

刘治成, 杨巍, 王炜, 等. 四川盆地中二叠世栖霞期微生物丘及其对沉积环境的启示[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 1009–1023.

Liu Zhicheng, Yang Wei, Wang Wei, et al. The microbial mud mound of the Middle Permian Qixia period in Sichuan basin and its indication significance to sedimentary environment[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 1009–1023(in Chinese with English abstract).

## 四川盆地中二叠世栖霞期微生物丘 及其对沉积环境的启示

刘治成<sup>1,2</sup> 杨巍<sup>2</sup> 王炜<sup>1</sup> 张鹏<sup>1</sup>

(1. 四川省国土勘测规划研究院, 四川 成都 610045; 2. 油气藏地质与开发国家重点实验室, 四川 成都 610500)

**摘要:** 在四川盆地华蓥溪口地区首次发现了发育在中二叠世栖霞期的微生物灰泥丘, 该灰泥丘以灰泥作为支撑结构; 参与建筑的生物主要是菌类微生物, 其次为多门类无脊椎动物, 如有孔虫、腕足等, 但生物物种分异度较低, 丰度较高; 岩石类型主要为生屑泥晶灰岩以及凝块石等; 灰泥丘可划分为丘基、丘核及丘翼。根据地化分析, 华蓥溪口栖霞组剖面野外样品古盐度  $Z$  值均  $>122$ , 且  $\delta^{13}\text{C} > 0$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  变化在  $-6.33\text{‰}$ ~ $-4.42\text{‰}$ , 向上  $\delta^{18}\text{O}$  总体为正偏移, 表明海平面逐渐下降。恢复的古水温在  $33.60\text{--}24.26\text{ }^\circ\text{C}$ 。 $V/(V+\text{Ni})$  比值为  $0.51228$ ,  $\text{U/Th}$  比值为  $8.28205$ ; 指出华蓥溪口地区处于水体较深, 水动力较弱, 温度较高的超咸缺氧环境。这种环境有利于微生物丘的发育, 并影响了造礁生物的发育和生长, 是导致栖霞期没有发育骨架礁的原因之一。

**关键词:** 四川盆地; 中二叠世; 栖霞组; 微生物丘; 沉积环境

中图分类号: P534.46 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)04-1009-15

## The microbial mud mound of the Middle Permian Qixia period in Sichuan basin and its indication significance to sedimentary environment

LIU Zhi-cheng<sup>1,2</sup>, YANG Wei<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>

(1. Sichuan Institute of Land Planning and Survey, Chengdu 610045, Sichuan, China; 2. State Key Lab of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering, Chengdu 610500, Sichuan, China)

**Abstract:** A microbial mud mound was found for the first time in the Middle Permian Qixia Formation of Huayin Xikou area. This mud mound is supported by mud, the primary builder is fungi, followed by invertebrates. The species diversity is low, with high species richness. The main lithology includes bioclastic micritic limestone and thrombolite. The mud mound can be divided into mound-core, mound-flank, and mound-base. According to the results of sample analysis of the Qixia Formation, all of the paleosalinity  $Z$  values  $>122$ ,  $\delta^{13}\text{C} > 0$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  values are between  $-6.33\text{‰}$  and  $-4.42\text{‰}$ , the ancient water temperature values are between  $33.60\text{ }^\circ\text{C}$  and  $24.26\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V/(V+\text{Ni})$  ratio is  $0.51228$ , and  $\text{U/Th}$  ratio is  $8.28205$ , suggesting that the environment of Qixia period was characterized by relatively deep water, relatively weak hydrodynamics, higher temperature, high salinity and anoxic

收稿日期: 2014-07-09; 改回日期: 2014-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272135, 41302023)、教育部博士点基金(优先发展领域)(20125121130001)联合资助。

作者简介: 刘治成, 男, 1983年生, 博士后, 主要从事沉积学, 古生物学研究; E-mail: lzc\_15@126.com。

nature. Such an environment was conducive to the development of microbial mud mound, and affected the development and growth of reef-building organisms. This was one of the reasons leading to the lack of skeleton of the reef in Qixia Formation.

**Key words:** Sichuan basin; middle Permian; Qixia Formation; microbial mud mound; sedimentary environment

**About the first author:** LIU Zhi-cheng, male, born in 1983, postdoctoral researcher, mainly engages in the study of sedimentology and paleontology; E-mail: lzc\_15@126.com.

作为生物礁的特殊类型,灰泥丘在古生代十分发育<sup>[1]</sup>。由于其含有大量灰泥、具有明显的丘状几何形态,与上下及相邻地层在几何形态、灰泥含量及矿物与组分等方面具有很大差别,而且缺乏造丘沉积物的搬运证据<sup>[2]</sup>。由此,灰泥丘通常被解释为在微生物作用下的原地堆积成岩而成<sup>[3-10]</sup>。由于微生物广泛参与了地质过程,因而日益受到关注<sup>[11-17]</sup>。而在地质历史中,不仅骨架礁生态系统演化可反映海洋环境变化情况,而且微生物成因碳酸盐岩也是环境和气候变化的重要指标,因此,微生物丘与环境的关系逐步受到重视<sup>[18-24]</sup>。

目前国内学者对四川盆地中二叠世栖霞期沉积环境的研究很多,大多数认为四川盆地在栖霞期处于水体清澈,营养丰富,有利于生物的繁殖的浅海环境<sup>[25-28]</sup>。但是,四川盆地栖霞期不仅没有生物礁发育的报道,还具有缺氧环境的特征。本次发现的栖霞期微生物灰泥丘,为四川盆地栖霞期的沉积环境研究提供了新的材料和思路,结合 Gaia 理论,本文尝试从微生物与环境的相互作用来解释四川盆地栖霞期的环境以及生物礁不发育的原因。

## 1 华蓥溪口剖面地质特征

文章研究的华蓥溪口剖面位于四川省华蓥市溪口镇到704发射台的公路旁(图1)。剖面内中二叠统发育完整。从下二叠统梁山组页岩开始,直至上二叠统龙潭组煤层结束。

其中栖霞组地层可分为2段(图2):

栖霞一段,该地层厚度为66.71 m。该段分为上下部:上部岩性主要为灰色厚层生屑泥晶灰岩、灰白色厚层泥晶灰岩、灰色厚层块状泥晶生屑灰岩,发育眼球眼皮构造及燧石团块,属浅缓坡沉积相带;下部岩性主要为灰色厚层块状生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、凝块石及泥灰岩。生屑可见海百合、珊瑚、大型腹足类及腕足类,发育有灰泥丘,属于深缓坡沉积相带。

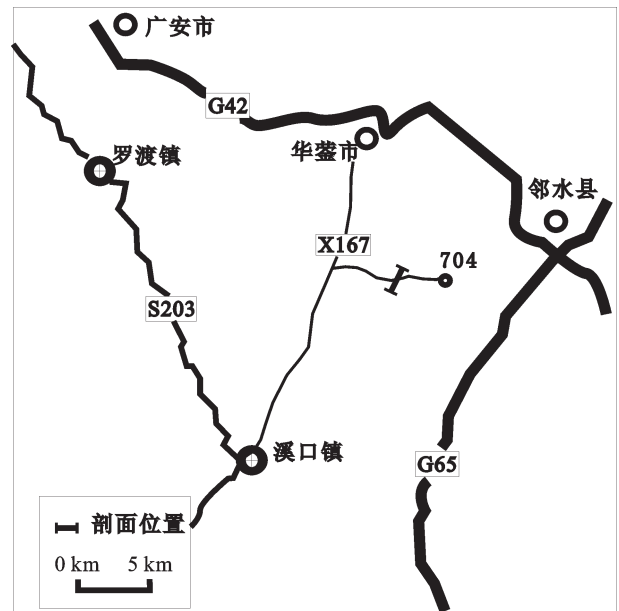


图1 华蓥溪口剖面地理位置图

Fig.1 Location of the Xikou section, Huaying

栖霞二段,该段地层厚度为39.84 m。岩性主要为灰色厚层生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、浅灰色厚层泥晶生屑灰岩;顶部为灰色厚层细粉晶白云岩,发育一层厚约6 cm的燧石条带。该段地层生屑丰富,局部可达60%,主要为有孔虫、介形虫、腕足、三叶虫、藻屑等。为开阔台地沉积相带。

## 2 微生物灰泥丘特征

本次研究的栖霞期灰泥丘(图3)发育在栖霞组下部,主要由灰泥组成,缺少像珊瑚、钙藻、层孔虫那样的宏观骨架生物建造者,近似于沃索蒂型(Waulsortion)灰泥丘。该灰泥丘以灰泥作为支撑结构;参与建筑的生物主要是菌类微生物(图4-a),其次为多门类无脊椎动物,如有孔虫、腕足等,但生物物种分异度较低,丰度较高;岩石类型主要为生屑泥晶灰岩以及凝块石等。

