

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽胞杆菌及其芽胞对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响

黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮*, 石纹豪, 杨珊

(西南大学资源环境学院, 土壤多尺度界面过程与调控重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 选取重庆地区分布面积较广的蓬莱镇组(S1)、沙溪庙组(S2)、飞仙关组(S3)和遂宁组(S4)这4种不同紫色母岩, 将其灭菌后加到未灭菌的取自西南大学崇德湖的景观水体中, 进行生态缸构建, 研究不同紫色母岩理化性质对水体中氮磷及有机物去除的影响。结果表明, 实验条件下, S1组对水体总氮、总磷及氨氮去除效果最好, 去除率分别为45.1%、62.3%、90.0%; S4组对水体中COD去除效果最好, 去除率为94.5%; 实验前后紫色母岩中氨氮含量变化均不明显, 说明紫色母岩的吸附作用不是导致水体中氨氮下降的主要因素; 砷对硫酸盐还原菌有抑制作用, 铜、镁对革兰氏阴性菌有促进作用, 水体中微生物多样性与总氮含量正相关; 微生物群落结构与环境因子的PCA分析得出母岩通过释放矿质元素影响水体中微生物群落结构及组成, 从而影响水体氮磷及有机物去除。

关键词: 紫色母岩; 景观水体; 氮磷去除; 有机物去除; 微生物群落

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1639-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.017

Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water

HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun*, SHI Wen-hao, YANG Shan

(Key Laboratory of Soil Multiscale Interface Process and Control, College of Resources and Environment, Southwestern University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to understand the impacts of physicochemical properties of purple parent rock on the removal rates of nitrogen, phosphorus and organics in landscape water systems, four types of purple parent rocks including Peng-lai-zhen Formation (S1), Sha-xi-miao Formation (S2), Fei-xian-guan Formation (S3) and Sui-ning Formation (S4), which distribute widely in Chongqing, were selected and autoclaved, and added to unsterile landscape water collected from Chong-de Lake in Southwest University, and the landscape water only was used as control. And several indicators such as total nitrogen and phosphorus and so on of every disposal were investigated periodically. The results indicated that: ① The highest removal rates of total nitrogen, total phosphorus and Ammonia nitrogen were observed in S1, which were 45.1%, 62.3% and 90%, respectively; the highest removal rate of COD was 94.5% in S4; the ammonia nitrogen content in the purple parent rocks was not obviously changed before and after the experiments, which indicated that the adsorption of ammonia nitrogen on purple parent rock surface was not the main reason for the decrease of ammonia nitrogen in water. ② Arsenate had inhibitory effect on the sulfate-reducing bacteria, while copper and magnesium had promoting effect on gram-negative bacteria. ③ The microbial diversity was positively correlated to total nitrogen in water. ④ Based on the PCA analyses of microbial community structure and environmental factors, the mineral elements released from parent rock affected the structure and composition of microbial community in the test water, and then influenced the removal rates of nitrogen, phosphorus and organics in water systems.

Key words: purple parent rock; landscape water; removal rates of total nitrogen and phosphorus; removal rates of organics; microbial community

近年来,城市水体景观的营建越来越受到人们的青睐,但景观水体的自净功能、循环能力和生物动态平衡能力弱,加之生活污水的不合理排放,导致许多景观水体富营养化,严重影响周边居住环境和城市环境^[1]。因此,研发行之有效的景观水体处理技术成为当前急需解决的问题。目前,有研究报道,水体基质的选择和铺设对景观水体治理效果有较大影响^[2]。刘红美等^[3]研究发现利用天然沸石和水化硅酸钙为基质,可有效去除微污染景观水体中的浊度、COD、氨氮、总氮、总磷。黄德锋等^[4]研究发现以沸石-页岩为基质和以砾石为基质对景观水体中

的浊度和COD均有较好的去除效果。He等^[5]采用砾石、沸石和矿灰这3种物质共同作为基质处理富营养化水体,发现其对富营养化水体中总氮、总磷的去除效果比单独以砾石为基质的去除效果好。因此,研究基质对水体理化性质及生态结构的影响,将对景观水处理方案设计有重大意义。

紫色母岩是广泛分布于西南地区的一种沉积

收稿日期: 2014-11-12; 修订日期: 2015-01-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAJ11B03)

作者简介: 黄雪娇(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤微生物, E-mail: 1548217611@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lizhlun4740@sina.com

岩,其矿物成分比砾石复杂,含有较多的黏粒矿物,风化形成的紫色土磷含量低且相对不易淋失^[6],能够吸附水体中的磷素^[7],同时母岩本身所释放的矿质元素可能会影响水中的微生物群落,从而间接影响水中氮磷的含量,因此可作为景观水基质材料.然而过去的研究大多集中在紫色母岩风化物理颗粒变化、风化破碎成土、营养肥力等方面^[8~11],还未将紫色母岩作为景观水体基质,维持景观水体稳定等方面的研究.本研究将紫色母岩作为景观水体基质,通过高温灭菌,杀灭紫色母岩样品中所携带的微生物,从紫色母岩理化性质的角度研究不同紫色母岩对自然富营养化水体氮磷等营养物去除的影响,以期利用紫色母岩作为景观水基质铺设,去除水体中氮、磷及有机物

提出合理化建议.

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

供试用紫色母岩材料选用重庆地区分布面积较广的蓬莱镇组(S1)、沙溪庙组(S2)、飞仙关组(S3)和遂宁组(S4)这4种具有不同沉积相的典型紫色母岩. S1组和S4组紫色母岩采自巴南区的界石和长生之间的倒置低山区; S2组紫色母岩采自西南大学紫色土实验基地; S3组紫色母岩采自北碚区鸡公山. 供试母岩基本性状列于表1. 取样后去除杂草、树枝等杂质,并将母岩样品处理成2 cm左右的小块在通风干燥的地方风干备用. 供试用水样采自西南大学崇德湖.

