

西湖沉积物中解磷菌的分离纯化及其解磷能力*

李文红 施积炎**

(浙江大学环境工程系, 杭州 310029)

【摘要】 采用有机磷固体培养基和无机磷固体培养基从沉积物中分离出具有解磷能力的菌株, 通过平板划线分离纯化后得到6株磷细菌, 其中2株为有机P细菌(编号为OP₁、OP₂), 4株为无机磷细菌(编号分别为NOP₁、NOP₂、NOP₃、NOP₄)。测定发现, OP₁、OP₂和NOP₃溶磷能力较强, NOP₄解磷能力较微弱, 而NOP₁及NOP₂在分离纯化后失去了解磷能力; 菌株OP₁及OP₂具有较强的分解有机磷卵磷脂的能力, 接种OP₁、OP₂菌株的培养液中水溶性磷含量分别比对照增加了38.53和64.53倍; 接种NOP₃菌株的培养液中磷含量比对照增加了54.06倍。

关键词 解磷菌 磷 沉积物 确定

文章编号 1001-9332(2006)11-2112-05 **中图分类号** S154.36 **文献标识码** A

Isolation, purification, and phosphate-solubilizing capability of phosphorous bacteria in West Lake sediment. LI Wenhong, SHI Jiyan (*Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(11): 2112-2116.

By using solid culture media containing organic and inorganic phosphorus, six strains of phosphorous bacteria in West Lake sediment were isolated and purified, among which, two strains coded as OP₁ and OP₂ could decompose lecithin, and the other four coded as NOP₁, NOP₂, NOP₃ and NOP₄ could dissolve inorganic phosphate. OP₁, OP₂ and NOP₃ had a stronger phosphate-solubilizing capability, followed by NOP₄, while NOP₁ and NOP₂ lost this capability after isolation and purification. The water-soluble P concentration in the culture media inoculated with OP₁, OP₂ and NOP₃ increased 38.53, 64.53 and 54.06 fold, respectively, compared with the control.

Key words Phosphate-solubilizing bacteria, Phosphorous, Sediment, West Lake.

1 引言

人们对于湖泊污染修复的研究始于20世纪中叶。最初,对湖泊污染修复研究的重点多集中在水体上。随着研究的深入,人们提出了沉积物的二次污染问题,即由于富含N、P的物质在沉积物中大量富集,沉积物会对水体产生重要影响,可能加剧水质恶化。P是世界上大多数湖泊真正意义上的限制性元素。沉积物中P的再利用,除受物理化学因素影响外,也受沉积物中微生物的影响,因此对沉积物微生物的研究具有重要意义。研究表明,在沉积物-水界面P循环中微生物仅通过影响pH、Eh而间接影响P的释放^[4,7,11,14]。近年来的研究发现,微生物也是控制和影响释P的重要因素,可直接参与P循环^[2,5,6,9,16]。微生物有可能将沉积物中的有机P分解为无机P,而且把不溶性P化合物转化成可溶性P。在好氧条件下微生物固定大量的P,并在厌氧条件下将其释放。沉积物中的微生物磷是植物有效磷的重要来源^[22,24],在微生物组织中的含量为1.4%~4.7%^[8]。微生物体完全分解后,固持其体内的P也可以无机P形式释放出来,对水体富营养化有直

接影响^[2,9,15]。

国内学者对影响沉积物释P的因素作了大量的研究^[3,18,23],如温度、pH值、溶解氧、氧化还原电位、水动力学、搅动等,其中涉及到微生物对释P的影响。也有学者对微生物在湖泊中的生态分布作了一些调查,并且分离出P细菌^[17,20]。本研究选用微生物含量极为丰富的西湖沉积物进行实验室模拟研究,对沉积物中的磷细菌进行了分离纯化,研究其解磷能力,旨在加深对微生物在湖泊沉积物-水界面P循环中作用的认识,为解除P的富营养化提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 微生物培养基

