

# 眼球状灰岩成因及其油气地质意义

李 昂<sup>1,2</sup>, 罗开平<sup>2</sup>, 李风勋<sup>2</sup>, 潘文蕾<sup>2</sup>, 彭金宁<sup>2</sup>, 邓 模<sup>2</sup>, 李龙龙<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

**摘要:**眼球状灰岩是一种形态类似眼球与眼皮结构的碳酸盐岩,在我国南方地区广泛发育。通过对国内外关于眼球状灰岩特征及成因等研究成果的大量调研与梳理,分析并论述了眼球状灰岩的岩石学特征、古沉积环境、成因及油气地质意义等。眼球状灰岩由泥晶—粉晶生屑灰岩的“眼球”与泥质灰岩或灰质泥岩的“眼皮”组成,其成因主要包括沉积作用与成岩作用 2 个方面。眼球状灰岩的“眼皮”为滞留深水环境下沉积的中等有机质丰度的高一过成熟烃源岩,具有良好的生烃能力。该类灰岩为一套低孔低渗的油气储层,且“眼皮”的储集性能明显优于“眼球”。裂缝可以改善眼球状灰岩的储集物性,裂缝发育的储层具有良好的油气显示。总体来看,眼球状灰岩气藏为自生自储的碳酸盐岩气藏。

**关键词:**眼球状灰岩;岩石特征;油气地质意义;碳酸盐岩;烃源岩

**中图分类号:**TE122.2

**文献标识码:**A

## Origin of eyeball-shaped limestone and its significance for petroleum geology

LI Ang<sup>1,2</sup>, LUO Kaiping<sup>2</sup>, LI Fengxun<sup>2</sup>, PAN Wenlei<sup>2</sup>, PENG Jinning<sup>2</sup>, DENG Mo<sup>2</sup>, LI Longlong<sup>2</sup>

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** Eyeball-shaped limestone is a kind of carbonate rock with a structure shaped as eyeball and eyelid, which is widely developed in south China. The petrological characteristics, paleo-sedimentary environment, origin and hydrocarbon geological significance of eyeball-shaped limestone were analyzed and discussed through a great deal of review and investigation on the characteristics and origin of domestic and abroad eyeball-shaped limestone. The eyeball-shaped limestone is composed of the “eyeball” of micrite-silty bioclastic limestone and the “eyelid” of argillaceous limestone or calcareous mudstone. Its origin mainly includes sedimentation and diagenesis. The “eyelid” of eyeball-shaped limestone is high-maturity to over-mature source rock with medium organic matter content deposited in deep water environment, which has good hydrocarbon generation potential. The eyeball-shaped limestone is also a set of low-porosity and low-permeability reservoir, and the storage performance of “eyelid” is obviously better than that of “eyeball”. Fractures can improve the reservoir physical properties of eyeball-shaped limestone, and the reservoir with fractures has good oil and gas display. On the whole, the eyeball-shaped limestone gas reservoir is a self-generating and self-storing carbonate gas reservoir.

**Key words:** eyeball-shaped limestone; rock characteristics; petroleum geological significance; carbonate rock; source rock

在我国多个地区及层系中发育了具有特殊构造的碳酸盐岩——眼球状灰岩。眼球状灰岩通常由颜色较深的“眼皮”和颜色较浅的“眼球”两部分组成,因其形态特殊,故在野外剖面和岩心中容易被识别。我国南方地区如云南、贵州、四川、重庆、湖北等地区的二叠系中广泛发育该类碳酸盐岩。眼球状灰岩的“眼皮”部分有机质丰度较高,具有较强的生烃潜力,常被视为良好的烃源岩。眼球状

灰岩内发育的溶蚀孔洞、缝合线及裂缝,不仅为油气的储集提供了空间,而且也是良好的油气运移通道。目前,四川盆地中二叠统眼球状灰岩分布的广泛性和良好的生烃能力,已经引起了石油学家们的高度关注,将其作为下一个重点勘探的层系。焦页 1 井二叠系茅口组眼球状灰岩层段测试产气量达  $1.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,也证明了该类灰岩可以作为重要的油气产层。

收稿日期:2020-03-23;修订日期:2021-04-22。

作者简介:李昂(1990—),男,博士,从事非常规油气地质研究。E-mail:liang2020@jlu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项专题(2017ZX05005-003-002)资助。

关于眼球状灰岩的成因是当前研究的热点,同时也是众多学者长期争论的焦点。前人在对不同地区眼球状灰岩分析研究之后,总结出沉积作用为主和差异成岩作用为主的两种成因观点。沉积作用又可分为原地沉积和异地沉积。原地沉积是指眼球状灰岩的形成是由沉积环境变化导致的。高计元<sup>[1]</sup>、张霞等<sup>[2]</sup>认为,海底底流溶解作用是形成该类灰岩的主要原因。一些学者则认为眼球状灰岩的形成是由于其原始沉积物——灰泥韵律层经一系列成岩作用所致,而陆源碎屑输入、上升流作用、碳酸盐工厂碳酸盐泥生产及浮动的碳酸钙补偿深度(CCD)界面,导致了灰泥韵律层的形成<sup>[3-5]</sup>。异地沉积是指眼球状灰岩的沉积为事件沉积作用。斜坡区的重力流沉积、浅海碳酸盐岩台地的风暴作用及碎屑流作用可以促成眼球状灰岩的形成<sup>[6-9]</sup>。差异成岩论者认为,眼球状灰岩的原始沉积物为均一分布的物质,形成于相同的沉积环境。在成岩过程中,富含泥质的碳酸盐沉积物发生化学分异,使得钙离子重新聚集在一起形成“眼球”,泥质残留下来形成“眼皮”。由于后期压实作用的增强,“眼球”在灰岩中呈现连续串珠状、断续串珠状或杂乱分布<sup>[10-11]</sup>。本文在调研大量文献的基础上,结合目前的勘探与研究进展,系统分析并阐述眼球状灰岩的岩石特征、成因及油气地质意义。

## 1 眼球状灰岩特征

### 1.1 岩石学特征

眼球状灰岩由“眼皮”和“眼球”两部分组成,二者特征在宏观和镜下存在明显的差异。“眼球”

