

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



2020

Vol.41 No.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单	梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国 (4767)
中国水泥排放清单及分布特征	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞 (4776)
环境空气 PM _{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立: 以长三角地区为例	张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹 (4786)
南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征	张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程 (4803)
郑州市 PM _{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析	张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹 (4813)
山西大学城 PM _{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估	李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇 (4825)
2000~2019 年中国 PM _{2.5} 时空演化特征	夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富 (4832)
北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异	尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军 (4844)
基于天气背景天津大气污染输送特征分析	蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐 (4855)
基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠 (4864)
基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源	孙佳宁, 谢绍东 (4874)
芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析	高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜 (4885)
密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应	张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双 (4895)
北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探	陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫 (4905)
2009~2018 年太湖湖泛强度变化及其影响因素	辛华荣, 朱广伟, 王雪松, 李骏, 陆隽 (4914)
雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征	张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆 (4924)
基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪	孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强 (4936)
会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价	李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一 (4948)
太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征	张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程 (4958)
强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海 (4970)
长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序	苏超, 崔严 (4981)
嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价	杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷 (4989)
污水处理厂对漓江桂林市城区河段淡水生物中微塑料累积的影响	谢元汕, 张清科, 张滴杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳 (4999)
村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律	卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送 (5008)
冬季小流域水体微生物多样性及影响因素	朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌 (5016)
水库热分层沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响	王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇 (5027)
长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析	韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣 (5037)
类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响	郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟 (5050)
基于决策树的城市黑臭水体遥感分级	李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰 (5060)
纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制	潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金鑫, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英 (5073)
温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N ₂ O 释放的影响	王丝可, 于恒, 左剑恶 (5082)
以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A ² /O 污染物去除特性	荣懿, 邵劲博, 于优城, 石炬, 金鹏康 (5089)
不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (5097)
中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响	田中科, 王芬, 闫钊 (5106)
基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价	韩琳, 徐夕博 (5114)
再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险	沈城, 刘馥雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛 (5125)
有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因子	侯静雯, 施维林, 高娟 (5133)
硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英 (5143)
叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响	闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰 (5151)
重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应	王晓宇, 韩辉 (5160)
油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响	赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君 (5168)
氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响	张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔 (5176)
生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及其细菌群落结构的变化	曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋 (5185)
铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响	贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰 (5193)
典型水环境微生物源异嗅物研究进展	张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥 (5201)
广告: 国家微生物科学数据中心	(前插)
《环境科学》征订启事 (4785) 《环境科学》征稿简则 (4947) 信息 (5015, 5124, 5132)	

水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响

王彤^{1,2}, 文刚^{1,2*}, 黄廷林^{1,2}, 司凡^{1,2}, 王晨旭^{1,2}, 路林超^{1,2}, 林薇^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055)

摘要: 本研究以水源水库热分层期沉积物中有机物为研究对象, 在分析其相对分子质量分布和有机物荧光特性的基础上, 探究了沉积物中有机物为碳源时, 好氧反硝化细菌的脱氮效能、细菌生长及碳去除性能。结果表明: ① 水源水库在热分层期, 沉积物中相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物所占比例较高; 同时相比于不同月有机物的相对分子质量分布, 7 月时沉积物中相对分子质量大的有机物所占的比例最低 (44.62%), 显示出较小的相对分子质量; ② 水源水库沉积物中有机物由陆地类腐殖质组分 C1 (250 nm, 425 nm)、类色氨酸和氨基酸物质 C2 (230 nm/280 nm, 322 nm) 和传统微生物类腐殖质混合物 C3 (250 nm, 340 nm) 所组成, 其中色氨酸和氨基酸类的物质 (组分 C2) 所占比例较高, 同时在 7 月时显示出较大的总荧光强度; ③ 好氧反硝化过程中, 5 月有机物显示出较好的作为电子供体的特征, 而 7 月的有机物却表现出较好的作为能源物质的性能, 同时使得好氧反硝化细菌 WGX-9 显示出较高的氮去除特性; ④ 相比于天然有机物、藻类有机物和实际水源水库水, 沉积物中有机物作为碳源时可以较好地促进菌株 WGX-9 的好氧反硝化脱氮效能。本文阐明了水源水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌的影响, 将为微污染水体氮污染控制工程提供依据。

关键词: 水源水库; 沉积物中有机物; 相对分子质量; 荧光特性; 好氧反硝化

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-5027-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004250

Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier

WANG Tong^{1,2}, WEN Gang^{1,2*}, HUANG Ting-lin^{1,2}, SI Fan^{1,2}, WANG Chen-xu^{1,2}, LU Lin-chao^{1,2}, LIN Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In this study, the relative molecular weight distribution and fluorescent characteristics of the organic matter in sediments during the thermal stratification of a drinking water reservoir were studied. The nitrogen removal, growth performance, and carbon removal ability of an aerobic denitrifier were investigated when the organic matter in sediments was used as a carbon source. The results found that: ① during the stratification period in the drinking water reservoir, the organic matter in sediments has a larger proportion of relative molecular mass $> 100 \times 10^3$. It can be observed that compared with the relative molecular weight distribution in different months, the percentage of macromolecular organic matter in sediments is the lowest in July (44.62%), showing a characteristic of smaller relative molecular weight; ② the organic matter in sediments of the drinking water reservoir was composed of terrestrial humic-like substance component C1 (250 nm, 425 nm), tryptophan and amino acid-like substances component C2 (230 nm/280 nm, 322 nm), and traditional microbial humic-like substances component C3 (250 nm, 340 nm). Component C2 accounted for a higher percentage, and the organic matter in July showed a higher total fluorescence intensity; ③ during the aerobic denitrification process, organic matter in May displayed better characteristics as an electron donor, while organic matter in July exhibited excellent performance as an energy substance and better denitrification characteristics of the strain WGX-9; ④ the aerobic denitrification performance of the strain WGX-9 can be significantly promoted when the organic matter in sediments is a carbon source, compared with natural organic matter, algae organic matter, and actual water of the drinking water reservoir. This study clarifies the characteristics of the organic matter in sediments during the thermal stratification period of the drinking water reservoir and its effect on an aerobic denitrifier. This will provide a scientific basis for the research of nitrogen pollution control in micro-polluted water sources.

Key words: drinking water reservoir; organic matter in sediments; relative molecular weight; fluorescence; aerobic denitrification

随着地下水开采受到限制, 水库逐渐成为大部分城市的主要供水水源^[1,2]。然而, 水库水由于水体流动性差和水力停留时间长等特点, 极易在夏秋季周期性暴发蓝藻水华, 导致水质恶化、增加水厂处理难度及供水成本、影响水生生态平衡等问题^[3-5]。其

收稿日期: 2020-04-28; 修订日期: 2020-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978557); 陕西省杰出青年科学基金项目(2018JC-026); 陕西省重点研发计划项目(2020ZDLSF06-05); 陕西高校青年创新团队项目

作者简介: 王彤(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水水源水质安全保障, E-mail: 18829029700@163.com

* 通信作者, E-mail: hitwengang@163.com

中,氮素含量超标(特别是硝氮)是引起水库水体富营养化的关键因素之一,因此去除水体中过量氮素已成为控制水库水体富营养化的主要手段之一^[6,7].目前,国内外学者已经对水库水体氮素原位控制技术进行了大量研究^[8].其中,好氧反硝化脱氮技术由于其不受氧浓度的限制、成本低和不产生二次污染等优点,受到越来越多的关注^[9,10].

