

# 从地球生物学角度讨论华南中二叠世海相烃源岩缺氧沉积环境成因模式

颜佳新<sup>1,2</sup>, 刘新宇<sup>1</sup>

1. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 探讨陆棚环境缺氧沉积的成因, 对查明海相优质烃源岩时空分布、恢复地史时期古环境演化具有重要意义。华南地区中二叠世栖霞组有机质丰富, 出现多方面缺氧沉积特征, 同时多门类底栖生物繁盛, 其成因一直令人困惑。简要介绍了陆棚浅海缺氧环境的生物特征及古氧相划分, 分析了栖霞组一个由纹层状灰岩和块状灰岩组成的典型的沉积序列的古氧相特征。块状灰岩的生物特征和地球化学特征均指示常氧沉积环境; 而纹层状灰岩的生物特征偏向常氧相, 沉积地球化学特征偏向厌氧相, 体现了陆棚缺氧沉积环境水体溶氧量不稳定的特点。栖霞组沉积特征表明, 栖霞组缺氧沉积环境的频繁出现与较高的生物产率有关。结合区域古地理和古特提斯古海洋背景, 认为华南地区中二叠世缺氧环境的成因与当时陆海分布格局和古海洋表面洋流系统有关。

**关键词:** 华南地区; 中二叠世; 缺氧; 古氧相; 模式。

中图分类号: P736.22

文章编号: 1000-2383(2007)06-0789-08

收稿日期: 2007-08-26

## Geobiological Interpretation of the Oxygen-Deficient Deposits of the Middle Permian Marine Source Rocks in South China: A Working Hypothesis

YAN Jia-xin<sup>1,2</sup>, LIU Xin-yu<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074 China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** To decipher the origin of oxygen-deficient shelf deposits is significant for tracing the distributions of marine hydrocarbon source rocks and interpreting the evolution of depositional environments. The origin of the Middle Permian Chihhsian Formation from South China remains a puzzle for long, with its evident oxygen-deficient features associated with diverse benthos. This paper introduce briefly the nature of oxygen-deficient shelf environment as well as subdivision of related paleoxygenation facies, and shows a typical Chihhsian depositional sequence with ecological and geochemical features. Massive bioclastic limestone from the middle of the sequence was believed to be formed under the aerobic conditions supporting by both ecological and geochemical features. However, a contradictory conclusion is observed for "laminated" limestones from the lower and upper parts of the sequence; the aerobic ecological signal was associated with the anoxic geochemical record. The association of contradictory signals in ecology and geochemistry was here interpreted as the instability of paleoxygenation condition in shelf environment, caused by enhanced paleoproductivity. Repetitive occurrence of oxygen-deficient condition might have been stemmed from paleo-Tethyan currents flowing across the South China.

**Key words:** South China; Middle Permian; oxygen-deficient; paleoxygenation facies; model.

川东北普光海相碳酸盐岩大气田的突破性进展, 预示了我国南方海相碳酸盐岩良好的油气勘探前景, 也使人们对我国南方探区寄予了更大的希望。中—上二叠统的暗色富有机质泥质灰岩和页岩是其

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 40472062); 中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目(No. G0800-06-ZS-319)。

作者简介: 颜佳新(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积地质学研究工作。E-mail: jxyan@cug.edu.cn

中主力烃源岩之一(蔡立国等, 2005; 马永生等, 2005)。查明这些富有机质海相碳酸盐沉积的时空分布规律与成因, 对推动我国南方海相探区油气地质勘探、深入认识海相碳酸盐岩烃源岩的贡献均有重要的意义。

海相中二叠统包括传统的栖霞组、茅口组及相当层位地层, 在南方出露广泛, 地层学和沉积学研究程度均较高。但是由于各学科关注重点的差别, 对该套富含有机质沉积的成因认识, 对沉积环境水体溶氧状况及相应的沉积特征和成因, 仍存在很多问题。本文在简要介绍浅海陆棚缺氧环境特征与古氧相划分的基础上, 将重点分析一个栖霞组典型的沉积序列, 探讨古氧相特征在地层剖面中的分布。并结合作者近年对该套地层的沉积学研究, 从地球生物学角度讨论该缺氧沉积环境的成因, 为进一步的深入研究提供一个工作模型, 对其他时代类似陆棚环境缺氧沉积成因研究也有借鉴意义。

