

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11
第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征 沈吉, 曹念文(4743)

2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)

武汉市PM_{2.5}化学组分时空分布及聚类分析 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)

郑州市某生活区大气PM_{2.5}中重金属污染特征及生态、健康风险评估 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)

厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析 王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)

2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征 霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)

太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析 闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)

东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枫亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)

艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)

中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素 侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)

石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 刘水桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)

郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估 张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)

典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用 鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)

2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)

焦化厂建筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险 赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)

中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价 杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)

岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素 原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)

长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送 吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)

望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)

不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响 陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 笪文怡, 黄亚文(4924)

合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价 陈姗, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)

三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)

丹江口水库氮磷内源释放对比 王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)

不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性 李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王瑀(4962)

纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响 王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)

水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)

MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性 王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)

微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响 王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)

基于铁锰泥的除砷颗粒吸附剂制备及其比较 曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)

氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B 张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)

天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估 陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)

废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征 姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)

全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行 印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)

FeCl₃-生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀 魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)

污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响 李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)

厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征 宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)

基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响 陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文焯, 倪敏(5066)

太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)

土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例 王锐, 张凤雷, 徐姝姝, 张永文(5082)

半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)

土壤调理剂对镉污染稻田修复效果 周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)

改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复 韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)

铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应 梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)

温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤 徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)

重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)

双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响 郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)

不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响 崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)

黄土高原地区两种土地利用方式CO₂和N₂O排放特征 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)

生物质炭对华北平原4种典型土壤N₂O排放的影响 张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)

优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N₂O和CH₄排放的影响 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)

《环境科学》征订启事(4995) 《环境科学》征稿简则(5039) 信息(4782, 4979, 5056)

不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性

李琳¹, 岳春雷², 张华^{2*}, 李贺鹏², 杨乐², 王珺²

(1. 浙江农林大学林业与生物技术学院, 临安 311300; 2. 浙江省林业科学研究院, 杭州 310000)

摘要: 选取苦草 (*Vallisneria natans*)、密刺苦草 (*Vallisneria denseserrulata*)、黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、伊乐藻 (*Elodea canadensis*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、竹叶眼子菜 (*Potamogeton malaianus*)、篦齿眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*) 和微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus*) 这 8 种亚热带地区常见的沉水植物为研究对象, 在室内静水条件下对其氮、磷吸收和水质净化能力进行对比试验, 并结合 16S rRNA 基因测序对沉水植物关联细菌群落组成进行测定, 研究沉水植物对水体的净化能力与植株体菌群之间的相关性。结果表明, 8 种沉水植物对水体中的氮磷的去除主要通过植物增效作用, 植物吸收富集作用去除率较低。其中密刺苦草对水体中 TN、TP 的去除率最高, 达到了 91.58% 和 96.81%。伊乐藻、金鱼藻对水中氮磷自身吸收能力高于其他组, 密刺苦草和苦草的植物增效的净化能力最强。经分析, 8 种沉水植物对水体中氮磷的净化能力较强可能是因为植物关联的细菌大多具有降解作用。根瘤菌目 (Rhizobiales)、伯克霍尔德氏菌目 (Burkholderiales)、黄杆菌目 (Flavobacteriales)、产碱杆菌科 (Alcaligenaceae)、贫铜菌属 (*Cupriavidus*) 和芽孢杆菌属 (*Bacillales*) 的细菌可能是引起密刺苦草增效的净化能力较强的优势菌群, 异常球菌纲 (Deinococci)、丛毛单胞菌科 (Comamonadaceae)、腐螺旋菌科 (Saprospiraceae) 和生丝微菌属 (*Hyphomicrobium*) 的细菌可能是引起苦草增效的净化能力较强的优势菌群。

关键词: 沉水植物; 净化能力; 16S rRNA 基因测序; 降解作用; 优势菌群

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4962-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201903265

Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes

LI Lin¹, YUE Chun-lei², ZHANG Hua^{2*}, LI He-peng², YANG Le², WANG Jun²

(1. School of Forestry and Bio-technology, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China; 2. Zhejiang Forestry Academy, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Eight submerged macrophytes are commonly found in subtropical areas, including *Vallisneria natans*, *Vallisneria denseserrulata*, *Hydrilla verticillata*, *Elodea canadensis*, *Ceratophyllum demersum*, *Potamogeton malaianus*, *Potamogeton pectinatus*, and *Potamogeton maackianus*, and these eight macrophytes were selected as research objects. The absorption capacity of nitrogen and phosphorus and water purification ability of submerged macrophytes were compared under indoor static water conditions. Furthermore, combining the bacterial community composition of submerged macrophytes, which was determined by 16S rRNA gene sequencing, the correlation between the water purification ability and the bacterial community of submerged macrophytes was determined. The results showed that all of the submerged macrophytes had obvious purification effects on nitrogen and phosphorus in water. The removal of nitrogen and phosphorus by submerged macrophytes was mainly through plant synergism, and the removal rate of plant absorption and enrichment was low. Among them, the removal rate of nitrogen and phosphorus was the highest in *Vallisneria denseserrulata*, reaching 91.58% and 96.81%. The self-absorption ability of nitrogen and phosphorus from water of *Elodea canadensis* and *Ceratophyllum demersum* was higher than other groups. The plant synergistic purification ability of *Vallisneria denseserrulata* and *Vallisneria natans* was the highest. The absolute dominant phyla of eight submerged macrophyte-associated bacteria were Proteobacteria (abundance values were more than 40%). At the genus level, *Cupriavidus*, *Rhodobacter*, and *Gemmatimonas* were the dominant genera for different submerged macrophytes. Most of these bacterial groups were degradable, which may be the main reason for the strong ability of eight submerged macrophytes to purify nitrogen and phosphorus in the water. The LEfSe analysis showed that *Vallisneria denseserrulata* and *Vallisneria natans* had the highest number of bacteria with significant differences. Among them, Rhizobiales, Burkholderiales, Flavobacteriales, Alcaligenaceae, *Cupriavidus*, and *Bacillales* may be the dominant bacteria to enhance the efficiency of plant purification of the water by *Vallisneria denseserrulata*. The bacteria of Deinococci, Comamonadaceae, Saprospiraceae, and *Hyphomicrobium* may be the dominant bacteria to enhance the efficiency of plant purification of the water by *Vallisneria natans*.