采用固体培养基培养微生物^[21],用于分离、鉴定沉积物中有机磷细菌及无机磷细菌的固体培养基:1)无机磷培养基 葡萄糖10g,酵母粉0.5g, CaCl₂ 0.1g, MgSO₄·7H₂O 0.3g, 蒸馏水1000ml,琼脂20g,灭菌。用时每50ml中加入10ml质量分数为100g·kg⁻¹的CaCl₂和1ml质量分数为100g

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB410807)。

** 通讯联系人, E-mail: shijiyang@zju.edu.cn

2005-10-27 收稿, 2005-12-28 接受。

· kg⁻¹的 K₂HPO₄ 混合液,混匀,用 0.1 mol · L⁻¹ NaOH 溶液调节 pH 为 7.0.2) 有机磷培养基(卵黄培养基) 蛋白胨 10 g,牛肉膏 3 g,NaCl 5 g,琼脂 15 g,蒸馏水 1 000 ml,pH 7.0,灭菌,用时每 50 ml 中加入新鲜蛋黄液 3 ml(蛋黄与生理盐水等比例混合)。

用于测定沉积物中有机磷细菌及无机磷细菌解磷能力的液体培养基:1) 无机磷培养基 葡萄糖 10 g,(NH₄)₂SO₄ 0.5 g,MgSO₄ · 7H₂O 0.3 g,NaCl 0.3 g,KCl 0.3 g,FeSO₄ · 7H₂O 0.03 g,MnSO₄ · 4H₂O 0.03 g,Ca₃(PO₄)₂ 5 g,蒸馏水 1 000 ml,pH 7.0 ~ 7.5.2) 有机磷培养基 葡萄糖 10 g,(NH₄)₂SO₄ 0.5 g,MgSO₄ · 7H₂O 0.3 g,NaCl 0.3 g,KCl 0.3 g,FeSO₄ · 7H₂O 0.03 g,MnSO₄ · 4H₂O 0.03 g,卵磷脂 2 g,CaCO₃ 5 g,蒸馏水 1 000 ml,pH 7.0 ~ 7.5.

2.2 试验方法

2.2.1 菌数测定 常规 10 倍稀释法稀释样品,取适宜稀释度样品 0.1 ml,分别涂于无机磷和有机磷固体培养基平板上,有机磷细菌在 30 °C 培养 2 d,无机磷细菌培养 7 d,具有透明圈的菌落视为具有解磷活性的菌落,同时分别计细菌总数。

2.2.2 菌落及菌株形态特征 取少许菌苔在平板表面划线,使生长出单个菌落,观察菌落的形状和大小、表面特征(光滑、粗糙、皱纹、同心环、辐射状等)、隆起形状(凹、凸、平)、边缘状况(光滑、锯齿状、波浪状、纤维状)、硬度、透明度、晕圈大小、菌落颜色等。在普通光学显微镜及透射电镜下观察优势菌株的形态特征。

2.2.3 解磷强度的测定 1) 磷细菌液的制备:将纯化后各优势菌株的菌苔用接种环刮下,洗进盛有 100 ml 无菌水带玻璃珠的三角瓶中,振荡 20 min.2) 磷细菌的培养:将 2 ml 菌株悬液接入 30 ml 灭菌的液体培养基中,对照接 2 ml 的灭菌液,接种后 30 °C,180 r · min⁻¹ 振荡培养 7 d.3) 培养物的处理:培养好的磷细菌液 4 000 r · min⁻¹ 离心 20 min,倒出上清液定容为 50 ml,沉淀加 1 g 石英砂在研钵中研磨 10 min 后用蒸馏水洗下,研磨液 4 000 r · min⁻¹ 再离心 20 min,弃去沉淀,将上清液也定容为 50 ml.4) 溶磷能力测定:测两次离心后上清液中的溶磷含量,第一次离心上清液测定结果为培养液中所含的溶磷,第二次离心上清液测定结果为菌体所吸收的溶磷.5) 磷的测定与解磷曲线的绘制:总磷的测定采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法.将培养物定期取样,离心,测定水溶性磷含量,以培养时间(d)为横坐标,以溶磷浓度为

