

强抗镉真菌的分离鉴定及溶磷能力研究

冯宏^{1,2,3}, 李永涛³, 张干¹, 罗春玲¹

(1 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642)

摘要:通过在培养基中加入 200 mg/L 镉($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), 从电子垃圾污染区土壤中筛选到 1 株强抗镉真菌, 经 ITS 序列鉴定为月状旋孢腔菌 *Cochliobolus lunatus*. 该菌株可在镉质量浓度为 2 000 mg/L 的 PDA 平板上生长良好, 抗性试验结果表明, 菌株对镉的抗性可能与该菌在生长过程中产生碱性物质有关; 菌株对镉、铅、锌和铜的最小抑菌浓度(MIC)均超过 500 mg/L, 菌株对 9 种重金属离子抗性的强弱顺序大致为: Zn^{2+} 、 Cd^{2+} > Pb^{2+} > Cu^{2+} > Co^{2+} > Ni^{2+} 、 Cr^{2+} > Hg^{2+} 、 Ag^+ . 该菌株对 3 种难溶性的磷酸盐具有溶磷作用, 溶磷能力强弱顺序为: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (104 mg/L) > AlPO_4 (86 mg/L) > $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (17 mg/L).

关键词: 镉抗性; 月状旋孢腔菌; 溶磷

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2013)02-0177-05

Screening, Identification of Fungi with High Cadmium-Resistance and its Solubilization Capacity of Insoluble Phosphates

FENG Hong^{1,2,3}, LI Yongtao³, ZHANG Gan¹, LUO Chunling¹

(1 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A fungus with high cadmium resistance was isolated from the soil polluted by e-waste primitive recycling activity by adding definite concentration of Cd (200 mg/L) as $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ in the medium. The fungus belonged to *Cochliobolus lunatus* according to ITS rDNA sequences. This strain was able to grow well on PDA plate containing 2 000 mg/L Cd^{2+} , and its cadmium resistance might be ascribed to the production of alkaline materials during its growth. Apart from Cd^{2+} , this strain could tolerate Pb^{2+} , Zn^{2+} and Cu^{2+} efficiently as well. The resistance decreased in the order of Zn^{2+} , Cd^{2+} > Pb^{2+} > Cu^{2+} > Co^{2+} > Ni^{2+} , Cr^{2+} > Hg^{2+} , Ag^+ . This strain could grow in the liquid medium with three different inorganic phosphates, and the phosphate solubilization capacity was in the order of $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (104 mg/L) > AlPO_4 (86 mg/L) > $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (17 mg/L).

Key words: cadmium-resistance; *Cochliobolus lunatus*; solubilizing phosphorus

金属镉具有很强的生物毒性, 通过参与生物体的多种生化过程干扰细胞正常代谢, 还能引起 DNA 断裂, 损坏 DNA 修复系统, 引起细胞凋亡^[1]. 镉在土壤中极易被作物吸收并富集在籽实内进入食物链, 对人体健康造成危害. 近年来, 我国出现的稻米镉超

标事件引起了科学家们的广泛关注. 微生物可以对土壤中的重金属进行固定、移动或转化, 改变它们在土壤中的环境化学行为, 可促进有毒、有害物质解毒或降低毒性, 从而达到生物修复的目的^[2]. 因此, 不断开发强抗镉微生物种质资源, 并探索其促生特性

收稿日期: 2012-09-09 网络出版时间: 2013-01-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20130122.1709.004.html>

作者简介: 冯宏(1977—), 女, 博士研究生; 通信作者: 张干(1967—), 男, 研究员, 博士, E-mail: zhanggan@gig.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(40901129)

成为当前研究的热点. 镉抗性微生物的筛选与特性研究在国内外广泛开展, 其菌株主要从矿区土壤^[3-6]、冶炼厂土壤^[7]、重金属污染土壤^[8]和普通土壤^[9-11]中筛选得到, 而从电子垃圾污染区的特殊生境中分离重金属抗性菌却鲜见报道. 本研究从电子垃圾污染区土壤中分离出1株对镉具有较强抗性的菌株, 并运用分子生物学方法对该菌株进行鉴定. 以最小抑制浓度 (Minimal inhibitory concentration, MIC) 为重金属抗性指标对菌株重金属抗性进行评价, 同时测定了菌株对3种难溶性磷酸盐的溶磷量. 通过该研究可望为重金属污染土壤的生物修复提供优质菌种资源.

