青岛潮间带趋磁细菌的垂直分布特征及与环境因子的关系

张 蕊^{1,2,5}, 陈一然^{1,2,5}, 周 克³, 张文燕^{1,5}, 肖 天^{1,5}, 吴龙飞^{4,5}

(1. 中国科学院 海洋研究所,海洋生态与环境科学重点实验室,山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学,北
京 100049; 3. 青岛农业大学,资源与环境学院,山东 青岛 266109; 4. 法国科研中心 地中海微生物研究所,
细菌化学实验室,法国 马赛; 5. 中法生物矿化与纳米结构联合实验室,山东 青岛 266071)

摘要: 趋磁细菌是一类能够沿着磁力线运动的革兰氏阴性细菌, 主要生活在淡水和海洋的有氧-无氧过渡区。本 调查通过对青岛汇泉湾潮间带沉积物柱状样分层样品中趋磁细菌的计数和沉积物理化因子的分析, 研究了趋磁 细菌的垂直分布特征及其与环境因子的关系。结果显示趋磁细菌以趋北型的趋磁球菌占优势, 主要分布环境的 氧化还原电位为 179.7~-107.0 mV, 为弱还原-还原性质, 最大丰度(94~169 个/cm³)出现在氧化还原跃层(表层下 5~9 cm 黄-黑沙界面处), 暗示有氧-无氧过渡区; 趋磁细菌的垂直变化趋势与粒径、含水率、硫酸盐的变化趋势 基本一致。

关键词: 趋磁细菌; 垂直分布; 环境因子; 氧化还原电位; 潮间带 中图分类号: Q938 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)10-0024-08

趋磁细菌(magnetotactic bacteria, MTB)是一类能 够沿着磁力线运动的特殊细菌。1963 年意大利学者 Bellini 首次在淡水中发现了磁敏感细菌,将研究结 果以意大利文的形式发表在其所在单位的内部刊物 上,未引起大家的关注^[1-3]。1975 年美国生物学家 Blakemore 在 Science 杂志上报道海泥中发现趋磁细 菌后^[4],才引起不同领域科学家的广泛关注。趋磁细 菌是对具有趋磁行为细菌的统称,形态多样,有螺 旋形、弧形、杆形、球形、多细胞聚集体(现称多细 胞趋磁原核生物,multicellular magnetotactic prokaryotes, MMPs)等^[5-9]。它们具有一些共同的特征: 革兰氏染色阴性(G⁻);端生或丛生鞭毛;体内具有由 生物膜包被的磁小体,通过磁小体的导向、借助鞭毛 进行趋磁运动;具有趋磁-趋氧性,使其更有效地定 位并找到最适生存环境等^[10-11]。

MTB 分布广泛, 从南半球到北半球乃至赤道的淡水、 池塘、湖泊、海洋、土壤等生境都存在^[4,11-13]。MTB 主 要生活在淡水和海洋的有氧-无氧过渡区(oxic-anoxic transition zone, OATZ)或称为氧化还原跃层中, 最 适生境一般存在一定的物理化学梯度^[14]。潮间带是 一个受到潮汐海浪等因素影响、生物多样性高、生 态因子复杂多变的特殊生境, 有必要研究 MTB 在潮 间带的垂直分布。选择青岛汇泉湾潮间带作为研究 地点, 通过采集沉积物柱状样分析, 调查 MTB 的垂 直分布特征及其与环境因子的关系, 帮助深入了解 MTB 的生态作用。

1 材料与方法

1.1 沉积物样品的采集、处理

在青岛汇泉湾(36°03' N, 120°21' E)潮间带采集 沉积物柱状样, 2010 年 12 月~2011 年 4 月共采集 14 个。用 10 cm×35 cm 有机玻璃管柱状采样器采 集芯样(12~18 cm),两端用海绵块塞紧,垂直放置, 保持柱状样不受扰动,立即带回实验室。