为纵坐标绘制曲线。

3 结果与分析

3.1 解磷细菌数量

沉积物中存在大量能分解卵磷脂和溶解磷酸钙的有机磷细菌与无机磷细菌,且前者数量多于后者(表 1).其中有机磷细菌为 1.73 × 10³ CFU · g⁻¹ 干泥,占细菌总数的 9%,无机磷细菌为 1.18 × 10³ cfu · g⁻¹ 干泥,占细菌总数的 5%。

吴根福等^[17,19]在杭州西湖水域进行的微生物生态调查表明,水体中有机磷细菌为 2 ~ 15 CFU · ml⁻¹,沉积物中有机磷细菌平均达 2.38 × 10³ CFU · g⁻¹ 干泥,与本研究的结果比较接近.他们还发现水中微生物与沉积物中微生物数量间有较好的相关性,说明在水体与表层沉积物交换较频繁的浅水湖泊中,水体和沉积物中的微生物可以互为交换补充.王锐萍等^[22]报道了海口东湖水体中有机磷细菌数为 1.62 ~ 1.88 CFU · ml⁻¹,无机磷细菌数为 350 ~ 1 940 CFU · ml⁻¹.可见不同的湖泊中具有解磷能力的细菌数量差异很大。

3.2 解磷细菌菌落形态

有机磷固体培养基中的卵磷脂可被磷细菌分泌的磷酸酶水解为甘油、脂肪酸、磷酸和胆碱,胆碱进一步分解为胺、二氧化碳、有机酸和醇,从而使得在鸡蛋黄培养基平板上培养的菌体能在其周围形成一定的透明圈.无机磷固体培养基中的难溶性磷酸盐在微生物溶磷机理的作用下溶解,也会在菌体周围形成一定的透明圈.依据透明圈大小进行平板筛选和鉴定,虽然仅是一种粗略的半定量方法,但其透明圈直径大小与菌株解磷能力呈正相关关系.透明圈大而亮,大致说明此磷细菌菌株分解有机磷或无机磷的能力比较强,从而可初步判断磷细菌解磷能力的强弱。

图 1 为通过平板划线分离纯化后得到 6 株磷细菌,其中 OP₁、OP₂ 为有机 P 细菌,NOP₁、NOP₂、

表 1 磷细菌的菌落特征

Table 1 Colony characteristics of phosphate-solubilizing bacteria

编号 Code	生长速率 Growth rate	菌落直径 Dimension of colony (mm)	菌落 + 透明 圈的直径 Dimension of colony and periphery (mm)	菌落形状 Colony form	表面形状 Exterior form	隆起形状 Apophysis form	颜色 Color
OP ₁	快 Quick	3 ~ 6	5 ~ 10	圆形 Round	光滑 Slippery	脐状 Umbilicate	黄色 Yellow
OP ₂	快 Quick	2 ~ 5	4 ~ 10	圆形 Round	光滑 Slippery	凸起 Protuberant	黄色 Yellow
NOP ₁	中等 Moderate	1 ~ 3	2 ~ 4	圆形 Round	粗糙 Rough	向内生长 Concave	红色 Red
NOP ₂	中等 Moderate	1 ~ 4	2 ~ 6	颗粒状不规则 Erode	光滑 Slippery	微突 Slightly protuberant	白色 White
NOP ₃	缓慢 Slow	1 ~ 2	3 ~ 5	圆形 Round	光滑 Slippery	凸起 Protuberant	白色 White
NOP ₄	中等 Moderate	2 ~ 4	3 ~ 5	圆形 Round	粗糙 Rough	向内生长 Concave	灰色 Gray

