

贾 瑜, 黄文辉. 山东平邑盆地古近系卞桥组一段湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(3): 342-354.

JIA Yu, HUANG Wen-hui. Carbon and Oxygen Isotopic Characteristics of Lacustrine Carbonate Rocks from the First Member of Paleogene Bianqiao Formation in Pingyi Basin of Shandong, China and Their Geological Significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(3): 342-354.

DOI: 10. 19814/j. jese. 2019. 12030

山东平邑盆地古近系卞桥组一段湖相碳酸盐岩 碳氧同位素特征及其地质意义

贾 瑜^{1,2}, 黄文辉^{1,2*}

(1. 中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘 要:对山东平邑盆地柏林剖面古近系卞桥组一段 19 件湖相碳酸盐岩样品的岩性特征、碳氧同位素特征、主量和微量元素进行了分析。结果表明:平邑盆地古近系卞桥组一段的岩性从地层底部到顶部整体变化依次为粗碎屑岩、核形石灰岩、生物碎屑灰岩、颗粒灰岩、泥晶灰岩/泥灰岩。碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要为 $-3.5\text{‰} \sim -2.5\text{‰}$, 平均值为 -2.9‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值主要为 $-8.5\text{‰} \sim -6.5\text{‰}$, 平均值为 -7.6‰ ; 碳氧同位素具有良好的相关性, 说明平邑盆地在古近系沉积时期是水体停留时间较长的封闭性湖泊系统。碳酸盐岩 Sr/Ba 值主要为 0.25~31.55, 可以认为平邑盆地古近系沉积时期水介质主要为咸水环境; Mg/Ca 值主要为 0.004 2~0.011 9, 结合氧同位素组成, 反映平邑盆地古近系沉积时期的古气候变化经历了潮湿环境→半干热环境→干热环境 3 个阶段。根据岩性序列垂向演化及薄片特征, 可以推断出平邑盆地在古近系卞桥组一段沉积时期, 湖盆水动力随着地层变新而减弱, 湖盆水体逐渐由高能转入低能环境。

关键词:地球化学; 湖相碳酸盐岩; 碳氧同位素; 古盐度; 古气候; 古近系; 卞桥组; 山东

中图分类号: P588.24⁺5; P597⁺.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2020)03-0342-13

Carbon and Oxygen Isotopic Characteristics of Lacustrine Carbonate Rocks from the First Member of Paleogene Bianqiao Formation in Pingyi Basin of Shandong, China and Their Geological Significance

JIA Yu^{1,2}, HUANG Wen-hui^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The lithological characteristics, carbon and oxygen isotopic composition, major and trace elements of 19 samples for lacustrine carbonate rocks from the first member of Paleogene Bianqiao Formation in Pingyi Basin of Shandong were analyzed. The results show that the lithological changes from the bottom to the top of the first member of Paleogene Bianqiao

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-03-06; 网络首发日期: 2020-04-10 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972172)

作者简介: 贾 瑜(1991-), 男, 四川简阳人, 工学硕士研究生, E-mail: YuJia_916@126.com.

* 通讯作者: 黄文辉(1961-), 男, 福建漳州人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: huangwh@cugb.edu.cn.

Formation in Pingyi Basin are coarse clastic rock, oncolite limestone, bioclastic limestone, grain limestone, micrite limestone/marlstone. The $\delta^{13}\text{C}$ values of carbonate rocks are -3.5‰ — -2.5‰ with an average of -2.9‰ , $\delta^{18}\text{O}$ values are -8.5‰ — -6.5‰ with an average of -7.6‰ , and the carbon and oxygen isotopes show good positive correlation, suggesting a relative closed lake system with a relatively long resident time at Paleogene in Pingyi Basin. The Sr/Ba ratios of carbonate rocks are 0.25–31.55, and it can be considered that the aqueous medium at Paleogene in Pingyi Basin is mainly salt water; the Mg/Ca ratios are 0.004 2–0.011 9, revealing that the paleoclimate evolution at Paleogene in Pingyi Basin experiences 3 stages, including humid climate→semiarid climate→arid climate. According to the vertical evolution of lithologic variation and thin section characteristics, it can be inferred that the hydrodynamic force of lake basin gradually weakens as strata becoming upper, and the water body of lake basin gradually converts from high-energy to low-energy environment at Paleogene in Pingyi Basin.

Key words: geochemistry; lacustrine carbonate rock; carbon and oxygen isotopes; paleosalinity; paleoclimate; Paleogene; Bianqiao Formation; Shandong

0 引言

目前,碳酸盐岩储层在全球范围内已探明的油气储层中具有举足轻重的地位^[1-2]。根据埃信华迈(IHS Markit)的统计数据显示,碳酸盐岩油气资源占全球油气资源总量的70%。中国碳酸盐岩储层具有丰富的油气资源,碳酸盐岩油气资源约占全国油气资源总量的30%^[1-4]。其中,海相碳酸盐岩油气勘探发展较早,勘探开发技术日趋成熟,相继在四川盆地、塔里木盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地发现了大型油气田^[5-8]。然而,湖相碳酸盐岩的相关研究起步较晚,稳定同位素、储层及湖泊生物作用等方面研究至20世纪60年代才逐渐运用到湖相碳酸盐岩研究的相关领域^[9-11]。20世纪80年代初,国外学者开始针对湖相碳酸盐岩的沉积模式^[12]和碳氧同位素的地质意义^[13]等开展了系统研究,并取得了很多成果。国内学者对湖相碳酸盐岩的系统研究亦始于20世纪80年代,相关研究主要集中在湖相碳酸盐岩油气勘探方面^[14-15]。近年来,不少国内学者尝试利用湖相碳酸盐岩的地球化学数据分析古湖泊的环境演化特征及其对油气勘探的意义^[16-22]。其中,碳氧同位素分析作为研究古气候的一项常规手段,在碳酸盐岩研究领域应用广泛,对地层划分与对比,恢复古水温、古盐度、古水文条件,以及其他古气候环境研究具有重要作用^[16-18, 23-28]。

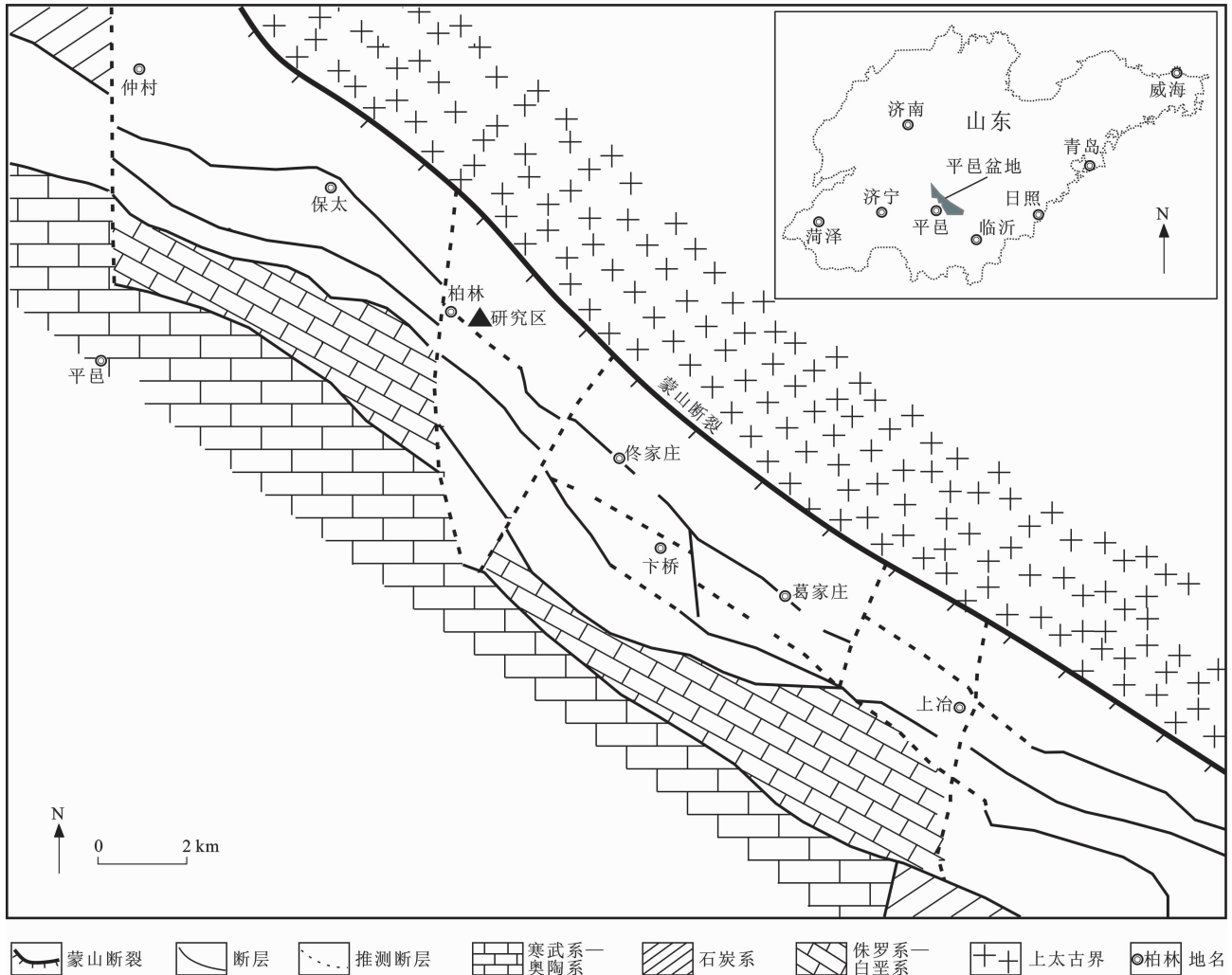
山东平邑盆地古近系官庄群碳酸盐岩具有发育广泛、单层厚度大、岩石类型多样的特点^[29-31]。因此,该区湖相碳酸盐岩研究对厘清中国东部中、新生代岩相古地理及油气勘探具有重要意义。李熙哲等

