

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

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

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

表流湿地细菌群落结构特征

魏佳明^{1,2,3}, 崔丽娟^{1,2,3*}, 李伟^{1,2,3}, 雷茵茹^{1,2,3}, 于菁菁^{1,2,3}, 秦鹏^{1,2,3}, 穆泳林^{1,2,3}, 梁钊瑞^{1,2,3}

(1. 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091; 2. 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091; 3. 北京汉石桥湿地生态系统国家定位观测研究站, 北京 101399)

摘要: 为探讨表流湿地细菌群落结构的分布以及细菌环境影响因子, 采用高通量测序方法, 对表流湿地沿水流方向 10 个不同处理单元细菌群落结构进行分析, 并利用冗余分析对其与环境因子的关系进行了探究. 研究表明: 细菌群落多样性指数 (香农-威纳指数) 平均值为 6.57, 细菌群落主要属于 Proteobacterice (38.97%)、Bacteroidetes (15.63%) 等 18 个门类, 丰度大于 1% 的共有 22 个属; 沿程细菌多样性总体呈现先升高后降低的波动性变化, 最终处理单元与最初处理单元的多样性均较其余各处理单元低; 细菌丰度与 pH、ORP、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN 均有相关性.

关键词: 表流湿地; 细菌群落; 水环境; 氮; 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4357-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.201602108

Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands

WEI Jia-ming^{1,2,3}, CUI Li-juan^{1,2,3*}, LI Wei^{1,2,3}, LEI Yin-ru^{1,2,3}, YU Jing-jing^{1,2,3}, QIN Peng^{1,2,3}, MU Yong-lin^{1,2,3}, LIANG Zhao-rui^{1,2,3}

(1. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. The Beijing Key Laboratory of Wetland Ecological Function and Restoration, Beijing 100091, China; 3. Beijing Hanshiqiao National Wetland Ecosystem Research Station, Beijing 101399, China)

Abstract: Employing high-throughput sequencing as the method, this study analyzed the relationship between the water environment and the microbial community structure in the surface-flow constructed wetland. The results showed that: the mean Shannon-Wiener index was 6.57 and there were mainly 18 categories in the microbial community, including Proteobacterice (38.97%), Bacteroidetes (15.63%) etc. Of these, the total content of 22 genera was over 1%. The microbial biodiversity showed an increasing trend at the beginning and then turned to a decreasing trend in the flowing direction. The results also revealed that pH, ORP, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N and TN acted as important restricting factors for the microbial community.

Key words: surface-flow constructed wetlands; microbial community; water environment; nitrogen; high-throughput sequencing

人工湿地将污水借助于基质、植物以及微生物等协同作用, 将污染物去除^[1]. 表流湿地总氮 (TN) 去除率较高, 且费用低、去污能力强, 运营简便, 得到了极大的推广与利用^[2]. 其中, 湿地细菌参与了污染物的分解与转化, 是人工湿地去污机制中的重要一环. 有报道称有细菌参与的硝化反硝化去氮量占氮去除总量的 60% ~ 86%^[3], 在氮去除方面占有举足轻重的地位. 因而研究人工湿地细菌群落结构, 了解人工湿地, 尤其是表流湿地的优势细菌群落及分布特征, 对从微观角度认识湿地污染物去除机制有着重要的作用. Ligi 等^[4]运用高通量测序技术, 发现 γ -Proteobacteria、 δ -Proteobacteria 和 β -Proteobacteria 是人工湿地最丰富的细菌类群. 也有学者研究发现, α -Proteobacteria、Actinobacteria 和 Bacteroidetes 为最为丰富的细菌类群^[5]. 此外, 还有研究发现湿地细菌虽对营养元素循环具有重要作用, 却也对外部环境敏感度较高^[6,7]. 近年来, 对于人工湿地空气细菌群落、植物根际细菌群落以及自

然河流、滨海湿地细菌群落多样性研究较多^[8~11], 但主要集中于利用 DGGE 等传统方法, 探究细菌群落结构或对各种类型废水净化效率的影响. 对湿地细菌群落的空间分布及其与外部环境间的关系的研究比较少.

本研究区位于北京市顺义区的北京市野生动物救护与繁育中心的复合流人工湿地中表流处理单元, 由于野生动物救护与繁育中心属未向游客开放单位, 减少了人为要素对细菌环境的影响, 采用了 Miseq 高通量测序的方法进行了沿水流方向的不同处理单元的细菌群落结构分析, 利用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 对其与环境因子的关系进行了探究, 以期能为表流湿地细菌群落结构的空

收稿日期: 2016-02-28; 修订日期: 2016-06-08

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFYBB2014QA029)

作者简介: 魏佳明 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态, E-mail: weijiaming1990@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lkyclj@126.com

间分布以及细菌环境影响因子的研究提供重要依据,并对湿地中的微生物研究提供了部分基础的数据,以期为深入探讨人工湿地净化水质的微生物机制提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 样点位置和样品采集

研究区位于北京市顺义区的北京市野生动物救护与繁育中心,在人工湿地表流处理单元共布设 10 个样点(A1~J1)。各处理单元的优势物种分别为:香蒲(*Typha orientalis*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、慈菇(*Sagittaria sagittifolia*)、针蔺(*Eleocharis congesta*)、荇菜(*Nymphoides peltatum*)、水芹(*Oenanthe javanica*)、雨久花(*Monochoria korsakowii*)、黑三棱(*Sparganium stoloniferum*)、鸢尾(*Iris tectorum*)。于 2015 年 5 月,采用 S 型 5 点取样法进行剥离表层沉积物的底泥采集,取样深度为 0~10 cm。上覆水在上述底泥采集点周围采集 3 个重复,将底泥保鲜带回实验室 -80℃ 冷冻保存,用于后续分子生物学分析;上覆水样带回实验室 4℃ 保存,作为环境因子分析。