颜色相对较浅,为灰色—深灰色,成分为较纯的灰岩,泥质含量较低,呈枕状、透镜状或瘤状等形态连续、断续或杂乱分布。薄片显示“眼球”岩性主要为泥晶—粉晶生屑灰岩,生物碎屑主要为藻类、腕足类、有孔虫、蠕类、介形虫、海百合等,化石组合属藻类有孔虫腕足类组合。生物碎屑一般较为破碎,分布杂乱,多为原地堆积;“眼皮”较“眼球”颜色深,且泥质含量也相对要高,为深灰色—灰黑色的泥质灰岩或灰质泥岩包裹着“眼球”。“眼皮”的厚度不均,当“眼球”呈透镜状或枕状密集分布时,“眼皮”的厚度较薄,纹层状特征明显;当“眼球”呈层状分散分布时,“眼皮”的厚度较大。“眼皮”内含生物碎屑,主要包括腕足类、有孔虫及介壳,缺乏藻类,化石组合属腕足类有孔虫组合;生屑也较破碎,显定向排列,多数为原地堆积(图1)。

### 1.2 地球化学特征

碳酸盐岩中的矿物常被作为获取古环境信息的重要载体,而元素则是组成矿物的基本单元。各种元素在碳酸盐岩中的富集不仅取决于自身的物理化学性质,同时也受古环境、古气候的影响<sup>[14]</sup>。因此,矿物中元素的种类及含量能够反映岩石的古沉积环境,如古水深、古盐度、古氧化还原条件以及古生产力等。重建古沉积环境对分析碳酸盐岩的成因机制具有重要意义。

#### 1.2.1 古氧相指标

古氧相是指沉积物形成时沉积水体中溶氧量特征。U、V、Mo、Cr 和 Co 等对氧化—还原环境敏感的元素能够有效地指示古氧相。这些元素在氧化条件下溶解度较高,在缺氧条件下溶解度变低,

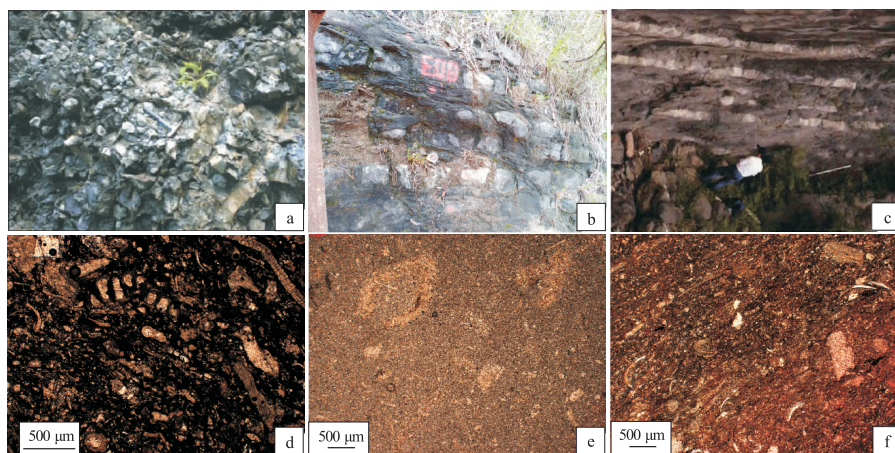


图1 眼球状灰岩野外露头及薄片照片

a. 杂乱分布的眼球状灰岩<sup>[12]</sup>, 四川旺苍双汇, 茅口组; b. 断续串珠状眼球状灰岩, 重庆涪陵, 茅口组; c. 连续串珠状眼球状灰岩<sup>[13]</sup>, 贵州桐梓松坎, 栖霞组; d. 含生屑泥质灰岩“眼皮”, JY66-1井, 1 316.23 m, 茅口组, 单偏光; e. 泥晶生屑灰岩“眼球”, JY66-1井, 1 338.75 m, 茅口组, 单偏光; f. 含生屑泥质灰岩“眼皮”, JY66-1井, 1 318.3 m, 茅口组, 单偏光

Fig.1 Field outcrops and thin sections of eyeball-shaped limestones

因此,缺氧环境下的沉积物中更容易富集这类元素。Cu 和 Ni 等元素是有机碳沉降的良好指标,若沉积岩中 U、V、Mo 等元素与 Cu、Ni 之间具有良好的正相关性,则沉积环境为缺氧环境<sup>[15]</sup>。此外,  $V/(V+Ni)$ 、 $V/Cr$ 、 $Ni/Co$ 、 $U/Th$ 、黄铁矿的矿化程度(DOP),也被广泛用来指示古沉积水体的氧化—还原环境(表 1)。通过对以上指标的分析,眼球状灰岩的“眼球”多为含氧—富氧环境沉积,少量为贫氧环境的产物;而“眼皮”多为厌氧环境沉积,少量为贫氧环境沉积<sup>[16-17]</sup>。然而,苏成鹏<sup>[18]</sup>在研究川东地区眼球状灰岩的古氧相时发现,“眼球”和“眼皮”沉积时水体的化学性质相同,且氧化还原环境没有发生变化。此外,还指出不同指标的判别结果相互矛盾,其原因可能是因为 V、Ni、Cr、Co、U、Th 等元素在碳酸盐岩中的含量太低,导致测试分析数据存在一定的偏差。

### 1.2.2 碳氧同位素指标

碳氧同位素特征是碳酸盐岩重要的地球化学指标之一。碳同位素特征能够反映全球有机碳储量变化、生物总量、 $CO_2$  含量变化、海平面变化、缺氧时间及进行地层对比等。氧同位素能够反映全球气候变化、冰期时间、海平面变化、地质温度、成岩作用影响等。然而,受成岩作用的影响,环境中的碳氧同位素以稳定的价态形式存在,原始沉积物中的  $\delta^{13}C$  与  $\delta^{18}O$  会发生同位素交换而导致含量降低<sup>[19]</sup>,从而影响了碳氧同位素的指示作用,不能较为准确地反映原始沉积环境。通常,年代越老的样品受成岩改造越强烈, $\delta^{13}C$  与  $\delta^{18}O$  值偏移越大,这种效应被称为“年代效应”<sup>[20-21]</sup>。 $\delta^{18}O > -10\%$ 、 $\omega(Mn)/\omega(Sr) < 10$  表明碳酸盐岩样品基本保持了原始的碳氧同位素组成<sup>[22-23]</sup>。此外, $\delta^{13}C$  与  $\delta^{18}O$  值的相关性也能够反映沉积物受成岩改造的强弱,其相关性越好表明岩石受后期成岩改造越强烈<sup>[24-25]</sup>。

#### (1) 古海水盐度

通常, $\delta^{13}C$  与  $\delta^{18}O$  的值与沉积水体的盐度具有相同的变化趋势,其中  $\delta^{13}C$  与古盐度的关系最为密切,且受温度影响较小<sup>[26-28]</sup>。KEITH 和 WEBER<sup>[29]</sup>利用  $\delta^{13}C$  与  $\delta^{18}O$  建立计算古盐度的经

