

文章编号: 1000-0550(2010) 03-0509-09

# 塔里木盆地石炭系泥岩沉积时的古盐度分析<sup>1</sup>

许 璟 蒲仁海<sup>1</sup> 杨 林<sup>2</sup> 李艾红<sup>2</sup>

(1. 大陆动力学国家重点实验室 西北大学地质系 西安 710069

2 中国石油化工股份有限公司西北分公司研究院 乌鲁木齐 830011)

**摘 要** 通过对塔里木盆地巴楚、塔中、塔河地区井下及巴楚小海子露头、阿克苏四石厂露头的石炭系泥岩中黏土矿物、微量和常量元素的测定,利用 Adams 和 Couch 古盐度计算公式、Walker 相当硼判定法及锶钡比值法定量一半定量地分析了该区石炭系泥岩沉积时的古盐度特征,结果表明古盐度在 4.7‰ ~ 33.9‰,大部分为半咸水沉积,其次为淡水—微咸水沉积,个别为咸水沉积;且古盐度变化明显,平面上巴楚组泥岩段泥岩总体具有从塔东北向塔西南古盐度变大的趋势;卡拉沙依组砂泥岩段泥岩在塔中古盐度最小,塔西南最大,塔北居中。由于沉积物中泥岩沉积时的古盐度特征是沉积环境的判别标志之一,因此它对有争议的卡拉沙依组砂泥岩段及巴楚组角砾岩段沉积环境的判定提供了沉积水体性质方面的依据。石炭系泥岩沉积时的古盐度与该时期海平面升降及沉积相演化有关,该泥岩形成于石炭纪海平面相对下降或上升缓慢、古盐度相对较低的沉积环境。

**关键词** 古盐度 泥岩 沉积环境 海平面变化 石炭系 塔里木盆地

**第一作者简介** 许璟 女 1984 年出生 硕士研究生 层序地层学、沉积学 E-mail: lily\_jing\_2003@163.com

**中图分类号** P534.45 P588.22 **文献标识码** A

古盐度是指记录在古代沉积物中的古代水体的盐度,可作为分析地质历史时期沉积环境特征的一个重要标志,古盐度的复原是恢复古环境、认识环境变化过程与机理的一种重要方法<sup>[1~4]</sup>。石炭系是塔里木盆地主要油气勘探目的层之一<sup>[5,6]</sup>,卡拉沙依组的砂泥岩段和巴楚组角砾岩段中的砂岩是良好的储层,其沉积相的认识一直是研究者关注的焦点<sup>[7~9]</sup>,大致存在潮坪、滨海、三角洲、河流等几种观点,但都缺乏足够的沉积学证据,因此分析与这些砂岩伴生的泥岩沉积时的古盐度特征可为解决该问题提供水体性质方面的依据。同时,古盐度的变化与区域海平面相对变化有一定的响应关系<sup>[10]</sup>,古盐度的恢复可为海平面升降旋回的重建提供一个有效的指标<sup>[10~12]</sup>。塔中、巴楚、塔北的塔河地区是塔里木盆地石炭系油气勘探的有利区域<sup>[5,7]</sup>,本研究对其井下及巴楚小海子露头、阿克苏四石厂露头的石炭系泥岩沉积时的古盐度进行了计算分析,为石炭纪沉积环境的厘定及海平面变化分析提供了定量—半定量依据。

## 1 样品采集

塔里木盆地石炭系地层自下而上可分为巴楚组

(C<sub>1b</sub>)下泥岩段、生屑灰岩段、中泥岩段和标准灰岩段;卡拉沙依组(C<sub>1k</sub>)上泥岩段、砂泥岩段、含灰岩段;小海子组(C<sub>2x</sub>)顶灰岩段<sup>[13~15]</sup>。其中巴楚组的下泥岩段、生屑灰岩段在塔北大部分地区缺失或相变为角砾岩段<sup>[15]</sup>;巴楚组中泥岩段在塔北含有盐岩层;卡拉沙依组的含灰岩段及小海子组顶灰岩段也在塔北大部分地区缺失<sup>[13,15]</sup>。巴楚、塔中、塔北的塔河等盆地不同地区的石炭系沉积物类型、厚度、湿润性和干旱化程度、古生物发育等方面均存在一定差异,石炭纪盆地也经历了多次海平面升降,所以泥岩沉积时的古盐度变化可能受到沉积相平面展布和海平面纵向旋回两方面的影响。研究样品主要采自巴楚、塔中、塔河井下,巴楚小海子露头及阿克苏四石厂露头石炭系泥岩,共 38 个样品,采样剖面、平面位置见图 1、2。