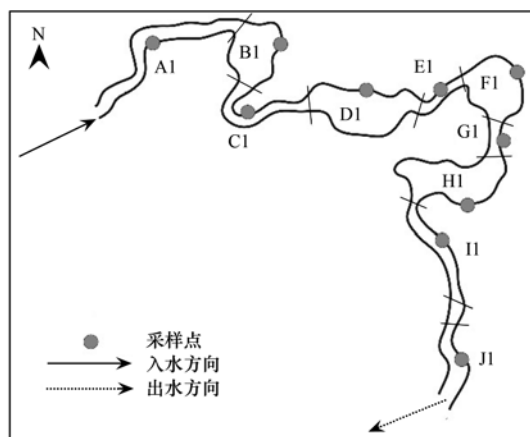


图 1 表流湿地采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in surface-flow constructed wetland

1.2 16S rDNA 的提取与 PCR 扩增检查

DNA 的提取主要利用 Omega 试剂盒 (OMEGA Soil DNA Kit) 进行并提取后,用引物^[12] 27F: 5'-AGAGTTTGTATCCTGGCTCAG-3' 和 1492R: 5'-TACCTGTACGACTT-3', 扩增提取宏基因组 DNA 的 16SrDNA。PCR 试验采用 TransGen AP221-02: TransStart Fastpfu DNA Polymerase, 20 μL 反应体系: 5 × FastPfu Buffer (4 μL), 2.5 mmol·L⁻¹ dNTPs (2 μL), Forward Primer (5 μmol·L⁻¹, 0.8 μL), Reverse

Primer (5 μmol·L⁻¹, 0.8 μL), FastPfu Polymerase (0.4 μL), Template DNA (10 ng), 补 ddH₂O 至 20 μL。

PCR 仪为 ABI GeneAmp® 9700 型, PCR 反应参数: 95℃ 3 min; 95℃ 30 s, 55℃ 30 s, 72℃ 45 s, 27 个循环; 72℃ 10 min。全部样本使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司) 切割回收 PCR 产物, Tris_HCl 洗脱; 2% 琼脂糖电泳检测。

1.3 Miseq 文库构建与测序

用 QuantiFluor-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega 公司) 检测定量 PCR 产物, 之后进行相应比例的混合。连接“Y”字形接头后, 利用磁珠对接头自连片段进行去除, 利用 PCR 扩增进行文库模板的富集, 氢氧化钠变性后, 产生单链 DNA 片段。利用桥式 PCR 和可逆性末端终结技术^[13], 依照 Illumina MiSeq 平台的标准测试方法进行高通量测序, 统计每轮收集到的荧光信号结果, 获知模板 DNA 片段的序列。

1.4 细菌多样性数据分析

应用 Usearch 软件将所有优化序列 Map 至 OTU 代表序列, 选出与 OTU 代表序列相似性在 97% 以上的序列, 生成 OTU 表格。利用 Mothur 软件分析^[14] ACE 指数 (估计群落中 OTU 数目), 香农-威纳指数 (H') (Shannon-Weiner, 估算样品中细菌多样性指数之一, 值越大说明群落多样性越高), 用于指数评估的 OTU 相似水平为 97%。

1.5 细菌分类学分析

使用 Qiime 平台与 RDP Classifier^[15] 贝叶斯算法对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析, 对比 SILVA 数据库^[16], 统计每个样品的群落组成。如若分类学数据库中出现一些分类学谱系中的中间等级没有科学名称, 以 norank 作为标记。分类学比对后根据置信度阈值的筛选, 有某些分类谱系在某一分类级别分值较低, 在统计时以 Unclassified 标记。

1.6 水体理化指标测定

温度 (Temp)、氧化还原电位 (ORP)、pH 等指标采用 YSI-EXO (YSI, USA) 便携式多参数水质分析仪现场同步测定。总氮 (TN)、氨氮 (NH₄⁺-N)、硝氮 (NO₃⁻-N)、亚硝氮 (NO₂⁻-N) 等指标测定方法按照文献 [17] 测定, 所使用仪器为 SMARTCHEM200 (WestCo, USA) 全自动化学分析仪。

1.7 统计分析

利用 SPSS 20.0 分析水体中指标参数与细菌群落结构的关系。采用主成分分析 (PCA) 方法对环境

因子进行筛选,冗余分析(RDA)研究水体细菌群落和水体环境因子之间的关系,所用软件为 R 语言与 Canoco 5.

2 结果与分析

2.1 水体理化性质

表流湿地沿水流方向不同处理单元水体环境理

化因子由表 1 所示. 总体 pH 都处于 7 以上,但均未超过 8; 电导率(SpCond)、总溶解固体(TDS)、盐度(Salinity)、氧化还原电位(ORP)均呈现先升高后降低的趋势,前三者波动性较小,后者波动性较大; 温度(Temp)的变化幅度不大,均在 22 ~ 25℃ 之间波动; 浊度(Turbidity)则与其他指标相反,呈现了先降低后升高的变化.

