

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f ₂ 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926)	《环境科学》征订启事 (4057)
信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析

李思远^{1,2}, 郝春博^{1,2*}, 王丽华^{1,2}, 吕铮³, 张丽娜^{1,2}, 刘莹^{1,2}, 冯传平^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 3. 石家庄钢铁股份有限公司(鑫跃烧结), 石家庄 050033)

摘要: 采集安徽某铁矿酸性矿山废水库周边的废矿石样品, 分析了样品的主要物化参数, 进而利用分子生物学方法, 构建真核生物 18S rDNA 克隆文库, 对样品中的真核生物多样性和群落结构进行了研究. 结果表明, 该区域呈现强酸性, pH 均在 3 以下, Fe、SO₄²⁻、P、NO₃⁻-N 含量都显示同一个趋势, 即裸露的废矿石样品 PD 和 1M 的含量高于有植被覆盖的样品 LW 和 XC. 4 个样品含有子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、球囊菌门(Glomeromycota)和节肢动物门(Arthropoda)这 4 类真核生物. 其中球囊菌门可以与植物形成绝对共生关系, 是早期植物适应陆地环境的关键. 包含球囊菌门的样品 LW 和 XC, 有植被保护, 其生物多样性比裸露的废矿石样品 PD 和 1M 的生物多样性更丰富. 此外, 还发现样品中存在很多对极低 pH、重金属有耐受力的菌种, 如 *Penicillium purpogenum*、*Chaetothyriales* sp.、*Staninwardia suttonii* 等.

关键词: 酸性矿山废水; 废矿石; 耐重金属; 18S rDNA; 群落结构

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-4105-07

Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake

LI Si-yuan^{1,2}, HAO Chun-bo^{1,2}, WANG Li-hua^{1,2}, LÜ Zheng³, ZHANG Li-na^{1,2}, LIU Ying^{1,2}, FENG Chuan-ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Groundwater Circulation and Evolution of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Shijiazhuang Iron & Steel Co., Ltd., (Xinyue Sintering), Shijiazhuang 050033, China)

Abstract: The abandoned mineral samples were collected in an acid mine drainage area in Anhui Province. Molecular ecological methods were used to construct 18S rDNA clone libraries after analyzing the main physicochemical parameters, and then the microeukaryotic diversity and community structure in the acid mine drainage area were studied. The results showed that the region was strongly acidic (pH < 3), and the concentrations of Fe, SO₄²⁻, P, NO₃⁻-N showed the same trend, all higher in the bare waste ore samples PD and 1M than in the vegetation covered samples LW and XC. Four eukaryotic phyla were detected in the abandoned mineral samples: Ascomycota, Basidiomycota, Glomeromycota and Arthropoda. Glomeromycota can form an absolute symbiotic relationship with the plant, and it was a key factor for early plant to adapt the terrestrial environment. The biodiversity of the vegetation covered samples LW and XC, which contained Glomeromycota, was much higher than that of the bare abandoned rock samples PD and 1M. Moreover, many sequences in the libraries were closely related to some isolated strains, which are tolerant to low pH and heavy metals, such as *Penicillium purpogenum*, *Chaetothyriales* sp. and *Staninwardia suttonii*.

Key words: acid mine drainage; waste ore; tolerance to heavy metal; 18S rDNA; community structure

酸性矿山废水(acid mine drainage, AMD)是由于硫化矿物长期暴露在地表,并与水、大气及微生物相互作用,发生氧化性溶解而形成的^[1]. 废水中的金属离子(如 Fe、Al、Zn、Cu 等)浓度很高,所以不能直接循环利用. 废水排放后会酸化水体,污染河流底泥,使水生生物绝迹,危害十分严重,是人类矿业活动的主要污染物之一^[2,3]. 酸性矿山废水形成的主要原因是黄铁矿的氧化,反应方程式为: $\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$. 从方程式中可以看出,Fe³⁺氧化黄铁矿形成 H₂SO₄ 和 Fe²⁺,而 Fe²⁺又会在空气中被氧化成 Fe³⁺,Fe³⁺再与黄铁矿反应,形成一个循环. 但是,在酸性条件下,Fe²⁺的氧化速度

很慢,并被认为是黄铁矿氧化反应的限速步骤^[4],而嗜酸菌可以通过氧化二价铁获得能量,从而加速 Fe²⁺ → Fe³⁺ 的转化,可以显著提高黄铁矿的氧化速率,极大地促进了酸性矿山废水的形成^[5].

