

文章编号:1009-3850(2016)02-0030-08

青海德令哈盆地石炭纪古环境研究

孙娇鹏¹, 陈世悦¹, 彭渊², 刘文平³, 马帅¹, 邵鹏程¹, 刘金¹

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川 成都 610051)

摘要: 采自德令哈地区石炭系的12个碳酸盐岩样品测试、分析结果表明, 德令哈地区石炭纪整体为分层中等的弱还原海相环境, 水体受陆源碎屑注入影响明显。这种湿热、还原的高盐度水体利于生物的繁盛及有机质的保存, 使德令哈地区石炭系发育极为优越的烃源岩条件。垂向上, 克鲁克组偏高的咸化程度及分层程度, 表明克鲁克组沉积水体相对闭塞、咸化程度较高, 而怀头他拉组、扎布萨尕秀组灰岩形成于水体交换相对通畅的海域。从岩性组合、陆源碎屑注入变化及盐度、还原性的差异来看, 克鲁克组主体为局限台地环境, 而怀头他拉组、扎布萨尕秀组为开阔台地。作为对克鲁克组高盐度、还原性水介质环境的响应, 克鲁克组烃源岩 TOC 条件要比怀头他拉组及扎布萨尕秀组优越。

关键词: 德令哈盆地; 石炭纪; 碳酸盐岩; 地球化学; 古环境

中图分类号: P534.45

文献标识码: A

柴东北缘德令哈地区是柴达木盆地前中生界海相勘探最有希望取得突破的地区, 石炭系是该区海相油气勘探的热点所在。近些年的工作取得了较大进展, 落实了石炭系在整个地区的大面积分布, 发育高演化阶段的优质烃源岩以及厚度巨大的碳酸盐岩、碎屑岩储层, 地表发现大量油砂等油气显示^[1]。但沉积学工作开展较少, 仅部分学者在对柴达木盆地古生代构造-古地理的论述中顺带进行了介绍, 总体研究程度较低。

现今保存在沉积岩中的地球化学信息是物源区岩石地球化学性质、沉积介质物理-化学条件及成岩过程中地下流体性质的综合体现, 但不同地质过程对不同元素的影响程度不一, 部分具有特殊指示意义的元素在不同阶段的可迁移性及不可迁移性存在明显差异。因此, 选取不同元素或元素组合, 可以通

过同一岩石的地化参数对物源区、沉积水体及成岩流体环境等进行综合示踪^[2,4]。

本文主要围绕着石炭纪古水体的物理-化学性质开展研究。在对石炭系地层特征、岩石学特征、古生物特征及沉积特征简要介绍的基础上, 通过对相关特征地球化学参数的选取、分析及讨论, 对德令哈盆地石炭纪古环境中的盐度、氧化-还原状态及碎屑注入等特征因子进行综合判断。

1 区域地质概况

研究区位于青海省中部海西州首府德令哈市以西, 大地构造位置介于鱼卡-沙柳河加里东期造山带及宗务隆-土尔垦大坂晚古生代一早中生代裂陷槽之间, 地层分区属柴北缘地层小区。石炭纪研究区所在的欧龙布鲁克地块与柴达木地块已完成拼贴,