## 1 浅海陆棚缺氧环境特征与古氧相划分

Rhoads and Morse (1971) 通过整理黑海、加利福尼亚湾大陆边缘的生物—水深关系资料, 发现对应水体溶氧量  $> 1 \text{ mL/m}$ 、 $1.0 \sim 0.1 \text{ mL/m}$  和  $0.1 \sim 0.0 \text{ mL/m}$  三个区间内的生物面貌(动物群分异度、壳质钙化程度、个体大小、营养状况以及生物扰动强度等)差异极大, 分别命名为 aerobic(常氧)、dysaerobic(贫氧)和 azoic(无生物)生物相(azoic 后来被修订为 anaerobic—“厌氧”), 成为缺氧沉积环境划分和识别的基础。aerobic 带生物丰富, 生物扰动强烈, 沉积物纹层构造难以保存; anaerobic 带几乎不含什么生物, 沉积纹层保存良好; dysaerobic 带后生动物的生命活动受到很大限制, 随着水体溶氧量的降低, 生物扰动强度逐渐减弱, 沉积物纹层构造可得到较好的保存。因而生物生态特征和沉积物沉积特征一直是识别缺氧沉积的两个重要方面, 贫氧相是其中的敏感和关键部分。

但是, Rhoads and Morse (1971) 模型依据的是大陆边缘环境, 那里水体低溶氧量主要与大洋中部贫氧层有关, 水体溶氧状况相对稳定、生物已基本上适应低氧环境。而地质学研究的目的层大多数属于浅海陆棚环境。相对于大陆边缘, 浅海陆棚环境水体

溶氧量不稳定、变化幅度大, 生物群落对溶氧变化的适应性差。另外, 浅海环境不同生物对水体溶氧量变化的敏感程度也各不相同, 它们与其生活方式、迁移能力、个体大小、对  $\text{H}_2\text{S}$  的耐受程度及环境温度密切相关。有些生物耐受性差 (Stenoxic, 狭氧性), 有些耐受性好 (Euryoxic, 广氧性)。因而不同学者对 dysaerobic 带生物相特征一直存在不同认识, 提出了一系列相近的生物相名称。例如, Koutsoukos 等人将缺乏大化石, 但是含有原地底栖微体化石的纹层状沉积称为“quasi-anaerobic”(准厌氧生物相), Savrda 和 Bottjer 将含带壳生物群的纹层状沉积称为“exaerobic”(常氧边缘相), 以及 Hallam 的“shelly laminate”(壳质纹层相)、Sageman 的“benthic boundary biofacies”(底栖边界相)、Oschmann 的“Poikiloaerobic”(变氧相, 溶氧发生季节性变化)等 (Tyson and Pearson, 1991)。从上述讨论也可以看出, 陆棚缺氧沉积环境的生物相特征记录了水体的溶氧特征, 但是古生态特征反映的是沉积期间水体溶氧条件变化的平均值, 即一段时间内的总体特征。

在缺氧沉积研究中, 术语的统一也是一个重要问题。除上述以生物相为基础的地质术语外, 化学和地球化学研究广泛使用的是“oxic”(常氧)、“suboxic”(贫氧)、“anoxic”(厌氧)。“oxic”指的是在有机质成岩驱动的氧化还原反应中, 可以自由获得分子氧作为氧化剂。在“suboxic”环境下, 氧化还原电势急剧变化, 可出现硝酸盐还原反应。在“anoxic”环境中, 氧化剂中已没有分子氧, 出现硫酸盐反应。很明显, 这些术语含义明显不同于生物相术语, 应用范围已延伸至早期(同生)成岩环境(沉积物/水界面之下) (Tyson and Pearson, 1991)。即沉积物的地球化学特征包含了从水体到沉积物再到(早期)成岩作用全过程的综合信息。在海洋生物学和生态学中, 也有类似的术语, 如“normoxic”(常氧)、“hypoxic”(贫氧)、“anaerobic”(厌氧), 但是并无严格定义。为此, Tyson and Pearson (1991) 提出了表 1 的统一方案, 得到了广泛接受和认可。

Tyson and Pearson (1991) 的方案着重考虑了陆棚浅海环境溶氧量的变化速度快、幅度大, 生物对低溶氧量适应性差的特点。特别是当溶氧量降低时, 生物反映明显。如当水体溶氧量降低至  $2.0 \sim 1.0 \text{ mL/L}$  时, 游泳和表栖移动生物会出现避让和迁移的现象。在没有其他逃生路径时, 它们会拥向海岸带

表 1 古氧相划分及相应术语中文翻译(划分方案据 Tyson and Pearson 1991)

Table 1 Terminology for low oxygen regime and the resulting biofacies in marine environments