该灰泥丘可分为丘基、丘核及丘翼。丘基厚1.05 m,岩性为浅灰、灰色厚层泥晶生屑灰岩;丘核

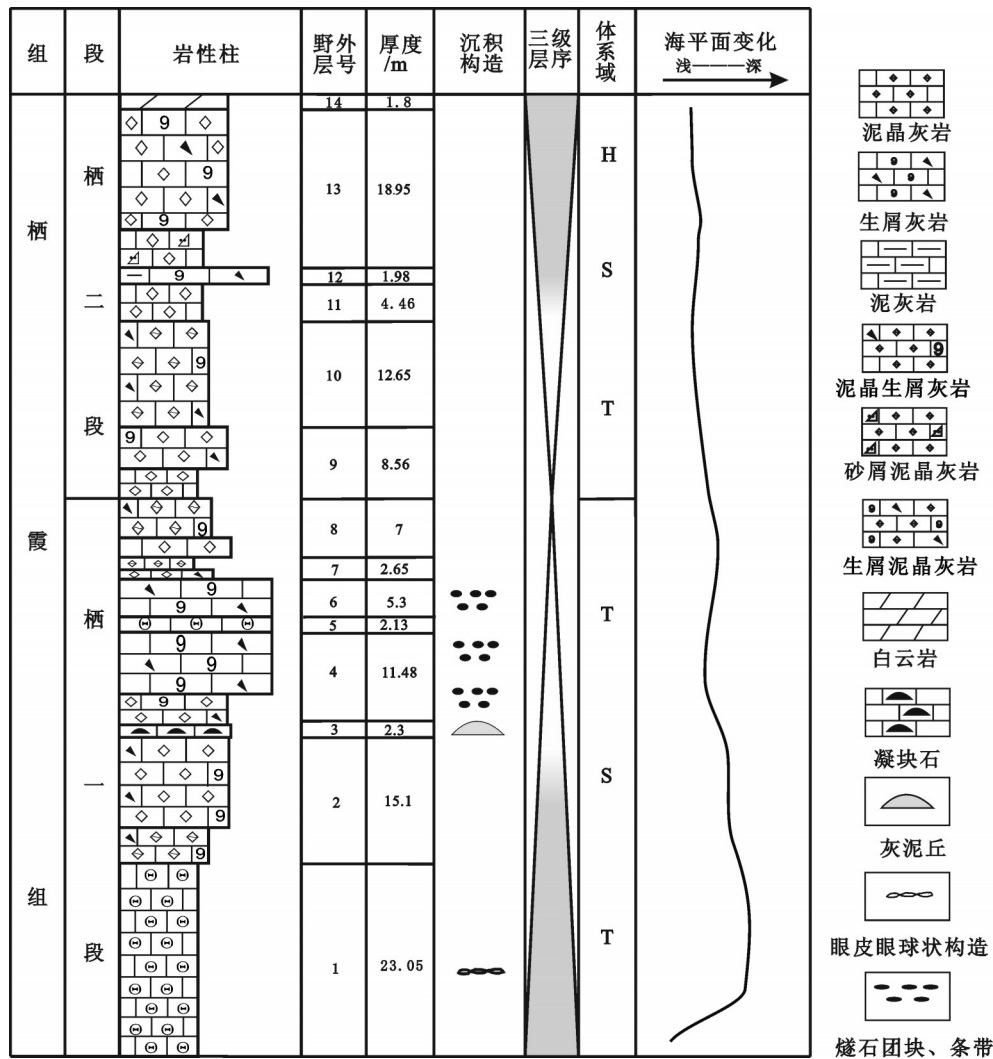


图2 华蓥溪口栖霞组地层综合柱状图  
Fig.2 Composite section of the Qixia Formation in Xikou of Huayin

出露高度为2.3 m, 岩性为浅灰色厚层块状生屑泥晶灰岩, 灰泥作为支架起支撑作用(图4-b、c), 空隙中充填有大量生物碎屑, 主要为有孔虫、腕足屑, 其次为海百合茎、腹足类等, 分异度较低, 生物碎屑破碎严重; 丘翼岩性为浅灰色、灰色厚层生屑泥晶灰岩。生物碎屑破碎严重(图4-d), 主要为有孔虫和海百合茎, 其次为腕足屑, 藻屑等, 分异度较低。

凝块石发育在丘核及丘翼中, 直径大小不等, 0.01~0.2 m, 宏观形态为不规则状、团块状、斑状等, 颜色较深, 与围岩界限清晰, 在丘翼处可见与围岩呈过渡关系(图4-e)。凝块石内部为泥晶胶结, 组构贫乏, 可见斑点构造(窗格构造)(图4-f)。

### 3 栖霞组沉积环境地化分析

本次对栖霞组沉积环境的恢复, 主要针对古盐度、古水温和古氧相等沉积环境指标做了分析研究。样品采用具低镁方解石成分的有铰腕足化石或受成岩作用较小的泥晶灰岩作为分析样品。

#### 3.1 古盐度分析

Keith 和 Weber<sup>[29]</sup>把 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 二者结合起来, 用以指示古盐度, 以Z值区分海相灰岩和淡水石灰岩。Z值> 120 为海相,Z值< 120 为陆相。

$$其中 Z = 2.048(\delta^{13}C + 50) + 0.498(\delta^{18}O + 50)$$

$\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 采用PDB标准。



图3 华莹溪口栖霞组下部灰泥丘

Fig.3 Photo of mud mound in the Qixia Formation of Xikou, Huayin

利用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 对中新生代的样品比较有效,而对古生代的样品,往往有一定偏差,克服的办法通常是采用具低镁方解石成分的有铍腕足化石或选用受成岩作用较小的泥晶灰岩作为分析样品。华莹溪口栖霞组剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值按照上述公式计算出结果(表1):

实验结果证明所有样品的 $Z$ 值均大于120,表明其均为海相碳酸盐岩。

陈荣坤<sup>[30]</sup>认为,当 $Z$ 值 $>122$ 时, $\delta^{13}\text{C}>0$ 时指示咸化的海水环境。所测试碳氧同位素指标(表1), $\delta^{13}\text{C}$ 最小值为1.84, $Z$ 值范围在127.93~134.47, $Z$ 值均大于122,反映出中二叠世栖霞期四川盆地处于超咸化海水环境。

### 3.2 古水温分析

古水温复原是恢复古环境,认识环境变化过程的重要方法。一般海洋表层温度的升高对应于海平面的上升和太阳热辐射的增加,沉积物中 $\delta^{18}\text{O}$ 值随之下降,而海洋表层温度的相对下降则对应于海平面的相对下降,沉积物中 $\delta^{18}\text{O}$ 值随之上升<sup>[31]</sup>。但水体介质的温度对 $\delta^{18}\text{O}$ 影响较大,同样选用较强抵抗成岩后生作用(低镁方解石)的生物化石,能在一定程度上降低影响效果。在盐度不变的情况下, $\delta^{18}\text{O}$ 值随温度升高而

降低。Shackleton等在前人的基础上提出古温度的公式如下<sup>[32]</sup>:

$$t=16.9-4.38(\delta\text{c}-\delta\text{w})+0.1(\delta\text{c}-\delta\text{w})^2$$

公式中 $t$ 为碳酸盐形成时的海水古温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $\delta\text{c}$ 为测得碳酸盐岩中的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB标准)(‰); $\delta\text{w}$ 为当时海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值(SMOW标准)(‰)。

此公式获得的计算结果常会出现较大偏差,主要是受年代效应影响,所测得的 $\delta^{18}\text{O}$ 并不能反映当时的原始值。鉴于以上原因,若用上面的公式计算样品形成时的古水温,那么就要选用正常盐度下的样品,并用其 $\delta^{18}\text{O}$ 校正值,Given等在1985年曾提出二叠纪大洋水的 $\delta^{18}\text{O}$ 应为 $-2.8\text{‰}$ (SMOW标准),再考虑到 $\delta^{18}\text{O}$ 的年代效应的校正,故公式可修正为<sup>[32]</sup>:

$$t=16.9-4.38(\delta^{18}\text{O}\text{校正}+2.8)+0.1(\delta^{18}\text{O}\text{校正}+2.8)^2$$

选用受成岩作用更小的泥晶灰岩作为分析样品,按照上述公式得出计算结果(表2)。

华莹溪口栖霞组剖面测试5个样,取样位置较均匀分布。 $\delta^{18}\text{O}$ 变化在 $-6.33\text{‰}$ ~ $-4.42\text{‰}$ ,向上 $\delta^{18}\text{O}$ 总体为正偏移,表明海平面下降。恢复的古水温在 $33.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $24.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。古水温恢复数据显示,栖霞早期海水温度较高,中后期降低并呈震荡趋势回升。分析该变化与冰川消融有关。

