

塔河地区下寒武统玉尔吐斯组沉积环境及有机质富集机理

张文文¹, 徐勤琪¹, 尚凯¹, 张楠², 廖启丰¹, 林静文¹, 李帅¹

¹ 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院; ² 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院

摘要 下寒武统玉尔吐斯组是塔里木盆地重要的烃源岩层段,开展有机质富集机理研究可为海相烃源岩评价与超深层油气勘探提供参考和依据。基于塔河地区典型单井矿物岩石学、无机地球化学和元素分析等资料,综合氧化-还原条件、古生产力、水体滞留程度等地球化学指标,探讨塔河地区玉尔吐斯组烃源岩沉积古环境及其对有机质富集的控制。研究表明:塔河地区玉尔吐斯组烃源岩有机质丰度高,下段的烃源岩有机质品质优于上段。从玉尔吐斯组沉积早期到晚期沉积水体古生产力水平、水体滞留程度、陆源碎屑输入及缺氧程度均呈现逐渐降低的演化趋势。玉尔吐斯组有机质富集与海平面变化引起的沉积古环境变化密切相关,有机质富集受保存条件、弱热液活动、上升洋流等因素共同控制,弱热液活动与上升洋流为优质烃源岩的发育提供了营养物质基础,中等滞留的沉积环境为有机质的富集提供了良好的外部条件,硫化-缺氧还原环境是有机质保存的关键。

关键词 地球化学特征; 古环境; 有机质富集; 玉尔吐斯组; 寒武系; 塔河地区; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1 **文献标识码**: A

引用: 张文文, 徐勤琪, 尚凯, 等. 塔河地区下寒武统玉尔吐斯组沉积环境及有机质富集机理[J]. 海相油气地质, 2025, 30(1): 17-29.

ZHANG Wenwen, XU Qinqi, SHANG Kai, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of the Lower Cambrian Yuertusi Formation in Tahe area, Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(1): 17-29.

0 前言

塔里木盆地是一个在前寒武纪古克拉通背景下发育的叠合复合盆地^[1-2]。塔里木盆地的油气勘探经历了从浅层向深层并逐渐向超深层挺进的过程,目前盆地的超深层勘探主要围绕台盆区奥陶系,相继在塔北、顺北、跃满、富满、满深等区块取得巨大成效。此外,在中寒武统盐下领域同样获得重要油气发现,证实寒武系具备发育规模油气藏的有利条件,是未来重要的接替领域^[3]。

对于塔里木盆地寒武系盐下领域,勘探与研究证实下寒武统玉尔吐斯组是重要烃源岩层段。塔里木盆地西北缘于提希剖面的玉尔吐斯组总有机碳含量(TOC)最高可达17.20%^[4];星火1井揭示了玉尔吐斯组厚约20 m的黑色泥岩,TOC最高达9.43%^[5];塔

北隆起LT1井揭示玉尔吐斯组厚约23 m的灰黑色泥页岩,TOC介于0.14%~29.8%^[1]。前人对该套烃源岩的古地理环境、沉积环境、有机质富集的主控因素和分布范围提出诸多观点,但存在较大争议。关于有机质富集模式,长期存在“保存模式”和“生产力模式”之争:“保存模式”强调在高初级生产力背景下还原环境对有机质的富集起主导作用;“生产力模式”强调富有机质烃源岩的形成得益于较高的初级生产力^[6-8]。许多研究都集中在某个单一因素上,缺乏对多种因素包括热液活动、海平面上升、古生产力、保存条件等的综合分析。前人主要以盆地边缘典型露头为研究对象,而盆地内部钻遇玉尔吐斯组的钻井较少且取心不连续,岩石资料较缺乏,这导致针对盆地内部玉尔吐斯组烃源岩的沉积环境、有机质富集等问题缺乏系统性研究,一定程度上制约了深层油

收稿日期: 2024-09-03; 改回日期: 2024-11-12

本文受中国石化科技项目“塔北-塔中震旦系-寒武系成藏条件与区带优选”(编号:P22123)资助

第一作者: 张文文, 硕士, 工程师, 主要从事地震地质综合解释研究。通信地址: 830011 新疆乌鲁木齐市新市区长春南路466号; E-mail: 2537536180@qq.com

通信作者: 徐勤琪, 本科, 副研究员, 主要从事石油地质综合研究。通信地址: 830011 新疆乌鲁木齐市新市区长春南路466号; E-mail: xuqq.xbsj@sinopec.com

气勘探的进程。

在前人研究的基础上,本文选取塔河地区揭示玉尔吐斯组优质烃源岩的A井,同时引用公开发表的LT1井测试数据成果,基于岩心、岩屑样品,利用元素地球化学指标明确烃源岩的沉积古环境及有机质富集机理,并构建相应的有机质富集模式,以期为塔里木盆地深层—超深层领域烃源岩评价和油气勘探提供依据。

1 地质背景

塔里木盆地在南华纪—震旦纪经历了基底形成和构造格局初始定型阶段:南华纪在拉张构造背

景下开始发育裂谷和裂陷,震旦纪末柯坪运动导致上震旦统遭受不同程度的剥蚀。早寒武世在克拉通内拗陷经历了一个填平补齐的过程,下寒武统或直接盖于基底之上,或与下伏震旦系呈不整合接触^[9-10]。盆地内玉尔吐斯组主要发育于拗陷内,分布较广,厚度大于30 m的区域集中在北部拗陷的中部(图1a)。

研究区塔河地区位于盆地北部。区内玉尔吐斯组发育于被动陆缘的深水陆棚环境,根据岩性变化可分为两段:下段以灰黑色、深灰色硅质泥岩(图1b,图2a、2b)、灰质泥岩(图2c)为主,上段以灰黑色、深灰色泥质灰岩为主。

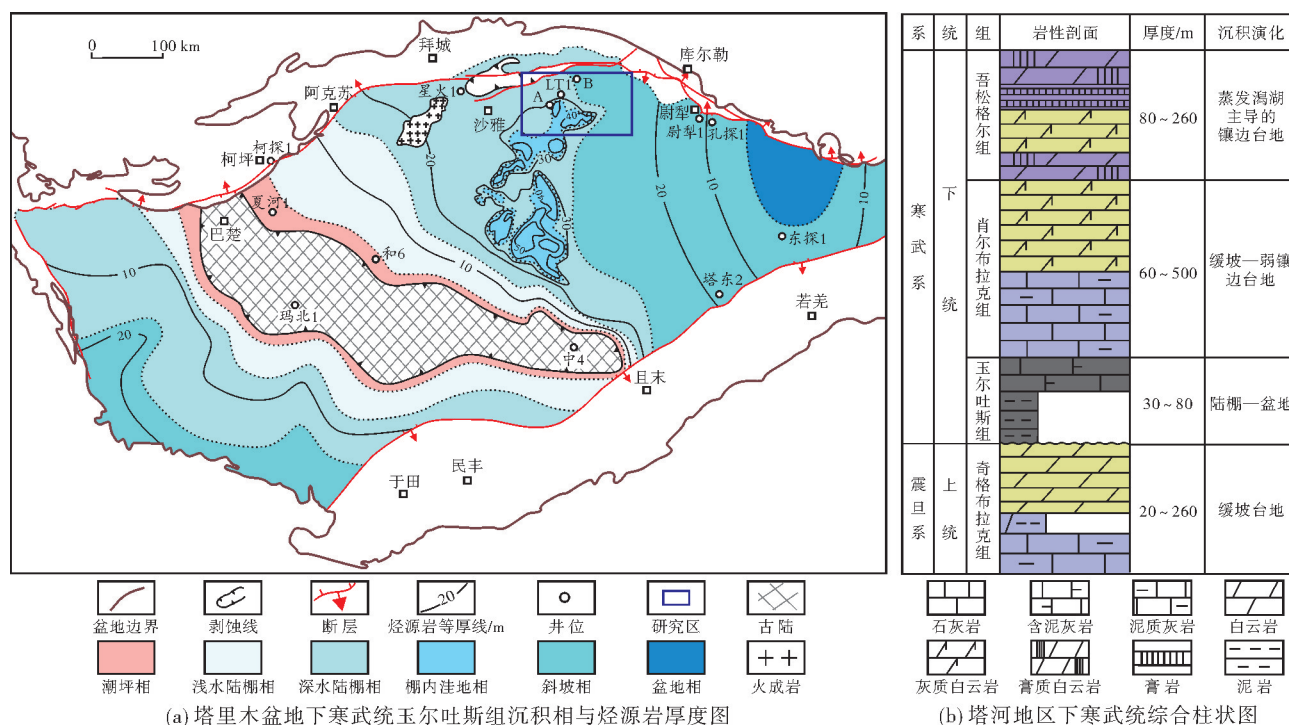


图1 塔里木盆地地下寒武统沉积背景及综合柱状图

Fig. 1 Sedimentary background and comprehensive column of the Lower Cambrian in Tarim Basin