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 化学试剂 金属盐分别为 $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 HgCl_2 、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 Na_2SeO_3 、 AgNO_3 . 将金属盐配成 10^4 mg/L 的溶液单独灭菌, 备用. 难溶磷酸盐分别为 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 AlPO_4 、 $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. 所有试剂均为分析纯.

1.1.2 培养基 镉抗性培养基^[9]: 蔗糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1 g, K_2HPO_4 2 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, NaCl 0.1 g, 酵母膏 0.5 g, CaCO_3 0.5 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 7.2, 琼脂 20 g.

PDA 培养基: 马铃薯 200 g, 蔗糖 20 g, 水 1 000 mL, 自然 pH, 琼脂 20 g.

难溶无机磷培养基: 葡萄糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.3 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, 难溶性磷酸盐 5.0 g, 加蒸馏水至 1 000 mL, pH 7.0~7.5.

1.2 方法

1.2.1 抗镉微生物的筛选 从清远电子垃圾污染区采集土壤、水、淤泥和电子垃圾焚烧物样品. 将样品经过无菌水梯度稀释至 10^{-2} , 取 0.1 mL 稀释液涂布于已加入 Cd^{2+} 质量浓度为 200 mg/L 的镉抗性培养基平板上, 待长出菌落后选择生长丰满的单菌落, 挑取此菌落划线分离, 获得其纯培养, 用体积分数为 20% 的甘油保存.

1.2.2 菌株的分子生物学鉴定 按照 SK1201-UNIQ-10 柱式细菌基因组 DNA 抽提试剂 (上海生工) 方法提取 DNA 基因组. 采用真菌通用引物 ITS1 (5' - TCCGTAGGTGAACCTGCGG - 3') 与 ITS4 (5' - TCCTCCGCTTATTGATATGC - 3') 进行 PCR 反应, 扩增 rDNA ITS 区段^[12]. 50 μL PCR 反应体系: 适量模板 DNA, 10 \times PCR buffer 5.0 μL , *Taq* DNA 聚合酶

2.5 U, 0.2 $\mu\text{mol/L}$ ITS1, 0.2 $\mu\text{mol/L}$ ITS4, 0.2 mmol/L dNTPs. PCR 扩增程序为: 95 $^\circ\text{C}$ 5min; 95 $^\circ\text{C}$ 35 s, 55 $^\circ\text{C}$ 35 s, 72 $^\circ\text{C}$ 40 s, 35 个循环; 72 $^\circ\text{C}$ 8 min. 用 15 g/L 的琼脂糖凝胶电泳对 PCR 扩增产物进行检测. 基因测序由上海生工生物工程公司完成, 获得测序结果后, 用 BLAST (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/blast>) 对基因序列的同源性进行分析.

1.2.3 分离菌株在不同浓度镉平板上的抗性 菌株经 PDA 固体培养基活化 5 d 后, 在菌落边缘用打孔器打孔, 再接种于镉质量浓度分别为 500、750、1 000、1 500、2 000 mg/L 的 PDA 固体培养基平板的中央, 每个镉浓度梯度做 3 次重复, 置于 28 $^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中培养. 从第 3 天开始, 每隔 24 h 采用交叉法测量菌株的菌落直径, 连续测定 6 d.

1.2.4 菌株在含镉和不含镉 2 种情况下的生长曲线及培养基 pH 的变化 将平板培养 5 d 的菌体刮入无菌水中, 摇匀, 制成孢子悬浮液, 孢子浓度约 10^9 CFU/mL, 取 400 μL 依次接种于镉质量浓度分别为 0 和 200 mg/L 的 30 mL PDA 液体培养基中. 28 $^\circ\text{C}$ 、150 r/min 培养 8 d. 离心收集不同培养时间的菌体, 用 PHS-3C 精密 pH 计测定上清液的 pH 值, 菌体用去离子水洗涤 3 次, 80 $^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量. 每 24 h 取样 1 次, 绘制生长曲线.

