

高爱国, 陈皓文, 赵冬梅. 2009 西北冰洋海域表层沉积物中厌氧菌分布特征 [J]. 环境科学学报, 29(10): 2209–2214

Gao A G, Chen H W, Zhao D M. 2009. Distribution of anaerobic bacteria in surface sediments from the Western Arctic Sea [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(10): 2209–2214

西北冰洋海域表层沉积物中厌氧菌分布特征

高爱国^{1,2*}, 陈皓文³, 赵冬梅¹

1 厦门大学海洋与环境学院海洋学系, 厦门 361005

2 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005

3 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

收稿日期: 2009-01-01 修回日期: 2009-04-18 录用日期: 2009-07-07

摘要: 用逐步稀释法在 4℃ 和 25℃ 培养条件下测定了西北冰洋海域 24 个表层沉积物样品中厌氧菌 (Anaerobic bacteria, AAB) 的检出率和含量。同时, 分析了这两项指标的水平分布 (纬度间、经度间) 差异, 以及在不同水深的变化特征。结果表明, 在 4℃ 和 25℃ 培养条件下厌氧菌检出率高达 100%, AAB 含量范围分别为 $9.00 \times 10^2 \sim 2.40 \times 10^7$ cell g⁻¹ 和 $2.90 \times 10^4 \sim 2.40 \times 10^7$ cell g⁻¹, 平均含量分别为 4.54×10^6 cell g⁻¹ 和 3.99×10^6 cell g⁻¹。AAB 含量存在水平分布差异, 随着纬度升高, 或经度自西向东, 或水深的加大, AAB 的含量均呈现逐渐降低的趋势。

关键词: 西北冰洋; 加拿大海盆; 楚科奇海; 厌氧菌; 表层沉积物

文章编号: 0253-2468(2009)10-2209-06 中图分类号: X171 文献标识码: A

Distribution of anaerobic bacteria in surface sediments from the Western Arctic Sea

GAO Aiguo^{1,2,*}, CHEN Haowen³, ZHAO Dongmei¹

1 Department of Oceanography, College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005

2 State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005

3 First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061

Received 1 January 2009; received in revised form 18 April 2009; accepted 7 July 2009

Abstract The occurrence and content of anaerobic bacteria in 24 surface sediments in the Western Arctic Ocean were measured via progressive dilution under laboratory incubation at 4°C and 25°C, and the spatial patterns of anaerobic bacteria distribution were further examined. All the samples have anaerobic bacteria. The contents of anaerobic bacteria cultivated ranged from 9.00×10^2 to 2.40×10^7 cell g⁻¹ wet sample (the same hereafter) and 2.90×10^4 to 2.40×10^7 cell g⁻¹ with an average of 4.54×10^6 cell g⁻¹ and 3.99×10^6 cell g⁻¹ in the 4°C and 25°C samples respectively. The distributions of anaerobic bacteria varied by both latitude and longitude and also in sediment samples with different water depths. The anaerobic bacteria content decreased from low latitude to high latitude, from the western area to the eastern area, and from shallow water to deep basin.

Keywords Western Arctic Sea; Canada Basin; Chukchi Sea; anaerobic bacteria; surface sediment

1 引言 (Introduction)

海洋沉积物中的有机质受到微生物的降解, 将使环境中的氧被逐渐消耗, 并产生 CH₄、H₂S、CO₂、H₂ 等代谢产物, 从而形成少氧或缺氧的厌氧微环境, 厌氧菌 (AAB) 随之增多 (Parkes *et al.*, 2000)。厌氧菌与好氧菌并没有明确的界限, 为了讨论方便, 通常将生长在没有氧气或培养基 E_h < 0V 的细

菌称为厌氧菌。厌氧菌存在于所有的海洋沉积物或大部分海水样品中, 它们许多是兼性厌氧 (Facultative) 或兼性需氧 (Microaerophilic) 的, 有一些则是专性厌氧的 (薛庭耀, 1962)。厌氧菌与好氧菌共存于沉积物中, 构成了沉积物中的微生物生态系统 (Robador *et al.*, 2007; Parkes *et al.*, 1994; D'Hondt *et al.*, 2002), 在适当条件下它们之间甚至会发生相互转变。

