

# 准噶尔盆地东北缘石炭纪古盐度与古环境

颜世翠

(中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

**摘要:**综合古盐度定性分析和定量计算结果,结合区域构造和沉积背景,对准噶尔盆地东北缘石炭纪古环境进行深入分析。研究区石炭系样品硼含量为 18.72~74.50  $\mu\text{g/g}$ ,下石炭统硼含量平均为 51.32  $\mu\text{g/g}$ ,上石炭统硼含量平均为 38.40  $\mu\text{g/g}$ ;石炭系样品 Sr/Ba 值为 0.15~1.85,下石炭统 Sr/Ba 值平均为 0.69,上石炭统 Sr/Ba 值平均为 0.40;2 种方法计算的古盐度平均值分别为 4.28‰ 和 6.54‰;说明研究区早石炭世古沉积水体为半咸水—咸水环境,晚石炭世古沉积水体为淡水环境,且石炭纪沉积古水体盐度远低于正常海水盐度。由于研究区石炭纪整体处于大陆边缘,早石炭世处于岛弧—弧后盆地沉积体系,平面上受多个岛弧分割,古沉积水体盐度变化大;晚石炭世,受区域构造背景影响,整体抬升为陆,古沉积水体盐度整体降低。

**关键词:**石炭纪 古环境 古盐度 硼元素法 锶钡法 准噶尔盆地

**中图分类号:**TE111.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-9603(2013)05-0060-04

准噶尔盆地克拉美丽气田及三塘湖盆地石炭系油气田的发现,引发了近年来新疆北部石炭系研究的热潮。勘探家们越来越认识到准噶尔盆地深层石炭系具有较大的勘探潜力,这无疑将极大拓展准噶尔盆地的勘探领域<sup>[1-2]</sup>。在晚古生代,新疆北部整体处于复杂构造转换期,残留洋(海)盆、沟弧盆体系及陆内裂谷体系在时空上交替发展。复杂的构造背景造就了多类型古地理单元并存的局面,油气生、储、盖研究及有利含油气区带预测难度大。而细粒沉积岩中的微量元素蕴含丰富的古环境信息,对恢复岩相古地理以及重建古沉积环境意义重大。因此,笔者利用沉积岩中微量元素反映的古盐度信息对准噶尔盆地东北缘石炭纪古沉积环境进行探讨,以期能有效指导准噶尔盆地石炭系油气生、储、盖特征研究。

## 1 古盐度定性分析

鉴于准噶尔盆地北部石炭系钻井资料较少,而地表露头资料较为丰富的特点,主要利用准噶尔盆地东北缘石炭系地表露头剖面来开展研究(图1),共选取了9条露头剖面及1口钻井的泥质岩样品进行微量元素分析。样品分析测试在吉林大学岩矿重点实验室完成,利用ICP-MS测试分析技术,系统开展了泥质岩中对古盐度较为敏感的Sr、Ba和B