## 2 古盐度计算

### 2.1 硼元素法

泥质沉积物的硼含量能够在一定程度上反映沉积水体的古盐度。其依据是硼在沉积过程中被黏土质点吸附,在适当的条件下有相当数量的吸附硼可被

<sup>1</sup> 中国石油化工股份有限公司海相前瞻性项目(编号:YH08114)资助。

收稿日期:2009-05-22 收修改稿日期:2009-08-24

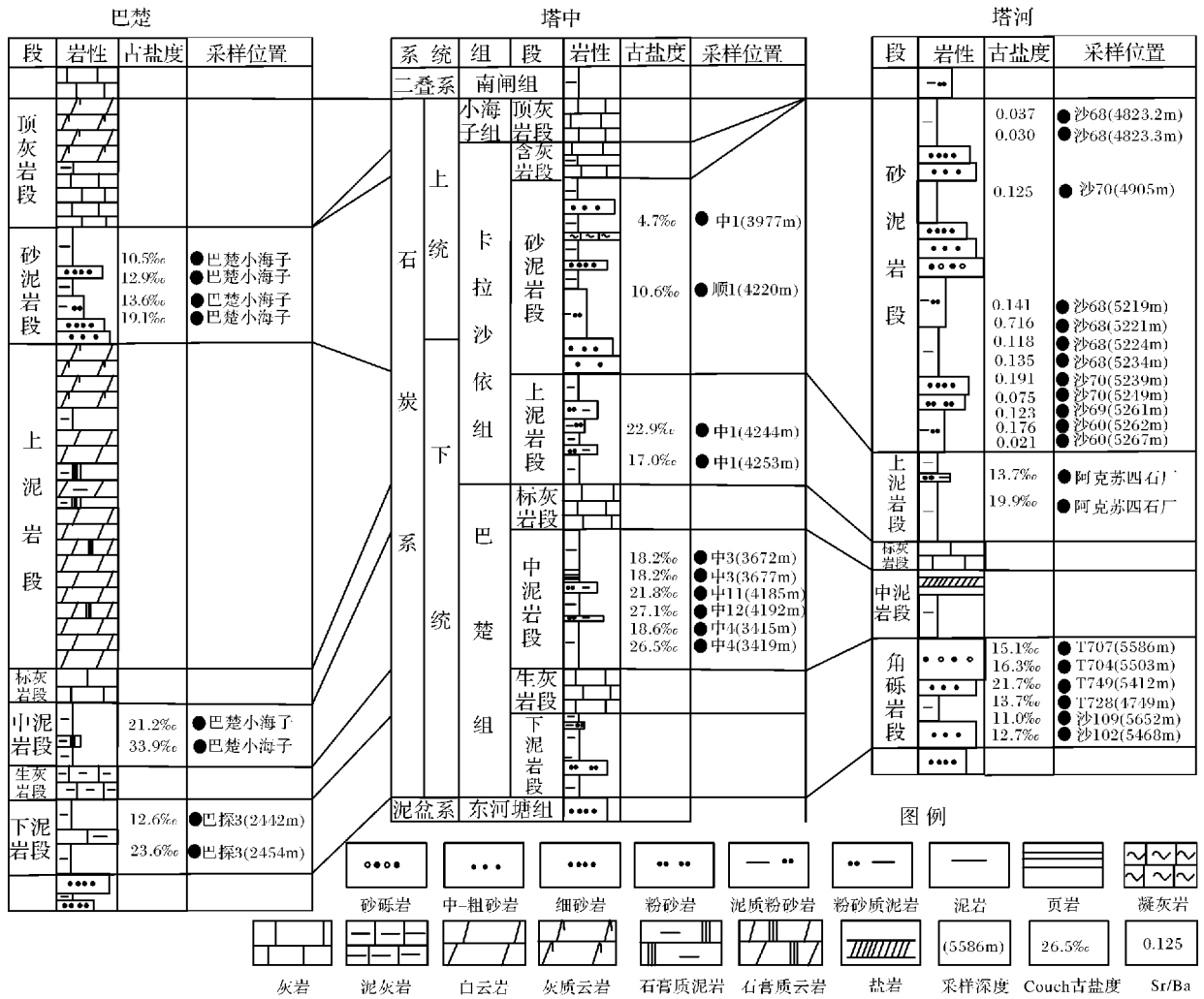


图 1 石炭系地层划分与采样剖面位置

Fig 1 Stratigraphic division of Carboniferous strata and sampling position in profile

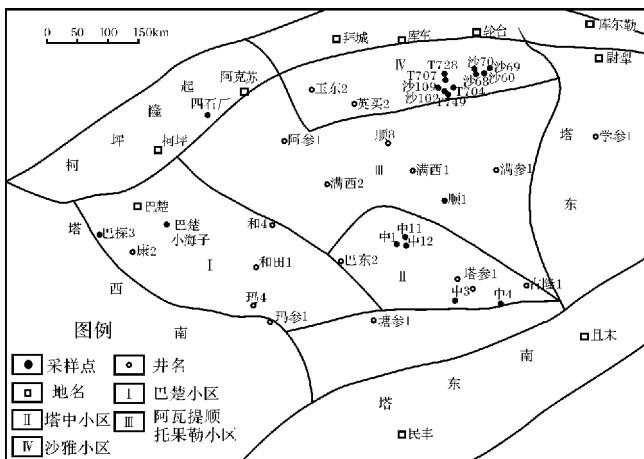


图 2 采样平面位置图

Fig 2 Map showing sampling sites

中硼的浓度有关<sup>[13, 16]</sup>; 而溶液中的硼浓度是水体盐度的线性函数。因而黏土矿物从水体中吸收的硼含量与水体的盐度呈双对数关系, 即所谓的佛伦德奇吸收方程<sup>[17]</sup>:  $bgB = C_1 bgS + C_2$  式中  $B$  为吸收硼含量 ( $10^{-6}$ );  $S$  为盐度 (%);  $C_1, C_2$  为常数, 此方程式是利用硼和黏土矿物定量计算古盐度的基础。

由于泥质沉积物中黏土矿物的含量及各组分的比例影响全岩硼含量, 在抽取黏土过程中, 部分吸附硼溶解进入水溶液而损失, 所以采用全岩硼换算黏土硼含量即能避免这种偏差<sup>[18]</sup>:

$$B = B_{\text{全岩}} H$$

式中  $B$ —黏土硼含量,  $10^{-6}$ ;  $B_{\text{全岩}}$ —全岩硼含量,  $10^{-6}$ ;  $H$ —全岩黏土含量, %。

用的古盐度计算公式有两个:

### 2.1.1 Adams 古盐度计算公式

固定。实验表明: 黏土矿物中提取出的硼数量与溶液

各种黏土矿物中,伊利石对硼的吸收作用最强,次为蒙脱石和高岭石。Walker提出针对伊利石含量为主的泥岩样品的硼含量校正公式,其公式如下<sup>[17 19]</sup>:

$$“B” = 8.5 \times B / K_2O$$

式中“B”指 Walker校正硼含量,8.5为岩石中没有其它含钾矿物时纯伊利石中的理论 K<sub>2</sub>O 浓度, K<sub>2</sub>O 为样品中的氧化钾含量, B 为黏土硼含量,公式的涵义是求取伊利石含量为 100% 时的硼含量。伊利石中硼含量与 K<sub>2</sub>O 含量有关,为了在同等条件下对比,需计算相当于 K<sub>2</sub>O 含量为 5% 时硼含量(称为 Walker 相当硼含量)。为此 Walker 等根据硼、钾含量作出一系列换算曲线(图 3),根据泥岩的 K<sub>2</sub>O 含量和 Walker 校正硼含量,即可在该曲线上可查得 Walker 相当硼含量。

