

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐珺, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析

吴雁雯, 张金池*, 郭晓平, 刘鑫

(南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037)

摘要: 岩石矿区废弃地水土流失问题极度严峻, 微生物对修复该问题造成的退化生境具有重要意义, 为探究微生物对岩石矿区生境修复的有效性与作用机制, 采用两次定向筛选, 获得1株高效产铁载体及吲哚乙酸(IAA)的硅酸盐矿物分解细菌, 利用16S rRNA基因序列分析鉴定该细菌为 *Pseudomonas protegens*。通过该细菌对硅酸盐岩的岩石分解实验, 测定培养液 pH 值、K、Al、Si 这3种元素的释放量, 检测岩石溶蚀的粒径变化, 并分析培养液中不同有机酸、氨基酸及多糖的浓度变化, 研究 *Pseudomonas protegens* NLX-4 对硅酸盐的溶蚀效果, 同时引入增强回归树(boosted regression tree analysis, BRT)分析, 探究其促溶机制。分析表明, 该细菌通过代谢积累一定浓度的酒石酸($>777 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)以及多糖($>8.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 对硅酸盐岩产生释钾、释铝、脱硅的作用, 从而有效促进岩石的分解。菌株 *Pseudomonas protegens* NLX-4 可作为修复废弃矿地被破坏生境的良好菌种资源。

关键词: 硅酸盐岩; 生物风化; 假单胞菌; 岩石矿区; 生态修复

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0283-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201607075

Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis

WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi*, GUO Xiao-ping, LIU Xin

(Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The soil and water loss problem in rock mining areas is an extremely serious problem, and microbes play significant roles in ecological restoration of those areas. In this study, directive screening was used to explore the efficiency of microbe-mediated habitat restoration and the underlying mechanisms. A bacterial strain NLX-4, which was then identified as *Pseudomonas protegens* according to its 16S rRNA gene sequence, was screened out as an efficient silicate dissolution bacterium with the ability to secrete siderophore and indole-3-acetic acid (IAA). Moreover, pH value, element (K, Al, Si) release, organic acid content, amino acid concentration, polysaccharide content, and rock particle diameter variation in culture medium were analyzed to explore the ability of *P. protegens* NLX-4 to promote dolomite dissolution under controlled experimental conditions. These results showed that *P. protegens* NLX-4 could play a positive role in dolomite dissolution by producing tartaric acid ($>777 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and polysaccharides ($>8.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). Therefore, *P. protegens* NLX-4 is an efficient microbial resource that can be used in rehabilitation of abandoned mines and has great application potential.

Key words: silicate rock; biological weathering; *Pseudomonas* sp.; rock mining area; ecological restoration

硅酸盐类矿物占自然界所有已知矿物种类的1/3, 占地壳比重的75%, 是我国两大岩石矿物类型之一^[1]。由于人类过度的开采活动, 造成岩矿区土地退化, 植物多样性锐减^[2], 裸岩遍布, 最终导致土地生产力完全丧失, 出现矿区石漠化现象^[3]。据统计, 我国矿山占用土地面积为 $581 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中矿区废弃地面积高达 $288 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 且以每年约 $4.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的增幅扩大, 而矿区复垦整治率极低^[4]。为解决岩矿区生态环境破坏的问题, 日本等国家开发出多种生态修复工程技术, 其原理就是以植物修复为基础, 结合喷播技术在裸岩表面喷射形成具有一定厚度并包含多种植物生长所需物质的基质层,

人为创造可促进植物生长的环境^[5]。但目前生态修复工程技术的绿化效果均存在难以长期维持的问题, 因为目前的修复措施仅能使植物根系生长于岩石上部, 依靠吸收基质中的有限养分生长, 养分吸收殆尽后, 植物将枯死, 喷播覆盖层也将从岩体表面脱落^[6]。因此, 加快岩石的土壤化进程, 形成植物持续生长所需的土壤环境, 是克服目前工程技术中绿化

收稿日期: 2016-07-12; 修订日期: 2016-08-17

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201504406); 林业科学技术推广项目([2015]17); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 吴雁雯(1989~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为生态环境修复, E-mail: wywhsl@sina.com

* 通信作者, E-mail: zhangjc8811@sohu.com

效果只作用于岩石表面,无法长期维持这一问题的关键.

微生物广泛存在于硅酸盐岩石矿区的贫瘠生境中,并将难以利用的营养元素转化为易于被吸收利用的形态^[7]. 其中,硅酸盐岩分解细菌可通过风化硅酸盐矿物,促进岩石的分解,并获得其生长所需的营养物质^[8]. 因此,硅酸盐岩分解细菌的研究对矿区被破坏生境的修复具有重要意义. 目前细菌风化岩石的途径主要有以下 4 种:细菌代谢分泌有机酸类物质,改变环境 pH,加速岩石溶解^[9];细菌分泌胞外多糖与低分子有机酸,通过络合作用促岩石风化^[10];细菌与矿石接触并产生酶类物质(如碳酸酐酶等),通过表面接触交换作用,破坏岩石矿物结晶构造,促进岩石溶蚀^[11];细菌具有的生物膜结构可形成特殊微环境,加快岩石风化^[12].

现有研究已证明芽孢杆菌等细菌对硅酸盐矿物的高效分解作用^[13, 14],但多集中于简单对比接入实验菌株后产生的差异性. 而不同菌株对不同岩石具有不同的促溶作用与机制^[15],简单的大小对比并不能说明细菌促进岩石溶蚀的主要因素,因此也无法阐述菌株的溶岩机制. 本研究引入增强回归树(boosted regression tree analysis, BRT)分析,以科学探究实验菌株的促溶机制. 此外,多数研究中的岩石风化菌种分离自土壤^[15, 16]. 而已有实验表明,苔藓根际微生物的次级代谢产物种类丰富,其中包括大量可降低环境 pH 的有机酸类物质^[17],以及生长素、赤霉素、脱落酸、吲哚乙酸等能有效促进植物生长的活性物质^[18, 19]. 本研究的实验菌株分离自岩矿区岩生苔藓表面,通过对高效溶岩细菌的筛选、鉴定与其溶蚀机制的探究,选出可以应用于废弃岩石矿区生境修复的菌株,以期为该地区的生态修复提供菌种资源.

1 材料与方法

1.1 采样区概况

庐山地处长江中下游鄱阳湖平原西北部,位于江西省北部,北临长江,东濒鄱阳湖,地理坐标为东经 115°52′~116°08′,北纬 29°26′~29°41′. 近年来由于过度的岩石开采,生态环境遭到严重破坏,土壤流失,植被减退,导致大量岩石裸露.

1.2 实验材料

1.2.1 岩石样品

取来自庐山矿区的裸露岩石,用去离子水对矿物进行反复清洗,直至上层溶液澄清. 再用 0.1

mmol·L⁻¹的盐酸溶液酸洗岩石粉(浸泡 1 h),从而降低矿物表面杂质影响且不改变矿物表面形貌及其化学属性^[20];再用去离子水冲洗至淋洗液呈中性,自然风干,经粉碎机粉碎,过 200 目筛,121℃ 高压灭菌 20 min 后备用.

上述处理后的矿粉经 X 射线衍射仪(XRD, Ultima IV, 日本理学)测定,得到其组成成分(实验衍射条件为:起始角 10b,终止角 45b,扫描速度 10 mm·min⁻¹,温度 20.0℃,湿度 55.0%);钾长石 52%,石英 36%,云母 10%,绿泥石 2%. 同时对岩石的组成元素进行岩石全矿分析,得到岩石的主要组成元素(表 1).