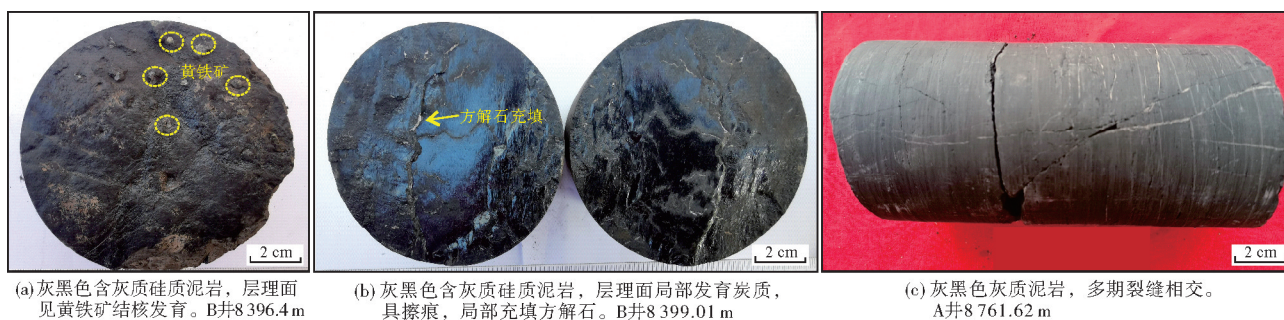


图2 塔河地区玉尔吐斯组下段泥质岩类岩心照片

Fig. 2 Core photos of mudstone of the lower section of Yertusi Formation in Tahe area

2 样品分析与测试结果

2.1 样品分析与测试

所有样品的有机碳含量测试由中国石化西北油田分公司实验中心完成,测试方法和流程依据标准 GB/T 19145—2003,测试仪器为高频红外碳硫分析仪。主量元素、全岩微量元素(包含稀土元素)测试均由中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验室完成:主量元素测试依据标准 GB/T 14506.14—2010、GB/T 14506.28—2010、GB/T 14506.34—2019,测试仪器为 Axios mAX X-射线荧光光谱仪(XRF),检测温度 24 ℃,相对湿度为 24%;全岩微量元素(包含稀土元素)测试依据标准 GB/T 14506.30—2010,测试仪器为 NexIOM 300D 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),检测温度 20.1 ℃,相对湿度为 19%。

此外,文中引用了公开发表的 LT1 井玉尔吐斯组测试数据成果^[11]。

2.2 地球化学特征

2.2.1 有机质丰度、类型和成熟度

塔河地区玉尔吐斯组烃源岩样品 TOC 介于 0.14%~12.90%,平均值为 4.44%,下段样品 TOC(平均值为 6.00%)高于上段(平均值为 1.87%)(图 3a)。热解分析显示,玉尔吐斯组样品生烃潜力(S_1+S_2)介于 0.93~8.08 mg/g,平均值为 3.0 mg/g,其中 1.0~2.0 区间的占比达 60%(图 3b),反映生烃潜力较大。根据烃源岩 TOC 与(S_1+S_2)交会图(图 3c)可以看出:玉尔吐斯组下段有机质具有很高的生烃潜力,为一套优质烃源岩;上段为一套差—中等烃源岩。朱光有等^[11]对玉尔吐斯组烃源岩有机质类型、成熟度的研究表明:LT1 井干酪根碳同位素组成(介于 -32.71‰~-28.26‰,平均值为 -30.53‰)指示干酪根类型主要为 I 型,少量为 II 型;等效镜质组反射率(介于 1.4%~1.7%,平均值为 1.53%)与最高热解峰温(介于 450~528 ℃,平均值为 473.69 ℃)均指示烃源岩处于高一过成熟阶段。

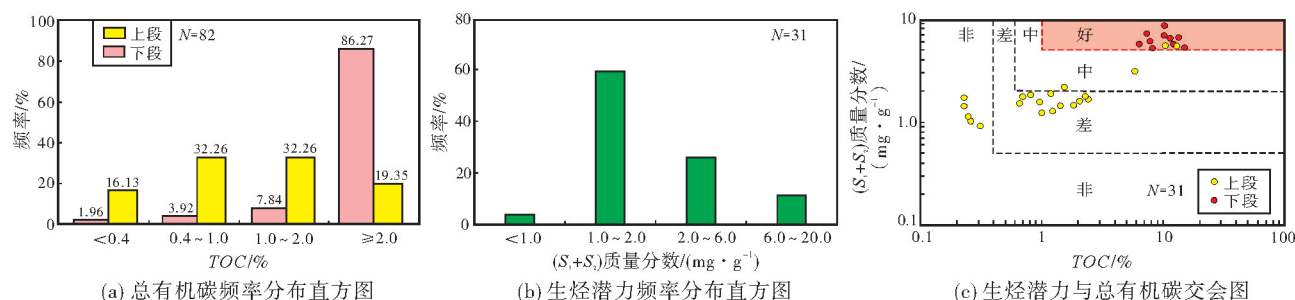


图3 塔河地区玉尔吐斯组烃源岩有机质特征

Fig. 3 Characteristics of organic matter of the source rocks of Yuertusi Formation in Tahe area

2.2.2 主量元素

玉尔吐斯组烃源岩主量元素分析结果表明:①主要成分是 SiO₂ 和 CaO,两者总含量为 50.55%~73.87%。其中 SiO₂ 含量高,质量分数为 9.26%~66.87%,平均值为 35.18%;CaO 质量分数为 7.00%~45.06%,平均值为 24.83%。玉尔吐斯组下段 SiO₂ 含量高于 CaO 含量,上段则相反。②Al₂O₃ 和 MgO 含量相当。其中 Al₂O₃ 质量分数为 1.47%~5.41%,平均值为 3.17%;MgO 质量分数为 1.60%~5.80%,平均值为 3.54%。③Fe₂O₃ 质量分数为 0.76%~2.78%,平均值为 1.52%。④其他氧化物(如 Na₂O、K₂O、MnO 等)含量均小于 1.0%。

2.2.3 微量元素

玉尔吐斯组烃源岩微量元素分析结果表明:微量元素主要有 Ba(含量为 608~16 504.72 μg/g,平均值为 3 811.45 μg/g)、Sr(含量为 469~2 544 μg/g,平均值为 997.94 μg/g)、V(含量为 26.5~2 331.53 μg/g,平均值为 393.74 μg/g)和 Cr(含量为 25.9~999 μg/g,平均值为 186.84 μg/g)。从微量元素含量在玉尔吐斯组的纵向分布看,大部分微量元素含量在地层中相对稳定,如 Be、Sc、Co、Ga、Nb、Cs、Th 等元素,但 V、Cr、Ni、Cu、Zn、Zr、Mo、Sr、Ba 和 U 元素有明显变化,V、Cr、Ni、Cu、Zn、Mo 和 U 元素在下段相对富集,Sr、Zr 和 Ba 元素在上段相对富集。

2.2.4 稀土元素

玉尔吐斯组样品稀土元素分析结果表明:①稀土元素总量(ΣREE)介于27.42~118.63 $\mu\text{g/g}$,平均值为51.64 $\mu\text{g/g}$,低于北美页岩稀土元素总量的平均值(146.4 $\mu\text{g/g}$)。②轻、重稀土元素含量分布不均。轻稀土元素含量(ΣLREE)介于24.35~102.83 $\mu\text{g/g}$,平均值为45.40 $\mu\text{g/g}$;重稀土元素含量(ΣHREE)介于3.08~15.81 $\mu\text{g/g}$,平均值为6.24 $\mu\text{g/g}$;轻、重稀土元素比值($\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$)介于5.41~10.32,平均

值为7.49,与北美页岩轻、重稀土元素比值相近(7.50)。③利用球粒陨石值标准化处理的稀土元素配分曲线统一呈现右倾,总体上反映塔河地区玉尔吐斯组轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损。

