

热液活动对东二沟剖面玉尔吐斯组烃源岩形成的影响

储呈林¹ 陈强路¹ 张博² 史政¹ 姜海健¹ 杨鑫¹

(1.中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所 江苏无锡 214126;

2. Tyumen State Oil and Gas University Tyumen 625003)

摘要 研究热液活动是否会破坏烃源岩的形成。对塔里木盆地东二沟剖面玉尔吐斯组进行地球化学分析,利用 δEu 、 Fe/Ti 和 $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti}$ 比值研究热液活动, Al/Ti 比值替代古生产力, V/Cr 、 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 和 Ni/Co 比值代表氧化还原环境,进而探讨热液活动与古生产力、氧化还原条件以及有机质含量之间的关系。玉尔吐斯组沉积时古生产力水平较低,为贫氧—厌氧环境,下部具有较强的热液活动,中上部热液活动较弱。下部的热液活动虽然促进了古生产力的提高,但TOC含量整体较低,为0.01%~3.58%,平均值为0.64%;中上部热液活动较弱,古生产力水平较低,TOC含量却较高,为0.06%~12.19%,平均值为8.95%,是较好的烃源岩层。岩石薄片显示,与热液活动相关的硅质岩中含有大量的藻类。研究表明,较强的热液活动会带来大量的富硅流体,稀释沉积物中的有机质,对烃源岩的形成起破坏作用。

关键词 热液活动 烃源岩 玉尔吐斯组 塔里木盆地

第一作者简介 储呈林 男 1982年出生 博士 沉积盆地分析 E-mail:cclin7101@126.com

中图分类号 TE121.32 **文献标识码** A

0 引言

海底热液活动于1977年首次在加拉帕戈斯群岛被发现,其主要出现在大洋中脊、弧后盆地和岛弧三种构造环境中^[1-2]。海底热液富含各种金属元素,如Fe、Zn、Cu、Cd、Mn等,越来越多的金属矿床被发现与热液活动相关^[3-5]。海底热液活动除带来大量金属元素外,同样能促进热液活动区生物群落的发育。现代海底热液研究表明,热液活动区生物繁盛,生物产量与热液活动强度呈正比,热液活动能促进沉积物中有机质的富集^[6]。Han *et al.*^[7]研究中国南方下寒武统牛蹄塘组发现,受热液活动影响的黑色页岩,金属元素富集,有机碳含量为2.55%~11.5%,平均值为7.73%,而未受热液活动影响的黑色页岩有机碳为1.80%~4.26%,平均值位3.67%。

目前热液活动与烃源岩关系的研究主要集中在热液活动有利于促进生物群落的发育和还原环境的形成两大方面^[8-11],而热液活动强度差异性及其产物对烃源岩形成的影响研究的较少。前人研究认为塔里木盆地下寒武统玉尔吐斯组为良好的烃源岩层,且形成过程中受到海底热液的影响^[12-13]。本文利用地

球化学指标对塔里木盆地东二沟剖面玉尔吐斯组的沉积环境进行了恢复和判别,分析有机碳和沉积环境的关系,探讨不同强度热液活动及其产物对烃源岩发育的影响。

1 区域地质背景

震旦纪早期,塔里木陆块已经固结为增生的大陆地壳,形成具有前震旦系基底的盆地;震旦纪末,塔里木陆块一度整体抬升,震旦纪地层遭受风化剥蚀^[14]。此后,早寒武世的冰川消融和缺氧事件,导致海平面快速上升,形成最大海泛并转为陆表海,沉积了早古生代第一套海相烃源岩^[15],在柯坪、阿克苏地区为玉尔吐斯组。

塔里木盆地东二沟剖面位于阿克苏市西南约50 km的青松石料厂北侧,地理位置为40°54′19.59″N, 79°51′10.05″E,地层发育良好(图1)。该剖面出露的玉尔吐斯组与下伏震旦系奇格布拉克组平行不整合接触,与上覆下寒武统肖尔布拉克组整合接触,底部为含磷硅质岩夹薄层黑色泥岩,向上硅质岩层逐渐增多;中部以黑色泥岩和页岩为主,夹有少量硅质岩;上部由瘤状白云岩夹泥岩逐渐过渡为肖尔布拉克组

