

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                           |                                                                           |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM <sub>2.5</sub> 影响 .....             | 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)                                             |
| 京津冀内陆平原区 PM <sub>2.5</sub> 浓度时空变化定量模拟 .....               | 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)                                          |
| 成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 .....                            | 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)                                              |
| 华山地区 PM <sub>2.5</sub> 中无机离子垂直分布特征 .....                  | 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)                                       |
| 烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM <sub>2.5</sub> ) 成分图谱 .....           | 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)                                                      |
| 长三角地区中小燃煤锅炉 PM <sub>2.5</sub> 成分谱特征 .....                 | 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)                                     |
| 民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 .....                                 | 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)                           |
| 冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 .....                           | 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)                                                  |
| 青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 .....                                  | 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)                                             |
| 辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 .....                                | 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)                                         |
| 典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 .....                         | 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)                                                    |
| 苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 .....                       | 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)                                                 |
| 上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 .....                                | 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)                                                  |
| 城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例 .....                 | 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)                                            |
| 艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 .....                                  | 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)                |
| 三峡澎溪河水华期间水体 CH <sub>4</sub> 浓度及其通量变化特征初探 .....            | 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)                                                   |
| 漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 .....                              | 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)                                               |
| 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 .....                               | 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)                                                  |
| 黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 .....                           | 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)                                            |
| 白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 .....                              | 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)                              |
| 典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 .....                            | 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)                                                       |
| 河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制 .....                         | 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)                                 |
| 蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 .....                               | 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)                                       |
| 真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 .....                                   | 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)                                               |
| 热活化过硫酸盐降解三氯生 .....                                        | 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)                                                 |
| 水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 .....                               | 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)                                        |
| 海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 .....                    | 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)                                     |
| 外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 .....                              | 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)                                              |
| 硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 .....                                | 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)                                         |
| 分段进水对改良 A <sup>2</sup> /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 .....       | 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)                                    |
| 不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 .....                          | 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)                                     |
| 智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 .....                 | 徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)                                                 |
| 温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 .....                    | 李玥, 胡奇, 高文 (1731)                                                         |
| 污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除 .....                                    | 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)                                                  |
| 零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 .....                       | 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)                                          |
| 环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 .....                            | 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)                                         |
| 后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 .....                                  | 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)                                                        |
| 复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 .....              | 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)                                              |
| 氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 .....                               | 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)                                            |
| 1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径 .....                               | 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)                                     |
| 铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 .....                                | 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)                                                  |
| 垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 .....                           | 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)                         |
| 黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 .....                             | 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)                                                 |
| 河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究 .....                      | 丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)                                   |
| 藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 .....                        | 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)                           |
| 深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 .....                              | 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)                                                 |
| 香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估 .....                | 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)                                                       |
| 偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例 .....                      | 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)                            |
| 西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 .....                            | 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)                                              |
| 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 .....                                  | 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)                                     |
| 长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 .....                                 | 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)                                                       |
| 三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 .....                                | 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)                               |
| 稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 .....                                   | 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)                                                      |
| 钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响 .....                    | 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926) |
| 外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 .....                              | 贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)                              |
| 模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 .....                           | 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)                                                  |
| 紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 .....                        | 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)                                                       |
| 季节非对称升温对喀斯特土壤 CO <sub>2</sub> 释放的影响 .....                 | 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)                                              |
| 《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925) |                                                                           |

# 氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化

贺雪濛<sup>1</sup>, 丁丽丽<sup>1\*</sup>, 张璐璐<sup>1</sup>, 顾卓江<sup>2</sup>, 任洪强<sup>1\*</sup>

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 2. 浙江海正药业有限公司, 杭州 311404)

**摘要:** 采用高通量测序技术(16S rRNA)、高效液相色谱(HPLC)等方法, 重点比较了不同氮磷失衡条件下膨胀污泥性能及群落结构(含膨胀菌)的变化。结果表明, 以膨胀污泥为接种污泥(A/O工艺), 经过一段时间培养单独限氮( $R_N$ )组的沉降性能可恢复到  $SVI < 150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ , 单独限磷( $R_P$ )组  $SVI$  指数呈现相对较弱的改善趋势; 正常 C/N/P(100:5:1)条件的  $R_0$  会导致污泥  $SVI$  指数最高( $SVI = 1496 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 其次为同时限制氮磷组( $R_{NP}$ )。正常营养条件下膨胀污泥脂多糖相对含量(LPS/MLVSS)与沉降性能  $SVI$  的皮尔逊相关性分析结果存在显著负相关( $r = -0.625$ ,  $P < 0.05$ ); 营养限制条件下污泥(膨胀期) LPS 对生物量的指示性更为准确。 *Thiothrix* 为 4 组反应器中主导膨胀菌, PCoA 的结果显示 II、III 阶段中存在氮限制的组( $R_{NP}$ 、 $R_N$ )群落迁移变化较大, RDA 结果显示 *Thiothrix* 与污泥沉降性能及比耗氧速率呈现显著相关。

**关键词:** 膨胀污泥; 氮磷失衡; 沉降性能; 脂多糖(LPS); 群落结构

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1782-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708094

## Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances

HE Xue-meng<sup>1</sup>, DING Li-li<sup>1\*</sup>, ZHANG Lu-lu<sup>1</sup>, GU Zhuo-jiang<sup>2</sup>, REN Hong-qiang<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Hisun Pharmaceutical Company Limited, Hangzhou 311404, China)

**Abstract:** In this paper, the performance, characteristics of the bulking sludge, and the variations in the microbial community (including the bulking bacteria) under different nitrogen and phosphorus imbalances were compared, using high-throughput sequencing (16S rRNA) and the high performance liquid chromatography (HPLC) technology. The results showed that after seeding bulking sludge in the A/O process and operating for a period of time, the sludge settleability of the nitrogen limitation alone reactor ( $R_N$ ) could recover to normal [sludge volume index ( $SVI$ )  $< 150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ], while the  $SVI$  of the phosphorus limitation alone reactor ( $R_P$ ) improved slightly; the control reactor ( $R_0$ , C/N/P = 100/5/1) exhibited the highest  $SVI$  index ( $SVI = 1496 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ), followed by the reactor of simultaneous nitrogen and phosphorus limitations ( $R_{NP}$ ). Under normal nutritional conditions, Pearson correlation analysis showed a significant negative correlation between the lipopolysaccharide (LPS) relative content (LPS/MLVSS) and the settleability of bulking sludge ( $r = -0.625$ ,  $P < 0.05$ ), while under nutrient limitation conditions, LPS showed high accuracy in reflecting the biomass of the activated sludge. *Thiothrix* was the dominant bulking bacteria in all the reactors. PCoA analysis showed that the migration of the community in the reactors experienced nitrogen limitation ( $R_{NP}$ ,  $R_N$ ) changes greatly during the stages II and III, while RDA analysis showed that the correlation of *Thiothrix* with the settling performance and oxygen consumption rate was significant.

**Key words:** bulking sludge; nitrogen and phosphorus imbalance; settleability; lipopolysaccharide (LPS); microbial community

污泥膨胀是污水处理厂运行中的常见状况, 具有高发性和危害性, 典型的污泥膨胀包括丝状细菌膨胀和非丝状细菌膨胀(黏性膨胀)。影响污泥膨胀的主要因素有环境条件(DO、温度、pH)、操作条件(营养物质比例、有机负荷、废水组分、污泥负荷、泥龄)和有毒物质(金属元素、毒性物质、硫化物浓度)等<sup>[1-7]</sup>, 但污泥膨胀的机制复杂尚不明确, 尤其是营养物质(N、P)失衡条件下发现关于是否会发生膨胀存在着矛盾现象。Switzenbaum等<sup>[8]</sup>曾调研美国马萨诸塞州发现34%的AS工艺水厂(83座)由于营养物缺乏引发膨胀; Blackbeard等<sup>[9]</sup>曾调研南非大约33个水厂中有27个因氮或磷缺乏

而有污泥膨胀问题。此外, 文献调研表明我国某些工业废水氮磷营养条件失衡会导致污泥膨胀问题, 陈冰照等<sup>[10]</sup>报道烤鳗废水中N、P营养元素同时缺乏时(C:N:P = 100:1.7:0.3)会引起丝状菌过量生长的污泥膨胀; 周雪飞<sup>[11]</sup>报道N缺乏、P充足时, 武进某精细化工厂废水(几乎无N)中发生了大量丝状菌繁殖, 而田口广<sup>[12]</sup>报道的面包酵母废液和

收稿日期: 2017-08-12; 修订日期: 2017-09-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC08B04)

作者简介: 贺雪濛(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: Sunnyhxm@126.com

\* 通信作者, E-mail: dinglili@nju.edu.cn; hqren@nju.edu.cn

高春娣<sup>[13]</sup>报道的啤酒废水中 $[BOD:N = 100:(2 \sim 3)]$ (轻微)、 $BOD:N = 100:0.94$ (严重)]常发生高含水率黏性菌胶团的过量生长从而引发非丝状菌膨胀.但是氮磷失衡不会导致污泥膨胀的现象也常见报道.陈滢等<sup>[14]</sup>报道采用序批式活性污泥工艺(SBR)处理啤酒废水时,通过人为添加氯化铵和磷酸二氢钾改变进水营养比,结果表明 $BOD_5:N:P$ 为 $100:5:1$ 、 $100:5:0.8$ 和 $100:4:0.8$ 时,污泥沉降性能良好;于振波<sup>[15]</sup>报道在营养失衡 $[N、P$ 同时缺乏( $C:N:P = 100:0.5:0.1$ ), $N$ 缺乏 $P$ 充足( $C:N:P = 100:(0.25 \sim 2):3$ ), $N$ 充足 $P$ 缺乏( $C:N:P = 100:15:0.6$ )]条件下,以乙酸钠为碳源模拟的人工配水为进水的活性污泥系统仍能保持良好的沉降性能;Wanner等<sup>[16]</sup>的研究发现,在膨胀的污泥中通常磷含量较少,当 $P/MLSS < 3\%$ 时, $SVI$ 升高,易发生污泥膨胀,反之,则很少引发膨胀.