Key words: submerged macrophytes; purification capacity; 16S rRNA gene sequencing; degradation; dominant bacteria

沉水植物在生态系统中处于初级生产者的地位, 主要通过自身的代谢和微生物的共同作用吸收富营养化水体中的氮、磷等有害物质, 同时抵制低等藻类的生长^[1,2]。沉水植物关联的微生物主要栖息于植株表面与内部。一些研究认为: 水体中有机物的降解和氮化合物的脱氮、磷化合物的转化等主

要是由沉水植物表面附着的微生物活动来完成^[3], 尤其是细菌, 由于其在植物表面环境中对各种分泌

收稿日期: 2019-03-29; 修订日期: 2019-06-03

基金项目: 浙江省省属科研院所专项项目 (2018F10001, 2019F1065-1)

作者简介: 李琳 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为沉水植物对湿地水环境的修复, E-mail: 82744224@qq.com

* 通信作者, E-mail: 297243125@qq.com

物的利用率和敏感性远远超过放线菌、真菌、藻类和原生动物等^[4]。已有研究也证实, 内生细菌能够有效表达必要的新陈代谢基因, 能促进异型生物物质和植物体内有害物质的降解, 在植物修复、水体净化和污染土地治理等方面扮演重要角色^[5]。因此, 研究沉水植物处理污水系统中植物关联细菌的群落组成, 对深入探讨沉水植物的净化功能及机制具有十分重要的意义。

目前, 关于不同沉水植物对水体污染物净化效果的相关研究较多^[6,7], 而对其净化效果中微生物作用的相关研究较少。何聘等^[8]的研究表明沉水植物附着细菌主要包括拟杆菌 (Bacteroidetes)、放线菌 (Actinobacteria)、变形菌、蓝藻细菌 (Cyanobacteria) 和疣微菌 (Verrucomicrobia) 等门类。Eriksson 等^[9]的研究表明篦齿眼子菜表面附着细菌的脱氮作用明显, 其反硝化能力可以在高营养条件下得到极大地提高, 并且受光照、水流和植物年龄的影响。在水生生态系统中, 常见功能植物内生细菌假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、肠杆菌属 (*Enterobacter*)、气单胞菌属 (*Aeromonas*)、微杆菌属 (*Microbacterium*)、固氮螺菌属 (*Azospirillum*)、脱硫杆菌属 (*Desulfobacterium*) 和无色杆菌属 (*Achromobacter*) 等对氮、磷、硫和有机复合物具重要的降解作用, 并有助于植物修复^[10]。本文选取亚热带地区 8 种常见的沉水植物为研究对象, 分析不同沉水植物对水体氮磷的去除能力与植物关联细菌类群之间的相关性, 以期为水生生态修复工程中沉水植物种类的筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

野外采集杭州地区分布的 8 种常见沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*)、密刺苦草 (*Vallisneria denseserrulata*)、黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、伊乐藻 (*Elodea canadensis*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、竹叶眼子菜 (*Potamogeton malaianus*)、篦齿眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*) 和微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus*), 选择生长状况良好且性状统一的成熟植株作为研究对象。

1.2 试验方法

2018 年 7 月初在浙江省林业科学研究院试验大棚内将供试的沉水植物用清水预培养 15 d, 使其适应生长的环境。然后选用长势良好且性状一致的植株, 将其清洗干净并用海绵吸走多余的水后, 种植于 40 L 圆底白色聚乙烯塑料桶。试验共设置 9 组, 每组为 3 个重复。每种植物为一组, 每个容器

内放入 105 g 植物, 5 kg 石英砂 (桶内厚度约 5 cm) 以固定根系。其中空白对照组每个桶内只放石英砂不放植物。

本试验用水取自上埠河 (浙江工业大学内, 位点 120°02'24"E, 30°13'48"N), 原水中 TN 含量为 $2.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 含量 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在原水中加入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 KH_2PO_4 试剂, 使水中 TN 含量为 $5.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 含量为 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 劣 V 类标准。每个试验桶内加入 35 L 配制好的污水。

本试验从 2018 年 7 月 16 日开始到 8 月 20 日结束, 每隔一周采一次样。在水面下 20 cm 处采 200 mL 水样, 共采 5 次。采样消耗的水用配好的污水补充, 因蒸发消耗的水用蒸馏水补充到原水位高度。最后一次采样结束后, 将每个桶内植物全部捞出吸取表面水分, 进行称重, 烘干, 计算含水率。同时采集每个桶内沉水植物的根、茎、叶部位, 将其放在 -80°C 冰箱保存, 用于细菌高通量测序。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 水质和植物样品指标测定

水体 TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法^[11], TP 采用 ICP-OES 法直接进样测定^[12], 植物样品中用浓硝酸 (优级纯) 消解, 植株全氮采用全自动凯氏定氮仪测定; 植物总磷采用 ICP-OES 法进样测定^[12]。

1.3.2 植物关联细菌群落组成分析方法

取 -80°C 保存的新鲜沉水植物的每个样品 500 mg 左右, 直接加入 2 mL 研磨离心管, 在预处理好的样品中加入 3 颗钢珠, 然后液氮冷冻, 核酸破碎仪上振荡 45 s, 再按照 M5635-02 试剂盒 (OMEGA, USA) 的操作说明进行 DNA 提取, 细菌 16S rRNA 采用 V3-V4 区引物进行 PCR 扩增, 测序结果用 QIIME 软件剔除疑问序列。然后用 Uparse 软件对有效数据在 97% 水平上进行操作分类单元 (operational taxonomic unit, OTU) 聚类。在 QIIME 中调用 UCLUST 这一序列对比工具与序列数据库 Greengene 进行比对, 获得每个 OTU 代表序列的分类学信息并剔除植物体叶绿素等干扰因素。再基于分类学信息, 进行群落结构的统计分析。8 组样品分别用名称的前两个汉字的首字母表示, 即苦草 (KC)、密刺苦草 (MC)、黑藻 (HZ)、伊乐藻 (YL)、金鱼藻 (JY)、竹叶眼子菜 (ZY)、篦齿眼子菜 (BC) 和微齿眼子菜 (WC)。

1.4 数据处理方法

采用 SPSS18 软件对数据进行统计分析, 采用 Duncan 法进行差异显著性检验, 用 Origin8.5 软件

作图。

该研究通过测定水体 TN 和 TP 浓度、植物鲜干重、植株 TN 和 TP 含量来计算水体 TN、TP 去除率 (η_1)，沉水植物体 TN、TP 富集吸收率 (η_2)，自然挥发、沉降等其他作用对 TN、TP 去除率 (η_3) 及沉水植物增效作用对 TN、TP 去除率 (η_4)。

$$\eta_1 = \left(1 - \frac{\text{结束状态水体氮、磷总量}}{\text{起始状态水体氮、磷总量}}\right) \times 100\%$$

$$\eta_2 = \frac{\text{沉水植物体氮、磷净吸收量}}{\text{起始状态水体氮、磷总量}} \times 100\%$$

$$\eta_3 = \frac{\text{空白组试验期间氮、磷变化量}}{\text{起始状态水体氮、磷含量}} \times 100\%$$

$$\eta_4 = \eta_1 - \eta_2 - \eta_3$$

表 1 8 种沉水植物鲜干重及植物氮、磷含量变化¹⁾

Table 1 Changes in fresh and dry weight and nitrogen and phosphorus contents of eight submerged macrophytes