收稿日期: 2014-09-28; 改回日期: 2014-10-10

作者简介: 孙娇鹏(1988-), 男, 博士研究生, 沉积学专业。E-mail: sunjiaopeng@163.com

资助项目: 本文为国土资源地调项目(资[2014]03-025-002、12120113040000-3)资助成果

而北面宗务隆-土尔垦大坂一带则形成裂陷槽。在此背景下,受来自北面宗务隆裂陷槽海侵的影响,研

究区石炭纪发育一套碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积建造(图1,图2A、B)。

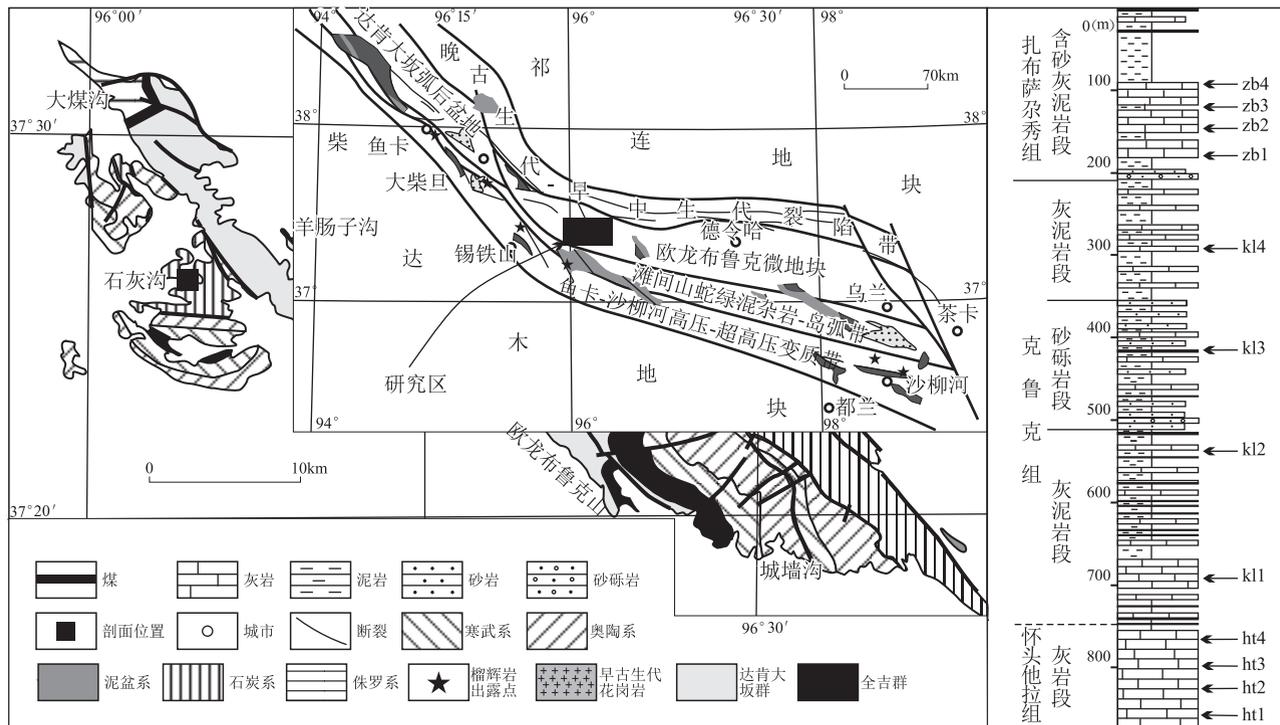


图1 研究区地质简图(据孙娇鹏等^[5],2014 修改)

Fig.1 Simplified geological map of the Delingha Basin in Qinghai

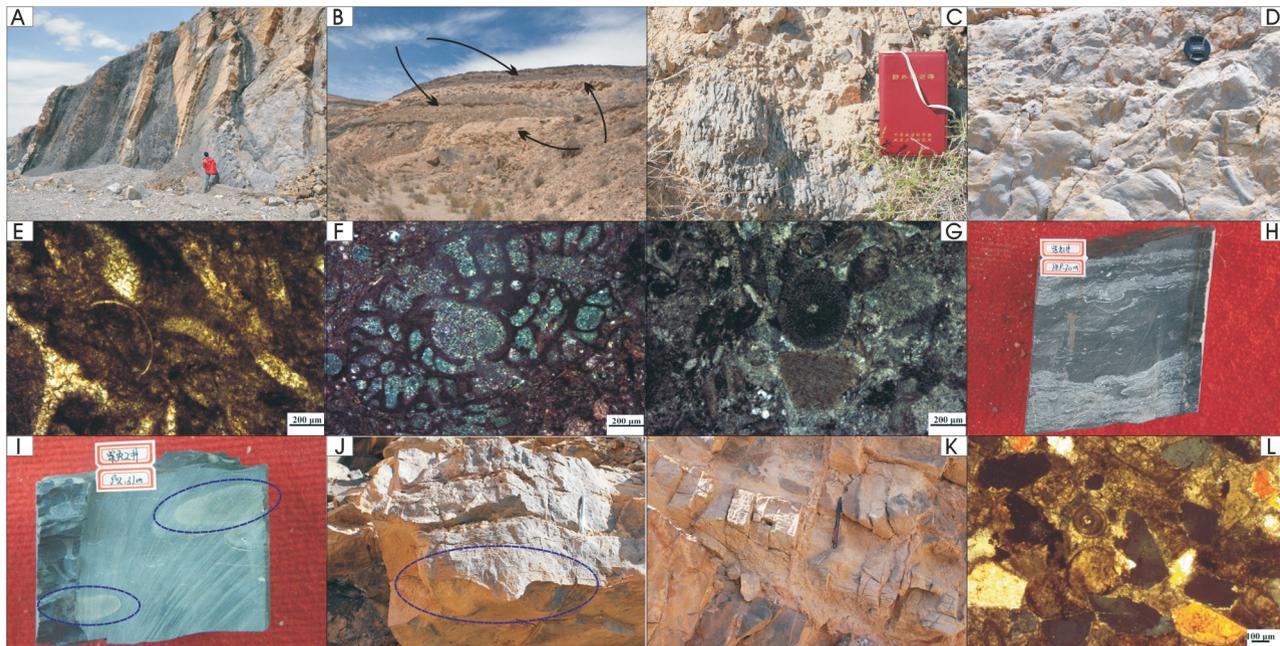


图2 德令哈地区石炭系典型照片

A. 克鲁克组灰岩与暗色泥岩互层;B. 克鲁克组砂砾岩、泥岩与灰岩互层;C. 怀头他拉组灰岩中的群体珊瑚;D. 城墙沟组灰岩中的大型单体珊瑚;E. 怀头他拉组灰岩中的介壳类(疑似,50×,+);F. 怀头他拉组灰岩中的瓣类(疑似,50×,+);G. 怀头他拉组灰岩中的屑屑颗粒(50×,+);H. 克鲁克组泥岩中的屑屑;I. 克鲁克组泥岩中的菱铁矿团块;J. 怀头他拉组灰岩中的风暴侵蚀面;K. 怀头他拉组灰岩中的砂岩透镜体;L. 怀头他拉组混积岩(100×,+)

Fig.2 Representative pictures for individual Carboniferous Formations in the Delingha Basin

