

湖北巴东栖霞组缺氧沉积环境的 地球化学特征

颜佳新 徐四平 李方林

(中国地质大学, 武汉)

[内容提要]地层的岩石地球化学特征是判断其形成环境氧化还原条件的重要手段之一。对湖北巴东水布垭剖面栖霞组中层纹状灰岩和含泥质灰岩的地球化学分析,结合鄂湘桂地区栖霞期区域沉积古地理背景及栖霞组沉积学、古生态学特征,表明该区栖霞组沉积于一贫氧的沉积背景。同时该研究表明大部分适用于判别泥质岩古氧相的痕量元素和稀土元素地球化学比值,如 U/Th 、 Ni/Co 、 $V/(V+Ni)$ 和 Ce/La 也可适用于该组以钙质沉积为主的沉积物。但部分指示,如 V/Cr 在碳酸盐岩中的应用值得今后研究注意。

关键词 栖霞组 缺氧沉积 地球化学

1 前言

沉积环境的古氧相特征不仅是沉积环境和古海洋特征恢复的重要内容,而且在油气勘探中亦具有重要指导意义^[1]。华南地区早二叠世栖霞期因含较丰富的有机质而被称为“黑栖霞”。近年已有多人从不同角度著文论述其缺氧沉积特征及成因^[2~6],主要证据包括岩相特征(如黑色页岩,硅质结核和团块、纹层状灰岩)、遗迹组构、沉积古地理特征(低能、局限)及有机相特征(浅海缺氧无定形有机相)等。在地球化学特征方面,仍未见详细的针对其缺氧沉积特征的研究报道,仅江纳言等^[7]对下扬子地区栖霞组稀土元素的研究中有所涉及。本文以湖北巴东水布垭剖面霞组碳酸盐岩地球化学分析为重点,结合栖霞期鄂湘桂地区沉积学和古生态学背景资料研究该剖面栖霞组缺氧沉积的地球化学特征。

2 地球化学分析

在判断沉积物形成环境的氧化还原条件方面,地球化学方法一直发挥着重要的作用。目前常用的古氧相地球化学指标主要包括:①依据早期成岩作用过程中黄铁矿形成与沉积环境的关系,包括有机碳和有机硫含量比值(C/S)及黄铁矿矿化程度(DOP)^[8];②利用元素铀钍在不同环境中的变化关系,包括 U/Th 比值及自生铀含量(AU);③各种痕量元素比值,如 V/Cr 、 Ni/Co 、 Ni/V 和 $(Cu+Mo)/Zn$ 等^[9];④稀土元素特征,如铈异常^[10,11];⑤同位素特征,如³⁴S/³²S^[12]。

① 本文1998年5月8日收稿

② 本文为自然科学基金项目(批准号49602030)资助成果

众多研究表明,许多金属元素可因吸附于有机质表面而沉积于海底。在水体中如果 O_2/H_2S 界面位于海底或海底之下,金属元素在沉降过程中可因有机质的氧化分解而重新回到海水中。如果 O_2/H_2S 界面在水体中上升,则大多数金属元素滞留于沉积物中。在黑色页岩中常富集的元素有 Ni、Co、Cu、Zn、U、V、Mo 和 Cr 等,但它们的富集机理并不相同。沉积物中 Ni、Co、Cu、Zn 的含量与其有机质含量有关,沉积物中有机质越多其所含的上述元素就越丰富。与此相反,U、V、Mo 和 Cr 则与沉积环境氧化还原条件有关。由此可根据上述两类痕量元素之间的比值差别是高有机质堆积速率还是缺氧沉积条件导致富有机质的黑色页岩形成。

Jones 等 (1994) 通过对西北欧晚侏罗世沉积古氧相地球化学研究后认为,在这方面 DOP、U/Th、V/Cr 和 Ni/Co 比值及自生铀含量 (AU) 最可靠 (表 1),它们尤其对富氧 (oxic) 与贫氧 (dysoxic) 相界线的判别效果最佳,并首次提出它们之间的对比关系 (表 1)。对 Ni/V 比值的古氧相意义目前还认识不一。Jones 等^[9]认为它易受成岩作用的影响,可靠性差。而 Tribouvillard 等人^[13]对英国约克郡相同层位地层的岩石地球化学研究发现,由于 V、Ni 地球化学行为的差异,岩石中 V/Ni 比不仅反映环境的氧化还原特征,而且还可以用来区分黑色页岩的成因 (是高有机质含量所致还是环境缺氧所为)。Hatch 等^[14]对北美堪萨斯州上宾西法尼亚系黑色页岩的研究也表明:V/(V+Ni) 比与 DOP 及上述元素含量均为环境氧化还原条件的反映,高 V/(V+Ni) 值 (0.84~0.89) 反映水体分层,底层水体中出现 H_2S 的厌氧环境;中等比值 (0.54~0.82) 为水体分层不强烈的厌氧环境;低值时 (0.46~0.60) 为水体分层弱的贫氧环境。