通过构造运动、古生物、沉积模式等方面对平邑盆地的湖相碳酸盐岩进行了研究,并取得了一定成果^[29-34]。但这些研究仍然存在两个问题:一是对平邑盆地湖相碳酸盐岩碳氧同位素研究仅略有涉及^[35],数据并不完善,这方面资料需要补充;二是对平邑盆地古环境的研究缺乏详实的地球化学数据支撑^[32-34]。针对上述两个问题,本文通过开展平邑盆地古近系下桥组一段湖相碳酸盐岩碳氧同位素研究,结合薄片鉴定及主量、微量元素分析,并综合前人研究成果,探讨了其古湖泊学意义,以期能在一定程度上丰富研究区古近系碳氧同位素数据,对中国东部中、新生代湖盆的古气候特征研究和油气勘探等提供参考。

1 区域地质概况

平邑盆地位于山东省平邑县柏林镇柏林村(图1),地处鲁西隆起带汶泗凹陷的东南延伸部位,盆地呈NW—SE向展布,是一个狭长的断陷湖盆,面积约为540 km²^[32-34]。蒙山断裂东北部隆起为剥蚀区,平邑盆地在古近系沉积时期接收了厚度超过2 km的官庄群沉积^[34]。官庄群地层主要发育碳酸盐岩,具有厚度大、分类广、类型多的特点^[29-30]。

对官庄群地层划分,前人研究差别较大,主要区别在于对官庄群地层的细分方面^[36-46]。根据张增奇等对平邑盆地的地层划分结果,可知官庄群自下而上依次发育固城组、下桥组、常路组和朱家沟组^[39]。本文研究的层位为古近系官庄群下桥组一段。研究区野外考察的平邑盆地柏林剖面(地理坐标为(35°26' N, 117°49' E))位于盆地的中部,全长约为



图件引自文献[47],有所修改

图1 山东平邑盆地地质简图

Fig. 1 Geological Sketch Map of Pingyi Basin in Shandong

27.05 m。依据岩性、构造等标志,可将柏林剖面划分为23个小层。通过野外实地露头观察,结合光学显微薄片鉴定,根据Dunham碳酸盐岩分类体系^[48],对各层岩石进行分类定名,并绘制了平邑盆地古近系官庄群卞桥组一段湖相碳酸盐岩综合柱状图(图2)。

2 分析方法与结果分析

2.1 分析方法

经过对山东平邑盆地柏林剖面的实地考察,本次研究共采集新鲜岩石样品23件。由于碳酸盐岩中的碳氧同位素极易受到成岩后生作用、沉积后的外来热流、生物降解作用等多种因素的影响^[17-18,23-24],所以在选取测试样品时,应该首先排除受裂缝缝合、风化作用、方解石充填及重结晶作用等因素影响的岩石样品。通过显微薄片鉴定,从所有

新鲜样品中筛选出19件未受影响的岩石样品,在中国地质科学院矿产资源研究所完成碳氧同位素分析测试。实验采用磷酸分离法,流程参照石油天然气行业标准《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法》(SY/T 5238—2008)^[49]。具体实验步骤如下:先将碳酸盐岩样品用玛瑙研钵研碎至0.09 mm以下,之后在110℃下烘烤2 h,放入干燥器中备用。由于碳酸盐岩样品的测试样品量一般为5~20 mg,故取20 mg样品与4~5 mL 100%正磷酸混合,置于60℃~70℃真空环境下,反应至所有CO₂均被收集。使用Thermo Fisher MAT-253型稳定同位素质谱仪进行碳氧同位素分析,误差低于0.2‰,分析结果见表1。主量、微量元素分析则在中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室完成。其中,运用X射线衍射(XRD)法测试主量元素,利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)对微量元素进行测试,实

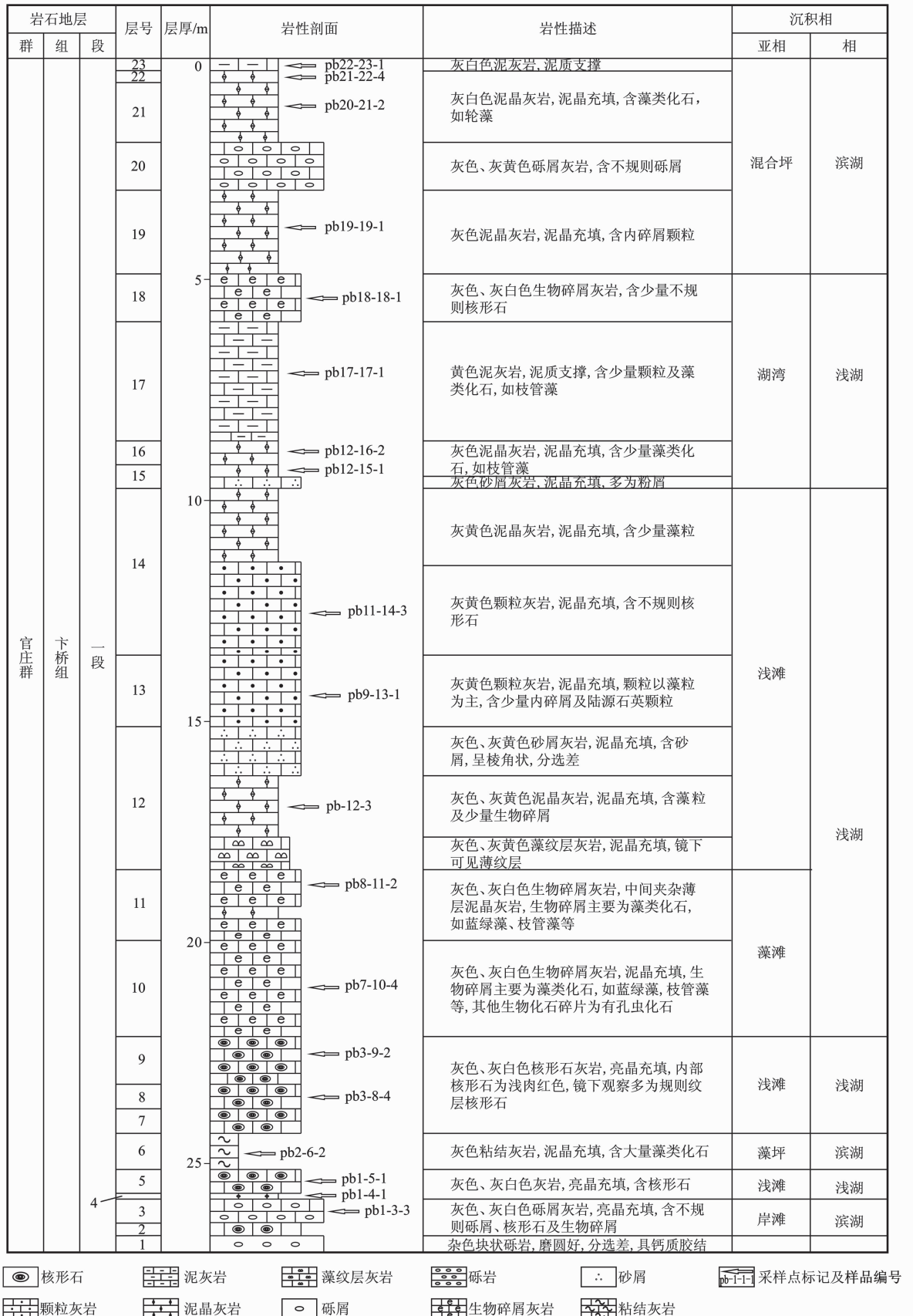


图 2 古近系下桥组一段湖相碳酸盐岩综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive Column of Lacustrine Carbonate Rocks from the First Member of Paleogene Bianqiao Formation