区内石炭系与泥盆系为不整合接触,与上覆二叠系为连续沉积,主要发育下统的城墙沟组、怀头他拉组以及上统的克鲁克组与扎布萨尕秀组下部。城墙沟组及怀头他拉组均分为下部砂砾岩、泥岩互层段及上部厚层碳酸盐岩段,也有学者认为城墙沟组与扎布萨尕秀组属同一层。上石炭统克鲁克组及扎布萨尕秀组下部岩性组合较为接近,以黑色、碳质泥页岩与生屑灰岩互层并夹薄煤层为主要特点,克鲁克组中部及扎布萨尕秀组底部发育砂砾岩沉积(图1)。石炭系在石灰沟及城墙沟出露最好,城墙沟出露城墙沟组,其余层段均在石灰沟出露。青海油田等单位在这两个地区开展了大量古生物、地层等工作,是柴北缘石炭系标准剖面。

区内石炭系灰岩普遍发育,或厚层产出、或与泥岩互层。灰岩以生物碎屑灰岩为主,夹若干层群体珊瑚或单体珊瑚灰岩(图2C、D),生屑颗粒主要为有孔虫、双壳类、瓣类、海百合茎(图2E、F、G);泥岩绝大多数为黑色泥岩或碳质泥岩,泥岩中也普遍发育大量生屑且见大量黄铁矿团块(图2H、I)。该区石炭系另一个特点是风暴作用极为频繁,但风暴回流不发育,多为原地搅动型,体现为灰岩内大量发育涡流侵蚀面(图2J)。

2 样品采集与测试方法

Tribovillard 等^[6]认为大规模陆源碎屑物质注入会很大程度影响沉积物的地球化学特征,其元素不宜做环境分析。为了减少陆源碎屑注入对 REE、Th、U 等大离子亲石元素以及 Zr、Hf 等高场强元素等的影响,本次全部采集灰岩样品进行测试。测试样品全部采集于石灰沟,采样位置见图1(样品所在层段与图1描述一致,但垂向位置可能略有差异)。采样时,洗去表面钻井泥浆,在实验室内粉碎至 200 目,主、微量、稀土元素含量测试在广州澳实矿物实验室完成。主量元素分析将样品在 105℃ 预干燥 1-2 小时,然后准确称取 0.9g 样品,煅烧后加入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - LiBO_2 助熔物,充分混和后,放置在自动熔炼仪中,使之在 1000℃ 以上熔融。熔融物倒出后形成扁平玻璃片,再用 X 荧光光谱仪 (AXIOS) 分析。同时称取 3g 样品,1000℃ 下测定烧失量 (LOI)。微量元素分析称取 0.25g 样品用 HClO_4 、 HNO_3 、 HF 消解。蒸至近干后的样品用稀 HCl 溶解定容,再用美国 AgilentVISTA 型等离子体发射光谱与 Agilent7700x 型等离子体质谱进行综合分析。称取 0.1g 样品进

行稀土元素分析,将试样加入到硼酸锂熔剂中,混合均匀,在 1000℃ 以上的熔炉中熔化。熔液冷却后,用 4% 的硝酸定容至 100ml,再用美国 Agilent7700x 型等离子体质谱仪分析。从测试结果(表1)来看,碳酸盐岩样品中微量元素丰度整体比陆源碎屑岩低。分析过程中,考虑到碳酸盐岩的特殊性,未采用 V/Cr 等不适用于碳酸盐岩环境分析的指标^[7]。

3 水体古盐度

由于 MgO 具有亲海性, Al_2O_3 具有亲陆性,镁铝比值 $m(m = 100 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 可作为衡量沉积水体盐度的指标。 $m \leq 1$ 则为淡水环境,1~10 属海陆过渡环境,介于 10~500 为海相环境^[8]。测试样品 m 值介于 12.12~116.13 之间,平均为 35.04,表明该区属海相沉积。12 个样品 $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Fe})$ 均大于 0.94,高于 0.89 的海水底限值^[9],同样表明研究区为海相环境。K 元素含量受陆源碎屑注入量控制,Rb 易被粘土及有机质吸附,受水体盐度影响明显^[10]。因此,Rb/K 受水体盐度控制,海相咸水中 Rb/K 值 ≥ 0.006 ,微咸水 ≥ 0.004 ^[11]。研究区 Rb/K 最小值为 40,远大于 0.006,可见所采样品均是在盐度较高的海相咸水环境中形成的。

浅海环境 Sr 含量 $> 160 \mu\text{g/g}$ 、Ga 含量 $< 15 \mu\text{g/g}$ 、V 含量 $< 86 \mu\text{g}$ ^[12],研究区 Sr、Ga 及 V 值均明显处于海相沉积范围。碱土元素 Sr、Ba 化学性质较为接近,但 Sr 比 Ba 迁移能力强,当河水(淡水)与海水(咸水)混合时,淡水中的 Ba^{2+} 易与海水中的 SO_4^{2-} 结合,形成 BaSO_4 ,并在靠近海岸附近沉淀;而 SrSO_4 溶解度较大,故而沉淀在较深处。因而沉积物中的 Sr/Ba 比值可以反映沉积水体离岸距离(古水深)、陆源物质注入情况及古水体盐度。测试样品 Ba 质量分数较低(20~130 $\mu\text{g/g}$,平均 60 $\mu\text{g/g}$),Sr 含量较高(除 ht1 外,分布在 232~814 $\mu\text{g/g}$ 之间),Sr/Ba 均值为 14.26。王益友等^[13]认为,Sr/Ba 值 > 0.6 为微咸水相, > 1 为咸水相。测试样品富 Sr、贫 Ba 及极高 Sr/Ba 值表明研究区属盐度较高的海水环境沉积。