3 沉积古环境演化

研究区A井相关参数的纵向变化特点如图4所示。微量元素含量及其比值等参数(表1)被广泛用于古环境的判别。

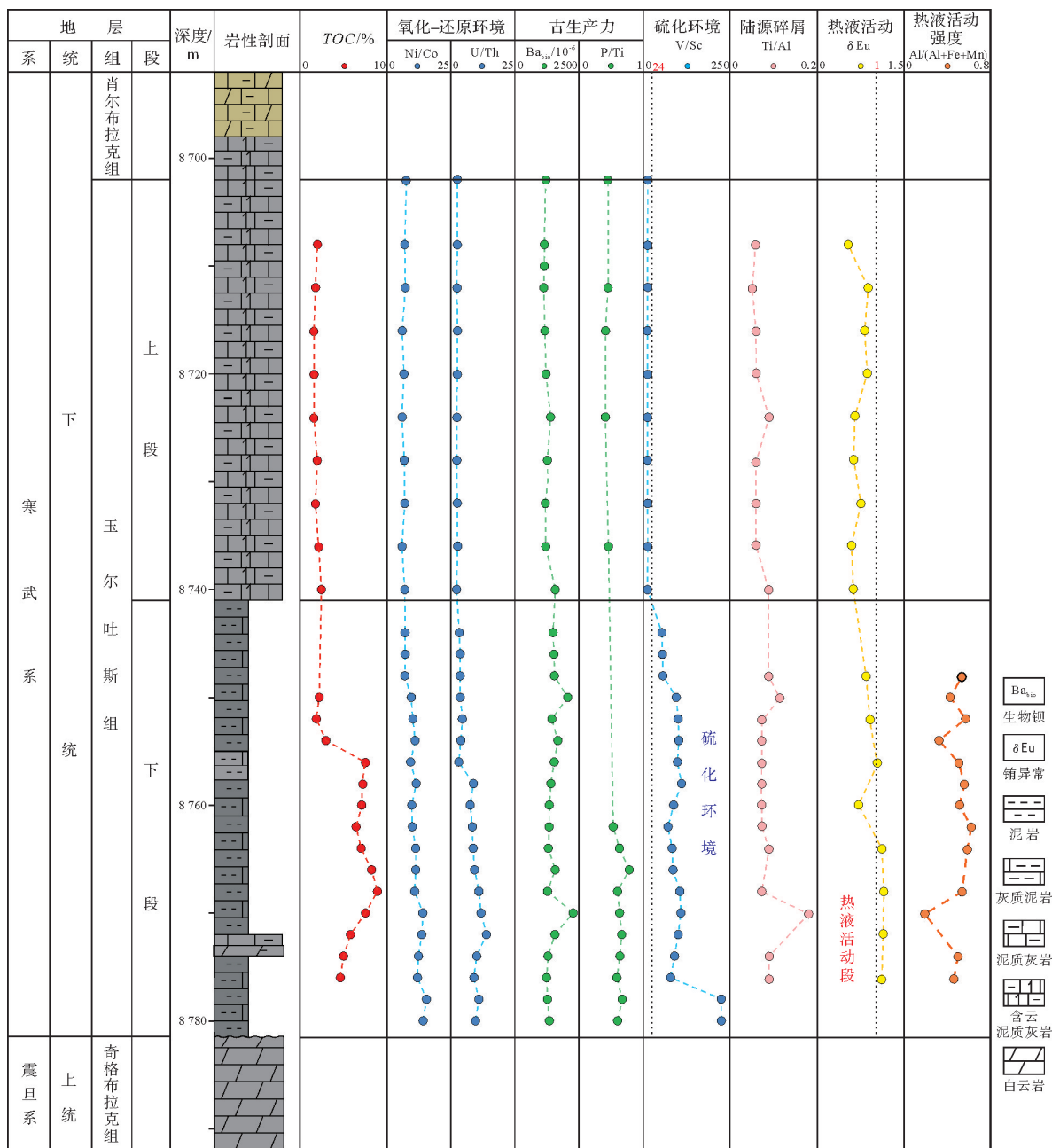


图4 塔河地区A井玉尔吐斯组古环境地球化学参数纵向变化

Fig. 4 Vertical variation diagram of paleoenvironmental geochemical parameters of Yuertusi Formation of Well A in Tahe area

表1 古环境判别常用参数一览
Table 1 Common parameters for identifying paleoenvironments

古环境分析	判别参数	判别方法
氧化-还原环境	Ni/Co	<5 指示富氧化环境, 5~7 指示贫氧、亚还原环境, ≥7 指示缺氧还原环境
	V/Sc	<9 指示富氧化环境, 9~20 指示贫氧、亚还原环境, ≥20 指示缺氧还原环境, ≥24 指示硫化环境
	U/Th	<0.75 指示富氧化环境, 0.75~1.25 指示贫氧、亚还原环境, ≥1.25 指示缺氧还原环境
古生产力	P/Ti	低值指示古生产力低, 高值指示古生产力高
	Ba _{bio}	Ba _{bio} 与古生产力成正比, (1 000~5 000)×10 ⁻⁶ 指示高等生产力
滞留程度	Mo/TOC	水体滞留程度增高时, Mo/TOC 比值减小; 滞留程度降低时, 比值增大
	Co·Mn	<0.4 指示开放/上升洋流环境, ≥0.4 指示滞留环境
陆源碎屑输入	Ti/Al	Ti/Al 与陆源碎屑输入成正比
热液活动	δEu	δEu > 1 是热液活动的重要标志

注: Ba_{bio}=Ba_{样品}-Al_{样品}(Ba/Al)_{PAAS}, 式中(Ba/Al)_{PAAS}=0.007 7, PAAS 代表澳大利亚后太古宙页岩;
δEu=3×Eu_N/(2×Sm_N+Tb_N), 式中X_N为采用澳大利亚后太古宙页岩标准化的样品值。

3.1 氧化-还原环境

在不同的环境下, V、Ni、Cr、Cu、U、Th 等元素会有不同程度的富集。目前 Ni/Co、V/Sc、U/Th 的值是判断水体氧化-还原环境的重要指标。Ni/Co≥7、V/Sc≥20、U/Th≥1.25, 分别指示水体为缺氧还原环境, 而且当 V/Sc≥24 时, 表明水体处于硫化环境; 5≤Ni/Co<7、9≤V/Sc<20、0.75≤U/Th<1.25, 分别指示水体处于贫氧、亚还原环境; Ni/Co<5、V/Sc<9、U/Th<0.75, 分别指示水体处于富氧环境^[12-13]。

从 Ni/Co 与 U/Th 交会图(图 5a)可以看出: ①玉尔吐斯组样品的 Ni/Co 值介于 4.04~34.95, 平均值为 12.86; U/Th 值介于 0.64~18.93, 平均值为 5.34。②下段样品的 Ni/Co 值(介于 7.58~34.95, 平均值为 17.03)、U/Th 值(介于 1.50~18.93, 平均值为 8.19)均指示沉积水体整体处于缺氧还原环境。③上段样品的 Ni/Co 值(介于 4.04~25.77, 平均值为 8.19)、U/Th 值

(介于 0.64~13.12, 平均值为 2.14)均表明沉积水体整体处于贫氧、亚还原环境(图 5a)。注意到有个别样品落在富氧区域内, 推测在上段沉积期的某一时期部分水体处于富氧环境。

玉尔吐斯组样品的 V/Sc 值介于 10.21~310.28, 平均值为 95.28, 有 2 个样品的 V/Sc 值表现为异常极大值(617.99 和 403.23)。从 V/Sc 值纵向分布看, 如图 5b 所示, 下段样品的 V/Sc 值主体为 35.14~310.28, 表明塔河地区沉积水体长期处于极端硫化环境。

综合上述 Ni/Co、U/Th 和 V/Sc 值的分析结果, 认为塔河地区玉尔吐斯组沉积时期水体环境从早期到晚期经历了硫化、缺氧还原到贫氧、亚还原的演化过程。

3.2 古生产力

磷(P)在生物体的新陈代谢中起着非常重要的作用, 是必不可少的营养物质。生物遗体中的磷随生物

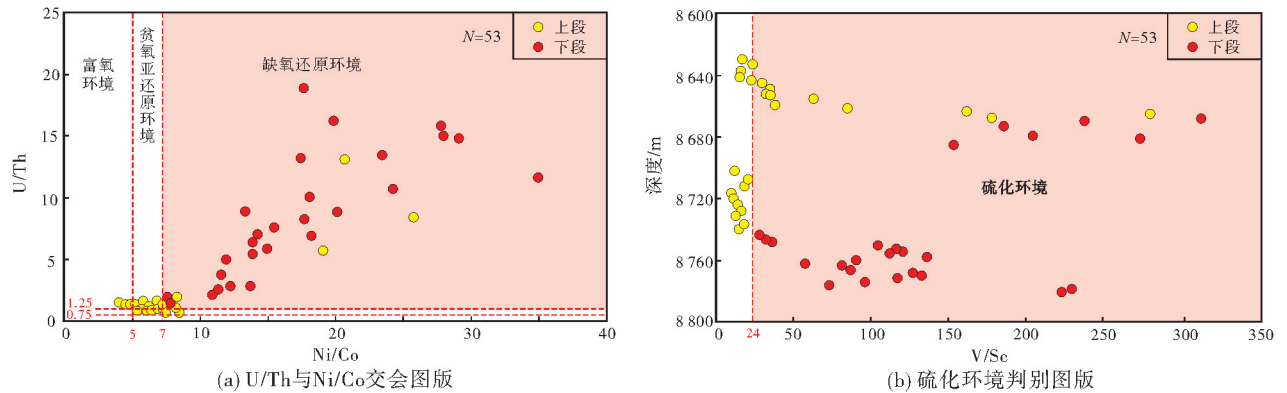


图5 塔河地区玉尔吐斯组烃源岩氧化-还原环境特征
Fig. 5 Characteristics of oxidation-reduction environment of source rocks of Yuertus Formation in Tahe area

