

doi:10.3799/dqkx.2014.073

太平洋海山富钴结壳钙质超微化石 生物地层学及生长过程

张海生^{1,2}, 韩正兵^{1,2}, 雷吉江², 赵 军^{1,2}, 于培松^{1,2},
胡 佶^{1,2}, 卢 冰^{1,2}, Pulyaeva, I.A.³

1. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 浙江杭州 310012

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江杭州 310012

3. State Scientific Centre Yuzhmorgeologia, Gelendzhik 353461, Russia

摘要: 正确判断富钴结壳生长年代及过程有助于研究结壳形成地质历史和重建古海洋环境。利用生物地层学方法(生物遗留印痕)对太平洋不同海山结壳样品进行生长时代和阶段研究,发现麦哲伦海山 CM3D06 结壳和中太平洋海山 CB14 结壳最初形成年代和富集特征差异显著:前者为白垩纪(或更古老)、晚古新世—早始新世、中—晚始新世、中—晚中新世、上新世—更新世等 5 个阶段;后者为晚古新世—早始新世、中—晚始新世、中中新世、上新世—更新世等 4 个阶段。两座海山结壳层内部超微化石组合具有极强的区域性特征,反映了大洋环境对生物的影响以及生物对环境的适应。结壳层间的不整合和结构构造的变化指示在渐新世其生长存在间断期,与成矿作用的间断有关。

关键词: 富钴结壳;钙质超微化石;生物地层学;地质年代;太平洋海山;地球化学。

中图分类号: P736.4

文章编号: 1000-2383(2014)07-0775-09

收稿日期: 2013-09-10

Calcareous Nannofossil Biostratigraphy and Growth Periods of Co-Rich Crusts from Pacific Seamounts

Zhang Haisheng^{1,2}, Han Zhengbing^{1,2}, Lei Jijiang², Zhao Jun^{1,2},
Yu Peisong^{1,2}, Hu Ji^{1,2}, Lu Bing^{1,2}, Pulyaeva, I.A.³

1. Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Hangzhou 310012, China

2. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

3. State Scientific Centre Yuzhmorgeologia, Gelendzhik 353461, Russia

Abstract: It enriches the geological history of Co-rich crusts (CRC) formation and the paleoceanography for us to understand the growth ages and periods of CRC. CRC samples collected from the Magellan and mid-Pacific seamounts were studied for the growth geological ages and periods by employing biostratigraphy (biological impressions). The primary formation geological ages and calcareous nannofossil assembly are different between CM3D06 CRC from the Magellan seamount and CB14 CRC from the mid-Pacific seamount. Based on the identification of calcareous nannofossil imprints and original fossil remains, five growth periods are determined for CM3D06 CRC, namely, Cretaceous (or older), Late Paleocene-Early Eocene, Middle-Late Eocene, Middle-Late Miocene, and Pliocene-Pleistocene, whereas four growth periods for CB14 CRC are determined as follows: Late Paleocene, Middle-Late Eocene, Middle Miocene, and Pliocene to Pleistocene. Regional characteristics for the nannofossil combination features of two CRC samples indicate the impact of oceanic environment on marine organisms and their adaptation. The unconformity of sub-layers and variation of structure and texture of the two CRC samples show that the main hiatus occurred during Oligocene.

Key words: Co-rich crust; calcareous nannofossil; biostratigraphy; geological age; Pacific seamount; geochemistry.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.41076072,40676025).

作者简介: 张海生(1953-),男,博士,研究员,从事海洋地球化学和古海洋环境研究.E-mail: zhangsoa112355@163.com

0 引言

大洋富钴结壳生长缓慢,一般为 mm/Ma 级,记录了成矿环境长期的历史变化.结壳中缺乏用来校准定年的钙质有孔虫,需要采用其他方法来测定结壳生长年代和速率.常用的绝对地质年代学方法有 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 法 (Segl *et al.*, 1984)、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 法 (Ingram *et al.*, 1990)、铀系法 (Chabaux *et al.*, 1997)、古磁性地层学 (Joshima and Usui, 1998)、生物地层学 (Cowen *et al.*, 1993; Pulyaeva, 1997; 苏新等, 2004; 武光海等, 2011; 陈芳等, 2013; 熊志方等, 2013; Zhang *et al.*, 2013) 等.其中,生物地层学方法定年的可靠程度高,与地质学方法联合应用,使得判断结壳的生长间断成为可能.这对于结壳层位的年代厘定、形成历史和古海洋重建研究都具有重要意义.超微化石个体小、数量庞大,在世界海洋中分布广泛,可进行远距离的海相地层对比.钙质超微化石的某些属种在地质历史时期中延续很短,演化快而明显 (Bown, 1998),近年来在海洋地质研究中应用广泛.白垩纪时期超微化石的属种最为丰富, Sissingh (1977) 根据欧美等地的化石,建立了 26 个白垩纪颗石藻带 (CC1~CC26); Roth (1978) 根据深海钻探资料,建立了 23 个白垩纪钙质超微化石带 (NC1~NC23).新生代时期化石分带运用广泛, Martini (1971) 据陆地钙质超微化石剖面划分出早第三纪 25 个化石带 (NP1~NP25) 和晚第三纪以来 21 个化石带 (NN1~NN21); Bukry (1973a, 1978) 和 Okada and Bukry (1980) 以深海剖面为主划分出早第三纪 19 个带 (CP1~CP19) 和晚第三纪以来 15 个带 (CN1~CN15).

中、西太平洋海山区不仅是太平洋海山富钴结壳广泛分布的区域,也是迄今海山富钴结壳资源调查和研究的热点地区.该区域海山富钴结壳形成前期,早白垩纪太平洋板块向西偏南漂移,形成了北东东向的双列热点火山链,是现今太平洋海山群的雏形 (Wen *et al.*, 1997).白垩纪期间南太平洋法属波利尼西亚热点群发生的大规模海山喷发事件,从地幔深处带来了大量岩浆物质 (Larson, 1991),为富钴结壳的生长提供了物质基础.大约 60~70 Ma BP 时穿过赤道并继续向北漂移到达目前的位置 (Smoot, 1999).我国学者自 20 世纪 90 年代初以来对太平洋海山结壳开展研究,在结壳微体古生物的定年方面取得重要研究成果 (苏新等, 2004; 程振波等, 2006; 武光海等, 2006; 马维林等, 2007; 潘家华等, 2007; 李

江山等, 2008).本文对麦哲伦海山、中太平洋海山的结壳样品进行生物地层学记录及其生长过程和阶段研究.