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40576060, 40376017)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40576060, 40376017)

作者简介: 高爱国 (1959—), 男, 教授 (博士), E-mail: agga@xmu.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)

Biography: GAO Aiguo (1959—), male, professor (Ph. D.), E-mail: agga@xmu.edu.cn * Corresponding author

厌氧菌在元素的地球化学循环中起着重要作用,它们与其他微生物一起参与有机碳、硫、氮、磷等的矿化过程,对沉积物的组成和性质变化、早期成岩过程等发挥着重要的作用 (Schink *et al.*, 2000; Gulberg *et al.*, 2002; Rysgaard *et al.*, 2004; Salmi *et al.*, 2004; Amosi *et al.*, 2005). 目前,研究较多的有硫酸盐还原菌 (Knoblauch *et al.*, 1999a; 1999b; 陈皓文等, 2007; 高爱国等, 2003; 2008a)、铁细菌 (高爱国等, 2008b)、锰细菌 (高爱国等, 2008c)、甲烷菌 (Thomsen *et al.*, 2001; Singh *et al.*, 2005)、反硝化菌 (Hulth *et al.*, 2005)等.

在微生物的生物地球化学研究中,不仅要了解微生物的种类、特定微生物的生物地球化学行为等 (Rivkin *et al.*, 1996; Rossello-Mora *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2004),还需要了解微生物的丰度变化特征 (Knoblauch *et al.*, 1999a; Parkes *et al.*, 2000). 对于进行大量样品的分析而言,经典的逐步稀释法虽然工作量较大,但应是简便易行的方法之一. 虽然厌氧菌的发现已有 330年,由于要计算海洋厌氧菌面临很多困难,如受制于实验条件和认识水平,且难以保证所用方法中各步骤的条件均达到厌氧状态等. 因此,这方面的资料较少,而在西北冰洋海域海洋沉积物中的研究更是少见. 考虑到某些功能性细菌同时具有多种功能,如同时兼具硫酸盐还原菌与铁细菌的功能等,因此,厌氧菌的数量将小于各功能细菌数量之和.

近年来,对于适冷菌的研究受到越来越多的关注 (Shcherbakova *et al.*, 2005),为了有效地评价厌氧菌在西北冰洋海域表层沉积物地球化学中的作用,从总体上认识厌氧菌的分布及变化特征,更全面地了解研究区的生物地球化学过程,本文借鉴前人的方法,用逐步稀释法在 4℃和 25℃培养条件下测定西北冰洋海域 24个表层沉积物样品中厌氧菌的检出率和含量,所涉及的厌氧菌是相对于特定培养基及培养条件 (薛庭耀, 1962)而言的. 同时,分析这两项指标的水平分布 (纬度间、经度间)差异,以及在不同水深的变化特征.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区简介

研究区位于北冰洋及其邻近的楚科奇海与波弗特海 (66°~80°N, 148°~170°W, 水深 41~3850m). 其中,加拿大海盆是西北冰洋的主体,而楚

科奇海与波弗特海是北冰洋周围的边缘海,为叙述方便,本文将其统称为西北冰洋海域. 相比较而言,在靠近亚美大陆一侧的沉积物含有较多营养物质 (薛斌等, 2006),推测可能分布有较多的厌氧菌,并在生物地球化学中发挥作用.

2.2 样品采集

2003年 7~9月的中国第二次北极考察期间,在“雪龙”号考察船上进行表层沉积物采样. 所用采样器分别为箱式采样器和多管取样器. 将沉积物采至甲板后,在现场按微生物学采样要求去掉上覆水及浮泥,采集深度 0~1cm的表层沉积物样品作为微生物分析所需样品,并迅速将其置于无菌塑料瓶中,使其尽可能不暴露于空气中,封盖保存于 4℃以下的冰箱中,带回国内实验室分析. 研究区采样站位参见图 1,共计 24个站位.