嗜酸菌的种类很丰富,在细菌、古细菌、真核生物三域生命中均有分布. 近年来,嗜酸菌已逐渐成为极端环境微生物领域的研究热点. 但是目前人们已经深入研究并投入到生产实践中的嗜酸菌大多

收稿日期: 2013-01-23; 修订日期: 2013-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40802059); 中央高校基本科研业务费专项(2652012028, 2652013100)

作者简介: 李思远(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境微生物, E-mail: lisiyuan236@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hao20709@yahoo.com.cn

是原核嗜酸微生物(细菌和古细菌)^[6],而对于真核嗜酸微生物的研究甚少.然而,近年来国外的一些研究发现,在某些极端酸性环境中真核生物的丰度比原核生物更高^[7].

本研究采集了安徽某酸性矿山废水区域的废矿石样品,采用分子生物学技术系统分析了不同样品中真核生物的种群结构及分布规律.研究结果不但拓展了人们对酸性环境中真核生物多样性的认识,还有利于了解真核生物在极端环境中的适应机制和生存状态,以期为酸性矿山废水区域的生态恢复提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 样品采集

安徽某铁矿排土场是废矿石的主要堆放地.大部分废矿石中含有黄铁矿,排土场经过长年雨水侵

蚀,并在嗜酸微生物的作用下,产生了大量酸性矿山废水,并最终形成一酸水库(库容约为 300 万 m³),严重污染周边环境并威胁到矿山的安全生产.本研究的取样时间为 2010 年 10 月,设立 4 个采样点(图 1),分别为:常年堆放废矿石的酸水库坡顶(PD),距离酸水库水面约 1 m 的裸露的风化矿石带(1M),酸水库附近植被相对茂盛的芦苇根际(LW),以及水库周边长有稀疏、短小植物的小草根际(XC). 采得酸性废矿石样品后,装入无菌袋中,并放置于装有干冰的冷藏箱中,尽快返回实验室进行操作.

1.2 物化参数的测定

样品带回实验室后,进行 pH 值的测定^[8]. 金属元素的测定在北京师范大学分析测试中心完成,非金属离子的测定由中国农业科学院土壤肥料研究所测试中心测定. 利用 SPSS 软件对物化参数进行聚类分析,并绘制聚类分析图^[9].

