https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.358



# 震旦系灯影组核形石白云岩成因机制及其意义:以 柳湾剖面为例

田腾振<sup>1,2</sup>,李泽奇<sup>1,2</sup>,鲁鹏达<sup>1,2</sup>,张 航<sup>3</sup>,吴 娟<sup>1,2</sup>,孙 玮<sup>2</sup>,刘树根<sup>2</sup>,何若玮<sup>2</sup>, 张洁伟<sup>3</sup>,邓 宾<sup>1,2\*</sup>

1. 成都理工大学能源学院,四川成都 610059

2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都 610059

3. 中国石油西南油气田川东北气矿,四川成都 610059

摘 要:震旦系灯影组核形石白云岩作为典型的前寒武纪微生物碳酸盐岩,是我国古老深层油气勘探的岩石类型之一.核形 石成因模式的研究,对研究古水体、恢复古环境及其成储模式有重要指导意义.根据核形石结构特征和成因机制将灯影组核形 石分为6类,结合岩石学、沉积学和地球化学等研究手段,开展了四川盆地北缘核形石分布特征和沉积过程的综合研究.结果 显示:灯影组二段核形石发育于潮下带一潮间坪环境下,水动力和微生物条件的差异影响着微生物生长、自身钙化作用、微生 物膜粘结和捕获作用、化学沉淀作用4种核形石纹层形成机理;进一步体现在水动力条件控制着核形石纹层发育厚度、形态特 征和伴生岩石类型,而微生物活动习性控制影响着核形石主微量、稀土元素分异特征:贫藻纹层较富藻纹层有较高的Fe/Mn 比、实体藻较非实体藻有较高Cu/Zn比,纹层稀土元素富集度一般低于核心.综上所述,灯二段核形石的形成存在4种机理,且 它们被海平面变化下的微生物和水动力条件联合控制.

关键词:核形石;微生物;水动力;灯影组;柳湾剖面;岩石学.

**中图分类号:** P581 **文章编号:** 1000-2383(2023)04-1568-19 **收稿日期:** 2022-03-05

# Genetic Mechanism and Significance of Oncoidal Dolostone in Sinian Dengying Formation: A Case Study of Liuwan Section

Tian Tengzhen<sup>1,2</sup>, Li Zeqi<sup>1,2</sup>, Lu Pengda<sup>1,2</sup>, Zhang Hang<sup>3</sup>, Wu Juan<sup>1,2</sup>, Sun Wei<sup>2</sup>, Liu Shugen<sup>2</sup>, He Ruowei<sup>2</sup>, Zhang Jiewei<sup>3</sup>, Deng Bin<sup>1,2\*</sup>

- 1. School of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
- 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
- 3. Northeast Sichuan Gasfield of Southwest Company, CNPC, Chengdu 610059, China

- **引用格式:**田腾振,李泽奇,鲁鹏达,张航,吴娟,孙玮,刘树根,何若玮,张洁伟,邓宾,2023.震旦系灯影组核形石白云岩成因机制及其意义:以 柳湾剖面为例.地球科学,48(4):1568-1586.
- Citation: Tian Tengzhen, Li Zeqi, Lu Pengda, Zhang Hang, Wu Juan, Sun Wei, Liu Shugen, He Ruowei, Zhang Jiewei, Deng Bin, 2023. Genetic Mechanism and Significance of Oncoidal Dolostone in Sinian Dengying Formation: A Case Study of Liuwan Section. Earth Science, 48(4):1568-1586.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. U19B6003);四川省科技计划重点研发项目(No. 2018JZ0078);四川省科技创新人才项目(No. 2022JDRC0001).

作者简介:田腾振(1996-),男,硕士研究生,主要从事沉积岩石学研究.ORCID:0000-0003-3197-4791. E-mail: 315164494@qq.com \* 通讯作者:邓宾, E-mail: dengbin13@mail.cdut.edu.cn

**Abstract:** As a typical Precambrian microbial carbonate rock, the Sinian Dengying Formation oncoidal dolostone is one of the rock types of ancient deep oil and gas exploration in China. The study on the genetic model of oncoids has important guiding significance for the restoration of paleoenvironment, the study of paleo-water and its reservoir-forming model. In this paper, the oncoid of Dengying Formation is divided into six types based on its structural characteristics and genetic mechanism. Combined with petrology, sedimentology, geochemistry and other research methods, a comprehensive study of the distribution characteristics and depositional process of oncoids in the northern margin of the Sichuan basin has been carried out. The results show that the second member of Dengying Formation sedimented in the environment of subtidal flat and intertidal flat. The differences of hydrodynamic and microbial conditions affect the four kinds of formation mechanisms of oncoidal laminations: microbial growth, microbial calcification, bonding and capturing of microbial biofilm, and chemical precipitation. On the other hand, hydrodynamic conditions control the development thickness of laminations, morphological characteristics and associated rock types of the oncoids. The Fe/Mn ratio of the pooralgae lamina is higher than that of the rich algae lamina; the Cu/Zn ratio of the solid algae is higher than that of the non-solid algae; and the enrichment of rare earth elements in the lamina is generally lower than that the oncoidal nuclei. In summary, there are four formation mechanisms for oncoids in the second member of Dengying Formation, and they are jointly controlled by microbial and hydrodynamic conditions under sea level change.

Key words: oncoid; microorganism; hydrodynamics; Dengying Formation; Liuwan Section; petrology.

# 0 前言

Heim(1916)描述瑞士侏罗系具有不同于鲕粒 的包壳颗粒时初次提出"核形石"概念.目前,核形 石作为前寒武纪典型的微生物岩石类型之一,其微 生物成因已普遍达成共识,但其在微生物岩中的名 词称谓、定位、分类方式和沉积过程仍有差异.20世 纪30到60年代,核形石被普遍认为是藻类成因结 核体,常称为"藻球(Algal ball)""藻饼(Algal biscuits)""藻类豆粒(Algal pisolites)"等(Wolf, 1965; Glass and Wilkinson, 1980). Aitken(1967) 在划分藻 碳酸岩时将核形石归为隐藻碳酸盐岩, Riding (2000)进一步将其微生物岩归纳为叠层石、凝块 石、树形石、均一石以及其他类型微生物岩等5类, 并将核形石划归为其他类型微生物岩.Logan et al. (1964)则认为核形石是球状叠层石,而梅冥相 (2007)认为不能将核形石简单化为球状叠层石,应 与叠层石平行使用.Flügel(2010)认为核形石是藻 包覆的颗粒,以区别于大量亮晶胶结物包覆的鲕粒.

一般而言,核形石是微生物成因的、具有核心 和纹层两部分组成的包覆颗粒(李熙哲等,2000;杨 仁超等,2011;白莹等,2019).核心一般由生物碎屑、 藻团块或微晶团块等组成,指示初始沉积环境(边 立曾和黄志诚,1988);纹层由几种不同类型的富藻 层、贫藻层或碳酸盐岩颗粒纹层围绕核心包覆形成 (李熙哲等,2000;唐玄等,2018).根据核形石核心、 纹层特征或核形石整体几何形态分类,进一步表征 其沉积环境(Kapila, 1977;李熙哲等,2000);或根据 其成因机制进行划分(贺自爱,1982;Flügel, 2010). 杜汝霖(1992)、杨仁超等(2011)结合结构特征和成 因机制对核形石纹层划分,对其特征和沉积过程进 行研究(表1).

核形石自前寒武纪至今均有发育,但目前的研究多集中在寒武纪及以后的层系中;对宏体生物大量欠缺的前寒武世的核形石分布及成因机制研究相当匮乏.本文以四川盆地北缘震旦系灯影组柳湾剖面核形石为例,采用偏光显微镜、扫描电镜、阴极发光和激光微区原位分析测试(LA-ICP-MS)分析等岩石学、沉积学、地球化学手段,对四川盆地北缘震旦系灯影组核形石分布与成因机制进行综合性研究.

