

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.01.07

引用格式: 刘帆, 廖慧鸿, 梅安鑫, 等. 应用自然伽马能谱法恢复碳酸盐岩沉积时的古水深——以山西兴县关家崖马五₅亚段为例[J]. 中国地质调查, 2024, 11(1): 57–64. (Liu F, Liao H H, Mei A X, et al. Application of natural gamma energy spectrum method for paleobathymetric recovery during carbonate deposition: A case study of M55 sub-member of Guanjiaya section in Xing County of Shanxi Province [J]. Geological Survey of China, 2024, 11(1): 57–64.)

应用自然伽马能谱法恢复碳酸盐岩沉积时的古水深 ——以山西兴县关家崖马五₅亚段为例

刘帆¹, 廖慧鸿^{2*}, 梅安鑫¹, 梁茹³, 彭宇⁴

(1. 川庆钻探工程有限公司苏里格项目经理部, 内蒙古 乌审旗 017300; 2. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 中国石化中原油田分公司物探研究院, 河南 濮阳 457001; 4. 川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院, 四川 成都 610000)

摘要: 古水深分析对还原古环境与盆地构造演化历史具有重要的意义。目前古水深恢复多以定性为主, 对样品可靠性的要求较高, 且易受资料条件限制, 而自然伽马能谱法具有易获取、成本低、受控因素少等优点, 可结合水深函数半定量恢复水深, 但该方法多被用于陆相碎屑岩的研究中, 是否适用于海相碳酸盐岩尚需验证。以鄂尔多斯盆地关家崖剖面奥陶系马家沟组五₅亚段为例, 利用自然伽马能谱法恢复了碳酸盐岩沉积时的古水深, 恢复结果与碳同位素法、生物遗迹法、岩石组构法显示的结果一致。研究验证了自然伽马能谱法在恢复碳酸盐岩沉积时的古水深方面具有较高的可信度与实用性。

关键词: 古水深; 自然伽马能谱法; 碳氧同位素; 马家沟组; 碳酸盐岩

中图分类号: P631.8+4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2024)01-0057-08

0 引言

古环境重建一直是国内外学者研究的重要内容, 其中古水深恢复是盆地分析、层序地层学、古地貌恢复以及古地理分析的重要基础内容之一^[1]。“将今论古”是开展古水深恢复的一个重要原则, 常见方法包括古生物法、地球物理法、沉积学法、地球化学法等。古生物法主要根据不同生物具有特定的生活环境和水深进行研究, 如古生物标志法、古生物分异度法以及遗迹化石组合等^[2-5]; 沉积学法包括对沉积构造、自生矿物、地层厚度、滨线轨迹等沉积特征的研究^[6-9]; 地球物理法利用地震资料恢复水深变化情况^[10]; 地球化学法包括元素比值法、钴元素法和碳同位素法等^[11-17]。上述方法可能受到所获得资料的限制而影响到古水深恢复的效果,

如化石群落可能存在保存状态不佳或环境条件不明确的问题, 地球物理法需要高清影像, 而地球化学法则需要较为详细的采样及精确的实验室数据分析等^[10, 18]。自然伽马能谱法获得的 Th/U 值具有易获取、成本低、受控因素少等优点, 可结合水深函数半定量恢复水深, 但目前该方法在古水深研究中多用于陆相碎屑岩沉积^[19-20], 在海相碳酸盐岩的古水深恢复工作中运用较少, 其精度尚需验证。

山西兴县关家崖剖面的马家沟组五段第五亚段(以下简称马五₅亚段)的遗迹化石种类丰富, 可为古水深恢复提供较好的资料。本文应用自然伽马能谱测井数据, 并结合碳氧同位素、遗迹化石和岩石组构等资料, 验证恢复关家崖剖面马五₅亚段的古水深变化, 以期探讨自然伽马能谱法在海相碳酸盐岩古水深恢复研究中的可行性与实用性。

收稿日期: 2023-05-22; 修订日期: 2023-12-19。

基金项目: 校-企合作项目“苏5区块奥陶系马家沟组有利储集区带预测技术研究(编号: CQC DLG-2021-03)”资助。

第一作者简介: 刘帆(1990—), 男, 工程师, 主要从事天然气勘探开发方面的研究工作。Email: liufan_cede@cnpc.com.cn。

通信作者简介: 廖慧鸿(1996—), 男, 在读博士, 主要从事沉积学方面的研究工作。Email: 1316236646@qq.com。

1 研究区概况

上属于鄂尔多斯盆地中东部晋西挠褶带(图1(a))^[21],局部构造为低缓的背斜。剖面上仅出露马家沟组五段的第四、第五和第六亚段,其中第四亚段的顶部为不整合面,上覆石炭系本溪组铝土岩(图1(b))。