好氧反硝化细菌,以碳源为电子供体,氧和硝酸盐为电子受体,在脱氮的同时去除部分有机物,可以有效控制水源水库因氮素超标而导致的蓝藻暴发问题^[11,12].在反硝化过程中,碳源不仅是好氧反硝化细菌增值代谢的营养物质,还为脱氮过程提供能量和电子,因此碳源是影响好氧反硝化细菌性能的关键因素之一^[13,14].目前对于好氧反硝化脱氮技术中碳源的研究主要集中在人造有机物(如乙酸钠、丁二酸钠和葡萄糖等)方面,仅有 Wen 等^[15]研究了实际水库中存在的有机物(如天然有机物和藻类有机物)对好氧反硝化细菌的影响.然而,沉积物在整个水库内源污染物释放和迁移转化过程中扮演着非常重要的角色^[16].水源水库在夏秋季热分层期,由于气温升高引起表层水温上升从而导致水库热分层,使得表层水体溶解氧向下传质受阻,底部溶解氧降低呈厌氧状态,导致沉积物中的有机物大量释放,继而引发严重的周期性内源污染,导致水质反复恶化^[17,18].目前,关于水源水库热分层期沉积物中有机物的相对分子质量分布和荧光特征及其对好氧反硝化细菌脱氮的影响还鲜为人知.因此,加强好氧反硝化细菌利用水库中沉积物中有机物的研究,对于水库水体氮污染原位控制工程的应用和丰富好氧反硝化生物脱氮理论具有关键的意义.

本文以水源水库热分层期沉积物中有机物为研究对象,在分析其相对分子质量分布和有机物特征的基础上,探究了当沉积物中有机物作为碳源时,好氧反硝化细菌的脱氮特性、细菌生长及碳去除性能,并对比了不同类型的实际水体中存在的有机物为碳源时对好氧反硝化细菌脱氮效能的影响,通过促进好氧反硝化脱氮技术应用于实际微污染水体中,减少水体中的氮素污染,以期为实现高效和经济的脱氮提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及有机物分离

1.1.1 研究区域概况及样品采集

黑河金盆水库(108°11′~108°12′E, 34°02′~34°03′N)位于陕西省西安市周至县境内,是西安市最主要的饮用水源工程.建成于2002年,总库容

2.0亿m³,平均水深70~100m^[19].金盆水库在夏季(5~8月)会形成稳定的热分层,热分层期水库底部溶解氧浓度迅速降低,沉积物释放大量有机物进入上覆水体^[20].本研究于2019年5~8月每月中旬在金盆水库主库区(108°11′10.71″E, 34°02′15.59″N)用柱状采泥器采集表层(0~1cm)沉积物,24h内送回实验室进行有机物的提取.取样期间扬水曝气系统6月10日开启,至6月28日关闭.

1.1.2 沉积物中有机物的提取

沉积物中有机物的提取步骤^[21]:①将沉积物溶于 Milli-Q 超纯水中冻融3次(冻/融, -80~37℃,时间比为30min:5min),冻融后的有机物溶于一定量的超纯水中,置于室温下释放1~2h;②采用超声波细胞粉碎机(JY92-IIID,新芝生物,中国)对将冻融后的有机物进行超声处理(功率为650W,超声处理15min,一个周期包含5s脉冲、3s暂停);③将超声后的样品在9600r·min⁻¹条件下离心10min(L-550,湘仪,中国)和去除上清液后,通过0.22μm的无菌滤膜过滤,滤液即为沉积物中的有机物.

1.2 菌株来源

好氧反硝化菌株 *Acinetobacter johnsonii* WGX-9 从饮用水水库(104°43′E, 33°42′N)沉积物中分离纯化得到,具有良好的好氧反硝化脱氮性能^[15].低温(-80℃)存储在实验室.

1.3 相对分子质量分级

有机物分级采用超滤装置(UFSC05001, Millipore 公司,美国)和相对分子质量为100×10³、30×10³、10×10³、5×10³和1×10³的超滤膜来分离成不同相对分子质量的部分^[15].在分级实验中,高纯氮气提供0.1MPa的压力,样品依次经过100×10³、30×10³、10×10³、5×10³和1×10³的超滤膜.经过分级后,将样品分为6个相对分子质量不同的部分,分别为相对分子质量>100×10³、(30~100)×10³、(10~30)×10³、(5~10)×10³、(1~5)×10³和<1×10³,然后测定各组分的总有机碳(total organic carbon, TOC)和总氮(total nitrogen, TN)浓度.

1.4 荧光光谱分析

采用荧光光谱仪(F-7000,日立,日本)测定荧光光谱,样品测定前首先过0.45μm的无菌滤膜,将TOC浓度稀释到5mg·L⁻¹,pH调整为7.0.激发波长(E_x)以5nm间隔从220nm扫描到420nm,发射波长(E_m)以2nm间隔从250nm扫描到550nm,扫描速度为12000nm·min⁻¹,狭缝为5nm,光电倍增管检测电压为500V.利用 Milli-Q 超纯水做空白

扣除实验,结合 Delaunay 三角形内插值法修正去除拉曼峰散射和瑞利散射^[22]。

利用 MATLAB 2014b 软件将样品的荧光矩阵组合,采用 N-way 和 DOM Fluor 工具箱进行平行因子分析,确定荧光组分数^[23]。平行因子分析模型解析出的是各组分的相对荧光强度,各组分的荧光强度 I_i 按照公式(1)计算:

$$I_i = \text{Score}_i \times E_{xi}(\lambda_{\max}) \times E_{mi}(\lambda_{\max}) \quad (1)$$

式中, Score_i 代表第 i 种组分的相对荧光强度; $E_{xi}(\lambda_{\max})$ 和 $E_{mi}(\lambda_{\max})$ 分别代表第 i 种组分激发和发射负载的最大值。

总荧光强度 I_{Tot} 和荧光组分的相对比例 P_i 计算方程式如下^[24]:

$$I_{\text{Tot}} = \sum_i I_i \quad (2)$$

$$P_i = I_i / I_{\text{Tot}} \quad (3)$$

1.5 好氧反硝化特性分析

根据 TOC 含量,制备了以 6 个不同相对分子质量的沉积物中有机物为碳源的好氧反硝化培养基。将活化的菌株 WGX-9 的菌液接种至装有 150 mL 液体培养基的锥形瓶中进行好氧反硝化实验。将锥形瓶在 30℃, 130 r·min⁻¹ 的恒温振荡培养箱中培养 72 h, 分别做 3 组平行 ($n=3$), 定时测定菌体生长吸光度值 (D_{600})、硝氮 (NO_3^- -N) 和 TOC 的浓度。不同月份培养基的初始浓度分别为: 5 月 TOC = 27.17 mg·L⁻¹, NO_3^- -N = 15.21 mg·L⁻¹; 6 月 TOC = 20.89 mg·L⁻¹, NO_3^- -N = 11.84 mg·L⁻¹; 7 月 TOC = 24.38 mg·L⁻¹, NO_3^- -N = 13.36 mg·L⁻¹; 8 月 TOC = 26.06 mg·L⁻¹, NO_3^- -N = 11.00 mg·L⁻¹。