1.2.5 菌株在固体培养基上对多种重金属离子的抗性 菌株对重金属的抗性用质量浓度 0 (对照)、25、50、100、200、300、400、500、750、1 000、1 500 和 2 000 mg/L 的重金属离子平板来衡量. 每处理设 3 个重复, 与对照板相比, 菌株不能生长的最低重金属浓度即为该菌株的 MIC, 所有的重金属盐在培养基灭菌后加入.

1.2.6 菌株的溶磷能力 在 250 mL 三角瓶中装入 50 mL 已灭菌的难溶无机磷培养基, 难溶磷酸盐质量浓度为 5.0 g/L, 分别接种 1 mL 菌悬液, 设不接菌为对照, 每处理重复 3 次, 28 $^\circ\text{C}$ 、120 r/min 振荡培养 8 d. 培养液在 10 000 r/min 转速下离心 5 min, 取上清液用钼锑抗比色法测定有效磷含量, 减去对照值即为溶磷量, 以每升培养液中 P_2O_5 的质量 (mg/L) 计.

2 结果与分析

2.1 分离鉴定

在含有高浓度镉的固体平板上共筛选出 7 株镉抗性菌, 其中 2 株细菌、5 株真菌. 细菌经过多次活化转接后镉抗性减弱, 而真菌仍表现出较强的抗性, 且多次转接后镉抗性保持不变, 故选取其中 1 株镉抗性真菌作为进一步研究的供试菌株, 编号为 Cd7.

该菌株在 PDA 固体培养基上生长较快, 30 $^\circ\text{C}$ 培养 3 d 后菌落直径为 5.2 cm, 6 d 就长满直径为 9 cm

的培养皿. 随着培养时间增加,菌丝由中央向边缘逐渐转变为灰绿色,底部呈墨绿色,背面呈灰色,菌落扁平,棉絮状,菌丝疏松. 利用 ITS1 和 ITS4 为引物对菌株 Cd7 的 ITS 区进行 PCR 扩增和正反向测序,得到的序列长度为 597 bp. 通过 BLAST 将该序列与 GenBank 数据库中序列进行比对,结果表明菌株 Cd7 与月状旋孢腔菌 *Cochliobolus lunatus* 的相似性为 100%,故鉴定其为月状旋孢腔菌.

2.2 菌株 Cd7 在不同浓度镉平板上的生长情况

菌株 Cd7 在不同浓度镉的 PDA 平板上培养 8 d 的菌落直径变化见表 1,由表 1 可以看出,随着培养时间的增加,各个处理下菌株 Cd7 菌落直径均呈增加趋势. 但随着 Cd^{2+} 浓度的增加,菌落直径的扩大速度随培养时间的增加明显减缓,说明随着 Cd^{2+} 浓度的增加,菌株 Cd7 受镉的抑制作用也明显增强,但该菌株在 2 000 mg/L Cd^{2+} 条件下仍可缓慢生长,可见菌株 Cd7 对镉具有较强的抗性. 培养 8 d 结束时,500 mg/L Cd^{2+} 处理的菌落直径接近对照.

与对照相比,镉处理对 Cd7 菌落形态有明显影响,菌株 Cd7 生长 3 d 时,不添加镉的处理,菌丝中央为灰绿色,边缘白色,背面灰黑色,而 500 mg/L Cd^{2+} 时,中央菌丝为淡黄色,边缘白色,随着培养时间的延长,菌落中央菌丝逐渐变绿色,边缘白色,背面由中央到边缘逐渐由棕褐色变为淡黄白色. 菌株 Cd7 在 2 000 mg/L Cd^{2+} 时的菌落形态变化更为明显,菌落表面菌丝黄绿色,边缘白色,背面由中央到边缘培养基颜色由棕褐色逐渐变为淡黄色,8 d 菌落直径可达 3.5 cm. 可能是由于在 Cd^{2+} 的胁迫下,菌体代谢产生黄色物质而使培养基背面显黄色,且随着培养时间的增加颜色逐渐加深.