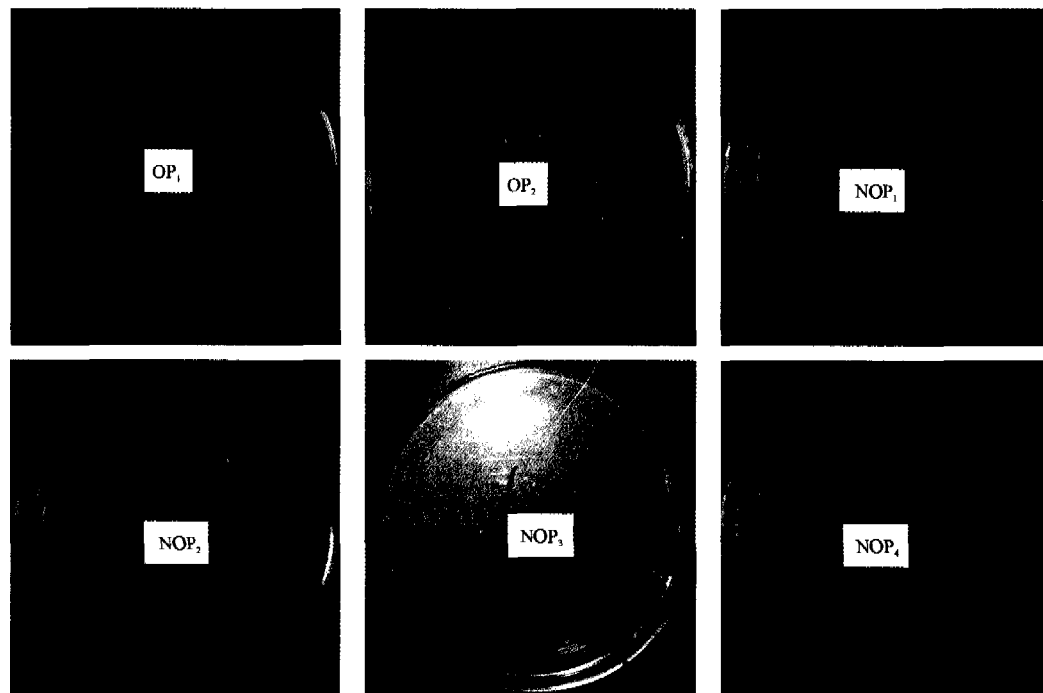


图1 平板培养条件下磷细菌的菌落形态

Fig. 1 Phosphate-solubilizing bacteria colony in solid media containing phosphate.

NOP₃、NOP₄ 为无机磷细菌. 测定菌落周围透明圈的大小发现, 这 6 株菌的解磷能力差异较大, 其中 OP₁、OP₂、NOP₃ 为溶磷能力较强的菌株, OP₁、OP₂ 生长速率快, 透明圈也较大; NOP₃ 虽然生长缓慢且菌落较小, 但它周围的透明圈比菌落大 1~2 倍.

OP₁、OP₂、NOP₃ 经革兰氏染色鉴定为革兰氏阴性菌, 在 1 000 倍显微镜下观察其均为杆状菌, 芽胞位于菌体中央(图 2A). 图 2B 为 3 株菌的透射电镜照片, OP₁ 菌体较大, 周身鞭毛, 长杆形, 两头呈圆形; OP₂ 为短杆形, 周身有鞭毛; NOP₃ 菌体较小, 周身有鞭毛, 长杆形, 两头略尖.

3.3 解磷细菌解磷强度

3.3.1 有机磷 由表 2 可见, 菌株 OP₁ 及 OP₂ 具有较强的分解有机磷卵磷脂能力, 接种 OP₁、OP₂ 菌株的培养液中水溶性磷含量分别为 62.45 和 103.54 mg · L⁻¹, 比对照(1.58 mg · L⁻¹)增加了 38.53 和

64.53 倍. 在对磷细菌分解卵磷脂能力进行测定中发现, 有机磷培养基接菌处理的 pH 值比对照高, 表明水溶性磷不是产生于酸的作用, 而是产生于酶的作用, 即酶解作用.