随着陆源碎屑影响程度增大,Ce 异常值 $\delta \text{Ce}(\delta \text{Ce} = \text{Ce}/\text{Ce}^* = 2 \times \text{Ce}_N/(\text{La}_N + \text{Pr}_N))$ 自大洋中脊(0.29)→大洋盆地(0.55)→大陆边缘(0.9~1.03)逐渐增大^[14]。研究区样品 δCe 分布区间为 0.43~1.02,平均为 0.75,样品这种较为明显的负异常特征反映了介于大洋盆地-大陆边缘之间的海洋环境。

表1 研究区石炭系样品微量元素统计表

Table 1 Trace element analyses of the samples from the Carboniferous strata in the Delingha Basin

项目	单位	下限	ht1	ht2	ht3	ht4	kl1	kl2	kl3	kl4	zb1	zb2	zb3	zb4
Al ₂ O ₃	%	0.01	1.99	1.16	1.3	0.92	1.2	1.19	1.32	1.6	0.31	0.75	0.9	0.46
MgO	%	0.01	0.27	0.37	0.13	0.58	0.21	0.16	0.16	0.57	0.36	0.32	0.15	0.22
Ca	%	0.01	1.02	15.3	5	26.1	11.4	8.94	7.78	18.65	17.75	17.45	6.87	13.2
Ti	%	0.005	<0.005	0.007	<0.005	0.005	0.014	0.013	0.016	0.032	0.005	0.005	<0.005	0.006
Fe	%	0.01	0.06	0.13	0.13	0.12	0.91	0.21	0.24	0.3	0.29	0.18	0.17	0.13
K	%	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.08	0.07	0.08	0.12	0.02	0.04	0.02	0.03
Rb	μg/g	0.1	0.8	1.6	1.3	0.8	4.6	3.6	4.2	6.5	1	1.7	1	1.2
Ba	μg/g	10	60	30	130	10	90	40	60	60	40	100	60	40
Ga	μg/g	0.05	0.82	1.06	0.63	1	0.91	0.89	1.06	1.89	0.43	0.46	0.47	0.64
Sr	μg/g	0.2	41.1	589	232	814	808	318	363	758	528	614	265	328
V	μg/g	1	1	5	2	6	4	4	4	8	1	2	1	3
Th	μg/g	1	<1	<1	<1	<1	1	1	1	1	<1	<1	<1	<1
U	μg/g	0.5	1.1	1.2	0.5	0.9	2.2	1.4	1.5	2	2.3	1.7	1.2	2.4
Ni	μg/g	0.2	3.1	4.3	2.5	5	4.4	3.2	3.6	5.9	2.9	0.9	1.1	6.9
Co	μg/g	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.9	0.6	0.6	0.8	0.3	0.3	0.6	0.5
Cu	μg/g	0.2	3.8	3.6	2.7	2.2	2.3	1.7	2.2	2.6	5.8	2.9	1.7	2.6
Zn	μg/g	2	7	6	9	11	10	7	8	26	15	7	15	12
Mg	μg/g	0.1	0.15	0.21	0.07	0.32	0.12	0.09	0.09	0.31	0.2	0.18	0.09	0.13
Nb	μg/g	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	1	0.1	0.1	0.2	0.1
Sc	μg/g	0.1	0.2	0.5	0.4	1.1	0.6	0.6	0.6	1.3	0.3	0.3	0.2	0.4
m 值			13.57	31.89	10	63.04	17.5	13.45	12.12	35.63	116.13	42.67	16.67	47.83
Ca/(Ca + Fe)			0.94	0.99	0.97	0.99	0.92	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.99
Rb/K			40	53.33	43.33	40	57.5	51.42	52.5	54.16	50	42.5	50	40
Sr/Ba			0.68	19.63	1.78	81.4	8.97	7.95	6.05	12.63	13.2	6.14	4.41	8.2
δ Ce			0.8	1.02	0.93	0.77	0.85	0.81	0.79	0.84	0.65	0.67	0.81	0.43
Ce _{anom}			-0.045	-0.008	-0.051	-0.107	-0.088	-0.105	-0.105	-0.101	-0.17	-0.227	×	-0.385
Th/U			<0.90	<0.83	<2	<1.11	0.45	0.71	0.66	0.5	<0.43	<0.58	<0.83	<0.41
&U			1.53	1.57	1.2	1.46	1.74	1.62	1.64	1.71	1.75	1.67	1.57	1.76
w(Ce)/w(La)			1.86	2.1	2	1.69	1.73	1.66	1.66	1.68	1.38	1.22	2.4	0.83
V/(V + Ni)			0.24	0.54	0.44	0.55	0.48	0.56	0.53	0.58	0.26	0.69	0.48	0.3
Ni/Co			15.5	14.33	6.25	10	4.89	5.33	6	7.38	9.67	3	1.83	13.8
Cu/Zn			0.54	0.6	0.3	0.2	0.23	0.24	0.28	0.1	0.39	0.41	0.11	0.22
Sr/Cu			10.82	163.61	85.93	370	351.3	187.06	165	291.54	91.03	211.72	155.88	126.15