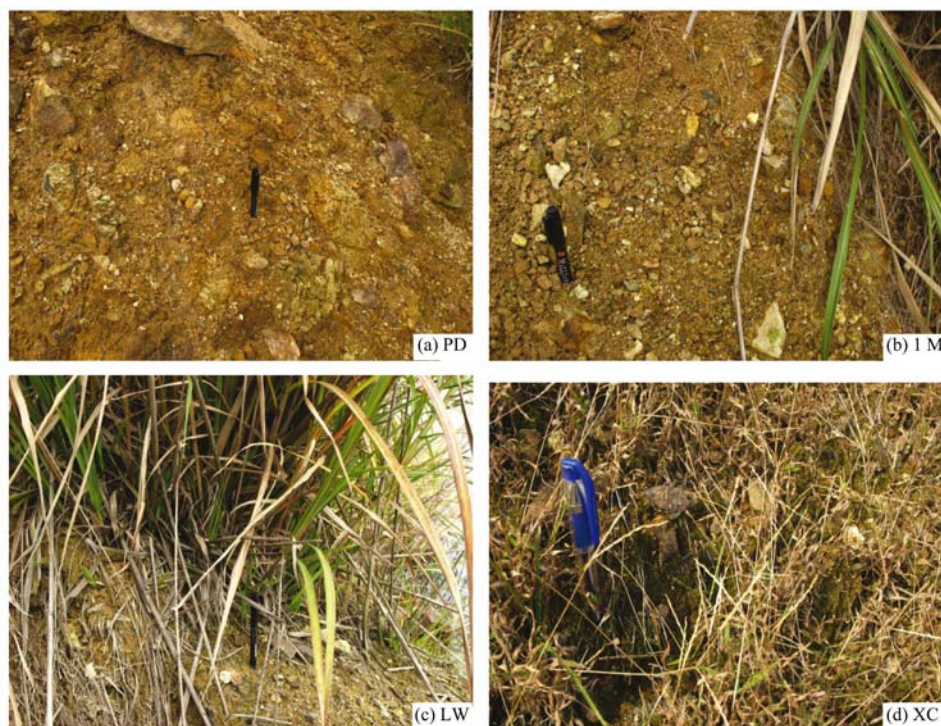


图 1 4 个取样点照片示意

Fig. 1 Photographs of four sampling points

1.3 废矿石样品总 DNA 提取及 18S rDNA 目的片段的扩增

废矿石样品经过长年风化,粒径较小,所以直接采用土壤及沉积物基因组 DNA 试剂盒(MPbio 试剂盒),并按生产商提供的步骤提取基因组 DNA. 使用真核生物 18S rDNA 通用引物 Euk-817F(5'-TTA GCA TGG AAT AAT RRA ATA GGA-3')和 Euk-1536(5'-ATT GCA ATG CYC TAT CCC CA-3')进行目的

基因的扩增. PCR 的反应条件为:95℃ 预变性 8 min,94℃ 变性 30 s,53℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 90 s,共 35 个循环,最后在 72℃ 下延伸 5 min. PCR 反应产物用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测.

1.4 克隆文库的建立

PCR 产物连接到 PEASY-T1 载体上,将连接好的环状质粒转化到大肠杆菌感受态细胞内,建立真菌样品的克隆文库. 利用载体特异性引物对 T7(5'-

TAA TAC GAC TCA CTA TAG GGC-3') 和 SP6 (5'-ATT TAG GTG ACA CTA TAG AAT ACT C-3') 进行 PCR 扩增验证插入片段的大小,筛选阳性克隆. 并用两种限制性内切酶(*Hha* I 和 *Msp* I) 进行酶切分析,确定 ARDRA 类型数目,然后用典型的代表克隆进行测序.

1.5 系统发育分析

获得序列后,首先用 Bellerophon 程序检测是否有嵌合体存在,剔除存在的嵌合体^[10]. 然后用 Dutor 软件对所得序列进一步分类,剔除相同序列,将所得序列输入 NCBI 网站,用 Blast 程序与 GenBank 中已有的序列进行比对,下载相似性最高的序列和相似性较高的已知种的序列作为参考. 将所有序列用 BioEdit 中 ClustalW 程序比对后,用 MEGA 4.0 软件绘制系统发育树.

1.6 序列登录号

本研究所得序列均已提交 GenBank 中,序列登录号为 JQ968637-JQ968685.

2 结果与分析

2.1 样品的物理化学参数

采集的 4 个废矿石样品的物理化学参数如表 1 所示. 从中可以看出,所有样品的 pH 值都在 3 以

下,其中 PD 最低,仅为 2.48. 所测的金属元素中,Fe 的含量最高,4 个采样点的含量均超过 90 mg·g⁻¹. 在没有植被生长的 PD、1M 两个样品中,Fe 的含量高于有植被覆盖的 LW、XC 两个固体样品. Al 的含量次之,大约为 60 mg·g⁻¹. SO₄²⁻ 的含量在 PD 和 1M 两个样品中很高,1M 可能是由于受下游水库的浸湿作用导致含量偏大. 4 个样品的有机质的含量差异很大,在 XC 中为 0.34%,而在 1M 内只有 0.09%,可能由于植物残骸的分解,使 XC、LW 的有机质含量较高. P、NO₃⁻-N 含量与 Fe、SO₄²⁻ 含量显示同一规律,PD 和 1M 的含量高于 XC 和 LW 的含量. 利用 SPSS 软件处理物化参数,得到聚类分析图(图 2),从图 2 中可以看出,样品 LW 和 XC 两点的位置更接近,表明两个取样点的物化性质更相似.

2.2 样品饱和度分析

4 个样品建立克隆文库,运用 Bellerophon 程序检验并剔除嵌合体后,利用 Dotur 软件对有效序列进行分析,绘制出 4 个样品的真核生物类群饱和度曲线(图 3). 4 个样品的序列共分成 17 个操作分类单元(operational taxonomic units, OTUs),其中 1M、PD、LW、XC 的分型分别为 4、3、7、7 类. 可以看出,LW 和 XC 有更高的丰富度.

