

非暖水碳酸盐岩: 沉积学进展与油气勘探新领域

贾承造¹ 张 杰^{2,3} 沈安江^{2,3} 姜 林⁴

(1. 中国石油天然气集团公司 北京 100724; 2. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室 浙江杭州 310023; 3. 中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023; 4. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:非暖水碳酸盐岩是碳酸盐岩沉积学中的重要组成部分,结合国内外关于碳酸盐岩的最新研究成果,综述了非暖水碳酸盐岩的研究内涵,将表面海水温度<20℃的非暖水碳酸盐岩的沉积环境划分为温暖-温水区(15~20℃)、凉水-温水区(5~15℃)和冷水-极地区(<5℃)。与暖水-热带区碳酸盐岩中含有大量光合自养生物组合不同,非暖水碳酸盐岩中的生物类型主要为非营光合作用的异养生物组合。非暖水碳酸盐岩的沉积速率很低,凉水碳酸盐岩的沉积速率大多不到 1m/ka,一般都只有每千年几厘米。由于缺乏造礁生物,非暖水碳酸盐岩的沉积环境缺乏生物礁,主要为无障壁的缓坡以及开阔的大陆架。由于缺乏灰泥支撑,非暖水碳酸盐岩主要为颗粒支撑结构,早期成岩作用中很少见到镁方解石或文石胶结。由于胶结作用大都发生于深埋藏环境,具有大量碳酸盐岩生物碎屑堆积的非暖水碳酸盐岩体系可以保存大量的优质粒内孔和粒间孔等储集空间,可能成为未来油气勘探的新领域。非暖水碳酸盐岩概念的出现,对岩相古地理分析具有重要影响,如果将现代非暖水碳酸盐岩研究、古生物资料以及古海水研究应用到古老碳酸盐岩研究中,则现在划分的古纬度可能将需要进行较大的改变。

关键词:非暖水碳酸盐岩;海平面变化;岩相古地理;冰期事件;油气勘探

中图分类号:TE122 **文献标识码:**A

Non-tropical carbonate: progress in sedimentology and new field of petroleum exploration

Jia Chengzao¹ Zhang Jie^{2,3} Shen Anjiang^{2,3} Jiang Lin⁴

(1. China National Petroleum Corporation, Beijing 100724, China; 2. CNPC Key Laboratory of Carbonate Reservoir, Zhejiang Hangzhou 310023, China; 3. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Zhejiang Hangzhou 310023, China; 4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract:Non-tropical carbonate is a significant component of carbonate sedimentology. Combined with latest carbonate research achievements, this paper focuses on the connotation of non-tropical carbonate realm with surface marine water temperature<20℃, which could be divided to warm-temperate realm (15-20℃), temperate-cool water realm (5-15℃) and polar cold water realm (<5℃). The biota types in non-tropical carbonate are mainly heterozoan association, which is different from the phtozoan association in tropical carbonate. The non-tropical carbonate has very low accumulation rate. The accumulation rate of cool-water carbonate is no more than 1m/ka, mostly only some centimeters per millennium. Because of the lack of reef-building organisms, there is reef deficiency in non-tropical carbonate, mainly are ramp with no barrier and open shelf. Lack of lime mud supporting, it is grain-supporting structure in non-tropical carbonate. There is little Mg-calcite or aragonite cementation in early stage diagenesis of non-tropical carbonate. Because the cementation is mainly in deep burial environments, the non-tropical carbonate system with abundant carbonate bioclasts accumulation can preserve plenty of high-quality intra-grain pores and inter-grain pores, which might be the new field of future petroleum exploration. The appearance of the concept non-tropical carbonate has significant influence on lithofacies paleogeography analysis. If the modern non-tropical carbonate study, paleontological material and paleo-ocean water study were applied into the ancient carbonate study, the present paleo-latitude division might be greatly changed.

Key words:non-tropical carbonate; sea level oscillation; lithofacies paleogeography; glacial events; petroleum exploration

引用:贾承造,张杰,沈安江,姜林. 非暖水碳酸盐岩:沉积学进展与油气勘探新领域[J]. 石油学报,2017,38(3):241-254.
Cite: JIA Chengzao,ZHANG Jie,SHEN Anjiang,JIANG Lin. Non-tropical carbonate:progress in sedimentology and new field of petroleum exploration[J]. Acta Petrolei Sinica,2017,38(3):241-254.

基金项目:国家重大科技专项(2016ZX05004-002)资助。
第一作者:贾承造,男,1948年3月生,1975年毕业于新疆工学院地质系,1987年获南京大学博士学位,现为中国科学院院士,主要从事构造地质学、石油地质学研究和油气勘探工作。Email:jia cz@petrochina. com. cn
通信作者:张 杰,男,1983年8月生,2005年获中国地质大学(武汉)学士学位,2008年获中国地质大学(武汉)硕士学位,现为中国石油杭州地质研究院工程师,主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。Email:zhangj_hz@petrochina. com. cn

碳酸盐岩储层的油气产量约占世界油气总产量的 60%^[1],碳酸盐岩沉积环境是决定储层发育的关键因素,因此碳酸盐岩沉积相与沉积模式一直是研究的热点^[2-4]。碳酸盐岩主要沉积于温暖的热带水体中^[2,5-6],但不可否认的是,沉积于温带和寒带环境的非暖水碳酸盐岩(包括凉水碳酸盐岩和冷水碳酸盐岩)也是沉积学的重要组成部分,但一直以来很少受到关注^[7]。

2016 年在加拿大卡尔加里举行的 AAPG 年会上, Noel P. James 在 SEPM 商业会议上对非暖水碳酸盐岩进行了系统而详细的介绍^[8],指出碳酸盐岩可形成于凉爽、寒冷甚至极寒的海水中。澳大利亚南部、新西兰等地区浅海、南半球及地中海新生代乃至晚古生代均发育大量的凉水/冷水碳酸盐岩,冷水环境发育大量的水生大型藻类、苔藓虫-海绵礁等,其具有很高的碳酸盐岩生产率,说明非暖水碳酸盐岩是碳酸盐岩沉积学中不可或缺的部分。在该次会议上,许多学者也对加勒比海附近以及法国等中、高纬度地区新近纪以来的非暖水碳酸盐岩进行了成岩作用、储层建模等方面的探讨^[9-11]。

Chave^[12]于 1967 年最早进行了凉水碳酸盐岩的研究,指出碳酸盐岩可以形成于所有纬度,与水体温度和陆源碎屑物质的供给量无关。最新的研究发现,不论是现代,还是地质历史时期,有相当规模的碳酸盐岩沉积于凉水环境和极地冷水环境^[13]。由于缺乏早期成岩作用,非暖水碳酸盐岩中保存了大量的原始孔隙,可以成为很好的储集岩。

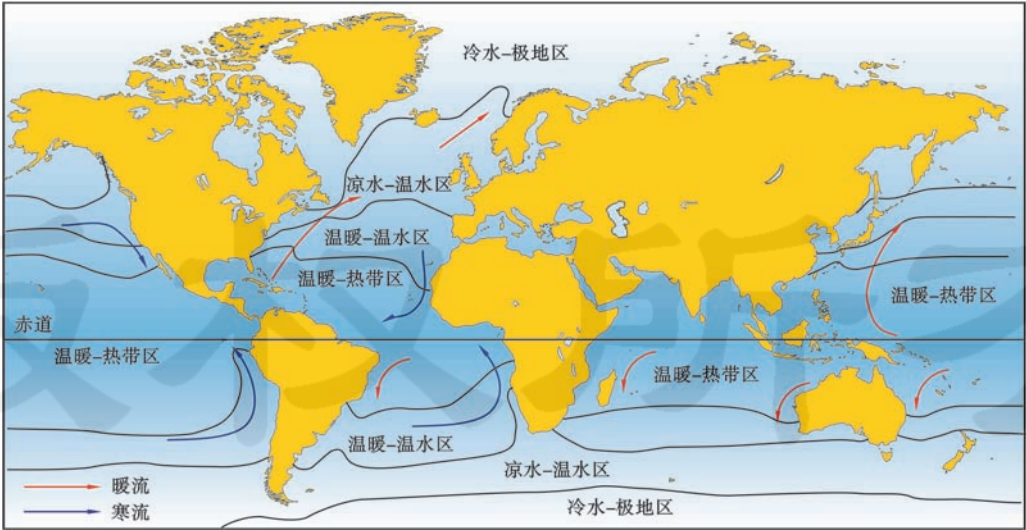
由于古海水温度难以确定,加之碳酸盐岩沉积受到海平面变化和构造运动的影响^[14],地质历史时期岩相古地理研究很难判断当时的水体性质。对于非暖水

碳酸盐岩的深入研究有可能对碳酸盐岩沉积学,甚至扩大碳酸盐岩油气勘探领域带来革命性的变化。

中国关于非暖水碳酸盐岩的研究还较少,笔者结合国际上对于现代以及地质历史时期非暖水碳酸盐岩的最新研究成果,从非暖水碳酸盐岩的内涵、沉积物颗粒类型、岩石特征、形成环境等方面进行了综述,并探讨了非暖水碳酸盐岩对油气勘探的意义以及研究中存在的问题。

1 非暖水碳酸盐岩的特征

暖水环境和非暖水环境的界线通常依据表面海水温度来进行划分,一般被划在表面海水温度约为 20℃ 附近,表面海水温度 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 为暖水环境(热带区),表面海水温度 $<20^{\circ}\text{C}$ 为非暖水环境^[13]。James 和 Lukasik^[15]绘制的全球平均表面海水温度等温线图中,将海水环境划分为 4 个区,分别是:温暖-热带区、温暖-温水区、凉水-温水区和凉水-极地区(图 1)。由于暖流和寒流的流动,以及海水的垂向流动,这 4 个区的界线并不是绝对的。过去地质学家关注的碳酸盐岩主要沉积于温暖-热带区,在该区内,碳酸盐岩的规模和产率都是最高的。除了热带区外,其他从低纬度到高纬度,甚至两极地区的海水环境均为非暖水环境,沉积的碳酸盐岩为非暖水碳酸盐岩。也就是说,表面海水温度 $<20^{\circ}\text{C}$ 条件下沉积的碳酸盐岩均为非暖水碳酸盐岩(表 1)。也有根据底部海水温度而划分为热带($>22^{\circ}\text{C}$)、亚热带($18\sim 22^{\circ}\text{C}$)、温带($10\sim 18^{\circ}\text{C}$)、副极地($5\sim 10^{\circ}\text{C}$)、极地($<5^{\circ}\text{C}$)^[7],由于水温随着水深变化,本文仅采用表面海水温度的划分方案。湖水表面温度 $<20^{\circ}\text{C}$ 沉积的碳酸盐岩也属于非暖水碳酸盐岩^[16]。