4 古环境氧化-还原、水体分层状态

Ce 异常(δCe)与 Ce_{anom} 指数常被用来作为判断古水体介质氧化还原条件的标志。变价元素 Ce 包括 Ce^{3+} 及 Ce^{4+} 两种价态,氧化条件下 Ce^{3+} 被氧化为很难被溶解的 Ce^{4+} ,因此海水中亏损 Ce 而沉积物中富集 Ce;缺氧还原环境下,沉积物中的 Ce^{4+} 重新转化为 Ce^{3+} 释放到水体中,导致沉积物中 Ce 亏损^[15]。Elderfield^[16]将 Ce、La、Nd 之间相关的变化称为铈异常(Ce_{anom}), $Ce_{anom} = \lg [3Ce_N (2La_N + Nd_N)]$ (N 为北美页岩标准化值),并认为 Ce_{anom} 受

沉积环境氧分压控制, $Ce_{anom} > -0.1$ 则 Ce 富集,为缺氧还原环境; < -0.1 则 Ce 亏损,反映富氧氧化环境。12 个样品测试结果中,除怀头他拉组 3 个样品 Ce_{anom} 略大于 -0.1 外,其余样品均小于 -0.1 ,总体为弱氧化-弱还原环境。测试样品 $w(Ce)/w(La)$ 值除 zb1、zb2 及 zb4 之外均 > 1.5 且大多数 < 2 ,说明当时水体贫氧-厌氧^[17]。

氧化状态及还原状态的改变会导致 Th 和 U 化学性质的分异^[18],表生环境下, Th^{4+} 不易溶解。U 在强还原状态下为不溶于水的 U^{4+} ,而在氧化状态下以易溶的 U^{6+} 存在,导致沉积物中 U 的亏损。基

于 Th 和 U 地球化学性质的差异,常用 $\&U$ 值($\&U = U/[0.5 \times (Th/3 + U)]$)和 Th/U 比值法衡量沉积水体的 Eh 状态^[19-20]。若 $\&U > 1$, Th/U < 2 , 则表明水体缺氧。测试样品 $\&U$ 均值 > 1.60 , 最小值 > 1.20 , 全部 > 1 ; Th/U 均值 0.79, 最大 1.11, 均 < 2 , 表明德令哈地区石炭纪盆地整体缺氧。

铁族元素 V、Ni 在水体中的存在状态受氧化还原电位控制,相对于 Ni 来说,V 聚集在强烈还原的富硫化氢环境中^[17]。V/(V + Ni) > 0.84 反映水体分层,沉积物表面呈现富 H₂S 的厌氧环境;V/(V + Ni) 介于 0.6 ~ 0.82, 表现为水体分层不是很强的厌氧环境;当比值较低时(0.46 ~ 0.60) 则说明水体分层较弱存在一定氧气。12 个测试样品 V/(V + Ni) 值分布在 0.24 ~ 0.68 之间,除样品 ht1、zb1 及 zb4 偏低之外,全部大于 0.46, 说明该区水体整体为分层不强的弱还原环境。Jones 等^[21] 认为, Ni/Co > 7 即为还原环境, < 5 为氧化环境。3 个组的 Ni/Co 均值分别为 11.52、5.90、7.05, 除个别样品低于 5 之外,大多数样品分布在 5 ~ 7 之间,反映水体整体贫氧。梅水泉^[22] 认为,在沉积作用中,铜族元素 Zn、Cu 随介质氧逸度不同而产生分离,即 Cu/Zn 比值随介质氧逸度增加而增大, > 0.63 即为氧化环境。测试样品 Cu/Zn 比值在 0.1 ~ 0.6 之间,大多数介于 0.21 ~ 0.63 的弱还原范围内,表明水体总体缺氧。

5 古气候及水体蒸发

Sr/Cu 比值介于 1 ~ 10 之间指示温湿气候,而 > 10 指示干热气候;同样, Mg/Ca 比的高值指示干热气候,低值指示温湿气候^[23]。除 ht1 外,样品 Sr/Cu 均大于 199.93, Mg/Ca 值均大于 71, 指示干热气候条件。

本次样品 Fe/Mn 比值极低,分布在 0.000963 ~ 0.003095 之间,这种极低的 Fe/Mn 值是干热气候的响应^[24]。Rb/K 和 Sr/Ba 比值是水体盐度的体现。宋明水^[24] 强调,由于 Rb、K 及 Sr、Ba 溶解度的差异而导致沉淀顺序有别, Rb 相对于 K、Sr 相对于 Ba, 均具有高的溶解度,高蒸发、高浓缩、高盐度的水体才会出现极高的 Rb/K 和 Sr/Ba 比值。区内 Rb/K 比值(平均 48.9)、Sr/Ba 比值(平均 15.49) 极高,客观反映了当时较为干热、强蒸发的古环境。