表 1 古氧相地球化学指标对比表^[9]

Table 1 Comparison of geochemical indices for the interpretation of palaeoredox conditions (after Jones and Manning, 1994)

古氧相	溶氧量 (ml/L)	DOP	U/Th	AU(10^{-6})	V/Cr	Ni/Co
厌氧(anoxic)	出现黄铁矿					
极贫氧(suboxic)	0.0~0.2	0.75	1.25	12.00	4.25	7.00
贫氧(dysoxic)	0.2~2.0	0.42	0.75	5.00	2.00	5.00
富氧(oxic)	>2.0					

注: AU 指自生铀含量

在稀土元素方面,铈异常是一种可靠而又有效的方法。白顺良等^[15]通过对华南泥盆纪缺氧沉积的稀土元素地球化学特征研究指出:铈异常值可用 Ce/La 比值代替,Ce/La 值 1.8 和 2.0 分别相当于铈异常值 -0.1 和 0。当 Ce/La<1.5 时为富氧环境,1.5~1.8 时为贫氧 (dysoxic) 环境,大于 2.0 时为厌氧环境。

本次古氧相地球化学研究样品采自湖北巴东水布垭剖面栖霞组中部,主要为层纹状灰岩和含泥质的灰岩。地表黑色页岩和含碳质泥灰岩因受到强烈风化而未予分析。测试项目除主要元素外主要针对上述指标。由于栖霞组早期成岩作用过程中硫酸盐还原反应存在明显的时空差异^①,导致本组碳酸盐岩中铁和硫的分布与 C/S 比值和 DOP 指标的应用前提明

① 颜佳新等, 1998, 湖北省巴东栖霞组沉积成岩作用地球化学特征研究, 沉积学报 (印刷中)。

显不同^[8],故本次研究没有选用 C/S 比值和 DOP 指标。考虑到样品中泥质和有机质含量差别可能对某些元素含量的影响,因而指标均采用元素含量比值,其中 Ni、Co 和 Cr 含量测定采用原子吸收光谱法,其余采用 x 射线荧光法(表 2)。对 12 件样品的测试结果表明:所有 Ni/Co 和 V/(V+Ni) 比值、10 个(共 12 个数据) Ce/La 比值、4 个 U/Th 比值(共 7 个数据)都指示出环境缺氧的特点,仅 V/Cr 值例外(均小于 1,0)。结合岩石样品中黄铁矿不发育的特点,它们应反映贫氧的沉积环境特征。

表 2 水布垭剖面栖霞组沉积环境古氧相地球化学特征

Table 2 Geochemical data for the palaeoredox conditions in the Qixia Formation of the Shuibuya section in Badong, Hubei

样 号	$w_B/\%$				$w_B/10^{-6}$			U/Th	Ni/Co	Ce/La	V/(V+Ni)	V/Cr
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Zn	Pb	Cu					
SB-42	7.83	1.29	49.45	0.67	36.6	6.4	11.1	>1.69	15.7	3.2	0.81	0.89
SB-44	23.93	0.67	33.07	10.80	48.2	6.7	15.2	—	8.6	4.4	0.75	0.35
SB-47	22.81	1.06	32.06	14.50	60.4	8.8	14.3	—	9.3	2.7	0.70	0.32
SB-49	24.13	0.56	32.08	14.70	24.2	5.8	12.3	—	20	0.1	0.68	0.28
SB-52	12.81	1.34	44.49	3.59	37.2	7.4	12.7	>1.1	22	1.8	0.52	0.63
SB-63	13.52	1.84	40.08	6.49	37.0	10.3	12.4	>0.5	10	7.4	0.82	0.34
SB-70	1.03	0.36	53.58	0.77	19.8	7.3	5.4	>1.57	10	2.7	0.79	0.67
SB-72	18.95	1.70	40.06	4.99	25.9	5.7	12.7	>0.41	23.3	3.4	0.71	0.12
SB-85	19.68	0.44	38.40	7.52	23.5	4.7	6.8	>0.14	30	5.2	0.90	1.0
SB-87	27.51	0.79	30.39	16.10	30.3	7.8	13.1	—	18	14.4	0.64	0.27
SB-95	22.72	0.72	37.19	7.78	16.8	7.4	8.4	—	27.5	0.8	0.61	0.94
SB-126	8.3	0.78	49.14	1.17	46.4	6.8	12.8	>1.16	7.5	3.3	0.80	0.46