菌株 WGX-9 好氧反硝化过程中硝氮降解采用一级动力学进行拟合^[25]:

$$\frac{d[\text{NO}_3^-]_t}{dt} = -k [\text{NO}_3^-]_t \quad (4)$$

式中, $[\text{NO}_3^-]_t$ 为好氧反硝化过程中 t 时刻硝氮的浓度; k 为速率常数。

1.6 不同类型碳源对好氧反硝化细菌的氮去除特性

选取实际水体中存在的不同类型的有机物: 天然有机物(腐殖酸和富里酸)、藻类胞内有机物(铜绿微囊藻 IOM 和小球藻 IOM)、藻类胞外有机物(铜绿微囊藻 EOM 和小球藻 EOM)、实际水源水库水体和沉积物中有机物分别作为好氧反硝化培养基的碳源^[15]。将活化的菌株 WGX-9 的菌液接种至装有 150 mL 液体培养基的锥形瓶中进行好氧反硝化实验。将锥形瓶在 30℃, 130 r·min⁻¹ 的恒温振荡培养箱中培养 72 h, 计算好氧反硝化过程的硝氮去除效率及去除速率。

1.7 测定方法

采用气相分子吸收光谱仪测定 NO_3^- -N 和 TN 的浓度(GMA3376, 上海北裕, 中国)。采用紫外分光光度计(UV-2600, UNICO, 中国)测定样品在 600 nm 的吸光值, 即 D_{600} 。TOC 采用总有机碳测定仪分析(TOC-L, 岛津公司, 日本)。

本实验数据采用单因素方差分析方法进行分析 ($P < 0.05$), 采用 SPSS 25.0 统计软件进行统计分析, 并用 Origin Pro 2019 软件进行动力学的拟合和绘图。每组实验重复 3 次 ($n=3$)。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中有机物的相对分子质量分布

沉积物中有机物在热分层期相对分子质量根据 TOC 和 TN 所占的比例如图 1 所示。图 1(a) 可以看出, 热分层期水源水沉积物中有机物的相对分子质量分布(以 TOC 计算时)主要以相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物为主, 其它相对分子质量的有机物所占比例较低。在 5、6、7 和 8 月, 相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物所占的比例分别为 32.53%、36.48%、28.81% 和 38.27%。且从图 1(a) 可知, 6 种不同相对分子质量的有机物在 5~8 月所占比例的分布顺序从高到低均为: $> 100 \times 10^3$ 、 $(10 \sim 30) \times 10^3$ 、 $(30 \sim 100) \times 10^3 \approx (5 \sim 10) \times 10^3$ 、 $(1 \sim 5) \times 10^3$ 、 $< 1 \times 10^3$ 。同时图 1(b) 可以观察到, 以 TN 计算时, 其沉积物中有机物的相对分子质量分布与以 TOC 计算时显示出相同的变化趋势。根据各组分的 TOC 和 TN 所占的百分比, 证明了水源水库中沉积物中相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物所占的比例较高, 相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的有机物所占的比例较低。

Hua 等^[26]的研究指出, 将相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 和 $(30 \sim 100) \times 10^3$ 的有机物定义为相对分子质量大的有机物, 将 $(10 \sim 30) \times 10^3$ 、 $(5 \sim 10) \times 10^3$ 、 $(1 \sim 5) \times 10^3$ 和 $< 1 \times 10^3$ 的有机物定义为相对分子质量小的有机物。根据这一结论, 以 TOC 来看, 从 5~8 月, 相对分子质量大的有机物所占的比例分别为: 47.63%、50.25%、44.62% 和 51.63%。以 TN 来看, 从 5~8 月, 相对分子质量大的有机物所占的比例分别为: 43.75%、42.29%、40.02% 和 40.17%。综上所述, 可以看出有机物的相对分子质量分布随时间的变化差异不明显 ($P > 0.05$), 但在 7 月时有机物的相对分子质量分布较为均匀, 显示出较小的相对分子质量, 这可能是由于扬水曝气系统在 6 月 10~28 日的运行, 使得沉积物内部生物地球化学作用更加明显^[17]。