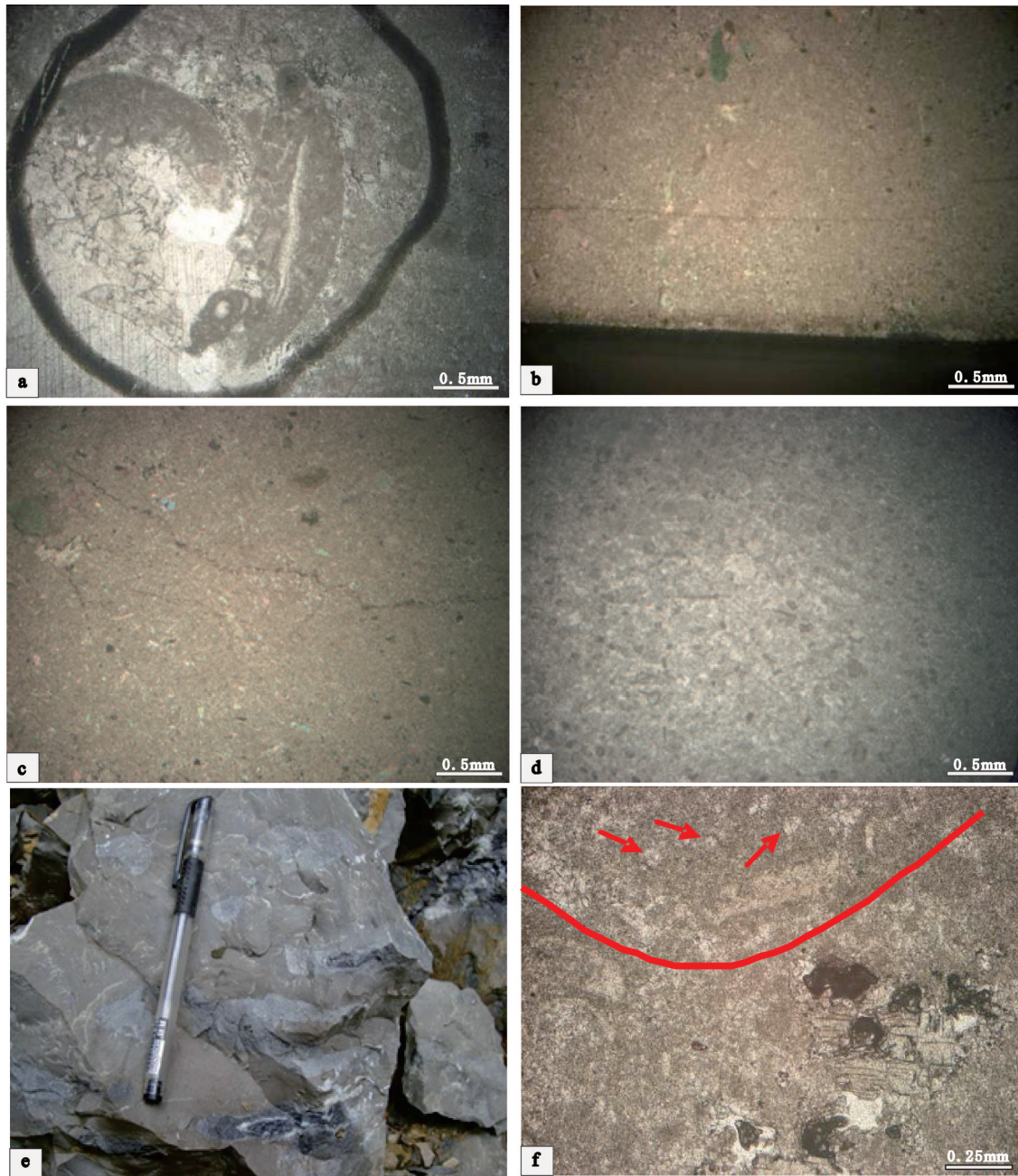


图4 华蓥溪口栖霞期灰泥丘中的凝块石及微生物

a—灰泥丘中的微生物(画圈内)相互粘结形成凝块状或明暗相间的层纹状结构,单偏光;b—灰泥丘丘核中含大量灰泥,起支撑作用,单偏光;c—灰泥丘丘翼中含大量灰泥,见少量极破碎的生屑,正交偏光;d—丘翼中的凝块石,灰泥为主,生屑较多,破碎严重,单偏光;e—形态不规则的凝块石,颜色较深,与围岩界限清晰;f—凝块石内可见窗格构造,单偏光

Fig.4 Photo of thrombolite and microbial in the Qixia Formation of Xikou, Huayin

a—Microbial in the mud mound, mutual bonding cambium striate fabric, plainlight; b—A large number of mortars support mud mound—core, plainlight; c—A large number of mortar in the mud mound—flank. A small very broken bioclastics, crossed nicols; d—Thrombolite in the mud mound—flank, the bioclastics seriously broken, plainlight; e—Thrombolite irregular shape, dark in color, having distinct boundary with wall rocks; f—Fenestral structure in thrombolite, plainlight

表1 华蓥溪口剖面栖霞组古盐度恢复值

Table 1 The distribution of paleosalinity Z values of the Qixia Formation in Xikou, Huayin

标本编号	采样小层	岩性	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	古盐度 Z 值
HY-1	3	灰岩	1.84	-6.33	127.9271995
HY-10	5-1	灰岩	3.52	-4.84	132.0967723
HY-16	8-3	灰岩	4.45	-4.50	134.1769298
HY-19	10	灰岩	4.32	-5.12	133.6034992
HY-22	13-1	灰岩	4.58	-4.42	134.4712364

表2 华蓥溪口剖面栖霞组古水温恢复值

Table 2 The ancient water temperature values of the Qixia Formation in Xikou, Huayin

标本编号	采样小层	岩性	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	古温度/°C
HY-1	3	灰岩	1.84	-6.33	33.59427
HY-10	5-1	灰岩	3.52	-4.84	26.24266
HY-16	8-3	灰岩	4.45	-4.50	24.62972
HY-19	10	灰岩	4.32	-5.12	27.59439
HY-22	13-1	灰岩	4.58	-4.42	24.25621

石炭纪—二叠纪由于受全球性冰川发育影响,在扬子板块包括威宁组、马平组及栖霞组沉积时期均受到冰期作用影响<sup>[33]</sup>。通过此次研究区内各地栖霞组古水温恢复,其均值温度明显低于现代水温,印证了研究区栖霞期广泛受冰川作用影响。研究区栖霞期处于冰期—间冰期过渡阶段,推测由于冰川消融,造成研究区栖霞期水体温度总体较低。

另一方面,吴汉宁等<sup>[34]</sup>利用近年来研究成果,建立了扬子板块显生宙的古地磁视极移曲线,早古生代,扬子板块处于赤道以南低纬度地区,加里东运动晚期,扬子板块北向平移运动加速,至二叠纪中晚期已移至北纬低纬地区。由于扬子板块加速向北运动,栖霞早期较栖霞晚期板块所在位置更接近赤道。在低纬度地区,受海洋型气候影响水温较高,而相对高纬度地区,受大陆型气候影响海水四季温差较大,海水温度普遍偏低。该特征是引起研究区栖霞早期温度高于栖霞晚期的因素之一。

### 3.3 古氧相研究

沉积环境的古氧相特征是沉积环境和古海洋特征恢复的重要内容。近年来其古氧相特征识别及应用分析已经成为研究的热点。

古氧相指反映地层(或沉积物)沉积形成时沉积环境水体中,特别是水体中溶氧量特征及其变化的各种岩石、生物和地球化学等特征的综合,为沉积相的重要组成部分<sup>[35]</sup>。早在20世纪70年代初期由

Rhoads 和 Morse<sup>[36]</sup>根据加利福尼亚大陆边缘底层水体中溶氧量与生物群特征及沉积构造的关系提出常氧(aerobic)、贫氧(dysaerobic)和厌氧(anaerobic)的古氧相三分方案。而地球化学分析方法由于其定量分析和多因素分析的特征越来越受重视,本次研究在总结前人研究成果后,建立了缺氧及常氧环境下的基本特征及判别指标(表3)。

微量元素比值是作为推断古氧相的重要工具,本次研究中, V/(V+Ni) 值的变化能较好地反映沉积环境中含氧量的变化。一般来说, V/(V+Ni) 值越高,反映缺氧程度越高。当其数值 >0.55 为厌氧环境, 0.45~0.60 为贫氧环境, <0.45 为常氧环境。U/Th 值主要作用为校正样品不利数值,也能反映缺氧环境的变化。一般来说, U/Th 值 >1.25 为厌氧环境, 0.75~1.25 为贫氧环境, <0.75 为常氧环境(表3)。

本次研究有针对地对样品的制备和分析元素进行了筛选,选用受成岩作用小的泥晶灰岩作为分析样品,利用等离子体质谱法对华蓥溪口栖霞组剖面10件样品,进行了V、Ni元素分析化验,并对U、Th值也进行了化验对比,得到数值(表4)。

华蓥溪口栖霞组剖面10件样品的分析结果显示:(表4), V/(V+Ni)最高值为0.78,相应U/Th值为1.04,为2层下部样品,岩性为灰黑色薄层泥灰岩; V/(V+Ni)最低值为0.51,相应U/Th值为8.28,为4层底部样品,岩性为灰色厚层具残余生物结构细—粉晶灰岩。V/(V+Ni)平均值为0.64, U/Th平均值为14.71。通过整体对比认为,溪口地区栖霞期属于缺氧环境沉积,并表现出贫氧与厌氧环境相互交替的现象。

栖霞组缺氧沉积中以有机质含量较高为特征,但有机质丰富并不一定代表缺氧环境,有机质丰富也可以是高生物产率或快速沉积的产物<sup>[41]</sup>。因此缺氧沉积的确定需要综合地球化学、沉积学和古生态学等多方面的综合研究。对华蓥溪口栖霞组剖面所取样品的镜下鉴定,充分印证了栖霞期的沉积环境特征。V/(V+Ni)相对低值的岩样,其生屑含量大多超过50%,富含孔虫、棘屑、腹足、苔藓虫、介形虫、棘皮、腕足等生屑,生物分异度高;而V/(V+Ni)相对高值的岩样,其生屑含量的值一般在10%~20%,生屑主要为介屑,生物分异度较低,泥晶填隙物的含量较高,最高可达91%。总体来说,栖霞期