1 海山区背景

中、西太平洋海山通常是指 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $145^{\circ}\text{E}\sim 165^{\circ}\text{W}$ 区域内的海山 (图 1).麦哲伦海山区位于东马里亚海盆西北缘,属大型断裂块状隆起,延伸方向北北西,延长 1 200 km,主要由相对独立的海山构成;其盾形火山基底主要由早白垩纪的拉班玄武质枕状熔岩组成,其次为晚白垩纪—老第三纪的亚碱性玄武岩及新第三纪的碱性玄武岩和火山碎屑岩.中太平洋海山区位于中太平洋海盆北缘,夏威夷—天皇海山链以西,属于热点成因的板内火山作用产物,坐落在总体走向近东西向的中太平洋海山隆上,延伸长度大于 3 000 km;其基底岩石主要由中白垩纪的拉班玄武岩及橄榄玄武岩组成,局部海山见有新生代的碱性火山岩.

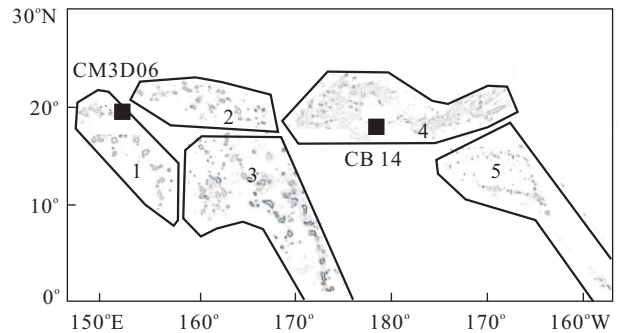


图 1 中、西太平洋海山及富钴结壳样品采集站点

Fig.1 Mid and West Pacific seamounts and sampling sites of Co-rich crusts

1. 麦哲伦海山区; 2. 马尔库斯—威克海山区; 3. 马绍尔群岛; 4. 中太平洋海山区; 5. 莱恩群岛

2 样品显微构造描述和鉴定方法

麦哲伦海山 CM3D06 结壳位于 153.10°E , 20.42°N (水深 2 490 m), 厚度为 98 mm.从顶面向下 13 mm 处有明显的变化层,为纯铁锰氧化物,上下构造变化不大,至 28 mm 处渐变为局部斑杂状构造,但仍以柱状构造为主;从 30 mm 处开始渐变,至 68 mm 处以斑杂构造为主,层间夹杂大量脉石矿物和黄色碎屑物质,与上下层界限分明;向下为老壳层,亦较致密,呈黑褐色,夹杂一定量的脉石矿物,组

成较为单一,主要为较致密平缓纹层状结构.中太平洋海山 CB14 结壳位于 179.02°E, 18.75°N(水深 2 912 m),厚度为 70 mm.从顶面向下 18 mm 为上层,褐黑色,结构致密;中间层厚约 20 mm,构造相对疏松,多见孔洞,充填黏土物质,有明显的变化层,为较纯的铁锰氧化物,上下构造变化不大,至 20 mm 左右渐变为局部斑杂状构造,但仍以柱状构造为主,至 40 mm 左右渐变为以斑杂构造为主,且有明显的生长间断;向下为老壳层,未见磷酸盐化,结构均匀,主要为较致密的平缓纹层状结构.可见,富钴结壳不同层次的结构构造变化存在差异,反映出结壳生长过程中古海洋环境变化的多样性与复杂性,即便是同一地区结壳成矿过程中的海底环境、沉积碎屑、洋流活动也存在着明显差异.

宏观对比分析可知,麦哲伦海山区结壳比中太平洋海山区结壳生长纹层要明显.CB14 结壳在 55 mm 上下出现结构构造的改变,但界面不是很明显,呈渐变式,但在 40 mm 处有一明显的突变边界,可能与沉积环境的突变或者铁锰氧化物的生长中断相关.CM3D06 结壳三层构造各界面间构造和色泽呈极好的韵律性变化,特别是 85 mm、58 mm 及 28 mm 附近均出现明显的色变界面.结壳结构构造分层中发生显微构造和色泽“突变”表明它们在生长过程中经历多种环境,最终形成多层结构,层间醒目界面可成为结壳生长过程中一个特定的时间标识.

使用高倍扫描电子显微镜(SEM)识别鉴定钙质超微化石,直接放大观察矿物质原生结构中的颗石藻壳体、盘星石碎片和铁锰物质及碳酸盐—磷酸盐脉中的原生印模.为控制结壳每个壳层顶底年代区间,对结壳每个构造层上、中、下的 2~3 个层位进行精细取样(避开结壳层间界限,特别是明显的生长间断),以建立起更加可信的年代区间框架.依照岩石学标准从结壳的垂直方向面和水平方向面的合适剖面取样,分别在每一壳层剥离 2~5 mm 宽的新鲜薄片(2~3 片),涂上一层薄金膜(6~9 nm),安装在 SEM 上的样品槽中在加速电压 18 kV 的条件下放大 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ 倍数进行观察(Zhang *et al.*, 2013).钙质超微化石的识别参考已经发表电子显微镜照片(Roth, 1973; Edwards and Perch-Nielsen, 1975; Perch-Nielsen, 1985),结壳壳层的定年根据每个被鉴定层位中钙质超微化石的年代交集来确定,特别关注是否存在标志种,基于它们在生物地层时标中的初现带和末现带或亚带来确定(Martini, 1971; Gartner, 1977; Okada and Bukry, 1980).本研

究钙质超微化石新生代框架的建立广泛地参考了沉积物岩芯钙质超微化石分析的文献资料(Martini, 1971; Martini and Worsley, 1971; Bukry, 1973a, 1973b, 1978),且与绝对地质年龄(Shumenko, 1987)相符.