6 陆源物质注入

V、Nb、Sc、Th 及 Ti 等赋存于重矿物的元素在岩石风化、搬运及沉积、成岩过程中具有极强的稳定

性,在水中存留时间极短,在自生物质中具有极低的富集程度。所以在海底沉积物中,这些几乎全部来源于陆源碎屑的元素客观地反映了陆源碎屑的供给情况。平面上,这些元素均具有近岸沉积特征,向盆地中心含量迅速下降;垂向上,这些元素的含量变化反映了陆源碎屑物质注入速率及沉积滨线迁移轨迹的变化。以 Ti、V 为例, Ti 是一种较稳定的元素,一般不形成可溶性化合物,所以海水中 Ti 的含量很低^[11], 沉积物中 Ti 主要来源于盆外^[25]; V 在泥岩、黏土岩中质量分数最高,平均达 130 $\mu\text{g/g}$, 这是由于黏土矿物对 V 的吸附作用所致,而碳酸盐岩中 V 的平均含量要低得多(2.2 $\mu\text{g/g}$)^[25]。从表 1 可以看出,石炭纪时期研究区碎屑物质供给较强,以 V 为例,克鲁克组灰岩的 V 含量约为正常碳酸盐岩的两倍以上,明显高于其余样品。表 1 中列述的 Sc、Th 及 Ti 等元素也具一致的变化规律,说明克鲁克组碳酸盐岩沉积期受到较强陆源碎屑注入的影响。

7 讨论与结论

在应用某类元素讨论特定问题的时候往往会近似认为在其它地质过程中该类元素含量或比值变化不明显,但事实上,保存在沉积岩中的各种元素含量、比值的变化规律极为复杂。一方面受元素本身的地球化学行为影响,另一方面又与沉积物化学组成复杂的多因素(比如成岩流体等)控制有关。任何判别标准都存在一定局限性与不确定性,因此得出的判别结果不尽相同。所以,仅仅通过单一元素或某几个元素的变化规律,很难全面、客观、准确地对问题进行合理的解释。

研究区石炭系以灰岩沉积为主,灰岩中有孔虫、双壳类、瓣类及海百合茎等海相化石普遍出现。主要元素的 m 值、Ca/(Ca + Fe) 值及 Rb/K 值,微量元素 Sr 含量、Ga 含量、V 含量及 Sr/Ba 比值,以及稀土元素 Ce 异常值(δCe),综合表明石炭纪德令哈地区是具有较高盐度的海相盆地。Ce_{anom}、w(Ce)/w(La)、 $\&U$ 、Th/U、V/(V + Ni) 及 Cu/Zn 值,一致指示德令哈地区石炭纪整体缺氧,表现为水体分层不是很强的厌氧环境,在岩性上的体现为泥岩中大量发育菱铁矿团块(图 21)。Sr/Cu、Mg/Ca、Fe/Mn、Rb/K 及 Sr/Ba 比值客观反映了研究区石炭纪较为干热、强蒸发的古环境。V、Nb、Sc、Th 及 Ti 等元素则表明,研究区石炭系存在较强的陆源碎屑注入,V 含量是正常碳酸盐岩含量的两倍即是这种较强碎屑物质注入的体现。

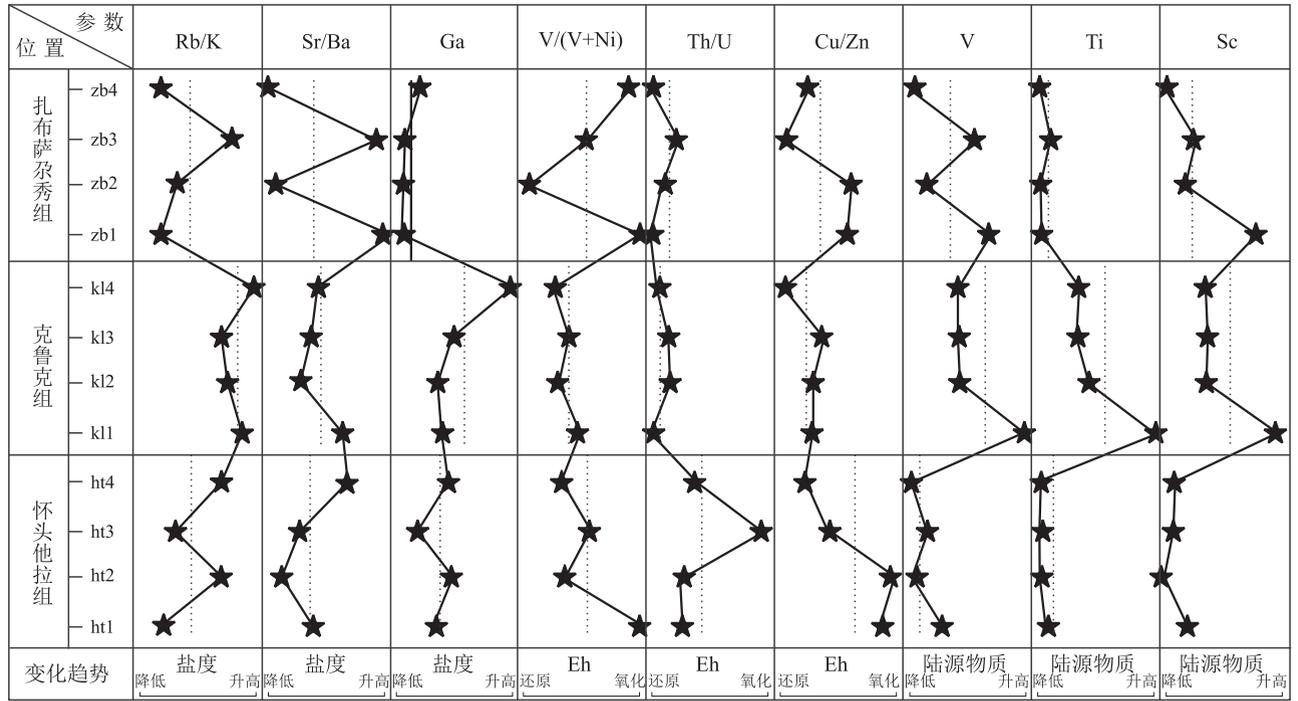


图3 研究区典型地化参数垂向变化图

Fig. 3 Vertical variations of representative geochemical parameters for the Delingha Basin