目前污泥沉降指数( $SVI$ )是判断污泥膨胀发生的主要指标(通常 $SVI > 150 mL \cdot g^{-1}$ 被视为膨胀发生),其他生理生化指标如胞外聚合物(EPS)和Zeta电位,其增加均会导致污泥 $SVI$ 上升,沉降性能恶化<sup>[17]</sup>;SOUR作为表征活性污泥的活性指标,李志华等<sup>[18]</sup>曾报道可通过连续监测SOUR对污泥膨胀进行早期预警.然而,污泥膨胀问题成因复杂,现有的宏观沉降性能并不能准确揭示其膨胀机制,因此迫切需要引入新的特征指标,脂多糖(LPS)作为一种存在于革兰氏阴性菌细胞壁外膜外叶中的生物大分子<sup>[19]</sup>,苏文博<sup>[20]</sup>指出在一定程度上可以反映活性污泥的微生物活性,且在饥饿条件下LPS对于活性生物量的指示的准确性方面高于污泥混合液挥发性悬浮固体浓度( $MLVSS$ ),因此本实验引入脂多糖(LPS)这一指标,结合膨胀污泥中的微生物群落,探索膨胀污泥性能及群落随营养条件改变的变化规律.

现阶段,污泥膨胀微生物的研究主要集中在膨胀细菌形态及生理生化特性<sup>[21]</sup>、污水厂膨胀菌的群落组成<sup>[22]</sup>、膨胀各阶段群落结构变化<sup>[23]</sup>以及不同条件下导致膨胀的不同优势菌等方面<sup>[21,24]</sup>.近5年来我国学者对全世界范围14个不同正常污水厂采集的膨胀污泥和北京某污水厂采集的3个阶段[膨胀发生(12月)-膨胀严重(2月)-膨胀恢复(8月)]的污泥群落分析,为后续对膨胀细菌的研究提供了理论基础<sup>[22,23]</sup>.据报道,目前已被鉴定的污水厂常见的丝状菌种类较多,分布较广,主要集中在Actinobacteria(放线菌门、 $G^+$ ,包括Candidatus M.

parvicella、Tetrasphaera等)、Firmicutes(厚壁菌门、 $G^+$ ,包括Trichococcus、Nostocoida limicola I等)、Proteobacteria(变形菌门、 $G^-$ ,包括Meganema perideroedes、Thiothrix、Leucothrix mucor、type 021N)、Chloroflexi(绿弯菌门、 $G^-$ ,包括Eikelboom morphotype 0803)、Bacteroidetes(拟杆菌门、 $G^-$ ,包括Haliscamenobacter hydrossis)、Planctomycetes(浮霉菌门、 $G^-$ ,包括Nostocoida limicola III-2-singulisphaera)几大门类<sup>[25~34]</sup>.国内外研究结果表明,通常Thiothrix、021N型、1701型、S. natans、H. hydrossis、Haliscamenobacter、N. limicola III等丝状菌在氮磷限制环境中仍能大量生长<sup>[21]</sup>.而针对氮磷失衡下的膨胀研究主要集中在不同条件下的膨胀类型、运行性能以及优势丝状菌上,陈滢等<sup>[14]</sup>通过采用不同的进水氮磷比证明了不同氮磷比条件会造成不同类型的污泥膨胀;张著等<sup>[35]</sup>研究了不同C/N/P比条件下好氧颗粒污泥的膨胀情况;杨雄等<sup>[24]</sup>开始从微生物角度对氮磷缺乏所引发的污泥膨胀问题进行研究,得出了不同氮磷条件下的优势丝状菌;但是,目前从微生物角度探究污泥膨胀问题还存在一些不足:①现阶段对膨胀菌生理生化特性的研究主要是纯培养,包括其形态特征、底物利用速率、适宜生长环境等,但群落结构变化报道较少;②丝状菌和菌胶团对底物(营养物质)的代谢转化规律的具体差异尚未研究清楚,其探究手段有待提升.

本文以膨胀污泥为接种污泥,研究了不同的氮磷限制条件对A/O工艺出水水质(化学需氧量、氨氮)及污泥沉降性能、生理生化性能(比耗氧速率、胞外聚合物、脂多糖)的影响,探讨了微生物群落结构(含膨胀细菌)随时间的变化,以期在实际工程中控制污泥膨胀问题提供理论依据和借鉴.

## 1 材料与方法

### 1.1 反应器的启动与运行

4组A/O工艺的反应器包括厌氧区和好氧区,总有效体积为4 L,其中配制的模拟废水是以无水乙酸钠为碳源,氯化铵为氮源,进水COD为 $400 mg \cdot L^{-1}$ .反应器运行为连续流,水力停留时间为8 h(厌氧区2 h,好氧区6 h),污泥停留时间20 d,进水pH为 $7.8 \pm 0.1$ ,溶解氧控制在 $2 \sim 5 mg \cdot L^{-1}$ ,温度维持在 $(25 \pm 2)^\circ C$ .接种污泥取自南京某污水处理厂,污泥浓度控制在 $(2500 \pm 500) mg \cdot L^{-1}$ ,沉降性能较差( $SVI > 150 mL \cdot g^{-1}$ ).

## 1.2 实验方法

结合城市生活污水的营养比例范围,将实验条件设计为4组( $R_0$ 、 $R_{NP}$ 、 $R_N$ 、 $R_P$ )。反应器运行第I阶段(1~14 d)为驯化期,4组进水营养条件相同,C/N/P比均为100:5:1,COD去除率稳定在95%以上,培养结束时膨胀度均显著上升;第14~48 d(II、III阶段), $R_0$ 保持正常营养比不变,其余3组分别变为同时限制氮磷组 $R_{NP}$ (C:N:P=100:1:0.2)、单独限制磷组 $R_P$ (C:N:P=100:5:0.2)和单独限制氮组 $R_N$ (C:N:P=100:1:1)。实验分两批完成,4月 $R_0$ 、 $R_{NP}$ ,其接种污泥样标记为C1;7月 $R_N$ 、 $R_P$ 实验接种泥样标号C2,均源于相同污水厂。对4组不同氮磷营养条件下反应器基本出水水质指标(化学需氧量、氨氮)及污泥沉降性能、生理生化性能(比好氧速率、胞外聚合物、脂多糖)以及微生物群落结构等进行测定。群落结构分析表明,C1与C2结构组成相近。

## 1.3 分析项目和方法

(1)常规指标测定 污泥浓度(MLSS)、混合液悬浮有机固体浓度(MLVSS)、污泥体积指数(SVI)、COD、 $\text{NH}_4^+$ -N的测定均参照国标法<sup>[36]</sup>。

(2)胞外聚合物(EPS)的提取及测定 本实验中微生物EPS的提取方法为热提法<sup>[37]</sup>,提取过程如下:从活性污泥反应器中取出10 mL混合液,在常温下以4 000 g的速度离心15 min,将上清液倒出,再加入15 mL的超纯水,漩涡振荡以保证充分混匀,然后在80℃的水浴锅中加热15 min,冷却至室温再低温离心12 000 g,15 min,得到的上清液,取出上清液测定EPS。蛋白质的测定方法为BCA试剂盒法<sup>[38]</sup>,多糖的测定方法为硫酸法<sup>[39,40]</sup>。

(3)脂多糖(LPS)浓度的测定<sup>[20]</sup> MDB荧光

标记法。MDB衍生溶液在配制按照Hara等<sup>[41]</sup>的方法,实验使用在高效液相色谱仪型号为安捷伦1200型,色谱柱规格为C8,5  $\mu\text{m}$ ,250×4.6 mm(I.D)。

(4)比耗氧速率(SOUR) 本实验按照Hao等<sup>[42]</sup>的方法测定活性污泥总呼吸速率(TOUR),比耗氧速率基于MLVSS计算得到,即 $\text{TSOUR} = \text{TOUR}/\text{MLVSS}$ 。

(5)微生物群落结构检测 采用16S rRNA基因高通量测序(MiSeq, Illumina)进行检测。污泥样品DNA的提取及PCR扩增采用马思佳等<sup>[43]</sup>报道的方法。经琼脂糖凝胶电泳鉴定PCR产物后,采用纯化试剂盒(Cycle-Pure Kit, OMEGA Bio-tek, Inc.)纯化后送至江苏中宜金大分析检测有限公司进行MiSeq测序。

## 1.4 数据统计与分析

常规水质指标的数据处理采用Origin 8.0软件,MiSeq数据经Sickle及Mothur降噪后,通过RDP分类处理。相关性分析使用的分析软件为SPSS statistics 22.0.0。RDA分析采用Canoco软件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氮磷失衡及污泥膨胀时反应器出水水质变化

