

·环境矿物学·

海洋粘土矿物与颗石藻 *Emiliana huxleyi* 共培养的实验研究

邹翔^{1,2}, 孙仕勇^{1,2}, 林森^{1,2}, 申珂璇^{1,2}, 谭道永^{1,2}, 董发勤^{1,2}

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;

2. 低成本废水处理技术四川省国际科技合作基地, 西南科技大学, 四川 绵阳 621010)

摘要: 颗石藻是海洋中广泛分布的超微型浮游藻, 经生物矿化作用形成的碳酸钙质颗石, 在古海洋学研究中具有重要意义。海洋粘土矿物与有机质的有机-无机相互作用在全球碳循环中扮演着重要角色。本文选取广泛分布于海洋的赫氏颗石藻 *Emiliana huxleyi* 与海洋粘土矿物中具有代表性的伊利石和蒙脱石共培养。通过对颗石藻生长曲线和 Sr/Ca、Mg/Ca 元素比值、颗石藻与粘土矿物样品的紫外可见光吸收光谱、红外吸收光谱和矿物物相等分析, 研究海洋粘土矿物与颗石藻的相互作用规律。通过研究表明伊利石对颗石藻的影响较小, 蒙脱石因对营养元素的吸附和颗石藻的絮凝作用对颗石藻的生长和 Sr/Ca、Mg/Ca 元素比值影响较大。颗石藻代谢分泌的生物分子未能通过层间插层作用进入伊利石层间, 颗石藻分泌的生物分子可通过插层作用进入并储存于蒙脱石层间, 海洋粘土矿物中的蒙脱石与海洋微生物的相互作用值得地球微生物学家关注, 可能有助于对古海洋环境的认识。

关键词: 颗石藻; 海洋粘土矿物; 伊利石; 蒙脱石; *Emiliana huxleyi*

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)02-0274-07

An experimental study of co-culturing marine clay minerals and *Emiliana huxleyi*

ZOU Xiang^{1,2}, SUN Shi-yong^{1,2}, LIN Sen^{1,2}, SHEN Ke-xuan^{1,2}, TAN Dao-yong^{1,2}
and DONG Fa-qin^{1,2}

(1. School of Environment and Resource, Key Laboratory of Ministry of Education for Solid Waste Treatment and Resource Utilization, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Low-cost Wastewater Treatment Technology International Sci-Tech Cooperation Base of Sichuan Province, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: The coccolithophore widely distributed in marine environment is one of the most important algae. Coccolith, formed through biomineralization processes, has important significance in paleoceanographic study. Interactions between marine clay minerals and organic matters play an important role in the global carbon cycle. Representative coccolithophore *Emiliana huxleyi* and marine clay minerals of illite and montmorillonite were selected for experimental co-culturing study. Growth curves, elemental ratios of Sr/Ca and Mg/Ca, UV-Vis spectra, FTIR spectra and XRD were utilized for analysis. The results show that illite has an insignificant effect on *E. huxleyi*, whereas montmorillonite has significant influence on *E. huxleyi* in growth curves as well as element ratios of Mg/Ca and Sr/Ca due to its adsorption and flocculation effect on nutrients. Metabolic biomolecules fail to enter the interlayer of illite. However, biomolecules secreted by the *E. huxleyi* enter and are

收稿日期: 2016-10-08; 接受日期: 2017-02-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472310, 41672039); 西南科技大学研究生创新基金(16ycx041)

作者简介: 邹翔(1990-), 男, 汉族, 在读研究生, 矿产普查与勘探专业; 通讯作者: 孙仕勇(1980-), 男, 博士、教授, 研究方向为矿物与微生物相互作用, E-mail: shysun@swust.edu.cn。

stored in the interlayers of montmorillonite. The presented study indicates that the interaction between marine clay mineral of montmorillonite and marine microorganisms has important geological significance, and hence geobiologists should pay more attention to the study of the ancient marine environment.