注:引自 James 等^[15],划分了现代碳酸盐岩不同的沉积分带。非暖水带分为温暖-温水区(warm-temperate, 15~20℃)、凉水-温水区(cool-temperate, 5~15℃)以及冷水-极地区(cold-polar, <5℃)。

图 1 全球平均表面海水温度等温线

Fig. 1 Isotherm of global average surface seawater temperature

表 1 不同浅海环境中非暖水碳酸盐岩的组成

Table 1 Composition of non-tropical carbonate at different shallow water circumstances

分区	海水环境	特征	表面海水温度范围/℃
凉水区 (cool water)	温暖-温水	异养生物组合(heterozoan)和过渡型异养生物组合在开阔陆架和缓坡区发育,有少量光合自养生物(大的底栖有孔虫,分散的虫黄藻珊瑚,缺乏钙质的绿藻)。含少量碳酸盐岩泥和原地的海底硬地。区内发育丰富的珊瑚类、海草或内部的大型植物(早白垩世以后)等生物,以及再生沉积(变余沉积, palimpsest sediment)构造。生物侵蚀和浸渍等成岩作用广泛发育。区内是苔藓虫、软体动物、有孔虫的工厂。	15~20
	凉水-温水	异养生物组合在开阔陆架和缓坡发育,主要的生物类型为珊瑚类和内部的大型植物(白垩纪以后),明显的软体动物,苔藓虫和藤壶等。区内可能有互层的冰碛岩沉积,少量碳酸盐岩泥和原地的海底硬地。可见再生沉积(变余沉积, palimpsest sediment)和广泛的生物侵蚀和浸渍作用。	5~15
冷水区 (cold water)	冷水-极地	异养生物组合在开阔陆架或海滩发育。季节性的冰盖,互层的冰碛岩沉积和冰携碎屑(ice rafted debris,IRD)常见。典型的矿物为六水碳钙石的方解石假晶(glendonites)。区内不仅含有生物(苔藓虫、软体动物、藤壶)碳酸盐岩,还有生物硅质(硅藻和海绵)沉积物。	<5

注:据 James 等^[15]修改。

1.1 非暖水环境中生物类型

非暖水环境中的生物类型称为非营光合作用的异养生物组合(heterozoan association),与暖水环境的光合作用自养生物组合(photozoan association)相对应。非暖水环境中的生物类型在暖水环境中几乎都可以见到,但非暖水碳酸盐岩最大的特点在于缺乏造礁生物和/或钙质绿藻。藤壶和苔藓虫在非暖水碳酸盐岩沉积物中不仅非常常见,而且是主要组分,其在暖水碳酸盐岩中却只占很小的部分^[17]。由于地质历史时期生物演化、多次生物大灭绝事件以及不同类型生物生活水体性质的差异,非暖水碳酸盐岩的生物类型因时代的不同以及纬度的不同,类型有一定差异。图 2 展示了新生代与古生代、中生代生物类型和颗粒类型(主要是指鲕粒、团块、球粒)的差异。不同水深条件下非暖水碳酸盐岩的生物类型也有较大差别。现代非暖水碳酸盐岩沉积环境的生物类型为珊瑚藻以及一些底栖无脊椎动物,其通过一系列异养的生活方式来获取食物,动物类主要包括藤壶、苔藓虫、双壳类、海绵、蠕虫类,非造礁珊瑚类和底栖有孔虫类,还有少量的腹足类、非虫黄藻珊瑚、介形虫和棘皮类等,植物类包括海草^[18]、珊瑚藻等^[7]。图 3 展示了不同地区和不同时代典型非暖水碳酸盐岩的岩石学特征。

1.2 非暖水碳酸盐岩沉积速率

据 Wilson^[2]统计,全新世浅水碳酸盐岩的沉积速率平均为 1 m/ka,礁带为 3 m/ka;大巴哈马滩和安德罗斯岛潮坪为 0.7 m/ka,深水为 1 cm/ka。图 4 对比了热带碳酸盐岩与凉水碳酸盐岩的沉积速率。以第四纪为例,热带碳酸盐岩礁相的沉积速率在<20m 水深内一般为几十厘米到十多米,最快可达 20 m/ka,鲕粒岩的沉积速率一般不超过 2 m/ka,潮积岩的沉积速率一般不到 1 m/ka。由于碳酸盐岩产率随着水体温度的下降而下降,非暖水碳酸盐岩沉积速率比暖水碳酸盐岩低了几个数量级,最快的海草滩及碳

酸盐岩沙滩也只有不到 1 m/ka,在潮下港湾、开阔陆架、陆架边缘到斜坡环境一般每千年只有几厘米,甚至几毫米。

1.3 非暖水碳酸盐岩的沉积物

非暖水碳酸盐岩的主要沉积物为珊瑚藻和无脊椎动物骨骼等生物颗粒。除了少量硅藻和硅质海绵产生的生物硅质外,大部分非暖水碳酸盐岩沉积物都是钙质的。常见的颗粒是卵石大小的红藻石,其随着洋流分布在海底。无脊椎动物骨骼沉积物包括底栖有孔虫、介形虫壳体和海鞘骨针、棘皮类、藤壶以及龙介虫

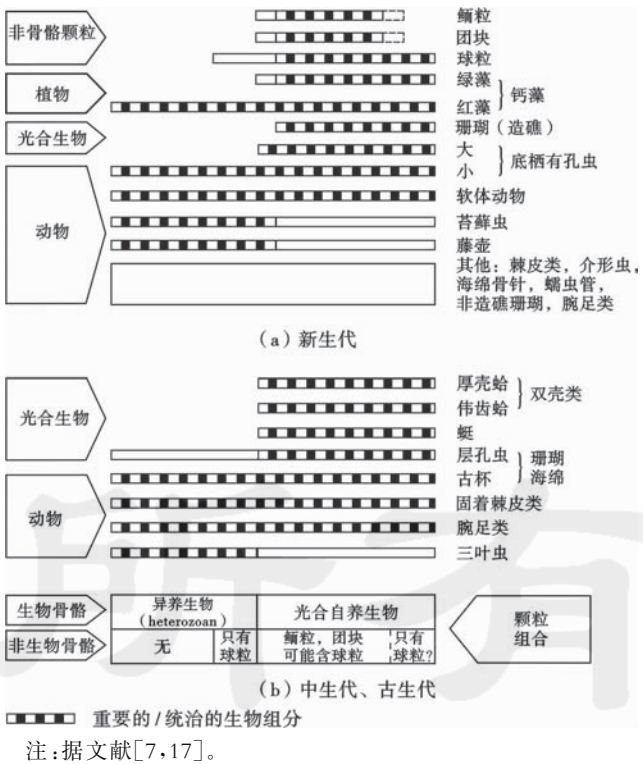
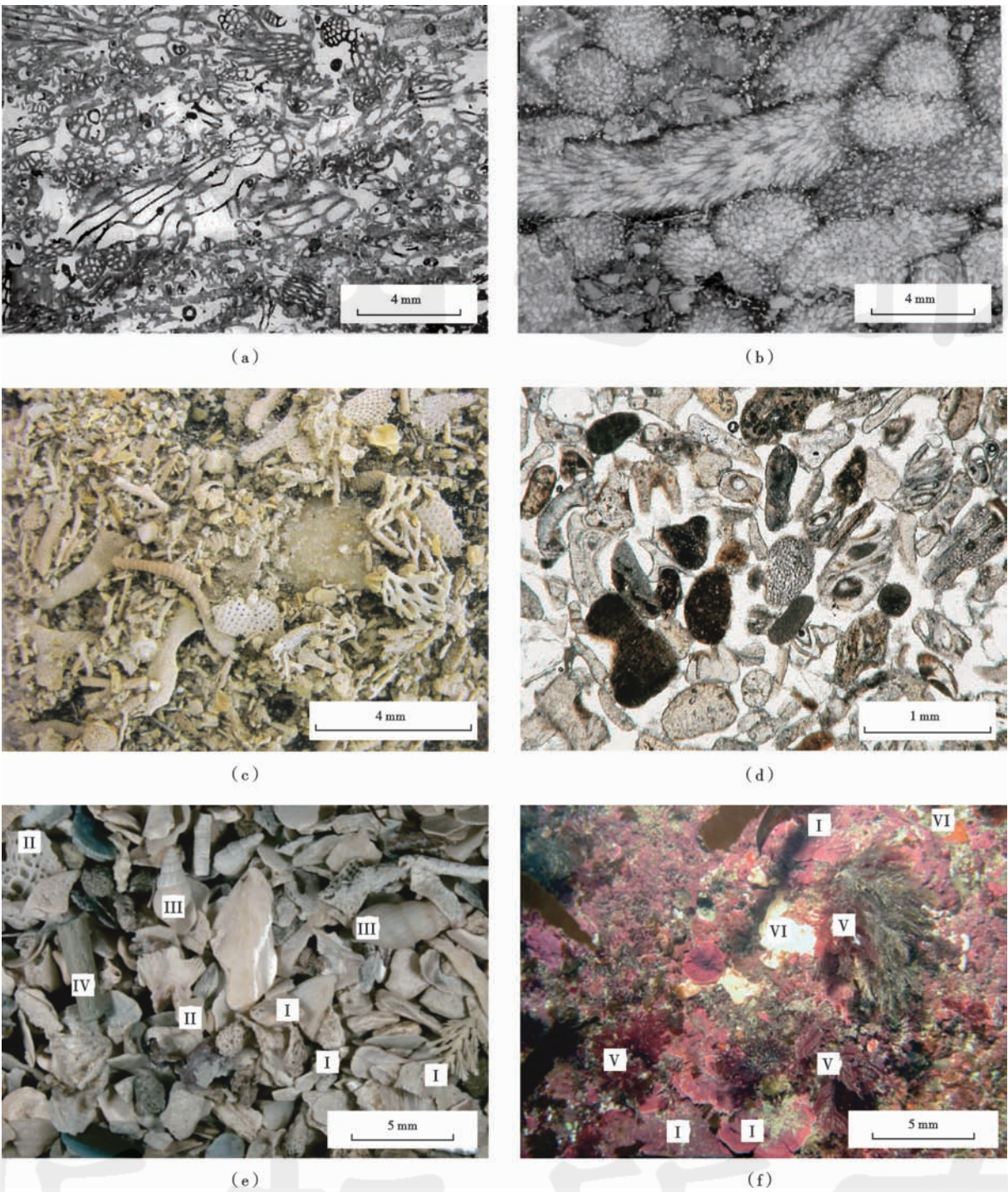