表 1 样品的物理化学参数

Table 1 Physical and chemical parameters of sample

样品	Fe/mg·g ⁻¹	Cu/mg·g ⁻¹	Na/mg·g ⁻¹	K/mg·g ⁻¹	Mn/mg·g ⁻¹	Al/mg·g ⁻¹
PD	105.66	0.06	26.43	5.89	0.80	61.06
1M	98.43	0.64	23.68	4.73	0.78	57.53
LW	90.32	0.79	24.44	5.16	0.46	59.51
XC	94.59	0.36	20.61	8.27	1.41	60.94
样品	pH	有机物/%	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	P/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹
PD	2.48	0.10	143.4	80.3	28.5	19.7
1M	2.51	0.09	284.4	68.0	40.3	14.6
LW	2.69	0.15	72.8	45.7	5.7	10.9
XC	2.87	0.34	58.0	21.9	0.9	28.7

2.3 真核生物类群比例分析

将测序得到的代表序列在 GenBank 数据库内进行相似性比对,得到 4 个样品的 18S rDNA 的基因序列属于四大类群,分别为子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、球囊菌门(Glomeromycota)和节肢动物门(Arthropoda),见图 4. 从图 4 中可以看出,样品 1M 和 PD 中的序列全部属于子囊菌门,而且子囊菌门在 LW、XC 样品文库中占的比例也分别高达 62.8%、64.7%. 担子菌门在 LW 文库中为第二大类群,约占 27.9%,在 XC

文库内占到 11.8%. 球囊菌门在 LW 文库内仅占 2.33%,但在 XC 文库内却为第二大类,占 20.6%. 节肢动物门在 LW 和 XC 中的比例很低,分别为 6.98%、2.94%. 从图 4 可以看出,XC 和 LW 两个样品在门这一分类级别上,都含有 4 个不同生物类群,而 1M 和 PD 这两个样品则都只含有 1 个生物类群. 因此,XC 和 LW 真核生物群落结构更为相似.