体沉积,成为烃源岩的一部分。由于陆源碎屑输入会对海洋水体中磷营养盐的含量造成影响,因此常用P/Ti消除陆源输入的影响。P/Ti值较低,指示低古生产力;P/Ti值较高,指示古生产力较高^[14]。塔河地区玉尔吐斯组样品的P/Ti值介于0.19~0.75,平均值为0.43,指示沉积水体具有中—高等的生产力。如图4所示,从早期到晚期P/Ti值呈降低的趋势:下段样品的P/Ti值较高(介于0.38~0.75,平均值为0.53),指示较高的古生产力;上段样品的P/Ti值较低(介于0.19~0.27,平均值为0.23),指示古生产力水平较低。

生物钡(Ba_{bio})是评价海洋古生产力的可靠指标,通常采用Murray等^[15]提出的公式: $Ba_{bio}=Ba_{样品}-Al_{样品}(Ba/Al)_{PAAS}$,式中 $(Ba/Al)_{PAAS}=0.0077$,PAAS表示澳大利亚后太古宙页岩。当 $1\ 000\times 10^{-6}<Ba_{bio}<5\ 000\times 10^{-6}$ 时,古海洋具有高生产力^[15]。计算结果显示,玉尔吐斯组样品的 Ba_{bio} 含量介于 $(482.27\sim 2\ 085.22)\times 10^{-6}$ (图4),平均值为 942.84×10^{-6} ,指示玉尔吐斯组沉积期水体具有中—高等的生产力。下段样品的 Ba_{bio} 含量介于 $(845.09\sim 2\ 085.22)\times 10^{-6}$,平

均值为 $1\ 243.93\times 10^{-6}$;上段样品的 Ba_{bio} 含量介于 $(482.27\sim 1\ 155.89)\times 10^{-6}$,平均值为 675.20×10^{-6} ,指示玉尔吐斯组下段具有更高的古生产力(图4)。这与P/Ti指示的古生产力程度相似。

3.3 水体滞留程度

沉积环境的开放与封闭制约着氧化还原敏感元素的富集程度。根据Mo、U元素在不同类型海盆中的分布差异,可划分出非滞留环境、弱滞留环境和强滞留环境^[16-17]。为了消除陆源碎屑输入及其他因素对Mo、U元素含量的影响,通过Al元素含量进行校正并分别计算出对应的富集系数 Mo_{EF} 、 U_{EF} :X元素的富集系数 $X_{EF}=(X/Al)_{样品}/(X/Al)_{PAAS}$,其中 $(X/Al)_{样品}$ 代表测试样品的元素比, $(X/Al)_{PAAS}$ 代表澳大利亚后太古宙页岩的元素比,即样品用PAAS标准化。 Mo_{EF} - U_{EF} 协变模式图常用来判断水体的滞留程度^[16-17]。从塔河地区玉尔吐斯组 Mo_{EF} - U_{EF} 交会图版(图6a)可以看出:① Mo_{EF}/U_{EF} 值为正常海水值的0.3~3倍;下段Mo、U富集程度较高,富集系数大多

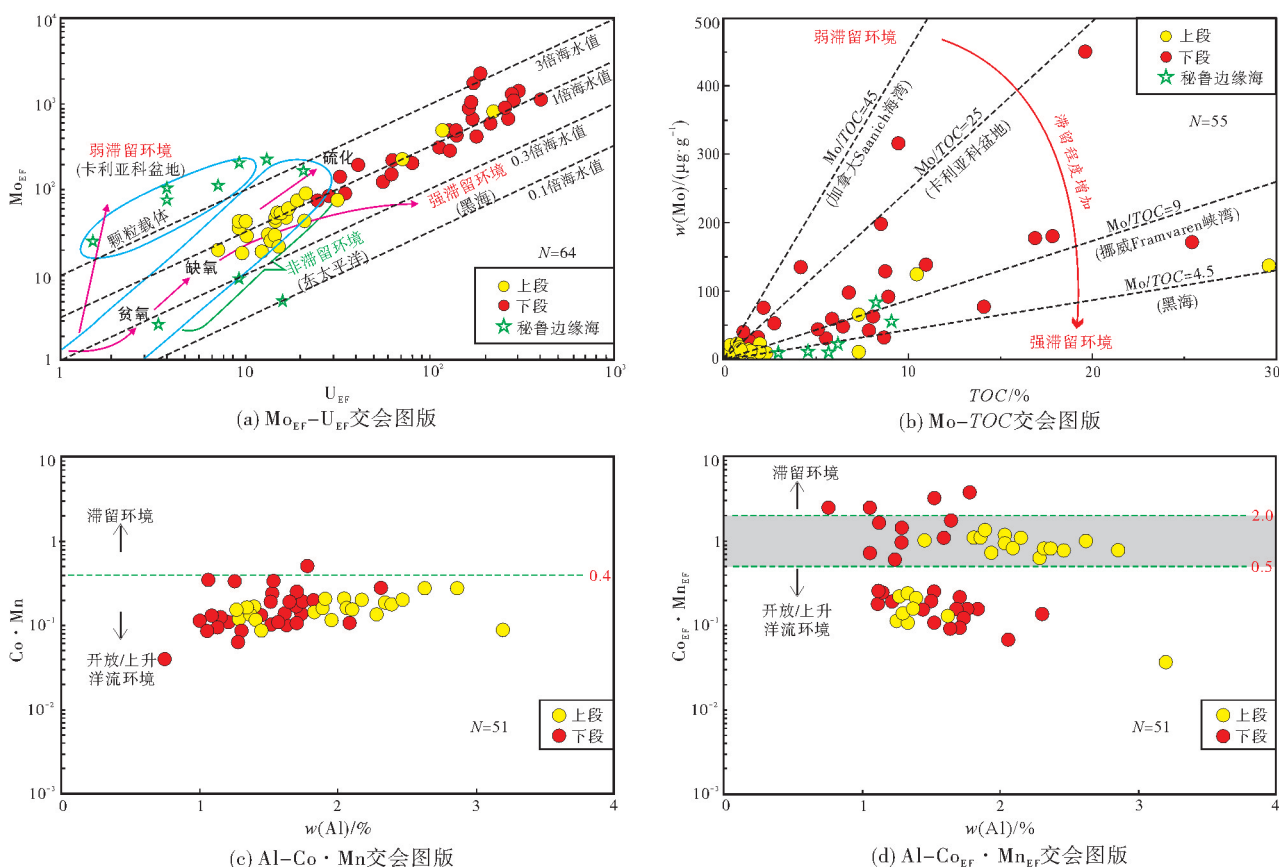


图6 塔河地区玉尔吐斯组水体滞留程度判别图版

Fig. 6 Discrimination chart of water retention degree of Yuertusi Formation in Tahe area

数大于100;上段 Mo、U 富集程度较低,富集系数多小于100。②下段样品均落在了硫化环境的区域,水体滞留程度中等;上段样品集中在缺氧区域内,处于非滞留区域内,指示上段沉积期水体循环良好,属非滞留环境。与之对比,在大陆边缘开放/上升洋流环境中 Mo 元素受到 Mn、Fe 颗粒载体吸附的较大影响而强烈富集^[16]。将秘鲁边缘海沉积物的样品进行投点,大部分样品落在颗粒载体吸附作用影响的区域,这制约了在 $Mo_{EF}-U_{EF}$ 协变模式图中对实际环境的判别。

此外, Mo/TOC 值可用来判断水体滞留程度^[18]。如图 6b 所示,塔河地区玉尔吐斯组样品 Mo/TOC 值介于 1.34~74.83, 86% 的样品落在 1.34~25 的区域内,指示沉积水体为中等—强滞留环境。这一结果与 $Mo_{EF}-U_{EF}$ 协变分析所得结论相悖。将秘鲁边缘海沉积物的样品在 Mo/TOC 关系中进行投点,发现样品主要分布在 Mo/TOC 值小于 9 的范围,如果按该模板应解释为中等—强烈滞留环境,这显然与实际情况不符。肖斌等对四川盆地五峰组—龙马溪组水体滞留程度的研究结果同样表明, Mo/TOC 值和 $Mo_{EF}-U_{EF}$ 协变的分析方法对于古生代大陆边缘开放的海洋环境并不适用^[16]。