关家崖剖面位于山西兴县关家崖村北侧,构造

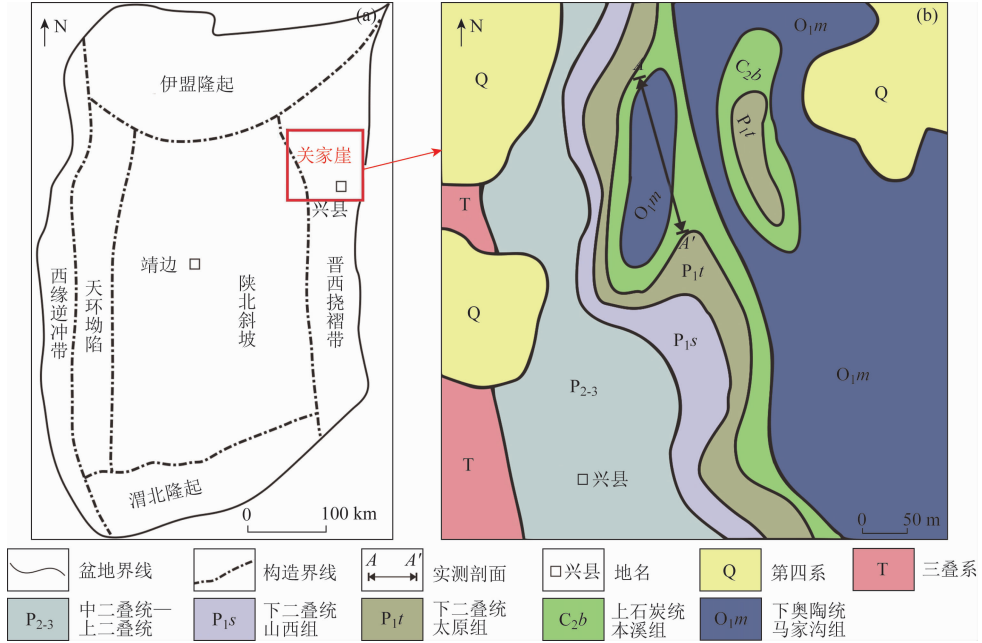


图1 鄂尔多斯盆地构造位置(a)和兴县关家崖地质简图(b)^[21]

Fig.1 Ordos Basin tectonic location (a) and geological sketch of Guanjiaya in Xing County (b)^[21]

奥陶系马家沟组属于碳酸盐台地相沉积^[22],为由灰岩、白云岩、膏盐岩旋回组成的碳酸盐岩地层,根据岩性特征可分为六段:第一、第三和第五段为海退沉积,以白云岩、膏岩、盐岩为主,夹少量灰岩,属局限台地—蒸发台地相沉积;第二、第四和第六段为海侵沉积,以灰岩、白云岩为主,属开阔台地相沉积。马家沟组五段根据岩性可划分为10个亚段,其中的马五₅亚段自上而下可再划分为马五₅₋₁亚段马五₅₋₂亚段,主要为潮坪相沉积^[23-25]。黄道军等^[26]对关家崖剖面马五₅亚段碳酸盐岩的沉积过程进行了重建,认为在马五₅亚期关家崖地区的海平面经历了3次波动。

据来自黄道军等^[26]。

关家崖剖面的岩石组合特征与自然伽马曲线显示:实测剖面第2~17层为马五₅亚段,其中第13~17层为马五₅₋₁亚段,以白云质灰岩为主,第2~12层为马五₅₋₂亚段,底部主要为一套灰岩,向上演变为白云岩。此外,实测的第0~1层为马五₆亚段,为一套微晶灰岩,第18~19层为马五₄亚段,为一套微晶白云岩(图2)。

2 古水深恢复

2.1 基本原理

对关家崖剖面开展1:100实测,逐层描述、采样。本文采用的Th、U、K的值均来自洁净的岩石表面,按约0.5m的间距采集自然伽玛数据,建立自然伽玛曲线(图2)。碳氧同位素与微量元素数

地层中的U含量与有机碳含量具有显著的对对应关系,有机碳的含量受水深的控制,因此U可以作为古环境的指示参数。Th在自然界中只以+4价化合物的形式存在,性质稳定,一般不受成岩作用后期改造或其他地球化学作用的影响,但容易受到岩石成分的影响。因此,地层中Th的含量变化能较好地反映碳酸盐岩中陆源碎屑(主要的泥质)成分的变化情况,记录沉积的旋回特征。碳酸盐岩中的K含量主要与黏土物质和钾盐矿物的含量有关^[27-28]。