验公式,来区分海相石灰岩和淡水石灰岩:

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

式中:Z 为盐度值,当  $Z < 120$  时为淡水相碳酸盐岩;当  $Z > 120$  时为海相碳酸盐岩。事实上,该公式已经广泛应用于前侏罗纪灰岩的古盐度分析中,并且有学者认为当 Z 值在 120 左右浮动时,表示古沉积环境存在淡水、海水交替的现象<sup>[30]</sup>。四川盆地鹿渡坝剖面、华蓥剖面及石柱剖面茅口组眼球状灰岩样品的 Z 值几乎全部大于 120,仅有极少量样品  $Z < 120$ ,表明眼球状灰岩为海相沉积,受淡水影响较小,为深埋藏成岩环境的产物<sup>[31-32]</sup>。

#### (2) 古水温分析

水体温度也是影响碳酸盐岩稳定同位素组分的重要因素,介质温度对  $\delta^{18}O$  值的影响远远超过对  $\delta^{13}C$  值的影响。因此,在盐度不变的情况下,可以利用  $\delta^{18}O$  的值作为测定古温度的可靠标志。当碳酸盐与介质处于平衡状态时, $\delta^{18}O$  的值随温度的升高而下降<sup>[33-34]</sup>。由 EPSTEIN 和 MAYEDA<sup>[35]</sup>提出后经 CRAIG<sup>[36]</sup>修改的计算古水温度的经验公式为:

$$t = 16.9 - 4.2(\delta^{18}O - \delta^{18}O_w) + 0.13(\delta^{18}O - \delta^{18}O_w)^2$$

式中:t 为古水体温度, $\delta^{18}O_w$  代表当时古水体的  $\delta^{18}O$  值。利用  $\delta^{18}O$  对沉积介质进行古温度分析时,对中生代以来的样品具有较好的效果,而中生代以前的样品常常受到较强成岩作用的影响,导致  $\delta^{18}O$  指示古温度的可靠性降低。梅浩林<sup>[17]</sup>参考前人对二叠系灰岩沉积古温度的校正方法,计算出二叠系眼球状灰岩的沉积古温度为 25~35 °C,个别样品超过 40 °C。此外,眼球状灰岩“眼球”的沉积古温度与二叠纪古海水温度相当,而略低于“眼皮”,表明“眼球”的沉积温度代表着沉积环境原始的水体温度,而“眼皮”的较高温度可能是来自某种外来水体的影响。

#### (3) 海平面变化

早在 20 世纪,国内外学者发现碳氧同位素变化与海平面变化紧密相关,可以指示古海平面的升降。海洋中的  $^{12}C$  主要富集在有机碳中,当海平面

表 1 古水体氧化—还原环境判别指标<sup>[17]</sup>

Table 1 Identification index of oxidation-reduction environment in ancient water body

古氧相	含氧量/(mL·L <sup>-1</sup> )	V/(V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	U/Th	DOP
厌氧、极贫氧	0~0.1	0.60~0.89	>4.25	>7.0	>1.25	>0.75
贫氧	0.1~1.0	0.46~0.60	2.00~4.25	5.0~7.0	0.75~1.25	0.45~0.75
富氧	>1.0	<0.46	<2.00	<5.0	<0.75	<0.45



上升,生物生产力增高,藻类等生物大量繁殖消耗水体中的 $^{12}\text{C}$ 转化为有机碳,从而使 $^{13}\text{C}$ 含量相对升高。此外,海平面上升导致古陆出露面积减小,因剥蚀而带入海洋中的有机碳也随之减少,进一步增大了水体中 $^{13}\text{C}$ 含量<sup>[37]</sup>。因此, $^{13}\text{C}$ 含量的降低反映了海平面的下降,反之表明了海平面的上升。一般认为,碳酸盐岩中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海平面的上升而降低,随海平面的下降而升高。但 $\delta^{18}\text{O}$ 容易受到水体温度、盐度及后期成岩改造等因素的影响,而导致海平面升降的指示效果较差<sup>[38-39]</sup>。通常, $\delta^{18}\text{O}$ 仅作为辅助指示海平面变化的参数。古水体的深浅变化控制着沉积物的岩性特征,因此海平面变化可以作为研究眼球状灰岩成因的重要参考。

## 2 眼球状灰岩成因探讨

不同地质历史时期的古地理环境和沉积环境具有较大差异,从而导致了不同的岩性组合及成岩模式<sup>[40-41]</sup>。前人对不同时期、不同地区的眼球状灰岩的成因做了大量的研究,但观点不一。目前,对眼球状灰岩成因的分歧主要包括沉积作用和成岩作用2个过程。主张沉积成因的学者认为灰岩—泥灰岩韵律层是沉积环境变化的产物<sup>[4,42]</sup>。主张成岩作用的学者认为,形成眼球状灰岩的原始沉积物是均质分布的,来自相同的沉积环境,眼球状灰岩形成于后期的成岩作用<sup>[43-44]</sup>。部分学者则认为沉积作用与成岩作用在眼球状灰岩形成过程中均有存在<sup>[12-13,45]</sup>。

### 2.1 沉积作用

眼球状灰岩中“眼球”和“眼皮”互层状韵律层的差异在于沉积过程中原始沉积物组分的不同,即两者的泥质含量相差较大。沉积环境和物质供给共同决定了这种差异的形成。“眼皮”的泥质含量较高,生物碎屑丰富,反映为静水沉积,其原始沉积物应为滞留的深水环境下形成;“眼球”的泥质含

量较低,表明原始沉积物形成时水动力条件较强,泥质的供应非常有限。这种沉积环境和物质供应的周期性变化,导致了“眼球”和“眼皮”原始沉积物的显著差异。

不同学者对引起这种周期性变化的原因具有不同的认识。薛武强等<sup>[46]</sup>通过对比重庆南川地区与四川盆地内其他地区的茅口组眼球状灰岩的沉积环境后认为,天文周期引起的海平面交替性升降是导致灰泥韵律层发育的主要原因。靳学斌等<sup>[47]</sup>结合野外剖面岩性变化观察及实验测试分析,也认为巢湖地区早三叠世 CCD 界面浮动频繁主要是受控于周期性的气候变化,典型的灰泥韵律层沉积反映了明显的米兰柯维奇天文旋回变化。此外,海底蕴流或洋流对 CCD 界面的升降同样起到了控制作用<sup>[1,7,48-49]</sup>。罗进雄等<sup>[16]</sup>发现沉积环境与物质供应的间歇性变化的原因在于上升流的作用,“眼皮”应为上升流沉积的产物。然而,一些眼球状灰岩中磷质含量低、含有大量的藻类化石,以及上升流沉积的影响范围等问题还未能做出很好的解释。上升流对眼球状灰岩的形成作用还需要进一步研究。原始沉积物灰泥韵律层经过各种地质作用后形成了眼球状灰岩。