图1是进水COD为400  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,不同C/N/P比条件下A/O工艺反应器进出水COD和氨氮浓度变化情况。反应器运行I阶段(1~14 d)为驯化期,进水营养条件相同,C/N/P比均为100:5:1,14 d后改变不同实验组的反应器进水营养条件, $R_0$ 保持正常营养比不变,其余3组分别变为同时限制氮磷组 $R_{NP}$ (C:N:P=100:1:0.2)、单独限制磷组 $R_P$ (C:N:P=100:5:0.2)和单独限制氮组 $R_N$ (C:N:P=100:1:1)。

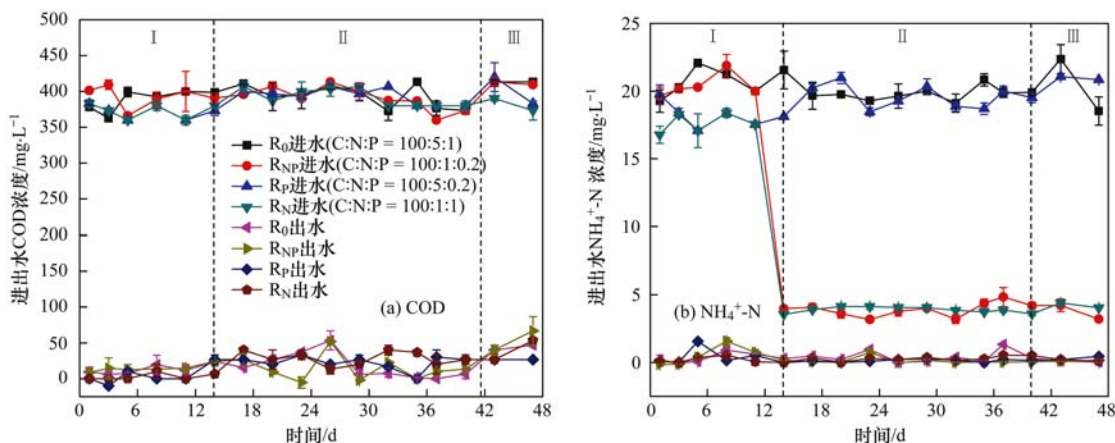


图1 反应器进出水COD和氨氮浓度变化

Fig. 1 Influent and effluent performances of the reactors

由图 1 可见, 经过 I 阶段的驯化期(0 ~ 14 d), 4 组反应器出水 COD 浓度均小于  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 氨氮浓度均小于  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 反应器运行 II (15 ~ 39 d)、III 阶段(40 ~ 48 d), 限制进水氮磷营养条件对反应器出水 COD 和氨氮浓度无显著影响, 4 组反应器出水 COD 和氨氮的浓度整体保持稳定, COD 的浓度范围在  $0 \sim 67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , III 阶段整体略有上升, 氨氮的浓度范围为  $0 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 不同氮磷营养条件下的 4 组反应器 COD 去除率均高于 80%, 氨氮去除率均高于 85%. 随膨胀程度的加重, COD 和氨氮去除率略有下降.

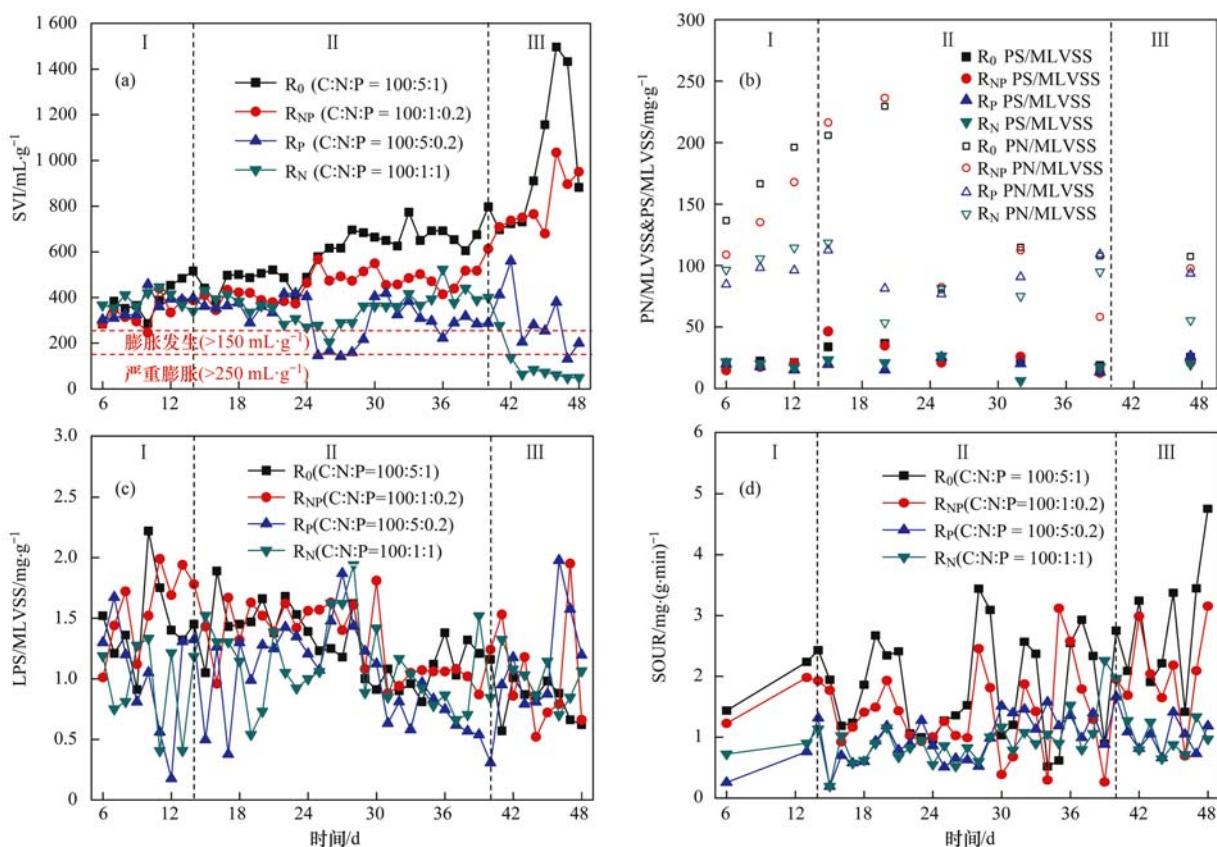
## 2.2 氮磷失衡下膨胀污泥性能变化

图 2 是 A/O 工艺在氮磷失衡及污泥膨胀条件下污泥性能(沉降性能、比耗氧速率、胞外聚合物及脂多糖相对含量)的变化.

由图 2(a)可见, I 阶段(0 ~ 14 d)以膨胀污泥为接种泥源, 进水 C/N/P 比正常(100:5:1), 4 组反应器中污泥 SVI 指数均上升( $340 \sim 515 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 属严重膨胀( $\text{SVI} > 250 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ). 第 II 阶段(15 ~ 39 d)改变 C/N/P 条件后, 正常营养条件

组  $R_0$  和同时限制氮磷组  $R_{NP}$  中污泥的 SVI 指数持续增加( $R_0 > R_{NP}$ ), 而单独限制磷( $R_P$ )或氮( $R_N$ )实验组中污泥沉降性能在 20 ~ 30 d 之间出现了短时间改善,  $R_P$  在 25 ~ 29 d 的  $\text{SVI} < 200 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $R_N$  在 24 ~ 28 d 的  $\text{SVI} < 300 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ . III 阶段(40 ~ 48 d)  $R_0$  和  $R_{NP}$  沉降性能快速恶化,  $\text{SVI} > 1000 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ , 膨胀程度加剧,  $R_P$  和  $R_N$  污泥 SVI 指数整体下降, 42d 后  $R_N$  沉降性能恢复( $\text{SVI} < 150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ). 为了进一步考察不同泥源在营养缺乏条件下的 SVI 恢复效果, 选取两个污水处理厂的污泥作为接种源并实施相同氮缺乏条件, 均发现 SVI 可恢复(数据未列入), 但恢复时间有差异(20 ~ 30 d).

由图 2(b)、2(d)可见污泥 EPS 中蛋白和多糖的相对含量和比耗氧速率(SOUR)变化情况. I 阶段(0 ~ 14 d)结束时, 4 组反应器中污泥蛋白质含量(以  $\text{MLVSS}^{-1}$  计)从  $85 \sim 137 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  持续上升至  $96 \sim 196 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 多糖含量(以  $\text{MLVSS}^{-1}$  计)基本稳定在  $15 \sim 22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 其中  $R_0$ 、 $R_{NP}$  蛋白含量显著性增加. 4 组反应器中活性污泥的 SOUR 均有所上升, 从  $0.4 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$  增加至  $0.8 \sim 2.2$



(a) SVI 指数; (b) 胞外聚合物(EPS)中蛋白多糖相对含量; (c) 脂多糖(LPS)相对含量; (d) 污泥比耗氧速率(以  $\text{O}_2/\text{MLSS}$  计)

图 2 反应器污泥性能变化

Fig. 2 Changes in the sludge characteristics

$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$  (以  $\text{O}_2/\text{MLSS}$  计). 第 II、III 阶段 (15 ~ 48 d), 4 组反应器中污泥多糖含量无明显变化规律, 第 20 d 起  $R_0$  和  $R_{NP}$  中污泥的蛋白含量急剧减少, 文献[35]报道蛋白质中的疏水组分有促进微生物间聚合的作用, 故随着蛋白含量骤减 SVI 指数持续上升.  $R_p$ 、 $R_N$  中蛋白含量在 25 d 起逐渐回升, 对应其在 24 ~ 30 d 间沉降性能的改善. 20 d 起  $R_N$  实验组的蛋白含量整体低于  $R_p$ , 32 d 起  $R_{NP}$  组蛋白含量整体低于  $R_0$ . 整个运行周期中 4 组反应器的污泥活性均有所增加,  $R_0$ 、 $R_{NP}$  比耗氧速率波动较大,  $R_N$ 、 $R_p$  无明显变化.