Key words: coccolithophore; marine clay mineral; illite; montmorillonite; *Emiliania huxleyi*

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41472310, 41672039); Postgraduate Innovation Fund Project by Southwest University of Science and Technology (16ycx041)

粘土矿物是海洋沉积物的重要组成部分,在浅海区约占沉积物总量的1/4~1/3。海洋广泛分布的粘土矿物种类中,粘土矿物的组成、含量和矿物学特征变化在古海洋研究中具有重要的古环境、古气候指示意义(孔祥乐等,2003;卢龙飞等,2006)。海洋粘土矿物来源广泛,在近海主要为海岸风浪的侵蚀、河口径流携带的外源物质,远海主要为大气降尘携带的颗粒物、火山喷发物等(周晓静等,2010;项立辉等,2015)。粘土矿物通过物理或化学吸附作用含有的营养盐和有机质,能够被微生物生长利用,甚至在没有营养物质的情况下仍能支持微生物的生长(汪丹等,2015)。海洋粘土矿物进入海洋以后,会以悬浮颗粒的形式影响海水的透光层,进而影响到浮游植物等初级生产力的光合作用(侯秀富等,2013)。粘土矿物在沉积过程中出现的溶解、絮凝、离子交换和吸附/解吸等过程,对海洋生物的地球化学作用会产生一定影响,进而影响元素的地球化学循环作用(侯秀富等,2013)。

上世纪90年代以来,国内外学者对海洋沉积物中的粘土矿物开展了深入研究,并将研究成果与 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和钙质超微浮游生物等对环境演变具有指示意义的指标相结合,成功解释了所研究区域乃至全球的古环境、古气候变化(孔祥乐等,2003)。早在上个世纪80年代就有学者探索了蒙脱石对河口区赤潮生物的影响抑制作用,研究发现粘土矿物参与了水体中营养盐的竞争,并通过增大浊度影响光照强度,进而减弱了生物光合作用,抑制了有害藻华生物的生长(陈慈美等,1989)。颗石藻是一类在海洋中广泛分布的单细胞钙质超微浮游植物,是海洋初级生产力的重要贡献力量之一。颗石藻通过生物矿化作用在细胞表面形成碳酸钙质颗石片(Coccoliths)并保存于海洋沉积物中,是海洋沉积物中唯一同时通过其有机质(分子化石或生物标志物)和非有机体(碳酸钙)提供古气候和古海洋环境信息的微生物(梁丹等,2012;苏翔等,2012;Oviedo *et al.*, 2014;芮晓庆等,2014)。虽然海洋粘土矿物与海洋微生物

相互作用的研究已经开展的较多,但是对于颗石藻这一类钙化藻的相关研究却非常少。此外,海洋沉积物中粘土矿物可能与颗石藻进一步发生相互作用,从而对传统对古海洋的研究造成干扰。因此,本文选用海洋粘土矿物中具有代表性的蒙脱石和伊利石以及颗石藻模式物种赫氏颗石藻(*Emiliania huxleyi*)共培养,探索两者之间的相互作用规律。

1 材料与方法

1.1 颗石藻和粘土矿物

赫氏颗石藻(*E. huxleyi*)藻种来源于厦门大学近海海洋国家重点实验室海洋藻类保种中心(CC-MA),光照智能培养箱(型号: MGC-450HPY-2, 上海一恒仪器有限公司)设定温度为20℃,光强20 000 lux,光暗周期为12L:12D。颗石藻在以上条件中培养十代以后接种培养,分别倒入已高温灭菌过的1 000 mL锥形瓶200 mL颗石藻原液,另外加入400 mL已灭菌的Aquil培养基。加入紫外灭菌过的伊利石、蒙脱石各0.5 g。钠型高纯蒙脱石购于寿光中联蒙脱石,高纯伊利石产地为湖南岳阳。

1.2 颗石藻的生长曲线和细胞生长率

颗石藻在设定条件下培养10 d,每隔1 d取样,置放于1.5 mL离心管。细胞计数采用血球计数板计数3次,取平均值,做标准误差分析。采集1 mL颗石藻溶液放置于1.5 mL离心管中,每隔12 h采用血球计数板计算颗石藻细胞丰度,样品计算3次取平均值后绘制颗石藻生长曲线。颗石藻细胞比生长率 $\mu(\text{d}^{-1})$, $\mu = (\ln C_2 - \ln C_1) / (T_2 - T_1)$,其中 C_2 、 $C_1(10^6 \text{ mL}^{-1})$ 分别代表 T_2 、 $T_1(\text{h})$ 时间点的细胞丰度(Xing *et al.*, 2015)。

1.3 主微量元素分析

颗石藻溶液在接种实验1 d后开始取样,每隔1 d取一次,置放于1.5 mL离心管,连续取样10次。样品在离心机下8 000 r/min离心10 min,选用上清液1 mL,用移液枪吸取0.1 mL样品稀释100倍后

