

文章编号: 1671-1505(2024)05-1090-18 DOI: 10.7605/gdtxb.2024.05.082

# 渤海湾盆地临清坳陷西部山西组—太原组海陆过渡相 泥页岩沉积环境及有机质富集\*

王 阳<sup>1,2</sup> 张涵宇<sup>1,2</sup> 朱炎铭<sup>1,2</sup> 秦 勇<sup>1,2</sup>  
陈尚斌<sup>1,2</sup> 王之炫<sup>1,2</sup> 曹 婉<sup>1,2</sup>

1 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008

2 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116

**摘要** 海陆过渡相页岩气勘探开发处于初级阶段, 而渤海湾盆地临清坳陷西部石炭—二叠系山西组—太原组泥页岩具有良好的生烃潜力, 也是中国海陆过渡相页岩气开发的重要层位。为研究山西组—太原组泥页岩沉积环境与有机质富集关系, 以 XJ1 井为研究对象, 系统开展了岩石矿物、有机地球化学、元素地球化学以及数值分析等工作。研究表明: 研究区山西组—太原组泥页岩脆性矿物含量低、黏土矿物含量高, 压裂难度大, TOC 含量平均值为 4.03%, 属于优质烃源岩, 具备页岩气勘探开发潜力; 太原组泥页岩沉积时期处于温暖湿润的气候条件, 具有频繁变化的陆源碎屑输入、较低的沉积速率以及低—中等古生产力水平, 沉积水体为海水沉积, 处于缺氧还原和中等滞留环境; 山西组泥页岩沉积时期, 古气候条件复杂多变, 具有稳定且较高的陆源碎屑输入、中等的沉积速率以及中—高等古生产力水平, 沉积水体为微咸水—海水沉积, 处于缺氧还原和中等—强滞留环境。根据古环境条件与 TOC 含量的线性相关性、灰色关联度以及稳健回归分析, 认为太原组泥页岩有机质富集主要受控于古气候、古氧化还原以及古水体盐度条件, 而山西组泥页岩有机质富集主要受控于古气候以及陆源碎屑输入条件。

**关键词** 渤海湾盆地 临清坳陷西部 山西组—太原组 海陆过渡相泥页岩 沉积环境 有机质富集

**第一作者简介** 王阳, 男, 1989 年生, 副教授、博士生导师, 中国矿业大学资源与地球科学学院副主任, 主要研究方向为煤层气、页岩气地质。E-mail: wangycumt@163.com。

中图分类号: P512.2, P618.130.1 文献标志码: A

## Sedimentary environment and organic matter enrichment of marine-continental transitional shale in the Shanxi-Taiyuan Formations in western Linqing Depression, Bohai Bay Basin, China

WANG Yang<sup>1,2</sup> ZHANG Hanyu<sup>1,2</sup> ZHU Yanming<sup>1,2</sup> QIN Yong<sup>1,2</sup>  
CHEN Shangbin<sup>1,2</sup> WANG Zhixuan<sup>1,2</sup> CAO Wan<sup>1,2</sup>1 China University of Mining and Technology, Key Laboratory of Coalbed Methane Resources &  
Reservoir Formation Process, Ministry of Education, Jiangsu Xuzhou 221008, China

2 China University of Mining and Technology, School of Resources and Geosciences, Jiangsu Xuzhou 221116, China

\* 国家自然科学基金项目 (编号: 42172156, 41802183, 42030810) 和中国矿业大学英才培育工程专项 (编号: 2022YCPY0201) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42172156, 41802183, 42030810) and the Talent Cultivation Project of China University of Mining and Technology (No. 2022YCPY0201)]

收稿日期: 2023-06-26 改回日期: 2024-04-17

**Abstract** The exploration and development of marine-continental transitional shale gas is in the primary stage. The Shanxi-Taiyuan Formations shale has good hydrocarbon generation potential and is also an important horizon for the development of marine-continental transitional shale gas in China. In order to explore the relationship between sedimentary environment and organic matter enrichment of the Shanxi-Taiyuan Formations shale in the western Linqing Depression, Bohai Bay Basin, Well XJ1 was investigated in detail by means of petrology, organic geochemistry, element geochemistry and numerical analysis. The results show that the Shanxi-Taiyuan Formations shale is characterized by a low content of brittle minerals, a high content of clay minerals and a high resistance to hydraulic fracturing. It is also found that the Shanxi-Taiyuan Formations shale comprises a high-quality source rock with an average TOC content of 4.03%, which has the potential for shale gas exploration and development. During the deposition of the Taiyuan Formation mudstone/shale, the study area featured an anoxic, moderately stagnant oceanic environment under a warm and humid climate, with frequent variations in terrigenous debris influx, low deposition rate and low to medium paleoproductivity level. During the deposition of the Shanxi Formation mudstone/shale, the study area featured anoxic, moderately to strongly stagnant and brackish to brine seawater under complex and ever-changing paleoclimatic conditions, with a stable and high terrigenous debris influx, medium deposition rate and medium to high paleoproductivity level. Given the linear correlation, grey correlation and robust regression analysis between paleoenvironmental conditions and TOC content, it is concluded that the enrichment of organic matter in the Taiyuan shale is mainly controlled by paleoclimate, paleoredox and ancient water salinity conditions, while the enrichment of organic matter in the Shanxi shale is mainly controlled by paleoclimate and terrigenous debris input conditions.

**Key words** Bohai Bay Basin, western Linqing Depression, Shanxi-Taiyuan Formations, marine-continental transitional shale, sedimentary environment, organic matter enrichment

**About the first author** WANG Yang, born in 1989, is an associate professor, doctoral supervisor, and the associate director of School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology. His main research direction is coalbed methane and shale gas geology. E-mail: wangycumt@163.com.

## 1 概述

近年来, 中国页岩气开发取得了重大进展, 现有探明的地质资源量已达  $80 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 并根据页岩沉积环境划分为 3 种类型: 海相、海陆过渡相以及陆相 (邹才能等, 2015; 董大忠等, 2021; Ding *et al.*, 2021; 郭为等, 2023)。海相页岩气已得到高效的开发, 并实现了 10 万亿方的突破 (邹才能等, 2015), 而中国海陆过渡相页岩气资源储量丰富, 开发潜力巨大, 但地质研究仍处于初级阶段, 海陆过渡相页岩有机质富集的主控因素和富集模式的研究仍然薄弱。

前人研究表明, 渤海湾盆地石炭系—二叠系发育 1 套海陆过渡相的煤系地层, 其中暗色页岩具有累计厚度大、有机质丰度高的特点, 具有良好的生烃潜力 (He *et al.*, 2016; 鄢继华等, 2019)。研究

区临清坳陷是渤海湾盆地重要的油气勘探区, 前人对临清坳陷晚古生代太原组—山西组含煤地层的沉积环境、烃源岩特征、岩相古地理、生烃演化以及成藏条件等方面做了大量研究, 并实现了石炭—二叠系煤成气勘探重大突破, 建立了煤成气成藏模式 (陈武珍等, 2012; 胡小成等, 2015; 陈天宇, 2020; Miao *et al.*, 2020)。然而, 迄今为止对临清坳陷石炭—二叠系页岩气勘探开发程度较低, 针对该地区的泥页岩有机质富集的主控因素和富集模式的研究仍相对薄弱, 制约了该区页岩气勘探进程。

本研究通过对渤海湾盆地临清坳陷西部 XJ1 井山西组—太原组泥页岩进行取样, 并开展岩石矿物、有机地球化学以及元素地球化学分析研究, 厘清山西组—太原组富有机质泥页岩古环境因素特征 (包括陆源碎屑输入、沉积速率、古气候特征、古

水矿化度、古生产力、古氧化还原、沉积水体受限程度等),并结合数值分析方法对泥页岩有机质富集的主控因素进行判断,进而探讨海陆过渡相泥页岩有机质富集模式,以期对渤海湾盆地海陆过渡相页岩气勘探提供理论依据。

## 2 地质概况

临清坳陷位于渤海湾盆地西南部,总体上呈北北东—北东向展布。临清坳陷是一个经历了多旋回构造运动的中—新生代陆相断陷沉降区。临清坳陷西部是指北到邢衡隆起,南抵内黄隆起,西至太行山隆起,东以馆陶低凸起和武城凸起与临清坳陷东部相隔的区域,包括丘县、巨鹿等4个凹陷以及鸡泽和广宗2大凸起,呈“凹凸相间和东西分带”的构造格局(图1-a)。根据区内XJ1钻井信息揭露,地层自下而上依次发育本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组。其中,太原组以砂岩、黑色泥页岩、煤层以及薄层灰岩为

主,厚度为71.33 m;山西组以砂岩、泥页岩以及薄层煤层为主,厚度为69.5 m(图1-b)。

本次研究的目的是层位是太原组和山西组,这套地层在研究区内分布范围较广。太原组沉积阶段,华北板块受到西伯利亚板块的挤压作用,地层由北低南高变转为北高南低,海侵方向由东北方向转为东南方向,因此,临清坳陷西部区域自东南向西北依次沉积发育碳酸盐岩台地相、潮坪相、潟湖相以及障壁岛沉积相(图2-a)。潮坪相周围沉积大量泥页岩,这些泥页岩成为良好的烃源岩;山西组沉积阶段,华北板块受到进一步的挤压作用,华北板块北缘不断抬升,海水从东南方向全部退出,开始发育河控三角洲沉积(分流河道以及分流间湾),分流河道沉积中心发育大量的泥页岩沉积,为页岩气资源提供物质基础(吕大炜等,2012;赵洪刚等,2012;陈天宇,2020)(图2-b)。

## 3 样品和研究方法

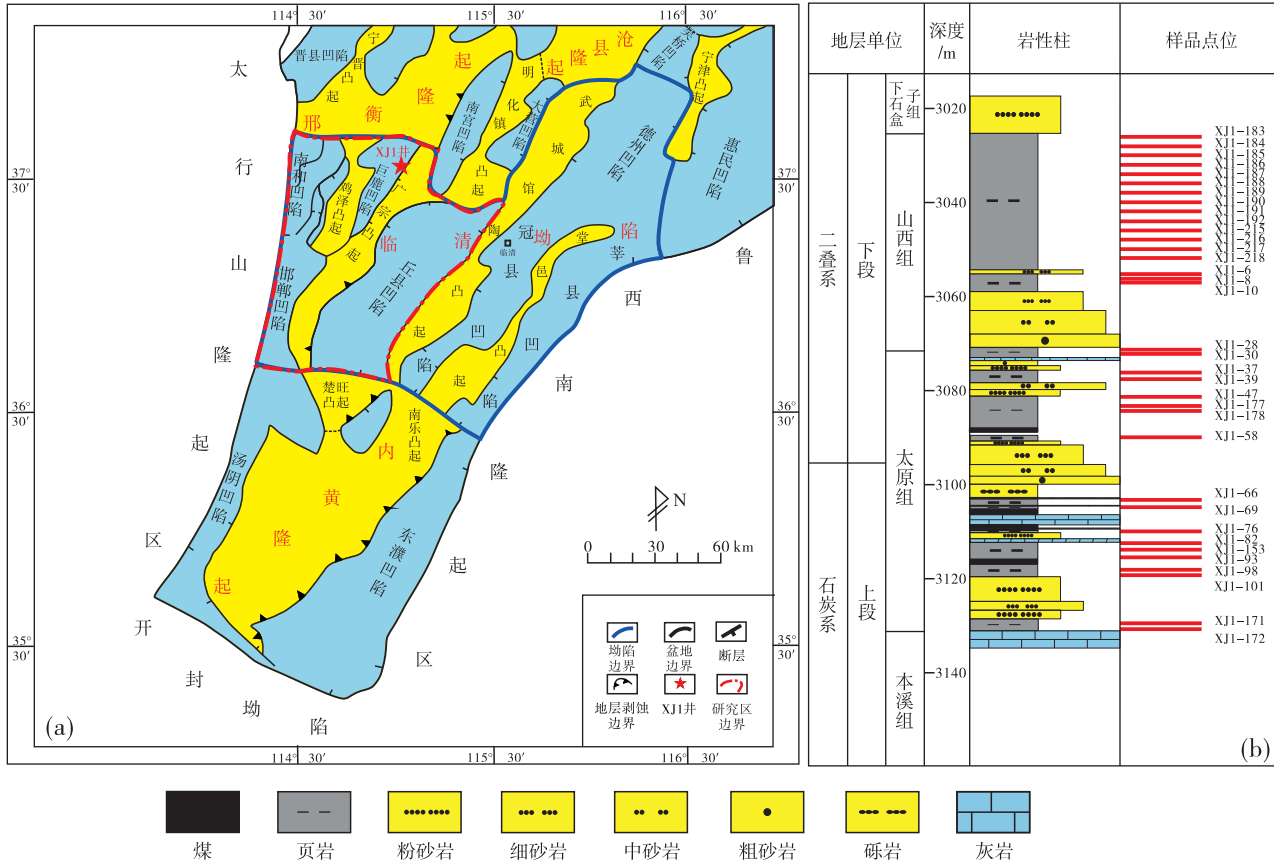


图1 渤海湾盆地临清坳陷西部地区位置 (a)(修改自赵洪刚等, 2012) 以及XJ1井石炭系—二叠系地层及样品点位 (b)  
 Fig.1 Location of western Linqing Depression of Bohai Bay Basin (a)(modified from Zhao et al., 2012) and the Carboniferous-Permian of Well XJ1 and sample point distribution (b)

