

文章编号:1000-0550(2004)04-0579-09

华南地区二叠纪栖霞组碳酸盐岩成因研究及其地质意义

颜佳新

(中国地质大学 武汉 430074)

摘要 二叠系栖霞组是华南地区一个特殊的碳酸盐岩地层,富含有机质和燧石结核,具广泛的空间分布,但是岩相和厚度变化极小,同时发育天青石结核和海泡石。概述前人对这些沉积特殊性的研究成果及存在问题。对其特殊性的深入成因分析表明,栖霞组其他沉积特殊性均与栖霞期的缺氧沉积环境有关,而缺氧沉积环境的成因可能与栖霞期较高的生物产率有关。根据栖霞期全球古气候、古海洋背景研究的最新进展,结合栖霞组的沉积学特征,认为栖霞组特殊性的成因可能与当时较高生物产率有关,进一步研究、确定栖霞期较高生物产率的成因及其变化将具有重要的地质意义。

关键词 华南地区 二叠纪 栖霞组 生物产率

作者简介 颜佳新 男 1962年出生 教授 沉积学

中图分类号 P588.24⁺5 **文献标识码** A

1 前言

华南地区二叠纪栖霞组是一个特殊的碳酸盐岩地层单元,如:1)色暗、富含有机质(沥青质);2)富含燧石结核(或硅质层);3)区域分布广,而岩性和厚度在空间上变化不大;4)发育特有的矿物集合体—天青石结核(菊花石)、特征矿物—海泡石;5)碳酸盐岩全岩稳定碳同位素特征表现为高的正值,属晚古生代最高^[1,2]。这些特征是华南地质历史中独一无二的。这些特殊性已经引起了人们的广泛关注,并已经展开了热烈的讨论。

笔者认为,针对栖霞组的成因研究,首先应该考虑整个华南地区栖霞组的整体特征,进行综合分析。如富含有机质并不是栖霞组的一个孤立沉积特征,栖霞组其他特殊性的成因均不同程度地与之有关;其次,栖霞组特殊性的成因,还与全球二叠纪特殊海洋地球化学背景有关。对栖霞组特殊性成因的深入理解,有助于我们对二叠纪古海洋特殊性的了解;第三,对栖霞组碳酸盐岩中特殊的成岩矿物的成因研究,如对天青石结核,也可以为我们深入了解该类矿物的形成条件提供重要的线索;此外,栖霞组特殊性成因的确定,还将具有重要的经济价值,如栖霞组海泡石矿床的成

因。本文在回顾前人研究的基础上,综合考虑栖霞组的沉积学特征,初步认为栖霞组成因与栖霞期较高的生物产率有关,供大家批评、讨论,以深化我们对华南地区二叠纪栖霞组成因的认识和碳酸盐岩早期成岩作用的认识。

2 与栖霞组富有机质和燧石结核成因有关的问题

2.1 富有机质沉积的成因模式问题

栖霞组碳酸盐岩富有机质的特点,自然使人们联想到缺氧沉积环境成因。缺氧沉积特征包括1)旋回性发育的黑色页岩、燧石结核层(或硅质层)、纹层状灰岩^[3,4];2)有机相特征(浅海缺氧无定形有机相)^[3];3)特殊的化石古生态特征和遗迹组构特征^[4];4)沉积古地理特征(低能、局限)^[5];5)部分微量元素比值^[6,7]。目前对该缺氧沉积环境的成因,有如下三种解释(或模式):

1)水体盐度分层模式,上层水体淡化。证据包括a)该区当时处于热带潮湿气候带;b)本组缺乏鲕粒等反映明显干燥气候的古气候标志;c)整个沉积环境为低能沉积环境,缺乏高能带沉积^[8-10];

2) 上升流模式。该模式较好的解释了华南栖霞组内大量的燧石结核和硅质层^[3],也可以解释栖霞组缺氧沉积和非缺氧沉积在剖面上相互交替的特点。由于上升流的发育往往伴随着水温的降低,Shi & Grunt 和 Shi 在论述该区上升流的发育中,列举了如下三个可能与低水温有关的证据:1) 在四川 Sakmarian 期梁山组和贵州西部沙子塘组中,发现冈瓦纳冷水腕足动物化石 *Globiella*; 2) 栖霞组中缺乏生物礁和类似生物礁的碳酸盐岩建造; 3) 栖霞组菊花石类似落基山早石炭世的六水炭钙石 (ikaite); 因而,他们认为来自冈瓦纳东部和北部陆棚的低温水体,以深部洋流的形式进入低纬度地区,从华南西部影响整个华南地区; 上升流的发育也可能(还)与当时古特提斯洋中强烈的、向东的古赤道边界流的诱导有关^[11, 12]。需指出的是,1) 菊花石的原生矿物已被证明是天青石^[13],应该排除在其非暖水沉积证据之外; 2) 最新研究表明,灰岩/泥灰岩韵律和结核状灰岩基本上是一种暖水沉积现象,不发育于上升流地区^[14]; 如果栖霞组内层纹状灰岩和块状灰岩组成的韵律的成因可以解释为灰岩/泥灰岩韵律的话(目前大多研究和描述如此),那么栖霞组大量发育的这种岩性韵律、结核状灰岩也不支持低温上升流解释。

3) 海侵模式。栖霞组整体由一个大的海侵序列组成,海侵对富有机质沉积的形成也可能发挥了重要作用^[9, 15],三级以及三级以上高频海平面变化与缺氧沉积环境的关系密切^[4]。若此,也可以解释栖霞组既存在富氧沉积,又具有缺氧环境特征的两面性。

但是上述缺氧成因模式都有不尽人意的地方。首先,导致水体分层的原因不明。栖霞组的沉积特征和生物特征,表明其沉积环境为浅水碳酸盐台地或缓坡,不是局限盆地或海湾。在这种浅水背景中,难以形成持久的、稳定的水体分层; 其次,虽然栖霞组富含生物化石、有机质和硅质,类似上升流沉积; 可是栖霞组缺氧沉积的空间分布不是带状分布,剖面结构不是有机质—硅质—磷质沉积的三位一体(缺乏磷质沉积),因而与上升流沉积明显不同^[16, 17]。第三,不同级别的周期性海平面变化是地质历史中的普遍规律,栖霞组并无例外; 很显然,在海平面因素之外,还可能存在一个或多个特殊因素,它们的共同作用导致了栖霞组缺氧沉积环境的形成。