Th/K值可以指示水体动力环境,估计沉积水体深度的变化,而Th/U值可以反映古环境氧化还原程度和相对古水深的变化^[28-30]。当Th/U > 7

时,指示强氧化环境,当 $2 < Th/U \leq 7$ 时,指示氧化环境,当 $Th/U \leq 2$ 时,指示缺氧环境^[31-32]。因此,可以利用自然伽马数据恢复碳酸盐岩沉积时的古水深。需要注意的是:①研究区在平面上应处于

同一沉积水体的范围内;②在垂向上研究目的层应均为沉积岩层,且发育在同一沉积水体中;③为了排除岩性不同造成的干扰,需要选择岩性一致的岩层进行研究。

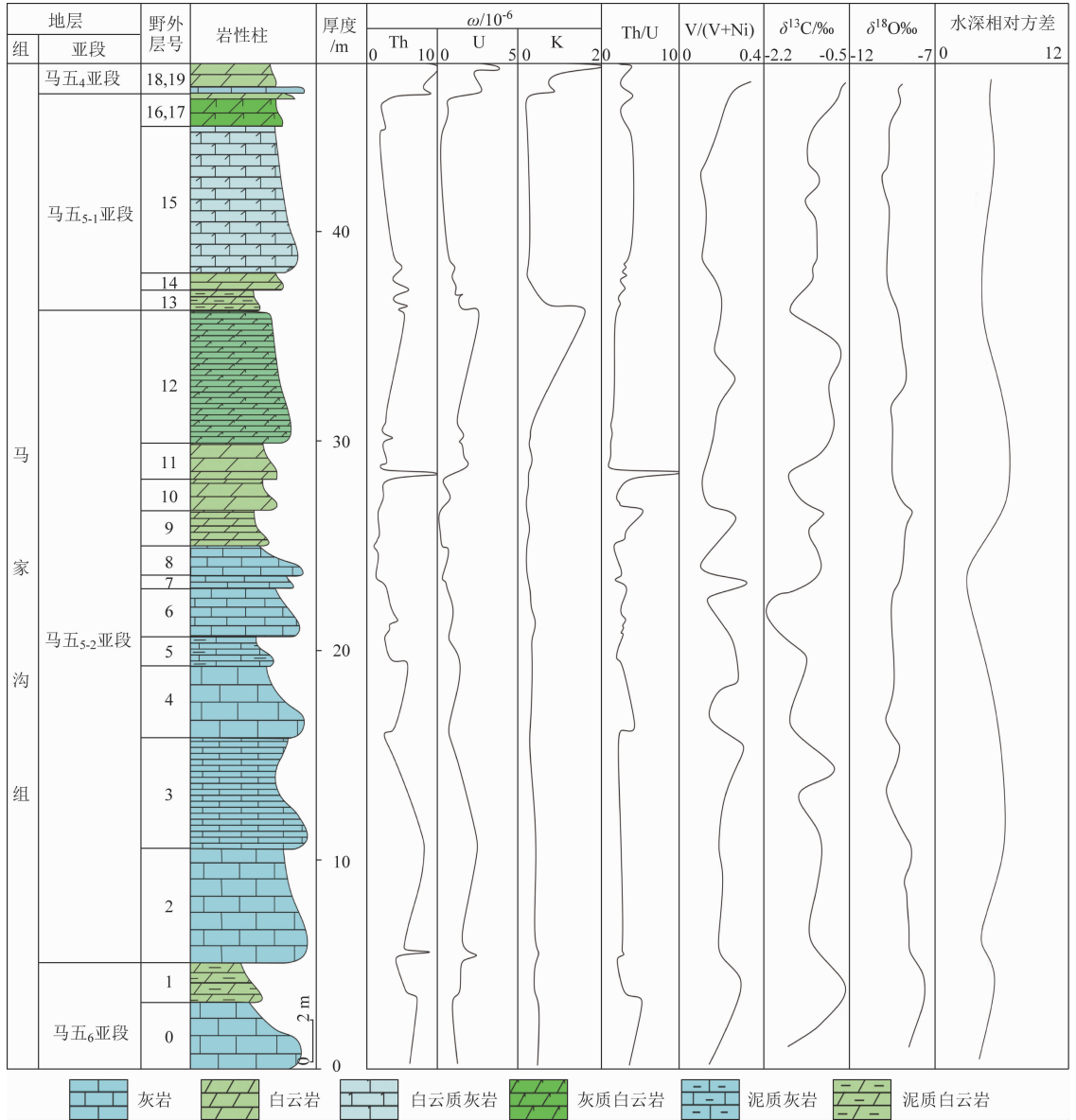


图 2 兴县关家崖剖面马五₅亚段自然伽马曲线与碳氧同位素曲线

Fig. 2 Natural gamma curves and carbon and oxygen isotope curves of M55 sub-member of Guanjiaya section in Xing County