## 1 区域地质背景

四川盆地震旦系灯影组沉积期具有板缘拉张 动力学构造沉积背景,其整体覆盖在陡山沱组之 上,在灯影组早期一灯影组末期经历了稳定沉积、 拉张前奏和主体拉张3个阶段(杨瑞青等,2019).在 盆地中北部地区晚元古代一早寒武世绵阳一长宁 拉张槽的控制影响下,川北地区米仓山一汉南古陆 构造高点不断向盆地外迁移,最终在盆地北缘形成 了南高北低的古地势特征.此间伴随全球海平面的 变化,灯影组共发育2个二级层序和4个三级层序, 在灯影组期间经历为4次海退(王文之等,2019),从 而使盆地北缘总体上形成受控于全球海平面频繁

第	48	卷
		_

Table 1         Classification basis and classification method of typical oncoids							
主要依据	具体依据	参考文献	分类内容				
	整体形态	李熙哲等(2000)	似球状、棒状、帽状、不规则状				
			Ⅰ:Lm,Lo、Ⅱ:Lm,Lo,Lg、Ⅲ:Lm,Lo、N-C:缺少纹				
几何形态特征	纹层形态	Kapila(1077)	层,藻网孔包含其他生物壳、IV-S:缺少纹层,藻网孔包				
		Kapila(1977)	含其他核形石(Lm:微晶纹层;Lo:含生物碎屑纹层;Lg:				
			凝块纹层)				
	核心形态	李熙哲等(2000)	简单核形石、复合核形石				
水动力成因特征	水动力	贺自爱(1982)	动态型、静态型、动静交替型				
	微止肺和层	$F_{1}$ ; $r_{col}(2010)$	泥晶核形石、绵层类核形石、孔层类核形石、有孔虫核形				
微生物成因(组分)特征	<b>减生物种</b> 周	r lugel(2010)	石、复合核形石				
	代表性组分	边立曾和黄志诚(1988)	骨骼核形石、非骨骼核形石				
	形太十小十山从郭均浩	杜孙 贡(1002)	同心纹层构造的核形石、具放射状构造的核形石、具同				
	形忍入小士內介即构迫	但仅林(1992)	心纹层和放射状构造的核形石				
结构、成囚机形态守多囚系结合	结构柱尔工术用	<b> </b>	泥晶纹层核形石、富屑纹层核形石、藻(菌)核形石、复合				
	审构付低于成囚	彻仁旭守(2011)	纹层核形石、放射状核形石、凝块核形石				

表1 典型核形石分类依据及分类方式

变化的稳定温暖潮湿碳酸盐岩沉积环境.

川北地区震旦系灯影组沉积期以碳酸盐岩台 地沉积为主,发育大量台坪相、微生物礁滩相和泻 湖相.灯一段沉积期水体较浅,沉积一套纹层状藻 白云岩为主的地层.灯二段四川盆地北缘普遍发育 一套以葡萄花边状白云岩为代表的微生物碳酸盐 岩,其下部富藻、顶部贫藻.至灯三段沉积期,受控 于全球海平面下降及汉南古陆陆源碎屑供给量增 加,川北地区发育一套蓝灰色或灰黑色碎屑岩层系. 灯四段沉积期,海水较深、火山活动加剧,发育一套 富含硅质岩夹层的白云岩层系(刘静江等,2015;徐 哲航等,2020).总体上,川北地区灯一段和灯二段、 灯三段和灯四段分别构成一个海侵一海退的沉积 旋回,其灯二段为富藻白云岩、灯四段为相对贫藻 白云岩.

川北灯影组二段普遍发育微生物白云岩,常见 葡萄花边结构、叠层石和核形石等典型结构,如麻 柳剖面、福成剖面、杨坝剖面等.唐玄等(2018)强调 紫阳麻柳剖面震旦系灯四段发育大量简单核形石、 复合核形石、薄皮核形石等;张云峰等(2022)在南 江县杨坝剖面灯二段发现椭圆状核形石、次圆状一 圆状、帽状等潮坪环境沉积核形石.本文震旦系柳 湾剖面位于巴中南江贵民乡附近(图1),位于杨坝 剖面和紫阳麻柳剖面之间,震旦系灯影组地层出露 完整,因此该剖面核形石解剖对于研究四川盆地北 缘核形石沉积分布与环境特征有重要的指导意义. 2 柳湾剖面震旦系灯影组二段沉积 特征

#### 2.1 柳湾剖面灯二段岩性地层特征

柳湾剖面灯影组与下伏澄江期花岗岩不整合 接触,上覆与筇竹寺组黑色页岩平行不整合接触, 其灯三段与灯二段岩溶风化不整合面发育.灯一段 底部为少量陆源碎屑砂岩,向上逐渐发育泥粉晶白 云岩,为一套海侵体系下的滨岸相沉积地层.

灯二段以潮坪相微生物颗粒白云岩为主,常见 凝块石白云岩(潮下一潮间环境)、核形石白云岩 (潮下一潮间环境)、砂屑白云岩(潮间高能环境)、 藻纹层白云岩(潮上坪低能环境)及泥粉晶白云岩 (潮下带低能环境),发育葡萄花边状构造.凝块石 白云岩呈中-厚层状产出,偏光显微镜下凝块大小 不一、形态不规则,多与其他凝块构成藻团块,其内 部溶蚀严重,被后期细一中晶白云石充填.砂屑白 云岩中砂屑颗粒多为0.01~0.10 mm,砂屑颗粒分选 较好,多形成层纹状,少数与凝块伴生,指示凝块石 向砂屑过渡的中高能环境;部分砂屑颗粒为残余砂 屑.核形石白云岩整段发育,自下而上数量逐渐减 少,至灯二段顶部仅有少量薄皮状核形石与凝块伴 生产出. 泥粉晶白云岩自底至顶逐渐发育, 厚度逐 渐增加;藻纹层白云岩在灯二段中下部、中部最为 发育,揭示灯二段垂向上藻类逐渐贫瘠的特征.根 据岩石学特征,灯二段发育两个泥晶白云岩→核形 石+凝块石(→砂屑)→藻纹层→核形石+凝块



图1 四川盆地北部米仓山地区灯影组震旦系柳湾剖面区域地质特征及其位置

Fig. 1 Regional geological features and location of Dengying Formation Sinian Liuwan Section in Micangshan area, northern Sichuan basin

据四川省地质局第二区域地质小队,1966,1:200 000南江幅地质图修改

石→泥晶白云岩的四级沉积旋回(图2).每个旋回 中由于水动力变化形成的核形石特征不同,两个旋 回中由于藻体环境改变,核形石类型也不同.

## 2.2 灯影组二段核形石特征

2.2.1 柳湾剖面核形石分类 基于对核形石几何 学形态、沉积环境和水动力条件等,本文采用Kapila (1977)核形石分类方案和李熙哲等(2000)纹层分 类原则相结合,以核形石纹层结构特征及其成因学 特征为主要依据,将其划分为3个大类、7个小类(表 2),同时参考杨仁超等(2011)核形石成因机制分 类,从而有助于对核形石的分布特征与成因机制的 探讨.

核形石在形成过程中由于微生物条件变化、水体动荡等环境条件的不一致性,指示单一纹层结构的核形石较少发育;因此,纹层划分主要是以纹层 类型为依据,而非全部纹层特征.根据纹层结构内 的组分类型将其划分为凝块纹层、微生物纹层和微 晶纹层三大类(Kapila, 1977).其中,前两类纹层结 构分别是由凝块、微生物碎屑等颗粒状物质组成, 根据其颗粒具体组分类型又将微生物纹层分为生 物碎屑纹层和丛状藻体纹层.第3类纹层主要是由 显晶质组成,根据晶体大小及晶体分布均匀程度将 其分为波状泥晶(以泥晶为主,纹层内夹杂部分亮 晶)、致密暗色纹层(泥晶)、致密亮晶纹层(亮晶)和 波状亮晶纹层(以亮晶为主,纹层内夹杂部分泥晶) (李熙哲等,2000).