现代富有机质沉积的分布与成因关系表明,海洋中富有机质沉积发育的主要控制因素是较高的初级生物产率而非水柱中的缺氧; 有机质保存的数量和质

量整体受沉积速率的控制(冲淡/凝缩),它影响着有机质的输入、控制着有机质埋藏(或保存)与沉积饥饿有机质在海底的分解之间的动态平衡^[18, 19]。栖霞组中丰富的有机质是否与较高的生物产率有关,是一个值得深入研究的课题。

2.2 形成栖霞组燧石结核的硅质来源问题

栖霞组中的燧石结核主要由微晶石英和玉髓组成,燧石结核内部及其上下围岩中生物碎屑丰富,属早期成岩作用成因^[20-22]。剖面上,含燧石结核层的分布具旋回性或韵律性^[4, 8, 20, 23]。近年来,华南地区二叠纪栖霞组之上的硅质岩的成因,引起了人们的广泛关注,结论包括热液成因、火山成因和生物成因等多种解释。如果组成栖霞组燧石结核的硅质来源于硅质生物碎屑,按照一般浅水碳酸盐沉积物中有机成因硅的平均含量计算,需要 5.1~23 倍于栖霞组厚度的沉积层; 也就是说在正常情况下,仅沉积有机硅不足以形成如此多的燧石结核^[20]。因而有些研究认为,栖霞组燧石结核硅质有可能来源于火山活动或者热液活动。但是到目前为止仍无确凿的火山活动或者热液活动的证据。此外,该燧石结核的成因机理,难以用通用的 Knauth 海水/淡水混合带硅化模式解释,因为 1) 滨海环境不发育,为海侵式旋回,缺乏淡水作用证据,岩石中锶含量较高; 2) 燧石的含量及其差异与所处环境和硅质生物的含量有关^[20]。

3 富有机质与栖霞组其他特殊性之间的成因联系

3.1 天青石结核成因研究

天青石结核是华南地区栖霞组最典型、最特征的矿物集合体(即菊花石,也曾被解释为六水炭钙石—ikaite,见参考文献^[11, 12, 15, 24])。就目前所知,其出露层位局限于栖霞组但空间分布广泛。天青石中的 Sr、S 同位素特征表明,它们形成于早期成岩作用阶段,组成天青石的 Sr^{2+} 、 SO_4^{2-} 均来源于同期海水,其中 Sr^{2+} 来源于文石向低镁方解石的成岩稳定转化或文石的溶解, SO_4^{2-} 离子来源于海水^[13](有关华南栖霞组菊花石参考文献见^[13])。

但是天青石结核在华南地区栖霞组广泛发育的地质意义仍有待进一步发掘。在正常浅水陆棚沉积环境中,由于硫酸盐还原作用等原因,沉积物孔隙水中的 SO_4^{2-} 离子浓度自沉积物/水界面向下逐渐降低直至完全被消耗(即硫酸盐还原带的底界); 而孔隙水

中的 Sr^{2+} 离子浓度则由于文石(和/或高镁方解石)的溶解和矿物稳定转化而逐渐增高。因此此类天青石的形成必须在硫酸盐还原带/甲烷形成带界面之上。有利于 Sr^{2+} 离子和 SO_4^{2-} 离子达到 SrSO_4 溶度积产生天青石沉淀的条件是:1) 较深硫酸盐还原带底界和2) 较快的文石、高镁方解石稳定转化(或文石的溶解)。现代深海钻探发现,类似成因天青石结核分布于大陆边缘和深海陆隆生物产率较高的地区^[25, 26]。因为一方面,大陆边缘和深海陆隆区硫酸盐还原带底界较深^[55],另一方面,高生物产率导致较高的沉积速率,有利于使浅埋的 SO_4^{2-} 离子进入到更深的深度(使硫酸盐还原带底界变深);较高的沉积速率也促进了文石向方解石的稳定转化(加速 Sr^{2+} 进入沉积物孔隙水)^[25]。根据栖霞组天青石结核的直径估计,栖霞期硫酸盐还原带底界至少深达 58 cm(笔者见过的最大的栖霞组菊花石的直径——产于湖南浏阳);如果考虑菊花石和围岩的差异压实作用,则硫酸盐还原带底界的深度大于 1 m。

现代陆棚和深海沉积物孔隙水研究表明,硫酸盐还原带底界的深度与生物扰动和有机质的输入或生物产率密切相关。在现代滨海沉积环境中,硫酸盐还原带深度一般 8~10 cm,海湾沉积环境 8~15 cm,河口三角洲带为 33~80 cm,上升流发育的大陆斜坡如非洲西部则可达 4~8 m,深海沉积因为极少含有机质,硫酸盐还原反应不发育,硫酸盐还原带的深度更大^[27~29](有关海相硫酸盐还原作用的更多参考文献见^[29])。对栖霞期而言,陆源有机质对硫酸盐还原带底界深度的影响可以不予考虑,因为到目前为止,没有证据显示华南地区天青石结核发育时有古陆存在;发育天青石结核的地层也不可能是深水沉积。对栖霞组遗迹组构研究表明,大多数遗迹的影响深度不过数厘米^[4]。已知菊花石的分布主要集中于地层厚度相对较大的地区,暗示其成因可能与较高的沉积速率有关^[13],这是否意味着栖霞期较高的生物产率很值得研究。

3.2 栖霞组海泡石成因研究

海泡石是一种富 Si 和 Mg、贫 Al 的粘土矿物。我国已探明海泡石储量约 1500 万吨,其中大多数产自华南地区栖霞组(有些地方可以延伸至茅口组下部^[58]),如已经开采的湖南浏阳和湘潭、江西乐平、四川广元、陕西宁强等海泡石矿;仅湖南浏阳栖霞组已探明海泡石储量就达 570 万吨、远景储量约 3000 万吨^[30~33]。目前开采的栖霞组海泡石主要为风化淋