水体溶氧量(mL/L)	水体环境古氧相	生物相	现生生物
8.0~2.0	Oxic(常氧)	Aerobic(常氧)	Normoxic(常氧)
2.0~0.2	Dysoxic(贫氧)		
2.0~1.0	Moderate(轻度贫氧)	Dysaerobic(贫氧)	
1.0~0.5	Severe(中度贫氧)		hypoxic(贫氧)
0.5~0.2	Extreme(极贫氧)		
0.2~0.0	Suboxic(准厌氧)	Quasi-anaerobic(准厌氧)	
0.0 (H <sub>2</sub> S)	Anoxic(厌氧)	anaerobic(厌氧)	Anoxic(厌氧)

导致大批死亡。当水体溶氧量降至 1.4~1.0 mL/L 时, 狭氧性底栖生物表现明显, 内栖生物逐渐出洞, 深内栖广氧性生物双壳停止掘进、水管伸长, 大多数双壳开始“打哈欠”, 其他移动底栖生物迁移至“相对高地”。当水体溶氧量再降低至 1.0~0.7 mL/L 时, 广氧性内栖生物也开始出洞, 先是小个体, 随后较大个者。当水体溶氧降至 1.0~0.5 mL/L 时, 所有生物表现出惰性。考虑到上述陆棚环境中生物对水体溶氧量变化的特殊情况, Tyson and Pearson (1991) 将贫氧环境水体溶氧量上限由 1.0 提升到 2.0 mL/L, 下限由 0.1 提到 0.2 mL/L, 并以倍数和半数的方式进一步细分(表 1)。0.2 mL/L 既是生物扰动的极限和溶氧测定方法的下限, 也是大多数浮游生物生活的下限, 同时出现硝酸盐还原反应。水体溶氧量考虑的是沉积物/水界面(SWI)之上 0.5~1 m 范围内的底部水体。

在中文文献中, 有关术语的翻译也值得讨论。为便于讨论和交流, 本文建议根据水体溶氧状况, 将沉积环境两分为常氧(aerobic, oxic, normoxic)沉积环境和缺氧(oxygen-deficient)沉积环境两类。古氧相维持原定义, 指反映地层(或沉积物)形成时沉积环境水体中, 特别是底层水体中溶氧量特征及其变化的各种岩石、生物和地球化学特征等的综合(颜佳新和张海清, 1996)。oxic, aerobic, normoxic 三个词含义相同, 前两个词一般翻译为“富氧”, 但是给人以水体溶氧“充足、富余”的感觉, 不如参照“normoxic”一词, 全部翻译为“常氧”更为妥帖。这样古氧相包括: 常氧相、贫氧相、准厌氧相、厌氧相(表 1)。

由于沉积地球化学中常用的“oxic, suboxic, anoxic”已经涉及到沉积物/水界面(SWI)之下的准同生成岩作用, 建议分别使用“有氧”、“贫氧”和“厌氧”, 并分别加上“成岩”等, 以示区别, 如“有氧呼

吸”、“有氧成岩环境”。

## 2 栖霞组缺氧沉积特征

华南地区二叠纪栖霞组缺氧沉积特征较为丰富, 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; (2) 有机相特征(浅海缺氧无定形有机相); (3) 特殊的古生态特征和遗迹组构特征; (4) 沉积古地理特征(低能、局限); (5) 部分微量元素比值(颜佳新, 2004)。另外, 栖霞组很多的特殊性也与缺氧沉积环境有着密切的成因联系, 如栖霞组特殊的天青石结核(菊花石)、丰富的海泡石矿藏, 栖霞组岩相和地层厚度在空间上的稳定性, 以及栖霞组碳酸盐岩缺乏生物礁等特征(颜佳新, 2004)。

另一方面, 栖霞组内也发育大量反映常氧环境的沉积学标志, 如大量浅水底栖生物的繁盛。因此在目前情况下, 要深入了解栖霞组沉积环境古氧相特征, 与其罗列更多地点、更多剖面的缺氧沉积学标志, 不如解剖一个典型的栖霞组沉积序列更有意义。

前期研究表明, 典型的栖霞组灰岩层由三部分组成, 中部为生物碎屑块状灰岩, 上部和下部为层纹状灰岩(图 1A)。两者交替构成栖霞组韵律, 韵律在全球海平面变化影响下, 再组成栖霞组特有的沉积旋回(颜佳新和方念乔, 1994; 颜佳新等, 1997)。在中部的块状灰岩段内, 生物碎屑丰富, 生物分异度高(有些由微晶灰岩构成), 有机质含量较低, 正常浅水陆棚常氧生物组合和沉积特征均发育在此微相内, 明显为常氧环境产物。

在顶部和底部层纹状灰岩中, 有机质含量较高, 含海泡石, 生物碎屑种类单调。常见的生物碎屑有介形虫、有孔虫、腕足碎片、苔藓虫碎片和三叶虫碎片等, 其余多为细粒难以识别门类的生物碎屑(图 1D)。生物碎片大体成定向排列(图 1D), 并遭受强

