

吐哈盆地台北凹陷水西沟群成烃环境演变对煤系烃源岩分布及煤岩气保存的影响

赵振宇¹, 张 华², 林 潼¹, 李 攀¹, 尤 帆², 杨润泽¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009)

摘要:吐哈陆相聚煤盆地是中国西部重要的含油气盆地。侏罗系水西沟群发育多套含煤优质烃源岩层,具有多套优质的砂岩储层和煤岩储层,是盆地主要的油气勘探目的层和深层煤岩气战略突破领域。通过研究盆地构造-沉积演化对烃源岩形成的影响以及微量元素对沉积环境的响应特征,分析了不同类型烃源岩的发育和分布规律,指出了煤岩储层中天然气(煤岩气)保存的有利空间位置。研究认为:①水西沟群沉积时期,构造抬升与沉降作用控制了台北凹陷沉积中心的形成与演化,沉积中心由北向南逐渐迁移;在晚侏罗世末期,北部发生强烈构造抬升,沉积中心继续向腹部迁移并造成东高、西低的地势特征,形成了现今胜北、丘东和小草湖洼陷3个逐渐向东抬升变浅的沉降中心。②沉积中心演化控制凹陷内不同次洼水体深度和盐度的变化。水西沟群八道湾组—三工河组沉积时期水体加深,盐度变小,三工河组—西山窑组沉积时期水体逐渐变浅,盐度增大。泥岩主要位于盆地的北部,具有自西向东加厚的特征。纵向上受古水体盐度的影响,八道湾组—西山窑组有机质类型和丰度具有逐渐变好的趋势。③水西沟群沉积期发生频繁的水体变动,煤形成于水体相对较浅的沉积环境。在八道湾组早期的水进初期阶段、八道湾组晚期和西山窑组早—中期的水退晚期阶段,水体相对较浅,为有利的聚煤环境,是吐哈盆地煤岩发育的主要层段。④在煤的发育区划分了10种不同类型的煤层顶—底板组合,提出了5个有利于煤岩气保存的煤层顶—底板组合类型及其分布位置,这些分布区是下一步煤岩气勘探方向。

关键词:成烃环境;微量元素;煤层顶—底板组合;煤系烃源岩;煤岩气;水西沟群;台北凹陷;吐哈盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Impacts of the hydrocarbon-generating setting evolution on the distribution of coal-measure source rocks and preservation of coal-rock gas in the Shuixigou Group, Taibei Sag, Tuha Basin

ZHAO Zhenyu¹, ZHANG Hua², LIN Tong¹, LI Pan¹, YOU Fan², YANG Runze¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Tuha Oilfield Company, PetroChina, Hami, Xinjiang 839009, China)

Abstract: The continental coal-accumulating Tuha Basin is recognized as a significant petroliferous basin in western China. The Jurassic Shuixigou Group contains multiple suites of high-quality source rock sequences bearing coal seams, as well as high-quality sandstone and coal reservoirs, emerging as a primary target for hydrocarbon exploration and a field for strategic breakthroughs in deep coal-rock gas exploration within the basin. In this study, we investigate the impacts of the basin's tectonic and sedimentary evolution on the formation of source rocks. Based on the response characteristics of trace elements to the sedimentary environment, we analyze the developmental and distribution patterns of various types of source rocks and identify favorable locations for natural gas (coal-rock gas) preservation in coal reservoirs. The results suggest that during the deposition of the Shuixigou Group, the tectonic uplift and subsidence processes governed the formation and evolution of the depocenter of the Taibei Sag, driving the depocenter to migrate gradually from north to south. At the end of the Late Jurassic, the northern part of the Tuha Basin underwent significant