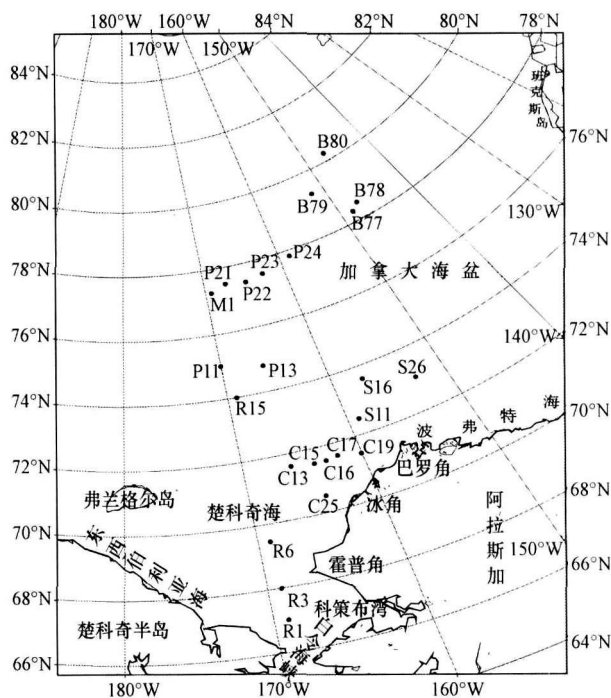


图 1 北极沉积物细菌分析样品采样站位图

Fig. 1 Map of sampling stations for bacteriological analysis from surficial sediments in the Western Arctic sea

2.3 厌氧菌分析

样品运回国内后立即开展实验室研究,运用逐步稀释法进行厌氧菌分析. 首先将样品转移到试管中,所用培养基 (薛庭耀, 1962)为: 陈海水 1000mL, 消化蛋白 5g, 磷酸高铁 1g, 琼脂 15.0g, 质量分数 1.0% 葡萄糖、质量分数 0.1% 硫化甘醇酸钠、质量分数 0.0002% 美蓝. 在 120℃消毒 20min, pH 值为 7.5~7.6.

用逐步稀释法组成稀释序列, 橡皮塞塞紧后置于 4°C 或 25°C 的恒温中分别培养 3 周以上, 期间不断观察培养情况, 并与空白作对照, 以试管中出现混浊/菌膜/沉淀者为厌氧菌阳性. 参照文献 (薛庭耀, 1962; 陈皓文等, 2007) 要求, 计算厌氧菌的检出率和含量 (cell g^{-1} , 以湿重计, 下同).

3 结果 (Results)

对研究区表层沉积物厌氧菌分析表明, 样品中厌氧菌的检出率为 100% (4°C 时 24 个样品, 25°C 时 8 个样品), 结果见表 1. 由表 1 可知, 4°C 和 25°C 两种培养温度下 AAB 的检出率均为 100%, 说明在表层沉积物中广泛分布着 AAB. 在 4°C 时, 样品中 AAB 含量范围为 $9.00 \times 10^2 \sim 2.40 \times 10^7 \text{ cell g}^{-1}$, 平均为

$4.54 \times 10^6 \text{ cell g}^{-1}$. 4°C 培养时, AAB 最高含量同时出现于 4 个站位, 即 R01、R03、R06 和 C17 站, 均为 $2.40 \times 10^7 \text{ cell g}^{-1}$, 它们处于研究区南部. 最小 AAB 值则出现于 P21 站, 它位于研究区北部. 最高与最低含量相差悬殊, 达 2.7×10^4 倍, 而 AAB 含量均值为最低含量的 5000 余倍, AAB 含量均值与最高含量差为 50 余倍. 这表明 AAB 低含量站位相对较少, 各站位间 AAB 含量有显著差异. 25°C 时, AAB 含量范围为 $2.90 \times 10^4 \sim 2.40 \times 10^7 \text{ cell g}^{-1}$, 平均为 $3.99 \times 10^6 \text{ cell g}^{-1}$. 25°C 培养时, AAB 最高值和最低 AAB 值分别出现于 S26 和 S16 站, 它们均出现于研究区加拿大海盆偏中南部, 最高含量是最低含量的 828 倍.

