ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第7期
2017年7月15日

目 次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 …… 颜金培,陈立奇,林奇,赵淑惠,李磊,朱大勇(2629)
利用MODIS C6数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 …… 赵仕伟,高晓清(2637)
秋冬季节华北背景地区PM_1污染特征及来源 …… 张周祥,张养梅,张小曳,王亚强,沈小静,孙俊英,周怀刚(2647)
杭州市$PM_{2.5}$中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 …… 吴丹,蔺少龙,杨焕强,杜荣光,夏俊荣,齐冰,刘刚,李凤英,杨孟,盖鑫磊(2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 …… 谢丹丹,祁建华,张瑞峰(2667)
西安市重污染与清洁天$PM_{2.5}$组分及其活性氧物质对比 …… 王堃,韩永明,何世恒,张婷,刘随心,曹军骥(2679)
黄山PM_{10}中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 …… 孟静静,侯战方,张二勋,董杰,刘晓迪,邢继钊,刘加珍(2688)
泉州市大气$PM_{2.5}$镧系元素组成特征及来源解析 …… 张云峰,于瑞莲,胡恭任,孙境蔚,许文质,张棕巍(2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 …… 许亚宣,李小敏,于华通,董林艳,赵玉婷,姚懿函,邹广迅,张新民(2707)
G20峰会期间宜兴市大气VOCs特征及来源分析 …… 张璘,张祥志,秦玮,茅晶晶,秦艳红,谢卫平,史文科,陈文泰(2718)
四川省2005~2014年农业源氨排放清单及分布特征 …… 冯小琼,陈军辉,姜涛,钱骏,叶宏(2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 …… 鲁君,黄成,胡磬遥,杨强,井宝莉,夏阳,卢滨,唐伟,楼晟荣,陶士康,李莉(2738)
我国城市饮用水中*N*-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 …… 张秋秋,潘申龄,张昱,杨敏,安伟(2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析 …… 赵鹏,何江涛,王曼丽,崔亚丰(2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 …… 张倩,宋金明,彭全材,李学刚,袁华茂,李宁,段丽琴,曲宝晓,王启栋(2763)
桂江流域夏季水-气界面CO_2脱气的空间变化及其影响因素 …… 张陶,李建鸿,蒲俊兵,吴飞红,李丽,袁道先(2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 …… 宁增平,肖青相,蓝小龙,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚A类似物的分布特征及潜在风险 …… 陈玫宏,郭敏,徐怀洲,刘丹,程杰,李江,张圣虎,石利利(2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 …… 李文章,张莉,王圣瑞,肖尚斌,钱伟斌,席银,许可宸,史玲珑(2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 …… 孙清清,陈敬安,王敬富,杨海全,计永雪,兰晨,王箫(2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征 …… 张艳,张婷婷,陈卫平,郭昌胜,花镇东,张远,徐建(2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 …… 陈莹,王昭,吴亚刚,赵剑强,杨文娟(2828)
CaO_2不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 …… 徐垚,李大鹏,韩菲尔,宋小君,李鑫,周婧,黄勇(2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 …… 鲜青松,唐翔宇,朱波(2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 …… 陈友媛,吴亚东,孙萍,吴丹(2850)
氧化镁基生物质炭高效去除水体中磷的特性 …… 王彬斌,林景东,万顺利,何锋(2859)
Pd/Fe^0双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 …… 张环,傅敏,魏俊富,王一冰,安慧颖,沈书怡(2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 …… 孔殿超,周跃飞,陈天虎,王进,李碧(2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 …… 韩慧慧,缪恒锋,张雅晶,陆敏峰,黄振兴,阮文权(2883)
微生物燃料电池改性阳极处理PTA废水 …… 孙靖云,范梦婕,陈英文,祝社民,沈树宝(2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 …… 苏文,陈洁,张胜鹏,孔繁翔(2901)
沼液SBR处理出水养殖螺旋藻 …… 蔡小波,郁强强,刘锐,赵远,陈吕军(2910)
K^+强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 …… 吴国栋,于德爽,李津,周同,王晓静(2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 …… 于濛雨,刘毅,田玉斌,石欢,徐富,杨宏(2925)
ANAMMOX的快速启动及EPS在ANAMMOX颗粒污泥中的空间分布 …… 李惠娟,彭党聪,陈国燕,姚倩,卓杨,王彬斌(2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 …… 李祥,林兴,王凡,袁砚,黄勇,袁怡,毕贞,刘忻,杨朋兵(2941)
基于厌氧氨氧化的含氨废气原位处理 …… 林兴,王凡,袁砚,李祥,黄勇,顾澄伟(2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 …… 沈庆然,李田,曹熠,潘舆(2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 …… 高景峰,孙丽欣,樊晓燕,潘凯玲,李定昌(2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 …… 周贵忠,许硕,姚倩,银钗(2972)
CO_2-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 …… 王博强,李晨阳,卢伟,樊昊,张冬至,汪治,吕聪,沈福东(2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 …… 田冬,高明,黄容,吕盛,徐畅(2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 …… 腾昌运,沈建国,王忠,王行,李鸿毅,张志剑(3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 …… 杜璨,许晨阳,王强,张帆,马武功,和文祥,侯琳,耿增超(3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响 …… 贾钦,朱雪梅,王琪,傅海辉,郝亚琼,何洁,杨子良(3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 …… 方至萍,廖敏,张楠,吕婷,黄小辉(3028)
BS+CTMAB复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 …… 刘伟,孟昭福,任爽,李文斌(3036)
1999年与2014年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 …… 李芬,王训,罗辑,袁巍,喻子恒,商立海(3045)
铅锌尾矿污染区3种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 …… 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静(3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 …… 周莉娜,蔡函臻,李荣华,王美净,赵军超,王权,张增强(3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 …… 郭香麟,左剑恶,史绪川,王凯军,吴静(3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 …… 晏卓逸,岳波,高红,李志龙,黄启飞,聂小琴,汪群慧(3078)
甲烷催化还原NO_x中Co基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 …… 潘华,建艳飞,陈宁娜,刘红霞,何炽,贺亚飞(3085)
《环境科学》征稿简则(2737) 《环境科学》征订启事(2809) 信息(2867, 2971, 3027)

微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果

陈友媛[1],吴亚东[1],孙萍[1*],吴丹[1,2]
(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院,海洋环境与生态教育部重点实验室,山东省海洋环境地质工程重点实验室,青岛 266100; 2. 青岛市规划局,青岛 266000)

摘要: 为了研究盐生植物碱蓬(*Suaeda salsa*)和微生物构建的组合型浮床对微盐碱水体的净化效果,构建空白对照浮床 A、碱蓬植物浮床 B、微生物浮床 C 和碱蓬 + 微生物组合型浮床 D,在室内连续流条件下对富营养化微盐碱水体(pH 值为 8.5 ~ 9.0,盐度为 5‰ ~ 7‰)进行动态净化实验. 结果表明,碱蓬植物浮床对总氮、总磷、高锰酸盐指数的去除率分别为 32.5%、14.3% 和 28.2%,增加微生物人工介质后,碱蓬 + 微生物组合浮床对水体中的总氮、总磷、高锰酸盐指数的净化效率达到 70.5%、34.7%、70.8%,其中微生物单元对总氮、总磷、高锰酸盐指数的去除率分别为 37.7%、21.6%、44.5%. 碱蓬 + 微生物组合型浮床净化硝态氮、总氮的增效作用去除率分别为 12.2%、0.3%,而在去除氨氮、总磷、高锰酸盐指数的过程中没有产生增效作用;表明在微盐碱环境中,组合型浮床中植物和微生物的协同增效作用受到抑制. 采用高通量测序技术对浮床 C、D 中微生物群落进行对比分析表明,组合型浮床中微生物群落具有更高的丰富度和多样性,这与浮床 D 具有较高的污染物去除率的结果相一致. 主成分分析结果表明,微生物的降解作用是水体中污染物浓度降低的主要因素. 本研究为组合型浮床应用于净化滨海区富营养化微盐碱水体提供了参考依据.