测样。加入 1 mL 2.5 M HCl 到离心下来的颗石藻和粘土矿物中, 100℃ 加热消解 2 h。然后加入 1 mL 超纯水, 消解后的样品在离心机下 8 000 r/min 离心 10 min, 去上清液, 样品稀释 5 倍后, 加入 1 mL 5% 的 HCl 和 H₂O₂ 混合溶液, 测定颗石藻的元素含量。以上制备好的样品用 ICP-OES (iCAP6500, ThermoFisher) 检测测定元素含量。

1.4 颗石藻的紫外可见吸收光谱和红外光谱分析

颗石藻样品红外光谱的测定选取了 3 个时间点, 分别是颗石藻扩大培养的第 1 天, 第 5 天和第 10 天, 倒出 100 mL 培养液, 用抽滤装置把颗石藻过滤在 0.22 μm 玻璃纤维滤膜上, 常温下烘 1 天, 去除样品水分。将颗石藻滤膜用紫外可见分光光度计 (UV-Vis) (型号: UV-3150, 日本岛津公司) 和全反射傅里叶红外光谱仪 (ATR-FTIR, 型号: Nicolet-5700, Thermo Nicolet Corporation) 获取样品的谱学信息。

1.5 海洋粘土矿物样品的 XRD 分析

海洋粘土矿物与颗石藻共培养第 10 天, 取 50 mL 摇匀后的培养液, 离心去除上清液, 用移液枪把悬浮的粘土矿物滴到盖玻片上, 均匀分布。然后把样品放在烘箱内 50℃ 烘干, 用于 X 射线衍射仪 (XRD) (X' Pert PRO, 荷兰帕纳科公司) 测样。

2 结果与讨论

2.1 海洋粘土矿物对颗石藻的生长影响

未添加粘土矿物的颗石藻生长曲线与加入伊利

石或蒙脱石的生长曲线均呈现倒“U”字型特征曲线, 在扩大培养的第 5 天左右, 细胞密度达到最大值 (图 1a)。在生长初期, 由于刚加入培养基, 颗石藻因适应新的生长环境, 细胞密度略有下降, 而细胞生长率也处于负值。1 d 以后, 颗石藻生长处于指数生长期, 细胞密度和细胞生长速率明显上升。3 d 以后, 细胞密度增长较慢, 细胞生长率开始下降。5 d 后, 细胞生长率迅速上升, 在 144 h 达到最大值。随后颗石藻细胞进入生长静止期, 3 种生长条件下颗石藻生长曲线均下降, 生长率处于负值。加入伊利石的颗石藻与自然生长的颗石藻生长曲线相似, 而加入蒙脱石的颗石藻在培养后期 168 h 之后, 细胞密度明显下降。蒙脱石具有非常高的比表面积、较大的阳离子交换容量等特性, 与颗石藻对营养物质产生了竞争, 导致颗石藻生长后期细胞密度急剧下降。此外, 蒙脱石对颗石藻的絮凝作用, 可能也是颗石藻密度下降的原因之一。可见蒙脱石对颗石藻的生长比伊利石的影响更大。

2.2 海洋粘土矿物与颗石藻相互作用的 Sr/Ca、Mg/Ca 比值变化分析

颗石藻元素地球化学研究在古海洋学研究中有重要意义, 目前研究的主要有 Sr/Ca 和 Mg/Ca 比值 (Stoll *et al.*, 2007; 梁丹等, 2012)。因此, 本文考察了颗石藻在自然条件下和分别加入一定量伊利石、蒙脱石条件下的颗石藻的 Sr/Ca、Mg/Ca 变化。从图 2 可见, 未加粘土矿物的颗石藻与加入伊利石的颗石藻的 Sr/Ca、Mg/Ca 变化不大, 可见伊利石对颗石藻的元素比值作用影响较小。加入蒙脱石生长