表1 供试母岩基本性状

Table 1 Basic properties of the parent rock samples

母岩	采样地点	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	pH	沉积相	碳酸盐反应
蓬莱镇组(S1)	重庆巴南	0.215	0.572	8	河湖相沉积	中
沙溪庙组(S2)	重庆北碚	0.153	0.791	7.3	河相沉积	无
飞仙关组(S3)	重庆北碚	0.147	0.483	7.8	海相沉积	中
遂宁组(S4)	重庆巴南	0.236	0.502	8.1	湖相沉积	强

1.2 模拟生态缸构建

将121℃高压灭菌25 min后的4种不同紫色母岩样品分别置于4个干净的20 L透明塑料桶底部,每桶加入1 kg紫色母岩,加入15 L崇德湖采集混合水样,完成模拟生态缸构建. 将模拟生态缸置于2 000 lx光照,12L:12D光照周期,25℃条件下培养. 将只有水样不加紫色母岩的生态缸作为空白对照,每个处理3次重复.

1.3 水质理化指标测定

总氮、总磷、pH及COD每5 d测定一次,氨氮、硝氮每3 d测定一次,所有指标均按照地表水水质指标分析国家标准进行测定^[12].

1.4 紫色母岩中氮氮测定

采用2 mol·L⁻¹ KCl浸提-靛酚蓝比色法测定实验前紫色母岩和实验结束后紫色母岩及其风化产物的氨氮含量^[13]. 用水分测定仪分析母岩及风化产物的水分含量.

1.5 水中元素测定

采用文献[14]测定各生态缸水体的B、Ca、Mg、Hg、Al、Zn、Fe、Cu、Mn、Mo、Pb、Cd、Ni、As、Cr、La和Ce等元素的含量.

1.6 磷脂脂肪酸(PLFA)分析微生物群落结构

每个生态缸取2 L水样用醋酸纤维滤膜(0.22

μm)抽滤,将抽滤后的滤膜进行提取、皂化、甲基化、萃取以及碱洗涤后获得上机样品,用Agilent 6850气相色谱仪(FID检测器)分析磷脂脂肪酸(PLFA)的成分. 色谱条件为: HP-5柱(25.0 m×200 μm×0.33 μm),进样量1 μL,分流比10:1,载气(H₂),尾吹气高纯N₂,助燃气空气,流速0.8 mL·min⁻¹;汽化室温度250℃、检测器温度300℃,柱前压10.0 psi(1 psi=6.895 kPa),质谱全扫描范围30~600 m/z;二阶程序柱温170℃(5 min)→260℃→310℃,维持1.5 min. 各成分脂肪酸通过MIDI Sherlock微生物鉴定系统(Version 6.1, MIDI, Inc., Newark, DE)进行. 标准品购于美国MIDI公司的C9-C20脂肪酸甲酯,PLFA用C19:0做内标换算PLFA的绝对含量.

根据磷脂脂肪酸绝对含量,计算水体中微生物群落的多样性指数(Shannon-Wiener, *H*). 计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i \quad (P_i = N_i/N)$$

同时,将微生物群落生物量、多样性指数与水体中氮磷等营养物质含量做PCA分析.

1.7 实验数据处理

实验数据用SPSS 13.0进行单因素方差分析,

用 Canoco for Windows 4.5 进行主成分分析, PCA 排序图中物种与环境因子间夹角的余弦值表示相关性, 文中图标用 Origin Pro 8 绘制。

2 结果与讨论

2.1 不同紫色母岩对水体 pH 变化的影响

如图 1 所示, 0 ~ 5 d 时, 各组中 pH 均迅速下降, 其中 S1 组下降最快, 并在 5 d 时显著低于其他各组, 说明该时间段内各组中微生物的硝化作用较强, S1 组生态缸中微生物的硝化作用最强。已有研究表明 pH 是水环境的重要影响因子, 当 pH 值在 7.3 ~ 8.0 之间时, 硝化作用最迅速^[15]。微生物对氨氮的硝化作用会伴随着 pH 下降, 硝化作用越强, pH 下降越明显^[16]。而本实验中, 除实验初始和实验周期结束时外, 各组生态缸水体的 pH 值均在 7.6 ~ 8.0 之间, 为硝化作用最适 pH 值, 且各组生态缸中的 pH (包括对照组) 无显著差异, 所以, 本实验中 pH 值不是影响硝化作用的限制因素。

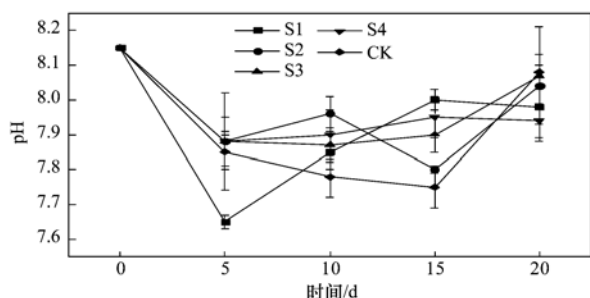


图 1 不同紫色母岩条件下水中 pH 随时间变化

Fig. 1 Variation of pH with time under conditions of different purple rocks

2.2 不同紫色母岩对水体污染物变化量的影响

2.2.1 不同紫色母岩对水体 COD 变化的影响

如图 2 所示, 4 种不同紫色母岩条件下水样中的 COD 均呈显著下降趋势。其中 S3、S4 组在实验开始 5 d 内下降显著且降低速率快于其他各组。在实验后期, 与对照组相比, 4 组生态缸对 COD 变化的影响趋于显著, 到第 15 d 时, 各组 COD 下降率从高到低依次为 S4 (94.5%) > S3 (78.0%) = S2 (78.0%) > S1 (63.4%) > CK (45.1%)。由此可见, 相对于对照组处理, 15 d 时 4 种生态缸模型均对水体 COD 有显著降低效果, S4 组对 COD 下降影响最大, 而 S1 组影响较小。