关键词:盐生植物;微生物;组合型浮床;微盐碱水体;水质净化;增效作用
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)07-2850-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201610128

Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed

CHEN You-yuan[1], WU Ya-dong[1], SUN Ping[1*], WU Dan[1,2]
(1. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education; Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Urban Planning Bureau Qingdao, Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to study the purifying effect of combined floating bed constucted by salinity plant *Suaeda salsa* and microorganisms on the slightly salt-alkaline water, blank floating bed A, *S. salsa* floating bed B, microbes floating bed C and *S. salsa* + microorganisms combined floating bed D were established, and slightly salt-alkaline eutrophic water body (pH 8.5-9.0, salinity 5‰-7‰) was purified under continuous flow conditions in the laboratory. Results showed that the removal rates of total nitrogen, total phosphorus, permanganate index by *S. salsa* floating bed were 32.5%, 14.3% and 28.2%, respectively. And the removal rates of total nitrogen, total phosphorus and permanganate index by *S. salsa* + microorganisms combined floating bed D which installed artificial medium with microorganisms reached 70.5%, 34.7% and 70.8%, respectively, of which the removal rates of total nitrogen, total phosphorus and permanganate index by microbial units were 37.7%, 21.6% and 44.5%, respectively. Synergies removal rates of nitrate nitrogen and total nitrogen by *S. salsa* + microorganisms combined floating bed were 12.2% and 0.3%, but there was no synergy in the process of removing ammonia nitrogen, total phosphorus and permanganate index, which indicated that the synergies of *S. salsa* and microorganisms in the combined floating bed were suppressed in slightly salt-alkaline environment. The high-throughput sequencing technique was adopted to analyze the microbial community in the floating bed C and D, which indicated that the abundance and diversity of microbial community in the combined floating bed were higher, and this was consistent with the result of the higher removal rate of the flotation bed D. Principal component analysis showed that the microbial degradation was a major factor in reducing the concentration of pollutants. This study provided a guide for the using of floating bed in purifying slightly salt-alkaline eutrophic water bodies in coastal area.

Key words: salinity plant; microorganism; combined floating bed; slightly salt-alkaline water; water purification; synergies

滨海河口区受潮汐作用影响,水体多为咸水或半咸水,经济发展导致水体富营养化现象普遍存在[1~3]. 近年来,生态浮床技术在水生态修复中得到广泛应用,生态浮床利用植物根系的吸附和吸收作用,能够有效地降低水体中污染物浓度,同时,浮床植物根系能够附着微生物,利用微生物的降解功

收稿日期: 2016-10-20; **修订日期**: 2017-02-23
基金项目: 青岛市政府采购项目(T-20150205-018)
作者简介: 陈友媛(1966 ~),女,博士,副教授,主要研究方向为水土污染控制与修复技术,E-mail: youyuan@ouc.edu.cn
* 通信作者,E-mail:sunpingllj@163.com

能进一步提高生态浮床对水体的净化能力[4~7]. 有研究表明,在淡水环境中,植物根系分泌的有机酸、蛋白质等物质能够促进微生物的生长,根系泌氧为植物内生菌和根际微生物提供氧气;同时,微生物降解产生的小分子有机物、无机物等可以被植物吸收利用,植物和微生物产生协同增效作用,进一步强化生态浮床对水质的净化效果[7~9];然而目前将生态浮床应用于净化滨海地区盐碱水体的研究较少. 受盐碱胁迫的影响,一方面,植物的生长受到限制,光合作用强度降低,根系活力下降,生态浮床对水体的净化效果尚不清楚;另一方面,在盐碱环境中,植物和微生物在净化富营养化水体中能否产生与淡水环境中相同的协同增效作用有待进一步探究. 本研究选用盐生植物碱蓬(*Suaeda salsa*)作为浮床植物,在浮床上安装附着有微生物的人工介质,构建组合型浮床;通过对照实验,探究该组合型浮床对富营养化微盐碱水体的净化效果,对植物和微生物在水质净化过程中的协同增效作用进行探讨,并对浮床植物生长状况和微生物特征进行分析,以期为组合型浮床在微盐碱水体生态修复中的应用提供理论支撑.

1　材料与方法

1.1　实验装置

实验在4个相同的反应器中进行,反应器长宽高为 80 cm × 20 cm × 50 cm,反应区长 70 cm,有效水深 30 cm,反应器由进水系统、浮床系统、曝气系统和出水系统 4 部分组成,如图 1 所示. 其中,浮床系统由浮床植物、浮板和悬挂在浮板下的人工介质 3 部分组成. 实验选取滨海盐生植物碱蓬作为浮床植物,选用聚乙烯泡沫板为浮板(50 cm × 19 cm × 2.5 cm),浮板上带有直径为 5 cm 的植物种植孔,可以将植物固定在种植孔中;浮板下悬挂人工介质(醛化纤维),每组悬挂六串,每串长 25 cm;在反应区底部安装有曝气系统.

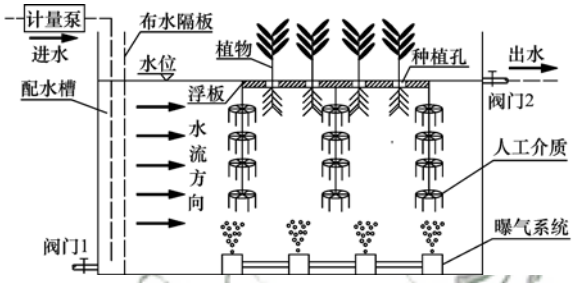

图 1　组合型浮床示意

Fig. 1　Schematic diagram of combined floating bed

1.2　实验材料

实验用水为自行配置的模拟水,各项指标均参考青岛市李村河河口区水质状况,如表 1,水体盐度为 5‰ ~ 7‰,pH 值为 8.5 ~ 9.0.

实验用植物碱蓬采自青岛市李村河河口区. 实验开始前,先将碱蓬植株在Hoagland营养液中水培 15 d,待长出新根后,选取长势良好且株高和根长相近的植株作为浮床植物,并清洗根部. 称取 200 g 碱蓬植物种植于浮床的种植孔中,浮床植物平均株高 19 cm,平均根长 4.5 cm,平均种植密度 500 株·m^{-2}. 浮床所用人工介质在挂膜前进行消毒,选对植物具有抗病虫害、促进植物生长的枯草杆菌作为菌剂,采用闷曝法进行挂膜,挂膜 3 d 后,人工介质上出现淡黄色黏稠状生物膜后,安装于浮床上进行实验[10~13].