植物名称	初始状态				结束状态				净增干重 /g
	鲜重 /g	含水率 /%	植物氮含量 /mg·g ⁻¹	植物磷含量 /mg·g ⁻¹	鲜重 /g	含水率 /%	植物氮含量 /mg·g ⁻¹	植物磷含量 /mg·g ⁻¹	
苦草	105.00	91.80% ± 0.17e	26.57 ± 0.65b	4.86 ± 0.11a	124.90 ± 10.82	90.90 ± 0.72c	29.28 ± 1.31b	5.12 ± 0.12a	2.80 ± 0.98b
密刺苦草	105.00	91.80% ± 0.76de	30.61 ± 1.11c	3.95 ± 0.10b	130.30 ± 10.47	91.00 ± 0.44c	32.32 ± 0.82d	4.18 ± 0.09cd	2.76 ± 1.10b
黑藻	105.00	89.80% ± 0.36b	22.12 ± 1.31a	3.19 ± 0.16c	116.80 ± 7.15	89.40 ± 0.79b	29.86 ± 1.34bc	4.06 ± 0.14d	1.67 ± 0.76bc
伊乐藻	105.00	87.50% ± 0.52a	21.91 ± 0.92a	3.21 ± 0.13c	123.90 ± 5.20	87.20 ± 0.30a	32.17 ± 0.85d	4.43 ± 0.13bc	2.73 ± 0.67b
金鱼藻	105.00	90.90% ± 0.46cd	20.45 ± 1.18a	2.60 ± 0.89d	112.90 ± 8.32	89.70 ± 0.46bc	29.78 ± 1.47bc	3.75 ± 0.07e	2.07 ± 0.86bc
竹叶眼子菜	105.00	90.20% ± 0.30bc	25.48 ± 1.33b	4.14 ± 0.17b	111.70 ± 6.24	89.10 ± 0.87b	31.25 ± 0.98cd	4.55 ± 0.34b	1.89 ± 0.68bc
篔齿眼子菜	105.00	89.40% ± 0.76b	21.67 ± 0.37a	1.39 ± 0.18e	110.30 ± 13.80	89.20 ± 0.89b	25.71 ± 1.03a	1.75 ± 0.11f	0.78 ± 1.49a
微齿眼子菜	105.00	90.10% ± 0.17bc	27.23 ± 0.48b	1.53 ± 0.08e	118.60 ± 8.12	90.30 ± 0.95bc	29.91 ± 0.82bc	1.89 ± 0.07f	1.10 ± 0.79bc

1) 植株氮、磷含量指干重状态下的含量; 各列中的字母表示统计分析的显著性, 相同字母表示不显著, 不同的字母表示在 $P=0.05$ 水平上显著, 下同

2.1.2 不同沉水植物处理的水质氮磷浓度变化

本试验供试的沉水植物都能有效地去除污水中的氮, 使水中总氮明显下降(图 1), 其中密刺苦草和金鱼藻的去除效果较好, 去除率达 91.58% 和 91.27%。微齿眼子菜的去除效果最差, 去除率为 79.41%。

8 种沉水植物对水体中总磷的去除效果较明显(图 2)。密刺苦草和黑藻对水体中总磷的去除效果最高, 去除率达 96.81% 和 95.55%。篔齿眼子菜对 TP 的吸收效果较差, 去除率为 80.89%。

2 结果与分析

2.1 不同沉水植物对水体中氮磷的去除效果比较

2.1.1 不同沉水植物鲜干重与植株氮磷含量的变化

经过 35 d 的生长, 不同沉水植物的鲜干重均有明显增长(表 1)。其中密刺苦草的鲜重增加最多为 25.30 g, 篔齿眼子菜的鲜重增加最少为 5.30 g。净增干重最多的苦草(2.80 g)是最少的篔齿眼子菜(0.78 g)的近 3.6 倍。不同沉水植物含水量的结束状态与初始状态相差不大, 变化范围为 87.20% ~ 91.80%。8 种沉水植物试验结束状态的植株氮、磷含量略高于起始状态。

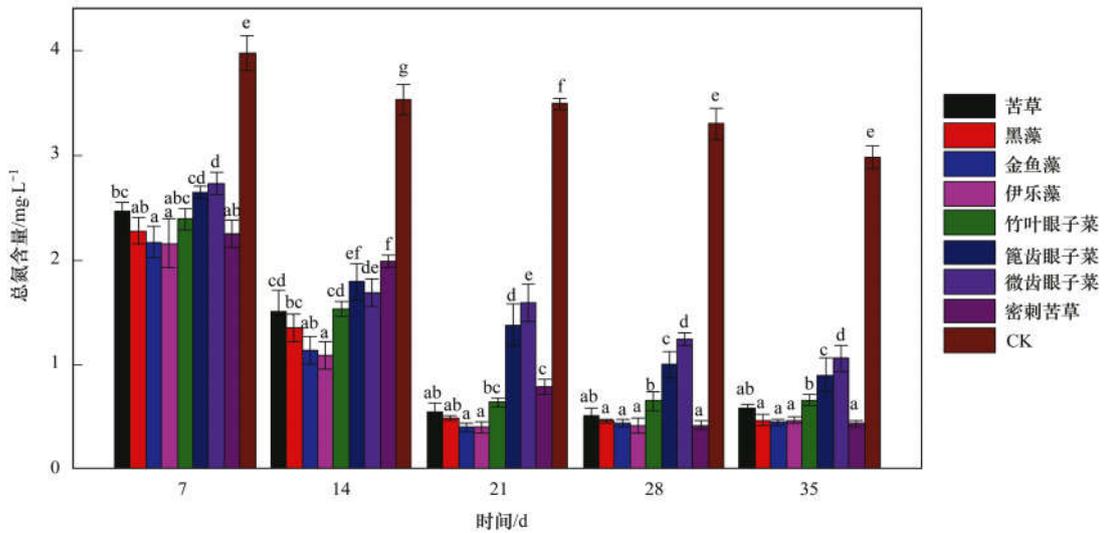
2.1.3 不同沉水植物对水质净化能力的分析

通过对水体中 TN 和 TP 去除率 (η_1) 的分析, 认为水体中氮磷去除率由植物富集吸收率 (η_2)、其他作用去除率 (η_3) 和植物增效去除率 (η_4) 这 3 部分组成(表 2)。不同沉水植物对水体中 TN、TP 的去除率存在差异, 但均高于空白组。其中密刺苦草组对水体中 TN 和 TP 的去除率最高, 伊乐藻组和金鱼藻组的植物富集吸收率高于其他组, 密刺苦草和苦草的植物增效去除率最高。

表 2 8 种沉水植物水体 TN、TP 去除率和各种作用去除率/%

Table 2 Removal rates of TN and TP and removal rates of various functions in eight submerged macrophytes/%