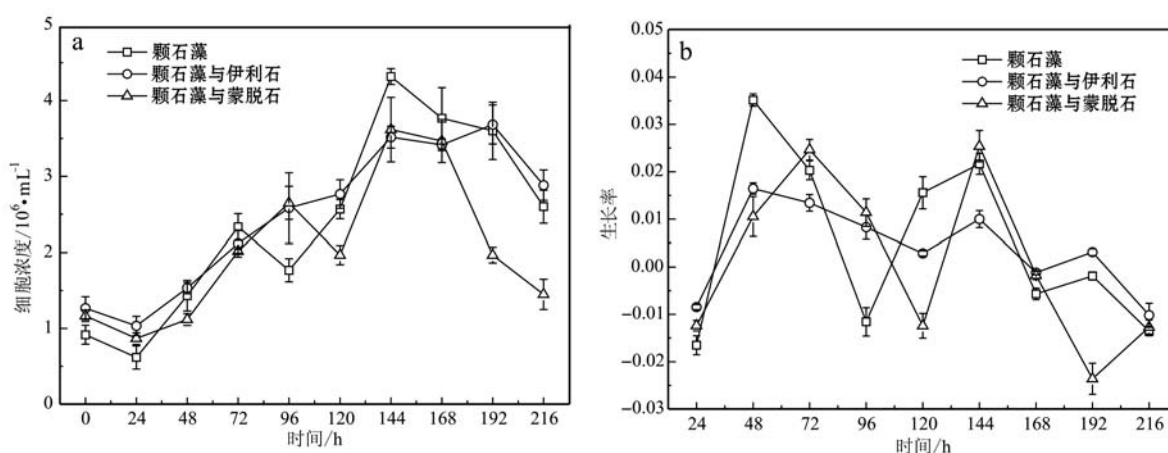


图 1 粘土矿物与颗石藻共培养的细胞生长曲线(a)和生长率(b)(误差标尺为 3 次平行实验平均值的标准误差)

Fig. 1 Growth curve (a) and growth rate (b) of coccolithophore cultured with clay minerals (the error scale is standard deviation of mean value of three-parallel experiments)

的颗石藻的 Sr/Ca 值在生长初期的 2~4 d 和生长末期 8~9 d 明显高于未加粘土矿物和加入伊利石的颗石藻元素比值下生长的颗石藻(图 2a)。而加入蒙脱石后,颗石藻的 Mg/Ca 值在生长中期的 6~8 d 高于

其他两种条件下的生长的颗石藻(图 2b)。可能的原因是由于蒙脱石的强吸附性、强阳离子交换性等物理化学特性,限制了颗石藻生长需要的主微量元素,导致颗石藻的元素比值发生变化。

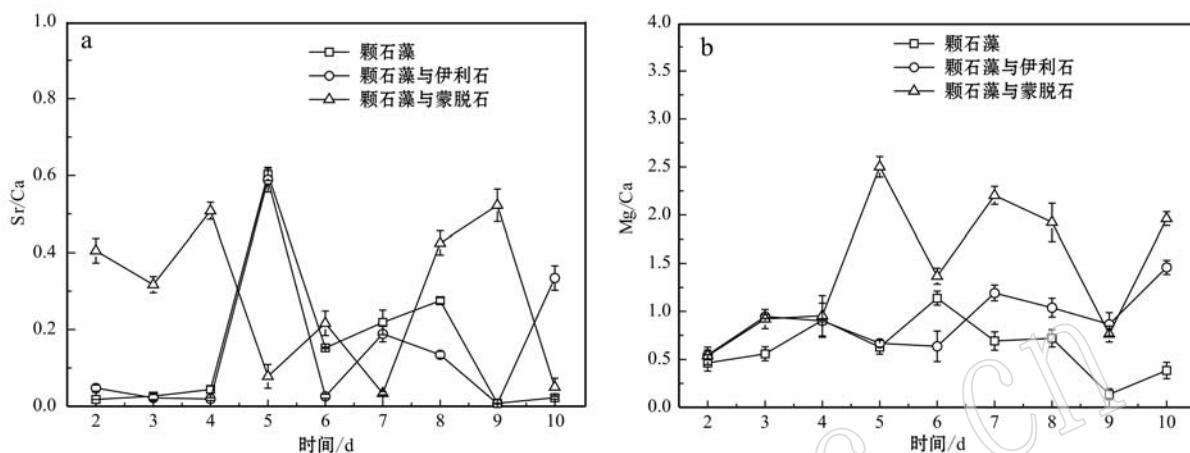


图2 粘土矿物与颗石藻共培养的 Sr/Ca(a), Mg/Ca(b)比值变化(误差标尺为3次平行实验平均值的标准误差)

Fig. 2 The variations of Sr/Ca (a) and Mg/Ca (b) during coccolithophore cultured with clay minerals (the error scale is standard deviations of mean values of three-parallel experiments)