赵小蓉等^[25]认为, 细菌在分解化合物的同时, 一部分磷被细菌同化为有机磷, 一部分以无机磷酸盐状态贮藏在细菌细胞内. 本实验通过研磨破碎细胞以释放出被菌体吸收的水溶性无机磷, 测定结果发现菌体中确有大量水溶性无机磷存在, 接种过 OP₁、OP₂ 菌株的菌体残渣中水溶性磷含量分别为 9.88 和 8.48 mg · L⁻¹, 是培养液中磷含量的 15.82% 和 8.19%. 采用研磨的方法破碎细胞, 其破碎效果不十分理想, 所测结果低于菌体含磷量. 同时, 细菌在生长过程中已经把吸收的部分水溶性磷转化为细胞中的有机磷, 如果包括被菌体同化的部分, 其解磷能力应高于实验结果.

3.3.2 无机磷 从表 3 可以看出, 4 株菌中只有 NOP₃ 表现出较强的解磷能力, NOP₄ 有微弱的解磷能力. 接种 NOP₃ 菌株的培养液中磷含量高达 68.83 mg · L⁻¹, 较对照(1.25 mg · L⁻¹)增加了 54.06 倍; 接种 NOP₄ 菌株的培养液中磷含量也有 4.50 mg · L⁻¹, 较对照增加了 2.6 倍. 而菌株 NOP₁ 和 NOP₂ 在分离纯化后失去了解磷能力. 据 Kucey^[12]报道, 在菌株纯化过程中, 有近 50% 的解磷细菌会失去解磷能力, 而大部分解磷真菌则可始终保持解磷活性. 林

表 2 有机磷细菌分解难溶性有机磷的能力(3 d 后)

Table 2 Ability of organic phosphate-solubilizing bacteria for dissolution of organic phosphorus (3 days later)

处理 Treatments	pH	培养液中磷含量 P concentration in liquid medium (mg · L ⁻¹)	菌体或残渣的 磷含量 P concentration in bacteria, (mg · g ⁻¹)
培养基 + 2 ml 无菌水 (CK) medium + 2 ml sterile water	6.72	1.58 ± 0.26	1.02 ± 0.11
培养基 + 2 ml OP ₁ 菌液 medium + 2 ml water with OP ₁	7.54	62.45 ± 0.81	9.88 ± 0.52
培养基 + 2 ml OP ₂ 菌液 medium + 2 ml water with OP ₂	7.38	103.54 ± 3.72	8.48 ± 0.33