2.4 系统发育学分析

将 XC、LW、PD、1M 这 4 个样品中的基因序列进行 Blast 分析,确定其系统发育类群. 为进一步了

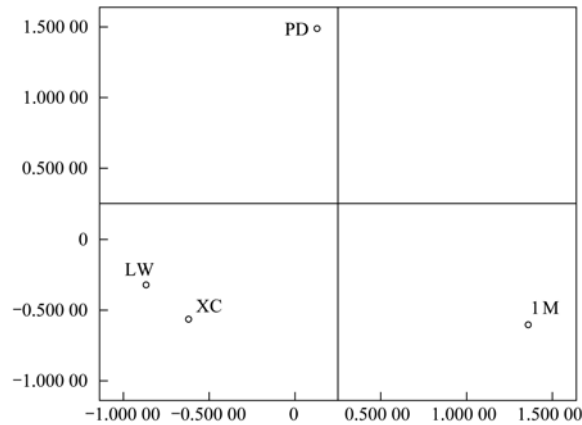


图 2 4 个样品的聚类分析
Fig. 2 Cluster analysis of the four samples

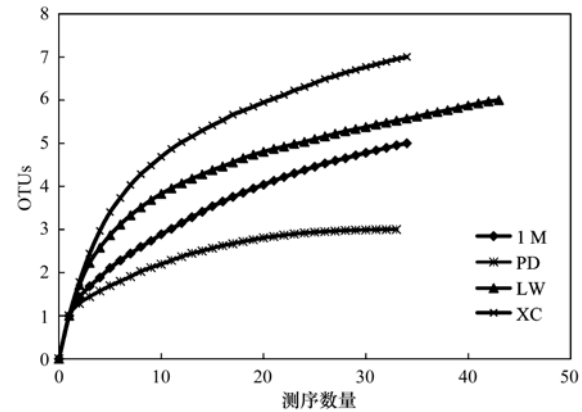


图 3 真核生物类群饱和度和曲线
Fig. 3 Saturation curve of eukaryote taxa

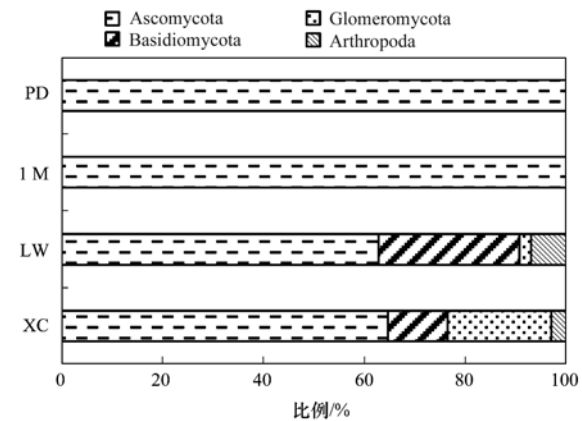


图 4 4 个样品中各生物类群比例
Fig. 4 Proportions of the 4 phyla in the four samples

解这些真核生物的系统发育学地位,构建了 4 个样品的系统发育树(图 5)。从图 5 中可以看出,子囊菌门是最大的门类,包含 10 种基因型,担子菌门和节肢动物门分别有 3 种,球囊菌门只有 1 种。

通过系统发育学分析,发现该酸性矿山废水周边区域的真核生物与耐酸、耐重金属的菌株密切相

关。首先在丰度最高的子囊菌门(Ascomycota)中,发现序列 AMD-2 在 4 个样品中均有分布。其中,在 1M(85.3%)和 LW(46.5%)样品文库中比例最高,且在 XC(20.6%)和 PD(9.09%)文库中也具有较高的丰富性。AMD-2 与青霉菌 *Penicillium purpurogenum* 的同源性高达 99%。Say 等^[11]曾研究 *Penicillium purpurogenum* 在酸性环境中对于 Ca、Pb、As、Hg 等重金属的去除能力,结果表明,吸附容量随 pH 增大而增大,在 pH 为 5 时,吸附容量达到最大值,而且该真菌对于 Pb 的吸附性能最高。值得注意的是,文献[12,13]研究的环境中的 N、P、K 含量很高,这与本研究中的高含量的 N、P 结果相一致。由于此类真菌具有产有机酸,破坏硅酸铝中的 Si—O 和 Al—O 键的性质,因此,Mishra 等^[14]从某铀矿水样中分离出的 1 株青霉菌 *Penicillium purpurogenum* MTCC7356,并利用该菌株去除铁含量较低的矿石中的 Si 和 Al,从而提高矿石中 Fe 的百分比。在实验运行 30 d 之后,反应体系的 pH 由起始 6.8 降到 2.1,其酸度甚至超过了本研究中的酸水库周边区域。此外,*Penicillium* 在 P 循环中被认为是关键微生物,其产生的有机酸可使环境的 pH 下降,导致 P 元素溶出。但是在 Al 和 Fe 含量较高的环境中,P 又会被固定,形成溶解度极低的 Al 和 Fe 的磷酸盐^[15]。因此,作为肥料的 P 很难被吸收,使得环境中的 P 富集。本研究中的酸水库周边的 Fe 和 Al 的含量很高,可以将 P 固定,这一点可以作为解释此恶劣的环境中 P 含量高的一个重要依据。

AMD-5 是 PD 文库中最丰富的基因型(84.8%),在 XC 文库中只占 2.94%,它在发育树上与 *Chaetothyriales* sp. 聚为一簇。*Chaetothyriales*(刺盾食目)是一类岩石栖息真菌(rock-inhabiting fungi,RIF),并且是岩石栖息真菌的两大类群之一。*Chaetothyriales* 可以良好地生长在营养贫瘠的岩石表层,其代谢过程中产生的黑色素和真菌产孢吸光色素能使生物免受干燥,紫外线和重金属的毒害。并且,*Chaetothyriales* 的分生孢子生长缓慢且呈颗粒状,因此其生存所需的能量物质很少,更容易适应营养和水分贫瘠的环境。同时,该类真菌的生殖方式简单,分生孢子和菌丝片段都可以作为繁殖体,在恶劣环境下更容易存活^[16,17]。本研究中 PD 样品采集于裸露的废矿石区域,条件非常恶劣,仅适合岩石栖息真菌的生长,因此该类真菌的相对丰度高达 84.8%。