2.3 海洋粘土矿物与颗石藻相互作用的谱学分析

UV-Vis 光谱反映颗石藻对紫外可见光波段范围的反射率情况。从图 3a 可见,未添加粘土矿物的颗石藻与加入伊利石、蒙脱石共培养后的颗石藻紫外-可见反射光谱的各峰位相似。在 200~400 nm 的紫外光区,由于颗石藻的颗石具有反射紫外线使细胞免受伤害的作用,3 种生长条件下的颗石藻的反射率均有上升。在 400~700 nm 的可见光区,加入蒙脱石作用后的颗石藻的反射率高于其他两种条件下生长的颗石藻。颗石藻需要吸收适量的可见光进行光合作用,加入适量的粘土矿物对颗石藻的光吸收影响不大。

颗石藻在钙化过程中形成生物成因方解石。碳酸钙的 O—C—O 反对称伸缩振动、面外弯曲和面内弯曲振动频率分别出现在 1433、878 和 713 cm^{-1} 。碳酸钙的 O—C—O 在 2980、2873、2511 cm^{-1} 和 1795 cm^{-1} 还出现较弱的吸收峰(Li *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015)。未加粘土矿物的颗石藻与加入伊利石的颗石藻红外光谱峰位相似,但加入伊利石后,在 1278 cm^{-1} 和 842 cm^{-1} 的吸收峰未能检出(图 3b)。加入蒙脱石后,颗石藻的特征峰被蒙脱石的特征峰掩盖,可能存在的原因是颗石藻表面被大量的蒙脱石超细颗粒覆盖。

图 3c 和 3d 是加入粘土矿物与颗石藻共同培养 10 d 后,沉积在培养瓶底部的粘土样品 FTIR 谱。加入伊利石与颗石藻共培养 10 d 后,FTIR 谱的特征峰变化很小(图 3c)。在 1437 cm^{-1} 、983 cm^{-1} 、758 cm^{-1} 等主峰位置未发生偏移现象,未出现新的吸收峰,未能检测出有机物的特征峰,可见伊利石未与颗石藻代谢产生的生物分子发生明显吸附作用。蒙脱石的特征吸收峰主要包括: 3620、3420、1035、915、847 和 525 cm^{-1} 等。其中 3620 cm^{-1} 的吸收峰属于蒙脱石结构或吸附水的羟基伸缩振动峰,3420 cm^{-1} 属于层间水分子羟基伸缩振动峰,1035 cm^{-1} 属于 Si—O—Si 伸缩振动峰,915 cm^{-1} 属于 Al—OH 弯曲振动峰,847 cm^{-1} 属于 Mg—OH 弯曲振动峰,525 cm^{-1} 属于 Si—O—Mg 弯曲振动峰(杨雅秀, 1994)。因此,加入蒙脱石共培养的 FTIR 谱在 3612 cm^{-1} 和 3383 cm^{-1} 处的吸收峰,分别归属于蒙脱石层间 Al—O—H 键的伸缩振动和 H—O—H 键层间水分子的伸缩振动。1630 cm^{-1} 峰归属于附近水分子 H—O—H 键弯曲振动,而 992 cm^{-1} 和 903 cm^{-1} 处的峰可归属于蒙脱石硅氧四面体和铝氧八面体中的 Si—O—Al 键和 Al—O—Al 键的振动峰,837 cm^{-1} 和 515 cm^{-1} 的吸收峰可能是加入培养基后,与营养元素发生作用产生的吸收峰。伊利石和蒙脱石

原矿样品为烘干后样品,故 $3\,600\text{ cm}^{-1}$ 和 $3\,380\text{ cm}^{-1}$ 波数附近的水峰位较弱,未有显著羟基伸缩振动峰。值得注意的是加入蒙脱石后,在 $2\,925$ 、 $1\,456$ 和 $1\,376$