3 结果与讨论

3.1 麦哲伦海山结壳 CM3D06 样品年代划分

根据结构构造的变化,CM3D06 结壳被分为 5 层(9 个亚层),其中 85~98 mm 为老壳层,68~78 mm 和 78~85 mm 形成时期相同,为一层,58~68 mm 为一层,28~38 mm 和 38~58 mm 为一层,0~5 mm、5~13 mm 和 13~28 mm 为新壳层.根据结壳中钙质超微化石生物组合的鉴定结果,这 5 层的形成时代分别为白垩纪(或更古老)、晚古新世—早始新世、中—晚始新世、中—晚中新世、上新世—更新世,生长间断期发生在早古新世和渐新世(图 2 和图 3).老壳层 85~98 mm 层段辨认出的钙质超微化石遗迹(壳体印模)有: *Zigodicus spiralis*、*Watznaneria barnesae* 和 *Broisonia parka*,其中 *W. barnesae* 的地质时代为中侏罗世—晚白垩世,是白垩纪远洋沉积中最为常见暖水种之一(Shumenko, 1987),其抗溶性最强,一般不会因成岩作用而消失(刘怀宝和 Watkins, 2004);而 *B. parka* 的地质时代是晚白垩世坎潘阶.麦哲伦海山是西北太平洋内受北西向转换断层控制的板内海底火山链,其形成时代为中侏罗世—白垩纪,因此 CM3D06 结壳老壳层时代为白垩纪(或更古老).68~85 mm 层段钙质超微化石由 *Coccolithus pelegicus*、*C. formosus*、*Discoaster barbadiensis*、*D. elegans*、*D. lodoensis*、*D. multiradiatus*、*D. mohleri* 和 *Reticulofenestra bisecta filewiezn* 等组成,总体上对应于 CP8~CP9 化石带(晚古新世—早始新世),在 85 mm 层段有一明显的色泽突变现象.58~68 mm 层段钙质超微化石组合为 *C. formosus*、*R. coentura*、*Chiasmolithus consuetus*、*Sphenolithus moriformis*、*Transversopontis pulcher* 和 *Ericsonia fenestrata*,形成时代对应于 NP14~NP20 或 CP12~CP15(中—晚始新世).48~58 mm 层段钙质超微化石组合为 *C. pelegicus*、*Trochoaster duplex* 和 *Pontosphaera distincta*,形成时代对应于 CN3~CN5a(中—晚中新世);28~48 mm 层段钙质超微化石组合为 *C. pelegicus*、*E. obruta* 和 *Umbilicosphaera sibogae*,结

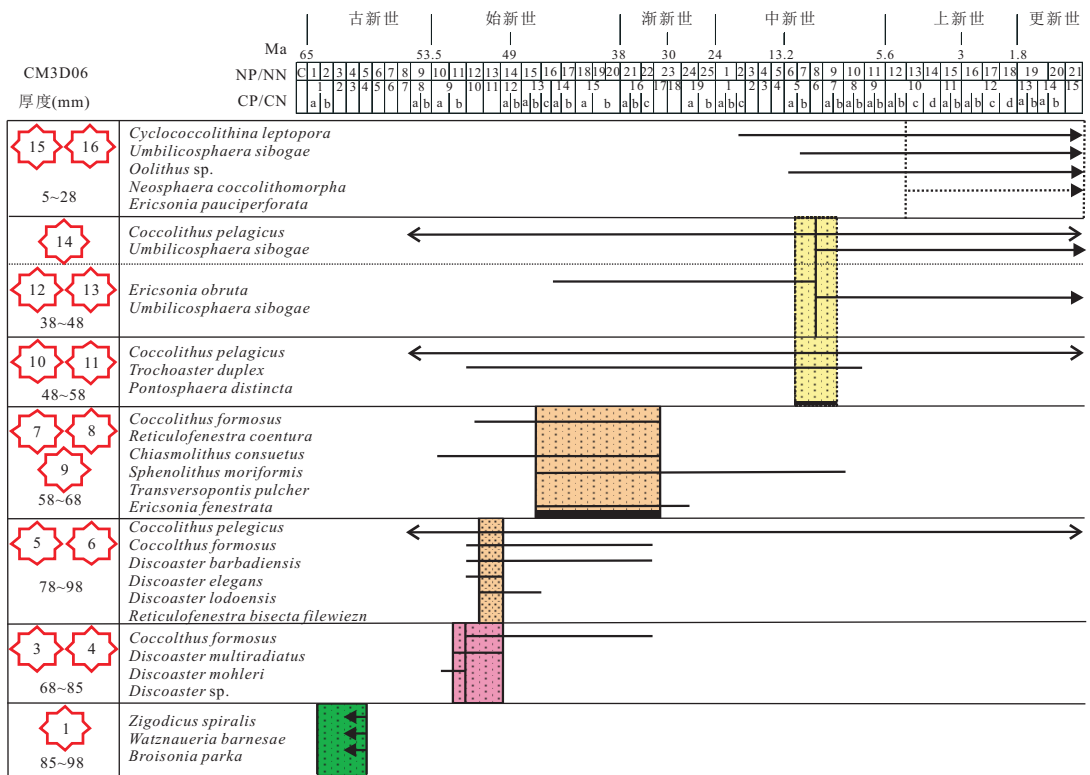


图 2 CM3D06 结壳各层年代钙质超微化石(标志化石)的形成时代

Fig.2 Calcareous nannofossils and geological age in each sub-layer of CM3D06 crust

钙质超微化石的生物名称对应的长短不一的横线代表该物种的生存阶段;灰色阴影区段代表利用不同物种的年代交集确定的结壳层段的大致生长年龄时段年方案参考文献(Martini, 1971; Bukry, 1973a, 1973b)

