

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
铜-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和铜、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)	

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性

李振灵¹, 丁彦礼^{1*}, 白少元^{1,2}, 李雪芬^{1,2}, 游少鸿^{1,2}, 解庆林^{1,2}

(1. 桂林理工大学广西矿冶与环境科学实验中心, 桂林 541004; 2. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为查明造成不同基质结构人工湿地净化性能差异的微生物因素, 利用高通量测序技术, 研究水平潜流人工湿地基质结构与微生物群落结构的相关性。结果表明, 3个对比人工湿地系统中, 从床体表层到底层渗透系数逐渐升高的六层结构人工湿地(CW6)净化性能最高, 其出水中COD、TN、NO₃⁻-N及NH₄⁺-N平均浓度分别为39、11、0.35及4 mg·L⁻¹, 其后为三层结构人工湿地(CW3), 而单层结构人工湿地(CW1)的净化效果最差, 平均出水浓度分别为95、21、0.60及12 mg·L⁻¹。高通量测序结果显示, 多层结构人工湿地中微生物OTUs略低于单层结构湿地, 但其优势菌门变形菌门(Proteobacteria)和其属水平上的硝化与反硝化细菌的相对丰度却显著高于单层湿地。PCA和丰度热图分析结果显示, CW3和CW6床体中变形菌门(Proteobacteria)属水平上的微生物存在显著的空间分布差异, 从而有利于污染物的分区降解, 而CW1各样点间的微生物群落结构无显著性差异。

关键词: 人工湿地; 基质结构; 微生物群落; 高通量; 主成分分析

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3713-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701050

Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands

LI Zhen-ling¹, DING Yan-li^{1*}, BAI Shao-yuan^{1,2}, LI Xue-fen^{1,2}, YOU Shao-hong^{1,2}, XIE Qing-lin^{1,2}

(1. Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To identify the microbial factors that cause the differences in the purification performance of constructed wetlands with different substrate structures, the relationship between the substrate structure and the microbial community composition in horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSSFCWs) was studied by high throughput sequencing. The results revealed that the purification performance of a six-layer constructed wetland (CW6), of which the permeability coefficient gradually increased from the surface layer to the bottom layer, was the highest among the three constructed wetland systems. The average concentrations of COD, TN, NO₃⁻-N, and NH₄⁺-N in the effluent were 39, 11, 0.35, and 4 mg·L⁻¹, respectively. The monolayer structure constructed wetland (CW1) had the worst purifying efficiency, with average effluent concentrations of 95, 21, 0.60 and 12 mg·L⁻¹ for COD, TN, NO₃⁻-N, and NH₄⁺-N, respectively. The results of the high-throughput sequencing showed that the number of microbial OTUs in multilayer structure wetlands was slightly lower than that in the monolayer structure wetland, but the relative abundance of the dominant phylum Proteobacteria and the nitrifying and denitrifying bacteria in the genus was significantly higher than the monolayer structure wetland. The results of PCA and heatmap indicated that there were significant differences in the spatial distribution of microbes in the genus of Proteobacteria in CW3 and CW6, which facilitated the degradation of pollutants. No significant differences were found in the community structure of CW1.

Key words: constructed wetlands; substrate structure; microbial community; high throughput; PCA

水平潜流人工湿地(horizontal subsurface flow constructed wetlands, HSSFCWs), 已被广泛用于工业、农业、生活污水以及城市地表径流的处理中^[1-3]。前人利用数值模拟方法结合实验研究结果表明, 基质结构对人工湿地(constructed wetlands, CWs)水力性能及净化效率影响显著, 由上到下填料渗透系数逐渐增加的分层填充方式能有效避免短流及死区的发生, 提高系统水力效率, 从而提高净化效果^[4,5]。值得注意的是, 基质结构的差异在提升系统

性能的同时, 势必会引起床体中微生物种群及结构的差异, 而目前国内外对于这方面的研究还鲜有报道。鉴于此, 本课题组以连续运行的分层结构及单层结构人工湿地系统为研究对象, 研究不同基质结

收稿日期: 2017-01-07; 修订日期: 2017-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41404116, 51638006, 51408147); 广西科技三项(桂科合1599005-2-2); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目

作者简介: 李振灵(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: LiZhenLing1992@163.com

* 通信作者, E-mail: dyl@glut.edu.cn

构人工湿地系统净化性能的差异及微生物群落结构分布差异,并利用 PCA 分析其与床体微生物种群结构分布的相关性.

1 材料与方法

1.1 实验装置

构建 3 个尺寸相同的人工湿地实验装置 (CW1、CW3 及 CW6),长、宽、高分别为 2、1 及 0.6 m(图 1),种植植物为美人蕉. 床体分为 3 部分,左右两端分别为 0.2 m 的布水区 and 集水区,主体填料区长度为 1.6 m,填充不同粒径的石英砂. 其中:①CW1 为单层人工湿地,由颗粒尺寸 ≤ 6

mm 的混合石英砂组成,其水力传导率 K 为 $65 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$; ②CW3 为 3 层结构的人工湿地,每层厚度相等,均为 0.2 m,石英砂粒径从表层到底层分别为 ≤ 0.6 、 $0.4 \sim 0.6$ 和 $1.0 \sim 3.0 \text{ mm}$,相应的 K 值分别为 26、36 和 $64 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$; ③CW6 为六层结构的人工湿地,每层厚度为 0.1 m,从表面到底部,石英砂粒径分别为 ≤ 0.6 、 $0.4 \sim 0.6$ 、 $0.6 \sim 0.9$ 、 $0.9 \sim 2.0$ 、 $2.0 \sim 4.0$ 和 $4.0 \sim 6.0 \text{ mm}$,对应的 K 值分别为 26、36、43、55、75 和 $176 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$. 3 个人工湿地在相同条件下运行处理校园生活污水,水力停留时间 (HRT) 均为 1.5 d,进水中水质参数如表 1 所示.