2.2.2 不同紫色母岩对水体氨氮变化的影响

如图 3 所示, 总体来看, 不同紫色母岩条件下各水样中的氨氮浓度均有不同程度的下降。各生态

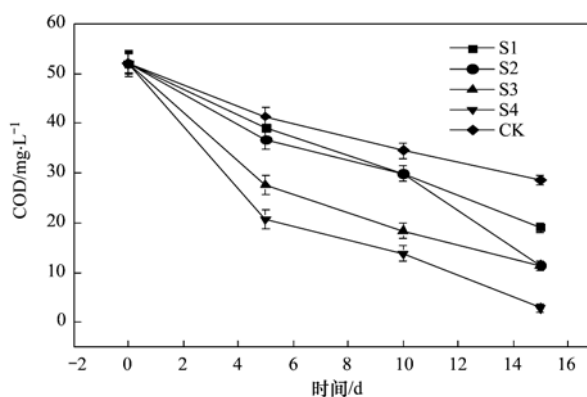


图 2 不同紫色母岩条件下 COD 随时间变化

Fig. 2 Variation of COD with time under conditions of different purple rocks

缸中氨氮在前 3 d 均显著下降, 这可能是氨氮挥发或水体微生物的硝化作用所导致。S3 组和 S4 组中氨氮含量在 3 d 之后明显升高, 而其他各组仍持续降低, 这可能与水体中有机物分解释放出的氨氮有关, 可以看出 S3 组和 S4 组在这一时段 COD 显著降低, 且降低速率快于其他各组 (图 2)。12 d 后, 各组氨氮浓度下降率均较高, S1 组生态缸中氨氮浓度显著低于对照组, 氨氮的下降率高达 90.0%, 而 S4 组中氨氮浓度显著高于对照组, 氨氮下降率仅为 43.9%。说明不同紫色母岩组成的生态系统对景观水体中的氨氮消耗作用有明显差异, 其中 S1 组生态缸的消耗效果最好, 而 S4 组生态缸的消耗效果最差。

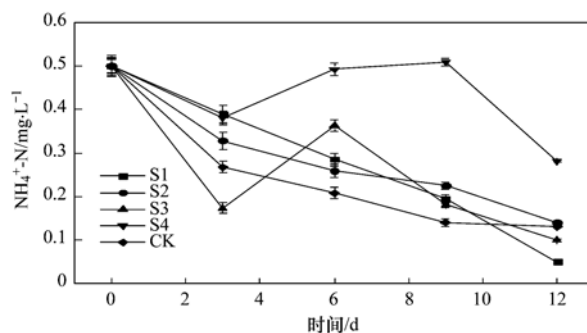


图 3 不同紫色母岩条件下水中 NH_4^+-N 随时间变化

Fig. 3 Variation of NH_4^+-N with time under conditions of different purple rocks

2.2.3 不同紫色母岩对水体硝态氮变化的影响

如图 4 所示, 硝态氮浓度变化均呈先上升后下降趋势 (对照组除外), 说明各生态缸中均存在微生物的硝化作用和反硝化作用, 而对照组中生态缸中硝化和反硝化作用均较弱。实验结束后, 相对于初始硝态氮浓度, 包括对照组在内的各组生态缸模型

均使硝态氮浓度升高,这应该是有机物分解和硝化作用共同作用的结果.然而不同紫色母岩组成的生态系统对景观水体中硝态氮含量的影响不同,S3组中硝态氮浓度极显著高于对照组,S4组中硝态氮浓度显著高于对照组,而S1和S2组与对照组无显著差异.前3d时各组生态缸中硝态氮浓度均显著上升,这说明各生态缸中发生了较强烈的硝化作用,将氨氮转化成了硝态氮.

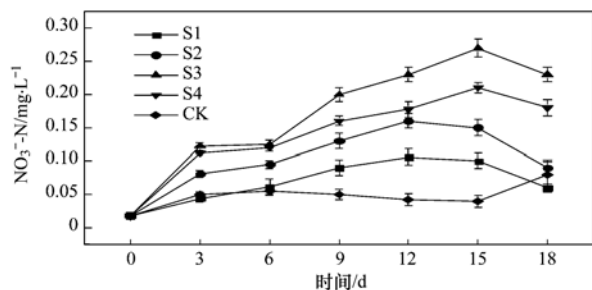


图4 不同紫色母岩条件下水中 NO_3^- -N随时间变化

Fig. 4 Variation of NO_3^- -N with time under conditions of different purple rocks