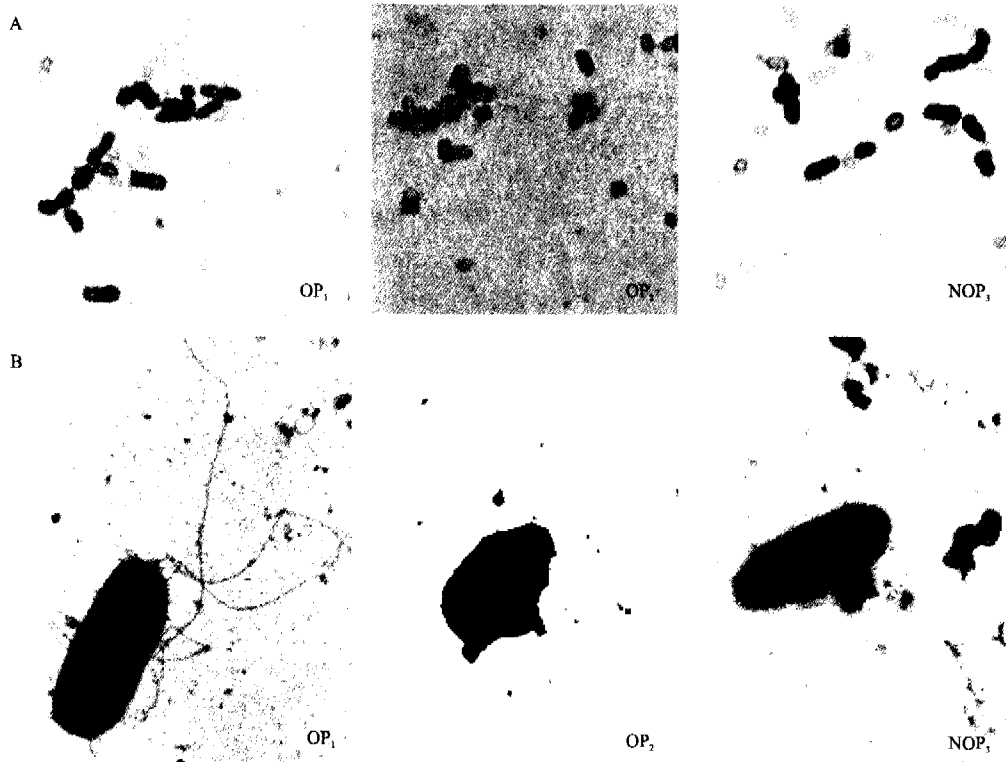


图2 磷细菌的微观形态特征

Fig. 2 Microcosmic characteristics of isolated phosphate-solubilizing bacteria.

A: 普通光学显微镜 Shown on the optic microscope; B: 透射电镜 Shown on the transmission microscope.

表3 无机磷细菌分解难溶性无机磷的能力(5 d后)

Table 3 Ability of inorganic phosphate-solubilizing bacteria for dissolution of un-soluble inorganic phosphorus (5 days later)

处理 Treatments	pH	培养液中磷含量 P concentration in liquid medium (mg · L ⁻¹)	菌体或残渣的磷含量 P concentration in bacteria, (mg · g ⁻¹)
培养基 + 2 ml 无菌水 (CK) medium + 2 ml sterile water	6.79	1.25 ± 0.13	1.26 ± 0.23
培养基 + 2 ml NOP ₁ 菌液 medium + 2 ml NOP ₁ culture	7.83	1.37 ± 0.21	1.17 ± 0.16
培养基 + 2 ml NOP ₂ 菌液 medium + 2 ml NOP ₂ culture	7.72	0.93 ± 0.16	1.24 ± 0.13
培养基 + 2 ml NOP ₃ 菌液 medium + 2 ml NOP ₃ culture	4.69	68.83 ± 1.13	6.52 ± 0.35
培养基 + 2 ml NOP ₄ 菌液 medium + 2 ml NOP ₄ culture	5.14	4.50 ± 0.41	2.40 ± 0.21

启美等^[13]在测定磷细菌的解磷能力时也发现,59株有机磷细菌中仅有6株表现出较强的解磷能力,部分无机磷菌株在分离纯化后失去解磷活力.通过研磨破碎细胞以释放出被无机磷细菌吸收的水溶性无机磷发现,接种过NOP₁和NOP₂菌株的菌体残渣中水溶性磷含量与空白对照基本无差别,而接种过NOP₃、NOP₄菌株的菌体残渣中水溶性磷含量则分别为6.52和2.40 mg · L⁻¹,是培养液中磷含量的9.47%和53.33%.

培养液pH值的变化与Ca₃(PO₄)₂的溶解明显相关.磷细菌在菌体生长过程中产生各种有机酸而将难溶性无机磷酸盐中的磷释放出来,即通过酸解

作用解磷.本实验中具解磷能力的NOP₃、NOP₄菌株的培养液pH分别为4.69和5.14,比对照(pH为6.79)明显下降,证实了这一点.但许多研究者认为,并非pH降低就能表现出解磷能力.Asea等^[1]报道pH与解磷量之间缺乏相关性或仅有微弱的相关