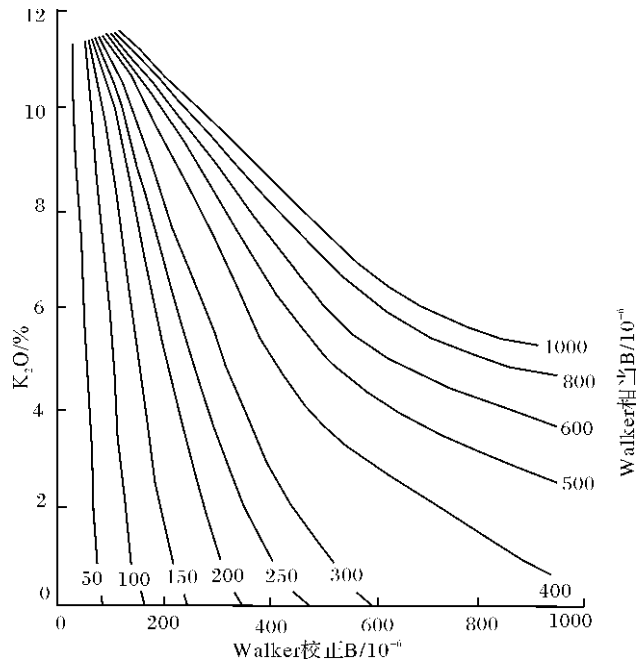


图 3 Walker 相当硼换算曲线

Fig 3 Conversion curve of Walker equivalent boron

在获得了适合古盐度计算的 Walker 相当硼含量后,利用 Adams 公式即可计算古盐度。该公式是 Adams 结合现代河口沉积的地球化学资料和佛伦德奇方程总结出的经验公式<sup>[20]</sup>:

$$S_p = 0.0977 B_{\text{相当}} - 7.043$$

式中 S<sub>p</sub> 为古盐度 ‰, B<sub>相当</sub> 为黏土岩中的 Walker 相当硼含量 10<sup>-6</sup>,公式适用于伊利石为主的样品。

### 2.1.2 Couch 古盐度计算公式

为了求取含复杂黏土矿物泥岩的古盐度, Couch

提出了不同的硼含量校正公式:

$$B^* = B / (4x_i + 2x_m + x_k)$$

式中 B\* 指 Couch 校正硼含量 10<sup>-6</sup>, B 为黏土硼含量, x<sub>i</sub>, x<sub>m</sub>, x<sub>k</sub> 分别为样品中实测伊利石、蒙脱石和高岭石的质量百分含量。其中伊利石、蒙脱石的含量分别为伊利石(蒙脱石)矿物含量与伊蒙混层中伊利石(蒙脱石)晶含量的总和。

Couch 古盐度方程为<sup>[4 21]</sup>:

$$\lg B^* = 1.28 \lg S_p + 0.11$$

由上式可得: S<sub>p</sub> = 10<sup>(lg B\* - 0.11) / 1.28</sup>

式中 S<sub>p</sub> 为古盐度 ‰, B\* 为 Couch 校正硼含量 10<sup>-6</sup>

对塔中、巴楚、塔河地区井下及巴楚小海子、阿克苏四石厂露头的石炭系巴楚组、卡拉沙依组 26 个泥岩样品运用以上两种方法分析的古盐度原始实验数据及计算结果见表 1。

### 2.2 Sr/ Ba 比值法

Sr/ Ba 比值可作为古盐度判别的标志<sup>[1, 4]</sup>。在自然界的水体中, Sr 和 Ba 以重硫酸盐的形式出现,当水体矿化度逐渐加大时, Ba 以 BaSO<sub>4</sub> 的形式首先沉淀,留在水体中的 Sr 相对 Ba 趋于富集。当水体的盐度加大到一定程度时 Sr 亦以 SrSO<sub>4</sub> 的形式以递增的方式沉淀,因而记录在沉积物中的 Sr 丰度和 Sr/Ba 比值与古盐度呈明显的正相关关系。对上述 26 个泥岩及塔河地区卡拉沙依组砂泥岩段的 12 个泥岩样品运用该方法进行了古盐度分析,原始实验数据及计算结果见表 1、2。

## 3 古盐度计算结果及其变化特征

对比 Couch 和 Adams 古盐度计算结果(表 1),可以看出大多数样品两者计算结果接近,且两者相关性高,相关系数为 0.81(图 4),因此两种计算结果在指示古盐度方面可靠性高。根据古盐度大于 35‰ 为超咸水, 25‰ ~ 35‰ 为咸水, 10‰ ~ 25‰ 为半咸水, 小于 10‰ 为微咸水—淡水<sup>[22 23]</sup>的标准,如图 5 所示,对于大多数样品两者反映的水体性质基本一致,有 5 个样品两者反映的水体性质虽不一致,但是其中一个与另一个所在的水体性质判别区间的临界值十分接近,另有 3 个样品两者计算结果差异较大。差异大的几个样品有个共同特点,即样品的黏土含量较低,这是因为全岩黏土含量低, Walker 相当硼中的计算因子 K<sub>2</sub>O 含量受岩石中其它含钾矿物影响大,从而影响了 Adams 公式计算的古盐度结果。而 Couch 公式计算的

古盐度排除了非黏土矿物的影响,且考虑了多种黏土矿物的存在及其吸附能力的差别,较为符合自然界的事实,适用的盐度范围较广<sup>[3]</sup>,所以应以 Couch 法计算结果为准。

对比该区的 Walker相当硼含量(表1),按照 Walker相当硼含量介于  $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$  之间为正常海咸水沉积,介于  $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$  之间为半咸水沉积,小于  $200 \times 10^{-6}$  为微咸水—淡水沉积<sup>[17-19]</sup> 的标准,其判别结果对于大多数样品与

Couch法一致,个别样品结果偏大。

研究资料表明,锶、钡、钙之间存在着一定的关系,并认为锶若不是以硫酸盐的状态存在,而是置换钙进入方解石或文石中,那么用 Sr/Ba比值推测古盐度的相对变化便失去意义<sup>[24-25]</sup>。可见样品中碳酸盐的存在,会影响 Sr/Ba比值,从而不能正确地反映古盐度。本区泥岩段、砂泥岩段中的泥岩样品可能会受到与之相邻的生屑灰岩段、标准灰岩段、含灰岩段或顶灰岩段的影响,大多数样品的 Sr/Ba比值自身规律

表1 塔里木盆地石炭系泥岩样品硼、钾、锶、钡和黏土矿物分析数据及沃克相当硼含量、古盐度、Sr/Ba比值计算数据

Table 1 The data of boron, kalium, strontium, barium and clay minerals analysis and "equivalent boron" concentration paleosalinity strontium-barium ratio calculation from Carboniferous mudstone samples Tarim basin