表 1　实验用水水质指标

Table 1　Water quality indicators of test water

水质指标	氨氮 /mg·L^{-1}	硝态氮 /mg·L^{-1}	总氮 /mg·L^{-1}	总磷 /mg·L^{-1}	高锰酸盐指数 /mg·L^{-1}
浓度	3.5 ~ 3.86	2.49 ~ 2.79	6.08 ~ 6.32	3.3 ~ 3.51	38.27 ~ 42.45

1.3　实验设计

本实验在编号为 A、B、C、D 的 4 个相同的反应器中进行,分别安装空白浮床 A、植物浮床 B、微生物浮床 C、植物 + 微生物组合型浮床 D. 4 组实验进行统一供水,实验用水通过计量泵连续进入配水池,再通过布水隔板上的布水孔均匀地进入反应区,并从出水口(阀门 2)连续出水;调节进水流速,控制力停留时间(HRT)为 4 d. 4 组实验均连续曝气,调节曝气量为 0.8 L·min^{-1}. 实验从 2016 年 5 月 26 日(0 d)开始,至 2016 年 6 月 19 日(24 d)结束,实验期间各组水温为 15 ~ 18℃. 采光良好,室内气温为 18 ~ 25℃.

1.4　监测项目和测试方法

实验开始后,每天上午 08:00 从反应器出水口采集水样,迅速在实验室内进行分析,测定水样中的盐度、pH、氨氮、硝态氮、总氮、总磷的浓度和高锰酸盐指数. 实验结束后,测定各组水体中的细菌

总量. 分别在各组实验开始时和结束时,测量每组碱蓬的鲜重、株高和根长.

水质指标监测按文献[14]方法测定. 其中,水体中的氨氮采用纳氏试剂分光光度法;硝态氮采用氨基磺酸紫外分光光度法;总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;总磷采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法;高锰酸盐指数的测定采用高锰酸钾法;水体中细菌总量采用平板涂布法.

1.5 高通量测序分析

在实验进行 24 d 时从反应器 C、D 中采集菌体样品,并采用 CTAB 对样本的基因组 DNA 进行提取,检测 DNA 的纯度和浓度,进行 PCR 扩增和产物纯化(委托北京诺禾致源公司完成). 使用 TruSeq® DNA PCR-Free Sample Preparation Kit 建库试剂盒进行文库构建,构建好的文库经过 Qubit 和 Q-PCR 定量,文库合格后,使用 HiSeq2500 PE250 对细菌 16S rDNA V4 区进行测序(委托北京诺禾致源公司完成).

利用 Uparse 软件(Uparse v7.0.1001, http://drive5.com/uparse/)[15]对所有样品的全部 Effective Tags 进行聚类,默认以 97% 的一致性(Identity)将序列聚类成为 OTUs(operational taxonomic units),同时会选取 OTUs 的代表性序列,依据其算法原则,筛选的是 OTUs 中出现频数最高的序列作为 OTUs 的代表序列.

选取每个样品在门水平(Phylum)上最大丰度排名前 10 的物种,生成物种相对丰度分布图. 对不同样品在 97% 一致性阈值下的 Alpha Diversity 分析指数进行统计.

1.6 数据分析

为探究组合型浮床在净化富营养化微盐碱水体的过程中植物单元和微生物单元的作用,本研究在测定水体中各项污染物指标的基础上,用 c/c_0 来表征出水污染物浓度变化,其中,c 为出水污染物浓度($mg\cdot L^{-1}$),c_0 为进水污染物浓度($mg\cdot L^{-1}$);分别计算各污染物的去除率 η_1,其他作用(曝气、光照等)去除率 η_2,植物单元去除率 η_3,微生物单元去除率 η_4,增效作用去除率 η_5,计算方法为:

$$\text{去除率}\ \eta_1(\%) = (\text{进水中污染物浓度} - \text{出水中污染物浓度}) \div \text{进水中污染物浓度} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{其他作用去除率}\ \eta_2(\%) = \text{空白浮床 A 去除率} \quad (2)$$

$$\text{植物单元去除率}\ \eta_3(\%) = \text{植物浮床 B 去除率} - \text{空白浮床 A 去除率} \quad (3)$$

$$\text{微生物单元去除率}\ \eta_4(\%) = \text{微生物浮床 C 去除率} - \text{空白浮床 A 去除率} \quad (4)$$

$$\text{植物 + 微生物增效作用去除率}\ \eta_5(\%) = \eta_1 - \eta_2 - \eta_3 - \eta_4 \quad (5)$$

对各组实验出水中污染物的各项指标进行初步分析表明,实验进行 10 d 后出水中各污染物浓度基本趋于稳定,因此选取第 0、2、4、6、8、10、12、18、24 d 的监测数据进行分析,并计算 10 ~ 24 d 的出水平均浓度. 数据分析采用统计软件 SPSS 19.0,通过单因素方差分析(ANOVA)比较各项测试指标在实验条件下的显著性差异,并在 $P = 0.05$ 水平下进行 Tukey 检验;采用主成分分析法对反应过程中各因素的主成分进行分析. 数据作图采用 Origin 8.5.

2 结果与讨论

2.1 组合型浮床对氮的净化效果

2.1.1 不同组合浮床对氮的净化效果

4 组浮床进出水中氨氮、硝态氮、总氮的浓度变化如图 2(a) ~ 2(c)所示. 实验初期,各组实验出水中氨氮、总氮浓度均随时间的延长显著降低($P < 0.05$),10 d 后 4 组实验出水中氨氮、总氮浓度逐渐趋于稳定;4 组实验出水中硝态氮浓度出现不同的变化趋势,在 0 ~ 4 d,水体中硝态氮浓度逐渐升高,其中添加有微生物的 C 组和 D 组实验出水中硝态氮浓度显著高于进水($P < 0.05$);在 4 ~ 12 d,4 组实验出水中硝态氮浓度迅速降低,并趋于稳定. 待出水稳定后,D 组实验出水中氨氮、硝态氮、总氮平均浓度最低,出水平均浓度为 0.83、0.91 和 1.82 $mg\cdot L^{-1}$,均达到地表Ⅴ类水质量标准.

2.1.2 植物和微生物对氮的净化作用

水体中的氮主要由氨氮、硝态氮、亚硝态氮和有机氮组成. 水体中氮的去除机制主要有物理吸附作用、植物吸收和微生物降解作用. 按照 1.6 节中污染物去除率的计算方法,得到组合型浮床净化氨氮、硝态氮和总氮的过程中其他作用去除率 η_2、植物单元去除率 η_3 和微生物单元去除率 η_4,如图 2(d)所示. 浮床 D 对氨氮的去除率 η_1 为 77.8%,其中 η_4(38.6%) > η_2(24.9%) > η_3(16.5%),表明微生物在组合型浮床去除水体中氨氮的过程中发挥着主要作用. 在有氧环境中,植物可以直接吸收利用氨氮合成多种氨基酸,而大部分的氨氮则主要通过硝化细菌的硝化作用转化为硝态氮和亚硝态氮,一部分被植物吸收利用,一部分被反硝化细菌转化