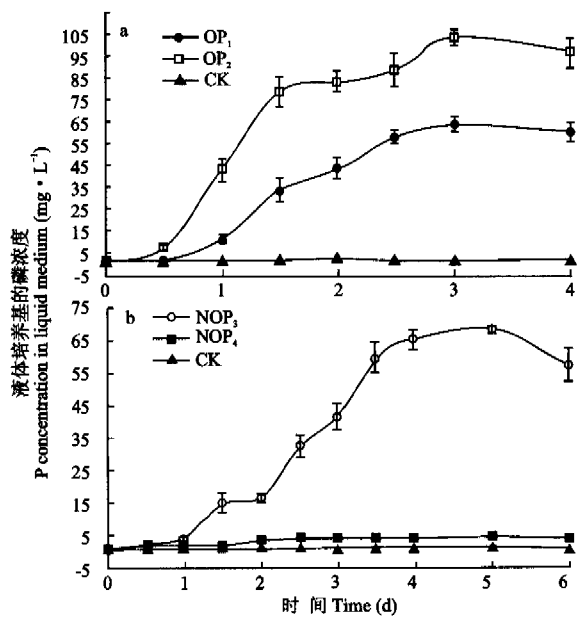


图3 细菌解磷曲线

Fig. 3 Dissolution of phosphorous by phosphate-solubilizing bacteria.

a) 有机磷细菌 Organic phosphate-solubilizing bacteria; b) 无机磷细菌 Inorganic phosphate-solubilizing bacteria.

性. Sperber^[15]认为,解磷微生物的解磷作用是由于微生物分泌出多种有机酸,它们与 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等离子螯合而使难溶性磷酸盐溶解. Illmer等^[10]认为,产有机酸只是解磷的一个方面,而伴随着呼吸或同化 NH_4^+ 时 H^+ 的释放是解磷的另一个重要机制,可见微生物的解磷机理还有待进一步研究.

3.3.3 磷细菌解磷曲线 如图3所示,磷细菌对 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 和卵磷脂中磷的释放分别在第5天和第3天时达到最大值,以后渐达平衡而略有下降趋势,这可能是菌体将部分无机磷转化为菌体中有机磷.

4 结 论

4.1 西湖沉积物中存在大量能分解卵磷脂和溶解磷酸钙的有机磷细菌和无机磷细菌,且前者比后者多.

4.2 分离纯化所得的6株磷细菌中, OP_1 、 OP_2 、 NOP_3 具有极强的解磷能力, NOP_4 有微弱的解磷能力,而 NOP_1 及 NOP_2 在分离纯化后失去解磷能力.

4.3 OP_1 、 OP_2 、 NOP_3 、 NOP_4 菌体中有大量水溶性无机磷存在,说明这4株菌能够对无机磷酸盐进行过量吸收并大量贮藏在细胞内.

参考文献

- 1 Asea PE. 1988. Inorganic phosphate solubilization by two *Penicillium* species in solution culture and soil. *Soil Biol Biochem*, **20**: 459-464
- 2 Clavero V. 1999. Influence of bacterial density on the exchange of phosphate between sediment and overlying water. *Hydrobiologia*, **392**: 55-63
- 3 Fan C-X (范成新). 1995. Physicochemical characteristics of sediments in Gehu Lake and simulation of its phosphorous release. *Lake Sci (湖泊科学)*, **7**(4): 341-350 (in Chinese)
- 4 Garber JH. 1984. ¹⁵N tracer study of the short-term fate of particulate organic nitrogen at the surface of coastal marine sediments. *Mar Ecol Prog Ser*, **16**: 89-104
- 5 Goedkoop W, Pettersson K. 2000. Seasonal changes in sediment phosphorus forms in relation to sedimentation and benthic bacterial biomass in Lake Erken. *Hydrobiologia*, **431**: 41-50
- 6 Colterman HL. 1996. Fractionation of sediment phosphate with chelating compounds: A simplification, and comparison with methods. *Hydrobiologia*, **335**: 87-95
- 7 Graf G. 1987. Benthic energy flow during a simulated autumn bloom sedimentation. *Mar Ecol Prog Ser*, **39**: 23-29
- 8 Hedley MJ, Steward WB. 1982. Method to measure microbial phosphate in soil. *Soil Biol Biochem*, **4**: 377-385
- 9 Hupfer M, Gächter R, Ruegger H. 1995. Polyphosphate in lake sediments: ³¹P NMR spectroscopy as a tool for its identification.

