

不同来源和粒径的胶体对光合细菌生长的效应

郑爱榕, 郑雪红, 陈 敏

(厦门大学海洋学系 亚热带海洋研究所, 厦门 361005)

摘要:天然胶体是近岸海域细菌和浮游植物可利用氮的一个重要来源,其含量的增加可促进藻类的繁殖和生长,有时甚至引发赤潮。研究显示,细菌在高分子量胶体存在下的生长和代谢速率比在低分子量中的提高 3~6 倍,暴露在阳光下的胶体有机物可释放生物可利用的富氮组分,进而提高细菌对胶体的分解。利用错流超滤技术从河流、河口、海洋水体和微藻培养液中提取胶体,研究了胶体来源和粒径对光合细菌(PSB,沼泽红假单胞菌 *Rhodopseudomonas palustris*)生长的影响。结果表明,在一定的胶体有机碳浓度范围,河流胶体(0~281.0 $\mu\text{mol/L}$)、河口胶体(0~121.2 $\mu\text{mol/L}$)、海洋胶体(0~88.8 $\mu\text{mol/L}$)和生源胶体(7.7~548.6 $\mu\text{mol/L}$)都能促进 PSB 的生长,分别使其相对增长率平均提高了 47.3%~196.2%,3.6%~9.3%,8.1%~10.4%和 2.4%~6.9%。其中,PSB 在河流胶体中的相对增长率的平均值(Y)与有机碳浓度(C_{DOC})呈对数相关($Y(\%) = -193.7 + 70.7\ln C_{\text{DOC}}$),表明高浓度的河流胶体,对 PSB 生长的促进效果更显著。两种生源胶体中,海水小球藻胶体(0~548.6 $\mu\text{mol/L}$)对 PSB 生长的促进作用大于球等鞭金藻胶体(7.7~384.4 $\mu\text{mol/L}$);PSB 在粒径为 10kD~0.22 μm 的海洋胶体中的生长大于在粒径为 1kD~10kD 的海洋胶体,其在前者中的 Y 是在后者中的 1.4~1.6 倍。这除了与胶体有机碳浓度和盐度有关外,可能还与胶体醛糖组成中半乳糖和葡萄糖的含量较高有关。以上结果表明不同来源和粒径的胶体对 PSB 的生长均有不同程度的促进作用,意味着天然胶体可被 PSB 利用。

关键词:天然胶体; 来源; 粒径; 光合细菌; 生长

Effects of colloids with different origin and size on the growth of photosynthetic bacteria

ZHENG Ai-Rong, ZHENG Xue-Hong, CHEN Min (Depart. of Oceanography and Institute of Subtropical Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 96~102.

Abstract: Marine colloids are an important source of nitrogen for bacteria and phytoplankton growth. Elevated concentration of colloids may stimulate algal growth, however, sometimes result in red tides in coastal water. The research showed that bacterial growth and respiration in the presence of high-molecular-weight (HMW) dissolved organic matter (DOM) were 3~6 times greater than those in the low-molecular-weight (LMW) material, and that exposed to sunlight caused DOM to release nitrogen-rich compounds that were biologically available, and enhanced furthermore bacterial degradation of colloids. The effects of colloids with different source and size on the growth of photosynthetic bacteria (PSB, *Rhodopseudomonas palustris*) were studied. Colloids were isolated by cross-flow ultrafiltration from the cultured solution of Marine *Chlorella* and *Isochrysis galbana*, Xiamen Bay, Jiulongjiang Estuary and Jiulongjiang River (in China) respectively. The results showed that the

基金项目:国家教育部高等学校骨干教师计划基金资助项目;厦门大学预研基金(B类)资助项目(2003xdyy40)

收稿日期:2003-11-08;**修订日期:**2004-07-09

作者简介:郑爱榕(1957~),女,福建福安人,硕士,教授,主要从事海洋有机化学和海洋环境化学研究。E-mail: arzheng@jingxian.xmu.edu.cn

致谢:衷心感谢福建省海洋研究所李秀珠研究员提供菌种,厦门大学戴民汉教授提供标称截留分子量为 1kDa 的平板超滤装置

Foundation item: the Foundation for University Key Teacher by Ministry of Education and Natural Science Fund of Xiamen University (series B, 2003xdyy40)

Received date: 2003-11-08; **Accepted date:** 2004-07-09

Biography: ZHENG Ai-Rong, Master, Professor, mainly engaged in marine organic chemistry and environmental chemistry. E-mail: arzheng@jingxian.xmu.edu.cn

Acknowledge: Sincere thanks are given to Li Xiu-Zhu for providing bacteria, and to Dr. Dai Min-Han from Xiamen University for providing the cross-flow ultrafiltration system with 1kDa flat membrane

average of relative increasing rates of PSB in the presence of riverine, estuarine, marine and biogenic colloids were respectively 47.3%~196.2%, 3.6%~9.3%, 8.1%~10.4% and 2.4%~6.9%, comparing to the control treatment when concentrations of colloidal organic carbon (C_{coc}) were 0~281.0 μ mol/L, 0~121.2 μ mol/L, 0~88.8 μ mol/L and 7.7~548.6 μ mol/L respectively. The results also showed that the average of relative increasing rates (Y) of PSB in the presence of riverine colloids were logarithmic correlation to concentrations of dissolved organic carbon (C_{DOC}), i.e. $Y(\%) = -193.7 + 70.7 \ln C_{DOC}$, which indicated that riverine colloids of higher concentration have more effect on the growth of PSB than those of lower concentration. For biogenic colloids, the stimulation of colloids produced by Marine *Chlorella* ($C_{coc}=0\sim548.6\mu\text{mol/L}$) on the growth of PSB was greater than that by *Isochrysis galbana* (7.7~384.4 μ mol/L). Results also showed that the growth rates of PSB in marine colloids with 10kg~0.22 μ m size were 1.4 to 1.6 times greater than those in marine colloids with 1~10kD size. This was not only related to COC concentrations and salinity, but to higher abundance of glucose and galactose in the colloids. All the above results suggested that the colloids with different origin and size could be uptaken by PSB and spur PSB growth to different degree.