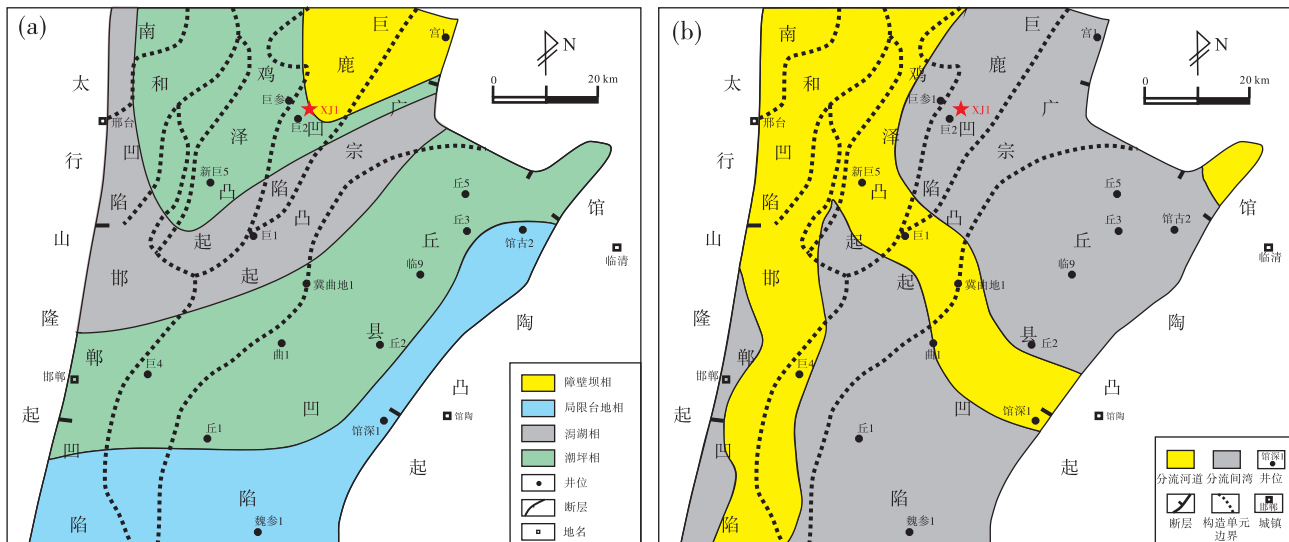


图 2 临清拗陷西部太原组 (a) —山西组 (b) 岩相古地理图 (修改自吕大炜等, 2012; 陈天宇, 2020)

Fig. 2 Lithofacies palaeogeographic maps of the Taiyuan (a) -Shanxi Formations (b) in western Linqing Depression (modified from Lü *et al.*, 2012; Chen, 2020)

临清拗陷石炭系—二叠系地层中沉积的暗色泥页岩、碳质泥页岩具有单层厚度小、层数多、互层频繁、总体厚度大的特点, 具备赋存页岩气的地质条件。采集的样品岩性以泥页岩和碳质页岩为主, 按岩性特征和采样间隔 (1~2 m) 共采集了 35 个岩心样品, 其中山西组 17 个样品, 太原组 18 个样品 (图 1-c)。对泥页岩样品进行岩心描述、实验分析, 为石炭—二叠系沉积环境分析以及泥页岩有机质富集机制研究提供重要数据。泥页岩样品分析包括总有机碳 (TOC) 含量检测、常量以及微量元素含量检测、XRD 全岩矿物定量分析、黏土矿物 X 衍射定量分析以及岩石热解分析。以上分析测试均在山东省煤田地质规划勘察研究院实验室进行。

总有机碳 (TOC) 含量检测依据沉积岩中总有机碳的测定方法, 使用 CS-230 碳硫分析仪按照中国标准 (GB/T19145-2003) 对样品进行分析测试; 常量元素分析使用耐火材料 X 射线荧光光谱化学分析熔铸玻璃片法, 按照中国标准 (GB/T21114-2007) 进行测定; 微量元素分析使用硅酸盐岩石化学分析方法, 按照中国标准 (GB/T14506.30-2010), 对样品进行测定; XRD 全岩矿物定量分析测试以及黏土矿物 X 衍射定量分析检测通过使用 Rigaku SmartLab9 X 射线衍射仪, 按照国标 (SY/T5163-2018) 进行分析测试, 进一步确定泥页岩的脆性程度; 岩石热解分析使用 OGE-VI 岩石热解

仪依据中国标准 (GB/T 18602-2012) 实验方法对样品进行分析, 进一步分析泥页岩有机质生烃潜力。

## 4 结果

### 4.1 岩性矿物特征

通过详细观察岩心样品, 发现烃源岩层段均具有较强的非均质性。山西组岩心岩性主要包括深灰色含碳泥页岩、灰色砂质泥页岩、灰色泥页岩以及灰色细砂岩、薄煤层互层等 (图 3-a, 3-d)。太原组岩心岩性主要为深灰色泥质粉砂岩、灰黑色泥页岩、灰色灰岩、黑色煤等 (图 3-b, 3-c, 3-e)。

岩心样品的 X 射线衍射结果显示, 山西组泥页岩矿物成分主要为黏土矿物和碎屑成分 (石英和长石), 其中脆性矿物 (石英、长石和黄铁矿) 含量平均值为 37.2%; 太原组泥页岩脆性矿物含量相对较高, 平均值为 41.8%。山西组泥页岩的脆性矿物含量低于压裂可行性的最低标准 (脆性矿物含量为 40%), 而太原组达到压裂可行性最低标准, 但山西组、太原组黏土矿物含量平均值分别为 46.28% 和 49.18%, 远高于北美商业开发海相页岩黏土矿物含量 (小于 30%) (Liu *et al.*, 2017) (附表 4)。

山西组—太原组黏土矿物主要为伊利—蒙脱石混层矿物 (平均值分别为 55.33% 和 33.33%) 和



a—山西组含碳泥页岩、灰色砂质泥页岩；b—太原组灰色细砂岩；c—太原组灰黑色泥页岩；  
d—山西组典型泥岩—粉砂岩；e—太原组典型泥页岩

图 3 临清拗陷西部 XJ1 井山西组—太原组典型岩心岩性照片

Fig. 3 Core lithologic photos of the Shanxi-Taiyuan Formations of Well XJ1 in western Linqing Depression

高岭石（平均值分别为 31.67% 和 45.5%）。临清拗陷西部海陆过渡相泥页岩与北美海相含气页岩相比，其脆性矿物含量相对较低，勉强达到水力压裂标准，黏土矿物含量相对较高，压裂难度较高。

#### 4.2 有机质丰度

有机质是油气生成的物质基础，因此有机质丰度可以有效地评价烃源岩生烃潜力。依据中国陆相烃源岩评价标准（SY/T 5735-1995）（表 1），使用总有机碳（TOC）含量、生烃潜量（ $S_1+S_2$ ）来评价研究区烃源岩有机质丰度。

表 1 陆相烃源岩有机质丰度评价标准  
Table 1 Evaluation criteria for organic matter abundance of continental source rocks

指标	非烃源岩	差烃源岩	中等烃源岩	好烃源岩	极好烃源岩
TOC/%	<0.4	0.4~0.6	>0.6~1.0	>1.0~2.0	>2.0
$S_1+S_2/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	—	<2	2~6	>6~20	>20

山西组泥页岩 TOC 含量平均值为 4.09%，而且大部分样品达到极好烃源岩标准，太原组泥页岩 TOC 含量平均值为 3.97%，而且有 50% 的样品达到极好烃源岩标准（图 4-b；表 1）；山西组泥页岩

生烃潜量（ $S_1+S_2$ ）平均为 15.63 mg/g，均达到烃源岩标准，其中 35% 的样品为差烃源岩类型，41% 的泥页岩样品达到好烃源岩类型以上，太原组泥页岩生烃潜量（ $S_1+S_2$ ）平均为 21.24 mg/g，泥页岩样品均达到烃源岩标准，其中大部分样品为差烃源岩类型，部分样品达到好烃源岩类型以上（图 4-a；表 1；附表 1；附表 5）。

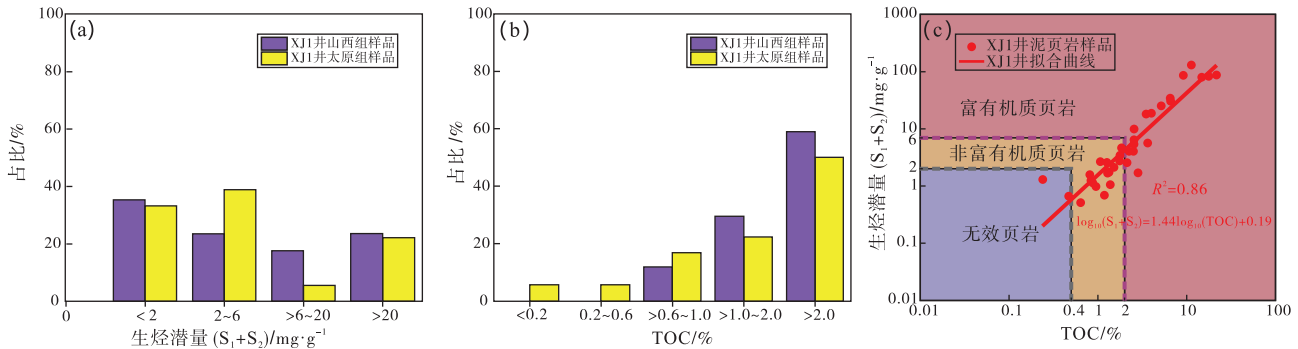
根据泥页岩样品曲线拟合方程为  $\log_{10}(S_1+S_2) = 1.44\log_{10}(\text{TOC}) + 0.19$  ( $R^2 = 0.86$ )（图 4-c），TOC 含量与生烃潜量具有较好的相关性，泥页岩样品大部分落入富有机质岩区域以及非富有机质岩区域，仅有 2 个样品落入非有效岩区域（He *et al.*, 2016），表明研究区山西组—太原组泥页岩具有良好的生烃物质基础。

## 5 讨论

### 5.1 古环境

#### 5.1.1 陆源碎屑输入与沉积速率

陆源碎屑输入以及沉积物沉积速率可以有效地控制沉积物中有机质富集程度，陆源碎屑输入可以将陆源有机质搬运至沉积盆地，进而促进有机质的



a—生烃潜量  $S_1+S_2$  分布；b—TOC 含量分布；c—生烃潜量 ( $S_1+S_2$ ) 与 TOC 含量散点图 (修改自 He *et al.*, 2016)

图 4 临清拗陷西部山西组—太原组 XJ1 井泥页岩有机质丰度和生烃潜力频率分布及岩石分类

Fig. 4 Frequency distribution of organic matter abundance and hydrocarbon generation potential diagram, and classification of Shanxi-Taiyuan Formations mud shale in Well XJ1 in western Linqing Depression