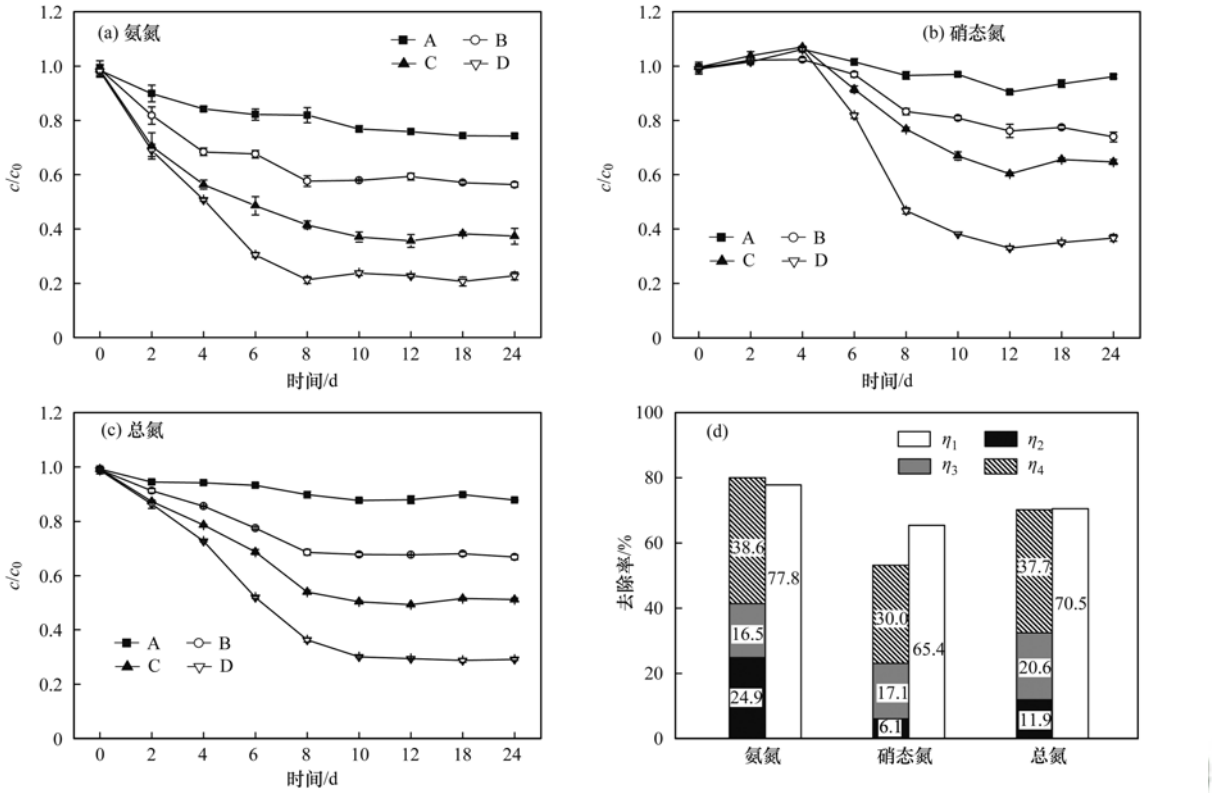

图 2　不同组合浮床对氮的净化效果

Fig. 2　Purifying effect of nitrogen in different combinations of floating bed

为氮气排出水体[16~18]. 同时,在碱性环境下,一部分游离态的 NH_4^+ 转化为分子态的 NH_3 和 $NH_3 \cdot H_2O$,在连续曝气作用下,通过挥发作用逐渐被去除[19].

水体中硝态氮的去除方式主要有两种,一是被植物根系吸收利用,作为植物生长所需营养,进入植物体内被转化为有机氮;二是在缺氧或厌氧环境中通过水体中反硝化细菌的硝化作用,转化为亚硝态氮,进而转化为 N_2 进入到空气中[6]. 由图 2(b)可知,实验开始时,在添加有微生物的 C 组和 D 组实验出水中硝态氮浓度显著高于进水($P < 0.05$),主要是由于在实验初期植物和微生物的生长状态尚不稳定,植物对硝态氮的吸收速率小于微生物的硝化作用速率,水体中的硝态氮不断积累;随着实验的进行,一方面,浮床植物生长状态趋于稳定,植物对硝态氮的吸收速率加快,硝态氮浓度逐渐降低;另一方面,人工介质表面生物膜厚度增加,在生物膜内部形成厌氧环境,有利于反硝化细菌的生 N_2 排出水体[6,17]. 在硝态氮的净化过程中,微生物单元去除率 η_4 > 植物单元去除率 η_3 > 其他作用去除率 η_2,表明微生物在组合型浮床去除水体中硝态氮的过程中发挥着主要作用.

由图 2(c)和 2(d)可知,实验进行 10 d 后,4 组实验出水中总氮浓度趋于稳定,浮床 D 实验出水中总氮平均浓度最低,平均去除率为 70.5%,明显高于浮床 B 对总氮的平均去除率(32.5%);其中植物单元和微生物单元对总氮的去除率分别为 20.6% 和 37.7%,大于其他作用去除率,表明植物的吸收作用和微生物的硝化-反硝化作用是去除总氮的两个主要途径,且微生物的作用占主要地位. 在本实验后期,植物根系脱落的腐殖质进入水体,水体中的有机氮浓度增加,出水中总氮浓度达到动态平衡. 在传统的植物浮床系统中,植物的生长速率和吸收能力限制了其对污染物的净化能力,而在组合型浮床中,微生物的硝化-反硝化作用极大地提高了对水体中氮的去除能力[20,21].

2.1.3　组合型浮床的增效作用

通过计算浮床 D 净化氨氮、硝态氮、总氮的增效作用去除率 η_5,探究微盐碱水体中碱蓬植物与微生物净化水体的协同增效作用. 由图 2(d)可知,与淡水中植物和微生物的增效作用不同,浮床 D 对氨氮的去除率 η_1 小于 η_2、η_3、η_4 之和,表明在微盐碱环境中碱蓬植物和枯草杆菌在去除氨氮过程中没有产生协同增效作用,而浮床 D 净化硝态氮和总氮的

增效作用去除率分别为 12.2%、0.3%,表明浮床 D 对硝态氮的去除产生了一定的增效作用,而对总氮的去除没有产生明显的增效作用.

在微盐碱水体中,植物的生长受到抑制,根系活力下降,光合作用速率降低,植物细胞通过无机离子和有机溶质调节细胞内外渗透压[22]. 有研究表明,盐度能够影响根系分泌物的种类和数量,使植物根际微环境发生变化,从而对微生物活性和种类产生影响[23]. 王郑等[10]采用水生植物与人工填料构建的组合型浮床对某农家乐污水进行净化实验,研究结果表明,组合型浮床对氨氮和总氮的去除效率为 88.67%、73.88%,进一步的计算结果表明,组合型浮床去除农家乐污水中氨氮和总氮的增效作用去除率均达到 10% 以上. 与此研究结果不同,在本研究中,受盐碱胁迫的影响,植物 + 微生物组合型浮床对氨氮、总氮没有产生与淡水环境中相同的协同增效作用.

2.2 组合型浮床对磷的净化效果

2.2.1 不同组合浮床对磷的净化效果

不同组合型浮床对总磷的净化效果如图 3. 从中可知,A 组实验出水中总磷浓度没有出现显著差异($P<0.05$). 在 B 组和 D 组实验中,实验进行的 0~4 d,总磷浓度下降缓慢;在 4~10 d,总磷浓度显著下降($P<0.05$),10 d 后出水总磷浓度基本趋于稳定($P<0.05$);在 C 组中,实验进行 10 d 后,出水总磷浓度基本趋于稳定($P<0.05$),可能是实验前期植物生长状态尚未稳定,速率较慢,10 d 后植物适应了相应的生长环境,对磷的吸收速率增加并趋于稳定. 4 组实验出水总磷平均浓度大小顺序为:A 组 > B 组 > C 组 > D 组,表明植物 + 微生物组合型浮床对水体中总磷的去除效果均高于其他 3 组.