植物名称	水体 TN 去除率 (η_1)	植物 TN 富集吸收率 (η_2)	其他作用 TN 去除率 (η_3)	植物增效 TN 去除率 (η_4)	水体 TP 去除率 (η_1)	植物 TP 富集吸收率 (η_2)	其他作用 TP 去除率 (η_3)	植物增效 TP 去除率 (η_4)
苦草	88.82 ± 0.87ab	4.19 ± 1.47ab	41.76 ± 2.22	42.87 ± 1.61b	95.51 ± 0.68ab	3.87 ± 2.19a	43.13 ± 1.57	48.51 ± 2.81a
密刺苦草	91.58 ± 0.56a	2.68 ± 0.70a	41.76 ± 2.22	47.14 ± 0.26a	96.81 ± 0.50a	3.47 ± 2.82a	43.13 ± 1.57	50.21 ± 2.37a
黑藻	90.97 ± 0.84a	7.24 ± 2.22c	41.76 ± 2.22	41.97 ± 2.61bc	95.55 ± 0.30ab	7.83 ± 0.89b	43.13 ± 1.57	44.59 ± 0.60b
伊乐藻	90.90 ± 0.56a	15.69 ± 2.57e	41.76 ± 2.22	33.45 ± 2.06e	93.43 ± 0.30c	17.95 ± 3.01d	43.13 ± 1.57	32.35 ± 2.73d
金鱼藻	91.27 ± 0.59a	10.82 ± 1.67d	41.76 ± 2.22	38.69 ± 1.38cd	94.94 ± 1.31b	12.84 ± 1.75c	43.13 ± 1.57	38.97 ± 2.86c
竹叶眼子菜	87.29 ± 0.95b	6.11 ± 1.51bc	41.76 ± 2.22	39.42 ± 0.77c	86.77 ± 0.23d	4.18 ± 1.77a	43.13 ± 1.57	39.46 ± 1.55c
篔齿眼子菜	82.53 ± 3.18c	1.76 ± 0.59a	41.76 ± 2.22	39.01 ± 2.63cd	80.89 ± 0.18f	1.51 ± 0.89a	43.13 ± 1.57	36.25 ± 0.81c
微齿眼子菜	79.41 ± 2.54d	1.65 ± 0.87a	41.76 ± 2.22	36.00 ± 1.78de	82.81 ± 0.93e	2.14 ± 0.87a	43.13 ± 1.57	37.54 ± 1.18c



用字母表示同一时间段不同沉水植物水体中氮磷含量统计显著性, 相同字母表示不显著, 不同的字母表示在 $P=0.05$ 水平上显著, 下同

图 1 不同沉水植物生长体系水体总氮含量变化

Fig. 1 Total nitrogen content of water in different growth systems of submerged macrophytes

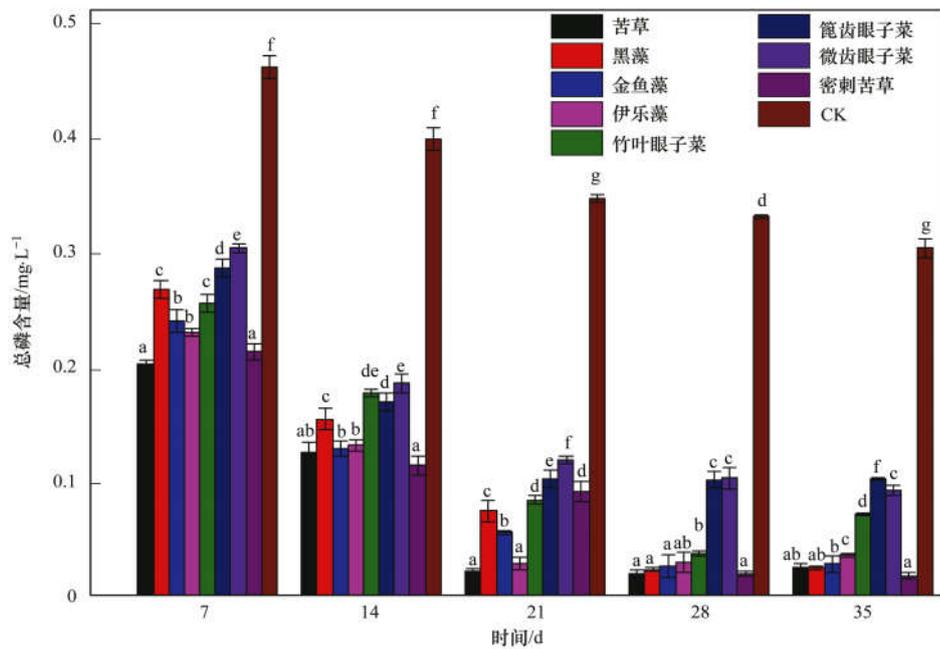


图 2 不同沉水植物生长体系水体总磷含量变化

Fig. 2 Total phosphorus content of water in different growth systems of submerged macrophytes

2.2 沉水植物体菌群多样性组成结果分析

2.2.1 不同沉水植物体细菌群落多样性

Illumina 测序结果显示, 24 个样本所测得苦草组 OTU 数最多(1742), 伊乐藻组的 OTU 数最少(816). 苦草组中细菌丰富度和多样性均高于其他组, 金鱼藻的细菌丰富度和多样性在所测得沉水植物组中最低(表 3).

2.2.2 PCA 主成分分析

通过主成分分析, 不同沉水植物间的样本表现出分散或聚集的分布情况(图 3). 第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)贡献率累计达 96.99%,

表 3 不同沉水植物的细菌丰度与多样性(平均值 ± 标准误差)

Table 3 Bacterial abundance and diversity of different submerged macrophytes (mean ± SE)

样品分组	OTU 数目	Chao1 (丰富度)	Shannon (多样性)
苦草	1 742	1 071.65 ± 144.66a	6.58 ± 0.45a
密刺苦草	1421	936.19 ± 53.74ab	5.65 ± 0.30a
黑藻	1 251	950.86 ± 188.68ab	3.24 ± 0.62b
伊乐藻	816	759.38 ± 129.04ab	3.00 ± 0.10bc
金鱼藻	945	642.34 ± 148.06b	2.01 ± 0.37c
竹叶眼子菜	952	955.92 ± 111.02ab	3.51 ± 0.31b
篦齿眼子菜	1 037	968.61 ± 20.26ab	3.54 ± 0.29b
微齿眼子菜	831	752.46 ± 126.22ab	2.74 ± 0.27bc

解释了原始数据中的大多数差异。黑藻、金鱼藻、伊乐藻、竹叶眼子菜、篦齿眼子菜和微齿眼子菜都聚集在一起,表明这6种沉水植物间的细菌群落结构相似度较高。与其他组相比,苦草和密刺苦草的分布较集中,表明这两组的细菌群落也具有较高的相似度。