表1 碳氧同位素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Carbon and Oxygen Isotopes

样品编号	层号	岩石类型	$\delta^{13}\text{C}$ 值/ $\%$	$\delta^{18}\text{O}$ 值/ $\%$
pb22-23-1	23	泥灰岩	-1.8	-6.3
pb21-22-4	22	泥晶灰岩	-2.0	-6.5
pb20-21-2	21	泥晶灰岩	-2.9	-7.1
pb19-19-1	19	泥晶灰岩	-3.0	-6.8
pb18-18-1	18	生物碎屑灰岩	-2.8	-6.7
pb17-17-1	17	泥灰岩	-3.4	-6.9
pb12-16-2	16	泥晶灰岩	-2.6	-7.1
pb12-15-1	15	泥晶灰岩	-3.4	-8.9
pb11-14-3	14	颗粒灰岩	-2.7	-7.2
pb9-13-1	13	颗粒灰岩	-2.5	-7.3
pb-12-3	12	泥晶灰岩	-2.7	-7.2
pb8-11-2	11	生物碎屑灰岩	-2.9	-8.2
pb7-10-4	10	生物碎屑灰岩	-3.6	-8.1
pb3-9-2	9	核形石灰岩	-3.3	-8.0
pb3-8-4	8	核形石灰岩	-3.2	-8.1
pb2-6-2	6	粘结灰岩	-3.3	-8.4
pb1-5-1	5	核形石灰岩	-2.8	-7.9
pb1-4-1	4	泥晶灰岩	-3.3	-8.4
pb1-3-3	3	砾屑灰岩	-3.2	-8.4

注： $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均基于 V-PDB 标准计算得到。

验过程依照国家标准《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分：44 个元素量测定》(GB/T 14506. 30—2010)^[50]，分析结果见表 2。

2.2 结果分析

分析结果是否保留了原始碳氧同位素组成，是讨论其地质意义的前提。前人对判断碳氧同位素数据原始性的方法存在着各种争议，但是达成了共同认识，即地层年代越老，同位素分馏效应越强，碳氧同位素原始组成破坏更加严重。前人研究表明，晚于侏罗纪岩石样品中的稳定同位素能更加有效地恢复古沉积环境^[23-28]。Kaufman 等发现 $\delta^{18}\text{O}$ 值大于 -10% 才具有原始性^[51]。其他学者(如袁剑英等)认为通过判断碳氧同位素是否具有正相关性来确定岩石的原始同位素组合是否遭到成岩后生作用的破坏^[18, 52]。然而，黄文辉等在研究德国南部地区麻姆组碳酸盐岩碳氧同位素时发现，相对稳定的沉积环境会导致碳氧同位素具有良好的相关性^[53]。因此，利用碳氧同位素的相关性这一标准来判断分析结果是否保留数据原始性时，需要结合研究区实际的沉积环境条件。

表2 部分主量、微量元素分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Partial Major and Trace Elements

样品编号	层号	$w(\text{Ca})/\%$	$w(\text{Mg})/\%$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$w(\text{Ba})/10^{-6}$	Sr/Ba 值	Mg/Ca 值
pb22-23-1	23	0.60	0.005 4	458	42.2	10.9	0.009 1
pb21-22-4	22	0.71	0.004 3	447	14.2	31.6	0.006 0
pb20-21-2	21	0.73	0.003 1	314	80.3	3.9	0.004 2
pb19-19-1	19	0.66	0.004 7	421	77.3	5.5	0.007 1
pb18-18-1	18	0.71	0.003 4	324	10.6	30.5	0.004 8
pb17-17-1	17	0.52	0.006 2	445	70.5	6.3	0.011 9
pb12-16-2	16	0.69	0.003 4	359	18.3	19.6	0.004 8
pb12-15-1	15	0.69	0.003 4	323	20.4	15.9	0.004 9
pb11-14-3	14	0.69	0.003 8	366	58.6	6.3	0.005 5
pb9-13-1	13	0.72	0.003 3	402	1 622.7	0.3	0.004 5
pb-12-3	12	0.57	0.005 5	306	9.9	30.9	0.009 6
pb8-11-2	11	0.70	0.003 8	344	16.5	20.9	0.005 5
pb7-10-4	10	0.68	0.003 7	409	172.3	2.4	0.005 4
pb3-9-2	9	0.65	0.003 9	326	38.3	12.3	0.005 9
pb3-8-4	8	0.68	0.003 1	404	53.9	8.5	0.004 5
pb2-6-2	6	0.67	0.003 6	370	28.3	13.1	0.005 4
pb1-5-1	5	0.70	0.003 8	410	17.0	24.1	0.005 4
pb1-4-1	4	0.68	0.003 2	330	22.5	14.7	0.004 7
pb1-3-3	3	0.62	0.004 3	270	18.7	14.4	0.006 8

注： $w(\cdot)$ 为元素含量(质量分数，下同)。

研究区所采集的样品属于古近系湖相碳酸盐岩，地层年代较新，且 19 件岩石样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均大于 -10% 。因此，可以认为研究区样品的碳氧同位素数据受到同位素分馏效应较弱，基本保留了数据原始性。山东平邑盆地古近系卞桥组一段湖相碳酸盐岩碳氧同位素分析结果如下：碳同位素平均值为 -2.9% ，大部分为 $-3.5\% \sim -2.5\%$ ；氧同位素平均值为 -7.6% ，大部分为 $-8.5\% \sim -8.0\%$ 及 $-7.5\% \sim -6.5\%$ 。

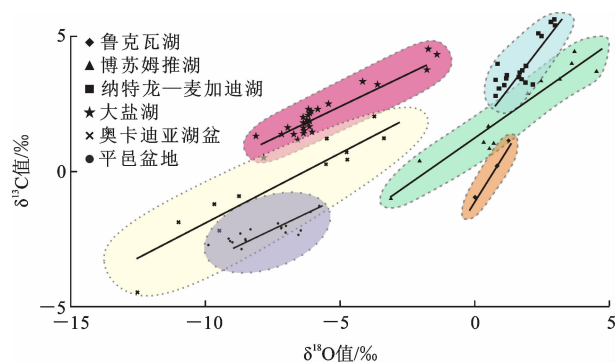
3 沉积环境分析

3.1 湖泊水体封闭性与开放性

碳酸盐岩中碳氧同位素的相互变化在一定程度上可以显示出湖泊的不同特点，不同湖泊的碳氧同位素组成具有唯一性^[54]。若湖泊的水文条件相对开放，则此时水体交替速度快，停留时间短，其碳氧同位素受当时注入水的影响较大，形成的碳酸盐岩碳同位素和氧同位素变化是独立的，碳氧同位素的相关系数就会小；反之，若湖泊的水文条件相对封闭，注入水量小，停留时间长，其碳氧同位素变化基

本受蒸发作用及湖泊水体大小的影响,碳氧同位素的变化具有联动性,碳氧同位素的相关系数就会大^[16,22,26,54-57]。因此,依据碳酸盐岩中碳氧同位素的变化情况,可以判断湖泊水体的封闭性与开放性。

