

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 22 期 Vol.31 No.22 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 22 期

2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型	林 川, 宫兆宁, 赵文吉 (6645)
中国水稻潜在分布及其气候特征	段居琦, 周广胜 (6659)
大豆异黄酮浸种对盐胁迫大豆幼苗的生理效应	武玉妹, 周 强, 於丙军 (6669)
黑河中游荒漠绿洲过渡带多枝桤柳对地下水位变化的生理生态响应与适应	张 佩, 袁国富, 庄 伟, 等 (6677)
高寒退化草地甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应	赵成章, 高福元, 石福习, 等 (6688)
基于生态足迹思想的皂市水利枢纽工程生态补偿标准研究	肖建红, 陈绍金, 于庆东, 等 (6696)
基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征	蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等 (6708)
高分辨率影像支持的群落尺度沼泽湿地分类制图	李 娜, 周德民, 赵魁义 (6717)
土壤食细菌线虫对拟南芥根系生长的影响及机理	成艳红, 陈小云, 刘满强, 等 (6727)
基于网络 K 函数的西双版纳人工林空间格局及动态	杨珏婕, 刘世梁, 赵清贺, 等 (6734)
树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应	张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等 (6743)
冀北山地阴坡优势树种的树体分维结构	田 超, 刘 阳, 杨新兵, 等 (6753)
帽峰山常绿阔叶林辐射通量特征	陈 进, 陈步峰, 潘勇军, 等 (6766)
不同类型拌种剂对花生及其根际微生物的影响	刘登望, 周 山, 刘升锐, 等 (6777)
一种自优化 RBF 神经网络的叶绿素 a 浓度时序预测模型	仝玉华, 周洪亮, 黄浙丰, 等 (6788)
不同种源麻栎种子和苗木性状地理变异趋势面分析	刘志龙, 虞木奎, 马 跃, 等 (6796)
黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化	施 宇, 温仲明, 龚时慧 (6805)
干旱区五种木本植物枝叶水分状况与其抗旱性能	谭永芹, 柏新富, 朱建军, 等 (6815)
火灾对马尾松林地土壤特性的影响	薛 立, 陈红跃, 杨振意, 等 (6824)
江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应	王 磊, 张 磊, 段学军, 等 (6832)
高温对两种卡帕藻的酶活性、色素含量与叶绿素荧光的影响	赵素芬, 何培民 (6845)
江苏省典型干旱过程特征	包云轩, 孟翠丽, 申双和, 等 (6853)
黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率	岳 平, 张 强, 杨金虎, 等 (6866)
光质对烟叶光合特性、类胡萝卜素和表面提取物含量的影响	陈 伟, 蒋 卫, 邱雪柏, 等 (6877)
铜陵铜尾矿废弃地生物土壤结皮中的蓝藻多样性	刘 梅, 赵秀侠, 詹 婧, 等 (6886)
圈养马麝刻板行为表达频次及影响因素	孟秀祥, 贡保草, 薛达元, 等 (6896)
田湾核电站海域浮游动物生态特征	吴建新, 阎斌伦, 冯志华, 等 (6902)
马鞍列岛多种生境中鱼类群聚的昼夜变化	汪振华, 王 凯, 章守宇 (6912)
基于认知水平的非使用价值支付动机研究	钟满秀, 许丽忠, 杨 净 (6926)
综述	
植物盐胁迫应答蛋白质组学分析	张 恒, 郑宝江, 宋保华, 等 (6936)
沉积物氮形态与测定方法研究进展	刘 波, 周 锋, 王国祥, 等 (6947)
野生鸟类传染性疾病预防研究进展	刘冬平, 肖文发, 陆 军, 等 (6959)
鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法	石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等 (6967)
专论	
IPBES 的建立、前景及应对策略	吴 军, 徐海根, 丁 晖 (6973)
研究简报	
柠条人工林幼林与成林细根动态比较研究	陈建文, 王孟本, 史建伟 (6978)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-11



封面图说: 滩涂芦苇及野鸭群——中国的海岸湿地, 尤其是长江入海口以北的海岸线, 多为泥质性海滩, 地势宽阔低洼, 动植物资源丰富, 生态类型独特, 为迁徙的鸟提供了丰富的食物和休息、庇护的良好环境, 成为东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站和越冬、繁殖地。一到迁徙季节, 成千上万的各种鸟类飞临这里, 尤其是雁鸭类数量庞大, 十分壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

刘梅,赵秀侠,詹婧,高毅,阳贵德,孙庆业. 铜陵铜尾矿废弃地生物土壤结皮中的蓝藻多样性. 生态学报, 2011, 31 (22): 6886-6895.

Liu M, Zhao X X, Zhan J, Gao Y, Yang G D, Sun Q Y. Cyanobacterial diversity in biological soil crusts on wastelands of copper mine tailings. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (22): 6886-6895.

铜陵铜尾矿废弃地生物土壤结皮中的蓝藻多样性

刘 梅¹, 赵秀侠¹, 詹 婧², 高 毅², 阳贵德¹, 孙庆业^{2, *}

(1. 安徽大学生命科学学院, 合肥 230039; 2. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230039)

摘要:生物土壤结皮是生态系统原生演替过程中的一个早期阶段,在铜陵铜尾矿废弃地自然生态恢复过程中生物土壤结皮在尾矿废弃地表面广泛分布。以生长在铜陵杨山冲和铜官山 2 处铜尾矿废弃地的生物土壤结皮为研究对象,运用常规培养方法和变性梯度凝胶电泳技术 (PCR-DGGE) 对不同群落生物土壤结皮中的蓝藻多样性及优势类群进行研究。结果表明 2 种研究方法所获得的蓝藻种类组成具有明显差异。显微观察结果表明常规培养试验中主要蓝藻类群为微囊藻属 (*Microcystis*)、色球藻属 (*Chroococcus*)、颤藻属 (*Oscillatoria*)、念珠藻属 (*Nostoc*) 和浮鞘丝藻属 (*Planktolyngbya*), 其中优势种类主要为铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、断裂颤藻 (*Oscillatoria fracta*) 和细浮鞘丝藻 (*Planktolyngbya subtilis*); 提取样品中微生物总 DNA, 对蓝藻 16S rRNA 进行 PCR-DGGE 分析, 回收 DGGE 图谱中 24 个条带进行测序分析, 结果显示, 所有序列与 GenBank 数据库中的近缘蓝藻的相似性系数均在 93% 以上, 其中优势蓝藻类群主要隶属于微鞘藻属 (*Microcoleus*) 和细鞘丝藻属 (*Leptolyngbya*), 裸地 (YL) 处和木贼群落下尾矿表面 (YM) 的生物土壤结皮中优势蓝藻类群主要为微鞘藻属, 而黄色真藓-藻类混合结皮 (YT) 和白茅群落 (YB, TG) 下的生物土壤结皮中的优势类群主要隶属于细鞘丝藻属。