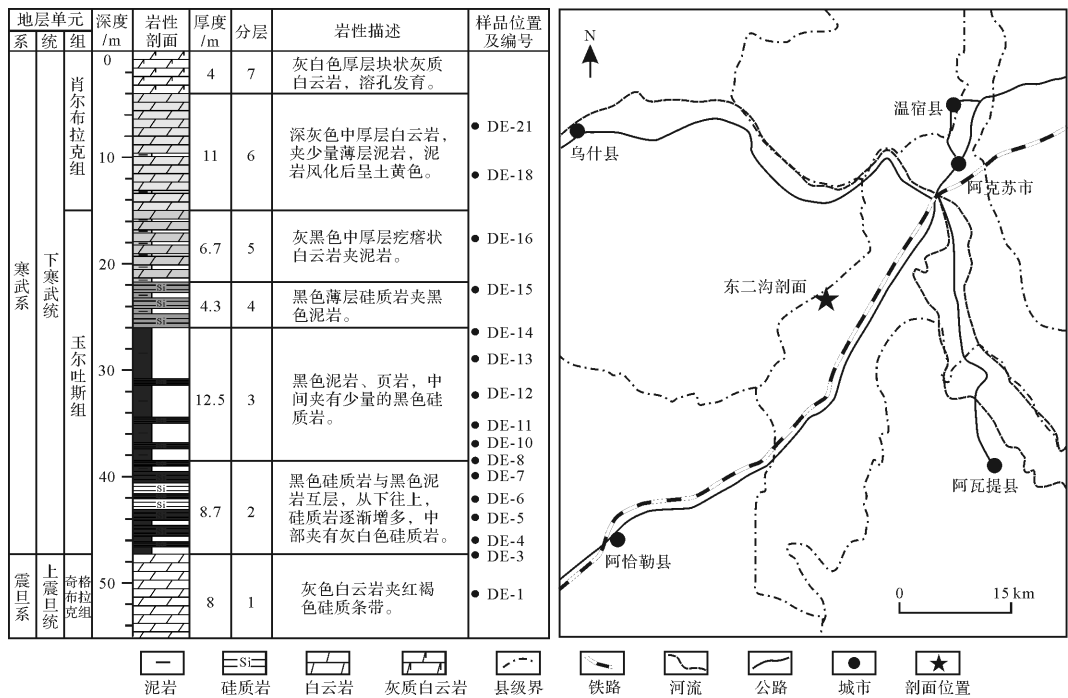


图1 塔里木盆地东二沟剖面岩性柱状图及位置

Fig.1 Map of lithology and location of Dongergou section in Tarim Basin

深灰色厚层块状白云岩。

2 样品和测试

样品采自于塔里木盆地东二沟剖面,共16件,其中震旦系奇格布拉克组样品1件、寒武系玉尔吐斯组样品13件、肖尔布拉克组样品2件。残余总有机碳测试在中石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验中心完成(表1),仪器为美国LecoCS-200碳硫测定仪,灵敏度为3~5位有效数字,准确度: $C > 0.1\% \pm 0.001$ 或 $0.1\% \pm 0.005$; $C < 0.1\% \pm 0.0002$ 或 $0.1\% \pm 0.005$ 。元素化学分析由中国石油勘探开发研究院廊坊分院完成(表1),主要元素数据用X射线荧光光谱法(XRF)分析,分析误差小于3%;微量和稀土元素数据用等离子体质谱法(ICP-MS)分析,分析误差小于6%。

3 烃源岩的形成环境

3.1 海底热液活动的证据

大洋中脊热液流体的稀土元素特征已经被广泛研究^[16-18]。由于稀土元素在化学性质上的相似性和系统差异,稀土元素常常用来作为海底热液活动的示踪剂^[19-21]。

东二沟剖面玉尔吐斯组沉积物稀土元素组成见

表1,稀土元素组成分析显示其总稀土(ΣREE)含量较低,为 $(3.9 \sim 117.09) \times 10^{-6}$,平均含量为 47.15×10^{-6} 。用北美页岩的稀土元素值标准化后^[22],具有明显的正Eu异常($\delta\text{Eu} = 0.94 \sim 2.11$)和负Ce异常($\delta\text{Ce} = 0.31 \sim 0.63$),轻稀土与重稀土比值较小,标准化曲线近于水平或左倾。Eu的正异常是现代海底热液流体稀土元素组成的重要标志^[19, 23-25],表明东二沟玉尔吐斯组沉积时有海底热液的参与(图2)。

沉积物中 Fe/Ti 和 $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti}$ 比值同样可以作为判别海底热液的标志,当 $\text{Fe}/\text{Ti} > 20$ 或 $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti} > 20 \pm 5$,沉积物认为是热液沉积^[26]。东二沟剖面玉尔吐斯组沉积中 Fe/Ti 比值为 $7.98 \sim 287.76$,平均值为 49.27 , $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti}$ 比值为 $9.31 \sim 320.11$,平均值为 53.82 (表1),同样表明玉尔吐斯组沉积时有海底热液的参与。以 δEu 、 Fe/Ti 和 $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti}$ 比值反应热液活动强弱,纵向上玉尔吐斯组热液活动具有由弱到强再减弱的特征,热液活动主要集中在玉尔吐斯组的中下部,上部热液活动不明显或较弱(图3)。