2.2.3 不同沉水植物体细菌群落组成

本研究采集了8种沉水植物共24个样品,共检测到23个门,64个纲,118个目,214个科,488个属的细菌种类。在门的分类水平上,不同沉水植物之间的细菌群落组成相似,主要来自7个门类(表4)。变形菌门为8种沉水植物的绝对优势菌门,丰度值范围为40.2%~84.6%。苦草组、密刺苦草组和黑藻组的细菌在7个细菌门类中都有分布且丰度值都大于1%。

选取每个样品在属水平上最大丰度前20的物种,生成物种相对丰度柱形图(图4)。贪铜菌属(*Cupriavidus*)、红细菌属(*Rhodobacter*)和芽单胞菌属(*Gemmatimonas*)为8种沉水植物共有的优势属(丰度

>1%),其中贪铜菌属的相对丰值较高,丰度值范围为4.5%~34.2%,在金鱼藻组中的丰度值最高。

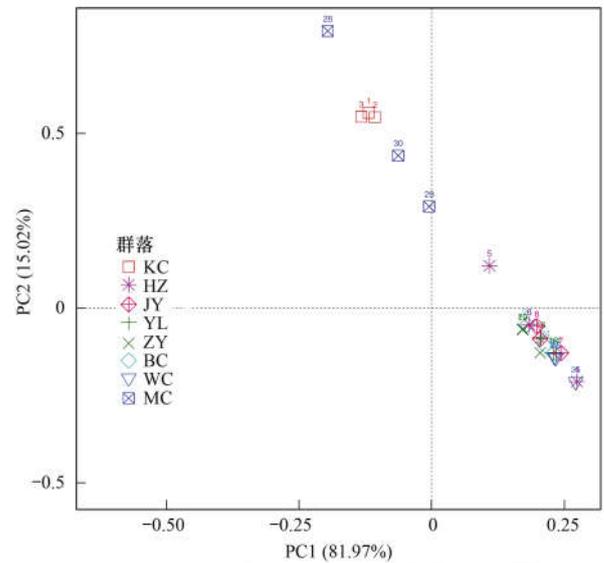


图3 不同沉水植物细菌群落主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of bacterial communities in different submerged macrophytes

表4 8种沉水植物主要优势门类/%

Table 4 Main dominant phyla of eight submerged macrophytes

沉水植物	变形菌门	蓝藻门	放线菌门	拟杆菌门	芽单胞菌门	厚壁菌门	酸杆菌门
苦草	45.1	19.1	3.3	17.6	2.5	5.8	2.9
密刺苦草	62.6	18.3	4.2	2.7	3.4	4.5	1.1
黑藻	60.8	15.3	3.6	1.8	9.6	3.9	1.9
伊乐藻	65.9	10.0	4.7	2.7	11.4	0.1	2.5
金鱼藻	84.6	2.4	1.7	2.2	3.3	0.4	1.2
竹叶眼子菜	40.2	6.4	35.7	1.4	10.6	0.1	1.4
篦齿眼子菜	65.7	4.2	10.4	4.9	7.3	0.3	3.4
微齿眼子菜	73.6	6.2	7.8	1.8	4.8	0.5	2.5

2.2.4 沉水植物细菌类群 LEfSe 差异分析

为了筛选出不同沉水植物从门到属具有显著差异的关键物种类群,进行了LEfSe分析(表5)。8种沉水植物共有103个具有显著性差异的不同水平的物种类群。其中,密刺苦草组和苦草组中具有显著差异的分类单元最多。密刺苦草组共有55个,苦草组有32个,且大多都分布于变形菌门。

3 讨论

3.1 不同沉水植物对水体中氮磷净化效果的分析

有研究表明,水体中氮磷的去除主要依靠植物直接吸收、物理作用和微生物作用等途径去除^[13-15],从试验结果看,8种沉水植物对TN、TP的富集吸收率范围分别为1.65%~15.69%和1.51%~17.95%,植物体内对氮磷的富集主要是通过植物体直接吸收水中氮和磷,并且同化为自身的结构组成物质,适时地转化到植物体内。其他作

用TN和TP的去除率分别为41.76%和43.13%。其他作用对氮磷的去除主要依靠物理作用,包括筒壁、石英砂的吸附和沉淀作用,而水体中氮的去除除了这些途径外,还存在氨的挥发作用。不同沉水植物系统扣除植物体直接吸收和其他作用去除后,水中氮磷的植物增效去除率范围为33.45%~47.14%和32.35%~50.21%,主要通过沉水植物分泌凝胶物质加速吸附水中的物质形成附着层,增加植物体表微生物的数量,植株表面附着的微生物和内生菌共同起到降解水中氮磷的作用^[16]。结果表明沉水植物对水体氮磷的吸收主要通过沉水植物增效作用,自身吸收富集作用只占很小的比例。这一结论在其他研究中也已被证实^[17]。

对不同沉水植物的水体净化效果进行分析,8种沉水植物对水体中TN的吸收效果依次是密刺苦草>金鱼藻>黑藻>伊乐藻>苦草>竹叶眼子菜>篦齿眼子菜>微齿眼子菜。对水体中TP的净化效