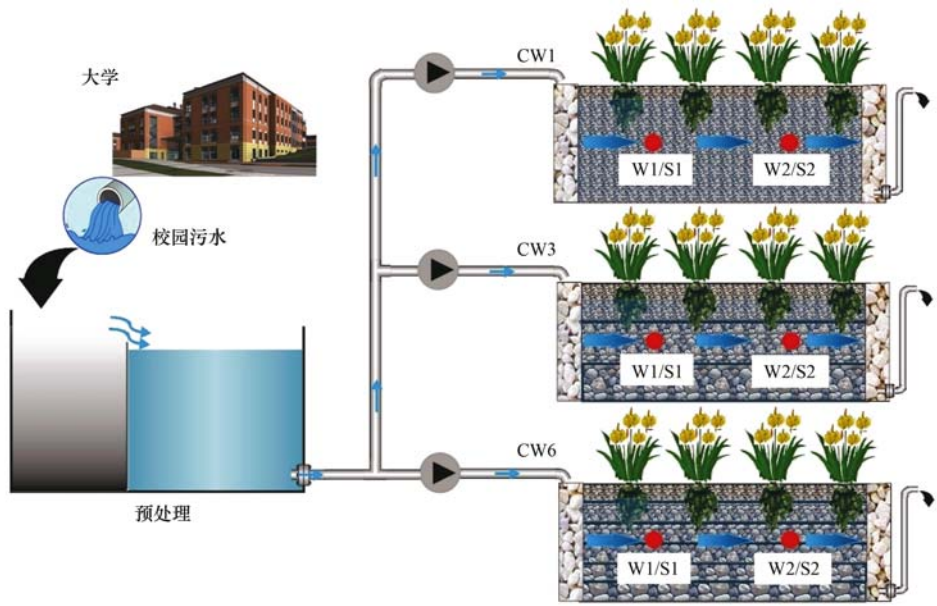


图 1 人工湿地实验装置示意
Fig. 1 Constructed wetlands experimental setup

表 1 3 个人工湿地进水的物理参数

Table 1 Physicochemical parameters of the influent for three constructed wetlands

参数	水温 /℃	pH	DO /mg·L ⁻¹	ORP /mV	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹
最小值	16	7.0	0.1	-168	130	18	0.8	26
最大值	28	7.6	0.6	-144	183	28	1.2	41
平均值	21	7.3	0.3	-158	156	23	0.9	35

1.2 采样

实验装置建于 2012 年,连续运行至今. 本实验时间为 2015 年 3 ~ 8 月,运行期间每周测定 3 个人工湿地进出水水质(国标法). 于 2015 年 7 月分别从 3 个 CWs 距离进水口 40 cm 和 160 cm 处的 A 和 B 不同深度 (10, 30 和 50 cm) 采集填料样品 (图 1),每个采样点取 3 个样品,除去样品中植物根或碎屑,储存在聚乙烯袋中,然后立即转移至实验室中

进行后续分析.

1.3 DNA 提取和高通量测序

采用 Mo Bio 公司的 Power Soil DNA 分离试剂盒提取 18 个样品中的 DNA. 采用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测提取的细菌总 DNA. 对 16S rRNA 基因的 V3 ~ V4 高变区片段进行 PCR 扩增,引物序列为 515F (GTGCCAGCMGCCGCGGTAA) 和 909R (CCCCgycaattcmtttragt). 扩增条件为:95℃

预变性 2 min, 接着进行 25 个循环, 包括 95℃ 变性 30 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 s; 循环结束后 72℃ 最终延伸 5 min. 每个样本 3 个重复, 将同一样本的 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测, 全部样品使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司) 切胶回收 PCR 产物, Tris_HCl 洗脱; 2% 琼脂糖电泳检测. 随后在生工生物工程 (上海) 股份有限公司的 Illumina MiSeq 平台上进行高通量测序分析, 得到原始图像数据文件经 CASAVA 碱基识别分析转化为原始测序序列, 结果以 FASTQ 文件格式储存. 利用 Mothur 对原始序列进行校正, 去除序列中的嵌合体, 得到优化序列; 在 97% 的相似性水平上将序列划分可操作分类单元 (operational taxonomic units, OTUs); 采用 RDP Classifier 贝叶斯算法对 97% 相似水平的 OUT 代表序列进行分类分析, 并在各个分类水平上统计每个样品的群落组成; 利用主成分分析 (PCA) 分析各床体微生物种群结构分布的相关性.

1.4 数据处理

实验数据统计分析采用软件 Excel 2010 和

SPSS 20.0 进行水质分析和主成分分析.