地区	层位	井名 露头	井深 /m	B <sub>全岩</sub> /10 <sup>-6</sup>	全岩粘土 含量/%	黏土矿物相对含量/%						Walker校 正 B/10 <sup>-6</sup> (%)	Walker相 当 B/10 <sup>-6</sup>	Adams 计算古盐 度/%	Couch 计算古 盐度/%	Sr /10 <sup>-6</sup>	Ba/10 <sup>-6</sup>	Sr/Ba		
						B/10 <sup>-6</sup>	K <sub>2</sub> O/%	S	It	Kao	I/S									
塔中	C <sub>1</sub> <sup>中</sup> 泥岩段	中3	3672	37	29	127	3.50	/	30	/	32	10	309	235	15.9	18.2	6160	1437	4.29	
		中3	3677	30	24	125	2.97	/	26	/	35	10	359	290	21.3	18.2	366	465	0.79	
		中11	4185	63	29	218	4.00	/	37	/	50	20	464	380	30.1	21.8	152	511	0.30	
		中12	4192	34	25	220	3.84	/	34	/	30	10	486	385	30.6	27.1	354	545	0.65	
		中4	3415	53	30	177	3.97	/	51	/	32	10	380	310	23.2	18.6	110	530	0.21	
		中4	3419	69	25	277	4.97	/	42	/	42	15	473	430	35.0	26.5	156	674	0.23	
		平均值												338	26.0	21.7				
	C <sub>1</sub> <sup>上</sup> 泥岩段	中1	4244	53	21	254	3.52	/	39	1	56	20	613	430	35.0	22.9	188	1095	0.17	
		中1	4253	49	27	182	4.64	/	60	/	38	20	334	290	21.3	17.0	176	541	0.33	
			平均值											360	28.1	19.9				
C <sub>1</sub> <sup>砂</sup> 泥岩段		中1	3977	5.3	39	14	1.18	60	1	21	/	/	98	90	1.8	4.70	140	318	0.44	
	顺1	4220	34	42	80	3.09	/	11	1	86	50	221	198	12.3	10.6	327	780	0.42		
	平均值												144	7.0	7.7					
巴楚	C <sub>1</sub> <sup>下</sup> 泥岩段	巴探3	2442	46	45	102	5.57	/	39	/	40	10	156	175	10.1	12.6	234	397	0.59	
		巴探3	2454	75	31	242	5.66	/	46	/	40	20	363	395	31.5	23.6	130	571	0.23	
		C <sub>1</sub> <sup>中</sup> 泥岩段	小海子	/	62	26	237	4.35	/	92	/	0	/	463	400	32.0	21.2	123	369	0.33
		小海子	/	107	25	428	5.00	/	72	/	20	5	728	728	64.1	33.9	127	595	0.21	
		平均值												425	34.4	22.8				
	C <sub>1</sub> <sup>砂</sup> 泥岩段	小海子	/	35	37	94	5.18	/	90	/	/	/	155	160	8.6	10.5	164	1157	0.14	
		小海子	/	37	30	124	4.87	/	91	/	/	/	217	215	14.0	12.9	52	940	0.06	
		小海子	/	33	27	120	4.13	/	83	/	/	/	248	230	15.4	13.6	69	836	0.08	
		小海子	/	48	26	184	4.39	/	82	/	/	/	357	315	23.7	19.1	77	560	0.14	
			平均值												230	15.4	14.0			
		平均值												222	14.6	14.8				
塔河	C <sub>1</sub> <sup>角</sup> 砾岩段	T707	5586	80	60	133	4.54	/	60	15	25	70	249	239	16.3	15.1	101	591	0.17	
		T704	5503	78	57	137	4.03	/	50	20	30	70	289	258	18.1	16.3	136	551	0.25	
		T749	5412	81	55	147	3.93	/	40	/	25	75	318	281	20.4	21.7	106	495	0.21	
		T728	5749	49	45	109	3.20	/	65	/	15	75	290	233	15.8	13.7	103	432	0.24	
		沙109	5652	60	65	92	3.87	/	70	15	15	75	202	177	10.3	11.0	123	521	0.24	
	沙102	5468	35	50	70	3.40	/	35	20	20	75	175	145	7.1	12.7	82.3	468	0.18		
		平均值												222	14.6	14.8				
阿克苏	C <sub>1</sub> <sup>上</sup> 泥岩段	四石厂	/	26	24	108	1.40	/	2	/	95	50	653	380	30.1	13.7	172	265	0.65	
		四石厂	/	35	21	167	1.54	91	6	/	3	/	923	430	35.0	19.9	220	283	0.78	
			平均值											405	32.5	16.8				

注: ①表中 B<sub>全岩</sub>, Sr, Ba原始数据由国土资源部西安矿产资源监督监测中心分析。B<sub>全岩</sub>由发射光谱法进行测定, Sr, Ba由等离子体光谱仪进行测定; ②K<sub>2</sub>O由西北大学大陆动力学国家重点实验室利用 X射线荧光光谱仪进行测定; ③黏土矿物由西安地质矿产研究实验测试中心利用 X射线衍射仪进行测定; 代号 S为蒙脱石, It为伊利石, Kao为高岭石, I/S为伊/蒙混层黏土, (%)为伊/蒙混层黏土中蒙脱石含量。

表 2 塔里木盆地塔河地区卡拉沙依组砂泥岩段泥岩样品锶、钡分析数据及 Sr/Ba 比值计算数据

Table 2 The data of strontium, barium analysis and strontium-barium ratio calculation from mudstone samples of sandstone and mudstone section of Kalashayi Formation in Tahe area, Tarim basin

层位	井号	井深 /m	Sr/10 <sup>-6</sup>	Ba/10 <sup>-6</sup>	Sr/Ba	层位	井号	井深 /m	Sr/10 <sup>-6</sup>	Ba/10 <sup>-6</sup>	Sr/Ba
C <sub>1</sub> k 砂泥岩段上部	沙 68	4823 2	67 3	1830	0.037	C <sub>1</sub> k 砂泥岩段下部	沙 68	5234	115	850	0.135
	沙 68	4823 3	64 1	2160	0.030		沙 70	5239	282	1480	0.191
	沙 70	4905	110	880	0.125		沙 70	5249	106	1420	0.075
	平均值				0.064		沙 69	5261	193	1570	0.123
C <sub>1</sub> k 砂泥岩段下部	沙 68	5219	123	870	0.141	沙 60	5262	155	880	0.176	
	沙 68	5221	179	250	0.716	沙 60	5267	140	6740	0.021	
	沙 68	5224	156	1320	0.118	平均值				0.188	
C <sub>1</sub> k 砂泥岩段 Sr/Ba 平均值					0.157						

注:表中 Sr, Ba 原始数据由新疆石油管理局勘探开发研究院实验中心分析,仪器为 OPTMA 等离子发射光谱仪

性差,且与利用 B, K<sub>2</sub>O 及黏土矿物含量判别的结果相差大(表 1)。但是对于塔河地区卡拉沙依组砂泥岩段,由于其上顶灰岩段、含灰岩段均缺失<sup>[13-15]</sup>,其下又为上泥岩段,因此受灰岩的影响小,且该段泥岩 Sr/Ba 比值规律性强,所反映的水体性质基本一致, Sr/Ba 比值在纵向上有向上变小的特点。该段 Sr/Ba 比值在 0.021~0.716 之间(表 2),平均为 0.157,按照 Sr/Ba 比值大于 1.0 为咸水,1.0~0.5 为半咸水,小于 0.5 为微咸水的标准<sup>[11]</sup>,属于微咸水沉积,有一个样品为半咸水沉积,且该段上部的 Sr/Ba 比值(平均为 0.064)小于下部的 Sr/Ba 比值(平均为 0.188),古盐度有向上变小的特点。