表 1 不同质量浓度镉对菌株 Cd7 菌落直径的影响

Tab.1 Influences of different mass concentrations of cadmium to colony diameters (strain Cd7)

$\rho(Cd^{2+}) / (mg \cdot L^{-1})$	菌落直径/cm					
	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d
0	5.2	6.4	8.0	9.0	9.0	9.0
500	3.1	3.9	4.8	6.2	7.0	8.8
750	2.8	3.4	4.4	5.3	6.1	7.5
1 000	2.2	2.9	3.5	4.2	4.8	5.3
1 500	1.6	2.3	2.8	3.5	3.9	4.4
2 000	0.6	1.6	2.4	2.9	3.2	3.5

2.3 不同初始镉浓度下 Cd7 的生长情况及培养基的 pH 变化

菌株 Cd7 在含镉 200 mg/L 和不含镉 2 种情况下 8 d 的生长曲线如图 1 所示. 由图 1 可见,200 mg/L 的镉和不添加镉相比,菌株同时进入对数增长期和

稳定生长期,不影响菌株的生长周期,但稳定期的菌体干质量低于不添加镉的处理,表明 200 mg/L 的镉对菌株的生长有轻微的抑制作用. 应娇妍等^[13]研究则发现 163.8 mg/L 的镉对茎点霉菌 *Phoma* sp. 的生长影响较大,生长几乎受到完全抑制. 由于环境中的镉浓度较低,本研究筛选到的月状旋孢腔菌对镉具有较强的抗性,具有实践应用的潜力.

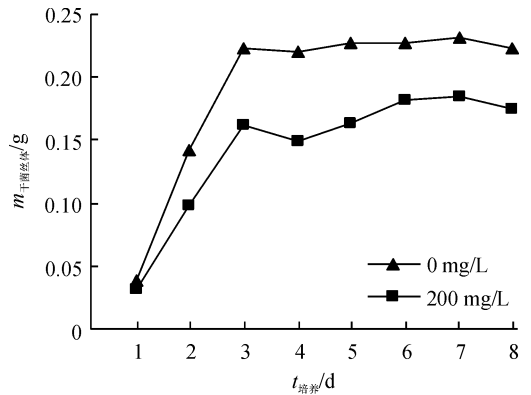


图 1 不同初始镉质量浓度对菌株 Cd7 生长的影响

Fig.1 Effects of different cadmium mass concentrations on the growth of strain Cd7

由图 2 可知,不含镉培养液的 pH 随着菌体的生长而呈上升趋势,可高达 7.87,从第 4 天开始,pH 趋于稳定. 而含镉培养液的 pH 随着菌体生长一直呈上升趋势,但最高仅达 7.37. 某些菌可以通过产碱方式沉淀重金属从而达到对重金属的解毒或富集^[14-15],推测该菌株对镉的抗性可能与该菌在生长过程中产生碱性物质有关.

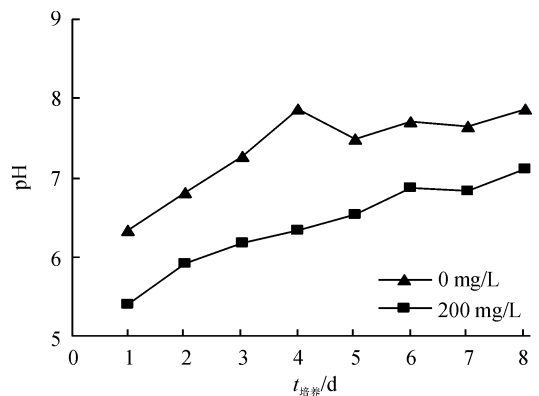


图 2 不同初始镉质量浓度培养条件下菌株 Cd7 生长过程中的培养基 pH 变化

Fig.2 Changes of medium pH during the growth of strain Cd7 in different Cd mass concentrations