壳形成时代对应于 CN3~CN5a(中一晚中新世), 以上为同一形成期。5~28 mm 层段钙质超微化石组合为 *Cyclococcolithina leptopora*、*U. sibogae*、*Oolithus* sp.、*Neosphaera coccolithomorpha* 和 *E. pauciperforata*, 结壳形成时代为上新世—更新世。

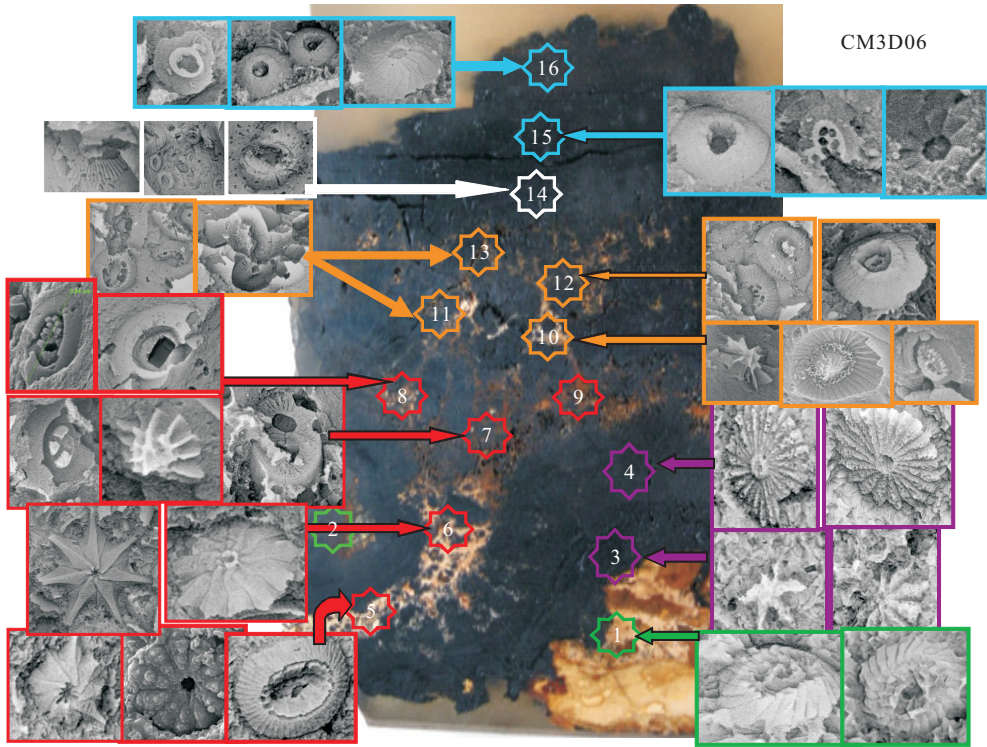
3.2 中太平洋海山结壳 CB14 样品年代划分

根据结构构造的变化, CB14 结壳被分为 4 层(6 个亚层), 其中 55~65 mm 和 65~70 mm 为老结壳, 40~55 mm 为一层, 20~40 mm 为一层, 0~13 mm 和 13~20 mm 为新壳层。根据结壳中钙质超微化石生物组合的鉴定结果, 这 4 层的形成时代分别为晚古新世—早始新世、中一晚始新世、中中新世、上新世—更新世, 结壳生长间断主要在渐新世(图 4 和图 5)。老壳层 55~70 mm 层段辨认出的钙质超微化石遗迹结构有: *Neochiastozgus junctus*、*Chiasmolithus consuetus*、*Hselithina iris*、*C. pelagicus*、*C. formosus*、*D. multiradiatus* 和 *D. mohleri*, 总体上对应于 CP8~CP9 化石带(晚古新世—早始新世)。40~55 mm 层段钙质超微生物组合为: *C. pelagicus*、*C. formosus*、*Chiasmolithus consuetus* 和 *E. fenestrata*, 它们部分被铁锰化合物溶

解和取代, 形成时代对应于 NP14~NP20 或 CP12~CP15(中一晚始新世)。20~40 mm 层段钙质超微化石保存的很差, 有些壳体为铁锰化合物取代, 能够识别出的钙质超微化石组合包括: *Cyclicargolithus floridanus*、*C. pelagicus*、*E. obruta*、*D. variabilis* 以及高度溶蚀的 *Trochoaster* sp.(很可能是 *T. duplex* 和 *T. radiatus*), 该壳层的形成时段对应于 CN3~CN5a(中中新世)。新壳层 0~20 mm 层段钙质超微化石组合为 *C. pelagicus*、*Calcidiscus macintyreii*、*U. sibogae*、*D. surculus*、*D. variabilis*、*D. brouweri* 和 *D. asymmertricus*, 结壳形成时代为上新世—更新世。

3.3 中、西太平洋海山结壳生长过程和阶段

富钴结壳是一类与热点火山、超级地幔柱成因海山有关的海底矿产, 其壳层在形成过程中因洋底环境不同而产生结构构造与成矿物质成分的差异。以上结果表明, 结壳的主要生长期在其结构构造及分层特征上有明显的显示。根据结壳钙质超微化石定年结果, 以及壳层结构构造的变化和壳层间的不整合, 可以推断结壳生长的间断及其地质年代。麦哲伦海山 CM3D06 结壳样品表层向下在 85 mm 处