3 沉积学和古生态学特征

在缺氧沉积的确定中,沉积学、古生态学和地球化学等方面资料的综合也极为重要^[13,16,17]。由于栖霞组沉积在空间上极为稳定,在其沉积环境氧化还原条件的确定中更应考虑其区域沉积学和古生态特征。在湘鄂一带及桂中地区,栖霞组一般具如下特征:

(1) 在古生态特征方面,本组栖霞组生物以悬食底栖为主,多为对水体中含氧量要求不高的广适型分子^[18],如腕足类,主要为壳体狭窄、表面积较大、壳薄营底栖自由躺卧的长身贝类和戟贝类;其次为个体小、壳薄的小嘴贝类和石燕类。该类腕足分布广,生态适用能力强。它们常与本组内海百合茎、苔藓虫、纤维海绵等共生,与国外同期缺氧盆地生物组合极为相似^[19]。

(2) 遗迹学研究表明,在缺氧沉积背景下,随水体中溶氧量的逐渐降低地层内将依次出现 *Planolites* 遗迹组构, *Zoophycos* 遗迹组构, *Chondrites* 遗迹组构。在本区栖霞组内反映极贫氧至厌氧环境的 *Zoophycos* 遗迹极为发育, *Chondrites* 也时有发现^[6]。

(3) 反映沉积环境贫氧至厌氧特征的水平层理和层纹极为普遍,具有栖霞组特色的层纹状灰岩已发现广泛分布于川、黔、桂及两湖和下扬子地区^[7,22,23]。虽然大多数层纹遭受过后期成岩作用的改造,其原生沉积特征的差异仍十分清楚。在碳质页岩中,常发育黄铁矿结核或晶粒。

栖霞组在湖北省南、北两侧厚度相对较小,一般小于 150m。在中部的恩施-长阳-蒲圻一带厚可达 250m,以深灰色眼球状灰岩和薄层至中厚层灰岩为主^[24]。岩石中生物碎屑含

量、底栖群体四射珊瑚和反映浅水沉积环境的藻屑从南北两侧往中部明显减少,而泥质碳质成分明显增加,反映本区中部沉积环境水体稍深。巴东水布垭剖面位于该中扬子碳酸盐台地中部的相对凹陷区内。该剖面栖霞组厚约 210m,主要由薄层含碳质泥质灰岩、中厚层泥晶灰岩、含生物碎屑灰岩、层纹状灰岩及硅化白云岩化灰岩组成,沉积旋回发育,其中含有机质泥质灰岩与薄层灰岩互层累积厚度大于 40m^[22]。上述反映沉积环境缺氧特点的沉积学和古生态特征在该剖面表现得更为清楚。

4 讨论和结论

缺氧沉积中以有机质含量较高为特征,但含较丰富有机质的沉积物并不一定就是缺氧环境成因,它们也可以是高生物产率或快速沉积的产物^[13,17,25]。因此缺氧沉积的确定需要综合地球化学、沉积学和古生态学等多方面的资料。综合地层沉积学研究表明,栖霞期实际上为一沉积速率较慢时期^[5]。上述诸多方面证据的叠加和吻合并非偶然,而应是本区内栖霞期沉积环境缺氧的反映。

值得指出的是,大多数古氧相痕量元素地球化学指标提出所依据的岩性大多为泥质岩类,其泥质和有机质含量均较高。本次研究样品均系碳酸盐岩。与大多数黑色页岩相比,本组岩石普遍贫金属元素。但如上所述,除 V/Cr 值外,大多数适用于泥质岩的指标同样用于该组含有机质和泥质的碳酸盐岩。