2.4 菌株 Cd7 对多种重金属的抗性

用 MIC 来表示菌株 Cd7 对重金属的抗性. MIC 值越大,表示菌株对重金属的抗性越大,反之,抗性越小. 菌株 Cd7 对 9 种重金属离子抗性的强弱顺序依次为: Zn^{2+} 、 Cd^{2+} (> 2 000 mg/L) > Pb^{2+} (1 500

mg/L) > Cu²⁺ (500 mg/L) > Co²⁺ (100 mg/L) > Ni²⁺、Cr²⁺ (50 mg/L) > Hg²⁺、Ag⁺ (25 mg/L). 低浓度的银和汞即可完全抑制该月状旋孢腔菌的生长, 其次是铬、镍和钴, 而对镉、铅、锌和铜都有较高抗性, 特别是对镉和锌的 MIC 均高于 2 000 mg/L. 重金属离子是微生物生长所必需的微量元素, 含量过高则会对微生物产生毒害作用. 不同的重金属离子对不同菌株的抗性强弱差异很大, 菌株 Cd7 能在高浓度镉环境条件下生长, 可能是由于在电子垃圾污染的特殊生境中微生物种群得到筛选进化, 形成独特的对重金属的抗性机制.

2.5 菌株 Cd7 的溶磷能力

菌株 Cd7 在不同无机磷源培养液中培养 8 d 后测得的溶磷量见图 3. 菌株 Cd7 对 Ca₃(PO₄)₂ 的溶磷量最大, 为 104 mg/L. 其次是 AlPO₄, FePO₄ · 4 H₂O 的溶磷量最低, 不足 20 mg/L. 菌株 Cd7 对不同的磷酸盐溶磷能力强弱顺序为: Ca₃(PO₄)₂ > AlPO₄ > FePO₄ · 4 H₂O. 培养 8 d 的 3 种不同无机磷源的培养液中都产生菌丝球, 但培养液均不澄清, 只有 AlPO₄ 相对较清. 说明菌株 Cd7 可以在无机磷酸盐为唯一磷源的环境中生长并表现出一定的溶磷能力.

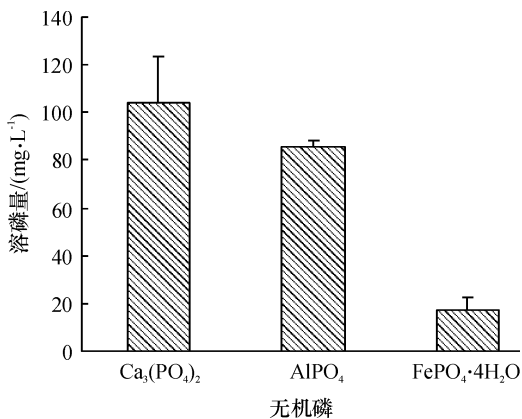


图3 菌株 Cd7 对 3 种难溶性磷酸盐的溶磷量

Fig. 3 Phosphate solubilization capacity of strain Cd7

3 讨论与结论

由于所用培养基不同, 镉在不同营养成分条件下的活性也不同, 因此不同微生物对镉的耐受量有很大差别. 刘爱民等^[7]筛选出一株耐镉假单胞菌, 在含 Cd²⁺ 质量浓度为 4 500 mg/L 的液体细菌培养基中能够生存. 应娇妍等^[6]筛选得到一株对镉具有很强抗性和富集能力的茎点霉菌 F2, 该菌可在 2 000 mg/L 的 Cd²⁺ 质量浓度下存活, 镉质量浓度在 163.8 mg/L 的液体培养基培养时, 生长几乎受到完全抑制. 呼庆等^[16]分离菌株可以在镉质量浓度为 1 000 mg/L 的固体培养基平板上生长. 而不少学者在 200

mg/L^[9,17] 及低于 200 mg/L^[10] 镉质量浓度筛选镉抗性菌, 由于镉是一种毒性很强的重金属, 在很低浓度下就有很大的毒性, 实际环境中的污染浓度也较低, 多在 1 mg/L 以下^[6]. 本研究筛选到的月状旋孢腔菌 Cd7 能在镉质量浓度为 2 000 mg/L 平板上生长良好, 表明该菌株具有较强的镉抗性, 且菌株在生长过程中产生黄色物质而使培养基背面显黄色, 菌株在镉胁迫下的代谢产物及代谢途径有待深入研究. 菌株 Cd7 在镉质量浓度为 200 mg/L 的液体培养基培养时, 其生长表现轻微的抑制作用, 培养基 pH 随着菌体的生长呈上升趋势. 菌株对镉的抗性可能与该菌在生长过程中产生碱性物质有关. 由于重金属和微生物间相互作用的复杂性, 其抗性机理有待进一步研究和探讨.

