment of cyanobacteria in Taihu Lake and Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2008, **29**(5): 1313-1318.
[9] Zhang Y D, Su Y L, Liu Z W, *et al.* Lipid biomarker evidence for determining the origin and distribution of organic matter in surface sediments of Lake Taihu, Eastern China[J]. Ecological Indicators, 2017, **77**: 397-408.
[10] Hansen A M, Kraus T E C, Pellerin B A, *et al.* Optical properties of dissolved organic matter (DOM): effects of biological and photolytic degradation [J]. Limnology and Oceanography, 2016, **61**(3): 1015-1032.
[11] Murphy K R, Stedmon C A, Graeber D, *et al.* Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC [J]. Analytical Methods, 2013, **5**(23): 6557-6566.
[12] 黄代中,肖文娟,刘云兵,等. 浅水湖泊沉积物脱氢酶活性的测定及其生态学意义[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 345-350.
Huang D Z, Xiao W J, Liu Y B, *et al.* Determination of dehydrogenase activity in sediment of shallow lakes and its ecological significance[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(3): 345-350.
[13] Adam G, Duncan H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(7-8): 943-951.
[14] 潘能,侯振安,陈卫平,等. 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4081-4087.
Pan N, Hou Z A, Chen W P, *et al.* Study on soil enzyme activities and microbial biomass carbon in greenland irrigated with reclaimed water[J]. Environmental Science, 2012, **33**(12): 4081-4087.
[15] Vranova V, Rejsek K, Formanek P. Proteolytic activity in soil: a review[J]. Applied Soil Ecology, 2013, **70**: 23-32.
[16] Pierre G, Graber M, Orvain F, *et al.* Biochemical characterization of extracellular polymeric substances extracted

- from an intertidal mudflat using a cation exchange resin [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2010, **38**(5): 917-923.
- [17] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [18] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [19] Xu H C, Li F F, Kong M, *et al.* Adsorption of cyanobacterial extracellular polymeric substance on colloidal particle; Influence of molecular weight [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **715**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136959.
- [20] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 基于三维荧光和平行因子分析法的大湖水体 CDOM 组分光学特征 [J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(3): 375-382.
Huang C C, Li Y M, Wang Q, *et al.* Components optical property of CDOM in Lake Taihu based on three-dimensional excitation emission matrix fluorescence [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(3): 375-382.
- [21] Zhang Y L, Liu X H, Wang M Z, *et al.* Compositional differences of chromophoric dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, **55**: 26-37.
- [22] Bai L L, Cao C C, Wang C H, *et al.* Toward quantitative understanding of the bioavailability of dissolved organic matter in freshwater lake during cyanobacteria blooming [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(11): 6018-6026.
- [23] 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 895-904.
Mo X, Chen F J, You C, *et al.* Characteristics and factors of soil enzyme activity for different plant communities in Yellow River Delta [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 895-904.
- [24] Simčič T. The role of plankton, zoobenthos, and sediment in organic matter degradation in oligotrophic and eutrophic mountain lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2005, **532**(1-3): 69-79.
- [25] 刘钊, 魏天兴, 朱清科, 等. 黄土丘陵沟壑区典型林地土壤微生物、酶活性和养分特征 [J]. *土壤*, 2016, **48**(4): 705-713.
Liu Z, Wei T X, Zhu Q K, *et al.* Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils in forests of loess hilly region [J]. *Soils*, 2016, **48**(4): 705-713.
- [26] Decho A W, Gutierrez T. Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fmicb.2017.00922.
- [27] 李春越, 党廷辉, 王万忠, 等. 腐殖酸对农田土壤磷素吸附行为的影响研究 [J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(3): 77-82.
Li C Y, Dang T H, Wang W Z, *et al.* Influence of humic acid on the adsorption behavior of phosphorus in agricultural soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(3): 77-82.
- [28] 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.
- [29] Sun L, Xun W B, Huang T, *et al.* Alteration of the soil bacterial community during parent material maturation driven by different fertilization treatments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **96**: 207-215.
- [30] Li D, Alidina M, Ouf M, *et al.* Microbial community evolution during simulated managed aquifer recharge in response to different biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) concentrations [J]. *Water Research*, 2013, **47**(7): 2421-2430.
- [31] 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.
- [32] McCarren J, Becker J W, Repeta D J, *et al.* Microbial community transcriptomes reveal microbes and metabolic pathways associated with dissolved organic matter turnover in the sea [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(38): 16420-16427.
- [33] Yan Z S, Jiang H L, Li X H, *et al.* Accelerated removal of pyrene and benzo [a] pyrene in freshwater sediments with amendment of cyanobacteria-derived organic matter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **272**: 66-74.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)