U 含量的趋势变化可直接体现水体深度的演变特征。为了更清晰地反映古水深的变化,本文采取水深函数进行半定量计算,即定义 $w(U) = 0$ 时水深为零,每个数据点相对于“零水深”的偏差便能反映相对水深,而各层段内水体的总体深度可以用水深的相对方差表示^[33],其表达式为

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [w(U)_i]^2 \quad (1)$$

式中: $w(U)_i$ 为各采样点的 U 含量, 10^{-6} ; D 为水深函数的相对方差; n 为数据点数量,个; i 为数据点的顺序标号。

2.2 古水深恢复

从关家崖剖面的 Th、U、K 曲线(图 2,表 1)可

表 1 兴县关家崖剖面马五₅ 亚段自然伽马数据
Tab.1 Natural gamma datas for M55 sub – member of Guanjiaya section in Xing County

地层	野外层号	$\omega_B/10^{-6}$			Th/U
		K	U	Th	
马五 ₄ 亚段	19	0.65	2.90	7.75	2.67
		2.20	4.45	22.70	5.10
	18	0.67	2.60	9.97	3.83
		0.55	3.30	7.60	2.30
	17	0.90	3.15	9.45	3.00
		0.20	0.60	3.50	5.83
		0.20	1.65	3.60	2.18
		0.10	0.60	2.27	3.78
		0.30	1.10	3.47	3.15
		0.13	0.93	1.90	2.04
马五 ₅₋₁ 亚段	16	0.10	0.90	2.10	2.33
		0.10	0.80	2.60	3.25
		0.10	0.70	2.50	3.57
		0.07	0.70	2.77	3.95
	15	0.13	0.37	1.73	4.72
		0.20	0.85	4.00	4.71
		0.15	1.40	4.50	3.21
		0.13	1.37	5.53	4.05
		0.23	1.60	4.50	2.81
		0.10	1.03	4.37	4.23
马五 ₅₋₂ 亚段	14	0.15	1.35	3.15	2.33
		0.30	1.73	6.70	3.87
		0.30	1.13	3.20	2.82
	13	0.33	1.87	5.93	3.18
		0.35	1.30	2.95	2.27
		0.30	2.27	4.77	2.10
		0.40	1.70	3.90	2.29
		0.60	2.07	6.73	3.26
		0.77	1.77	4.07	2.30
		1.50	3.15	5.60	1.78
12	0.27	1.50	2.73	1.82	
	0.10	1.50	2.85	1.90	
	0.20	1.55	2.60	1.68	
	0.10	1.70	2.20	1.29	
	0.15	1.50	2.35	1.57	
	0.25	2.30	3.85	1.67	
	0.20	1.65	2.55	1.55	
	0.15	1.95	2.25	1.15	
马五 ₅₋₂ 亚段	11	0.27	2.00	3.00	1.50
		0.10	2.35	1.90	0.81
		0.17	1.93	2.23	1.16
	10	0.03	0.93	10.63	11.40
		0.15	0.65	2.65	4.08
		0.10	0.60	2.50	4.17
9	0.17	0.80	2.33	2.92	
	0.05	1.30	2.40	1.85	
	0.07	0.73	2.07	2.82	
	0.10	0.90	2.10	2.33	
9	0.10	0.25	1.55	6.20	
	0.20	0.55	1.85	3.36	
	0.10	0.40	1.50	3.75	

续表

地层	野外层号	$\omega_B/10^{-6}$			Th/U
		K	U	Th	
马五 ₅₋₂ 亚段	8	0.10	0.60	1.60	2.67
		0.10	0.63	0.90	1.42
		0.10	1.13	1.88	1.67
	7	0.10	0.40	1.17	2.92
		0.10	0.85	1.40	1.65
		0.20	0.80	3.05	3.81
		0.20	1.40	3.65	2.61
	6	0.27	1.37	3.83	2.80
		0.30	1.23	4.70	3.81
		0.30	1.15	3.10	2.70
0.30		1.05	3.50	3.33	
0.20		1.10	3.00	2.73	
0.25		0.85	2.65	3.12	
5	0.18	1.03	2.78	2.71	
	0.25	1.75	3.60	2.06	
	0.20	1.93	6.07	3.14	
	0.20	0.83	4.03	4.84	
	0.13	0.85	2.73	3.21	
	0.20	1.15	2.60	2.26	
4	0.15	1.28	2.98	2.33	
	0.33	2.93	8.27	2.82	
	0.25	1.77	5.40	3.06	
	0.40	3.40	9.10	2.68	
	0.38	1.93	6.53	3.39	
	0.30	1.78	4.10	2.31	
马五 ₆ 亚段	0	0.29	1.77	5.94	3.36
		0.40	1.20	7.20	6.00