重金属抗性菌往往对多种重金属具有抗性, 潘园园等^[4]筛选到具有产气能力的肠杆菌 *Enterobacter aerogenes*, 该菌对多种重金属具有明显的广谱抗性, MIC 值为 4.5 mmol/L 的铜和 2.0 mmol/L 的镉. 窦敏娜等^[5]从铅锌尾矿中分离获得的一株重金属抗性蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus* HQ-1, 对镉、铅、铜、银、锌和钴都有较高抗性, MIC 值分别为 1 200、700、600、500、450 和 300 mg/L. 与之相比, 本研究筛选到的月状旋孢腔菌 Cd7 对镉、铅、锌和铜都有较高抗性.

菌株 Cd7 具有一定的溶磷能力. 冯宏等^[18]从类芦根际土壤中筛选出的溶磷真菌黑曲霉 *Aspergillus niger* 具有较高的溶磷率, 对磷酸铝的溶磷率达 92.02%. 康贻军等^[19]分离到的 2 株解磷真菌, 最高溶磷量达 897.35 和 565.49 mg/L. 赵小蓉等^[20]筛选出的欧文氏菌、肠杆菌和节杆菌溶磷能力较弱, 且供试菌株中真菌溶磷能力普遍比细菌要高得多. 孙珊等^[21]筛选到一株溶磷能力强的假单胞菌 *Pseudomonas* sp., 其对难溶性磷酸盐磷酸钙、磷酸铝和磷酸铁的最大溶磷量分别为 224.51、62.75 和 17.41 mg/L. 刘文干等^[22]筛选出的洋葱伯克霍尔德氏菌 *Burkholderia cepacia* 对磷酸钙、磷酸铝、磷酸铁均有较强的溶解能力, 最高溶磷量分别为 125.79、227.34 和 60.02 mg/L. 菌株 Cd7 的溶磷量远远低于筛选出的溶磷真菌的溶磷量, 高于或略低于筛选出的溶磷细菌的溶磷量.

已经发现对镉有很强的耐受性及吸附能力的微生物有蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus*^[5,8,16]、铜绿假单胞菌 *Pseudomonas aeruginosa*^[23]、深红酵母 *Rhodotorula rubra*^[24]、茎点霉菌^[6]、螺旋藻 *Spirulina* sp.^[25] 等. 本研究从电子垃圾污染区土壤中分离、纯化获得 1