表 1 表流湿地不同处理单元水体环境理化因子

Table 1 Physicochemical characteristics of each unit in the surface-flow constructed wetland

项目	温度 /℃	电导率 /mS·cm ⁻¹	总溶解固体 /g·L ⁻¹	盐度 /ng·L ⁻¹	pH	氧化还原电位 /mV	浊度 /NTU
A1	22.787	0.542	0.352	0.263	7.700	-90.667	14.333
B1	22.830	0.555	0.361	0.270	7.627	-105.333	238.533
C1	23.623	0.560	0.364	0.270	7.680	-96.000	19.900
D1	23.197	0.558	0.363	0.270	7.633	-89.000	14.733
E1	23.577	0.554	0.360	0.270	7.697	-32.333	-0.300
F1	24.040	0.559	0.363	0.270	7.780	-10.667	6.700
G1	24.563	0.523	0.340	0.253	7.823	-63.667	93.967
H1	23.813	0.531	0.345	0.253	7.767	-42.000	138.400
I1	25.070	0.530	0.345	0.257	7.697	-86.333	303.267
J1	23.880	0.545	0.354	0.267	7.773	-60.333	146.800

表流湿地各种形态氮含量变化如图 2 所示,从中可以看出各采样点总氮(TN)含量基本处于国家 II 类与 III 类水标准之间,随流动方向有降低的趋势. 其中氨氮(NH₄⁺-N)与亚硝氮(NO₂⁻-N)含量相对硝氮(NO₃⁻-N)较高. 除硝氮呈现了明显降低趋势外,其他指标均出现了先升高后降低的趋势. 总体看来,表流湿地具备一定的去除氮的能力.

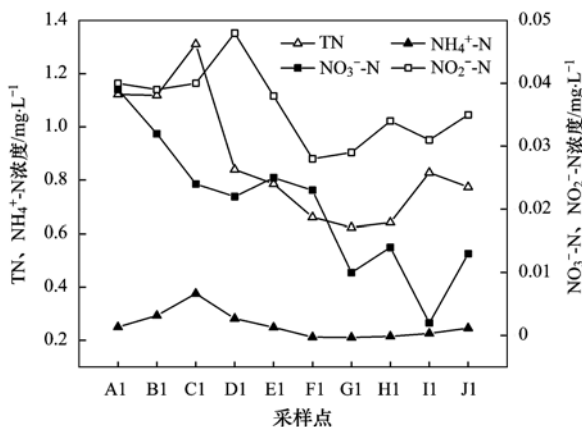


图 2 表流湿地不同处理单元水体中不同氮形态含量变化

Fig. 2 Variations in contents of different nitrogen forms in each unit of the surface-flow constructed wetland

2.2 细菌多样性和丰度

如图 3 所示,10 个样品按相似度 97% 进行聚类分析得到的 OTU 数量平均为 3 044 个,利用香农-威纳指数(Shannon-Weiner index, H')比较分析 10 个

样点中的细菌多样性,结果平均 H' 达 6.57,总体呈现先升高后降低的趋势,其中最高值 6.94 出现在 F1 处理单元,菌群丰度 ACE 指数均值达到了 3 704,与多样性的变化趋势十分接近,也在 F1 处理单元出现了最高值 4 070.

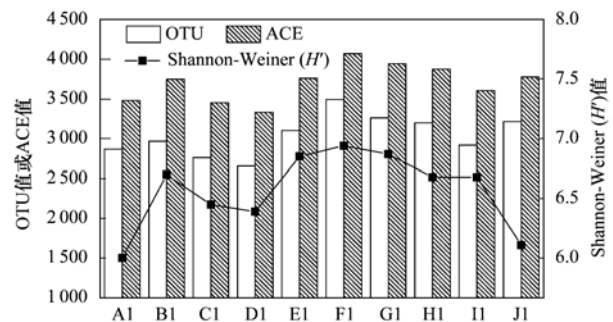


图 3 表流湿地不同处理单元细菌多样性和丰度

Fig. 3 Biodiversity and abundance of bacteria in each unit of the surface-flow constructed wetland

2.3 细菌群落结构

提取 97% 相似水平的 OTU 代表序列,应用 RDP classifier^[15]贝叶斯算法进行分类学分析,得出门、属两个水平的各个样品细菌群落结构组成. 统计其在门类别上的构成形成柱状图(图 4),同时分析在各个水平上的菌群结构. 结果显示检测所得 OTU 主要属于 18 个门类,分别是 Proteobacterice (38.97%)、Bacteroidetes (15.63%)、Chloroflexi (8.1%)、Acidobacteria (8%)、Firmicutes (7.2%)、

Planctomycetes (5.55%)、 Chlorobi (3.23%)、 Actinobacteria (2.37%)、 Spirochaetae (1.38%)、 Cyanobacteria(1.23%)、 Nitrospirae (1.04%)， 剩 余 门 类 归 为 待 定 菌 群 (Candidate _ division _ WS3、

Candidate _ division _ OP8、 Bacteria _ unclassified、 3.16%) 和 稀 有 细 菌 类 别 (Lentisphaerae、 Gemmatimonadetes、 Fibrobacteres, 1.27%)。 各 采 样 点 的 优 势 菌 均 为 Proteobacterice。