图 2 陆架沉积物中典型的非暖水碳酸盐岩颗粒类型所形成的各种生物组合

Fig. 2 The principal carbonate grain types arranged to show the various combinations (associations) in which they occur in shelf sediments



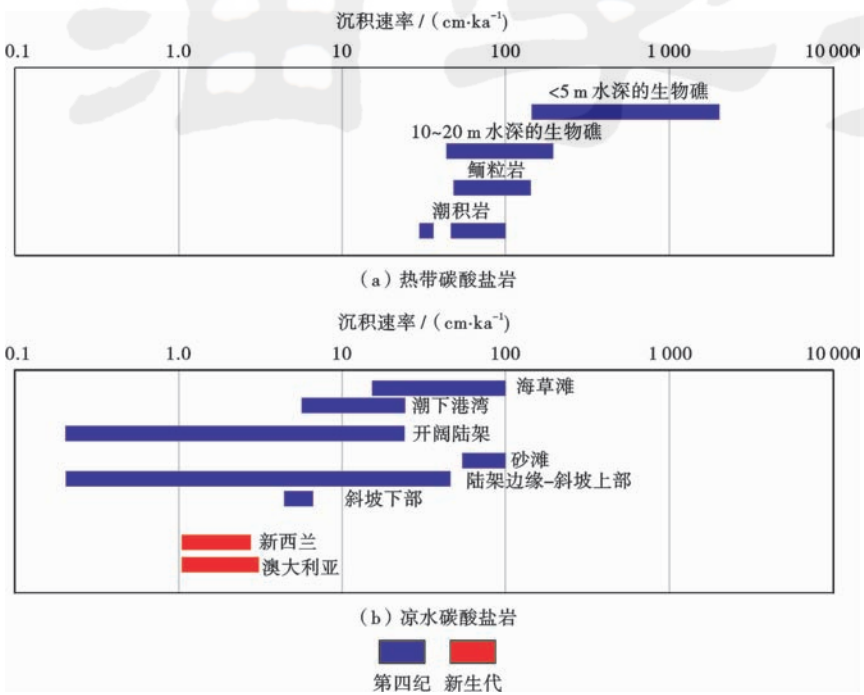
(a)晚渐新世苔藓虫颗粒灰岩,已经历 16 Ma 的大气淡水成岩作用,仍然未被胶结,澳大利亚南部 Gambier 灰岩,岩石薄片,单偏光^[7]。(b)中奥陶世苔藓虫颗粒灰岩,可见颗粒之间具有典型的机械压实和化学压实作用,无胶结物(可能由于缺乏文石质颗粒,所以没有早期胶结作用),加拿大魁北克蒙特利尔,Laval 组,岩石薄片,单偏光^[13]。(c)渐新世凉水灰岩,含有大量树枝状和窗格状苔藓虫,澳大利亚南部^[9]。(d) 更新世凉水碳酸盐岩体系中砂丘岩薄片照片,可见有孔虫、苔藓虫、软体动物、海胆等不同的生物颗粒^[19],澳大利亚南部 Cape Spencer, Bridgewater 组,单偏光。(e) 叶片状珊瑚丛中碳酸盐岩粗砂的颗粒组分,Baxter's 生物礁,含大量软体动物碎片,弯曲而被硬壳包裹的珊瑚藻(I)、藤壶(II)、小的腹足类(III)与棘皮动物的棘(IV),新西兰,Kaikoura,南部海湾^[20]。(f)现代大型藻类群落带,珊瑚藻的结节和硬壳膜(I)、软的红藻(V)、海绵(VI),图左侧可见在厚大型藻类下面的水螅虫包壳基底^[20],新西兰,Kaikoura,南部海湾。

图 3 非暖水碳酸盐岩岩石学特征

Fig. 3 Petrographic characteristics of non-tropical carbonate

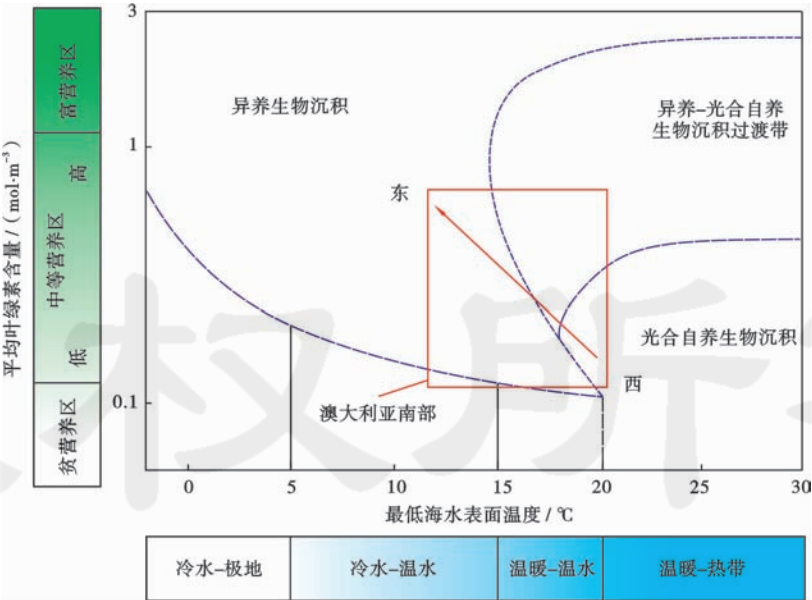
等。在古生代,腕足类、三叶虫等无脊椎动物骨骼也是非暖水碳酸盐岩中重要的沉积物来源。非暖水碳酸盐岩中最典型的骨骼组分是苔藓虫^[21],其与软体动物和有孔虫一起分布在陆架中,是温水碳酸盐岩主要的沉积物。珊瑚藻是唯一的底栖钙质自养生物,从热带到两极的海水表层到水下约 80 m 深处都存在^[13]。由于海水温度的差异,以及控制生物生存的叶绿素含量导

致营养物质的变化,进而导致了沉积物类型的变化,这在澳大利亚表现最明显,从西部的光合自养生物沉积到东部的异养生物沉积(图 5),沉积物类型发生了很大转变。由颗石藻形成的碳酸盐岩灰泥仅仅占了浅海非暖水碳酸盐岩中很小的一部分。大量的营养物质随着洋流的流动从外缓坡、斜坡下部上涌(图 6),使得非暖水生物可以大量发育并形成较厚的碳酸盐岩沉积。