脂多糖 (LPS) 是一种存在于革兰氏阴性菌细胞壁外膜外叶中的生物大分子<sup>[19]</sup>, 在以细菌为净化和功能中心的活性污泥中广泛存在, 在维持细胞渗透压、抵御抗生素以及病毒方面具有重要作用. 由图 2(c) 可见, 第 I 阶段 (0 ~ 14 d) 驯化结束后, 4 组反应器中污泥中 LPS 相对含量 ( $\text{LPS}/\text{MLVSS}$ ) 达到  $1.2 \sim 1.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , II 阶段 (15 ~ 39 d),  $R_0$  从 22 d 起开始呈下降趋势直至 34 d 后有所回升, 其余 3 个实验组在 27 ~ 30 d 均开始出现下降趋势, 直至 III 阶段 (40 ~ 48 d) 运行结束时,  $R_{NP}$ 、 $R_N$ 、 $R_p$  中脂多糖含量均有所回升,  $R_0$  下降. 整个运行周期中,  $R_0$  和  $R_{NP}$  中脂多糖相对含量整体高于  $R_N$ 、 $R_p$ . 4 组不同营养条件下反应器运行过程中污泥 LPS 含量和 SVI 的皮尔逊相关性分析结果均存在负相关, 其中  $R_0$  呈显著负相关 ( $r = -0.625$ ,  $P < 0.05$ ). 膨胀期 4 组反应器的污泥 MLVSS 浓度和脂多糖含量皮尔逊相关性分别是  $r_0(0.841) > r_{NP}(0.720) > r_p(0.268) > r_N(0.221)$ . 苏文博<sup>[20]</sup>的研究表明 SBR 工艺 N、P 饥饿下会诱导胞内聚合物的产生积累, 从而 LPS 比 MLVSS 对生物量的指示更具准确性. 本实验  $R_0$  组污泥 MLVSS 浓度和 LPS 含量呈显著性相关, 其他实施氮磷限制组相关性较弱, 表明可能有胞内聚合物的产生, 该结论在氮限制组实验中通过对污泥 PHB 相对含量的测定也予以证实 (氮限制条件下, A/O 活性污泥工艺污泥中胞内聚合物 PHB 的相对含量增幅为 3.4% ~ 7.4%, 膨胀期和沉降性能恢复期均保持增加), 与苏文博的研究结果相一致<sup>[20]</sup>, 由此推测 A/O 工艺污泥膨胀条件下, LPS 对生物量的指示具备较强的准确性.

整个运行周期中 4 组反应器活性污泥质量浓度在逐渐地下降, MLSS 由约  $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降至  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 系统膨胀污泥的 LPS 绝对含量要高于非膨胀污泥系统.

## 2.3 微生物群落变化

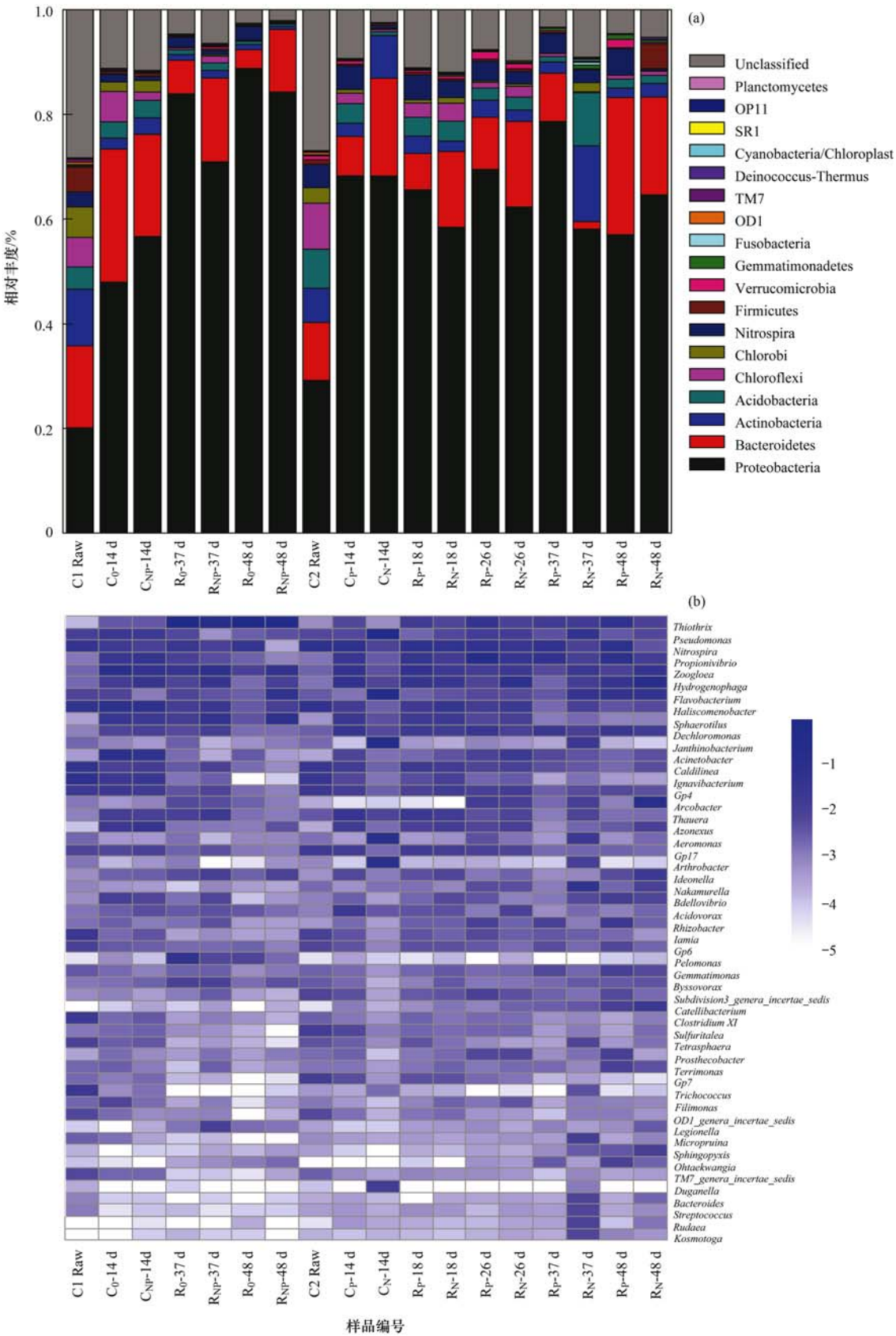
### 2.3.1 氮磷失衡下膨胀污泥门水平上微生物群落变化趋势

图 3(a) 显示了门水平上 4 组反应器内污泥微生物群落结构随时间的变化. 两批次接种污泥 C1 (4 月接种) 和 C2 (7 月接种) 群落中 Proteobacteria (变形菌门) 的相对丰度最高, 其次为 Bacteroidetes (拟杆菌门), 均为常见的膨胀细菌所属门类, Actinobacteria (放线菌门)、Chloroflexi (绿弯菌门)、Chlorobi (绿菌门) 等其他常见膨胀菌门相对丰度均大于 3.0%. 其他相对丰度较高 ( $> 3.0\%$ ) 的非膨胀菌门主要是 Acidobacteria (酸杆菌门) 和 Nitrospira (硝化螺旋菌门).

由图 3(a) 可见, 运行 I 阶段 (0 ~ 14 d), 接种泥源从污水处理厂氧化沟工艺转变成实验室模拟的 A/O 工艺运行培养, 进水营养条件 C/N/P 比均为 100:5:1, 经过两周相同条件的培养, 4 组反应器变形菌门含量均显著提高 (增幅 27% ~ 39%), 7 月接种的泥源 (C2) 整体变形菌门含量略高于 4 月接种泥源 (C1). 第 II 阶段 (15 ~ 39 d), 主要膨胀菌门方面,  $R_0$ 、 $R_{NP}$ 、 $R_p$  中变形菌门相对含量均上升 (增幅 10.4% ~ 36%), 而  $R_N$  中呈下降趋势 (至 37 d 降低 10%);  $R_0$ 、 $R_{NP}$ 、 $R_p$  中其他丰度较低的绿弯菌门、绿菌门、厚壁菌门相对含量均下降, 而  $R_N$  中含量较低且无明显变化规律.  $R_0$ 、 $R_{NP}$  中拟杆菌门、放线菌门相对含量均呈现下降趋势, 而  $R_p$ 、 $R_N$  中变化不明显. 主要的非膨胀菌门方面, 酸杆菌门相对含量在 4 组反应器中整体均呈现下降趋势, 硝化螺旋菌门相对含量在  $R_0$  中呈现上升趋势,  $R_p$ 、 $R_N$  中变化不明显, 但均大于 2%, 与系统始终保持着一定的脱氮能力相一致, 而  $R_{NP}$  中相对含量小于 1%. 第 III 阶段 (40 ~ 48 d), 变形菌门含量在  $R_0$ 、 $R_{NP}$  中仍然持续增加, 但增幅减弱 (4.8% ~ 13.4%),  $R_p$  中降低了 21.7%,  $R_N$  中回升了 6.5%;  $R_0$ 、 $R_{NP}$ 、 $R_p$  中拟杆菌门、放线菌门相对含量均呈现下降趋势, 而  $R_N$  中变化不明显; 4 组反应器中绿弯菌门、绿菌门、厚壁菌门相对含量至 III 阶段运行结束时几乎均趋于 0; 酸杆菌门相对含量在  $R_0$ 、 $R_{NP}$  中几乎趋于 0, 而在  $R_p$ 、 $R_N$  中维持在 1% ~ 2%; 硝化螺旋菌门相对含量  $R_0$ 、 $R_p$  中分别增加至 2.5% 和 5%, 在  $R_{NP}$ 、 $R_N$  中趋于 0.