Limnol Oceanogr, **40**: 610-617

- 10 Illmer P, Schinner F. 1992. Solubilization of inorganic phosphates by microorganisms isolated from forest soils. *Soil Biol Biochem*, **24**(2): 389-395
- 11 Kelly JR, Nixon SW. 1984. Experimental studies on the effect of organic deposition on the metabolism of coastal marine bottom community. *Mar Ecol Prog Ser*, **17**: 157-169
- 12 Kucey RMN. 1983. Phosphate-solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. *Can J Soil Sci*, **63**: 671-678
- 13 Lin Q-M (林启美), Sun Y-X (孙炎鑫). 2000. Community characters of soil phosphobacteria in four ecosystems. *Soil Environ Sci (土壤与环境)*, **9**(1): 34-37 (in Chinese)
- 14 Qi X-H (戚晓红), Liu S-M (刘索美), Zhang J (张 经), et al. 2003. Nutrients regeneration speed of sediment in harmful algae blooms (HAB) area of East China Sea. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **14**(7): 1112-1116 (in Chinese)
- 15 Sperber JI. 1958. Solution of apatite by soil microorganisms producing organic acids. *Aust J Agric Res*, **9**: 782-787
- 16 Törnblom E, Rydin E. 1998. Bacterial and phosphorus dynamics in profundal Lake Erken sediments following the deposition of diatoms: A laboratory study. *Hydrobiologia*, **364**: 55-63
- 17 Wu G-F (吴根福), Wu H (吴 浩). 2000. Studies on the ecological distribution of microorganisms in the West Lake, Hangzhou. *Acta Hydrobiol Sin (水生生物学报)*, **24**(6): 589-596 (in Chinese)
- 18 Wu G-F (吴根福), Xuan X-D (宣晓东). 1998. Environmental factors on sediment phosphorus release in West Lake in Hangzhou. *China Environ Sci (中国环境科学)*, **18**(2): 107-110 (in Chinese)
- 19 Wu G-F (吴根福), Xuan X-D (宣晓东). 1999. Population distribution of microorganisms in the water body of West Lake, Hangzhou. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **19**(3): 435-440 (in Chinese)
- 20 Xia X-H (夏学惠), Zhang Z (张 灼). 2002. Geochemistry and influence to environment of phosphorus in modern sediment in Dianchi Lake. *Acta Sediment Sin (沉积物学报)*, **20**(3): 416-420 (in Chinese)
- 21 Zhong W-H (钟文辉), Cai Z-C (蔡祖聪). 2004. Methods of studying soil microbial diversity. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **15**(5): 899-904 (in Chinese)
- 22 Wang R-P (王锐萍), Chen Y-C (陈玉翠). 2001. The preliminary report of studies on phosphate bacteria from East Lake in Haikou. *J Hainan Normal Univ (Nat Sci) (海南师范学院学报·自然科学版)*, **14**(1): 84-88 (in Chinese)
- 23 Yin D-Q (尹大强), Tan Q-R (覃秋容). 1994. Effects of environmental factors on release of phosphorus from sediments in Wuli Lake. *Lake Sci (湖泊科学)*, **6**(3): 240-244 (in Chinese)
- 24 Zhao S-H (赵少华), Yu W-T (宇万太), Zhang L (张 璐), et al. 2004. Research advance in soil organic phosphorus. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **15**(11): 2189-2194 (in Chinese)
- 25 Zhao X-R (赵小蓉), Lin Q-M (林启美). 2001. The methods for quantifying capacity of bacteria in dissolving P compounds. *J Microbiol (微生物学通报)*, **28**(1): 1-3 (in Chinese)

作者简介 李文红,女,1973年生,博士研究生.主要从事水污染控制研究,发表文章10余篇. E-mail: liwh@zju.edu.cn
责任编辑 肖 红