关键词:铜尾矿废弃地; 生物土壤结皮; 蓝藻; 多样性; DGGE

Cyanobacterial diversity in biological soil crusts on wastelands of copper mine tailings

LIU Mei¹, ZHAO Xiuxia¹, ZHAN Jing², GAO Yi², YANG Guide¹, SUN Qingye^{2, *}

1 School of Life Science, Anhui University, Hefei 230039, China

2 School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230039, China

Abstract: Biological soil crusts are an initial stage of primary ecological succession, and are widely distributed on the wasteland surfaces of copper mine tailings that are undergoing natural ecological restoration. We investigated the cyanobacterial diversity and the dominant taxa in biological soil crusts growing on Yangshanchong and Tongguanshan copper mine tailings. We used conventional cultivation and fingerprinting by polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis (PCR-DGGE). Biological soil crust samples were collected from moss-algal crusts of the *Imperata cylindrica* community of the Tongguanshan and Yangshanchong mine wastelands, moss-algal crusts of the Yangshanchong mine wasteland, moss-algal crusts of the *Hippochaete ramosissimum* community of the Yangshanchong mine wasteland, and moss-algal crusts of the *Zoysia sinica* community of the Yangshanchong mine wasteland. The surface layers of tailings samples from bare wasteland without plant communities were collected for comparison. Conventional cultivation and molecular methods showed somewhat different cyanobacterial species composition. Microscopic observation showed that *Microcystis*, *Chroococcus*, *Oscillatoria*, *Nostoc*, and *Planktolyngbya* were the main taxa cultivated, and dominant species included *Microcystis aeruginosa*, *Oscillatoria fracta*, and *Planktolyngbya subtilis*. Different samples showed different species

基金项目: 环保公益性行业科研专项资助 (201009041-02)

收稿日期: 2010-07-03; 修订日期: 2011-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunqingye@ahu.edu.cn

composition; however, *M. aeruginosa* was found in all biological soil crusts from wastelands at different developmental stages. It was abundant in the crusts of the *I. cylindrica* community of the Tongguanshan mine wasteland, in the moss-algal crusts of the Yangshanchong mine wasteland, and in the bare wasteland without the colonization by plant communities. Three 16S rRNA cyanobacterial-specific primers, CYA359F (forward), CYA781R(a) and CYA781R(b) (reverse), were used to assess the molecular diversity of these communities. The 16S rRNA gene was analyzed by PCR-DGGE. Shannon-Wiener diversity indices were calculated based on PCR-DGGE banding patterns. The cyanobacterial diversity index of the same sample had obvious differences as shown by the assignments of the reverse primers, except for the moss-algal crusts from the *Z. sinica* community of the Yangshanchong mine wasteland. Twenty-four DGGE bands were excised from the DGGE gel and sequenced. All the 16S rRNA sequences showed at least 93% similarity with known sequences in the NCBI database. A phylogenetic analysis indicated that four sequences could be identified as related to *Microcoleus* (95%—98% similarity), two were affiliated with *Leptolyngbya* (95%—96%), and one grouped with *Phormidium* (97%). The other 17 sequences belonged to uncultivated cyanobacteria. *Microcoleus* was the dominant cyanobacteria in biological soil crusts from bare wasteland and in the *H. ramosissimum* community. *Leptolyngbya* was the dominant taxon in moss-algal crusts and in crusts from the *Imperata cylindrica* var. *major* community.

Key Words: copper mine tailings; biological soil crust; cyanobacteria; diversity; DGGE

生物土壤结皮是由细菌、真菌、放线菌、藻类、地衣和苔藓等生物在土壤表面形成的一薄层壳状结构。生长在干旱、半干旱区域的生物土壤结皮不仅为土壤提供有机质和氮素^[1-4]、促进土壤发育和物质转化、加速土壤团聚结构的形成^[5-7],而且来自生物土壤结皮的分泌物通过对土壤颗粒的粘结作用,能够有效减少水分蒸发、增加表层土壤的稳定性,减少表层土壤的风蚀和水蚀^[8-10],从而影响高等植物的定居、生长和生态系统的发展^[11-13]。研究表明生长在铜尾矿上的生物土壤结皮能够增加表层尾矿的含水量、改善表层尾矿的 pH 值和电导率,增加表层尾矿有机质、总氮、有效态磷等含量^[14],提高表层尾矿中的微生物量和土壤酶活性^[15]。

铜陵是我国六大铜业基地之一,区内分布着多处铜尾矿废弃地,这些尾矿废弃地或通过人工辅助生态修复或通过自然生态恢复途径而得到不同程度的植被恢复。在铜尾矿废弃地自然生态恢复过程中,生物土壤结皮在尾矿废弃地表面广泛存在,这些生物土壤结皮可分为 3 种类型:藻类结皮、藓-藻混合结皮及藓类结皮,其中的藓类植物主要是黄色真藓 (*Bryum pallenscens*)^[15]。

作为生物土壤结皮的重要组成部分,蓝藻通过固氮作用、光合作用和分泌胞外多糖等在增加土壤养分、改善土壤水分条件、增加土壤表面稳定性等方面扮演重要角色^[5,16-17]。本研究以铜陵 2 处铜尾矿废弃地自然生态恢复过程中形成的生物土壤结皮为对象,运用常规培养方法和 PCR-DGGE 技术,探讨铜尾矿废弃地上不同类型生物土壤结皮中的蓝藻多样性特点。

1 研究区概况

铜陵地处长江中下游南岸,属亚热带季风气候,年平均气温 16.2℃,夏季平均气温 27.4℃,无霜期平均为 230 d,年平均降水量 1390 mm,年平均湿度为 75%—81%。本研究选取生长在铜陵杨山冲(30°54'N,117°53'E)和铜官山(30°54'N,117°49'E)2 处铜尾矿废弃地上的生物土壤结皮。杨山冲尾矿废弃地堆存尾矿 1308 万 t,库区面积 22 hm²,库区汇水面积 0.54 km²^[18],该尾矿废弃地 1991 年弃置停用后开始自然生态恢复过程,目前自然生长的主要维管植物群落包括白茅(*Imperata cylindrica*)群落、中华结缕草(*Zoysia sinica*)群落、木贼(*Hippochaete ramosissimum*)群落,局部地段仍分布着斑块状的、无维管植物定居的黄色真藓-藻类混合结皮。铜官山尾矿库占地面积约 20 hm²,该库弃置时间超过 30 a,目前自然植物群落主要为白茅(*I. cylindrica*)群落。在 2 处尾矿废弃地维管植物群落中生长着藓-藻混合结皮以及藓类结皮。2 处尾矿废弃地主要由石质粉末组成,属沙质质地,80% 以上的尾矿废弃物颗粒直径小于 0.154 mm^[18];组成尾矿的主要矿物为钙铁(铝)榴石、石英、辉石和长石等^[14],并含有一定比例的黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、方铅矿、闪锌