柱子水平放置于干净木板上(木板上铺一层塑料 薄膜),每层 2 cm,进行纵向切样。每层含样品 300~400 g。分别取 100 g 转移至无菌聚乙烯样品瓶中, 注入 100 mL 无菌海水,进行 MTB 磁收集、丰度观测 及细菌总数的计数,剩余样品于-20℃冰箱保存。

1.2 MTB的收集、计数

样品收集:用胶带将磁铁(磁场强度为 0.05 T)粘 于样品瓶壁的泥水界面之上约 1 cm 处(S 极面向瓶 壁)。30~40 min 后,用无菌吸管吸取各磁铁附近样品

收稿日期: 2012-12-06; 修回日期: 2013-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(NSFC 41276170, 40906069, 41106135, 40776094);山东省万人计划项目

作者简介:张蕊(1988-),女,山东成武人,硕士研究生,主要从事海洋 微生物研究,电话 0532-82898584,E-mail:zhangruihi.cool@163.com;肖 天,吴龙飞,通信作者,电话 0532-82898586,E-mail:txiao@qdio.ac.cn, wu@imm.cnrs.fr

于 1.5 mL 离心管中, 定容至 V₁(mL)^[15]。

样品计数:用移液枪(无菌枪头)吸取 $V_2(30 \mu L)$ 样品,置于载玻片上制成悬滴,采用悬滴法在光镜 下观察,记录 MTB 的数量 $n(\uparrow)$ 。通过与已标定容量 的样品瓶比对得出沉积物的体积 $V(cm^3)$,并根据公 式 $N=nV_1/V_2V$ 计算得到 MTB 的丰度 $N(\uparrow/cm^3)$ 。

1.3 细菌总数计数

采用吖啶橙直接镜检计数法(acridine orange direct count, AODC)^[16],使用荧光显微镜(OLYMPUS BX51)在放大倍数为 10×100 下随机观察 10 个视野并 计数(细菌总数不低于 500 个)。细菌总数 $N=nAS_1/S_2V$, 其中 n:稀释倍数; A: 10 个视野中细菌的平均数(个); S_1 : 滤膜的有效过滤面积(cm²); S_2 :视野面积(cm²); V: 过滤水样的体积(mL)(V=1 mL)。

1.4 物理、化学因子的测定与相关性分析

1.4.1 物理因子测定

温度(T)用温度计现场打孔(2 cm 一层)测定。

盐度(S)用手持折光仪(WY100 海水检测仪,中 国成都)室内测定。

粒度采用筛析法测定^[17],所用标准检验筛(直径为 10 cm)孔径分别为 2、1、0.5、0.25、0.1、0.063 mm。 1.4.2 化学因子测定

氧化还原电位(Eh)参照电位计法^[18]原位测定 (2 cm 一层),用智能便携式氧化还原电位仪、铂电极 和饱和甘汞参比电极(QX6530 型,中国南京),待仪 器稳定(一定时间)读数。*Eh= Eh*_r + *Eh* ₃₀。

其中 *Eh*: 样品相对于氢标准电极的电位(mV); *Eh*_r: t^{C} (测定样品时的温度)时饱和甘汞电极相对于氢标 准电极的电位(mV); *Eh*_n: 铂电极和饱和甘汞电极测 得的电位(mV)。

酸碱度(pH)参照电位计法^[18]使用 pH 仪(JENCO 6173 型,中国上海)室内测定。

含水率(W_*)采用减质量法计算(两次平行样测定的差值不得大于1%)^[18]。

 $W_{\pi} = [(m_2 - m_3)/(m_2 - m_1)] \times 100\%,$

其中 m_1 : 玻璃培养皿质量(g); m_2 : 玻璃培养皿与 湿样质量和(g); m_3 : 玻璃培养皿与烘干样质量 和(g)。

硫化物(S²⁻)含量参照离子选择电极法^[18]室内 测定(不包括 HgS、CuS、PbS),用智能便携式氧化 还原电位仪、硫电极和饱和甘汞电极(QX6530 型, 中国南京)。 硝酸盐(NO₃⁻)、硫酸盐(SO₄²⁻)、总有机碳(total organic carbon, TOC)、总铁含量由中国科学院海洋研究 所分析测试中心测定,其中NO₃⁻和SO₄²⁻含量用离子 色谱法(戴安 ICS-90 离子色谱仪,美国加利福尼亚)、 TOC 含量用非分散红外技术(元素 Vario 总有机碳分析 仪,德国哈瑙)、总铁含量用火焰原子吸收分光光度法 (NovAA300 火焰原子吸收光谱仪,德国耶拿)测定。