表3 缺氧环境及常氧环境基本特征及综合判别指标<sup>[37-40]</sup>

**Table 3 Basic features and related indicators for anoxic environment and oxygeneous environment**

沉积环境		判别指标		
		缺氧环境		常氧环境
		厌氧	贫氧	
水体溶氧量(ml/L)		<0.1	0.1~1	>1
古地理		低能、滞留、局限、上升流区		高能、循环畅通
岩石	颜色	灰黑色—黑色	深灰色—黑灰色	浅灰—深灰色
	层状	纹层—薄层 少见中层	中层为主, 次见薄层	厚层块状为主, 次为中层
	岩性	黑色页岩、硅质岩、(泥质)石灰岩、(磷灰石)		变化较大
	其他	有机质丰富 见黄铁矿	有机质较丰富, 见黄铁矿	含有机质, 但大部分被破坏
古生物	底栖生物	缺乏	常见体小壳薄的腕足、双壳类	底栖生物发育, 生物个体大; 珊瑚、藻类、腕足类等繁盛
	浮游生物	放射虫、菊石 发育	常见菊石, 偶见放射虫	偶见菊石
	生物扰动	缺乏	偶见—常见	强烈
	遗迹构造	<i>Zoophycos?Chondrites</i>		
矿物	标型矿物	原生金属硫化物		褐铁矿、Mn 氧化物
	黄铁矿矿化度(DOP)	无 H <sub>2</sub> S 时 DOP0.4~0.7; 含 H <sub>2</sub> S 时 DOP>0.7		DOP<0.4
元素地球化学	铁同位素指标	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> >1		Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> <1
	微量元素含量	过渡金属、有机硫含量高		过渡金属含量低
	V/(V+Ni)	>0.55	0.45~0.60	<0.45
	V/Cr	>4.25	2.00~4.25	<2.00
	Ni/Co	>7.00	5.00~7.00	<5.00
	U/Th	>1.25	0.75~1.25	<0.75
	AU/10 <sup>16</sup> δU	>12	5.00~12.0 δU>1	<5.00 δU<1

表4 华蓥溪口剖面栖霞组古氧相地化分析结果

Table 4 Geochemical analytical values for paleo-oxygenation facies of the Qixia Formation in Xikou, Huayin

标本编号	采样小层	岩性	V	Ni	U	Th	V/(V+Ni)	U/Th
WL1	2-1	灰岩	5.32	4.35	1.24	0.44	0.55016	2.81818
WL2	2-2	泥灰岩	29.5	8.42	1.89	1.81	0.77795	1.0442
WL4	3	灰岩	5.71	2.27	1.71	0.17	0.71554	10.0588
WL5	4	灰岩	19.6	18.66	3.23	0.39	0.51228	8.28205
WL7	5	灰岩	4.93	2.38	3.27	0.21	0.67442	15.5714
WL15	8	灰岩	3.51	2.78	2.62	0.065	0.55803	40.3077
WL16	9	灰岩	1.89	1.23	1.89	0.060	0.60577	31.5
WL19	11	灰岩	6.30	4.56	2.44	0.19	0.58011	12.8421
WL21	13-1	灰岩	8.10	4.05	2.75	0.16	0.66667	17.1875
WL22	13-2	灰岩	13.4	4.20	6.67	0.89	0.76136	7.49438

生物种类繁多,生物丰度较高。

此次研究表明,四川盆地中二叠世栖霞期主要处于缺氧环境中。笔者推测可能是生物原因引起水体中缺氧环境的形成。表现为缺氧环境中生物分异度降低,环境有利于有机质埋藏,易形成颜色较深、岩层厚度较薄的泥灰岩;反之,生物受相对富氧环境影响分异度增高,环境不利于有机质埋藏,易形成颜色较浅、岩层厚度较厚的生屑灰岩。

#### 4 四川盆地栖霞期沉积环境特征

栖霞早期,四川盆地由于海侵作用加速,海平

面迅速上升,盆地内全部被海水淹没,大部处于盐度较高的缺氧环境中。受西南地区峨眉地幔柱持续隆升的影响,古地形自西南向东北缓缓倾斜,无明显的坡折带<sup>[42]</sup>。自西南向东北水体逐渐加深,开阔台地、浅缓坡、深缓坡依次展布<sup>[42-43]</sup>(图5)。

本次研究没有发现盆地规模的白云岩及其他蒸发岩,野外样品采集中也是以有较网腕足化石为主,尽可能减少成岩作用影响。因此栖霞期海水盐度较高的结论值得探讨,推测与生物对环境的反馈作用有关。栖霞期海水温度早期高,晚期低的特征与纬度变化及冰川消融有关。生物因素则导致了

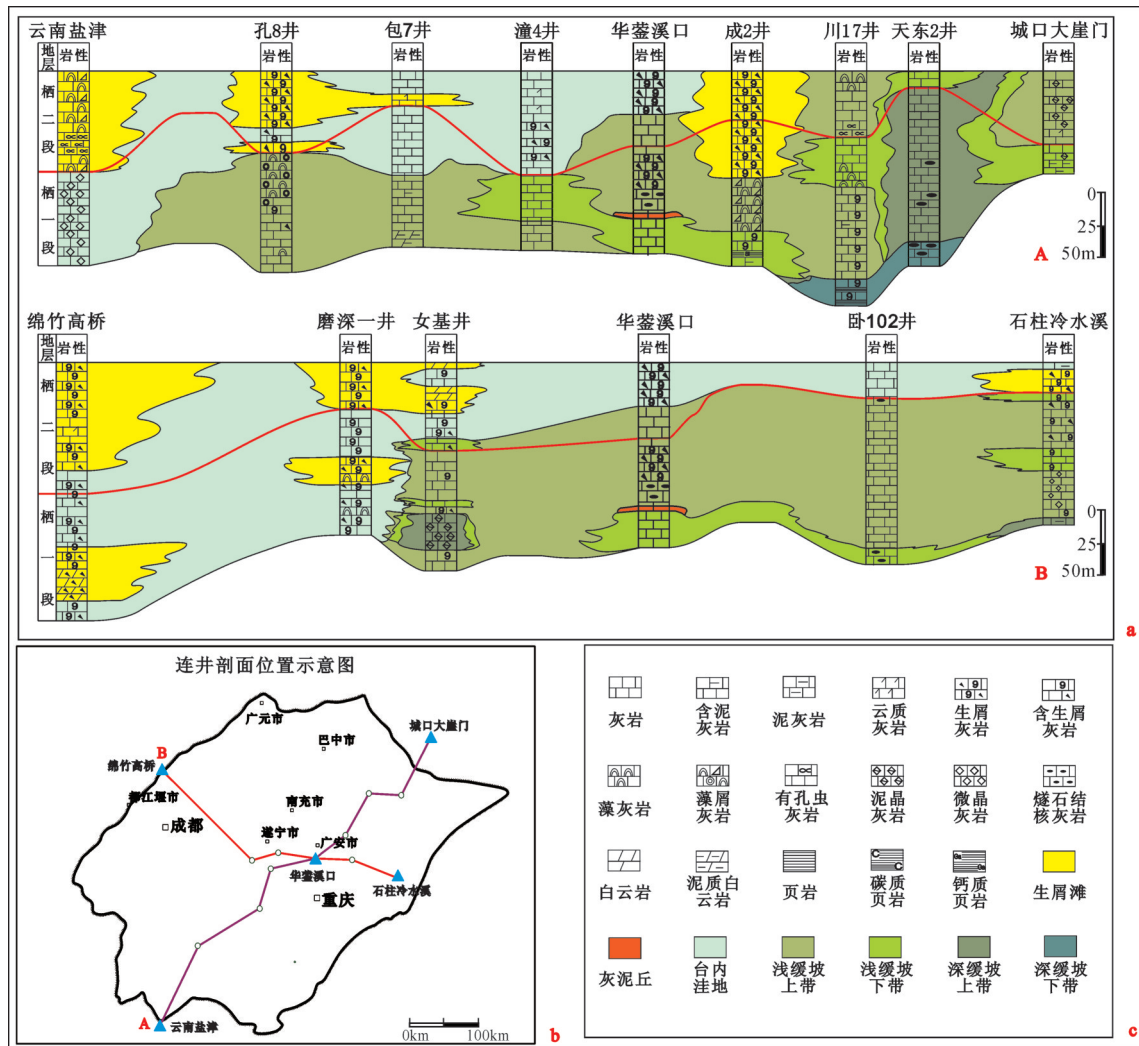


图5 四川盆地栖霞组沉积相连井剖面示意图  
 Fig.5 Sedimentary facies distribution of the Qixia Formation in Sichuan basin

区内含氧量低。虽然冰川消融与凝结、纬度变化、生物的复苏是三个影响研究区海水环境的因素<sup>[33-34,41]</sup>，但它们却引起同步变化的相同效应并造就了栖霞期特殊的沉积环境。因此，结合地化分析认为：华蓥溪口地区中二叠世栖霞期为超盐度，海水温度逐渐降低的缺氧环境。

### 5 微生物灰泥丘发育模式

早二叠世梁山期时，四川盆地地貌属于准平原化。到了中二叠世栖霞期，大规模的海侵使得海平面快速上升，整个四川盆地处于浅海环境。受峨眉地幔柱活动的影响<sup>[42-43]</sup>，海底地貌出现变化，此时华蓥溪口地区开始出现地貌高地，有利于生物的聚集。由于水体状态(温度、深度、盐度、清澈度、营养