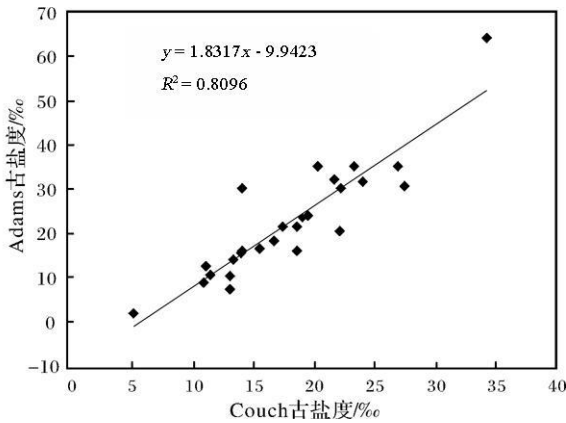


图 4 Adams 古盐度和 Couch 古盐度的关系

Fig 4 The relationship of Adams and Couch paleosalinity

根据以上分析,结合古盐度计算结果(表 1, 2),石炭系泥岩沉积时的古盐度有以下几个特点:(1)古盐度在 4.7‰~33.9‰,大部分泥岩样品为半咸水沉积,其次为淡水—微咸水沉积,个别为咸水沉积;(2)巴楚组、卡拉沙依组三套泥岩段古盐度比巴楚组角砾

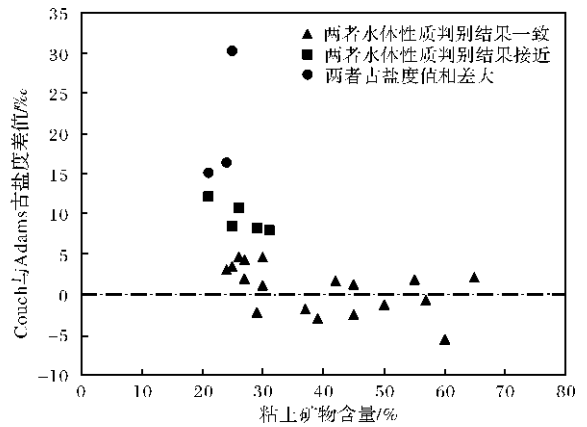


图 5 Adams 与 Couch 古盐度差值与黏土矿物含量的关系

Fig 5 The relationship of the difference between Adams and Couch paleosalinity and clay mineral content

岩段和卡拉沙依组砂泥岩段古盐度稍偏大;(3)巴楚组泥岩段泥岩总体具有从塔东北向塔西南古盐度变大的趋势,塔河地区(相变为角砾岩段)为半咸水沉积,塔中地区基本为半咸水—咸水沉积,塔西南巴楚地区为半咸水—咸水沉积,局部的古盐度已达咸水上限;(4)卡拉沙依组砂泥岩段泥岩在塔中地区古盐度最小,为淡水—微咸水沉积,巴楚地区最大,为半咸水沉积,塔河地区居中,为微咸水—半咸水沉积。

#### 4 关于古盐度与沉积环境关系的讨论

沉积物中泥岩沉积时的古盐度特征是沉积环境的判别标志之一<sup>[26]</sup>,因此本次分析结果可为判别塔里木盆地石炭系的沉积环境提供水体性质方面的依据。据前人研究,石炭系巴楚组、卡拉沙依组泥岩段多为障壁海岸沉积<sup>[18, 9, 27, 28]</sup>,在塔中地区,泥岩段古盐度分析结果属于半咸水—咸水,这与以海水为主受淡

水影响的障壁海岸沉积环境相一致;而在巴楚地区,泥岩段中夹有膏岩、白云岩,本次古盐度分析结果最高,属于半咸水—咸水,局部已达咸水上限,反映了巴楚地区气候较为干旱。对于作为储层较发育的卡拉沙依组砂泥岩段及巴楚组角砾岩段的沉积环境,前人争论较大,本文试图从古盐度的角度对它们的沉积环境进行分析。

自塔河地区卡拉沙依组砂泥岩段砂岩产出高产油气流以后,对其砂岩沉积相的认识一直存有分歧。由于缺少古生物化石,且河道砂岩与潮道砂岩的沉积特征有许多相似之处,所以对卡拉沙依组砂泥岩段是以潮坪还是以三角洲—河流沉积为主一直存有争议<sup>[29-32]</sup>。本文得出的该岩性段古盐度分析结果绝大部分显示其沉积水体为淡水—微咸水,个别为半咸水,就古盐度方面,塔河地区卡拉沙依组砂泥岩段为三角洲—河流沉积的可能性较大。在塔中地区,古盐度分析结果显示其沉积水体同样为淡水—微咸水,因此从古盐度结果方面也显示该段应以陆相沉积为主,而非潮坪沉积。另外在巴楚地区该段古盐度分析结果显示其沉积水体为半咸水,从古盐度结果方面显示该段应以海陆过渡相沉积为主。以前人对卡拉沙依组砂泥岩段沉积相的研究<sup>[8,9,28,29,33]</sup>为根据,并参考上述对该段沉积水体的古盐度分析以及结合测井、岩性、露头、地震等资料,可将该段地层沉积水体的古盐度平面分区大致划分为(图6):<sup>1</sup>淡水—微咸水古盐度区:主要分布于塔北、塔中及其以东的广大区域,以冲积扇—河流—三角洲陆相沉积为主<sup>[8,28,29,33]</sup>,沉积物多为含砾砂岩、砂岩和砂泥岩。其中位于塔东南的冲积扇相砂砾岩含量较多,表明有物源来自塔中东南古陆;塔中地区该段岩性具有曲流河的二元结构特点,河道砂岩与漫滩泥岩均较为发育,而且在该段三维地震的沿层切片上显示出了蛇曲河道形状的低振幅异常(图7);在塔北地区,多口井的岩心、测井曲线显示该段下部具有反粒序的河口坝特征,上部则具有正粒序的分流河道特征,该段泥岩的古盐度在纵向上也有向上变小的特点,总体反映了三角洲—河流沉积的特点。此区域中本次研究所有样品的古盐度基本为淡水—微咸水,且为陆相沉积,因此推测该区域应为淡水—微咸水古盐度区。<sup>④</sup>半咸水古盐度区:分布于巴楚地区,属于以沼泽化潮坪为主的障壁海岸沉积<sup>[8,28,33]</sup>,沉积物多为泥岩、砂岩夹炭质页岩。此区域中所有样品的古盐度均为半咸水,且属于以海相为主的海陆过渡相沉积环境,因此推测该区域应为半咸