1.4.3 相关性分析

MTB与环境因子的相关性用统计软件SPSS 16.0 中的Pearson Correlation 分析。

2 结果

2.1 MTB 垂直分布特征

选取 4 个有代表性的柱状样(编号为 1*、2*、3*、 4*)进行分析,深度分别为 15、18、14、14 cm;每个 柱状样中都有一个明显的黄-黑沙界面,深度分别在 7、9、7、5 cm 处(图 1);2 cm 分层后共获得 30 个样 品。所有样品中的 MTB 以趋磁球菌占优势(大于 90%),有少量的弧菌、螺菌和 MMPs;约 95%为趋北 型 MTB。MTB 的垂直分布不均匀:最大丰度位于 黄-黑沙界面,分别在 7~8 cm(93 个/cm³)、9~10 cm (136 个/cm³)、7~8 cm(127 个/cm³)、5~6 cm (168 个/cm³)处。表层 2 cm 内几乎没有 MTB,从表层 至黄-黑沙界面,MTB 丰度随深度的增加而增大;界面 下,丰度随深度的增加而下降。MTB 的丰度在界面上 下变化显著,最高相差 27 倍之多(柱 2*)。

通过对4个柱状样的*Eh*和S²⁻含量的测定(图1), 发现*Eh*在黄-黑沙界面处(2 cm范围内)急剧下降(柱 3*,最大相差140 mV),黄-黑沙界面正好处在*Eh*降 低和S²⁻浓度上升的变化跃层,也就是沉积物中的 OATZ^[14, 19-23],而MTB最大丰度位于该跃层(图1)。

2.2 MTB 垂直分布与生物、物理、化学因子的关系

2.2.1 MTB 与细菌总数的关系

细菌总数的垂直分布差异大:表层 0~2 cm 内为 $6.8 \times 10^5 \sim 14.3 \times 10^5 \ \text{^/cm}^3$, 3~4 cm 内为 $4.4 \times 10^5 \sim 13.0 \times 10^5 \ \text{^/cm}^3$ (柱 1*、2*、3*、4*),细菌和 MTB 的最 大丰度出现的位置不相同。MTB 的垂直分布与细菌 总数的垂直分布无显著相关性(表 1, *r* =-0.307, *P* > 0.05)。

2.2.2 MTB 与 T, S, pH 的关系

采样点温度在 4.9~13.8 ℃, 随深度增加而递减;



图 1 沉积物中 MTB 丰度、*Eh*、S²⁻质量比、黄-黑沙界面的垂直分布图

Fig.1 Vertical distribution of MTB abundance, redox potential, sulfide content and yellow-black layers in the sediment cores

盐度在 26.0~31.5, 随深度增加而逐渐下降; pH 在 7.75~8.18, 随深度变化而变化。MTB 的垂直变化与 温度、盐度、酸碱度无显著相关性(表 1)。

2.2.3 MTB 与粒度和含水率的关系

以柱 4*为例, 结果显示: 小于 0.25 mm 粒级含

量与含水率显著正相关(表 1, r = 0.898, P < 0.01); 小于 0.25 mm 粒级含量和含水率在黄-黑沙界面出现小峰值, 而 MTB 恰好主要分布在此范围(图 2、表 2); 4 个柱状样 中, 小于 0.25 mm 粒级含量为 48%~83.9%、含水率为 19.5%~23.6%时, MTB 较多(94~169 个/cm³); MTB 的

Tab.1 Correlation analysis between the abundance of MTB and environmental factors