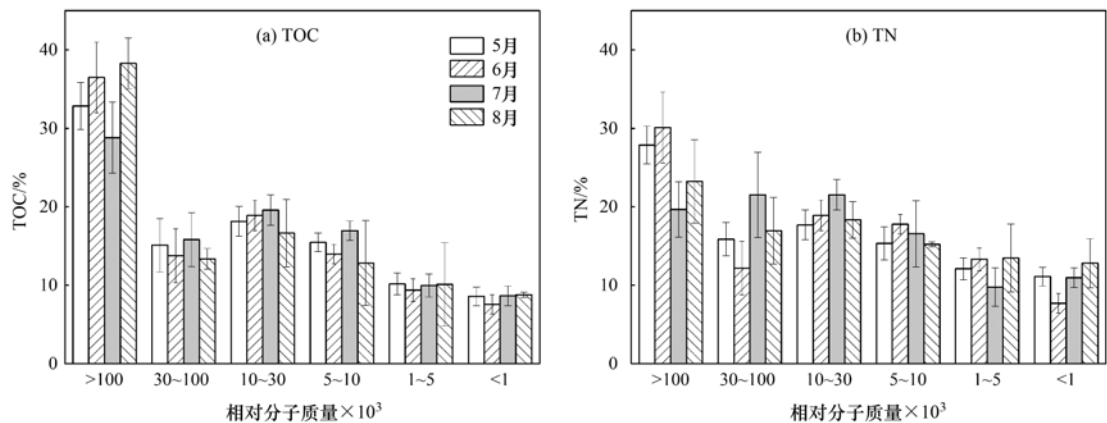


图1 水库热分层期沉积物中有机物以 TOC 和 TN 计算的相对分子质量分布

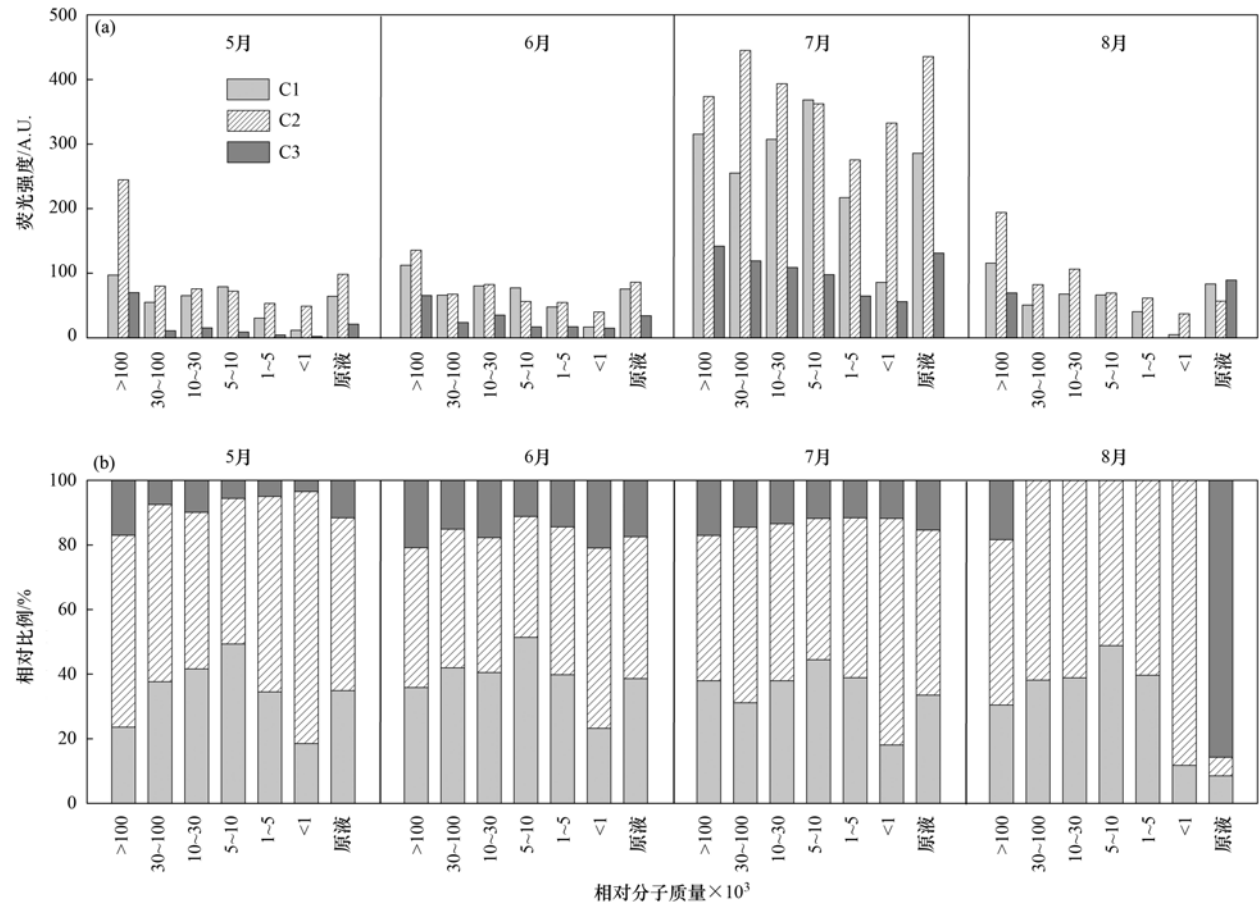
Fig. 1 Apparent relative molecular mass distributions of organic matter in sediments in TOC and TN during the thermal stratification of reservoirs

2.2 三维荧光光谱及组分特性

通过 PARAFAC 模型对沉积物中有机物的三维荧光光谱进行解析,最终解析出 3 个荧光组分. 其中组分 C1 的最大激发波长在 250 nm 处,最大发射波长在 425 nm 处,可以归类为陆地类腐殖质^[27];组分 C2 有两个明显的最大激发波长(分别在 230 nm 和 280 nm 处)和一个最大发射波长(322 nm),被证实为类色氨酸和氨基酸荧光,且此类物质的相对分

子质量较低^[23];组分 C3 由一个最大激发波长(250 nm)和一个最大发射波长(340 nm)所组成,属于传统微生物类腐殖质的混合物^[28];此结果与之前的研究结论相一致^[29].

热分层期沉积物中有机物各组分的荧光强度变化情况如图 2(a) 所示. 从中可知,热分层期沉积物中相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 有机物的总荧光强度相对高于其它相对分子质量有机物的总荧光强度,



(a) 荧光强度分布; (b) 荧光组分的相对比例

图2 水库热分层期沉积物中有机物的荧光强度分布及荧光组分的相对比例

Fig. 2 Distribution of fluorescence intensity and relative proportion of fluorescent components in organic matter in sediments during the thermal stratification of reservoirs

此结果与相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物所占的比例最高相一致(图 1)。同时组分 C2 的荧光强度普遍高于组分 C1 和 C3 ($P < 0.05$), 可知沉积物中有机物主要是由类色氨酸和氨基酸类的物质所组成。观察到 7 月时有机物的荧光强度显著高于其它月 ($P < 0.05$), 这可能是由于水库中扬水曝气系统的运行, 提供良好的好氧及混合条件, 从而导致更复杂的迁移转化、微生物作用等过程, 使得沉积物中的有机物含量明显增加^[29]。

热分层期沉积物中有机物各组分的相对含量如图 2(b) 所示。可以看出, 自 5 ~ 7 月以来, 组分 C2 有机物的相对丰度最高, 分别为 53.48%、43.95% 和 51.08%, 与上述结果相一致。而 8 月却有一定的下降, 其具体原因可能是由于环境因素的不同引起的。在 5 月时, 相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的有机物的组分 C2 相对丰度为 77.98%, 高于相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物的组分 C2 的相对丰度(59.38%) ($P < 0.05$), 其它月也有相类似的结论。可知, 相对分子质量越小, 组分 C2 所占的比例越大, 造成这一结果的原因可能是组分 C2 所代表的类色氨酸和氨基酸物质, 其相对分子质量较小的^[23]。

结果表明, 水源水库热分层期沉积物中有机物中组分 C2(类色氨酸和氨基酸物质)所占比例较高。研究报道类色氨酸一般来源于生物活动, 可知沉积物中有机物的生物活动较为丰富^[30]。相比于 5 ~ 8 月, 可知 7 月时沉积物中有机物生物活动最为丰富; 相比于不同相对分子质量, 微生物在相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的有机物中其活性高于相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物, 与之前所报道的相对分子质量较小的有机物适合微生物的生长相