#### 2.1.1 暴露成因

构造抬升运动使得灰泥韵律层间歇性地暴露在地表。受风化溶蚀作用的影响,灰泥韵律层常被切割成大小、形状不规则的块体。在埋藏过程中,上覆沉积物重力作用及地下流体溶蚀,将灰质块体进一步分割成枕状、透镜状瘤体,即“眼球”。随后,地下流体中的黏土物质充填于“眼球”之间的裂隙中或地层沉降接受黏土物质沉积形成了“眼皮”,进一步固结成岩为眼球状灰岩(图2a)。

#### 2.1.2 差异压实成因

“眼球”与“眼皮”组分的差异必然会反映在密度和强度的差异上。“眼球”中灰质含量较高,其

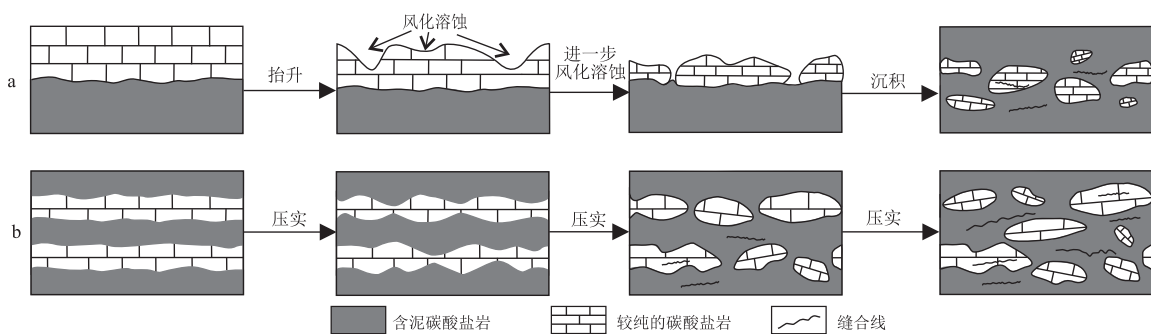


图2 眼球状灰岩暴露成因及差异压实成因示意

Fig.2 Exposure cause and differential compaction cause of eyeball-shaped limestones

密度和强度要明显高于“眼皮”。在准同生期和成岩早期,未固结的灰泥互层在重力作用下发生差异压实。沉积界面在差异压实的初期相对平整,若上覆压力不是很强烈,灰质层未被断开而是发生细颈化,呈串珠状或豆荚状展布,形成连续串珠状的眼球状灰岩;当上覆压力增大,沉积界面变得不平整,而这种不平整又会加强差异压实作用。泥质层塑性流动增强,而连续的串珠状或豆荚状灰质层受垂向挤压和泥质层不均匀的上窜作用进一步断成块体,形成断续串珠状的眼球状灰岩。强烈的差异压实常使断开的“眼球”发生剪切错移,排列杂乱,最终形成杂乱状的眼球状灰岩(图 2b)。在这个过程中,不仅应力作用使得灰质层发生物理变形,压溶和酸溶作用同样促进了“眼球”的形成。

### 2.1.3 重力流成因

在具有一定坡度的台地边缘斜坡区,弱固结的灰泥互层在重力作用下发生水下坍塌。灰岩脆性较大,容易发生碎裂,而泥质岩塑性较好,发生流动变形包裹着灰岩块体,形成成层性与韵律性较差的眼球状灰岩<sup>[50]</sup>。朱洪发等<sup>[51]</sup>认为灰泥互层受到重力滑塌程度的不同,所产生眼球状灰岩的类型也不相同。当斜坡较缓时,滑塌作用不强,灰岩的成层性没有遭到强烈破坏,呈连续的串珠状,即形成连续串珠状的眼球状灰岩;当中等滑塌强度时,灰岩层断裂成分散的块体,进一步受差异压实和压溶作用的影响,形成断续串珠状的眼球状灰岩;当斜坡的坡度较大时,灰泥互层经强烈的滑塌作用后混合成破碎的、分选性差的杂乱状眼球状灰岩(图 3)。

## 2.2 成岩作用

### 2.2.1 压溶成因

在成岩过程中,随着上覆地层压力的增大,均

质的原始沉积物发生差异溶解作用,形成缝合线构造。当一条缝合线形成后,局部应力发生改变,在缝合线两侧的岩石在压剪性应力的作用下,发生平行其延伸方向的微小错动,当错动多次进行时,便形成了缝合线群或缝合线网<sup>[12,41]</sup>。网状微缝合线将原来均匀的灰泥质原始沉积物分割成大小不一的块体<sup>[52-55]</sup>。随着压溶作用的逐渐增强,缝合线两侧的钙质溶解向外迁移,在一定位置处聚集成“眼球”,而压敏性较差的黏土等杂质则残留富集形成“眼皮”,最终以眼球状灰岩的形式产出。在局部应力场作用下,“眼球”发生变形及错移,使之呈杂乱分布在“眼皮”之中(图 4a)。

### 2.2.2 成岩分异成因

苏成鹏<sup>[18]</sup>在分析川东地区茅口组眼球状灰岩的地球化学指标后发现,“眼球”与“眼皮”形成于相同的沉积环境,其原始沉积物几乎没有差别,认为眼球状灰岩为单纯的差异成岩作用所致。差异成岩作用是指在成岩过程中原始沉积物内孔隙水的化学性质发生改变<sup>[56-57]</sup>,导致其内部不稳定的碳酸盐矿物发生溶蚀,产生钙离子重新分配,聚集在一起形成瘤体,即为“眼球”。随着埋深增大,差异压实作用显著增强,“眼皮”发生塑性流动,“眼球”也因所受应力由弱到强而依次呈现出顺层连续串珠状、顺层断续串珠状及杂乱状。此外,“眼球”和“眼皮”会经历压溶作用,进一步促进眼球状灰岩的形成(图 4b)。