以看出,地层中的 U 含量整体较为稳定,而 Th 和 K 的值分别在 28.70 m 和 36.40 m 处出现异常增高,说明在这一时期岩石中的泥质含量增高,可能为水体突然变浅导致陆源碎屑输入量增加。马五₅ 亚段的 Th/U 值为 2~5,平均 2.99,说明其沉积环境主要为氧化环境。马五₅₋₂ 亚段的 Th/U 值大部分为 2~4,指示了氧化环境,但在第 11~12 小层和第 7~9 小层中 Th/U 值大部分 <2,指示了缺氧环境。在 28.70 m 处,Th/U 值最大为 11.4,指示了强氧化的沉积环境,而在 29.10 m 处,Th/U 值迅速减小到 0.81,转变为缺氧环境,说明水体在此时经历了一次快速起伏,水体由浅变深。在 26.90 m 和 16.50 m 处,Th/U 值分别为 6.2 和 4.84,均指示了氧化环境,随后 Th/U 值减小,沉积环境由氧化逐渐向弱氧化甚至缺氧环境演变,水体由浅逐渐加深,说明水体深度在反复波动,具有一定的旋回性。马五₅₋₁ 亚段的 Th/U 值大部分为 2~6,沉积环境主要为氧化环境。

将由自然伽马曲线获得的 U 含量按层号带入

式(1),计算水深相对方差,得到马五₅₋₁亚段的水深相对方差平均值为2.16,马五₅₋₂亚段的水深相对方差平均值为2.33,水深相对方差减小说明氧含量增加,水体整体变浅。五₅亚段的7~9层水深相对方差为0.53;马五₅亚段的第3层、第5~6层、第10~17层的水深相对方差分别为1.84、1.42、2.49;马五₅亚段的第2层和第4层水深方差分别为11.64、3.75。可以看出在第2层,即10.6 m处水体深度达到最大。关家崖剖面马五₅亚段的Th/U值曲线(图2)可以看出海平面的波动频繁,经历了海侵-海退的旋回,水体突然加深形成还原环境,而后因沉积物的充填、含氧量增加使水体变浅,海平面至少经历了3次上升和下降。

3 讨论

利用碳同位素恢复碳酸盐岩沉积时古水深的方法已得到了广泛应用^[11,13,16,34-36],黄道军等^[26]使用碳同位素法对关家崖剖面的古水深进行了恢复,本文将其研究结果与自然伽马能谱法得到的相对水深变化进行了对比(图2)。

自然伽马能谱法显示在关家崖剖面的第2~3层水深由深变浅,经历了一次波动后在第8层水体最浅,而后逐渐变深,呈小幅度波动。碳同位素曲线显示马五₅亚段的第2~3层水体由深变浅,在第6层水体最浅,在第10~17层时水深相对稳定,呈小幅度动荡。对比两者水深恢复结果,可以看出自然伽马能谱法和碳同位素法恢复出的水深变化在局部小层之间略有差异,可能来源于自然伽玛测点与碳同位素取样点的间距差异,但总体趋势基本一致。利用碳同位素恢复古水深的方法是目前恢复古水深最普遍且有效的方法之一,然而在盆地中会受到岩心限制,不易获取连续的古水深曲线,自然伽马曲线得到的Th/U值曲线受控因素少,且为必测标准曲线,易获取连续数据,更具有实用性。

刘梦瑶等^[37]在马五₅亚段采用遗迹化石组合进行的古环境分析显示,马五₅亚段的第7~9层生物量相对较少,大部分为居住迹,为潮上带沉积。马五₅亚段的第2层和第4层主要为食沉积物动物的觅食迹和居住迹,潜穴的直径变化较小,生物扰动指数较低,表明此环境中大部分是个体较小的造迹生物,且其捕食能力弱,因此能在水体较深的安静环境中生

存。马五₅亚段的第3层、第5~6层、第10~17层为潮间带,生物数量相对较多,主要为居住迹和食悬浮物动物的遗迹,水体较动荡且食物丰富,具有很强的生物扰动。遗迹化石组合样式受控于含氧量变化,沉积环境从贫氧转变为富氧,生物遗迹组合也从无扰动演变为发育有觅食迹、牧食迹及居住潜穴^[38-39],这与V/(V+Ni)值(图2)指示的氧化还原环境变化相吻合,且与黄道军等^[26]根据岩石组构、生物遗迹重建的关家崖剖面马五₅亚段的碳酸盐岩沉积环境基本一致。遗迹化石与岩石组构确定出的古水深变化趋势与Th/U值、碳同位素得出的古水深变化趋势基本吻合,说明利用自然伽马能谱法恢复的古水深是可信的,证实了Th/U值在恢复碳酸盐岩沉积时的古水深研究中的可靠性。