### 2.3.2 氮磷失衡下膨胀污泥属水平上微生物群落变化趋势

图 3(b) 显示了属水平上 4 组不同氮磷营养条



(a) 门水平, 相对丰度 > 0.10%; (b) 属水平, 相对丰度 > 0.50%

图3 不同氮磷营养条件下各反应器污泥微生物群落结构演变

Fig. 3 Abundances of different phyla and the heat map of genera of activated sludge microorganisms in the reactors under different nutritional conditions

件下反应器内污泥微生物群落结构组成. 所有样本水平上的优势菌种(平均相对含量  $> 1\%$ )共 10 种, 包括变形菌门下丝状菌属 *Thiothrix* (丝硫细菌属, 9.4%) 和 *Sphaerotilus* (球衣细胞属, 1.2%)、拟杆菌门下丝状菌属 *Flavobacterium* (黄杆菌属, 1.9%) 和 *Haliscomenobacter* (束缚杆菌属, 1.8%), 以及其他变形菌门下 *Pseudomonas* (假单胞菌属, 2.5%)、*Propionivibrio* (2.3%)、*Zoogloea* (动胶菌属, 2.3%)、*Hydrogenophaga* (噬氢菌属, 2.1%)、*Dechloromonas* (1.0%) 和硝化螺旋菌门下 *Nitrospira* (硝化螺菌属, 2.4%)。

经过 I 阶段(0 ~ 14 d)的培养, 相对丰度较大的优势菌种变化基本一致, 其中变形菌门下的丝状菌属 *Thiothrix*、*Sphaerotilus* 均出现了不同程度的增加; 拟杆菌门下丝状菌属 *Flavobacterium* 相对含量基本均出现了下降(除  $R_N$  中 *Flavobacterium* 相对含量占比突跃为 16.2%), 而 *Haliscomenobacter* 在 4 组反应器中变化趋势不一致, 其在  $R_0$ 、 $R_{NP}$  中出现了增加,  $R_P$ 、 $R_N$  中则出现了下降. 系统中其他主要的非膨胀菌属 *Pseudomonas*、*Propionivibrio*、*Zoogloea*、*Hydrogenophaga*、*Dechloromonas* 在 4 组反应器中均出现了不同程度的增加, 而 *Nitrospira* 相对含量则出现了下降. 第 II、III 阶段(15 ~ 48 d), 4 组反应器中 *Thiothrix* 相对含量均增加,  $R_0$  增幅最大(72.4%),  $R_{NP}$  次之(31.9%). *Haliscomenobacter* 在  $R_0$ 、 $R_{NP}$  中持续下降, 而在  $R_P$ 、 $R_N$  中均先增加后从 18d 起开始下降至运行结束; *Sphaerotilus* 在  $R_0$ 、 $R_P$  中持续下降, 而在  $R_{NP}$  中持续增加, 在  $R_N$  中 18d 起开始下降至运行结束; *Flavobacterium* 在  $R_{NP}$ 、 $R_P$ 、 $R_N$  中整体呈增加趋势, 至运行末期丰度约 3% ~ 4% (48 d), 而在  $R_0$  中丰度较低( $< 0.6\%$ )且呈下降趋势; 反硝化脱氮聚磷功能菌 *Pseudomonas*、*Nitrospira* 整体变化不明显, 至运行末期  $R_0$ 、 $R_P$  中 *Nitrospira* 菌丰度为 3% ~ 5%, 其余实验组中 *Pseudomonas*、*Nitrospira* 丰度均小于 0.5%, 说明系统反硝化脱氮聚磷能力减弱. 4 组反应器中 *Thiothrix* 在 II 阶段均持续增加, 至 III 阶段仅  $R_N$  中 *Thiothrix* 出现了下降, 动胶菌属 *Zoogloea* 在 II 阶段  $R_P$  中整体呈下降趋势至运行 III 阶段略有回升, 在  $R_N$  中持续增加, 对应系统沉降性能的恢复, 而在  $R_0$  中明显下降, 在  $R_{NP}$  中变化不明显。

本实验中 4 组反应器中主导丝状菌属 *Thiothrix* 是一种  $\gamma$ -变形菌纲下的革兰氏阴性菌, 近年来常在膨胀的污水处理系统中发现, 尤其是工业废水处理

系统中, 文献[44]中有关 *Thiothrix* 属的纯培养研究显示它们能利用有机酸和明胶, 并在生长的过程中能减少含硫化合物和脱氮, 因此这类丝状微生物的存在对污水处理系统脱氮除硫起着重要的作用. *Thiothrix* 在以乙酸为碳源的活性污泥系统中容易繁殖, 但底物利用速率却很低<sup>[45]</sup>, 适合在低溶解氧、氮磷缺乏、进水中含还原性硫化物及高浓度低分子碳化合物、污泥负荷大于  $0.1 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$  (以  $\text{BOD}_5/\text{MLSS}$  计)且曝气池为完全混合式的活性污泥系统中生长繁殖<sup>[21]</sup>, 其大量繁殖会导致污泥膨胀, 在高负荷工业废水处理厂出现较多. 反应器运行 II 阶段氮磷单独限制组中  $R_P$  和  $R_N$  中 *Thiothrix* 菌相对含量上升幅度不明显, 磷限制组  $R_P$  中 *Thiothrix* 菌相对含量在 II 阶段出现了小幅度波动至 III 阶段运行结束时整体增加 3.9%, 而氮限制组  $R_N$  中 *Thiothrix* 菌相对含量在 II 阶段先小幅度增加至 1.2% (37 d), 后至 III 阶段运行结束又降低为 0.7% (48 d), 此变化与  $R_N$  运行末期沉降性能改善相一致. *Sphaerotilus* 为专性好氧菌, 可以降解各种类型的有机酸、糖类、醇类及氨基酸, 但不能利用更复杂的底物, 其大量繁殖会导致较高的  $\text{SVI}$ <sup>[21]</sup>. 本实验条件下, *Sphaerotilus* 仅在  $R_{NP}$  实验组中呈持续增加趋势, 与文献[21]中报道的 *Sphaerotilus* 适合在氮磷缺乏条件下大量繁殖相一致. 絮凝形成菌的细胞干重中含 N 为 12% ~ 14%, 丝状菌如 *Thiothrix*、*Sphaerotilus*、*Beggiatoa* 的细胞干重中含 N 仅为 5% ~ 6%, 且对营养物质有较强的亲和力、吸收率和累积能力, 可适合较宽的营养物含量范围, 因此, N、P 不足有利于这些丝状菌的增殖<sup>[46]</sup>. *Haliscomenobacter* 是一类拟杆菌门丝状菌, 运行 II、III 阶段 4 组反应器中该丝状菌相对含量整体均呈现下降趋势, 说明该类菌属与本实验中污泥膨胀的发生及加剧无明显影响。

样本中检出的其他几类丝状菌如拟杆菌门下 *Bacteroides* (拟杆菌属)、放线菌门下 *Tetrasphaera* (四球虫属)、厚壁菌门下 *Streptococcus* (链球菌属) 和 *Trichococcus* (毛球菌属), 绿弯菌门下 *Caldilinea* (暖绳菌属), 在系统中含量较低( $< 3\%$ )且整体呈现下降趋势. 据报道, *Flavobacterium* 和 *Bacteroides* 是工业废水及城市污水处理厂中较常见的拟杆菌门丝状菌, 在活性污泥系统中可能对污泥絮体的沉降性产生轻微影响<sup>[47,48]</sup>. *Tetrasphaera* 属丝状菌常出现于活性污泥系统中但数量较少, 极少数情况下才会导致泡沫问题<sup>[49,50]</sup>, 绿弯菌门丝状菌在实际城市污

水及工业污水处理厂中普遍存在,但由于这些丝状菌通常生长于污泥絮体内部,故很少导致污泥膨胀现象<sup>[51]</sup>.