2 结果与讨论

2.1 不同基质结构人工湿地净化效果

CW1、CW3 及 CW6 对 COD、TN、 NO_3^- -N 及 NH_4^+ -N 的去除效果如图 2 所示, 从中可见, 3 个系统对有机物、和含氮污染物都有明显的降解梯度. 其中 CW6 去除效率最高, 其出水中以上 4 种污染物的平均浓度分别为 39、11、0.35 及 4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 相应的去除率为 75%、67%、61% 及 83%. 三者之中, CW1 的去除性能最差, 4 种污染物的平均去除率分别为 39%、39%、34% 及 49%. CW3 的净化性能介于二者之间, 4 种污染物的平均去除率分别为 60%、55%、50%、72%.

由此可见, CW3 和 CW6 系统中从床体表层到底层渗透系数逐渐升高的分层结构可强化人工湿地对 COD 和含氮污染物的去除能力. 其原因在于床体表层的填料渗透系数较小, 能够有效阻止越流、短流区的形成, 而床体底层的填料粒径较大, 渗透系数较高, 能够促进水流的通过, 从而避免该区域死区

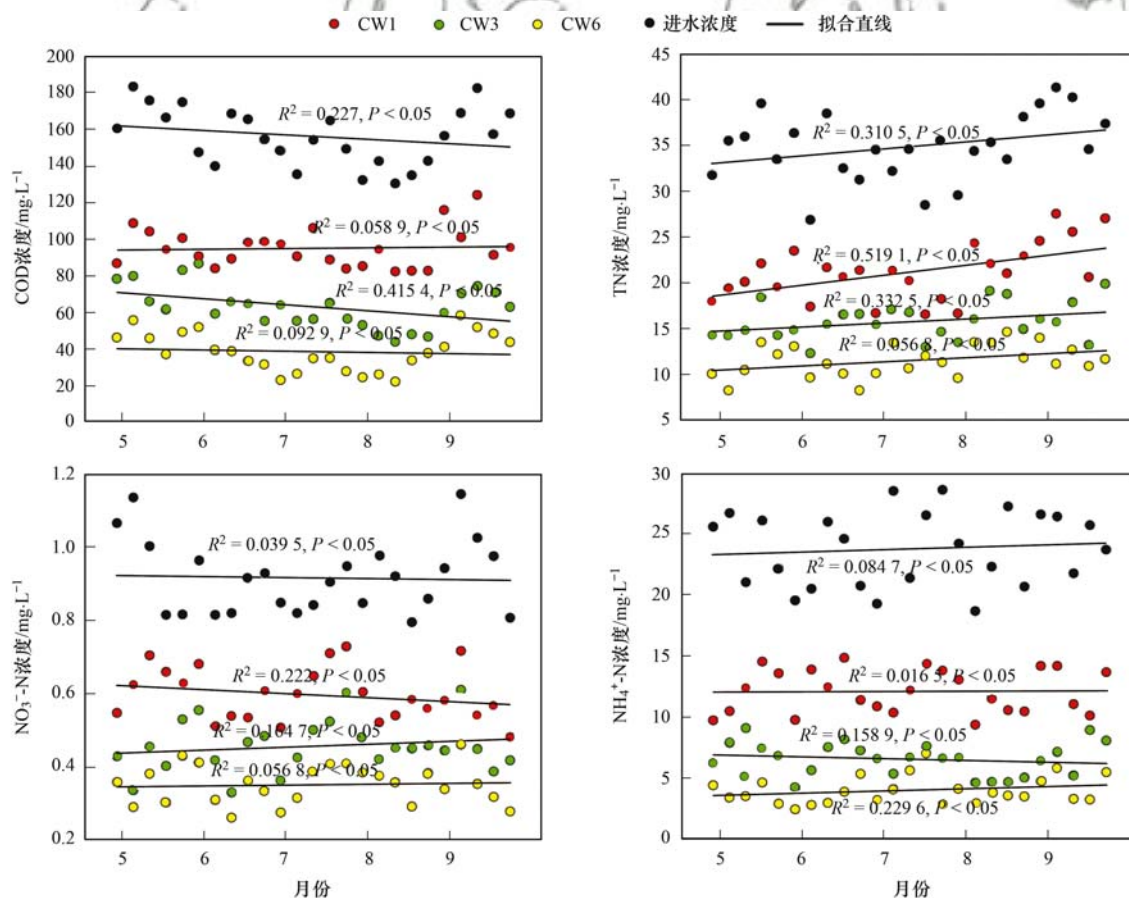


图 2 3 个人工湿地中 COD、TN、 NO_3^- -N 及 NH_4^+ -N 进出水浓度分析

Fig. 2 Influent and effluent concentration analysis of COD, TN, NO_3^- -N, and NH_4^+ -N in three constructed wetlands