cm^{-1} 处出现显著的有机物特征吸收峰,表明蒙脱石对颗石藻代谢产生的生物分子具有明显的吸附作用。

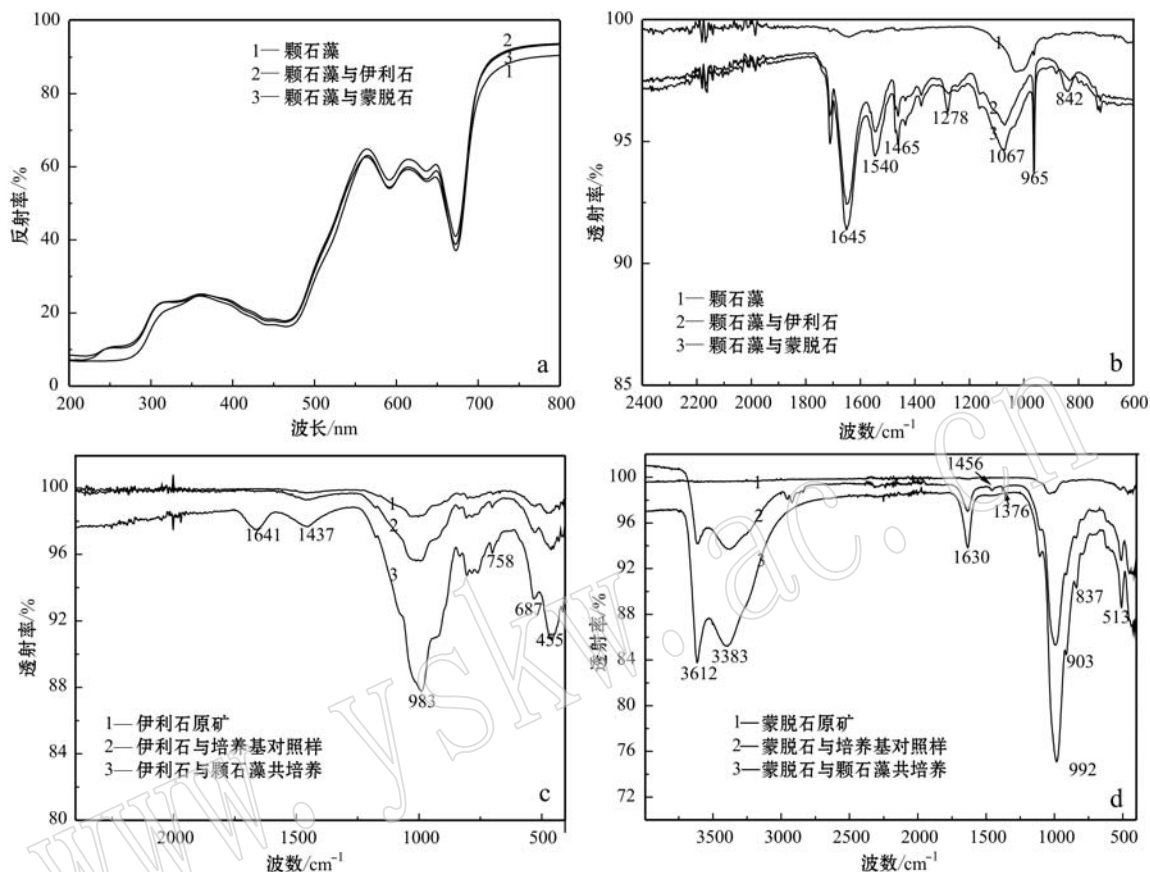


图3 粘土矿物与颗石藻共培养10 d后的颗石藻和粘土矿物的UV-Vis吸收光谱(a)和ATR-FTIR光谱(b~d)

Fig. 3 The UV-Vis spectra (a) and ATR-FTIR spectra (b~d) of coccolithophore and clay minerals after co-culturing for 10 days

2.4 海洋粘土矿物与颗石藻相互作用的矿物物相分析

通过对比伊利石和加入培养基作用后的伊利石样品的XRD物相图谱发现,加入伊利石与颗石藻共培养10 d后,伊利石的特征峰基本无变化,并且伊利石的 d_{001} 值保持不变,也未出现新的矿物衍射峰(图4a)。可见颗石藻对伊利石的矿物结构影响较小,伊利石层间也未吸附其代谢的有机分子。但加入蒙脱石后,蒙脱石与培养基以及颗石藻共培养后, d_{001} 均有下降,由 1.58 nm 分别下降到 1.45 nm 和 1.48 nm 。加入培养基后 d_{001} 下降的原因在于实验所用蒙脱石样品为钠型高纯蒙脱石,层间主要含钠离子和水分子层。当加入到培养基后,蒙脱石层间钠离子与培养基中的营养元素发生交换作用,并且排出部分层间吸附水,使得层间距变小。当与颗石藻共培