表 1 岩石主要组成

Table 1 Main components of the rock sample				
项目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	其他
含量/%	73.80	13.40	9.90	2.90

1.2.2 苔藓样品

采集庐山矿区生长于岩石表面较为完整的苔藓,使用已灭菌的土壤刀轻轻将苔藓层铲下,将其置于无菌自封袋中带回,4℃ 冰箱中短暂保存备用,其余样品则置于 -20℃ 冰箱保存.

1.2.3 实验培养基

(1) 亚历山大罗夫培养基 蔗糖 5.0 g, Na₂HPO₄ 2.0 g, MgSO₄·7H₂O 0.5 g, FeCl₃ 0.005 g, CaCO₃ 0.1 g, 岩石矿粉 1.0 g, 琼脂 15.0 g, 去离子水 1 000 mL, 调节 pH 至 7.0~7.2.

(2) 细菌富集培养基 牛肉膏 5.0 g, 蛋白胨 10.0 g, NaCl 5.0 g, 琼脂粉 18 g, 去离子水 1 000 mL, 调节 pH 至 7.2~7.4.

(3) 有氮培养基 蔗糖 10 g, K₂HPO₄ 2.0 g, MgSO₄·7H₂O 0.5 g, NaCl 0.1 g, (NH₄)₂SO₄ 1.0 g, 酵母膏 0.5 g, CaCO₃ 0.5 g, 琼脂 20 g(液体培养基不加), 去离子水 1 000 mL, 调节 pH 至 7.2.

(4) 细菌发酵培养液 蔗糖 10 g, Na₂HPO₄ 2.0 g, MgSO₄·7H₂O 0.5 g, CaCO₃ 0.1 g, NaCl 0.1 g, (NH₄)₂SO₄ 0.5 g, 去离子水 1 000 mL, 调节 pH 至 7.2~7.4.

1.3 实验方法

1.3.1 样品的处理与菌种分离

取苔藓样品,用无菌水反复冲洗样品表面,将多遍洗涤后的清洗液用无菌水梯度稀释(10⁻⁴、10⁻⁵、10⁻⁶)后取 200 μL 均匀涂布于基亚历山大罗夫培养基上,置于培养箱内 28℃ 条件下进行培养. 根据菌

落形态、颜色等特征初步判断分离出的菌株种类,并按常规方法挑取单菌落纯化后保存,每个样品进行3次平行处理。

1.3.2 硅酸盐矿物分解细菌初筛

(1) 菌株产吡啶乙酸(IAA)能力的测定

配制浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的色氨酸溶液, 无菌有机滤膜过滤。试管分装高压灭菌 (121°C , 20 min) 处理的有氮培养液 4.0 mL , 加入色氨酸溶液 1.0 mL , 配制浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的色氨酸培养液。分别将实验菌株接种于上述培养液, $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 28°C 条件下振荡培养 72 h 。将样品 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min , 取上清液 1.0 mL , 加入 $50 \mu\text{L}$ $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的正磷酸及 2.0 mL Sackowski's 显色剂, 充分混合后置于恒温 25°C 黑暗处, 显色 30 min , 取出测定 530 nm 波长下吸光值^[21]。无菌处理作为空白调零, 并分别以浓度为 5 、 10 、 20 、 40 、 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 IAA 标准液绘制标准曲线以计算菌株发酵液中的 IAA 浓度。

(2) 菌株产铁载体的测定

将实验菌株接种于有氮培养液中, $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 28°C 振荡培养 48 h 。 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min 取上清液 2.0 mL , 加入 2.0 mL CAS 检测液充分混合, 1 h 后测定 630 nm 波长处吸光值 (A), 以去离子水作为空白对照调零。另取 2.0 mL CAS 检测液与 2 mL 无菌有氮液体培养基充分混合, 测定 630 nm 波长处吸光值, 即为参比值 (A_r)。同时观察反应液颜色变化, 变为黄色说明有铁载体产生, 黄色越深则铁载体产量越多。所用器皿均需先浸泡于浓度为 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液中进行脱铁处理^[22]。

1.3.3 硅酸盐矿物分解细菌复筛

以硅酸盐矿物作为唯一的钾源对分离出的细菌进行培养, 发酵液中 SiO_2 的增量作为检测菌株溶蚀矿物能力的指标^[23]。取 1.0 mL 培养 24 h 的菌悬液 (按 6% 的接种量) 接入装有 20 mL 细菌发酵培养液和 0.2 g 硅酸盐岩石粉的 50 mL 锥形瓶中, 另取 121°C 高温灭活的菌悬液 1 mL 接入培养液作为对照, 每种处理方式做 3 个平行样品。 28°C , $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 7 d , 离心取发酵上清液采用硅钼蓝比色法测定其中硅含量。

1.3.4 细菌 NLX-4 的鉴定

(1) 细菌 NLX-4 的生理生化特性测定

采用 Gram 染色法光学显微镜下观察菌体形态, 并参照文献^[24]对菌株 NLX-4 进行生理生化特性的测定。

(2) 细菌 NLX-4 的 16S rRNA 基因序列分析鉴定

菌株 NLX-4 DNA 提取: 采用 CTAB 法^[25]提取菌株 NLX-4 的基因组 DNA, 采用 ND-1000 微量紫外光度计测定提取到的 NLX-4 基因组 DNA 浓度。取 $2.5 \mu\text{L}$ 基因组 DNA 用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测。

16S rRNA 基因的 PCR 扩增: 扩增 16S rRNA 基因的正向引物 27F ($5'$ -AGAGTTTGATCC/ATGGCTCAG- $3'$) 对应于 *E. coli* 16S rRNA 基因的第 $8 \sim 27$ 个碱基位置, 反向引物 1492R ($5'$ -TACGGTTACCTTGTTACGACTT- $3'$) 对应于 *E. coli* 16S rRNA 基因的第 $1492 \sim 1510$ 个碱基位置。以菌株 NLX-4 的总 DNA 为模板进行扩增。

PCR 反应体系体积为 $25 \mu\text{L}$: $10 \times \text{Taq DNA polymerase buffer}$ $2.5 \mu\text{L}$, $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$ $1.5 \mu\text{L}$, 引物 27F 和 1492R ($10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 各 $0.5 \mu\text{L}$, $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ dNTP $2.0 \mu\text{L}$, $5 \text{ U} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ Taq 酶 $0.15 \mu\text{L}$, 模板 DNA $0.5 \mu\text{L}$, ddH_2O 补足至 $25 \mu\text{L}$ 。

PCR 反应条件: 95°C 预变性 5 min , 95°C 变性 30 s , 52°C 退火 30 s , 72°C 延伸 1 min , 共 30 个循环; 最后 72°C 延伸 10 min 。PCR 产物用经 EB 染色的 1% 琼脂糖凝胶上电泳检测。

PCR 产物分析: PCR 产物的纯化以及测序交由南京金斯瑞生物科技有限公司完成, 将测序结果提交至 GenBank, 采用 BLAST 软件进行比对分析。

1.3.5 细菌 NLX-4 的岩石分解实验

取 1.0 mL 培养 24 h 的菌悬液 ($6.0 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$) 接入装有 100 mL 细菌发酵培养液和 0.5 g 硅酸盐岩石粉的 250 mL 锥形瓶中, 另取 121°C , 20 min 灭活的菌悬液 1.0 mL 接入培养液作为对照, 每种处理方式做 3 个平行样品。将培养 0 、 2 、 5 、 10 、 12 、 15 、 22 、 30 d 的样品分别离心 ($5\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 20 min), 取发酵上清液, 采用 pH 计 (PB-10, 德国 SATORIUS) 测定 pH 值。另取上清液 5.0 mL , 稀释至 25 mL , 取稀释液 5.0 mL 加入 1.0 mL 6% 的 H_2O_2 , 70°C 水浴 30 min 后定容至 10 mL , 过滤取滤液加 1 滴浓硝酸 (65%) 酸化, 采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP, Vista MPX, 美国 Varian) 测定发酵液中 K^+ 、 Al^{3+} 的含量。同时采用硅钼蓝比色法测定发酵上清液中的 Si 元素含量。此外, 分离出岩石矿粉并加入 10 mL 10% 的 H_2O_2 , 充分反应后将容器注满去离子水, 静置 24 h 抽去上层溶液, 采用激光粒度分析仪 (S3500 SI, 美国 Microtrac) 对不同作用时间的岩石颗粒粒径进行测定。