Sweere 等^[19]提出 Al-Co·Mn 图版来判别水体滞留环境: $Co \cdot Mn > 0.4$ 时,处于滞留环境,反之则处于开放/上升洋流环境。塔河地区玉尔吐斯组下段局

部水体处于相对滞留的环境,上段处于开放的水体环境(图 6c)。为了消除陆源碎屑输入对 Co、Mn 含量的影响,分别计算出 Co、Mn 的富集系数 Co_{EF} 、 Mn_{EF} ,两者交会同样指示塔河地区玉尔吐斯组下段水体滞留程度更高、上段处于弱滞留环境(图 6d)。

综上所述,塔河地区玉尔吐斯组下段沉积期属于半滞留海盆、水体循环中等,上段沉积期处于弱滞留环境、水体循环良好,从早期到晚期水体滞留程度逐步减弱。

3.4 陆源碎屑输入

陆源碎屑输入不仅能影响水体氧化-还原环境等古环境特征,还可稀释海盆自身生物供给能力,从而影响烃源岩的质量。陆源输入的强弱通常会导致 Al、Si、Ti 等元素含量的显著变化。利用 Al 对 Ti 进行标准化(Ti/Al),可以反映陆源碎屑的输入情况,高 Ti/Al 值指示高陆源输入^[20]。从塔河地区 LT1 井、A 井玉尔吐斯组 Ti/Al 垂向变化图(图 4,图 7a,图 7b)可以看出,玉尔吐斯组整体陆源输入较少(Ti/Al 值介于 0.06~0.19,平均值为 0.08),下段样品 Ti/Al 平均值(0.09)要大于上段样品(0.07),指示从早期到晚期陆源输入强度呈逐渐降低的变化趋势。玉尔吐斯组样品 TOC 与 Ti/Al 相关性图(图 7c)表明,两者基本无相关性($R^2=0.0357$),表明陆源碎屑输入对有机质富集影响较小。

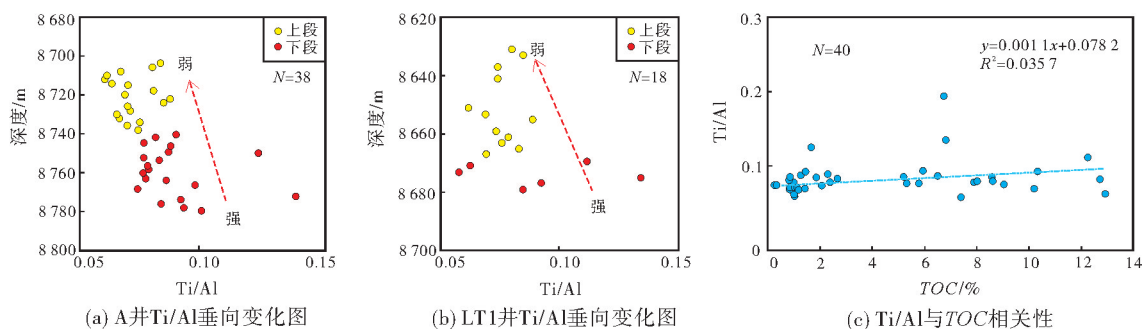


图7 塔河地区玉尔吐斯组陆源输入判别图版

Fig. 7 Discrimination chart of terrestrial input of Yuertusi Formation in Tahe area

4 有机质富集因素及机理

4.1 有机质富集因素

4.1.1 保存条件与古生产力

Co·Mn 和 Cd/Mo 联合图版可用于判别不同海洋环境对富有机质形成的主控因素。Sweere 等^[19]对

全球 5 种不同程度滞留水体沉积物中 Co、Mn 元素含量的研究发现,这两种元素的分布在水体滞留程度不同的环境中存在强烈差异;此外,当 $Cd/Mo > 0.1$ 时,有机质的富集主要受控于生产力,反之,有机质的富集主要受控于保存条件。如图 8 所示:①塔河地区玉尔吐斯组样品绝大部分落在图版左下角,区

别于现代海盆,例如以保存条件为主控因素、处于滞留环境的黑海沉积物,和以生产力为主控因素、处于开放/上升洋流环境的秘鲁边缘海沉积物;②玉尔吐斯组有机质富集受保存环境影响更显著;③玉尔吐斯组沉积期水体持续受到上升洋流的影响,而上升洋流的发育可能受到海平面变化的制约。

为了验证基于 $\text{Cd}/\text{Mo}-\text{Co} \cdot \text{Mn}$ 图版的判断,将 TOC 与保存条件指标(以 U/Th 、 Ni/Co 为代表)和古生产力指标(以 Ba/Al 、 Ba_{bio} 为代表)分别进行相关性分析。玉尔吐斯组样品 TOC 与 Ni/Co 、 U/Th 呈现良好的正相关(图 9a, 9b),相关系数(R^2)分别为 0.750 3、0.655 2,表明有机质富集受氧化-还原条件

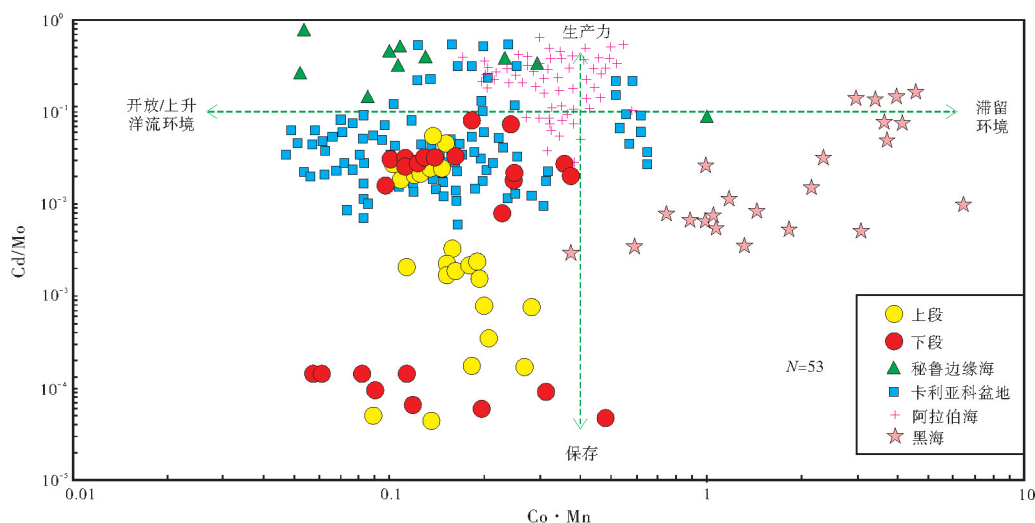


图8 塔河地区玉尔吐斯组 $\text{Cd}/\text{Mo}-\text{Co} \cdot \text{Mn}$ 交会图版

Fig. 8 $\text{Cd}/\text{Mo}-\text{Co} \cdot \text{Mn}$ crossplot chart of Yuertusi Formation in Tahe area