## 3 油气地质意义

眼球状灰岩广泛分布于我国南方地区,且厚度稳定。迄今为止,在不少地区的眼球状灰岩中发现了良好的油气显示,如苏南、皖南及川西北等地区,

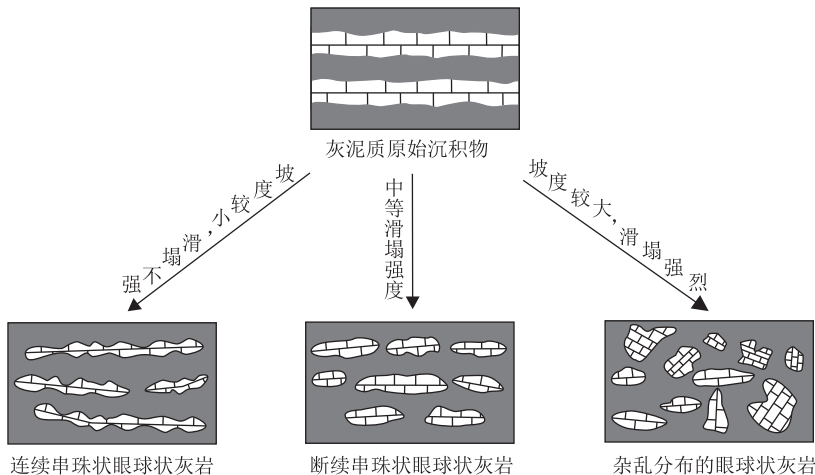


图 3 眼球状灰岩重力流成因示意

Fig.3 Gravity flow cause of eyeball-shaped limestones

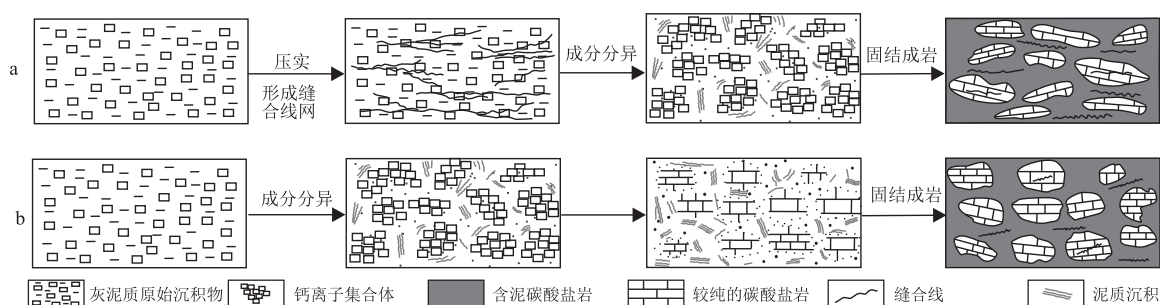


图4 眼球状灰岩差异压溶成因和成岩分异成因示意

Fig.4 Differential pressure solution cause and diagenetic differentiation cause of eyeball-shaped limestones

尤其在四川盆地中二叠统的眼球状灰岩储层中取得了较大进展。早在20世纪70年代中期,江苏句容盆地内东风3井、东风13井分别测试产油逾1 t/d和2.84 t/d<sup>[50,58]</sup>。此前,川西吴家1井茅一段眼球状灰岩测试获气 $0.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2015年,川东焦石坝地区焦页1井茅一段眼球状灰岩中测试获气 $1.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流。同年,位于川东平桥背斜西翼的大石1井,获得测试产量 $5.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。多口钻井的成功试气表明,眼球状灰岩具有生烃能力和储集性能,勘探前景可观。然而,对眼球状灰岩的研究还处于起步阶段。

目前,国内外学者对眼球状灰岩的“眼皮”部分能够生烃这一观点已达成共识。“眼皮”主要为含泥灰岩或泥质灰岩,具有一定的有机质丰度,且纵横向分布相当广泛。就有机质数量和质量而言,眼球状灰岩的“眼皮”作为烃源岩的意义重大<sup>[59-61]</sup>。川东南地区二叠系茅口组一段发育厚度为50~60 m的眼球状灰岩,“眼皮”的有机碳含量分布在0.51%~2.0%,平均值为0.88%;有机质成熟度 $R_o$ 为1.71%~2.18%,平均值为1.94%,处于高成熟生干气阶段;有机质类型主要为II<sub>1</sub>型,少量为I型。碳酸盐岩烃源岩的有机质丰度下限为0.4%~0.5%<sup>[62-63]</sup>,因此,眼球状灰岩的“眼皮”为一套中等有机质丰度的高一过成熟烃源岩,具备较好的生烃条件。眼球状灰岩“眼皮”的孔隙度为0.1%~6.08%,渗透率平均为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,而“眼球”的孔隙度为0.008%~1.44%,渗透率平均为 $0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，“眼皮”的储集物性要明显优于“眼球”,总体表现为低孔低渗的致密储层<sup>[64]</sup>。“眼皮”的储集空间以滑石成岩收缩孔、矿物粒缘孔等无机孔缝为主,有机质孔数量较少<sup>[65]</sup>。眼球状灰岩内还发育低角度滑脱缝、高角度缝及网状缝,裂缝发育的储层储集物性得到改善,具有较好的油气显示。如焦页30-6井、焦页66-1井茅一段的裂缝密度与含气量存在一定的正相关性。姚威等<sup>[66]</sup>

气源对比的结果显示,川东南地区茅一段气源来自于自身,该气藏为一个自生自储的碳酸盐岩气藏。此外,四川盆地部分地区中二叠统茅二段、茅三段发育岩溶缝洞型储层,眼球状灰岩还可以作为烃源岩为该套储层供烃<sup>[67]</sup>。因此,眼球状灰岩作为新的油气勘探领域应该受到高度重视。

## 4 结论

(1) 眼球状灰岩的“眼皮”为深灰色—灰黑色的泥质灰岩或灰质泥岩,“眼球”为灰色—深灰色的泥晶—粉晶的生屑灰岩。“眼球”呈枕状、透镜状或瘤状等连续、断续或杂乱分布在“眼皮”中。“眼球”和“眼皮”中元素的种类及含量能够反映岩石的古沉积环境,对于研究眼球状灰岩的成因具有较大帮助。

(2) 眼球状灰岩的成因主要包括沉积作用和成岩作用。周期性的天文活动、气候变化、海底底流或洋流及上升流等因素控制了原始沉积物灰泥韵律层的沉积,随后受到暴露侵蚀、重力流及差异压实等作用形成眼球状灰岩;成岩作用包括差异压溶作用和成岩分异作用,均一分布的原始沉积物受应力或化学梯度的影响,钙离子运移和重新聚集致使灰质和泥质分异形成眼球状灰岩。

(3) 眼球状灰岩的“眼皮”为一套中等有机质丰度的高一过成熟烃源岩,具备良好的生烃条件。该套灰岩表现为低孔低渗的特征,“眼皮”的储集物性要优于“眼球”,储集空间以滑石成岩收缩孔、矿物粒缘孔等无机孔缝为主。裂缝改善了眼球状灰岩的储集物性,裂缝发育处含气量较高。眼球状灰岩不仅可以自生自储,还可以作为烃源岩为其他储层供烃。

## 参考文献:

- [1] 高计元. 中国南方泥盆系瘤状灰岩的成因[J]. 沉积学报, 1988, 6(2): 77-86.