Talbot 通过研究不同时代湖泊水体变化时发现,碳氧同位素的相关系数(r)大于 0.7 且氧同位素变化波动较大时,湖泊水体处于封闭状态^[54](图 3)。国内学者在相关研究中有类似的发现^[16,26,55]。图 4、5 分别是根据平邑盆地古近系下桥组一段湖相碳酸盐岩中碳氧同位素制作的散点图和垂向曲线。图 4 中碳氧同位素的相关系数为 0.73,显示较强的相关性,且 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-9.0\text{‰} \sim -6.0\text{‰}$,波动较大。从图 5 可以看出,碳氧同位素整体上变化趋势基本吻合,曲线显示出较强的相关性。综上所述,平邑盆地在这一时期所形成的湖泊水体具有停留时间长的封闭性特点。



坦桑尼亚鲁克瓦湖(Rukwa)有 4 个样品, $r=0.95$;加纳博苏姆推湖(Bosumtwi)有 12 个样品, $r=0.97$;肯尼亚与坦桑尼亚交界的纳特龙-麦加迪湖(Natron-Magadi)有 19 个样品, $r=0.64$;美国大盐湖(The Great Salt Lake)有 27 个样品, $r=0.87$;英国奥卡迪安湖(Orcadian Basin)有 12 个样品, $r=0.93$;以上数据引自文献^[54]。中国山东平邑盆地有 19 个样品, $r=0.73$

图 3 封闭湖盆碳酸盐岩碳氧同位素相关性

Fig. 3 Correlation of Carbon and Oxygen Isotopes for Carbonate Rocks from Closed Lakes

3.2 古盐度

前人在研究不同区域的碳酸盐岩时发现,Sr 和 Ba 含量对古盐度的变化比较敏感^[28,58-60]。因此,Sr/Ba 值常用于区分淡水和盐水。根据实验数据绘制的平邑盆地碳酸盐岩 Sr/Ba 值变化曲线如图 5 所示。通常 Sr/Ba 值大于 1 被认为是咸水,Sr/Ba 值小于 1 被认为是淡水^[58-60]。研究区碳酸盐岩 Sr/Ba 值主要为 0.25~31.55,平均值为 14.10,远大于 1,反映了研究区在下桥组沉积时期的湖水为咸水。平邑盆地在下桥组中发现石膏矿层^[30,37-39],张矿明等在研究中也发现有孔虫类及腹足类螺化石^[34],表明

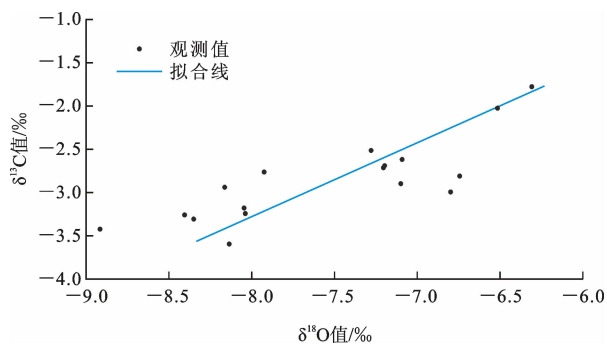


图 4 平邑盆地碳酸盐岩碳氧同位素相关性

Fig. 4 Correlation of Carbon and Oxygen Isotopes for Carbonate Rocks in Pingyi Basin

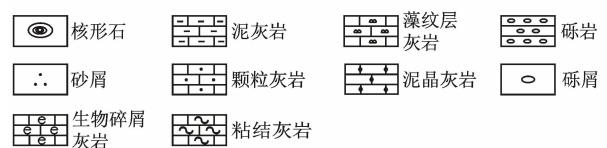
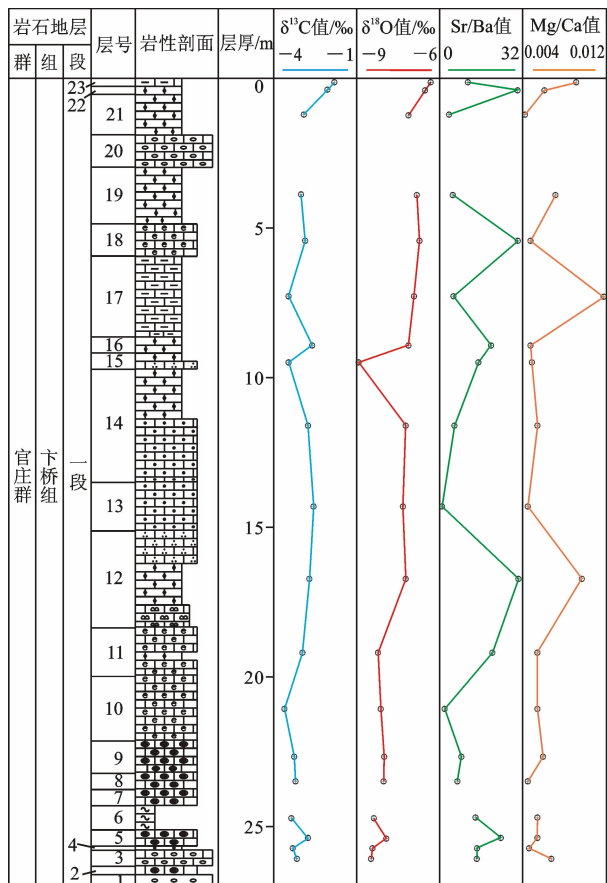


图 5 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、Sr/Ba 和 Mg/Ca 值随深度变化特征
Fig. 5 Variation Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values, and Sr/Ba and Mg/Ca Ratios with Depth

平邑盆地在下桥组沉积时期的水体应该为咸水,与地球化学分析结果相符。

下桥组一段下部地层(第 3~10 层)的碳酸盐岩 Sr/Ba 平均值为 12.8,中部地层(第 11~17 层)的碳

酸盐岩 Sr/Ba 平均值为 14.3, 上部地层(第 18~23 层)的碳酸盐岩 Sr/Ba 平均值为 16.5, 说明卞桥组一段碳酸盐岩 Sr/Ba 值自下而上逐渐增加。从图 5 中 Sr/Ba 值变化曲线也可发现相同的变化趋势。因此, 可以认为随着地层逐渐变新, 平邑盆地的古盐度呈现逐渐增加的趋势(图 6)。

量变化, 进而能够推断出当时湖盆的气候变化。

卞桥组一段下部地层(第 3~10 层)的碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -8.2‰ , 中部地层(第 11~17 层)的碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -7.5‰ , 上部地层(第 18~23 层)的碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -6.7‰ 。卞桥组一段下部地层的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值小于上部地层的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值, 由此可以认为下部地层的蒸发量/降雨量小于上部地层的蒸发量/降雨量, 根据图 5 中氧同位素变化曲线也可以看出这个特征。因此, 可以认为随着地层变新, 湖盆的蒸发量/降雨量逐渐增加(图 6)。

国内学者在研究中发现, 碳酸盐岩 Mg/Ca 值会受到古气候的影响^[58-59, 63]。Mg/Ca 值高, 斜率陡, 数值变化起伏大, 指示干热气候; 而 Mg/Ca 值低, 斜率缓, 数值变化较平稳, 指示潮湿气候^[58-59]。然而, 在运用 Mg/Ca 值分析古气候变化时, 需要考虑地层中碱层影响。王随继等在研究泌阳凹陷核桃园组地层时发现, 碱层中钠盐开始沉淀时, 会使 Mg/Ca 值出现低值, 甚至极低值, 这会影响 Mg/Ca 值分析结果^[64]。X 射线衍射分析表明, 研究区样品 K_2O 平均含量为 0.17%, 最高值仅为 0.54%, Na_2O 平均含量小于 0.01%, 可判断研究区岩层为非碱层。因此, 可以使用 Mg/Ca 值判断研究区的古气候条件。

卞桥组一段碳酸盐岩中 Mg/Ca 值主要为 0.004 2~0.011 9, 变化范围较大。具体到不同的层段, 碳酸盐岩 Mg/Ca 值变化具有不同的特征。下部地层(第 3~10 层)的碳酸盐岩中 Mg/Ca 平均值为 0.005 5, 最大值为 0.006 8, 最小值为 0.004 5; Mg/Ca 值变化起伏不大(图 5), 可以判断出此时湖盆处于潮湿环境(图 6)。中部地层(第 11~17 层)的碳酸盐岩中 Mg/Ca 平均值为 0.006 7, 最大值为 0.011 9, 最小值为 0.004 5; 从图 5 可以看出, 第 12、17 层碳酸盐岩中 Mg/Ca 值出现高值, 有明显的数值变化, 应为干热环境(图 6); 第 13~16 层碳酸盐岩中 Mg/Ca 平均值为 0.004 9, 最大值为 0.005 5, 最小值为 0.004 5, Mg/Ca 值变化较小, 应为潮湿环境(图 6); 由此可以判断出中部地层的湖盆应处于半干热环境。上部地层(第 18~23 层)碳酸盐岩中 Mg/Ca 平均值为 0.006 2, 最大值为 0.009 1, 最小值为 0.004 2; 从图 5 可以看出, Mg/Ca 值变化起伏较大, 斜率陡, 可以判断此时湖盆应处于干热环境(图 6)。