1.3.6 细菌分解岩石有效物质的测定

分别取培养 0、2、5、10、12、15、22、30 d 的发酵液,先采用定性滤纸过滤,矿粉和菌体用少量去离子水迅速冲洗几次,将所有滤液和冲洗液移至 100 mL 容量瓶,定容. 将溶液移至离心管,10 000 r·min⁻¹离心 10 min,采用针头无菌过滤器(滤膜孔径 0.22 μm),过滤. 取滤液 5.0 mL,置于 50 mL 的容量瓶中定容,用移液枪吸取 1.0 mL 移入 1.5 mL 的色谱瓶中,采用高效液相色谱仪(1260,美国 Agilent)对培养液中相关有机酸的浓度进行测定^[26].

另取发酵液 2.0 mL 于 10 mL 离心管,加入 2.0 mL 浓度为 5% 的碘基水杨酸钠混合均匀,静置 1 h 使蛋白质沉淀,再加入 1.0 mL 浓度为 1% 的 EDTA 溶液和 1.0 mL 浓度为 0.06 mol·L⁻¹ 的稀盐酸溶液,5 000 r·min⁻¹离心 15 min. 取上清液 1.0 mL 置于 5 mL 容量瓶中,蒸干,用 1.0 mL (pH = 2.2) 的缓冲液溶解待测.

取培养 0、2、5、10、12、15、22、30 d 平行样品的发酵液,静置沉淀至固液分离,过滤取上清液,加入 95% 的乙醇,8 000 r·min⁻¹离心 10 min 收集多糖,并置于 50℃ 烘干,称重可得发酵液中多糖含量.

1.3.7 数据处理

采用 EXCEL 2010 和 SPSS 22.0 对所得数据进行分析,应用 R 3.3.0 对岩石溶蚀的相关因子进行增强回归树(BRT)分析^[27].

BRT 是以分类回归树算法为基础发展而来,包括回归树算法和 Boosting 方法两个部分^[28]. 作为一种自学习方法,BRT 可产生多重回归树,提高模型稳定性及预测精度^[29]. 即在运算过程中,对一定量数据进行多次随机抽取,分析各自变量对因变量的影响程度,剩余数据用于拟合结果检验,最终生成的多重回归树,取平均值并输出结果. 该分析方法可量化自变量对因变量的影响,分析不同影响因子的贡献率,目前被广泛应用于生态研究中^[30-32].

2 结果与分析

2.1 高效溶岩细菌的筛选

微生物发酵过程中可产生植物的生长激素,如吲哚乙酸(IAA),具有促进植物细胞生长、生根及果实发育的作用^[33]. 微生物产生的铁载体对 Fe³⁺ 具有极强的亲和性^[34],可抑制有害微生物生长,螯合铁、锰、锌等金属离子^[35],促进矿物分解^[36],并提供植物生长所需营养元素. 微生物产铁载体的能

力以 A/A_r 比值作定量指标. A/A_r 比值越小则说明微生物产铁载体能力越强^[22].

对分离到的细菌产 IAA 及铁载体能力测定结果如表 2 所示,22 株细菌具有不同程度的产 IAA 及铁载体的能力. 其中 5 株细菌菌铁载体显色反应为阴性(-),不产铁载体;4 株细菌不产 IAA. 产铁载体能力较强的菌株有 14 株(A/A_r: 0~0.6),产 IAA 浓度大于 10 mg·L⁻¹ 的菌株共 16 株,其中,产 IAA 浓度大于 100 mg·L⁻¹ 的菌株共 3 株,分别为 NLX-19 (110.48 mg·L⁻¹)、NLX-14 (106.84 mg·L⁻¹)、NLX-4 (102.29 mg·L⁻¹). 选择产铁载体能力达“+++”以上且产 IAA 浓度大于 10 mg·L⁻¹ 的 12 株细菌进行复筛.

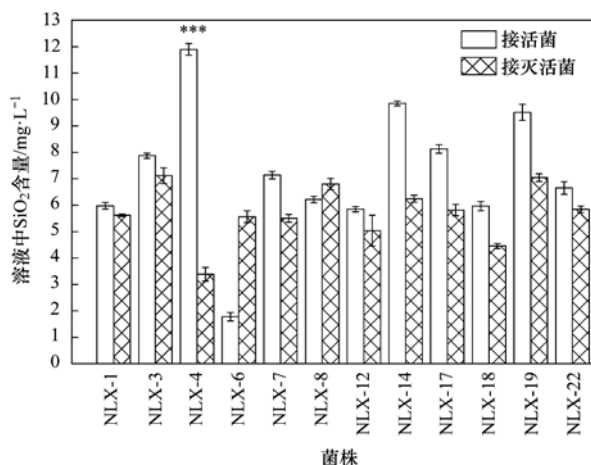
表 2 菌株产 IAA 与铁载体测定结果¹⁾

Table 2 Indoleacetic acid and siderophore productions of the tested strains

菌株	IAA/mg·L ⁻¹	产铁载体能力
NLX-1	80.49	++++
NLX-2	0	+++
NLX-3	66.12	+++++
NLX-4	102.29	++++
NLX-5	75.15	-
NLX-6	42.25	+++++
NLX-7	75.36	++++
NLX-8	45.76	++++
NLX-9	9.95	+++
NLX-10	0	-
NLX-11	68.37	-
NLX-12	83.6	++++
NLX-13	0.83	+
NLX-14	106.84	+++
NLX-4	0	+
NLX-16	0	-
NLX-17	55.92	+++++
NLX-18	81.21	++++
NLX-19	110.48	+++
NLX-20	13.29	++
NLX-21	20.36	-
NLX-22	59.7	++++

1) A/A_r 为 0~0.2,表示为++++; A/A_r 为 0.2~0.4,表示为++++; A/A_r 为 0.4~0.6,表示为+++; A/A_r 为 0.6~0.8,表示为++; A/A_r 为 0.8~1.0,表示为+

由图 1 可以看出,进行复筛的 12 株细菌中,细菌 NLX-4 作用下培养 7 d 的发酵液释放的硅含量比对照组显著增加,同时,对比其他菌株,其促进硅元素释放的作用也最明显(11.90 mg·L⁻¹). 说明在该细菌的生长代谢过程可有效促进岩石的溶解,并导致其中硅元素的释放量增加. 结合两次筛选结果,选择菌株 NLX-4 作为目的细菌进行下一步研究.



显著性水平: *** 表示 $P < 0.001$

图1 菌株对硅酸盐矿物的溶蚀作用

Fig. 1 Dissolution of silicate minerals in 7 days

2.2 细菌 NLX-4 的鉴定

经染色镜检,判断 NLX-4 为革兰氏阴性杆菌. 生理生化特性试验结果如下: 过氧化氢酶试验,硝酸盐还原试验,反应为阳性; M. R. 试验, V. P. 试验, 淀粉水解试验, 明胶液化试验, 糖醇类发酵试验(葡萄糖、果糖、乳糖、半乳糖、甘露糖、甘露醇)反应为阴性.

对菌株 NLX-4 (No. KX379232) 的 16S rRNA 基因进行扩增和测序,并将结果与 NCBI 数据库比对,

BLAST 表明其与假单胞菌属的 *Pseudomonas protegens* CY01 (No. JX082197) 相似性极高, 达到 99% 以上. 结合其生理生化特性, 该菌株被鉴定为 *Pseudomonas protegens*.