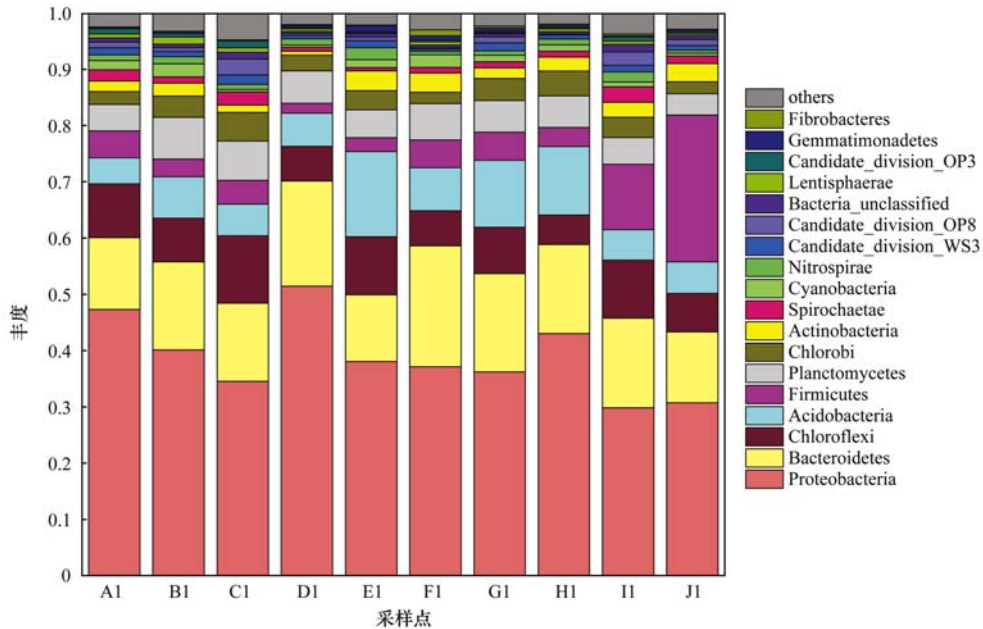


图 4 表流湿地不同处理单元细菌群落结构

Fig. 4 Community structure of bacteria in each unit of the surface-flow constructed wetland

对 不 同 处 理 单 元 的 不 同 门 类 细 菌 所 占 比 重 进 行 均 值 分 析, 如 图 5 所 示. 其 中 Proteobacterice 的 比 重 均 值 为 0.39, 此 外 均 值 较 高 的 门 类 为 Bacteroidetes、 Chloroflexi、 Acidobacteria、 Firmicutes、 Planctomycetes. 对 不 同 处 理 单 元 的 不 同 门 类 细 菌 所 占 比 重 进 行 方 差 分 析, 发 现 菌 群 变 化 主 要 集 中 在 Firmicutes、 Proteobacteria、 Acidobacteria、 Bacteroidetes、 Chloroflexi、 Planctomycetes. 比 重 所 占 较 高 的 门 类 细 菌 方 差 也 较 高, 说 明 不 同 处 理 单 元 的 细 菌 结 构 变 化 主 要 发 生 在 了 所 占 比 重 较 高 的 细 菌 门 类 上.

此 外, 菌 群 丰 度 大 于 1% 的 共 有 22 个 属, 为 Comamonadaceae _ unclassified (4.54%)、 Anaerolineaceae _ uncultured (4.53%)、 Lactococcus (3.6%)、 Subgroup_6_norank(3.46%)、 vadinHA17_norank (2.81%)、 WCHB1-69_norank (2.43%) 和 Nitrosomonadaceae _ uncultured (1.88%)、 Thiobacillus (1.78%)、 Saprospiraceae _ uncultured (1.43%)、 Polaromonas (1.37%)、 Rhodocyclaceae _ unclassified (1.38%)、 Comamonas (1.33%)、 Hydrogenophaga (1.27%)、 Xanthomonadales _ norank (1.32%)、 Flavobacterium (1.21%)、 SC-I- 84 _ norank

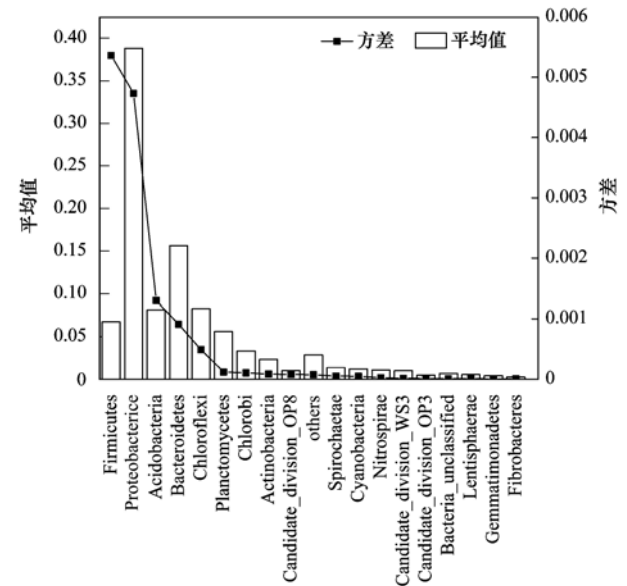


图 5 表流湿地不同门类细菌所占比重均值与方差分布
Fig. 5 Mean and variance of different taxa of bacteria in the surface-flow constructed wetland

(1.17%)、 Xanthomonadales _ uncultured (1.13%)、 Candidate _ division _ OP8 _ norank (1.05%)、 Caldilineaceae _ uncultured (1.03%)、 Candidate _ division _ WS3 _ norank (1.03%)、 Pirellula (1%)、

BSV26_norank(1%) .