3.2 古海洋生产力

海洋生产力反映了生物通过同化作用生产或积累有机物的能力^[27]。对于古海洋而言,古海洋生产力的直接测定是不可能的。古海洋生产力的研究常

表1 塔里木盆地东二沟剖面样品元素数据

Table 1 Elements data from samples of Dongergou section in Tarim Basin

| 样品编号 | DE-1 | DE-3 | DE-4 | DE-5 | DE-6 | DE-7 | DE-8 | DE-10 | DE-11 | DE-12 | DE-13 | DE-14 | DE-15 | DE-16 | DE-18 | DE-21 |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 岩性 | 白云岩 | 黑色页岩 | 黑色页岩 | 硅质岩 | 黑色页岩 | 黑色页岩 | 黑色页岩 | 硅质岩 | 黑色页岩 | 黑色页岩 | 黑色页岩 | 黑色页岩 | 黑色泥岩 | 白云岩 | 白云岩 | 白云岩 |
| 层位 | Z ₂ g | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ γ | ε ₁ x |
| TOC | 0.03 | 0.04 | 0.24 | 0.04 | 3.58 | 0.53 | 0.03 | 0.01 | 9.97 | 8.03 | 11.39 | 12.19 | 11.79 | 0.06 | 0.09 | 0.06 |
| Al ₂ O ₃ | 0.48 | 0.62 | 2.32 | 0.55 | 0.17 | 0.14 | 0.08 | 0.40 | 0.49 | 3.39 | 0.65 | 1.90 | 1.58 | 0.28 | 2.71 | 0.79 |
| TFe ₂ O ₃ | 0.22 | 0.31 | 0.96 | 0.54 | 0.27 | 0.32 | 0.53 | 1.26 | 0.80 | 1.89 | 0.45 | 1.10 | 0.78 | 0.13 | 0.78 | 0.49 |
| Mn | 296.21 | 214.95 | 278.57 | 320.69 | 136.54 | 221.78 | 418.34 | 591.63 | 381.36 | 292.22 | 40.68 | 73.63 | 96.17 | 379.03 | 773.45 | 598.92 |
| Ti | 159.14 | 135.88 | 529.08 | 125.67 | 45.93 | 28.74 | 12.93 | 72.82 | 144.45 | 1126.36 | 240.68 | 622.91 | 422.94 | 114.19 | 673.09 | 170.16 |
| V | 18.81 | 60.24 | 264.54 | 681.70 | 359.96 | 213.40 | 43.49 | 77.00 | 332.58 | 1058.69 | 128.27 | 148.30 | 293.83 | 7.16 | 80.40 | 77.15 |
| Cr | 5.25 | 31.33 | 175.82 | 185.70 | 82.87 | 54.50 | 19.46 | 33.91 | 85.76 | 307.64 | 33.50 | 48.32 | 71.01 | 4.98 | 44.35 | 19.57 |
| Ni | 8.63 | 10.61 | 2.39 | 4.55 | 31.68 | 18.95 | 6.30 | 15.28 | 15.70 | 167.00 | 11.61 | 12.89 | 30.99 | 6.80 | 8.77 | 9.68 |
| Co | 0.91 | 1.27 | 0.11 | 0.24 | 1.80 | 1.12 | 0.66 | 0.54 | 0.37 | 12.52 | 1.06 | 3.27 | 1.37 | 0.98 | 1.76 | 1.07 |
| La | 2.08 | 3.28 | 1.76 | 9.58 | 2.78 | 0.77 | 2.47 | 0.79 | 4.61 | 27.14 | 19.57 | 26.12 | 18.70 | 7.48 | 25.73 | 7.11 |
| Ce | 2.43 | 2.51 | 2.05 | 16.60 | 3.64 | 0.96 | 3.09 | 1.24 | 5.25 | 27.56 | 20.92 | 31.12 | 19.53 | 5.69 | 24.52 | 7.78 |
| Pr | 0.32 | 0.92 | 0.31 | 4.00 | 0.73 | 0.19 | 0.71 | 0.23 | 1.21 | 5.69 | 3.70 | 5.26 | 3.93 | 1.39 | 4.86 | 1.28 |
| Nd | 1.18 | 4.05 | 1.40 | 19.47 | 3.23 | 0.80 | 3.12 | 1.01 | 5.43 | 23.97 | 14.70 | 20.77 | 16.11 | 5.50 | 20.14 | 4.83 |
| Sm | 0.24 | 0.75 | 0.44 | 4.81 | 0.78 | 0.19 | 0.65 | 0.25 | 1.17 | 5.03 | 2.74 | 4.06 | 3.16 | 0.90 | 3.63 | 0.83 |
| Eu | 0.05 | 0.16 | 0.16 | 1.28 | 0.23 | 0.09 | 0.21 | 0.12 | 0.40 | 1.26 | 0.68 | 0.91 | 0.76 | 0.19 | 0.80 | 0.18 |
| Gd | 0.23 | 0.60 | 0.64 | 6.13 | 0.90 | 0.19 | 0.75 | 0.24 | 1.35 | 5.57 | 2.98 | 4.16 | 3.54 | 0.82 | 3.61 | 0.78 |
| Tb | 0.04 | 0.08 | 0.13 | 1.15 | 0.15 | 0.03 | 0.12 | 0.04 | 0.23 | 1.02 | 0.53 | 0.71 | 0.61 | 0.13 | 0.58 | 0.13 |
| Dy | 0.30 | 0.46 | 0.98 | 7.89 | 1.10 | 0.23 | 0.89 | 0.24 | 1.65 | 7.19 | 3.64 | 4.63 | 4.20 | 0.80 | 3.56 | 0.78 |
| Ho | 0.07 | 0.08 | 0.23 | 1.72 | 0.24 | 0.05 | 0.18 | 0.05 | 0.35 | 1.55 | 0.76 | 0.97 | 0.88 | 0.16 | 0.67 | 0.15 |
| Er | 0.21 | 0.22 | 0.83 | 5.17 | 0.77 | 0.16 | 0.54 | 0.15 | 1.06 | 5.06 | 2.41 | 3.08 | 2.91 | 0.46 | 2.07 | 0.43 |
| Tm | 0.03 | 0.03 | 0.17 | 0.78 | 0.12 | 0.03 | 0.08 | 0.02 | 0.17 | 0.78 | 0.38 | 0.46 | 0.45 | 0.06 | 0.30 | 0.07 |
| Yb | 0.21 | 0.15 | 1.32 | 4.04 | 0.67 | 0.18 | 0.36 | 0.19 | 0.95 | 4.54 | 2.11 | 2.69 | 2.35 | 0.32 | 1.66 | 0.39 |
| Lu | 0.03 | 0.02 | 0.24 | 0.62 | 0.12 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 0.15 | 0.74 | 0.35 | 0.41 | 0.35 | 0.05 | 0.25 | 0.06 |
| ΣREE | 7.44 | 13.32 | 10.65 | 83.24 | 15.47 | 3.90 | 13.20 | 4.61 | 23.99 | 117.09 | 75.47 | 105.33 | 77.49 | 23.95 | 92.38 | 24.78 |
| LREE | 6.30 | 11.68 | 6.12 | 55.74 | 11.39 | 3.00 | 10.25 | 3.64 | 18.08 | 90.65 | 62.31 | 88.23 | 62.19 | 21.14 | 79.68 | 22.00 |
| HREE | 1.14 | 1.64 | 4.53 | 27.50 | 4.07 | 0.90 | 2.95 | 0.97 | 5.91 | 26.44 | 13.16 | 17.10 | 15.30 | 2.80 | 12.70 | 2.78 |
| LREE/HREE | 5.54 | 7.10 | 1.35 | 2.03 | 2.80 | 3.35 | 3.47 | 3.76 | 3.06 | 3.43 | 4.73 | 5.16 | 4.07 | 7.54 | 6.27 | 7.91 |
| δEu | 0.94 | 1.06 | 1.28 | 1.02 | 1.20 | 2.11 | 1.31 | 2.21 | 1.37 | 1.04 | 1.05 | 0.97 | 1.00 | 0.97 | 0.97 | 0.96 |
| δCe | 0.63 | 0.59 | 0.31 | 0.56 | 0.56 | 0.55 | 0.51 | 0.63 | 0.48 | 0.48 | 0.53 | 0.58 | 0.49 | 0.38 | 0.47 | 0.56 |
| (Fe+Mn)/Ti | 11.70 | 17.38 | 13.29 | 32.55 | 43.95 | 84.68 | 320.11 | 128.80 | 41.23 | 12.00 | 13.26 | 12.44 | 13.17 | 11.30 | 9.31 | 23.73 |
| Fe/Ti | 9.84 | 15.80 | 12.76 | 30.00 | 40.98 | 76.97 | 287.76 | 120.68 | 38.59 | 11.74 | 13.10 | 12.32 | 12.94 | 7.98 | 8.16 | 20.21 |