表 2 临清拗陷西部 XJ1 井陆源碎屑通量微量元素指标

Table 2 Trace element indexes of terrestrial debris flux of Well XJ1 in western Linqing Depression

项目	指标	地层		UCC	PAAS
		太原组	山西组		
陆源碎屑通量	Al /wt. %	11.44~37.85 (25.76)	16.31~33.72 (16.31)	8.04	10.01
	Ti /wt. %	0.43~1.42 (1.01)	0.74~1.51 (0.74)	0.38	0.60
	Zr/Al	0.04~0.08 (0.07)	0.06~0.14 (0.06)	—	—
	(La/Yb) <sub>N</sub>	6.76~25.44 (13.36)	5.13~14.35 (8.56)	—	—

注：a~b (c)，a：最大值；b：最小值；c：平均值。

表 3 临清拗陷西部 XJ1 井古气候条件微量元素指标

Table 3 Trace element indexes of paleoclimate conditions of Well XJ1 in western Linqing Depression

项目	指标	地层		温暖湿润	干燥炎热
		太原组	山西组		
古气候条件	Sr/Cu	2.38~30.23 (10.59)	0.94~59.80 (9.30)	1~10	>10
	Rb/Sr	0.10~0.47 (0.29)	0.01~2.26 (0.46)	—	—

注：a~b (c)，a：最大值；b：最小值；c：平均值。

富集。而沉积速率的变化，可以影响有机质的稀释程度 (Khaled *et al.*, 2022)。Al、Ti 和 Zr 元素在地质历史中具有稳定性，其含量变化可以有效地指示陆源碎屑输入程度 (Zhang *et al.*, 2021a; Khaled *et al.*, 2022)。

泥页岩样品中 Ti、Al 元素具有较好的相关性，这表明物源碎屑供给输入具有一致性和稳定性 (图 5-a)。据 Al、Ti 元素含量表明，Al 和 Ti 元素

表 4 临清拗陷西部 XJ1 井古水盐度以及古生产力指标微量元素指标

Table 4 Trace element indexes of paleowater salinity and paleoproductivity of Well XJ1 in western Linqing Depression

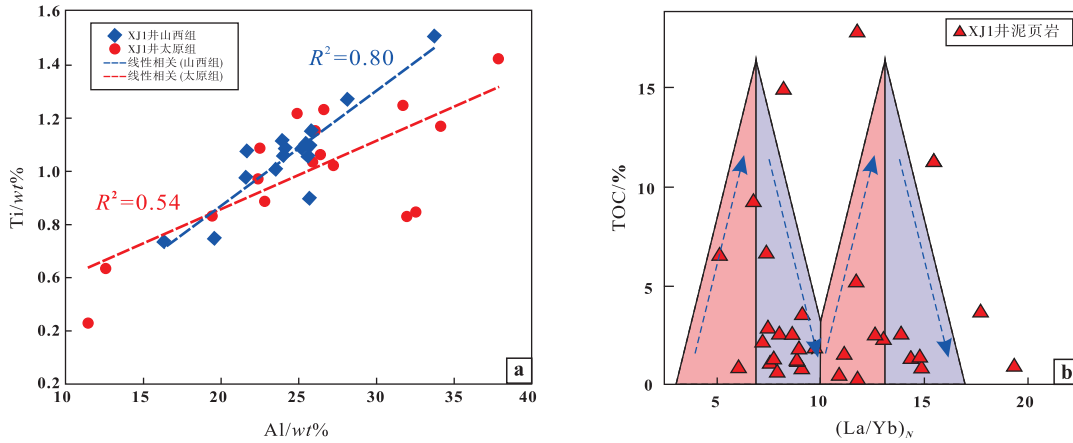
项目	指标	地层		类型		
		太原组	太原组	陆相	海陆过渡相	海相
古水盐度	Sr/Ba	0.24~6.39 (1.77)	0.28~1.05 (0.60)	<0.2	0.2~0.5	>0.5
古生产力	P/Ti	0.03~1.25 (0.22)	0.04~0.49 (0.16)	PAAS 0.12	NASC 0.135	UCC 0.17
	Ba <sub>bio</sub> / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	68.54~1957.83 (310.78)	136.85~4395.56 (744.76)	低等 <200	中等 200~1000	高等 >1000

注：a~b (c)，a：最大值；b：最小值；c：平均值。

含量均高于 UCC 和 PAAS 中 2 元素含量 (表 2; 附表 1)，表明在晚石炭世太原组至早二叠世山西组沉积期间具有较大的陆源碎屑输入量。碎屑通量变化指标 Al、Ti 纵向变化趋势表明 (图 6)，晚石炭世太原组泥页岩沉积时期，虽然伴随着频繁变化的碎屑流入，但整体表现为较高的碎屑输入量，而且太原组灰岩与泥页岩的交替发育表明，太原组海水处于振荡阶段，水动力条件复杂、频繁的海退和海进，使得大量的陆源碎屑物质流入沉积盆地。

在早二叠世山西组沉积阶段，研究区具有较为稳定的碎屑输入。在沉积阶段早期至中期，陆源碎屑输入量相对稳定，可能在此阶段，海平面相对稳定。随后陆源碎屑输入量出现一个波动区间，之后保持较高的陆源碎屑输入量，这可能由于一次突然的海退和海进过程，使得陆源碎屑量发生波动 (图 6)。

(La/Yb)<sub>N</sub> (N 为球粒陨石归一化值) 是评价



a—陆源碎屑通量指标 Ti-Al 散点图；b—稀释条件  $(La/Yb)_N$  和 TOC 关系图

图 5 临清拗陷西部 XJ1 井泥页岩样品的陆源碎屑通量指标以及稀释条件关系图

Fig. 5 Terrestrial debris flux index and dilution condition relationship diagram of mud shale samples from Well XJ1 in western Linqing Depression

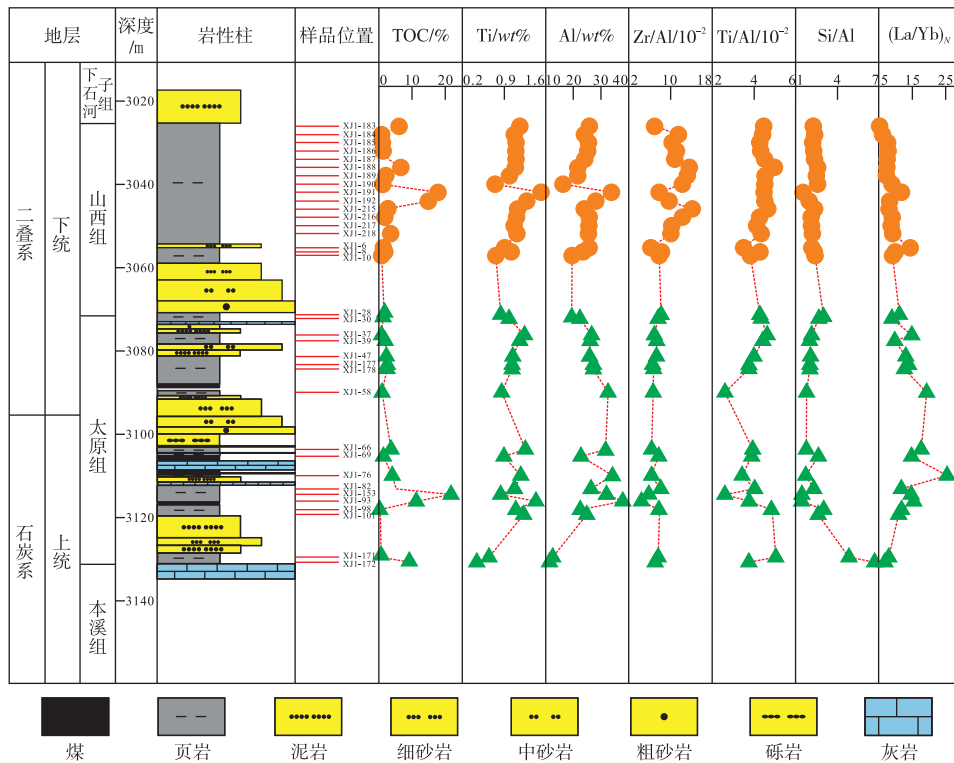


图 6 临清拗陷西部 XJ1 井山西组—太原组海陆过渡相泥页岩 TOC 含量和陆源碎屑通量指数垂向变化

Fig. 6 Vertical variation of TOC content and terrestrial debris flux index of the Shanxi-Taiyuan Formations marine-continental transitional shale in Well XJ1, western Linqing Depression

物源碎屑沉积速率快慢的有效指标 (Tenger *et al.*, 2006)。 $(La/Yb)_N$  与 TOC 含量的散点图显示, 随着  $(La/Yb)_N$  值的增大, TOC 含量表现为先增大、后减小, 再增大、再减小的趋势。而当  $(La/Yb)_N$  值在 7.5 和 12.5 时, TOC 含量达到最高

(图 5-b), 这表明沉积速率的快慢可以控制泥页岩样品中有机质的富集程度。而中等的陆源碎屑沉积速率, 可以有效地富集有机质(丁江辉等, 2021)。XJ1 井太原组到山西组  $(La/Yb)_N$  值介于 8.56~13.36 之间(表 2; 附表 3), 沉积率先减

表 5 临清拗陷西部 XJ1 井样品古氧化还原指标微量元素指标

Table 5 Trace element indexes of paleoredox of samples from Well XJ1 in western Linqing Depression

项目	指标	XJ1 井地层		类型		
		太原组	太原组	氧化 < 2.2	缺氧 2.2~4.25	厌氧 > 4.25
古氧化还原	V/Cr	0.49~3.61(1.77)	1.72~2.92(2.35)	氧化 < 2.2	缺氧 2.2~4.25	厌氧 > 4.25
	V/Sc	5.08~44.78(18.04)	5.92~16.35(9.72)	氧化 < 9.1	厌氧 > 9.1	
	Ce/La	1.48~2.27(1.90)	1.40~2.24(1.88)	氧化 < 1.5	缺氧 1.5~1.8	厌氧 > 1.8
	综合评价	-0.71~1.52(0.52)	0.06~0.62(0.32)	氧化 < 0	厌氧 > 0	

注：a~b (c), a: 最大值; b: 最小值; c: 平均值。

小、后增大，并在山西组沉积时期保持稳定，接近 7.5。这与 Al、Ti 含量纵向变化趋势一致，这表明沉积速率的变化可能与海平面的变化密切相关。

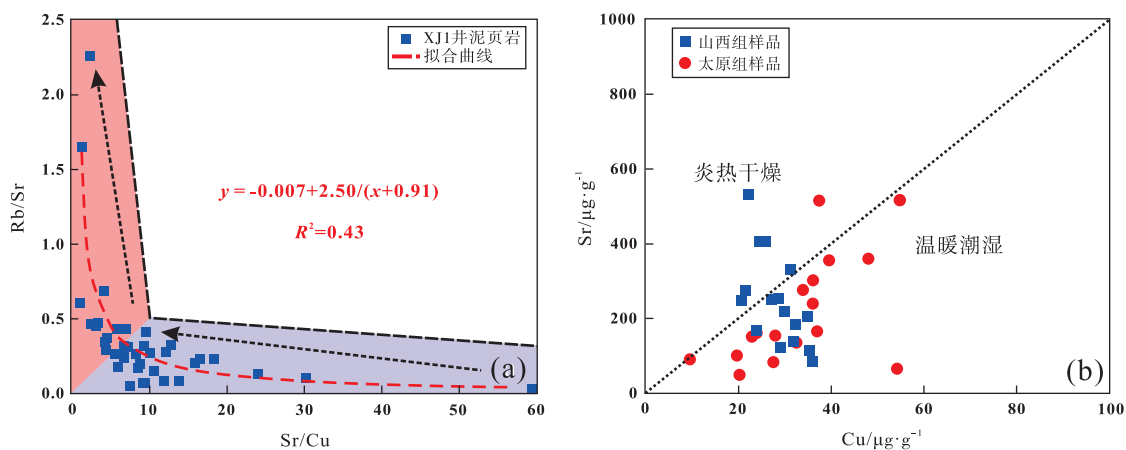
5.1.2 古气候条件

古气候条件可以控制物源碎屑输入沉积盆地的进程，进而影响沉积物中有机质的富集和保存。因此，正确反映海陆过渡相沉积阶段的古气候特征，有助于分析与解释海陆过渡相烃源岩有机质富集的变化特征。微量元素受风化剥蚀、搬运沉积等地质过程的影响较小，可以有效地反映古气候变化过程 (Li *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020)。