2.2.4 不同紫色母岩对水体总氮含量的影响

有机氮和无机氮共同构成水体中总氮的含量,无机氮又分为硝态氮和氨氮.水体中氮的去除途径主要分为以下2种:①氨氮的挥发;②微生物硝化作用将氨氮转变成硝态氮,反硝化作用将硝态氮转化成气态氮溢出水体^[17].随着时间的推移,不同处理组水样中的总氮均呈现下降趋势,最终S1组中总氮浓度极显著低于对照组,S2组中总氮浓度显著低于对照组,而S3和S4组与对照组无显著差异(见图5),可见4种生态缸模型均对总氮有一定去除效果,S1组生态缸对总氮去除效果最好,S4组去除效果较差.刘海伟等^[18]研究表明,常温下水体 $\text{pH} < 7$ 时,水体中 NH_4^+ 为主要存在形式,当 $\text{pH} > 7$ 时,水体中 NH_4^+ 迅速减少,分子形态的 NH_3 相应增加.本实验研究发现各生态缸中水体 pH 均大于7,水体中 NH_4^+ 可能会以 NH_3 形式挥发进入大气中.然而对照水体 pH 也大于7.6,但其总氮下降很少,因此4种紫色母岩处理组水体总氮的减少与氨氮挥发关系不大,推测和4种紫色母岩促进水体中微生物的反硝化作用有关.Chang等^[19]研究发现,硝化作用会造成 pH 值的下降而反硝化作用则会引起 pH 值的升高.本实验各生态缸中 pH 值前3d均明显降低(图1),说明各生态缸中存在显著的硝化作用.S1组生态缸水体中前5d时发生强烈的硝化作用,将氨氮转化成硝态氮,之后水体 pH 急剧上升,

硝化作用减弱,反硝化作用增强,将硝态氮转化成气态氮,总氮显著下降.S4组生态缸水体中由于有机物分解释放氨氮,因此水体中氨氮的下降率较小,且水体中硝化作用大于反硝化作用,因此硝态氮上升浓度较大,水体总氮下降效果不明显.

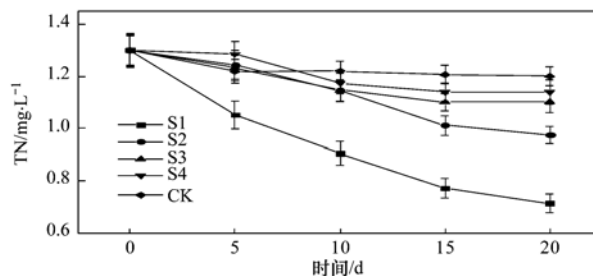


图5 不同紫色母岩条件下水中TN随时间变化

Fig. 5 Variation of TN with time under conditions of different purple rocks

2.2.5 不同紫色母岩对水体总磷变化的影响

如图6所示,相比于对照组,各组生态缸中总磷浓度均有显著下降,S3组下降显著,其他组下降极显著.其中S4组的总磷浓度在前5d内急剧下降,之后仍然持续下降;S1、S2组在实验前期5d内下降趋势稍缓,5d之后总磷浓度急剧下降;S3组持续下降.由此可见,4种生态缸模型均对总磷有良好的去除效果,其中S1组、S4组、S2组生态缸去除总磷效果均非常显著,S3组去除效果稍弱.

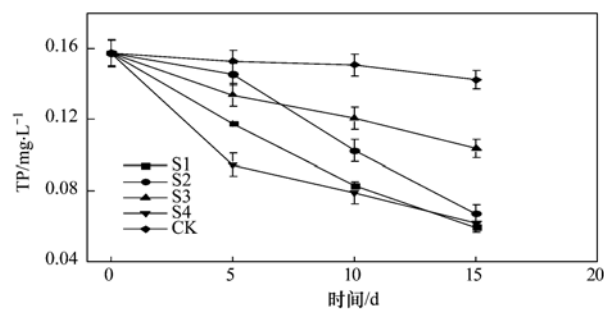


图6 不同紫色母岩条件下TP随时间变化

Fig. 6 Variation of TP with time under conditions of different purple rocks

2.3 实验前后紫色母岩氨氮含量的变化

王而力等^[20]研究发现风沙土不同组分对氨氮具有不同的吸附能力;陈丽丽等^[21]研究表明红泥对氨氮的吸附能力较强.因此紫色母岩对氨氮的吸附作用,可能也是氨氮下降的影响因素.然而根据实验前后紫色母岩氨氮含量的变化结果(见表2),4种紫色母岩在实验前后氨氮含量变化均不明显.其中只有S1组氨氮含量变化相对较大,上升了0.47

表 2 紫色母岩在实验前后NH₄⁺-N的含量/mg·kg⁻¹

Table 2 NH ₄ ⁺ -N content in purple rocks before and after the experiment/mg·kg ⁻¹				
项目	S1	S2	S3	S4
实验前	5.01 ± 0.02	4.96 ± 0.01	4.71 ± 0.00	6.90 ± 0.01
实验后	5.48 ± 0.03	5.01 ± 0.01	4.27 ± 0.01	6.43 ± 0.02

mg·kg⁻¹,仅占实验中氨氮下降量的 6.9%,所以紫色母岩的吸附作用不是导致水体中氨氮下降的主要因素.

2.4 各组生态缸条件下紫色母岩对水体中元素含量变化的影响

如表 3 所示,各组生态缸模型水体中,铅、锰、锌、镍、硼、铬、铝、铁、钙元素含量值差异不显著. 镉在 S1 组和 S4 组水体中的含量均高于对照组和 S2、S3 组; 4 种紫色母岩处理组的砷含量均显著低于对照组,其中 S1 组和 S3 组水体中砷含量最低;

4 种紫色母岩处理组水体中铜含量均高于对照组,其中 S4 组中铜含量显著高于对照组; S1 组中钼含量显著低于其他各组,而其他各组与对照组无显著差异; 各组生态缸中微量元素总含量无显著差异,且均低于对照组. 与对照组相比,各组生态缸模型水体中二价镁离子均有明显的减少,其中 S3 组减少最显著,而各组生态缸模型水体中磷含量均明显下降,其中 S3 组下降最慢(见图 6),这与李幸等^[22]的研究结果不符,说明各组生态缸中磷含量的下降不仅受镁离子的影响,还受其他元素的共同作用.