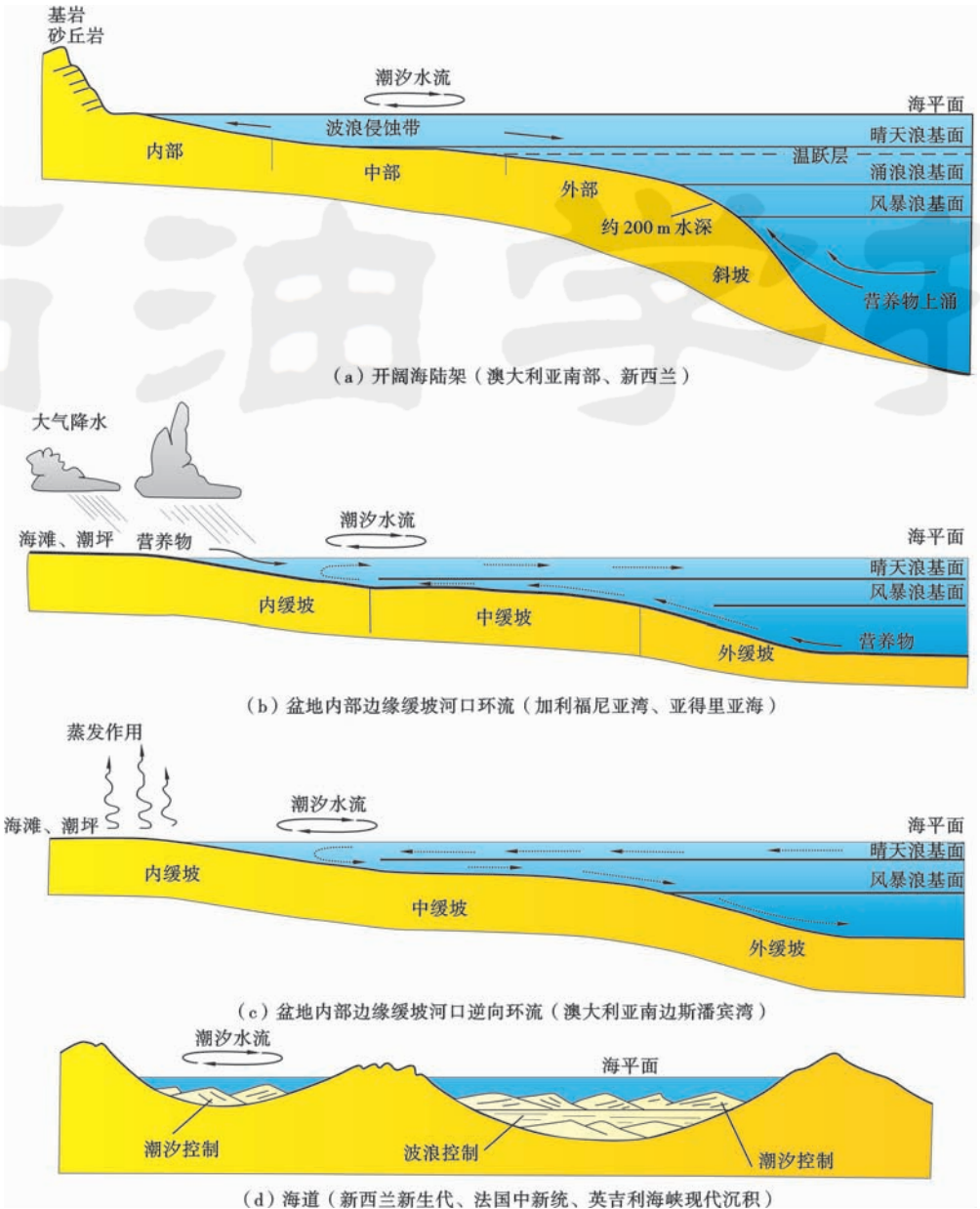
注:据文献[7]。
图 4 热带碳酸盐岩与凉水碳酸盐岩沉积速率对比

Fig. 4 Comparison of depositional rate between tropical carbonate and cool-water carbonate



注:据文献[15,23]修改。
图 5 最低海水表面温度与海水叶绿素含量,以及不同碳酸盐岩沉积物类型适合环境分布

Fig. 5 Minimum sea surface temperature and seawater chlorophyll content with appropriate environments wherein the different carbonate sediment associations



注:据 James 等^[15]。

图 6 在被碳酸盐岩沉积物覆盖的凉水开阔海、盆地内部和海道环境的陆地边缘环境中划分的不同水动力带
Fig. 6 The different hydrodynamic zones on continental margin environments covered by carbonate sediment in cool-water open ocean, interior basin, and seaway environments

新生代以来的研究表明,非暖水环境中也有许多准同生白云岩沉积。在澳大利亚南部 Lacepede 陆架的第四纪富含石英质双壳-苔藓虫凉水碳酸盐岩沉积物中, Bone 等^[22]发现了由于海平面升降而在同沉积期沉积物-水体界面以下形成的灰白色—橙色—暗红色白云石岩屑,其中自形—他形白云石在岩石中的含量最高可达 25%,其富含 $\text{Ca}(\text{MgCO}_3)$ 的摩尔百分含量大约为 44%,贫 Fe,阴极发光下具有杂乱的环带, Sr 同位素与现代海水沉积物相符,¹⁴C 定年为 28 ka,碳氧同位素值类似于海水白云石。Dix 和 Nelson^[24]在研究新西兰最北部渐新世凉水碳酸盐岩的成岩作用时,也

发现了同沉积期的自生白云石。这些白云石的发现为解释地质历史时期灰岩中分散状白云石的成因提供了一种可能。

1.4 非暖水碳酸盐岩的成岩作用

非暖水环境中沉积物在同沉积期经历的主要成岩作用为生物骨骼的磨蚀、生物侵蚀^[25]、浸渍、溶蚀以及少量胶结作用^[26]。由于缺乏如鲕粒等非骨骼碳酸盐岩颗粒,缺乏明显的灰泥沉积,非暖水碳酸盐岩中很少见早期非生物作用的镁方解石或文石胶结物(图 3),仅在一些特殊情况下少量存在。Nelson 等^[27]研究了新西兰和澳大利亚南部古近纪和新近纪的凉水碳酸盐

岩,发现其中存在少量的海水胶结物,其仅在以下几种情况下发育:①发育在罕见的原地生物丘内;②发育在一些具交错层理的多层砂体中;③发育在潮下带碳酸盐岩米级旋回的顶部;④大多与特定的不整合面相伴生。

灰泥丘在碳酸盐岩沉积中非常普遍,以往多被认为沉积于浅海环境。Reynaud 等^[28]研究了法国东南部海退期潮汐三角洲凉水碳酸盐岩的成岩作用,发现由于生物碎屑机械侵蚀、生物侵蚀以及下伏灰泥侵蚀而形成的 Uzès 组灰泥的形成速度比长期潮汐搬运再沉积的速度要快。近年来在北大西洋 Porcupine Seabight 海区进行的大洋钻探发现灰泥可以沉积于深海,甚至冷水环境^[29]。在该区研究中还发现冷水的珊瑚丘中由于沉积硫酸盐矿物的氧化作用(如黄铁矿),使得水体酸度增加,碳酸盐矿物发生溶蚀,孔隙水过饱和而导致石膏和白云石的形成。这种溶蚀虽然增加了孔隙

度,但也促进了沉积物-水界面处的沉积物发生石化作用(lithification)^[30]。Dix 和 Nelson^[24]发现凉水碳酸盐岩陆架可以沉积原地的和外来的文石质灰泥,其石化速率接近热带深水台地周围沉积物灰泥的石化速率,渐新世碳酸盐岩灰泥石化速度比生物砾屑灰岩粒间灰泥的石化速率快。Farrow 和 Fyfe^[25]发现低纬度灰泥是通过生物骨骼碎屑或沉积而形成的,而高纬度陆架的冷水碳酸盐岩灰泥是通过生物侵蚀或浸泡而形成的。

2 非暖水碳酸盐岩与暖水碳酸盐岩的差异

由于形成水体温度和环境的不同,非暖水碳酸盐岩与暖水碳酸盐岩在生物类型、沉积物/颗粒组成、结构构造、成岩作用、碳氧同位素组成、沉积速率、沉积模式等方面都具有显著的差异(表 2)。

表 2 暖水碳酸盐岩和非暖水碳酸盐岩差异
Table 2 Differences between tropical carbonate and non-tropical carbonate

特征	暖水碳酸盐岩	非暖水碳酸盐岩
形成的水体温度	≥20℃	<20℃
纬度	低纬度	中、高纬度,极地环境
生物类型	种类和数量繁多,以光合自养生物为主	种类较少,以异养生物为主,主要包括藤壶、苔藓虫、双壳类和底栖有孔虫,少量腹足类、介形虫、棘皮类等动物,以及海草、珊瑚藻等植物。不含造礁珊瑚和绿藻类
沉积物/颗粒组成	各种生物骨骼和非生物骨骼颗粒、生物硅质	主要为异养生物骨骼、生物硅质
结构构造	各种碳酸盐岩结构,灰泥较多	颗粒结构,缺乏灰泥支撑
早期成岩作用	强烈,类型多样	弱,主要为生物骨骼的磨蚀、侵蚀、浸渍等
原始沉积物碳氧同位素值	现代海洋沉积物碳同位素值(PDB)0~4‰,氧同位素值(PDB)-1‰~2‰ ^[31]	碳氧同位素值(PDB)0~1.5‰(钙质砾岩除外,Kyser 等 ^[32])
沉积速率	快,每千年几十厘米到十多米,最快可达 20 m/ka	慢,最快的海草滩及碳酸盐岩沙滩不到 1 m/ka,一般只有每千年几毫米到几厘米
沉积模式	各种碳酸盐岩沉积模式,含生物礁相	无障壁的开阔陆架,缓坡模式,缺乏生物礁相

近年来对于非暖水碳酸盐岩的研究还发现其与暖水碳酸盐岩存在如下差异:

- (1) 冷水海草是非暖水碳酸盐岩的沉积物工厂(sediment factory),其碳酸盐生产速率超过热带海洋被子植物,对古新世到现在的海草碳酸盐岩工厂的定量计算证实了这一结论^[33]。
- (2) 粗叶海藻是非常重要的碳酸盐岩工厂,尤其是在高纬度冷水海洋环境中。
- (3) 冷水海相碳酸盐岩可能出现在边缘海的潮缘蒸发—白云石环境中。
- (4) 长期认为已经灭绝的一些古生代苔藓虫、海绵等生物被发现生长于现代冷水上陆坡环境,有的形成丘滩沉积。
- (5) 广泛存在的海底溶蚀作用发生在温水浅海区、远高于溶跃面(方解石补偿深度,CCD 面)的区域。
- (6) 冷水方解石沉积物中少量早期快速胶结作用的存在导致其与暖水碳酸盐岩在埋藏成岩作用方面存

在明显差异。

3 非暖水碳酸盐岩沉积相模式

非暖水碳酸盐岩的沉积环境主要为无障壁缓坡^[34]以及开阔的大陆架,其沉积受到了全球和区域性气候条件、陆源碎屑供给、海洋学、营养物供给和海平面升降等因素的影响^[7]。最普遍的沉积环境是开阔海陆架(以大陆边缘或海滩为代表)、内陆盆地(以地中海以及一套陆表、前陆和内克拉通沉积中心和海道)、连接大型水体的浅海单元(如海峡、拉长的台内水道、或内陆通道)等^[7,13,35]。非暖水碳酸盐岩沉积相研究方法与暖水碳酸盐岩是一致的,结合了地震地层学研究、岩石学特征和地质演化研究而形成^[36-38]。图 6 展示了非暖水环境的开阔海陆架、内陆盆地边缘缓坡和海道的沉积相带划分和水动力特征。温暖-温水环境,凉水-温水环境和冷水-极地环境的碳酸盐岩沉积相存在一定的差异。

3.1 温暖-温水碳酸盐岩系统

温暖-温水碳酸盐岩系统包括高能开阔海体系和低能内陆盆地体系,以及海道(seaway)(图 6)。

高能开阔海体系^[39]的沉积相划分与暖水碳酸盐岩类似^[40],可以划分为沿岸沉积、内陆架、中陆架和外陆架。海岸上形成大量的风成岩丘或向水下推进的斜坡沉积楔状物^[19],海洋里主要存在海草、大型藻类以及苔藓虫、棘皮类、海底双壳类、浮游有孔虫等异养生物[图 3、图 7(a)]。最广泛的现代海岸沉积体系发育于澳大利亚南部和西部,以及非洲南部,在地中海地区也有发育。内陆架具有很陡的滨岸特征,可以延伸很远,海底被沙浪覆盖,基岩上生长着海带和海草。苔藓