采用此类划分方案,可知除亮晶为主的纹层以 外,各纹层均是富藻环境下强烈微生物活动的产 物,而在水体能量影响下显示出不同纹层特征.丛 状藻体纹层形成于低能水体,主要由于动荡水体环 境下实体藻类结构难以生长和保存.该纹层镜下具 有明显丛状实体藻生长特征,区别于其他纹层的隐

	层 系 深		深 史 性 柱		培下昭上	沉积相		沉积序列		海平面	-2	-2 0 2 4 6		核形石纹			
系	统	组	段	(m)	石工	11	現下照刀	亚相	微相	三级	四级	受化 降	升-6-4	$\delta^{13}O(\%$	o) 2 4 6	层发育类型	
			Ξ	440-	•• ••									• :	•.		
			段	450-	· · · · ·								•		• •		
				460-	· / · / ·	•	S. A.										
				470-	/ */ *	*	l <u>me</u>		潮					• •	•		
				480-	/ **** /				下								
雪		Last		490-		/			带				•				
辰		川		500-	*/	*	1 <u>mm</u>		潮间带					••	•		
				510-	1 - 1 -				、法田								
	上			520-	7	~			召归								
				530-	/ • / •	/	C & B P	潮	下				21	•			
			二	540-		_			带					•	•		
				550-		7	0.00		潮间带				•	•			
				560-		Ž *	and the first		南下				•	•			
				570-	*	*			一带 潮间带					• •			
		E/		580-			A		潮								
旦		影		590-	0/0/0	*			下				•				
				600-	~ / •	~	and a		带								
				610-			<u>tum</u>		潮田市			(					
				630-	-77	~ ^	the state of the		190					•••			
				640-		/	binn	坪	下 				•				
			段	650-	*** / **												
				660-	12 12	7			阁								
	统	č		670-	*/ / 0	* *	- 13 - 1 / ·		带						•		
T					680-	7	2	<b>M</b>		>±0					•	•	_
尔		爼.		690-		7	Contraction of the		诩								
				700-					下				•				
				710-		-			带					•	•••		
,														••	••		
-	1-1	11 砂	屑云	岩	● <u>/●</u> 核型 ●/●/	퀱石云岩	; / <u>***/</u> 泥晶ź	云岩	*	* * *	· 氣纹层:	云岩 74	凝:	块石白云	岩 / •	▲ 含砂云岩	
	••1• 1•• ••1•	: 1 :	质砂	岩	■ 致 密 致 密 纹 厚	密暗色 层发育	─ 波状 約 纹 层 2	尼晶 長育		约	凝块	育	不到	规则亮晶 【层发育	1	丛状藻体 纹层发育	

图 2 川北柳湾震旦系灯影组二段剖面综合柱状特征图(亚相一微相)

Fig. 2 Comprehensive columnar characteristic map of the second member of the Sinian Dengying Formation in Liuwan, northern Sichuan (subfacies-microfacies)

### 表 2 柳湾剖面灯影组核形石分类方案(据 Kapila, 1977;李熙哲等, 2000修改)

Table 2The classification scheme of the Dengying Formation oncoids in Liuwan Section (modified after Kapila, 1977; Li<br/>et al., 2000)

纹层内组分类型	组分具体特征	纹层形成机制	生物环境	水体能量		
凝块纹层	/	<b>#</b> # 和料 # /r 田				
微生物纹层 一	生物碎屑纹层	1曲 犹 仲 柏 垣 作 用		低能环境		
	丛状藻体纹层		富藻			
微晶纹层 ——	波状泥晶纹层	微生物和藻类生长作用		略高能环境		
	致密暗线纹层			遇到五柱法古他互接		
	致密亮晶纹层	化带运送作用	分范	蚀烈间行狭尚胚环境		
	波状亮晶纹层	化子机硬作用	页 凓	低能环境		

晶质或显晶质类型;实体藻以光合作用为主,微生 物膜相对不发育,不利于凝块、微生物碎屑等其他 隐晶质粘结颗粒和化学沉淀显晶质纹层的形成(李 熙哲等,2000;杨仁超等,2011).隐藻中微生物膜和 其中细菌微生物通过粘结和捕获作用、自身钙化作 用和化学沉淀作用形成各种纹层类型.凝块纹层和 生物碎屑纹层均是微生物粘结和捕获作用形成的 纹层,而这种作用机制在高能水体中很难发挥成 效,因此该两类纹层多形成于低能水体环境.致密 暗色纹层和波状泥晶纹层中的泥晶成分是在藻类 顶端吸附效应(粘结和捕获作用)与底部抑制效应 控制下形成(李熙哲等,2000),整圈分布的泥晶纹 层显示核形石在水体中不断跳动,使得其捕获和粘 结作用难以发挥,最终形成致密暗色纹层类型,代 表强烈而持续的高能水体环境;而波状泥晶则非整 圈分布致密暗色纹层,代表间歇性的高能水体扰动 环境.对于亮晶为主的纹层而言,亮晶成分主要是 在微生物控制下的化学沉淀作用而形成.致密亮晶 纹层与致密暗色纹层类似,核形石在水体中不断翻 滚,颗粒物质难以吸附,形成均匀性的纹层特征,象 征持续高能水体环境;同样,波状亮晶非整圈分布, 象征不稳定的高能水体.

2.2.2 核形石纹层特征 柳湾震旦系灯影组剖面 核形石核心为凝块或其粘结聚集形成的藻凝块颗 粒,以多个颗粒组成的复合核心为主,部分为单一 核心.从纹层类型分析,由于前寒武宏体生物欠发 育(李杨凡和李飞,2022),因而该剖面生物碎屑纹 层不发育,主要为凝块纹层(图 3e)、丛状藻体纹层 (图 3a, 3b)、波状泥晶纹层(图 3c, 3d)、致密暗色纹 层(图 3e, 3f)、致密亮晶纹层和波状亮晶纹层(图 3d, 3e).

从纹层厚度上分析,核形石纹层与核心比自 1:1至1:10不等,少数纹层厚度大于核心半径,以 普通核形石和薄皮核形石较为发育.从纹层形态上 分析,纹层主要受控于核心形态发育;柳湾剖面核 心为椭球状或球状,因此围绕不同球度的核心形成 相对薄厚不一的纹层特征.总的来说,虽然柳湾剖 面见薄皮核形石,但仍是发育以某一纹层为主,伴 生其他类型纹层,呈非单一纹层、非均匀纹层厚度 产出.

其次,核形石纹层结构具有显著的世代性,致 使阴极发光下各纹层具有不同特征显示,主要因为 纹层具有期次性及各类型纹层的主要成分和晶体 结构不同.阴极发光下(使用 Sunny 阴极荧光系统 (CL)对各纹层和后期流体进行测试),凝块纹层呈 现圆形、椭圆形、不规则状等形态各异的暗红色,形 态类型与核形石形成过程中所吸附的凝块类型相 关(图 4a);波状泥晶特征为不连续的黑色圈层结 构,黑色圈层结构间见少量暗红色阴极发光响应 (图 4b);致密暗色纹层为暗红色,与暗红色凝块纹 层区别于该纹层多成环带状,而非颗粒状(图 4c); 波状亮晶纹层呈现间断性出现的黄色响应,多在其 他纹层间隙中发育(图 4d);丛状藻体纹层具有沿核 心向四周发散状黑色阴极光响应,鲜与其他纹层共 同发育(图 4e, 4f);重结晶白云石呈现出颗粒状的 浅黑色特征(图 4e, 4f).

除核形石不同纹层类型的发光特征外,亦可见 成岩作用改造下不同期次的矿物响应(图4b,4e, 4f).成岩作用改造下的阴极发光环带特征响应原因 是不同期次矿物的晶体结构差异或矿物基本成分 不同,而核形石纹层形成世代较短,亦可见不同纹 层的世代性,主要是由于生物活动在核形石形成过 程中的重要控制作用.实体藻、隐藻和细菌后期矿 化成分以隐晶质为主,不同微生物其矿化结构和程 度也有所差异,致使隐藻和细菌含量较高的致密暗 线纹层、凝块纹层、波状泥晶纹层富藻段多呈暗红 色阴极发光响应.丛状藻体纹层主要是实体藻控制 形成,与隐藻纹层具有不同阴极发光显示.隐藻和 细菌通过自身生命活动控制的Ca<sup>2+</sup>沉淀具有显晶 质特征,但晶体大小又明显区别于后期流体沉淀矿 物;因此该类纹层(波状亮晶纹层和致密亮晶纹层) 的阴极发光特征与上述纹层存在一定差异.综上所 述,核形石纹层阴极发光特征与微生物活动具有必 然联系,进一步指示核形石形成过程与微生物活动 的相关性.