微量元素 Sr、Cu 与 Rb 对气候条件反应敏感。在温暖湿润的气候条件下，Sr 会优先流失，而 Cu 和 Rb 元素保持稳定，因此 Sr 与 Cu 元素的浓度比 (Sr/Cu) 以及 Rb 与 Sr 元素的浓度比 (Rb/Sr)，可以指示古气候条件的变化特征 (Li *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021a)。根据泥页岩样品 Rb/Sr 与 Sr/Cu 的相关性分析，XJ1 井泥页岩样品曲线拟合方程为  $y = -0.007 + 2.50/(x + 0.91)$  ( $R^2 = 0.43$ )

(图 7-a)。当 Sr/Cu 值小于 10 时，Rb/Sr 值快速增加。而当 Sr/Cu 值大于 10 时，Rb/Sr 值减小缓慢，表明 Sr 元素含量对气候反应敏感，当降雨量丰富时，Sr 元素含量会快速流失，使得 Rb/Sr 值快速增大；而当气候干旱时，Sr 元素含量保持稳定，使得 Rb/Sr 值缓慢减小(图 7-b)，说明古气候条件与降水量具有良好的相关性。

研究区泥页岩样品中 Sr/Cu 值介于 0.94 ~ 59.80 之间，Rb/Sr 值介于 0.01 ~ 2.26 之间(表 3; 附表 2)，而且太原组到山西组 Sr/Cu 平均值也呈上升趋势 (从 9.30 增至 10.59)，Rb/Sr 平均值呈下降趋势 (从 0.46 减至 0.29)，这表明古气候从温暖湿润转变为干湿交替。垂向变化图(图 8)显示，太原组沉积阶段，仅有 2 个样品 Sr/Cu 值大于 10，其余样品 Sr/Cu 值均小于 10，而且在太原组达到峰值 (59.80)，而 Rb/Sr 值出现谷值 (0.01)。这说明在太原组沉积阶段，主要为温暖湿润的气候条件，在沉积过程中出现气候变化，转为干燥炎热的气候，但干旱炎热的气候并未持续多久(图 8)。在



a—古气候 Rb/Sr-Sr/Cu 双变量图; b—古气候条件 Sr-Cu 判别图

图 7 临清拗陷西部 XJ1 井泥页岩样品古气候分析

Fig. 7 Paleoclimate analysis diagram of mud shale samples from Well XJ1 in western Linqing Depression

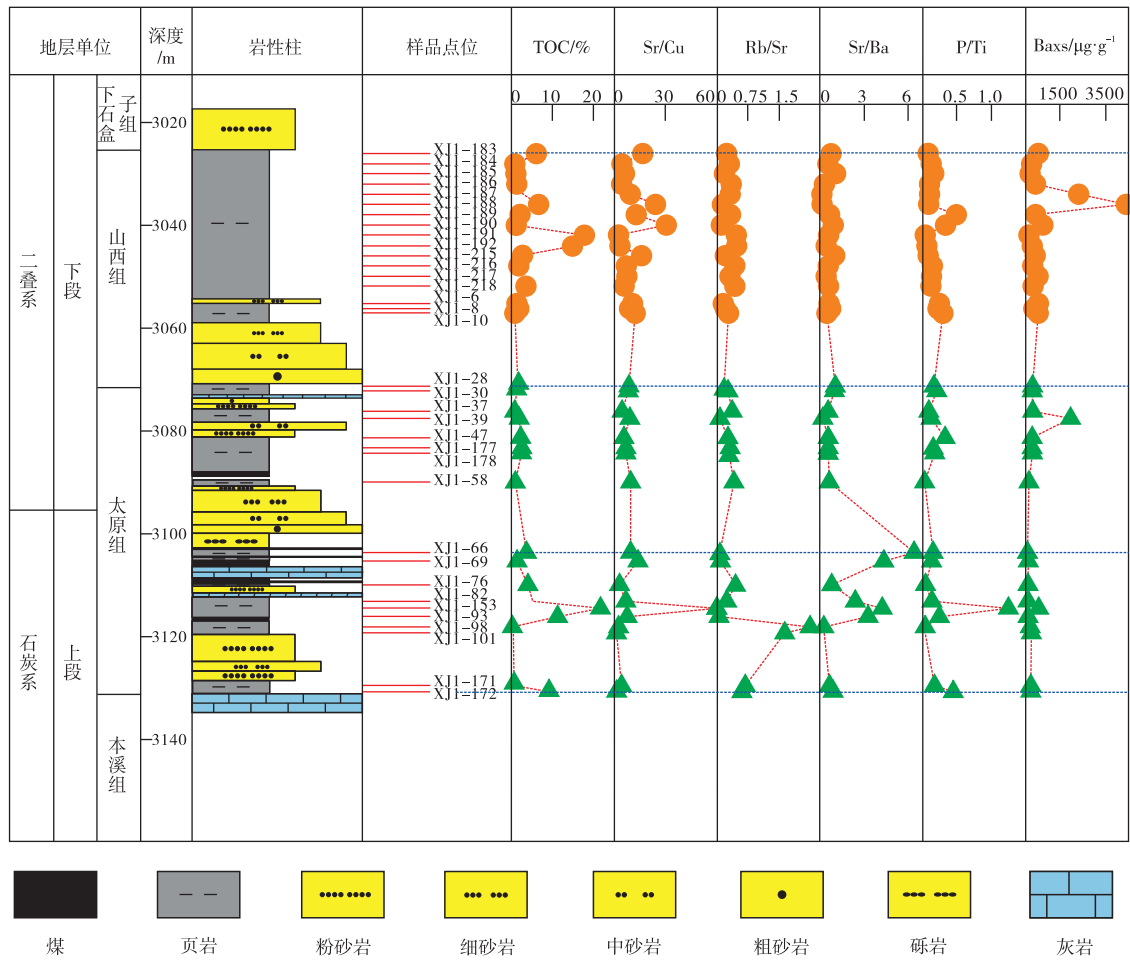


图 8 临清拗陷西部 XJ1 井山西组—太原组海陆过渡相泥页岩 TOC 含量、古气候、古水盐度以及古生产力指标垂向变化  
 Fig. 8 Vertical variation of TOC content, paleoclimate index, paleosalinity and paleoproductivity index of the Shanxi-Taiyuan Formations marine-continental transitional mud shale samples from Well XJ1 in western Linqing Depression

山西组沉积阶段，Sr/Cu 值变化频繁，Rb/Sr 值也呈现波动变化，但总体上表现为当 Sr/Cu 值大于 10 时，Rb/Sr 值小于或接近 0.25，这也说明在此沉积阶段，古气候条件呈现波动变化(图 8)。

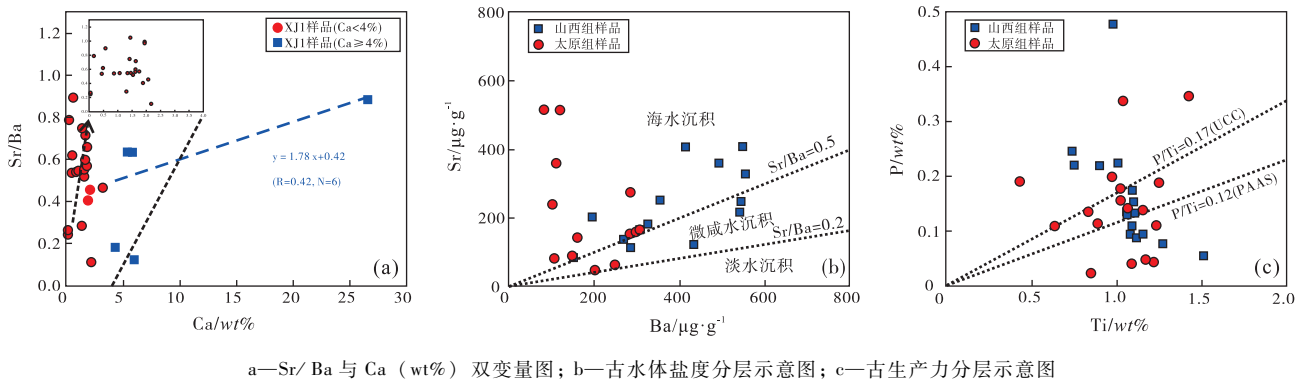
研究区古气候主要为温暖湿润条件。从太原组到山西组，由温暖湿润转变为相对干燥的气候，太原组沉积阶段表现为较为恒定的温暖湿润气候，而山西组气候则呈现波动变化，降雨量时多时少，古气候条件更不稳定。

### 5.1.3 古水体盐度

古水体盐度可以有效地区分沉积环境（海洋、海陆过渡以及大陆），而微量元素 Sr 和 Ba 对盐度变化具有敏感反应，Sr/Ba 值常用作古水体盐度指标 (Zhang *et al.*, 2021a, 2021b)。Sr/Ba 值受多种因素共同控制，并不单一受控于古水体盐度特征 (Wei and Algeo, 2020)。在本研究中，当 Ca 元素

含量高时 ( $Ca \geq 4\%$ )，Sr/Ba 与 Ca 元素含量呈正相关关系。因此，选择  $Ca(wt\%) = 4\%$ ，作为临清拗陷西部石炭—二叠系泥页岩使用 Sr/Ba 值的最大阈值，即当样品中  $Ca(wt\%) \geq 4\%$  时，该样品为无效样品(图 9-a)。此外，沉积物中 Sr/Ba 值  $< 0.2$ 、 $0.2 \sim 0.5$  和  $> 0.5$  分别表示淡水、微咸水和海水沉积环境 (Wei and Algeo, 2020)。

古水体盐度判别图(图 9-b)显示，XJ1 井泥页岩样品主要分布在微咸水和海水沉积。太原组样品 Sr/Ba 值介于 0.24~6.39 之间，平均值为 1.77，代表整体环境为海水环境，少量为微咸水环境(图 9-b; 表 4; 附表 2)。山西组 Sr/Ba 比值介于 0.28~1.05 之间，平均值为 0.60，代表整体环境为微咸水沉积和海水环境(图 9-b)。根据 Sr/Ba 值趋势图(图 8)显示，太原组沉积阶段早期至太原组中期，Sr/Ba 值出现频繁较大的波动变化，陆



a—Sr/Ba 与 Ca (wt%) 双变量图; b—古水体盐度分层示意图; c—古生产力分层示意图

图 9 临清拗陷西部 XJ1 井山西组—太原组泥页岩样品古水体盐度以及古生产力判别图解

Fig. 9 Discrimination diagram of paleowater salinity and paleoproductivity of the Shanxi-Taiyuan Formations mud shale samples in Well XJ1 in western Linqing Depression

源碎屑输入也表现为波动变化，这表明在此沉积阶段，沉积盆地出现频繁的海退和海进。之后在太原组沉积阶段后期至山西组沉积阶段中期 Sr/Ba 值维持在 0.6 左右，说明该阶段，沉积盆地始终处于海洋环境，海平面相对稳定。随后 Sr/Ba 值快速下降后又快速上升并保持稳定，说明在山西组沉积阶段晚期，沉积盆地出现 1 次大规模的海退和海进过程，使得 Sr/Ba 值和陆源碎屑输入量发生波动。