滤后的粘土。海泡石在栖霞组大多数露头剖面都有分布,远远不止勘探关注的“镁质页岩”的区域和层段。因此,海泡石为栖霞组名副其实的特征矿物。

在《Palygorskite-sepiolite: occurrences, genesis and uses》一书中,Callen 综述了沉积型坡缕石和海泡石的时空分布。坡缕石—海泡石的分布环境包括:季节性、半干旱气候条件下的内陆湖泊、内陆海、陆缘海环境和钙质土壤环境,以及开阔大洋内的玄武质玻璃和火山沉积物的热液蚀变环境。Callen 认为在无火山物质的条件下,海相沉积中的坡缕石—海泡石的成因与干旱—半干旱气候有关^[34]。受该文章的影响,前人对华南地区栖霞组海泡石成因的认识始终未能摆脱“干旱—沉积”成因模式,因而认为栖霞组海泡石可能直接形成于沉淀作用^[31, 36],或同沉积—早期成岩交代作用^[35, 37, 38],或者为沉积—成岩作用改造成因^[39]。海泡石交代藻类和其他生物化石介壳的现象常被作为次要特征^[37]。可是,没有证据表明栖霞组沉积环境出现过干旱—强烈蒸发的迹象。前人用以说明栖霞组存在蒸发环境条件的证据,如正延性玉髓和天青石,均已证实与强蒸发环境条件无关^[13, 40]。因而很明显,用干旱气候条件解释栖霞组海泡石的成因与栖霞组生物特征和沉积特征相矛盾。

实际上,1) 上述专著论述的主要是坡缕石而非海泡石;2) 深海钻探发现的坡缕石—海泡石粘土的纬度分布与它们在陆域范围内的分布不吻合(p. 27),即至少目前海域范围内的坡缕石—海泡石的纬度分布与干旱气候带无关;3) 美国东南部中新世坡缕石—海泡石粘土,是目前该类粘土矿产的三个主要产地之一,它们形成于淡化的海相沉积环境(p. 39~58);4) 海相坡缕石—海泡石的地史分布可能与海水化学成分的波动变化有关(p. 56~57)。简而言之,海泡石形成条件需要的仅仅是富镁、富硅、贫铝的碱性环境;强烈蒸发的环境有利于水体中 Mg^{2+} 浓度的提高,但是并非必须。

另外,形成栖霞组海泡石的镁质和硅质来源,也是一直困扰着栖霞组海泡石成因解释的一个重要问题^[36, 37]。因而有研究认为形成该海泡石的硅质和镁质来源于与深大断裂有关的热液活动(或同时伴有上升流的影响)^[35]。依此解释,萍乐拗陷的海泡石似乎可以与江南深大断裂联系上,但是湖北、四川、陕西和湖南其他地区相同层位的海泡石的成因,还需其他证据的支持。

事实上,原生栖霞期碳酸盐沉积物中并不缺乏

镁。简单的估算可以使这个问题更加明了。1) 栖霞期处于文石海沉积时期,即原生沉积以文石和高镁方解石为主^[41]。参考现代巴哈马碳酸盐台地化学沉积物(whiting)的原生矿物构成,假定栖霞组原生沉积中含有 50%文石和 50%高镁方解石;2) 在早期成岩矿物稳定转换中,假定含 14M%镁的高镁方解石转换为含 2M%镁的低镁方解石;3) 若高镁方解石稳定转化过程中释放的 Mg 全部转化为海泡石,则可在原生沉积中产生 9.7% ± 的海泡石;若形成白云石消耗(按海泡石灰岩中含 3% ± 白云石计算)部分释放的 Mg,其余释放的 Mg 形成海泡石,则可在原生沉积中形成 7.1% ± 的海泡石。如果再考虑:1) 纹层状灰岩/灰岩韵律单元中,无海泡石的灰岩层中 Mg 的转移;2) 纹层状海泡石灰岩经历的成岩压实、压溶成岩作用(主要影响碳酸盐矿物),海泡石层中的海泡石含量将大为提高。因此栖霞期原生沉积物中的 Mg 足以解释栖霞组海泡石成因。如上所述,栖霞组的燧石结核是早期成岩作用成因。大量的燧石结核也表明栖霞组早期成岩环境不乏硅质物质。野外证据很清楚的表明,海泡石发育的层段燧石结核不发育,燧石结核发育的层段海泡石不发育(如湖南浏阳和陕西宁强)。

因此,栖霞组早期成岩环境特征完全符合海泡石形成所需要的环境条件。对栖霞组成岩作用地球化学特征研究表明,栖霞组碳酸盐岩中的 Si 和 Mg 呈正

相关(相关系数 > 0.9),其中 Si、Mg 含量分别对应岩石中的早期硅化和白云岩化作用^[42];对天青石结核的成岩交代历史的研究表明,栖霞组早期硅化和白云岩化作用是同期的^[43]。对含有海泡石的钙质结核的成因研究表明,华南地区栖霞组海泡石的形成也明显为早期成岩作用成因,它们与早期硅化、白云岩化阶段同期^[44];栖霞组化石藻类硅化作用研究得出的成岩序列也与之吻合^[45]。因而形成海泡石所需的硅和镁可以分别来自早期硅化和白云岩化成岩流体^[44]。

华南栖霞组海泡石成因研究具有重要的地质意义。海相自生(早期成岩作用)成因富镁质粘土矿物(海泡石和坡缕石)常常与富有机质、磷质和自生白云石沉积相伴生^[46-48]。而海相磷质和早期自生白云石的成因往往与富营养的上升流环境有关^[49,50]。如在北卡罗来纳大陆边缘(陆棚和上斜坡)中新世沉积物中,自生海泡石和坡缕石的分布仅仅局限于富含有机质、燧石结核和自生白云石的沉积相中,为缺氧沉积环境成因^[48]。这些同样早期成岩作用成因、具有类似矿物组合的海泡石能给华南栖霞组海泡石成因研究什么启示呢?如果它们的成因也与缺氧沉积环境有关,那么与上述栖霞组天青石结核的成因研究结果是偶然巧合,还是当时沉积环境的真实写照,不能不引起人们注意,尤其是针对栖霞组这样一个富含有机质、发育燧石结核的特殊的地质单元。

3.3 栖霞组岩性和厚度的空间稳定性

换个角度看待华南地区栖霞组岩性和厚度在空间上的稳定性,其显著的特点就是缺乏生物礁。就目前所知,可能的影响因素不外乎温度和水体营养水平两项。众所周知,非暖水沉积中生物礁不发育^[51,52];因而有学者将其视为栖霞组发育水温较低的上升流的证据之一^[11,12]。目前还未能引起大家足够重视的是,富营养水体对生物礁发育的负面影响。造礁生物群落高度适应贫营养水体,营养物质的输入刺激了浮游生物的生长、降低了水体透明度,因而降低了碳酸盐沉积的产生;营养物质的输入也刺激了藻类和非造礁—悬食(suspension-feeding)生物的大量繁盛,加剧了对生物礁的生物侵蚀;中等程度的营养物质的增加就可以使得生物礁由净生产(net production)转变为净