2.3 细菌 NLX-4 分解硅酸盐岩的能力

由于钾(K)、铝(Al)、硅(Si)为实验所用硅酸盐岩样本的3大主要组成元素(表1),因此选择这3种元素作为细菌风化硅酸盐岩能力的指标. 对发酵中3种元素的浓度进行测定(图2),可见相对于对照组,实验组的3种元素浓度在实验过程中均出现显著增加. K^{2+} 浓度[图2(a)]在0~15 d 呈现大幅上升,15 d~30 d 期间持续上升但增幅减缓,在30 d 时浓度已增至 $85.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 实验组发酵液中 Al^{3+} 与 SiO_2 含量[图2(b)和2(c)]也呈现相似的变化趋势,均在细菌作用下显著增加,并于30 d 时分别达到最大值 $96.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $32.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明细菌作用于岩石,促进岩石溶解并释放其中组成元素. 而在15 d 后, K^{+} 、 Al^{3+} 、 SiO_2 含量的上升趋势减缓则说明,在密闭环境中,随着环境条件的变化,细菌溶蚀岩石释放元素的速率有所下降^[37].

在对不同培养时间下岩石粒径的变化量进行分析时发现(表3),受到细菌 NLX-4 的作用,岩石发生溶解,粒径不断减小,在0~15 d 期间岩石粒径的减小量呈上升趋势,并在15 d 时达到最大值2.18

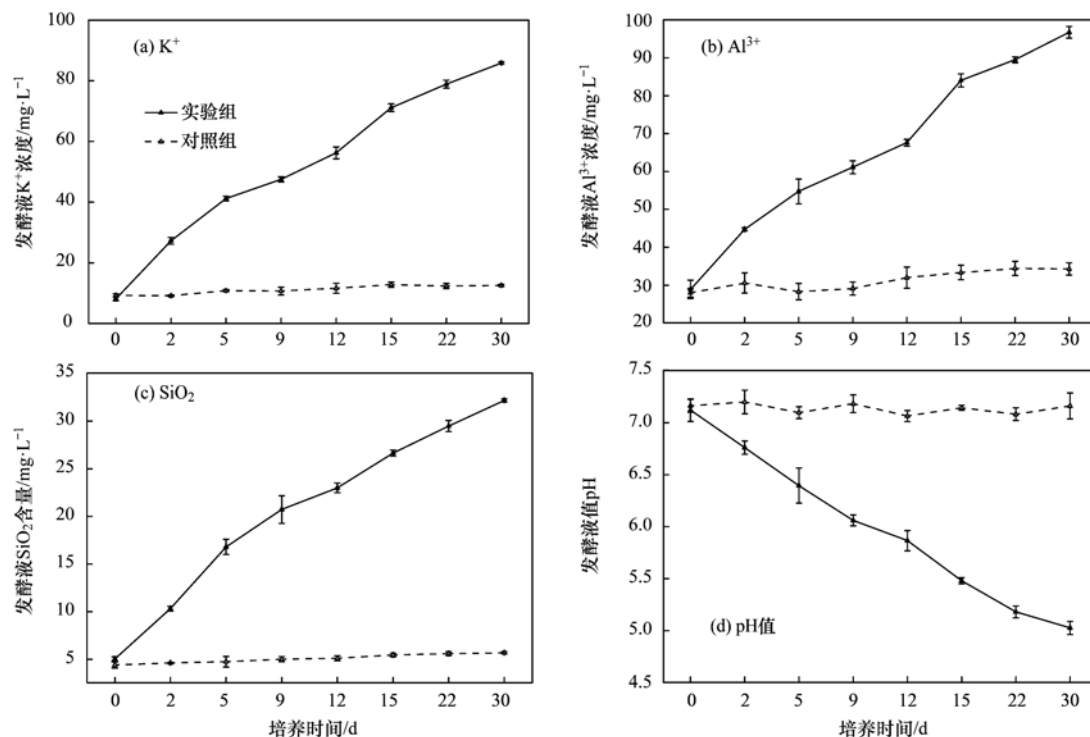


图2 发酵液 K^{+} 、 Al^{3+} 、 SiO_2 浓度及 pH 值

Fig. 2 Concentrations of K^{+} , Al^{3+} , SiO_2 and pH value in fermentation broth

μm,此后岩石粒径的减小量不断下降,至 30 d 时降为 1.60 μm. 该结果进一步说明在 30 d 的实验过程中,细菌 NLX-4 持续促进岩石分解,但在 15 d 后其分解岩石作用有所减弱.

由发酵液 pH 的变化可知[图 2(d)],细菌 NLX-4 具有降低培养液浓度的能力. 对照组培养液

pH 值在实验过程中变化不显著. 实验组培养液 pH 值在实验 0~15 d 显著下降; 15~30 d 仍持续下降,但下降速度减缓,至实验结束 pH 值降至 5.03. 结合以上 3 种元素的释放量以及岩石粒径的变化,可以看出,细菌代谢产生的酸性物质导致环境 pH 降低,可有效促进岩石的溶蚀.

表 3 岩石粒径变化量¹⁾

Table 3 Particle diameter variation of the rock sample

培养时间/d	0	2	5	9	15	22	30
岩石粒径变化量(P)/μm	0	1.10	1.44	1.84	2.18	1.88	1.60

1) $P = P_x - P_y$, P 为岩石粒径变化量, P_x 为实验组相邻培养时间测得岩石粒径差值, P_y 为对照组相邻培养时间测得岩石粒径差值

2.4 细菌 NLX-4 分解硅酸盐岩的有效物质

有研究证明,经实验条件培养的细菌可产生多种有机酸^[38],在其创造的酸性环境中, H^+ 可置换出岩石矿物中的 K^+ 、 Al^{3+} 等阳离子,加速矿物的溶蚀. 因此,本实验选取草酸、柠檬酸、酒石酸、苹果

酸这 4 种有机酸作为高效液相色谱测定指标. 由测定结果可知(表 4),细菌发酵液中酒石酸浓度远高于其他 3 种有机酸,且随时间的变化与培养液 pH 值呈相反趋势,于培养 30 d 时达到最大值 1 025.87 $mg \cdot L^{-1}$.

表 4 发酵液有机酸浓度¹⁾

Table 4 Concentrations of organic acids in fermentation broth

时间/d	草酸			柠檬酸		
	出峰时间	含量/ $mg \cdot L^{-1}$	标准差	出峰时间	含量/ $mg \cdot L^{-1}$	标准差
0	/	0.00	0.00	/	0.00	0.00
2	6.88	41.99	1.54	8.05	31.15	1.30
5	6.89	65.70	2.45	8.05	47.84	1.63
9	6.88	78.20	2.58	8.05	64.22	2.37
12	6.87	70.57	3.01	8.05	59.45	0.80
15	6.87	49.57	2.42	8.05	44.77	0.72
22	6.87	31.88	1.14	8.04	35.99	1.05
30	6.87	26.08	1.19	8.05	32.44	1.11

时间/d	酒石酸			苹果酸		
	出峰时间	含量/ $mg \cdot L^{-1}$	标准差	出峰时间	含量/ $mg \cdot L^{-1}$	标准差
0	/	0.00	0.00	/	0.00	0.00
2	8.57	364.19	2.63	9.52	38.88	1.91
5	8.57	569.41	10.40	9.51	74.15	1.05
9	8.57	690.08	7.26	9.52	91.68	2.00
12	8.57	777.38	8.71	9.52	123.68	6.43
15	8.57	956.98	5.53	9.52	103.32	2.69
22	8.57	992.32	5.51	9.51	84.73	1.36
30	8.57	1 025.87	5.14	9.52	75.58	3.51

1) 对照组中 4 种有机酸均未检测出

在与岩石混合发酵培养的过程中,细菌 NLX-4 代谢产生氨基酸与多糖,使发酵液中的氨基酸与多糖含量显著增加. 由图 3(a)可以看出,在培养前期(0~12 d)氨基酸含量显著上升,此后 12~15 d 期间增幅大幅上升,15 d~30 d 持续上升,但增幅明显减缓. 多糖含量则在 0~9 d 时大幅上升,此后至 12 d 增幅减缓,12~22 d 增幅再次上升,22~30 d 多糖含量下降[图 3(b)]. 表明在实验后期,细菌生成并分泌多糖的速率降低,小于多糖被利用分解的速率^[39].