收稿日期:2024-02-18;修回日期:2024-09-29。

第一作者简介:赵振宇(1980—),男,博士、高级工程师,油气地质勘探与风险井目标评价。E-mail: zhaozy01@petrochina.com.cn。

通信作者简介:林潼(1980—),男,博士、高级工程师,油气地质。E-mail: lintong1980@163.com。

基金项目:国家自然科学基金委企业创新发展联合基金项目(U22B6002);中国石油科技重大专项(2023ZZ18-03)。

tectonic uplift, resulting in the continuous migration of the depocenter toward the basin's hinterland and the development of the terrain featuring highs in the east and lows in the west. Consequently, three present-day subsidence centers, i. e., the Shengbei, Quidong, and Xiaocaohu sub-sags, are formed, which tend to rise and grow shallower eastward. The depocenter evolution determines the changes in the depth and salinity of water bodies in the sub-sags of the Taibei Sag. Specifically, the water bodies exhibited an increasing depth and decreasing salinity during the deposition of the Badaowan and Sangonghe formations of the Shuixigou Group. In contrast, the water bodies displayed a gradually decreasing depth and increasing salinity during the deposition of the Sangonghe and Xishanyao formations of the group. Mudstones are primarily distributed in the northern part of the basin, thickening from west to east. Influenced by the salinity of paleo-water bodies, the Badaowan—Xishanyao formations are characterized by vertically improving organic matter both in types and abundance. The Shuixigou Group underwent frequent fluctuations in water bodies during its deposition, with coals forming in sedimentary environments with relatively shallow water bodies. This group exhibited shallow water bodies during the initial water transgression in the early deposition of the Badaowan Formation, along with the late water regression in the late deposition of the Badaowan Formation and the early-middle deposition of the Xishanyao Formation, creating favorable coal-accumulation environments. Therefore, the Shuixigou Group represents the primary interval for coal occurrence in the Tuha Basin. Ten types of roof-floor assemblages of coal seams are identified in coal-bearing areas of the basin. Five favorable roof-floor assemblages for the preservation of coal-rock gas, as well as their locations, are determined, serving as the targets for future coal-rock gas exploration.

Key words: hydrocarbon-generating environment, trace element, roof-floor assemblage of a coal seam, coal-measure source rock, coal-rock gas, Shuixigou Group, Taibei Sag, Tuha Basin

引用格式:赵振宇,张华,林潼,等.吐哈盆地台北凹陷水西沟群成烃环境演变对煤系烃源岩分布及煤岩气保存的影响[J].石油与天然气地质,2024,45(6):1755-1771. DOI:10.11743/ogg20240619.

ZHAO Zhenyu, ZHANG Hua, LIN Tong, et al. Impacts of the hydrocarbon-generating setting evolution on the distribution of coal-measure source rocks and preservation of coal-rock gas in the Shuixigou Group, Taibei Sag, Tuha Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1755-1771. DOI: 10.11743/ogg20240619.

吐哈盆地是中国重要的陆相聚煤盆地,其侏罗系水西沟群不仅发育多套已经证实的主力烃源岩层^[1-2],同时还发育多套有利的砂岩储层和煤岩储层,是吐哈盆地最重要的油气勘探层系^[3-4]。前期盆地油气勘探主要集中在中-上侏罗统及其以上的地层,并在台北凹陷及其周缘发现了多个含油气正向构造带^[5],累计探明石油地质储量 2.77×10^8 t,天然气地质储量 1.185×10^8 m³^[1]。近年来,盆地油气勘探从浅层正向构造带向深层洼陷区岩性地层转移,获得了重大突破,例如,2022年针对洼陷内岩性油气藏勘探,首次在三工河组获得高产工业油气流^[4]。同时,在深层煤岩气勘探方面也取得了重大进展,2023年针对深层煤岩储层的钻探(深度>1 500 m),在西山窑组煤层中获得高含气量煤岩样品,测试含气量24 m³/t,并且游离气含量超过50%,估算整个吐哈盆地深层煤岩气资源量为 1.6×10^{12} m³,显示出盆地煤岩储层勘探的广阔前景,是今后天然气勘探的接替领域。