注:TOC、Al₂O₃、TFe₂O₃ 单位为%,其余元素单位为 μg/g。

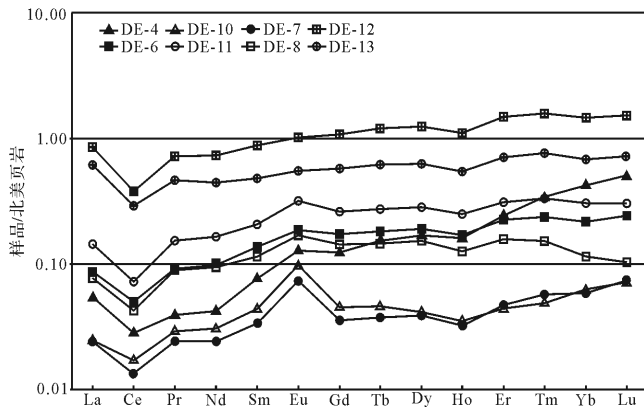


图2 东二沟剖面玉尔吐斯组稀土元素配分模式

Fig.2 REE pattern of Yuertusi Formation at Dongergou section

用生物沉积物、化学元素、古生物等指标来替代^[28]。随着现代分析测试技术的进步及其分析精度的提高,地球化学指标在古海洋研究中的作用日益突出,常用

来反应古生产力的地球化学指标包括 Al、Al/Ti、P、Ba、Ba/Ti 等^[29-31]。

单一元素受沉积速率等因素的影响较大,而通过元素比值可以抵消沉积速率等变化的影响^[31],且 Al 和 Ti 元素受成岩作用的影响较小,因此本文采用 Al/Ti 的比值来做为反应古海洋生产力的指标。由于 Al/Ti 比值受陆源物质的影响较大,仅在受陆源物质含量较小的情况下适用^[30]。Kryc *et al.*^[32] 在太平洋和南极半岛的研究表明,陆源物质小于 3%~5% 时,Al/Ti 可以作为替代古生产力的指标。Yarincik *et al.*^[33] 在研究卡里亚科盆地时同样指出 Al/Ti 作为古产力指标时,陆源物质必须小于 5%。根据 Ti/Ti_{PAAS} 计算陆源物质含量^[34],东二沟剖面除 3 个样品陆源物质含量超过 5% 外,其余样品的陆源物质含量都小于 5%,平均值为 4.66%,总体陆源物质的含量较少。因此可以用 Al/Ti 来作为反应古生产力的指标。

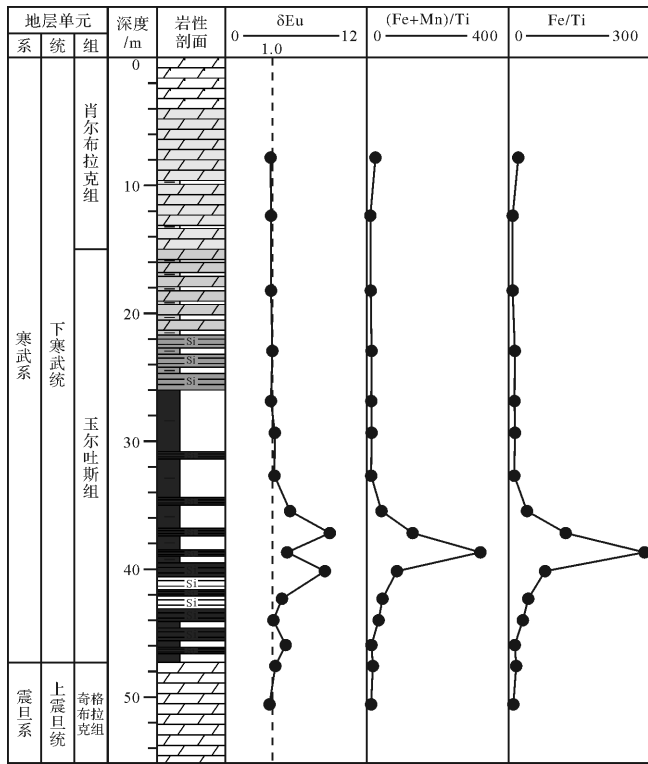


图3 东二沟剖面玉尔吐斯组热液活动的地球化学特征
Fig.3 Geochemical characteristics of hydrothermal activities of Yuertusi Formation at Dongergou section