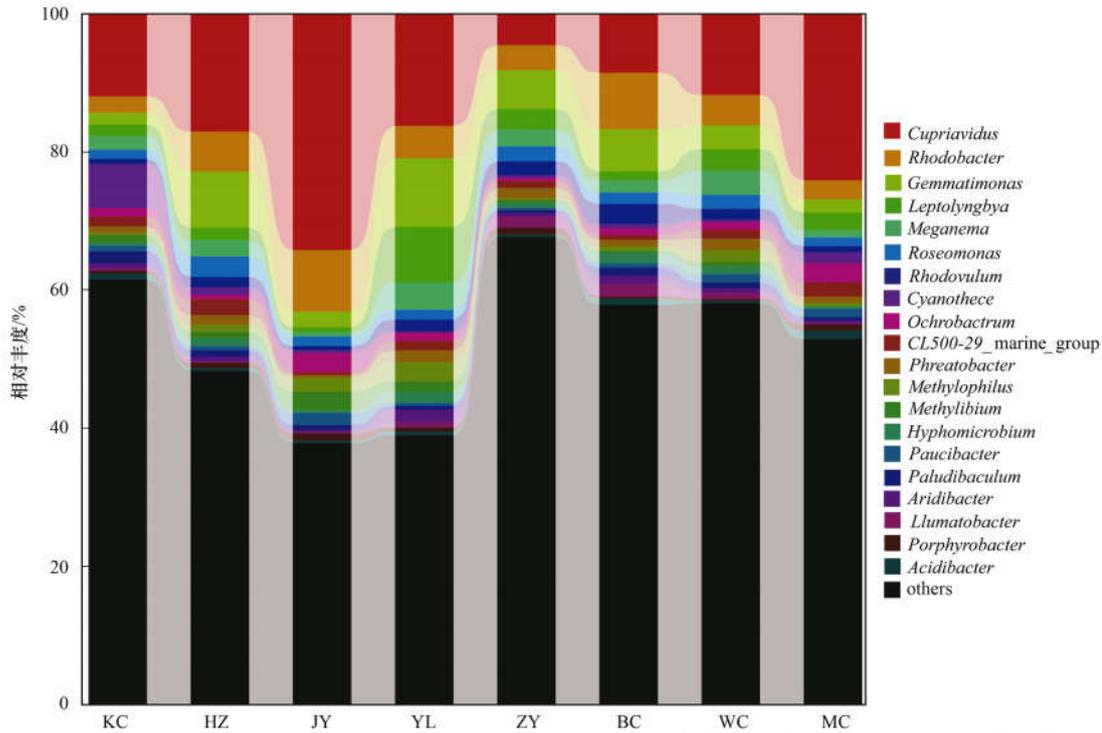


图 4 属水平细菌群落组成

Fig. 4 Bacterial community composition at the genus level

表 5 组间具有显著差异的分类单元¹⁾

Table 5 Classification units with significant differences between groups

植物名称	从门到属具有显著差异的关键物种
苦草	蓝藻门; Subsection I 目、Family I 科、蓝丝菌属; 变形菌门; δ -Proteobacteria; α -Proteobacteria: 生丝微菌科、生丝微菌属、 <i>Devosia</i> 属、 <i>Tabrizicola</i> 属; 甲基杆菌科**、 <i>Meganema</i> ** 属; β -Proteobacteria: 丛毛单胞菌科、 <i>Methylibium</i> 属、 <i>Pelomonas</i> 属; 红长命菌属; γ -Proteobacteria: 黄单胞菌科; 放线菌门; 酸微菌目; 拟杆菌门; 拟杆菌门**、鞘脂杆菌纲、鞘脂杆菌目、噬纤维菌科、腐螺旋菌科; 厚壁菌门; 厚壁菌门、梭杆菌; 酸杆菌门; 酸杆菌门、Solibacterales 目、Solibacteraceae_Subgroup_3 科、 <i>Paludibaculum</i> 属; 栖热菌门; 栖热菌门**、异常球菌纲**、栖热菌目**、栖热菌科**、亚栖热菌属;
密刺苦草	蓝藻门; Melainabacteria 纲、ML635J_21 纲、Cyanobacteria. Subsection III 目、Subsection III. Family I 科; 变形菌门; 变形菌门**; α -Proteobacteria; Incertae_Sedis 目、柄杆菌目**、苍白杆菌属; 根瘤菌目**、Rhizobiales 科**; β -Proteobacteria; β -Proteobacteria**; γ -Proteobacteria; γ -Proteobacteria、黄单胞菌目、Xanthomonadales_Incertae_Sedis 科、Xanthomonadales_Incertae_Sedis. <i>Acidibacter</i> 属; δ -Proteobacteria; SAR324_clade_Marine_group_B 目; 蛭弧菌目、蛭弧菌科、蛭弧菌属; 放线菌门; 酸微菌科、 <i>CL500_29_marine_group</i> 属; 假诺卡氏属、假诺卡氏科; 拟无枝酸菌属; 拟杆菌门; Flavobacteriia 纲、黄杆菌目; 鞘脂杆菌目 Chitinophagaceae 科**、 <i>Lacibacter</i> 属、 <i>Chitinophaga</i> 属、 <i>Vibriionimonas</i> 属; 厚壁菌门; 芽孢杆菌纲、芽孢杆菌目; 疣微菌门; 疣微菌纲、疣微菌目、疣微菌科
黑藻	厚壁菌门; 芽孢杆菌科
伊乐藻	变形菌门; 嗜甲基菌目、嗜甲基菌科
金鱼藻	放线菌门; Micrococcales 纲
竹叶眼子菜	放线菌门; 放线菌门**、放线菌纲、丛毛单胞菌科 <i>Candidatus_Symbiobacter</i> 属**
篦齿眼子菜	放线菌门; 黄色杆菌科
微齿眼子菜	蓝藻门; 蓝藻门**; 变形菌门; 新鞘氨醇杆菌

1) 未标注 * 是表示具有显著差异的物种, 即 $P < 0.05$, 标注 ** 是指差异极显著的物种, 即 $P < 0.01$

果表现为:密刺苦草 > 黑藻 > 苦草 > 金鱼藻 > 伊乐藻 > 竹叶眼子菜 > 微齿眼子菜 > 篦齿眼子菜. 其中伊乐藻、金鱼藻对水中氮磷自身吸收能力高于其他组,密刺苦草和苦草的植物增效作用的净化能力较强. 刘丹丹等^[18]和 杨文斌等^[19]研究表明金鱼藻、伊乐藻都具有较强的吸收富集能力,本文研究结果与此相似,试验期间伊乐藻和金鱼藻的水体透明度较高. 孔祥龙等^[20]的研究表明苦草属的植物对水体中氮磷具有较强的净化能力,与文中结论相似.

3.2 不同沉水植物体细菌群落组成与水体中氮磷净化效果之间的关系

为了更深入地研究水体净化过程中微生物的作用,通过高通量测序对供试的 8 组 24 个样品的沉水植物进行了细菌 16S rRNA 基因测序,共得到 8995 个 OTU,表明 8 种沉水植物体中存在丰富的微生物,这些微生物不仅数量众多,也具有较高的多样性. 本研究中 8 组沉水植物样品中优势门类为 7 个. 主要优势菌门是变形菌门和蓝藻门,相对丰值较高菌门还有放线菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、芽单胞菌门和酸杆菌门. van der 等^[21]的研究表明,在浮游藻类占优势的藻型湖泊(浑浊态)中蓝藻门的含量较多,而在以水生植物为主体的草型湖泊(清水态)中则是拟杆菌门更占优势. 本研究结果表明,与其他处理组相比金鱼藻组中蓝藻门的丰度值较低,水体较清澈. 许多研究表明^[22,23]变形菌门的细菌参与了湖泊生态系统中各种生物地球化学循环过程,变形菌门是湖泊生态系统中的绝对优势菌群. 本次研究中变形菌门的丰度值范围为 40.2% ~ 84.6%,也证明了这一观点. Fuentes 等^[24]的研究结果表明,属于厚壁细胞门类的细菌可以有效地降解多氯联苯和石油烃类化合物等有机污染物. 酸杆菌门被认为能够参与各种环境污染物的生物降解过程^[21]. 本研究中沉水植物的大多数优势门类细菌都对水中的污染物有降解作用,在对水体总氮总磷的分解代谢过程中起着十分重要的作用.

在细菌属水平上比较所有样本发现,贪铜菌属、红细菌属和芽单胞菌属的相对丰度值超过了 1%. 目前,有报道指出贪铜菌属是一种很少见的耐重金属的细菌,主要应用在环境污染物的降解方面. 沈娥^[25]探讨了贪铜菌属 *Cupriavidus* sp. SHE 在对吡啶等芳香族化合物降解方面的研究. 红细菌属在各个样本中占一定的优势. 有研究报道,隶属于这个属的细菌在生物膜的形成过程中发挥了关键作用^[26],这些细菌在维持河湖生态系统的稳定性等过程中发挥着至关重要的作用. 芽单胞菌属于革兰氏阴性菌,繁殖通过出芽方式,对有机物的去除有

积极作用^[27].