株月状旋孢腔菌(曾用名新月弯孢霉 *Curvularia lunata*)。目前国内外对新月弯孢霉的研究主要集中在生产氢化可的松,由其引起的玉米和水稻等植物病害,引起角膜炎、产絮凝剂和孢外产漆酶^[26-27]等方面。关于月状旋孢腔菌对重金属的抗性尤其是对镉的抗性研究鲜见报道,本研究结果表明该菌株具有溶磷作用。该菌株对镉的吸附作用及土壤中镉形态的转化及对植物的促生作用有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刁书永,张立志,袁慧. 镉中毒机制研究进展[J]. 动物医学进展, 2005, 26(5): 49-51.
- [2] 滕应,骆永明,李振高. 污染土壤的微生物修复原理与技术进展[J]. 土壤, 2007, 39(4): 497-502.
- [3] 王能飞,袁红莉,应娇妍,等. 一株分离自矿区土壤的酵母菌富集 Cd 的特性[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 674-677.
- [4] 潘园园,陈雯莉,黄巧云. 一株抗重金属铜镉细菌的分离、鉴定及其 16S rDNA 的序列分析[J]. 微生物学通报, 2005, 32(3): 68-72.
- [5] 窦敏娜,呼庆,齐鸿雁,等. 重金属抗性菌 HQ-1 生物吸附镉与银的比较研究[J]. 微生物学通报, 2007, 34(6): 1097-1103.
- [6] 应娇妍,袁红莉,孙英,等. 抗 Cd 菌株的筛选及其对 Cd 的去除特性[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 292-295.
- [7] 刘爱民,黄为一. 耐镉菌株的分离及其对 Cd²⁺ 的吸附富集[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1): 91-95.
- [8] 刘红娟,张慧,党志,等. 一株耐镉细菌的分离及其富集 Cd 的机理[J]. 环境工程学报, 2009, 3(2): 367-371.
- [9] 盛下放,白玉,夏娟娟,等. 镉抗性菌株的筛选及对番茄吸收镉的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 467-469.
- [10] 夏娟娟,盛下放,江春玉. 重金属镉抗性菌株的筛选及其对镉活化作用的研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1357-1360.
- [11] 江春玉,盛下放,何琳燕,等. 一株铅镉抗性菌株 WS34 的生物学特性及其对植物修复铅镉污染土壤的强化作用[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1961-1968.
- [12] TAO G, LIU Z Y, HYDE K D, et al. Whole rDNA analysis reveals novel and endophytic fungi in *Bletilla ochracea* (Orchidaceae)[J]. Fungal Divers, 2008, 33(1): 101-122.
- [13] 应娇妍,袁红莉,李宝珍. 一株茎点霉菌的抗镉机制[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 575-578.
- [14] PODDA F, ZUDDAS P, MINACCI A, et al. Heavy metal coprecipitation with hydrozincite [Zn₅(CO₃)₂(OH)₆] from mine waters caused by photosynthetic microorganisms[J]. Appl Environ Microbiol, 2000, 66(11): 5092-5098.
- [15] REMACLE J, MUGURUZA I, FRANSOLETT M. Cadmium removal by a strain of *Alcaligenes denitrificans* isolated from a metal-polluted pond[J]. Water Res, 1992, 26(7): 923-926.
- [16] 呼庆,齐鸿雁,窦敏娜,等. 强抗镉蜡状芽孢杆菌的分离鉴定及其抗性机理[J]. 环境科学, 2007, 28(2): 42-430.
- [17] 刘红娟,党志,张慧,等. 蜡状芽孢杆菌抗重金属性能及对镉的累积[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 25-29.
- [18] 冯宏,李永涛,张志红,等. 类芦根际溶磷真菌的筛选、鉴定及其溶磷能力分析[J]. 微生物学通报, 2010, 37(5): 677-681.
- [19] 康贻军,胡健,单君,等. 两株解磷真菌的解磷能力及其解磷机理的初步研究[J]. 微生物学通报, 2006, 33(5): 22-27.
- [20] 赵小蓉,林启美,李保国. 溶磷菌对 4 种难溶性磷酸盐溶解能力的初步研究[J]. 微生物学报, 2002, 42(2): 236-241.
- [21] 孙珊,黄星,范宁杰,等. 一株溶磷细菌的分离、鉴定及其溶磷特性研究[J]. 土壤, 2010, 42(1): 117-122.
- [22] 刘文干,何园球,张坤,等. 一株红壤溶磷菌的分离、鉴定及溶磷特性[J]. 微生物学报, 2012, 52(3): 326-333.
- [23] WANG C L, MICHELS P C, DAWSON S C, et al. Cadmium removal by a new strain of *Pseudomonas aeruginosa* in aerobic culture[J]. Appl Environ Microbiol, 1997, 63(10): 4075-4078.
- [24] SALINAS E, ELORZA D E ORELLANO M, REZZA I, et al. Removal of cadmium and lead from dilute aqueous solutions by *Rhodotorula rubra*[J]. Bioresource Technol, 2000, 72(2): 107-112.
- [25] COSTA A C, FRANCAF P. Cadmium up take by *Spirulina maxima*: Toxicity and mechanism[J]. World J Microbiol Biotechnol, 1998, 14(4): 579-581.
- [26] 郑楠,赵敏. 真菌新月弯孢霉的研究进展[J]. 黑龙江医药, 2010, 23(2): 165-167.
- [27] 姜庆宏,崔岱宗,赵敏,等. 一株产漆酶真菌新月弯孢霉 JQH-100 在染料脱色中的应用[J]. 菌物学报, 2010, 29(5): 678-682.