2.5 细菌 NLX-4 分解岩石机制的增强回归树(BRT)分析

运用 BRT 模型分析草酸、柠檬酸、酒石酸、苹果酸、氨基酸以及多糖这 6 种因子对岩石钾元素释放的影响. 采用以下调整设置进行生态建模:树复杂性(tree complexity) = 5,学习速率(learning rate) = 0.01,袋分数(bag fraction) = 7. 采用分析软件 R 3.3.0 进行 BRT 分析,训练数据的相关性为 0.988,验证数据相关性为 0.996,二者 ROC 值均大于 0.8,说明 BRT 分析结果可靠^[40]. 分析结果如图 4 所示,

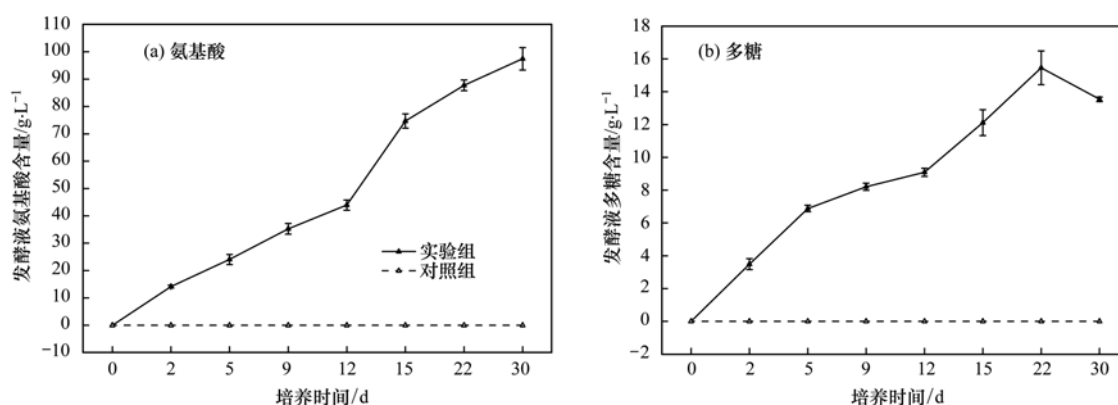


图3 发酵液中氨基酸及多糖含量

Fig. 3 Contents of amino acid and polysaccharide in fermentation broth

酒石酸对 K 元素从岩石的溶出影响最大, 对其产生了 50.1% 的贡献率. 其余变量对 K 元素释放的影响程度分别为: 多糖(31.9%) > 柠檬酸(7.5%) > 氨基酸(5.3%) > 草酸(3.4%) > 苹果酸(1.7%). 此外, 随着酒石酸浓度的增大($>777 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 该酸对

岩石的溶蚀作用越强, 释放的 K 元素越多. 由于酒石酸与 pH 呈负相关($P < 0.01$), 对 pH 具有显著调控作用, 因此, 其创造的酸性环境可有效促进岩石中 K 元素的析出. 同时, 多糖($>8.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)也与 K 元素的溶出呈现正相关关系. 说明本实验中细菌 NLX-4 促进岩石溶蚀是多种因子共同作用的结果^[41].

在采用 BRT 模型对岩石 Al 元素释放的影响因子分析中可以看出(图 5), 最主要的影响因子是酒石酸, 其贡献率为 69.3%. 其他因子贡献率依次为: 多糖(16.2%) > 柠檬酸(5.1%) > 草酸(4.6%) > 氨基酸(4.3%) > 苹果酸(0.6%). 且随着酒石酸浓度的增加($>777 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 该变量对 Al 元素溶出的促进作用越显著, 呈现正相关关系. 此外, 多糖含量大于 $8.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 随着其含量增加, 该变量与 Al 元素释放量呈正相关. 因此, 岩石中 Al 元素的溶出受到多种变量共同影响.

在细菌 NLX-4 释放 Si 元素的 BRT 分析中可以发现(图 6), 贡献率最大的影响因子为多糖(50.7%), 其次为酒石酸(31.2%), 其余 4 种变量的贡献率分别为: 柠檬酸(9.1%), 氨基酸(4.9%), 草酸(3.1%), 苹果酸(1.1%). 多糖($>8.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)与酒石酸($>777 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)含量均与 Si 元素释放量呈正相关关系. 由于 Si 元素及其氧化物的特殊理化性质, 在细菌对硅酸盐岩的促溶作用中, Si 元素的析出主要通过多糖与小分子有机酸的络合作用实现^[42].

综上所述, 酒石酸是促进岩石溶解并释放 K、Al 元素的主要因素, 且在浓度高于 $777 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时起到显著促进作用. 多糖使促进岩石溶蚀并释放 Si 元素的主要因素, 且在含量高于 $8.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时促进作用明显.

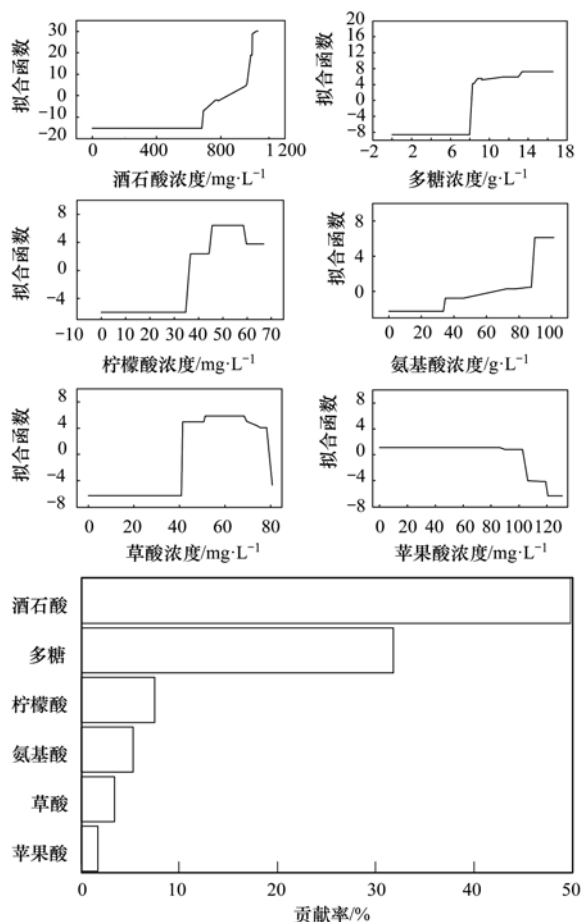


图4 菌株 NLX-4 解钾主要因素的 BRT 分析

Fig. 4 BRT analysis of the relationship between potassium releasing and six factors