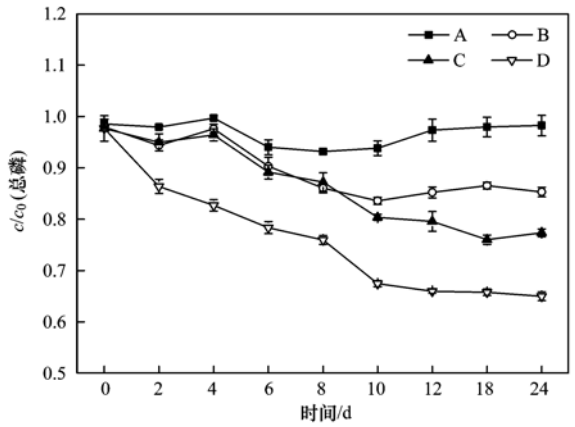

图 3 不同组合浮床对总磷的净化效果

Fig. 3 Purifying effect of total phosphorus in different combinations of floating bed

2.2.2 植物和微生物对磷的净化作用

按照 1.6 节中的公式分别计算 4 组浮床对总磷的去除率和各单元的去除率. 浮床 B 和浮床 D 对总磷的平均去除率分别为 14.3% 和 34.7%,其中 η_4(21.6%) > η_3(13.6%) > η_2(0.7%),表明植物 + 微生物组合浮床型浮床对总磷的去除率显著高于植物浮床,且微生物在组合型浮床去除水体中磷的过程中发挥着主要作用. 一方面,磷元素是微生物生长繁殖的必须元素,微生物对磷的富集和降解作用能够有效降低水体中总磷浓度;另一方面,人工介质对分子态和颗粒态的磷有一定的吸附作用[18,24]. 其他作用去除率 η_2 几乎为 0,表明其他作用包括曝气、光照等对水体中总磷浓度几乎没有影响. 然而,植物 + 微生物组合型浮床对总磷的增效作用去除率为 -1.3%,表明植物 + 微生物组合型浮床对水体中总磷的去除没有产生协同增效作用.

对 4 组实验出水中的总磷检测结果表明,水体中磷的去除机制包括植物吸收、微生物富集和降解作用,而植物对磷的吸收作用受植物吸收能力的限制,对水体中总磷的去除率不高,而在植物和微生物联合作用下,能够有效降低水体中总磷浓度,且微生物的富集作用和人工介质的吸附作用占主要地位. 然而,受植物吸收能力和微生物对磷的降解能力的限制,组合型浮床对总磷的去除效果有限,这与杨林燕等的研究结果相似[11,25]. 选择具有较强吸附能力的人工介质或填料以及选用具有较强富集效应的聚磷菌等方法能够进一步提高组合型浮床对总磷的去除效果.

2.3 组合型浮床对高锰酸盐指数的净化效果

2.3.1 不同组合浮床对高锰酸盐指数的净化效果

对 4 组实验进出水中高锰酸盐指数进行监测,

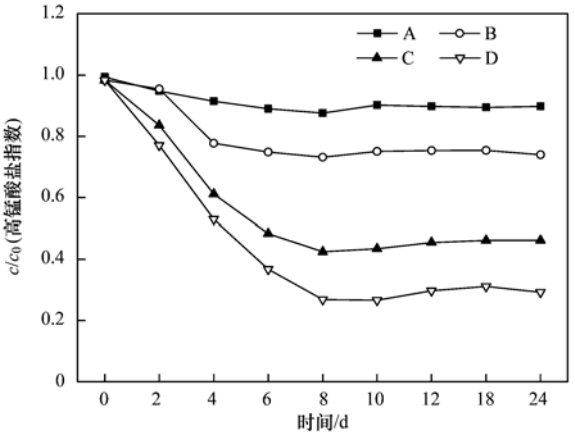

图 4 不同组合浮床对高锰酸盐指数的净化效果

Fig. 4 Purifying effect of permanganate index in different combinations of floating bed

高锰酸盐指数变化如图4. 实验开始后，A 组和 B 组出水中高锰酸盐指数均出现小幅降低，在实验进行 4 d 后即趋于稳定（$P<0.05$）；在添加有微生物的 C 组和 D 组中，从实验开始到第 8 d，出水中高锰酸盐指数显著降低（$P<0.05$）；在实验进行 8 d 后实验出水中高锰酸盐指数之间均没有显著性差异（$P<0.05$），4 组实验出水中高锰酸盐指数平均值大小顺序为：A 组 > B 组 > C 组 > D 组，表明植物 + 微生物组合型浮床对高锰酸盐指数的去除效果最佳.

2.3.2　植物和微生物对高锰酸盐指数的净化作用

水体中过高浓度的有机物是导致水体恶臭的主要原因，对水体中有机污染物的去除机制主要有微生物的降解、植物根系的截留和人工介质或填料的吸附作用，其中微生物的降解作用占主要地位[21]. 与本研究结果相似，通过计算得到组合型浮床在去除高锰酸盐指数过程中各单元的去除效率，其中，η_4（44.5%）> η_3（17%）> η_2（11.2%），微生物对高锰酸盐指数的去除作用明显大于植物，表明微生物的降解作用在去除高锰酸盐指数的过程中发挥着主要作用. 水体中的有机污染物能够为微生物提供碳源、氮源、无机盐等营养物质，为微生物的生长和繁殖提供能量来源.

在本研究中，浮床 D 对高锰酸盐指数的平均去除效率为 70.8%，明显高于浮床 B（28.2%），其中增效作用去除率为 -1.9%，表明在微盐碱环境中，碱蓬植物和枯草杆菌之间没有产生协同增效作用，较高的去除率是植物和微生物联合作用的结果.

2.4　浮床植物的生长状况

植物的生长状态是反映水质改善的一个关键因素. 植物可以通过根部吸收、吸附等作用去除水体中的营养盐.

实验初期，浮床 B 和浮床 D 中的碱蓬植物生长良好，根部长出新根，并有新芽长出，植株高度明显增加，植株顶部有新芽长出，实验进行 6 d 左右时，浮床 D 中植物根部有微生物黏膜形成. 实验开始和结束时，B 组和 D 组实验中碱蓬植物的各项生长指标如表 2. B 组和 D 组中的植物鲜重、株高和根长均有所增加，表明在增加曝气、人工介质等条件下，盐生植物碱蓬可以在浮床上正常生长. D 组实验中植物各项生长指标的增加量均高于 B 组，这表明植物 + 微生物组合型浮床比仅有植物的浮床更适合浮床植物的生长，这可能与 D 组中的微生物有关. 一方面，微生物通过降解作用，将水体中的污染物降解为可直接被植物吸收利用的小分子物质和微量元素，并促进植物的生长；另一方面，微生物可以通过降低植物病原体对植物的毒害作用，提高植物的生存能力[26,27].