水古盐度区。<sup>④</sup>咸水古盐度区:分布在塔西南地区,主要为开阔台地沉积<sup>[8,28]</sup>,沉积物为灰岩夹砂岩、泥岩,由于此区域是以海相沉积为主,因此推测该区域应为咸水古盐度区。

大量钻井岩心、测井、三维地震属性等分析表明,塔河地区巴楚组角砾岩段属于扇三角洲—浅水泻湖—障壁等沉积<sup>[31,34,35]</sup>。向南至哈得油田和塔中地区,角砾岩段相变为下泥岩段和生屑灰岩段两部分,下泥岩段中夹2~5m细砂岩储层,是哈得油田一个重要产层之一,但对其沉积相则有潮坪和低能滨海两种不同的认识。本次古盐度分析结果表明该段具半咸水环境特点,所以薄砂岩储层属于潮间带砂坪的可能性较大,半咸水应是潮间带间歇性海水与大气降水混合作用的结果。

## 5 关于古盐度与海平面变化、沉积演化关系的讨论

垂向上岩性的变化是发生沉积相变的直接反映,这些变化与海平面升降的旋回密不可分。识别垂向上的沉积相变及相序组合,并结合古盐度分析结果和海平面变化规律,则为恢复重建塔里木盆地石炭纪沉积演化历史提供了重要依据。前人研究认为,塔里木盆地石炭纪在总体以海平面相对上升为主的海侵过程中,受全球性海平面升降及构造作用等诸多因素影响,其相对海平面曾出现过短暂的停止和下降。石炭纪发生的多次海平面相对升降使得盆内碳酸盐岩与碎屑岩在垂向上互层,且灰岩沉积多发生在海平面的相对快速上升期,碎屑岩沉积多发生在海平面相对下降或缓慢上升时期<sup>[7,8,9,28]</sup>。

石炭系巴楚组—卡拉沙依组两个海平面旋回中,除本次分析所得的各泥岩段和砂泥岩段中泥岩所反映的半咸水—淡水古盐度,还应存在生屑灰岩段、标准灰岩段中灰岩所代表的正常海水(咸水)盐度以及盐岩和膏泥岩所反映的超咸水古盐度。第一个海平面升降旋回包括下泥岩段—生屑灰岩段—中泥岩段—(盐岩层),古盐度分析结果表明其沉积水体经历了半咸水—咸水—半咸水—(超咸水)的演化,结合上述关于其沉积环境的判别结果,该段沉积水体的古盐度变化与垂向上沉积相的相变演化一致,其表现为障壁海岸—碳酸盐岩台地<sup>[8,9,27]</sup>—障壁海岸沉积;第二个海平面升降旋回为中泥岩段—双峰灰岩段—上泥岩段—砂泥岩段,古盐度分析结果显示其沉积水体经历了半咸水—咸水—半咸水—微咸水—(淡水)

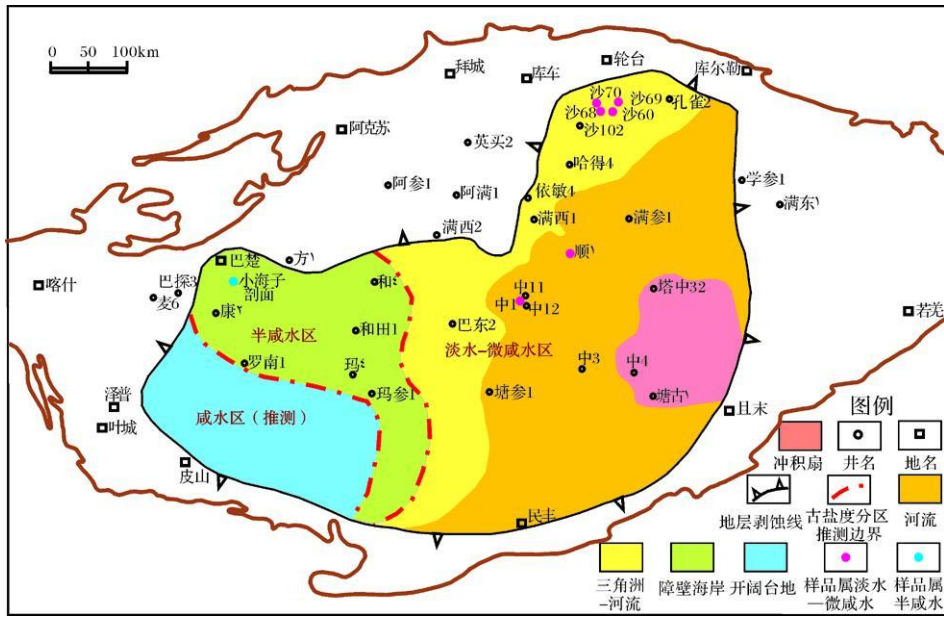


图 6 塔里木盆地卡拉沙依组砂泥岩段古盐度分区图

Fig. 6 The palaeosalinity zoning map of sandstone and mudstone section in Karashayi Formation, Tarim basin

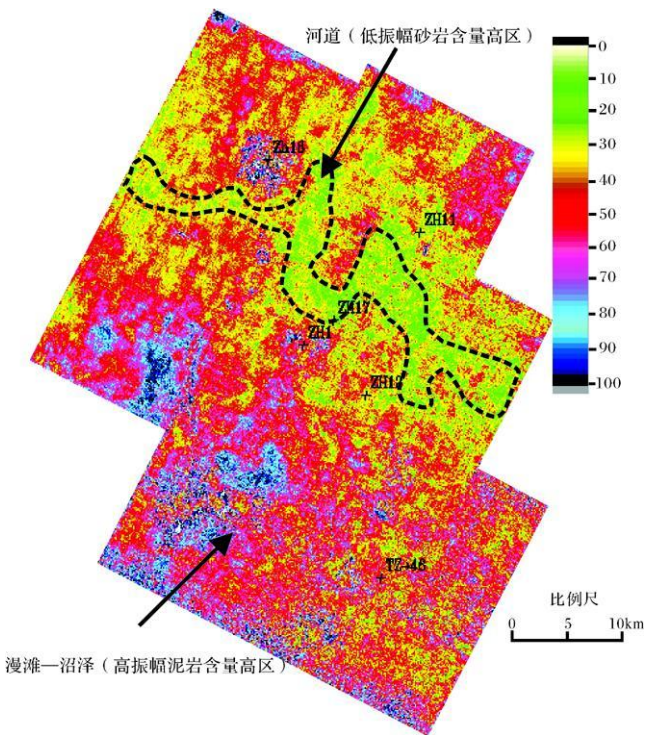


图 7 塔中三维区卡拉沙依组砂泥岩段均方根振幅图

Fig. 7 RM S Amplitude in age of sandstone and mudstone section of Karashayi Formation in three-dimensional zone of Tazhong area