❖ 钙质超微化石的采样位置及编号

图 3 CM3D06 结壳中的钙质超微化石分布

Fig.3 Distribution of calcareous nannofossil species in CM3D06 crust

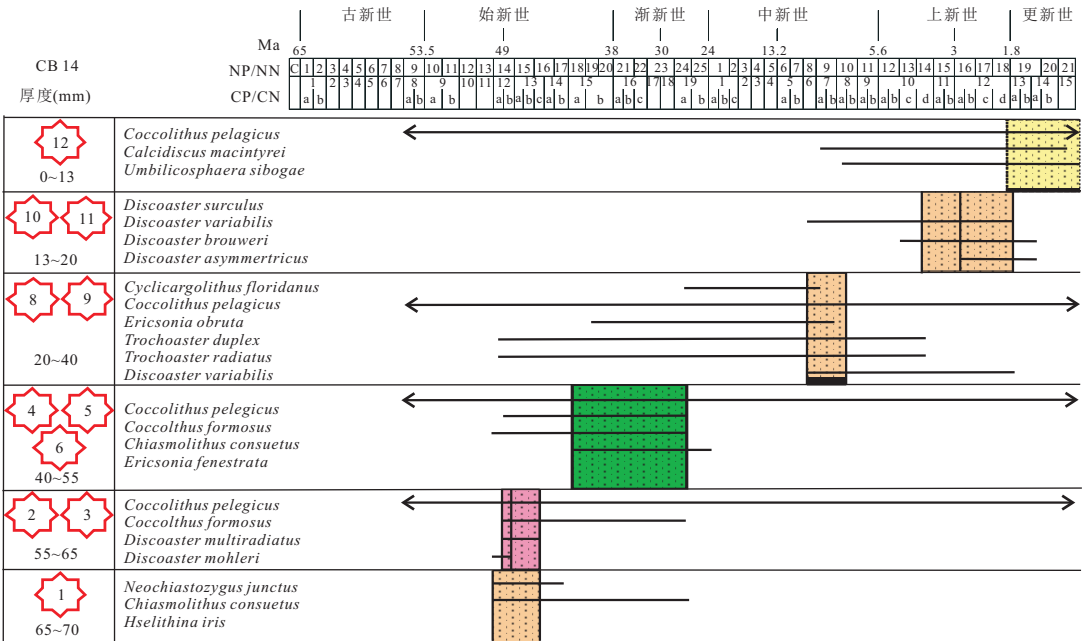
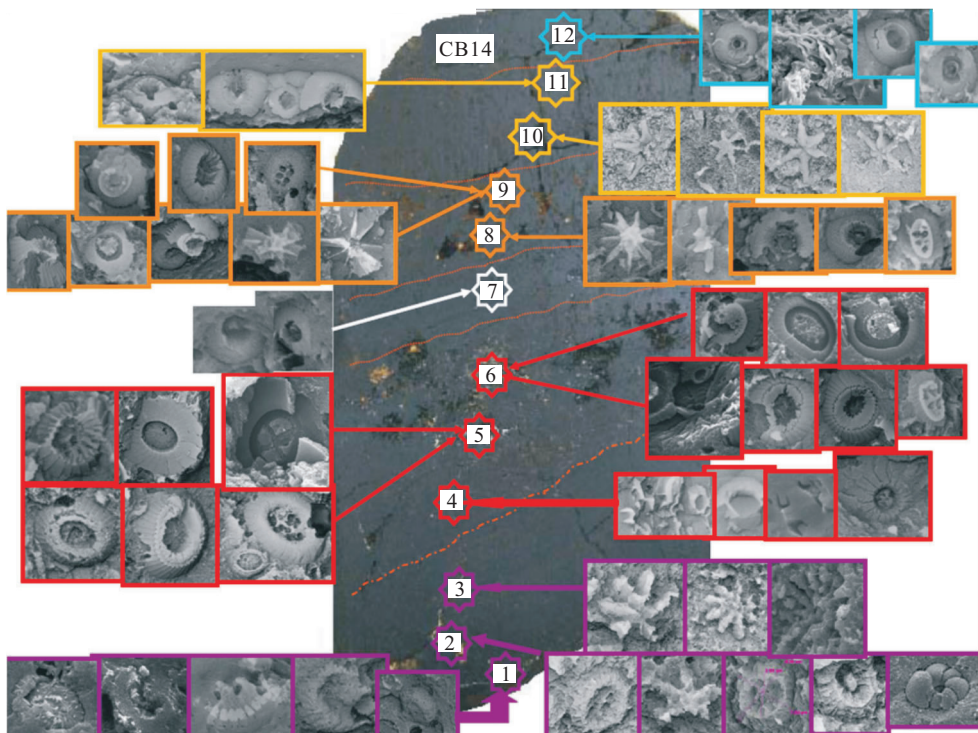


图 4 CB14 结壳各层年代钙质超微化石(标志化石)的形成时代

Fig.4 Calcareous nannofossils and geological age in each sub-layer of CB14 crust

(早古新世)和 58 mm 处(渐新世)存在明显的生长间断,不同壳层间明显的特征变化和矿物化学组成

等差别(武光海等,2001,2005)证明了这一点.中太平洋海山 CB14 结壳样品在 40 mm 处(渐新世)出



☞ 钙质超微化石的采样位置及编号

图 5 CB14 结壳中的钙质超微化石分布

Fig.5 Distribution of calcareous nannofossil species in CB14 crust

现不整合断面,两块结壳均缺失渐新世的生长段,说明该时期不适合研究区域结壳生长,这与武光海等(2006)研究结果一致。但是不同海山结壳的生长间断年代的长短存在差别,还可能存在局域性的次级生长间断。渐新世时期,特提斯海因构造运动关闭,环赤道洋流逐渐减弱,南极底层水虽已开始形成,但还没有影响到海山区。因此结壳生长环境恶化,产生生长间断(Melnikov *et al.*, 2002). Pulyaeva(1997)也认为该时期为海退期,大洋生产力、生物碳酸盐产率和碳酸盐补偿线(CCD)均降低,这可能是该时期的普遍特征。

中、西太平洋海山两块结壳开始生长的年代分别在晚古新世和白垩纪(或更古老),这说明了两个结壳最初形成时的环境存在较大差异,也意味着结壳并不是在海山形成之后就立即开始生长。Jeong *et al.*(2000)认为海山环境不稳定是导致结壳形成年代差异的原因之一,在地质时期太平洋发生了一系列构造运动和重大地质事件,古海洋环境也发生了显著的变化,结壳只有在合适的条件下才能够生长。结壳主要形成在最低含氧层(OMZ)以下、CCD以上的海洋学界面内。在南极底层水供氧条件下,海水中成矿物质凝集沉淀并依附于海山硬质基岩表面