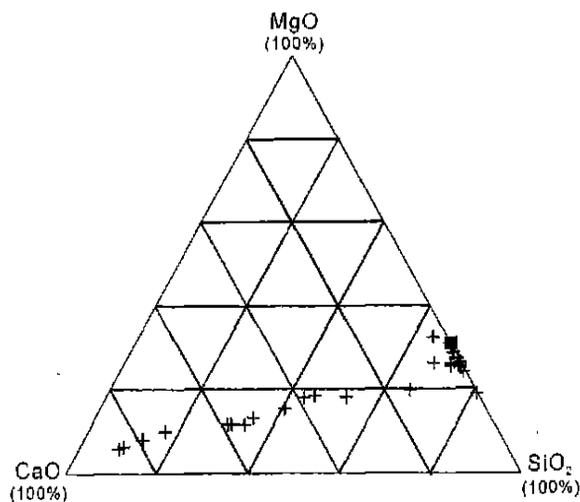


图 1 华南地区栖霞组含海泡石灰岩化学成分三角图解
数据根据章人骏等(1985)(13点)、刘德猛(1988)(2点)、Zhang and Tomita(1989)(1点)、杨振强等人(1992)(2点)、颜佳新等(12点)。黑色方块代表海泡石理论化学成分。

Fig. 1 Ternary plots for sepiolite-bearing limestones of Chixia Formation from the South China

Yan J X, Munnecke A, Steuber T, Carlson E H, Xiao YL. Marine sepiolite in Middle Permian carbonates of South China: implications for secular variation of Phanerozoic seawater chemistry. *Journal of Sedimentary Research*, 2004(待刊).

侵蚀 (net-erosion)^[53]。根据栖霞组发育大量的文石质藻类化石^[45]看,缺乏生物礁的栖霞组与其说是低温水体的影响,不如说是富营养水体的影响。至于富营养水体是否一定意味上升流,也值得深入研究。

4 栖霞期全球古气候、古海洋背景

近年来,全球二叠纪古海洋的特殊性逐渐受到人们的重视。如 1) 对西特提斯—西太平洋—北美西部外来地体中的硅质岩地层的总结发现,该区二叠纪中期(对应栖霞至茅口期)是一个生物成因硅质沉积的高峰时期,北美西部二叠纪磷矿组沉积也形成于这个时期,被称为二叠纪硅质沉积事件 (Permian Chert Event—PCE)^[54]; 2) 栖霞期也是一个化石硅化(硅质为生物成因)的高峰时期^[55]; 3) 最近,对联合古大陆西北部地层综合研究也表明,该区 Sakmarian—Artinskian 期至二叠纪末期是一个硅质沉积和保存的高峰期;作者认为其成因与联合古陆西北部的海水环流及温盐分层有关,并且有可能是全球性的(高生物成因硅质沉积或保存)^[56]; 4) 对生物礁的研究发现,二叠纪生物礁中发育文石质结壳沉积,表明中、晚二叠世期间,海水处于对碳酸盐的超饱和状态^[57]; 5) 通过对石盐中流体包裹体的化学成分分析发现,晚前寒武纪、二叠纪和第三纪以来(40Ma 以来)的三个时期古海水化学特征具极大的相似性,均以高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 比、高 Na^+ 含量为特征;而显生宙的其他时期则以低 Mg^{2+}/Ca^{2+} 比、低 Na^+ 含量为特征^[58],与观察到的二叠纪碳酸盐沉积特殊性相吻合,也合理的解释了 Sandberg(1983) 提出的显生宙原生碳酸盐矿物沉淀变化趋势(即“文石海”和“方解石海”的交替)^[41]; 6) 石盐中流体包裹体的研究还发现,二叠—三叠纪和第三纪海水以富 SO_4^{2-} 、贫 Ca^{2+} 为特征,而其余时期则相反^[59]; 7) 二叠—三叠纪是联合古大陆发育的鼎盛时期。对联合古大陆期间的古气候研究表明,当时气候环流主要受巨型季风 (Megamonsoon) 控制^[60, 61],北半球巨型季风体制可能在早二叠世就已经成型^[62]。地质学研究和古气候模拟研究都表明,在季风气候体制控制下的大陆内部,气候炎热、干旱少雨,风成沉积常见^[63, 64]。另一方面,在现代海洋试验表明,铁是一个有限的营养元素,外源铁的加入可以极大地刺激藻类的生物产率^[65]; 第四纪“海洋生物泵 (biological pump)”的变化也与大气粉尘输送相关。因此最新研究认为,联合古陆期间季风体制下盛行的大气粉尘,通过对海洋铁的输出,极大地刺激了当时的初级生物

产率,导致海水富营养化、藻类的大量繁盛和黑色页岩的形成;增加的海洋生物产率与陆生植物的繁盛一起导致了二叠纪碳酸盐岩碳同位素的正偏^[66]。日本秩父带 Sambosan 地体二叠纪硅质岩的地球化学研究也表明,组成其硅质岩中的硅有 30% ~ 60% 来源于与黄土成因相同的陆源物质^[67]。

因此,二叠纪不仅是一个海水地球化学特征极为特殊的时期,而且自栖霞期开始,全球海水似乎都进入了一个对碳酸盐岩、硅质岩的沉积或保存极为有利、生物产率较高的时期^[94]。这些进展,为我们深入了解华南地区二叠纪栖霞组众多特殊性提供了重要的线索,因为华南地区栖霞组大量发育的天青石结核、海泡石和燧石结核,与全球二叠纪富含 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 离子、易于文石沉积的海水化学特征以及较高的硅质生物产率呈现出惊人的一致性。

5 栖霞组成因初步解释

从以上论述中不难发现,虽然栖霞组具有很多特殊性,但是各特殊性之间存在明显的成因联系;虽然其成因与二叠纪全球海水地球化学特征、古气候背景的特殊性分不开,但是其中最基本的、联系到栖霞组其它特殊性的仍然还是富有机质的成因问题。