研究区古水矿化度条件显示为微咸水和海水沉积条件。太原组沉积阶段主要为海水，少量为微咸水，山西组沉积阶段为微咸水和海水。

#### 5.1.4 古生产力条件

古生产力是指生物通过生命活动从外界环境中生产积累有机物的过程，它能影响沉积物中有机质含量的高低，进而影响页岩气聚集 (Arsairai *et al.*, 2016)。沉积水体中的营养元素含量 (如 P 和 Ba) 是表征古生产力高低的有效指标 (Algeo and Ingall, 2007)。P 元素含量高低易受陆源碎屑输入量的影响，P/Ti 值可以有效地排除陆源碎屑输入的影响，更加准确地反映古生产力的高低 (Zhao *et al.*, 2021)。其次，生物成因 Ba ( $Ba_{bio}$ ) 含量 (是指 Ba 元素总含量减去陆源碎屑中 Ba 的含量)，通常被用作古生产力指标，其表达式如下 (Francois *et al.*, 1995)：

$$Ba_{bio} = Ba_{tot} - [Al \times (Ba/Al)_{detrital}]$$

其中， $Ba_{bio}$  是指生物成因下的 Ba 含量；Al 和  $Ba_{tot}$  分别为测试样品中 Al 和 Ba 元素的总含量； $(Ba/Al)_{detrital}$  是平均地壳岩石中 Ba/Al 值，范围介于 0.0032 ~ 0.0046 之间，平均值为 0.0039 (Shen

*et al.*, 2015)，本研究中选用 0.0039 来计算生物成因 Ba 含量。此外，当  $Ba_{bio}$  含量 < 200  $\mu\text{g/g}$ 、200 ~ 1000  $\mu\text{g/g}$  和 > 1000  $\mu\text{g/g}$  分别表示古生产力水平低、中等和高。

本研究中泥页岩样品，P 与 Ti 散点图显示主要分布在 UCC 和 PAAS 附近 (图 9-c；表 4；附表 2)，部分样品 P/Ti 值高于 UCC 值，说明生产力水平较高， $Ba_{bio}$  含量介于 68.54 ~ 4395.56  $\mu\text{g/g}$  之间，平均值为 521.57  $\mu\text{g/g}$ ，大多样品古生产力水平中等。其中太原组 P/Ti 平均值为 0.22， $Ba_{bio}$  含量平均值为 310.78  $\mu\text{g/g}$ ，其中有 50% 的样品低于 200  $\mu\text{g/g}$ ，30% 样品 P/Ti 值远小于 0.17，生产力水平低，说明太原组泥页岩古生产力水平具有波动性，推测古生产力高低与海平面活动有关。山西组 P/Ti 平均值为 0.16， $Ba_{bio}$  含量平均值为 744.76  $\mu\text{g/g}$ ，山西组泥页岩 P/Ti 值和  $Ba_{bio}$  含量相对稳定，但在山西组沉积阶段后期达到峰值 (4395.56  $\mu\text{g/g}$ )，这一时期 Sr/Ba 值达到谷值 (0.11) (图 8)，推测古生产力水平与海平面活动相关，当海平面快速下降，大量的海生藻类等生物缺少生存环境，大量死亡后被大量的陆源物质掩埋，使得  $Ba_{bio}$  含量快速增加。

总的来说，临清拗陷西北部古生产力水平主要为中等。晚石炭世—早二叠世沉积阶段，古生产力水平呈现波动性，太原组主要为低和中生产力水平，山西组主要为中生产力水平，部分达到高生产力水平。

#### 5.1.5 古氧化还原条件

氧化还原条件可以影响沉积物中有机质的分解

与保存 (Khaled *et al.*, 2022)。V、Cr、Sc、Ce 和 La 等微量元素对沉积水体的氧化还原条件反应敏感, 其衍生参数可以有效指示沉积水体的氧化还原程度, 例如 V/Cr、V/Sc 以及 Ce/La (表 5)。不同指标在指示沉积水体的氧化还原程度中存在差异 (图 10), 所以通过对测试样品中氧化还原参数进行离散程度计算, 进而确定沉积水体的氧化还原程度, 公式如下:

$$X_{Dis} = \frac{(X - X_N)}{X_N}$$

式中,  $X_{Dis}$  是指测试样品中某一古氧化还原指标的离散程度;  $X$  为测试样品中某一古氧化还原指标的数据;  $X_N$  是某一古氧化还原指标的富氧与缺氧界限值。在本研究中  $X_{Dis}$  值大于 0, 说明沉积水体为缺氧状态, 反之, 则为富氧状态, 而  $X_{Dis}$  值越大, 说明沉积水体缺氧程度越高,  $X_{Dis}$  值越小, 说明富氧程度越高。单一氧化还原指标的离散程度并不能有效地指示沉积水体的氧化还原条件, 通过对各指

标离散程度进行标准化并求和, 综合对多种指标, 对沉积水体氧化还原程度进行计算, 公式如下:

$$X_{assess} = (|X_{1Dis}| + |X_{2Dis}| + \dots + |X_{nDis}|)$$

其中,  $X_{assess}$  是指测试样品按照各氧化还原指标综合后的离散程度;  $X_{1Dis}$ 、 $X_{2Dis}$ 、 $\dots$ 、 $X_{nDis}$  是指各测试样品某一古氧化还原指标的离散程度;  $|X|$  是指对氧化还原指标进行标准化, 减小单一指标的影响, 本研究中, 总氧化还原程度计算为:

$$X_{assess} = \left( \frac{(X-2.2)}{2.2} + \frac{(X-1.5)}{1.5} + \dots + \sqrt[4]{\frac{(X-9.1)}{9.1}} \right)$$

由于 V/Cr 和 Ce/La 的富氧与缺氧界限值相差不大, 数值离散化后, 数值相差较小, 而 V/Cr 的富氧与缺氧界限值为 9.1, 与其余 2 组氧化还原指标界限值相差较大, 所以对 V/Cr 数据进行标准化, 使其数值接近 V/Cr 和 Ce/La 的测试值。

本研究中, 太原组综合评价指标介于 -0.71 ~ 1.52 之间, 平均值为 0.52, 仅有 1 个样品处于富氧区, 说明在太原组沉积阶段主要为缺氧环境

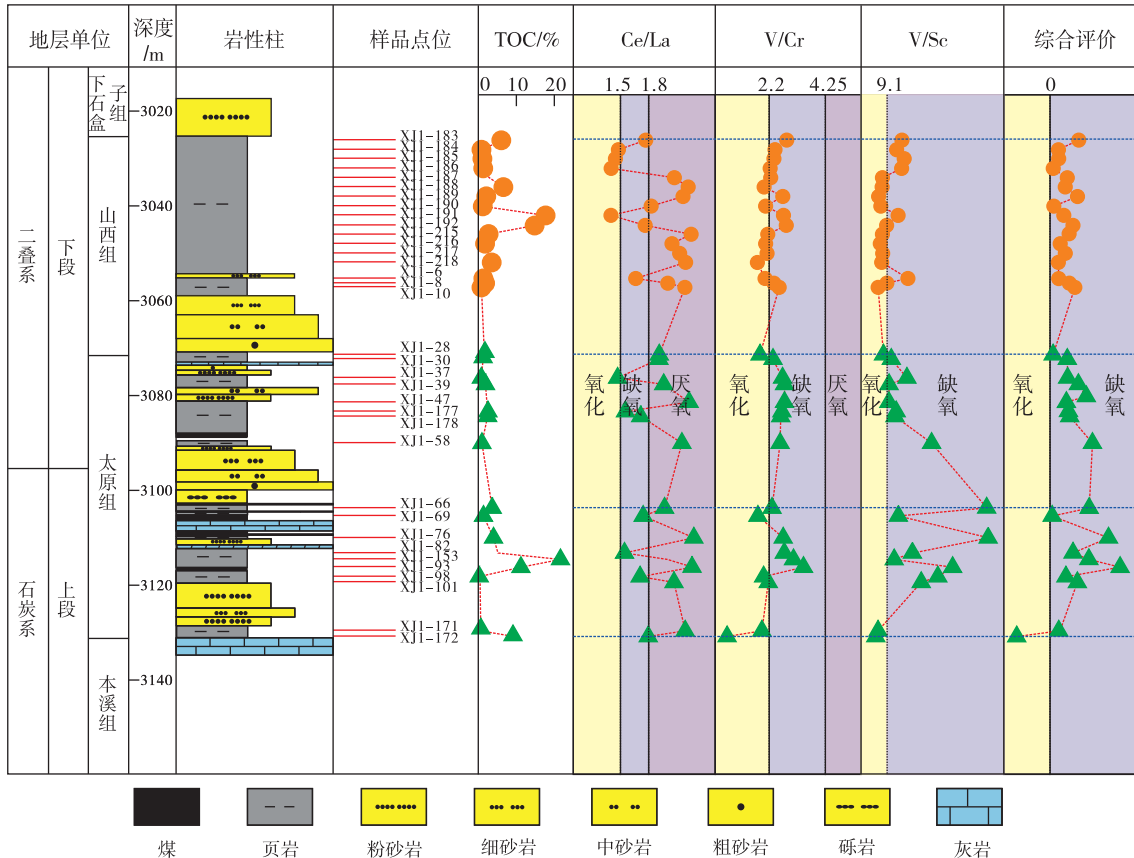


图 10 临清拗陷西部 XJ1 井山西组—太原组海陆过渡相泥页岩样品 TOC 和古氧化还原指标垂向变化  
 Fig. 10 Vertical variation of TOC and paleoredox indexes of the Shanxi-Taiyuan Formations marine-continental transitional mud shale samples from Well XJ1 in western Linqing Depression

(图 10)，而且太原组综合指标在沉积阶段早中期呈波动变化，与古水盐度变化一致，也反映出沉积水体氧化还原条件的变化与海平面变化具有一致性。山西组综合评价指标介于 0.06~0.62 之间，平均值为 0.32，说明山西组沉积阶段沉积水体含氧量较为稳定，沉积水体处于缺氧还原环境。

此外，通过 Mo 与 TOC 含量关系图以及 U-EF 和 Mo-EF 协变图，来判别沉积水体氧化还原程度以及水体受限程度（丁江辉等，2021；尚福华，2022）。Mo 与 TOC 含量关系图是基于现代沉积物所处沉积环境下得到的结果，因此要恢复沉积时 TOC 含量 (TOC<sub>0</sub>)，前文运用岩石热解数据计算得出了 C<sub>OT</sub> 含量和 HI 指数值，采用 Modica and Lapierre (2012) 提出的公式计算 TOC<sub>0</sub>，公式如下：

$$TOC_0 = \frac{C_{OT}}{(1 - (\alpha \times TR))}$$

其中： $\alpha = \frac{HI_0}{1200}$ ；TR 代表有机质转化比，公式如下：

$$TR = \frac{(1200 / (HI_0) \times (HI_0 - HI))}{(1200 - HI)}$$

HI<sub>0</sub> 代表沉积时 HI 指数值，前人对于 HI<sub>0</sub> 值做了大量研究，但 HI<sub>0</sub> 值具有不确定性，研究认为 I 型干酪根 HI<sub>0</sub> 值约为 900，II 型干酪根和 III 型干酪根 HI<sub>0</sub> 值分别约为 600 和 250 (Hart and Steen, 2015; Hart and Hofmann, 2022)。基于上述研究内容，计算得出太原组—山西组泥页岩 TOC<sub>0</sub> 值，山西组 TOC<sub>0</sub> 值介于 0.88%~23.95% 之间，平均值为

6.63%；太原组 TOC<sub>0</sub> 值介于 0.75%~61.72% 之间，平均值为 9.11% (附表 5)。图 11-a 显示，山西组—太原组 Mo/TOC<sub>0</sub> 值介于 0.02~7.93 之间，平均值为 0.97，主要集中处于黑海模型中，代表沉积环境主要为强滞留水体环境。U-EF-Mo-EF 协变图显示，山西组—太原组样品与综合评价指标显示一致，研究区所有数据点主要在贫氧区域附近。太原组样品较为分散，说明太原组沉积阶段含氧量具有波动性。山西组样品较为集中，整体均处于贫氧区域，而且显示沉积环境主要为中等—强滞留水体环境(图 11-b)。

总的来说，研究区沉积水体古氧化还原条件主要为缺氧还原条件，沉积水体为中等—强滞留水体环境。晚石炭世太原组沉积阶段，沉积水体含氧量呈现波动性，为缺氧还原以及中等滞留水体环境。山西组沉积阶段，含氧量较为稳定，沉积水体为缺氧还原以及中等—强滞留水体环境。