表 3 各组生态缸中元素含量¹⁾
Table 3 Element contents in different eco-cylinders

元素	S1	S2	S3	S4	CK
As/μg·L ⁻¹	—	1.09 ± 0.19b	—	1.46 ± 0.17b	3.22 ± 0.26a
Hg/μg·L ⁻¹	0.065 ± 0.00a	0.064 ± 0.00a	—	0.066 ± 0.00a	0.060 ± 0.00a
Pb/μg·L ⁻¹	1.45 ± 0.37a	1.52 ± 0.75a	1.56 ± 0.71a	1.52 ± 0.31a	0.95 ± 0.14a
Cd/μg·L ⁻¹	0.19 ± 0.00	—	—	0.08 ± 0.00	—
Mn/μg·L ⁻¹	0.92 ± 0.67a	1.49 ± 1.94a	0.90 ± 0.48a	1.27 ± 1.47a	0.87 ± 0.46a
Cu/μg·L ⁻¹	2.04 ± 0.39ab	1.54 ± 0.80ab	1.77 ± 0.54ab	2.57 ± 0.13a	1.22 ± 0.24b
Zn/μg·L ⁻¹	7.01 ± 3.09a	9.89 ± 5.57a	10.37 ± 10.24a	11.87 ± 11.51a	18.92 ± 16.58a
Mo/μg·L ⁻¹	1.20 ± 0.24b	2.20 ± 0.41a	1.74 ± 0.13a	2.00 ± 0.19a	2.05 ± 0.20a
Ni/μg·L ⁻¹	7.37 ± 0.46a	7.38 ± 1.04a	7.85 ± 1.59a	7.46 ± 0.14a	7.06 ± 0.76a
B/μg·L ⁻¹	47.4 ± 3.8a	50.8 ± 8.7a	54.0 ± 3.8a	53.0 ± 3.0a	52.0 ± 0.3a
Cr/μg·L ⁻¹	1.12 ± 0.05a	1.20 ± 0.36a	1.07 ± 0.22a	0.94 ± 0.13a	1.35 ± 0.13a
Al/μg·L ⁻¹	48.8 ± 35.1a	44.6 ± 10.9a	43.0 ± 14.2a	41.7 ± 22.5a	59.6 ± 24.0a
合计/μg·L ⁻¹	117.600	120.720	122.194	122.480	144.067
Fe/mg·L ⁻¹	0.0811 ± 0.02a	0.0707 ± 0.02a	0.0596 ± 0.03a	0.0467 ± 0.01a	0.0859 ± 0.01a
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	50.17 ± 1.37a	48.37 ± 1.71a	55.08 ± 7.97a	53.79 ± 1.59a	51.73 ± 6.99a
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	8.63 ± 0.18b	8.52 ± 0.65b	3.45 ± 0.41d	5.36 ± 0.21c	11.22 ± 0.20a
合计/mg·L ⁻¹	58.8778	56.9574	58.5929	59.2000	63.0359

1) 同行数据后字母不同表示差异显著(P < 0.05)

2.5 PLFA 分析微生物群落结构

2.5.1 各生态缸中微生物群落结构

如图 7 所示,在 5 组生态缸模型中,共有 13 种不同的磷脂脂肪酸标记被检测出来^[23,24]. 其中标记 16:0 和 18:0 均代表硫酸盐还原菌及厌氧菌,且在各个组中都被检测到. 16:0 在 S3 组中所占百分含量最高,为 58.1%,在 S1 组中所占百分含量最低,为 12.1%; 18:0 在 S4 组中所占百分含量最高,为 8.8%,在 S3 组中所占百分含量最低,为 2.3%. 通过比较可知,硫酸盐还原菌及厌氧菌在 S3 组中所占比例最高,而在 S1 组中所占比例最低. 标记 14:0

代表 G⁺ 菌及部分 G⁻ 厌氧菌,仅在 S3 组和对照组中被检出,所占百分含量均非常低. 由此可见,各组生态缸模型水体中 G⁺ 菌及部分 G⁻ 厌氧菌含量非常低. 标记 16:1w9c 和 18:1w9c 均代表 G⁻ 菌,其中 16:1w9c 仅在 S3 组中出现,占总量的 6.8%; 除对照组和 S1 组外,18:1w9c 在另外 3 组中均被检测到,含量依次为 S4 (5.3%) > S2 (3.4%) > S3 (1.6%). 因此 G⁻ 菌在 S3 组中所占比例最高. 标记 18:3w6c (6,9,12) 表示真菌,仅在 S3 组中出现,所占百分含量很低,因此真菌在各组生态缸水体中存在量非常少. 标记 20:4w6,9,12,15c 代表原生动