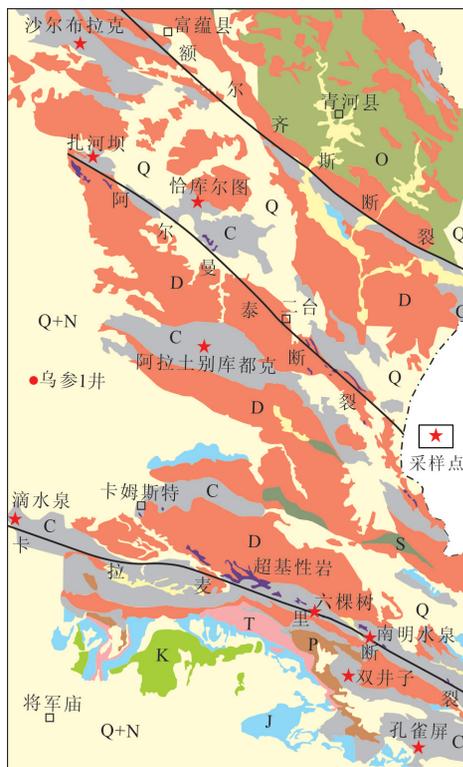


图1 准噶尔盆地东北缘石炭系样品平面位置分布

等微量元素的分析测试工作。

水体盐度是指水体中所有可溶盐的质量分数,而古盐度是指保存于古沉积物之中的盐度<sup>[3]</sup>。目前相关研究多间接利用古沉积物来进行古盐度推算,分析沉积岩中对古盐度具有指示意义的微量元素

收稿日期:2013-06-27。

作者简介:颜世翠,女,工程师,硕士,从事地球物理技术的开发与应用。联系电话:(0546)8715757,E-mail:yanshicui.slyt@sinopec.com。

含量及比值等定性开展古盐度研究,主要包括硼元素法和锶钡法等<sup>[4]</sup>。

### 1.1 硼元素法

硼元素主要富集在地球表层的各类岩石和水体中,沉积岩中的伊利石等粘土矿物具有较强的硼吸附能力,其中海绿石的吸附能力最强,粘土和页岩次之。因而沉积物的硼含量与水体硼含量有关。Couch对北大西洋、太平洋东北部等地区的研究结果表明,水体中的硼含量与水体盐度存在线性关系<sup>[5]</sup>,因此沉积物中硼含量也与水体中的盐度存在一定的相关性。一般而言,海相环境下硼含量为80~125  $\mu\text{g/g}$ ,而淡水环境硼含量大部分小于60  $\mu\text{g/g}$ <sup>[6]</sup>。现代不同环境条件下沉积物中硼含量存在很大差别,其中海相环境硼含量一般为80~150  $\mu\text{g/g}$ ,半咸水海盆环境硼含量为85~110  $\mu\text{g/g}$ <sup>[7]</sup>;海陆过渡相中硼含量为50~70  $\mu\text{g/g}$ ,而陆地湖泊环境硼含量为60~500  $\mu\text{g/g}$ 。

古沉积物中硼含量由于水体盐度和沉积环境的不同而存在较大差异。受淡水改造的海相环境如吐哈盆地西南缘侏罗系<sup>[8]</sup>、三塘湖盆地石炭系<sup>[9]</sup>硼含量往往小于60  $\mu\text{g/g}$ ,表现出淡水—微咸水的特点;而咸化—半咸化湖盆如东营凹陷、苏北盆地古近系<sup>[7]</sup>沉积物中硼的含量往往高于100  $\mu\text{g/g}$ ,甚至高于现代海相环境中的硼含量。准噶尔盆地东北缘石炭系样品硼含量为18.72~74.50  $\mu\text{g/g}$ ,下石炭统硼含量平均为51.32  $\mu\text{g/g}$ ,上石炭统硼含量平均为38.40  $\mu\text{g/g}$ (表1),前者反映了海陆过渡环境,后者反映了陆相环境。与吐哈盆地侏罗系和三塘湖盆地石炭系类似,相对于现代水系,与潮汐河口湾和三角洲前缘相似,均反映一种古盐度偏低的古水体环境,代表海水受淡水改造作用强烈的环境。可能是由于石炭纪北准噶尔局限海盆与南部天山古洋盆中间有古陆相隔,此外,受到北部古陆区碎屑输入和大气降水影响导致水体盐度低于正常海水。