物质质量等)、水动力条件和沉积物基底的变化，该地处于温暖、清澈以及较深的水体环境，同时由于水体变咸，水温变高，含氧量降低，有利微生物的生存。大量微生物开始在此快速生长并捕获和粘结灰泥，同时由于微生物的生命活动引起水体环境中物理化学条件的变化以及在沉积物表面生长或死亡后发生了钙化作用，在该地构成一定稳定的基地，也具有一定障积作用。在此基础上，大量底栖生物开始富集，由于海水饱和且不缺乏生长空间，微生物未停止生长或死亡，并对环境进行反馈作用，以更加适应自己的生长，同时可能发生进化，灰泥丘也继续生长并向周围扩展。顶部沉积了一套灰色、深灰色生屑泥晶灰岩，可能是由于微生物对于环境的反馈作用以及海平面的变化，使得水体的



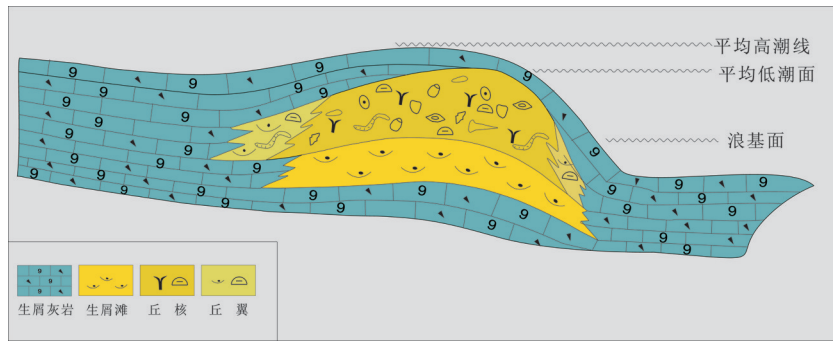


图6 华蓥溪口栖霞组下部灰泥丘发育模式

Fig.6 Map of development pattern of mud mound in the Qixia Formation of Xikou, Huayin

状态发生了改变,不利于微生物的生长。而水动力条件的变化也影响了凝块石的宏观形态<sup>[44-45]</sup>,灰泥不再起到支撑作用,灰泥丘停止生长(图6)。

## 6 栖霞期微生物丘与环境的关系

### 6.1 与水体的关系

泥盆纪的凝块石常见于深陆架灰泥丘的泥岩和颗粒质石灰岩中<sup>[46]</sup>,古生代和中生代的凝块石常形成在较小角度倾斜的生物丘和生物礁的侧面,以及台地边缘斜坡的背景<sup>[47]</sup>。前人研究表明,具大量凝块石构造的丘产生在不同的静水环境<sup>[47]</sup>:(1)浪基面以下;(2)风暴浪基面附近;(3)在正常浪基面与风暴浪基面之间;(4)在风暴浪基面之下。

栖霞期,华蓥溪口地区处于浅缓坡沉积相(图6),处于水体较深,水动力较弱的超咸缺氧环境。由于一次小规模的海平面下降事件<sup>[42]</sup>,华蓥溪口地区由浅缓坡下带变迁为浅缓坡上带。在这一过程中,由于水动力条件发生了变化,以及地貌隆起,结合超咸、缺氧以及温度较高的特殊环境,在华蓥溪口地区发育了微生物成因的灰泥丘。

### 6.2 与生物危机的关系

在微生物岩与环境关系方面,各国学者对与生物危机相关的生物事件(特别是微生物事件)和环境事件方面均做了很有影响的工作。通过对古生代生物标志化合物分析发现,微生物岩多发育在极端环境中,特别是重大生物灭绝事件时期以及与礁发育有关的环境中,如Guthrie<sup>[48]</sup>在研究晚奥陶世生物集群灭绝期间的沉积环境时,从美国Illinois盆地的Maquoketa群地层中检测到了一系列来自绿硫细菌的生物标志化合物,反映了透光带的缺氧条件。二

叠纪—三叠纪之交的生物灭绝事件作为显生宙最严重的生物危机,近年也在生物标志化合物方面也取得了突出成果,在与生物相关的环境事件上,于澳大利亚的Perth盆地和中国长兴煤山钻孔岩心中检测出一系列来源于绿硫细菌的生物标志化合物,这些化合物的相对含量在界线附近出现最高值,反映出二叠纪—三叠纪之交Perth盆地为缺氧环境,水体中富含硫化氢,与现代的黑海类似,从而认为当时水体(可能是全球水体)透光带富含硫化氢,这些有毒物质可能是二叠纪—三叠纪界线附近生物灭绝的原因。近年来这些生物标志化合物在欧洲的莱茵盆地也被发现<sup>[49-58]</sup>。对重大地质突变期微生物岩及其环境关系研究,主要集中在华南P/T之交的微生物及微生物岩,取得了一系列重要成果,认为晚二叠世生物礁上部微生物岩的发育代表了极端环境条件的出现<sup>[23,59-64]</sup>。

目前国内学者普遍认为华南地区栖霞期处于缺氧环境,但缺氧环境的成因则表述不一,有学者认为是上升流的影响,也有学者认为是生物产率高造成<sup>[25-26,65-68]</sup>。本次研究根据岩性、碳氧同位素及微量元素分析也认为四川盆地栖霞期处于缺氧环境,并根据区内首次发现的微生物岩,对缺氧环境的成因有了新的认识。认为生物因素是导致四川盆地栖霞期处于缺氧环境的原因,而微生物对环境的反馈可能是主要因素之一。

构造、气候和海平面控制了沉积环境的性质和分布<sup>[69]</sup>。栖霞期,整个四川盆地的沉积环境、古构造、古气候未发生大的改变<sup>[42-43]</sup>。栖霞早期,由于海平面上升,环境开始发生变化,开始沉积海相碳酸盐岩(图7-a)。此时,研究区内含氧量较低,岩性上

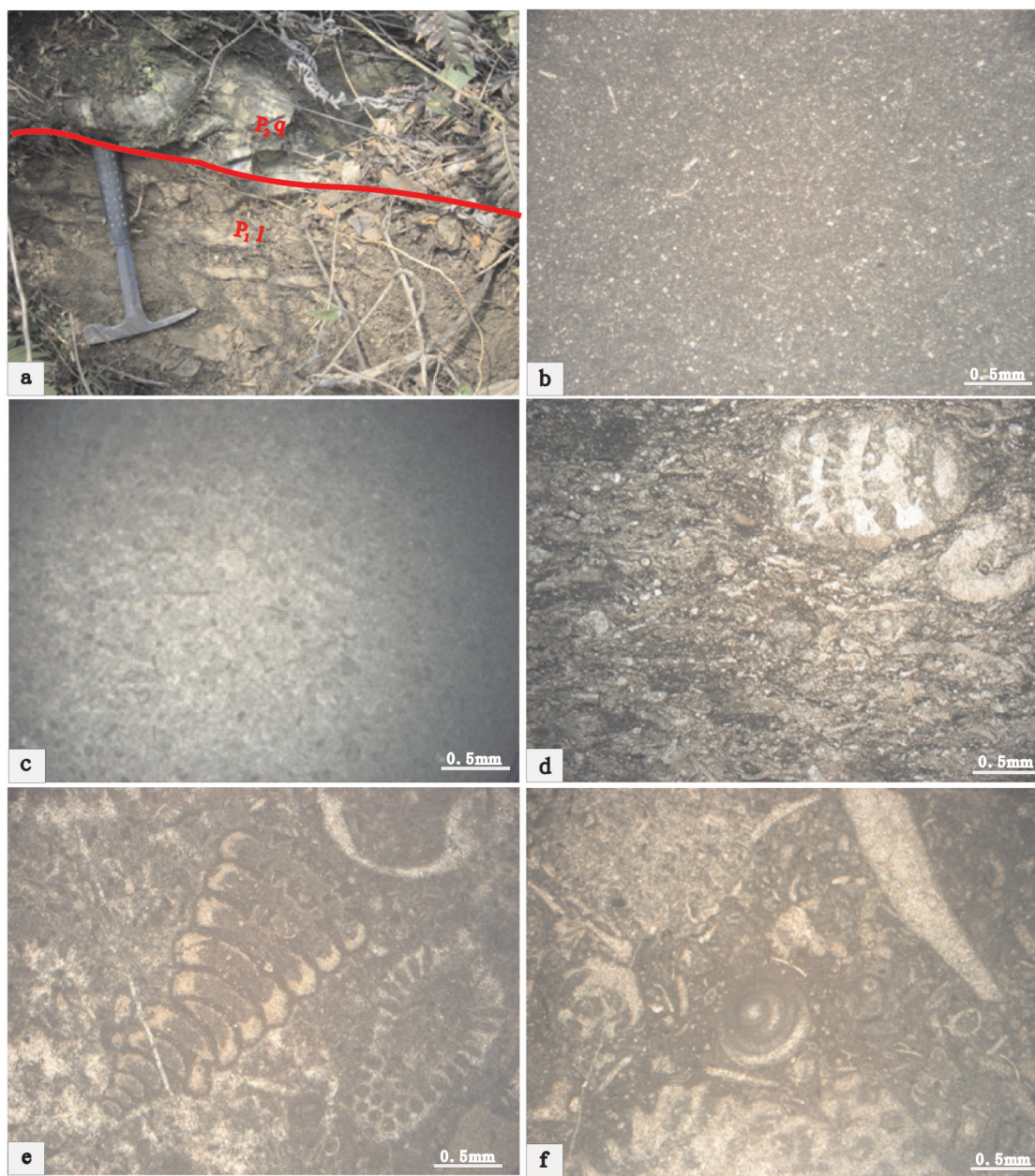


图7 华荃溪口剖面栖霞组中不同环境照片对比

- a—梁山组与栖霞组的分界，梁山组岩性为绿灰色页岩，可见不连续煤线。栖霞组岩性为灰色中层含泥晶灰岩与灰黑色薄层泥灰岩互层，呈眼球眼皮状构造，燧石团块发育；b—第1层中的“眼皮”，深灰色泥晶灰岩，生屑少见，有机质含量高，代表了一种缺氧环境，单偏光；  
c—微生物丘中丘翼，深灰色泥晶灰岩，灰泥为主，生屑破碎，形态小，单偏光；d—第5层的“眼皮”灰岩中保存较好的梯状虫，单偏光；  
e—第4层的泥晶生屑灰岩，生屑保存完整，可见有孔虫、介形虫、绿藻等，单偏光；f—第6层的生屑灰岩，生屑保存状态不一，可见有孔虫、腹足类、介形虫等，单偏光