2.3.3 PCoA 分析及群落多样性变化

PCoA 的结果显示 II、III 阶段中存在氮限制的组( $R_{NP}$ 、 $R_N$ )群落迁移变化较大(图 4). 自接种至 I 阶段驯化期(1~14 d)培养结束后,4 组反应器中污泥的香农-威尔指数均上升,运行 II、III 阶段(15~48 d),随着污泥膨胀程度的加重, $R_0$  和  $R_{NP}$  污泥中的香农-威尔指数整体呈下降趋势,微生物多样性

逐步降低( $R_0$  从 0.76 降至 0.35,  $R_{NP}$  组从 0.79 降至 0.56).  $R_P$  和  $R_N$  中污泥的香农-威尔指数先呈现略微下降趋势( $R_P$  从 0.76 降至 0.68,  $R_N$  从 0.82 降至 0.65),到运行中期(26 d)沉降性能出现改善时又呈现了上升趋势直至运行结束(48 d), $R_P$ 、 $R_N$  香农-威尔指数分别增至 0.73 和 0.83,说明微生物多样性在膨胀期先降低后在恢复期略微上升,基本恢复到了改变营养条件前的多样性水平,且氮限制条件下多样性增减幅度要高于磷限制组,这一趋势与沉降性能的变化趋势相一致.

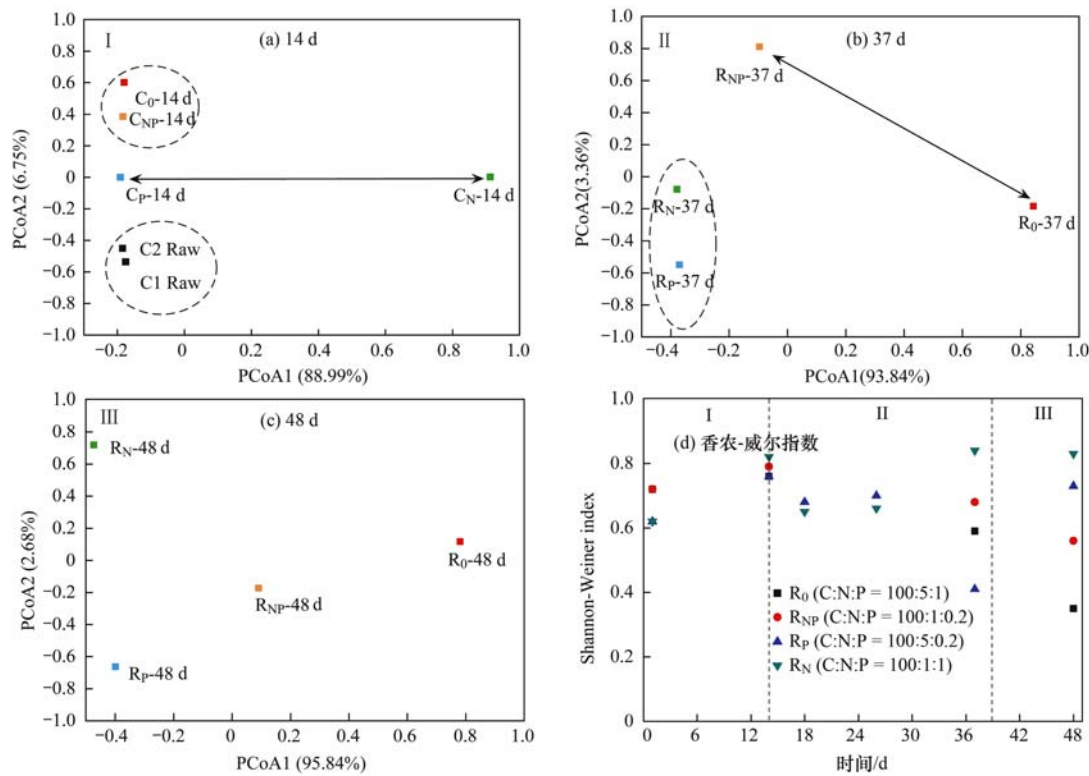


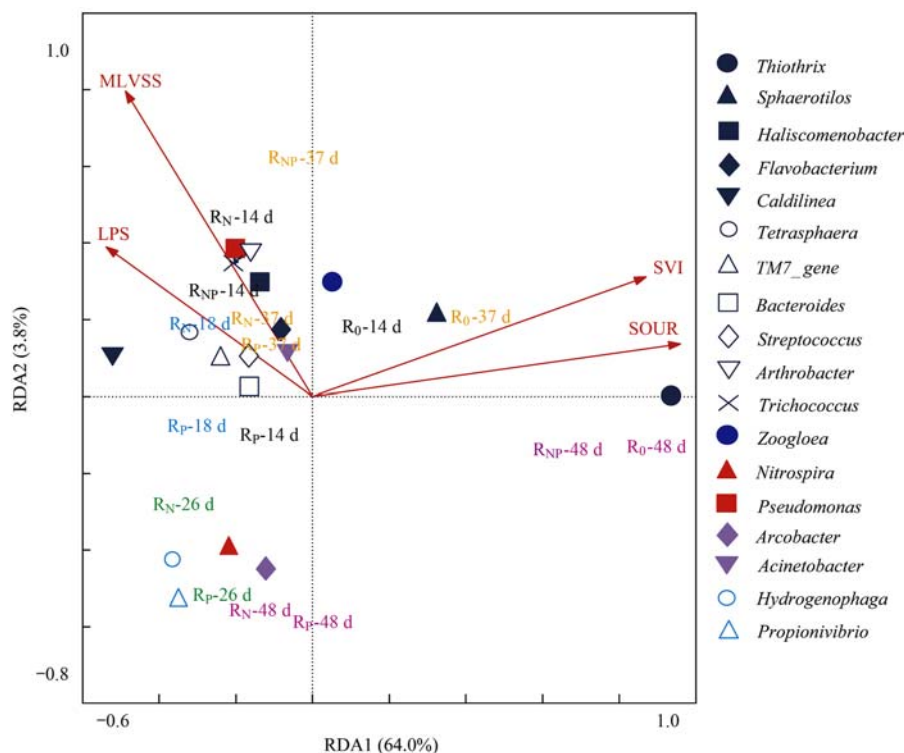
图 4 4 组反应器在不同阶段的 PCoA 分析及微生物多样性变化

Fig. 4 PCoA analysis and changes in the microbial diversity of the reactors at different periods

2.3.4 RDA 分析

RDA 分析被用来研究微生物群落与污泥沉降性能之间的关系(图 5),RDA1 和 RDA2 分别代表 64.0% 和 3.8% 的总差异.  $R_N$  和  $R_P$  样本相似性较大,而  $R_0$  和  $R_{NP}$  样本差异性较大. 变形菌门  $\gamma$ -变形菌纲下的丝状菌 *Thiothrix* 和污泥沉降性能(SVI)相关性最高, *Thiothrix* 含有直或弧形菌丝,大部分会从菌胶团中突出<sup>[21]</sup>,RDA 分析显示 *Thiothrix* 与系统沉降性能(SVI)呈极显著正相关( $r = 0.792$ ,  $P < 0.05$ ),为系统中的优势丝状菌. 变形菌门  $\beta$ -变形菌纲下的浮游球衣菌属 *Sphaerotilus* 为系统中导致沉降性能恶化的第二优势菌,与 SVI 呈正相关( $r = 0.595$ ,  $P < 0.05$ ),文献[21]报道其适合在低溶解

氧、氮磷缺乏、进水中含大量低分子化合物、污泥负荷大于  $0.2 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$  (以  $\text{BOD}_5/\text{MLSS}$  计)且曝气池为完全混合式的活性污泥系统中生长繁殖,其大量繁殖会导致较高的 SVI. 样本中检出的其他几类丝状菌如放线菌门下 *Tetrasphaera*, 厚壁菌门下链球菌 *Streptococcus* 和 *Trichococcus*, 尽管在系统中含量较低,且整体呈现出下降趋势,但从 RDA 分析中可得出其相互之间存在极显著相关性( $P < 0.05$ ),菌群间可能存在相互促进作用. 绿弯菌门下 *Caldilinea*、拟杆菌门下 *Haliscomenobacter* 和 *TM7* 与脂多糖(LPS)之间存在显著相关性( $P < 0.05$ ),从图 5 中可看出 *Tetrasphaera*、*Streptococcus*、*Trichococcus*、*Caldilinea*、*TM7*、*Bacteroides* 与污泥



$R_0$ 、 $R_{NP}$ 、 $R_P$ 、 $R_N$  分别表示正常营养条件组、氮磷限制组、磷限制组、氮限制组，其中下标数值表示运行天数

图 5 4 组不同氮磷营养条件下反应器内污泥微生物 RDA 分析

Fig. 5 RDA analysis of the microbial community composition in relation to sludge characteristics

SVI 指数呈现一个负相关趋势,说明在本实验污泥系统中这几类丝状菌属不是导致污泥沉降性能恶化的菌群.拟杆菌门下丝状菌 *Flavobacterium* 和 *Haliscomenobacter*、放线菌门下 *Arthrobacter* 以及粘附力极强的变形菌门下 *Acinetobacter* 与 SVI 基本无相关性,说明对系统沉降性能基本无影响.

