

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明(789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁(795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌(801)

北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪(807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶(816)

上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰(825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛(834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山(847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康(854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒(862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊(873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙(884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉(893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕(900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇(910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶(917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿(925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良(935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军(942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰(950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇(955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃(963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩(970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东(980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博(988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹(994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇(1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛(1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷(1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇(1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬(1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞(1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印(1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚(1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉(1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 田乐琪(1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航(1075)

1株 *Arthrobacter arilaitensis* 菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义(1082)

海洋菌株 γ 3 的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津(1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁(1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义(1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐(1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼(1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽(1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大(1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝(1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮(1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东(1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇(1171)

《环境科学》征订启事(1138) 《环境科学》征稿简则(1155) 信息(824,853,883)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究

端正花¹, 潘留明^{2,3}, 陈晓欧¹, 王秀朵^{2,3}, 赵乐军^{2,3}, 田乐琪¹

(1. 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051; 3. 天津市基础设施耐久性企业重点实验室, 天津 300051)

摘要: 采用水质参数指标测定和高通量测序技术, 探讨了郑州某污水处理厂冬季间歇性污泥膨胀机制. 结果表明该厂活性污泥的污泥容积指数(SVI 值)的变化与季节温度变化有显著的负相关性, 1~4 月及 12 月易发生污泥膨胀, 但是不影响出水水质. 高通量测序技术分析发现污泥膨胀月份泥样的微生物群落结构要显著不同于未膨胀月份. 该厂发生丝状菌污泥膨胀的优势丝状菌为腐螺旋菌科 Saprospiraceae 和黄杆菌科 Flavobacterium. 因此, 低温导致活性污泥微生物群落结构变化是引起该厂活性污泥膨胀的原因.

关键词: 低温; 污泥膨胀; 高通量测序; 微生物群落; 丝状菌

中图分类号: X172; X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1070-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.036

Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature

DUAN Zheng-hua¹, PAN Liu-ming^{2,3}, CHEN Xiao-ou¹, WANG Xiu-duo^{2,3}, ZHAO Le-jun^{2,3}, TIAN Le-qi¹

(1. School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China; 3. Tianjin Enterprise Key Laboratory of Infrastructure Durability, Tianjin 300051, China)

Abstract: The mechanism of activated sludge bulking in Zhengzhou wastewater treatment plant was studied by measurement of water quality parameters and high-throughput sequencing technology. The change of SVI value was significantly negatively correlated with the seasonal temperature variation, and sludge bulking was easy to occur during December to the next April, but the water quality was not affected. The result verified by high-throughput sequencing technology analysis showed that the microbial community structure of bulking sludge was significantly different from that of the non-bulking one. The dominant filamentous bacteria in the bulking sludge in this plant were Saprospiraceae and Flavobacterium. Therefore, the activated sludge bulking in this wastewater treatment plant was caused by the propagation of filamentous bacteria at low temperature.

Key words: low temperature; activated sludge bulking; high-throughput sequencing; microbial community structure; filamentous bacteria

活性污泥法作为一种成本较为低廉、处理效果好的污水净化工艺被广泛用于城市污水处理厂. 在我国约有 60% 的城市污水处理厂和大部分工业废水处理厂采用了活性污泥法^[1~3], 但是污泥膨胀的高发生率是制约污水处理工艺发展的主要因素之一^[4~6]. 研究表明超过 50% 的污水处理厂受到污泥膨胀的困扰^[7], 且 95% 以上的污泥膨胀是由丝状菌过度增殖引起^[8,9]. 污泥发生丝状性膨胀的本质为细菌对相关环境因素变化的响应差异而导致菌落之间的平衡被破坏^[10~12]. 研究发现在低温条件下极易发生污泥膨胀, 导致污泥絮体松散、沉淀压缩性能变差, 影响出水水质^[13,14]. 因此冬季低温诱导的污泥膨胀问题已成为目前研究的重点. 郑州某污水处理厂近年来每年均出现间断性污泥膨胀问题, 致使二沉池发生漂泥现象, 后续处理费用增加, 经济效益降低. 本研究于 2014 年对该厂进行连续采样调

查, 结合水质参数和细菌群落结构变化, 拟探讨该厂冬季发生污泥膨胀的机制, 以期能够提出相应的调控措施.