AMD-11 在 XC 文库中占 5.88%,它与真菌 *Staninwardia suttonii* 的亲缘关系最近。对于此真菌

Scytinostroma 属亲缘关系较近,研究表明,该属的 *Scytinostroma galactinum* 可以生长在酸性环境下,生长受金属离子(如 Al, Pb)抑制,抑制作用随着金属离子浓度的增加而增强,在 Al 含量为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, pH 为 3.5 时,抑制作用最强,生物量为零^[21]. 但是本研究中 Al 含量很高,4 个样品均高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,且 pH 低于 3.0,而 *Scytinostroma* 却是 LW 文库的第二大类群(27.9%).

此外,球囊菌门(*Glomeromycota*)中,AMD-8 在 XC 文库中占 20.6%,在 LW 文库中仅占 2.33%. 与 AMD-8 亲缘关系最近的是 *Glomeromycota* sp.,这类真菌发现于极端酸性(pH 3.0)的高硫酸盐土壤中,它可以促进土壤中硫酸盐的吸收^[22,23]. 这可以解释 XC、LW 两处的硫酸盐的含量为何低于 PD 和 1M 两个样品.

节肢动物门(*Arthropoda*)只出现在 LW 和 XC 文库中,所占的比例也很低. 节肢动物门内的两个序列 AMD-15、AMD-16 与 *Tullbergia yosii* 的相似性高达 99%,而 *Tullbergia yosii* 也是耐酸微生物,将 *Tullbergia yosii* 接种在起始 pH 值为 3、4、5 的土壤中,生长 12 月后 3 个条件下的生物量相同^[24].

此外,固体样品中还存在着对植物生长起积极作用的真核生物. AMD-17 在 LW 文库中占 14.0%,它与 *Humicola fuscoatra* var. (棕黑腐质霉)亲缘关系最近. 棕黑腐质霉是一种真菌寄生物,能够产生一种细胞结合抑真菌物质,抑制植物病原真菌的生长^[25]. 除此之外,只出现在 LW 文库中的 AMD-14,与 *Kionochaeta* sp. 的相似性最大,虽然仅占 2.33%,但它也是一种抑制病原菌的微生物. 该菌种能产生抗生素 pughininA,这种抗生素能够防止植物疮痂病原菌的生存,从而促进植被的生长^[26].

值得注意的是,AMD-10 在 XC 样品中占统治地位,约为 35.3%,它与 *Loramyces macrosporus* 在系统发育树上位于同一分支. *Loramyces* 是一类水生真菌,主要生活在常规的淡水河流中^[27,28]. 但在本研究中,此类生物却在强酸性环境中居于统治地位,这在以往各类文献中还未见报道.

3 讨论

经过对 2010 年秋废矿石样品的物化分析,4 个采样点的物化性质具有一定的相关性. 就整体环境而言,此区域受酸性矿山废水的污染严重,pH 都在 3 以下. 作为铁矿废矿石的堆放地,环境中金属元

素的含量很高,其中 Fe 最高,Al 次之,并且 SO_4^{2-} 、P 的含量也很高. 相对而言,地表裸露的 PD 和 1M 两样品的 Fe、 SO_4^{2-} 含量更高,pH 更低,物理化学条件更严酷. 而有植被覆盖的 XC 和 LW 两样品因为有地表植物的保护,环境条件相对温和.

在矿山废水周边区域存在的真核生物主要有 4 类:子囊菌门、担子菌门、球囊菌门和节肢动物门. 地表裸露的 1M 和 PD 两样品中的真核生物的多样性较低,均只有子囊菌门 1 个生物类群,且在两个样品中都有一种占绝对优势的菌种,如:AMD-2 在 1M 文库中占 85.3%,AMD-5 在 PD 文库中占 84.8%. 而地表有植被覆盖的 XC 和 LW 中真核生物的多样性则更为丰富,均含有 4 个生物类群,并且没有一种生物的比例超过 50%. 其中,只出现在 XC 和 LW 两个样品中的球囊菌门,可以与植物形成绝对共生关系,是早期植物适应陆地环境的关键^[29,30]. 球囊菌门在 XC 文库中所占比例高达 20.6%,是第二大生物类群. XC 样品区域植被稀疏、短小,相对 LW 样品区域,该区域植被生长更加困难,更需要球囊菌门生物的共生作用,因此球囊菌门生物所占比例比 LW 区域更高. 可见,某些微生物对于矿山环境中植物的生长起着重要作用. 反过来,植物的生长也为微生物创造了一个良好的生存环境,XC 和 LW 两样品的微生物多样性更加丰富. XC 和 LW 的物理化学参数和真核生物群落结构均非常相似,说明样品的物理化学性质对微生物群落组成有着决定性的影响.