综上所述, 氧同位素及 Mg/Ca 值变化曲线大体上可以将平邑盆地这一时期的古气候环境划分为 3 个阶段, 即潮湿环境→半干热环境→干热环境(图 6)。

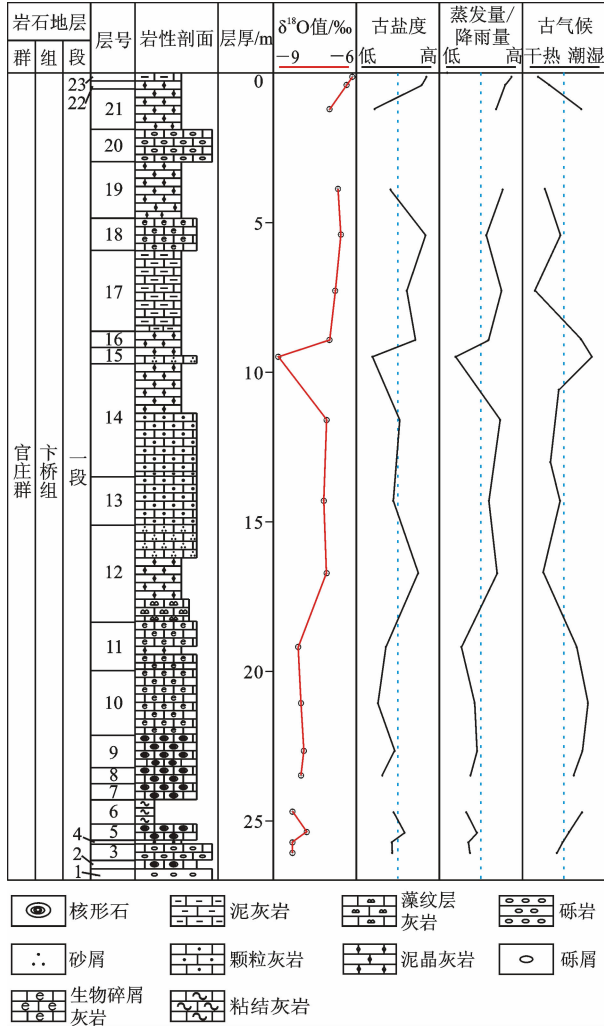


图 6 $\delta^{18}\text{O}$ 值、古盐度、蒸发量/降雨量和古气候随深度变化特征

Fig. 6 Variation Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ Values, Paleosalinity, Evaporation/Precipitation and Paleoclimate with Depth

3.3 古气候

温度对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响远远超过温度对 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响^[23-35, 61-62], 因此, 利用氧同位素作为恢复古温度的手段是十分有效的。对于一个封闭湖泊来说, 注入水(降雨量)与蒸发量之间的平衡控制着氧同位素的变化^[54]。随着蒸发作用的增强, 水体中较多 ^{16}O 逸出, 从而使碳酸盐岩中 ^{18}O 增加^[26, 54-55]。因此, 根据 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化可以反映当时湖盆的蒸发量/降雨

3.4 古水体环境

由于湖泊水体相较于海洋水体整体较小,所以湖相碳酸盐岩对陆源注入、水动力条件、水体涨落等水体环境变化非常敏感^[29-31,33-35,54]。因此,通过对下桥组一段的岩性变化及显微特征进行分析,能够推断出当时湖盆的古水体环境演变。平邑盆地柏林剖面的岩性从地层底部到顶部整体变化依次为粗碎屑岩、核形石灰岩、生物碎屑灰岩、颗粒灰岩、泥晶灰岩/泥灰岩。根据岩性序列垂向演化特征,可以大致推断出在下桥组一段沉积时期,湖盆水动力随着地层逐渐变新而减弱。此外,具体到下桥组一段的不同层段还能够发现其岩性变化有着明显的区别和特点。

下桥组一段下部地层(第3~14层)底部主要岩性为粗碎屑岩、核形石灰岩,中部岩性变化为生物碎屑岩、颗粒灰岩,再到顶部主要由泥晶灰岩构成(图2),反映出此时湖盆水体环境逐渐加深,水动力逐渐减弱。从显微特征上看,第3~9层主要为亮晶充填,富含生物碎屑及藻类化石[图7(a)],第7~9层发育大量核形石,颗粒较大且呈多层规则纹层[图7(b)],具复合核心的特点,反映出此时湖盆水体属于高能环境;第12~14层均为泥晶充填,且核形石发育数量较少,纹层具有无规则且呈团块状的特点[图7(c)],说明此时水动力已经减弱,湖盆水体属于低能环境。

下桥组一段上部地层(第16~23层)岩性发育较为复杂,主要岩石类型为泥晶灰岩、泥灰岩,中间夹杂砂屑灰岩、生物碎屑灰岩、砾屑灰岩(图2)。岩性的快速变化反映出湖盆在该时期水体环境变化较大。从薄片显微特征来看,第16~23层多为泥晶充填,说明此时水动力已经减弱,湖盆水体属于低能环境。下桥组一段上部地层(第16~23层)发育的核形石数量较下部地层(第3~14层)少,且核形石的外形多不规则,呈凝块状纹层[图7(d)、(e)],个别地层能发现轮藻化石[图7(f)],这也说明了此时的湖盆水体处于低能环境。

4 结 语

(1)山东平邑盆地古近系下桥组一段湖相碳酸盐岩碳氧同位素相关系数为0.73,说明平邑盆地在古近系沉积时期是水体停留时间较长的封闭性湖泊系统。

(2)根据Sr/Ba值可以认为平邑盆地古近系沉积时期水介质主要为咸水环境;随着地层逐渐变新,古盐度呈现逐渐增加的趋势。

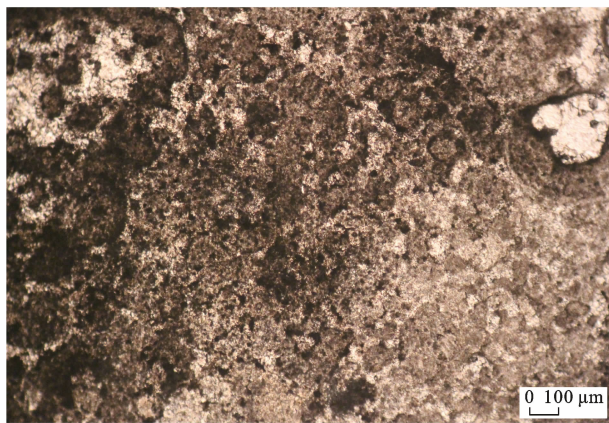
(3)氧同位素及Mg/Ca值反映平邑盆地古近系沉积时期的古气候共经历潮湿环境→半干热环境→干热环境3个阶段。

(4)通过岩性垂向序列演化及薄片特征可以推断出平邑盆地古近系下桥组一段沉积时期的水动力条件为:随着地层逐渐变新,水动力条件逐渐减弱,湖盆水体逐渐由高能转入低能环境。

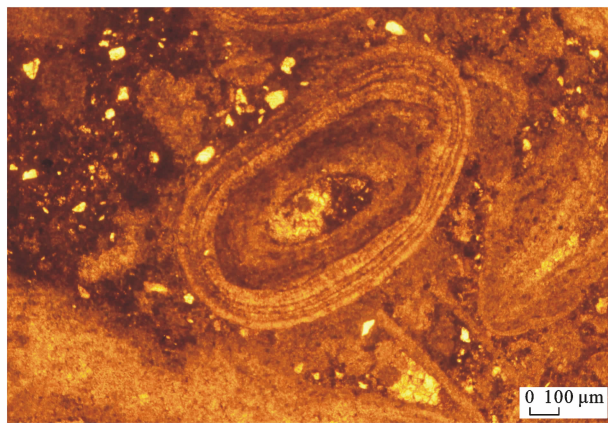
参考文献:

References:

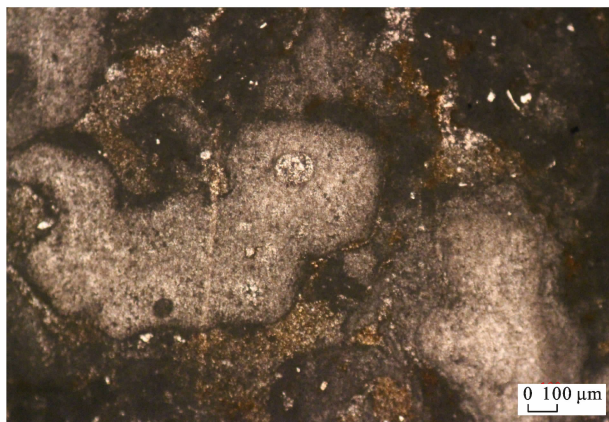
- [1] 沈安江,陈娅娜,蒙绍兴,等.中国海相碳酸盐岩储层研究进展及油气勘探意义[J].海相油气地质,2019,24(4):1-14.
SHEN An-jiang, CHEN Ya-na, MENG Shao-xing, et al. The Research Progress of Marine Carbonate Reservoirs in China and Its Significance for Oil and Gas Exploration[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(4):1-14.
- [2] 马永生,何治亮,赵培荣,等.深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J].石油学报,2019,40(12):1415-1425.
MA Yong-sheng, HE Zhi-liang, ZHAO Pei-rong, et al. A New Progress in Formation Mechanism of Deep and Ultra-deep Carbonate Reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12):1415-1425.
- [3] 李阳,康志江,薛兆杰,等.中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):669-678.
LI Yang, KANG Zhi-jiang, XUE Zhao-jie, et al. Theories and Practices of Carbonate Reservoirs Development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4):669-678.
- [4] 陈欢庆,胡海燕,李文青,等.复杂岩性油藏精细描述研究进展[J].地球科学与环境学报,2020,42(1):99-119.
CHEN Huan-qing, HU Hai-yan, LI Wen-qing, et al. Review on Fine Description of Complex Lithologic Reservoir[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(1):99-119.
- [5] 刘树根,宋金民,罗平,等.四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景[J].成都理工大学学报(自然科学版),2016,43(2):129-152.
LIU Shu-gen, SONG Jin-min, LUO Ping, et al. Characteristics of Microbial Carbonate Reservoir and Its Hydrocarbon Exploring Outlook in the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2016, 43(2):129-152.
- [6] 杜江民,龙鹏宇,杨鹏,等.中国陆相湖盆碳酸盐岩



(a) 第3层为亮晶充填, 含藻类化石、生物碎屑



(b) 第7层总体为亮晶充填, 含大量核形石, 颗粒大且呈多层规则纹层, 为核形石灰岩



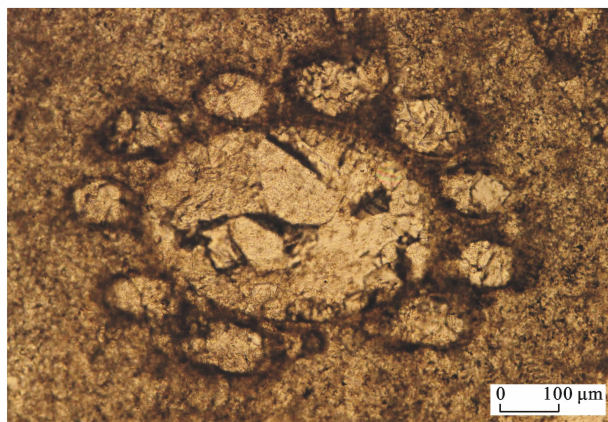
(c) 第14层总体为泥晶充填, 含核形石, 具不规则纹层, 为颗粒灰岩



(d) 第16层成分复杂, 含枝管藻化石, 为泥晶灰岩



(e) 第17层成分较为复杂, 泥质支撑, 含生物碎屑(如枝管藻化石), 为泥灰岩



(f) 第22层成分简单, 总体为泥晶充填, 含轮藻, 为泥晶灰岩

图7 湖相碳酸盐岩显微照片

Fig. 7 Microphotographs of Lacustrine Carbonate Rocks

储集层特征及其成藏条件[J]. 地球科学进展, 2020, 35(1):52-69.

DU Jiang-min, LONG Peng-yu, YANG Peng, et al. Characteristics of Carbonate Reservoir and Its Forming Conditions in Continental Lake Basin of China[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(1):52-69.

[7] 苏玲, 朱如凯, 崔景伟, 等. 中国湖相碳酸盐岩时空分布与碳同位素特征[J]. 古地理学报, 2017, 19(6):

1064-1076.

SU Ling, ZHU Ru-kai, CUI Jing-wei, et al. Spatial-temporal Distribution of Lacustrine Carbonate Rocks in China and Their Carbon and Oxygen Isotopic Characteristics[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(6):1064-1076.

[8] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力[J]. 石油学报, 2019,

- 40(11):1296-1310.
HAN Jian-fa, SU Zhou, CHEN Li-xin, et al. Reservoir-controlling and Accumulation-controlling of Strike-slip Faults and Exploration Potential in the Platform of Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11):1296-1310.
- [9] 贾文博, 关平, 刘沛显, 等. 湖相碳酸盐岩元素测试方法研究[J]. *沉积学报*, 2018, 36(4):842-852.
JIA Wen-bo, GUAN Ping, LIU Pei-xian, et al. Study on the Element Testing Method of Lacustrine Carbonates[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(4):842-852.
- [10] 赵永胜, 赵霞飞. 内陆湖泊贝壳碳酸盐碳氧同位素组成与古气候研究[J]. *成都地质学院学报*, 1990, 17(3):83-93.
ZHAO Yong-sheng, ZHAO Xia-fei. The Approach of Paleoclimate and the Oxygen, Carbon Isotopic Compositions of Shelly Carbonates in Inland Lake[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1990, 17(3):83-93.
- [11] 王腾飞, 金振奎, GUNAY A, 等. 湖盆滩坝沉积研究进展[J]. *科技导报*, 2018, 36(23):57-67.
WANG Teng-fei, JIN Zhen-kui, GUNAY A, et al. Research Progress of Lacustrine Beach-bars[J]. *Science and Technology Review*, 2018, 36(23):57-67.
- [12] RYDER R T, FOUCH T D, ELISON J H. Early Tertiary Sedimentation in the Western Uinta Basin, Utah[J]. *GSA Bulletin*, 1976, 87(4):496-512.
- [13] STUIVER M. Oxygen and Carbon Isotope Ratios of Fresh-water Carbonates as Climate Indicators[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(27):5247-5257.
- [14] 王衡鉴, 周书欣, 滕玉洪, 等. 松辽盆地西部中部组合淡水碳酸盐岩的分布规律及其与油气的关系[J]. *大庆石油学院学报*, 1983(1):35-49.
WANG Heng-jian, ZHOU Shu-xin, TENG Yu-hong, et al. Distribution of Freshwater Carbonates in the Middle Part of the Western Part of Songliao Basin and Its Relationship with Oil and Gas[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1983(1):35-49.
- [15] 周自立, 杜韞华. 湖相碳酸盐岩的沉积相与油气分布关系:以山东胜利油田下第三系碳酸盐岩为例[J]. *石油实验地质*, 1986, 8(2):123-132.
ZHOU Zi-li, DU Yun-hua. Relationship Between Sedimentary Facies of Lacustrine Carbonate Rocks and Oil and Gas Distribution[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1986, 8(2):123-132.
- [16] 潘文静, 王清斌, 刘士磊, 等. 渤海海域石臼坨地区古近系沙河街组湖相生屑白云岩成因[J]. *古地理学报*, 2017, 19(5):835-848.
PAN Wen-jing, WANG Qing-bin, LIU Shi-lei, et al. Origin of Lacustrine Bioclastic Dolostone in the Paleogene Shahejie Formation: A Case Study in Shijiutuo Area, Bohai Sea[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(5):835-848.
- [17] 毛玲玲, 伊海生, 季长军, 等. 柴达木盆地新生代湖相碳酸盐岩岩石学及碳氧同位素特征[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(1):41-48.
MAO Ling-ling, YI Hai-sheng, JI Chang-jun, et al. Petrography and Carbon-oxygen Isotope Characteristics of the Cenozoic Lacustrine Carbonate Rocks in Qaidam Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(1):41-48.
- [18] 袁剑英, 黄成刚, 曹正林, 等. 咸化湖盆白云岩碳氧同位素特征及古环境意义:以柴西地区始新统下干柴沟组为例[J]. *地球化学*, 2015, 44(3):254-266.
YUAN Jian-ying, HUANG Cheng-gang, CAO Zheng-lin, et al. Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Saline Lacustrine Dolomite and Its Palaeoenvironmental Significance: A Case Study of Lower Eocene Ganchaigou Formation in Western Qaidam Basin[J]. *Geochimica*, 2015, 44(3):254-266.
- [19] YI S, HUANG W H, MU N N. Lacustrine Carbonates of Paleogene in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2019, 34(3):1157-1173.
- [20] LI S Y, CURRIE B S, ROWLEY D B, et al. Diagenesis of Shallowly Buried Miocene Lacustrine Carbonates from the Hoh Xil Basin, Northern Tibetan Plateau: Implications for Stable-isotope Based Elevation Estimates[J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 388:20-36.
- [21] 曹高社, 余爽杰, 孙凤余, 等. 豫西宜阳地区三叠纪早期孙家沟组上段湖相碳酸盐岩碳氧同位素和古环境分析[J]. *地质学报*, 2019, 93(5):1137-1153.
CAO Gao-she, YU Shuang-jie, SUN Feng-yu, et al. Carbon and Oxygen Isotopic Composition and Palaeoenvironment Analysis of Lacustrine Carbonate Rocks in the Upper Member of Early Triassic Sunjiagou Formation, Yiyang Area, Western Henan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(5):1137-1153.
- [22] MCCORMACK J, NEHRKE G, JONS N, et al. Refining the Interpretation of Lacustrine Carbonate Isotope Records: Implications of a Mineralogy-specific Lake Van Case Study[J]. *Chemical Geology*, 2019, 513:167-183.
- [23] 何起祥. 碳、氧稳定同位素在沉积学中的应用[J]. *世界地质*, 1983, 2(1):1-14.
HE Qi-xiang. Application of Carbon-oxygen Isotope in Sedimentology[J]. *Global Geology*, 1983, 2(1):1-14.