2.2.3 核形石分布特征 柳湾剖面核形石灯二段 全段分布,顶部发育较少,主要集中在底部和中下 部.结合岩性特征和核形石纹层结构特征将核形石 发育层段划分为两期旋回,与川北地区前寒武灯二 段生物逐渐衰落相对应(李伟等,2015).综合分析得 出,伴随两期海平面的缓慢下降过程,水动力条件 和微生物繁育条件逐渐变化,不同类型纹层交替演 变,以及纹层厚度随海平面下降逐渐减小.

第一旋回发育于灯二段下部10~100m处,核 形石白云岩下部发育大量凝块石白云岩,少量与其 伴生.最底部纹层以丛状藻体纹层核形石为主,伴



图 3 柳湾剖面震旦系灯影组核形石主要纹层类型 Fig. 3 Main types of oncoids of Sinian Dengying Formation oncoids in Liuwan Section a. 丛状藻体纹层核形石(2.5-);b. 丛状藻体纹层核形石(5-),图 a 局部放大;c. 波状泥晶纹层核形石(1.25-);d. 波状泥晶纹层核形石(2.5-), 图 c 局部放大;e. 凝块纹层核形石(5-);f. 波状泥晶纹层核形石(5-)

生少量凝块纹层核形石,核形石直径达2~4 mm的 椭球状,核心为普遍为多个凝块粘结形成的藻团 块,丛状藻体纹层特征明显,部分藻体被后期溶蚀 作用改造,揭示富藻低能潮下带核形石沉积环境. 向上发育致密暗色纹层,常与砂屑白云岩伴生,显 示水体由低能环境向高能环境的垂向变化.致密暗 色纹层核形石发育较薄,指示柳湾剖面核形石沉积 过程中高能潮坪环境沉积时期较短.

凝块纹层核形石是粘结和吸附微小凝块而形成,主要由凝块颗粒和泥粉晶白云石组成(图 3a,

3e).该剖面见其伴生波状亮晶纹层和波状泥晶纹层 共同发育,标志水体能量的动荡变化.该旋回中上 部由于海平面逐渐下降,水体能量增加,致使微生 物的种类和繁育程度大幅度下降,从环境与生物双 重方面制约了核形石的形成,因此该旋回中上部仅 可见少量波状泥晶纹层,厚度较薄.顶部海平面迅 速上升,发育一套以凝块纹层为主核形石白云岩.

第二沉积旋回发育于灯二段中上部,核形石白 云岩厚度80m左右,核形石与凝块石构造密切伴 生,部分层段少量出现且为薄皮状核形石(纹层厚



图4 核形石纹层类型阴极发光特征

#### Fig.4 Cathodoluminescence characteristics of oncoids stone laminae

a.凝块纹层和波状泥晶纹层(2.5倍);b.波状泥晶纹层(2.5倍);c.致密暗色纹层和波状泥晶纹层(2.5倍);d.波状亮晶纹层和波状泥晶纹层 (2.5倍);e.丛状藁体纹层和致密暗色纹层(2.5倍);f.丛状藁体纹层(2.5倍)

度<核心厚度).该旋回底部为一期潮下带略高能环 境下波状泥晶纹层核形石;向上逐渐过渡为凝块石 白云岩→藻纹层白云岩→砂屑白云岩→凝块石白 云岩,至中部发育潮下带中略高能一低能环境的波 状泥晶纹层、凝块纹层和波状亮晶纹层(图5);垂向 上顶部仅少量凝块纹层和薄层波状泥晶纹层发育, 丛状藻体纹层和致密暗线纹层不发育.这与灯二段 顶部微生物发育程度降低、陆源碎屑影响作用增大 的特征相一致,从而导致丛状藻体纹层和致密暗色 纹层不发育.

柳湾剖面核形石总体呈现多类纹层复合发育,

显示出潮间坪-潮下带沉积环境.垂向上两期旋回 中,核形石主要发育在藻纹层和凝块石白云岩层 系,灯二段底部第一期旋回相对于上部第二期旋回 核形石纹层更具富藻特性,指示垂向上核形石沉积 过程中藻类、细菌等微生物活动性减弱.

# 3 核形石微生物成因特征

#### 3.1 扫描电镜特征

核形石作为微生物主控成因的沉积颗粒,经过 埋藏、成岩改造等过程后,其原生生物结构受到了



图 5 核形石野外和镜下沉积序列 Fig. 5 Oncoid field and microscopic sedimentary sequences a.野外核形石层位剖面(四级旋回特征);b.手标本核形石旋回特征 (藻纹层白云岩-凝块石白云岩-核形石白云岩);c.偏光显微镜性 核形石发育特征(藻纹层-凝块石-核形石)(2-)

一定程度的破坏,仅有部分结构残余保留下来.柳 湾剖面震旦系灯影组核形石中见矿化生物有机质 残余及生物生命活动产物(EPS). 通过扫描电镜 (FESEM:使用场发射环境扫描电子显微镜(Qunta250 FEG)和 IncaX-max20 能谱仪(EDS))观察发 现,菌丝体残余物呈柱状附着于晶间微孔内(图 6a), 亦或是与 EPS 共生分布在晶体表面(图 6b). EPS 表现为非晶质体,常与细菌微生物共生,分布 于晶体表面(图 6a, 6b)、晶洞内壁(图 6e)、其他白云 石晶体表面(图 6c, 6d),以粘液状(图 6a~6c)、丝状 (图 6d)、蛛网(图 6e)状产出.形态各异的 EPS 可能 与当时水体环境部分离子矿物存在相关,如Cu<sup>2+</sup>、 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>等离子相关(江孟等,2014),而不同水体 环境下离子浓度有所差异,进一步揭示核形石形成 伴随海平面起伏变化.核形石样品中大量有机矿物 及EPS的存在是对其有机成因的一个重要证据,对 诠释核形石形成过程及其沉积古环境有重要指示 意义.不同离子浓度下微生物膜发育程度不同,适 宜Cu<sup>2+</sup>浓度下微生物膜及EPS发育程度更高,更易 于核形石形成(李姝,2014);在Pb2+增加后,微生物 膜内的连通通道和孔洞减少,但其整体框架形态不 会改变(图 6e, 6f)(江孟等, 2014). 对菌丝体残余物 和EPS进行能谱分析发现,其矿物成分以C(质量 数:10%~45%)、O(质量数:50%左右)、Ca(质量数:10%左右)、Mg(质量数:5%~15%)为主,几乎 未见S、Cl、Fe和Mn等元素成分,显示该期控制核 形石形成的微生物多以呼吸作用和光合作用为主, 未见硫化还原作用等其他生物作用.除此之外,见 实体藻类生物结构,其晶体结构不明显,形态亦与 隐藻、细菌和EPS有所差异(图6f).由于前寒武纪 生物类型的局限性和埋藏改造作用,柳湾剖面仅可 见部分菌丝体残余和实体藻,但足以论证核形石纹 层的微生物成因.