1 材料与方法

1.1 样品采集和水质测定

郑州某污水处理厂主体采用 A²/O 处理工艺, 建设规模为 30 万 m³·d⁻¹, 总变化系数为 1.30. 设计出水水质为 BOD₅ 20 mg·L⁻¹, COD 80 mg·L⁻¹. 生物池设计参数为: 泥龄 14 d, BOD₅ 污泥负荷 0.08 kg·(kg·d)⁻¹, 污泥浓度 3.80 g·L⁻¹, 产泥率 0.97 kg·kg⁻¹, 设计水温最低 12℃. 污水水质监测的水样

收稿日期: 2015-09-08; 修订日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(5110316)

作者简介: 端正花(1981~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境生物学, E-mail: duanzhenghua@mail.nankai.edu.cn

均采自污水处理厂的进出水口。经预处理后用快速消解法测定 COD, 测定间隔为一周。用于微生物群落结构研究的污泥样品取自 A²/O 工艺好氧段。采集后的样本在 -20℃ 下保存运输至实验室。

1.2 微生物群落结构测定与分析

污泥样品解冻后, 用美国 OMEGA 公司土壤 DNA 提取试剂盒 E. Z. N. A. TM Soil DNA Kit (OMEGA D5625-01, USA) 进行 DNA 的提取。提取后的 DNA 进行琼脂糖凝胶电泳实验, 检验其纯度。最后将纯化 DNA 样溶解于 50 μL TE buffer, -20℃ 下保存以备用。

将 30 μL 的 DNA 样本送到微基生物科技(上海)有限公司进行 16S rDNA V4 可变区的高通量测序 (Roche 454 GS FLX sequencer)。测得的高质量序列优化后与 silva 119 数据库中的 aligned (16S/18S, SSU) 核糖体序列比对后进行 OTU 聚类。使用 mothur 软件 (<http://www.mothur.org/>) 计算菌群丰度指数 (chao 1, ACE) 和多样性指数 (Shannon 指数)。

2 结果与讨论

2.1 污水动力学参数

2.1.1 进出水 COD 变化

该厂 2014 年 1 月到 12 月的进出水 COD 情况如图 1 所示, 平均进水 COD 浓度为 339 mg·L⁻¹。平均出水浓度为 22.40 mg·L⁻¹, 全部低于出水设计值 (50 mg·L⁻¹), COD 去除率达 90% 以上, 净化效果佳。本研究中, 1~4 月的水温范围在 14~20℃ 之间, COD 去除率始终维持在 90% 以上, 出水 COD 指标和夏季样品相差无几, 活性污泥的降解效率并没有受到很大

的影响。这与前人的研究类似。如罗固源等^[15]考察了低温(8~20℃)对螺旋升流式反应器(SUFR)系统处理效果的影响, 同样发现 SUFR 系统在低温运行期间, COD 去除率始终保持在 86% 以上。崔迪^[16]在比较寒区 3 种污水处理工艺性能时发现, 水温变化范围在 10.40~17.10℃ 之间时, A/O 污水生化处理系统对 COD 的去除率仍然可达 82.10%, 满足出水水质标准。究其原因, 高春娣等^[17]认为, 活性污泥丝状菌微膨胀状态下, 丝状菌比表面积大, 并且使得活性污泥具有很好的网滤作用, 可以有效去除出水中细小的悬浮物, 改善出水水质。

2.1.2 SVI 变化

2014 年全年该厂活性污泥的沉降性能变化趋势如图 2 所示, 表现出很明显的季节性变化趋势, 即温度曲线与 SVI 正好呈相反的变化趋势。1 月 SVI 指数从 150 迅速上升到 250; 2 月稳定 250 左右, 污泥膨胀最为严重。随着温度的回升, 3 月开始污泥沉降性能缓慢恢复; 4 月恢复速度进一步加快。从 5 月开始到 12 月, 污泥 SVI 值始终稳定在 100, 沉降性能良好。因此, 本实验采集 8 月的泥样代表整个夏季, 而波动较大的 1、2、3、4、12 月均需单独采样研究微生物菌落结构。污泥膨胀现象在我国北方寒冷地区城市污水处理厂经常发生^[18,19], 这给污水处理的正常运行和管理带来很大困难。Knoop 等^[20]也发现系统在 12℃ 运行期间发生了污泥膨胀。这与本研究的结论是一致的。