本试验条件下各处理组的微生物群落结构存在差异,由 PCA 主成分分析可知,苦草组、密刺苦草组与其他沉水植物组细菌群落组成差异显著. LEfSe 分析结果表明,密刺苦草组和苦草组中具有显著差异的菌群数量最多,而且水样测定结果表明密刺苦草和苦草的植物增效的净化能力高于其他组. 密刺苦草中具有显著差异的菌群数量共 55 个,大多分布于变形菌门. 根瘤菌(属于 α -Proteobacteria)是通过与豆科植物根系共生,在植物根部形成根瘤共生体,在利用植物根系分泌物的同时通过固氮作用为植物提供氮素^[28]. Moulin 等^[29]提出伯克霍尔德氏菌属和贪铜菌属是归属于 β -变形杆菌纲的根瘤菌,也有固氮作用. 李辉等^[30]的研究表明,人工湿地去除有机氮主要由于氨化细菌的作用,而芽孢杆菌属(属于厚壁菌门)为人工湿地中氨化细菌的优势菌属. 李科德等^[31]认为产碱杆菌属(属于 β -Proteobacteria)和黄杆菌属(属于拟杆菌门)等快生型细菌在有机污染物的分解代谢中起着十分重要的作用. 由此可以推断密刺苦草组引起水体中氮磷降解的关键物种分布于根瘤菌目、伯克霍尔德氏菌目、黄杆菌目、产碱杆菌科、贪铜菌属和芽孢杆菌属. 苦草组中具有显著差异的分类单元是 32 个,集中分布于变形菌门、拟杆菌门、栖热菌门和酸杆菌门. 李卫华等^[32]提到反硝化细菌分布于变形菌门,除了 δ -Proteobacteria 纲外,其余的 α 、 β 、 γ 和 ϵ 这 4 个纲都含有反硝化菌. 王莉等^[33]的研究表明 α -变形菌纲生丝微属菌株 *Hypomicrobium* sp. MAP-1 对甲胺磷、乙酰甲胺磷和水胺硫磷污染的土壤有修复能力. 丛毛单胞菌科(属于 β -Proteobacteria)中大部分菌属可分解污染物,氨氮、酚类物质、碳氮等营养因子对该菌科的生长繁殖均产生影响^[34]. 有研究表明特吕珀菌科属于异常球菌纲栖热菌门,能在碱、盐及高温的条件中生长,在堆肥过程中产生固氮酶,参与固氮过程,同时可利用多种糖类、有机酸和氨基酸^[35]. 腐螺旋菌科可以降解活性污泥中的蛋白质^[36]. 由此得出苦草组中异常球菌纲、丛毛单胞菌科、腐螺旋菌科和生丝微菌属的细菌具有降解作用,因此推断这些菌种可能是引起苦草组水体中氮磷降解的关键物种.

4 结论

(1) 8 种沉水植物都对水体中 TN、TP 有明显的净化效果. 其中密刺苦草组对水体中 TN、TP 的去除率最高,伊乐藻组和金鱼藻组的植物富集吸收率高于其他组,密刺苦草和苦草的植物增效去除率

最高。

(2) 8 种沉水植物关联细菌的绝对优势菌门为变形菌门(丰度值均大于 40%)。贪铜菌属、红细菌属和芽单胞菌属为不同沉水植物共有的优势属。这些细菌类群大多具有降解作用,可能是引起沉水植物对水体中氮磷净化能力较强的主要原因。

(3) 由 PCA 主成分分析可知,密刺苦草组、苦草组与其他沉水植物组的细菌群落结构相似度不高。LEfSe 分析结果表明,密刺苦草组和苦草组中具有显著差异的菌群数量最多,其中根瘤菌目、伯克霍尔德氏菌目、黄杆菌目、产碱杆菌科、贪铜菌属和芽孢杆菌属的细菌可能是引起密刺苦草增效的净化能力较强的优势菌群;异常球菌纲、丛毛单胞菌科、腐螺旋菌科和生丝微菌属的细菌可能是引起苦草增效的净化能力较强的优势菌群。

参考文献:

- [1] Dai Y R, Jia C R, Liang W, *et al.* Effects of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **40**: 113-116.
- [2] 毕业亮, 吴诗敏, 周思宁, 等. 绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2265-2270.
- Bi Y L, Wu S M, Zhou S N, *et al.* Allelopathic effects and allelochemicals of *Myriophyllum elatinoides* on *Microcystis aeruginosa* and *Selenastrum capricornutum* [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2265-2270.
- [3] 项学敏, 宋春霞, 李彦生, 等. 湿地植物芦苇和香蒲根际微生物特性研究[J]. *环境保护科学*, 2004, **30**(4): 35-38.
- Xiang X M, Song C X, Li Y S, *et al.* Microorganism features of *Typha Latifolia* and *Phragmites Australis* at rhizosphere [J]. *Environmental Protection Science*, 2004, **30**(4): 35-38.
- [4] 李璐滨, 刘敏, 杨淑贞, 等. 毛竹根际可培养微生物种群多样性分析[J]. *微生物学报*, 2008, **48**(6): 772-779.
- Li L B, Liu M, Yang S Z, *et al.* Cultivable microbial diversity at the rhizosphere of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2008, **48**(6): 772-779.
- [5] 张琼琼, 黄兴如, 郭道宇. 湿地植物内生细菌多样性研究进展[J]. *湿地科学*, 2015, **13**(2): 233-243.
- Zhang Q Q, Huang X R, Guo X Y. Advance in endophytic bacterial diversity of wetland plants [J]. *Wetland Science*, 2015, **13**(2): 233-243.
- [6] 金树权, 周金波, 包薇红, 等. 5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 156-161.
- Jin S Q, Zhou J B, Bao W H, *et al.* Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 156-161.
- [7] 王立志. 两种沉水植物对间隙水磷浓度的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(4): 1051-1058.
- Wang L Z. Influence of two submerged macrophytes on pore water phosphorus concentration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(4): 1051-1058.
- [8] 何聃, 任丽娟, 邢鹏, 等. 沉水植物附着细菌群落结构及其多样性研究进展[J]. *生命科学*, 2014, **26**(2): 161-168.
- He D, Ren L J, Xing P, *et al.* Research progress of diversity and community structure of epiphytic bacteria on submerged macrophytes [J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2014, **26**(2): 161-168.
- [9] Eriksson P, Weisner S. Functional differences in epiphytic microbial communities in nutrient-rich freshwater ecosystems: an assay of denitrifying capacity [J]. *Freshwater Biology*, 1996, **36**(3): 555-562.
- [10] Shehzadi M, Afzal M, Khan M U, *et al.* Enhanced degradation of textile effluent in constructed wetland system using *Typha domingensis* and textile effluent-degrading endophytic bacteria [J]. *Water Research*, 2014, **58**: 152-159.
- [11] 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. 24-56.
- [12] 陈江, 金新华, 周均, 等. ICP-OES 测定废水中总磷 [J]. *工业水处理*, 2011, **31**(7): 83-85.
- Chen J, Jin X H, Zhou J, *et al.* Determination of total phosphorus in wastewater by ICP-OES [J]. *Industrial Water Treatment*, 2011, **31**(7): 83-85.
- [13] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 385-392.
- Wang L Z, Wang G X, Yu Z F, *et al.* Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in the growth period [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 385-392.
- [14] 葛绪广, 王国祥, 陈成忠, 等. 苦草生长对沉积物中磷迁移转化的影响 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(20): 5802-5811.
- Ge X G, Wang G X, Chen C Z, *et al.* Effects on the transformation of phosphorus in sediment with growing of *Vallisneria natans* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(20): 5802-5811.
- [15] Christiansen N H, Andersen F Ø, Jensen H S. Phosphate uptake kinetics for four species of submerged freshwater macrophytes measured by a ³³P phosphate radioisotope technique [J]. *Aquatic Botany*, 2016, **128**: 58-67.
- [16] 王文林, 刘波, 韩睿明, 等. 沉水植物茎叶微界面及其对水体氮循环影响研究进展 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(22): 6409-6416.
- Wang W L, Liu B, Han R M, *et al.* Research advancements and perspectives on leaf and stem micro-interfaces in submerged macrophytes and its effect on water nitrogen cycling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(22): 6409-6416.
- [17] Xu W W, Hu W P, Deng J C, *et al.* Effects of harvest management of *Trapa bispinosa* on an aquatic macrophyte community and water quality in a eutrophic lake [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **64**: 120-129.
- [18] 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 等. 伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3764-3768.
- Liu D D, Li Z K, Ye Z X, *et al.* Nitrogen uptake and denitrification study on the joint treatment of aquatic vegetation and immobilized nitrogen cycling bacteria in Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3764-3768.
- [19] 杨文斌, 李阳, 孙共献. 两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2156-2163.
- Yang W B, Li Y, Sun G X. Effects of two submerged macrophytes on dissolved inorganic nitrogen in overlying water and interstitial water [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2156-2163.
- [20] 孔祥龙, 叶春, 李春华, 等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中