栖霞组最为明显的宏观沉积特征是,生物碎屑块状灰岩/层纹状含海泡石灰岩韵律特别发育(图 2)。韵律在剖面上组成栖霞组特有的沉积旋回^[4, 8]。在块状灰岩段内,生物碎屑丰富,生物分异度高,栖霞组反映正常浅海沉积条件的生物组合均发育在此层段。该段有机质含量较低,明显为富氧环境沉积。在层纹状含海泡石灰岩中,有机质含量较高,生物碎屑种类单调,能够识别的主要为介形虫、有孔虫、腕足碎片、苔藓虫碎片和三叶虫碎片等,其余均为细粒难以识别门类的生物碎屑。生物碎片大体成定向排列,并遭受强烈成岩压实作用影响(碎片折断)。在有些海泡石含量较低的层段,可发育燧石结核。韵律的两个组成部分不但在成岩作用方面存在差别,而且在地球化学特征方面也存在明显差别^[42](图 2)。如层纹状灰岩 ^{13}C 明显比块状灰岩重,并相对富含硅和镁,痕量元素比值呈现缺氧沉积环境的特点,其中 V/Cr 比值异常可能与藻类特别发育有关^[6]。后者的这些特征与较高生物产率环境下的沉积物特征相吻合。

较高的生产率可以导致大量有机质的堆积;较高

参见上页脚注。

产率导致的较高的沉积速率,可以促进准稳定矿物—文石的稳定转化,加深硫酸盐还原带的深度,导致天青石结核的形成;在早期成岩阶段,部分有机硅组成了燧石结核,部分有机硅(与 Mg)组成了海泡石。在燧石结核发育的地方,高镁方解石向低镁方解石转化释放的 Mg^{2+} (Mg^{2+} 未能与硅形成海泡石)则在围岩中形成白云石,产生白云岩化。生物产率的波动导致沉积环境水体溶氧量的波动,导致缺氧沉积与正常浅海碳酸盐沉积交替出现的沉积旋回^[4]。

因此本文认为,华南地区栖霞组的成因——也就是在同一个组内富含有机质、发育燧石结核、发育菊花石(天青石)、发育海泡石的原因,是较高生物产率的结果(图 2)。值得注意的是,栖霞组环境水体产率要低于上升流发育地区,可能为中等偏高的程度。因为:1) 栖霞组碳酸盐岩中磷的含量整体偏低;2) 富营养环境中,产率在很大程度上以浮游生物和肉质藻类为主,钙质沉积相对较少,这些与栖霞组富碳酸盐沉积情形不吻合;3) 在西南非洲早第三纪早期和美国东南部中新世巨厚的磷块岩、海泡石粘土沉积中,海泡

石粘土与磷质沉积在层位上相邻,但从未混杂共生,这意味着海泡石形成于较为富营养环境的水体,但是当水体营养水平进一步提高时,海泡石粘土沉积让位于磷质沉积^[68, 69]。即华南栖霞期沉积环境水体富营养程度还未达到发育磷质沉积的程度。

但是,造成生物产率波动的原因仍然需要进一步的研究。北美西部磷矿组(Phosphoria Formation)与栖霞组大体同期,其中沉积的 P_2O_5 量达到 1.7×10^{12} 吨,相当于现代海水中含磷总量 6 倍以上^[70]。磷矿组大量磷质的沉积,固然与其当时所处的古地理条件有关(上升流),但是也反映了当时特殊的古海水化学特征。栖霞组富有机质碳酸盐岩沉积,是二叠纪超饱和——富营养海水的直接反映,是上升流影响的结果,是巨季风体制下大气粉尘刺激的全球高生物产率的结果,还是特殊的古地理格局和古洋流组合的结果,都有待我们进一步研究解决。

另外,上述栖霞组沉积韵律,从外貌上与灰岩—泥灰岩韵律极为相似。有人认为灰岩—泥灰岩韵律的形成,与泥质物质在原始沉积物中的差异分布(剖

岩性	成岩作用特征	环境解释
灰色厚层块状生屑灰岩,有机质含量低。	早期胶结良好,生物碎屑保存完好,晚期成岩压实作用影响较小。	正常浅海陆棚碳酸盐环境,富溶解氧、贫营养盐环境。
灰黑色层纹状含海泡石灰岩,有机质含量较高。	早期成岩作用中形成海泡石,晚期成岩压实作用影响明显	富营养水体,较高生物产率,导致环境缺氧。

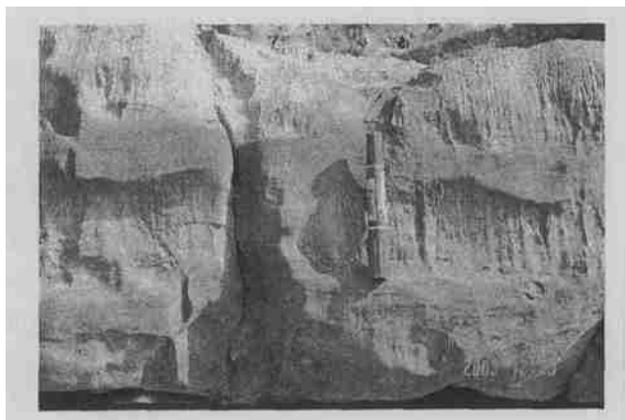


图 2 栖霞组生物碎屑灰岩—含海泡石灰岩韵律特征与成因解释

Fig. 2 Characteristics and origin of Chihhsian rhythmite consisting of limestone and sepiolite-bearing limestone

面上)有关;最新研究认为,其成因与文石在泥灰岩段中的溶解有关^[14, 71]。如果栖霞组上部的泥质(海泡

石)形成于早期成岩作用,上述两种模式如何解释海泡石在栖霞组岩石韵律中的差异分布呢,对我们深入了解灰岩—泥灰岩韵律成因有和启示呢?重要的是,栖霞组内原生文石的稳定转换导致了天青石的发育,高镁方解石的稳定转换形成了海泡石,前者主要分布于块状灰岩内,后者主要分布在层纹状灰岩内,这是否意味着栖霞组内韵律的成因与原生碳酸盐矿物成分有关,即是否存在富文石段与富高镁方解石段的交替旋回;若有,其古海洋意义如何?还有,栖霞组内原生碳酸盐矿物稳定转换时,形成了天青石和海泡石,这在地史中是极为罕见的。那么,早期成岩成因的天青石和海泡石形成的制约条件是什么?