- GAO Jiyuan. Origin of nodular limestone in Devonian system in south China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1988, 6(2): 77-86.
- [2] 张霞, 林春明, 凌洪飞, 等. 浙西地区奥陶系砚瓦山组瘤状灰岩及其成因探讨 [J]. *古地理学报*, 2009, 11(5): 481-490.  
ZHANG Xia, LIN Chunming, LING Hongfei, et al. Nodular limestone and its genesis from the Ordovician Yanwashan Formation in western Zhejiang province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(5): 481-490.
- [3] MUNNECKE A, WESTPHAL H. Shallow-water aragonite recorded in bundles of limestone-marl alternations: the Upper Jurassic of SW Germany [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164(3/4): 191-202.
- [4] HUSSON D, THIBAUT N, GALBRUN B, et al. Lower Maastrichtian cyclostratigraphy of the Bidart section (Basque Country, SW France): a remarkable record of precessional forcing [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 395: 176-197.
- [5] 吕炳全, 蔡进功, 刘峰, 等. 栖霞组中台缘斜坡上升流沉积相及其与烃源岩的关系 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(5): 109-118.  
LÜ Bingquan, CAI Jingong, LIU Feng, et al. Upwelling deposits at the marginal slope of a carbonate platform in Qixia stage and its relation with hydrocarbon source rocks [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(5): 109-118.
- [6] 刘宝珺, 张继庆, 许效松. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩 [J]. *地质学报*, 1986(1): 55-67.  
LIU Baojun, ZHANG Jiqing, XU Xiaosong. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of Silong, Xingwen, Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986(1): 55-67.
- [7] 李双应, 洪天求, 金福全, 等. 巢县二叠系栖霞组臭灰岩段异地成因碳酸盐岩 [J]. *地层学杂志*, 2001, 25(1): 69-74.  
LI Shuangying, HONG Tianqiu, JIN Fuquan, et al. Allochthonous carbonate rocks in the swine limestone member of the Permian Chihhsia Formation of Chaoxian, Anhui [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2001, 25(1): 69-74.
- [8] 万秋, 李双应. 中扬子地区中二叠统沉积及古地理特征 [J]. *地质学报*, 2011, 85(6): 993-1007.  
WAN Qiu, LI Shuangying. Sedimentation of the Middle Permian series in the Middle Yangtze area and paleogeographical characteristics [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 993-1007.
- [9] 陆鹿, 李壮福, 康鹏, 等. 安徽巢北地区栖霞组臭灰岩段富有机质成因探讨 [J]. *地质论评*, 2014, 60(1): 71-79.  
LU Lu, LI Zhuangfu, KANG Peng, et al. Interpretation of rich organic matter in swine limestone member of the Permian Chihhsia Formation, Chaobei, Anhui [J]. *Geological Review*, 2014, 60(1): 71-79.
- [10] HALLAM A. Origin of minor limestone-shale cycles: climatically induced or diagenetic? [J]. *Geology*, 1986, 14(7): 609-612.
- [11] RAISWELL R. Non-steady state microbiological diagenesis and the origin of concretions and nodular limestones [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1987, 36(1): 41-54.
- [12] 刘杰, 李蔚洋, 何幼斌. 四川旺苍双汇下二叠统茅口组眼球状石灰岩成因分析 [J]. *海相油气地质*, 2011, 16(1): 63-67.  
LIU Jie, LI Weiyang, HE Youbin. Genetic analysis of Lower Permian Maokou augen limestone in Wangcang area, Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16(1): 63-67.
- [13] 罗进雄, 何幼斌, 何明薇, 等. 华南中二叠统眼球状石灰岩特征及成因的思考 [J]. *古地理学报*, 2019, 21(4): 613-626.  
LUO Jinxiong, HE Youbin, HE Mingwei, et al. Thoughts on characteristics and origin of the Middle Permian eyeball-shaped limestone in South China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(4): 613-626.
- [14] 汪凯明, 罗顺社. 海相碳酸盐岩锶同位素及微量元素特征与海平面变化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 51-58.  
WANG Kaiming, LUO Shunshu. Strontium isotope and trace element characteristics of marine carbonate and sea level fluctuation [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 51-58.
- [15] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义 [J]. *地质论评*, 2009, 55(1): 91-99.  
CHANG Huajin, CHU Xuelei, FENG Lianjun, et al. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies [J]. *Geological Review*, 2009, 55(1): 91-99.
- [16] 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): 629-637.  
LUO Jinxiong, HE Youbin. Origin and characteristics of Permian eyeball-shaped limestones in Middle-Upper Yangtze region [J]. *Geological Review*, 2010, 56(5): 629-637.
- [17] 梅浩林. 川东鄂西地区中二叠统眼球状石灰岩成因研究 [D]. 武汉: 长江大学, 2017.  
MEI Haolin. Study on the origin of the Middle Permian eyeball limestone in the area from eastern Sichuan to western Hubei [D]. Wuhan: Yangtze University, 2017.
- [18] 苏成鹏. 川东地区茅口组眼球状石灰岩成因机制及地质意义 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017.  
SU Chengpeng. Genetic mechanism and geological significance of eyeball-shaped limestone of the Maokou Formation in east Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [19] 罗贝维, 魏国齐, 杨威, 等. 四川盆地晚震旦世古海洋环境恢复及地质意义 [J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1099-1111.  
LUO Beiwei, WEI Guoqi, YANG Wei, et al. Reconstruction of the Late Sinian Paleo-ocean environment in Sichuan Basin and its geological significance [J]. *Geology in China*, 2013, 40(4): 1099-1111.
- [20] 邵龙义. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系 [J]. *中国矿业大学学报*, 1994, 23(1): 39-45.  
SHAO Longyi. The radiation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature ETC [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1994, 23(1): 39-45.
- [21] 罗顺社, 吕奇奇, 席明利, 等. 湘北九溪、沅古坪下奥陶统等深岩类型、碳氧同位素特征及沉积环境 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(5): 745-755.  
LUO Shunshu, LÜ Qiqi, XI Mingli, et al. Types, carbon/oxygen isotope characteristics and depositional environments of the Lower Ordovician contourites in Jiuxi and Yuanguping of north Hunan province, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(5): 745-755.
- [22] KAUFMAN A J, JACOBSEN S B, KNOLL A H. The vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 120(3/4): 409-430.