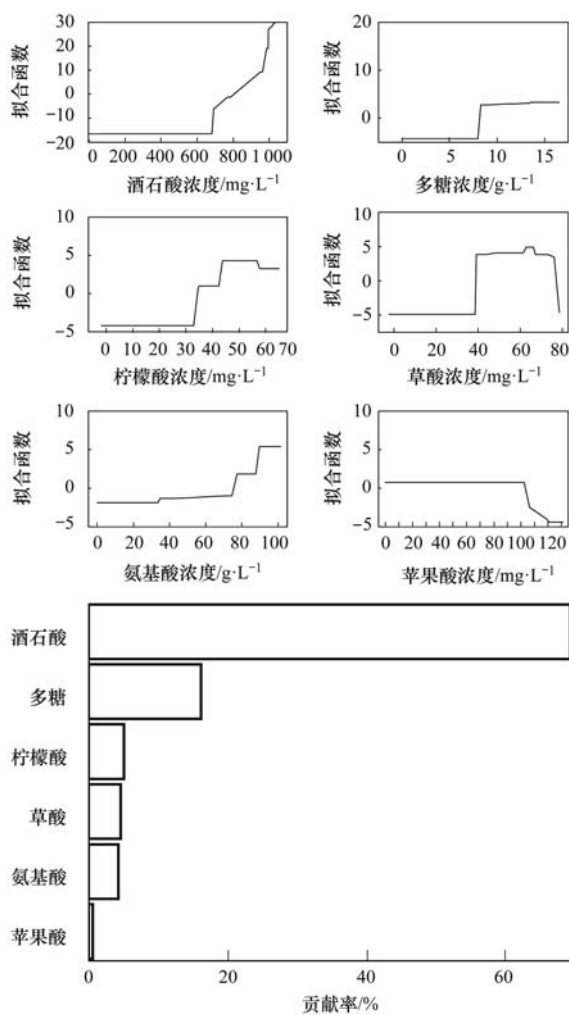


图5 菌株 NLX-4 释铝主要因素的 BRT 分析

Fig. 5 BRT analysis of the relationship between aluminum releasing and six factors

3 讨论

3.1 高效菌株的筛选特性

岩石矿区蕴藏丰富的含硅矿物,但其中大部分以稳定的铝硅酸盐状态存在,无法被植物直接吸收利用^[43]. 硅酸盐岩分解细菌能高效促进该类矿物溶解,并释放多种营养元素^[44]. 同时,一些特定的微生物在其生命过程中能产生如吡啶乙酸(IAA)、赤霉素等生长激素促进植物生长^[45],此外,还可产生能够与 Fe^{3+} 等金属离子发生络合反应的铁载体,使元素从岩石析出,从而促进岩石分解^[34]. 不同岩石风化实验中的矿物材料来源不同,而岩石矿物结构复杂多样,不同实验室筛选到的菌株溶蚀岩石能力强弱可能存在差异,无法对不同类型的硅酸盐岩矿物均产生良好的分解效能^[11]. 这一问题将导致筛选出的菌株在实际应用中产生效果不稳定,因此,

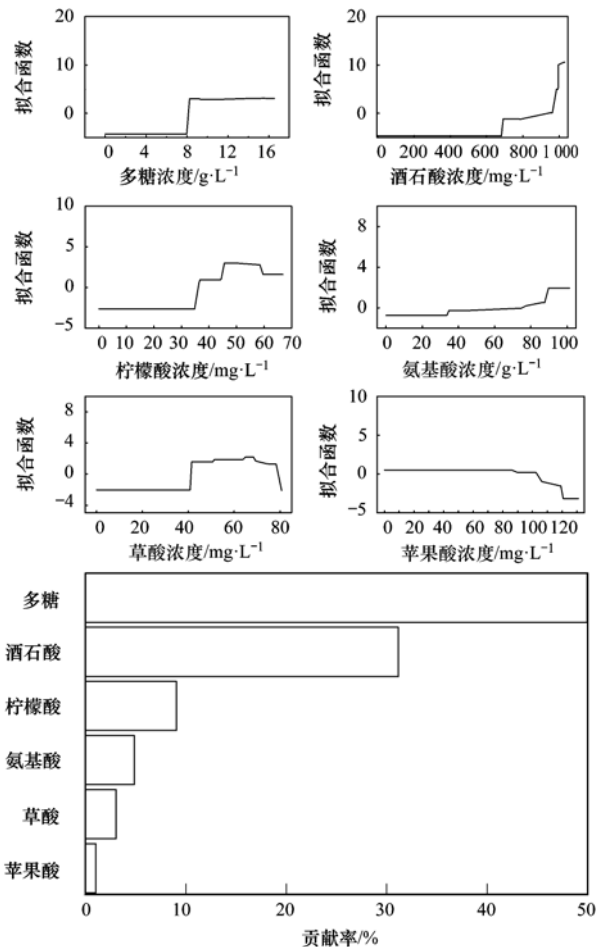


图6 菌株 NLX-4 脱硅主要因素的 BRT 分析

Fig. 6 BRT analysis of the relationship between desilicification and six factors

应综合多项指标对菌株进行定向筛选. 本研究不仅考量了菌株 NLX-4 对岩石的风化效果,还选择了可代谢产生 IAA 和铁载体两种植物促生物质作为指标进行定向筛选,以期开发硅酸盐岩菌种更为丰富的潜在功效.

3.2 菌株 NLX-4 促进岩石溶蚀的作用机制

岩石表面的生存环境对微生物而言更为严苛,为了维持正常的生命活动与种群延续,岩表微生物主要采取是相互协作或共生方式,而非土壤中常见的互相竞争或抑制,从而不同类群的微生物可保留各自所需微量水分与有限养分^[46],而一旦温度、养分及湿度等环境条件变得适宜微生物生长,则将促使其进入岩石缝隙以扩大生存的空间,加速矿物的风化进程. 因此,在岩石分解细菌的生命过程中,会分泌一些有效物质,促进岩石溶蚀,获得自身生长繁殖所需的营养与空间环境^[47]. 本实验探究的高效分解岩石细菌选自岩生苔藓表面,在对其岩石分解能力的研究中发现,该菌株的代谢活动降低了发酵

液 pH, 创造酸性环境, 促使岩石发生溶蚀, 释放其中的 K、Al、Si 元素, 最终导致岩石粒径不断减小。

已有研究表明, 硅酸盐岩分解细菌可代谢分泌如草酸、柠檬酸、酒石酸等有机酸, 对硅酸盐矿物产生显著促溶作用^[48]。此外, 细菌代谢产生的小分子有机酸、氨基酸及胞外多糖等, 还可通过与溶液中的阳离子进行络合而促进风化岩石的反应正向进行^[49]。经研究发现^[50], 相同酸性条件下, 有机酸对矿物的溶蚀能力是无机酸的 10 倍以上, 络合作用被认为在这一过程中起到了重要作用。本研究筛选的高效菌株 NLX-4 分泌的酒石酸可显著降低发酵液 pH。此外, 通过 BRT 分析, 可以发现, 岩石中 K、Al 元素的溶出主要是由于酒石酸创造酸性环境, 岩石被酸解, 且当酒石酸浓度大于 $777 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对岩石促溶作用显著。岩石中 Si 元素的析出则主要由于细菌分泌多糖对其产生络合作用, 且当多糖浓度高于 $8.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时促进元素释放、岩石分解效果显著。说明有机酸与多糖均需环境中达到一定浓度才能对岩石发挥良好的促分解效果^[9]。

3.3 菌株 NLX-4 在矿区修复中的潜在作用

过度的开采活动导致岩石矿区土壤流失, 植被减退, 岩石裸露, 对其生境造成严重的破坏^[51]。因此, 微生物对岩石的风化作用在环境极度恶化地区具有重要意义。岩石分解菌株可将岩石分解为细粒, 进而形成土壤^[16]。同时, 将岩石中难以被植物吸收利用的营养元素转化为离子形式, 以促进植物在贫瘠地区的生根繁殖^[52]。此外, 硅酸盐岩分解菌株 NLX-4 还可产生吡啶乙酸及铁载体这 2 种促进植物生长的物质, 对岩石矿区被破坏生境具有极大的修复潜力。但应用于破坏生境修复中的菌种不仅需具备高效性, 也需具备对环境的良好适应性^[53]。因此, 进一步的应用研究中, 需探究细菌 NLX-4 对岩矿区环境的适应能力, 以及对该菌株的驯化改良。