Key words: colloids; photosynthetic bacteria; origin; size; growth

文章编号:1000-0933(2005)01-0096-07 中图分类号:Q178,Q938,X17 文献标识码:A

胶体是指粒径介于 1nm~1 μ m 的微粒、大分子和分子聚集物^[1]。天然水体中的胶体主要由活生物体、有机高聚物 and 无机颗粒组成^[1,2],是大气圈、水圈和生物圈之间相互作用的动态组成,对全球碳循环和气候变化有着潜在的调控作用。异养菌是海洋中溶解有机物的主要消费者和矿化者,在全球生物地球化学循环中扮演着非常活跃的角色。研究显示,细菌在分子量胶体存在下的生长和代谢速率比在低分子量中的提高 3~6 倍^[3];暴露在阳光下的胶体有机物可释放生物可利用的富氮组分,进而提高细菌对胶体的分解^[4];海洋胶体有机物是近岸海域细菌和浮游植物可利用氮的一个重要来源,它们含量的增加可促进藻类的繁殖和生长,甚至引发赤潮^[5~8]。可见,天然胶体与生物活动息息相关,通过细菌的分解作用可对初级生产力、次级生产力等生物学过程产生重要的影响。光合细菌(PSB)广泛分布于海洋、湖沼、江河、池塘的污泥和土壤,在厌氧条件下可分解有机物,在自然界的碳、氢和硫循环中起着重要作用^[9],具有抗赤潮能力^[10]。本文在海洋胶体有机碳(COC)浓度对 PSB 生长影响研究^[11,12]的基础上,研究不同来源和粒径的胶体对 PSB 生长的效应,以探讨天然胶体的细菌可利用性,为近岸水体赤潮形成机制的探索提供依据。

1 实验材料和方法

1.1 光合细菌、培养和生长速率

PSB 系沼泽红假单胞菌(*Rhodopseudomonas palustris*),由海泥分离得到,培养配方见文献^[13]。细菌数(N)按线性方程 $N = (0.146 + 7.62OD_{660}) \times 10^9$ 换算,其中 OD_{660} 是细菌在 721 分光光度计 660nm 波长处的光密度。实验所用培养液、蒸馏水及玻璃器皿均在 115 $^{\circ}\text{C}$ 高温灭菌 15~20min。

PSB 的相对增长率用 y 表示, $y = 100 \times (N_t/N_0 - N_t/N_{0\text{对照}}) / (N_t/N_{0\text{对照}})$ 。式中, N_t/N_0 和 $N_t/N_{0\text{对照}}$ 是细菌分别在胶体存在下和在对照组中的相对生长率; N_t 和 N_0 分别为 t 时间和初始时间的细菌数。COC 对细菌生长的促进作用以 PSB 相对增长率 y 的平均值 Y 表示, $Y = (\sum y) / n$, n 为对细菌增长期内细菌数测定值的个数。

1.2 水样和胶体提取

实验所用胶体有河流、河口、海洋、生源胶体和不同粒径的海洋胶体。提取河流、河口和海洋胶体的水样于 2001 年 8 月分别取自九龙江、九龙江河口和厦门湾东部海域,盐度分别为 0、18.0 和 28.0。提取生源胶体的水样来源于海水小球藻(Marine *Chlorella* 简称小球藻)和球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*, 简称金藻)的培养液。该培养液的制备:配制只含 NaCl 和 MgSO_4 的人工海水,加入 $f/2$ 配方的营养后分别接入小球藻和金藻,在实验室自然光照下分别培养 7 个月和 3 个月,期间每 10~20d 添加一次营养,盐度为 35.5。提取不同粒径的海洋胶体的水样于 2002 年 12 月取自厦门湾东部海域,盐度为 32.0。

提取胶体的方法按陈敏等^[14]的方法。水样用干净的塑料桶取表层水运回实验室,用 0.22 μ m 折叠式滤芯去除悬浮颗粒物后,用标称截留分子量为 10kD 的中空纤维超滤装置(Amicon 公司生产,型号 10P10-20)超滤,得到的截留液是粒径为 10kD~0.22 μ m 的胶体,而超滤液的粒径 <10kD。生源胶体的提取方法与上述方法相同。1kD~10kD 粒径胶体的提取:取海水水样预先经过 10kD 中空纤维超滤装置超滤过的 <10kD 的超滤液,用标称截留分子量为 1kD 的平板超滤装置(Millipore 公司生产,型号 P2P LAC C05)超滤,得到的截留液是粒径为 1~10kD 的胶体,其超滤液粒径 <1kD。

1.3 胶体有机碳的测定

以上所有样品的预过滤液、截留液和超滤液各取 10ml,加 0.4ml 浓磷酸酸化,置于冰箱 4 $^{\circ}\text{C}$ 以下保存。样品经高温催化氧化

后用总有机碳分析仪(Shimazu-5000A)测定,与标准样品的误差小于 10%^[14]。设 C_{ROC} 为截留液中有有机碳浓度, C_{UOC} 为超滤液中有有机碳浓度,则所得胶体样品的胶体有机碳浓度: $C_{COC} = C_{ROC} - C_{UOC}$ (表 1)。

1.4 不同来源的胶体对光合细菌生长的效应

分别将截留液(10kD~0.22 μ m)和<10kD 的超滤液配成 COC 浓度不同的 4 种溶液(表 1)。为消除盐度对 PSB 生长的影响,还设置盐度为 0、18.0、28.0 和 35.5 的人工海水分别作为河流、河口、海洋和生源胶体存在下培养体系的对照组。在上述体系(120ml)中加入 PSB 培养液(原培养配方中除酵母膏和蛋白胨以外的营养盐)后,将生长至指数期的 PSB 离心,用高温消毒的蒸馏水洗涤、悬浮,重复 2 次后等分加入,使其初始细菌密度约为 1.36×10^9 个/ml,然后转移并充满至 100ml 的磨口具塞锥形瓶中,塞紧,使其基本处于无氧状态,置于 40W 白炽灯泡对称照明下的自制光照培养箱($30 \pm 1^\circ\text{C}$)中培养,每个体系样品数为 1。每天摇晃 3 次,每天定时测定 1 次光密度,取样分析后将培养液倒回,使原体系保持充盈状态而达到厌氧条件,测定所用的器皿均经过高温消毒。培养时间为 10d,因海洋胶体体系中的 PSB 在培养 7d 后出现絮凝现象,难以得到准确的光密度值,故培养时间取 7d。