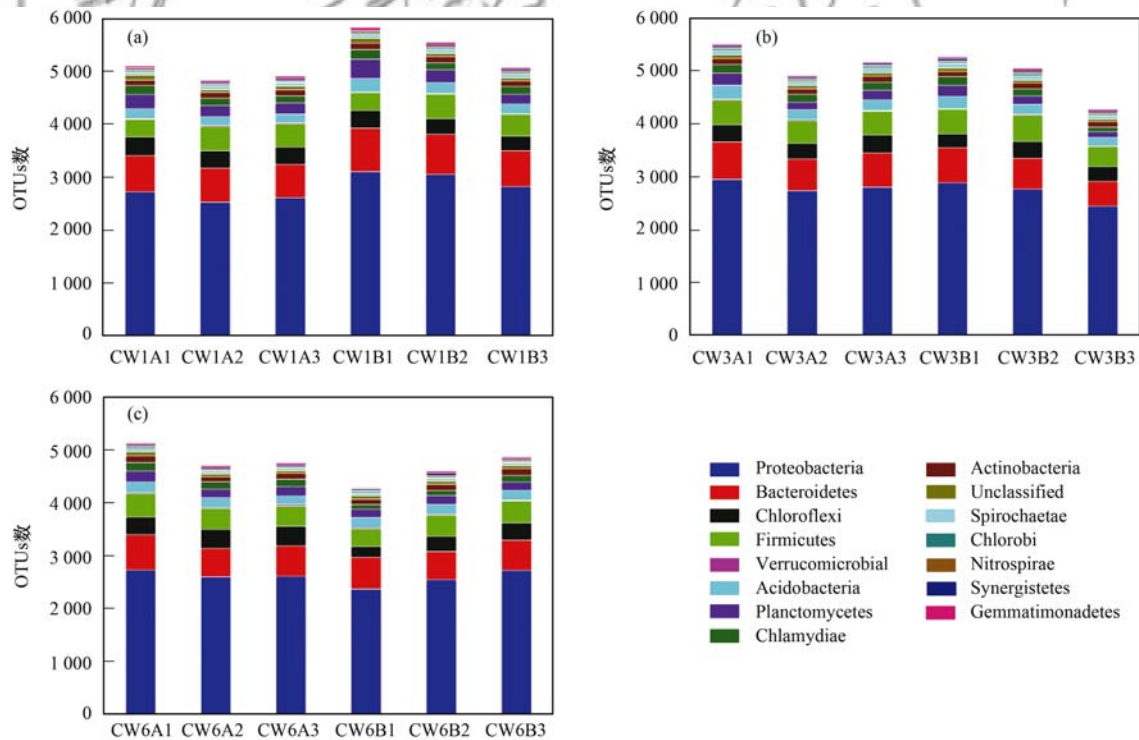
的形成. 在此情况下, 整个床体流场分布趋于均匀, 提高的水力性能有利于充分发挥填料及其上附着的微生物与污染物的接触时间, 提高传质效率, 并促进微生物的功能分区, 提高净化性能^[6,7], 其结果与 Bai 等的^[8] 研究结果一致.

2.2 微生物群落结构

高通量测序方法分析的 18 个样品中共得到 945 864 条高质量序列和 20 823 个 OTUs (按 97% 的相似度划分), 涵盖 15 门、50 纲、115 目、230 科及 910 属. 图 3 为微生物在门类水平上的 OTUs 分布. 从中看出, 3 个人工湿地中, 变形菌门 (Proteobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 的丰度相对较高; 其次分别为绿弯菌门 (Chloroflexi)、疣微菌门 (Verrucomicrobial)、厚壁菌门 (Firmicutes)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、浮霉菌门 (Planctomycetes) 和衣原体菌门 (Chlamydiae), 它们分别占 CW1 总数的 1% ~ 10% 之间; 绿菌门 (Chlorobi)、硝化螺旋菌门 (Nitrospirae)、螺旋体菌门 (Spirochaetae)、放线菌门 (Actinobacteria)、Synergistetes 以及芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes) 丰度极低 (<1%). 比较而言, CW6 和 CW3 的 OTUs 数量略低于 CW1, 考虑原因主要是由于在现有污染物浓度下, 多层结构湿地系

统对污染物有较好的净化效果, 使得污染物浓度沿水流方向呈现出从高到低的梯度代谢规律, 床体各处污染物种类相对简单, 从而有利于不同功能微生物的分区富集, 使其种类趋于集中^[9,10]. 有研究表明, 在水平潜流人工湿地中, 微生物群落数量随深度和排污口距离的增加而减少^[11]. 因而, 从床体中 OTUs 的分布上来看, 一般而言, 进水中较高的营养物质浓度及床体表层中丰富的溶解氧容易造成 OTUs 在数量上进水端高于出水端, 床体表层高于底层的趋势, 如图 3(b)、3(c) 所示, 这与 Button 等^[12] 的研究结果相似. 但对比分析发现 CW1 在分布上 [图 3(a)], 出水端 OTUs 数量高于进水, 表明该系统对污染物净化性能有限, 较多的污染物到达出水端, 造成出水端的 OTUs 数量较高.