岸—碳酸盐台地<sup>[8 9 27]</sup>—障壁海岸—三角洲(河流)沉积。应当注意的是, 沉积水体的盐度变化也受气候因素的影响, 因此两个旋回中古盐度演化模式的差异应当是古气候和古环境对古水体盐度共同影响的结果。

### 6 结论

对塔里木盆地巴楚、塔中、塔河地区石炭系泥岩进行了古盐度实验测试及分析计算, 结果表明, 古盐度在 4.7‰~ 33.9‰, 且变化明显, 大部分泥岩样品为半咸水沉积, 其次为淡水—微咸水沉积, 少数为咸水沉积。巴楚组、卡拉沙依组三套泥岩段古盐度比巴楚组角砾岩段和卡拉沙依组砂泥岩段古盐度稍偏大, 且平面上巴楚组泥岩段泥岩总体具有从塔东北向塔西南古盐度变大的趋势, 卡拉沙依组砂泥岩段泥岩在塔中古盐度最小, 塔西南最大, 塔北居中。塔里木盆地石炭系泥岩的古盐度与其所伴生的沉积环境有很好的对应关系, 并且古盐度的变化与海平面升降关系也很密切, 塔里木盆地石炭系由于存在多期海平面升降旋回, 使得碳酸盐岩与碎屑岩在垂向上互层, 该时期泥岩形成于石炭系海平面相对下降或上升缓慢、古盐度相对较低的沉积环境。

的演化, 该旋回垂向上的沉积相演化表现为障壁海

## 参考文献 (References)

- 1 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25 [Zheng Rongcai Liu Meiqing Study on paleosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25]
- 2 Harder H. Boron content of sediments as a tool in facies analysis [J]. Sedimentary Geology, 1970, 4(1): 153-175
- 3 赵俊青, 纪友亮, 张世奇. 陆相高分辨率层序界面识别的地球化学方法 [J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 79-86 [Zhao Junqing Ji Youliang Zhang Shiqi *et al.* Geochemical methods of boundary identification in terrigenous high-resolution sequence [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 79-86]
- 4 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析 [J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 114-120 [Wen Huanguo Zheng Rongcai Tang Fei *et al.* Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 Member in the Gengwan region Ordos Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 114-120]
- 5 俞仁连, 闫相宾, 金晓辉. 塔里木盆地研究进展与勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 598-604 [Yu Renlian, Yan Xiangbin, Jin Xiaohui Research achievements and exploration direction in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 21(1): 23-27]
- 6 王君奇, 武涛. 塔里木盆地石炭系沉积特征及石油地质意义 [J]. 石油实验地质, 1999, 21(1): 23-27 [Wang Junqi Wu Tao The Carboniferous depositional characteristics and petroleum geology in the Tarim basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1999, 21(1): 23-27]
- 7 贾承造, 高岩, 赵秀岐, 等. 塔里木盆地层序地层学及非圈闭构造 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-130 [Jia Chengzao Gao Yan, Zhao Xiuzhi *et al.* Sequence Stratigraphy and Non-Trap Structure in the Tarim Basin [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2003: 1-130]
- 8 熊继辉, 贾承造, 王毅, 等. 层序地层学及其在塔里木盆地石炭系研究中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 1-181 [Xiong Jihui, Jia Chengzao Wang Yi *et al.* Sequence Stratigraphy and Its Application in Carboniferous Research of Tarim Basin [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1996: 1-181]
- 9 朱如凯, 罗平, 罗忠. 塔里木盆地晚泥盆世及石炭纪岩相古地理 [J]. 古地理学报, 2002, 4(1): 13-24 [Zhu Rukai Luo Ping Luo Zhong Lithofacies paleogeography of the late Devonian and Carboniferous in Tarim Basin [J]. Journal of Paleogeography, 2002, 4(1): 13-24]
- 10 Heinrichs M L, Walker I R. Fossil muds and paleosalinity: potential as indicators of hydrological balance and sea-level change [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(15-16): 1948-1965
- 11 Roe H M. Late Middle Pleistocene sea-level change in the southern North Sea: the record from eastern Essex, UK [J]. Quaternary International, 1999, 55(1): 115-128
- 12 Amorosia, Lucchi M R, Rossi V, *et al.* Climate change signature of small-scale parasequences from Late glacial Holocene transgressive deposits of the A mo valley fill [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 273(1-2): 142-152
- 13 顾家裕, 朱筱敏, 贾进华, 等. 塔里木盆地沉积与储层 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-255 [Gu Jiayu Zhu Xiaomin, Jia Jinhua *et al.* Sedimentology and Reservoir of Tarim Basin [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2003: 1-255]
- 14 黄智斌, 杜品德, 张师本, 等. 塔里木盆地石炭系卡拉沙依组的厘定 [J]. 地层学杂志, 2005, 29(1): 55-70 [Huang Zhibin, Du Pinde, Zhang Shibei *et al.* Revision of the Carboniferous Kalashayi Formation of the Tarim Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29(1): 55-70]
- 15 周志毅, 赵治信, 胡兆珣, 等. 塔里木盆地各纪地层 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 103-170 [Zhou Zhiyi Zhao Zhixin Hu Zhaoxun, *et al.* Each Period Strata in Tarim Basin [M]. Beijing Science Press, 2001: 103-170]
- 16 张金亮, 张鑫. 塔里木盆地志留系古海洋沉积环境的元素地球化学特征 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(2): 200-208 [Zhang Jinliang Zhang Xin. The element geochemical features of ancient oceanic sedimentary environments in the Silurian Period in the Tarim Basin [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(2): 200-208]
- 17 Walker C T. Departure Curves for Computing Palaeosalinity from Boron in Illites and Shales [J]. AAPG Bulletin, 1963, 47: 833-841
- 18 李宝利. 硼元素古盐度计算方法的改进 [J]. 复式油气田, 1995, 6(1): 55-58 [Li Baoli Improvement of calculation method of Boron element paleosalinity [J]. Multiple Oil & Gas Field, 1995, 6(1): 55-58]
- 19 Walker C T. Evaluation of boron as a palaeosalinity indicator and its application to offshore prospects [J]. AAPG Bulletin, 1968, 52: 751-766
- 20 Adams T D, Haynes J R, Walker C T. Boron in Holocene illites of the dovey estuary, Wales and its relationship to palaeosalinity in cyclothem [J]. Sedimentology, 1965, 4: 189-195
- 21 Couch E L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data [J]. AAPG Bulletin, 1971, 55(10): 1829-1837
- 22 陶晓风, 吴德超. 普通地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 149-235 [Tao Xiaofeng Wu Dechao General Geology [M]. Beijing Science Press, 2007: 149-235]
- 23 吕炳全, 孙国志, 编. 海洋环境与地质 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 1-56 [Lu Bingquan Sun Guozhi Marine Environment and Geology [M]. Shanghai Tongji University Press, 1997: 1-56]
- 24 冯洪真, 俞剑华, 方一亭, 等. 五峰期上扬子海古盐度分析 [J]. 地层学杂志, 1993, 17(3): 179-185 [Feng Hongzhen, Yu Jianhua, Fang Yiting *et al.* Palaeosalinity analysis of upper Yangtze sea in Wufengian period [J]. Journal of Stratigraphy, 1993, 17(3): 179-185]
- 25 彭立才, 韩德馨, 濮人龙, 等. 陆相咸化湖泊沉积中锶/钡比值及其地质意义 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(1): 50-52 [Peng Licai Han Dexin Pu Renlong *et al.*  $\omega(\text{Sr})/\omega(\text{Ba})$  value of continental brackish lake deposit and its geological significance [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 28(1): 50-