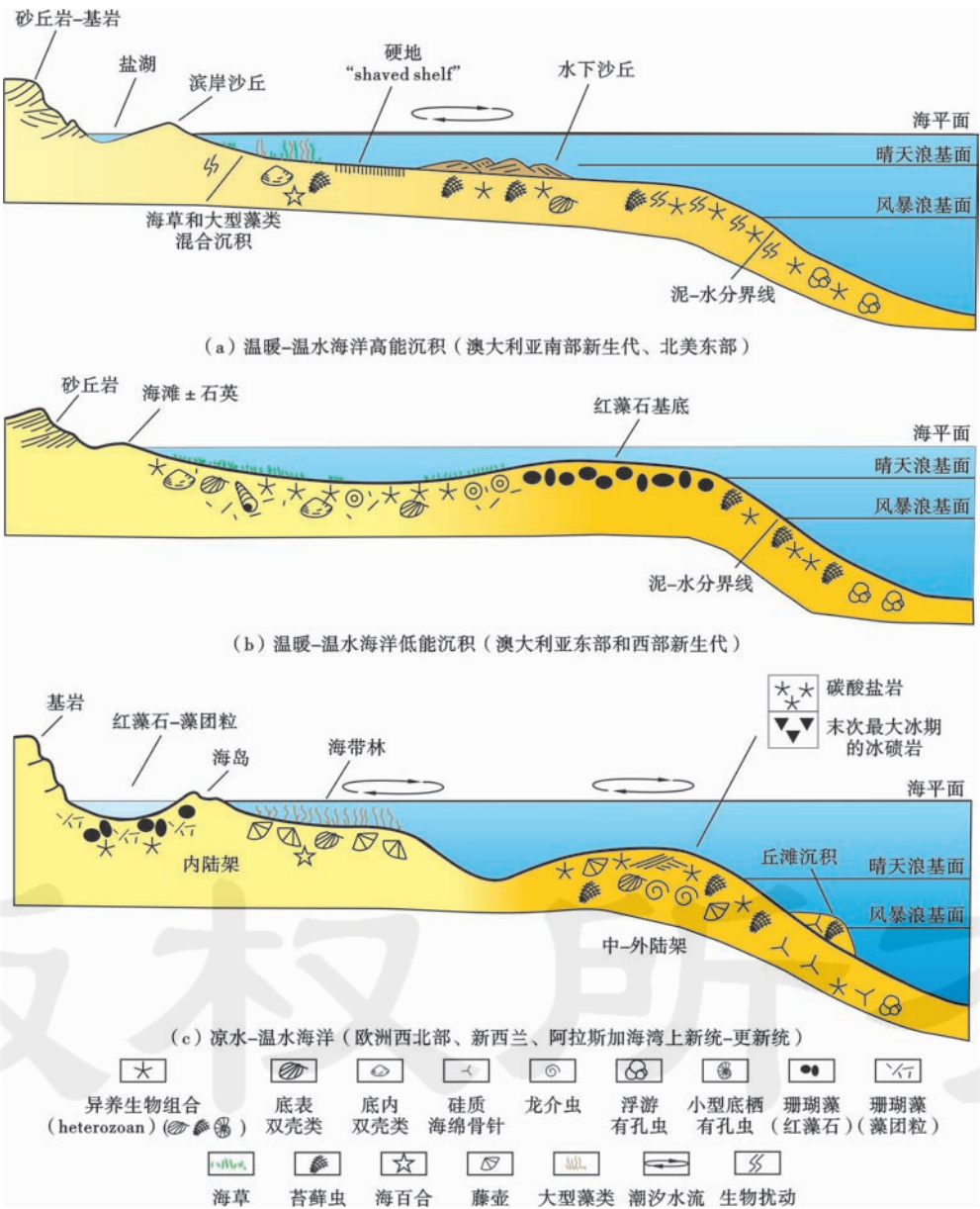
虫、软体动物(主要是内栖的双壳类)、棘皮类和小型底栖有孔虫形成了生物碎片碳酸盐岩砂以及碳酸盐岩砾屑,大量基岩表面大都被珊瑚红藻覆盖^[27]。

在低能内陆盆地体系中,相对比较安静,沉积相的类型与高能环境类似[图 7(b)],但形成的岩石颗粒比较细。

大部分海道都是温暖-温水的沉积相类型,发育交错层理,水深 40~60 m。沉积物大多是异养生物形成的颗粒岩和砾屑碳酸盐岩,含珊瑚藻和含量不等的陆源碎屑。

3.2 凉水-温水碳酸盐岩系统

不同于热带碳酸盐岩,所有凉水-温水体系都是开阔海环境[图 7(c)],体系中存在大量的新近系冰川沉积物,导致许多陆架都被海洋冰川沉积物覆盖。随着末



注:据 James 等^[15]。

图 7 温暖-温水环境和凉水-温水环境中开阔海陆地边缘不同水动力带和主要的钙质生物分布

Fig. 7 The different hydrodynamic zones and main calcareous biota on open-ocean continental margin environments in warm-temperate and cool-temperate marine settings

次最大冰期(LMG)后陆地冰川大量消融,许多北半球的陆架变成了非暖水碳酸盐岩沉积环境。最低的海水表面温度介于-5~15℃。

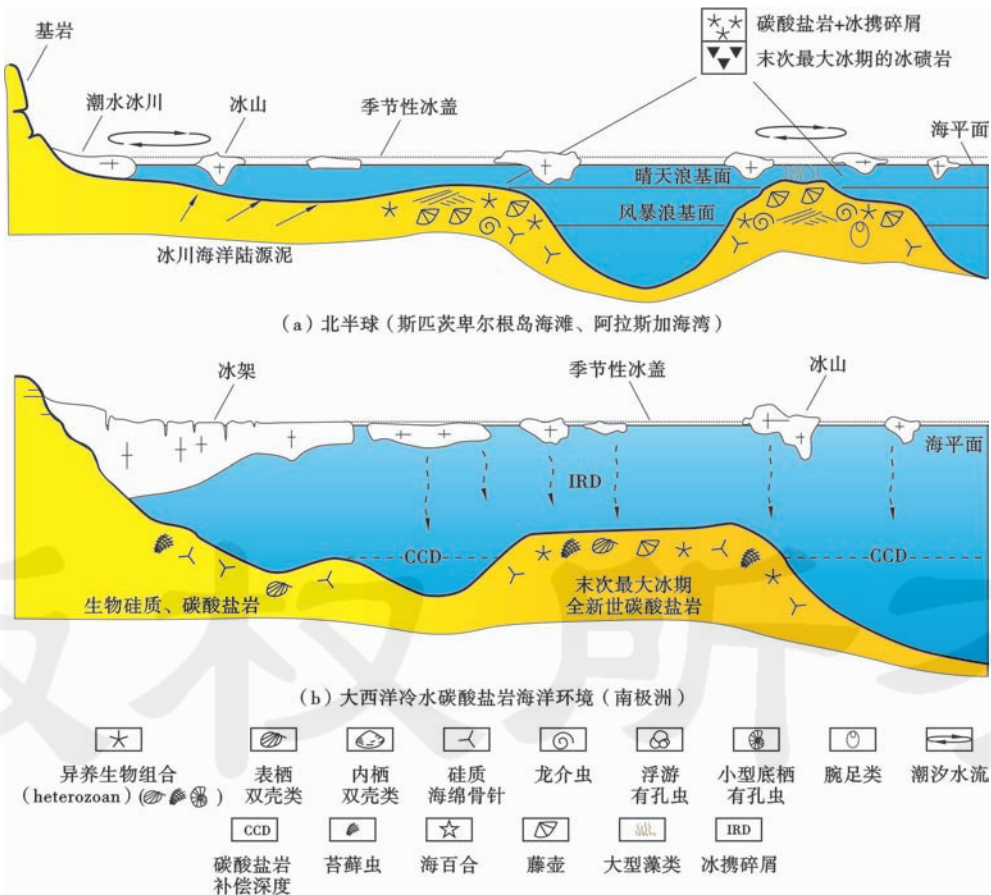
内陆架到约 50 m 水深以内主要的沉积物为海草^[33]、大型褐藻水下森林和珊瑚藻(藻团粒)滩。Reynaud 等^[28]研究了法国东南部 Uzès 盆地中新统的滨岸高能相带沉积的凉水碳酸盐岩,识别出海退期形成的潮汐三角洲环境中的红藻石相、富含双壳类的凉水碳酸盐岩相,认为地貌特征控制了碳酸盐岩的沉积厚度和沉积特征。碳酸盐岩-碎屑岩红藻石沉积在内缓坡环境的滨岸带是非常普遍的,可以识别出 4 种富含红藻石的亚相:红藻石集合体、块状红藻石砾屑灰岩、层状红藻石砾屑灰岩和红藻石漂砾灰岩^[33]。

中缓坡到外缓坡主要的生物有双壳类、苔藓虫、非虫黄藻珊瑚个体,以及龙介虫、棘皮类、海绵、底栖有孔虫等。在缺乏较大生物生存的地方,发现有灰泥沉积。在澳大利亚东南部 Bass 盆地中部温水陆架环境的浅水地区,通过超微浮游生物的原始堆积而沉积了碳酸盐灰泥,水深 70~85 m,通过水体搬运,最终在能量最低的较深水环境中沉积下来^[41-42]。不同于高能缓坡环

境,地中海特提斯和准特提斯(Paratethys)的新近纪,以及现代西班牙 Balearic 台地,都发育低能孤立缓坡环境的温水碳酸盐岩,属于低营养的清水环境,主要的岩相包括:潟湖、障壁岛、浅水潮下带、内缓坡、中缓坡、外缓坡。孤立缓坡环境的生物类型包括苔藓虫、红藻、棘皮类、软体动物等,海水胶结物非常罕见,深水灰泥的矿物成分为镁方解石和方解石,缺乏文石(除红藻 *Peyssonnelia* 是文石质以外)^[43]。