相关性	MTB	细菌	pН	Т	S	Eh	$W_{\mathcal{K}}$	粒级	S ²⁻	TOC	SO_4^{2-}	NO_3^-
细菌	-0.307											
	(0.105)											
pН	0.171	0.022										
	(0.376)	(0.908)										
Т	0.071	-0.299	0.397*									
	(0.730)	(0.138)	(0.044)									
S	-0.040	-0.075	0.392*	0.102								
	(0.839)	(0.698)	(0.035)	(0.620)								
Eh	-0.032	-0.203	0.558**	0.233	-0.107							
	(0.878)	(0.319)	(0.003)	(0.252)	(0.602)							
W_{\star}	0.341	-0.146	0.002	0.099	0.377*	-0.149						
	(0.071)	(0.449)	(0.994)	(0.631)	(0.044)	(0.469)						
粒级	0.293	-0.097	-0.239	-0.084	0.275	-0.384	0.898**					
	(0.123)	(0.616)	(0.212)	(0.684)	(0.148)	(0.052)	(0.000)					
S ²⁻	-0.161	0.275	-0.522*	-0.668**	0.032	-0.455	0.384	0.465*				
	(0.474)	(0.215)	(0.013)	(0.002)	(0.887)	(0.051)	(0.077)	(0.029)				
TOC	0.102	-0.084	-0.215	-0.085	-0.161	0.357	0.361	0.174	0.280			
	(0.600)	(0.666)	(0.263)	(0.680)	(0.403)	(0.073)	(0.054)	(0.366)	(0.206)			
SO_4^{2-}	0.280	-0.131	-0.569**	-0.495*	-0.581**	-0.145	0.199	0.318	0.311	0.411*		
	0.141	0.499	0.001	0.010	0.001	0.480	0.301	0.093	0.158	0.027		
NO_3^-	-0.250	0.038	-0.280	0.198	-0.146	-0.314	-0.307	-0.215	-0.088	-0.295	-0.175	
	(0.262)	(0.868)	(0.207)	(0.376)	(0.517)	(0.155)	(0.164)	(0.336)	(0.738)	(0.183)	(0.435)	
Fe	-0.231	-0.182	-0.180	0.454*	0.285	-0.037	0.303	0.372*	0.090	-0.100	-0.282	-0.016
	(0.227)	(0.343)	(0.351)	(0.020)	(0.133)	(0.859)	(0.110)	(0.047)	(0.691)	(0.604)	(0.139)	(0.944)
注:括号外表示皮尔逊相关系数,括号内表示显著性高低;*表示在 P < 0.05 条件下显著相关;**表示在 P < 0.01 条件下显著相关												

丰度变化与二者的变化趋势基本一致。

2.2.4 MTB 与 Eh, S²⁻, SO²⁻, TOC 的关系

4个柱状样中,上层黄沙 *Eh*为 375.0~179.7 mV, 通常属于弱氧化-弱还原性质^[23];黄-黑沙界面下 *Eh*为 179.7~-107.0 mV,通常属于弱还原-还原环 境^[23]。MTB 最大丰度出现在氧化还原跃层,主要分 布在弱还原-还原的环境中。

S²⁻质量比为0~2.56 mg/kg,表层为零,随深度增加而逐渐升高,峰值出现在黄-黑沙界面下,分别位于 8 cm(柱3*、4*)、12 cm(柱2*)处。4个柱状样中,SO₄²⁻ 在表层为410.1~528.7 mg/kg,随深度增加而增加, 在黄-黑沙界面达到峰值,为468.8~841.6 mg/kg(柱 3*除外),随后下降。TOC表层质量分数在0.034%~ 0.054%,变化趋势与硫酸盐类似,在黄-黑沙界面 为0.028 %~0.602 %。MTB的变化趋势与SO₄²⁻的基本 一致,在SO₄²⁻含量峰值区MTB达到最大丰度(以柱 4*为例,图3)。SO₄²⁻和TOC显著相关(表1, r =0.411, *P* < 0.05)。MTB与TOC无显著相关性(表1,*r*=0.102, *P* > 0.05)。