4 结论

(1) 菌 NLX-4 分离自岩生苔藓表面, 具有高效产植物促生物质 IAA 及铁载体的功能, 并经生理生化特性测定与 16S rRNA 基因序列分析鉴定该菌株为 *Pseudomonas protegens*。

(2) *Pseudomonas protegens* NLX-4 可通过分泌酒石酸及多糖显著促进岩石溶蚀, 释放其中 K、Al、Si 这 3 种主要组成元素。其中, 酒石酸在浓度大于 $777 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时显著促进 K、Al 元素从岩石中析出, 且浓度越大, 释放元素作用越强。多糖在含量高于 8.21

$\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对 Si 元素释放具有显著促进作用, 且其浓度变化与解硅作用呈正相关。此外, 参与分析的其余变量也分别对岩石溶解, 元素释放具有一定贡献率。说明不同促溶物质对岩石的不同组成成分产生的作用强度不同, 同时发挥作用的有效物质需积累达到一定的浓度, 此外, 促进岩石溶解是多种因素共同作用的结果。

(3) 本研究筛选并鉴定了高效产植物促生物质并分解硅酸盐矿物的菌株 *Pseudomonas protegens* NLX-4, 结合生态统计分析方法 BRT 探究其促溶机制, 进一步证明其有效性。为解决岩石矿区生境中突出的水土流失、裸岩遍布等问题提供了良好的菌种资源与新的思路。

参考文献:

- [1] 杜乐天, 黄志章. 硅酸盐岩石中价岐化法则[J]. 地球化学, 1984, (3): 273-281.
Du L T, Huang Z Z. Valence dipolarization in silicate rocks[J]. Geochimica, 1984, (3): 273-281.
- [2] 方瑛, 马任甜, 安韶山, 等. 黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1121-1127.
Fang Y, Ma R T, An S S, et al. Heidaigou opencast coal mine: soil enzyme activities and soil physical and chemical properties under different vegetation restoration [J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 1121-1127.
- [3] 王晓学, 李叙勇, 吴秀芹. 基于元胞自动机的喀斯特石漠化格局模拟研究[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 907-914.
Wang X X, Li X Y, Wu X Q. Pattern simulation of karst rocky desertification based on cellular automata [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 907-914.
- [4] 冷菁. 吉林省梅河矿区废弃地生态恢复评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Leng J. Research on the assessment of ecological restoration for the mining wasteland in Meihe mining area of Jilin province [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [5] Borland H, Ambrosini V, Lindgreen A, et al. Building theory at the intersection of ecological sustainability and strategic management[J]. Journal of Business Ethics, 2016, 135(2): 293-307.
- [6] 赵耀娟. 抚顺市闭坑矿山环境恢复治理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
Zhao Y J. Research on closed mine environmental recovery and management in Fushun city [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [7] von Herrath M G, Fujinami R S, Whitton J L. Microorganisms and autoimmunity: making the barren field fertile? [J]. Nature Reviews Microbiology, 2003, 1(2): 151-157.
- [8] 王琪. 不同微生境钾质粗面岩表生细菌群落结构与细菌对岩石的风化效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
Wang Q. Potassic trachyte-associated bacterial communities and their involvement in rock weathering [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [9] 肖国光, 孙德四, 曹飞. 硅酸盐细菌代谢产物影响斜长石风

- 化作用的模拟试验[J]. 矿物岩石, 2013, **33**(1): 8-15.
- Xiao G G, Sun D S, Cao F. Weathering of silicate minerals by metabolites produced by silicate bacteria in culture experiments [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2013, **33**(1): 8-15.
- [10] 孔明明. 两种细菌和两种有机酸对层状硅酸盐矿物分解的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- Kong M M. Effects of two silicate mineral-solubilizing bacteria and two kinds of organic acids on decomposition of phyllosilicates [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [11] 申泰铭, 邢必果, 李为, 等. 不同种类微生物及其碳酸酐酶对 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -碳酸盐系统中碳酸盐岩的溶蚀作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, **33**(6): 797-800.
- Shen T M, Xing B G, Li W, *et al.* Characteristics of carbonate rock corrosion by different kinds of microbes and their carbonic anhydrases in the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -carbonate system [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, **33**(6): 797-800.
- [12] 刘娟, 凌婉婷, 盛月慧, 等. 根表功能细菌生物膜及其在土壤有机污染控制与修复中的潜在应用价值[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2112-2117.
- Liu J, Ling W T, Sheng Y H, *et al.* Biofilm formation of functional bacteria on root surfaces and its potential applications on organic contaminant control and soil remediation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(11): 2112-2117.
- [13] 赵江曼, 朱明龙, 张旭, 等. 硅酸盐细菌的筛选、鉴定和对铝硅酸盐矿物的作用研究[J]. 高校化学工程学报, 2014, **28**(5): 1036-1043.
- Zhao J M, Zhu M L, Zhang X, *et al.* The screening and identification of silicate bacteria and its interaction with aluminosilicate minerals[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2014, **28**(5): 1036-1043.
- [14] 李冰, 赵勋, 王岩, 等. 胶质芽孢杆菌工业化发酵研究进展[J]. 农业科学研究, 2014, **35**(1): 68-72.
- Li B, Zhao X, Wang Y, *et al.* Research and progress on industrial fermentation of *Bacillus mucilaginosus*[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2014, **35**(1): 68-72.
- [15] 郭芯岐. 云母矿区不同生态环境中可培养矿物分解细菌对黑云母的风化作用及其种群结构研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Guo X Q. Biotite weathering by the mineral-weathering bacteria isolated from the different environments in the mica mine area and the population of the mineral-weathering bacteria[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [16] 张文彬. 钾矿区不同生境可培养矿物风化细菌风化矿物效应及其系统发育关系研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Zhang W B. Mineral weathering and phylogenetic relationship of mineral weathering bacteria from different habitats in potassium mine[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [17] 杨琳璐, 王中生, 周灵燕, 等. 苔藓和地衣对环境变化的响应和指示作用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, **36**(3): 137-143.
- Yang L L, Wang Z S, Zhou L Y, *et al.* Response and bioindicator of bryophyte and lichen as cryptogam plants to environmental change[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2012, **36**(3): 137-143.
- [18] 王华磊. 结皮微生物资源菌株筛选及其代谢产物研究[D]. 唐山: 河北联合大学, 2013.
- Wang H L. Crust microbial strains screening and study on its metabolite[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2013.
- [19] 吴凯. 调控烟草根际拮抗菌数量防控土传烟草青枯病效果及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Wu K. Study on the mechanisms of manipulating the population of antagonist to suppress tobacco bacterial wilt[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [20] 王朝华. 嗜酸菌与黄铁矿作用的实验研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- Wang C H. Experimental study on oxidation of pyrite mediated by acidophilic bacteria[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [21] Bano N, Musarrat J. Isolation and characterization of phosphate degrading soil bacteria of environmental and agronomic significance[J]. Letters in Applied Microbiology, 2003, **36**(6): 349-353.
- [22] 王平, 董飏, 李阜棣, 等. 小麦根圈细菌铁载体的检测[J]. 微生物学通报, 1994, **21**(6): 323-326.
- Wang P, Dong B, Li F D, *et al.* Detection and determination of the siderophores produced by wheat rhizobacteria [J]. Microbiology, 1994, **21**(6): 323-326.
- [23] Welch S A, Ullman W J. The effect of organic acids on plagioclase dissolution rates and stoichiometry[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, **57**(12): 2725-2736.
- [24] 中国科学院微生物研究所细菌分类组. 一般细菌常用鉴定方法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [25] 王美玲. 一株海洋细菌基因组文库的构建及岩藻多糖酶基因的筛选[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- Wang M L. The study on construction of genomic library of a marine bacteria and screening its fucoidanase gene[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013.
- [26] 游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 等. 低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 173-179.
- You R, Liang L, Qin C Q, *et al.* Effect of low molecular weight organic acids on the chemical speciation and activity of mercury in the soils of the water-level-fluctuating zone of the three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 173-179.
- [27] Ridgeway M E, Silveira J A, Meier J E, *et al.* Microheterogeneity within conformational states of ubiquitin revealed by high resolution trapped ion mobility spectrometry[J]. Analyst, 2015, **140**(20): 6964-6972.
- [28] 余玉萍, 陈淑清. 基于增强回归树的水藻预测分析[J]. 长春大学学报, 2015, **25**(3): 20-23.
- She Y P, Chen S Q. Forecast and analysis of algae based on Boosted Regression Tree[J]. Journal of Changchun University, 2015, **25**(3): 20-23.
- [29] Cheong Y L, Leitão P J, Lakes T. Assessment of land use factors associated with dengue cases in Malaysia using Boosted Regression Trees[J]. Spatial and Spatio-temporal Epidemiology, 2014, **10**: 75-84.
- [30] Pittman S J, Costa B M, Battista T A. Using Lidar Bathymetry and Boosted Regression Trees to predict the diversity and abundance of fish and corals[J]. Journal of Coastal Research, 2009, **53**(S): 27-38.
- [31] Weisberg P J, Shandra O, Becker M E. Landscape influences on recent timberline shifts in the Carpathian Mountains: abiotic