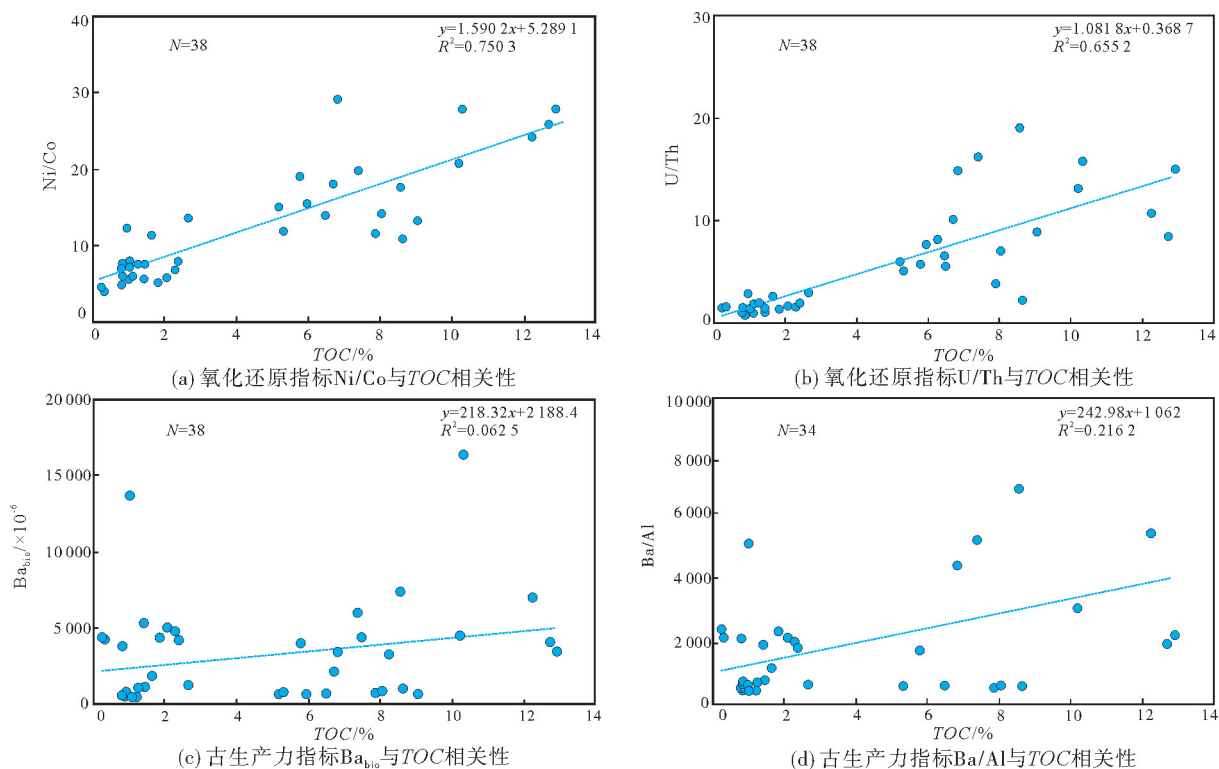


图9 塔河地区玉尔吐斯组氧化-还原指标、古生产力指标与总有机碳相关图

Fig. 9 Correlation charts of redox index (Ni/Co , U/Th), paleoproductivity index (Ba_{bio} , Ba/Al) and total organic carbon content (TOC) of Yuertusi Formation in Tahe area

的影响。玉尔吐斯组样品 TOC 与 Ba_{bio} 、 Ba/Al 呈弱正相关(图 9c, 9d), 相关系数分别为 0.062 5、0.216 2, 表明虽然高海洋古生产力为有机质富集提供了充足的物质来源, 但并不是有机质 TOC 变化的主控因素。可见, 采用 $Co \cdot Mn - Cd / Mo$ 图版判别富有机质形成的主控因素是可靠的, 玉尔吐斯组有机质富集受保存环境影响更显著, 高生产力与还原环境有利于有机质聚集。

4.1.2 热液活动

玉尔吐斯组发育重晶石、黄铁矿等热液矿物。前人研究认为玉尔吐斯组下段硅质岩为热液成因^[8]。一般认为稀土元素 Eu 正异常($\delta Eu > 1$)是热液流体活动的重要标志^[21], 但 Eu 正异常可能会是受到高 Ba 样品测试信号的影响所致, 若 Eu 正异常与 Ba 质量分数无明显的正相关, 则可以认为 Eu 正异常为可靠的测试结果^[22]。朱光有等^[11]对塔河地区 LT1 井玉尔吐斯组样品的研究结果显示: 上段样品中 Eu 正异常受到 Ba 的强烈干扰, 不能作为热液流体活动的证据; 下段样品 Eu 正异常与 Ba 、 Al_2O_3 含量的相关性极弱, 这个 Eu 正异常是由热液活动引起的。

A 井玉尔吐斯组样品 δEu 与 Ba 含量无明显正相关($R^2=0.010\ 3$)(图 10a), Eu 正异常与 Al_2O_3 含量

相关性极弱($R^2=0.255\ 4$)(图 10b), 表明 Eu 正异常为真实信号。计算表明: A 井玉尔吐斯组下段部分样品表现为 Eu 正异常(图 10c), 说明下段沉积期伴有热液活动; 上段样品均表现为 Eu 负异常, 反映上段沉积期热液活动已经停止。

沉积物中的 Al 一般作为陆源输入的指示元素, 而热液活动区具有 Fe 、 Mn 富集的特征, 故常用 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 来表示热液活动的强弱, 其值越小代表热液活动越强^[23]。对受热液作用影响的玉尔吐斯组下段计算 $Al/(Al+Fe+Mn)$, 结果显示: 下段样品 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 介于 0.31~0.56, 平均值为 0.43, 说明热液活动相对较弱, 且自下而上 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值呈逐渐增大趋势, 说明下段沉积期热液活动呈逐渐减弱的演化趋势(图 4)。

此外, 玉尔吐斯组下段样品热液活动强度参数 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 与氧化还原环境参数(U/Th)、古生产力参数(Ba_{bio})以及 TOC 均呈弱正相关(图 11a—11c)。这说明热液活动越弱, 有机质保存条件越好, 古生产力水平越高, 有机质丰度越高。

4.1.3 上升洋流

上升洋流是从深部向表层运动的海水, 北美西部盆地等地区优质烃源岩的发育均得益于上升洋

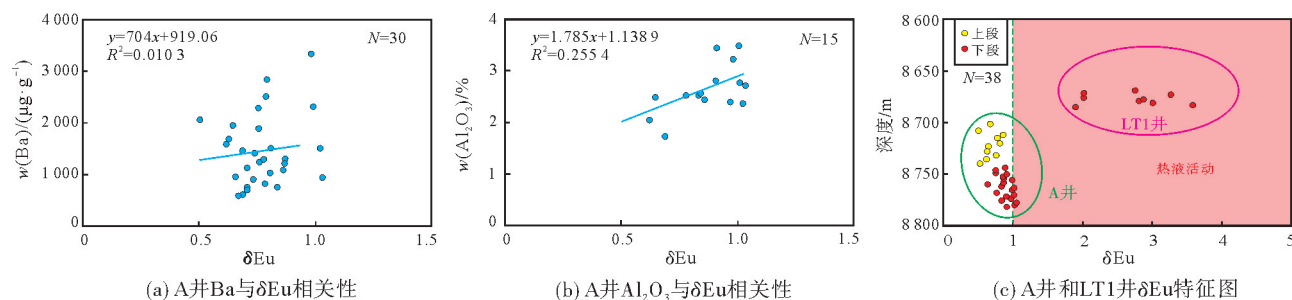


图 10 塔河地区玉尔吐斯组热液活动判别图

Fig. 10 Discrimination charts of hydrothermal activity of Yuertusi Formation in Tahe area

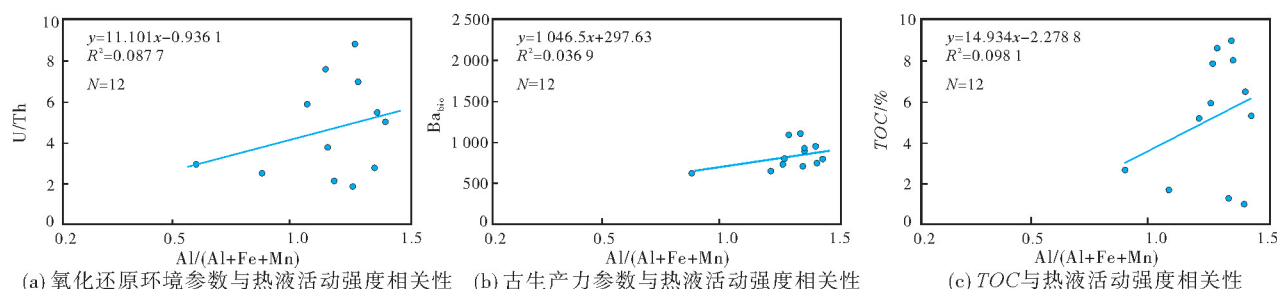


图 11 塔河地区 A 井玉尔吐斯组下段环境参数与热液活动强度相关图

Fig. 11 Correlation charts between environmental parameters and hydrothermal activity intensity in the lower section of Yuertusi Formation of Well A in Tahe area