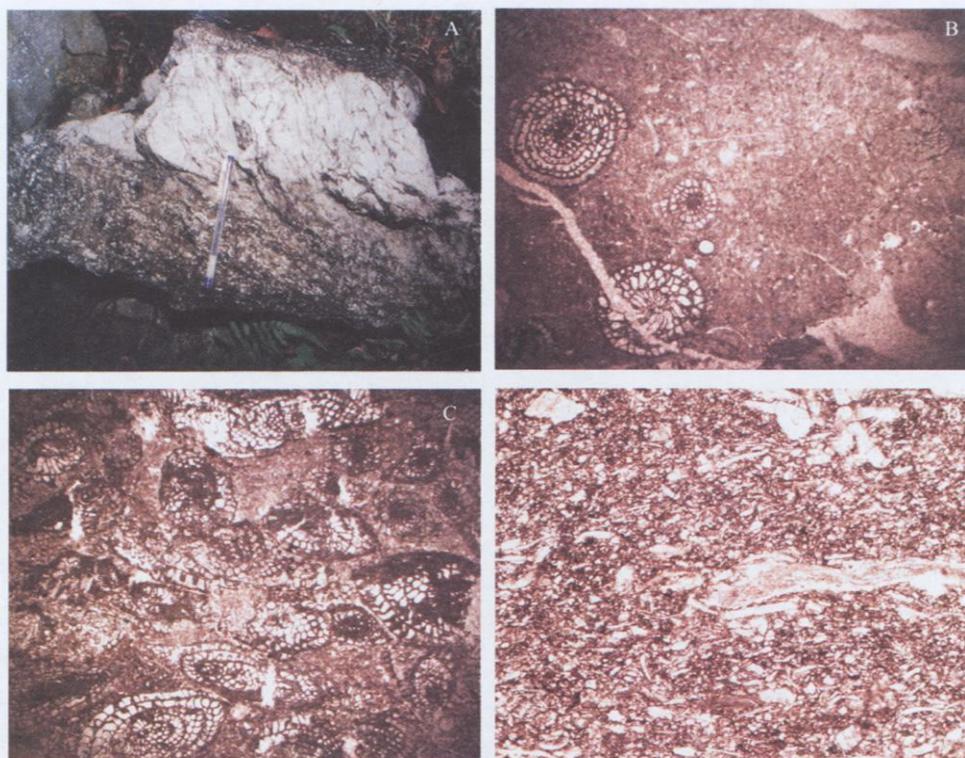


图 1 A 为栖霞组典型沉积序列野外照片, 江西萍乡慈化; B 为照片 A 中部(CH-10)显微照片(X5); C 为照片 A 中部(CH-13)显微照片(X5); D 层纹状灰岩显微照片(X5, 广西来宾栖霞组中部)

Fig. 1 Photography of Chihhsia limestone. A. Exposure of a typical Chihhsian limestone bed with plenty fusulinid in its lower and top parts Cihua, Jiangxi; B. Microphotography of sample CH-10 from the middle of the sampled bed; C. Microphotography of sample CH-13 from the upper part of the sampled bed; D. Microphotography of Chihhsian laminated limestone from the Tieqiao section, Laibin of Guangxi

烈成岩压实作用影响. 在有些海泡石含量较低的层段, 可发育燧石结核.

本次研究选取的作为分析测试重点的灰岩韵律产于江西萍乡慈化剖面栖霞组中部, 该段地层主要为中厚层状生物碎屑灰岩. 在连续 4 层含燧生物碎屑灰岩中, 选取第 3 层(厚约 30 cm)进行连续取样(从下往上取样 8 块)(图 1A). 燧生物碎屑见于整个取样灰岩层内, 但是在下部和顶部密集(图 1A, 1B). 从生物组合角度看, 该灰岩层含有大量的浅水底栖生物燧化石, 应该形成于常氧环境. 下部和顶部燧生物碎屑灰岩外观发育层纹状构造, 颜色较深. 镜下检查有机质含量较高, 成岩压实作用明显(缝合线, 以及部分燧壳有压碎现象)(图 1C). 这些层纹状构造通常被认为是原来的层理, 只是明显受到成岩压实作用的强化. 若此, 则层纹状构造的成因与缺氧沉积环境有关, 但是富含常氧环境生物碎屑—燧.

选择常用的微量元素比值和黄铁矿矿化程度

(DOP)对其开展沉积地球化学分析测试, 结果见图 2. U/Th、Ni/Co 和 DOP 值表明, 中部灰岩层的沉积环境为常氧相, 下部和顶部灰岩层形成于缺氧沉积环境. V/(V+Ni)比值大体类似, 只是顶部有些异常. 但是, Ce/La 比值与此相反.