因此,从碳酸盐沉积学的角度看,栖霞组成因具有重要的理论意义和经济意义。目前我们看到的仍然可能只是冰山一角,更多的仍有待我们进一步发掘。栖霞组得天独厚的地质条件,为我们探索这些问题提供了难得的机会和条件。

参考文献(References)

- 1 黄思静. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究. 地质学报, 1997, 71(1): 45~53 [Huang Sijing. A study on carbon and strontium isotopes of Late Paleozoic carbonate rocks in the Upper Yangtze Platform. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(1): 45~53]
- 2 Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ^{13}C and ^{18}O evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 1999, 161: 59~88
- 3 吕炳全, 翟建军. 下扬子地区早二叠世海进和上升流形成的缺氧环境的沉积. 科学通报, 1989, 22: 1721~1724 [Lu Binquan, Zhai Jianjun. Early Permian oxygen-deficient deposits of transgression and upwelling in origin in the Lower Yangtze Region. *Kexue Tongbao*, 1989, 22, 1721~1724]
- 4 颜佳新, 陈北岳, 李思田, 等. 鄂湘桂地区栖霞组古氧相分析与层序地层和海平面变化. 地质论评, 1997, 43(2): 193~199 [Yan Jiaxin, Chen Beiyue, Li Sitian, et al. Oxygen-related facies and sequence stratigraphy as well as sea-level changes in the Chihhsia Formation of Hubei, Hunan and Guangxi area. *Geological Review*, 1997, 43(2), 193~199]
- 5 吴胜和, 冯增昭, 何幼斌. 中下扬子地区二叠纪缺氧环境研究. 沉积学报, 1994, 12(2): 29~36 [Wu Shenhe, Feng Zengzhao, He Youbin. Study on anoxic environments of Permian in the Middle and Lower Yangtze Region. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 29~36]
- 6 颜佳新, 徐四平, 李方林. 湖北巴东栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征. 岩相古地理, 1998, 18(6): 27~32 [Yan Jiaxin, Xu Siping, Li Fanglin. Geochemistry of aerobic depositional environment of Qixia Formation in Badong, Hubei Province. *Lithofacies and Palaeogeography*, 1998, 18(6), 27~32]
- 7 施春华, 黄秋, 颜佳新. 广西来宾栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(2): 72~77 [Shi Chunhua, Huang Qiu, Yan Jiaxin. Geochemistry of the dysaerobic sedimentary environments of the Qixia Formation in Laibin, Guangxi. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2001, 21: 72~77]
- 8 颜佳新, 方念乔. 湖北省栖霞组沉积环境, 沉积旋回及层序地层划分. 地球科学, 1994, 19(5): 620~626 [Yan Jiaxin, Fang Nianqiao. Depositional environments, cycles and sequences of Chihhsia Formation in Hubei Province. *Earth Science*, 1994, 19(5), 620~626]
- 9 颜佳新, 杜远生. 冰川发育对赤道地区碳酸盐沉积环境和沉积作用的影响. 地质科技情报, 1994, 13(3): 48~56 [Yan Jiaxin, Du Yuansheng. The influence of glaciation on low latitude shelf carbonate sedimentary environment and sedimentation: three cases from South China. *Geol. Sci. and Technol. Information*, 1994, 13(3), 48~56]
- 10 Ziegler A M, Gibbs M T, Hulver M L. A mini-atlas of oceanic water masses in the Permian Period. In: Shi G R, Archibold N W, Grover M, eds. *The Permian of Eastern Tethys: Stratigraphy, Palaeogeography and Resources*. Melbourne: The Royal Society of Victoria, 1998. 323~343
- 11 Shi G R, Grunt T A. Permian Gondwana-Boreal antitropicality with special reference to brachiopod faunas. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 2000, 155: 239~263
- 12 Shi G R. Possible influence of Gondwana glaciation on low-latitude carbonate sedimentation and trans-equatorial faunal migration: the Lower Permian of South China. *Geosciences Journal (Seoul)*, 2001, 5(1): 57~63
- 13 Yan J X, Carlson E H. Nodular celestite in the Chihhsia Formation (Middle Permian) of South China. *Sedimentology*, 2003, 50: 265~278
- 14 Westphal H, Munnecke A. Limestone-marl alternations: a warmwater phenomenon? *Geology*, 2003, 31(3): 263~266
- 15 Wang Y, Jin Y G. Permian palaeogeographic evolution of the Jiangnan Basin, South China. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 2000, 160(1-2): 35~44
- 16 Summerhayes C P. Upwelling system: evolution since Early Miocene. *Geological Society Special Publication*, London, 1992, 64: 1~519
- 17 Summerhayes C P. Upwelling in the ocean: modern processes and ancient records. Report of the Dahlem workshop, Berlin, 1994. 1~422
- 18 Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(4): 454~466
- 19 Sageman B B. Stratigraphic hierarchy of organic carbon-rich siltstones in deep-water facies, Brushy Canyon Formation (Guadalupian), Delaware Basin, West Texas. *Geology*, 1998, 26(5): 451~454
- 20 沙庆安, 吴望始, 傅家谟. 黔桂地区二叠系综合研究-兼论含油气性. 北京: 科学出版社, 1990. 1~215 [Sha Qing'an, Wu Wanshi, Fu Jiamu. Comprehensive research on Permian in Guizhou-Guangxi area and its petroleum potential. Beijing: Science Press, 1990. 1~215]
- 21 毕华. 栖霞组燧石结核成因新证据. 地层学杂志, 1994, 18(4): 214~216 [Bi Hua. New evidences for the origin of the Chihhsian chert nodules. *Journal of Stratigraphy*, 1994, 18(4), 214~216]
- 22 朱嗣昭. 赣西湘东地区下二叠统沉积中水玉髓的研究. 见: 王英华, 鲍志东, 朱筱敏编, 沉积学及岩相古地理学新进展. 北京: 石油工业出版社, 1995. 53~55 [Zhu Sizhao. Lutecite in the Lower Permian of Eastern Hunan—Western Jiangxi area. In: Wang Yinhua, Bao Zhidong, Zhu Xiaoming, eds. *Progress in Sedimentology and Lithofacies*. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 1995. 53~55]
- 23 何海清. 浙江省栖霞组沉积微相, 韵律, 沉积旋回及层序地层分析. 石油实验地质, 1997, 19(2): 127~130 [He Haiqing. Depositional microfacies, rhythms, cycles and sequence stratigraphy of Qixia Formation in Zhejiang Province, China. *Experimental Petroleum Geology*, 1997, 19(2): 127~130]
- 24 颜佳新. 论华南栖霞组中的菊花石. 岩相古地理, 1992, 12(1): 47~51 [Yan Jiaxin. Reviews on the chrysanthemum stones from the Qixia Formation in South China. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1992, 12(1): 47~51]
- 25 Baker B K, Bloomer S H. The origin of celestite in deep-sea carbonate sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1988, 52: 335~339
- 26 Melim L A, Westphal H, Swart P K, et al. Questioning carbonate diagenetic paradigms: evidence from the Neogene of the Bahamas. *Marine Geology*, 2002, 185: 27~53
- 27 Canfield D E. Sulfate reduction in deep-sea sediments. *American Journal of Science*, 1991, 291(2): 177~188
- 28 Capone D G, Kiene R P. Comparison of microbial dynamics in marine and freshwater sediments: contrasts in anaerobic carbon catabolism. *Limnol. Oceanogr.*, 1988, 33: 725~749
- 29 施春华, 颜佳新. 早期成岩作用过程中硫酸盐还原作用研究进展. 广西地质, 2001, 14(1): 21~26 [Shi Chunhua, Yan Jiaxin, Han Xin.