1.5 外加醛糖对光合细菌生长的效应

用盐度为 9.0 的人工海水配置一系列 PSB 培养液(只含原培养配方中的无机营养盐),分别添加木糖、半乳糖、甘露糖和葡萄糖,最终浓度为 1.026gC/L,以无添加醛糖的培养液为对照组,余下步骤与 1.4 同,培养时间 16d。

1.6 不同粒径的胶体对光合细菌生长的效应

分别将粒径为 10kD~0.22 μ m 和 1~10kD 的截留液与<1kD 的超滤液配成 COC 浓度不同的 3 种溶液(表 1),同时设置盐度(32.0)与之相同的人工海水为对照组。在上述体系中加入原培养配方中除酵母膏和蛋白胨以外的营养盐,余下步骤按 1.4 操作,培养时间为 15d。

2 结果

2.1 光合细菌在不同来源胶体以及外加醛糖体系中的生长变化

PSB 在河流、河口和海洋胶体存在下的介质中和对照组中均呈对数生长(图 1),其相对生长率 N_t/N_0 与培养时间 t 呈显著对数相关(表 1)。由图 1-a 可知,对河流胶体,当 $C_{COC} = 0 \mu\text{mol/L}$ (即体系不存在粒径为 10kDa~0.22 μ m 的高分子量胶体,但还存在粒径<10kDa 的低分子量胶体和真溶解态有机物,或 $C_{COC} = 5.6 \mu\text{mol/L}$ (高分子量胶体浓度较低)时,PSB 的生长变化趋势十分相似,在培养期内持续稳定生长;当高分子量胶体浓度较高时($C_{COC} = 140.5$ 和 $281.0 \mu\text{mol/L}$),PSB 在前 7d N_t/N_0 急剧增大,然后缓慢下降。总之,在实验的 COC 浓度范围内($0 \sim 281.0 \mu\text{mol/L}$),PSB 在河流胶体中的生长均高于 $S=0$ 的对照组,其相对生长率分别平均比对照组提高了 47.3%、56.6%、192.3% 和 196.2%,与培养介质中总有机碳浓度 C_{DOC} (为 C_{COC} 和 C_{UOC} 之和)呈对数相关,即 $Y(\%) = -193.7 + 70.7 \ln C_{DOC}$ ($n=4, r=0.9807, P<0.05$)。这表明不论是何种浓度的河流胶体,都能促进 PSB 的生长,尤其是在较高浓度条件下,促进效果异常显著。

比较 COC 浓度不同的河口胶体与 $S=18.0$ 的人工海水对照组中 PSB 的 N_t/N_0 变化(图 1-b)可以发现,实验前 6d,胶体体系中 PSB 的 N_t/N_0 高于对照组,到第 7 天只有 $C_{COC} = 60.6 \mu\text{mol/L}$ 的体系比对照组高 5.3%,其他胶体浓度的体系与对照组相一致。此后对照组的 N_t/N_0 超过胶体存在下的体系。在 $C_{COC} = 0 \sim 121.2 \mu\text{mol/L}$ 的范围内,PSB 的 N_t/N_0 分别比对照组平均高 3.6%、6.3%、9.3% 和 8.4% (表 1),说明河口胶体对 PSB 的生长也有促进作用,但相对增长率的平均值 Y 与 C_{COC} 之间没有相关关系。

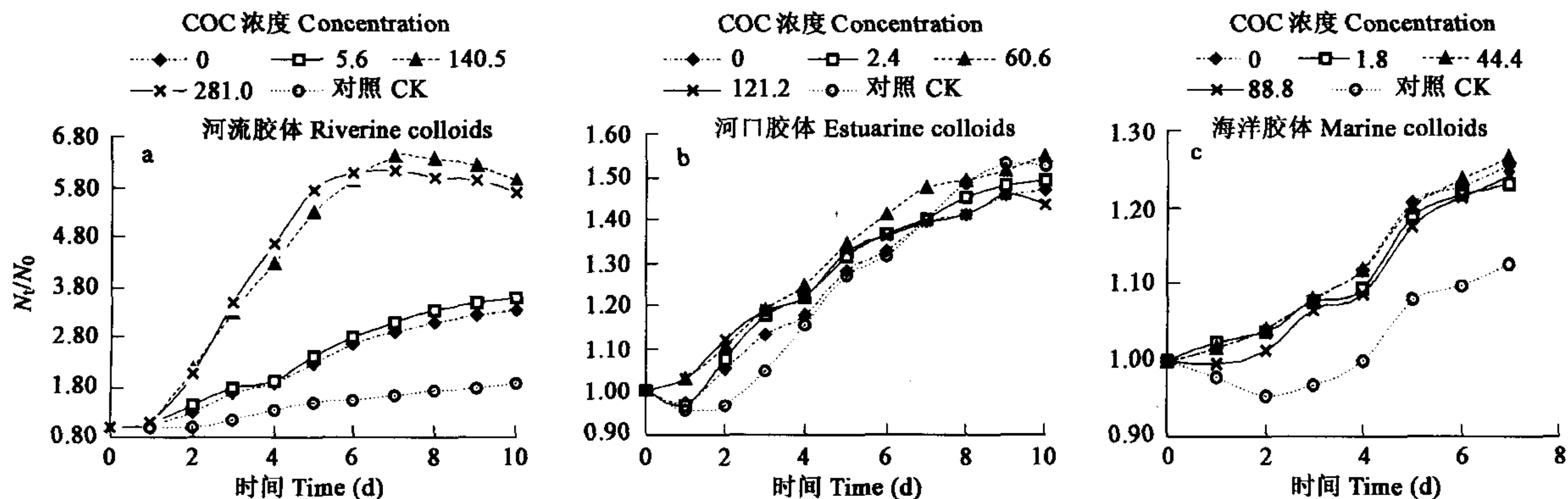


图 1 PSB 在河流、河口和海洋胶体介质中的相对生长率(N_t/N_0)