2.2 微生物群落结构

2.2.1 多样性分析

本研究采用高通量测序, 读取 6 个样(1、2、3、

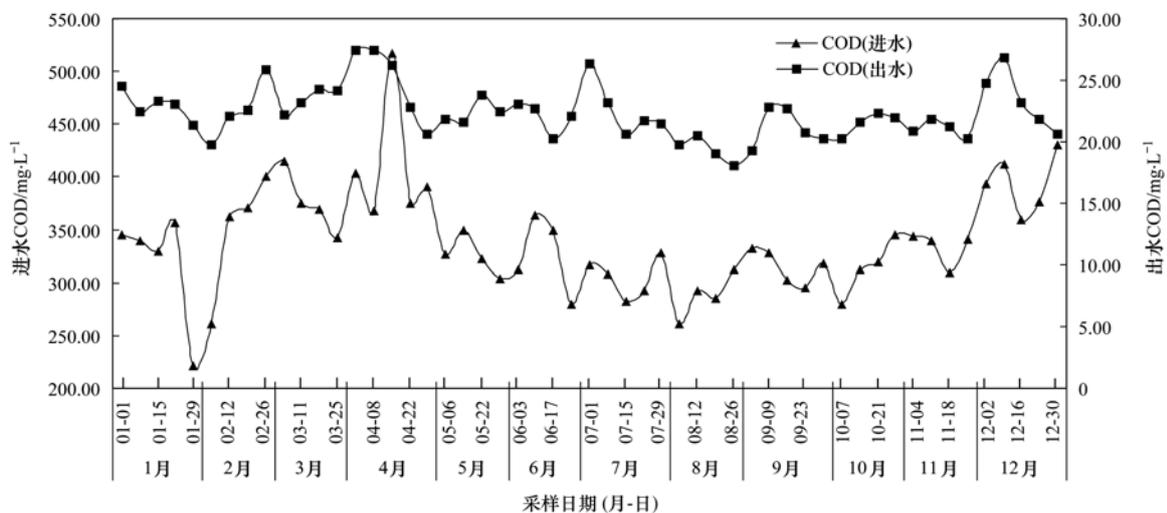


图 1 进出水 COD 变化趋势

Fig. 1 COD changes of effluent and influent

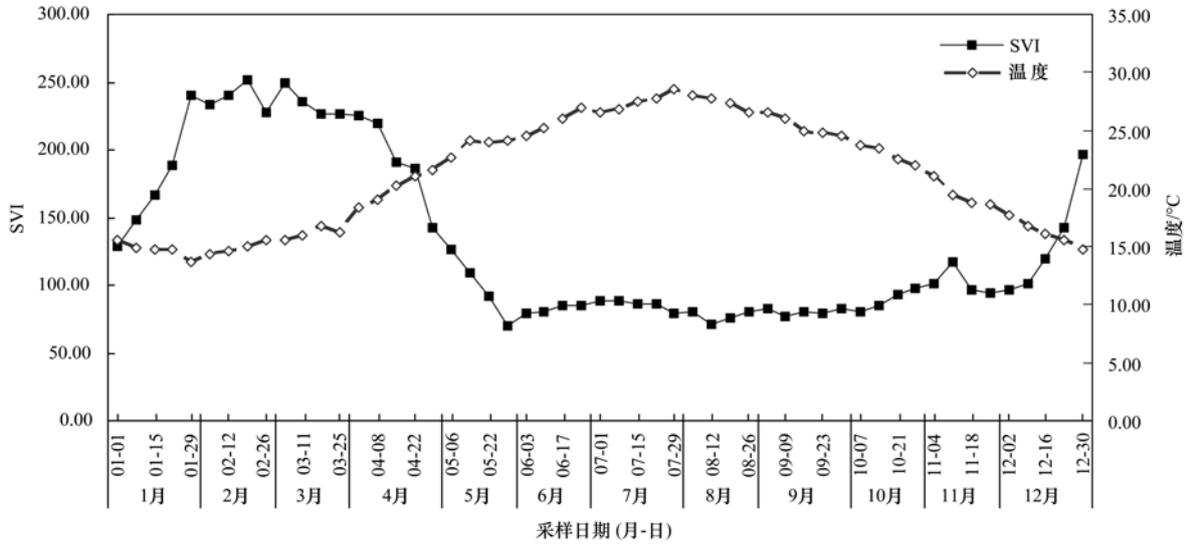


图 2 全年 SVI 变化趋势

Fig. 2 Change of SVI value throughout the year

4、8 和 12 月) 的有效序列依次为 68194、53100、61602、68481、33532 和 65724. 序列长度集中在 400 ~ 500 bp. 稀释性曲线(rarefaction curve)都趋于平坦时,说明测序数据量合理. 为了反映不同样品中微生物群落组成的相似性以及影响微生物多样性的主要因素,用 PC-ORD 软件将各组样本之间的数据差异在 PCA 图中表现出来. 分析结果显示如图 3 所示, 8 月样品与其他月份存在着很大的差异.