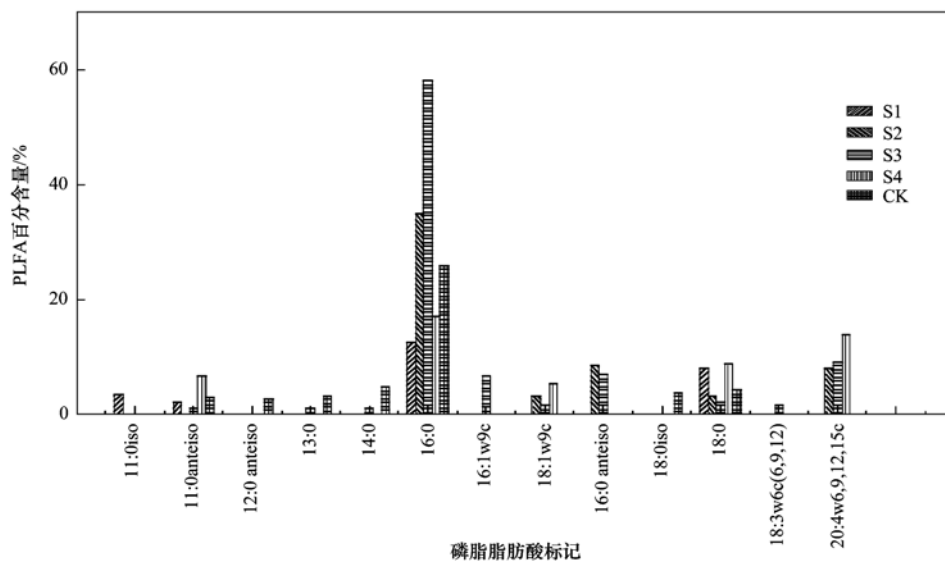


图7 各组中 PLFA 标记的分布

Fig. 7 Distribution of PLFA biomarkers in different groups

物,除对照组和 S1 组外,20:4w6,9,12,15c 在另外 3 组中均被检测到,在 S4 组中的百分含量最高,由此可见 S4 组紫色母岩有利于原生动动物生存。

2.5.2 各生态缸中微生物的生物量

磷脂脂肪酸 (PLFA) 分析是一种评价微生物群落结构和生物量的方法。Bardgett 等^[25]认为磷脂脂肪酸的组成可以表示微生物群落的生物量。本研究根据 PLFA 检测结果分别计算出 5 组生态缸水体中各磷脂脂肪酸绝对含量的总量,用以表示 5 组生态缸水体中所含的相对微生物的生物量(见图 8)。其中,S3 组生态缸模型中相对生物量显著高于其他各组,S1 组中的相对生物量最低。

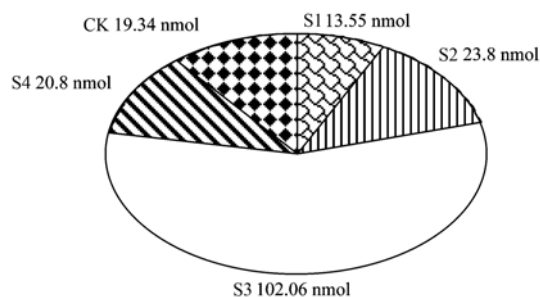


图8 各组中相对生物量的分布

Fig. 8 Distribution of relative biomass in different groups

2.5.3 各生态缸中微生物多样性

根据 PLFA 检测结果,利用 Shannon 指数公式计算出 5 组生态缸水体中各磷脂脂肪酸的多样性指数,以表示生态缸水体中的微生物多样性(见图 9)。S1 组多样性指数显著小于其他各组,S3 组多样性指数最高。由此可见,各组生态缸模型中 S3 组微生物

多样性最高,S1 组微生物多样性最低。在各组生态缸营养物质含量相对稳定的中后期,各组总氮含量最低的为 S1 组,最高的为 S3 组(见图 5),而由 PLFA 计算得出的生物量和多样性指数最低水平同样为 S1 组,而生物量和多样性指数最高水平为 S3 组。这说明微生物影响水体中总氮含量的变化,微生物量及多样性指数越小,总氮含量越低,反之则越高。这与 Pratt 等^[26]和吴建军等^[27]的研究结果一致。

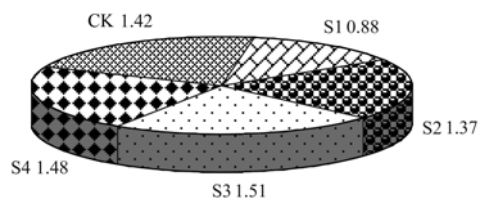


图9 各组中微生物多样性的分布

Fig. 9 Distribution of microbial diversity in different groups

2.5.4 微生物群落结构与水体环境因子的 PCA 分析

将微生物总生物量、多样性指数、具有代表的特殊 PLFA 标记和各环境因子及营养物质含量进行 PCA 分析,结果如图 10。总氮与生物多样性指数显著正相关,同时与磷脂脂肪酸标记 18:0 和 18:1w9c 正相关;磷脂脂肪酸标记 18:1w9c 和 18:0 同时与硝氮显著正相关,与 COD 负相关。说明硫酸盐还原菌及厌氧菌和革兰氏阴性菌与总氮、硝氮正相关,与 COD 负相关。