养后,因蒙脱石层间吸附颗石藻代谢分泌的有机质后,层间距扩增约 0.03 nm 。

蒙脱石属于2:1型层状硅酸盐粘土矿物,具有比表面积大、阳离子交换容量大和层间可膨胀性等特点,因而有机质容易通过插层作用进入层间并赋存(Satterberg *et al.*, 2003; 卢龙飞等, 2006)。伊利石层间无膨胀性,因此不能通过层间插层作用吸附有机分子,因而不具备储存有机质的能力。

3 结论

通过对粘土矿物与颗石藻共培养的研究发现,颗石藻在粘土矿物作用下,相对于蒙脱石,颗石藻生长受伊利石的影响较小。由于受到了蒙脱石对营养元素的吸附和细胞絮凝作用,使得颗石藻生长曲线

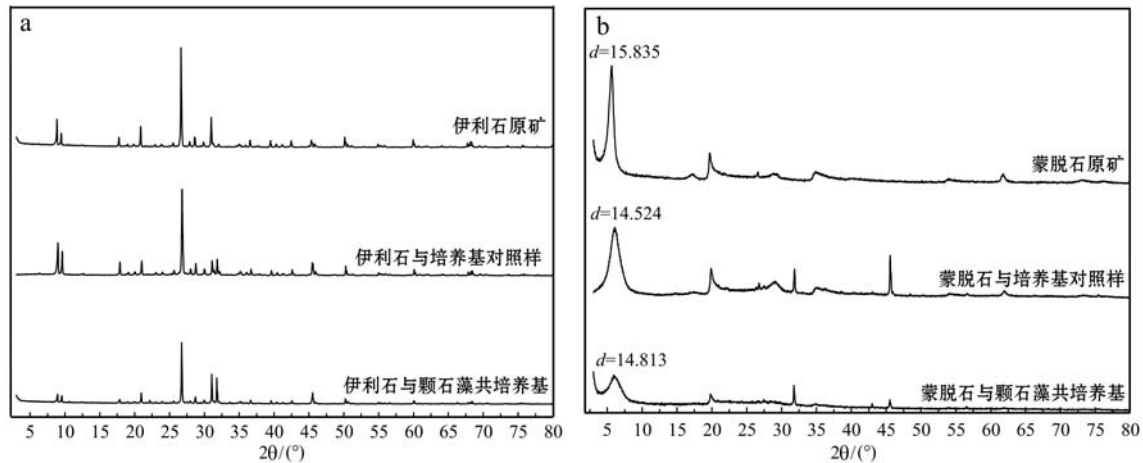


图4 粘土矿物与颗石藻共培养10 d后粘土矿物的XRD物相分析

Fig. 4 The XRD patterns of coccolithophore and clay minerals after co-culturing for 10 days

变化大。蒙脱石对颗石藻的 Sr/Ca 和 Mg/Ca 元素比值影响显著,可能对利用海底沉积颗石样品研究古海洋环境造成影响。海洋粘土矿物在颗石藻生长过程中,伊利石几乎不受颗石藻的影响。但颗石藻代谢分泌的生物大分子可通过插层作用,进入蒙脱石层间并储存。