### 5.2 有机质富集影响因素

有机质含量的高低是正负效应叠加后的最终结果，前人关于有机质富集主要为 2 种观点，即“生产力模式”以及“保存条件模式”(Talbot, 1988; Carroll and Bohacs, 1999)。“生产力模式”，主要是强调海洋初级生产力对于有机质富集的主导作用，而“保存条件模式”则侧重于海洋的缺氧还原条件对有机质富集的主导作用。但有机质富集过程并非单一因素条件起决定作用，它是多种因素耦合控制的结果，根据上文分析出的古环境条件，对临清拗陷西部研究区海陆过渡相的有机质富集因

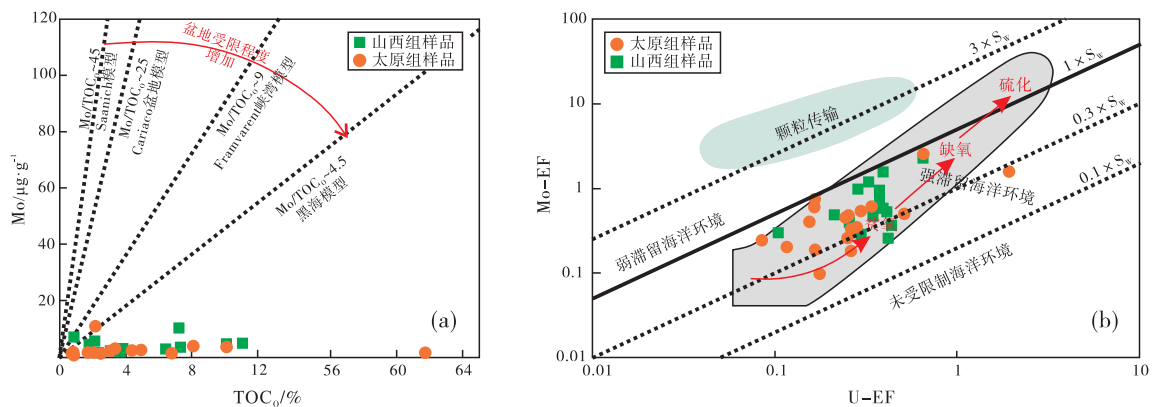


图 11 临清拗陷西部山西组—太原组泥页岩 Mo 与 TOC 关系图 (a) 泥页岩 U-EF 和 Mo-EF 协变图 (b)  
(修改自 Algeo and Tribovillard, 2009)

Fig. 11 Relationship between Mo and TOC (a) and U-EF and Mo-EF covariation diagram (b) of mud shale of the Shanxi-Taiyuan Formations in western Linqing Depression(modified from Algeo and Tribovillard, 2009)

素进行探讨。

5.2.1 单一古环境因素影响分析

临清拗陷西北部海陆过渡相太原组泥页岩沉积阶段具有频繁变化的陆源碎屑流入、低的沉积速率以及低一中等古生产力水平，沉积水体处于海水以及缺氧还原状态，古气候温暖湿润；山西组泥页岩沉积阶段，具有稳定且较高的陆源碎屑流入、中等沉积速率以及中一高等古生产力水平，沉积水体处于微咸水—海水以及缺氧还原状态，古气候条件在山西组盆地发育时期波动变化。

研究 XJ1 井泥页岩样品单个环境因素，包括古水体盐度 (Sr/Ba)、沉积速率 (La/Yb)<sub>N</sub>、古气候条件 (Sr/Cu)、陆源碎屑输入条件 (Ti%)、古生产力条件 (Ba<sub>bio</sub>)、古氧化还原条件 (综合指标) 与 TOC 含量的关系 (图 12)，表明：山西组泥页岩 TOC 含量与古气候条件、陆源碎屑输入条件、古生产力条件、古氧化还原条件、沉积速率以及古水矿化度的相关性系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.06、0.61、0.03、0.06、0.02、0.03 (图 12)，这表明山西组泥页岩 TOC 含量与陆源碎屑含量呈良好的线性关系，当陆源碎屑输入量越高，带来大量的陆源营养物质且加速了有机质的掩埋过程，使得大量的有机质得以保存。其余古环境因素对有机质影响较小。

太原组泥页岩 TOC 含量与古气候条件、陆源碎屑输入条件、古生产力条件、古氧化还原条件、沉积速率以及古水矿化度的相关性系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.62、0.02、0.02、0.04、0.08、0.23 (图 12)，说明太原组 TOC 含量与古气候条件以及古盐度条件具有较好的相关性，太原组有机质富集可能受控于古气候条件与古水体盐度特征。

5.2.2 多元统计分析有机质富集控制因素

单一环境因素分析只能对有机质富集起到定性判断，确定单一古环境因素与 TOC 含量之间的相关程度，但有机质富集是多个环境因素共同作用的结果，单一的环境因素并不能解释有机质富集过程。对有机质富集进行灰色关联分析以及多元线性回归分析，可以系统地表征有机质含量在各环境因素综合作用下的结果，从而确定地质历史时期这些因素对有机质生成和保存的影响程度。

灰色关联分析法的原理是通过确定参考序列 (TOC 含量) 和若干比较数据列 (古环境参数) 的几何相似程度，可以反映曲线之间的关联程度 (Yin et al., 2019; Si et al., 2018)。各古环境因素与 TOC 含量之间的主次关系，可以通过比较系统中各个古环境因素的灰色关联度的大小来确定。灰色关联分析的基本步骤请详见 Yin 等 (2019)。

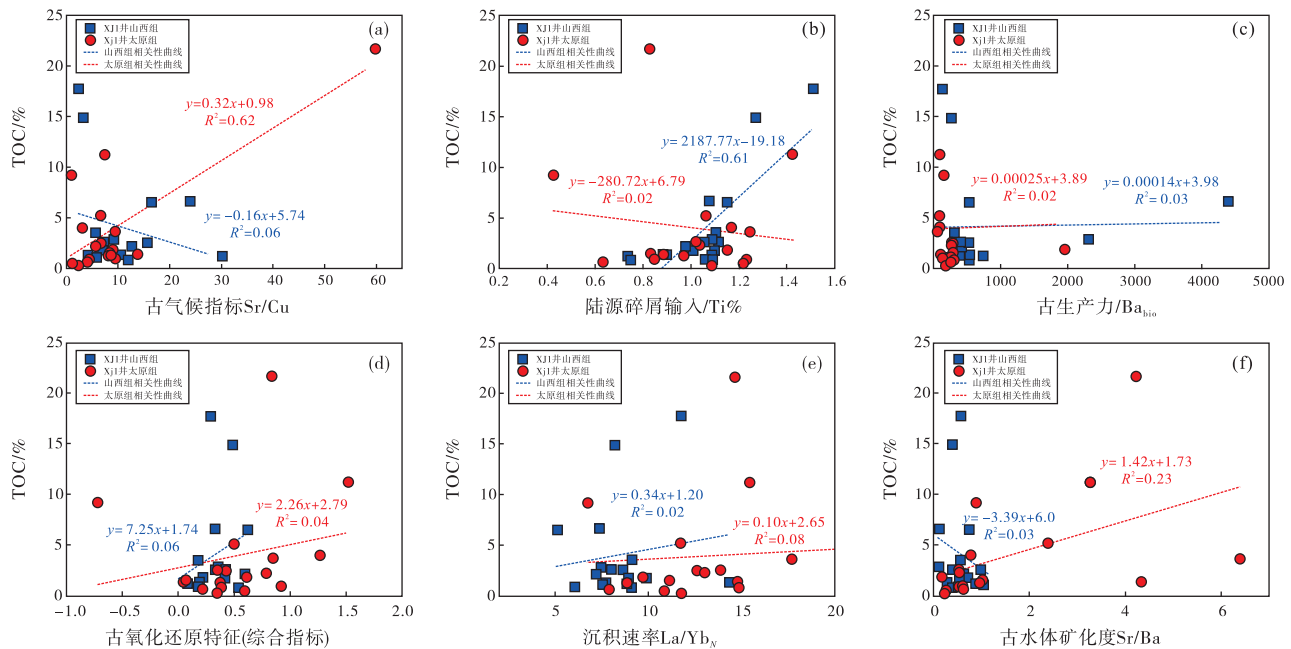


图 12 临清拗陷西部 XJ1 井泥页岩样品古环境指标与 TOC 的关系

Fig. 12 Relationship between paleoenvironmental indexes and TOC of mud shale samples from Well XJ1 in western Linqing Depression

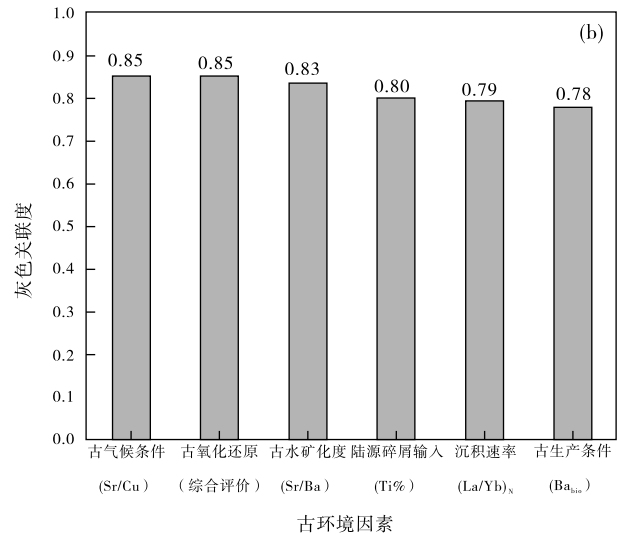
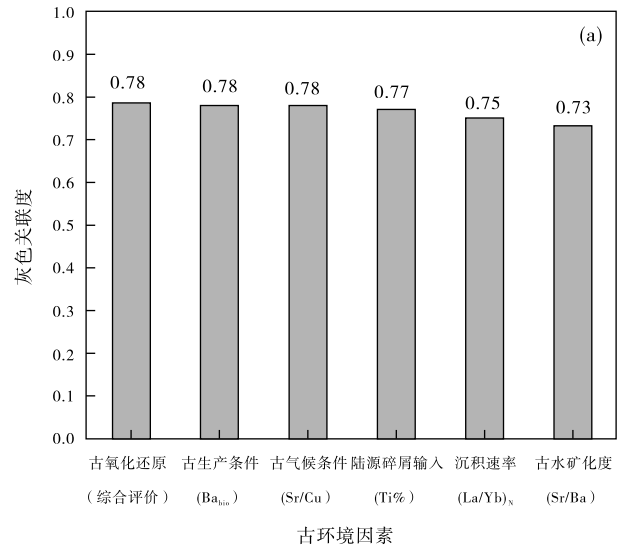
通过计算各影响因素与有机碳含量灰色关联度，山西组灰色关联度由高到低分别为：古氧化还原条件 > 古生产力条件 ( $Ba_{bio}$ ) > 古气候条件 ( $Sr/Cu$ ) > 陆源碎屑输入 ( $Ti\%$ ) > 沉积速率 ( $(La/Yb)_N$ ) > 古水体矿化度 ( $Sr/Ba$ )。各因素的关联度差异较小，其中古氧化还原条件、古生产力条件、古气候条件、陆源碎屑输入、沉积速率以及古水体矿化度的关联度分别为 0.78、0.78、0.78、0.77、0.75 以及 0.73，表明研究区有机质富集无明显的决定影响因素，但古氧化还原条件、古生产力条件、古气候条件以及陆源碎屑输入条件，对有机质富集影响相对较大(图 13-a)。

太原组灰色关联度由高到低分别为：古气候条件 ( $Sr/Cu$ ) > 古氧化还原条件 > 古水体矿化度 ( $Sr/Ba$ ) > 陆源碎屑输入 ( $Ti\%$ ) > 沉积速率 ( $(La/Yb)_N$ ) > 古生产力条件 ( $Ba_{bio}$ )。其中古气候条件、古氧化还原条件以及古水体盐度指标与 TOC 含量的灰色关联度较高，分别为 0.85、0.85、0.83。这表明古气候、古氧化还原环境以及古水体盐度对研究区有机质富集的影响较大。陆源碎屑输入指标、沉积速率指标以及古生产力指标与 TOC 含量的灰色关联度较低，表明陆源碎屑输入、沉积速率以及古生产力对研究区太原组有机质富集控制作用有限(图 13-b)。