2.5.5 水体元素含量与微生物功能群的关系

采用 PCA 进行微生物群落结构和元素含量的

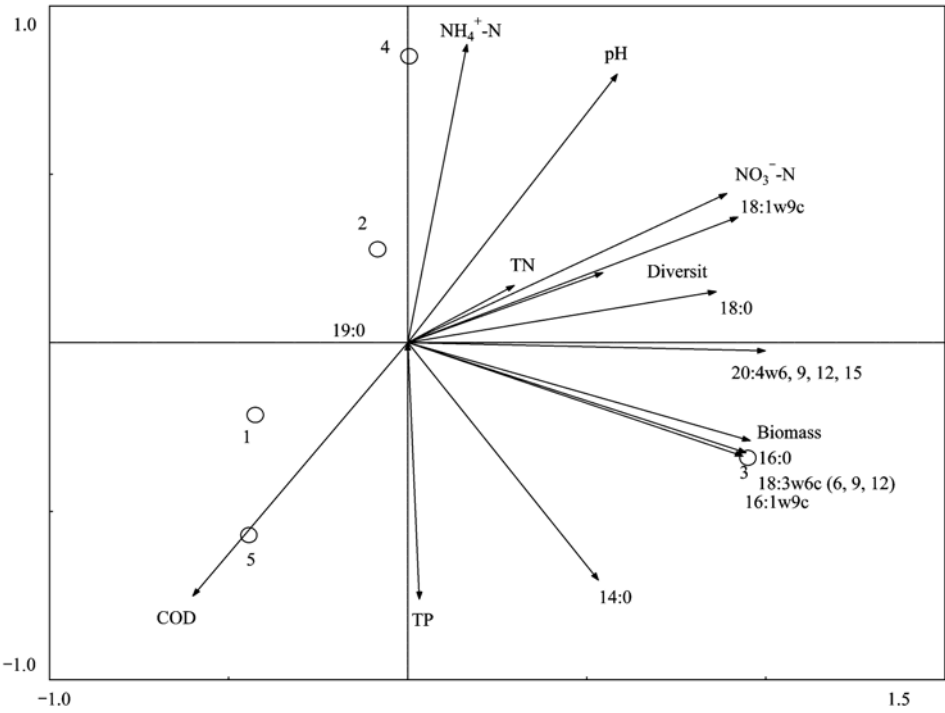


图 10 微生物群落结构与环境因子的 PCA 分析

Fig. 10 Principal component analysis for microbial community structure and environment factors

相关分析. 结果如图 11 所示, 磷脂脂肪酸标记 18:0、14:0 与元素铁、钙显著正相关, 与砷、锰、钼负相关; 18:1 w9c、18:3 w6c(6,9,12) 与铁、钙正相关; 20:4w6,9,12,15c 与镍、铁正相关. 说明革兰氏阴性菌与元素铁、钙、镍、铅、铜、镁、铬

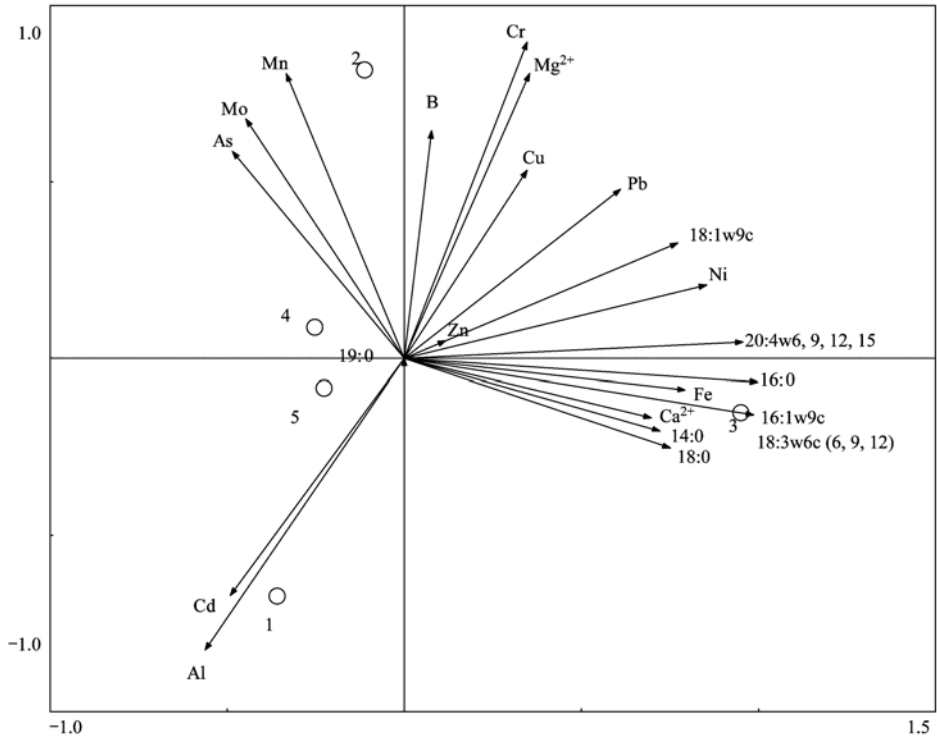


图 11 微生物群落结构与元素含量的 PCA 分析

Fig. 11 Principal component analysis for microbial community structure and element contents

正相关,与镉和铝负相关;硫酸盐还原菌及厌氧菌和革兰氏阳性菌与铁、钙正相关,与砷、锰、钼负相关.已有研究表明硫酸盐还原菌在生长代谢途径中,以水体中的有机物作为碳源,促进水体有机物的分解^[28],而本研究发现磷脂脂肪酸标记 18:0 所代表的硫酸盐还原菌及厌氧菌与水体 COD 含量负相关(见图 10),与前人的研究结果一致.喻国辉等^[29]在几种金属离子对沼泽红假单胞菌 2-8 生长和亚硝酸盐消除的影响研究中得出 $10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$ 刺激菌株生长和亚硝酸盐消除, $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$ 抑制该菌株生长和亚硝酸盐消除; $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Mg}^{2+}$ 促进该菌株生长和亚硝酸盐消除.而本实验各生态缸水体中,铜元素含量均在 $10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平,且可促进 18:1 w9c 的生长,因此 18:1 w9c 所代表的革兰氏阴性菌是具有消除亚硝酸盐能力的硝化细菌.本实验各组紫色母岩生态缸水体中,镁离子浓度均在 $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平,而对照组中镁离子浓度均在 $10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平.实验结果显示,除对照组外,镁离子含量高的生态缸中总氮浓度较低,说明在 $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平时,镁离子含量与硝化作用正相关,而含量在 $10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平时,硝化作用可能被抑制.