表 1 西北冰洋海域表层沉积物中厌氧菌含量

Table 1 Content of anaerobic bacteria from surface sediments in the Western Arctic Sea

站号	纬度 (N)	经度 (W)	水深 /m	4°C 菌数 /(cell g^{-1})	25°C 菌数 /(cell g^{-1})
R01	66° 59' 28"	169° 00' 49"	50	2.40×10^7	
R03	67° 59' 57"	168° 59' 22"	55	2.40×10^7	
R06	69° 29' 43"	169° 00' 00"	53	2.40×10^7	
C25	70° 29' 38"	163° 58' 09"	41	1.10×10^6	
C19	71° 27' 49"	160° 01' 09"	50	1.10×10^6	2.40×10^5
C17	71° 29' 21"	162° 02' 01"	46	2.40×10^7	
C16	71° 32' 51"	163° 00' 52"	43	2.40×10^5	
C15	71° 34' 45"	164° 00' 46"	42	2.40×10^6	
C13	71° 36' 51"	165° 59' 51"	44	2.40×10^6	
S11	72° 29' 24"	159° 00' 00"	50	9.30×10^4	2.40×10^6
S26	73° 00' 00"	152° 40' 00"	3000	7.50×10^5	2.40×10^7
S16	73° 35' 28"	157° 09' 50"	3800	1.90×10^4	2.90×10^4
R15	73° 58' 58"	169° 04' 23"	175	1.10×10^6	
P13	74° 48' 02"	165° 48' 24"	453	2.40×10^5	
P11	75° 00' 24"	169° 59' 37"	263	1.10×10^5	1.10×10^6
M1	77° 17' 56"	169° 00' 46"	1456	2.40×10^5	2.40×10^5
P21	77° 22' 44"	167° 21' 38"	561	9.00×10^2	
P22	77° 23' 43"	164° 55' 59"	326	1.50×10^4	
P23	77° 31' 40"	162° 31' 05"	2200	2.40×10^4	
P24	77° 48' 38"	158° 43' 16"	1880	2.40×10^6	2.40×10^6
B77	78° 18' 55"	148° 06' 57"	3850	2.40×10^4	
B78	78° 28' 43"	147° 01' 41"	3800	2.40×10^5	
B79	79° 18' 52"	151° 47' 09"	3800	1.10×10^5	
B80	80° 13' 25"	146° 44' 16"	3750	4.30×10^5	1.50×10^6

4 讨论 (Discussion)

4°C 和 25°C 两种温度培养中, AAB 的平均含量分别为 $4.54 \times 10^6 \text{ cell g}^{-1}$ 和 $3.99 \times 10^6 \text{ cell g}^{-1}$. 在数量上与同研究区表层沉积物和岩芯中的好氧菌相比, 含量差距不大 (Gao *et al.*, 2007, 2008), 这表明相当数量的厌氧菌在研究区沉积物中同样起着重要的地球化学和生态学作用.

相关研究表明, 控制沉积物中细菌生存的主要因素是输入海底的有机碳通量及其可利用性 (Deming *et al.*, 1992), 表层沉积物中微生物量与有机碳显著相关、与沉积速率也成正相关 (Boetius *et al.*, 2000). Koencke 等 (2000) 对北冰洋欧亚海盆从巴伦支海陆坡到罗蒙诺索夫海岭的细菌分布研究发现, 随着水深增加, 纬度升高, 细菌生物量减少, 呈现细菌的地理分布差异特点. 温度对细菌的

影响也不容忽略的, 以往的研究表明, 该研究区沉积物中细菌的适宜生长温度为 4~15℃, 大部分细菌为嗜冷菌或适冷菌, 有少量的中温菌存在 (Chen *et al.*, 2004). 然而, 也有关于适宜细菌生长更高的温度报道, 如太平洋沉积物细菌的适宜生长温度为 25℃ (Pakes *et al.*, 1994), 北冰洋沉积物中硫酸盐还原菌的适宜生长温度为 20℃ (Knoblauch *et al.*, 1999a). 为了揭示研究区表层沉积物中厌氧菌在不同地理区域内的分布差异, 讨论如下.