- [23] 葛祥英,牟传龙,周恩恩,等.湖南奥陶纪沉积演化特征[J].中国地质,2013,40(6):1829-1841.  
GE Xiangying, MOU Chuanlong, ZHOU Kenken, et al. Characteristics of Ordovician sedimentary evolution in Hunan province [J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1829-1841.
- [24] HOLSER W T. Gradual and abrupt shifts in ocean chemistry during phanerozoic time [M]//HOLLAND H D, TRENDALL A F. Patterns of Change in Earth Evolution. Berlin: Springer, 1984: 123-143.
- [25] QING Hairuo, VEIZER J. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: implications for coeval seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(20): 4429-4442.
- [26] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 59-88.
- [27] PROKOPH A, SHIELDS G A, VEIZER J. Compilation and time-series analysis of a marine carbonate  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  database through earth history [J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 87(3/4): 113-133.
- [28] 任影,钟大康,高崇龙,等.四川盆地东部下寒武统龙王庙组碳、氧同位素组成及古环境意义[J].海相油气地质,2016,21(4):11-20.  
REN Ying, ZHONG Dakang, GAO Conglong, et al. Carbon and oxygen isotope compositions and its paleoenvironment implication of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the east part of Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2016, 21(4): 11-20.
- [29] KEITH M L, WEBER J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(10/11): 1787-1816.
- [30] 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[J].地球科学(中国地质大学学报),1999,24(1):13-20.  
YAN Jiaxin. Permian-Triassic paleoclimate of eastern Tethys and its paleogeographic implication [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 1999, 24(1): 13-20.
- [31] 张秀莲,王英华,潘荣胜.内蒙古乌拉特前旗余太镇中上奥陶统岩石学特征及其沉积环境[J].地质学报,1991(2):154-165.  
ZHANG Xiulian, WANG Yinghua, PAN Rongsheng. Petrological characteristics and sedimentary environment of the Middle-Upper Ordovician in Shetai town of Urad Front Banner, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991(2): 154-165.
- [32] 李乾,徐胜林,陈洪德,等.川北旺苍地区茅口组地球化学特征及古环境记录[J].成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(3):268-281.  
LI Qian, XU Shenglin, CHEN Hongde, et al. Geochemical characteristics and palaeo-environmental implication of Middle Permian Maokou Formation in Wangcang region, Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(3): 268-281.
- [33] MILLIMAN J, SYVITSKI J. Geomorphic tectonic control of sediment discharge to ocean: the importance of small mountainous rivers [J]. *The Journal of Geology*, 1991, 100(5): 525-544.
- [34] 张秀莲.碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J].沉积学报,1985,3(4):17-30.  
ZHENG Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4): 17-30.
- [35] EPSTEIN S, MAYEDA T. Variation of  $\text{O}^{18}$  content of waters from natural sources [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, 4(5): 213-224.
- [36] CRAIG H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters [J]. *Science*, 1961, 133(3467): 1833-1834.
- [37] 宋昊南,卢远征,谭聪,等.陕西岐山蓊县系碳氧同位素特征及其古环境意义[J].地质学报,2019,93(8):2068-2080.  
SONG Haonan, LU Yuanzheng, TAN Cong, et al. C and O isotopic characteristics of the Mesoproterozoic Jixian system in Qishan, Shaanxi province, China and their paleoenvironment implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(8): 2068-2080.
- [38] 陈梅,王龙樟,张雄,等.C/O同位素在川东北碳酸盐岩储层研究中的应用[J].沉积学报,2011,29(2):217-225.  
CHEN Mei, WANG Longzhang, ZHANG Xiong, et al. Application of carbon and oxygen isotope to carbonate reservoirs in northeast Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 217-225.
- [39] 许中杰,孔锦涛,程日辉,等.下扬子南京地区早寒武世幕府山组海平面相对升降的地球化学和碳、氧同位素记录[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(1):158-169.  
XU Zhongjie, KONG Jintao, CHENG Rihui, et al. Geochemical and carbon and oxygen isotope records of relative sea-level change of Mufushan Formation in Early Cambrian in Nanjing, Lower Yangtze region [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(1): 158-169.
- [40] RAISWELL R. Chemical model for the origin of minor limestone-shale cycles by anaerobic methane oxidation [J]. *Geology*, 1988, 16(7): 641-644.
- [41] 郝家棚,彭成龙,张国祥,等.滇西施甸地区寒武系—泥盆系瘤状灰岩特征及成因探讨[J].贵州大学学报(自然科学版),2014,31(5):43-47.  
HAO Jiapeng, PENG Chenglong, ZHANG Guoxiang, et al. Discussion on origin of the Cambrian-Devonian nodular limestone in Shidian region W. Yunnan province [J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2014, 31(5): 43-47.
- [42] BELTRAN C, DE RAFÉLIS M, PERSON A, et al. Multiproxy approach for determination of nature and origin of carbonate micro-particles so-called "micarb" in pelagic sediments [J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 213(1/2): 64-76. PH
- [43] BATHURST R G C. Diagenetically enhanced bedding in argillaceous platform limestones; stratified cementation and selective compaction [J]. *Sedimentology*, 1987, 34(5): 749-778.
- [44] MUNNECKE A, WESTPHAL H, KÖLBL-EBERT M. Diagenesis of plattenkalk: examples from the Solnhofen area (Upper Jurassic, southern Germany) [J]. *Sedimentology*, 2008, 55(6): 1931-1946.
- [45] 冯增昭,何幼斌,吴胜和.中下扬子地区二叠纪岩相古地理[M].北京:地质出版社,1991:25-41.  
FENG Zengzhao, HE Youbin, WU Shenghe. Lithofacies paleogeography of Permian of Middle and Lower Yangtze region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 25-41.
- [46] 薛武强,刘喜婷,颜佳新,等.重庆南川地区中二叠统茅口组