应用 Bray-Curtis 距离算法和 complete 聚类方法,将高丰度和低丰度的物种分块聚集,通过颜色梯度及相似程度来反映多个样本在各分类水平上群落组成的相似性和差异性,如图 6 所示,蓝色相似度最差,红色相似度最高. 结果表明,最高相似度为

25.2% ,整体相似度较低. 采样点 A1、C1、I1、J1 与 B1、D1、E1、F1、G1、H1 菌群群落组成相差较大,其中 A1 与 C1,I1 与 J1 菌群群落组成较为相近,这与水体理化性质的变化较为相似,可能是水体环境因素影响了细菌群落组成. 各采样点样本 *Anaerolineaceae* _ *uncultured*、 *Comamonadaceae* _

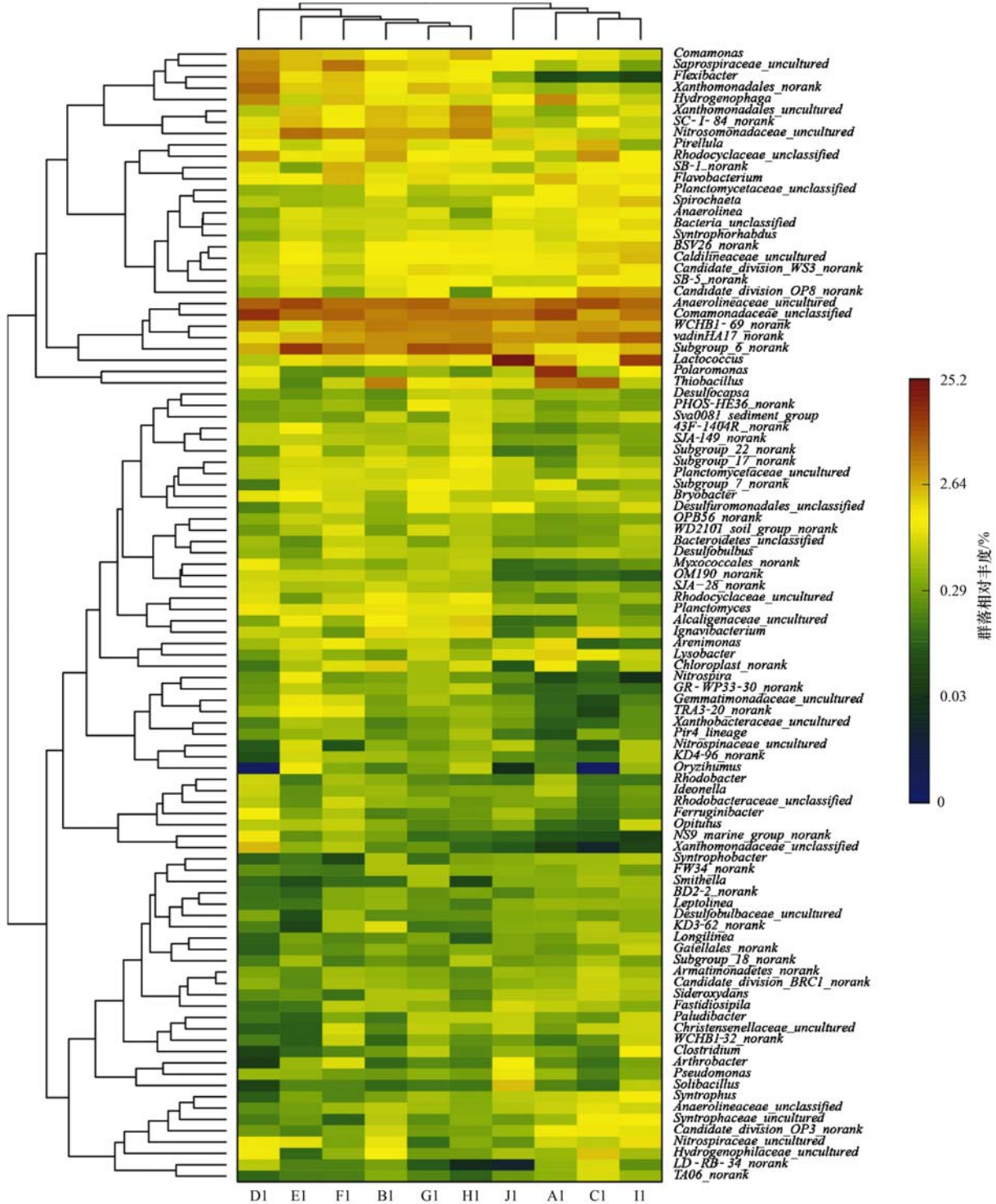


图 6 表流湿地细菌群落聚类 heatmap

Fig. 6 Heatmap of microbial clusters in the surface-flow constructed wetland

unclassified、*WCHB1-69_norank*、*vadinHA17_norank*、*Lactococcus*、*Subgroup_6_norank* 相对丰度都较高,A1 与 J1 有明显差异.

2.4 细菌与环境因子的关系

以水体理化因子为主要环境因子,对其以主成分分析法(PAC)进行主成分提取,方差最大化正交旋转后($P=0.05$),提取了3个主成分,贡献率分别为0.508、0.249、0.129. 第一主成分主要反映了TDS、SpCond、Salinity的影响,因子载荷系数分别为-0.471、-0.470、-0.459;第二主成分主要反映了ORP、pH、Turbidity的影响,因子载荷系数分别为-0.654、-0.449、0.418;第三主成分主要反映了Temp的影响,因子载荷系数分别为-0.563. 不同环境因子的载荷分布特征表明该表流湿地的主要环境因子包括SpCond、TDS、pH和ORP(图7).