成壳状或圈层状生长发育,在其形成过程中同时接受了更多的生物沉积。

第一阶段(白垩期末),大约 90 Ma BP 时太平洋海山群因热点群的强烈改造作用继续漂移,同时伴随着海山垂直方向上的升降,中、西太平洋海山大约在 60~70 Ma BP 时穿过赤道到达目前的位置(Smoot, 1999)。一方面,这一阶段海山经历了多期岩浆活动,物质来源丰富,海水循环和生物活动间的相互作用有利于海山结壳的生成(赵俐红等, 2005);另一方面,这一时期全球气温较高,没有南极底流的发育,大洋深层水溶解氧含量极低,火山活动诱发海山滑坡,不利于边坡不稳定的海山结壳生长(石学法等, 2008)。因此,CM3D06 结壳在这一时期开始生长,就意味着麦哲伦海山的位置、地形和水深有利于结壳生长发育。

第二阶段(晚古新世—早始新世),古新世时期中太平洋海山位于低纬度区,由于均衡补偿作用缓慢下沉,海山顶上珊瑚礁不断生长,逐渐形成平顶山(Haggerty and Premoli-Silva, 1995)。CB14 富钴结壳开始生长,结壳形成环境主要受表中层洋流和海山自身流的影响,有证据表明当时存在环赤道洋流(Arnaud-Vanneau and Premoli-Silva, 1995)。

第三阶段(中一晚始新世),大约在始新世末海山热沉降基本结束,之后随太平洋板块经历了一个漫长的水平方向的漂移过程(Winterer *et al.*, 1993),在漂移过程中海流作用适时的冲掉了海山上的沉积物,这为富钴结壳的不断生长提供了有利环境。这一时期塔斯曼—南极水道张开,德雷克水道逐渐向深层水开放,环南极底层水形成,结壳组成变化与极地冰盖的消长相关(赵俐红等,2005)。

第四阶段(中一晚中新世),这一阶段初期印度尼西亚水道向深层水闭合,促使环南极底流加强,南极出现永久性的冰盖(Halbach and Puteanus, 1984)。这一时期内全球气温逐渐降低,南极中层水和底层水加强,中、西太平洋海山群的 OMZ 逐步向北退缩,海洋出现“过氧化”状态,不利于结壳生长(Ren *et al.*, 2007)。

第五阶段(上新世—现代),这一阶段全球气温持续降低,巴拿马水道闭合,彻底终结了环赤道流系,阻隔了太平洋与北大西洋之间的表层水的交流,北大西洋深层水加强,同时南极底层流和上层水团加强,使得太平洋 OMZ 的范围和强度发生了减弱(Christensen *et al.*, 1997)。尽管这一阶段海山下沉并不显著,但是 OMZ 下限上升,逐渐远离海山,改变了富钴结壳的成矿背景条件,海山周围海水中成矿物质含量降低,这一阶段不利于富钴结壳发育生长(Ling *et al.*, 1997)。

4 结论

(1)利用太平洋海山富钴结壳生物化石遗留印痕确定其形成时代和生长阶段,麦哲伦海山 CM3D06 结壳形成和生长可分为 5 个阶段:白垩纪(或更古老),晚古新世—早始新世,中一晚始新世,中一晚中新世,上新世—更新世;中太平洋海山 CB14 结壳形成和生长可分为 4 个阶段:晚古新世—早始新世、中一晚始新世、中中新世、上新世—更新世。(2)结壳的生长主要集中于不同环境因素控制的两个阶段(分别对应结壳的新、老壳层),渐新世是海退期,处于两种环境的转换期,该时期大洋生产力、CCD 和生物碳酸盐产率均降低,是结壳生长的主要间断期。

致谢:感谢匿名审稿人提出宝贵意见;中国大洋协会提供研究样品和航次相关资料,大洋航次调查队员采集研究样品付出辛勤劳动,在此一并谢忱!

References

- Arnaud-Vanneau, A., Premoli-Slitva, I., 1995. Biostratigraphy and Systematic Description of Benthic Foraminifers from Mid-Cretaceous Shallow-Water Carbonate Platform Sediments at Sites 878 and 879 (Mit and Takuya-Daisan Guyots). In: Haggerty, J. A., Premoli-Silva, I., Rack, F., et al., eds., *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 144: 199—219.
- Bown, P. R., 1998. *Calcareous Nannofossil Biostratigraphy*. Springer Netherlands, Berlin, Germany, 315.
- Bukry, D., 1973a. Coccolith Stratigraphy, Eastern Equatorial Pacific, Leg 16, Deep Sea Drilling Project. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 16: 653—711. doi: 10.2973/dsdp.proc.16.126.1973
- Bukry, D., 1973b. Phytoplankton Stratigraphy, Deep Sea Drilling Project, Leg 20, Western Pacific Ocean. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 20: 307—317. doi: 10.2973/dsdp.proc.20.114.1973
- Bukry, D., 1978. Biostratigraphy of Cenozoic Marine Sediment by Calcareous Nannofossils. *Micropaleontology*, 24: 44—60.
- Chabaux, F., O'Nions, R. K., Cohen, A. S., et al., 1997. ^{238}U — ^{234}U — ^{230}Th Disequilibrium in Hydrogenous Oceanic Fe-Mn Crusts: Palaeoceanographic Record of Diagenetic Alteration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 3619—3632. doi: 10.1016/S0016-7037(97)00187-7
- Chen, F., Su, X., Zhou, Y., 2013. Late Miocene-Pleistocene Calcareous Nannofossil Biostratigraphy of Shenhu Gas Hydrate Drilling Area in the South China Sea and Variations in Sedimentation Rates. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Z. B., Shi, X. F., Su, X., et al., 2006. Growth Ages of Ferromanga-Nese Crusts from the Western and Central Pacific: Comparison between Nannofossil Analysis and ^{10}Be Dating. *Chinese Science Bulletin*, 51: 3035—3040. doi: 10.1007/s11434-006-2193-y
- Christensen, J. N., Halliday, A. N., Godfley, L. V., et al., 1997. Climate and Ocean Dynamics and the Lead Isotopic Records in Pacific Ferromanganese Crusts. *Science*, 277: 913—918. doi: 10.1126/science.277.5328.913
- Cowen, J. P., DeCarlo, E. H., McGee, D. L., 1993. Calcareous Nannofossil Biostratigraphic Dating of a Ferromanganese Crust from Schumann Seamount. *Marine Geology*, 115: 289—306. doi: 10.1016/0025-3227(93)90057-3
- Edwards, A. R., Perch-Nielsen, K., 1975. Calcareous Nannofossils from the Southwest Pacific, Deep Sea Drilling Project, Leg 29. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 29:

- 469—540. doi:10.2973/dsdp.proc.29.113.1975
- Gartner, S., 1977. Nannofossils and Biostratigraphy: An Overview. *Earth-Science Reviews*, 13: 227—250. doi: 10.1016/0012-8252(77)90001-0
- Haggerty, J. A., Premoli Silva, I., 1995. Comparison of the Origin and Evolution of Northwest Pacific Guyots Drilled during Leg 144. In: Haggerty, J. A., Premoli Silva, I., Rack, F., et al., eds., *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 144: 935—949.
- Halbach, P., Puteanus, D., 1984. The Influence of the Carbonate Dissolution Rate on the Growth and Composition of Co-Rich Ferromanganese Crusts from Central Pacific Seamount Areas. *Earth and Planetary Science Letters*, 68: 73—87. doi:10.1016/0012-821X(84)90141-9
- Ingram, B. L., Hein, J. R., Farmer, G. L., 1990. Age Determination and Growth Rates of Pacific Ferromanganese Deposits Using Strontium Isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 1709—1721. doi:10.1016/0016-7037(90)90402-7
- Jeong, K. S., Jung, H. S., Kang, J. K., et al., 2000. Formation of Ferromanganese Crusts on Northwest Intertropical Pacific Seamounts: Electron Photomicrography and Microprobe Chemistry. *Marine Geology*, 162: 541—559. doi: 10.1016/S0025-3227(99)00091-2
- Joshima, M., Usui, A., 1998. Magnetostratigraphy of Hydrogenetic Manganese Crusts from Northwestern Pacific Seamounts. *Marine Geology*, 146: 53—62. doi:10.1016/S0025-3227(97)00131-X
- Larson, R. L., 1991. Geological Consequences of Superplumes. *Geology*, 19: 963—966. doi:10.1130/0091-7613(1991)019<0963:GCOS>2.3.CO;2
- Li, J. S., Fang, N. Q., Qu, W. J., et al., 2008. Os Isotope Dating and Growth Histories of Co-Rich Crust from Central Pacific. *Science China: Earth Science*, 51: 1452—1459. doi:10.1007/s11430-008-0100-x
- Ling, H. F., Burton, K. W., O'Nions, R. K., et al., 1997. Evolution of Nd and Pb Isotopes in Central Pacific Seawater from Ferromanganese Crusts. *Earth and Planetary Science Letters*, 146: 1—12. doi:10.1016/S0012-821X(96)00224-5
- Liu, H. B., Watkins, D. K., 2004. Calcareous Nannofossils from the Niobrara Formation (Upper Cretaceous) and Paleoenvironments of the North American Western Interior Basin Part II: Paleoenvironment Study. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 26—38 (in Chinese with English abstract).
- Ma, W. L., Jin, X. L., Zhong, S. L., et al., 2007. Calcareous Nannofossil Biostratigraphy Study of Cobalt-Rich Crust from Marcus Sea Ridge. *Acta Oceanologica Sinica*, 29(5): 174—180 (in Chinese with English abstract).
- Martini, E., 1971. Standard Tertiary and Quaternary Calcareous Nannoplankton Zonation. In: Farinacci, A., ed., Proc. 2nd Int. Conf. Planktonic Microfossils Roma. *Rome*, 2: 739—785.
- Martini, E., Worsley, T., 1971. Tertiary Calcareous Nannoplankton from the Western Equatorial Pacific. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 7: 1471—1507. doi:10.2973/dsdp.proc.7.129.1971
- Melnikov, M. Y., Tugolesov, D. D., Gubenkova, V. V., et al., 2002. Preliminary Results on Drilling of Co-Rich Manganese Crusts (the Ioan Guyot, the Pacific Ocean-Case Study). *Minerals of the Ocean*, 24—27.
- Okada, H., Bukry, D., 1980. Supplementary Modification and Introduction of Code Numbers to the Low Latitude Coccolith Biostratigraphic Zonation. *Marine Micropaleontology*, 5: 321—325. doi: 10.1016/0377-8398(80)90016-X
- Pan, J. H., Zhang, J., Liu, S. Q., et al., 2007. Calcareous Nannofossil Biostratigraphy of Co-Rich Crusts from Northwestern Pacific and Its Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(5): 411—417 (in Chinese with English abstract).
- Perch-Nielsen, K., 1985. Mesozoic Calcareous Nannofossils. In: Bolli, H. M., Saunders, J. B., Perch-Nielsen, K., eds., *Plankton Stratigraphy*. Cambridge University Press, Cambridge, 329—426.
- Pulyaeva, I., 1997. Stratification of Ferromanganese Crusts on the Magellan Seamounts. In: Wang, P., Berggren, W. A., eds., *Proceedings of 30th International Geological Congress*, Beijing, 111—128.
- Ren, X. W., Glasby, G. P., Liu, J. H., et al., 2007. Fine-Scale Compositional Variations in a Co-Rich Mn Crust from the Marcus-Wake Seamount Cluster in the Western Pacific Based on Electron Microprobe Analysis (EMPA). *Marine Geophysical Researches*, 28: 165—182. doi: 10.1007/s11001-007-9024-7
- Roth, P. H., 1973. Calcareous Nannofossils—Leg 17, Deep Sea Drilling Project. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 17: 695—795. doi:10.2973/dsdp.proc.17.123.1973
- Roth, P. H., 1978. Calcareous Nannoplankton Biostratigraphy and Oceanography of the Northwestern Atlantic Ocean. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 44: 731—759. doi:10.2973/dsdp.proc.44.134.1978
- Segl, M., Mangini, A., Bonani, G., et al., 1984. ¹⁰Be-Dating of a Manganese Crust from Central North Pacific and Implications for Ocean Palaeocirculation. *Nature*, 309: 540—543. doi:10.1038/309540a0
- Shi, X. F., Ren, W., Liu, J. H., et al., 2008. Ore-Controlling