4.1 厌氧菌分布的纬度差异

将表层沉积物的 AAB 含量按纬度区间进行统计, 结果列于表 2. 由表 2 可知, 4℃时, AAB 含量均值在 4 个纬度区间中呈现出随纬度升高而降低的趋

势; 25℃时, AAB 含量均值也是随纬度升高而降低. 尽管培养温度不同, AAB 高含量的站位均出现于较低纬度的海区中, 这表明靠近亚美大陆一侧的海区可能更适于厌氧菌, 尤其是嗜中温厌氧菌的生长繁殖. 推测该区域可能有更适于厌氧菌生存的条件, 如较多的生源物质供应 (薛斌等, 2006). 低含量 AAB 的站位大多位于中、高纬度的海区中, 并以 4℃培养结果更为明显. 这可能是受沉积物的化学成分、海底水温等因子的制约 (Rivkin *et al.*, 1996; Rossell-Mora *et al.*, 1999; Robador *et al.*, 2007). 本研究结果表现出测站间、海区间表层沉积物中 AAB 含量分布的不均匀性, 类似的现象也见于北冰洋欧亚海盆 (Kroencke *et al.*, 2000).

表 2 西北冰洋海域表层沉积物厌氧菌含量纬度区间的比较

Table 2 Comparison of anaerobic bacteria numbers in surface sediments by latitude in the Western Arctic Sea

纬度 (N)	站位	4℃含量 / (cell g ⁻¹)			
		样品数	最小值	最大值	平均值
66°~70°	R1, R3, R6	3	2.40×10 ⁷	2.40×10 ⁷	2.40×10 ⁷
70°~74°	C25, C19, C17, C16, C15, C13, S11, S26, S16, R15	10	1.90×10 ⁴	2.40×10 ⁷	3.32×10 ⁶
74°~78°	P13, P11, M1, P21, P22, P23, P24	7	9.00×10 ²	2.40×10 ⁶	4.33×10 ⁵
>78°	B77, B78, B79, B80	4	2.40×10 ⁴	4.30×10 ⁵	2.01×10 ⁵
纬度 (N)	站位	25℃含量 / (cell g ⁻¹)			
		样品数	最小值	最大值	平均值
66°~70°	R1, R3, R6				
70°~74°	C25, C19, C17, C16, C15, C13, S11, S26, S16, R15	4	2.90×10 ⁴	2.40×10 ⁷	6.67×10 ⁶
74°~78°	P13, P11, M1, P21, P22, P23, P24	3	2.40×10 ⁵	2.40×10 ⁶	1.25×10 ⁶
>78°	B77, B78, B79, B80	1			1.50×10 ⁶

4.2 厌氧菌的经度分布差异

将表层沉积物的所在站位按经度区间划为 5 个分区后进行 AAB 指标比较分析, 结果列于表 3 从

表 3 可以看出, 经度由东向西, 4℃时的 AAB 平均值呈明显的增高趋势, 而 25℃时这种增高趋势不明显. 4℃和 25℃时, 西部 (165°W~170°W) 的 AAB

表 3 西北冰洋海域表层沉积物厌氧菌含量经度区间的比较

Table 3 Comparison of anaerobic bacteria numbers in surface sediments by longitude in the Western Arctic Sea

经度 (W)	站位	4℃含量 / (cell g ⁻¹)			
		样品数	最小值	最大值	平均值
145°~150°	B80, B78, B77	3	2.40×10 ⁴	4.30×10 ⁵	2.31×10 ⁵
150°~155°	B79, S26	2	1.10×10 ⁵	7.50×10 ⁵	4.30×10 ⁵
155°~160°	S16, P24, S11	3	1.90×10 ⁴	2.40×10 ⁶	8.37×10 ⁵
160°~165°	C19, C17, P23, C16, C25, C15, P22	7	1.50×10 ⁴	2.40×10 ⁷	4.13×10 ⁶
165°~170°	P13, C13, P21, R3, R6, M1, R1, R15, P11	9	9.00×10 ²	2.40×10 ⁷	8.45×10 ⁶
经度 (W)	站位	25℃含量 / (cell g ⁻¹)			
		样品数	最小值	最大值	平均值
145°~150°	B80, B78, B77				
150°~155°	B79, S26	1			2.40×10 ⁵
155°~160°	S16, P24, S11				
160°~165°	C19, C17, P23, C16, C25, C15, P22	4	2.90×10 ⁴	2.40×10 ⁷	6.88×10 ⁶
165°~170°	P13, C13, P21, R3, R6, M1, R1, R15, P11	3	2.40×10 ⁵	2.40×10 ⁶	1.38×10 ⁶