Fig.7 Correlation of different sedimentary environments of the Qixia Formation in Xikou, Huayin

- a—Boundaries of the Liangshan Formation and Qixia Formation; Liangshan Formation lithology is greenish gray shale, Qixia formation lithology is interbedded micrite and marl, with eye eyelid structure and flint clumps; b—Eyelid limestone in the first layer, black laminated micrite, rare bioclastics, high organic matter content, representing an anoxic environment, plainlight; c— Mud mound-flank, black laminated micrite, the bioclastic seriously broken, plainlight; d—Eyelid limestone in the fifth layer, better preservation of Climacamina, plainlight; e—Micritic bioclastic limestone in the fourth layer, bioclastics preserved intact, Foraminifera, Ostracoda, Algae and other visible, plainlight; f— bioclastic limestone in the sixth layer, the state of bioclastic reservation varies, Foraminifera, Gastropods, Ostracods visible, plainlight

表现为生物稀少,有机质含量高(图7-b)。受到峨眉地幔柱运动的影响,在四川华蓥溪口地区出现局部高地,叠合海平面变化的因素,海水含氧量低,水体温度较高,盐度也较高(表1,表2,表4),能够快速适应这种极端环境的微生物作为先驱分子开始繁衍,并形成灰泥丘。这种环境不利于造礁生物的生存,而微生物的扩散又挤压了其他生物的生存空间,这时微生物主宰了可居住的生态,限制了其他生物的生长(图7-c)。由于生物不仅仅是被动地适应环境,同时对环境具有调节作用,并使环境演化有利于生物进化<sup>[21]</sup>。地球上的生物,特别是细菌,与地球的无机系统相互作用,无意识地稳定了全球的环境以保持环境对生物有利<sup>[21]</sup>。通过这种微生物对环境的调节作用,伴随构造和海平面变化,华蓥溪口地区的温度、含氧量和盐度等环境指标开始向有利于其他生物生存的范围变化,并趋于稳定(表1,表2,表4),当环境达到微生物无法忍受的气候和化学范围时,其他生物则取得了选择优势,并占据了主导地位,微生物不再占据优势地位,研究区内开始大量出现正常海洋生物,并占据了主导地位(图6-d,e,f)。正是由于这种无意识的行为,使得华蓥溪口地区栖霞期保持了一种稳定的超咸缺氧环境,并进一步影响了造礁生物的发育和生长,这可能是导致四川盆地在栖霞期没有发育骨架礁的原因之一。

## 7 研究意义

目前中国中二叠世栖霞期的礁仅见东昆仑地区<sup>[70-71]</sup>和湖南涟源地区<sup>[72]</sup>的报道,这一时期礁的主要骨架生物由海绵、珊瑚、苔藓虫组成。四川盆地是中国南方二叠纪生物礁最发育的地区,但主要集中在长兴期<sup>[73-77]</sup>,还未有栖霞期生物礁的报道。

华蓥溪口栖霞期凝块石灰泥丘,不仅是首次在四川盆地栖霞组发现灰泥丘,也是首次在栖霞组发现微生物岩。可以作为对四川盆地栖霞期的沉积环境研究的指标。为四川盆地栖霞期的沉积环境研究提供了新的材料,并提出四川盆地栖霞期是一个极端条件下的环境,也是四川盆地栖霞期不发育骨架礁的原因之一。但由于相关研究资料少,条件有限,对栖霞期凝块石灰泥丘的发育模式和控制因素认识仍有不足,随着以后相关研究的增多和深入,微生物岩以及微生物成因灰泥丘对四川盆地栖

霞期的环境和气候变化的指示必将更加清晰。

## 8 结论

在四川盆地首次发现的中二叠世栖霞期华蓥溪口凝块石灰泥丘近似于沃索蒂型(Waulsortion)灰泥丘,是以灰泥作为支撑结构。可划分为丘基、丘核及丘翼,丘核出露高度为2.3 m。参与建筑的生物主要是菌类微生物,其次为多门类无脊椎动物,如有孔虫、腕足等,但生物物种分异度较低,丰度较高。岩石类型主要为生屑泥晶灰岩以及凝块石等。

通过碳氧同位素和微量元素分析认为灰泥丘发育时期的环境为超咸、缺氧以及温度较高的极端环境。整个栖霞期处于一个超咸缺氧的较稳定环境。

本次在四川盆地发现的栖霞期凝块石灰泥丘不仅印证了栖霞期四川盆地的极端环境,而且微生物岩的出现也指示出由于微生物对环境的调节作用,伴随构造和海平面变化,研究区保持了一种稳定的超咸缺氧环境,并进一步影响了造礁生物的发育和生长。这可能是导致四川盆地在栖霞期没有发育骨架礁的原因之一。

**致谢:** 审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

## 参考文献(References):

- [1] Leinfelder R R. The origin of Triassic reefs: Current research developments and result[J]. *Facies*, 1994, 31: 1-56.
- [2] 张廷山, 边立曾, 俞剑华, 等. 陕西宁强早志留世灰泥丘中微生物及其造岩意义[J]. *古生物学报*, 2000, 39(2): 263-266.  
Zhang Tingshan, Bian Lizeng, Yu Jianhua, et al. Microbial fossils in lower Silurian micrite mound, Ningqiang, southern Shaanxi[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2000, 39(2): 263-266 (in Chinese with English abstract).
- [3] Wendt J, Belka Z, Kaufmann B, et al. The world's most spectacular carbonate mud mounds (Middle Devonian, Algerian Sahara) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997: 424-436.
- [4] Kaufmann B. Diagenesis of Middle Devonian carbonate mounds of the Mader Basin (Eastern Anti-Atlas, Morocco) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67: 945-956.
- [5] Bathurst R G. Stromatolites origin related to submarine-cemented cursts in Paleozoic mud mounds[J]. *Geology*, 1980, 8: 132-134.
- [6] Pratt B R. Stromatolitic framework of carbonate mud mounds[J]. *J. of Sed. Geol.*, 1982, 52: 1203-1227.
- [7] 钱宪和. 泥晶灰岩与泥晶丘, 它们的问题与成因[J]. *台湾中央地质调查所特刊第五号*, 1991, 213-229.  
Qian Xianhe. Cause analysis of micritic limestone and micritic