2.2.5 MTB 与 NO₃、总铁的关系

四个柱状样中,NO₃和总铁含量的垂直分布特 征不明显,MTB最大丰度对应的NO₃质量比为1.75~ 8.76 mg/kg,总铁质量比为2411~4277 mg/kg。未发现 NO₃、总铁含量与MTB 垂直分布有显著相关性(表1)。

3 讨论

我们在汇泉湾潮间带观察到的 MTB 以趋北型的趋磁球菌为主,这与邢素娥等在汇泉湾沿岸水深约2m的泥水交界处所发现的结果一致^[24]。

本文数据表明,MTB占细菌总数的比例最大为 0.027%,不是细菌群落中的优势类群。而在德国 Chiemsee湖沉积物的OATZ区,Magnetobacteriumbavaricum是微生物群落中的主要组成部分^[20];在 淡水沉积物的OATZ区,有时MTB占细菌总量的



图 2 柱 4*沉积物中 MTB 丰度与粒径、含水率的垂直分 布图

Fig.2 Vertical distribution of MTB abundance, grain size and water content in the sediment core 4



图 3 柱 4*沉积物中 MTB 丰度、 SO₄²⁻ 质量比、TOC 质 量分数垂直变化图



	8										
。 密 庄 (am)	粒级组分百分比(%)										
沐皮(cm) -	细砾	巨砂	粗砂	中砂	细砂	粗粉砂					
0~2	7.72	26.19	28.76	19.69	17.20	0.44					
2~4	4.35	27.42	30.49	16.75	19.60	1.39					
4~6	3.99	13.52	21.02	13.55	44.03	3.89					
6~8	12.83	16.99	19.47	12.90	35.08	2.73					
8~10	22.69	12.23	12.94	8.91	39.49	3.74					
10~12	8.69	9.90	10.26	7.01	58.19	5.95					
12~14	1.00	1.23	2.34	2.08	82.61	10.74					

表 2 柱 4*沉积物中不同深度下粒级组分的垂直分布

Tab.2 Vertical distribution of grain size content in the sediment core 4

注:细砾 > 2 mm ,巨砂 1~2 mm ,粗砂 0.5~1 mm ,中砂 0.25~0.5 mm ,细砂 0.1~0.25 mm ,粗粉砂 0.063~0.1 mm

1%^[25]; 定量 PCR 的方法分析美国 Falmouth 盐池水 体中 MTB 的种群动态,有时 MTB 占此层细菌量的 10%^[26]。

已有的研究发现, MTB 主要分布在水体(淡水和 海洋)中和沉积物中的 OATZ。例如:在水体中,美国 Pettaquamscutt 河口的 OATZ(OATZ 在 3.5~4.7 m 水深 处)发现产铁氧化物型磁小体的 MTB 聚集^[22];美国 Falmouth 盐池水体中产铁氧化物型磁小体的趋磁球 菌位于氧跃层上部(即 OATZ),而产铁硫化物型磁小 体的 MMPs 和趋磁大杆菌分布在氧跃层底部或氧跃 层之下的硫化物浓度较低的区域(跃层在水体深度 $1.5~3.4 \text{ m} \ \mathrm{b}$)^[14]。在沉积物中, *Magnetobacterium bavaricum* 密集出现在德国 Chiemsee 湖沉积物的 OATZ, 其深度在沉积物 5 mm $\mathcal{V}^{[20]}$; 巴西 Araruama 潟湖沉积物中发现的 '*Candidatus* Magnetoglobus multicellularis'主要分布在氧跃层底部(沉积物 4 cm 处丰度最大)^[19]; 南大西洋远洋和半远洋沉积物(水 深约 3000 m)中的 MTB 主要聚集在低氧气浓度区域 (沉积物上层 10 cm 内)^[21]。我们在潮间带沉积物中发现, MTB 最大丰度位于氧化还原跃层, 即 OATZ 区, 此处黄-黑沙界面显著, 深度为沉积物表层下 5~9 cm, 较淡水湖沉积物 MTB 和沿岸潟湖沉积物 MMPs 分布 深度更深。究其原因, 可能是潮间带环境受潮汐海浪风等影响, OATZ 形成于沉积物的更深层, 其 MTB 的最大分布也随之下移。De Beer 对 Wadden 海潮间带砂质沉积物中氧气的变化进行了长周期的检测, 发现氧气渗透深度可达 10 cm 或更深^[27]。根据他的研究结果, 结合我们的调查数据, 推测像汇泉湾这种砂质沉积物环境, 氧气渗透深度加深, 使 OATZ 下移, 也就形成了潮间带沉积物中 MTB 的最大丰度随 OATZ 下移而加深的现象。这可能是 MTB 在潮间带沉积物中分布的一个特点。