值分别是东部 (145°W ~ 150°W (4°C)、150°W ~ 155°W (25°C)) 的 36.6 和 5.8 倍, 这表明在所测站位由东部、中部向西部, 生态环境逐渐有利于表层沉积物中 AAB 的生长繁衍. 这与北太平洋的营养物质通过白令海峡进入西北冰洋, 进而对研究区的生物地球化学活动产生影响, 并呈由西向东减弱的趋势一致.

4.3 不同水深沉积物中的厌氧菌分布

统计不同水深沉积物样品中厌氧菌含量, 结果如表 4 所示. 由表 4 可知, AAB 含量在不同水深范围间均有差异. 4°C 时, AAB 均值随水深的增加呈出先略减小后增大, 然后又减低到最小的态势, 最

大值和最小值分别出现在 41~55m 和 3000~3850m. 25°C 时, AAB 均值随水深增加呈现先增大而后减小的趋势, 最大值和最小值分别出现在 175~561m 和 1456~2200m. 总体来看, 两种培养温度条件下的 AAB 含量随水深增加而减小, 这表明水深的增大不利于部分 AAB 的生存. 这是水压增高、水温降低和来自海水的生源物质减少等生态环境因子综合影响的结果, 但这些因素却可能趋向有利于表层沉积物中部分兼性好氧、兼性厌氧菌, 包括一些适压 (barophilic) 和耐压 (barotolerant) 细菌的生长, 而不利于严格厌氧菌的生存, 具体原因尚待探讨.

表 4 西北冰洋海域表层沉积物厌氧菌含量变化对上覆水厚度的响应

Table 4 Response of sediment anaerobic bacteria content to overlying water depth in the Western Arctic Sea

水深 /m	站位	4°C 含量 / (cell g ⁻¹)			
		样品数	最小值	最大值	平均值
41~55	C25, C15, C16, C13, C17, S11, C19, R1, R6, R3	10	9.30 × 10 ⁴	2.40 × 10 ⁷	1.03 × 10 ⁷
175~561	R15, P11, P22, P13, P21	5	9.00 × 10 ⁵	1.10 × 10 ⁶	2.93 × 10 ⁵
1456~2200	M1, P24, P23	3	2.40 × 10 ⁴	2.40 × 10 ⁶	8.88 × 10 ⁵
3000~3850	S26, B8Q, B78, B79, S16, B77	6	1.90 × 10 ⁴	7.50 × 10 ⁵	2.62 × 10 ⁵
水深 /m	站位	25°C 含量 / (cell g ⁻¹)			
		样品数	最小值	最大值	平均值
41~55	C25, C15, C16, C13, C17, S11, C19, R1, R6, R3	2	2.40 × 10 ⁵	2.40 × 10 ⁶	1.32 × 10 ⁶
175~561	R15, P11, P22, P13, P21	3	2.90 × 10 ⁴	2.40 × 10 ⁷	8.38 × 10 ⁶
1456~2200	M1, P24, P23	1	2.40 × 10 ⁵	2.40 × 10 ⁵	2.40 × 10 ⁵
3000~3850	S26, B8Q, B78, B79, S16, B77	2	1.50 × 10 ⁶	2.40 × 10 ⁶	1.95 × 10 ⁶

5 结论 (Conclusions)

1) 利用逐步稀释法对西北冰洋海域 24 个表层沉积物作了厌氧菌检出率和含量测定, 厌氧菌的检出率高达 100%. 在 4°C 和 25°C 培养条件下, 厌氧菌的含量范围为 $9.00 \times 10^2 \sim 2.40 \times 10^7$ cell g⁻¹ 和 $2.90 \times 10^4 \sim 2.40 \times 10^7$ cell g⁻¹, 平均含量则分别为 4.54×10^6 cell g⁻¹ 和 3.99×10^6 cell g⁻¹, 证实研究区沉积物中广泛分布着大量的厌氧菌.