多元线性回归分析可以有效地反映有机质富集与各古环境因素之间存在的非确定的相互依赖和制约关系，并能够将这种关系用数学表达式的形式表达出来。其目的是可以将有机质富集过程可以形象具体地表现出来，并对未知的变量做出预测或检验其变化的准确性 (Fan *et al.*, 2023)。

根据研究区泥页岩数据，TOC 含量作为因变量，自变量选用前文分析的对 TOC 含量可能影响较大的古环境参数，即古水体矿化度 ( $Sr/Ba$ )、沉积速率 ( $(La/Yb)_N$ )、古气候条件 ( $Sr/Cu$ )、陆源碎屑输入条件 ( $Ti\%$ )、古生产力条件 ( $Ba_{bio}$ )、古氧化还原条件 (综合指标)，运用稳健回归方法进行计算。

山西组有机质富集过程中，变量古气候条件 ( $Sr/Cu$ )、沉积速率 ( $(La/Yb)_N$ ) 以及陆源碎屑输入 ( $Ti\%$ )  $P$  值均小于 0.1 (表 6)，表明古气候条件、沉积速率以及陆源碎屑输入量，对山西组有机质富集产生显著性影响。古氧化还原条件、古生产力条件不是研究区有机质富集的决定影响因素。根据稳



a—山西组样品；b—太原组样品

图 13 临清拗陷西部 XJ1 井泥页岩样品的古环境因素和灰色关联度

Fig. 13 Paleoenvironmental factors and grey correlation degree of mud shale samples from Well XJ1 in western Linqing Depression

健回归得出多元线性回归模型，如下：

$$TOC = -34.371 + 0.413 \times (Sr/Cu) + 2934.887 \times (Ti\%) - 0.001 \times (Ba_{bio}) + 4.02 \times (\text{assessment criteria}) + 0.632 \times (La/Yb)_N - 5.31 \times (Sr/Ba)$$

拟合值与真实值误差较小，相关性  $R^2 = 0.807$ ，两曲线拟合较好(图 14-b)，具有较强的准确性。

太原组有机质富集过程中，变量古气候条件 ( $Sr/Cu$ ) 以及古氧化还原条件 (综合评价)  $P$  值均小于 0.1 (表 6)，表明古气候条件以及古氧化还

表 6 稳健回归求解临清拗陷西部 XJ1 井泥页岩的拟合参数

Table 6 Robust regression to solve fitting parameters of mud shale in Well XJ1 in western Linqing Depression

拟合参数	山西组			相关系数 $R^2$	太原组			相关系数 $R^2$
	参数值	显著性 $P$ 值	是否显著		参数值	显著性 $P$ 值	是否显著	
古气候指数 (Sr/ Cu)	0.413	0.008	是	0.807	0.341	0.0001	是	
陆源碎屑通量 (Ti%)	2934.9	0.0001	是		129.937	0.750	不是	
古生产力 ( $Ba_{bio}$ )	-0.001	0.207	不是		-0.002	0.273	不是	
古氧化还原指标 (综合评价)	4.02	0.273	不是		4.408	0.049	是	
沉积速率 ( $La/Yb$ ) <sub>N</sub>	0.632	0.035	是		-0.215	0.247	不是	
古水盐度 (Sr/ Ba)	-5.31	0.17	不是		0.055	0.893	不是	
常数值	-34.371			-0.126				

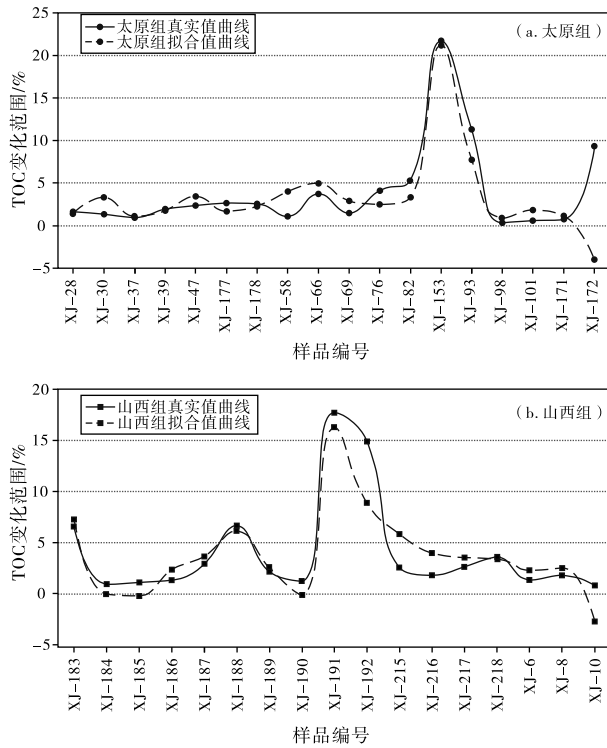


图 14 临清拗陷西部 XJ1 井泥页岩样品稳健回归分析拟合值与真实值曲线

Fig. 14 Curves of fitted values and true values of robust regression analysis of mud shale samples from Well XJ1 in western Linqing Depression

原条件对太原组有机质富集产生显著性影响。其余古环境条件不是研究区有机质富集的决定影响因素。稳健回归得出多元线性回归模型，如下：

$$TOC = -0.126 + 0.341 \times (Sr/ Cu) + 129.937 \times (Ti\%) - 0.002 \times (Ba_{bio}) + 4.408 \times (\text{assessment criteria}) - 0.215 \times (La/ Yb)_N + 0.055 \times (Sr/Ba)$$

拟合值与真实值误差相对较大，相关性  $R^2 =$

0.551 ( $R^2 > 0.5$ )，两曲线拟合相对较好(图 14-a)，具有一定的准确性。

有机质富集影响因素研究表明，古环境因素对有机质影响复杂多变，并不是单一的线性关系。通过灰色关联法分析各环境因素与 TOC 含量主次关系，进而探讨有机质与各因素间的相关性，并结合稳健回归分析各环境因素对 TOC 含量是否起到显著性影响。综合上述研究认为：山西组沉积阶段，古气候条件以及陆源碎屑输入对有机质富集具有重要的影响作用；太原组沉积阶段，有机质富集受控于古气候条件、古氧化还原条件以及古水体盐度条件。海陆过渡相泥页岩有机质富集并非受单一的古环境因素控制，而是多种因素共同叠加的结果。

### 5.3 有机质富集机制

上述研究表明，有机质富集是复杂的地质过程，受多种因素共同控制。结合前人研究成果，探讨临清拗陷西北部研究区石炭—二叠系山西组—太原组有机质富集模式。

太原组沉积阶段，研究区主要为潮坪—泻湖环境（吕大伟等，2012；赵洪刚等，2012）。温暖湿润的气候条件，使得陆源高等植物以及海洋藻类生物繁盛，并且促进了岩石风化，而大量的降水使得陆源碎屑物质以及火山灰流入沉积水体，为沉积水体带来大量的营养物质；而海进过程，可以将大量的海洋深部营养物质带至海面，也促进海洋藻类等浮游生物的繁盛（陈代钊等，2011），为太原组富有机质泥页岩沉积奠定了物质基础。缺氧还原以及中等滞留的沉积水体环境，使得有机质不会快速氧化分解，为有机质富集提供了保存条件。较低的沉积速率使得有机质更长时间暴露在水体之中，使得

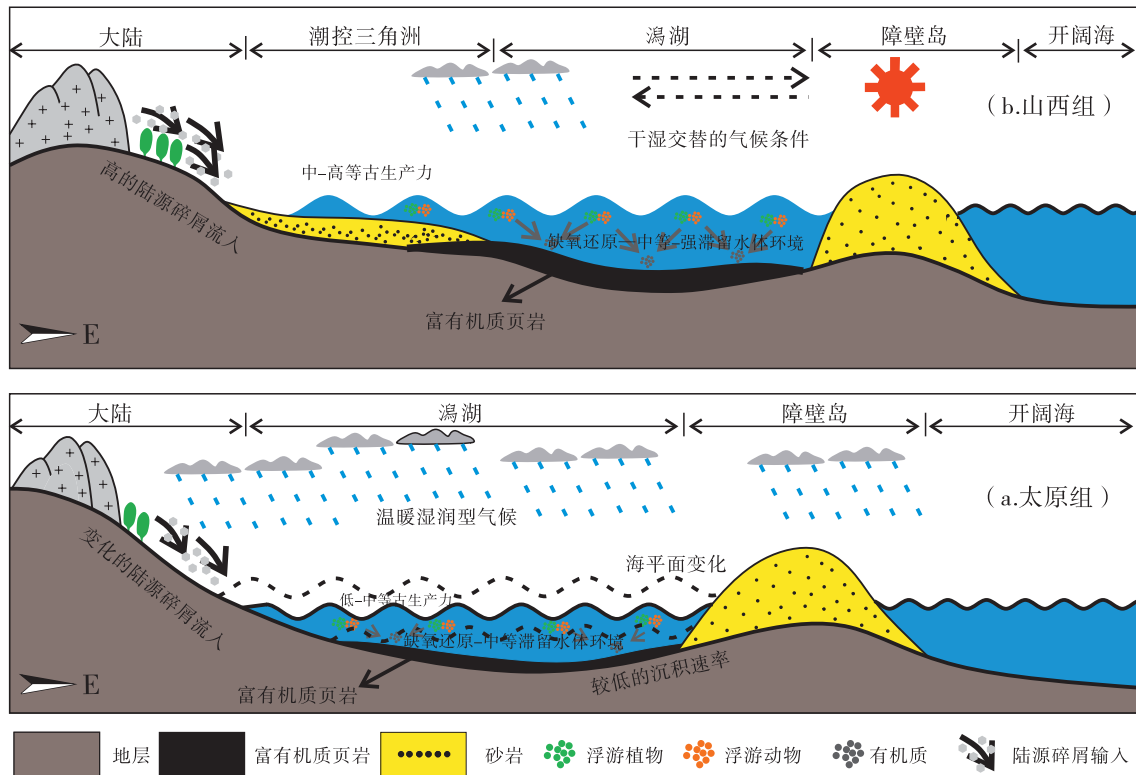


图 15 临清拗陷西部山西组—太原组海陆过渡相泥页岩有机质富集模式

Fig. 15 Enrichment model of organic matter in marine-continental transitional mud shale of the Shanxi-Taiyuan Formations in western Linqing Depression

部分有机质被消耗殆尽，其次，海退过程减少了陆源碎屑的输入，使得沉积水体初级生产力下降，较低的沉积速率以及海退过程，两者共同作用下，导致太原组泥页岩有机质含量较低(图 15-a)。

山西组沉积阶段，研究区主要为潮控三角洲—潟湖环境(吕大炜等，2012；赵洪刚等，2012)。频繁变化的古气候条件，使得岩石风化程度加剧，稳定且高的陆源碎屑输入，使得大量的营养物质流入沉积水体，促进古生物的繁盛，提高了海洋古水生产力水平。其次，海平面稳定，使得沉积水体具有稳定的缺氧还原、中等的沉积速率以及强滞留的水体环境，为有机质富集提供了较好的保存条件，促进了有机质富集，促使山西组形成一套富有机质页岩(图 15-b)。

基于上述研究分析，海陆过渡相泥页岩有机质富集更加依赖古气候条件，古气候条件不仅能够控制古生物的繁盛程度，也能控制物源碎屑流入的多少，进而控制沉积水体的古生产力状况，从而影响有机质富集。这更加证明有机质富集是受多种古环

境因素共同控制，有助于确定海陆过渡相泥页岩有机质的产生和保存最佳条件，并有助于揭示海陆过渡相页岩有机质富集机理，为过渡相页岩气勘探提供了一定的理论依据。

## 6 结论

1) 依据渤海湾盆地临清拗陷西部巨鹿凹陷 XJ1 井山西组、太原组泥页岩碎屑通量变化指标、古气候指标、古水盐度指标、古生产力指标以及古氧化还原指标，太原组烃源岩主要形成于高的碎屑输入量以及较低的沉积速率、温暖湿润的古气候条件、海水、低—中等生产力水平以及缺氧还原—中等滞留的沉积水体环境；山西组烃源岩主要形成于稳定的陆源碎屑通量以及中等的沉积速率、古气候条件频繁变化、微咸水以及海水、中—高等生产力水平、缺氧还原以及中—强滞留的沉积水体环境。