表1 准噶尔盆地东北缘石炭系样品硼含量及锶钡比值

样品	层位	岩性	硼含量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		Sr/Ba		古水体环境
			范围	平均值	范围	平均值	
乌参1井	C <sub>j</sub>	灰黑色凝灰质泥岩	25.60~74.50	54.2	0.15~1.31	0.51	半咸水
沙尔布拉克	C <sub>j</sub>	灰黑色粉砂质泥岩	48.20~61.20	53.7	0.42~0.67	0.55	半咸水
恰库尔图	C <sub>j</sub>	灰黑色泥岩	18.72~66.20	50.5	0.45~1.54	0.95	半咸水—咸水
扎河坝	C <sub>j</sub>	黑色泥岩	43.99~70.46	62.5	0.69~1.85	1.22	咸水
	C <sub>b</sub>	黑色泥岩	39.67~41.50	40.8	0.39~0.45	0.42	淡水
南明水泉	C <sub>j</sub>	灰黑色炭质泥岩	27.60~65.30	56.7	0.38~0.76	0.62	半咸水
滴水泉	C <sub>j</sub>	灰黑色粉砂质泥岩	38.20~61.50	53.1	0.52~0.70	0.59	半咸水
双井子	C <sub>b</sub>	灰黑色粉砂质泥岩	30.00~41.10	36.0	0.31~0.52	0.38	淡水
六棵树	C <sub>h</sub>	灰黑色粉砂质泥岩	44.80~54.80	51.4	0.25~0.67	0.56	半咸水
孔雀屏	C <sub>h</sub>	灰黑色含粉砂质泥岩	40.80~57.60	50.2	0.81~0.94	0.88	半咸水—咸水

### 1.2 锶钡法

锶和钡是碱土金属中化学性质较相似的2个元素,锶比钡迁移能力强,当淡水和海水相混合时,淡水中的 $\text{Ba}^{2+}$ 与海水中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 结合生成 $\text{BaSO}_4$ 沉淀,而 $\text{SrSO}_4$ 溶解度大,可以继续迁移到远海,通过生物途径沉淀下来。因此,锶钡比值(Sr/Ba)可作为海相与陆相以及古盐度的判别指标,一般来讲,陆相淡水沉积物中Sr/Ba值小于1.0,而海相沉积物中Sr/Ba值大于1.0,Sr/Ba值介于0.5~1.0为海陆过渡的半咸水相<sup>[10]</sup>。

准噶尔盆地东北缘石炭系样品Sr/Ba值为0.15~1.85,水体咸度差异性较大。但总体而言,下石炭统Sr/Ba值平均为0.69,反映了一种海陆过渡的半咸水沉积环境,而上石炭统Sr/Ba值平均为0.40,反映了一种陆相淡水沉积环境,与硼元素反映的沉积环境

基本相同。

## 2 古盐度定量计算

由于硼元素一旦被粘土矿物吸收后,无论呈吸附状态还是在矿物晶格中,都不会因后期物理和化学变化而迁移;另外,水体中硼含量是水体盐度的线性函数,矿物吸收硼含量与水体硼含量有关,据此许多学者都提出可根据岩石样品中硼含量来计算水体盐度<sup>[5-6]</sup>。不同粘土矿物对硼的吸收量不同,根据X衍射粘土矿物分析,准噶尔盆地东北缘石炭系样品粘土矿物以蒙脱石和伊利石为主,高岭石含量较低(表2),采用泥岩中硼含量与水体盐度关系的等温吸收方程来确定古盐度,Landergren古盐度计算公式<sup>[11]</sup>为