#### 3.2 地球化学特征

对柳湾剖面灯二段核形石样品进行激光微区 原位分析测试(LA-ICP-MS)分析,使用安捷伦电 感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900)和相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统(GeoLas HD:激光能 量 80 mJ, 频率 5 Hz, 激光束斑直径 44 µm). 对柳湾 剖面共计6个核形石样品,包括核形石各种纹层类 型、核心、藻纹层、凝块和后期流体共计32个点位进 行测试,使用NIST610、BHVO-2G、BIR-1G、 BCR-2G国际标准物质进行微量元素标准校正,对 主微量元素和稀土元素进行测试分析.使用 ICPMSDATACAL10.8软件对结果进行分析解释, 采用澳大利亚太古宙页岩对数据进行标准化.结果 显示:各纹层在主量元素、微量元素、稀土元素具有 一定的共性和差异性.各类纹层、凝块核心和藻纹 层Mn/Sr平均值为1.86;Mn、Fe与Sr呈现出不相关 的关系(Mn-Sr相关系数: R<sup>2</sup>=0.22; Fe-Sr相关系 数:R<sup>2</sup>=0.13),说明后期成岩作用改造不强烈,保留 了核形石原始沉积特征(Derry et al., 1992). 藻纹 层、核形石纹层、凝块核心和后期流体的CaCO3含 量在 54%~58% 波动, MgCO<sub>3</sub>含量约 40%~45%; Si元素为除 $CaCO_3$ 和MgCO<sub>3</sub>以外含量最高的元素, 纹层中(微生物)硅质普遍达1500×10<sup>-6</sup>~2000× 10<sup>-6</sup>. 硅质成分的成因主要来源于三个方面,包括生 物或生物化学成因、化学沉积、白云石硅化作用(张 倩慧等,2021).常见的地球化学区分元素包括稀土 元素、Fe、Mn、Al等;热液硅质稀土元素表现出 HREE 富集、Eu 正异常(Sverjensky, 1984), 而明显 区别于非热液硅质 REE 富集、Eu负异常特征,而不 同成因的硅质成分在Fe-Mn-Al元素三角图版中 位于不同区带(徐跃通,1997).本次测试分析样品为 非硅质岩,但硅质成分含量极高,因此使用Fe-Mn-Al元素三角图对该硅质成分来源进行定性分



图6 核形石扫描电镜特征

Fig.6 Scanning electron microscope characteristics of oncoids

a. 波状泥晶纹层:晶间孔内丝状菌(Ba)和晶体表面粘液状胞外聚合物(EPS);b. 波状亮晶纹层晶体表面丝状菌(Ba)和粘液状胞外聚合物(EPS);c.凝块纹层:晶体表面粘液状胞外聚合物(EPS);d.致密暗色纹层:晶体表面丝状胞外聚合物(EPS);e.致密暗色纹层:晶粒表面网状 聚合物(EPS);f. 丛状藻体纹层:实体藻结构(Sa)

析;将数据投点在Fe、Mn、Al元素三角图中发现,柳 湾剖面核形石纹层在热液硅质成分和非热液硅质 成分均有分布(图7),指示纹形成过程中受生物或 生物化学成因控制,沉积埋藏后被热液流体改造. Al/(Al + Fe + Mn)值除丛状藻体纹层达0.50左 右,其他纹层类型在0.20左右波动,指示生物为非 纯远洋生物(Adachi *et al.*, 1986).然而,核形石纹层 样品稀土元素并未出现明显元素富集现象(图7)、 部分纹层 Eu 元素正异常显示(平均正异常指数为 1.84左右)、所有后期流体和部分纹层显示的热液硅 质成分,进一步指示样品受后期热液流体影响.纹 层稀土元素显示 Dy 负异常(平均负异常指数为 0.79);Yb元素见正异常和负异常,且异常指数差异 较大(表3:Dy和Yb部分低于检测限,无异常指数). 目前,国内外对 Dy和Yb元素异常分析研究较少, 且未见对该两种元素单独分析的碳酸盐岩实例.结



图 7 稀土元素配分式和 Al-Fe-Mn 三角图 Fig.7 Partition formula of rare earth elements and Al-Fe-Mn triangular diagrams

合核形石研究背景,推测纹层 Dy元素正异常可能 与生物活动有关;而 Yb元素异常,可能同时受到生 物活动控制和 Tm、Lu元素的影响.整体上,核形石 纹层在生物条件控制下形成,富含大量硅质成分; 成岩后期受热液活动影响,部分纹层原始生物沉积 硅质成分被改造,纹层硅质含量陡增,致使硅质成 分的生物特征元素显示消失,表现为热液硅质成因.

主微量元素中,Fe、Mn比值是对古盐度环境特征的响应,Fe、Mn比随着盐度的降低其比值逐渐升高,Fe/Mn=1为正常海水,Fe/Mn=5为正常淡水; Cu/Zn比值是对氧化还原环境的反应,Cu/Zn比越大,其环境氧化性越强,其中Cu/Zn<0.21为还原环境,比值在0.21~0.35为弱还原环境,比值在0.35~ 0.50为还原氧化环境(梁天意等,2021).核形石主微量元素特征显示明显分异现象(图8),丛状藻体纹层和致密暗色纹层以生物结构实体泥晶化产生的纹层多分布于高古盐度的海水环境中,但由于致密暗线纹层较为致密,沉降速率过快,其反映水体古盐度偏高,实际应为略高盐度弱海水环境.致密亮晶纹层、波状泥晶纹层和波状亮晶纹层以化学作用产生的纹层则显示在古盐度较低的近似淡水环境中,疑似受核形石所形成微观生态系统影响所致. 同时,凝块和凝块纹层在高盐度和低盐度古环境下 均有分布,它可能与测试点位为凝块本体(高盐度) 或胶结物(低盐度)过渡带相关.Cu/Zn比值对比发 现,核形石纹层和核心、凝块和藻纹层普遍发育于 还原一氧化环境,及部分为弱还原环境.丛状藻体 纹层以实体藻为基础的纹层显示出强氧化环境,而 致密暗色纹层、藻纹层等隐藻结构以还原一氧化环 境为主.同一层位核形石纹层和核心、以及凝块和 藻纹层在其古盐度、氧化还原环境方面的显著差异 主要受控于微生物活动的影响,微生物通过其生命 活动改造周围水体环境,促进自身生物结构生成, 为后期沉积提供物质基础.总体上,丛状藻体纹层 (实体藻)生命活动强度大于致密暗色纹层(隐藻), 而致密亮晶纹层、波状泥晶纹层和波状亮晶纹层则 是在此生命活动下微生物通过化学沉淀形成的特 征纹层,显示出微生物条件对核形石纹层类型的控 制作用.

# 4 核形石成因模式

#### 4.1 核形石水动力控制因素

据前文所述,柳湾剖面为碳酸盐岩台地潮坪

表3 柳湾剖面部分核形石样品数据处理结果

Table 3	Data processing results of some oncoidal samples in Liuwan section							
التح المراجع	Fe含量	Mn含量	Sr含量	0 /7	Fe/Mn	Eu/Eu*	Dy异常	Yb异常
尖型	$(10^{-6})$	$(10^{-6})$	$(10^{-6})$	Cu/Zn			指数	指数
	79.45	28.23	45.97	1.48	2.81	2.23		
山區畫住於目	174.03	69.20	49.93	2.70	2.51	0.81	1.21	
<b>必</b> 状深件	185.15	93.53	55.43	1.12	1.98	1.30	0.85	1.31
	99.54	32.17	46.47	0.80	3.09	1.87		
	283.32	44.40	47.93	0.27	6.38	0.97	0.60	
海井公司	178.76	62.91	47.04	0.48	2.84	2.41		
艇块纹层	240.70	59.40	56.71	0.17	4.05	1.27		0.33
	267.36	113.74	43.48	0.72	2.35	0.41		
	203.85	42.81	48.28	0.67	4.76	1.60	0.37	
波状泥晶纹层(泥晶)	315.86	65.12	47.25	1.49	4.85	2.52		0.83
	256.95	57.49	42.84	0.14	4.38	0.79		
	129.20	80.75	34.64	0.22	1.60	0.51	0.37	0.87
	158.71	75.68	36.63	0.29	2.10	2.22		
	131.70	102.83	38.55	0.39	1.28	0.82	0.65	
	148.09	100.93	39.68	0.32	1.47	1.70		0.16
<b></b> 我 密 暗 巴 纹 层	107.75	45.77	28.85	0.08	3.73	0.80		
	230.33	102.94	47.95	0.07	2.24	0.62	1.11	
	259.46	68.72	40.80	0.29	3.78	0.58		
	182.80	100.21	41.62	0.23	1.82	0.80		
	475.80	70.03	42.21	1.17	6.79	0.81	0.72	
波状或致密亮晶纹层(亮晶)	302.48	75.87	48.44	0.77	3.99	1.41	0.36	2.31
	144.01	43.51	31.79	0.33	3.31	0.33		
海北北北	82.27	81.33	39.38	0.46	4.84	1.75	0.47	1.32
艇状核心	525.77	190.99	37.19	0.13	2.75	0.88		
<b>丘</b> 押 法 <b>法</b>	29.58	232.23	25.74	0.13	0.13	2.56	0.10	
<b>口</b>	17.78	154.80	26.40	0.07	0.11	2.44	0.64	1.53