用 Ce/La 比值来反映沉积环境古氧相特征最早由白顺良等(Bai *et al.*, 1994)提出. 他们通过对华南泥盆纪缺氧沉积的稀土元素地球化学特征分析后认为, 铈异常值可用 Ce/La 比值代替, Ce/La 值 1.8 和 2.0 分别相当于铈异常值 -0.1 和 0. 当 Ce/La < 1.5 时为富氧环境, 1.5 ~ 1.8 时为贫氧环境, 大于 2.0 时为厌氧环境. 本次分析的 8 个样品有 7 个样品的 Ce/La 比值大于 2. 若此, 则几乎全部上述分析结果均属厌氧古氧相, 而且灰岩层的中部缺氧程度更甚. 与其他地化指标相比照, 现有对 Ce/La 比值的古氧相解释显然不合适, 因此, 必须重新考虑 Ce/La 比值的古氧相意义.

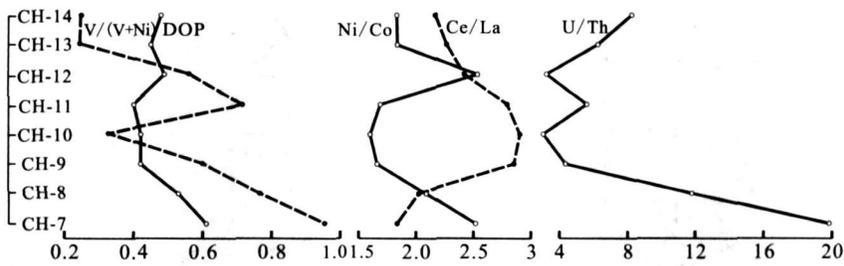


图 2 栖霞组典型沉积序列(图 1A)的地球化学特征

Fig. 2 Geochemical profiles of a typical limestone bed in Chihshian Stage (Fig. 1A)

Ce 和 La 均属稀土元素,前者为正四价,后者为正三价.在氧化环境和充氧条件下,沉降有机质趋向于吸附更多的  $Ce^{4+}$ ,而使得沉积物中  $Ce/La$  比值升高.灰岩层中部  $Ce/La$  比值明显高于其上部 and 下部纹层状含藻生物碎屑灰岩,说明其古氧相特征更趋于氧化条件.这样理解,则  $Ce/La$  比值反映的古氧相特征就完全与 DOP 等反映的古氧相条件一致.

上述沉积学和沉积地球化学分析测试结果正是华南地区栖霞组古氧相特征的缩影:从生物(碎屑颗粒)组合角度看,块状灰岩和层纹状灰岩层都形成于常氧环境;而从沉积地球化学分析结果看,层纹状含海泡石灰岩形成于缺氧环境,中部块状灰岩形成于常氧环境.

这种生物相特征与沉积地球化学特征存在明显差别的情形,是研究陆棚沉积环境古氧相时经常遇到的问题,各种指标的不一致常常引发认识上的分歧.如上所述,(1)陆棚沉积物和沉积岩反映的古氧相应该是一段时期内的平均结果,生物组合面貌也一样.(2)与大陆边缘和开阔大洋贫氧层环境相比,陆棚沉积环境水体溶氧量不稳定、变化速度快、变化幅度大.陆棚贫氧相水体溶氧量可以波动于常氧相和厌氧相之间.(3)由于常氧环境下生物的繁盛和强烈的生物扰动改造,短暂的充氧事件就可以使得陆棚缺氧沉积完全被改造,使其沉积特征和生物相特征更接近于常氧相特征,但是缺氧期间形成的沉积地球化学特征则可以保存下来(只要常氧环境持续短、沉积速率不是太低)(Tyson, 2007, 个人通信).因此,当前生物相特征与沉积地球化学特征的差异性,可能恰好说明了栖霞组总体上形成于一个频繁缺氧的浅水陆棚环境,而其中富含常氧生物的灰岩层则形成于短暂的充氧事件期间.

### 3 华南地区中二叠世缺氧环境成因模式讨论

关于栖霞组缺氧沉积环境成因,前人提出过 3 种模式:水体盐度分层模式、上升流模式、海侵模式.显然第一种模式是不可行的,因为栖霞期沉积环境整体较浅,难以维持持久的、稳定的水体分层.上述栖霞组典型沉积序列古氧相特征,与上升流沉积有相似之处,但是一般的大陆边缘上升流沉积,空间分布呈带状,剖面上往往为有机质—硅质—磷质沉积三位一体.栖霞组缺乏磷质沉积,明显与此不同(颜佳新, 2004).