通过OTU数量、ACE指数以及 H' 与不同外部环境因子的皮尔逊相关性分析(表2),发现细菌丰

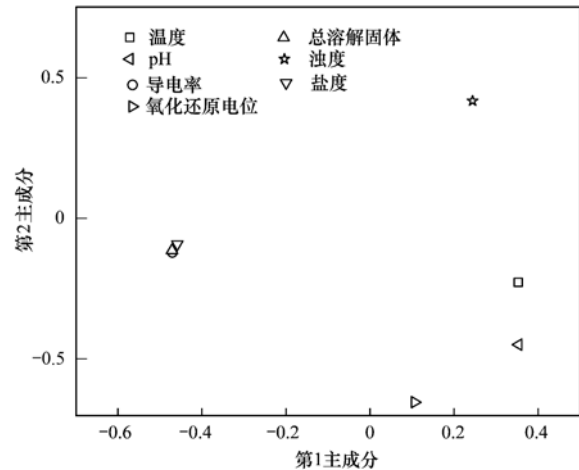


图7 表流湿地不同环境因子 PCA 分析

Fig. 7 PCA ordinations for various environmental factors in the surface-flow constructed wetland

度与ORP、pH、TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N均有一定相关性,其中与ORP、 NO_2^- -N的相关性最大.

表2 细菌多样性与环境因子的关系¹⁾

Table 2 Relationship between bacterial diversity and environment factors

	电导率	总溶解固体	pH	氧化还原电位	TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	NO_2^- -N
OTU	-0.249	-0.256	0.815 **	0.825 **	-0.694 *	-0.262	-0.685 *	-0.828 **
ACE	-0.280	-0.287	0.742 *	0.748 *	-0.664 *	-0.271	-0.647 *	-0.833 **
H'	-0.069	-0.074	0.234	0.498	-0.470	-0.318	-0.312	-0.532

1) **表示在0.01水平(双侧)上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关

对水体理化环境因子与细菌主要菌落(属)所占比重进行中心标准化,并进行校正(蒙特卡洛置换检验),提取第一与第二坐标轴信息,对方差总解释率为61.03%,从而形成冗余分析(RDA),图8中直接看出物种群落分布与环境因子之间的关系,结果表明*Hydrogenophaga*、*Pirellula*、*Polaromonas*、*WCHB1-69_norank*、*Anaerolineaceae_uncultured*、*Flavobacterium*、*Thiobacillus*与水中氮相关指标呈正相关关系,而*SC-I-84_norank*、*Nitrosomonadaceae_uncultured*、*Subgroup_6_norank*、*Xanthomonadales_norank*与其则呈负相关关系. ORP、pH等理化指标与上述关系相反. *Comamonadaceae_unclassified*、*Saprosiraceae_uncultured*、*Comamonas*、*Rhodocyclaceae_unclassified*、*Xanthomonadales_uncultured*与TDS、SpCond呈正相关关系,而*BSV26_norank*、*vadinHA17_norank*、*Caldilineaceae_uncultured*、*Lactococcus*、*Candidate_division_OP8_norank*、*Candidate_division_WS3_norank*则与其呈负相关关系.

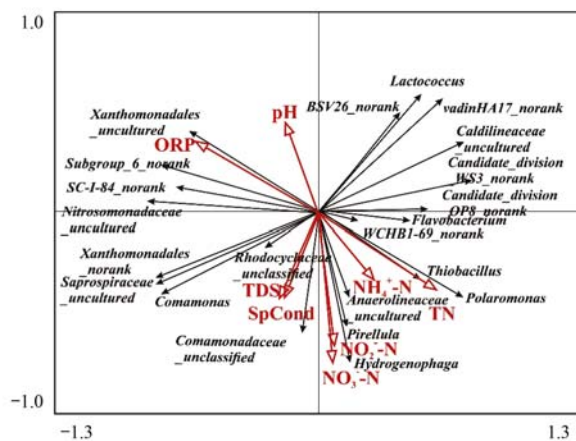


图8 细菌群落与环境因子的关系

Fig. 8 Relationship between bacterial community and environment factors

3 讨论

本研究中,氨氮的去除率较低,仅为1.6%,但总氮去除率却达到了31.01%,从进水到出水,氨氮含量变化不明显,氮元素的去除,主要集中在了硝

氮、亚硝氮与其他形态氮(多数为有机氮)上。此外,氨氮、硝氮与亚硝氮的总和在各处理单元均只占总氮含量的较少一部分。说明表流湿地入水的无机氮较少,绝大部分还处于有机氮形态,继而在沿程各处理单元,氮处理的环节首先集中在了氨化作用。由于氨化过程快于硝化过程^[4],使得水体、沉积物的有机氮不断释放,加之 C1 处理单元面积较小,性状狭窄,不利于水体存留,使得水体流动速度大,水力停留时间短,没有给水体充分处理时间。因而出现随水体流动方向,总氮含量先升高后降低,但总体呈现降低的趋势。