细粒径的沉积物通常含水率高、比表面积大、 渗透性小,能吸附更多的有机物、氮、磷等营养元 素^[28-29]。Postec 等^[30]研究地中海 Fos 海湾中的 MTB, 认为沉积物的粒度是影响 MTB 存在的决定性因素。 本调查中,小于 0.25 mm 粒级组分与含水率显著正 相关,该粒级组分的峰值处于黄-黑沙界面,认为沉 积物的类型影响 MTB 的垂直分布,黄-黑沙界面的 细颗粒吸附较多的营养元素供给 MTB 生活利用,保 证充分的营养来源,利于 MTB 的生存。

Postec等^[30]发现, MTB丰度随时间变化的趋势与 SO₄²⁻浓度的变化趋势一致,本文结果也显示MTB的 变化趋势与 SO_4^{2-} 的基本一致。MTB丰度下降时, SO_4^{2-} 含量也下降,猜测MTB和硫酸盐还原菌存在一 定关系(如: 硫酸盐还原菌 Desulfovibrio magneticus strain RS-1是 -变形菌纲MTB)或MTB含有参与硫 氧化的基因(dsr cluster),还原 SO₄²⁻产生S^{2-[31]}。SO₄²⁻ 和S²⁻可以互相转化^[32-36], 二者可能作为一个因子影响 MTB的垂直分布。Bazylinski等^[22]认为在含硫化物的 缺氧区多出现产铁硫化物型磁小体的MTB, 潘红苗 等[13]在青岛汇泉湾水泥交界处的沉积物中观察到趋 磁球菌体内除了磁小体外、还包含大量的硫颗粒。 Martins等^[37]发现原生动物可以摄食MTB、并在其酸 性食物泡内将MTB的磁小体消化降解, 使磁小体中 的晶体态铁转化成生物更容易利用的胶体态铁、释放 到环境中, 被浮游植物等利用, 参与铁在食物链中的 传递和循环。因此结合本文调查结果,认为在铁、硫 的地球化学循环中, MTB占有重要的地位。这将有助 于我们深入认识这类特殊微生物在铁、硫生物地化循 环中的作用。

4 结论

汇泉湾潮间带沉积物中的趋磁细菌以趋北型的 趋磁球菌为主,其垂直分布不均匀,最大丰度出现 在沉积物的黄-黑沙界面处,即氧化还原跃层,也是 通常认为的有氧-无氧过渡区。影响潮间带沉积物中 趋磁细菌垂直分布的因子有氧化还原电位、粒径、 含水率及硫酸盐等,趋磁细菌垂直变化趋势与粒径、 含水率、硫酸盐的变化趋势基本一致。沉积物中的 细砂环境更利于趋磁细菌生存。

致谢:感谢徐剑虹老师在采样及样品的初步处理中 给予的帮助。感谢董逸师姐在论文撰写中提供的宝 贵意见。

参考文献:

- Bellini S. On a unique behavior of freshwater bacteria[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(1): 3-5.
- [2] Bellini S. Further studies on "magnetosensitive bacteria"[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(1): 6-12.
- [3] Frankel R B. The discovery of magnetotactic/magnetosensitive bacteria[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(1):1-2.
- [4] Blakemore R P. Magnetotactic bacteria[J]. Science, 1975, 190(4212): 377-379.
- [5] Maratea D, Blakemore R P. Aquaspirillum magnetotacticum sp.Nov., a magnetic Spirillum [J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1981, 31(4): 452-455.
- [6] Sakaguchi T, Arakaki A, Matsunaga T. Desulfovibrio magneticus sp. nov., a novel sulfate-reducing bacterium that produces intracellular single-domain-sized magnetite particles[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2002, 52(1): 215-221.
- [7] Hanzlik M, Winklhofer M, Petersen N. Pulsed-fieldremanence measurements on individual magnetotactic bacteria[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 248(2): 258-267.
- [8] Lefèvre C T, Bernadac A, Yu-Zhang K, et al. Isolation and characterization of a magnetotactic bacterial culture from the Mediterranean Sea[J]. Environmental

Microbiology, 2009, 11(7): 1646-1657.

- [9] Wenter R, Wanner G, Schüler D, et al. Ultrastructure, tactic behaviour and potential for sulfate reduction of a novel multicellular magnetotactic prokaryote from North Sea sediments[J]. Environmental Microbiology, 2009, 11(6): 1493-1505.
- Bazylinski D A, Frankel R B. Magnetosome formation in prokaryotes[J]. Nature Reviews Microbiology, 2004, 2(3): 217-230.
- [11] Frankel R B, Bazylinski D A, Johnson M S, et al. Magneto-aerotaxis in marine coccoid bacteria[J]. Biophysical Journal, 1997, 73(2): 994-1000.
- [12] Faivre D, Schüler D. Magnetotactic Bacteria and Magnetosomes[J]. Chemical Reviews, 2008, 108(11): 4875-4898.
- [13] 潘红苗,武洪庆,肖天. 趋磁细菌生态学研究进展[J].生态学报, 2009, 29(4): 2107-2114.
- [14] Simmons S L, Sievert S M, Frankel R.B, et al. Spatiotemporal distribution of marine magnetotactic bacteria in a seasonally stratified coastal salt pond[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(10): 6230-6239.
- [15] Wolfe R S, Thauer R K, Pfennig N. A 'capillary racetrack' method for isolation of magnetotactic bacteria[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1987, 45(1): 31-35.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中 国国家标准化管理委员会.海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查[M].北京:中国标准出版社,2007: 18-29.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国 国家标准化管理委员会.海洋调查规范第 8 部分:海 洋地质地球物理调查[M].北京:中国标准出版社, 2007: 7-9.
- [18] 国家质量技术监督局. 海洋监测规范第 5 部分:沉积 物分析[M].北京:中国标准出版社, 1998: 65-81.
- [19] Abreu F, Martins J L, Silveira T S, et al. 'Candidatus Magnetoglobus multicellularis', a multicellular, magnetotactic prokaryote from a hypersaline environment[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2007, 57(6): 1318-1322.
- [20] Spring S, Amann R, Ludwig W, et al. Dominating role

of an unusual magnetotactic bacterium in the microaerobic zone of a freshwater sediment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(8): 2397-2403.