Fig. 1 The relative growth rate(N_t/N_0) of PSB in the medium of riverine, estuarine or marine colloids

表 1 PSB 在不同来源与不同粒径胶体介质中的相对生长率 N_t/N_0 和培养时间 t 的相关关系Table 1 The relationship between N_t/N_0 and culture time for PSB in the medium of colloids with different origin and size

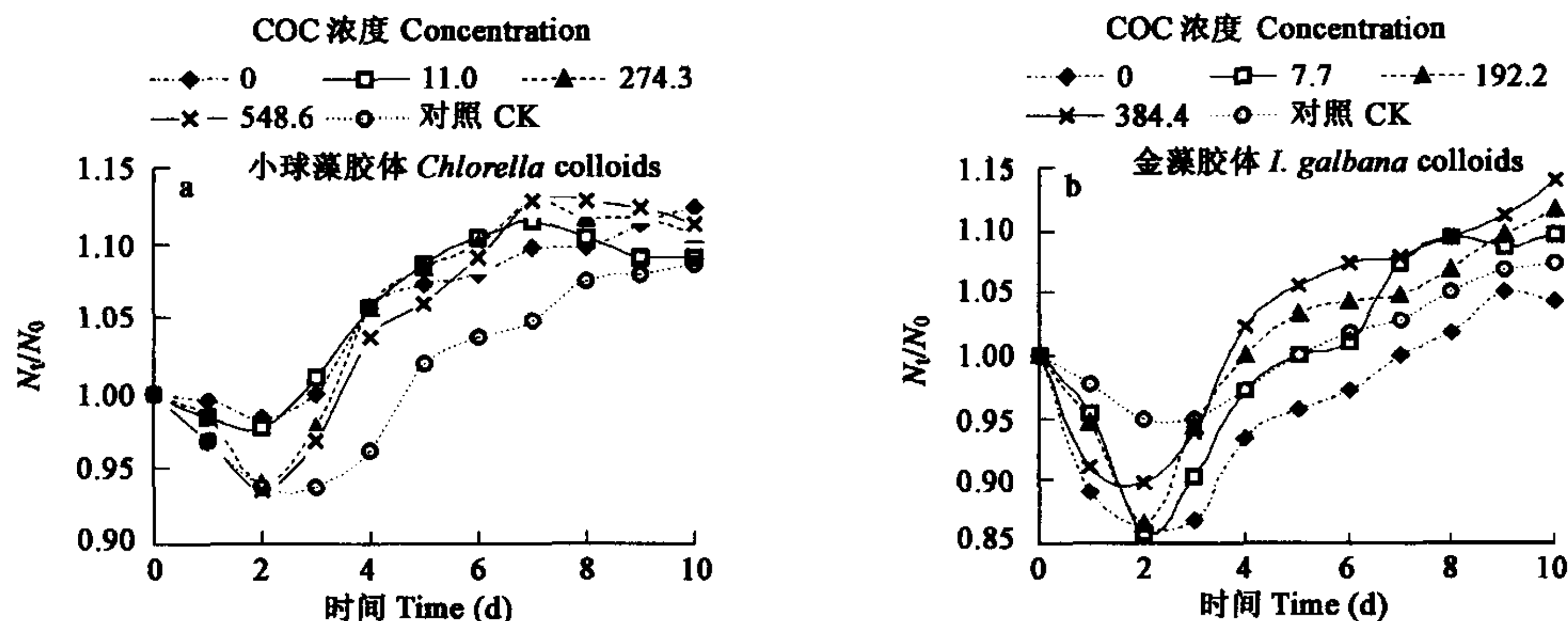
胶体 Colloids	C_{voc} ^① ($\mu\text{mol/L}$)	C_{coc} ^② ($\mu\text{mol/L}$)	时间 Time (d)	回归方程 ^③ $N_t/N_0=a+b\ln t$		相关系数 ^④ r	个数 ^⑤ n	置信度 ^⑥ $P<$	y ^⑦ (%)	Y ^⑧ (%)
				a	b					
河流胶体 Riverine colloids	31.0	0	10	0.904	0.417	0.9885	10	0.01	—	—
		0	10	0.673	1.098	0.9669	10	0.01	4.6~75.1	47.3
		5.6	10	0.685	1.190	0.9667	10	0.01	6.4~87.7	56.6
		140.5	1 st ~7 th	0.593	2.844	0.9825	7	0.01	9.9~269.5	192.3
		281.0	1 st ~7 th	0.652	2.896	0.9802	7	0.01	11.6~253.2	196.2
河口胶体 Estuarine colloids	114.2	0	10	0.831	0.288	0.9473	10	0.01	—	—
		0	10	0.912	0.236	0.9800	10	0.01	0.8~8.2	3.6
		2.4	10	0.931	0.242	0.9907	10	0.01	0.2~12.8	6.3
		60.6	10	0.967	0.244	0.9783	10	0.01	5.3~14.0	9.3
		121.2	10	0.997	0.198	0.9851	10	0.01	3.5~15.3	8.4
海洋胶体 Marine colloids	221.4	0	2 nd ~7 th	0.826	0.149	0.9505	6	0.01	—	—
		0	2 nd ~7 th	0.893	0.183	0.9748	6	0.01	4.1~11.8	10.2
		1.8	2 nd ~7 th	0.900	0.169	0.9624	6	0.01	4.7~11.5	9.2
		44.4	2 nd ~7 th	0.862	0.204	0.9886	6	0.01	4.1~12.6	10.4
		88.8	2 nd ~7 th	0.844	0.201	0.9833	6	0.01	1.8~10.6	8.1
小球藻胶体 Marine <i>Chlorella</i> colloids	74.5	0	2 nd ~7 th	0.839	0.108	0.9679	9	0.01	—	—
		0	2 nd ~7 th	0.920	0.089	0.9816	9	0.01	1.8~8.8	5.3
		11.0	2 nd ~7 th	0.938	0.079	0.9037	9	0.01	0.6~8.9	5.3
		274.3	2 nd ~7 th	0.873	0.117	0.9381	9	0.01	3.1~9.6	6.4
		548.6	2 nd ~7 th	0.848	0.129	0.9642	9	0.01	2.1~9.6	6.9
金藻胶体 <i>Isochrysis galbana</i> colloids	51.1	0	2 nd ~10 th	0.864	0.088	0.9674	9	0.01	—	—
		0	2 nd ~10 th	0.754	0.127	0.9808	9	0.01	-9.1~-1.8	-5.0
		7.7	2 nd ~10 th	0.782	0.144	0.9864	9	0.01	0.1~4.4	2.4
		192.2	2 nd ~10 th	0.824	0.102	0.9866	9	0.01	1.7~4.1	2.4
		384.4	2 nd ~10 th	0.801	0.146	0.9838	9	0.01	4.0~6.1	5.0
海洋胶体 Marine colloids (1~10kD)	17.4	0	15	0.993	0.076	0.7532	9	0.05	—	—
		2.0	15	0.924	0.212	0.9795	9	0.01	4.5~43.4	28.5
		51.1	15	0.934	0.212	0.9824	9	0.01	5.7~44.5	29.8
		102.2	15	0.919	0.207	0.9703	9	0.01	65.8~44.2	27.2
		1.4	15	0.947	0.276	0.9868	9	0.01	10.7~63.4	42.8
海洋胶体 Marine colloids (10kD~0.22 μm)	17.4	34.0	15	0.917	0.264	0.9760	9	0.01	5.9~58.0	37.3
		68.0	15	0.881	0.337	0.9702	9	0.01	6.4~74.9	46.6