综合Th/U值与碳同位素曲线的变化,发现关家崖剖面马五₅亚段海平面整体处于变浅的海退时期,在这个大的框架下,两条曲线出现了多次细小的波动,表明该时期海平面波动频繁,水体加深,由氧化环境转向还原环境,而后因沉积物的充填水体变浅,海平面的变化主要由3个上升和下降旋回组成。

4 结论

通过将碳同位素法、遗迹化石法等与自然伽马能谱法恢复碳酸盐岩沉积时古水深的方法进行比较,发现自然伽马能谱法与碳同位素法、遗迹化石法恢复得到的古水深变化的结果基本一致。研究表明自然伽马能谱法在恢复碳酸盐岩沉积时的古水深研究中是可行且准确的。

参考文献(References):

- [1] 张才利,高阿龙,刘哲,等.鄂尔多斯盆地长7油层组沉积水体及古气候特征研究[J].天然气地球科学,2011,22(4):582-587.
Zhang C L, Gao A L, Liu Z, et al. Study of character on sedimentary water and palaeoclimate for Chang7 oil layer in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 582-587.
- [2] 郭秋麟,倪丙荣.利用化石群分异度探讨古水深[J].石油大学学报:自然科学版,1990,14(2):1-7.
Guo Q L, Ni B R. Determination of palaeodepth with diversity of fossil community[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1990, 14(2): 1-7.
- [3] 赵激林,姜在兴,刘孟慧.东濮凹陷西部下第三系的遗迹相[J].石油大学学报:自然科学版,1989,13(1):1-8.
Zhao C L, Jiang Z X, Liu M H. Ichnofacies of the Eocene in west-

- ern Dongpu depression [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1989, 13(1): 1-8.
- [4] van der Zwaan G J, Jorissen F J, De Stigter H C. The depth dependency of planktonic/benthic foraminiferal ratios: Constraints and applications [J]. Marine Geology, 1990, 95(1): 1-16.
- [5] Ginsburg R N, Rezak R, Wray J L. Geology of Calcareous Algae: Notes for A Short Course [R]. Miami: University of Miami, 1971.
- [6] 王成善, 李祥辉. 沉积盆地分析原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- Wang C S, Li X H. Sedimentary Basin: From Principles to Analyses [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [7] 康波, 解习农, 杜学斌, 等. 基于滨线轨迹的古水深定量计算新方法——以古近系沙三中段东营三角洲为例 [J]. 沉积学报, 2012, 30(3): 443-450.
- Kang B, Xie X N, Du X B, et al. A new paleobathymetric approach based on shoreline trajectory: An example from Dongying delta in the third member of Paleogene Shahejie Formation [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(3): 443-450.
- [8] 董刚, 何幼斌. 根据地层厚度恢复古水深度的研究 [J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2010, 7(3): 484-486.
- Dong G, He Y B. Study on paleo-water-depth restoration according based on stratum thickness [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2010, 7(3): 484-486.
- [9] 庞军刚, 李文厚, 肖丽. 陕北地区延长组坳陷湖盆浅湖与深湖亚相的识别特征 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(6): 36-40.
- Pang J G, Li W H, Xiao L. Identifying characteristics of shallow lake and deep lake of Yanchang Formation depressed type lacustrine basin in Shanbei area [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2009, 45(6): 36-40.
- [10] 钟建华, 倪良田, 邵珠福, 等. 渤海湾盆地古近纪超深水与极超深水沉积及油气地质意义 [J]. 高校地质学报, 2017, 23(3): 521-532.
- Zhong J H, Ni L T, Shao Z F, et al. Identification of the ultra deep water deposition of the Bohai Bay Basin during the Paleogene and its significance for oil and gas geology [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(3): 521-532.
- [11] 田景春, 曾允孚. 贵州二叠纪海相碳酸盐岩碳、氧同位素地球化学演化规律 [J]. 成都理工学院学报, 1995, 22(1): 78-82.
- Tian J C, Zeng Y F. The evolution pattern of the carbon and oxygen isotopes in the Permian marine carbonate rocks from Guizhou [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1995, 22(1): 78-82.
- [12] 许中杰, 蓝艺植, 程日辉, 等. 句容地区下奥陶统仑山组海平面变化的碳酸盐岩地球化学记录 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2017, 47(5): 1458-1470.
- Xu Z J, Lan Y Z, Cheng R H, et al. Carbonate geochemical record of sea-level change of Lunshan Formation in Lower Ordovician in Jurong area [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2017, 47(5): 1458-1470.
- [13] 邵龙义, Jones T P. 桂中晚二叠世碳酸盐岩碳同位素的地层学意义 [J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 84-88.
- Shao L Y, Jones T P. Carbon isotopes and the stratigraphical implication of the Late Permian carbonates in central Guangxi [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 84-88.
- [14] 汪凯明, 罗顺社. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义——以冀北坳陷长城系高于庄组为例 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 343-349.
- Wang K N, Luo S S. Geochemical characters of carbonates and indicative significance of sedimentary environment: An example from the Gaoyuzhuang Formation of the Changcheng System in the northern Hebei depression [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 343-349.
- [15] 李任伟, 陈锦石, 张淑坤. 中元古代雾迷山组碳酸盐岩碳和氧同位素组成及海平面变化 [J]. 科学通报, 1999, 44(16): 1697-1702.
- Li R W, Chen J S, Zhang S K. Carbon and oxygen isotope composition of the carbonale rocks and its implication for sea-level change of Middle Proterozoic Wumishang Formation [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(16): 1697-1702.
- [16] 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 Z J, Kong J T, Cheng R H, 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.
- [17] 刘鑫, 高婷, 田景春, 等. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长4+5段沉积期古环境条件及意义 [J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3501-3518.
- Liu X, Shang T, Tian J C, et al. Paleo-sedimentary environmental conditions and its significance of Chang 4+5 member of Triassic Yanchang Formation in the Zhenbei area, Ordos Basin, NW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(11): 3501-3518.
- [18] Emmel B, De Jager G, Zieba K, et al. A 3D, map based approach to reconstruct and calibrate Palaeo-bathymetries - testing the cretaceous water depth of the Hammerfest Basin, southwestern Barents Sea [J]. Continental Shelf Research, 2015, 97: 21-31.
- [19] 李佳穆. 地球化学测井在松科二井古环境分析中的应用 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- Li J M. Application of Geochemical Logging in Paleoenvironment Analysis of Well SK-2 [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [20] 彭诚. 松辽盆地科探井古环境古气候测井分析方法及其关键问题研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Peng C. Research on Log Analysis Method of Paleoenvironment and Paleoclimate from Scientific Drilling Boreholes in Songliao Basin and Its Key Issues [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [21] 徐论勋. 晋西兴县奥陶系石油地质综合研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.