表 2　实验前后浮床 B、D 中碱蓬生长指标

Table 2　Growth indexs of *S. salsa* in floating bed B and D before and after the experiment

生长指标	浮床 B			浮床 D		
	实验开始	实验结束	增加量	实验开始	实验结束	增加量
鲜重/g	200.5	225.2	24.7	200.3	242.6	42.3
平均株高/cm	19	20.4	1.4	19.02	21.6	2.58
平均根系长度/cm	4.5	5.6	1.1	4.48	6.2	1.72

2.5　浮床微生物特征

实验结束时对 4 组实验进出水中细菌总数进行检测结果表明，C 组和 D 组实验出水中细菌总数显著高于 A 组和 B 组. 因此，在 97% 相似水平下从 C 组、D 组中提取微生物的 OTUs 代表序列，用 Mothur 方法与 SILVA[28] 的 SSUrRNA 数据库[15] 进行物种注释分析，获得分类学信息，并得出门水平的细菌群落结构相对丰度，如图 5 所示. 结果显示，浮床微生物主要由 10 个门类组成，分别是 Proteobacteria、Bacteroidetes、Firmicutes、Cyanobacteria、Chloroflexi、Actinobacteria、Verrucomicrobia、Gemmatimonadetes、Gracilibacteria、Hydrogenedentes，两组实验中优势菌种均为 Proteobacteria.

对不同样品在 97% 一致性阈值下的 Alpha Diversity 分析指数进行统计分析，结果如表 3. C 组、D 组样品文库覆盖率均在 99.9% 以上，表明本研究样品中的大多数微生物种类都被检测到了. 由样品菌群丰富度指数（chao1 指数和 ACE 指数）可知，D 组浮床中微生物的丰度高于 C 组，由样品多样性指数（Shannon 指数和 Simpson 指数）可知，D 组浮床中微生物的多样性也高于 C 组. 这些研究结果表明，与仅安装人工介质的浮床 C 相比，浮床 D 中微生物具有更高的丰富度和多样性，进而说明在浮床上种植碱蓬植物有利于微生物的生长和繁殖，这与浮床 D 具有较高的污染物去除率的结果相一致.

浮床植物根系可以为微生物提供附着位点，根

系泌氧为微生物的新陈代谢提供氧气,植物根际为微生物提供适宜生长和繁殖的微环境[6,29]. 一方面,浮床 C 和浮床 D 上安装的人工介质为微生物提供了充足的附着位点,有利于微生物的生长和繁殖;另一方面,人工介质可以吸附氮、磷和小分子有机物等,这些物质又可以为微生物提供营养,进一步促进了微生物的生长和繁殖[6,30].

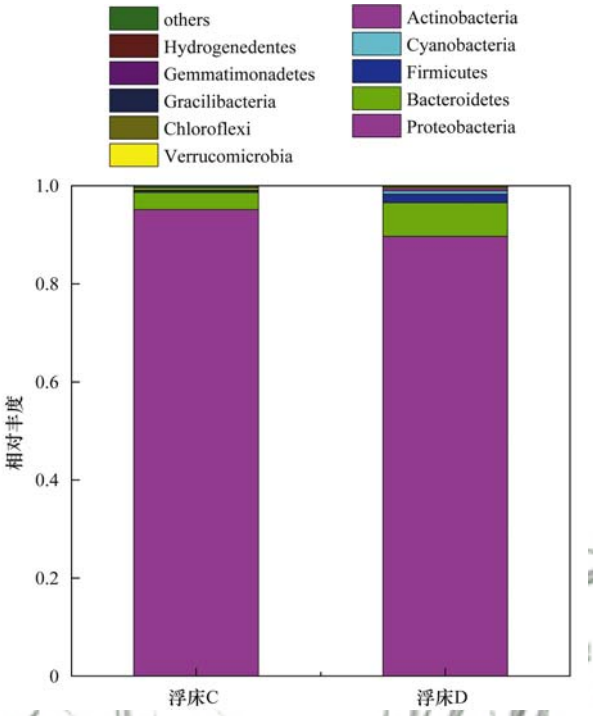

图 5 门水平上微生物群落相对丰度分布

Fig. 5 Relative abundance of microbial community at phylum levels

表 3 浮床微生物群落多样性

Table 3 Alpha diversity of microbial community in floating bed

组别	Shannon 指数	Simpson 指数	chao1 指数	ACE 指数	覆盖率/%
浮床 C	3.89	0.87	262.957	272.562	99.9
浮床 D	4.994	0.908	301.2	303.081	100

为了探究不同变量之间的相互作用关系,对植株鲜重增量、细菌总量及水体中各污染物的去除率进行主成分分析(PCA),提取得到第 1、第 2 主成分,如图 6. 其中,第 1 主成分主要反映了细菌总量和水体各污染物去除率的关系,第 2 主成分主要反映了植物鲜重增量与水体中各污染物去除率之间的影响. 分析结果表明,浮床植物的营养吸收作用和微生物的降解作用在水体净化过程中发挥着重要作用,其中,微生物在植物 + 微生物组合型浮床净化微盐碱水体中发挥着主要作用.

综上所述,组合型浮床对富营养化微盐碱水体具有较好的净化效率,一方面盐生植物碱蓬对微盐

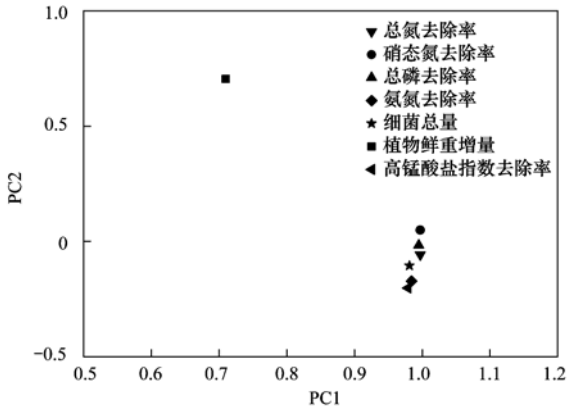

图 6 组合型浮床实验中各变量 PCA 分析

Fig. 6 PCA analysis of variables in combined floating bed experiment

碱环境具有一定的耐受能力,通过增加曝气等条件,碱蓬植物能够在微盐碱水体中生长,并通过吸收和吸附作用去除微盐碱水体中的营养盐;另一方面,人工介质中的微生物通过富集和降解作用,极大地降低了微盐碱水体中污染物浓度. 高通量测序结果表明,组合型浮床有利于微生物的生长和繁殖,从而强化了组合型浮床对营养盐的去除效果. 通过比较植物单元和微生物单元对污染物的去除率,表明微生物的降解作用在植物 + 微生物组合型浮床净化富营养化微盐碱水体的过程中发挥主要作用. 与本研究结果相似,王国芳等[31]探究了组合型浮床中的水生植物单元、水生动物单元、微生物单元对污染物的去除率,结果表明,人工介质附着的微生物是氮磷等污染物的净化主体,其中微生物单元对总氮、总磷、高锰酸盐指数的去除率分别为 48.5%、46.7%、49.9%,均高于水生植物和水生动物单元.