①Concentration of organic carbon in ultrafiltrate;②Concentration of colloidal organic carbon;③Regressing equation;④Correlative factor;
⑤Numbers;⑥Confidence;⑦Relative increasing rate;⑧Average of relative increasing rate

图 1c 是 $C_{coc}=0\sim 88.8\mu\text{mol/L}$ 的海洋胶体存在下 PSB 的生长情况。很明显,PSB 在海洋胶体存在下的生长好于盐度相同但无胶体存在的对照组,相对增长率的平均值 Y 为 8.1%~10.4%(表 1),与 COC 浓度也没有相关关系。

图 2 是 PSB 在两种生源胶体存在下的培养介质中的生长趋势。在前 2d,PSB 的相对生长率均有所下降,3d 后才开始生长,这是由于在高盐度(35.5)介质中 PSB 的适应期较长所致。尽管如此,其 N_t/N_0 与培养时间 t 的对数关系依然十分显著(表 1)。在小球藻胶体存在的介质中($C_{coc}=0\sim 548.6\mu\text{mol/L}$),PSB 的生长明显高于对照组,相对增长率的平均值 $Y=5.3\%\sim 6.9\%$ (表 1),说明小球藻胶体对 PSB 的生长有一定的促进作用,但不同浓度的影响差别不大。在金藻胶体存在的介质中,当 $C_{coc}=0$ 时(无 10kD~0.22 μm 粒径胶体,而有小于 10kD 粒径胶体存在),PSB 的生长始终低于对照组(Y 为 -5.0%);当 $C_{coc}=7.7\mu\text{mol/L}$ 时,6d 后才能超过对照组($Y=2.4\%$);当 $C_{coc}=192.2\sim 384.4\mu\text{mol/L}$,略高于对照组(Y 为 2.4%~5.0%),这表明金藻胶体只有在较高浓度条件下才能促进 PSB 的生长。

PSB 在外加木糖、半乳糖、甘露糖和葡萄糖中的生长结果(图 3)表明,木糖和甘露糖分别在前 5d 和前 3d 对 PSB 的生长有影响($Y=31.5\%$ 和 10.8%);PSB 在外加半乳糖的介质中整个培养期内的生长均比对照组好($Y=64.6\%$);在外加葡萄糖的介质中前 2d 和最后 2d 的生长比对照组好($Y=69.8\%$)。由此可知,在外加的 4 种单糖中,对 PSB 生长的促进作用是葡萄糖>半乳糖>木糖>甘露糖。

图2 光合细菌在生源胶体介质中的相对生长率(N_t/N_0)Fig. 2 The relative growth rate (N_t/N_0) of PSB in the medium of biogenic colloids

2.2 光合细菌在不同粒径的胶体体系中的生长变化

由 PSB 在不同粒径胶体介质和对照组中的生长曲线(图 4)可知,不论在 1~10kD 或 10kD~0.22 μ m 的胶体中,PSB 的生长均明显高于对照组,而且变化趋势均一致。 N_t/N_0 和 t 的对数关系十分显著(表 1)。1~10kD 和 10kD~0.22 μ m 的胶体分别使 PSB 的相对生长率比对照组提高了 27.2%~29.8%和 37.3%~46.6%(表 1),与胶体有机碳浓度无相关关系。