表2 准噶尔盆地东北缘石炭系样品古盐度计算值

样品	层位	岩性	Landergren 古盐度,‰	粘土矿物含量, %			高岭石 含量, %	Couch 古盐度,‰
				伊利石	蒙脱石	高岭石		
孔雀屏	C <sub>1h</sub>	灰黑色粉砂质泥岩	2.42~5.40	50.1~54.0	20.4~22.0	5.0~8.0	15.22~23.40	6.89~9.63
	C <sub>1d</sub>	灰色粉砂质泥岩	0.84~1.82	45.8~51.8	21.6~26.4	5.0~9.0	9.61~15.61	4.80~7.02
双井子	C <sub>2j</sub>	暗色泥岩	3.01~4.81	40.4~58.8	28.7~41.6	4.0~7.0	13.77~24.57	6.36~10.01
	C <sub>2b</sub>	灰黑色泥岩	1.18~2.46	48.4~68.8	25.4~48.7	7.0~10.0	7.84~16.47	4.10~7.32
南明水泉	C <sub>2j</sub>	泥灰质细砂岩	0.98~7.23	40.0~50.0	18.0~24.0	7.0~12.0	10.62~32.17	5.19~12.35
六棵树	C <sub>1h</sub>	灰黑色含炭质泥岩	2.71~4.82	49.5~62.4	19.1~24.6	5.0~9.0	13.92~22.74	6.42~9.42
	C <sub>1d</sub>	灰黑色泥岩	0.72~2.21	57.6~68.7	27.5~38.9	6.5~8.6	6.69~13.46	3.62~6.25
滴水泉	C <sub>2j</sub>	灰黑色粉砂质泥岩	2.08~6.28	42.0~55.4	28.0~40.0	1.0~4.0	12.50~27.33	5.90~10.88
恰库尔图	C <sub>2j</sub>	灰色泥岩	0.40~7.46	45.3~56.0	27.6~35.0	4.0~8.5	6.19~27.54	3.41~10.94
扎河坝	C <sub>2j</sub>	黑色泥岩	2.88~7.97	47.6~62.6	14.4~70.4	5.0~9.0	10.99~22.51	5.34~9.34
	C <sub>2b</sub>	黑色泥岩	2.27~2.52	49.2~58.1	29.5~36.8	7.4~9.5	12.57~15.79	5.93~7.08
沙尔布拉克	C <sub>2j</sub>	灰黑色泥岩	3.56~6.21	33.8~48.4	35.2~47.2	8.0~11.0	16.12~28.65	7.20~11.28
	C <sub>1h</sub>	灰色凝灰质泥岩	2.25~3.23	54.8~64.2	57.5~68.5	7.5~9.7	9.80~13.52	4.88~6.27
乌参1井	C <sub>2j</sub>	灰黑色凝灰质泥岩	1.82~5.82	68.9~75.8	38.5~45.1	8.0~12.0	6.31~20.66	3.46~8.74

$$\lg B = 0.43 \lg S + \lg 27.9 \quad (1)$$

式中:  $B$  为实测硼含量,  $10^{-6}$ ;  $S$  为古盐度, ‰。

利用式(1)计算出准噶尔盆地东北缘石炭系样品古盐度为0.40‰~7.97‰, 平均值为4.28‰, 上、下石炭统样品古盐度变化较大(表2)。

Couch 根据粘土矿物对硼的吸收比率关系, 提出以高岭石含量为标准的硼含量校正公式<sup>[5]</sup>

$$B_k = \frac{B}{4X_i + 2X_m + X_k} \quad (2)$$

式中:  $B_k$  为高岭石硼含量, %;  $X_i$ ,  $X_m$  和  $X_k$  分别为样品中实测伊利石、蒙脱石和高岭石的含量, %。

根据 Freundlich 吸收方程, 其盐度计算式为

$$\lg B_k = 1.28 \lg S + 0.11 \quad (3)$$

高岭石硼含量是基于样品吸附硼的总量与多种粘土矿物相对含量的比值关系, 适用盐度范围广(1‰~35‰), 因此应用较为广泛。利用 Couch 方法计算了准噶尔盆地东北缘石炭系样品古盐度为3.41‰~12.35‰, 平均值为6.54‰(表2), 与 Landergren 方法计算古盐度结果相近, 均反映石炭纪水体盐度总体较低, 小于正常海洋的水体盐度(35‰); 总体具有早石炭世水体古盐度高于晚石炭世的特点。