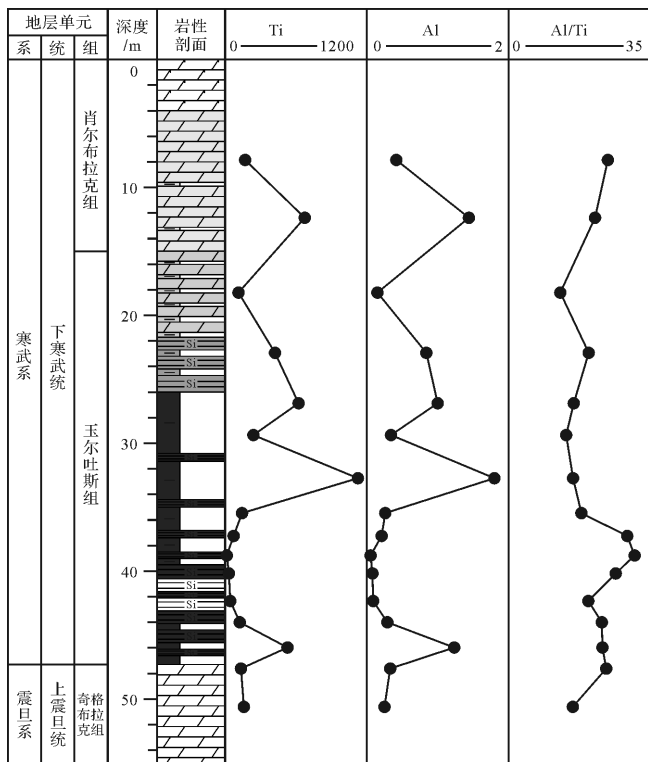


图4 东二沟剖面玉尔吐斯组古生产力的地球化学特征
Fig.4 Geochemical characteristics paleoproductivity of Yuertusi Formation at Dongergou section

从东二沟剖面玉尔吐斯组 Al/Ti 随深度变化的曲线可以看出, Al/Ti 比值变化的范围不大, 主要分布在 12.8~31.12 之间, 平均值为 21.08。玉尔吐斯组下部的 Al/Ti 比值较大, 平均值为 25.28, 大于上部的 16.88, 反应了玉尔吐斯组沉积早期, 古生产力水平较高。总体看来, 由下往上, 玉尔吐斯组古生产力水平逐渐下降(图 4)。

3.3 保存条件

保存条件是沉积物中有机质能否富集的关键因素之一。一般来说, 缺氧环境有利于有机质的富集和保存, 是优质烃源岩发育的重要条件之一。由于 Cr、U、V、Ni 等微量元素对沉积水体中的氧化还原条件比较敏感, 且在成岩过程中几乎不发生迁移, 反应了沉积时的原始条件, 所以它们是用来恢复水体氧化还原条件的理想指标^[35]。本文采用 V/Cr、V/(V+Ni) 和 Ni/Co 作为氧化还原条件的替代指标。地球化学家认为: 常氧环境 $V/Cr < 2.00$ 、 $V/(V+Ni) < 0.46$ 、 $Ni/Co < 5.00$; 贫氧环境 $2.00 < V/Cr < 4.25$ 、 $0.46 < V/(V+Ni) < 0.6$ 、 $5.00 < Ni/Co < 7.00$; 厌氧环境 $V/Cr > 4.25$ 、 $V/(V+Ni) > 0.6$ 、 $Ni/Co > 7.00$ ^[35-36]。

从图5中可知, 东二沟剖面玉尔吐斯组 V/Cr 比

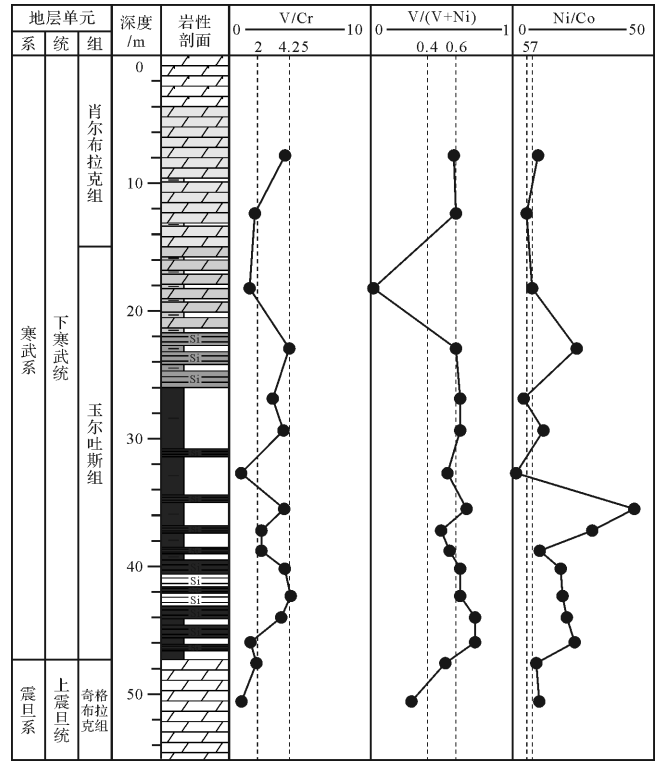


图5 东二沟剖面玉尔吐斯组氧化还原的地球化学特征
Fig.5 Geochemical characteristics of paleoredox of Yuertusi Formation at Dongergou section

值主要介于2~4之间,表明玉尔吐斯组沉积时为贫氧的沉积环境,V/(V+Ni)比值大于0.46,主要分布在0.6附近,表现为贫氧—厌氧的特征。与V/Cr和V/(V+Ni)比值不同,Ni/Co比值大多数表现为厌氧的特征,这可能是由于成岩作用使Co元素再活化,造成Co元素减少而引起的^[37],但Ni/Co纵向上的变化规律与V/Cr和V/(V+Ni)相同。因此,东二沟剖面玉尔吐斯组沉积时为贫氧—厌氧的水体环境(图5)。