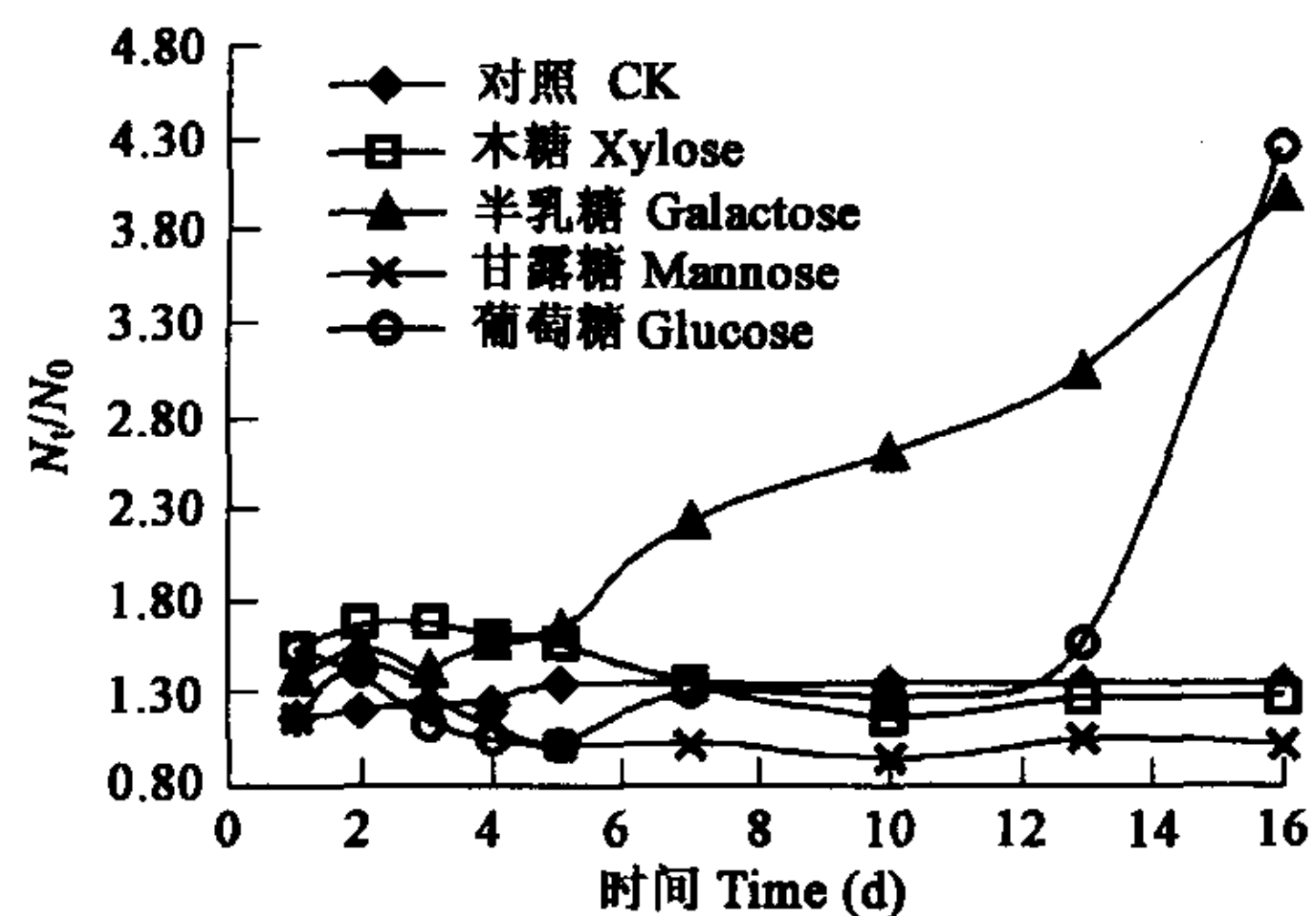
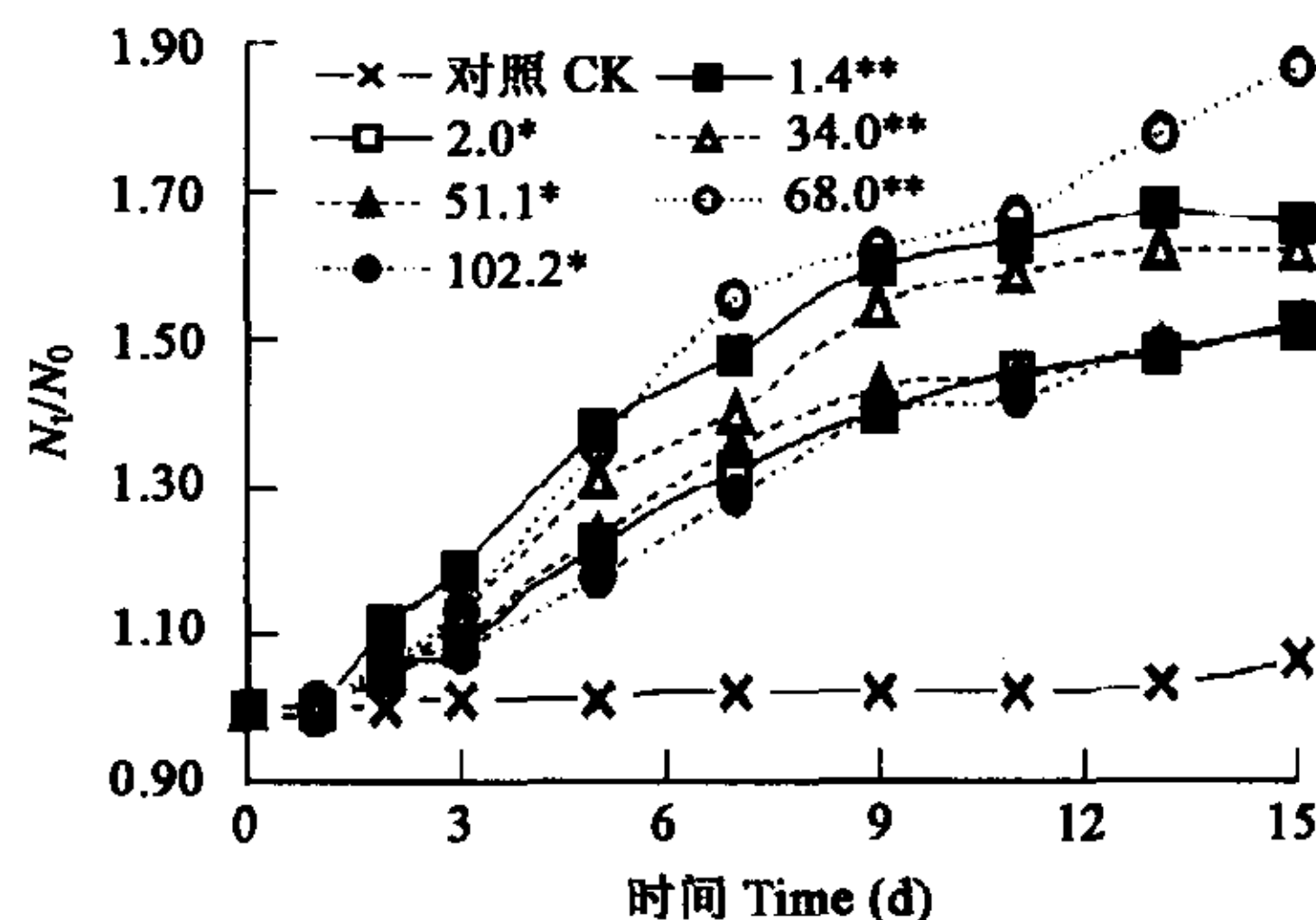
图3 PSB 在外加中性糖的介质中的相对生长率(N_t/N_0)Fig. 3 The relative growth rate (N_t/N_0) of PSB in added neutral sugar