### 3 古环境分析

通过古盐度定性分析以及定量计算结果, 结合区域古构造、沉积背景, 可以进一步深入分析石炭

纪古沉积环境。

#### 3.1 早石炭世

在早石炭世早期, 克拉美丽洋盆向北俯冲, 在阿尔曼太缝合带南侧形成一些水下岛弧, 准噶尔北部主要处于活动大陆边缘多岛弧背景。准噶尔盆地东北缘卡拉麦里山六棵树地区火山活动频繁, 沉积了一套火山碎屑岩与火山岩互层的岩石组合(黑山头组), 火山活动间歇期沉积的薄层炭质泥岩 Sr/Ba 值为0.56, 代表一种海陆过渡沉积环境。距其不远的孔雀屏地区则沉积了一套细粒的砂质泥岩与粉砂质泥岩互层的陆相碎屑岩夹薄层炭质泥岩组合, 粉砂质泥岩 Sr/Ba 值为0.81~0.94, 代表半咸水沉积环境。这可能是由于准噶尔盆地东北缘卡拉麦里岛弧向北俯冲, 主要发育沟弧盆体系下的陆相及海陆过渡相沉积环境, 水体偏淡, 并且火山活动频繁, 同时在火山活动间歇期形成的火山湖泊水体盐度总体偏低。

在早石炭世晚期, 准噶尔盆地东北缘卡拉麦里残留洋盆完全闭合, 处于弧后盆地背景。卡拉麦里断裂带南北两侧均发育一套正常碎屑岩沉积, 沉积环境复杂多变, 总体具有三段式充填特征, 底部为一套火山岩及火山碎屑岩, 中部为细碎屑岩, 上部为粗碎屑岩或火山碎屑岩, 在钻井及野外露头剖面中均有体现。水体古盐度也呈现多变特征, 双井子、六棵树一带距物缘区较近, 淡水供应充足, 盐度低, 而滴水泉地区处于较封闭的水体环境, 沉积了一套暗色泥岩, 厚度可达近千米, 具有半咸水的沉

积特点。北部恰库尔图及沙尔布拉克地区反映了水体盐度较大的沉积环境(图2)。

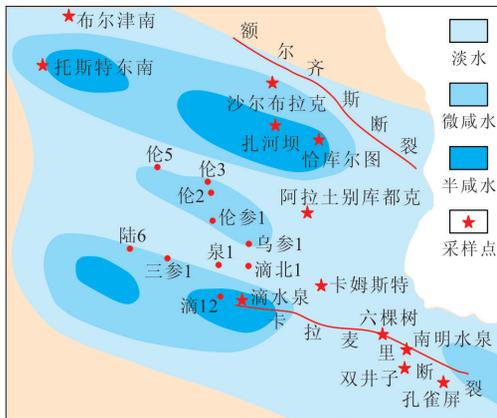


图2 准噶尔盆地东北缘早石炭世水体盐度平面分布

准噶尔盆地东北缘早石炭世晚期整体上表现为在扎河坝附近水体盐度最大,向南北两侧靠近卡拉麦里断裂和额尔齐斯断裂水体古盐度变小,为淡水—半咸水环境。其平面展布受卡拉麦里及额尔齐斯等深大断裂带控制,南侧双井子地区发育粗碎屑沉积,为可能的物缘区,陆相淡水供应充沛,古水体盐度最低,主要为淡水环境;而北侧受额尔齐斯断裂带控制,水体较深,盐度相对较高(图2),这种古盐度变化特点受控于准噶尔盆地东北缘早石炭世总体处于分割性较强的多岛弧海陆过渡沉积环境。这一点与前人对准噶尔盆地北部沉积环境以及岩相古地理的研究相一致<sup>[12]</sup>。