3 结论

(1)蓬莱镇组生态缸水体中,微生物经过硝化作用以及反硝化作用将水体中的大部分氮最终转化成气态氮排出水体,因此蓬莱镇组紫色母岩组成的生态系统对水体总氮及氨氮去除效果最好.

(2)遂宁组对水体中 COD 去除效果最好,这可能与遂宁组母岩本身释放的铜元素促进水体中有机物降解菌生长有关,需要进一步探讨.

(3)紫色母岩的吸附作用不是导致水体中氨氮下降的主要因素,主要是通过改变景观水体中矿质元素的含量,影响水中的微生物群落,从而间接影响水中氮以及有机物的含量.

(4)综上结果,蓬莱镇组紫色母岩可以作为景观水体基质,在维护景观水体质量的稳定方面具有很好的应用前景.

参考文献:

- [1] Liu F, Huang C Y, He T B, *et al.* The environmental impact of phosphorus on water by a long-term applying fertilizer pin the upland fields of yellow soil areas and its risks evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(6): 838-844.
- [2] 张蔚. 修复富营养化水体的植物筛选与人工湿地基质净化性能比较[D]. 长春: 东北师范大学, 2010. 23-26.
- [3] 刘红美, 李春杰, 吴德意, 等. 基质强化型潜流人工湿地净化景观水体的研究[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(1): 6-10.
- [4] 黄德锋, 李田. 不同基质复合垂直流人工湿地对富营养化景观水的净化效果[J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(8): 616-621.
- [5] He S B, Yan L, Kong H N, *et al.* Treatment efficiencies of constructed wetlands for eutrophic landscape river water [J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(4): 522-528.
- [6] 张丹, 陈安强, 苏友波, 等. 水热环境对不同紫色母岩崩解特性的影响[J]. 土壤学报, 2013, **50**(4): 643-651.
- [7] 王振华, 朱波, 何敏, 等. 紫色土泥沙沉积物对磷的吸附-解吸动力学特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(1): 154-160.
- [8] 张勇, 陈效民, 邓建强, 等. 不同母质发育的红壤电荷特性研究[J]. 土壤, 2011, **43**(3): 481-486.
- [9] Zhang W H, Wei C F, Li Y, *et al.* Effects of rock fragments on infiltration and evaporation in hilly purple soils of Sichuan Basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**(8): 1655-1665.
- [10] Du J, Luo Y J, Zhang W H, *et al.* Major element geochemistry of purple soils/rocks in the red Sichuan Basin, China: implications of their diagenesis and pedogenesis [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(6): 1831-1844.
- [11] Lin P S, Shang Z H, Hu H K. Study on the physico-chemical properties of soil developed from purple sandstone (K2yt) in typical area of Hanjiang Valley[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2009, **36**(2): 93-97.
- [12] 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. 102-418.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] GB/T 8538-1995, 饮用天然矿泉水检验方法[S].
- [15] Focht D D, Verstraete W. Biochemical ecology of nitrification and denitrification[J]. *Advances in Microbial Ecology*, 1977, **1**: 135-214.
- [16] 张伟. 土壤颗粒表面电场对酸性土壤硝化作用的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2010. 2-3.
- [17] Baulch H M, Stanley E H, Bernhardt E S. Can algal uptake stop NO_3^- pollution[J]. *Nature*, 2011, **477**(7366): 86-89.
- [18] 刘海伟, 刘云, 王海云, 等. pH 和共存阳离子对草莓茎吸附水体氨氮的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1884-1889.
- [19] Chang C H, Hao O J. Sequencing batch reactor system for nutrient removal: ORP and pH profiles[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1996, **67**(1): 27-38.
- [20] 王而力, 王嗣洪, 赵晓亮. 风沙土不同有机组分对氨氮的吸附特征影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1357-1364.
- [21] 陈丽丽, 张成军, 李鹏, 等. 人工湿地不同基质对氨氮的吸附特性研究[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(3): 518-523.
- [22] 李幸, 高大文, 刘琳. 镁离子浓度对 SBR 生物除磷系统的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2036-2040.
- [23] Baniulyte D, Favila E, Kelly J J. Shifts in microbial community composition following surface application of dredged river

- sediments[J]. *Microbial Ecology*, 2009, **57**(1): 160-169.
- [24] Glucksmann A M, Skipper H D, Brignon R L, *et al.* Use of the MIDI-FAME technique to characterize groundwater communities [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2000, **88**(4): 711-719.
- [25] Bardgett R D, Hobbs P J, Frostegård Å. Changes in soil fungal: bacterial biomass ratios following reductions in the intensity of management of an upland grassland[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **22**(3): 261-264.
- [26] Pratt B, Riesen R, Johnston C G. PLFA analyses of microbial communities associated with PAH-contaminated riverbank sediment[J]. *Microbial Ecology*, 2012, **64**(3): 680-91.
- [27] 吴建军, 蒋艳梅, 吴愉萍, 等. 重金属复合污染对水稻土微生物生物量和群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(6): 1102-1109.
- [28] 张照韩. 反硝化抑制硫酸盐还原菌活性试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007. 1-95.
- [29] 喻国辉, 陈燕红, 程萍, 等. 几种金属离子对沼泽红假单胞菌 2-8 生长和亚硝酸盐消除的影响[J]. *南方水产科学*, 2011, **7**(4): 30-35.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行