一致^[15,32]。

2.3 好氧反硝化细菌的氮去除特性

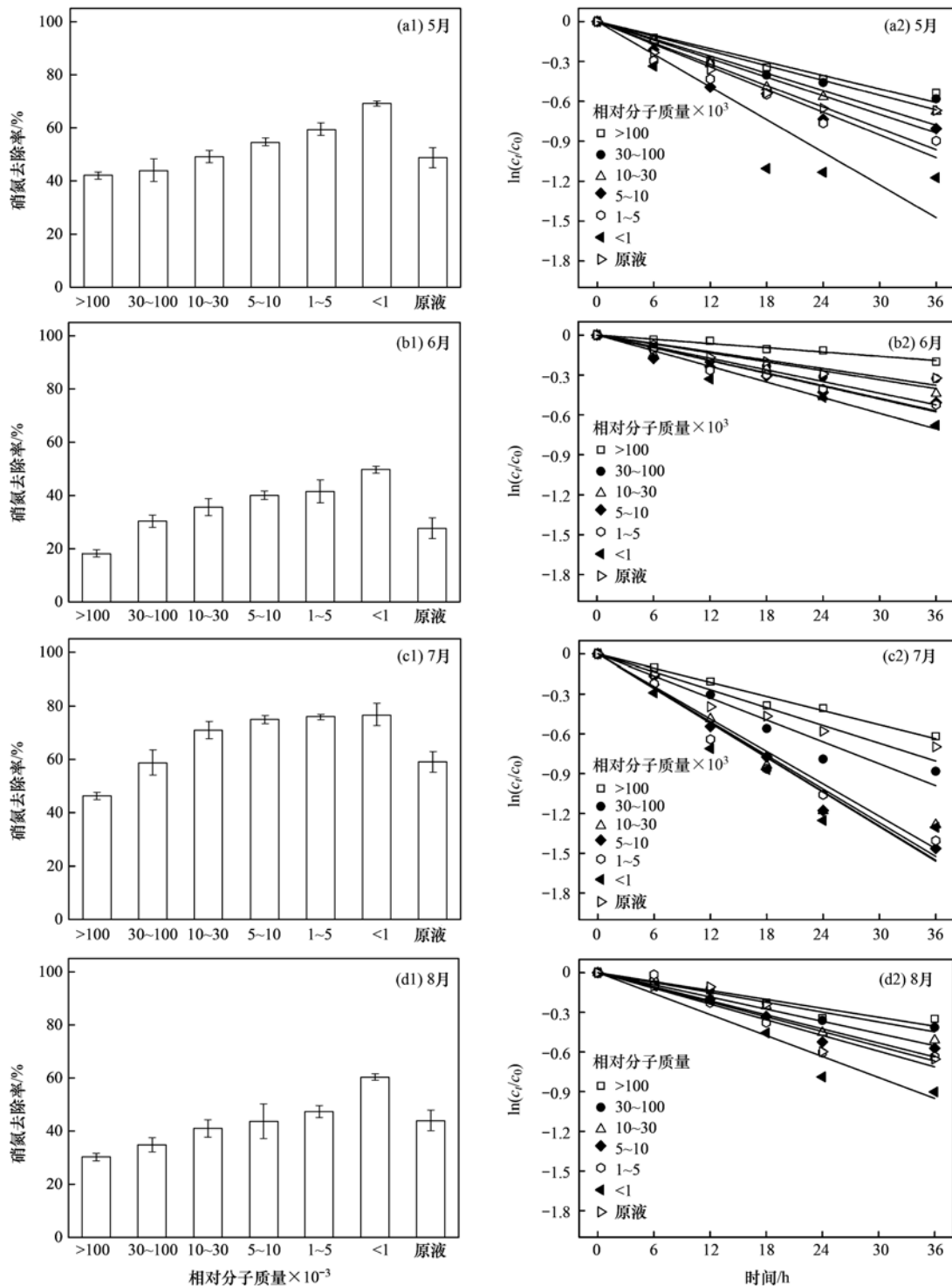
图 3 显示了菌株 WGX-9 以热分层期沉积物中不同相对分子质量的有机物为碳源时硝氮的去除性能。图 3(a) 为硝氮的去除性能, 图 3(b) 和表 1 为硝氮的降解动力学参数(一级动力学模型)。如图 3(a) 所示, 可以观察到当达到稳定期时, 以热分层期的沉积物有机物(5 ~ 8 月)为碳源时, 随着相对分子质量的降低, 硝氮的去除效率均显示出增加的趋势 ($P < 0.05$); 硝氮的降解动力学常数也有相同的趋势, 在相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 时达到最大值[图 3(b) 和表 1]。可见, 相对分子质量小的有机物促进好氧反硝化细菌的氮去除性能, 与之前的研究结果相一致^[15]。

当以 5 ~ 8 月的沉积物中有机物为碳源时, 在反硝化达到稳定时, 硝氮去除效率分别为: 48.76%、27.64%、59.03% 和 39.58%; 硝氮的降解动力学常数分别为: 0.023、0.010、0.024 和 0.019 h^{-1} 。结果表明当以 7 月沉积物中有机物为碳源时, 好氧反硝化细菌显示出较好的氮去除性能 ($P < 0.05$)。造成这种现象可能是由于 7 月有机物的相对分子质量分布相对较小且有机物的含量相对较高, 从而促进了好氧反硝化细菌的脱氮特性^[33]。

以上结果表明, 沉积物中的有机物一定程度上可以促进菌株 WGX-9 的脱氮特性, 特别是相对分子质量较小且含量较为丰富的有机物, 此结论与之前的研究结果相一致^[13,15]。但是, 其硝氮去除效率相比于以乙酸钠为碳源时的硝氮去除效率(86.56%)要低^[15], 但仍具有较强的氮去除性能(39.58% ~ 59.03%), 可见菌株 WGX-9 有一定的应用潜力来控制水源水库热分层期水质的周期性污染。

表 1 动力学参数与回归系数的结果

Table 1 Regression results of kinetic parameters and regression coefficients (R^2)							
月份	相对分子质量 × 10 ³	k/h^{-1}	R^2	月份	相对分子质量 × 10 ³	k/h^{-1}	R^2
5	> 100	0.017	0.972	6	> 100	0.005	0.986
	30 ~ 100	0.018	0.968		30 ~ 100	0.011	0.943
	10 ~ 30	0.022	0.971		10 ~ 30	0.015	0.946
	5 ~ 10	0.027	0.953		5 ~ 10	0.016	0.970
	1 ~ 5	0.018	0.970		1 ~ 5	0.016	0.982
	< 1	0.041	0.920		< 1	0.020	0.984
	原液	0.023	0.939		原液	0.010	0.963
7	> 100	0.018	0.991	8	> 100	0.011	0.958
	30 ~ 100	0.028	0.978		30 ~ 100	0.012	0.980
	10 ~ 30	0.041	0.974		10 ~ 30	0.015	0.975
	5 ~ 10	0.043	0.990		5 ~ 10	0.018	0.977
	1 ~ 5	0.042	0.987		1 ~ 5	0.020	0.957
	< 1	0.043	0.960		< 1	0.026	0.971
	原液	0.024	0.967		原液	0.019	0.936



(a1) ~ (d1): 硝氮去除率; (a2) ~ (d2): 硝氮降解动力学

图3 菌株 WGx-9 在水库热分层期沉积物中有机物为碳源时氮去除性能及硝氮降解动力学

Fig. 3 Nitrogen removal performance and nitrate degradation kinetics of strain WGx-9 with organic matter in sediments during the thermal stratification of reservoirs as a carbon source

2.4 好氧反硝化细菌的增长及碳去除特性

菌株 WGx-9 以热分层期沉积物中不同相对分子质量有机物为碳源时细菌生长特征及碳去除性能如图4所示。可以看出,在达到稳定期时,随着相对分子质量的降低, D_{600} 和 TOC 的去除效率均显示出增加的趋势,与硝氮去除性能的变化规律相一致。有