- [21] Petermann H, Bleil U. Detection of live magnetotactic bacteria in South Atlantic deep-sea sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 117: 223-228.
- [22] Bazylinski D A, Frankel R B, Heywood B R, et al. Controlled biomineralization of magnetite (Fe₃O₄) and greigite (Fe₃S₄) in a magnetotactic bacterium[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(9): 3232-3239.
- [23] 宋金明, 李延, 朱仲斌. *Eh* 和海洋沉积物氧化还原环境的关系[J]. 海洋通报, 1990, 9(4): 33-39.
- [24] 邢素娥,潘红苗,朱开玲,等.青岛汇泉湾海洋趋磁 细菌多样性研究[J].高技术通讯,2008,18(3): 312-317.
- [25] Flies C B, Jonkers H M, De Beer D, et al. Diversity and vertical distribution of magnetotactic bacteria along chemical gradients in freshwater microcosms[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2005, 52(2): 185-195.
- [26] Simmons S L, Bazylinski D A, Edwards K J. Population dynamics of marine magnetotactic bacteria in ameromictic salt pond described with qPCR[J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(9): 2162-2174.
- [27] De Beer D, Wenzhöfer F, Ferdelman T G, et al. Transport and mineralization rates in North Sea sandy intertidal sediments, Sylt-Rømø Basin, Wadden Sea[J]. Limnology and Oceanography, 2005, 50(1): 113-127.
- [28] Krom M D, Berner R A. Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1980, 25(5): 797-806.
- [29] 周栋, 王东启, 陈振楼, 等. 上海市滨岸带沉积物中 酸挥发性硫化物垂直分布及空间变化特征[J]. 环境 科学研究, 2009, 22(2): 138-144.
- [30] Postec A, Tapia N, Bernadac A, et al. Magnetotactic bacteria in microcosms originating from the French Mediterranean coast subjected to oil-industry activities[J]. Environmental Microbiology, 2012, 63(1): 1-11.
- [31] Kawaguchi R, Burgess J G, Sakaguchi T, et al. Phylogenetic analysis of a novel sulfate- reducing magnetic bacterium, RS-1, demonstrates its membership of the delta-Proteobacteria[J]. FEMS Microbiology Letters, 1995, 126(3): 277-282.

- [32] 甘居利,李纯厚,贾晓平,等.南海北部渔场表层沉积物中的硫化物[J]. 湛江海洋大学学报,2001,21(2): 44-47.
- [33] 王文强, 韦献革, 温琰茂. 哑铃弯网箱养殖对表层沉积物的污染[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(1): 56-60.
- [34] 廖家隆,姚素平,丁海. 滨海红树林泥炭沉积物中硫 的赋存特点及其控制因素[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 620-630.
- [35] 焦涛. 城市河道沉积物-水体系硫化物赋存特征及反 硫化过程研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [36] 王娟娟,李晓敏,曲克明,等.乳山湾底质中硫化物 和氧化-还原电位的分布与变化[J].海洋水产研究, 2006, 27(6): 64-70.
- [37] Martins J L, Silveira T S, Abreu F, et al. Grazing protozoa and magnetosome dissolution in magnetotactic bacteria[J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(11): 2775-2781.

Vertical distribution characteristics of magnetotactic bacteria and the relationship with environmental factors in intertidal zone of Qingdao

ZHANG Rui^{1, 2, 5}, CHEN Yi-ran^{1, 2, 5}, ZHOU Ke³, ZHANG Wen-yan^{1, 5}, XIAO Tian^{1, 5}, WU Long-Fei^{4, 5}

(1. Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 4. Laboratoire de Chimie Bactérienne, Aix-Marseille Université, CNRS, F-13402 Marseille Cedex 20, France; 5. France-China Bio-Mineralization and Nano-Structures Laboratory, Qingdao 266071, China)

Received: Dec.,6,2012

Key words: magnetotactic bacteria; vertical distribution; environmental factors; redox potential; intertidal zone

Abstract: Magnetotactic bacteria (MTB) are Gram-negative, motile prokaryotes that can orient and migrate along the geomagnetic lines of force. MTB are ubiquitous in sediments and stratified water column and distribute predominantly in the oxic-anoxic transition zone (OATZ). To study the vertical distribution of MTB and their relationships with environmental factors, sediment cores were collected from intertidal sites in the Huiquan Bay, Qingdao. The redox potential and temperature were measured *in situ*, and other geochemical parameters of the sediments and count of MTB were analyzed in laboratory. Results showed that the most abundant MTB are coccoid-shaped ones which swim toward the north pole. MTB were concentrated in the reduced environments with a redox potential ranging from 179.7 mV to -107.0 mV. The maximum abundance (94~169 ind./cm³) of MTB was observed at redox cline which was located at the yellow-black layers transition with a depth of 5~9 cm, implying it's a OATZ. The MTB exhibited a similar vertical distribution manner with those of the grain size, water content and sulfate concentration in the sediment.

(本文编辑:张培新)