3.3 冷水-极地碳酸盐岩系统

在高纬度的陆架地区,海水温度很少高于 5℃,在黑暗而且漫长的冬季,陆架多被冰雪覆盖,如硅藻、硅质海绵骨针等在内的硅质生物组分发育(图 8)。一些对温度敏感性不强的生物如双壳类、苔藓虫、棘皮类、腹足类和底栖有孔虫等在这里生活并形成生物碳酸盐岩。主要的岩相包括杂砾岩、冰携碎屑(ice-rafted debris,IRD)、韵律层、六水碳钙石(glendonite)粉砂岩、生物扰动泥晶灰岩^[44]。由于寒冷、沉积速率低,缺少捕食性的鱼类,这些环境有几个典型特征:沿岸线柔软的海底悬浮生活着一些捕食者;海绵在海底覆盖了超过50%的面积,其骨针密集堆积形成了1~2m厚的沉



注:据 James 等^[15]。

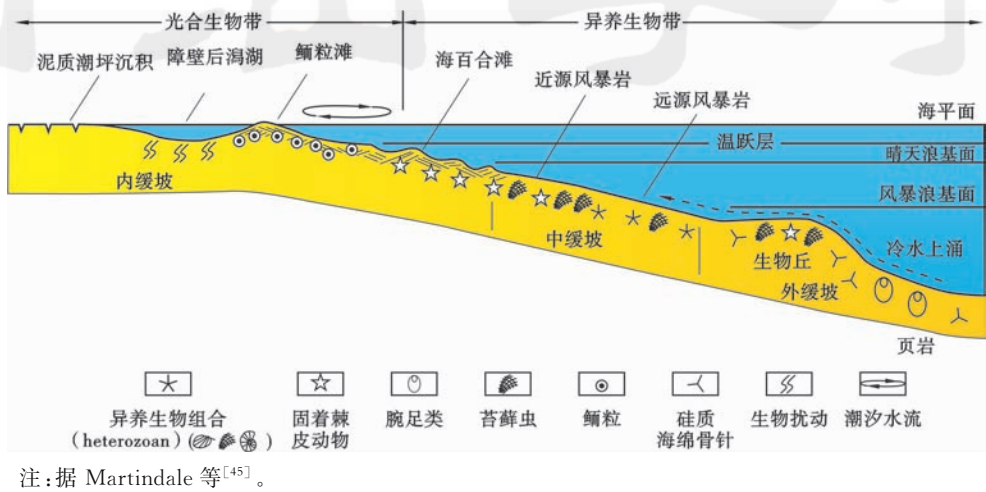
图 8 冷水碳酸盐岩沉积环境的水动力带和生物分带

Fig. 8 The hydrodynamic zones and biota in cold-water carbonate sedimentary environment

积物;几乎没有沉积进食或潜穴生活的海底动物;软体动物非常罕见。Rogala 等^[44]研究了澳大利亚塔斯马尼亚州早二叠世下 Parmeener 超群的 Darlington 和 Berriedale 生物碎屑灰岩,此时正值间冰期,冈瓦纳南部大陆从 80°S 北移到 70°S,大量的冰携碎屑中含有无数冰山和六水碳钙石,指示出在接近冰点的海水温度,岩石中含有大量的异养钙质无脊椎生物组合,包括壳体厚实的大腕足(*robust brachiopods*)、苔藓虫、宽铰

蛤、海绵骨针和海百合等,珊瑚藻和牙形石也大量存在,碳酸盐岩主要沉积于中陆架,在海平面高位域时期,位于冰山基线以下。

随着水体深度的变化,水温、光照、营养物、生物及沉积物类型等也会发生相应的变化,以加拿大西部沉积盆地密西西比系为例,缓坡环境的非暖水碳酸盐岩主要沉积于较深水的中缓坡和外缓坡,可以发育生物丘和生物滩,在外缓坡,由于冷水上涌,可以形成风暴沉积(图 9)。



注:据 Martindale 等^[45]。

图 9 基于加拿大西部沉积盆地密西西比系碳酸盐岩而建立的综合温度分层缓坡环境的海水古环境划分

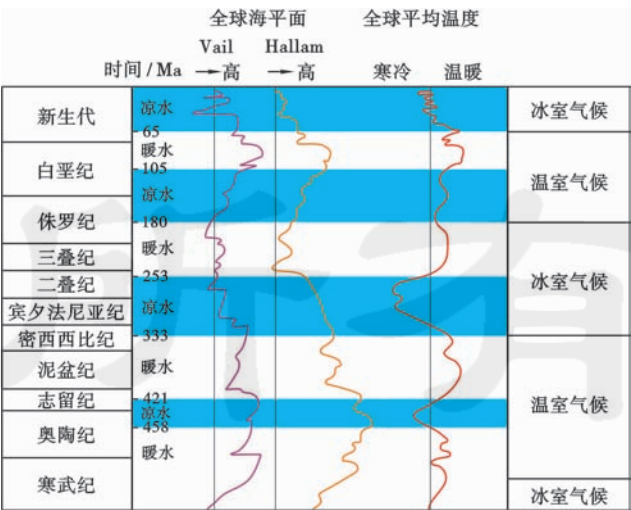
Fig. 9 Marine paleoenvironments on an interpreted temperature-stratified ramp as represented by Mississippian carbonates in the Western Canadian Sedimentary Basin

4 非暖水碳酸盐岩对油气勘探的意义

由于现代非暖水碳酸盐岩的广泛研究,地质学家逐渐认识到非暖水碳酸盐岩在地质历史时期存在的真实性:①众多学者意识到南澳大利亚是巨大的冷水碳酸盐岩沉积区,地质历史时期可能发育巨大的非暖水碳酸盐滩;②南半球以及地中海存在大量的新生代非暖水碳酸盐岩沉积;③部分古生界灰岩特征类似上述新生代非暖水碳酸盐岩^[13]。这些研究无疑对于现今碳酸盐岩油气勘探具有重要的意义。

在地质历史时期,全球气候经历了很大的变化(图 10),这不仅表现在海水条件,也表现在大气环境的变化。一级温室气候与冰室气候又可以进一步划分成凉水期和暖水期。全球性气候变化决定了非暖水碳酸盐岩发育的规模,区域性的气候差异也影响非暖水碳酸盐岩的沉积。根据 Frakes 等^[46]的研究,全球碳酸盐岩大油气田形成的时代如石炭纪、二叠纪、侏罗纪、白垩纪、古近纪、新近纪等都属于凉水时期,可见很多目前认为是热带碳酸盐岩的时代及岩石记录,很有可能表面海水温度并未达到热带碳酸盐岩的程度,而是属于非暖水碳酸盐岩。

由于大量碳酸盐岩生物碎屑的堆积,非暖水碳酸盐岩具有非常好的储集性能。Kyser 等^[32]发现澳大利亚南部渐新世—中新世的凉水碳酸盐岩的孔隙度最高可达 50%。Frank 等^[10]从沉积学、岩石学和地球化学角度分析了现代和古代发育于中高纬度地区的凉水



注:据文献^[46-48]修改。图中划分了整个显生宙冰室时期和温室时期,以及凉水-暖水海洋时期的变化。

图 10 全球海平面变化曲线

Fig. 10 Global sea-level curves

碳酸盐岩的成岩作用,发现其不同于热带碳酸盐岩之处在于缺乏灰泥支撑,主要是颗粒支撑,胶结作用多发生于深埋藏环境。Nelson 等^[27]发现新西兰和澳大利亚南部古近系和新近系凉水碳酸盐岩(苔藓虫颗粒灰岩)中虽然存在一些海水胶结物,但仍然保存了大量的孔隙。因此凉水碳酸盐岩体系可以保存大量的优质粒内孔和粒间孔等储集空间^[10]。在滨岸环境,由机械侵蚀和生物侵蚀形成的大量灰泥会充填大部分潮汐相带的原始孔隙,从而使得储层渗透率降低^[28]。虽然非暖水碳酸盐岩的沉积速率较低,由于冷水洋流的上涌(图9),仍然可以形成较厚的沉积,从而提供可观的储集层厚度。

已发现的非暖水碳酸盐岩油气田主要分布在新生代以来高纬度地区的地层中,位于新西兰的 Taranaki 盆地更新统 Tikorangi 组属于裂缝性油藏,其中沉积的非暖水碳酸盐岩是重要的储层和产油层^[49]。

目前可以确认的新生代以前的非暖水碳酸盐岩油气田主要发育在奥陶纪、石炭纪、二叠纪等凉水时期(图10)。北美下石炭统中存在典型的六水碳钙石方解石假晶(小于7℃才能形成),反映了当时是冷水的环境^[50]。Martindale 和 Boreen^[45]对加拿大落基山脉山麓的密西西比系19个碳酸盐岩油气田进行了研究,其中含苔藓虫、棘皮类、腕足类和海绵骨针的生物碎屑灰岩为典型的凉水/深水组合,其位于温跃层以下,上涌的冷水带来营养物质,属于高能缓坡环境。凉水碳酸盐岩储层孔隙度多小于12%,渗透率为1~250mD,储层孔隙类型包括:①深水苔藓虫颗粒灰岩和泥晶灰岩建造中原生的粒间孔和遮蔽孔;②中陆架到内陆架近端含风暴岩和巨型波痕的苔藓虫、海百合泥粒灰岩、颗粒灰岩中的裂缝白云岩、灰质白云岩中的次生晶间孔。储层发育主要受到了白云石化作用和次生晶间孔、淋滤的铸模孔和溶孔发育的控制。

不仅是海相环境发育非暖水碳酸盐岩,陆地湖泊也可以发育非暖水碳酸盐岩并形成油气田。Beynon 和 Pemberton 等^[16]通过暗色水体中沉积的遗迹化石研究,发现加拿大阿尔伯达地区下白垩统 Grand Rapids 组中的油砂形成于冷水湖泊中。