- [24] 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.
ZHANG Xiu-lian. 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.
- [25] 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 Long-yi. The Relation of the Oxygen and Carbon Isotope in the Carbonate Rocks to the Paleotemperature [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1994, 23(1): 39-45.
- [26] 刘传联. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及其古湖泊学意义[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 109-114.
LIU Chuan-lian. Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Lacustrine Carbonates of the Shahejie Formation in the Dongying Depression and Their Paleolimnological Significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 109-114.
- [27] 万友利, 王 剑, 付修根, 等. 羌塘盆地南坳陷中侏罗统布曲组白云岩储层成因流体同位素地球化学示踪[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 189-200.
WAN You-li, WANG Jian, FU Xiu-gen, et al. Geochemical Tracing of Isotopic Fluid of Dolomite Reservoir in the Middle Jurassic Buqu Formation in Southern Depression of Qiangtang Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2020, 41(1): 189-200.
- [28] 杨永恒, 孙国强, 王晔桐, 等. 柴达木盆地北缘平台地区路乐河组沉积环境与成岩流体特征[J]. 沉积学报, 2019, 37(6): 1258-1268.
YANG Yong-heng, SUN Guo-qiang, WANG Ye-tong, et al. Sedimentary Diagenetic Environment of the Lulehe Formation in the Pingtai Region, Northern Qaidam Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1258-1268.
- [29] 李熙哲, 管守锐, 谢庆宾, 等. 平邑盆地下第三系官中段核形石成因分析[J]. 岩石学报, 2000, 16(2): 262-268.
LI Xi-zhe, GUAN Shou-rui, XIE Qing-bin, et al. The Oncoids Genesis in the Middle Member of the Guanzhuang Formation of Eocene in Pingyi Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(2): 262-268.
- [30] 顾澄皋. 山东平邑盆地下第三系钙壳的特征及意义[J]. 沉积学报, 1988, 6(3): 89-97.
GU Cheng-gao. Characteristics and Significance of Lower Tertiary Caliches in the Pingyi Basin, Shandong Province [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1988, 6(3): 89-97.
- [31] 潘文静, 杜晓峰, 王清斌, 等. 渤海海域东南部新近纪湖盆萎缩期古生物特征及古环境意义[J]. 微体古生物学报, 2018, 35(3): 238-250.
PAN Wen-jing, DU Xiao-feng, WANG Qing-bin, et al. Neocene Palaeontological Characteristics and Its Palaeoenvironment Significance During the Withering Period of the Lacustrine Basin in the Southeastern Bohai Sea, North China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2018, 35(3): 238-250.
- [32] 董俊昌, 李 燕, 孙维凤, 等. 平邑盆地官庄群湖相碳酸盐岩的古地理意义[J]. 地质与勘探, 2012, 48(1): 93-101.
DONG Jun-chang, LI Yan, SUN Wei-feng, et al. Paleogeographic Significance of Guanzhuang Group Lacustrine Carbonate in the Pingyi Basin [J]. Geology and Exploration, 2012, 48(1): 93-101.
- [33] 唐鑫萍, 黄文辉, 邓宏文, 等. 山东平邑盆地古近系湖相微生物碳酸盐岩形成机理[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 355-364.
TANG Xin-ping, HUANG Wen-hui, DENG Hong-wen, et al. Formation Mechanisms of the Paleogene Lacustrine Microbial Carbonate Rocks in Pingyi Basin, Shandong Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 355-364.
- [34] 张矿明, 黄文辉, 汪建辉, 等. 山东省平邑盆地古近系湖相核形石特征及环境意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(2): 259-268.
ZHANG Kuang-ming, HUANG Wen-hui, WANG Jian-hui, et al. Characteristics and Environmental Significance of Lacustrine Oncolites in Paleogene Guanzhuang Formation in Pingyi Basin, Shandong Province in Eastern China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(2): 259-268.
- [35] 谢庆宾, 管守锐, 李熙哲. 山东平邑盆地官中段沉积环境和层序地层特征[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 71-78.
XIE Qing-bin, GUAN Shou-rui, LI Xi-zhe. Depositional Environmental and Sequence Stratigraphy Characteristics of Middle Member of the Guanzhong Formation in the Pingyi Basin, Shandong [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 71-78.
- [36] 管守锐, 白光勇, 狄明信. 山东平邑盆地下第三系官庄组中段碳酸盐岩沉积特征及沉积环境[J]. 华东石油学院学报, 1985(3): 9-20.
GUAN Shou-rui, BAI Guang-yong, DI Ming-xin. Sedimentary Characteristics and Environment of Carbonate Rocks in the Middle Member of the Guanzhuang Formation of Lower Tertiary in the Pingyi Basin of Shandong Province [J]. Journal of East China Petroleum