从微生物数量及所占比例上来看 (图 4 和图 5), CW1、CW3 及 CW6 中样品的平均序列数分别为 318 125、315 769 及 302 462. 变形菌门 (Proteobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 作为 3 个人工湿地系统中的主要菌门, 其在 CW1 中所占比例分别为 61.54% 及 19.56%, 在 CW3 中分别占 66.76% 和 13.27%, CW6 中分别占 66.06% 和 12.86%. 变形菌门 (Proteobacteria) 作为 3 个 CWs



A1、A2、A3 分别代表样点 A 处深度为 10、30、50 cm 的样品; B1、B2、B3 分别代表样点 B 处 10、30、60 cm 深的样品; CW1、CW3、CW6 分别代表 3 个人工湿地; 下同

图 3 3 个人工湿地中微生物 OTUs 分布

Fig. 3 Distribution of microbial OTUs in three constructed wetlands

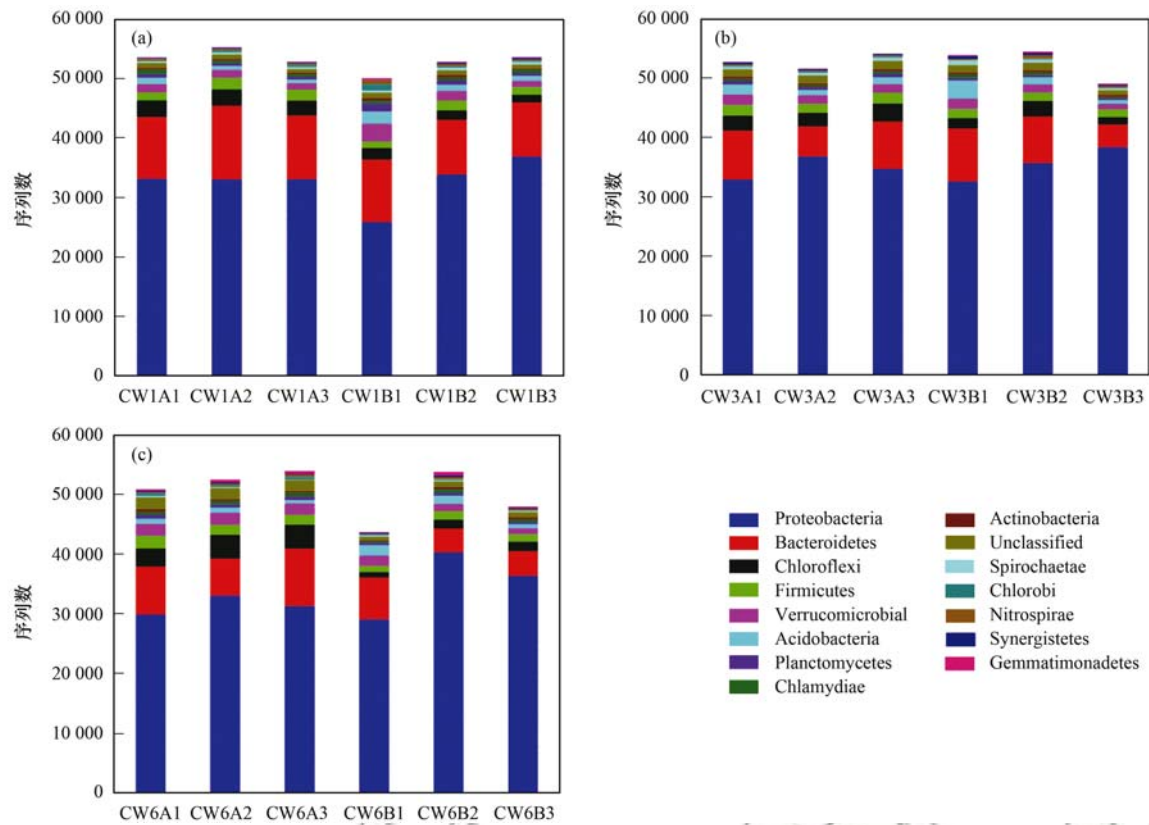


图 4 3 个人工湿地中 18 个样点的序列数量及微生物群落分布
Fig. 4 Sequence number and microbial community distribution of 18 samples in three constructed wetlands

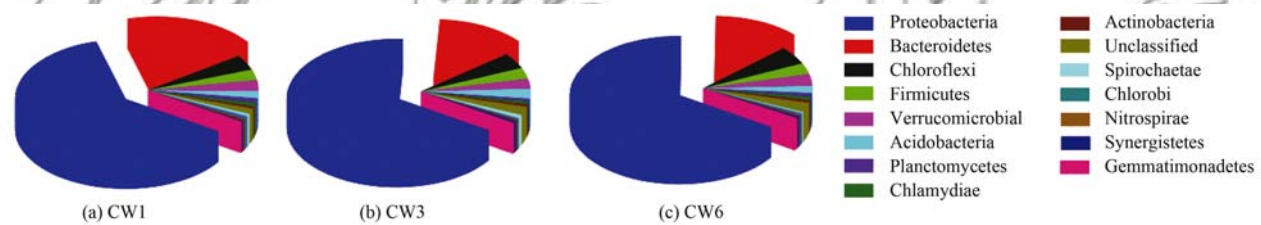


图 5 3 个人工湿地中每个菌门所占比例
Fig. 5 Proportion of every phylum in three constructed wetlands

中最为丰富的菌门,其多为专性或兼性厌氧代谢^[13]. 之前的相关研究表明,变形菌门(Proteobacteria)中包含许多与有机物和无机物代谢(如:碳循环,氮和硫循环)有关的菌属,并且在人工湿地中广泛分布^[14~16]. 因而推测 CW3 和 CW6 对含氮污染物的去除率高于 CW1 可能与该系统较丰富的变形菌门(Proteobacteria)有关.