5 非暖水碳酸盐岩研究中存在的问题

虽然全球岩相古地理研究已经取得了很大的进展,全球陆地板块的聚散和漂移得到了证实,但是由于碳酸盐岩沉积受到海平面升降变化影响非常明显,很难根据化石记录确定古老碳酸盐岩沉积水体性质究竟是暖水还是非暖水。尤其是古生代及以前的地层,由于不清楚与当时生活的四射珊瑚和横板珊瑚共生的生物是否与中生代和新生代的石珊瑚属于相同的类型,

当时究竟是暖水还是非暖水环境一直存在争议^[13]。

Beauchamp^[51]研究了加拿大北部寒冷地区的二叠系气候变化,发现当时气候有变凉的证据,属于凉水环境碳酸盐岩。密西西比系一二叠系存在一次全球的冰期事件(LPIA),发育冷水碳酸盐岩。其他时代的许多古老碳酸盐岩是否为非暖水环境的碳酸盐岩仍然有待进一步的研究来证实。Chappell 和 Shackleton^[52]通过有孔虫的氧同位素特征,对海平面变化与气候变化、海水温度进行了探讨,认为深海的温度是气候体系中动态变化的部分。Bone 和 James^[53]对澳大利亚南部 Lacepede 陆架凉水碳酸盐岩中苔藓虫内部的矿物成分以及同位素特征进行了分析,发现苔藓虫的内部矿物成分(文石、低镁方解石、中等镁含量方解石)在38~180m水深范围内变化比较大,但同一属种的矿物成分都不随着海水温度的变化而变化,稳定同位素特征与周围海水相符,除了窗格状的苔藓虫和扁平粗大树枝状文石质苔藓虫外,保留原始矿物成分的苔藓虫内部矿物可以反映当时古海水和古环境的特征,这对于确定古代海水性质无疑具有重要意义。

在地质历史时期,由于没有钙质无脊椎动物化石作为标准,前寒武纪是最难判断海水性质的时代^[54]。尤其在新元古代晚期,气候变化在全球范围内达到了极端,甚至出现了全球冰期(雪球地球)。广泛沉积的“盖帽碳酸盐岩”覆盖在冰期杂砾岩上,没有明显的证据表明当时是冷水还是暖水沉积环境^[13]。最新的研究表明,六水碳钙石的方解石假晶(glendonites)存在于冰期沉积之间的鲕粒碳酸盐岩中,而这种矿物通常只有当海水温度<7℃时才能沉积^[13]，“盖帽碳酸盐岩”具有碳同位素最低达-41‰的特征^[55],是“雪球地球”时期类似现代冷泉碳酸盐岩环境的产物,属于典型的非暖水碳酸盐岩。

非暖水碳酸盐岩概念的出现^[56],对岩相古地理分析具有重要影响。以往对于岩相古地理的研究多基于古地磁资料和板块学说来进行,很少将古海水性质考虑在内。如果结合古海水性质和古生物资料,以及现代对于澳大利亚、新西兰等中高纬度地区非暖水碳酸盐岩的研究成果^[24]进行综合研究^[57-66],那么现在划分的古纬度可能将需要进行较大的改变。

6 结 论

结合国内外关于碳酸盐岩的最新研究成果,从定义、分类、生物类型、沉积速率、沉积物、岩石学特征、成岩作用、与暖水碳酸盐岩的差异和沉积相等方面对非暖水碳酸盐岩进行了综述,探讨了非暖水碳酸盐岩对沉积学和油气勘探的意义及存在的问题:

(1) 非暖水碳酸盐岩为表面海水(湖水)温度 $<20^{\circ}\text{C}$ 沉积的碳酸盐岩。其沉积环境可以划分为温暖-温水区($15\sim 20^{\circ}\text{C}$)、凉水-温水区($5\sim 15^{\circ}\text{C}$)和冷水-极地区($<5^{\circ}\text{C}$)。非暖水碳酸盐岩中的生物类型主要为非营光合作用的异养生物组合(heterozoan)。非暖水碳酸盐岩的沉积速率很低,凉水碳酸盐岩的沉积速率大多不到 1 m/ka ,甚至只有每千年几厘米。非暖水碳酸盐岩主要为颗粒支撑结构,早期成岩作用中很少见到镁方解石或文石胶结。

(2) 由于缺乏造礁生物,非暖水碳酸盐岩的主要沉积环境缺乏生物礁,主要为无障碍的缓坡以及开阔的大陆架。包括高能开阔海体系、低能内陆盆地、海道和缓坡等。

(3) 非暖水碳酸盐岩对油气勘探具有重要意义,可以成为重要的油气储集层。由于胶结作用大都发生于深埋藏环境,具有大量碳酸盐岩生物碎屑堆积的非暖水碳酸盐岩体系可以保存大量的优质粒内孔和粒间孔等储集空间,可能成为未来油气勘探的新领域。在新西兰 Taranaki 盆地更新统、加拿大落基山脉山麓的密西西比系和阿尔伯达地区下白垩统等层系发现的油气田均为典型的非暖水碳酸盐岩油气田。

(4) 非暖水碳酸盐岩概念的出现,对岩相古地理分析具有重要影响,如果将现代非暖水碳酸盐岩研究、古生物资料以及古海水研究应用到古老碳酸盐岩研究中,现在划分的古纬度可能将需要进行较大的改变。

致谢 感谢中国石油勘探开发研究院赵文智院士对本文的大力支持。感谢加拿大阿尔伯塔大学 Brian Jones 教授、新西兰 Waikato 大学 Campell S. Nelson 教授的认真指导并提供大量参考资料。感谢中国地质大学(武汉)童金南教授、李荣副教授、陈晶副教授及加拿大阿尔伯塔大学任敏博士在论文写作过程中的启迪与指点。感谢中国石油学会赵宗举教授提供的宝贵修改意见。中国石油杭州地质研究院张友工程师为本文提供了部分翻译的英文文献,在此一并致谢。

参 考 文 献

[1] ROEHL P O, CHOQUETTE P W. Carbonate petroleum reservoirs[M]. New York: Springer-Verlag, 1985: 1-622.

[2] WILSON J L. Carbonate facies in geologic history[M]. New York: Springer-Verlag, 1975: 471.

[3] 高白水, 金振奎, 朱小二, 等. 哈萨克斯坦扎纳诺尔油田石炭系碳酸盐岩浅滩沉积模式及储层质量差异机理[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 867-877.

GAO Baishui, JIN Zhenkui, ZHU Xiaoe, et al. Sedimentary model and reservoir heterogeneity of Carboniferous carbonate beach in Zanazor, Kazakhstan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7):

867-877.

[4] 石开波, 刘波, 田景春, 等. 塔里木盆地震旦纪沉积特征及岩相古地理[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1343-1360.

SHI Kaibo, LIU Bo, TIAN Jingchun, et al. Sedimentary characteristics and lithofacies paleogeography of Sinian in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1343-1360.

[5] 廖涛, 侯加根, 陈利新, 等. 塔北哈拉哈塘油田奥陶系岩溶储层发育模式[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1380-1391.

LIAO Tao, HOU Jiagen, CHEN Lixin, et al. Evolutionary model of the Ordovician karst reservoir in Halahatang oilfield, northern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11): 1380-1391.

[6] BATHURST R G C. Carbonate sediments and their diagenesis[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975: 658.

[7] JAMES N P. The cool-water carbonate depositional realm[M]// JAMES N P, CLARKE J A D. Cool-water Carbonates. Tulsa, OK: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1997, 56: 1-20.

[8] JAMES N P. Carbonates in a cold ocean: the evolving paradigm[R]. Calgary, Canada: Department of Geological Sciences & Geological Engineering, Queen's University, 2016.

[9] CORE E E, RAMÍREZ W R, SANTOS H, et al. Miocene-Pliocene heterozoan-dominated systems in the Dominican republic: analogs for neogene reservoirs in the Caribbean: AAPG 2016 Annual Convention and Exhibition[C]. Calgary, Alberta, Canada: AAPG, 2016.

[10] FRANK T D. Diagenetic pathways in heterozoan carbonates: AAPG 2016 Annual Convention and Exhibition[C]. Calgary, Alberta, Canada: AAPG, 2016.

[11] PUGLIANO T M, GOLDSTEIN R H, FRANSEEN E K. Fundamental controls on modeling reservoir properties of fining-updip heterozoan carbonates: AAPG 2016 Annual Convention and Exhibition[C]. Calgary, Alberta, Canada: AAPG, 2016.

[12] CHAVE K E. Recent carbonate sediments-an unconventional view[J]. Journal of Geological Education, 1967, 15(5): 200-204.

[13] JAMES N P, JONES B. Origin of carbonate sedimentary rocks[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2015: 1-446.

[14] 赵宗举. 全球海平面变化指标及海相构造层序研究方法——以塔里木盆地奥陶系为例[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 262-273.

ZHAO Zongju. Indicators of global sea-level change and research methods of marine tectonic sequences: take Ordovician of Tarim Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 262-273.

[15] JAMES N P, LUKASIC J. Cool- and cold-water neritic carbonates[M]// JAMES N P, DALRYMPLE R W. Facies Models 4: GEOText 6. St. John's, Newfoundland: Geological Association of Canada, 2010: 369-398.

[16] BEYNON B M, PEMBERTON S G. Ichnological signature of a brackish water deposit: an example from the Lower Cretaceous Grand Rapids Formation, Cold Lake oil sands area, Alberta[M]// PEMBERTON S G. Applications of Ichnology to Petroleum Exploration. Tulsa, OK: SEPM Society for Sedimentary, 1992, 17: 199-221.