矿^[19], 主要有害元素含量分别为 Fe(81.25—228.14 g/kg)、Cu(0.64—1.67 g/kg)、Zn(302.09—741.90 mg/kg) 和 As(159.32—532.88 mg/kg)。

2 材料与方法

2.1 样本采集与预处理

采集的生物土壤结皮样本包括铜官山铜尾矿废弃地白茅群落中的藓-藻混合结皮(TG)、杨山冲铜尾矿废弃地白茅群落中藓-藻混合结皮(YB)、杨山冲铜尾矿废弃地中华结缕草群落中藓-藻混合结皮(YJ)、杨山冲铜尾矿废弃地木贼群落中藓-藻混合结皮(YM)、杨山冲铜尾矿废弃地黄色真藓-藻类混合结皮(YT), 同时还在杨山冲尾矿废弃地无植物生长的裸露区域采集了表层尾矿样品(YL)作为对照。

在各种植物群落分布区及无植物生长的裸露区域分别随机选取 6 个采样点, 先去除生物土壤结皮表面的落叶, 然后用镊子夹取表层结皮, 并用小刀尽量刮掉结皮背面粘附的尾矿, 将 6 个采样点所采集样本装入密封袋、并均匀混合, 放入装有冰块的保温箱内, 带回实验室于 -20 °C 冰箱保存, 用于蓝藻多样性研究。

在各生物土壤结皮采样处, 同时采集紧贴生物土壤结皮的尾矿(厚度 2 cm, 面积 10 cm × 10 cm), 每处采集的尾矿样本作为一份独立样本装入密封袋, 并放入装有冰块的保温箱内, 带回室内后取部分样本进行含水量测定, 其余样本经室内自然风干、过筛后用于其他理化性质测定。

2.2 理化性质分析

含水量用烘干法((105±2) °C)测定, 有机质含量采用烧失量法((550±5) °C, 6 h)测定, pH 值和电导率分别用酸度计(pHS-3C 型精密 pH 计, 上海雷磁仪器厂)和 DDS-11A 型电导率仪(上海盛磁仪器有限公司)测定($W_{\text{尾矿}}:V_{\text{水}}=1\text{ g}:5\text{ mL}$), 总氮采用开氏定氮法测定, 有效态磷采用钼蓝比色法测定^[20]。

2.3 蓝藻的多样性分析

2.3.1 蓝藻的培养与观察

在容积为 100 mL 的三角瓶内, 加入 50 mL 液体培养基(培养基采用 Bristol 和 BBM 两种), 灭菌备用, 然后把约 5 g 的结皮试样加入培养基内, 充分振荡((25±1) °C、180 转/min)后放入光照培养箱中((25±1) °C、15000lx、光/暗周期 12h/12h、每天摇动 2 次)培养, 过 2—3 周待藻类长出后用显微镜(OLYMPUS BX51)进行观察^[21]。

2.3.2 蓝藻的 PCR-DGGE 分析

(1) 总 DNA 的提取

参照 Zhou^[22] 和苏振宏等^[23] 的提取方法, 并稍加改进, 即: 在加入 DNA 抽提缓冲液之前用 1×TE 洗涤样本 2 遍(于 65 °C 水浴 10 min, 4000 r/min 离心 2 min, 弃掉上液), 去除结皮中的腐殖质、色素、盐离子等, 以便后续的 DNA 扩增。

(2) PCR 扩增

参考 Nübel 等^[24] 及 Boutte 等^[25] 的扩增条件, 运用巢式 PCR 对蓝藻 16S rRNA 特异片段进行扩增。具体为: 第一轮引物为 16S 359F 和 23S 30R, 第一轮扩增反应体系为: 2 μL 的模板、0.4 μmol/L 每种引物、0.05 mg 的 BSA (bovine serum albumin)、0.2 mmol/L 的 dNTPs、10×PCR buffer (含 2 mmol/L MgCl₂)、2U 的 TaqDNA 聚合酶, 加适量的双蒸水补足 50 μL。第一轮扩增条件为: 94 °C 预变性 5 min、94 °C 45 s、54 °C 45 s 和 68 °C 2 min (30 个循环), 最后在 68 °C 下延伸 7 min。以第一轮反应的产物为模板进行第二轮扩增, 第二轮扩增反应的上游引物 GC-16S 359F、下游引物分别采用 16S 781R(a) 和 16S 781R(b), 反应体系与第一轮相同。第二轮扩增条件为: 94 °C 预变性 5 min、94 °C 1 min、60 °C 1 min 和 68 °C 1 min (30 个循环), 最后在 68 °C 下延伸 7 min。

(3) DGGE 分析

第二轮扩增的产物用于 DGGE 分析: 变性剂梯度 45%—60%, 聚丙烯酰胺胶浓度为 6%, 1×TAE buffer 电泳缓冲液, 30 μL PCR 扩增产物作为样本, 在 60 °C、100 V 电压下电泳 16 h 后, 用 SYBR Green I 溶液染色

20 min,然后在凝胶成相系统中拍照、切胶。

(4) 切胶回收与测序

切取明亮的条带放入 1.5 mL 的离心管,加 30 μ L 的 1 $\times$ TE,4 $^{\circ}$ C 过夜保存。然后再对切取的条带进行扩增,蓝藻的引物为 16S 784R 和 16S 359F,其它条件与上述的蓝藻第二轮扩增相同。PCR 反应的产物用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测,对目标条带进行切胶纯化,纯化产物直接进行双向测序。

2.4 数据处理

采用 SPSS16.0 进行理化数据分析,用 One way ANOVA (Duncan 检验)进行多重比较 ($P<0.05$);Shannon-Wiener 指数用于计算 DGGE 胶中各泳道蓝藻多样性^[26],MEGA4 用于系统树构建。

3 结果

3.1 生物土壤结皮下铜尾矿理化性质的变化

不同取样区域生物土壤结皮下及裸露区域的尾矿理化性质(表 1)分析表明,杨山冲铜尾矿废弃地生物土壤结皮下尾矿的 pH 值高于铜官山尾矿废弃地生物土壤结皮下尾矿,在杨山冲尾矿废弃地,pH 值表现为 YL > YT 和 YJ > YB 和 YM;生物土壤结皮下尾矿含水量、电导率、有机质(烧失量)、总氮含量均表现为 TG > YM 和 YB > YJ、YT 和 YL;铜官山尾矿废弃地生物土壤结皮下尾矿中有效磷含量高于杨山冲尾矿废弃地生物土壤结皮下尾矿,杨山冲尾矿废弃地不同区域结皮下尾矿无显著差异。

表 1 不同类型生物土壤结皮下尾矿理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of substrates under biological soil crusts (Mean $\pm$ SD, $n=6$)