图4 光合细菌在不同粒径海洋胶体介质中的相对生长曲线

Fig. 4 The relative growth curves of PSB in the medium of marine colloids with different size

胶体粒径 Acolloidal size * 1~10kD, ** 10kD~0.22 μ m

3 讨论

3.1 不同来源胶体对光合细菌生长的效应

研究^[15,16]表明,淡水和海水胶体有明显不同的化学特征,淡水胶体 C/N 高(40~50),富含脂肪族、芳香族和羧基的碳,分子结构是高度缩合的环型;而海水胶体 C/N 低(15~20)、富含烷(烃)基的碳,是敞开的线型分子结构。这是由于河流和湖泊的胶体来自陆源有机质,而海水胶体来自海洋微藻和细菌的生物合成,因此它们的生物活性可能有所区别。Amon 等^[3]研究发现,河流胶体对细菌生长的促进作用低于来源于浮游植物水华时的海洋胶体,表明陆源 DOM 的生物活性低于浮游植物产生的 DOM,而浮游植物水华时新生的 DOM 的生物活性更高。但本文结果与此相反。

图 1 的结果表明,河流、河口和海洋胶体在不同程度上均对 PSB 的生长有刺激作用。虽然上述胶体的有机碳浓度和盐度均不同,无法定量比较 3 种来源的胶体对 PSB 生长效应的相对大小。但若将 COC 浓度接近的胶体作一比较,还是可以定性判断 3 种来源胶体对 PSB 生长促进作用的大小。对比 PSB 在营养相同、盐度不同的介质中的生长(图 1)可知,河流胶体(140.5 μ mol/L)和河口胶体(121.2 μ mol/L)的 COC 浓度分别是海洋胶体(88.8 μ mol/L)的 1.5 倍和 1.4 倍,但 PSB 在对应的胶体浓度下的相对增长率的平均值 $\bar{Y}$ (192.3%和 9.3%)分别是海洋胶体(10.4%)的 18.5 倍和 0.9 倍。因此,十分明显,河流胶体对 PSB 生长的促进作用 $\gg$ 海洋胶体 $>$ 河口胶体。这与培养介质的 COC 浓度和盐度有关外,可能还与胶体中性糖的相对含量有

关。对 3 种胶体中性醛糖组成分析^①发现,河流胶体中这 4 种单糖的摩尔百分含量(73.9%)>海洋胶体(69.3%)。

藻细胞新陈代谢过程产生并释放到水体中的有机物,被细菌分解或吸收利用后,部分以矿物或其他生物可利用的形式释放回水体,为藻类生长提供必需的营养^[17],同时也以代谢物形式释放大量溶解有机物(DOM)^[18,19],从而实现有机物的循环利用。研究表明,藻产生的 DOM,在 10d 内约 30%的溶解有机碳(DOC)被细菌利用,被消耗的 DOC 大部分是结合态的中性糖和氨基酸^[20]。浮游植物排泄物的光化学产物也为细菌提供了大量的 DOC,维持了细菌的高生产力^[21]。本文由于两种生源胶体存在下的介质盐度一样(图 2),因此,盐度对 PSB 生长的效应可以消除,故从小球藻胶体的 COC 浓度(274.3 $\mu\text{mol/L}$)是金藻胶体(384.4 $\mu\text{mol/L}$)的 0.7 倍,而对应浓度下 PSB 的 Y(6.4%)是金藻胶体(5.0%)的 1.3 倍(表 1),说明小球藻胶体对 PSB 生长的效应略大于金藻胶体。这种差异不仅与 COC 浓度有关,而且与胶体中性糖的相对组成有关。因为这两种胶体中性糖的组成分析结果^①表明,小球藻胶体中对 PSB 生长起主要作用的葡萄糖和半乳糖的摩尔百分含量(37.0%)大于金藻胶体(30.4%)。

3.2 不同粒径的胶体对光合细菌生长的效应

Amon and Benner^[3]在比较不同粒径的溶解有机物(DOM)对细菌生产力的影响时发现,在 Rio Negro 河流,介质中细菌数由高到低依次是粒径为 30kD~0.1 μm 的超高分子量有机物、<1kD 的低分子量有机物和 1~30kD 的高分子量有机物;而在 Rio Solimoes 河流,使细菌数增加的有机物的粒径是(1~30kD)>(小于 1kD)>(30kD~0.1 μm)。可见,不同粒径的胶体对细菌生长的效应不同。