- mound[J]. Central Geological survey of Taiwan(Special Issue), 1991: 213–229(in Chinese).
- [8] Tsien H H. The role of microorganisms and the origin of micrite components in algal reefs and micrite mounds[M]. Memoires Instituts Geologigues Del Univ. Catholique de Louvain, t. xxxv, 1994: 123–135.
- [9] Freitas T A. Silurian microbial buildups of the Canadian Arctic[J]. Spec. Publ. int. Ass. Sediments, 1995, 23: 151–169, 393.
- [10] Dupraz C, Strasser A. microbialites and micro-encrusters in shallow coral bioherms (Middle to Late Oxfordian Swiss Jura Mountains). *Facies*, 1999, 40: 101–130.
- [11] Chafetz H S, Buczynski C. Bacterially induced lithification of microbial mats[J]. *Palaios*, 1992, 7: 277–293.
- [12] Pedone V A, Folk R L. Formation of aragonite cement by nanobacteria in the Great Salt Lake, Utah[J]. *Geology*, 1996, 24(8): 743–765.
- [13] Konhauser K O. Diversity of bacterial iron mineralization[J]. *Earth Science Reviews*, 1998, 43: 91–121.
- [14] 刘志礼, 刘雪娟, 李朋富. 藻类及其有机质成矿作用试验[J]. *沉积学报*, 1998, 17(1): 9–18.  
Liu Zhili, Liu Xuexian, Li Pengfu. Mineralization tests made by algae and its organic matters[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 17(1): 9–18(in Chinese with English abstract).
- [15] 龚一鸣, 徐冉, 汤中道, 等. 晚泥盆世F–F之交菌藻微生物繁荣与集群绝灭的关系: 来自碳同位素和分子化石的启示[J]. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(2): 140–148.  
Gong Yiming, Xu Ran, Tang Zhongdao, et al. Relationships between bacterial–agal proliferating and mass extinction in the Late Devonian Frasnian–Famennian transition: Enlightening from carbon isotopes and molecular fossils[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(2): 140–148(in Chinese).
- [16] 韩作振, 陈吉涛, 迟乃杰, 等. 微生物碳酸盐岩研究: 回顾与展望[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 29–37.  
Han Zuozhen, Chen Jitao, Chi Naijie, et al. Microbial carbonates: a review and perspective [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 29–37(in Chinese with English abstract).
- [17] Martínez M R, Reitner J, Ramón M. Micro– framework reconstruction from peloidal– dominated mud mounds (Viséan, SW Spain) [J]. *Facies*, 2010, 56: 139–156.
- [18] Camoin G F, Gautret P, Montaggioni L F, et al. Nature and environmental significance of microbialites in Quaternary reefs: The Tahiti paradox[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 126: 271–304.
- [19] Spracht S, Camoin G, Golubic S, Le Campion Th. Microbialites in a modern lagoonal environment: Nature and distribution (Tikehau atoll, French Polynesia) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 175: 103–124.
- [20] 杨浩, 王永标, 陈林, 等. 地球微生物过程与潜在烃源岩的形成: 钙质微生物岩[J]. *地球科学*, 2007, 32(6): 797–802.  
Yang Hao, Wang Yongbiao, Chen Lin, et al. Calcic–microbialite as a kind of potential hydrocarbon source rock and its geomicrobiological processes[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32(6): 797–802(in Chinese with English abstract).
- [21] 孙枢, 王成善. Gaia理论与地球系统科学[J]. *地质学报*, 2008, 82(1): 1–8.  
Sun Shu, Wang Chengshan. Gaia theory and earth system science[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(1): 1–8(in Chinese with English abstract).
- [22] 谢树成, 黄咸雨, 黄俊华, 等. 重大地质突变期生物与环境事件的分子化石记录[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 208–217.  
Xie Shucheng, Huang Xianyu, Huang Junhua, et al. Molecular fossil records as a proxy of the biotic and environmental events during critical geological periods[J]. *Earth science Frontiers*, 2006, 13(6): 208–217(in Chinese with English abstract).
- [23] 谢树成, 殷鸿福, 曹长群, 等. 二叠纪—三叠纪之交地球表层系统的多幕式变化: 分子地球生物学记录[J]. *古生物学报*, 2009, 48(3): 487–496.  
Xie Shucheng, Yin Hongfu, Cao Changqun, et al. Episodic changes of the earth surface system across the Permian–triassic boundary: molecular geobiological records[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2009, 48(3): 487–496(in Chinese with English abstract).
- [24] Wang Q F, Zhang Y F, Wu X C. Triassic (Carnian) hexactinellid–thrombolite reef mounds and oolitic bank complex in NW Sichuan, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2014, published online. 12 June.
- [25] 李朋威, 吴夏, 白晓, 等. 四川广元上寺剖面二叠系栖霞组沉积碳库与有机碳埋藏[J]. *古地理学报*, 2010, 12(3): 301–306.  
Li Pengwei, Wu Xia, Bai Xiao, et al. Sediment carbon pool and organic carbon burial in the Permian Qixia Formation at Shangsi section in Guangyuan, Sichuan Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(3): 301–306(in Chinese with English abstract).
- [26] 罗进雄, 何幼斌. 中—上扬子地区二叠系眼球状石灰岩特征及成因研究[J]. *地质论评*, 2010, 56(5): 629–636.  
Luo Jinxiong, He Youbin. Origin and characteristics of Permian eyeball–shaped limestones in Middle–Upper Yangtze Region[J]. *Geological Review*, 2010, 56(5): 629–636(in Chinese with English abstract).
- [27] 胡明毅, 魏国齐, 胡忠贵, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组层序–岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2010, 12(5): 515–526.  
Hu Mingyi, Wei Guoqi, Hu Zhonggui, et al. Sequence–lithofacies palaeogeography of the Middle Permian Qixia Formation in Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(5): 515–526 (in Chinese with English abstract).
- [28] 魏国齐, 杨威, 朱永刚, 等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体

- 系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 442-448.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Zhu Yonggang, et al. Depositional system of the Middle Permian Qixia Formation in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 442-448(in Chinese with English abstract).
- [29] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geoch. et Cosmoch. Acta, 1964, 28: 1786-1816.
- [30] 陈荣坤. 稳定氧碳同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用[J]. 沉积学报, 1994, 12(4): 11-20.
- Chen Rongkun. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(4): 11-20(in Chinese with English abstract).
- [31] 张廷山, 俞剑华, 边立曾, 等. 四川盆地南北缘志留系的锶和碳、氧同位素演化及其地质意义[J]. 岩相古地理, 1998, 18(3): 41-49.
- Zhang Tingshan, Yu Jianhua, Bian Lizeng, et al. Strontium, carbon and oxygen isotopic compositions and their geological significance: the Silurian strata on the northern and southern margins of the Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology, 1998, 18(3): 41-49(in Chinese with English abstract).
- [32] 邵龙义, 窦建伟, 张鹏飞. 西南地区晚二叠世氧、碳稳定同位素的古地理意义[J]. 地球化学, 1998, 25(6): 575-581.
- Shao Longyi, Dou Jianwei, Zhang Pengfei. Paleogeographic significances of carbon and oxygen isotopes in late Permian rocks of southwest China[J]. Geochimica, 1998, 25(6): 575-581(in Chinese with English abstract).
- [33] 颜佳新, 杜元生. 冰川发育对赤道地区碳酸盐沉积环境和沉积作用的影响[J]. 地质科技情报, 1994, 13(3): 48-56.
- Yan Jiabin, Du Yuansheng. The influence of glaciations on low latitude shelf carbonate sedimentary environment and sedimentation—three cases from south China[J]. Geological Science and Technology Information, 1994, 13(3): 48-56(in Chinese with English abstract).
- [34] 吴汉宁, 吕建军, 朱日祥, 等. 扬子地块显生宙古地磁视极移曲线及地块运动特征[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(增刊): 69-78.
- Wu Hanning, Lv Jianjun, Zhu Rixiang, et al. Revised apparent polar wander path of the Yangtze Block and its tectonic implications [J]. Science in China (Series D), 1998, 28(SI): 69-78 (in Chinese).
- [35] 颜佳新, 张海清. 古氧相——一个新的沉积学研究领域[J]. 地质科技情报, 1996, 15(3): 7-13.
- Yan Jiabin, Zhang Haiqing. paleo-oxygenation facies: a new research field in sedimentology[J]. Geological Science and Technology Information, 1996, 15(30): 7-13(in Chinese with English abstract).
- [36] Rhoads D C, Morse J W. Evolutionary and ecologic significance of oxygen-deficient marine basins[J]. Lethaia, 1971, 4: 413-428.
- [37] 吴胜和, 冯增昭, 何幼斌. 中下扬子地区二叠纪缺氧环境研究[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 29-36.
- Wu Shenghe, Feng Zengzhao, He Youbin. Study on anoxic environments of Permian in the middle and lower Yangtze region[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(2): 29-36(in Chinese with English abstract).
- [38] 王争鸣. 缺氧沉积环境的地球化学标志[J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(2): 55-58.
- Wang Zhengming. Geochemical indicators for diagnosing anoxic sedimentary environment[J]. Acta Geologica Gansu, 2003, 12(2): 55-58(in Chinese with English abstract).
- [39] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 海相沉积有机质的碳同位素记录及其环境意义[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 11-16.
- Teng Geer, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. Organic carbon isotope record in marine sediment and its environment significance—an example from Ordos basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 11-16(in Chinese with English abstract).
- [40] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相沉积有效烃源岩的判识[J]. 自然科学进展, 2004, 14(11): 1249-1256.
- Teng Geer, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. Identification of effective marine source rock of Ordovician in Ordos Basin[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(11): 1249-1256.
- [41] Raiswell R, Buckley F. Degree of pyritization of iron as a palaeoenvironmental indicator of bottom water oxygenation[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1988, 58(5): 812-819.
- [42] 张廷山, 陈晓慧, 刘治成, 等. 峨眉地幔柱构造对四川盆地栖霞期沉积格局的影响[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1251-1264.
- Zhang Tingshan, Chen Xiaohui, Liu Zhicheng, et al. Effect of Emeishan Mantle Plume over the sedimentary pattern of Mid-Permian Xixia Period in Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(8): 1251-1264(in Chinese with English abstract).
- [43] 杨巍, 张廷山, 刘治成, 等. 地幔柱构造的沉积及环境响应——以峨眉地幔柱为例[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 835-850.
- Yang Wei, Zhang Tingshan, Liu Zhicheng, et al. Sedimentary and environmental responses to mantle plume: A case study of Emeishan mantle plume[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 835-850(in Chinese with English abstract).
- [44] 党皓文, 刘建波, 袁鑫鹏. 湖北兴山中寒武统覃家庙群微生物岩及其古环境意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 2: 40-49.
- Dang Haowen, Liu Jianbo, Yuan Xinpeng. Microbialites in the Middle Cambrian Qinjiamiao Group in Xingshan, Hubei Province: Implication for paleoenvironmental reconstruction [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 2: 40-49(in Chinese with English abstract).
- [45] 何起祥. 沉积地球科学的历史回顾与展望[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 10-18.
- He Qixiang. Sedimentary Earth Sciences: Yesterday, today and