- Development of sulfate reduction during early diagenesis. *Guangxi Geology*, 2001, 14(1): 21 ~ 26]
- 30 李文光. 海泡石矿的成矿地质条件. *吉林地质*, 1999, 18(3): 61 ~ 67 [Li Wenguang. The ore-forming geological features of sepiolite deposit and its prespective for prospecting ore. *Jilin Geology*, 1999, 18(3): 61 ~ 67]
- 31 李文光, 张瑛. 我国海泡石矿床成矿条件及成因类型初探. *陕西地质*, 1999, 17(1): 43 ~ 47 [Li Wenguang, Zhang Ying. A preliminary discussion on the ore-forming conditions and genetic types of sepiolite deposits in China. *Geology of Shaanxi*, 1999, 17(1): 43 ~ 47]
- 32 暨雄卓. 海泡石原矿加工与橡胶应用研究. *中国矿业*, 1998, 7(6): 79 ~ 81 [Ji Xiongzhuo. Researches on processing sea form and applying it in rubber. *China Mineral-Resources Industry*, 1998, 7(6): 79 ~ 81]
- 33 周时光. 朝天海泡石矿的开发利用方向. *中国非金属矿工业导刊*, 2000, No. 17: 42 ~ 45 [Zhou Siguang. Exploration and utility of the Chaotian sepiolite. *Chinese Bulletin of non-metallic Mine Industry*, 2000, No. 17: 42 ~ 45]
- 34 Singer A, Galan E. Palygorskite-sepiolite: occurrences, genesis and uses. Amsterdam: Elsevier, 1984. 1-352
- 35 杨振强, 陈善庆, 林金明, 等. “江南古陆”两侧早二叠世海泡石的形成环境及成矿预测. *岩相古地理文集*, 北京: 地质出版社, 1991. 1 ~ 46 [Yang Zhengqiang, Chen Shanqing, Lin Jinming, *et al.* Sedimentary environments and forecast prospect of the Early Permian sepiolite deposits around the “Jiangnan Old Land”. *Collections of Lithofacies and Palaeogeography*, Beijing: Geological Publishing House, 1991. 1 ~ 46]
- 36 章人俊, 邱翠微, 彭长琪, 等. 湖南醴陵地区镁质粘土的特征及成因讨论. *中国地质科学院宜昌地矿所所刊*, 1985, (9): 1 ~ 13 [Zhang Renjun, Qiu Cuiwei, Peng Changqi, *et al.* The characteristics of magnesium-rich clay in Liling area, Hunan Province and a discussion on its genesis. *Bull. Yichang Inst. Geol. Mineral Resources, CAGS*, 1986, .9: 1 ~ 13]
- 37 杨振强, 许俊文. 萍乐拗陷海泡石的形成及后期变化. *中国地质科学院宜昌地矿所所刊*, 1986, 12: 31 ~ 51 [Yang Zhengqiang, Xu Junwen. The formation and post-sedimentary alternation of sepiolite in the Pingle Depression. *Bull. Yichang Inst. Geol. Mineral Resources, CAGS*, 1986, No. 12: 31-51]
- 38 Liu D Y. Sedimentary sepiolite of the Early Permian period in South China. *Clay Minerals*, 1985, 20(4): 529 ~ 535
- 39 任磊夫. 粘土矿物与粘土岩. 北京: 地质出版社, 1992. 135 ~ 136 [Ren Leifu. *Clay minerals and rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 135 ~ 136]
- 40 颜佳新, 夏琼霞, Carlson E H. 华南栖霞组菊花石假象内正延性玉髓的成因及其地质意义. *沉积学报*, 2001, 19(3): 444 ~ 448 [Yan Jiixin, Xia Qionxia, Carlson E H. Length-slow chalcedony in chrysanthemum stone of Chihsia Formation, South China and its geological implication. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 444 ~ 448]
- 41 Sandberg P A. An oscillating trend in Phanerozoic nonskeletal carbonate mineralogy. *Nature*, 1983, 305: 19 ~ 22
- 42 颜佳新, 伍明, 李方林, 等. 湖北省巴东栖霞组沉积成岩作用地球化学特征研究. *沉积学报*, 1998, 16(4): 78 ~ 84 [Yan Jiixin, Wu Ming, Li Fanglin, *et al.* Geochemistry of sedimentation and diagenesis in Qixia Formation (Early Permian) of Badong, Hubei Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(4): 78 ~ 84]
- 43 颜佳新, 施春华, 李军虹, 等. 华南地区栖霞组菊花状天青石的交代及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(1): 75 ~ 83 [Yan Jiixin, Shi Chunhua, Li Junhong, *et al.* Replacement of chrysanthemum-shaped celestite in the Chihsia Formation of South China and its geological implication. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(1), 75 ~ 83]
- 44 颜佳新, 张宽忠, Carlson E H. 华南地区栖霞组“菊花石”假象与海泡石矿成因关系探讨. *矿物岩石*, 2000, 20(4): 1 ~ 5 [Yan Jiixin, Zhang Kuanzhong, E H Carlson, Remarks on origin of sepiolite with evidences from replacement history of nodular celestite in the Chihsia Formation of South China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2000, 20(4): 1 ~ 5]
- 45 Mu X N, Riding R. Silicification of Permian calcareous algae from Nanjing, China. *Geological Magazine*, 1988, 125(2): 123 ~ 139
- 46 Bentor Y K. Phosphorites: the unsolved problem. *SEPM Special Publication 29*, 1980. 3 ~ 18
- 47 Odin G S, Letolle R. Gauconitization and phosphatization environments: a tentative comparison. *SEPM Special Publication 29*, 1980. 227 ~ 237
- 48 Allison M A, Riggs S R. Clay-mineral suites in cyclic Miocene sediments: a model for continental margin deposition in a mixed siliciclastic-phosphatic-dolomitic-biogenic system. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64(2): 386 ~ 395
- 49 Riggs S R. Paleooceanographic model of Neogene phosphate deposition, U S Atlantic continental margin. *Science*, 1984, 223: 123 ~ 131
- 50 Baker P A, Burns S J. Occurrence and formation of dolomite in organic-rich continental margin sediments. *AAPG Bulletin*, 1985, 69: 1917 ~ 1930
- 51 颜佳新. 非热带浅海碳酸盐岩研究新进展. *地质科技情报*, 1991, 10(4): 15 ~ 18 [Yan Jiixin. Reviews on the non-tropical shelf carbonates. *Geol. Sci. and Technol. Inform.*, 1991, 10(4), 15 ~ 18]
- 52 James N P. The cool-water carbonate depositional realm. *SEPM Special Publication*, 1997, 56: 1-20
- 53 Hallock P, Schlager W. Nutrient excess and the demise of coral reefs and carbonate platforms. *Palaos*, 1986, 1: 389 ~ 398
- 54 Murchey B L, Jones D L. A mid-Permian chert event: widespread deposition of biogenic siliceous sediments in coastal, island arc and oceanic basins. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 1992., 96: 161 ~ 174
- 55 Kidder D L, Erwin D H. Secular distribution of biogenetic silica through the Phanerozoic: comparisons of silica-replaced fossils and bedded cherts at the series level. *The Journal of Geology*, 2001, 110: 509 ~ 522
- 56 Beauchamp B, Baud A. Growth and demise of Permian biogenic chert along northwest Pangea: evidence for end-Permian collapse of thermohaline circulation. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, 2002, 184: 37 ~ 63
- 57 Grotzinger J P, Knoll A H. Anomalous carbonate precipitates: is the Precambrian the key to the Permian? *Palaio*, 1995, 10: 578 ~ 596
- 58 Lowenstein T K, Timofeeff M N, Brennan S T, *et al.* Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: Evidences from fluid inclusions. *Science*, 2001, 294: 1086 ~ 1088
- 59 Kovalevich V M, Peryt T M, and Petrichenko O I. Secular variations in seawater chemistry during the Phanerozoic as indicated by brine inclusion