植物根系分泌的低分子量有机酸、小分子量蛋白质等物质能够改善植物根部微环境,并对微生物的生长和繁殖产生影响[32,33]. 不同植物根系分泌物的种类和数量不同. 刘雯等[34]研究了茭白和美人蕉植物根系分泌物与脱氮之间的关系,结果表明,美人蕉根系能够比茭白分泌更多的溶解性有机碳(DOC),这些可溶性的有机碳可以为污水中微生物提供碳源,有利于氮的反硝化. 然而,植物根系分泌物的种类和数量随生存环境的变化而变化,在盐碱环境中,植物分泌的有机酸种类发生了变化,小分子蛋白质活性降低,这些都对微生物的生长和繁殖产生影响. Rocha 等[35]研究了盐度对芦苇根系分泌低分子量有机酸的影响,在盐环境中,芦苇根系柠檬酸含量增加,能够对根际微生物的生长和繁殖产生影响. 在本研究中,受盐碱胁迫的影响,植物和微生物

之间没有出现明显的协同增效作用. 在实际应用中可进一步筛选不同的盐生植物和微生物进行搭配，以提高组合型浮床对微盐碱水体的净化效果.

3　结论

(1)植物 + 微生物组合型浮床对富营养化微盐碱水体有较好的净化效果. 浮床系统运行稳定后，组合型浮床对水体中的总氮、总磷、高锰酸盐指数的平均去除率分别为 70.5%、34.7%、70.7%，显著高于只有碱蓬的植物浮床.

(2)在微盐碱环境中，植物 + 微生物浮床对去除硝态氮、总氮增效作用去除率为 12.2% 和 0.3%，对去除氨氮、总磷、高锰酸盐指数的增效作用去除率为负值，表明在微盐碱环境下，盐生植物和微生物之间的增效作用受到不同程度的抑制.

(3)高通量测序分析结果表明，浮床微生物的优势菌种为 Proteobacteria，与仅安装人工介质的微生物浮床相比，组合型浮床更有利于微生物的生长和繁殖.

(4)主成分分析(PCA)结果表明，浮床植物的吸收作用和微生物的降解作用是水质净化的主要机制，其中微生物对污染物的去除率高于植物.

(5)该组合型浮床首次将盐生植物与微生物进行组合，用于修复富营养化微盐碱水体，有效提高了组合型浮床的净化效率，同时具有较好的景观效果，在微盐碱水体生态修复中具有很好的应用价值. 探究盐碱胁迫下植物根系分泌物与微生物的相互作用机制并筛选不同盐生植物 + 微生物组合有助于进一步提高浮床的净化效果.

致谢：感谢中国海洋大学环境科学与工程学院水土污染分析实验室成员对采样及实验过程提供的帮助!

参考文献：

[1] Huang L F, Zhuo J F, Guo W D, *et al*. Tracing organic matter removal in polluted coastal waters via floating bed phytoremediation[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **71**(1-2): 74-82.

[2] 张雷, 曹伟, 马迎群, 等. 大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1677-1684.
Zhang L, Cao W, Ma Y Q, *et al*. Distribution of nitrogen and phosphorus in the tidal reach and estuary of the Daliao river and analysis of potential eutrophication[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1677-1684.

[3] 陈友媛, 孙萍, 陈广琳, 等. 滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1489-1496.
Chen Y Y, Sun P, Chen G L, *et al*. A contrastive study on salt-alkaline resistance and removal efficiency of nitrogen and phosphorus by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* in coastal estuary area[J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1489-1496.

[4] Ning D L, Huang Y, Pan R S, *et al*. Effect of eco-remediation using planted floating bed system on nutrients and heavy metals in urban river water and sediment: a field study in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **485-486**: 596-603.

[5] 李建柱, 侯杰, 张鹏飞, 等. 空心菜浮床对鱼塘水质和微生物多样性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 3071-3080.
Li J Z, Hou J, Zhang P F, *et al*. Influence on water quality and microbial diversity in fish pond by *Ipomoea aquatica* floating-bed [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(10): 3071-3080.

[6] Wu Q, Hu Y, Li S Q, *et al*. Microbial mechanisms of using enhanced ecological floating beds for eutrophic water improvement [J]. Bioresource Technology, 2016, **211**: 451-456.

[7] Haichar F E Z, Santaella C, Heulin T, *et al*. Root exudates mediated interactions belowground [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **77**: 69-80.

[8] 陆松柳, 胡洪营, 孙迎雪, 等. 3 种湿地植物在水培条件下的生长状况及根系分泌物研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 1901-1905.
Lu S L, Hu H Y, Sun Y X, *et al*. Study on the growth characteristics and root exudates of three wetlands plants at different culture conditions[J]. Environmental Science, 2009, **30**(7): 1901-1905.

[9] Mucha A P, Almeida C M R, Bordalo A A, *et al*. LMWOA(low molecular weight organic acid) exudation by salt marsh plants: natural variation and response to Cu contamination [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, **88**(1): 63-70.

[10] 王郑, 崔康平, 许为义, 等. 组合型生态浮床处理农家乐污水[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(1): 455-460.
Wang Z, Cui K P, Xu W Y, *et al*. Combined ecological floating bed for farmhouse wastewater treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(1): 455-460.

[11] 杨林燕, 海热提, 李萌, 等. 碳纤维湿地式浮床对微污染水体的净化研究[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(11): 136-141.
Yang L Y, Hai R T, Li M, *et al*. Purification of micro-polluted waters using vegetated floating bed made of carbon fiber[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **36**(11): 136-141.

[12] 袁冬海, 席北斗, 魏自民, 等. 微生物-水生生物强化系统模拟处理富营养化水体的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 19-23.
Yuan D H, Xi B D, Wei Z M, *et al*. Disposal of eutrophication water by the microorganisms-aquatic plants strengthened purification system in pre-dem[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(1): 19-23.

[13] 魏巍, 黄廷林, 智利, 等. 新型悬浮填料在原位生物脱氮处理中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(9): 13-17.
Wei W, Huang T L, Zhi L, *et al*. Application of novel suspended carrier to *in-situ* enhanced biological denitrification treatment[J]. China Water & Wastewater, 2010, **26**(9): 13-17.

[14] 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. 12-13.

[15] Edgar R C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads[J]. Nature Methods, 2013, **10**(10): 996-998.

[16] Bartucca M L, Mimmo T, Cesco S, *et al*. Nitrate removal from polluted water by using a vegetated floating system[J]. Science of the Total Environment, 2016, **542**: 803-808.

[17] Liu J Z, Wang F W, Liu W, *et al*. Nutrient removal by up-scaling a hybrid floating treatment bed(HFTB) using plant and periphyton: from laboratory tank to polluted river [J]. Bioresource Technology, 2016, **207**: 142-149.

[18] Guo Y M, Liu Y G, Zeng G M, *et al*. A restoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(5): 1090-1098.

[19] 刘波, 王国祥, 王凤贺, 等. 不同曝气方式对城市重污染河道水体氮素迁移与转化的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(**10**): 2971-2978.
Liu B, Wang G X, Wang F H, *et al*. Effect of different aeration ways on migration and transformation of nitrogen in heavily polluted urban river [J]. Environmental Science, 2011, **32**(10): 2971-2978.

[20] 吴建强, 王敏, 吴健, 等. 4 种浮床植物吸收水体氮磷能力试验研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 995-999.
Wu J Q, Wang M, Wu J, *et al*. Study on the nitrogen and phosphorus uptake ability of four plants cultivated on floating-bed [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 995-999.

[21] 童敏, 李真, 黄民生, 等. 多功能人工水草生物膜处理黑臭河水研究[J]. 水处理技术, 2011, **37**(8): 112-116.
Tong M, Li Z, Huang M S, *et al*. Study on treating malodorous black water by multi-fuctional eco-biofilm with artificial aquatic mat[J]. Technology of Water Treatment, 2011, **37**((8): 112-116.