- tomorrow [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 10–18 (in Chinese with English abstract).
- [46] Dieken G. Karbonatmikrofazies, Paläoökologie und Genese der Stromatactis-Strukturen des Suchomasty- und des basalen Acanthopyge-Kalksteins im Barrandium (Tschechische Republik) [M]. *Aachener Geowissenschaftliche Beiträge*, 1996, 19: 1–116.
- [47] Flajs G, Hüssner H. A microbial model for the Lower Devonian Stromatactis mud mounds of the Montagne Noire (France) [J]. *Facies*, 1993, 29: 179–194.
- [48] Guthrie J M. Molecular and carbon isotopic analysis of individual biological markers: evidence for sources of organic matter and palaeoenvironmental conditions in the Upper Ordovician Maquoketa Group, Illinois Basin, U. S. A [J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 25: 439–460.
- [49] Grice K, Schaeffer P, Schwark L, et al. Changes in palaeoenvironmental conditions during deposition of the Permian Kupferschiefer (Lower Rhine Basin, northwest Germany) inferred from molecular and isotopic compositions of biomarker components [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26: 677–690.
- [50] Grice K, Cao C Q, Love G D, et al. Photic zone euxinia during the Permian–Triassic superanoxic event [J]. *Science*, 2005, 307: 709–714.
- [51] Grice K, Audino M, Boreham C J, et al. Distributions and stable carbon isotopic compositions of biomarkers in torbanites from different palaeogeographical locations [J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32: 1195–1210.
- [52] Kershaw S, Zhang T, Lan G A. Microbialite carbonate crust at the Permian–Triassic boundary in South China, and its palaeoenvironmental significance [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 146: 1–18.
- [53] Kershaw S, Guo L, Swift A, et al. Microbialites in the Permian–Triassic boundary interval in Central China: Structure, age and distribution [J]. *Facies*, 2002, 47: 83–89.
- [54] Ezaki Y, Liu JB, Adachi N. Earliest Triassic microbial itemicroto megastructures in the Huaying area of Sichuan Province, South China: implications for the nature of oceanic conditions after the end–Permian extinction [J]. *Palaios*, 2003, 18: 388–402.
- [55] Ezaki Y, Liu J, Adachi N. Microbialites and their responsible microbes following the end Permian extinction in Sichuan, South China [J]. *Gondwana Research*, 2001, 4: 614–614.
- [56] Lehrmann D J, Payne J L, Felix S V, et al. Permian–Triassic boundary sections from shallow–marine carbonate platforms of the Nanpanjiang Basin, south China: implications for oceanic conditions associated with the end–Permian extinction and its aftermath [J]. *Palaios*, 2003, 18: 138–152.
- [57] Watson J S, Sephton M A, Looy C V, et al. Oxygen–containing aromatic compounds in a Late Permian sediment [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36: 371–384.
- [58] Xie S, Pancost R D, Yin H, et al. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction [J]. *Nature*, 2005, 434: 494–497.
- [59] 王永标, 童金南, 王家生, 等. 华南二叠纪末大绝灭后的钙质微生物岩及古环境意义 [J]. *科学通报*, 2005, 50(6): 552–558.  
Wang Yongbiao, Tong Jinnan, Wang Jiasheng, et al. Calcimicrobialites and its palaeoenvironmental significance after Late–Permian mass extinction in South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(6): 552–558 (in Chinese).
- [60] 吴亚生, 姜红霞, Yang Wan, 等. 二叠纪–三叠纪之交缺氧环境的微生物和微生物岩 [J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(5): 618–628.  
Wu Yasheng, Jiang Hongxia, Yang Wan, et al. The microbe and microlite in anoxic environment during the Permian–Triassic transition [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(5): 618–628 (in Chinese).
- [61] 杨浩, 张素新, 江海水, 等. 湖北崇阳二叠纪–三叠纪之交钙质微生物岩的时代及基本特征 [J]. *地球科学*, 2006, 31(2): 165–170.  
Yang Hao, Zhang Suxin, Jiang Haishui, et al. Age and general characteristics of calcimicrobialite near the Permian–Triassic boundary in Chongyang, Hubei Province [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(2): 165–170 (in Chinese with English abstract).
- [62] 黄咸雨, 焦丹, 鲁立强, 等. 二叠纪–三叠纪之交环境的不稳定性和生物危机的多阶段性: 浙江长兴微生物分子化石记录 [J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(5): 629–635.  
Huang Xianyu, Jiao Dan, Lu Liqiang, et al. The fluctuating environment associated with the episodic biotic crisis during the Permian–Triassic transition: Evidence from microbial biomarkers in Changxing, Zhejiang Province [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(5): 629–635 (in Chinese).
- [63] 何磊, 王永标, 杨浩, 等. 华南二叠纪–三叠纪之交微生物岩的古地理背景及沉积微相特征 [J]. *古地理学报*, 2010, 12(2): 151–163.  
He Lei, Wang Yongbiao, Yang Hao, et al. Palaeogeography and microfacies characteristics of microbialites across the Permian–Triassic boundary in South China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(2): 151–163 (in Chinese with English abstract).
- [64] 刘欣春, 陈孝政, 叶法丞, 等. 川东北二叠系–三叠系界线附近微生物岩微观表面特征观察研究 [J]. *古生物学报*, 2010, 49(2): 261–268.  
Liu Xinchun, Chen Xiaozheng, Ye Facheng, et al. Surface microstructures of the microbialite around Permian–Triassic boundary, in Sichuan, China [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2010, 49(2): 261–268 (in Chinese with English abstract).
- [65] 吕炳全, 瞿建忠. 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 [J]. *科学通报*, 1989, 34(22): 1721–1724.  
Lv Bingquan, Qu Jianzhong. Sedimentation of anoxic

- environments under trans gressionian dup welling process in Early Permian in Lower Yangtze area[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(22): 1721–1724(in Chinese).
- [66] 施春华, 胡瑞忠, 颜佳新. 栖霞组沉积地球化学特征及其环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(2): 144–148.
- Shi Chunhua, Hu Ruizhong, Yan Jiaxin. Sedimentary geochemistry of the Qixia Formation and its environmental implication[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(2): 144–148(in Chinese with English abstract).
- [67] 颜佳新. 华南地区二叠纪栖霞组碳酸盐岩成因研究及其地质意义[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 579–586.
- Yan Jiaxin. Origin of Permian Chihhsian carbonates from South China and its geological implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 579–586(in Chinese with English abstract).
- [68] 李洪星, 陆现彩, 边立曾, 等. 有孔虫壳体内部草莓状黄铁矿成因及其地质意义——以湖北雁门口地区栖霞组有孔虫化石为例[J]. 高校地质学报, 2009, 15(4): 470–476.
- Li Hongxing, Lu Xiancai, Bian Lizeng, et al. Formation of pyrite framboids in the chamber of foraminifera and its geological significance: A case study of the foraminifera fossils in the Qixia Formation in the Yanmenkou area, Hubei Province [J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(4): 470–476(in Chinese with English abstract).
- [69] Mike Leeder. Cybertectonic Earth and Gaia's weak hand: sedimentary geology, sediment cycling and the Earth system[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164: 277–296.
- [70] 范嘉松, 吴亚生. 世界二叠纪生物礁的基本特征及其古地理分布[J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 287–304.
- Fan Jiasong, Wu Yasheng. Main features of the Permian reefs of world and their palaeogeographic distribution [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(3): 287–304(in Chinese with English abstract).
- [71] 田树刚, 范嘉松. 东昆仑早—中二叠世生物礁建造特征[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 145–154.
- Tian Shugang, Fan Jiasong. Reef– building mechanism in the early–middle Permian, the east Kunlun[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(2): 145–154(in Chinese with English abstract).
- [72] 柳祖汉. 湖南栖霞期的生物群落、古地理与生物礁[J]. 地质科学, 2003, 38(2): 190–199.
- Liu Zuhan. Communities, palaeogeography and reefs of middle Permian Qixia period in Hunan[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(2): 190–199(in Chinese with English abstract).
- [73] 张廷山, 姜照勇, 陈晓慧. 四川盆地古生代生物礁滩特征及发育控制因素[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 1017–1030.
- Zhang Tingshan, Jiang Zhaoyong, Chen Xiaohui. Characteristics and controlling factors of development of Paleozoic reef–banks in the Sichuan basin[J]. Geology in China, 2008, 35(5): 1017–1030 (in Chinese with English abstract).
- [74] 刘治成, 张廷山, 党录瑞, 等. 川东北地区长兴组生物礁成礁类型及分布[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1298–1311.
- Liu Zhicheng, Zhang Tingshan, Dang Lurui, et al. Reef– forming types and distribution of organic reefs in Changxing Formation of northeastern Sichuan area[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1298–1311(in Chinese with English abstract).
- [75] 周刚, 郑荣才, 陈浩如, 等. 川东地区长兴组台地边缘生物礁类型及其演化特征[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1140–1149.
- Zhou Gang, Zheng Rongcai, Chen Haoru, et al. The types and evolution of platform– edge reefs in Permian Changxing Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1140–1149(in Chinese with English abstract).
- [76] 王春梅, 王春连, 刘成林, 等. 四川盆地东北部长兴组沉积相、沉积模式及其演化[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 594–609.
- Wang Chunmei, Wang Chunlian, Liu Chenglin, et al. Sedimentary facies, sedimentary model and evolution of Changxing Formation in northeast Sichuan basin[J]. Geology in China, 2011, 38(3): 594–609(in Chinese with English abstract).
- [77] 蒋志斌, 王兴志, 张帆, 等. 四川盆地北部长兴组—飞仙关组礁、滩分布及其控制因素[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 940–950.
- Jiang Zhibin, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. Distribution and controlling factors of reefs and oolitic beaches for the Changxing to Feixianguan formations in the northern Sichuan basin[J]. Geology in China, 2008, 35(5): 940–950(in Chinese with English abstract).