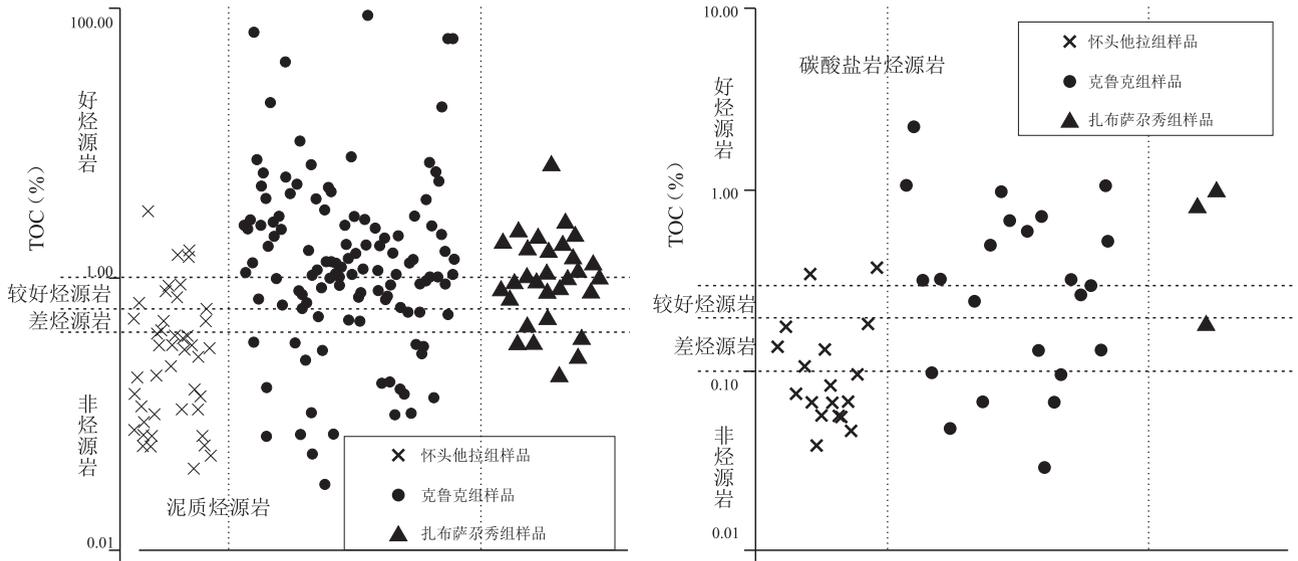


图4 德令哈地区烃源岩有机碳含量统计图

Fig. 4 Statistics of the organic carbon contents in the source rocks from the Delingha Basin

岩相组合上,克鲁克组呈现暗色泥岩与灰岩互层的岩性组合特点(图2A、B),而怀头他拉组与扎布萨尕秀组主要发育厚层碳酸盐岩沉积(图2C、D、E、F、G、J)。克鲁克组颗粒灰岩(主要是生屑灰岩与礁灰岩)含量、厚度明显小于另外两个组。Rb/K值及Sr/Ba值及K/Na值等表明克鲁克组具有相对较高的古盐度。同时,克鲁克组样品的V、Nb、Sc、Th及Ti含量要明显高于怀头他拉组与扎布萨尕秀组,

大约是其它两个组含量的两倍,说明克鲁克组沉积期具有较多的陆源碎屑物质的注入(图3)。德令哈海盆石炭纪的咸化与与陆源碎屑注入有关,陆源碎屑中的Mg、Na等碱金属元素为水体咸化提供了充足的阳离子。克鲁克组偏高的咸化程度及分层程度,意味着克鲁克组沉积水体相对闭塞、咸化程度较高,而怀头他拉组、扎布萨尕秀组灰岩形成于水体交换相对通畅的海域。从岩性组合、陆源碎屑注入变

化及盐度、还原性的差异来看,克鲁克组主体为局限台地环境,而怀头他拉组、扎布萨尕秀组为开阔台地。导致水体分层中等的可能原因主要有两个方面:一是频繁的风暴作用,研究区全部灰岩均存在明显的风暴涡流侵蚀痕迹(图2J),风暴搅动导致水体与空气频繁交换,造成氧气含量的提升;二是陆源碎屑注入导致的水体分层破坏。研究区碳酸盐岩整体不是很纯,常夹砂岩透镜体(图2K)或形成混积岩(图2L),这说明粗陆源碎屑高频进入盆地,携带碎屑物质的淡水会破坏海水的分层,导致环境中 Eh 值趋向氧化。

石炭纪时期,研究区湿热的高盐度海相环境利于植物及海洋生物的繁盛,总体闭塞、还原的水体条件利于沉积物中有机质的保存。在此背景下,德令哈地区石炭系各个层段均发育有烃源岩,不论碳酸盐岩还是泥质烃源岩样品总体具有相对较高的 TOC 含量(图4)。从3个组的对比来看,克鲁克组的泥质烃源岩及碳酸盐岩烃源岩较怀头他拉组及扎布萨尕秀组都好得多,体现为高 TOC 样品绝大多数出现在克鲁克组(图4),这与克鲁克组具有的高盐度、还原性的水介质环境相吻合。