流带来海底营养元素与缺氧水。Sweere等^[19]提出Al-Co·Mn图版可用来判别有机质富集是否受到上升洋流的影响。

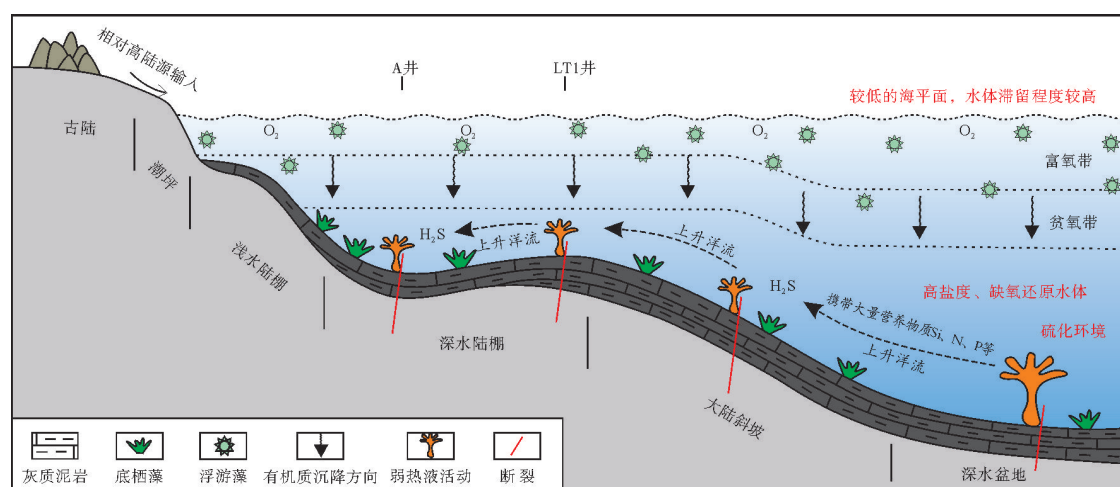
如图6的Al-Co·Mn图版所示,塔河地区玉尔吐斯组沉积期持续受到上升洋流的影响,还有部分样品 $Co_{EF} \cdot Mn_{EF}$ 介于0.5~2.0,推测是受到不稳定季节性上升洋流的影响。这一认识与Co·Mn-Cd/Mo图版分析结果(图8)一致。玉尔吐斯组沉积期上升洋流将热液流体携带的营养物质和缺氧水体搬运至浅水—深水陆棚区,使得底栖藻类、浮游藻类等大量繁殖,水底氧气含量快速消耗,古海洋的初级生产力快速增加。

4.2 有机质富集机理

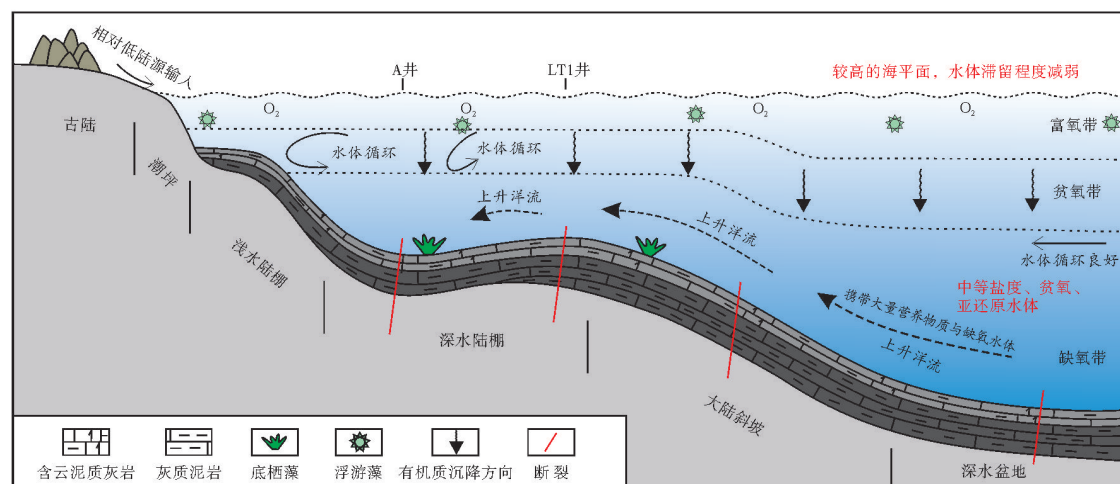
综合研究认为,塔里木盆地塔河地区玉尔吐斯

组富有机质泥岩与阿克苏、柯坪地区,以及全球其他地区特别是古特提斯构造域,具有类似的成因^[24]。有机质的富集不是由单一因素所决定,而是由水体氧化-还原环境、水体滞留程度、上升洋流、弱热液活动等多个要素相互配置与耦合的结果。较弱的热液活动以及持续的上升洋流使得富营养的底水上涌,与正常海水混合后发生大规模扩散,使得底栖藻类、浮游藻类等大量繁殖,提高了古生产力。海侵导致塔河地区所处的深水陆棚相带具有较大水深,加之表层水的有机物沉降耗氧导致底层水处于硫化缺氧状态,有利于富有机质沉积物的保存。

在寒武纪早期全球海侵背景下,大规模海侵使得沉积水体加深,且形成明显分层(图12a)。玉尔吐斯组沉积早期海平面较低,水体滞留程度较高,水体循环程度中等;深部热液流体沿着断裂上涌,



(a) 玉尔吐斯组下段有机质富集模式



(b) 玉尔吐斯组上段有机质富集模式

图12 塔河地区玉尔吐斯组有机质富集模式

Fig. 12 Organic matter enrichment model of Yuertusi Formation in Tahe area

同时携带丰富的P、Fe、Ni和Si等元素与海水混合;上升洋流将这些丰富的营养物质搬运至浅水—深水陆棚区,使得底栖藻类、浮游藻类等大量繁殖,古海洋的初级生产力快速增加,为烃源岩的发育提供良好的物质基础;底部水体整体处于缺氧的还原环境,同时适当的热液活动携带大量硫化物促进了硫化环境的形成,为烃源岩的埋藏、保存提供了有利条件,形成玉尔吐斯组下段这套优质烃源岩。

随着海侵持续,至玉尔吐斯组沉积晚期,水体与广海连通性变好,滞留程度减弱,水体循环良好。海平面上升带来的洋流上涌持续将营养物质与缺氧水体搬运至浅水—深水陆棚区;持续海侵加剧了水体缺氧程度,底栖藻类生物开始死亡,初始生产力水平下降,水体具有中等的古生产力(图12b);后期海侵作用逐渐停止,海平面逐渐下降,滞留水体发生分层,仅局部深水处于贫氧、亚还原环境,保存条件变差,先前沉积的部分有机质被氧化分解,形成玉尔吐斯组上段一套差—中等的烃源岩。

5 结 论

(1)塔河地区下寒武统玉尔吐斯组烃源岩以灰质泥岩、硅质泥岩和泥岩为主,下段有机质丰度高,有机质类型以I型为主,处于高一过成熟阶段,为一套优质烃源岩。

(2)沉积地球化学特征表明:塔河地区玉尔吐斯组下段沉积期处于硫化—缺氧还原的古水体环境,水体滞留程度较高,整体具有较高的古生产力;上段沉积期处于贫氧—亚还原的古水体环境,水体滞留程度减弱,整体具有中等的古生产力。

(3)塔河地区玉尔吐斯组有机质富集主控因素变化与海平面变化引起的沉积古环境变化密切相关。玉尔吐斯组有机质的富集是硫化—缺氧还原的保存条件、弱热液活动、上升洋流等多个要素相互配置与耦合共同导致的结果。弱热液活动与上升洋流为优质烃源岩发育提供了营养物质基础,中等滞留的沉积环境为有机质的富集提供了良好的外部条件,硫化—缺氧还原环境是有机质保存的关键。

参 考 文 献

- [1] 杨海军,陈永权,田军,等.塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J].中国石油勘探,2020,25(2): 62-72.
YANG Haijun, CHEN Yongquan, TIAN Jun, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in Well Luntan-1 of the Tarim Basin[J]. China petroleum exploration, 2020, 25(2): 62-72.
- [2] 乔博,高志前,樊太亮,等.塔里木盆地寒武系台缘结构特征及其演化[J].断块油气田,2014,21(1): 7-11.
QIAO Bo, GAO Zhiqian, FAN Tailiang, et al. Structural characteristics and evolution of Cambrian platform margin in Tarim Basin[J]. Fault-block oil and gas field, 2014, 21(1): 7-11.
- [3] 吕海涛,耿锋,尚凯.塔里木盆地寒武系盐下领域勘探关键问题与攻关方向[J].石油与天然气地质,2022,43(5): 1049-1058.
LÜ Haitao, GENG Feng, SHANG Kai. Key factors and directions of exploration in the Cambrian pre-salt sequence, Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2022, 43(5): 1049-1058.
- [4] 杨赞昊,高志前,樊太亮,等.下寒武统黑色岩系沉积环境与控烃差异:以塔里木盆地西北缘和东北缘为例[J].断块油气田,2022,29(1): 47-52.
YANG Yunhao, GAO Zhiqian, FAN Tailiang, et al. The differences of sedimentary environment and hydrocarbon control of Lower Cambrian black rock series: a case study of northwestern and northeastern margin, Tarim Basin[J]. Fault-block oil and gas field, 2022, 29(1): 47-52.
- [5] 朱传玲,闫华,云露,等.塔里木盆地沙雅隆起星火1井寒武系烃源岩特征[J].石油实验地质,2014,36(5): 626-632.
ZHU Chuanling, YAN Hua, YUN Lu, et al. Characteristics of Cambrian source rocks in Well XH1, Shaya Uplift, Tarim Basin[J]. Petroleum geology and experiment, 2014, 36(5): 626-632.
- [6] 陈新军,蔡希源,高志前,等.寒武、奥陶纪海平面变化与烃源岩发育关系:以塔里木盆地为例[J].天然气工业,2005,25(10): 18-20, I0020.
CHEN Xinjun, CAI Xiyuan, GAO Zhiqian, et al. The relationship between sea level change and source rock development of Cambrian-Ordovician in Tarim Basin[J]. Natural gas industry, 2005, 25(10): 18-20, I0020.
- [7] 金值民,谭秀成,唐浩,等.浅水超覆沉积富有机质细粒沉积物沉积环境与岩石学特征:以塔里木盆地西北部寒武系玉尔吐斯组为例[J].石油勘探与开发,2020,47(3): 476-489.
JIN Zhimin, TAN Xiucheng, TANG Hao, et al. Sedimentary environment and petrological features of organic-rich fine sediments in shallow water overlapping deposits: a case study of Cambrian Yuertus Formation in northwestern Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 2020, 47(3): 476-489.
- [8] 张春宇,管树巍,吴林,等.塔西北地区早寒武世玉尔吐斯组热液作用及沉积模式[J].地学前缘,2019,26(1): 202-211.
ZHANG Chunyu, GUAN Shuwei, WU Lin, et al. Hydrothermal activity and depositional model of the Yurtus Formation in the Early Cambrian, NW Tarim, China[J]. Earth science frontiers,