- 眼球状灰岩成因[J].地质科学,2015,50(3):1001-1013.
- XUE Wuqiang,LIU Xiting,YAN Jiaxin,et al.The origin of eyeball-shaped limestone from Maokou Formation (Mid-Permian) in Nanchuan region,Chongqing, Southwest China[J].Chinese Journal of Geology,2015,50(3):1001-1013.
- [47] 靳学斌,李壮福,陆鹿,等.下扬子巢湖地区下三叠统瘤状灰岩成因再探讨[J].高校地质学报,2014,20(3):445-453.
- JIN Xuebin,LI Zhuangfu,LU Lu,et al.Reappraisal of the origin of Lower Triassic nodular limestone in the Chaohu area,Lower Yangtze region[J].Geological Journal of China Universities,2014,20(3):445-453.
- [48] WESTPHAL H,HILGEN F,MUNNECKE A.An assessment of the suitability of individual rhythmic carbonate successions for astrochronological application[J].Earth-Science Reviews,2010,99(1/2):19-30.
- [49] WESTPHAL H,MUNNECKE A,BRANDANO M.Effects of diagenesis on the astrochronological approach of defining stratigraphic boundaries in calcareous rhythmites: the tortonian GSSP[J].Lethaia,2008,41(4):461-476.
- [50] 郭福生,梁鼎生.浙江江山硯瓦山组瘤状灰岩的成因[J].矿物岩石,1993,13(3):74-80.
- GUO Fusheng,LIANG Dingsheng.On the origin of nodular limestone in Yanwanshan Formation in Jiangshan,Zhejiang[J].Journal of Mineralogy and Petrology,1993,13(3):74-80.
- [51] 朱洪发,王恕一.苏南、皖南三叠纪瘤状灰岩、蠕虫状灰岩的成因[J].石油实验地质,1992,14(4):454-460.
- ZHU Hongfa,WANG Shuyi.The origins of the Triassic nodular and vermicular limestones in south Jiangsu-south Anhui provinces[J].Petroleum Geology & Experiment,1992,14(4):454-460.
- [52] WANLESS H R.Limestone response to stress; pressure solution and dolomitization[J].Journal of Sedimentary Research,1979,49(2):437-462.
- [53] 郭福生.下扬子地区三迭系下统瘤状灰岩成因研究[J].华东地质学院学报,1989,12(4):17-22.
- GUO Fusheng.Preliminary study on the origin of nodular limestone of the Lower Triassic in the Lower Yangtze region[J].Journal of East China College of Geology,1989,12(4):17-22.
- [54] 金振奎,冯增昭.云贵地区二叠系瘤状灰岩的成因[J].岩石学矿物杂志,1994,13(2):133-137.
- JIN Zhenkui,FENG Zengzhao.The origin of the Permian Nodular limestones in Yunnan-Guizhou region[J].Acta Petrologica et Mineralogica,1994,13(2):133-137.
- [55] 袁志华.中扬子地区下三叠统大冶组瘤状灰岩成因研究[J].地球化学,1998,27(3):276-282.
- YUAN Zhihua.Origin of Nodular limestone within Daye Formation of Lower Triassic in the Middle Yangtze region[J].Geochimica,1998,27(3):276-282.
- [56] 韩树棻.安徽沿长江地区下三叠统瘤状灰岩成因研究[J].地质科学,1983(3):232-238.
- HAN Shufen.Preliminary study on origin of the Lower Triassic nodular limestone in the region along the Yangtze River[J].Scientia Geologica Sinica,1983(3):232-238.
- [57] WALTER L M,BURTON E A.Dissolution of recent platform carbonate sediments in marine pore fluids[J].American Journal of Science,1990,290(6):601-643.
- [58] 蓝光志,张廷山,高卫东.川西北地区早志留世瘤状灰岩的类型、成因及意义[J].西南石油学院学报,1994,16(3):1-6.
- LAN Guangzhi,ZHANG Tingshan,GAO Weidong.Classification, genesis and significance of nodular limestone of Early Silurian in NW Sichuan[J].Journal of Southwestern Petroleum Institute,1994,16(3):1-6.
- [59] 刘喜停,颜佳新,马志鑫,等.华南栖霞组灰岩—泥灰岩韵律层的成因[J].地球科学(中国地质大学学报),2014,39(2):155-164.
- LIU Xiting,YAN Jiaxin,MA Zhixin,et al.Origination of limestone-marl alternations from Qixia Formation of south China[J].Earth Science(Journal of China University of Geosciences),2014,39(2):155-164.
- [60] LIU Xiting,YAN Jiaxin,XUE Wuqiang,et al.The geobiological formation process of the marine source rocks in the Middle Permian Chihsia Formation of south China[J].Science China Earth Sciences,2014,57(5):957-964.
- [61] 罗进雄,何幼斌.中上扬子地区二叠系烃源岩特征[J].天然气地球科学,2014,25(9):1416-1425.
- LUO Jinxiong,HE Youbin.Characteristics of the Permian source rocks in the Middle and Upper Yangtze region[J].Natural Gas Geoscience,2014,25(9):1416-1425.
- [62] PETERS K E,CASSA M R.Applied source rock geochemistry[M]//MAGOON L B,DOW W G.The petroleum system:from source to trap.Oklahoma,Tulsa:AAPG,1994:93-120.
- [63] 梁狄刚,张水昌,张宝民,等.从塔里木盆地看中国海相生油问题[J].地学前缘,2000,7(4):534-547.
- LIANG Digang,ZHANG Shuichang,ZHANG Baomin,et al.Understanding on marine oil generation in China based on Tarim Basin[J].Earth Science Frontiers,2000,7(4):534-547.
- [64] 刘瑾,夏文谦,李晶晶,等.川东南地区茅一段储层特征分析[J].科技通报,2019,35(7):26-32.
- LIU Jin,XIA Wenqian,LI Jingjing,et al.Analysis of reservoir characteristics of the first member of Maokou formation in southeastern Sichuan Basin[J].Bulletin of Science and Technology,2019,35(7):26-32.
- [65] 胡东风,王良军,张汉荣,等.碳酸盐岩烃源岩气藏的发现及其油气地质意义:以四川盆地涪陵地区中二叠统茅口组一段气藏为例[J].天然气工业,2020,40(7):23-33.
- HU Dongfeng,WANG Liangjun,ZHANG Hanrong,et al.Discovery of carbonate source rock gas reservoir and its petroleum geological implications:a case study of the gas reservoir in the first Member of Middle Permian Maokou Formation in the Fuling area,Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry,2020,40(7):23-33.
- [66] 姚威,许锦,夏文谦,等.四川盆地涪陵地区茅一段酸解气、吸附气特征及气源对比[J].天然气工业,2019,39(6):45-50.
- YAO Wei,XU Jin,XIA Wenqian,et al.A characteristic analysis between acidolysis gas and adsorbed gas and its application to gas-source correlation in Mao 1 Member,Fuling area,Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry,2019,39(6):45-50.
- [67] 徐祖新.川东地区中二叠统茅口组天然气成因及气源[J].特种油气藏,2019,26(2):16-22.
- XU Zuxin.Genesis and source of gas in Middle Permian Maokou Formation of eastern Sichuan Basin[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2019,26(2):16-22.