- 52]
- 26 姜在兴. 沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003 442-458 [Jiang Zaixing Sedimentology [M]. Beijing Petroleum Industry Press 2003 442-458]
- 27 Chen Z Q, Shi G R. Late Paleozoic depositional history of the Tarim Basin, northwest China: An integration of biostratigraphic and lithostratigraphic constraints [J]. AAR Bulletin, 2003 87(8): 1323-1354
- 28 王毅, 纪友亮, 熊继辉, 等. 塔里木盆地上泥盆统与石炭系层序地层分析 [J]. 沉积学报, 1998, 16(2): 74-81 [Wang Yi, Ji Youliang, Xiong Jiuji et al. Sequence stratigraphic analysis of the Neodevonian-Carboniferous in the Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(2): 74-81]
- 29 何发岐, 翟晓先, 俞仁连, 等. 塔河油田石炭系卡拉沙依组沉积与成因分析 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 258-262 [He Faqi, Zhai Xiaoxian, Yu Renlian, et al. Deposition and genetic analysis of carboniferous Karashayi Formation in Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2004 25(3): 258-262]
- 30 蒲仁海, 翟晓先, 严华, 等. 塔河油田典型地震相 [J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3): 308-314 [Pu Renhai, Zhai Xiaoxian, Yan Hua, et al. Typical seismic facies in Tahe Oilfield [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(3): 308-314]
- 31 郭齐军, 赵省民, 塔河地区石炭系沉积特征 [J]. 石油与天然气地质, 2002 23(1): 99-102 [Guo Qijun, Zhao Shengmin. Depositional characteristics of Carboniferous in Tahe region [J]. Oil & Gas Geology, 2004 25(3): 258-262]
- 32 李永宏, 闫相宾, 张涛, 等. 塔河油田石炭系卡拉沙依组储层特征及其控制因素 [J]. 石油实验地质, 2004 26(1): 17-27 [Li Yonghong, Yan Xiangbin, Zhang Tao, et al. Reservoir characteristics and their controlling factors of the Carboniferous Karashayi Formation in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(1): 17-27]
- 33 郭建华, 刘生国, 肖传桃, 等. 塔中卡拉沙依组一小海子组层序地层与沉积相 [J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(3): 265-271 [Guo Jianhua, Liu Shengguo, Xiao Chuantao, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary facies of Karashayi-Xiaohaizi Formations Central Tarim [J]. Oil & Gas Geology, 1995 16(3): 265-271]
- 34 冯明友, 韩强, 蒲仁海. 用反射波强度斜率识别层序及沉积环境 [J]. 新疆石油地质, 2008 20(3): 380-381 [Feng Mingyou, Han Qiang, Pu Renhai. Application of reflection strength slope to identification of sequence and sedimentary environment [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008 20(3): 380-381]
- 35 范春花, 蒲仁海, 俞仁连, 等. 塔河油田巴楚组底部砂泥岩段储层特征及控制因素 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(6): 5-10 [Fan Chunhua, Pu Renhai, Yu Renlian, et al. Reservoir characteristics of the sand-mudstone in the bottom of Bachu Formation in Tahe Oilfield and their controlling factors [J]. Journal of Xi'an Shiyou University Natural Science Edition, 2007, 22(6): 5-10]

## The Palaeosalinity Analysis of Carboniferous Mudstone, Tarim Basin

XU Jing<sup>1</sup> PU Ren-hai<sup>1</sup> YANG Lin<sup>2</sup> LIAI-hong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

2. Research Institute of Northwest Petroleum Branch, SINOPEC, Urumqi 830011)

**Abstract** Though the analysis of clay minerals, major and trace elements of the Carboniferous mudstone samples collected from cores in Bachu, Tazhong and Tahe areas and field outcrops around Xiaohaizi in Bachu and Sishichang in Akesu, palaeosalinity character of water environment when this mudstone was deposited in these regions was revealed by quantitative semiquantitative analysis involving calculation using Adams and Couch palaeosalinity formula, equivalent boron determine method suggested by Walker and strontium-barium ratio method. The results indicate the range of palaeosalinity is 4‰~33.9‰, and display that the majority of mudstone samples show semi-saltwater sedimentary environment and freshwater-brackish environment is secondary while saltwater environment is less. In plane view, from northeast of the basin to southwest, the palaeosalinity concentration of mudstone in Mudstone Section, Bachu Formation increased in a general view. Mudstone in Sandstone and Mudstone Section, Karashayi Formation shows the minimal palaeosalinity concentration in the center and the maximal in the southwest part of the basin, and in the north part of the basin, the palaeosalinity concentration is moderate. Owing to palaeosalinity information extracted from mudstone is one of the indications to determine the sedimentary environment, it can provide important reference in aspect of water character for identifying controversial sedimentary environment of Sandstone and Mudstone Section in Karashayi Formation and Breccia Section in Bachu Formation. Palaeosalinity of water environment when Carboniferous mudstone was deposited has a good correlation with eustasy and sedimentary facies evolution in this period, and these mudstone was formed in sedimentary environment in which sea level is relatively in fall or slow rise and palaeosalinity is relatively low.

**Key words** palaeosalinity, mudstone, sedimentary environment, eustasy, Carboniferous, Tarim basin