- Institute, 1985(3):9-20.
- [37] 迟洪纪,何湘龙,王士林. 山东平邑盆地下第三系的划分[J]. 地层学杂志, 1986, 10(2):121-127.
CHI Hong-ji, HE Xiang-long, WANG Shi-lin. Classification of the Stratigraphy of the Paleogene in the Pingyi Basin, Shandong[J]. Journal of Stratigraphy, 1986, 10(2):121-127.
- [38] 关绍曾,庞其清,萧宗正. 鲁西南莱芜、蒙阴、平邑盆地早第三纪地层的划分和对比[J]. 化工矿产地质, 1997, 19(3):149-162.
GUAN Shao-zeng, PANG Qi-qing, XIAO Zong-zheng. Division and Correlation of Stratigraphy Among Early Tertiary Basins: Laiwu, Mengyin and Pingyi in Southwest Shandong[J]. Geology of Chemical Minerals, 1997, 19(3):149-162.
- [39] 张增奇,杜圣贤,张尚坤,等. 山东平邑盆地官庄群有关地层的重新厘定[J]. 地层学杂志, 2014, 38(1):8-25.
ZHANG Zeng-qi, DU Sheng-xian, ZHANG Shang-kun, et al. Reassessment of the Guanzhuang Group in the Pingyi Basin, Shandong[J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(1):8-25.
- [40] 杜圣贤,刘凤臣,陈军,等. 山东平邑盆地晚白垩世—古新世生物地层及白垩系/古近系界线研究[J]. 地质学报, 2019, 93(8):1831-1848.
DU Sheng-xian, LIU Feng-chen, CHEN Jun, et al. The Cretaceous-Paleocene Biostratigraphy and Boundary in the Pingyi Basin, Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(8):1831-1848.
- [41] 杜圣贤,李越,宋香锁,等. 山东平邑盆地下桥组(晚白垩世马斯特里赫特晚期)泉华成因的核形石[J]. 微体古生物学报, 2016, 33(3):325-333.
DU Sheng-xian, LI Yue, SONG Xiang-suo, et al. Travertine-type Oncoids from the Cretaceous Bianqiao Formation (Late Maastrichtian) in the Pingyi Basin, Shandong Province, East China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2016, 33(3):325-333.
- [42] 杜圣贤,王启飞,宋香锁,等. 山东平邑盆地古新世孢粉组合及其古气候意义[J]. 微体古生物学报, 2015, 32(4):419-429.
DU Sheng-xian, WANG Qi-fei, SONG Xiang-suo, et al. Paleocene Sporo-pollen Fossils of the Pingyi Basin, Shandong Province, China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2015, 32(4):419-429.
- [43] 唐鑫萍,黄文辉,邓宏文,等. 山东平邑盆地古近系湖相核形石的沉积环境分析[J]. 现代地质, 2011, 25(3):456-463.
TANG Xin-ping, HUANG Wen-hui, DENG Hong-wen, et al. Sedimentary Environment of Paleogene Lacustrine Oncoids in Pingyi Basin, Shandong Province[J]. Geoscience, 2011, 25(3):456-463.
- [44] 于学峰,杜圣贤,王启飞,等. 山东平邑盆地晚白垩世介形类[J]. 微体古生物学报, 2014, 31(4):387-404.
YU Xue-feng, DU Sheng-xian, WANG Qi-fei, et al. Late Cretaceous Ostracods from the Pingyi Basin, Shandong Province, China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2014, 31(4):387-404.
- [45] 杜圣贤,卢辉楠,刘书才,等. 山东平邑盆地晚白垩世孢粉化石[J]. 微体古生物学报, 2013, 30(4):379-388.
DU Sheng-xian, LU Hui-nan, LIU Shu-cai, et al. Late Cretaceous Sporo-pollen Fossils of the Pingyi Basin, Shandong Province[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2013, 30(4):379-388.
- [46] 杨景林,徐健,刘凤臣,等. 山东平邑盆地固城组和下桥组的介形类动物群[J]. 微体古生物学报, 2013, 30(2):145-165.
YANG Jing-lin, XU Jian, LIU Feng-chen, et al. Ostracode Faunas from the Gucheng and Bianqiao Formations in Pingyi Basin, Shandong[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2013, 30(2):145-165.
- [47] 杜圣贤,于深洋,宋香锁,等. 山东费县白垩纪末期下桥组的湖相灰岩[J]. 微体古生物学报, 2016, 33(4):444-451.
DU Sheng-xian, YU Shen-yang, SONG Xiang-suo, et al. Lacustrine Limestones of the Bianqiao Formation (Maastrichtian, Latest Cretaceous) from Feixian, Shandong Province, East China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2016, 33(4):444-451.
- [48] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2003.
JIANG Zai-xing. Sedimentology[M]. Beijing, Petroleum Industry Press, 2003.
- [49] SY/T 5238—2008, 有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法[S].
SY/T 5238—2008, Analysis Method for Carbon and Oxygen Isotope of Organic Matter and Carbonate[S].
- [50] GB/T 14506.30—2010, 硅酸盐岩石化学分析方法第30部分:44个元素量测定[S].
GB/T 14506.30—2010, Methods for Chemical Analysis of Silicate Rocks, Part 30: Determination of 44 Elements[S].
- [51] 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.
- [52] 曹红霞,尚婷,吴海燕,等. 鄂尔多斯盆地东南部马

- 家沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 578-586.
- CAO Hong-xia, SHANG Ting, WU Hai-yan, et al. Characteristics of Carbon and Oxygen Isotopes of Carbonate Rocks in Majiagou Formation and Their Implication, Southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2018, 48(4): 578-586.
- [53] 黄文辉, 刘文中, BAUSCH W M. 德国南部地区上侏罗统麻姆组碳酸盐岩碳、氧稳定同位素研究[J]. 地球化学, 1999, 28(1): 97-102.
- HUANG Wen-hui, LIU Wen-zhong, BAUSCH W M. Stable Isotopes(C, O) of Upper Jurassic Malm Carbonate Rocks in Southern Germany[J]. Geochimica, 1999, 28(1): 97-102.
- [54] TALBOT M R. A Review of the Palaeohydrological Interpretation of Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in Primary Lacustrine Carbonates[J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 1990, 80(4): 261-279.
- [55] 王春连, 刘成林, 徐海明, 等. 江陵凹陷古新世盐湖沉积碳酸盐碳氧同位素组成及其环境意义[J]. 地球学报, 2013, 34(5): 567-576.
- WANG Chun-lian, LIU Cheng-lin, XU Hai-ming, et al. Carbon and Oxygen Isotopes Characteristics of Palaeocene Saline Lake Facies Carbonates in Jiangling Depression and Their Environmental Significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(5): 567-576.
- [56] MATHER C C, SKRZYPEK G, DOGRAMACI S, et al. Paleoenvironmental and Paleohydrochemical Conditions of Dolomite Formation Within a Saline Wetland in Arid Northwest Australia[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 185: 172-188.
- [57] MARTIN-BELLO L, ARENAS C, ANDREWS J E, et al. Lacustrine Stromatolites as Multi-scale Recorders of Climate Change: Insights from the Miocene Ebro Basin[J]. Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology, 2019, 530: 312-329.
- [58] 马奂奂, 刘池洋, 张 龙, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段沉积岩元素地球化学特征及沉积环境分析[J]. 现代地质, 2019, 33(4): 872-882.
- MA Huan-huan, LIU Chi-yang, ZHANG Long, et al. Geochemical Characteristics and Depositional Environment Implications of Sedimentary Rocks in the Chang-7 Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Geoscience, 2019, 33(4): 872-882.
- [59] 逢淑伊, 操应长, 梁 超. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段岩相特征及沉积环境: 以樊页1井为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 799-809.
- PANG Shu-yi, CAO Ying-chang, LIANG Chao. Lithofacies Characteristics and Sedimentary Environment of Es₄^U and Es₃^L: A Case Study of Well FY1 in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2019, 40(4): 799-809.
- [60] 王 卓, 赵靖舟, 陈宇航. 鄂东神府地区山西组古沉积环境及沉积特征分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(5): 24-30, 36.
- WANG Zhuo, ZHAO Jing-zhou, CHEN Yu-hang. Analysis of Palaeo-sedimentary Environment and Characteristics of Shanxi Formation in Shenfu Area on the Eastern Margin of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2019, 34(5): 24-30, 36.
- [61] KELTS K, TALBOT M. Lacustrine Carbonates as Geochemical Archives of Environmental Change and Biotic/Abiotic Interactions[M]. Berlin: Springer, 1990.
- [62] 刘成东, 刘 友, 万建军, 等. 衢州市上方镇方解石矿床碳、氧同位素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(2): 374-378, 394.
- LIU Cheng-dong, LIU You, WAN Jian-jun, et al. Carbon and Oxygen Isotopic Composition of the Shangfang Calcite Deposit in Quzhou City, Zhejiang Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(2): 374-378, 394.
- [63] 徐崇凯, 刘池洋, 郭 佩, 等. 潜江凹陷古近系潜江组盐间泥岩地球化学特征及地质意义[J]. 沉积学报, 2018, 36(3): 617-629.
- XU Chong-kai, LIU Chi-yang, GUO Pei, et al. Geochemical Characteristics and Their Geological Significance of Intrasalt Mudstones from the Paleogene Qianjiang Formation in the Qianjiang Graben, Jiangnan Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(3): 617-629.
- [64] 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 65-70.
- WANG Sui-ji, HUANG Xing-zhen, TUO Jin-cai, et al. Evolutional Characteristics and Their Paleoclimate Significance of Trace Elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(1): 65-70.