- influences modulate effects of land-use change [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2013, **45**(3): 404-414.
- [32] 蔡文华, 杨健, 刘志华, 等. 黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子[J]. 生态学报, 2012, **32**(11): 3303-3312.
- Cai W H, Yang J, Liu Z H, *et al.* Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(11): 3303-3312.
- [33] 邵佳慧. 解淀粉芽孢杆菌 SQR9 吡啶乙酸合成途径及促生效应的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Shao J H. Indole-3-acetic acid synthesis pathways and plant-growth-promotion effects of bacillus amyloliquefaciens SQR9 [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [34] 王诗忠. 铁载体降低金属生物毒性的机制研究[D]. 广州: 中山大学, 2012.
- Wang S Z. Role of siderophore in reducing metal toxicity [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2012.
- [35] Deshmukh G M, Shete A, Pawar D M. Oxidative absorption of hydrogen sulfide using an iron-chelate based process: chelate degradation [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2013, **88**(3): 432-436.
- [36] 何琳燕, 张垠, 盛下放, 等. 一株产铁载体细菌的筛选及其与云母的相互作用[J]. 高校地质学报, 2012, **18**(1): 117-124.
- He L Y, Zhang Y, Sheng X F, *et al.* Isolation of a siderophore-producing bacterial strain and mica-bacterial interactions [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, **18**(1): 117-124.
- [37] 张永东, 钱一雄, 王恕一. 石英在碱性成岩环境中的溶蚀作用规律探讨及实验模拟[A]. 中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第 15 届学术年会论文摘要集(5) [C]. 长春: 中国矿物岩石地球化学学会, 2015.
- [38] 王建萍. 三株细菌胞外聚合物(EPS)对矿物细颗粒表面性质的影响及改性作用[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- Wang J P. The effect and modification of surface properties mineral granules mediated by three common bacteria and extracellular polymeric substances (EPS) [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015.
- [39] 李欧. *Paenibacillus elgii* B69 胞外多糖结构鉴定及生物合成途径研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Li O. Structural characterization and identification of biosynthetic pathway of the exopolysaccharide from *Paenibacillus elgii* B69 [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [40] 焦琳琳, 常禹, 申丹, 等. 利用增强回归树分析中国野火空间分布格局的影响因素[J]. 生态学报, 2015, **34**(8): 2288-2296.
- Jiao L L, Chang Y, Shen D, *et al.* Using boosted regression trees to analyze the factors affecting the spatial distribution pattern of wildfire in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(8): 2288-2296.
- [41] 王明霞, 袁玲, 黄建国, 等. 4 株外生菌根真菌对 Al^{3+} 吸收与吸附的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3479-3485.
- Wang M X, Yuan L, Huang J G, *et al.* Al^{3+} absorption and assimilation by four ectomycorrhizal fungi [J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3479-3485.
- [42] 马光友. 产酸与产多糖细菌对硅酸盐矿物的风化效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- Ma G Y. Silicate mineral weathering by organic acid-or exopolysaccharides-producing bacteria [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [43] 孙德四, 陈晔, 曹飞. 细菌-矿物接触方式对铝土矿降解的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2013, **42**(1): 122-128.
- Sun D S, Chen Y, Cao F. Influence of microbe-mineral contact model on decomposition of bauxite [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, **42**(1): 122-128.
- [44] 俞雅君. 砂质红壤剖面矿物风化细菌的分离筛选及其系统发育关系研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Yu Y J. Isolation and screening of the mineral-weathering bacteria from a sandy red soil profile and study on their phylogenetic relationships [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [45] 陈宝. 内生细菌促进东南景天 Zn/Cd 的提取效应及其机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Chen B. The effects and mechanisms of endophytic bacteria promoting Zn/Cd phytoextraction by *Sedum alfredii* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [46] 朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 等. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(6): 1107-1116.
- Zhu Y G, Duan G L, Chen B D, *et al.* Mineral weathering and element cycling in soil-microorganism-plant system [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, **57**(5): 888-896.
- [47] 刘成禹, 李宏松. 岩石溶蚀的表现特征及其对物理力学性质的影响[J]. 地球与环境, 2012, **40**(2): 255-260.
- Liu C Y, Li H S. Study on the expressive characteristics of rock corrosion and its effect on physical and mechanical properties of rock surface layer [J]. Earth and Environment, 2012, **40**(2): 255-260.
- [48] 王秀林, 孙德四, 曹飞. 硅酸盐细菌代谢产物对不同结构硅酸盐矿物风化作用的影响[J]. 非金属矿, 2013, **36**(1): 1-4.
- Wang X L, Sun D S, Cao F. The influence of silicate bacterial metabolites on weathering of silicate minerals with different crystal structures [J]. Non-Metallic Mines, 2013, **36**(1): 1-4.
- [49] Welch S A, Barker W W, Banfield J F. Microbial extracellular polysaccharides and plagioclase dissolution [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, **63**(9): 1405-1419.
- [50] Wieland E, Wehrli B, Stumm W. The coordination chemistry of weathering: III. A generalization on the dissolution rates of minerals [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, **52**(8): 1969-1981.
- [51] 杨振意, 薛立, 许建新. 采石场废弃地的生态重建研究进展[J]. 生态学报, 2012, **32**(16): 5264-5274.
- Yang Z Y, Xue L, Xu J X. Advances in ecology restoration of abandoned quarries [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(16): 5264-5274.
- [52] Rey P F. Opalisation of the Great Artesian Basin (central Australia): an Australian story with a Martian twist [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2013, **60**(3): 291-314.
- [53] 秦莉, 高茹英, 徐亚平, 等. 堆肥中高效降解纤维素及金霉素和土霉素的复合菌系的构建[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(30): 465-470.
- Qin L, Gao R Y, Xu Y P, *et al.* Construction of a high-efficiency complex microbial system to degrade cellulose and chlortetracycline and oxytetracycline in compost [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(30): 465-470.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301