参考文献:

- [1] 马寅生,尹成明,刘成林,等.柴达木盆地石炭系油气资源调查评价进展[J].地球学报,2012,33(2):135-144.
- [2] 姚旭,周瑶琪,李素.豫西地区早二叠世碳酸盐岩台地沉积环境及地球化学特征[J].现代地质,2013,27(6):1340-1347.
- [3] 陈蓉,王峰,田景春.鄂尔多斯盆地中西部延长组碎屑岩物源分析及储层特征[J].沉积与特提斯地质,2009,29(1):21-26.
- [4] 杨伟,伊海生,杜秋定,等.滇东南中三叠统法郎组含锰岩系稀土元素和铀、钍元素的特征及意义[J].沉积与特提斯地质,2011,31(4):104-110.
- [5] 孙娇鹏,陈世悦,彭渊,等.全吉地区新元古代滨岸冰川沉积特征及地质意义[J].地质学报,2014,88(7):1134-1140.
- [6] TRIBOVILLARD N, DESPRAIRES A, LAILIERVERGSE, et al. Geochemical study of organic-rich cycles from the Kimmeridge Clay Formation of Yorkshire (G. B.): Productivity versus anoxia [J]. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 1994, 108(1/2): 165-181.
- [7] 林治家,陈多福,刘芊.海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J].矿物岩石地球化学通报,2008,27(1):72-80.
- [8] 张十三.沉积岩层中镁铝含量比的研究及其应用[J].矿物岩石地球化学通报,1988,7(2):12-13.
- [9] 闵隆瑞,迟阵卿,朱关详,等.河北阳原东目连第四纪叠层石古环境分析[J].地质学报,2002,76(4):446-453.
- [10] CAMPBELL F A, WILLIAMS G D. Chemical composition of shales of Mannville Group (Lower Cretaceous) of Central Alberta [J]. Canada Bull. Am. Assoc. Petr. Geol., 1965, 49(1):81-87.
- [11] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学技术出版社,1984.1-109.
- [12] CHEN Z Y, CHEN Z L, ZHANG W G. Quaternary stratigraphy and trace element indicators of the Yangtze delta, eastern China, with special reference to marine transgressions [J]. Quaternary Research, 1997, 47(2):181-191.
- [13] 王益友,郭文莹,张国栋.几种地化标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J].同济大学学报,1979,(2):51-60.
- [14] MURRY R W. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. Geology, 1990, 18(3):268-271.
- [15] DEBAAR H J W, BACON M P, BREWER P G. Rare earth elements in the Pacific and Atlantic oceans [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1985, 49(9):1943-1959.
- [16] ELDERFIELD H, GREAVES M J. The rare earth elements in seawater [J]. Nature, 1982, 296(5854):214-219.
- [17] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environmental and geochemistry of the upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1-3):65-82.
- [18] ROGERS J W, ADAMS J S. Handbook of Thorium and Uranium Geochemistry [M]. Beijing: Atomic Press (Chinese version), 1976.1-200.
- [19] WIGNALL P B, TWITCHETT R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. Science, 1996, 272(5265):1155-1158.
- [20] KIMURA H, WATANABE Y. Ocean anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary [J]. Geology, 2001, 29(11):995-998.
- [21] JONES B, MANNING D C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. Chemical Geology, 1994, 111(111):111-129.
- [22] 梅水泉.岩石化学在湖南前震旦系沉积环境及铀来源研究中的应用[J].国土资源导刊,1988,3:25-31+49.
- [23] 刘刚,周东升.微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J].石油实验地质,2007,29(3):307-310+314.
- [24] 宋明水.东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J].矿物岩石,2005,25(1):67-73.
- [25] 邓宏文,钱凯.沉积地球化学与环境分析[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1993.1-240.

Palaeoenvironments of the Delingha Basin in Qinghai during the Carboniferous

SUN Jiao-peng¹, CHEN Shi-yue¹, PENG Yuan², LIU Wen-ping³, MA Shuai¹, SHAO Peng-cheng¹, LIU Jin¹

(1. *School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China*; 2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 3. *Southwest Oil and Gas Field Company, CNPC, Chengdu 610051, Sichuan, China*)

Abstract: The analyses of 12 pieces of carbonate rock samples from the Carboniferous strata in the Delingha Basin, Qinghai have reflected that during the Carboniferous, the Delingha area was once in the marine saline water environments with saline and dysaerobic sea water, humid and highly evaporated conditions, and plenty of terrigenous supply. This type of humid and reducing environments may be favourable for the propagation of organisms and preservation of organic matter, and thus may be the ideal sites for the development of the Carboniferous source rocks. Vertically, higher salinity and stratification of sea water in the Keluke Formation suggest the relatively enclosed and salinized sea water in the restricted carbonate platform environment, while in the Huaitoutala and Zhabusagaxiu Formations, the sea water was well connected in the open carbonate platform environment. It can be seen that the total organic contents in the Keluke Formation are higher than those in the Huaitoutala and Zhabusagaxiu Formations in the Delingha Basin.

Key words: Delingha Basin; Carboniferous; carbonate rock; geochemistry; palaeoenvironment