2) 研究区表层沉积物中厌氧菌含量均值大致呈现随纬度升高而降低, 随经度由东向西升高, 随水深增加而减小的趋势. 厌氧菌的分布与沉积环境、沉积物中有机质含量、营养物质来源、水深等理化和生态因子有关, 其相互作用关系还有待深入研究.

参考文献 (References):

- Amosti C, Finken, Larsen O, *et al.* 2005. Anoxic carbon degradation in Arctic sediments: Microbial transformations of complex substrates [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 69: 2309–2320
- Boetius A, Lochte K. 2000. Regional variation of total microbial biomass in sediments of the deep Arabian Sea [J]. *Deep-Sea Research II* 47: 149–168
- Chen H W, Gao A G, Sun H Q, *et al.* 2004. Abundance of general aerobic heterotrophic bacteria in the Bering Sea and Chukchi Sea and their adaptation to temperature [J]. *Chinese Journal of Polar Science* 15(1), 39–46
- Deming JW, Yager P L. 1992. Natural bacterial assemblages in deep-sea sediments: towards a global view // Rowe G T, Pariente V. *Deep Sea Food Chains and the Global Carbon Cycle* [M]. Netherlands: Dordrecht Netherlands Kluwer Academic Publishers 11–27
- D'Hondt S, Smith D C, Spivack A J. 2002. Exploration of the marine subsurface biosphere [J]. *JIDES-Journal* 28(1): 51–54
- 高爱国, 陈皓文, 孙海青. 2003. 北极沉积物中硫酸盐还原菌与生物地球化学要素的相关分析 [J]. *环境科学学报*, 23(5): 619–624

责任作者简介: 高爱国 (1959—), 男, 教授, 主要从事生物地球化学等研究.