- Xu L X. Comprehensive Study of Ordovician Petroleum Geology in Xingxian County, Jinxi [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [22] 杜江民,张小莉,聂万才,等. 苏里格地区马五₅亚段储集层特征及其主控因素[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(1): 34-40.
Du J M, Zhang X L, Nie W C, et al. Study on reservoir characteristics and main controlling factors of Ma-55 submember in Sulige area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(1): 34-40.
- [23] 宁博,王起琼,李百强,等. 鄂尔多斯盆地马五-5亚段白云岩化成因模式[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(5): 531-538.
Ning B, Wang Q C, Li B Q, et al. Genetic model for M5-5 submember dolomitization of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(5): 531-538.
- [24] 史基安,邵毅,张顺存,等. 鄂尔多斯盆地东部地区奥陶系马家沟组沉积环境与岩相古地理研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 316-324.
Shi J A, Shao Y, Zhang S C, et al. Lithofacies paleogeography and sedimentary environment in Ordovician Majiagou Formation, eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 316-324.
- [25] 包洪平,杨承运. 鄂尔多斯东部奥陶系马家沟组微相分析[J]. 古地理学报, 2000, 2(1): 31-42.
Bao H P, Yang C Y. Study on microfacies of Majiagou Formation, Lower Ordovician, eastern Ordos, North China [J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(1): 31-42.
- [26] 黄道军,余伟,魏柳斌,等. 运用岩石组构、生物遗迹及地球化学重建碳酸盐岩沉积古环境——以山西兴县关家崖马五-5亚段为例[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2021, 48(5): 539-548.
Huang D J, She W, Wei L B, et al. Reconstruction of carbonate sedimentary palaeo-environment by using rock fabric, biological remains and geochemistry: A case study of the Ma 5-5 submember at Guanjiaya, Xingxian, Shanxi, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2021, 48(5): 539-548.
- [27] 陈中红,查明,金强. 自然伽玛及自然伽玛能谱测井在沉积盆地古环境反演中的应用[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1145-1150.
Chen Z H, Zha M, Jin Q. Application of natural gamma ray logging and natural gamma spectrometry logging to recovering paleoenvironment of sedimentary basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(6): 1145-1150.
- [28] 冯伟明,谢渊,刘建清,等. 海相碳酸盐岩自然伽马能谱测井资料的沉积学意义——以川东南 L1 井下寒武统清虚洞组为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(5): 165-172.
Feng W M, Xie Y, Liu J Q, et al. Sedimentological significance of natural gamma ray logging data of marine carbonate: A case of the well L1 of Qingxudong Formation, Lower Cambrian in southeast Sichuan Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(5): 165-172.
- [29] 高达,林畅松,胡明毅,等. 利用自然伽马能谱测井识别碳酸盐岩高频层序——以塔里木盆地塔中地区 T1 井良里塔格组为例[J]. 沉积学报, 2016, 34(4): 707-715.
Gao D, Lin C S, Hu M Y, et al. Using spectral gamma ray log to recognize high-frequency sequences in carbonate strata: A case study from the Lianglitage Formation from Well T1 in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(4): 707-715.
- [30] 阳孝法,林畅松,杨海军,等. 自然伽马能谱在塔中地区晚奥陶世碳酸盐岩层序地层分析中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 384-391.
Yang X F, Lin C S, Yang H J, et al. Application of natural gamma ray spectrometry in analysis of Late Ordovician carbonate sequence stratigraphic analysis in middle Tarim Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3): 384-391.
- [31] Udechachon M, Thassanapak H, Feng Q L, et al. Palaeoenvironmental implications of geochemistry and radiolarians from Upper Devonian chert/shale sequences of the Truong Son fold belt, Laos [J]. Geological Journal, 2017, 52(1): 154-173.
- [32] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. Science, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [33] 陈中红,查明. 轴曲线在沉积盆地古环境反演中的应用[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(6): 11-15.
Chen Z H, Zha M. Application of uranium curve to paleoenvironment inversion in sedimentary basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2004, 28(6): 11-15.
- [34] Derry L A, Brasier M D, Corfield R M, et al. Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian Craton: A paleoenvironmental record during the "Cambrian explosion" [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 128(3/4): 671-681.
- [35] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications [J]. Precambrian Research, 1995, 73(1/2/3/4): 27-49.
- [36] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2010: 288.
Huang S J. Carbonate Diagenesis [M]. Beijing: Geology Press, 2010: 288.
- [37] 刘梦瑶,史云鹤,董国栋,等. 山西兴县中奥陶统马家沟组五₅亚段遗迹化石组合及其古环境意义[J]. 古生物学报, 2019, 58(4): 487-501.
Liu M Y, Shi Y H, Dong G D, et al. Characteristics of paleoenvironmental evolution and ichnocoenosis in the 55 submember of the Middle Ordovician Majiagou Formation, Xingxian, Shanxi [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2019, 58(4): 487-501.
- [38] 杨式溥. 遗迹化石的古环境和古地理意义[J]. 古地理学报, 1999, 1(1): 7-19.
Yang S P. Palaeoenvironmental and palaeogeographic significance of trace fossils [J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1(1): 7-19.
- [39] Ekdale A A, Mason T R. Characteristic trace-fossil associations in oxygen-poor sedimentary environments [J]. Geology, 1988, 16(8): 720-723.