4 热液活动对烃源岩发育的影响

以 δEu 反应热液活动,Al/Ti比值表示古生产力水平,V/Cr和V/(V+Ni)比值代表氧化还原环境,结合TOC值,研究了热液活动对东二沟剖面玉尔吐斯组烃源岩发育的影响(图6)。

东二沟剖面玉尔吐斯组Al/Ti比值变化的范围不大,下部Al/Ti比值分布在19.7~31.12之间,平均值为25.28,上部Al/Ti值为12.8~21.33,平均值为16.88,下部的古生产力高于上部。根据 δEu 纵向上的变化,玉尔吐斯组沉积时的热液活动主要集中在下部。因此玉尔吐斯组下部较高的古生产力水平可能与热液活动有关,在热液活动较强时,古生产力同样存在一个明显的突变(图6),这可能与热液活动时带来丰富的营养物质有关。虽然玉尔吐斯组下部古生产力水平较高,处于贫氧—厌氧的沉积环境,但其

TOC含量却比较低,7个样品中TOC含量为0.01%~3.58%,平均值为0.64%,但其中仅有DE-6和DE-7两个样品TOC含量大于0.5%,整体上烃源岩并不发育。虽然玉尔吐斯组中上部的古生产力水平较低、保存条件与下部相似,但热液活动较弱(图6),其TOC含量反而较高,6个样品中TOC含量为0.06%~12.19%,平均值为8.95%,仅有DE-16一个样品TOC含量<0.5%,是烃源岩的发育层段。

东二沟剖面玉尔吐斯组沉积时,古生产力水平和氧化还原条件比较相似,仅在热液活动方面存在明显的差异性,因此热液活动是造成下部和中上部TOC差异的主要原因。玉尔吐斯组内部硅质岩的微量和稀土元素特征表明其属热水沉积作用形成。露头剖面下部硅质岩大量发育,中上部硅质岩较少也与热液活动的总体特征相符,因此硅质岩是热液活动的直接物质表现。剖面上玉尔吐斯组内部的硅质岩主要为黑色,厚度稳定,与黑色泥岩接触界线清楚。镜下薄片观察显示,硅质岩为深褐色,内部含有丰富的有机质,以藻类体为主,藻类体以绿藻、底栖红藻为主(图7)。因此玉尔吐斯组下部TOC含量较低,可能是由于强烈的热液活动,带来大量的富硅流体,在沉积了大套硅质岩的同时,稀释了沉积物中的有机质所造成的,也就是说强烈的热液活动破坏了玉尔吐斯组下部烃源岩的发育环境。

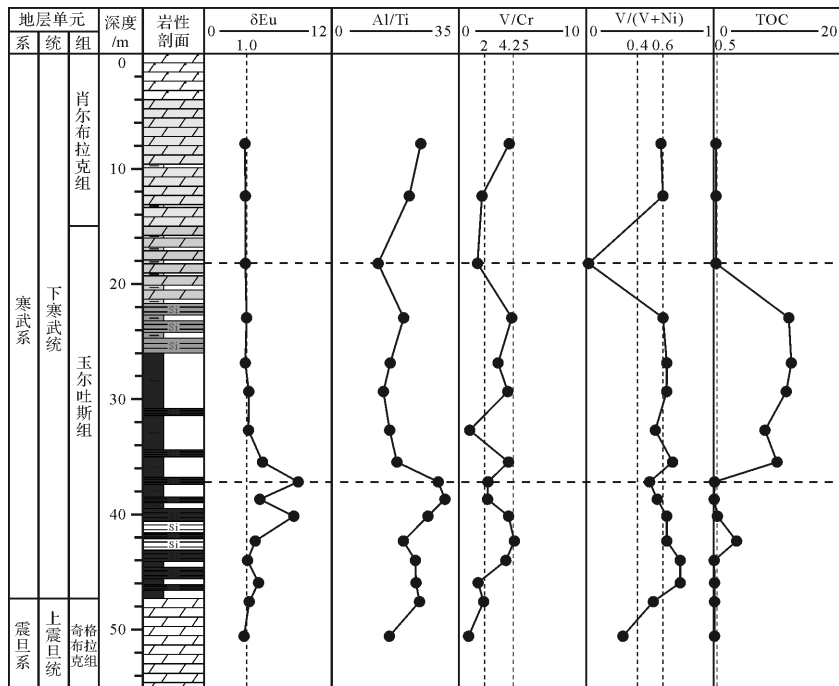


图6 东二沟剖面玉尔吐斯组地球化学特征参数及有机碳丰度关系

Fig.6 Geochemical characteristics and TOC of Yuertusi Formation at Dongergou section

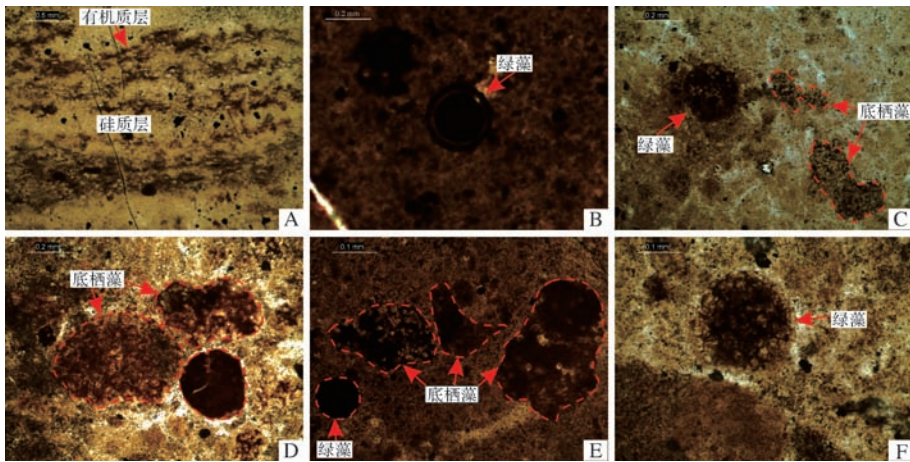


图7 东二沟剖面玉尔吐斯组硅质岩生物特征

A.有机质与微晶石英互层,单偏光,DE-10;B.绿藻,单偏光,DE-5;C.绿藻和底栖藻叶状体,单偏光,DE-10;D.底栖藻叶状体,单偏光,DE-5;E.绿藻和底栖藻叶状体,单偏光,DE-5;F.绿藻,单偏光,DE-10。