Fig. 8 Consonance plot characteristics of Fe/Mn and Cu/Zn ratios of oncoids in Deng 2 Member, Liuwan Township Section

相,核形石发育层段普遍位于潮下带一潮间坪,其 沉积环境的转变与海平面变化密切相关,对柳湾剖 面灯影组岩样分段进行原岩碳氧同位素测定,进而 根据碳同位素波状判断海平面变化趋势(Ding et al., 2020).结果显示:灯二段碳同位素普遍正偏 移,偏移强度最大为6%左右,氧同位素在-5%~ 5‰之间波动,根据碳同位素变化趋势得出,灯二段 发育两个三级旋回伴随两次海平面下降过程,两个 过程均有核形石旋回发育.第一旋回中发育从状藻 体纹层(伴生少量凝块纹层)→致密暗色纹层→波 状泥晶纹层→凝块纹层(伴生少量波状亮晶纹层), 指示潮下带(低能环境)→潮下-潮间坪(高能环境)→ 潮间坪(略高能环境)→潮下带(低能环境)的环境水 体变化,第二旋回中核形石纹层类型为波状泥晶纹 层→凝块纹层(伴生少量波状亮晶纹层),指示潮下 带(略高能环境)→潮下带(低能环境).核形石纹层 发育特征与碳氧同位素测定的三级旋回和海平面 变化具有耦合性,与岩性特征表征的四级旋回水动 力强度基本符合,指示柳湾剖面核形石发育受控于 水动力条件.

水动力环境影响核形石发育类型,核形石几何 形态、核心类型和纹层类型等均与水体能量密切相 关.柳湾剖面核形石均为凝块或其藻粘结而成的藻 团块,多种纹层混合发育,几何形态发育球状、椭球 状和不规则状.其中,高能水体环境形成的核形石 多呈球状、椭球状;低能环境呈不规则状,纹层见单 一面发育.从纹层类型来讲,化学沉淀形成的亮晶 纹层在低能水体环境中表现为波状亮晶纹层、高能 水体中形成致密亮晶纹层;隐藻类和细菌控制形成 纹层随水体能量增加依次发育凝块纹层、波状泥晶 纹层、致密暗色纹层;实体藻类纹层主要是低能环 境下形成,高能环境下实体藻类结构易被破坏,不 利于丛状藻体纹层核形石发育(图9).

#### 4.2 核形石微生物控制因素

核形石作为微生物成因的具有圈层结构的包 覆颗粒,其形成过程中离不开菌藻类活动,在核形 石形成过程中可将单个核形石颗粒视作一个"微观 生态系统"(杨仁超等,2011).该生态系统与环境相 互作用,促进生物新陈代谢和生命活动.微生物自 身活动通过改变自身环境,从而为矿物形成提供有 利条件,实现诱导矿化过程(黄亚蓉,2019),而该过 程中产生的微生物膜和胞外聚合物(EPS)是纹层矿 物沉淀的关键 .EPS 是指微生物分泌产生的一些与 细胞成分类似的蛋白质、核酸等高分子聚合物,常 分布于微生物内部或表面.微生物表面 EPS 的存在 不仅可以吸附水体环境中的营养物质,进一步可为 细菌生存、繁育提供可能,大量细菌在EPS上繁盛 形成微生物膜.结合川北柳湾剖面,其微生物残余 物及EPS能谱分析未显示S、Cl等元素富集,纹层 LA-ICP-MS分析Cu、Zn等元素普遍小于1×10<sup>-6</sup>, 揭示核形石形成时期微生物以有氧形式参与的光 合作用和呼吸作用为主,少有硫化作用等厌氧生物 活动参与.微生物膜和EPS通过此类有氧生物活动 调整核心或纹层表面物理化学性质,促进碳酸盐岩



图 9 核形石类型与水动力、生物活动关系(据李熙哲等,2000修改)

Fig. 9 The relationship between oncoid types and hydrodynamic and biological activities (modified from Li et al., 2000)

Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>离子沉淀和颗粒吸附使其形成核形石纹 层.除此之外,微生物和其微生物膜自身钙化也是 纹层形成的一种重要形式(图10).

核形石纹层形成主要是通过实体藻生长作用、 细菌和隐藻类等微生物自身钙化作用、微生物膜粘 结和捕获作用、化学沉淀作用4种方式控制核形石 纹层的形成,主要发生在温暖湿润的适宜微生物繁 盛而其结构不易被破坏的浅海环境.第一,在核形 石凝块核心形成之后,实体藻类围绕其生长,由于 四季变化、环境变化,致使生物繁盛、衰败交替,而 在埋藏期泥晶化作用促使其形成亮暗交替的丛状 藻体纹层.第二,微生物自身活动分泌产生大量 EPS聚集在核心表面逐渐形成微生物膜,其自身生 命活动捕获大量Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>离子进入生物结构,在 沉积期钙化形成CaCO<sub>3</sub>沉淀,或者Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>被固 定于微生物结构中,在后期成岩作用与降解作用的 影响下形成CaCO<sub>3</sub>,通过这两种微生物钙化作用形 成致密暗色纹层或波状泥晶纹层的暗色部分.第 三,微生物膜粘结和捕捉水体中细小颗粒物,主要 包括凝块、砂屑、微生物碎屑等.根据捕获物类型的 不同分为凝块纹层(纹层成分主要是凝块)、微生物 纹层(捕获物主要是微生物碎屑).第四,微生物及其



Fig. 10 Formation pattern of oncoidal laminae in Dengying Formation



Fig. 11 Genesis model of oncoidal dolostone in Liuwan Section

生物膜形成的微观生态系统能够改变小范围环境 特征,主要通过生命活动实现.如蓝细菌通过CO<sub>2</sub>浓 缩机制将环境中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>2</sub>运输进生物结构,产 生OH<sup>-</sup>排入生物膜中,进而消耗生物膜中H<sup>+</sup>形成 碱性梯度(产生H<sub>2</sub>O,是化学沉淀纹层中古盐度较低 的主控因素)(张喜洋,2016),促进Ca<sup>2+</sup>沉淀,形成 以致密亮晶纹层为主的化学沉淀纹层,包括波状亮 晶纹层的亮晶部分.实体藻生长作用一般单独产出 丛状藻体纹层,而其他3种作用共同控制形成以某 一纹层为主的多种纹层共同发育的核形石纹层结 构(图10).

柳湾剖面主要出露震旦系灯影组地层,主要为 隐藻类、细菌和部分实体藻类,因此不发育生物碎 屑纹层,其他纹层类型均见发育.受海平面变化和 水体环境影响,川北前寒武世主要是隐藻活动,实 体藻较不发育,仅发育于灯二段底部.因此,柳湾剖 面仅底部发育丛状藻体纹层,粘结捕获作用形成的 凝块纹层和微生物钙化作用形成的致密暗色纹层 全段可见.另外,由于微生物生命活动的存在,微生 物表面"微观生态系统"的化学特性固然不同于普 通环境,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>在微生物膜碱性浓度下沉淀,形 成伴生于致密暗色纹层的致密亮晶纹层,或受水动 力影响交替出现的波状亮晶纹层和波状泥晶纹层. 由于多种作用共同控制下,因此单一纹层核形石不 易于形成,柳湾剖面多为某一特征纹层为主,伴生 其他类型纹层为特征的核形石.主要原因为某一类 型纹层形成后,受环境变化或自身结构影响,在微 生物活动的主控下形成新类型或原类型纹层,多次 重复作用最终形成核形石纹层结构.