[22] 陈广琳, 陈友媛, 孙萍, 等. 滨海区黄花鸢尾的耐盐碱性及氮磷去除效果[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(11): 3422-3430.
Chen G L, Chen Y Y, Sun P, *et al*. The *Iris Pseudoacorus*' tolerant ability and removal efficiency for nitrogen and phosphorus in saline-alkaline water of coastal region [J]. China Environmental Science 2015, **35**(11): 3422-3430.

[23] 朱静平, 程凯. 3 种水培植物根系分泌的有机酸对氮循环菌的影响[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(9): 2139-2143.
Zhu J P, Cheng K. Effect of organic acids exuded from hydroponic plants roots on nitrogen cycling bacteria[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(9): 2139-2143.

[24] 蒋丽, 谌建宇, 李小明, 等. 粉煤灰陶粒对废水中磷酸盐的吸附试验研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(7): 1413-1420.
Jiang L, Chen J Y, Li X M, *et al*. Adsorption of phosphate from wastewater by fly ash ceramsite [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(7): 1413-1420.

[25] 温奋翔, 王兵, 肖波, 等. 北方景观水体中生态浮床的植物筛选与水质净化效果[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(12): 5881-5886.
Wen F X, Wang B, Xiao B, *et al*. Plants screening of ecological floating bed and its effects on water quality purification in an artificial lake in northern China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(12): 5881-5886.

[26] 陆开宏, 胡智勇, 梁晶晶, 等. 富营养水体中 2 种水生植物的根际微生物群落特征[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(11): 1508-1515.
Lu K H, Hu Z Y, Liang J J, *et al*. Characteristics of rhizosphere microbial community structure of two aquatic plants in eutrophic waters [J]. China Environmental Science, 2010, **30**(11): 1508-1515.

[27] Lu H L, Ku C R, Chang Y H. Water quality improvement with artificial floating islands[J]. Ecological Engineering, 2015, **74**: 371-375.

[28] 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.

[29] Zhang J P, Liu B, Zhou X H, *et al*. Effects of emergent aquatic plants on abundance and community structure of ammonia-oxidising microorganisms [J]. Ecological Engineering, 2015, **81**: 504-513.

[30] 贺鸿志, 余景, 李拥军, 等. 3 种湿地植物构建的浮床系统修复富营养化水体的效果研究[J]. 华南农业大学学报, 2011, **32**(2): 16-20.
He H Z, Yu J, Li Y J, *et al*. Studies on mediation of eutrophic water using artificial floating-beds system established with three wetland plants [J]. Journal of South China Agricultural University, 2011, **32**(2): 16-20.

[31] 王国芳, 汪祥静, 吴磊, 等. 组合型生态浮床中各生物单元对污染物去除的贡献及净化机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, **34**(4): 136-141.
Wang G F, Wang X J, Wu L, *et al*. Contribution and purification mechanism of bio-components to pollutants removal in an integrated ecological floating bed [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, **34**(4): 136-141.

[32] 傅明辉, 郑李军, 蒋丽花, 等. 富营养化水体中水生植物根际微生物群落研究[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(12M): 133-137.
Fu M H, Zheng L J, Jiang L H, *et al*. Study on structure and function of rhizosphere microbial communities of aquatic plant in eutrophic water [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **36**(12M): 133-137.

[33] 吴伟, 胡庚东, 金兰仙, 等. 浮床植物系统对池塘水体微生物的动态影响[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(9): 791-795.
Wu W, Hu G D, Jin L X, *et al*. Dynamic influence on microorganisms in pond waterbody by the planted float system [J]. China Environmental Science, 2008, **28**(9): 791-795.

[34] 刘雯,丘锦荣,卫泽斌,等. 植物及其根系分泌物对污水净化效果的影响[J]. 环境工程学报,2009, **3**(6): 971-976.
Liu W, Qiu J R, Wei Z B, *et al*. Effects of different plants and plant root exudates on wastewater purification [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, **3**(6) : 971-976.

[35] Rocha A C S, Almeida C M R, Basto M C P, *et al*. Influence of season and salinity on the exudation of aliphatic low molecular weight organic acids(ALMWOAs) by *Phragmites australis* and *Halimione portulacoides* roots [J]. Journal of Sea Research, 2015, **95**: 180-187.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 7

Jul. 15, 2017

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry ····· YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, *et al.* (2629)

Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product ····· ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)

Sources and Characteristics of Regional Background PM_1 in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ··· ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, *et al.* (2647)

Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of $PM_{2.5}$ in Hangzhou ····· WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, *et al.* (2656)

Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China ····· XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)

Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of $PM_{2.5}$ in Xi'an, China During Haze and Clean Days ····· WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, *et al.* (2679)

Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM_{10} from Mt. Huangshan ····· MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, *et al.* (2688)

Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in $PM_{2.5}$ of Quanzhou ····· ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, *et al.* (2698)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China ····· XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, *et al.* (2707)

VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit ····· ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, *et al.* (2718)

Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014 ····· FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, *et al.* (2728)

Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China ····· LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, *et al.* (2738)

Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of *N*-nitrosodimethylamine(NDMA) in Drinking Waters in China ····· ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, *et al.* (2747)

Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment ····· ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, *et al.* (2754)

Distribution and Sources of *n*-alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay ····· ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, *et al.* (2763)

Spatial Variations of CO_2 Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China ····· ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, *et al.* (2773)

Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River ····· NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, *et al.* (2784)

Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu ····· CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, *et al.* (2793)

Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources ····· LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, *et al.* (2801)

High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ··· SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, *et al.* (2810)

Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China ····· ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, *et al.* (2819)

Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution ····· CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, *et al.* (2828)

Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO_2 ····· XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, *et al.* (2836)

Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks ····· XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)

Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed ····· CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, *et al.* (2850)

MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water ····· WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, *et al.* (2859)

Degradation of *N*-nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber ····· ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, *et al.* (2868)

Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol ····· KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, *et al.* (2875)

Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes ····· HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, *et al.* (2883)

Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell ····· SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, *et al.* (2893)

Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta ····· SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, *et al.* (2901)

Cultivation of *Spirulina platensis* in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization ····· CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, *et al.* (2910)

Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K^+ Addition in Saline Surroundings ····· WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (2917)

Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria ····· YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, *et al.* (2925)

Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules ····· LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, *et al.* (2931)

Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge ····· LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, *et al.* (2941)

Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process ····· LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, *et al.* (2947)

Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling ····· SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, *et al.* (2953)

Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge ····· GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, *et al.* (2961)

Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment ····· ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, *et al.* (2972)

Shift of Microbial Communities During the CO_2-Brine-Sandstone Interaction Process ····· WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, *et al.* (2978)

Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems ····· TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, *et al.* (2988)

Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils ····· TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, *et al.* (3000)

Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under *Betula albosinensis* Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains ····· DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, *et al.* (3010)

Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area ····· JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, *et al.* (3020)

Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination ····· FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, *et al.* (3028)

Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil ····· LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, *et al.* (3036)

Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of *Abies fabri* at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014 ····· LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, *et al.* (3045)

Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area ····· ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, *et al.* (3054)

Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost ····· ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, *et al.* (3061)

Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw ····· GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, *et al.* (3070)

Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China ····· YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, *et al.* (3078)

Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO_x by CH_4 ····· PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, *et al.* (3085)