Fig.7 Organisms characteristic of silicite in Yuertusi Formation at Dongergou section

5 结论

δEu 、 Fe/Ti 和 $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti}$ 比值研究表明,玉尔吐斯组下部沉积时具有较强的热液活动,热液活动带来了大量的营养物质促进了生古产力水平的提高,但也带来了大量的富硅流体,在沉积大套硅质岩的同时,对沉积物中富集的有机质造成了稀释,造成 TOC 含量较低,7 个样品中仅 2 个样品 TOC 含量大于 0.5%;而玉尔吐斯组中上部的古生产力水平、保存条件与下部相似,但热液活动较弱,形成了对有机质保存的有利因素,6 个样品的 TOC 含量平均值为 8.95%,是较好的烃源岩层段。综上所述,热液流体强烈活动时,带来的富硅流体会造成沉积物中有机质的稀释,不利于形成有利的烃源岩层段。

参考文献 (References)

- 1 Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the Galápagos Rift[J]. *Science*, 1979, 203(4385): 1073-1083.
- 2 Spiess F N, Macdonald K C, Atwater T, et al. East pacific rise: hot springs and geophysical experiments[J]. *Science*, 1980, 207(4438): 1421-1433.
- 3 Scott M R, Scott R B, Rona P A, et al. Rapidly accumulating manganese deposit from the Median Valley of the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 1974, 1(8): 355-358.
- 4 Corliss J B, Lyle M, Dymond J, et al. The chemistry of hydrothermal mounds near the Galápagos Rift[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40(1): 12-24.
- 5 Rona P A. Pattern of hydrothermal mineral deposition: mid-Atlantic Ridge crest at latitude 26° N[J]. *Marine Geology*, 1976, 21(4): 59-66.

- 6 陈践发,张水昌,孙省利,等. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 467-472. [Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Sun Shengli, et al. Main factors influencing marine carbonate source rock formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 467-472.]
- 7 Han Tao, Zhu Xiaoqing, Li Kun, et al. Metal sources for the polymetallic Ni-Mo-PGE mineralization in the black shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 67: 158-169.
- 8 梁钰,侯读杰,张金川,等. 海底热液活动与富有机质烃源岩发育的关系——以黔西北地区下寒武统牛蹄塘组为例[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(4): 28-32. [Liang Yu, Hou Dujie, Zhang Jinchuan, et al. Hydrothermal activities on the seafloor and evidence of organic-rich source rock from the Lower Cambrian Niutitang Formation, northwestern Guizhou[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 28-32.]
- 9 张文正,杨华,解丽琴,等. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响——以鄂尔多斯盆地长7 烃源岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(4): 424-429. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Xie Liqin, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(4): 424-429.]
- 10 李天义,何生,杨智. 海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析[J]. *地质科技情报*, 2008, 27(6): 63-70. [Li Tianyi, He Sheng, Yang Zhi. The marine source rock formation conditions and control factors[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2008, 27(6): 63-70.]
- 11 孙省利,陈践发,刘文汇,等. 海底热水活动与海相富有机质层形成的关系——以华北新元古界青白口系下马岭组为例[J]. *地质论评*, 2003, 49(6): 588-595. [Sun Xingli, Chen Jianfa, Liu Wenhui, et al. Hydrothermal venting on the seafloor and formation of or-