结皮 样本 Samples	含水量 Water content /%	电导率 Electric conductivity /(μ S/cm)	pH	烧失量 Loss of ignition /(g/kg)	总氮 Total Nitrogen /(mg/kg)	有效磷 Available phosphorus /(mg/kg)
TG	17.30 $\pm$ 1.65 ^d	139 $\pm$ 26 ^b	7.76 $\pm$ 0.17 ^a	69.24 $\pm$ 10.73 ^b	184.93 $\pm$ 25.69 ^c	2.31 $\pm$ 1.24 ^b
YB	8.82 $\pm$ 2.65 ^b	92 $\pm$ 21 ^{ab}	8.16 $\pm$ 0.13 ^b	13.71 $\pm$ 4.90 ^a	41.06 $\pm$ 24.26 ^b	0.82 $\pm$ 0.37 ^a
YM	13.58 $\pm$ 2.58 ^c	115 $\pm$ 29 ^{ab}	8.16 $\pm$ 0.15 ^b	13.37 $\pm$ 6.39 ^a	41.11 $\pm$ 17.89 ^b	1.20 $\pm$ 0.46 ^a
YJ	6.91 $\pm$ 1.75 ^b	86 $\pm$ 20 ^a	8.29 $\pm$ 0.17 ^{bc}	10.15 $\pm$ 6.09 ^a	23.18 $\pm$ 9.20 ^{ab}	0.55 $\pm$ 0.51 ^a
YT	3.37 $\pm$ 0.42 ^a	72 $\pm$ 21 ^a	8.38 $\pm$ 0.18 ^{bc}	5.51 $\pm$ 3.71 ^a	8.43 $\pm$ 1.16 ^a	1.07 $\pm$ 0.75 ^a
YL	3.71 $\pm$ 0.67 ^a	84 $\pm$ 11 ^a	8.44 $\pm$ 0.21 ^c	5.56 $\pm$ 3.94 ^a	7.55 $\pm$ 2.38 ^a	0.75 $\pm$ 0.56 ^a

同列数据后不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平

3.2 生物土壤结皮中蓝藻多样性变化

显微观察表明(表 2),铜尾矿废弃地表面生长的生物结皮中蓝藻主要隶属于色球藻科(Chroococcaceae)、颤藻科(Oscillatoriaceae)、微毛藻科(Microchaetaceae)、念珠藻科(Nostocaceae)和伪鱼腥藻科(Pseudanabaenaceae)。色球藻科的优势类群主要为微囊藻属的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*),其他类群如色球藻属的粘连色球藻(*Chroococcus cohaerens*)、隐球藻属(*Aphanocapsa*)、隐杆藻属(*Aphanothece*)和粘球藻属(*Gloeocapsa*)等数量较少;颤藻科的藻类主要为颤藻属(*Oscillatoria*)和鞘丝藻属(*Lyngbya*),其中优势种类主要为断裂颤藻(*O. fracta*)和包氏颤藻(*O. boryana*);念珠藻科的藻类主要为念珠藻属(*Nostoc*)的一个种;伪鱼腥藻科的主要类群为细浮鞘丝藻(*Planktolyngbya subtilis*)。但不同样本之间蓝藻的组成存在差异。

由表 2 可以看出,铜官山老尾矿废弃地白茅群落(TG)中的蓝藻主要包括 9 个种,杨山冲黄色真藓-藻类混合结皮(YT)及杨山冲结缕草群落(YJ)中各有 11 种蓝藻类群,杨山冲木贼群落(YM)及杨山冲白茅群落(YB)均有 14 种蓝藻类群,杨山冲裸地(YL)含有 10 个蓝藻类群;其中铜绿微囊藻在 6 个群落中均有分布,且在铜官山老尾矿废弃地白茅群落下(TG)、杨山冲黄色真藓-藻类混合结皮(YT)及杨山冲裸地(YL)中数量较多;粘连色球藻在杨山冲黄色真藓-藻类混合结皮(YT)、杨山冲木贼群落(YM)及杨山冲白茅群落(YB)中存在,色球藻科的其余属只存在于个别群落中,且数量很少;断裂颤藻存在于杨山冲的 5 个群落结皮中,且在杨山冲裸地中数量较多,而在铜官山老尾矿废弃地白茅群落下结皮中(TG)没有发现;念珠藻属的一个种在杨山

冲黄色真藓-藻类混合结皮(YT)及杨山冲裸地(YL)中不存在,在其余4种群落中均有,且在杨山冲木贼群落中数量较多;在研究的6个群落结皮中,除了杨山冲黄色真藓-藻类混合结皮(YT)中没有观察到细浮鞘丝藻外,其余5个群落结皮中均有此种藻类存在。

表2 不同生物结皮中的蓝藻

Table 2 Different biological crusts of cyanobacteria

种类 Species	TG	YT	YM	YB	YJ	YL	合计 Total
色球藻科 Chroococcaceae							
铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	+++++	+++++	+++	++	+++	+++++	6
土生隐球藻 <i>Aphanocapsa muscicola</i>		+					1
隐杆藻属一种 <i>Aphanothece</i> sp.	++			+			2
温生隐杆藻 <i>Aphanothece caldariorum</i>					++		1
粘连色球藻 <i>Chroococcus cohaerens</i>		+++	+	++			3
微小色球藻 <i>C. minutus</i>		+		+			1
铜绿色球藻 <i>Chroococcus</i>			+				1
束缚色球藻 <i>C. tenax</i>			+				1
铜绿粘球藻 <i>Gloeocapsa aeruginosa</i>			++				1
颗粒粘球藻 <i>G. granosa</i>			+				1
束球藻属一种 <i>Gomphosphaeria</i> sp.		+					1
圆胞束球藻 <i>G. aponina</i>				+			1
粘杆藻属一种 <i>Gloeotheca</i> sp.			++				1
颤藻科 Oscillatoriaceae							
巨颤藻 <i>Oscillatoria princeps</i>		+				++	2
颤藻 <i>Oscillatoria</i>	+						1
尖细颤藻 <i>O. acuminata</i>		+			+		2
断裂颤藻 <i>O. fracta</i>		++	+	+++	+	+++++	5
包氏颤藻 <i>O. boryana</i>	+			++	+	++	4
蛇形颤藻 <i>O. anguina</i>			+				1
变红颤藻 <i>O. rubescens</i>				+			1
威利颤藻 <i>O. willei</i>				+			1
阿氏席藻 <i>Phormidium allorgei</i>						+	1
微毛藻科 Microchaetaceae							
微毛藻属一种 <i>Microchaete</i> sp.		+		+			2
柔嫩微毛藻 <i>M. tenera</i>	++		+			+	3
念珠藻科 Nostocaceae							
念珠藻属一种 <i>Nostoc</i> sp.	+		++++	++	+++		4
溪生念珠藻 <i>N. rivulare</i>	++			+	+		3
沼泽念珠藻 <i>N. Paludosum</i>	+		++		+	+	4
水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>					+		1
多变鱼腥藻 <i>Anabaena variabilis</i>			++				1
固氮鱼腥藻 <i>A. azotica</i>					+		1
伪鱼腥藻科 Pseudanabaenaceae							
粗壮细鞘丝藻 <i>Leptolyngbya valderiana</i>						+	1
希罗鞘丝藻 <i>Lyngbya hieronymusii</i>						+	1
细浮鞘丝藻 <i>Planktolyngbya subtilis</i>	++++		+	+++	++	++	5
平裂藻科 Merismopediaceae							
细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>		+					1
伪枝藻科 Scytonemataceae							
皮壳伪枝藻 <i>Scytonema crustaceum</i>				+			1
水球藻科 Hydrococcaceae							
水球藻属一种 <i>Hydrococcus</i> sp.		+					1
合计 Total	9	11	14	14	11	10	