巢湖平顶山剖面栖霞组碳质或钙质页岩中, V/Cr 值与此大体相同,但均具反映缺氧环境的正锺异常。相反在一些较纯灰岩中, V/Cr 值较高(大多数大于 1.0, 3 个样大于 2.0)^[7]。据 Hatch 等资料^[14],在北美堪萨斯上宾西法尼亚系黑色页岩中, Cr 含量一般与 U、V、Mo、Cd、Zn 含量及有机质含量等一起随沉积环境氧化还原程度变化而变化,但在少数样品中出现反向变化。经进一步的有机质组成和物源分析发现, Cr 含量变化趋势异常的样品与其含较丰富海相藻类有机质有关(大部分样品中有机质为陆源成因)。众所周知,华南栖霞期海侵范围极广,陆源物质注入对沉积环境的影响极小。对栖霞组中有机地球化学研究表明,栖霞组内主峰碳多为 ¹⁷C 或 ¹⁹C,表明母质来源以海洋生物,尤以藻类为主^[7,26]。因此本组内较低的 V/Cr 值可能一方面与灰岩中有机质含量较低因而 V 含量也较低有关;另一方面可能与栖霞期海藻大量发育、海相藻类生物对 Cr 的富集有关。由此看来, Jones 等(1994)提出的 V/Cr 值标准在碳酸盐岩古氧相判别中的可靠性仍值得进一步研究。

由于前人对 Ni/V 比值意义存在不同意见,而 Ce/La 比值亦还未见应用于其它古氧相解释中,本次分析时,旨在进行试探性工作。有趣的是,如果去掉样号 SB-87 的话(岩石薄片镜下检查发现该样品所受成岩作用较为明显), V/(V+Ni) 与 Ce/La 两指标间有着良好的相关关系(图 1)。这也表明了 V/(V+Ni) 和 Ce/La 比值在古氧相解释中的可靠性。

综上所述,本次所测栖霞组层纹状灰岩和含泥质灰岩样品的沉积环境应为贫氧沉积环境,而本组内发育黄铁矿的黑色页岩、含碳质泥灰岩可能形成于厌氧沉积条件,含生物碎屑的块状灰岩则应为富氧沉积条件的产物。这与沉积学证据极为吻合。对栖霞组地层成因结构研究表明,栖霞期古氧相的时空结构与海平面变化有着密切的联系,受海平面变化的影响,水体中溶氧量可以波动于富氧至厌氧相之间,形成了栖霞组复杂和多变的古氧相特征^[6]。

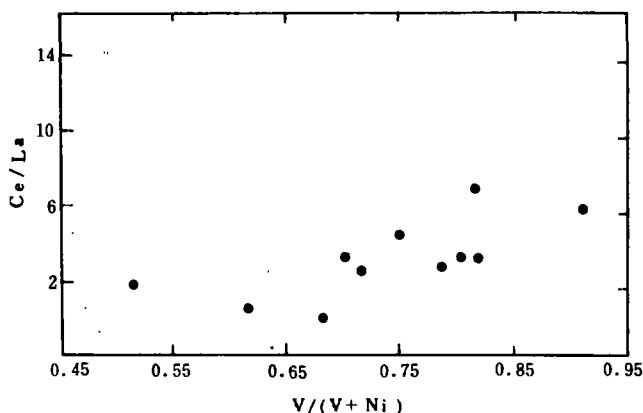


图 1 水布垭剖面栖霞组中 $V/(V+Ni)$ 与 Ce/La 的关系图

Fig. 1 $V/(V+Ni)$ versus Ce/La plot for the Qixia Formation of the Shuibuya section in Badong, Hubei