#### 4.3 柳湾剖面核形石形成过程

柳湾剖面灯二段发育于潮坪环境,可见凝块石 白云岩、藻纹层白云岩、核形石白云岩、砂屑白云岩 等.核形石主要发育于潮下带低能环境,少量核形 石见于潮下带上部至潮间带高能环境,与凝块石白 云岩和砂屑白云岩伴生,与潮间带一潮上带藻纹层 白云岩或潮下带泥粉晶白云岩顶底接触,具备完整 沉积旋回特征.随海平面变化依次沉积泥粉晶白云 岩→砂屑白云岩→核形石白云岩→凝块石白云 岩→藻纹层白云岩,对应于潮坪沉积环境的转变.

核形石沉积受微生物发育特征和水体能量双 重因素控制.在潮坪环境下,海平面变化控制水体 能量,同时不同潮面间微生物发育程度不同.因此, 海平面变化是控制潮坪环境下核形石发育的主要 因素.对于隐藻、细菌等微生物控制形成的核形石 而言,早期凝块、藻团块或破碎叠层石等形成核心 后,受光面生物繁盛产生大量 EPS,部分微生物膜 形成(图11a).在微生物生命活动过程中,其通过自 身光合作用或细菌呼吸作用产生气体使自身变轻, 亦或是低能水体控制其翻滚、浮起、高能水体中不 断弹跳,促进核心大范围被微生物膜和EPS 包裹 (图 11b).其后,根据自身重力与水体能量相关性悬 浮于不同水体环境下,并不断运动,潮下(高盐度) 低能富藻(氧化环境)环境中,悬浮核心依靠微生物 膜粘结和捕获作用,吸附大量凝块、砂屑、生物碎屑 颗粒,形成凝块纹层或生物碎屑纹层.潮下带顶部 和潮间带下部(古盐度略高的弱氧化环境)水体能 量强烈而持续,贫藻环境中形成致密亮晶纹层、富 藻环境中微生物后期矿化形成致密暗线纹层.但 是,致密亮晶纹层主要受控于微生物诱导矿化、致 密暗线纹层沉降迅速,所以Fe/Mn比值反映的古盐 度信号存在较大偏差.根据水动力条件对致密暗线 纹层和致密亮晶纹层进行反演,这两种纹层应位于 略高盐度水体环境,潮间带(古盐度低)和潮下带 (略高盐度)略高能下,由于核形石颗粒在高能一略 高能环境中反复转换,因此微生物在纹层不同位置 富集不同,微生物后期矿化后多形成波状泥晶纹层 (富藻)或波状亮晶纹层(贫藻).对于潮上带环境(较 高盐度),其间歇性暴露,不易与微生物发育与繁 盛,鲜有纹层发育(图11c).随着海平面上升或自身 包覆纹层不断形成,水体能量不再支持核形石悬 浮、翻滚,核形石逐渐下沉,同时可能伴随凝块、砂 屑等颗粒(图 11d)沉积于不同潮坪相带中(柳湾剖 面核形石多沉积于潮下带,部分见于潮间带).另外, 由于在纹层形成过程中,潮坪环境水体能量、生物 宜居环境和生物类型在不断变换,因此易形成多种 纹层类型复合核形石,单一纹层核形石较少.对于 实体藻而言,其在水体中翻滚悬浮过程中生物膜作 用较弱,主要通过光合作用进行藻体生长.由于季 节变化,实体藻发育程度不同,沉积后经埋藏泥晶 化作用形成纹层.

## 5 结论

(1)柳湾剖面震旦系灯影组核形石主要发育在 灯二段,根据核形石纹层结构特征将其划分为:丛 状藻体纹层、凝块石纹层、致密暗色纹层、波状泥晶 纹层、致密亮晶纹层和波状亮晶纹层六类,它们发 育于潮下带一潮间坪低能环境、具有明显的两个三 级旋回生长特性.

(2)灯二段核形石发育微生物结构,具微生物 分泌物(EPS和微生物膜)成分特征,地球化学元素 揭示其硅质成分主要是生物化学成因,受后期热液 活动影响,且Fe/Mn、Cu/Zn比值指示核形石纹层 具有生物结构成因和生物化学沉淀成因两种机制.

(3)微生物自身生命活动的差异和水体能量导 致核形石纹层形成过程中的自身生长作用和细菌 等钙化作用、粘结和捕获作用、化学沉淀作用强弱 差异.富藻条件下捕获粘结作用、微生物和藻类生 长作用较强,凝块纹层、微生物纹层及泥晶纹层发 育,贫藻环境则以化学沉淀为主的亮晶纹层发育; 水体能量越大,生物作用越弱,凝块纹层和微生物 纹层逐渐不发育,微晶纹层逐渐发育.所以,灯二段 核形石形成受控于微生物条件和水动力因素双重 控制.

#### References

- Adachi, M., Yamamoto, K., Suigiski, R., 1986. Hydrothermal Chert and Associated Siliceous Rocks from the Northern Pacific Their Geological Significance as Indication Od Ocean Ridge Activity. *Sedimentary Geology*, 47 (1-2): 125-148. https://doi. org/10.1016/0037-0738 (86)90075-8
- Aitken, J. D., 1967. Classification and Environmental Significance of Cryptalgal Limestones and Dolomites, with Illustrations from the Cambrian and Ordovician of South-Western Alberta. SEPM Journal of Sedimentary Research, 37(4): 1163-1178. https://doi.org/10.1306/ 74d7185c-2b21-11d7-8648000102c1865d
- Bai, Y., Luo, P., Liu, W., et al., 2019. Characteristics and Origin of Oncolite from Changping Formation in the Series 2 of Cambrian in Western Beijing. *Geoscience*, 33 (3): 587-597(in Chinese with English abstract).
- Bian, L.Z., Huang, Z.C., 1988. On Classification and Paleoecological Significance of Oncolite and Features of Nonskeletal Oncolite in Ordovician, Anhui, China. Acta Palaeontologica Sinica, 27(5): 544-552, 666(in Chinese with English abstract).
- Derry, L. A., Kaufman, A. J., Jacobsen, S. B., 1992. Sedimentary Cycling and Environmental Change in the Late Proterozoic: Evidence from Stable and Radiogenic Isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1317– 1329. https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90064-p

- Ding, Y., Chen, D. Z., Zhou, X. Q., et al., 2020. Paired δ<sup>13</sup>C<sub>carb</sub> − δ<sup>13</sup>C<sub>org</sub> Evolution of the Dengying Formation from Northeastern Guizhou and Implications for Stratigraphic Correlation and the Late Ediacaran Carbon Cycle. *Journal of Earth Science*, 31(2): 342−353. https:// doi.org/10.1007/s12583-018-0886-1
- Du, R.L., 1992. Precambrian Paleontology and Geoscience. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Flügel, E., 2010. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application. Springer Science & Business Media, Berlin, 289-563.
- Glass, S. W., Wilkinson, B. H., 1980. The Peterson Limestone—Early Cretaceous Lacustrine Carbonate Deposition in Western Wyoming and Southeastern Idaho. Sedimentary Geology, 27(2): 143-160. https://doi.org/ 10.1016/0037-0738(80)90034-2
- He, Z.A., 1982. Classification and Origin of Oncolite. *Oil & Gas Geology*, 3(1): 41-48, 99 (in Chinese with English abstract).
- Heim, A., 1916. Monographie der Churfrsten Mattstock Gruppe (3 Teil). Lithogenesis Beitr Geol Karte, Schweiz NF 20, 369-537.
- Huang, Y. R., 2019. Study of Mineralization Mechanism of Carbonates and Sulfates Mediated by Marine Microbes (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei, 3-13(in Chinese with English abstract).
- Jiang, M., Hu, X.W., Li, S., et al., 2014. Influence of Pb<sup>2+</sup> on the Extracellular Polymeric Substances(EPS) of Bio-Membranes. *Journal of Safety and Environment*, 14(4): 237-241 (in Chinese with English abstract).
- Kapila, D., 1977. Classification of Oncoids from the Upper Jurassic Carbonates of the French Jura. Sedimentary Geology, 18(4): 337-353. https://doi. org/10.1016/ 0037-0738(77)90058-6
- Li, S., 2014. The Interaction Influence between Biofilm and Its Extracellular Polymers by Cu<sup>2+</sup> (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming, 29-58(in Chinese with English abstract).
- Li, W., Liu, J.J., Deng, S.H., et al., 2015. The Nature and Role of Late Sinian-Early Cambrian Tectonic Movement in Sichuan Basin and Its Adjacent Areas. Acta Petrolei Sinica, 36(5): 546-556, 563 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.Z., Guan, S.R., Xie, Q.B., et al., 2000. The Oncoids Genesis in the Middle Member of the Guanzhuang For-

mation of Eocene in Pingyi Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 261-268 (in Chinese with English abstract).