海洋粘土矿物中的蒙脱石层间储存的颗石藻代谢有机物,值得地质学家关注,可能有助于重建古海洋环境的研究。

References

- Chen Cimei and Su Zetong. 1989. Laboratory simulating study of inhibiting effect and mechanism of smectite- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to red tide in estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2: 75~85(in Chinese with English abstract).
- Hou Xiufu, Guo Peiyong, Zhang Huaxiang, et al. 2013. Effects of water suspended particulate matter on the physiological and photosynthetic activity of *Scenedesmus obliquus*[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(5): 1 446~1 457(in Chinese with English abstract).
- Kong Xiang and Xiang Haiguang. 2003. A discussion on the study of clay minerals from ocean sediments and global change[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1: 22~26(in Chinese with English abstract).
- Li W, W S, Chen P P, et al. 2013. Influence of initial calcium ion concentration on the precipitation and crystal morphology of calcium carbonate induced by bacterial carbonic anhydrase[J]. Chemical Engineering Journal, 218(3): 65~72.
- Liang Dan and Liu Chuanlian. 2012. Advances in element geochemistry analysis of coccolith[J]. Advances in Earth Science, 27(2): 217~223(in Chinese with English abstract).
- Lu Longfei, Cai Jingong, Bao Yujin, et al. 2006. Summary of processes and significance of clay minerals in marine sedimentary organic matter preservation and in global carbon cycle[J]. Advances in Earth Science, 29(11): 1 303~1 313(in Chinese with English abstract).
- Oviedo A M, Langer G and Ziveri P. 2014. Effect of phosphorus limitation on coccolith morphology and element ratios in Mediterranean strains of the coccolithophore *Emiliania huxleyi*[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 459(1): 105~113.
- Rui Xiaoqing, Liu Chuanlian and Li Zhiming. 2014. Advances in coccolithophore laboratory culture and their application research[J]. Advances in Earth Science, 29(11): 1 303~1 313(in Chinese with English abstract).
- Satterberg J, Arnarson T S, Lessard E J, et al. 2003. Sorption of organic matter from four phytoplankton species to montmorillonite, chlorite and kaolinite in seawater[J]. Marine Chemistry, 81(1): 11~18.
- Stoll H M, Ziveri P, Shimizu N, et al. 2007. Relationship between coccolith Sr/Ca ratios and coccolithophore production and export in the Arabian Sea and Sargasso Sea[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 54(5~7): 581~600.
- Su Xiang and Liu Chuanlian. 2012. Effects of ocean acidification on coccolithophores[J]. Advances in Earth Science, 27(11): 1 274~1 280(in Chinese with English abstract).
- Wang Dan and Dong Hailiang. 2015. The utilization of organic matters in nontronite by microorganisms[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and

- Geochemistry, 34(2): 301~309(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Yao Q, Zhou G, *et al.* 2015. Transformation of amorphous calcium carbonate into monohydrocalcite in aqueous solution: a biomimetic mineralization study[J]. *European Journal of Mineralogy*, 27(6): 717~729.
- Xiang Lihui, Zhang Xiaofei, Liu Qiang, *et al.* 2015. Distribution pattern of clay minerals in surface sediments of Nantong offshore areas and their provenance[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2: 264~271(in Chinese with English abstract).
- Xing T, Gao K and Beardall J. 2015. Response of growth and photosynthesis of *Emiliana huxleyi* to visible and UV irradiances under different light regimes[J]. *Photochemistry & Photobiology*, 91(2): 343~349.
- Yang Yaxiu. 1994. *Chinese Clay Minerals*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaojing, Li Anchun, Wan Shiming, *et al.* 2010. Clay minerals in surfacial sediments of the East China sea shelf: Distribution and provenance[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 41(5): 667~675(in Chinese with English abstract).
- 及其机制的实验室模拟研究[J]. *海洋通报*, 2: 75~85.
- 侯秀富, 郭沛涌, 张华想, 等. 2013. 水体悬浮颗粒物对斜生栅藻生理生化及光合活性的影响[J]. *环境科学学报*, 33(5): 1446~1457.
- 孔祥乐, 项海光. 2003. 海洋沉积粘土矿物与全球变化研究的探讨[J]. *海洋湖沼通报*, 1: 22~26.
- 梁丹, 刘传联. 2012. 颗石藻元素地球化学研究进展[J]. *地球科学进展*, 27(2): 217~223.
- 卢龙飞, 蔡进功, 包于进, 等. 2006. 粘土矿物保存海洋沉积有机质研究进展及其碳循环意义[J]. *地球科学进展*, 21(9): 931~937.
- 芮晓庆, 刘传联, 李志明. 2014. 颗石藻室内培养及应用研究进展[J]. *地球科学进展*, 29(11): 1303~1313.
- 苏翔, 刘传联. 2012. 海洋酸化对颗石藻的影响[J]. *地球科学进展*, 27(11): 1274~1280.
- 汪丹, 董海良. 2015. 微生物对绿脱石中有机质利用的研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(2): 301~309.
- 项立辉, 张晓飞, 刘强, 等. 2015. 南通近海表层沉积物粘土矿物含量分布特征及物质来源[J]. *应用海洋学学报*, 2: 264~271.
- 杨雅秀. 1994. *中国粘土矿物*[M]. 北京: 地质出版社.
- 周晓静, 李安春, 万世明, 等. 2010. 东海陆架表层沉积物粘土矿物组成分布特征及来源[J]. *海洋与湖沼*, 41(5): 667~675.

附中文参考文献

陈慈美, 苏泽彤. 1989. 蒙脱石- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对河口区赤潮的抑制效应