[17] LEES A, BULLER A T. Modern temperate-water and warm-wa-

- ter shelf carbonate sediments contrasted[J]. *Marine Geology*, 1972, 13(5): M67-M73.
- [18] BROWN K M. Calcareous epiphytes on modern seagrasses as carbonate sediment producers in shallow cool-water marine environments, South Australia[D]. Adelaide: University of Adelaide, 2005: 247.
- [19] JAMES N P, BONE Y. Pleistocene aeolianites at Cape Spencer, South Australia; record of a vanished inner neritic cool-water carbonate factory[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(7): 2038-2059.
- [20] REID C M, JAMES N P, BONE Y. Carbonate sediments in a cool-water macroalgal environment, Kaikoura, New Zealand[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(7): 1935-1952.
- [21] BONE Y, JAMES N P. Bryozoans as carbonate sediment producers on the cool-water Lacepede Shelf, southern Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 86(3/4): 247-271.
- [22] BONE Y, JAMES N P, KYSER T K. Syndepositional detrital dolomite in quaternary cool-water carbonate sediments, Lacepede shelf, South Australia[J]. *Geology*, 1992, 20(2): 109-112.
- [23] DIX G R, NELSON C S. Diagenetic potential for lithification of cool-water carbonate shelf mud[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185(1/2): 41-58.
- [24] JAMES N P, BONE Y. Neritic carbonate sediments in a temperate realm: southern Australia [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2011.
- [25] FARROW G E, FYFE J A. Bioerosion and carbonate mud production on high-latitude shelves[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 60(1/4): 281-297.
- [26] CARON V, NELSON C S, KAMP P J J. Sequence stratigraphic context of syndepositional diagenesis in cool-water shelf carbonates; Pliocene Limestones, New Zealand[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(2): 231-250.
- [27] NELSON C S, JAMES N P. Marine cements in mid-Tertiary cool-water shelf limestones of New Zealand and southern Australia[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(3): 609-629.
- [28] REYNAUD J, DALRYMPLE R W, VENNIN E, et al. Topographic controls on production and deposition of tidal cool-water carbonates, Uzès basin, SE France[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(1): 117-130.
- [29] RADDATZ J, RÜGGERBERG A, LIEBETRAU V, et al. Environmental boundary conditions of cold-water coral mound growth over the last 3 million years in the Porcupine Seabight, Northeast Atlantic[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2014, 99: 227-236.
- [30] PIRLET H, WEHRMANN L M, BRUNNER B, et al. Diagenetic formation of gypsum and dolomite in a cold-water coral mound in the Porcupine Seabight, off Ireland[J]. *Sedimentology*, 2010, 57(3): 786-805.
- [31] LOHMANN K C. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst [M] // JAMES N P, CHOQUETTE P W. *Paleokarst*. New York: Springer-Verlag, 1988: 58-80.
- [32] KYSER T K, JAMES N P, BONE Y. Alteration of Cenozoic cool-water carbonates to low-Mg calcite in marine waters, Gambier Embayment, South Australia [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1998, 68(5): 947-955.
- [33] BRANDANO M, RONCA S. Depositional processes of the mixed carbonate-siliciclastic rhodolith beds of the Miocene Saint-Florent Basin, northern Corsica[J]. *Facies*, 2014, 60(1): 73-90.
- [34] BURCHETTE T P, WRIGHT V P. Carbonate ramp depositional systems[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 79(1/4): 3-57.
- [35] PEDLEY H M, CARANNANTE G. Cool-water carbonates: depositional systems and palaeoenvironmental controls [M]. London: Geological Society, 2006.
- [36] FEARY D A, JAMES N P. Seismic stratigraphy and geological evolution of the Cenozoic, cool-water Eucla platform, Great Australian Bight[J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(5A): 792-816.
- [37] FEARY D, HINE A C, MALONE M J. Great Australian Bight: Cenozoic cool-water carbonates: proceedings of the Ocean Drilling Program[C]. Texas: College Station, 1999: 58.
- [38] HUUSE M, FEARY D A. Seismic inversion for acoustic impedance and porosity of Cenozoic cool-water carbonates on the upper continental slope of the Great Australian Bight[J]. *Marine Geology*, 2005, 215(3/4): 123-134.
- [39] JAMES N P, BONE Y, VON DER BORCH C C, et al. Modern carbonate and terrigenous clastic sediments on a cool water, high energy, mid-latitude shelf: Lacepede, southern Australia[J]. *Sedimentology*, 1992, 39(5): 877-903.
- [40] BETZLER C, BRACHER T C, NEBELSICK J. The warm temperate carbonate province: a review of facies, zonations, and delimitations [M]. CFS Courier Forschungsinstitut Senckenberg. Berlin: Schweizerbart Science publisher, 1997: 83-99.
- [41] BASSI D, CARANNANTE G, MURRU M, et al. Rhodalgae/bryomol assemblages in temperate-type carbonate, channelized depositional systems: The Early Miocene of the Sarcidano area (Sardinia, Italy) [M] // PEDLEY H M, CARANNANTE G. *Cool-water Carbonates: Depositional Systems and Palaeoenvironmental Controls*. London: Geological Society, 2006: 35-52.
- [42] BLOM W M, ALSOP D B. Carbonate mud sedimentation on a temperate shelf: Bass Basin, southeastern Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 60(1/4): 269-280.
- [43] FORNOS J J, AHR W M. Temperate carbonates on a modern, low-energy, isolated ramp: the Balearic platform, Spain[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67(2): 364-373.
- [44] ROGALA B, JAMES NP, REID C M. Deposition of polar carbonates during interglacial highstands on an early Permian shelf, Tasmania[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(7): 587-606.
- [45] MARTINDALE W, BOREEN T D. Temperature-stratified Mississippian carbonates as hydrocarbon reservoirs-examples from the Foothills of the Canadian Rockies [M] // JAMES N P, CLARKE J A D. *Cool-water Carbonates*. Tulsa, OK: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1997, 56: 391-409.

- [46] FRAKES L A, FRANCIS J E, SYKTUS J I. Climate modes of the Phanerozoic[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [47] VAIL P R, MITCHUM R M, TODD R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level[M]//PAYTON C E. In Stratigraphic Interpretation of Seismic Data. Houston: AAPG, 1977:49-212.
- [48] HALLAM A. Pre-Quaternary sea-level changes[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 1984, 12(12): 205-243.
- [49] HOOD S D, NELSON C S, KAMP P J J. Modification of fracture porosity by multiphase vein mineralization in an Oligocene non-tropical carbonate reservoir, Taranaki Basin, New Zealand[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(10): 1575-1597.
- [50] BRANDLEY R T, KRAUSE F F. Thinolite-type pseudomorphs after Ikaite; indicators of cold water on the subequatorial western margin of Lower Carboniferous North America[M]//EMBRY A E, BEAUCHAMP B, GLASS D J. Pangea: Global Environments and Resources. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1994: 333-345.
- [51] BEAUCHAMP B. Permian climatic cooling in the Canadian Arctic[J]. Geological Society of America Special Papers, 1994, 288: 229-246.
- [52] CHAPPELL J, SHACKLETON N J. Oxygen isotopes and sea level[J]. Nature, 1986, 324(6093): 137-140.
- [53] BONE Y, JAMES N P. Bryozoan stable isotope survey from the cool-water Lacepede shelf, southern Australia[M]//JAMES N P, CLARKE J A D. Cool-water Carbonates. Tulsa, OK: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1997, 56: 93-105.
- [54] 吴因业, 刘伟, 刘艳, 等. 中国冈瓦纳的寒武系下伏沉积及其石油地质意义[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1069-1079.
- WU Yinye, LIU Wei, LIU Yan, et al. The underlying deposition of Cambrian of Gondwana in China and its petroleum geological significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1069-1079.
- [55] 冯东, 陈多福, 刘芊. 新元古代晚期盖帽碳酸盐岩的成因与“雪球地球”的终结机制[J]. 沉积学报, 2006, 24(2): 235-241.
- FENG Dong, CHEN Duofu, LIU Qian. Formation of late neoproterozoic cap carbonates and termination mechanism of “snowball earth”[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(2): 235-241.
- [56] NELSON C S. Non-tropical shelf carbonates: modern and ancient[M]. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- [57] BOREEN T D, JAMES N P. Holocene sediment dynamics on a cool-water carbonate shelf; Otway, southeastern Australia[J]. Journal of Sedimentary Research, 1993, 63(4): 574-588.
- [58] BOREEN T D, JAMES N P. Stratigraphic sedimentology of Tertiary cool water limestones, SE Australia[J]. Journal of Sedimentary Research, 1995, 65(1b): 142-159.
- [59] BOREEN T D, JAMES N P, WILSON C, et al. Surficial cool-water carbonate sediments on the Otway continental margin, south-eastern Australia[J]. Marine Geology, 1993, 112(1/4): 35-56.
- [60] COLLINS L B. Sediments and history of the Rottneest Shelf, Southwest Australia; a swell-dominated, non-tropical carbonate margin[J]. Sedimentary Geology, 1988, 60(1/4): 15-49.
- [61] COLLINS L B, ZHU Z R, WYRWOLL K H, et al. Late Quaternary evolution of coral reefs on a cool-water carbonate margin; the Abrolhos carbonate platforms, southwest Australia[J]. Marine Geology, 1993, 110(3/4): 203-212.
- [62] FULLER M K, BONE Y, GOSTIN V A, et al. Holocene cool-water carbonate and terrigenous sediments from southern Spencer Gulf, South Australia[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1994, 41(4): 353-363.
- [63] GOSTIN V A, BELPERIO A P, CANN J H. The Holocene non-tropical coastal and shelf carbonate province of Southern Australia[J]. Sedimentary Geology, 1988, 60(1/4): 51-70.
- [64] JAMES N P, BONE Y, COLLINS L B, et al. Surficial sediments of the Great Australian Bight; facies dynamics and oceanography on a vast cool-water carbonate shelf[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(4): 549-567.
- [65] BRANDANO M, CUFFARO M, GAGLIANONE G, et al. Quantifying the contribution of seagrass carbonate factory from Paleocene to the Present: 19th ISC2014 IAS International Sedimentological Congress[C]. Geneva, Switzerland: IAS, 2014.
- [66] JAMES N P, CLARKE M J D. Cool-water carbonates[M]. Tulsa, OK: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1997.

(收稿日期 2017-01-16 改回日期 2017-03-01 编辑 王培玺)