### 3.2 晚石炭世

晚石炭世古水体盐度整体上小于早石炭世古水体盐度。晚石炭世发现的少量介形类化石个体明显减小,以棕红色的氧化色调为主,说明古水体盐度逐渐降低<sup>[12]</sup>。这可能是因为晚石炭世古地理格局发生了很大的变化,构造背景由俯冲挤压转换为碰撞后应力松弛,火山活动剧烈,整个准噶尔盆地北缘处于大陆裂谷环境。由于乌伦古地区构造抬升,总体古地形呈现东北高、西南低的格局,海水不断由北向南退去,火山活动频繁,准噶尔盆地东北缘成为可能的物缘区,陆相淡水供应充沛,同时与南部及西部古洋盆的彻底隔开导致古水体变淡。卡拉麦里山双井子地区沉积了巨厚的河流相粗碎屑岩,其 Sr/Ba 值较低,仅为 0.38,古盐度为 1.18‰~2.46‰,反映为淡水环境;与其相近的孔雀屏地区,发育了正常的滨海砾岩, Sr/Ba 值为 0.23,古盐度为 0.84‰~1.82‰;北部的扎河坝地区 Sr/Ba 值为 0.42,硼含量可达 41.50 μg/g,均反映了陆相淡水沉积环境。

## 4 结论

通过对硼含量和锶钡比值等反映古盐度参数的分析认为,准噶尔盆地东北缘石炭纪总体古沉积水体为淡水—半咸水的环境,海水受淡水改造作用强烈,水体盐度远小于正常海洋的水体盐度,这可能是由于准噶尔盆地东北缘石炭纪局限海盆与大洋隔开,受陆源输入和大气降水影响导致水体盐度远低于正常海水。同时,受古构造、沉积背景的控制,准噶尔盆地东北缘早石炭世处于陆缘岛弧环境,水体盐度总体低于正常海水盐度;扎河坝附近水体盐度最大,向南北两侧水体盐度降低,其高盐度水体展布方向受北西向大断裂控制;南部双井子地区作为可能的物缘区,陆上淡水供应充沛,水体盐度最低。晚石炭世由于构造抬升,海水从北向南退去,导致水体盐度整体上低于早石炭世。

### 参考文献:

- [1] 宋元林,廖健德,张瑾琳,等.准噶尔盆地克拉美丽火山岩气田开发技术[J].油气地质与采收率,2011,18(5):78-80,88.
- [2] 郝爱华,刘虹瑜,熊益学,等.火山熔岩储层次生孔隙类型的岩相学研究——以克拉美丽气田石炭系滴西17井区为例[J].特种油气藏,2012,19(5):26-29.
- [3] 李进龙,陈东敬.古盐度定量研究方法综述[J].油气地质与采收率,2003,10(5):1-3.
- [4] 杨彦敏,奥立德,刘金华,等.高邮凹陷深凹带戴一段古水体特征[J].油气地质与采收率,2012,19(4):27-30.
- [5] Couch E L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. AAPG Bulletin, 1971, 55(10): 1 829-1 837.
- [6] Walker C T. Evaluation of boron as a paleosalinity indicator and its application to offshore prospects[J]. AAPG Bulletin, 1968, 52(5): 751-766.
- [7] 杨锐. 微量元素硼的环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1993, 13(3): 91-96.
- [8] 王敏芳,焦养泉,王正海,等.沉积环境中古盐度的恢复[J].新疆石油地质,2005,26(6):720-722.
- [9] 刘俊田,梁浩,侯全政,等.三塘湖盆地晚石炭世沉积环境中的古盐度恢复[J].新疆石油天然气,2011,7(1):1-5.
- [10] 史忠生,陈开远,史军,等.运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析[J].断块油气田,2003,10(2):12-16.
- [11] Lendergren S, Carvajal M C. Geochemistry of boron. III. The relationship between boron concentration in marine clay sediments and the salinity of the depositional environments expressed as an adsorption isotherm[J]. Arkiv Mineralogisch Geological, 1969, 5: 13-22.
- [12] 张义杰,齐雪峰,程显胜,等.准噶尔盆地晚石炭世和二叠纪沉积环境[J].新疆石油地质,2007,28(6):674-675.