研究表明,相对分子质量较小的有机物可以显著促进好氧反硝化细菌的增长及碳去除性能^[34],这与本文的研究结果一致。

同时可以观察到当以热分层期(5~8月)沉积物中有机物为碳源时,在好氧反硝化反应达到稳定时, D_{600} 分别为:0.029、0.023、0.032 和 0.023;

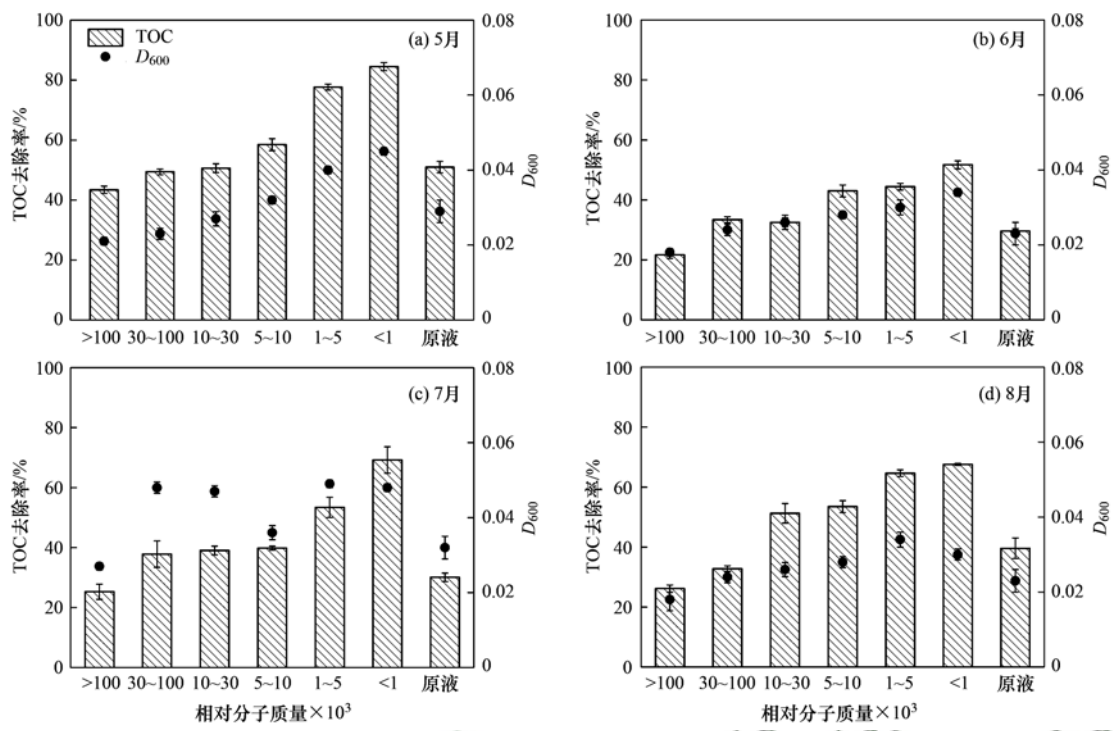


图4 菌株 WGX-9 在水库热分层期沉积物中有机物为碳源时菌株生长性能及碳去除性能
Fig. 4 Growth performance and carbon removal performance of strain WGX-9 with organic matter in sediments during the thermal stratification of reservoirs as a carbon source

TOC 的去除效率分别为: 51.01%、29.56%、30.07%和 38.48%。 D_{600} 的变化与硝氮的变化呈现出相同的趋势,以 7 月的有机物为碳源时,细菌增长效果最好($P < 0.05$);但 TOC 的去除效率却显示出不同的变化规律,当以 5 月的有机物为碳源时,好氧反硝化细菌却显示出较好的碳去除性能($P < 0.05$).推测原因可能是水库水体中环境因素变化较为复杂,从而导致沉积物中有机物和微生物的含量有所不同。

热分层期沉积物中有机物为碳源时, D_{600} 与 TOC 的去除效率之间的相关性如图 5 所示.高相关系数(R^2)进一步证实了 TOC 的去除除了好氧反硝化过程中作为电子供体的部分外还有菌株 WGX-9 的同化作用.斜率(k)表示消耗单位质量 TOC 所产生的生物量,即 TOC 与 D_{600} 的转换效率.相对较高的 k 值表明细菌同化在好氧反硝化碳去除过程中起着重要的作用.当以 7 月的有机物为碳源时, k 显示出相对其它月的最大值($k = 0.00072$, $P < 0.05$),表明 7 月的有机物对于好氧反硝化细菌 WGX-9 的生长有显著的促进作用.造成这种现象可能是因为 7 月的有机物在组分 C2(类色氨酸和氨基酸物质)显示出较高的含量,且研究表明,类色氨酸类的有机物在生物降解过程中,容易被微生物所利用^[35].综上,菌株 WGX-9 更倾向于利用 7 月的有机物来进行增值.5 月的有机物为碳源时, k 相对较小($k =$

0.00039),但其 TOC 去除效率却较高,推测可能是由于在反硝化过程中,作为电子供体的碳源所占的比例要高于作为能源物质的比例。

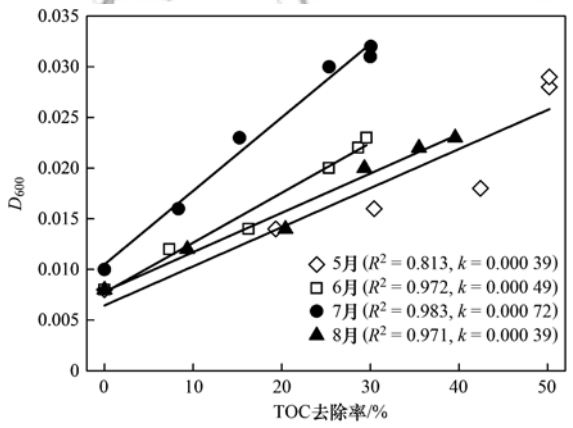


图5 沉积物中有机物原液为碳源时 TOC 去除率和 D_{600} 的相关性

Fig. 5 Correlation curve between the removal efficiency of TOC and D_{600} with organic matter in sediments during the thermal stratification of reservoirs as a carbon source

结果表明,菌株 WGX-9 的好氧反硝化过程中,5 月有机物显示出较好的作为电子供体的特征,而 7 月的有机物却表现出较好的作为能源物质的性能. Jia 等^[13]在研究好氧反硝化过程中的电子转移途径时发现,碳源的氧化还原电势及有机物的相对分子质量使得电子向硝酸盐呼吸链的转移存在差异.因此,沉积物中有机物由于其复杂的结构及含量,使得

其作为好氧反硝化过程的碳源时,表现出不同的电子转移路径.

2.5 不同类型碳源对好氧反硝化细菌的氮去除特性

反硝化作用本质上是碳源作为电子供体的氧化

还原过程,不同类型的碳源对脱氮速率和脱氮动力学有很大的影响. 当不同类型(天然有机物、藻类有机物、实际水库源水和沉积物中有机物)有机物为碳源时,菌株 WGX-9 的硝氮去除效率、硝氮去除速率和 $\Delta\text{TOC}/\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}$ 如表 2 所示.