TG: moss-algal crusts from *I. cylindrical* community of Tongguanshan mine wasteland; YT: moss-algal crust of Yangshanchong mine wasteland; YM: moss-algal crusts from *H. ramosissimum* community of Yangshanchong mine wasteland; YB: moss-algal crusts from *I. cylindrical* of Yangshanchong mine wasteland; YJ: moss-algal crusts from *Z. sinica* community of Yangshanchong mine wasteland; YL: bare wasteland

DGGE 图谱(图 1)表明:不同下游引物[CYA781R(a)和 CYA781R(b)]扩增同一生物结皮样品得到的条带位置和条带数量不同。当下游引物为 CYA781R(a)时,扩增生物结皮样品得到的清晰条带数分别为 TG 3 条、YM 6 条、YJ 3 条、YB 2 条、YT 4 条和 YL 4 条;当下游引物为 CYA781R(b)时,扩增结皮样品得到的清晰条带数分别为 TG 7 条、YM 3 条、YJ 3 条、YB 3 条、YT 9 条和 YL 2 条。

基于 DGGE 图谱中各泳道条带数目、亮度和迁移距离所获得的 Shannon-Wiener 多样性指数(图 2)表明,除来自杨山冲中华结缕草群落中结皮(YJ)样品外,同一样品用 2 种引物所获得的蓝藻多样性指数存在明显不同。其中,在杨山冲裸地(YL)和杨山冲木贼群落下尾矿中(YM),以 CYA781R(a)引物扩增所得到的蓝藻多样性指数高于以 CYA781R(b)引物扩增所得到的蓝藻多样性指数;而杨山冲黄色真藓-藻类混合结皮(YT)和白茅生长处(YB)以及铜官山老尾矿废弃地白茅群落下尾矿中(TG),以 CYA781R(b)引物扩增所得到的蓝藻多样性指数高于以 CYA781R(a)引物扩增所得到的蓝藻多样性指数。

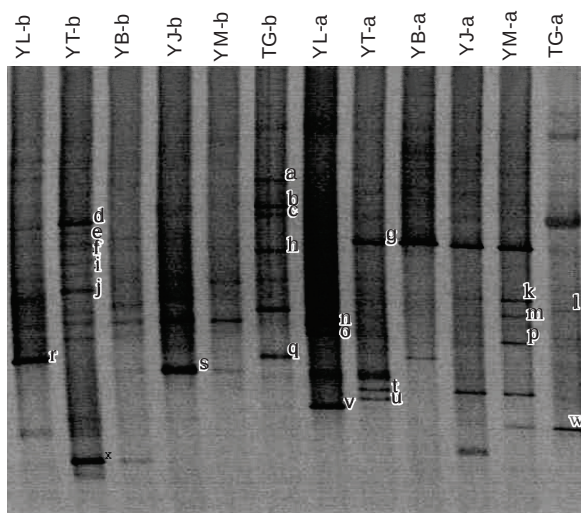


图 1 不同类型生物结皮中蓝藻的 DGGE 图谱
Fig. 1 DGGE band patterns of Cyanobacteria

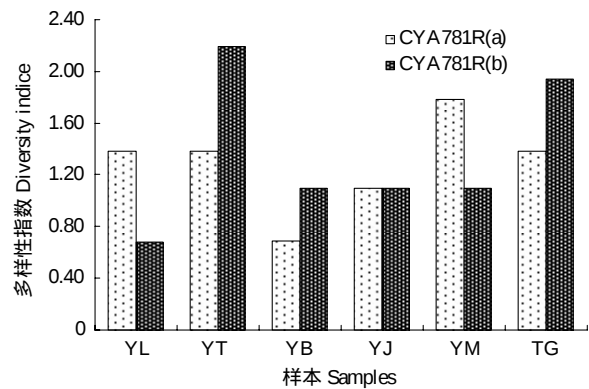


图 2 不同类型结皮中蓝藻多样性指数
Fig. 2 Diversity index of Cyanobacteria in different biological soil crusts

从 DGGE 胶(图 1)中切割了 23 条(a—w)较清晰的条带,经扩增、测序,并与 NCBI 的 Blastn 进行比对后,构建系统树(图 3)。结果表明,所测序条带与 Blastn 中的近缘蓝藻的相似性系数(Identity)均在 93% 以上。利用下游引物 781R(b)扩增、切带的 13 个条带中,测序结果表明有 2 个条带(i、x)与细鞘丝藻属(*Leptolyngbya*)、1 条(e)与席藻属(*Phormidium*)亲缘关系较近,其余条带为未培养的蓝藻;利用下游引物 781R(a)扩增、切带的 11 个条带中,测序结果表明有 4 个条带(m、p、t、u)与微鞘藻属(*Microcoleus*)亲缘关系较近,其余条带为未培养的蓝藻。4 个与微鞘藻属亲缘关系较近的条带皆对应于 *Microcoleus* sp. SAG 2212 (EF654075),且相似度皆在 95% 以上。

结合图 1 与图 3 可以看出,在杨山冲裸地(YL)和木贼群落下尾矿表面生物土壤结皮中(YM)的优势类群主要为微鞘藻属种类;而杨山冲黄色真藓-藻类混合结皮(YT)和白茅生长处(YB)以及铜官山老尾矿废弃地白茅群落下尾矿中(TG)的优势类群主要为细鞘丝藻属种类。

4 讨论

生物土壤结皮中的蓝藻在增加土壤表面稳定性、减少土壤侵蚀、增加土壤养分等方面具有重要意义^[5,16-17]。早期研究主要通过室内培养方式确定构成生物土壤结皮的藻类组成,由于生物土壤结皮中存在许多无法室内培养的蓝藻,致使人们关于生物土壤结皮中的蓝藻群落结构和多样性认识受到很大的局限^[27]。分子生物学方法的应用为人们更好地了解生物土壤结皮中蓝藻群落结构和种类组成提供了便捷的手段,目前通过分子生物学技术人们对不同环境中的蓝藻多样性开展了大量的研究工作^[25, 27-29],其中 PCR-DGGE 技术