Application of natural gamma energy spectrum method for paleobathymetric recovery during carbonate deposition: A case study of M55 sub – member of Guanjiaya section in Xing County of Shanxi Province

LIU Fan¹, LIAO Huihong², MEI Anxin¹, LIANG Ru³, PENG Yu⁴

(1. *Sulige Project Management Department, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Inner Mongolia Wushenqi 017300, China*; 2. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China*; 3. *Geophysical Exploration Research Institute of Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Henan Puyang 457001, China*; 4. *Geology Exploitation and Development Institution, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., Sichuan Chengdu 610000, China*)

Abstract: The paleobathymetric analysis is of great significance to the paleoenvironment reconstruction and tectonic evolution of the basin. At present, paleobathymetric recovery is mainly qualitative, with high requires of sample reliability and is easy to be limited by the data condition. The natural gamma energy spectrum method has the advantages of accessibility, low cost and few controlled factors, and can be used to semi – quantitative paleobathymetric recovery based on bathymetric function. However, this method is mostly used in terrestrial clastic rock deposition and its suitability for marine carbonate rock deposition is not clear. Taking the M55 sub – member of Ordovician Majiagou Formation in Guanjiaya section of Ordos Basin as an example, the authors in this paper used the natural gamma energy spectrum method to reconstruct the paleobathymetry of carbonate sediments. This method has good consistency and same results obtained by carbon isotopic method, biological heritage method and rock fabric method. The credibility and practicability of natural gamma energy spectrum method in recovering paleobathymetric recovery was also proven.

Keywords: paleobathymetry; natural gamma energy spectrum method; carbon and oxygen isotope; Majiagou Formation; carbonate

(责任编辑: 魏昊明)