- 2019, 26(1): 202–211.
- [9] 马庆佑, 曹自成, 蒋华山, 等. 塔河—顺北地区走滑断裂带的通源性及其与油气富集的关系[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 327–334.
- MA Qingyou, CAO Zicheng, JIANG Huashan, et al. Source-connectivity of strike slip fault zone and its relationship with oil and gas accumulation in Tahe–Shunbei area, Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(4): 327–334.
- [10] 邱华标, 印婷, 曹自成, 等. 塔里木盆地塔中北坡走滑断裂特征与奥陶系油气勘探[J]. 海相油气地质, 2017, 22(4): 44–52.
- QIU Huabiao, YIN Ting, CAO Zicheng, et al. Strike-slip fault and Ordovician petroleum exploration in northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2017, 22(4): 44–52.
- [11] 朱光有, 胡剑凤, 陈永权, 等. 塔里木盆地轮探1井下寒武统玉尔吐斯组烃源岩地球化学特征与形成环境[J]. 地质学报, 2022, 96(6): 2116–2130.
- ZHU Guangyou, HU Jianfeng, CHEN Yongquan, et al. Geochemical characteristics and formation environment of source rock of the Lower Cambrian Yuertusi Formation in well Luntan-1 in Tarim Basin [J]. Acta geologica sinica, 2022, 96(6): 2116–2130.
- [12] 肖斌, 郭东旭, 冯明飞, 等. 渝东北五峰组—龙马溪组黑色页岩有机质富集主控因素[J]. 断块油气田, 2024, 31(1): 18–25, 49.
- XIAO Bin, GUO Dongxu, FENG Mingfei, et al. Main controlling factors for organic matter enrichment in black shale of Wufeng–Longmaxi Formation in northeast Chongqing [J]. Fault-block oil and gas field, 2024, 31(1): 18–25, 49.
- [13] 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, USA [J]. Chemical geology, 1992, 99(1/3): 65–82.
- [14] 付小东, 陈娅娜, 罗冰, 等. 四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义[J]. 地质学报, 2021, 95(6): 1903–1920.
- FU Xiaodong, CHEN Yana, LUO Bing, et al. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan Basin [J]. Acta geologica sinica, 2021, 95(6): 1903–1920.
- [15] 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.
- [16] 肖斌, 刘树根, 冉波, 等. 基于元素 Mn、Co、Cd、Mo 的海相沉积岩有机质富集因素判别指标在四川盆地北缘的应用[J]. 地质论评, 2019, 65(6): 1316–1330.
- XIAO Bin, LIU Shugen, RAN Bo, et al. Identification of organic matter enrichment factors in marine sedimentary rocks based on elements Mn, Co, Cd and Mo: application in the northern margin of Sichuan Basin, South China [J]. Geological review, 2019, 65(6): 1316–1330.
- [17] ALGEO T J, TRIBOVILLARD N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum–uranium covariation [J]. Chemical geology, 2009, 268(3/4): 211–225.
- [18] ALGEO T J, LYONS T W. Mo–total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions [J]. Paleoceanography, 2006, 21(1): PA1016.
- [19] SWEERE T, VAN DEN BOORN S, DICKSON A J, et al. Definition of new trace-metal proxies for the controls on organic matter enrichment in marine sediments based on Mn, Co, Mo and Cd concentrations [J]. Chemical geology, 2016, 441: 235–245.
- [20] 何龙, 王云鹏, 陈多福, 等. 重庆南川地区五峰组—龙马溪组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(2): 203–218.
- HE Long, WANG Yunpeng, CHEN Duofu, et al. Relationship between sedimentary environment and organic matter accumulation in the black shale of Wufeng–Longmaxi Formations in Nanchuan area, Chongqing [J]. Natural gas geoscience, 2019, 30(2): 203–218.
- [21] MURRAY R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications [J]. Sedimentary geology, 1994, 90(3/4): 213–232.
- [22] KIDDER D L, KRISHNASWAMY R, MAPES R H. Elemental mobility in phosphatic shales during concretion growth and implications for provenance analysis [J]. Chemical geology, 2003, 198(3/4): 335–353.
- [23] BOSTRÖM K, PETERSON M N A, JOENSUU O, et al. Aluminum-poor ferromanganoan sediments on active oceanic ridges [J]. Journal of geophysical research, 1969, 74(12): 3261–3270.
- [24] 孙候雪, 郝芳, 王奇, 等. 早寒武世玉尔吐斯组烃源岩沉积环境与有机质富集机制[J]. 高校地质学报, 2024, 30(5): 622–633.
- SUN Houxue, HAO Fang, WANG Qi, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of the Yuertusi Formation source rocks during Early Cambrian Period [J]. Geological journal of China universities, 2024, 30(5): 622–633.

Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of the Lower Cambrian Yuertusi Formation in Tahe area, Tarim Basin

ZHANG Wenwen¹, XU Qinqi¹, SHANG Kai¹, ZHANG Nan²,
LIAO Qifeng¹, LIN Jingwen¹, LI Shuai¹

1. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Northwest Oilfield Company;

2. Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC Northwest Oilfield Company

Abstract: The Lower Cambrian Yuertusi Formation is an important source rock layer in Tarim Basin. The research on the organic matter enrichment mechanism could provide valuable guidance for the exploration of ultra-deep marine oil and gas reserves. Based on data of mineral petrology, inorganic geochemistry, and elemental analysis of Well A, combined with data of Well LT1 cited from reference, this study explores the sedimentary paleoenvironment of the Yuertusi Formation source rock in Tarim Basin and its control on organic matter enrichment, with integrated element geochemical indicators such as paleoproductivity, redox conditions and others. The results show that: (1) Yuertusi Formation in the Tahe area has high organic matter content, and the organic matter quality of the lower section, with an average *TOC* of 6%, is superior to the upper section. (2) Paleoproductivity level (P/Ti , Ba_{bio}), water retention degree (Mo/TOC , $Co \cdot Mn$), terrigenous detrital input (Ti/Al) and anoxia degree (Ni/Co , U/Th , V/Sc) show a gradual decreasing trend from early to late period of Yuertusi Formation. (3) Closely corresponded with variations in the sedimentary paleoenvironment induced by sea level fluctuations, the organic matter enrichment in the Yuertusi Formation is jointly influenced by preservation conditions, weak hydrothermal activity, and upwelling currents. In the early stage of Yuertusi, under a sea level of relatively low, a medium-high water retention developed, and the weak hydrothermal activity made the bottom seawater being in an anoxic state, and the long-term anoxic and sulfidation environment was conducive to the preservation of organic matter, thus the lower section of Yuertusi Formation with high *TOC* formed. In the late stage of Yuertusi, the sea level experienced fluctuating rise and gradual decline, the water retention degree reduced under the high sea level, and when the sea level decreased significantly, the environment gradually changed from anoxic to oxygen-poor, which may lead to the oxidation and decomposition of some organic matter, thus the upper section with low *TOC* formed.

Key words: geochemical characteristics; paleoenvironment; organic matter enrichment; Yuertusi Formation; Cambrian; Tahe area; Tarim Basin

ZHANG Wenwen, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in seismic-geological comprehensive interpretation. Add: No. 466 Changchun South Rd., Xinshi District, Urumqi, Xinjiang 830011, China. E-mail: 2537536180@qq.com

XU Qinqi, Corresponding author: Associate Researcher, mainly engaged in petroleum geology. Add: No. 466 Changchun South Rd., Xinshi District, Urumqi, Xinjiang 830011, China. E-mail: xuqq.xbsj@sinopec.com