- Gao A G, Chen H W, Sun H Q. 2003. Analysis on correlation between sulphate-reducing bacteria and biogeochemical factors of sediment in the Chukchi sea and Bering sea Arctic [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 23(5): 619—624 (in Chinese)
- Gao A G, Chen H W. 2007. Geographical distribution of general aerobic heterotrophic bacteria in surficial sediments from the Chukchi Sea and Canadian Basin [J]. *Chinese Journal of Polar Research* 18 (2): 147—154
- Gao A G, Chen H W. 2008. Distribution of general aerobic heterotrophic bacteria in sediment core taken from the Canadian basin and the Chukchi Sea [J]. *Chinese Journal of Polar Science* 19 (1): 14—22
- 高爱国, 陈皓文, 林学政. 2008a. 加拿大海盆与楚科奇海柱状沉积物中硫酸盐还原菌分布状况 [J]. *环境科学学报*, 28 (5): 1014—1020
- Gao A G, Chen H W, Lin X Z. 2008a. Sulphate reducing bacteria in core sediments from the Canada Basin and the Chukchi Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 28(5): 1014—1020 (in Chinese)
- 高爱国, 陈皓文. 2008b. 锰细菌在加拿大海盆、楚科奇海沉积物的分布 [J]. *环境科学学报*, 28 (11): 2369—2374
- Gao A G, Chen H W. 2008b. Distributional study on manganese bacteria in cores from the Canada Basin and Chukchi Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 28(11): 2369—2374 (in Chinese)
- 高爱国, 陈皓文. 2008c. 铁细菌在北极特定海区沉积物中的分布 [J]. *海洋科学进展*, 26(3): 326—333
- Gao A G, Chen H W. 2008c. Distributional study on iron-oxidizing bacteria in cores from specifically arctic sea [J]. *Advances in Marine Science* 26(3): 326—333 (in Chinese)
- Gullberg L B, Finster K, Jørgensen N O G. 2002. Utilization of marine sedimentary dissolved organic nitrogen by native anaerobic bacteria [J]. *Limnology and Oceanography*, 47(6): 1712—1722
- Hulth S, Aller R C, Canfield D E, *et al* 2005. Nitrogen removal in marine environments—recent findings and future research challenges [J]. *Marine Chemistry*, 94(1—4): 125—145
- Knoblauch C, Jørgensen B B, Harder J. 1999a. Community size and metabolic rates of psychrophilic sulfate-reducing bacteria in Arctic Marine Sediments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(9): 4230—4233
- Knoblauch C, Sahn K, Jørgensen B B. 1999b. Psychrophilic sulfate-reducing bacteria isolated from permanently cold Arctic marine sediments. Description of *Desulfofrigus oceanense* gen. nov., sp. nov., *Desulfofrigus fragile* sp. nov., *Desulfobaba gelida* gen. nov., sp. nov., *Desulfotalea psychrophila* gen. nov., sp. nov. and *Desulfotalea arctica* sp. nov. [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 49: 1631—1643
- Kroencke I, Vannelse A, Vincx M, *et al* 2000. Different benthic size compartments and their relationship to sediment chemistry in the deep Eurasian Arctic Ocean [J]. *Mar Ecol Prog Ser* 199: 31—41
- Parkes R J, Cragg B A, Bale S J, *et al* 1994. Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean Sediments [J]. *Nature* 37(6496): 410—413
- Parkes R J, Cragg B A, Wellsbury P. 2000. Recent studies on bacterial populations and processes in subseafloor sediments. A review [J]. *Hydrogeology Journal* 8(1): 11—28
- Rijk R B, Anderson M R, Lajzerowicz C. 1996. Microbial Processes in cold oceans. I. Relationship between temperature and bacterial growth rate [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 10: 243—254
- Robador A, Büchert V. 2007. Long-term responses of an aerobic carbon mineralization during bacterial sulfate reduction to induced temperature shifts in Arctic and temperate marine sediments [J]. *Geophysical Research Abstracts* 9: 1—2
- Rosselle-Mora R, Thandrup B, Schaefer H. *et al* 1999. The response of the microbial community of marine sediments to organic carbon input under anaerobic conditions [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 22: 237—248
- Rysgaard S, Glud R N. 2004. Anaerobic N₂ production in Arctic sea ice [J]. *Limnology and Oceanography*, 49(1): 86—94
- Salmén J M, Tuomi P M, Suortti A M, *et al* 2004. Potential for aerobic and anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons in boreal subsurface [J]. *Biodegradation*, 15: 29—39
- Schink B, Friedrich M. 2000. Phosphite oxidation by sulfate reduction [J]. *Nature*, 406(6791): 37
- Singh N, Kendall M N, Liu Y, *et al* 2005. Isolation and characterization of methylobrophic methanogens from anoxic marine sediments in Skan Bay Alaska. Description of *methanococoides alaskense* sp. nov., and amended description of *methanosarcina baltica* [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 55: 2531—2538
- Thomsen T R, Finster K, Ransing N B. 2001. Biogeochemical and molecular signatures of anaerobic methane oxidation in a marine sediment [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(4): 1646—1656
- 薛斌, 潘建明, 张海生, 等. 2006. 北极楚科奇海地区沉积物生源物质的来源和分布 [J]. *极地研究*, 18(4): 265—272
- Xue B, Pan J M, Zhang H S, *et al* 2006. Source and distribution of biogenic matter in sediments at station of Chukchi sea area [J]. *Chinese Journal of Polar Research* 18(4): 265—272 (in Chinese)
- 薛庭耀. 1962. 海洋细菌学 [M]. 北京: 科学出版社, 1) 276
- Xue T Y. 1962. Marine Bacteriology [M]. Beijing Science Press 1) 276 (in Chinese)
- Zhou J S, Greer C W, Thiboutot S, *et al* 2004. Biodegradation of the nitramine explosive hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine and octahydro-1, 3, 5, 7-tetra-nitro-1, 3, 5, 7-tetrazine in cold marine sediment under anaerobic and oligotrophic conditions [J]. *Can J Microbiol* 50(2): 91—96