- Factors and Ore-Forming Processes of Co-Rich Fe-Mn Crust: An Example from Western Pacific. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27 (3): 232—238 (in Chinese with English abstract).
- Shumenko, S. I., 1987. Calcareous Nannoplankton. State Scientific Centre Yuzhmoregeologia, Gelendzhik (in Russian).
- Sissingh, W., 1977. Biostratigraphy of Cretaceous Calcareous Nannoplankton. *Geologie en Mijnbouw*, 56: 37—65.
- Smoot, N. C., 1999. Orthogonal Intersections of Megatrends in the Western Pacific Ocean Basin: A Case Study of the Mid-Pacific Mountains. *Geomorphology*, 30: 323—356. doi: 10.1016/S0169-555X(99)00060-4
- Su, X., Ma, W. L., Cheng, Z. B., 2004. Calcareous Nannofossil Biostratigraphy for Co-Rich Ferromanganese Crusts from Central Pacific Seamounts. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 141—147 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X., de Carlo, E. H., Li, Y. H., 1997. Interelement Relationships in Ferromanganese Crusts from the Central Pacific Ocean: Their Implications for Crust Genesis. *Marine Geology*, 136: 277—297. doi: 10.1016/S0025-3227(96)00064-3
- Winterer, E. L., Natland, J. H., van Wassbergen, R. J., et al., 1993. Cretaceous Guyots in the Northwest Pacific: An Overview of Their Geology and Geophysics. In: American Geophysical Union, ed., *The Mesozoic Pacific Geology: Tectonics, and Volcanism. Geophysical Monography, Washington, D.C.*, 77: 307—334.
- Wu, G. H., Pulyaeva, I. A., Liu, J. H., et al., 2011. Biostratigraphic Research on the Seamount Ferromanganese Crusts of the Mid-Pacific Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(4): 129—139 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Zhou, H. Y., Ling, H. F., et al., 2005. Phosphorites in Co-Rich Crusts and Their Palaeoceanography Significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 25: 39—44 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Zhou, H. Y., Yang, S. F., et al., 2001. Variations of Fe-Me Oxide Mineral Assemblages in Co-Rich Crust during Its Growth. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 137—143 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Zhou, H. Y., Zhang, H. S., et al., 2006. Two Main Formation Episodes of Ferromanganese Crusts in the Pacific Ocean. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 577—588 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Z. F., Li, T. G., Zhai, B., et al., 2013. Quantitative Evaluation of Paleoproductivity of Diatom Mats from Tropical West Pacific during the Last Glacial Maximum. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(1): 25—32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Zhao, J., Han, Z., et al., 2013. Calcareous Nannofossils and Molecular Fossils in Cobalt-Rich Crusts and Their Response to the P/E Global Event. *Acta Geologica Sinica*, 87: 1264—1274. doi: 10.1111/1755-6724.12127
- Zhao, L. H., Gao, J. Y., Jin, X. L., et al., 2005. Research on Drifting History and Tectonic Origin of the Mid-Pacific Mountains. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(3): 35—42 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈芳, 苏新, 周洋, 2013. 南海神狐海域水合物钴探区钙质超微化石生物地层与沉积速率. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(1): 1—9.
- 程振波, 石学法, 苏新, 等, 2006. 西、中太平洋铁锰结壳生长年龄: 超微化石与¹⁰Be测年的对比. *科学通报*, 51: 2685—2689.
- 李江山, 方念乔, 屈文俊, 等, 2008. 中太平洋富钴结壳的 Os 同位素定年与结壳生长间断. *中国科学: 地球科学*, 38: 1122—1129.
- 刘怀宝, Watkins, D. K., 2004. 北美西部内陆海盆 Niobrara 组的钙质超微化石及其环境意义 II: 古环境研究. *高校地质学报*, 10(1): 26—38.
- 马维林, 金翔龙, 钟石兰, 等, 2007. 马尔库斯海脊富钴结壳的钙质超微化石生物地层学研究. *海洋学报*, 29(5): 174—180.
- 潘家华, 张静, 刘淑琴, 等, 2007. 西北太平洋富钴结壳的钙质超微化石地层学研究及意义. *地球学报*, 28(5): 411—417.
- 石学法, 任文, 刘季花, 等, 2008. 富钴铁锰结壳的控矿要素和成矿过程——以西太平洋为例. *矿物岩石地球化学通报*, 27(3): 232—238.
- 苏新, 马维林, 程振波, 2004. 中太平洋海山富钴结壳的钙质超微化石地层学研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(2): 141—147.
- 武光海, Pulyaeva, I. A., 刘捷红, 等, 2011. 中太平洋海山铁锰结壳生物地层学研究. *海洋学报*, 33(4): 129—139.
- 武光海, 周怀阳, 凌洪飞, 等, 2005. 富钴结壳中的磷酸盐岩及其古环境指示意义. *矿物学报*, 25(1): 39—44.
- 武光海, 周怀阳, 杨树锋, 等, 2001. 富钴结壳生长过程中铁锰氧化物矿物组合的变化. *矿物学报*, 21(2): 137—143.
- 武光海, 周怀阳, 张海生, 等, 2006. 中太平洋地区两个铁锰结壳的生长幕研究. *地质学报*, 80(4): 577—588.
- 熊志方, 李铁刚, 翟滨, 等, 2013. LGM 热带西太平洋硅藻席古生产力定量评估. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(1): 25—32.
- 赵俐红, 高金耀, 金翔龙, 等, 2005. 中太平洋海山漂移史及其来源. *海洋地质与第四纪地质*, 25(3): 35—42.