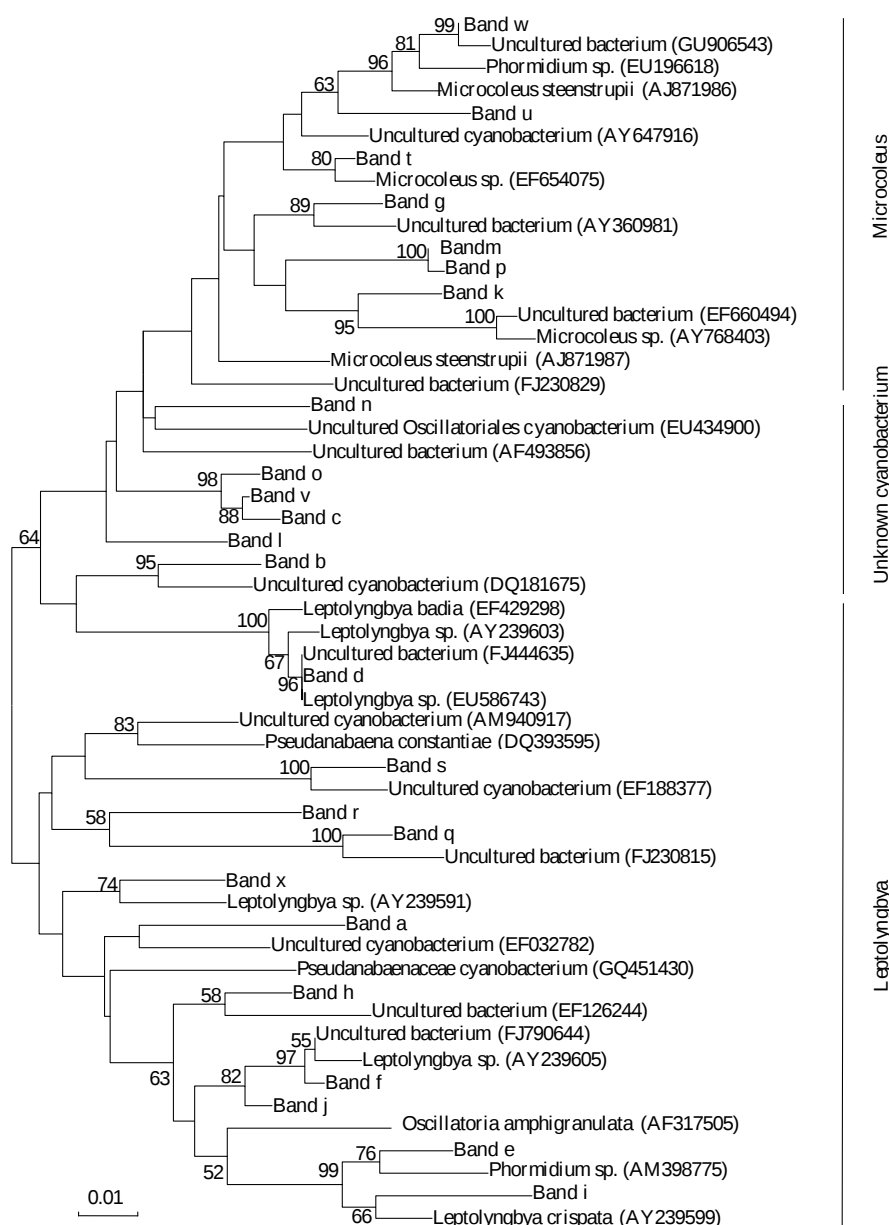


图3 基于邻接法构建的优势蓝藻及其近缘类群核苷酸序列系统树

Fig. 3 Neighbour-joining phylogenetic tree based on dominant cyanobacteria nucleotide sequences among the characteristics DGGE bands and their closest relatives

已被广泛应用于微生物生态研究,利用该方法检测蓝藻的多态性不需分离、培养,且将分离的 DNA 条带直接通过基因比对鉴定蓝藻种类,可避免因纯化、培养以及人为经验判断等因素造成的误差。

Boutte 等^[25]的研究表明,下游引物 CYA781R(a)和 CYA781R(b)对不同类型的蓝藻 16S rDNA 扩增具有特异性,其中 CYA781R(a)对丝状蓝藻的特异性较高,而 CYA781R(b)对单细胞蓝藻扩增特异性较高。利用传统培养方法发现样品中存在大量单细胞蓝藻(微囊藻属和色球藻属,表 2)和丝状蓝藻类群(念珠藻属、席藻、水华束丝藻、多变鱼腥藻等),但以 CYA781R(a)和 CYA781R(b)为下游引物的 PCR-DGGE 研究仅得到少数用传统培养方法未被发现的丝状蓝藻类群(细鞘丝藻属和微鞘藻属,图 3),大量占优势的单细胞蓝藻(铜绿微囊藻)和丝状蓝藻(颤藻属、念珠藻属、浮鞘丝藻属)类群在 PCR-DGGE 研究中并未被检测到。这一方面可能是由于样品中 DNA 提取不完全以及引物对某些 DNA 片段的优先扩增等引起,另一方面可能由于 DGGE 胶的众多条带之中仅有部分优势的条带可以被切取、测序,仍有大量的非优势条带不能够被切取、测序。因此,

在研究生物土壤结皮蓝藻多样性时,将常规培养方法与分子生物学方法相结合,能够获得更为全面的蓝藻种类组成信息。

构成尾矿废弃地生物土壤结皮的蓝藻绝大多数类群广泛分布于各种生境,如铜尾矿废弃地生物土壤结皮中细鞘丝藻属、颤藻属及念珠藻属等在水稻田中也有分布^[27];沙漠生物土壤结皮中的优势类群颤藻属和色球藻属,在铜尾矿废弃地生物土壤结皮中均有发现^[30];生长在火山熔岩上的许多亚气生蓝藻类群(鞘丝藻属、席藻属、颤藻属、微鞘藻属、伪枝藻属、念珠藻属、粘球藻属、隐球藻属、隐杆藻属等)在本研究中也被发现^[31]。与其他生境条件下相比,铜尾矿废弃地上生长的生物土壤结皮中蓝藻有其特殊性。尽管铜尾矿废弃地生物土壤结皮中也生长着大量像沙漠生物结皮一样的丝状蓝藻类群,但铜尾矿废弃地上生物土壤结皮中微囊藻属的铜绿微囊藻在数量上是占绝对优势的,这与沙漠生物土壤结皮中以色球藻属占优势有所不同;一些分布于沙漠生物土壤结皮中的蓝藻类群(如集球藻属(*Synechococcus*)、集胞藻属(*Synechocystis*)、螺旋藻属(*Spirulina*)、节球藻属(*Nodularia*)、粘囊藻属(*Myxosarcina*)^[30]以及分布于火山熔岩上的亚气生蓝藻(如真枝藻科 Stigonemataceae、蓝柄藻科 Cyaostylonaceae),在本研究中均未发现,而铜尾矿废弃地表面的生物土壤结皮中的微毛藻科(Microchaetaceae)、平裂藻科(Merismopediaceae)、水球藻科(Hydrococcaceae)以及伪鱼腥藻科的浮鞘丝藻属(*Planktolynghya*)在沙漠结皮中少见报道。