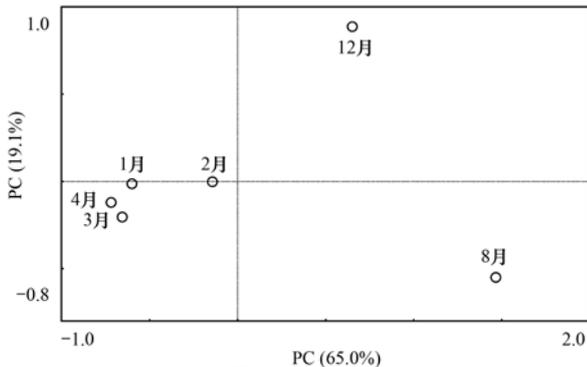


图 3 PCA 分析

Fig. 3 Principle component analysis

全样本相似性分析如图 4 所示,进一步反映了样本之间的相似性,结果与图 3 一致,8 月样品和其他样品差异最大. 微生物群落结构的多样性是评价污水处理系统结构和功能的主要指标之一. 样品间的多样性的差异表明夏季的细菌群落结构要显著不同于发生污泥膨胀的样品,微生物群落结构的差异与温度有着明显的相关性.

2.2.2 优势种变化

在 97% 的相似度下对所有序列进行 OTU

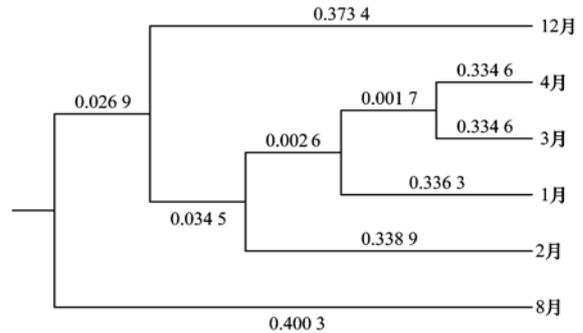


图 4 全样本相似性分析

Fig. 4 Whole sample similarity analysis

(operational taxonomic units) 分类并进行生物信息统计分析. 所有序列分属于细菌的 30 个门. 图 5 显示了在门水平上的相对丰度的差异. 结果表明 8 月的细菌菌落结构显著不同于其他月份,几种主要优势门的相对丰度均发生了明显的变化;而 1、2、3、4、12 月则保持了一定的相似性. 这与之前的微生物结构的多样性和相似度分析结果一致,即温度的变化导致活性污泥中细菌群落优势种群组成也发生了显著变化.

在所有样本中,变形菌门的 Proteobacteria 为主导优势门,其相对丰度占细菌总数的比例在 1、2、3、4、8 和 12 月依次为 50.18%、43.77%、43.24%、43.58%、36.15% 和 44.39%,表现出显著的季节变化趋势. 第二优势门为拟杆菌门的 Bacteroidetes,其相对丰度在 8 月变化显著,比例为 15.66% 的,远低于其他月份. 第三优势门绿弯菌门的 Chloroflexi 的相对丰度随温度增加而上升. 值得注意的是放线菌门的 Actinobacteria 相对丰度在温