*Nitrospira* 属于硝化螺旋菌门下的一类革兰氏阴性细菌.其作为硝化细菌 (*Nitrifier*),可将亚硝酸盐氧化成硝酸盐,在水体中扮演着极为重要的角色<sup>[52]</sup>.*Nitrospira* 是存在于污水处理厂和实验室反应器中主要的亚硝酸氧化菌. RDA 分析可得出 *Nitrospira* 与大部分丝状菌属均呈负相关,说明本实验活性污泥系统中丝状菌的生长可能会抑制 *Nitrospira*,这与反应器运行后期系统总氮去除能力下降的结果相一致. *Pseudomonas* 是  $\gamma$ -变形菌纲下的革兰氏阴性菌,能以多种有机物为碳源和能源;利用有机氮或无机氮为氮源,具有反硝化聚磷功能<sup>[53]</sup>,可能受 *Thiothrix* 的抑制作用. 动胶菌属 *Zoogloea* 属于  $\beta$ -变形菌纲下的一类革兰氏阴性细菌,在污水处理系统中通常聚合在一起形成菌胶团,是污水处理系统中的主体细菌<sup>[54]</sup>.已有研究报道,氮磷营养限制下,活性污泥菌胶团会变松散,且数量大量减少.

RDA 结果表明,微生物比耗氧速率和污泥沉降性能之间存在显著性相关 ( $r = 0.815$ ,  $P < 0.05$ ),系统内丝状菌的分布存在着较强的相关性,污泥 MLVSS 和脂多糖作为指示生物量的指标,呈显著相关 ( $r = 0.862$ ,  $P < 0.05$ ),脂多糖和污泥沉降性能之间存在负相关.运行 I 阶段驯化结束后 4 组反应器之间群落差异不显著;II 阶段在 26 d 时氮限制组 ( $R_N$ ) 和磷限制组 ( $R_P$ ) 的群落分布较为相似,且与系统内主要丝状菌相关性较弱,对应了 24 ~ 30 d 之间沉降性能的改善,37 d 时  $R_N$  和  $R_P$  群落组成更为接近且与系统内多种丝状菌存在着较强的相关性,对应 II 阶段后期  $R_N$  和  $R_P$  沉降性能的恶化,而  $R_0$  和  $R_{NP}$  群落分布差异相对较大,且  $R_0$  与 *Thiothrix* 和 *Sphaerotilus* 存在着较强的相关性;III 阶段运行末期 (48 d) 时,  $R_0$  和  $R_{NP}$  群落组成差异度减小,且与 *Thiothrix* 存在着极强的相关性,而  $R_N$  和  $R_P$  群落组成与 26 d 时较为相似,与运行末期  $R_N$  和  $R_P$  沉降性能恢复改善相一致.

### 3 结论

(1) 以膨胀污泥为接种污泥 (A/O 工艺),经过一段时间培养单独限氮 ( $R_N$ ) 组的沉降性能可恢复到  $SVI < 150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ,单独限磷 ( $R_P$ ) 组 SVI 指数呈

现相对较弱的改善趋势。

(2) 营养限制条件下污泥(膨胀期) LPS 对生物量的指示性更为准确。

(3) 4 组反应器内微生物多样性均在膨胀期降低, PCoA 的结果显示 II、III 阶段中存在氮限制的组( $R_{NP}$ 、 $R_N$ )群落迁移变化较大, 单独限氮( $R_N$ )和限磷( $R_P$ )组在沉降性能恢复阶段多样性上升(基本恢复到了改变营养条件前的多样性水平)。

(4) *Thiothrix* 为本实验 4 组反应器中主导膨胀菌, RDA 结果显示其与污泥沉降性能及比耗氧速率呈现显著相关, 其与 *Sphaerotilus*, *Haliscomenobacter* 等丝状菌属的相对丰度在  $R_N$  组沉降性能恢复阶段均有所下降。

#### 参考文献:

- [1] 高春娣, 彭永臻, 潼川哲夫, 等. 营养物质缺乏引起的丝状菌污泥膨胀及其控制[J]. 水处理技术, 2003, 29(3): 159-162.  
Gao C D, Peng Y Z, Takigawa A, et al. Filamentous bulking caused by nutrient deficiency and bulking control [J]. Technology of Water Treatment, 2003, 29(3): 159-162.
- [2] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking and other solids separation problems[M]. London: IWA Publishing, 2004.
- [3] Gaval G, Pernelle J J. Impact of the repetition of oxygen deficiencies on the filamentous bacteria proliferation in activated sludge[J]. Water Research, 2003, 37(9): 1991-2000.
- [4] Krishna C, van Loosdrecht M C M. Effect of temperature on storage polymers and settleability of activated sludge[J]. Water Research, 1999, 33(10): 2374-2382.
- [5] 聂琨. A/O 除磷系统污泥沉降性变化与影响机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
Nie K. Research on sludge settleability and its influence in anaerobic/aerobic phosphorus removal systems[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [6] 邓晓钰. 制药废水生化处理中污泥膨胀的原因分析及控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
Deng X Y. Study on the influencing factors and control of the activated sludge bulking in pharmaceutical wastewater treatment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [7] 吕桂宾. 印染废水处理中污泥膨胀的原因及控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
Lv G B. Study on the cause and control of sludge bulking in treatment of printing and dyeing wastewater [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [8] Switzenbaum M S, Plante T R, Woodworth B K. Filamentous bulking in Massachusetts: extent of the problem and case studies [J]. Water Science and Technology, 1992, 25(4-5): 265-271.
- [9] Blackbeard J R, Gabb D M D, Ekama G A, et al. Identification of filamentous organisms in nutrient removal activated sludge plants in South Africa[J]. Water SA, 1988, 14(1): 29-33.
- [10] 陈冰照, 林梅. 烤鳗废水活性污泥法处理中污泥膨胀的原因及控制[J]. 福建环境, 2001, 18(6): 18-19.  
Chen B Z, Lin M. Reasons and control of sludge bulking in baking eel wastewater treatment by activated sludge process[J]. Fujian Environment, 2001, 18(6): 18-19.
- [11] 周雪飞, 任南琪, 陈漫漫, 等. 低有机负荷含磷废水处理中污泥膨胀的控制对策[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(4): 58-60.  
Zhou X F, Ren N Q, Chen M M, et al. Control of sludge bulking during treatment of phosphorized wastewater with low organic loading[J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture, 2001, 34(4): 58-60.
- [12] 田口广. 活性污泥膨胀与控制对策[M]. 孙玉修, 蔡汉弟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- [13] 高春娣, 彭永臻, 王淑莹, 等. 氮缺乏引起的非丝状菌活性污泥膨胀[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 61-65.  
Gao C D, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Non-filamentous activated sludge bulking caused by the deficiency of nitrogen [J]. Environmental Science, 2001, 22(6): 61-65.
- [14] 陈滢, 彭永臻, 刘敏, 等. 营养物质对污泥沉降性能的影响及污泥膨胀的控制[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 62-63.  
Chen Y, Peng Y Z, Liu M, et al. Effect of nutrient on sludge settling property and bulking controls [J]. Environmental Science, 2004, 25(6): 62-63.
- [15] 于振波. 氮磷缺乏对活性污泥系统的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
Yu Z B. Influence of nitrogen and phosphorus deficiency on activated sludge system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [16] Wanner J, Kragelund C, Nielsen P H. Microbiology of bulking [A]. In: Microbial Ecology of Activated Sludge[M]. London: IWA Publishing, 2010. 191-214.
- [17] 吴志高. 胞外聚合物(EPS)对污泥沉降性能的影响及其在生物除磷中的作用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
Wu Z G. Study on the effect of extracellular polymer substances on the settleability of the sludge and its role in biological removal of phosphorus[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [18] 李志华, 朱珂辰. 以比耗氧速率作为丝状菌膨胀预警指标的研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(11): 39-42.  
Li Z H, Zhu K C. Using specific oxygen uptake rate as a warning index of sludge bulking[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(11): 39-42.
- [19] Zhang C, Liu W J, Sun W, et al. Endotoxin contamination and control in surface water sources and a drinking water treatment plant in Beijing, China[J]. Water Research, 2013, 47(11): 3591-3599.
- [20] 苏文博. 脂多糖指示营养缺乏条件下活性污泥生物量的方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.  
Su W B. Study on lipopolysaccharide indicative function to biomass of activated sludge under the conditions of nutrient deficiency[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [21] 彭永臻, 郭建华. 活性污泥膨胀机理、成因及控制[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [22] Guo F, Zhang T. Profiling bulking and foaming bacteria in activated sludge by high throughput sequencing [J]. Water Research, 2012, 46(8): 2772-2782.
- [23] Wang P, Yu Z S, Qi R, et al. Detailed comparison of bacterial communities during seasonal sludge bulking in a municipal wastewater treatment plant [J]. Water Research, 2016, 105:

- 157-166.
- [24] 杨雄, 彭永臻, 郭建华, 等. 氮/磷缺乏对污泥沉降性能及丝状菌生长的影响[J]. 化工学报, 2014, **65**(3): 1040-1048.
- Yang X, Peng Y Z, Guo J H, *et al.* Influence of nitrogen/phosphate deficiency on sludge settleability and filamentous growth[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(3): 1040-1048.
- [25] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, *et al.* Filamentous bulking sludge-a critical review[J]. Water Research, 2004, **38**(4): 793-817.
- [26] Seviour R J, Kragelund C, Kong Y H, *et al.* Ecophysiology of the *Actinobacteria* in activated sludge systems[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2008, **94**(1): 21-33.
- [27] Liu J R, Burrell P, Seviour E M, *et al.* The filamentous bacterial morphotype '*Nostocoida limicola*' I contains at least two previously described genera in the low G + C gram positive bacteria[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2000, **23**(4): 528-534.
- [28] Nielsen P H, Kragelund C, Seviour R J, *et al.* Identity and ecophysiology of filamentous bacteria in activated sludge[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2009, **33**(6): 969-998.
- [29] Asvapathanagul P, Olson B H, Gedalanga P B, *et al.* Identification and quantification of *Thiothrix eikelboomii* using qPCR for early detection of bulking incidents in a full-scale water reclamation plant[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(9): 4045-4057.
- [30] Beer M, Seviour E M, Kong Y, *et al.* Phylogeny of the filamentous bacterium Eikelboom Type 1851, and design and application of a 16S rRNA targeted oligonucleotide probe for its fluorescence in situ identification in activated sludge[J]. FEMS Microbiology Letters, 2002, **207**(2): 179-183.
- [31] Björnsson L, Hugenholtz P, Tyson G W, *et al.* Filamentous *Chloroflexi* (green non-sulfur bacteria) are abundant in wastewater treatment processes with biological nutrient removal[J]. Microbiology, 2002, **148**(8): 2309-2318.
- [32] Speirs L B, Tucci J, Seviour R J. The activated sludge bulking filament Eikelboom morphotype 0803 embraces more than one member of the *Chloroflexi* [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2015, **91**(9): fiv100.
- [33] Miłobędzka A, Muszyński A. Differences in populations of filamentous bacteria involved in foaming and bulking of activated sludge[J]. Challenges of Modern Technology, 2016, **6**(3): 30-33.
- [34] Guo J H, Peng Y Z, Wang Z W, *et al.* Control filamentous bulking caused by chlorine-resistant Type 021N bacteria through adding a biocide CTAB[J]. Water Research, 2012, **46**(19): 6531-6542.
- [35] 张著, 高大文, 袁向娟, 等. 营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3197-3201.
- Zhang Z, Gao D W, Yuan X J, *et al.* Aerobic granular sludge bulking due to the lack of nutrient and its recovery [J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3197-3201.
- [36] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [37] Bassin J P, Kleerebezem R, Rosado A S, *et al.* Effect of different operational conditions on biofilm development, nitrification, and nitrifying microbial population in moving-bed biofilm reactors [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(3): 1546-1555.
- [38] Antharavally B, Krohn R I, Mallia A K, *et al.* Development of a detergent and reducing agent compatible BCA protein assay[J]. The FASEB Journal, 2006, **20**(5): A962.
- [39] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Analytical Chemistry, 1956, **28**(3): 350-356.
- [40] Houda N, Abdelwaheb C, Asma B R, *et al.* Tertiary nitrification using moving-bed biofilm reactor: a case study in Tunisia[J]. Current Microbiology, 2015, **70**(4): 602-609.
- [41] Hara S, Takemori Y, Yamaguchi M, *et al.* Fluorometric high-performance liquid chromatography of *N*-acetyl- and *N*-glycolylneuraminic acids and its application to their microdetermination in human and animal sera, glycoproteins, and glycolipids[J]. Analytical Biochemistry, 1987, **164**(1): 138-145.
- [42] Hao X D, Wang Q L, Zhang X P, *et al.* Experimental evaluation of decrease in bacterial activity due to cell death and activity decay in activated sludge[J]. Water Research, 2009, **43**(14): 3604-3612.
- [43] 马思佳, 顾卓江, 丁丽丽, 等. 碳源对活性污泥微生物细胞膜特性和群落结构影响[J]. 微生物学通报, 2017, **44**(3): 561-573.
- Ma S J, Gu Z J, Ding L L, *et al.* Effects of carbon sources on cell membrane properties and microbial community of activated sludge[J]. Microbiology China, 2017, **44**(3): 561-573.
- [44] Williams T M, Unz R F. Isolation and characterization of filamentous bacteria present in bulking activated sludge[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1985, **22**(4): 273-282.
- [45] Nielsen J L, Christensen D, Kloppenborg M, *et al.* Quantification of cell-specific substrate uptake by probe-defined bacteria under *in situ* conditions by microautoradiography and fluorescence *in situ* hybridization [J]. Environmental Microbiology, 2003, **5**(3): 202-211.
- [46] 丁峰, 王淑莹, 李秀玮, 等. 缺乏营养物质(N、P等)引起的污泥膨胀及其控制[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, **34**(5): 59-63.
- Ding F, Wang S Y, Li X W, *et al.* Activated sludge bulking due to lack of nutrient and its control [J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture, 2001, **34**(5): 59-63.
- [47] Thomsen T R, Blackall L L, de Muro M A, *et al.* *Meganema perideroedes* gen. nov., sp. nov., a filamentous alphaproteobacterium from activated sludge [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2006, **56**(8): 1865-1868.
- [48] Kragelund C, Levantesi C, Borger A, *et al.* Identity, abundance and ecophysiology of filamentous bacteria belonging to the *Bacteroidetes* present in activated sludge plants [J]. Microbiology, 2008, **154**(3): 886-894.
- [49] McKenzie C M, Seviour E M, Schumann P, *et al.* Isolates of '*Candidatus Nostocoida limicola*' Blackall *et al.* 2000 should be described as three novel species of the genus *Tetrasphaera*, as *Tetrasphaera jenkinsii* sp. nov., *Tetrasphaera vanveenii* sp. nov. and *Tetrasphaera veronensis* sp. nov. [J]. International Journal of

- Systematic and Evolutionary Microbiology, 2006, **56** ( Pt 10 ): 2279-2290.
- [50] Wanner J. Activated sludge bulking and foaming control [ M ]. Lancaster, Pa: CRC Press, 1994.
- [51] Kragelund C, Caterina L, Borger A, *et al.* Identity, abundance and ecophysiology of filamentous *Chloroflexi* species present in activated sludge treatment plants [ J ]. FEMS Microbiology Ecology, 2007, **59**(3): 671-682.
- [52] 周合喜. 变温下 A/O 复合系统的处理效能及菌群响应研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Zhou H X. Treatment performance and microbial community dynamics at different temperature in a hybiy A/O process [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [53] 杨勇光. 碳源种类对反硝化除磷系统的影响及反硝化聚磷菌 (DPB) 的分离 [ D ]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- Yang Y G. Effects of types of carbon source on biological denitrifying phosphors and nitrogen removal system and isolation of DPB [ D ]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [54] Zhu Y, Zhang Y, Ren H Q, *et al.* Physicochemical characteristics and microbial community evolution of biofilms during the start-up period in a moving bed biofilm reactor [ J ]. Bioresource technology, 2015, **180**: 345-351.

环境科学

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                    |                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM <sub>2.5</sub> .....                                        | DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445) |
| Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM <sub>2.5</sub> Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                          | HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)              |
| Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu .....                                                                      | LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)               |
| Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> at Mt. Huashan, Inland China .....                                                                  | CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)                 |
| Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM <sub>2.5</sub> ) Produced by Burning Fireworks .....                                                                 | XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)                    |
| Chemical Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region .....                          | XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)                   |
| Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion .....                                                                         | YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)          |
| Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring .....                                                     | ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)       |
| Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao .....                                                                                      | LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)             |
| Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay .....                                                                      | ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)       |
| Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas .....                                         | LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)                   |
| Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City .....                       | WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)      |
| Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai .....                                                                                                                      | YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)         |
| Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo .....                            | CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)      |
| Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region .....                                                                                           | CAO Can, ZHANG Fei, Ayinge'er-Yalikun, <i>et al.</i> (1568)         |
| CH <sub>4</sub> Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River .....                                                                                                            | QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)                 |
| Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River .....                                                                                             | MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)            |
| Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments .....                                                          | ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)    |
| Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River .....                                              | LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)                    |
| Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake .....                                                                       | GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)          |
| Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta .....                                                              | GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)                                |
| Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process .....                                                                                | LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)                      |
| Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment .....                                                                                                        | FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)            |
| Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine .....                                                                                     | SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)                |
| Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation .....                                                                                                              | JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)     |
| Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water .....                                                                                                         | XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)          |
| Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater .....                                                                                   | SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)          |
| Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition .....                                                                                        | YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)             |
| Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads ..... | SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)      |
| Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A <sup>2</sup> /O-BAF System .....                                          | NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)      |
| Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control .....                                         | LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)          |
| Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process .....                  | XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)      |
| Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater .....    | LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)                                    |
| Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process .....                                                                                                         | WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)             |
| Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process .....                                        | YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)              |
| Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge .....                                                             | CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)         |
| Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....                                                                                      | ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)                            |
| Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02 .....                                                                         | CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)            |
| Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances .....                               | HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)          |
| Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain .....                                                                 | LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)            |
| Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings .....                                                                                      | LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)             |
| Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin .....                                                                     | HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)      |
| Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region .....                                                     | CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)    |
| Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone .....                                                                                                | DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)    |
| Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding .....                                                              | ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)     |
| Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China .....                                                              | SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)        |
| Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment .....                                                   | SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)                           |
| Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajiu Lake, Shengnongjia .....                                                                            | HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)        |
| Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China .....                                                  | SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)               |
| Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi .....                                                                                 | SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)           |
| Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It .....                                                                | ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)                         |
| Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment .....                                                          | GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)           |
| Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains .....                                                                                   | WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)                     |
| Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage .....                                                                       | ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)          |
| Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern .....                                                           | HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)             |
| Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland .....                                                                 | WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)           |
| Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission .....                          | TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)                         |
| Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO <sub>2</sub> Release in Karst Region .....                                                                                       | TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)   |