人工湿地中含氮污染物的去除机理主要有硝化作用、反硝化作用以及氨氧化作用等^[17]. 与之相关的微生物主要有氨氧化真菌/细菌、硝化细菌(Nitrifying bacteria)和反硝化细菌(Denitrifying bacteria)^[18]. 通过分析发现,变形菌门(Proteobacteria)中包含硝化菌属和绝大多数的反硝化菌属^[19,20],硝化菌属有 *Nitrosococcus* 和

Nitrosomonas,硝化菌属序列数在 3 个系统(CW1、CW3 和 CW6)中所占比例分别为 0.25%、0.26% 和 0.51% (图 6); 而反硝化菌属主要包括 *Denitratisoma*、*Pseudomonas*、*Thauera*、*Comamonas*、*Azoarcus*、*Acidovorax*、*Rhizobium*、*Rhodobacter*、*Hydrogenophaga*、*Arcobacter*、*Thiobacillus*、*Sulfurimonas* 和 *Paracoccus*,3 个系统中反硝化菌属序列数所占比例分别为 12.5%、14.7% 及 19.1% (图 6),它们对 3 个系统含氮污染物的降解起决定性作用. 如图 6 所示,CW6 中硝化细菌的丰度比例远远高于 CW1 和 CW3,这可能是 CW6 中氨氮去除率(83%)高于 CW1(49%)和 CW3(72%)的主要原因. 此外,3 个系统中反硝化菌属丰度均高于硝化菌属说明硝化作用可能是制约该系统除氮效率的

关键因素,这可能是由于水平潜流人工湿地中的缺氧或厌氧环境更适合反硝化细菌生存所致,此结果与 Vymazal^[21]的研究结果一致.

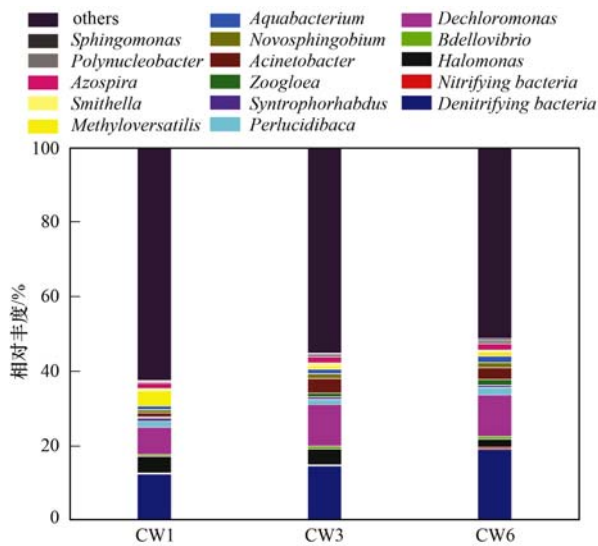


图 6 3 个人工湿地中属水平的菌属丰度

Fig. 6 Relative abundance of the genus in three constructed wetlands

2.3 变形菌门 (Proteobacteria) 属水平主成分分析

鉴于 3 个系统中变形菌门 (Proteobacteria) 的含量较高,存在差异,并且它与污染物的去除密切相关,因而对其主要菌属群进行主成分分析.如图 7 所示,为 3 个人工湿地中变形菌门 (Proteobacteria) 的属水平 PCA 分析. PC1 和 PC2 分别占变异总数的 34.52% 和 17.93%,占 PC1 比重大的前 3 种主成分分别为 *Zoogloea* (90.5%, 正相关)、*Thiobacillus* (89.2%, 正相关) 以及 *Aquabacterium* (86.9%, 正相关), PC2 的前 3 种菌属分别为 *Bdellovibrio* (87.6%, 正相关)、*Thauera* (77.3%, 正相关) 以及 *Azospira* (59.4%, 正相关). 其结果显示,3 个系统在变形菌门 (Proteobacteria) 属水平上的微生物群落分布无显著差异,而就各湿地进出水端而言, CW3 的进水端 (A) 和出水端 (B) 及 CW6 的进水端 (A) 和出水端 (B) 的群落结构分别在 PC1 水平上均呈现显著差异. 样点 A 受 *Azospira* 以及 *Denitratisoma* 影响较大,而样点 B 则更多地被 *Zoogloea* 及 *Thiobacillus* 影响. *Zoogloea* 是一种有机物代谢菌属, *Thiobacillus* 则是参与硫代谢的自养型反硝化菌属^[22],而 *Azospira* 和 *Denitratisoma* 则是 2 种与氮代谢相关的异养反硝化菌属^[23,24],它们的存在依赖于有机物和硝酸盐的浓度大小^[25]. CW3 和 CW6 中进出水端较为明显的微生物群落代谢差异显示出含氮污染物 (如 NO_3^- -N 及 NH_4^+ -N) 和有机物在该系统不同床体区域存在一定

降解梯度,从而导致微生物功能的分区富集. 比较而言, CW1 的样品点主要集中在原点附近,各样点间的微生物群落结构无显著性差异,因而出现 3 个系统间的净化差异. 这与多层结构对含氮污染物的净化效率高于单层结果一致.