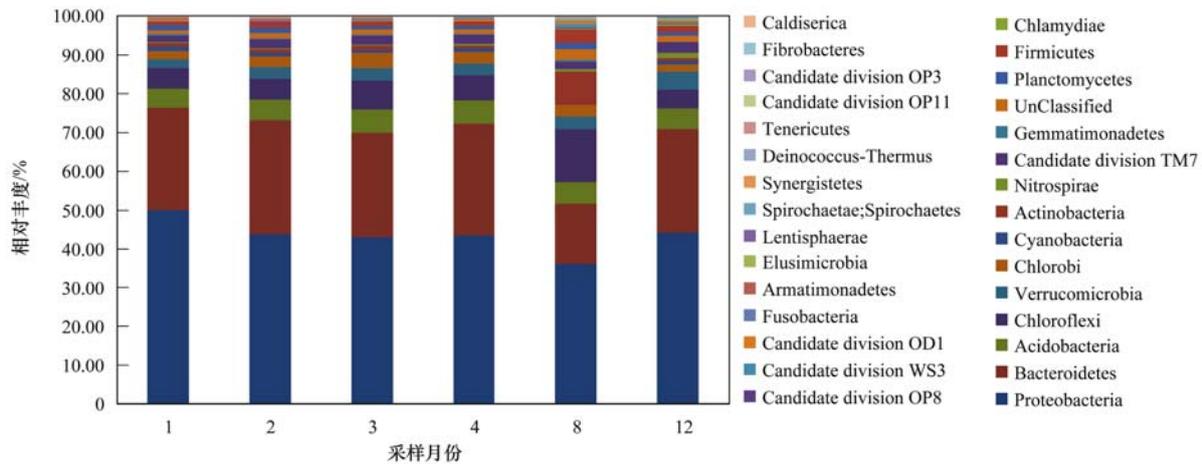


图5 不同细菌门的相对丰度

Fig. 5 Relative abundances of different phyla

度较低的月份中仅占到 1% 左右的比例,而在 8 月占到了细菌总数的 8.50%。

以上对群落结构的进一步分析表明正是由于主要的细菌菌群变形菌门、拟杆菌门、放线菌门对温度的响应不一致,导致了细菌菌落结构发生了显著改变。温度降低,嗜冷菌(主要是拟杆菌门)的大量繁殖取代不耐低温的细菌的优势地位,进而引发污泥膨胀,沉降性能变差,表现为 SVI 值变高,而温度正是诱导这种群落结构变化的根本原因。

2.2.3 丝状菌变化

根据 OTU 分类数据,筛选出所有丝状菌进一步的分析。如图 6 所示,8 月(夏季)的丝状菌群落组成与其他月份存在显著差异,表明丝状菌菌落结构随温度发生了较明显的变化。腐螺旋菌科 Saprospiraceae 在 1、2、3、4、12 月占到了丝状菌总数的 50% 左右,且相对丰度较为稳定,但在 8 月的样品急剧下降至 25% 以下,这与污泥的 SVI 变化趋势一致,同属拟杆菌门的黄杆菌科的 Flavobacteriales 的相对丰度发生了类似的变化趋势。说明该厂活性污泥膨胀与拟杆菌门丝状菌(主要是腐螺旋菌科的 Saprospiraceae 和黄杆菌科的 Flavobacteriales)在低温月份的大量增殖有关。另外,值得注意的是绿弯菌门的 Anaerolineae 和放线菌门的 Candidatus Microthrix 作为常见的丝状菌^[21,22],在 8 月的相对丰度有显著的增殖。绿弯菌门丝状菌普遍存在于市政污水处理厂和工业废水处理厂中,它们一般隐藏在污泥菌胶团絮状体内部,通常也不会引起污泥膨胀^[23,24]。并且由于其在污泥膨胀月份的相对丰度过低,这两种丝状菌不是引起污泥膨胀的主要菌种。

针对低温条件污泥膨胀的调控方法,保温等措

施无疑会增加基建和运行费用,不太经济可行。有人提出,通过人工筛选、培育耐低温优势菌是解决这类问题的最佳途径^[25,26]。本研究建议针对郑州某污水处理厂冬季污泥膨胀问题,添加相关药剂抑制拟杆菌门丝状菌的生长,改善污泥沉降性能。

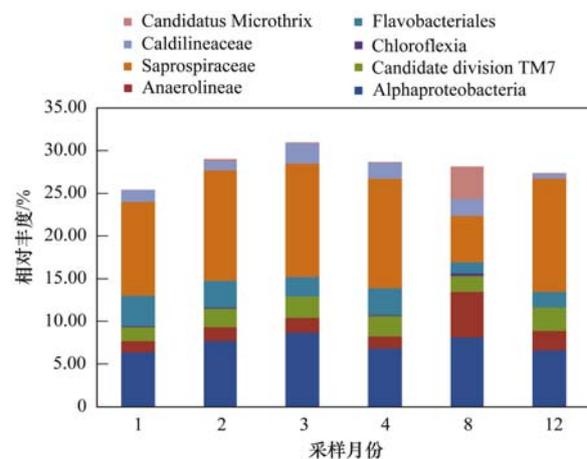


图6 丝状菌相对丰度

Fig. 6 Relative abundances of filamentous bacteria

3 结论

(1) 季节变化引起的温度变化是该厂发生冬季污泥膨胀的根本原因。

(2) 该厂发生的丝状菌污泥膨胀的优势丝状菌为腐螺旋菌科的 Saprospiraceae 和黄杆菌科的 Flavobacteriales。

参考文献:

- [1] 王浩宇,王增长,王小英. 关于活性污泥膨胀的影响因素与控制研究[J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(20): 172-173.
- [2] 葛峰,郭坤,周广灿,等. 南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析[J]. 环境科学,

- 2012, **33**(5): 1646-1651.
- [3] 高景峰, 李婷, 张树军, 等. 两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 [J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2939-2946.
- [4] 彭永臻, 郭建华, 王淑莹, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础 [J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3342-3347.
- [5] 许世伟, 张荣兵, 顾剑, 等. 大型城市污水处理厂活性污泥法污泥膨胀防控对策 [J]. 给水排水, 2010, **36**(11): 43-45.
- [6] 陈燕, 刘国华, 范强, 等. 不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化 [J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2610-2616.
- [7] 吴昌永, 彭永臻, 彭铁. A²O 工艺中的污泥膨胀问题及恢复研究 [J]. 中国环境科学, 2008, **8**(12): 1074-1078.
- [8] 王淑莹, 高春娣, 彭永臻, 等. SBR 法处理工业废水中有有机负荷对污泥膨胀的影响 [J]. 环境科学学报, 2000, **20**(2): 129-133.
- [9] 郝晓地, 朱景义, 曹秀芹. 污泥膨胀形成机理及控制措施研究现状和进展 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, **7**(5): 1-9.
- [10] 朱铁群, 李凯慧, 张杰. 活性污泥驯化的微生物生态学原理 [J]. 微生物学通报, 2008, **35**(6): 939-943.
- [11] 刘慧, 李学强, 王晓东. 活性污泥丝状菌膨胀的运行控制生产性试验研究 [J]. 中国给水排水, 2013, **29**(3): 83-86.
- [12] 陈烜, 汤兵, 张姿, 等. 曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3031-3037.
- [13] 刘振超, 李凤, 李倩. 低温下投加臭氧控制丝状菌膨胀的生产性试验研究 [J]. 中国给水排水, 2015, **31**(15): 35-39.
- [14] 白晓慧, 陈英旭, 王宝贞. 活性污泥法低温硝化及其运行控制条件研究 [J]. 环境科学学报, 2001, **21**(5): 569-572.
- [15] 罗固源, 季铁军, 豆俊峰. SUFR 系统在低温影响下处理效果的试验分析 [J]. 环境科学学报, 2005, **25**(4): 512-518.
- [16] 崔迪. 寒区污水生化处理系统微生物群落结构与功能解析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. 22-23.
- [17] 高春娣, 武联菊, 郝坤, 等. 低温条件下低溶解氧污泥微膨胀的发生及分子生态学解析 [J]. 北京工业大学学报, 2011, **37**(7): 1085-1089.
- [18] 吴成强, 杨金翠, 杨敏, 等. 运行温度对活性污泥特性的影响 [J]. 中国给水排水, 2003, **19**(9): 5-7.
- [19] 任南琪, 刘娇, 王秀衡. 低温时污泥膨胀对 MBR 中膜污染的影响 [J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 155-159.
- [20] Knoop S, Kunst S. Influence of temperature and sludge loading on activated sludge settling, especially on *Microthrix parvicella* [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(4-5): 27-35.
- [21] 李彤鲜, 费学宁, 池勇志, 等. 活性污泥丝状膨胀早期预警的研究进展 [J]. 环境化学, 2012, **31**(8): 1151-1156.
- [22] 高莎, 金德才, 赵志瑞, 等. A²O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性 [J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2912-2917.
- [23] 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**(Pt 3): 886-894.
- [24] 王萍, 余志晟, 齐嵘, 等. 丝状细菌污泥膨胀的 FISH 探针研究进展 [J]. 应用于环境生物学报, 2012, **18**(4): 705-712.
- [25] 尹军, 王雪峰, 王建辉, 等. 低温对污水生物处理过程的影响及改进措施 [J]. 吉林建筑工程学院学报, 2007, **24**(2): 29-33.
- [26] 周娜, 袁林江. 温度波动对 SBR 污泥沉降性的影响及其变化规律 [J]. 中国给水排水, 2011, **27**(7): 91-94.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行