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,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.海侵模式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(颜佳新, 2004).

较高的生产率可以使得水体耗氧增加,导致环境缺氧,有利于有机质的堆积和保存;生物产率的波动可使得沉积环境水体溶氧量发生波动,导致缺氧沉积与正常浅海碳酸盐沉积交替出现,形成栖霞组特有的沉积旋回.全岩稳定碳同位素测试表明,纹层状灰岩的  $\delta^{13}C$  明显比块状灰岩的高(颜佳新等, 1998),整个栖霞组灰岩的  $\delta^{13}C$  在华南晚生代碳酸盐岩地层中最高(黄思静, 1997),这些均支持栖霞期华南地区较高生物产率的推论.从古生态角度看,序列中部块状灰岩内,生物分异度高、个体较大、钙藻发育.而在纹层状含海泡石灰岩中,生物个体相对较小、属种组合单调、缺乏钙质藻类生物,相对富含有

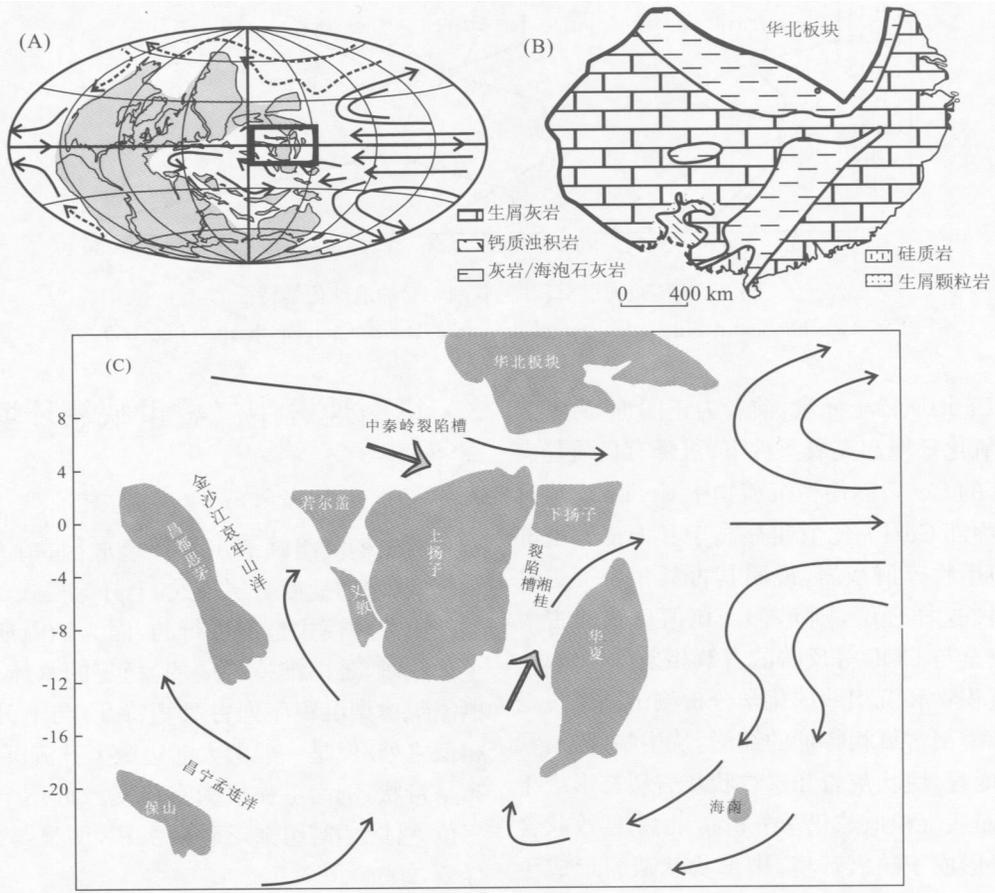


图 3 华南地区栖霞期表面洋流再造

Fig. 3 Paleocurrent reconstruction of the Chihsian Stage in the South China region

A. 栖霞期全球古大陆再造及古洋流格局, 方框内为华南地区 (Yan and Zhao, 2001); B. 华南地区二叠纪栖霞组岩相古地理; C. 华南地区栖霞期表面洋流再造 (地块分布据殷鸿福未刊资料)

机质. 这种块状灰岩到层纹状含海泡石灰岩的转变, 与水体营养物质增加、生物产率增加→小个体和肉质藻类繁盛→水体耗氧增加→环境缺氧的序列也是吻合的 (Hallock and Schlager, 1986). 栖霞期沉积特殊性 (暗色富有机质、富燧石结核、岩性和厚度空间稳定性好等) 的成因也可能与较高生物产率有关 (颜佳新, 2004).