参 考 文 献

- 1 颜佳新、张海清. 古氧相——一个新的沉积学研究领域. 地质科技情报, 1996, 15(3), 7~3
- 2 吕炳全、翟建军. 下扬子地区早二叠世海进和上升流形成的缺氧环境沉积. 科学通报, 1989, 34(22), 1721~1724
- 3 Sano H and Jiang N. Early Permian carbonate sedimentation in South China. Abstracts--29th Intern. Geol. Congr, Kyoto, 1992, 2(3), 288
- 4 吴胜和、冯增昭、何幼斌. 中下扬子地区二叠纪缺氧环境研究. 沉积学报, 1994, 12(2), 29~35
- 5 颜佳新、杜远生. 冰川发育对赤道地区碳酸盐沉积环境和沉积作用的影响. 地质科技情报, 1994, 13(3), 48~56
- 6 颜佳新、陈北岳、李思田等. 鄂湘桂地区栖霞组古氧相分析与层序地层和海平面变化. 地质论评, 1997, 43(2), 193~199
- 7 江纳言等. 下扬子地区二叠纪古地理和地球化学环境. 北京: 石油工业出版社, 1994, 1~206
- 8 Morse J W and Berner P A. What determines sedimentary C/S ratios? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(6), 1073~1077
- 9 Jones B J and Manning A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1994, 111, 111~129
- 10 Elderfield H and Greaves M J. The rare earth elements in seawater. *Nature*, 1982, 296, 214~219
- 11 Wright J and Holser W T. Palaeoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite. *Geochimica et Cosmochimica acta*. 1987, 51, 631~644
- 12 Kajiwa Y, Yamakita S, Ishida K et al. Development of a largely anoxic stratified ocean and its temporary massive mixing at the Permian/Triassic boundary supported by the sulfur isotopic record. *Palaeogeogr Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1994, 111, 367~379
- 13 Tribouillard N P, Desprairies A, Lallier-Verges E et al. Geochemical study of organic matter-rich cycles from the Kimmeridge Clay Formation of Yorkshire (UK): productivity versus anoxia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1994, 108, 165~181
- 14 Hatch J R and Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. *Chemical Geology*, 1992, 99, 65~82
- 15 Bai S L, Bai Z Q, Ma X P et al. Devonian events and biostratigraphy of South China, Chapter 3: Ce/La ratio as marker of paleoredox. Beijing: Peking Univ. Press, 1994, 21~24
- 16 Hallam A and Wignall P B. 贫氧生物相与厌氧生物相的古生态. 大自然探索, 1992, 11(2), 9~10
- 17 Wetzel A. Stratification in black shales, depositional model and timing--an overview. In: Einsele G et al. (eds.), *Cy-*

- cles and Events in Stratigraphy. Berlin, Springer-Verlag, 1991, 508—523
- 18 颜佳新、赵锡文、杜远生. 利用群落古生态分析研究黄石地区栖霞组沉积环境. 岩相古地理, 1996, 16(4), 40~49
 - 19 Kammer T W, Brett C E, Boardman D R et al. Ecological stability of the dysaerobic biofacies during the Late Paleozoic. *Lethaia*, 1986, 19(2), 109—121
 - 20 Savrda C E and Bottjer D J. Trace fossil model for reconstruction of paleo-oxygenation in bottom water. *Geology*, 1986, 14(1), 3—6
 - 21 Ekdale A A and Bromley R G. Analysis of composite ichnofabrics, an example in uppermost Cretaceous chalk of Denmark. *Palaeos*, 1991, 6(3), 232—249
 - 22 颜佳新、方念乔. 湖北省栖霞组沉积环境, 沉积旋回及层序划分. 地球科学, 1994, 19(5), 620~626
 - 23 杨万容、江纳言、戴庆兰等. 南京栖霞山栖霞组生物灰岩岩石学特征及环境分析. 地层学杂志, 1984, 8(1), 38~48
 - 24 冯增昭等. 中下扬子地区二叠纪岩相古地理. 北京: 地质出版社, 1991, 1~244
 - 25 Pedersen T F and Calvert S E. Anoxia vs productivity: what controls the formation of organic carbon-rich sediments and sedimentary rocks? *The AAPG Bulletin*, 1991, 74(4), 454—466
 - 26 沙庆安, 吴望始, 傅家谟. 黔桂地区二叠系综合研究——兼论含油气性. 北京: 科学出版社, 1990, 215

Geochemistry of the dysaerobic sedimentary environments of the Qixia Formation in Badong, Hubei

Yan Jiaxin Xu Siping Li Fanglin

China University of Geosciences, Wuhan

ABSTRACT

The geochemistry of sediments and/or rocks in the oxygen-deficient environments is commonly an important indicator for the interpretation of palaeoredox conditions. The analyses of twelve moderately laminated limestone and argillaceous limestone samples collected from the Lower Permian Qixia Formation of the Shuibuya section in Badong, Hubei, integrated with their sedimentary and palaeoecological characteristics, have confirmed that the carbonate successions in the study area were accumulated in a dysaerobic environment. In addition, it is suggested that most geochemical indices for the interpretation of palaeoredox conditions inferred from ancient mudstones, for example, U/Th, Ni/Co, V/(V + Ni) and Ce/La except V/Cr, are also valid for the interpretation of argillaceous limestones.

Key words: Qixia Formation, anoxic sediments, geochemistry