- Li, Y.F., Li, F., 2022. How did Reefs Evolve During the Precambrian-Cambrian Transition? *Earth Science*, 47 (10): 3853-3855(in Chinese with English abstract).
- Liang, T.Y., Liu, J.D., Li, M.M., et al., 2021. Discovery of Oncolitic in the Upper Permian Linxi Formation in Central Great Xing'an Mountains and Its Geological Significances. *Geological Review*, 67(3): 593-611 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.J., Li, W., Zhang, B.M., et al., 2015. Sedimentary Palaeogeography of the Sinian in Upper Yangtze Region. *Journal of Palaeogeography*, 17(6): 735-753 (in Chinese with English abstract).
- Logan, B. W., Rezak, R., Ginsburg, R. N., 1964. Classification and Environmental Significance of Algal Stromatolites. *The Journal of Geology*, 72(1): 68-83. https:// doi.org/10.1086/626965
- Mei, M.X., 2007. Revised Classification of Microbial Carbonates: Complementing the Classification of Limestones. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 222-234 (in Chinese with English abstract).
- Riding, R., 2000. Microbial Carbonates: The Geological Record of Calcified Bacterial-Algal Mats and Biofilms. Sedimentology, 47(Suppl. 1): 179-214. https://doi.org/ 10.1046/j.1365-3091.2000.00003.x
- Sverjensky, D. A., 1984. Prediction of Gibbs Free Energies of Calcite-Type Carbonates and the Equilibrium Distribution of Trace Elements between Carbonates and Aqueous Solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48 (5): 1127–1134. https://doi. org/10.1016/0016-7037 (84)90203-5
- Tang, X., Liu, S.G., Song, J.M., et al., 2018. Characteristics and Environmental Significance of the Sinian Dengying Formation Oncoids in the Northeastern Sichuan Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 36(2): 232-242(in Chinese with English abstract).
- Wang, W.Z., Wen, L., Yao, J., et al., 2019. Sequence Classification and Discovery of Multi-Stage Platform Margin Belts of Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 42 (4): 46-54(in Chinese with English abstract).
- Wolf, K. H., 1965. Petrogenesis and Palaeoenvironment of Devonian Algal Limestones of New South Wales. Sedimentology, 4(1-2): 113-178. https://doi. org/

10.1111/j.1365-3091.1965.tb01285.x

- Xu, Y.T., 1997. Genetic Geochemistry for the Bedded Silicalite in the Late Permian Dalong Formation and Its Sedimehtary Setting in Southeastern Hubei. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 17(3): 204-212(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.H., Lan, C.J., Ma, X.L., et al., 2020. Sedimentary Models and Physical Properties of Mound-Shoal Complex Reservoirs in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin. *Earth Science*, 45(4): 1281–1294(in Chinese with English abstract).
- Yang, R.C., Fan, A.P., Han, Z.Z., et al., 2011. Status and Prospect of Studies on Oncoid. Advances in Earth Science, 26(5): 465-474(in Chinese with English abstract).
- Yang, R.Q., Yang, F.L., Zhou, X.F., et al., 2019. Paleogeographic Evolution of the Dengying Formation in Hannan-Northeastern Sichuan Basin: Sedimentary Evidence of the Extensional Tectonic Setting for the Northwest Margin of the Yangtze Block in the Late Sinian. Acta Sedimentologica Sinica, 37(1): 189–199(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q.H., Su, J.H., Wan, L., et al., 2021. Analysis of Origin and Existing Problems of Siliceous Minerals in Marine Carbonate Rocks in Sichuan Basin. Advances in Geosciences, 11 (6): 869-878(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Y., 2016. The Calcification of Cyanobacteria from Microbial Carbonates in the Cambrian, Western Henan (Dissertation). Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 51-71(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Tang, Y., Tang, H. M., et al., 2022. Fabric Characteristics of Oncoids from Yangba Section, Ediacaran Dengying Formation, Northwestern Sichuan. Acta Sedimentologica Sinica, 40(5): 1302-1312(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 白莹, 罗平, 刘伟, 等, 2019. 北京西郊丁家滩剖面寒武系第 二统昌平组核形石特征及成因. 现代地质, 33(3): 587-597.
- 边立曾,黄志诚,1988.核形石的分类及生态研究.古生物 学报,27(5):544-552,666.
- 杜汝霖,1992.前寒武纪古生物学及地史学.北京:地质出版社.
- 贺自爱, 1982. 藻灰结核分类及其成因. 石油与天然气地 质, 3(1): 41-48, 99.

- 黄亚蓉,2019.海洋微生物调控的碳酸盐和硫酸盐的矿化机制研究(博士学位论文).合肥:中国科学技术大学, 3-13.
- 江孟,胡学伟,李妹,等,2014. Pb<sup>2+</sup>对生物膜胞外聚合物(EPS)的影响研究.安全与环境学报,14(4):237-241.
- 李姝,2014. Cu<sup>2+</sup>对生物膜及其胞外多聚物的作用规律研究 (硕士学位论文).昆明:昆明理工大学,29-58.
- 李伟,刘静江,邓胜徽,等,2015.四川盆地及邻区震旦纪 末-寒武纪早期构造运动性质与作用.石油学报,36 (5):546-556,563.
- 李熙哲,管守锐,谢庆宾,等,2000.平邑盆地下第三系官中 段核形石成因分析.岩石学报,16(2):261-268.
- 李杨凡,李飞,2022. 前寒武-寒武纪重大转折期生物礁是 如何演化的? 地球科学,47(10):3853-3855.
- 梁天意,刘敬党,李猛猛,等,2021.大兴安岭中段上二叠统 林西组核形石的发现及其地质意义.地质论评,67(3): 593-611.
- 刘静江,李伟,张宝民,等,2015.上扬子地区震旦纪沉积古 地理.古地理学报,17(6):735-753.
- 梅冥相,2007. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订:对灰岩成 因结构分类体系的补充. 地学前缘,14(5):222-234.
- 唐玄,刘树根,宋金民,等,2018.四川盆地东北缘灯影组核

形石特征及环境意义. 沉积学报, 36(2): 232-242.

- 王文之,文龙,姚军,等,2019.四川盆地震旦系灯影组层序 划分及多期台缘带的发现.天然气勘探与开发,42(4): 46-54.
- 徐跃通,1997.鄂东南晚二叠世大隆组层状硅质岩成因地球 化学及沉积环境.桂林工学院学报,17(3):204-212.
- 徐哲航,兰才俊,马肖琳,等,2020.四川盆地震旦系灯影组 丘滩体储层沉积模式与物性特征.地球科学,45(4): 1281-1294.
- 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等, 2011. 核形石研究现状与展望. 地球科学进展, 26(5): 465-474.
- 杨瑞青,杨风丽,周晓峰,等,2019.汉南一川东北灯影组古 地理演化:晚震旦世扬子西北缘拉张背景的沉积学证 据.沉积学报,37(1):189-199.
- 张倩慧,苏进红,万漓,等,2021.四川盆地海相碳酸盐岩中 硅质含有物成因及存在问题分析.地球科学前沿,(6): 869-878.
- 张喜洋,2016.豫西寒武纪微生物碳酸盐岩中蓝细菌的钙化 作用(硕士学位论文). 焦作:河南理工大学,51-71.
- 张云峰,唐雨,唐洪明,等,2022. 川西北杨坝剖面埃迪卡拉系 灯影组核形石组构特征. 沉积学报,40(5):1302-1312.