依据下列事实推测, 华南地区栖霞期生物产率可能为中等偏高的程度, 低于典型的大陆边缘上升流发育地区: (1) 栖霞组碳酸盐岩中磷的含量整体偏低; (2) 在富营养环境中, 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, 而栖霞组以碳酸盐沉积为主; (3) 在西南非洲古近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. 也就是说, 华南栖霞期沉积环境水体营养盐达到形成海泡石的程度, 但是还未达到发育磷质沉积的程度 (颜佳新, 2004).

从区域古地理角度看, 华南地区栖霞期全部被海水所覆盖, 属于孤立台地型海洋环境 (图 3A, 3B). 支持该时期较高生物产率的营养盐不可能来自陆源地表径流 (无陆地出露水面), 甚至与二叠—三叠纪全球盛行的巨季风有关的大气粉尘也影响不到该区 (图 3A, 3B). 因此刺激本区生物产率提高所需的营养盐只能来自海洋. 综合上述栖霞期古氧相特征 (频繁缺氧)、生物产率特征 (较高但是又低于典型上升流环境, 还与海平面变化密切相关), 结合栖霞期全球古海洋环境背景, 本文认为栖霞期缺氧沉积环境成因与当时海陆分布和古洋流格局有关 (图 3C).

华南有关地块,包括上扬子、下扬子和华夏地块等,整体位于古特提斯洋东侧、赤道偏南一带(图3A)。该区西侧受古特提斯洋流影响,东侧受赤道暖流和赤道逆流影响(Yan and Zhao, 2001)。两者共同作用的结果是,表层洋流(有时可能包括缺氧和富营养盐的中层流成分)自西南向东北流经全区,主流方向可能沿湘桂裂隙槽流动,导致该区富含海泡石、缺氧特点更明显(图3B)。另一支沿秦岭裂隙槽向东流动,形成扬子北缘富硅和海泡石沉积。

这种古海洋格局至少持续到茅口期。虽然华南地区茅口期沉积完全不同于栖霞期,如出现硅质岩、生物礁灰岩和陆缘碎屑岩,空间分异明显,但是硅质岩发育的地区与栖霞组海泡石富集区相似(可一直持续到晚二叠世)(王立亭等, 1994; 刘宝珺和许效松, 1994)。茅口期中—后期,含海泡石沉积结束,硅质岩中有时出现磷质结核,指示比栖霞期稍高的生物产率,是前人提出上升流沉积模式的重要证据。但是与典型上升流沉积相比,磷质沉积仍然偏少。

与栖霞期沉积古地理对比,华南地区茅口期古地理的最大特点是,东侧华夏古陆和西侧的康滇古陆开始上升,向中部供应陆源碎屑物质。可以推测,比栖霞期略高的生物产率可能源于陆源风化带来的营养物质。茅口期火山活动也可能起到了一定作用。华夏古陆和康滇古陆的上升,也进一步强化了沿湘桂裂隙槽流动的表面洋流主支,使得该带全部为硅质岩沉积。所以茅口期沉积相的特点和分布格局不仅符合上述洋流模式,而且印证了该模式的合理性。

## 4 结论和认识

与传统的古生物学不同,地球生物学强调生物界与非生物界的相互作用,或生物圈与地圈的相互作用(谢树成等, 2006)。华南二叠纪栖霞组研究历史悠久,研究程度较高,但是有些问题一直令人困惑,如栖霞组富含有机质,缺氧沉积特征明显,但是反映常氧环境的底栖生物化石(或者碎屑)也极为丰富。单一的古生态学研究 and 沉积学研究对此都难以给予圆满解释。上述分析清楚地表明,综合考虑陆棚沉积环境与生物的特点及相互关系,结合古地理、古海洋背景,可体现地球生物学的研究特点,并为解决类似问题提供一个新思路。

浅水陆棚缺氧沉积环境中,水体溶氧量变化速度快、幅度大,生物对其适应性差,因而缺氧沉积环

境在生物相特征、沉积特征和沉积地球化学特征方面的表现可能会有所差异,值得今后研究重视。当前分析表明,中二叠世栖霞组—茅口组缺氧沉积环境成因,可能与当时古特提斯地区海陆分布、古洋流背景有关,也与华南地区古地理演化有关(如东吴运动期间康滇古陆、华夏古陆的上升剥蚀),并非简单的上升流模式加海侵模式,值得在今后进一步研究中注意,也有待进一步工作的验证。