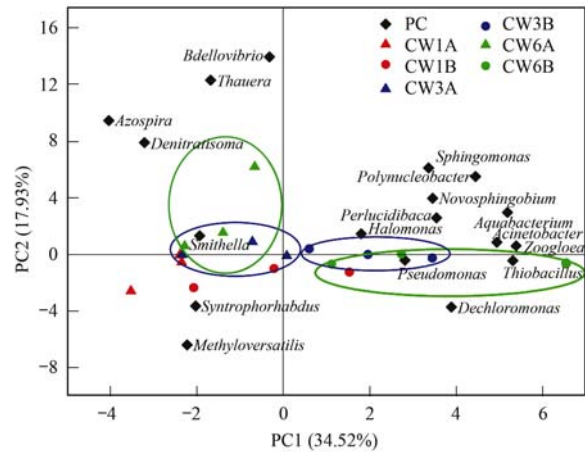


图 7 3 个人工湿地中变形菌门 (Proteobacteria) 中属水平的主成分分析

Fig. 7 Principal component analysis of Proteobacteria at the genus level in three constructed wetlands

2.4 物种丰度热图

应用 Bray-Curtis 距离算法和 Complete 聚类法,将 3 个系统中属水平上主要菌群中的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 8 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 18.78%,整体相似度较低. *Denitratisoma*、*Azospira*、*Pedospaera* 和 *Thiobacillus* 均是反硝化菌属,其中 *Denitratisoma*、*Azospira*、*Pedospaera* 属于异养型, *Thiobacillus* 是自养型,它们的生存代谢依赖有机物浓度和硝酸盐浓度.从图 8 中可以看出,就整体而言, CW3 和 CW6 中 *Denitratisoma*、*Azospira* 和 *Thiobacillus* 等反硝化菌属的丰度高于 CW1,这有助于提高 CW3 和 CW6 系统中硝态氮的去除.而对于单个系统,3 种菌属的丰度差异分别体现在 CW3 和 CW6 的进水端采样点 (A) 和出水端采样点 (B),其原因可能是由于进水中含有丰富的有机物和硝态氮使得异养反硝化菌属 (*Denitratisoma* 和 *Azospira*) 富集在 CW3 和 CW6 进水端,相比之下,由于 CW3 和 CW6 对有机物的高效降解使得其出水端以自养型反硝化菌属 (*Thiobacillus*) 为主.此外, CW1 的 6 个采样点基本处于同一个丰度水平,其结果与主成分分析结果一致.

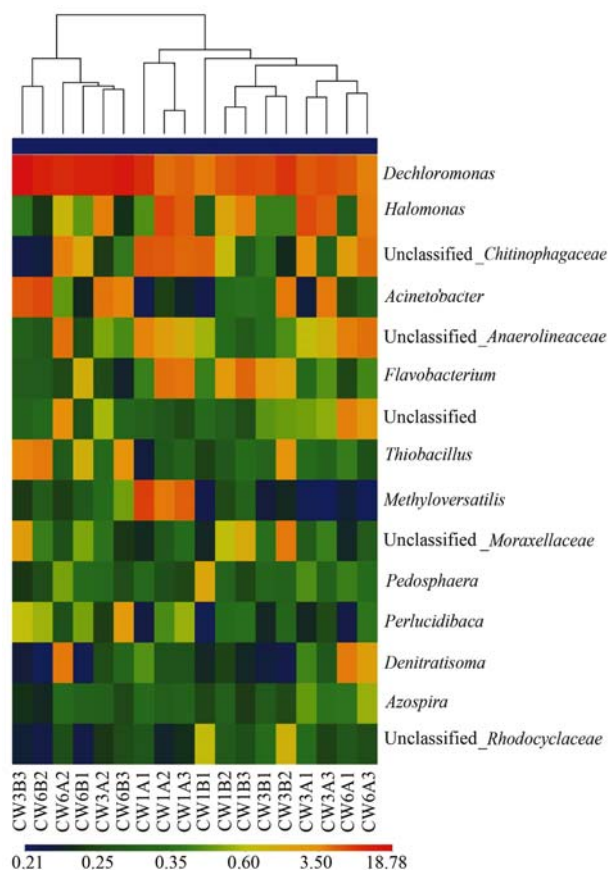


图8 3个人工湿地中属水平微生物群落聚类 Heatmap

Fig. 8 Heatmap of microbial clusters in the genus in three constructed wetlands

3 结论

(1)从床体表层到底层渗透系数逐渐升高的多层结构潜流人工湿地对COD、TN、 NO_3^- -N及 NH_4^+ -N的去除效果相较于单层结构有显著提高。

(2)多层结构人工湿地床体中微生物种群相对集中,其OTUs数量略低于单层结构系统,而变形菌门(Proteobacteria)作为优势菌门,所占比例显著高于单层结构,且其属水平上的硝化细菌与反硝化细菌在数量上均高于单层结构湿地。

(3)主成分分析和丰度热图分析结果显示,单层结构与多层结构人工湿地的微生物的种群结构在属水平上无显著差异,但多层结构系统(CW3、CW6)进出水间差异显著,主要体现在变形菌门(Proteobacteria)的属水平上,从而实现多层结构系统中污染物的高效降解。