- 氮素迁移转化的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 539-549.
- Kong X L, Ye C, Li C H, *et al.* Effect on nitrogen transfer and migration by *Vallisneria natans* (Lour.) Hara in water-sediment-submerged macrophytes system [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 539-549.
- [21] van der Gucht K, Vandekerckhove T, Vloemans N, *et al.* Characterization of bacterial communities in four freshwater lakes differing in nutrient load and food web structure [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2005, **53**(2): 205-220.
- [22] Zhang J X, Yang Y Y, Zhao L, *et al.* Distribution of sediment bacterial and archaeal communities in plateau freshwater lakes [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(7): 3291-3302.
- [23] Hempel M, Blume M, Blindow I, *et al.* Epiphytic bacterial community composition on two common submerged macrophytes in brackish water and freshwater[J]. BMC Microbiology, 2008, **8**: 58.
- [24] Fuentes S, Méndez V, Aguila P, *et al.* Bioremediation of petroleum hydrocarbons: catabolic genes, microbial communities, and applications [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, **98**(11): 4781-4794.
- [25] 沈娥. *Cupriavidus* sp. SHE 的筛选及特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- Shen E. Isolation and characterization of *Cupriavidus* sp. SHIE crossoft Word [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [26] Elifantz H, Horn G, Ayon M, *et al.* *Rhodobacteraceae* are the key members of the microbial community of the initial biofilm formed in Eastern Mediterranean coastal seawater [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2013, **85**(2): 348-357.
- [27] 赵锐. 青岛近海两种生态环境可培养细菌多样性研究及3株海洋新菌的分类鉴定[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- Zhao R. Studies of Cultivated marine bacterial diversities in two specific ecological environments in qingdao coastal area and taxonomic analysis of three novel bacteria[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [28] 张典利, 孟臻, 亓文哲, 等. 植物根际促生菌的研究与应用现状[J]. 世界农药, 2018, **40**(6): 37-43, 50.
- Zhang D L, Meng Z, Qi W Z, *et al.* The research and application status of plant growth promoting rhizobacteria [J]. World Pesticides, 2018, **40**(6): 37-43, 50.
- [29] Moulin L, Munive A, Dreyfus B, *et al.* Nodulation of legumes by members of the β -subclass of Proteobacteria[J]. Nature, 2001, **411**(6840): 948-950.
- [30] 李辉, 徐新阳, 李培军, 等. 人工湿地中氨化细菌去除有机氮的效果[J]. 环境工程学报, 2008, **2**(8): 1044-1047.
- Li H, Xu X Y, Li P J, *et al.* Research on ammonibacteria removing organic nitrogen in construction wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, **2**(8): 1044-1047.
- [31] 李科德, 胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理[J]. 中国环境科学, 1995, **15**(2): 140-144.
- Li K D, Hu Z J. Mechanisms of sewage purification by reed bed system[J]. China Environmental Science, 1995, **15**(2): 140-144.
- [32] 李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 等. 序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 342-349.
- Li W H, Sun Y J, Liu Z L, *et al.* Analysis on diversity of denitrifying microorganisms in sequential batch bioreactor landfill [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 342-349.
- [33] 王莉, 凌琪, 伍昌年, 等. *Hyphomicrobium* sp. MAP-1 菌株修复甲胺磷乙酰甲胺磷和水胺硫磷污染土壤的实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(1): 81-87.
- Wang L, Ling Q, Wu C N, *et al.* Bioremediation on the Soil Contaminated by methamidophos, acephate and isocarbophos by *Hyphomicrobium* sp. MAP-1 [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(1): 81-87.
- [34] 赵燕, 薛林贵, 李琳, 等. 丛毛单胞菌在环境污染物降解方面的研究进展[J]. 微生物学通报, 2012, **39**(10): 1471-1478.
- Zhao Y, Xue L G, Li L, *et al.* Advance in environmental pollutants degradation of *Comamonas* [J]. Microbiology China, 2012, **39**(10): 1471-1478.
- [35] Li X F, Bond P L, van Nostrand J D, *et al.* From lithotroph-to organotroph-dominant: directional shift of microbial community in sulphidic tailings during phytostabilization [J]. Scientific Reports, 2015, **5**: 12978.
- [36] Xia Y, Kong Y H, Thomsen T R, *et al.* Identification and ecophysiological characterization of epiphytic protein-hydrolyzing *Saprospiraceae* ("*Candidatus* Epiflobacter" spp.) in activated sludge [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(7): 2229-2238.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-ru, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)