表 2 不同类型有机物对好氧反硝化细菌 WGX-9 脱氮特性的影响

Table 2 Effects of different types of organic matter on denitrification characteristics of strain WGX-9

项目		硝氮去除效率/%	硝氮去除速率/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	$\Delta\text{TOC}/\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}$
天然有机物	腐殖酸	16.50	0.034	9.37
	富里酸	19.04	0.036	12.04
藻类胞外有机物	铜绿微囊藻	36.00	0.080	10.87
	小球藻	45.00	0.088	12.31
藻类胞内有机物	铜绿微囊藻	25.20	0.075	21.24
	小球藻	30.98	0.066	11.51
实际水库源水	2019 年 1 月	27.34	0.030	3.20
	2019 年 4 月	27.27	0.030	3.26
	2019 年 6 月	22.34	0.024	8.70
	2019 年 7 月	35.21	0.039	5.21
沉积物中的有机物	2019 年 5 月	48.76	0.316	1.64
	2019 年 6 月	27.64	0.170	1.74
	2019 年 7 月	59.03	0.402	1.28
	2019 年 8 月	39.58	0.305	2.47

可以看出,当藻类有机物及沉积物中的有机物为碳源时,硝氮的去除效率较高(在 29.20% ~ 59.03% 范围内);硝氮的去除速率也较高,为 $0.080 \sim 0.289 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,明显高于天然有机物和水库源水为碳源时 16.50% ~ 35.20% 的硝氮去除效率和 $0.035 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右的硝氮去除速率. 这一现象可以解释为:藻类有机物较好地生物利用性及较低的相对分子质量分布促进了好氧反硝化菌株的脱氮性能^[36];而沉积物中的有机物由于较为丰富的类蛋白含量,加速了好氧反硝化菌株的氮去除性能;对于天然有机物,较低的氮去除速率可能是由于其组成成分较为单一,均为微生物难利用的相对分子质量较大的腐殖酸/富里酸物质^[37];实际水库源水由于较低的碳、氮含量和有机物的含量,使得好氧反硝化菌株的氮去除性能受到明显的抑制.

有研究报道指出^[38],好氧反硝化过程中,理论上 $\Delta\text{COD}/\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}$ 值为 2.86 (即 $\Delta\text{TOC}/\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} = 7.60$). 由表 2 可以得出,当沉积物中有机物为碳源时, $\Delta\text{TOC}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 较小,约为 1.64 ~ 2.48 的范围内,低于已经报道的低温贫营养好氧反硝化菌株 HITLi7^T ($\Delta\text{TOC}/\text{NO}_3^- \text{-N} = 4.128$)^[39]. 当以天然有机物和藻类有机物为碳源时, $\Delta\text{TOC}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 相对较高,在 9.37 ~ 21.34 范围内. 造成这种现象原因可能是由于菌株 WGX-9 是从水源水库沉积物中筛分得出,对水源水及沉积物中有机物有较好的适应性,可

以更好地利用其中的碳源来进行反硝化脱氮. 而人工配置的天然有机物和藻类有机物去除相同的氮则需要更多的有机物.

综上,当沉积物中有机物为好氧反硝化细菌的碳源时,其氮去除性能高于以水库中存在的其它有机物,这可能是由于沉积物有机物的含量较为丰富且相对分子质量分布相对较为均匀. 因此,利用沉积物中有机物作为碳源来进行好氧反硝化细菌的培养及驯化,对于筛分出适应水源水库的高效好氧反硝化细菌有一定的借鉴意义.

3 结论

(1) 水源水库在热分层期,沉积物中相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物所占比例较高,相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的有机物所占的比例较低;相比于不同月份有机物的相对分子质量分布,7 月时沉积物中相对分子质量大的有机物所占的比例最低 (44.62%),有机物的相对分子质量分布较为均匀,显示出较小的相对分子质量.

(2) 运用 PARAFAC 模型解析出水源水库在热分层期,沉积物中有机物可分为陆地类腐殖质组分 C1 (250 nm, 425 nm),类色氨酸和氨基酸组分 C2 (230 nm/280 nm, 322 nm) 和传统微生物类腐殖质的混合物 C3 (250 nm, 340 nm),其中色氨酸和氨基酸类的物质(组分 C2) 所占比例较高;同时在 7 月

时显示出较大的总荧光强度。

(3) 菌株 WGX-9 的好氧反硝化过程中, 5 月有有机物显示出较好的作为电子供体的特征; 而 7 月的有机物却表现出较好的作为能源物质的性能, 同时使得好氧反硝化细菌 WGX-9 显示出较好的氮去除效率。可能是由于扬水曝气系统在 6 月 10~28 日的运行, 提供了良好的好氧及混合条件, 从而导致更复杂的微生物作用。

(4) 相比较不同类型的实际水体中的有机物(天然有机物、藻类有机物、水源水库的实际水体), 沉积物中的有机物为碳源时, 可以较好地促进菌株 WGX-9 的好氧反硝化性能; 硝氮的去除效率较高, 最高可为 59.03%; 硝氮去除速率最大为 $0.402 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$; $\Delta\text{TOC}/\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 较小, 在 1.64~2.476 范围内。

参考文献:

- [1] Li X, Huang T L, Ma W X, *et al.* Effects of rainfall patterns on water quality in a stratified reservoir subject to eutrophication: Implications for management [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **521-522**: 27-36.
- [2] 黄廷林. 水源水库水质污染原位控制与改善是饮用水水质安全保障的首要前提[J]. *给水排水*, 2017, **43**(1): 1-3, 69.
- [3] Huang Y W, Yang C, Wen C C, *et al.* S-type dissolved oxygen distribution along water depth in a canyon-shaped and algae blooming water source reservoir: reasons and control [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(6): 987.
- [4] Liu M Z, Ma J R, Li K, *et al.* Strong turbulence benefits toxic and colonial cyanobacteria in water: a potential way of climate change impact on the expansion of harmful algal blooms [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **670**: 613-622.
- [5] 王晨旭, 黄廷林, 李楠, 等. 人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2166-2176.
Wang C X, Huang T L, Li N, *et al.* Effect of artificial mixing on temporal and spatial succession of algae community structure in Jinpen Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2166-2176.
- [6] Ma T, Chen Q, Gui M Y, *et al.* Simultaneous denitrification and phosphorus removal by *Agrobacterium* sp. LAD9 under varying oxygen concentration [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(7): 3337-3346.
- [7] 闫苗苗, 张海涵, 钊珍芳, 等. 生物脱氮技术中好氧反硝化细菌的代谢及应用研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(3): 668-676.
Yan M M, Zhang H H, Zhao Z F, *et al.* Research progress of metabolism and application of aerobic denitrifying bacteria in biological denitrification technology [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(3): 668-676.
- [8] 周石磊. 混合充氧强化水源水库贫营养好氧反硝化菌的脱氮特性及技术应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
Zhou S L. Nitrogen removal characteristics of indigenous-oligotrophic aerobic denitrifiers via in situ oxygen enhancement and technology application research[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [9] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis[J]. *Marine Chemistry*, 1995, **49**(2-3): 81-115.
- [10] Zhang H H, Zhao Z F, Li S L, *et al.* Nitrogen removal by mix-cultured aerobic denitrifying bacteria isolated by ultrasound: performance, co-occurrence pattern and wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **372**: 26-36.
- [11] Ji B, Yang K, Zhu L, *et al.* Aerobic denitrification: a review of important advances of the last 30 Years [J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2015, **20**(4): 643-651.
- [12] 郭焱, 张召基, 陈少华. 好氧反硝化微生物学机理与应用研究进展[J]. *微生物学通报*, 2016, **43**(11): 2480-2487.
Guo Y, Zhang Z J, Chen S H. Microbiology and potential application of aerobic denitrification: a review [J]. *Microbiology China*, 2016, **43**(11): 2480-2487.
- [13] Jia Y T, Zhou M M, Chen Y C, *et al.* Carbon selection for nitrogen degradation pathway by *Stenotrophomonas maltophilia*: based on the balances of nitrogen, carbon and electron [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **294**: 122114.
- [14] 文刚, 王彤, 黄廷林, 等. 贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2339-2348.
Wen G, Wang T, Huang T L, *et al.* Nitrogen removal performance and nitrogen/carbon balance of oligotrophic aerobic denitrifiers [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2339-2348.
- [15] Wen G, Wang T, Li K, *et al.* Aerobic denitrification performance of strain *Acinetobacter johnsonii* WGX-9 using different natural organic matter as carbon source: effect of molecular weight [J]. *Water Research*, 2019, **164**: 114956.
- [16] 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 等. 湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2431-2437.
Kang P L, Zhang H H, Huang T L, *et al.* Denitrification characteristics and community structure of aerobic denitrifiers from lake and reservoir sediments [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2431-2437.
- [17] Li N, Huang T L, Mao X J, *et al.* Controlling reduced iron and manganese in a drinking water reservoir by hypolimnetic aeration and artificial destratification [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 497-507.
- [18] Wentzky V C, Frassl M A, Rinke K, *et al.* Metalimnetic oxygen minimum and the presence of *Planktothrix rubescens* in a low-nutrient drinking water reservoir [J]. *Water Research*, 2019, **148**: 208-218.
- [19] 王亚平, 黄廷林, 周子振, 等. 金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价[J]. *环境化学*, 2017, **36**(3): 659-665.
Wang Y P, Huang T L, Zhou Z Z, *et al.* Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen Reservoir [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(3): 659-665.
- [20] 巨拓, 黄廷林, 马卫星, 等. 稳定分层水库水质的季节性变化特征及扬水曝气水质改善[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 819-828.
- [21] Ju T, Huang T L, Ma W X, *et al.* Characteristics of seasonal variation and water-lifting aerator improvement of water quality in a steady stratified reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 819-828.
- [21] Chen M L, Hur J. Pre-treatments, characteristics, and biogeochemical dynamics of dissolved organic matter in sediments: a review [J]. *Water Research*, 2015, **79**: 10-25.

- [22] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [23] Zepp R G, Sheldon W M, Moran M A. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters: correction method for eliminating Rayleigh and Raman scattering peaks in excitation-emission matrices[J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 15-36.
- [24] Zhou Y Q, Shi K, Zhang Y L, *et al.* Fluorescence peak integration ratio $I_C: I_T$ as a new potential indicator tracing the compositional changes in chromophoric dissolved organic matter [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1588-1598.
- [25] Su J F, Xue L, Huang T L, *et al.* Kinetic analysis of denitrification coupled with Cd(II) removal by *Cupriavidus* sp. CCI and its removal mechanism[J]. *Research in Microbiology*, 2019, **170**(4-5): 214-221.
- [26] Hua L C, Chao S J, Huang C. Fluorescent and molecular weight dependence of THM and HAA formation from intracellular algogenic organic matter (IOM) [J]. *Water Research*, 2019, **148**: 231-238.
- [27] Carstea E M, Baker A, Bieroza M, *et al.* Characterisation of dissolved organic matter fluorescence properties by PARAFAC analysis and thermal quenching[J]. *Water Research*, 2014, **61**: 152-161.
- [28] Wang Y, Zhang D, Shen Z Y, *et al.* Characterization and spacial distribution variability of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yangtze Estuary [J]. *Chemosphere*, 2014, **95**: 353-362.
- [29] Hur J, Lee B M, Shin K H. Spectroscopic characterization of dissolved organic matter isolates from sediments and the association with phenanthrene binding affinity [J]. *Chemosphere*, 2014, **111**: 450-457.
- [30] Zhou S L, Xia C, Huang T L, *et al.* Seasonal variation of potential denitrification rate and enhanced denitrification performance via water-lifting aeration technology in a stratified reservoir—A case study of Zhoucun reservoir[J]. *Chemosphere*, 2018, **211**: 1123-1136.
- [31] 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.
- [32] Yang M, Lu D W, Qin B D, *et al.* Highly efficient nitrogen removal of a coldness-resistant and low nutrient needed bacterium, *Janthinobacterium* sp. M-11 [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **256**: 366-373.
- [33] Zhang H H, Zhao Z F, Kang P L, *et al.* Biological nitrogen removal and metabolic characteristics of a novel aerobic denitrifying fungus *Hanseniaspora uvarum* strain KPL108 [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **267**: 569-577.
- [34] Ellington M J K, Bhakoo K K, Sawers G, *et al.* Hierarchy of carbon source selection in *Paracoccus pantotrophus*: strict correlation between reduction state of the carbon substrate and aerobic expression of the nap operon[J]. *Journal of Bacteriology*, 2002, **184**(17): 4767-4774.
- [35] Lee M H, Osburn C L, Shin K H, *et al.* New insight into the applicability of spectroscopic indices for dissolved organic matter (DOM) source discrimination in aquatic systems affected by biogeochemical processes [J]. *Water Research*, 2018, **147**: 164-176.
- [36] Li L, Gao N Y, Deng Y, *et al.* Characterization of intracellular & extracellular algae organic matters (AOM) of *Microcystis aeruginosa* and formation of AOM-associated disinfection byproducts and odor & taste compounds [J]. *Water Research*, 2012, **46**(4): 1233-1240.
- [37] Kolehmainen R E, Langwaldt J H, Puhakka J A. Natural organic matter (NOM) removal and structural changes in the bacterial community during artificial groundwater recharge with humic lake water[J]. *Water Research*, 2007, **41**(12): 2715-2725.
- [38] Wong B T, Lee D J. Denitrifying sulfide removal and carbon methanogenesis in a mesophilic, methanogenic culture [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(12): 6673-6679.
- [39] Zheng Z J, Zhang D Y, Li W G, *et al.* Substrates removal and growth kinetic characteristics of a heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacterium, *Acinetobacter harbinensis* HITLi7^T at 2°C [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **259**: 286-293.

CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta	 ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir ...	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section	 XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China	 GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism	 PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source	 RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules	 ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bathriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area	 JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)