## References

- Bai, S. L., Bai, Z. Q., Ma, X. P., et al., 1994. Devonian events and biostratigraphy of South China, Chapter 3: Ce/La ratio as marker of paleoredox. Peking Univ. Press, Beijing (in Chinese).
- Cai, L. G., Rao, D., Pan, W. L., et al., 2005. The evolution model of the Puguang gas field in northeast Sichuan. *Petroleum Geology and Experiment*, 27(5): 462–467 (in Chinese with English abstract).
- Hallock, P., Schlager, W., 1986. Nutrient excess and the demise of coral reefs and carbonate platforms. *Palaios*, 1: 389–398.
- Huang, S. J., 1997. A study on carbon and strontium isotopes of Late Paleozoic carbonate rocks in the Upper Yangtze platform. *Acta Geologica Sinica*, 71: 45–53 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., Xu, X. S., 1994. Atlas of lithofacies and paleogeography of South China (Sinian to Triassic). Science Press, Beijing, 188 (in Chinese).
- Ma, Y. S., Fu, Q., Guo, T. L., et al., 2005. Pool forming pattern and process of the upper Permian-Lower Triassic, The Puguang gas field, Northeast Sichuan basin, China. *Petroleum Geology and Experiment*, 27(5): 455–461 (in Chinese with English abstract).
- Rhoads D. C., Morse, J. W., 1971. Evolutionary and ecological significance of oxygen-deficient marine basins. *Leithaia*, 4: 413–428.
- Tyson, R. V., Pearson, T. H., 1991. Modern and ancient continental shelf anoxia: An overview. In: Tyson, R. V., Pearson, T. H., eds., Modern and ancient continental shelf anoxia. *Geological Society Special Publication*, 58: 1–24.
- Wang, L. T., Lu, Y. B., Zhao, S. J., et al., 1994. Permian lithofacies paleogeography and mineralization in South China. Geological Publishing House, Beijing, 147 (in Chinese).
- Xie, S. C., Gong, Y. M., Tong, J. N., et al., 2006. Advancement from paleontology to geobiology. *Chinese Science*

- Bulletin*, 51(19): 2327—2336(in Chinese).
- Yan, J. X., 2004. Origin of Permian Chihsian carbonates from South China and its geological implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(4): 579—587 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. X., Chen, B. Y., Li S. T., et al., 1997. Oxygen-related facies and sequence stratigraphy in the Qixia Formation on the Hubei-Hunan-Guangxi region. *Geological Review*, 43: 193—199 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. X., Fang N. Q., 1994. Depositional environments, cycles and sequences of Chihsia Formation in Hubei Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 620—626 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. X., Xu S. P., Li, F. L., 1998. Geochemistry of dys-aerobic depositional environment of Qixia Formation in Badong, Hubei. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 18(6): 27—32 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. X., Zhang H. Q., 1996. Paleo-oxygenation facies: A new research field in sedimentology. *Geol. Sci. and Technol. Information*, 15(3): 7—13 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. X., Zhao K., 2001. Permo-Triassic paleogeographic, paleodimatic and paleoceanographic evolutions in eastern Tethys and their coupling. *Science in China (Series D)*, 44(11): 968—978.
- 附中文参考文献**
- 蔡立国, 饶丹, 潘文蕾, 等, 2005. 川东北地区普光气田成藏模式研究. *石油实验地质*, 27(5): 462—467.
- 黄思静, 1997. 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*, 71(1): 45—53.
- 刘宝珺, 许效松, 1994. 中国南方岩相古地理图集. 北京: 科学出版社, 188.
- 马永生, 傅强, 郭彤楼, 等, 2005. 川东北地区普光气田长兴—飞仙关气藏成藏模式与成藏过程. *石油实验地质*, 27(5): 455—461.
- 王立亭, 陆彦邦, 赵时久, 等, 1994. 中国南方二叠纪岩相古地理与成矿作用. 北京: 地质出版社, 147.
- 谢树成, 龚一鸣, 童金南, 等, 2006. 从古生物学到地球生物学的跨越. *科学通报*, 51(19): 2327—2336.
- 颜佳新, 2004. 华南地区二叠纪栖霞组碳酸盐岩成因研究及其地质意义. *沉积学报*, 22(4): 579—587.
- 颜佳新, 陈北岳, 李思田, 等, 1997. 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*, 43(2): 193—199.
- 颜佳新, 方念乔, 1994. 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——中国地质大学学报*, 19(5): 620—626.
- 颜佳新, 徐四平, 李方林, 1998. 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*, 18(6): 27—32.
- 颜佳新, 张海清, 1996. 古氧相——一个新的沉积学研究领域. *地质科技情报*, 15(3): 7—13.