虽然本文两种粒径的胶体 COC 浓度不同,但从 1~10kD 胶体的 COC 浓度(2.0~102.2 $\mu\text{mol/L}$)是 10kD~0.22 μm 胶体(1.4~68.0 $\mu\text{mol/L}$)的 1.4~1.5 倍,而后者的 Y 却是前者的 1.4~1.6 倍(图 4 和表 1),可以判断 10kD~0.22 μm 的胶体对 PSB 生长的促进作用大于 1~10kD 的胶体,表明胶体对 PSB 生长的促进作用随胶体粒径的增大而增大。这与胶体有机物的生物活性随粒径增大而增大的观点吻合^[3,22]。此外,糖组成的分析结果^①表明,10kD~0.22 μm 胶体的半乳糖和葡萄糖的摩尔百分含量(20.6%和 21.2%)均大于 1~10kD 胶体(18.1%和 17.4%),这意味着不同粒径胶体的生物活性与其单糖组成有关。

References:

- [1] Buffle J, Leppard G G. Characterization of aquatic colloids and macro-molecules 1. Structure and behavior of colloidal material. *Environ. Sci. Technol.*, 1995, **29**: 2169~2175.
- [2] Ogura N. High molecular weight organic matter in seawater. *Mar. Chem.*, 1977, **5**: 535~549.
- [3] Amon R M W, Benner R. Bacterial utilization of different size classes of dissolved organic matter. *Limnol. Oceanogr.*, 1996, **41**(1): 41~51.
- [4] Bushwa K, Zeep R Z, Tarr M A, et al. Photochemical release of biologically available nitrogen from aquatic dissolved organic matter. *Nature*, 1996, **381**(6581): 404~407.
- [5] Carlsson P, Segatto A Z, Granéli E. Nitrogen bound to humic matter of terrestrial origin—a nitrogen pool for coastal phytoplankton? *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1993, **97**: 105~116.
- [6] Lovley D R, Coates J D, Blunt-Harris L, et al. Humic substances as electron acceptors for microbial respiration. *Nature*, 1996, **382**(6590): 445~448.
- [7] Berman T, Chava S. Algal growth on organic compounds as nitrogen sources. *J. Plankton Res.*, 1999, **21**: 1423~1437.
- [8] Maestrini S Y, et al. Nitrogenous organic substances as potential nitrogen sources, for summer phytoplankton in the Gulf of Riga, eastern Baltic Sea. *Plankton Biol. Ecol.*, 1999, **46**: 8~17.
- [9] Zhu Z Y, Yu J A, Lin Z X, et al. Research and application of photosynthetic bacteria. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Publish, 1991.
- [10] Zeng Y, Qin S, Liang M S. Advances on comprehensive utilization of photosynthetic bacteria. *Fisheries Science*, 2000, **19**(5): 35~37.
- [11] Zheng A R, Chen M, Zheng X H, et al. Effect of marine colloids on the growth of photosynthetic bacteria. *Mar. Pollution Bulletin*, 2002, **45**: 290~294.
- [12] Zheng A R, Chen M, Zheng X H, et al. Effects of marine colloids on the growth of photosynthetic bacteria. *Progress in Natural Science*, 2002, **12**(7): 759~762.
- [13] Li X Z, Huang M Z, Chen C Q, et al. Isolation and incubation of photosynthetic bacteria in sea mud. *Fujian Fisheries*, 1993, **57**(2): 14~18.
- [14] Chen M, Guo L D, Huang Y P, et al. Application of the cross-flow ultrafiltration technique to the study of colloidal uranium. *Thorium*,

① 郑雪红. 海洋胶体对光合细菌生长的效应及其有机碳分布和中性醛糖组成. 厦门大学理学硕士论文, 2003

radium isotopes and organic carbon in seawater, 2000, **22**(5):51~59.

- [15] Hedges J I, Hatcher P G, Ertel J E, *et al.* A comparison of dissolved humic substances from seawater with Amazon River counterpart by ^{13}C -NMR spectrometry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, **56**: 1753~1757.
- [16] Hedges J I, Keil R G, Benner R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? *Org. Geochem.*, 1997, **27**: 195~212.
- [17] Gao Y H, Jin H M, Huang D Q, *et al.* Advances in studies on the extracellular products of marine microalgae. *Marine Science*, 2002, **26**(3):35~38.
- [18] Aluwihare L I, Repeta D J. A comparison of the chemical characteristics of oceanic DOM and extracellular DOM produced by marine algae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1999, **186**:105~117.
- [19] Wang W X, Guo L D. Production of colloidal organic carbon and trace metals by phytoplankton decomposition. *Limnol. Oceanogr.*, 2001, **46**(2): 278~286.
- [20] Amon R M W, Fitznar I I P, Benner R. Linkages among the bioactivity, chemical composition, and diagenetic state of marine dissolved organic matter. *Limnol. Oceanogr.*, 2001, **46**(2): 287~297.
- [21] Jones D R, Karl D M, Laws E A. Growth rates and production of heterophic bacterial and phytoplankton in the North Pacific subtropical gyre. *Deep-Sea Research, Part I*, 1996, **43**(10): 1567~1580.
- [22] Amon R M W, Benner R. Rapid cycling of high-molecular-weight dissolved organic matter in the ocean. *Nature*, 1994, **369**(6481): 549~552.

参考文献:

- [9] 朱章玉, 俞吉安, 林志新, 等. 光合细菌的研究及其应用. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.
- [10] 曾宇, 秦松, 梁明山. 光合细菌综合应用新进展. 水产科学, 2000, **19**(5): 35~37.
- [12] 郑爱榕, 陈敏, 郑雪红, 等. 海洋胶体对光合细菌生长的效应. 自然科学进展, 2002, **12**(7):759~762.
- [13] 李秀珠, 黄美珍, 陈超群, 等. 海洋光合细菌的分离培养研究. 福建水产, 1993, **57**(2): 14~18.
- [14] 陈敏, 郭劳动, 黄奕普. 错流超滤技术在海水胶体态铀、钍、镭同位素和有机碳研究中的应用. 海洋学报, 2000, **22**(5):51~59.
- [17] 高亚辉, 荆红梅, 黄德强, 等. 海洋微藻胞外产物研究进展. 海洋科学, 2002, **26**(3):35~38.