作为一类光合微生物,蓝藻的分布、数量和生长、繁殖受环境条件的制约^[32],还受自生发育阶段及其他植物的影响^[33]。与杨山冲尾矿废弃地相比,弃置时间较长、维管植物(白茅)群落生长良好的铜官山尾矿废弃地表面基质中含有较高的 TN、有效磷、电导率和水分含量,pH 值呈微碱性。尽管这种环境条件有利于蓝藻的定居、生长和繁殖,但从表 2 可以看出,生长在杨山冲尾矿废弃地白茅群落下的生物土壤结皮(YB)中蓝藻的多样性明显高于生长在铜官山老尾矿废弃地白茅群落下生物土壤结皮(TG)中的蓝藻多样性。生长在铜官山老尾矿废弃地上的白茅群落发育时间长,植被盖度和枯枝落叶量明显高于生长在杨山冲尾矿废弃地上的白茅群落,维管植物群落的形成与发展可能通过影响群落内的光照条件以及植物凋落物的堆积量而对尾矿表面生物土壤结皮的生长、发育及种类组成与多样性产生影响。

综上所述,铜陵铜尾矿废弃地生物土壤结皮中蓝藻群落的结构较为简单、多样性较低,生长在这些生物土壤结皮中的优势蓝藻主要隶属于微鞘藻属、细鞘丝藻属、微囊藻属、颤藻属、细浮鞘丝藻及色球藻属,这些蓝藻在铜尾矿废弃地自然生态恢复过程中表层尾矿中养分的形成、积累以及改善尾矿废弃地土壤质地等方面具有重要作用。对生物结皮中蓝藻的深入研究,能够丰富结皮藻类的物种多样性,进一步理解生物结皮初期的形成机制,有助于对极端环境的治理提供有利措施。

References:

- [1] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20: 179-223.
- [2] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35:128-135.
- [3] Holst J, Butterbach-Bahl K, Liu C Y, Zheng X H, Kaiser A J, Schnitzler J P, Zechmeister-Boltenstern S, Brüggemann N. Dinitrogen fixation by biological soil crusts in an Inner Mongolian steppe. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45(7): 679-690.
- [4] Zaady E, Groffman P, Shachack M. Nitrogen fixation in macro- and microphytic patches in the Negev Desert. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(4): 449-454.
- [5] Chen L Z, Liu Y D, Song L R. The function of exopolysaccharides of *Microcoleus* in the formation of desert soil. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(2): 155-159.
- [6] Yan D R, Ji M, Xue Y Y. Development characteristics of desert biological crust. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (5): 990-993.
- [7] Tang D S, Wang W B, Li D H, Hu C X, Liu Y D. Effects of artificial algal crust on soil enzyme activities of HOPQ Desert, China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31 (3): 339-343.
- [8] Gahel A G, Shtina E A. Algae on the sands of arid regions and their role in soil formation. *Soviet Soil Science*, 1974, 6: 311-319.
- [9] Li X R, Jia Y K, Long L Q, Zhang J G, Jia Y K. Advances in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semiarid

- regions. *Journal of Desert Research*, 2001, 21 (1): 4-11.
- [10] Xu J, Bai X L, Yang C, Zhang P. Study on diversity and binding-sand effect of moss on biotic crusts of fixed dunes. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27 (4): 545-551.
- [11] Li X R, Zhang J G, Wang X P, Liu L C, Xiao H L. Study on soil microbiotic crust and its influences on sand-fixing vegetation in arid desert region. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(9): 965-970.
- [12] Li X R, Zhou H Y, Wang X P, Zhu Y G, O'Conner P J. The effects of sand stabilization and revegetation on cryptogam species diversity and soil fertility in the Tengger Desert, Northern China. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 237-245.
- [13] Long L Q, Li X R. Effects of soil microbiotic crusts on seedling survival and seedling growth of two annual plants. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(6): 656-660.
- [14] Sun Q Y, An S Q, Yang L Z, Wang Z S. Chemical properties of the upper tailings beneath biotic crusts. *Ecological Engineering*, 2004, 23(1): 47-53.
- [15] Chen Z, Yang G D, Sun Q Y. Effects of bio-crust on soil microbial biomass and enzyme activities in copper mine tailings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2193-2198.
- [16] Birkemoe T, Liengen T. Does collembolan grazing influence nitrogen fixation by cyanobacteria in the high Arctic?. *Polar Biology*, 2000, 23(8): 589-592.
- [17] Issa O M, Defarge C, Bissonnais Y L, Marin B, Duval O, Bruand A, D'Acqui L P, Nordenberg S, Anneman M. Effects of the inoculation of cyanobacteria on the microstructure and the structural stability of a tropical soil. *Plant and Soil*, 2007, 290(1/2): 209-219.
- [18] Dai H W, Wang C L, Wang G H, Li Z H, Qiu X T. Technological research on rehabilitation & revegetation in Yang Shan Chong tailings dam. *Resource and Industries*, 2000, (7): 26-27.
- [19] China Natural Resources Committee. *China Natural Resources Series (Anhui)*. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [20] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Method of Soil Analysis*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [21] Soil Microbiology Seminar. *Experimentation of Soil Microbiology*. Beijing: Science Press, 1983: 170-178.
- [22] Zhou J Z, Bruns M A, Tiedje J M. DNA recovery from soils of diverse composition. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, 62(2): 316 - 322.
- [23] Su Z H, Zhang D L, Wang G H, Liu Y D, Hu C X. An Efficient method of DNA extraction from soil biological crusts. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30 (4): 486-488.
- [24] Nübel U, Garcia-Pichel F, Muyzer G. PCR primers to amplify 16S rRNA genes from cyanobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(8): 3327-3332.
- [25] Boutte C, Grubisic S, Balthasart P, Wilmette A. Testing of primers for the study of cyanobacterial molecular diversity by DGGE. *Journal of Microbiological Methods*, 2006, 65(3): 542-550.
- [26] Diallo M D, Willems A, Vloemans N, Cousin S, Vandekerckhove T T, De Lajudie P, Neyra M, Vyverman W, Gillis M, van der Gucht K. Polymerase chain reaction denaturing gradient gel electrophoresis analysis of the N₂-fixing bacterial diversity in soil under *Acacia tortilis* ssp. *raddiana* and *Balanites aegyptiaca* in the dryland part of Senegal. *Environmental Microbiology*, 2004, 6(4): 400-415.
- [27] Song T Y, Lin Z M, Zheng W W, Martensson L, Rasmussen U. Analysis on the species diversity of cyanobacteria in paddy field by comparison between normal culture and DGGE method. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 140-143.
- [28] Crispin C A, Gaylarde C C. Cyanobacteria and biodeterioration of cultural heritage: a review. *Microbial Ecology*, 2005, 49(1): 1-9.
- [29] Ng C C, Huang W C, Chang C C, Tzeng W S, Chen T W, Liu Y S, Shyu Y T. Tufa microbial diversity revealed by 16S rRNA cloning in Taroko National Park, Taiwan. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 342-348.
- [30] Zhang B C, Zhang Y M, Zhao J C, Zhang R C. Study on Cyanobacteria of biological soil crusts in Gurbantunggut Desert, Zhungar Basin, Sinkiang. *Geography and Geo-Information Science*, 2005, 21 (5): 107-109.
- [31] Lu L H. *The Study of Taxology and Ecology of Sub-Aerial Blue-Green Algae on Lava of Aershan*. Jilin: Northeast Normal University, 2007.
- [32] Stibal M, Šabacká M, Kaštovská K. Microbial communities on glacier surfaces in Svalbard: impact of physical and chemical properties on abundance and structure of Cyanobacteria and algae. *Microbial Ecology*, 2006, 52(4): 644-654.
- [33] Zhang B C, Zhang Y M, Zhao J C, Chen R Y, Zheng Y P. Variation in algal composition among different developmental stages of biological soil crusts in Gurbantunggut Desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 9-17.