细菌多样性在流动水体与静止水体分别受制于不同影响要素,流动性较大的表流湿地会受到以细菌群落间相互影响为主的内部环境与细菌生存的外部环境相互作用^[18]。有学者研究发现,在水平潜流人工湿地中,细菌群落数量随深度和排污口距离的增加而减少^[19,20]。因而污染物浓度越大,可以促使细菌多样性越丰富,研究中的总氮含量呈现了波动性变化,进而使得细菌多样性也呈现了先升高后降低的波动性变化,但总体呈现了多样性指数降低的趋势,且 A1 与 C1, I1 与 J1 菌群群落组成较为相近,与上述研究得出的结果相似。进一步探究外部环境因子与 OTU 数量、Ace 以及 H' 间的相关性发现,细菌多样性、丰度均与 TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 均处于正相关关系,证实了上述结果。

通过进一步分析细菌群落结构组成,发现沿程各处理单元细菌群落优势门 Proteobacterice 主要是由以下纲组成: α -Proteobacteria (4.63%)、 β -Proteobacteria (19.42%)、 γ -Proteobacteria (6.71%)、 δ -Proteobacteria (7.8%)。 β -Proteobacteria 作为优势门中的优势纲,有研究表明其在淡水环境中常见^[22],丰度受到营养元素浓度以及 pH 影响^[23]。此外,优势门 Bacteroidetes (15.63%) 下的 Flavobacteria (1.63%)、Cytophagia (1.57%),在湿地中较为常见,有报道称具有硝化作用^[24]。硝化作用依赖于废水中氨氮浓度的大小^[25],同时较高浓度的硝酸盐会促进反硝化作用^[26]。因而沿程不断补充的氨氮,使得表流湿地沿程细菌多样性均处于较高水平,随后硝化作用产生的硝氮、亚硝氮促进了反硝化作用,进而发生了群落结构的变化。另外,在本研究中发现 *Thiobacillus* 与总氮的浓度存在极强的正相关关系,虽然该属为硫杆菌属,与硫元素相关极强,但该属下存在 *Thiobacillus denitrificans*,即脱氮硫杆菌,是一种反硝

化细菌,导致这种较强的关联。该属与氨氮、硝氮、亚硝氮也存在着正相关关系。与之相反的是 *Nitrosomonadaceae_uncultured*,硝化杆菌科内的一属,其与与氮元素相关的指标,尤其是总氮存在着负相关关系。这种关系说明细菌的硝化与反硝化作用,对水中氮去除有着很大关联。

细菌多样性除受到上覆水营养元素的影响,主要还受到了其他环境因子的影响。水体的导电率反映了水体的含盐量,其中细菌群落比重最大的属 *Comamonadaceae_unclassified* 与导电率产生了较强的正相关作用,但导电率却对整体细菌丰度并未产生极强的影响,这说明该表流湿地水体导电率中的水体含盐种类可能仅对部分微生物产生了影响,如上文对含氮盐类与个别细菌属间的相关性,而对其他细菌影响较弱。氧化还原电位表现了水体的氧化性与还原性,其中与其呈正相关作用的细菌属则适宜生存在氧化性较强的环境中,如具有硝化功能的 *Nitrosomonadaceae_uncultured* 等。此外,该表流湿地的 pH 虽变化较小,但由于一些细菌因其对 pH 的较高敏感性,而使得 pH 对其参与的净化过程影响较大,例如硝化作用的最适 pH 值是 7.0 ~ 8.0^[25]。有学者研究发现表流湿地 TN 进水浓度与出水浓度存在显著线性相关关系^[27]。表流湿地 pH 值沿水流方向变化不大,总体都呈现弱碱性,其中氨氮浓度呈现沿水流方向逐渐降低的趋势^[28]。本研究发现由于表流湿地水中的 pH 受到初始入水 pH 影响较大,但沿程氨氮的浓度始终变化不大,使得表流湿地沿程 pH 值一直处于弱碱性,这种弱碱性较酸性条件更有利于细菌异养活动^[29]。因而与水中的 pH 以及 N 元素含量相关^[24]。在本研究 RDA 分析中, β -Proteobacteria 下的 *Nitrosomonadaceae_uncultured* 与水中氮相关指标呈负相关关系,与 pH 呈正相关关系但 Flavobacteria 下的 *Flavobacterium* 与水中氮相关指标呈正相关关系,与 pH 呈负相关关系,与已有研究得出的结果一致^[24]。

4 结论

(1) 随水体流动方向,总氮含量先升高后降低,但总体呈现降低的趋势,而细菌多样性也呈现了先升高后降低的波动性变化,但总体呈现了多样性指数降低的趋势。

(2) 细菌群落多样性指数(香农-威纳指数)平均值为 6.57,细菌群落主要属于 Proteobacterice (38.97%)、Bacteroidetes (15.63%) 等 18 个门类,

丰度大于 1% 的共有 22 个属。

(3) 细菌丰度与 pH、ORP、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、TN 均有相关性,但不同细菌受到的环境因子影响差异较大,其中受不同含氮元素影响的细菌较为类似。

参考文献:

- [1] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [2] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, **26**(8): 2670-2677.
Lu S Y, Jin X C, Yu G. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(8): 2670-2677.
- [3] US EPA. Design manual: constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment[R]. EPA 625/1-88/022, 1988.
- [4] Ligi T, Oopkaup K, Truu M, *et al.* Characterization of bacterial communities in soil and sediment of a created riverine wetland complex using high-throughput 16S rRNA amplicon sequencing [J]. Ecological Engineering, 2014, **72**: 56-66.
- [5] Buesing N, Filippini M, Bürgmann H, *et al.* Microbial communities in contrasting freshwater marsh microhabitats [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2009, **69**(1): 84-97.
- [6] Findlay S. Stream microbial ecology [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2010, **29**(1): 170-181.
- [7] Jiang J G, Shen Y F. Development of the microbial communities in Lake Donghu in relation to water quality [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **127**(1-3): 227-236.
- [8] 左平, 欧志吉, 姜启昊, 等. 江苏盐城原生滨海湿地土壤中的微生物群落功能多样性分析 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2014, **50**(5): 715-722.
Zuo P, Ou Z J, Jiang Q W, *et al.* Function diversity of soil microbial communities in original coastal wetlands, Yancheng, Jiangsu Province [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014, **50**(5): 715-722.
- [9] 关晓燕, 韩家波, 王摆, 等. 辽东湾大凌河口湿地土壤微生物群落分析 [J]. 生态环境学报, 2012, **21**(6): 1063-1070.
Guan X Y, Han J B, Wang B, *et al.* Analysis of bacterial communities in Liaodong Bay Dalinghe estuarine wetland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(6): 1063-1070.
- [10] 唐婧, 徐小蓉, 商传禹, 等. 南明河城区河段细菌多样性与环境因子的关系 [J]. 微生物学报, 2015, **55**(8): 1050-1059.
Tang J, Xu X R, Shang C Y, *et al.* Association of bacterial diversity in city area of Nanming river with environmental factors [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2015, **55**(8): 1050-1059.
- [11] 雷旭, 李冰, 李晓, 等. 复合垂直流人工湿地系统中不同植物根际微生物群落结构 [J]. 生态学杂志, 2015, **34**(5): 1373-1381.
Lei X, Li B, Li X, *et al.* Rhizosphere microbial communities of three plants in vertical-flow constructed wetland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(5): 1373-1381.
- [12] Xiong J B, Liu Y Q, Lin X G, *et al.* Geographic distance and pH drive bacterial distribution in alkaline lake sediments across Tibetan Plateau [J]. Environmental Microbiology, 2012, **14**(9): 2457-2466.
- [13] Turcatti G, Romieu A, Fedurco M, *et al.* A new class of cleavable fluorescent nucleotides: synthesis and optimization as reversible terminators for DNA sequencing by synthesis [J]. Nucleic Acids Research, 2008, **36**(4): e25.
- [14] Schloss P D, Gevers D, Westcott S L. Reducing the effects of PCR amplification and sequencing artifacts on 16S rRNA-based studies [J]. PLoS One, 2011, **6**(12): e27310.
- [15] Wang Q, Garrity G M, Tiedje J M, *et al.* Naive Bayesian classifier for rapid assignment of rRNA sequences into the new bacterial taxonomy [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(16): 5261-5267.
- [16] Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, *et al.* The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools [J]. Nucleic Acids Research, 2013, **41**(D1): D590-D596.
- [17] 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.
- [18] Brendan Logue J, Lindström E S. Biogeography of bacterioplankton in inland waters [J]. Freshwater Reviews, 2008, **1**(1): 99-114.
- [19] Nguyen L M. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters [J]. Ecological Engineering, 2000, **16**(2): 199-221.
- [20] Nurk K, Truu J, Truu M, *et al.* Microbial characteristics and nitrogen transformation in planted soil filter for domestic wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2005, **40**(6-7): 1201-1214.
- [21] Yu Z T, Mohn W W. Bacterial diversity and community structure in an aerated lagoon revealed by ribosomal intergenic spacer analyses and 16S ribosomal DNA sequencing [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, **67**(4): 1565-1574.
- [22] 曾巾, 杨柳燕, 梁医, 等. 南京玄武湖底泥微生物群落结构研究(英文版) [J]. 生态科学, 2008, **27**(5): 351-356.
Zeng J, Yang L Y, Liang Y, *et al.* Bacterial communities in sediments of Lake Xuanwu [J]. Ecological Science, 2008, **27**(5): 351-356.
- [23] Nacke H, Thürmer A, Wollherr A, *et al.* Pyrosequencing-based assessment of bacterial community structure along different management types in German forest and grassland soils [J]. PLoS One, 2011, **6**(2): e17000.
- [24] 曾永辉. 典型海洋环境中浮游细菌多样性及环境适应机制的研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
Zeng Y H. Microbial diversity and environmental adaptation mechanisms in typical marine environments [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [25] Paredes D, Kusch P, Mbvette T S A, *et al.* New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment—a review [J]. Engineering in Life Sciences, 2007, **7**(1): 13-25.
- [26] Sirivedhin T, Gray K A. Factors affecting denitrification rates in experimental wetlands: field and laboratory studies [J]. Ecological Engineering, 2006, **26**(2): 167-181.
- [27] 崔丽娟, 李伟, 张曼胤, 等. 复合人工湿地运行 2 a 净化水禽污水效果 [J]. 农业工程学报, 2011, **27**(12): 234-240.

- Cui L J, Li W, Zhang M Y, *et al.* Effects of waterfowl sewage treatment by integrated artificial wetland running for 2 years[J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(12): 234-240.
- [28] 张列宇, 饶本强, 熊璞, 等. 人工湿地黑臭水体处理系统微生物脱氮机理研究[J]. 水生生物学报, 2010, **34**(2): 256-261.
- Zhang L Y, Rao B Q, Xiong Y, *et al.* The microbial mechanism of horizontal constructed wetland used to treated black-odor river [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, **34**(2): 256-261.
- [29] Tao W D, Hall K J, Ramey W. Effects of influent strength on microorganisms in surface flow mesocosm wetlands [J]. Water Research, 2007, **41**(19): 4557-4565.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggyery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (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