本研究发现样品中存在很多对重金属、极端酸性环境有很强耐受力的菌株,如 *Penicillium purpurogenum*、*Chaetothyriales* sp.、*Staninwardia suttonii*、*Nigrospora oryzae*、*Glomeromycota* sp. 等. 同时,也检测到了对金属及低 pH 耐受力较低的菌种 *Scytinostroma* sp.,以及主要生活在淡水河流中的水生真菌 *Loramyces macrosporus*,它们的存在可能是与环境中耐重金属、耐酸的真核生物形成共生关系. 共生作用降低了环境对低耐受力菌株的毒害作用,从而使得环境中低耐受物种的大量存在,扩充了生物多样性. 但是其真正的生存机制,还需要进一步的研究.

4 结论

(1) 酸性矿山废水周边区域呈现强酸性,pH 都在 3 以下,重金属的含量很高,Fe、 SO_4^{2-} 、P、 NO_3^- -N 含量都显示同一个趋势:裸露的废矿石样品 PD 和

1M 的含量大于有植被覆盖的样品 LW 和 XC.

(2) 酸水库周边有植被覆盖区域的真核生物多样性,比地表裸露样品中的生物多样性更丰富. 物理化学参数对真核群落组成有着重要的影响.

(3) 研究区域存在大量耐酸耐重金属的真核生物. 此外,还检测出一些对于酸性矿山废水区域低耐受的菌种,它们的大量存在可能是与耐受能力强的菌株形成了共生关系.

参考文献:

- [1] 周跃飞, 谢越, 周立祥. 酸性矿山废水天然中和形成的富铁沉淀及其环境属性[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1582-1588.
- [2] Hao C B, Wang L H, Gao Y N, *et al.* Microbial diversity in acid mine drainage of Xiang Mountain sulfide mine, Anhui Province, China[J]. Extremophiles, 2010, **14**(5): 465-474.
- [3] Pagnanelli F, Luigi M, Mainelli S, *et al.* Use of natural materials for the inhibition of iron oxidizing bacteria involved in the generation of acid mine drainage [J]. Hydrometallurgy, 2007, **87**(1-2): 27-35.
- [4] 张洪勋, 郝春博, 白志辉. 嗜酸菌研究进展[J]. 微生物学杂志, 2006, **26**(2): 68-72.
- [5] 李雅琴. 嗜酸菌及其应用[J]. 微生物学通报, 1998, **25**(3): 170-172.
- [6] González-Toril E, Llobet-Brossa E, Casamayor E O, *et al.* Microbial ecology of an extreme acidic environment, the Tinto River[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(8): 4853-4865.
- [7] Amaral-Zettler L A, Zettler E R, Theroux S M, *et al.* Microbial community structure across the tree of life in the extreme Río Tinto[J]. International Society for Microbial Ecology, 2011, **5**(1): 42-50.
- [8] ISO 10390-2005. Soil quality-Determination of pH[S].
- [9] Rapkin B D, Luke D A. Cluster analysis in community research: Epistemology and practice[J]. American Journal of Community Psychology, 1993, **21**(2): 247-277.
- [10] Almeida W I, Vieira R P, Cardoso A M, *et al.* Archaeal and bacterial communities of heavy metal contaminated acidic waters from zinc mine residues in Sepetiba Bay[J]. Extremophiles, 2009, **13**(2): 263-271.
- [11] Say R, Yilmaz N, Denizli A. Biosorption of cadmium, lead, mercury, and arsenic ions by the fungus *Penicillium purpurogenum*[J]. Separation Science and Technology, 2003, **38**(9): 2039-2053.
- [12] Pečiulytė D, Dirginčiūtė-Volodkienė V. Effect of long-term industrial pollution on microorganisms in soil of deciduous forests situated along a pollution gradient next to a fertilizer factory. 3. Species diversity and community structure of soil fungi [J]. Ekologija, 2010, **56**(3): 132-143.
- [13] Say R, Yilmaz N, Denizli A. Removal of chromium(VI) ions from synthetic solutions by the fungus *Penicillium purpurogenum* [J]. Engineering in Life Sciences, 2004, **4**(3): 276-280.
- [14] Mishra M, Pradhan M, Sukla L B, *et al.* Microbial beneficiation of salem iron ore using *Penicillium purpurogenum* [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2011, **42**(1): 13-19.
- [15] Scervino J M, Mesa M P, Mónica I D, *et al.* Soil fungal isolates produce different organic acid patterns involved in phosphate salts solubilization[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, **46**(7): 755-763.
- [16] Ruibal C, Platas G, Bills G F. High diversity and morphological convergence among melanised fungi from rock formations in the Central Mountain System of Spain [J]. Persoonia-Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi, 2008, **21**(1): 93-110.
- [17] Ruibal C, Gueidan C, Selbmann L, *et al.* Phylogeny of rock-inhabiting fungi related to *Dothideomycetes* [J]. Studies in Mycology, 2009, **64**(1): 123-133.
- [18] Yamazaki A, Toyama K, Nakagiri A. A new acidophilic fungus *Teratosphaeria acidotherma* (Capnodiales, Ascomycota) from a hot spring[J]. Mycoscience, 2010, **51**(6): 443-455.
- [19] 罗宽, 王国平, 黄声仪. 水稻圆斑病研究[J]. 湖南农学院学报, 1987, **1**(1): 59-67.
- [20] Rawla G S. A note on trace elements for the growth of *Nigrospora oryzae* (B. and BR.) patch [J]. New Phytologist, 1969, **86**(4): 941-943.
- [21] Wargo P M, Carey A C. Effects of metals and pH on in vitro growth of *Armillaria ostoyae* and other root and butt rot fungi of red spruce[J]. Forest Pathology, 2001, **31**(1): 5-24.
- [22] Higo M, Isobe K, Kang D J, *et al.* Molecular diversity and spore density of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi in acid sulfate soil in Thailand [J]. Annals of Microbiology, 2011, **61**(2): 383-389.
- [23] Schüßler A, Krüger M, Walker C. Revealing natural relationships among arbuscular mycorrhizal fungi: culture line BEG47 represents *Diversispora epigaea*, not *Glomus versiforme* [J]. Plos One, 2011, **6**(8): e23333.
- [24] Hågvær S. Reactions to soil acidification in microarthropods: Is competition a key factor? [J]. Biology and Fertility of Soils, 1990, **9**(2): 178-181.
- [25] Wicklow D T, Joshi B K, Gamble W R, *et al.* Antifungal metabolites (monorden, monocillin IV, and cerebrosides) from *Humicola fuscoatra* Traaen NRRL 22980, a mycoparasite of *Aspergillus flavus* Sclerotia [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(11): 4482-4484.
- [26] Tagawa M, Tamaki H, Manome A, *et al.* Isolation and characterization of antagonistic fungi against potato scab pathogens from potato field soils [J]. FEMS Microbiology Letters, 2010, **305**(2): 136-142.
- [27] Shearer C A, Descals E, Kohleyer B, *et al.* Fungal biodiversity in aquatic habitats [J]. Biodiversity and Conservation, 2007, **16**(1): 49-67.
- [28] Raja H A, Miller A N, Shearer C A. Freshwater ascomycetes: *Aquapoterium pinicola*, a new genus and species of *Helotiales* (*Leotiomyces*) from Florida [J]. Mycologia, 2008, **100**(1): 141-148.
- [29] Brundrett M C. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants [J]. New Phytologist, 2002, **154**(2): 275-304.
- [30] Hempel S, Renker C, Buscot F. Differences in the species composition of arbuscular mycorrhizal fungi in spore, root and soil communities in a grassland ecosystem [J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(8): 1930-1938.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行