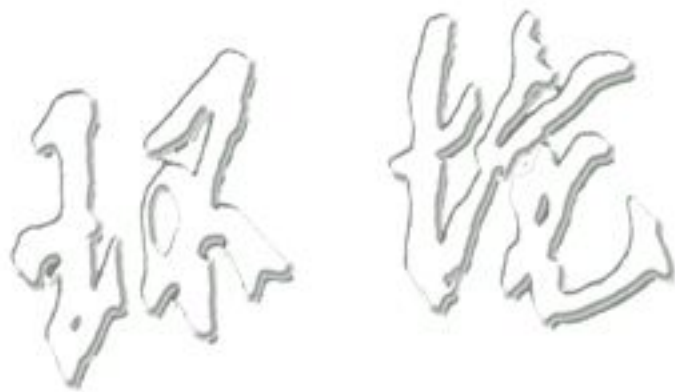
参考文献:

[1] 赵艳,李锋民,王昊云,等.不同结构好氧/厌氧潜流人工湿地微生物群落代谢特性[J].环境科学学报,2012,32(2):299-307.
Zhao Y, Li F M, Wang H Y, et al. Characteristics of microbial

community metabolism in aerobic/anaerobic subsurface flow constructed wetland[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(2): 299-307.

- [2] Headley T R, Tanner C C. Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: an innovative stormwater treatment technology[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2012, 42(21): 2261-2310.
- [3] Choi J Y, Maniquiz M C, Geronimo F K, et al. Development of a horizontal subsurface flow modular constructed wetland for urban runoff treatment[J]. Water Science and Technology, 2012, 66(9): 1950-1957.
- [4] 丁彦礼,何珊,宋志鑫,等.水平潜流人工湿地流场数值模拟与结构优化分析[J].环境工程学报,2015,9(7):3209-3214.
Ding Y L, He S, Song Z X, et al. Numerical simulations of flow field and analyses of optimal structure for horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(7): 3209-3214.
- [5] 白少元,宋志鑫,丁彦礼,等.潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究[J].环境科学,2014,35(2):592-596.
Bai S Y, Song Z X, Ding Y L, et al. Correlation of substrate structure and hydraulic characteristics in subsurface flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 592-596.
- [6] Suliman F, Futsaether C, Oxaal U. Hydraulic performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands for different strategies of filling the filter medium into the filter basin[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(1): 45-55.
- [7] Tee H C, Lim P E, Seng C E, et al. Newly developed baffled subsurface-flow constructed wetland for the enhancement of nitrogen removal[J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 235-242.
- [8] Bai S Y, Lv T, Ding Y L, et al. Multilayer substrate configuration enhances removal efficiency of pollutants in constructed wetlands[J]. Water, 2016, 8(12): 556.
- [9] Yi X H, Jing D D, Wan J Q, et al. Temporal and spatial variations of contaminant removal, enzyme activities, and microbial community structure in a pilot horizontal subsurface flow constructed wetland purifying industrial runoff[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(9): 8565-8576.
- [10] 魏佳明,崔丽娟,李伟,等.表流湿地细菌群落结构特征[J].环境科学,2016,37(11):4357-4365.
Wei J M, Cui L J, Li W, et al. Characteristics of bacterial communities in surface-flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4357-4365.
- [11] 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.
- [12] Button M, Nivala J, Weber K P, et al. Microbial community metabolic function in subsurface flow constructed wetlands of different designs[J]. Ecological Engineering, 2015, 80: 162-171.
- [13] Michael T M, John M M. Brock biology of microorganisms (11th ed)[J]. International Microbiology, 2005, 8: 149-152.

- [14] Liu J, Yi N K, Wang S, *et al.* Impact of plant species on spatial distribution of metabolic potential and functional diversity of microbial communities in a constructed wetland treating aquaculture wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **94**: 564-573.
- [15] Ansola G, Arroyo P, Sáenz de Miera L E. Characterisation of the soil bacterial community structure and composition of natural and constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **473-474**: 63-71.
- [16] Dworkin M, Falkow S, Rosenberg E, *et al.* The prokaryotes: Vol 5: proteobacteria: alpha and beta subclasses (3rd ed.) [M]. New York: Springer, 2006. 3-37.
- [17] van Niftrik L, Jetten M S M. Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: unique microorganisms with exceptional properties[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2012, **76** (3): 585-596.
- [18] Truu M, Juhanson J, Truu J. Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407** (13): 3958-3971.
- [19] Vymazal J. Removal of enteric bacteria in constructed treatment wetlands with emergent macrophytes: a review [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2005, **40** (6-7): 1355-1367.
- [20] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, **22** (1-2): 93-117.
- [21] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380** (1-3): 48-65.
- [22] Andrade M V F, Sakamoto I K, Corbi J J, *et al.* Effects of hydraulic retention time, co-substrate and nitrogen source on laundry wastewater anionic surfactant degradation in fluidized bed reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **224**: 246-254.
- [23] Wu Y H, Han R, Yang X N, *et al.* Correlating microbial community with physicochemical indices and structures of a full-scale integrated constructed wetland system [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100** (15): 6917-6926.
- [24] Pelissari C, Ávila C, Trein C M, *et al.* Nitrogen transforming bacteria within a full-scale partially saturated vertical subsurface flow constructed wetland treating urban wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 390-399.
- [25] Saeed T, Sun G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **112**: 429-448.



CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Banksides in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong, <i>et al.</i> (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables Influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)