- ganic-rich sediments-evidence from the Neoproterozoic Xiamaling Formation, North China[J]. *Geological Review*, 2003, 49(6): 588-595.]
- 12 于炳松,陈建强,李兴武,等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面下寒武统底部硅质岩微量元素和稀土元素地球化学及其沉积背景[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 59-66. [Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Li Xingwu, et al. Rare earth and trace element patterns in bedded-cherts from the bottom of the Lower Cambrian in the northern Tarim Basin, Northwest China: implication for depositional environments[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 59-66.]
- 13 孙省利,陈践发,刘文汇,等. 塔里木盆地寒武统硅质岩地球化学特征及其形成环境[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(3): 45-48. [Sun Xingli, Chen Jianfa, Liu Wenhui, et al. Geochemical characteristics of cherts of Lower Cambrian in the Tarim Basin and its implication for environment[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(3): 45-48.]
- 14 林杨松,杨海军,刘景彦,等. 塔里木早古生代原盆地古隆起地貌和古地理格局与地层圈闭发育分布[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(2): 189-197. [Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleohigh geomorphology and paleogeographic framework and their controls on the formation and distribution of stratigraphic traps in the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(2): 189-197.]
- 15 许效松,汪正江,万方,等. 塔里木盆地早古生代构造古地理演化与烃源岩[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 49-57. [Xu Xiaosong, Wang Zhengjiang, Wan Fang, et al. Tectonic paleogeographic evolution and source rocks of the Early Paleozoic in the Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 49-57.]
- 16 Mitra A, Elderfield H, Greaves M J. Rare earth elements in submarine hydrothermal fluids and plumes from the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Marine Chemistry*, 1994, 46(3): 217-235.
- 17 Klinkhammer G P, Elderfield H, Edmond J M, et al. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(23): 5105-5113.
- 18 James R H, Elderfield H, Palmer M R. The chemistry of hydrothermal fluids from the Broken Spur site, 29°N Mid-Atlantic ridge[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(4): 651-659.
- 19 丁振举,刘丛强,姚书振,等. 海底热液沉积物稀土元素组成及其意义[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(1): 27-30. [Ding Zhenju, Liu Congqiang, Yao Shuzhen, et al. REE composition and implication of hydrothermal sedimentation of sea-floor[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(1): 27-30.]
- 20 李小虎,初凤友,张平萍,等. 西南印度洋中脊热液产物稀土元素组成变化及其来源[J]. *海洋学报*, 2014, 36(6): 33-41. [Li Xiaohu, Chu Fengyou, Zhang Pingping, et al. Characteristics of composition and source of rare earth elements in the seafloor hydrothermal products from the Southwest Indian Ridge[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(6): 33-41.]
- 21 王晓媛,曾志刚,陈帅,等. 我国台湾东北部龟山岛附近海域热液流体中的稀土元素组成及其对浅海热液活动的指示[J]. *科学通报*, 2013, 58(19): 1874-1883. [Wang Xiaoyuan, Zeng Zhigang, Chen Shuai, et al. Rare earth elements in hydrothermal fluids from Kueishantao, off northeastern Taiwan: indicators of shallow-water, sub-seafloor hydrothermal processes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(19): 1874-1883.]
- 22 Haskin L A, Wildeman T R, Haskin M A. An accurate procedure for the determination of the rare earths by neutron activation[J]. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 1968, 1(4): 337-348.
- 23 Douville E, Bienvenu P, Charlou J L, et al. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(5): 627-643.
- 24 Craddock P R, Bach W, Seewald J S, et al. Rare earth element abundances in hydrothermal fluids from the Manus Basin, Papua New Guinea: Indicators of sub-seafloor hydrothermal processes in back-arc basins[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(19): 5494-5513.
- 25 Mills R A, Elderfield H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG mound, 26° N Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(17): 3511-3524.
- 26 Boström K. Genesis of ferromanganese deposits-diagnostic criteria for recent and old deposits[C]//Rona P A, Boström K, Laubier L, et al. *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers*. New York: Springer, 1983: 473-489.
- 27 沈国英,施并章. *海洋生态学*[M]. 厦门:厦门大学出版社,1990: 119-120. [Shen Guoying, Shi Bingzhang. *Marine Ecology*[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1990: 119-120.]
- 28 黄永建,王成善,汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 163-170. [Huang Yongjian, Wang Chengshan, Wang Yunliang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 163-170.]
- 29 沈俊,施张燕,冯庆来. 古海洋生产力地球化学指标的研究[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(2): 69-77. [Shen Jun, Shi Zhangyan, Feng Qinglai. Review on geochemical proxies in paleo-productivity studies[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(2): 69-77.]
- 30 任景玲,张经,刘素美. 以 Al/Ti 比值为地球化学示踪剂反演海洋古生产力的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(12): 1314-1320. [Ren Jingling, Zhang Jing, Liu Sumei. A review on aluminum to titanium ratio as a geochemical proxy to reconstruct paleoproductivity[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(12): 1314-1320.]
- 31 李牛,胡超涌,马仲武,等. 四川广元上寺剖面上二叠统大隆组优质烃源岩发育主控因素初探[J]. *古地理学报*, 2011, 13(3): 347-354. [Li Niu, Hu Chaoyong, Ma Zhongwu, et al. Main control factors of high quality hydrocarbon source rocks of the Upper Permian Dalong Formation at Shangsi section of Guangyuan, Sichuan province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(3): 347-354.]
- 32 Krye K A, Murray R W, Murray D W. Al-to-oxide and Ti-to-organic linkages in biogenic sediment: Relationships to paleo-export production and bulk Al/Ti[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 211(1/2): 125-141.
- 33 Yarincik K M, Murray R W, Peterson L C. Climatically sensitive eoli-

- an and hemipelagic deposition in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578, 000 years: results from Al/Ti and K/A[J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(2): 210-228.
- 34 Murray R W, Leinen M. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(20): 3869-3878.
- 35 Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111-129.
- 36 Hatch J R, 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.[J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/2/3): 65-82.
- 37 Hallberg R O. A Geochemical method for investigation of paleoredox conditions in sediments [J]. *Ambio Special Report*, 1976, 4: 139-147.

Influence on Formation of Yuertusi Source Rock by Hydrothermal Activities at Dongergou Section, Tarim Basin

CHU ChengLin¹ CHEN QiangLu¹ ZHANG Bo² SHI Zheng¹ JIANG HaiJian¹ YANG Xin¹

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Development,

SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen 625003, Russia)

Abstract: Based on geochemical analyses of Yuertusi Formation at Dongergou section of Tarim basin, trace elements and rare earth elements are used to probe paleoenvironmental conditions. Using δEu , Fe/Ti and (Fe+Mn)/Ti ratios for the interpretation of hydrothermal activity, Al/Ti ratios as paleoproductivity proxies and V/Cr, V/(V+Ni) and Ni/Co ratios as paleoredox proxies, the relationship of hydrothermal activity, paleoproductivity, paleoredox and total organic carbon was discussed. The data shows that Yuertusi Formation was deposited under dominantly euxinic conditions with a low paleoproductivity and that the lower part of the section experienced a strong hydrothermal activities. Although the hydrothermal activities improve the paleoproductivity of the lower part, the total organic carbon is low and ranges from 0.01% to 3.58% with an average of 0.64%. The middle-upper part of the section have a weak hydrothermal activities, but the total organic is high and ranges from 0.06% to 12.19% with an average of 8.95%. There are plenty of algal in the thin section of cherts related with hydrothermal activities. The study suggests that strong hydrothermal activities provided a lot of silica-rich fluid, which diluted the organic matter in the sediments and destroyed the formation of high-quality source rocks.

Key words: hydrothermal activity; source rock; Yuertusi Formation; Tarim Basin