2) 通过对单一古环境因素与 TOC 含量分析，并通过灰色关联法以及稳健回归分析，认为山西组沉积阶段，古气候条件以及陆源碎屑输入对有机质

富集具有重要的影响作用；太原组沉积阶段，有机质富集受控于古气候条件、古氧化还原条件以及古水体盐度。

3) 晚石炭—早二叠世沉积阶段，温暖湿润的气候条件为研究区古生物的繁盛以及陆源碎屑输入提供了必要条件，进而控制了沉积水体的古生产力水平，为有机质富集提供了物质基础。而缺氧还原以及滞留的沉积水体条件，为有机质富集提供了较好的保存条件，形成了海陆过渡相富有机质岩。

**致谢** 感谢山东省煤田地质规划勘察研究院实验室所有人员的支持与帮助。同时衷心感谢各位专家及编辑在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见！

### 参考文献 (References)

- 陈代钊,汪建国,严德天,韦恒叶,遇昊,王清晨. 2011. 扬子地区古生代主要烃源岩有机质富集的环境动力学机制与差异. 地质科学, 46(1): 5-26. [Chen D Z, Wang J G, Yan D T, Wei H Y, Yu H, Wang Q C. 2011. Environmental dynamics of organic accumulation for the principal Paleozoic source rocks on Yangtze block. Chinese Journal of Geology, 46(1): 5-26]
- 陈天宇. 2020. 临清拗陷西部二叠系山西组、石盒子组沉积特征与物源分析. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Chen T Y. 2020. Sedimentary characteristics and provenance analysis of Permian Shanxi Formation and Shihezi Formation in the West Linqing depression. Masteral dissertation of China University of Geosciences( Beijing) ]
- 陈武珍,陈红汉,李文涛,丰勇,宫雪,熊万林. 2012. 临清拗陷东部石炭—二叠系二次生烃差异性研究. 沉积学报, 30(1): 179-188. [Chen W Z, Chen H H, Li W T, Feng Y, Gong X, Xiong W L. 2012. Study on differentiation of secondary hydrocarbon generation for the Carboniferous-Permian source rocks in the Eastern Linqing depression. Acta Sedimentologica Sinica, 30(1): 179-188]
- 丁江辉,张金川,石刚,申宝剑,唐玄,杨振恒,李兴起,李楚雄. 2021. 宣城地区龙潭组页岩沉积环境与有机质富集. 沉积学报, 39(2): 324-340. [Ding J H, Zhang J C, Shi G, Shen B J, Tang X, Yang Z H, Li X Q, Li C X. 2021. Sedimentary environment and organic matter accumulation for the Longtan Formation shale in Xuancheng area. Acta Sedimentologica Sinica, 39(2): 324-340]
- 董大忠,邱振,张磊夫,李树新,张琴,李星涛,张素荣,刘翰林,王玉满. 2021. 海陆过渡相页岩气层系沉积研究进展与页岩气新发现. 沉积学报, 39(1): 29-45. [Dong D Z, Qiu Z, Zhang L F, Li S X, Zhang Q, Li X T, Zhang S R, Liu H L, Wang Y M. 2021. Progress on sedimentology of transitional facies shales and new discoveries of shale gas. Acta Sedimentologica Sinica, 39(1): 29-45]
- 郭为,高金亮,李海,康莉霞,张金武,刘国华,刘钰洋. 2023. 中国海陆过渡相页岩气地质开发特征:以鄂尔多斯盆地东缘山西组和四川盆地龙潭组页岩气为例. 矿产勘查, 14(3): 448-458. [Guo W, Gao J L, Li H, Kang L X, Zhang J W, Liu G H, Liu Y Y. 2023. The geological and production characteristics of marine-continental transitional shale gas in China: taking the example of shale gas from Shanxi Formation in Ordos Basin and Longtan Formation in Sichuan Basin. Mineral Exploration, 14(3): 448-458]
- 胡小成,周瑶琪,张风霄. 2015. 临清拗陷东部太原组煤系烃源岩特征及主控因. 科学技术与工程, 15(6): 41-47. [Hu X C, Zhou Y Q, Zhang F X. 2015. The characteristics of coal source rock in Taiyuan Formation of Eastern Linqing depression and its main controlling factors. Science Technology and Engineering, 15(6): 41-47]
- 吕大炜,赵洪刚,李增学,刘海燕,王平丽,赵学升,满毅,宁文峰. 2012. 渤海湾盆地临清拗陷晚古生代古地理特征. 古地理学报, 14(4): 437-450. [Lü D W, Zhao H G, Li Z X, Liu H Y, Wang P L, Zhao X S, Man Y, Ning W F. 2012. Palaeogeographic characteristics of the Late Paleozoic in Linqing depression, Bohai Bay Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 14(4): 437-450]
- 尚福华. 2022. 复杂构造区页岩储层特征及页岩气赋存:以渝东北龙马溪组为例. 中国矿业大学博士学位论文. [Shang F H. 2022. Shale reservoir characteristics and shale gas occurrence in complex structural area: a case study of Longmaxi Formation in Northeast Chongqing. Doctoral dissertation of China University of Mining and Technology]
- 鄢继华,常嘉,陈世悦,单腾飞. 2019. 秦皇岛地区上古生界沉积特征与沉积演化. 古地理学报, 21(5): 743-756. [Yan J H, Chang J, Chen S Y, Shan T F. 2019. Sedimentary characteristics and evolution of the Upper Paleozoic strata in Qinhuangdao area. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(5): 743-756]
- 赵洪刚,梁吉坡,陈晓燕. 2012. 临清拗陷晚古生代沉积环境及演化分析. 山东国土资源, 28(3): 1-4. [Zhao H G, Liang J P, Chen X Y. 2012. Analysis on sedimentary environment and evolution in late Paleozoic era in Linqing depression. Shandong Land and Resources, 28(3): 1-4]
- 邹才能,翟光明,张光亚,王红军,张国生,李建忠,王兆明,温志新,马锋,梁英波,杨智,李欣,梁坤. 2015. 全球常规—非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测. 石油勘探与开发, 42(1): 13-25. [Zou C N, Zhai G M, Zhang G Y, Wang H J, Zhang G S, Li J Z, Wang Z M, Wen Z X, Ma F, Liang Y B, Yang Z, Li X, Liang K. 2015. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources. Petroleum Exploration and Development, 42(1): 13-25]
- Algeo T J, Ingall E. 2007. Sedimentary Corg: P ratios, paleocean ventilation, and Phanerozoic atmospheric  $pO_2$ . Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 256(3-4): 130-155.
- Algeo T J, Tribouillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation. Chemical Geology, 268(3-4): 211-225.
- Arsairai B, Wannakomol A, Feng Q L, Chonglakmani C. 2016. Paleoproductivity and paleoredox condition of the Huai Hin Lat Formation in Northeastern Thailand. Journal of Earth Science, 27(3): 350-364.
- Carroll A R, Bohacs K M. 1999. Stratigraphic classification of ancient lakes: balancing tectonic and climatic controls. Geology, 27(2): 99-102.

- Chen Y H, Wang Y B, Guo M Q, Wu H Y, Li J, Wu W T, Zhao J Z. 2020. Differential enrichment mechanism of organic matters in the marine-continental transitional shale in northeastern Ordos Basin, China; control of sedimentary environments. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83: 103625.
- Ding J H, Zhang J C, Huo Z P, Shen B J, Shi G, Yang Z H, Li X Q, Li C X. 2021. Controlling factors and formation models of organic matter accumulation for the Upper Permian Dalong Formation black shale in the Lower Yangtze region, South China; constraints from geochemical evidence. *ACS Omega*, 6(5): 3681–3692.
- Fan Y L, Xiang Y Y, Guo Z J. 2023. Adaptive efficient and double-robust regression based on generalized empirical likelihood. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 52(7): 3079–3094.
- Francois R, Honjo S, Manganini S J, Ravizza G E. 1995. Biogenic barium fluxes to the deep sea; implications for paleoproductivity reconstruction. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 289–303.
- Hart B S, Hofmann M H. 2022. Revisiting paleoenvironmental analyses and interpretations of organic-rich deposits: the importance of TOC corrections. *Organic Geochemistry*, 170: 104434.
- Hart B S, Steen A S. 2015. Programmed pyrolysis (Rock-Eval) data and shale paleoenvironmental analyses; a review. *Interpretation*, 3(1): 41–58.
- He J H, Ding W L, Jiang Z X, Li A, Wang R Y, Sun Y X. 2016. Logging identification and characteristic analysis of the lacustrine organic-rich shale lithofacies; a case study from the Es<sub>3</sub><sup>L</sup> shale in the Jiyang depression, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145: 238–255.
- Khaled A, Li R X, Xi S L, Zhao B S, Wu X L, Yu Q, Zhang Y N, Li D L. 2022. Paleoenvironmental conditions and organic matter enrichment of the Late Paleoproterozoic Cuizhuang formation dark shale in the Yuncheng Basin, North China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208: 109627.
- Li Y, Wang Z S, Gan Q, Niu X L, Xu W K. 2019. Paleoenvironmental conditions and organic matter accumulation in Upper Paleozoic organic-rich rocks in the east margin of the Ordos Basin, China. *Fuel*, 252(6): 172–187.
- Liu J, Yao Y B, Liu D M, Pan Z J, Cai Y D. 2017. Comparison of three key marine shale reservoirs in the southeastern margin of the Sichuan Basin, SW China. *Minerals*, 7(10): 179.
- Miao Q Y, Xu C G, Hao F, Yin J, Wang Q, Xie M J S, Cao Y J, Zou H Y. 2020. Roles of fault structures on the distribution of mantle-derived CO<sub>2</sub> in the Bohai Bay Basin, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 197: 104398.
- Modica C J, Lapierre S G. 2012. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation; example from the Mowry shale in the Powder River Basin of Wyoming. *AAPG Bulletin*, 96(1): 87–108.
- Qiu N S, Zuo Y H, Chang J, Li W Z. 2014. Geothermal evidence of Mesozoic lithosphere thinning in the Jiyang Sub-basin, Bohai Bay Basin, eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 26(3–4): 1079–1092.
- Shen J, Schoepfer S D, Feng Q L, Zhou L, Yu J X, Song H Y, Wei H Y, Algeo T J. 2015. Marine productivity changes during the End-Permian crisis and Early Triassic recovery. *Earth-Science Reviews*, 149: 136–162.
- Si S L, You X Y, Liu H C, Zhang P. 2018. DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 1: 1–33.
- Talbot M R. 1988. The origins of lacustrine oil source rocks; evidence from the lakes of tropical Africa. *Geological Society Special Publication*, 40(1): 29–43.
- Tenger B, Liu W H, Xu Y C, Chen J F. 2006. Comprehensive geochemical identification of highly evolved marine carbonate rocks as hydrocarbon-source rocks as exemplified by the Ordos Basin. *Science in China Series D*, 49(4): 384–396.
- Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 341–366.
- Yin K D, Xu J, Li X M. 2019. A new grey comprehensive relational model based on weighted mean distance and induced intensity and its application. *Grey Systems: Theory and Application*, 9(3): 374–384.
- Zhang L F, Dong D Z, Qu Z, Wu C J, Zhang Q, Wang Y M, Liu D X, Deng Z, Zhou S W, Pan S Q. 2021a. Sedimentology and geochemistry of Carboniferous-Permian marine-continental transitional shales in the Eastern Ordos Basin, North China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 571: 110389.
- Zhang L F, Zhao Q, Peng S Z, Qiu Z, Feng C J, Zhang Q, Wang Y M, Dong D Z, Zhou S W. 2021b. Paleoenvironment and organic matter accumulation mechanism of marine-continental transitional shales; outcrop characterizations of the Carboniferous-Permian strata, Ordos Basin, North China. *Energies*, 14(21): 7445.
- Zhao B S, Li R X, Qin X L, Wang N, Zhou W, Khaled A, Zhao D, Zhang Y N, Wu X L, Liu Q. 2021. Geochemical characteristics and mechanism of organic matter accumulation of marine-continental transitional shale of the Lower Permian Shanxi Formation, southeastern Ordos Basin, North China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205: 108815.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)