参考文献:

- [5] 陈兰周, 刘永定, 宋立荣. 微鞘藻胞外多糖在沙漠土壤成土中的作用. *水生生物学报*, 2002, 26(2): 155-159.
- [6] 闫德仁, 季蒙, 薛英英. 沙漠生物结皮土壤发育特征的研究. *土壤通报*, 2006, 37(5): 990-993.

- [7] 唐东山, 王伟波, 李敦海, 胡春香, 刘永定. 人工藻结皮对库布齐沙地土壤酶活性的影响. 水生生物学报, 2007, 31(3): 339-343.
- [9] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 张景光, 贾玉奎. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展. 中国沙漠, 2001, 21(1): 4-11.
- [10] 徐杰, 白学良, 杨持, 张萍. 固定沙丘结皮藓类植物多样性及固沙作用研究. 植物生态学报, 2003, 27(4): 545-551.
- [11] 李新荣, 张光景, 王新平, 刘立超, 肖洪浪. 干旱沙漠区土壤微生物结皮及其对固沙植被影响的研究. 植物学报, 2000, 42(9): 965-970.
- [13] 龙利群, 李新荣. 土壤微生物结皮对两种一年生植物幼苗存活和生长的影响. 中国沙漠, 2003, 23(6): 656-660.
- [15] 陈政, 阳贵德, 孙庆业. 生物结皮对铜尾矿废弃地土壤微生物量及酶活性的影响. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2193-2198.
- [18] 代宏文, 王春来, 汪庚火, 李章鹤, 邱晓梯. 杨山冲尾矿库复垦建立植被技术研究. 资源·产业, 2000, (7): 26-27.
- [19] 中国自然资源丛书编撰委员会. 中国自然资源丛书(安徽卷) 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [21] 土壤微生物研究会. 土壤微生物实验法. 北京: 科学出版社, 1983: 170-178.
- [23] 苏振宏, 张德禄, 王高鸿, 刘永定, 胡春香. 一种从土壤生物结皮中有效提取 DNA 的方法. 水生生物学报, 2006, 30(4): 486-488.
- [27] 宋铁英, 林智敏, 郑伟文, Martensson L, Rasmussen U. DGGE 法与常规培养法对稻田蓝细菌多态性分析结果比较. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 140-143.
- [30] 张丙昌, 张元明, 赵建成, 张茹春. 准噶尔盆地古尔班通古特沙漠生物结皮蓝藻研究. 地理与地理信息科学, 2005, 21(5): 107-109.
- [31] 吕林海. 阿尔山火山熔岩台地上亚气生蓝藻的分类及生态研究. 吉林: 东北师范大学, 2007.
- [33] 张丙昌, 张元明, 赵建成, 陈荣毅, 郑云普. 古尔班通古特沙漠生物结皮不同发育阶段中藻类的变化. 生态学报, 2009, 29(1): 9-17.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 22 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Hyperspectral estimation models for plant community water content at both leaf and canopy levels in Wild Duck Lake wetland	6645
Potential distribution of rice in china and its climate characteristics	6659
Effects of seed soaking with soybean isoflavones on soybean seedlings under salt stress	6669
Ecophysiological responses and adaptation of <i>Tamarix ramosissima</i> to changes in groundwater depth in the Heihe river basin	6677
<i>Melica przewalskyi</i> population spatial pattern and response to soil moisture in degraded alpine grassland	6688
A study on ecological compensation standard for Zaoshi Water Conservancy Project based on the idea of ecological footprint	6696
Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data	6708
Marshclassification mapping at a community scale using high-resolution imagery	6717
The impact of bacterial-feeding nematodes on root growth of <i>Arabidopsis thaliana</i> L. and the possible mechanisms	6727
Spatial and dynamic analysis of plantations in Xishuangbanna using network <i>K</i> -function	6734
Contrastive analysis and climatic response of tree-ring gray values and tree-ring densities	6743
Fractal structure of dominant tree species in north-facing slope of mountain of northern Hebei	6753
Characteristics of radiation fluxes of an evergreen broad-leaved forest in Maofeng Mountain, Guangzhou, China	6766
Effects of seed-dressing agents on groundnut and rhizosphere microbes	6777
Time series prediction of the concentration of chlorophyll-a based on RBF neural network with parameters self-optimizing	6788
A trend surface analysis of geographic variation in the traits of seeds and seedlings from different <i>Quercus acutissima</i> provenances	6796
Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River basin, Shaanxi Province, China	6805
An analysis on the water status in twigs and its relations to the drought resistance in Five woody plants living in arid zone	6815
The effect of fire on soil properties in a <i>Pinus massoniana</i> stand	6824
Water-environment effects of industry structure in Taihu Lake Basin in Jiangsu Province	6832
Effect of high temperature on enzymic activity, pigment content and chlorophyll fluorescence of two <i>Kappaphycus</i> species	6845
Analysis on characteristics of a typical drought event in Jiangsu Province	6853
Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau	6866
Effects of light quality on photosynthetic characteristics and on the carotenoid and cuticular extract content in tobacco leaves	6877
Cyanobacterial diversity in biological soil crusts on wastelands of copper mine tailings	6886
Stereotypic behavior frequency and the influencing factors in captive Alpine musk deer (<i>Moschus sifanicus</i>)	6896
Zooplankton ecology near the Tianwan Nuclear Power Station	6902
Diel variations of fish assemblages in multiple habitats of Ma'an archipelago, Shengsi, China	6912
A novel cognitive-based approach to motivation for non-use value	6926
Review	
Salt-responsive proteomics in plants	6936
Research progress on forms of nitrogen and determination in the sediments	6947
Review of research progress of infectious diseases in wild birds	6959
Review on the methods to quantify fish's ability to cross velocity barriers in fish passage	6967
Monograph	
Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: foundation, prospect and response strategy	6973
Scientific Note	
A comparative study of the spatial-temporal patterns of fine roots between young and mature <i>Caragana korshinskii</i> plantations	6978

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 22 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 22 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元