- in halite: The Journal of Geology, 1998, 106: 695 ~ 712
- 60 Parrish J T. Climate of the supercontinent Pangea. The Journal of Geology, 1993, 101: 215 ~ 233
- 61 颜佳新. 东特提斯地区二叠—三叠纪古气候特征及其古地理意义. 地球科学, 1999, 24(1): 13 ~ 20 [Yan Jiaxin. Permian-Triassic paleoclimate of eastern Tethys and its paleogeographic implication. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(1), 13 ~ 20]
- 62 Tabor N J, Montanez I P. Shifts in late Paleozoic atmospheric circulation over western equatorial Pangea: insights from pedogenic mineral ^{18}O compositions. Geology, 2002, 30(12): 1127 ~ 1130
- 63 Rees P M, Ziegler A M, Gibbs M T, *et al.* Permian phytogeographic patterns and climate data/ model comparisons. The Journal of Geology, 2002, 110(1): 1 ~ 31
- 64 Gibbs M T. Simulations of Permian climate and comparisons with climate-sensitive sediments. The Journal of Geology, 2002, 110(1): 33 ~ 55
- 65 Boyd P W. A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. Nature, 2000, 407: 695 ~ 702
- 66 Soreghan G S, Soreghan M J. Atmospheric dust and algal dominance in the Late Paleozoic: a hypothesis. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(4): 457 ~ 461
- 67 Shimizu H. Sources and depositional environments of some Permian and Triassic cherts: significance of Rb-Sr and Sm-Nd isotopic and REE abundance data. The Journal of Geology, 2001, 109: 105 ~ 125
- 68 Millot G. Geology of Clays. New York: Springer Verlag, 1970, 262 ~ 276
- 69 McClellan G H, Van Kauwenbergh S J. Clay mineralogy of the phosphorites of the southeastern United States. In: Burnett W C, Riggs S R, eds. Phosphate deposits of the world, Vol. 3, Neogene to Modern Phosphorites. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 337 ~ 351
- 70 Sheldon R P. Phosphorite deposits of the Phosphoria Formation, western United States. In: Notholt A J G, Sheldon R P, Davidson D F, eds. Phosphate deposits of the world, Vol. 2, Phosphate rock resources. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 53 ~ 70
- 71 Munnecke A, Westphal H, Erick M, *et al.* The mineralogical composition of precursor sediments of calcareous rhythmites - a new approach. International Journal of Earth Sciences, 2001, 90: 795 ~ 812

Origin of Permian Chihhsian Carbonates from South China and Its Geological Implications

YAN Jia-xin

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract The Permian Chihhsia Formation of South China is a unique carbonate succession, which is rich in organic matter and chert nodule, and is characterized by the great lateral persistence with little variation in lithofacies and strata thickness. Two special diagenetic minerals, nodular celestite and sepiolite, are developed in the carbonate succession. Comprehensions on the origin of the above-mentioned features implied that oxygen-deficient environmental condition was a critical controlling factor among these features. Based on sedimentary features of the carbonate succession, it was proposed that the Chihhsian deficient environments were derived from relatively high bioproductivity. This explanation is compatible with recent advancements in the Permian paleoclimatology and paleoceanography, but further work on the origin of the high bioproductivity is still desired.

Key words South China, Permian, Chihhsia Formation, bioproductivity