明确水西沟群不同层段烃源岩的发育与分布规

律,特别是煤层的分布规律,是勘探向深部、向非常规转移并取得成功的重要条件。前人从沉积环境和煤系成烃、成储机制等方面对水西沟群煤系地层开展了大量的研究工作^[6-10]。研究显示,盆地水西沟群在露头和岩心中均已发现大量的煤层,并且煤层单层厚度大、分布面积广,因此认为盆地湖相烃源岩不发育,煤系地层的炭质泥岩、泥岩和煤是主要的烃源岩,已发现的油气主要来源于水西沟群煤系烃源岩。围绕着吐哈盆地特殊的煤岩成烃机制,前人开展了详细的分析,认为吐哈盆地煤岩中基质镜质体与木栓质体具有一定的成油能力^[7-8],特别是基质镜质体由于生物化学阶段细菌等微生物的强烈改造作用,使其具有氢化芳香结构,比较富含烃基团,具有生成液态烃的能力。因此,煤系烃源岩对吐哈盆地的油气成藏起到关键性的作用。然而,随着丘东洼陷内三工河组高含凝析油天然气的发现,三工河组二段“毡子层”对生烃的作用被重新认识^[11],该套泥岩主要形成于湖相环境,部分已发现的有机质类型与西山窑组烃源岩具有差异,同

时三工河组中天然气乙烷碳同位素较轻($\delta^{13}\text{C}_2$ $< -28.5\%$),说明存在油型气的特征,可能来自该段湖相烃源岩。

通过构造-沉积的演化过程对成烃环境的影响分析,开展水西沟群不同类型烃源岩的发育与分布规律研究,对认识盆地的油气成藏规律,特别是洼陷深部的油气富集规律能够起到重要的指导作用。同时烃源岩的展布对认识煤岩储层中天然气的富集和保存规律同样起到关键的作用。近年来,煤岩气的勘探如火如荼,煤岩气作为一种新的矿藏勘探类型,虽然与传统煤层气一脉相承,但在埋深、储层、气源、含气性和产出动态等方面存在明显差异^[12],已成为继页岩气和致密油之后,非常规油气勘探的新热点^[12-13],并相继在准噶尔盆地白家海凸起、鄂尔多斯盆地大宁—吉县和临兴—神府等区块获得重大突破^[13-17],在吐哈和海拉尔等盆地深部煤层中也见良好显示。前期针对盆内煤岩储层的勘探主要集中在浅层的常规煤层气,在沙尔湖和大南湖等地区获得了一系列突破发现^[18-21],而深部煤岩气方面虽然在台北凹陷核5井深度1 812 m和柯19井深度3 350 m的西山窑组深层煤岩中获得工业气流,但并未获得重视,煤岩气的勘探与认识程度整体较低。本文从宏观地质因素——构造-沉积环境及其演化的角度出发,探索构造-沉积框架内烃源岩的发育与分布规律以及煤岩气成藏保存条件的时空分布规律,旨在为吐哈盆地的油气勘探向深层、向非常规转变提供理论指导。

1 地质背景

吐哈盆地位于中亚东部两大缝合带交汇处,经历了石炭纪—早二叠世拉张,晚二叠世—三叠纪、中—晚燕山期和喜马拉雅期多期挤压冲断,形成了现今夹持于南部觉罗塔格山和北部博格达山—哈尔里克山之间、呈东西向展布的狭长山间盆地,其东西长约660 km,南北宽60 ~ 130 km,总面积约 $5.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1]。已发现的油气主要位于北部吐鲁番坳陷台北凹陷(图1),台北凹陷自西向东又可进一步划分为胜北、丘东和小草湖3个洼陷。目前,在二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近系5套地层中均发现了工业油气流,累计探明石油地质储量 $4.10 \times 10^8 \text{ t}$,其中侏罗系为主力含油气层系,探明储量占5套地层累计探明储量的53.7%,但是发现的油气藏多数位于中侏罗统及以上地层。凹陷内剩余的油气资源量主要位于深部的中—下侏罗统水西沟群中。水西沟群自下而上发育八道湾组(J_1b)、三工河组(J_1s)和西山窑组(J_2x),依据层序地层的划分与对比结果^[22],又可将八道湾组、三工河组和西山窑组分别划分出4个、2个和4个层段(图2)。其中烃源岩层主要位于八道湾组二段—八道湾组四段(J_1b^2 — J_1b^4)、三工河组二段(J_1s^2)和西山窑组二段—西山窑组三段(J_2x^2 — J_2x^3)。烃源岩中,厚煤层位于 J_1b^2 , J_1b^4 , J_2x^2 和 J_2x^3 ,特别是 J_2x^2 煤层,厚度在16 ~ 45 m,平均厚度为27 m,在台北凹陷内广泛分布,是吐哈盆地煤岩气勘探最重要的层段。

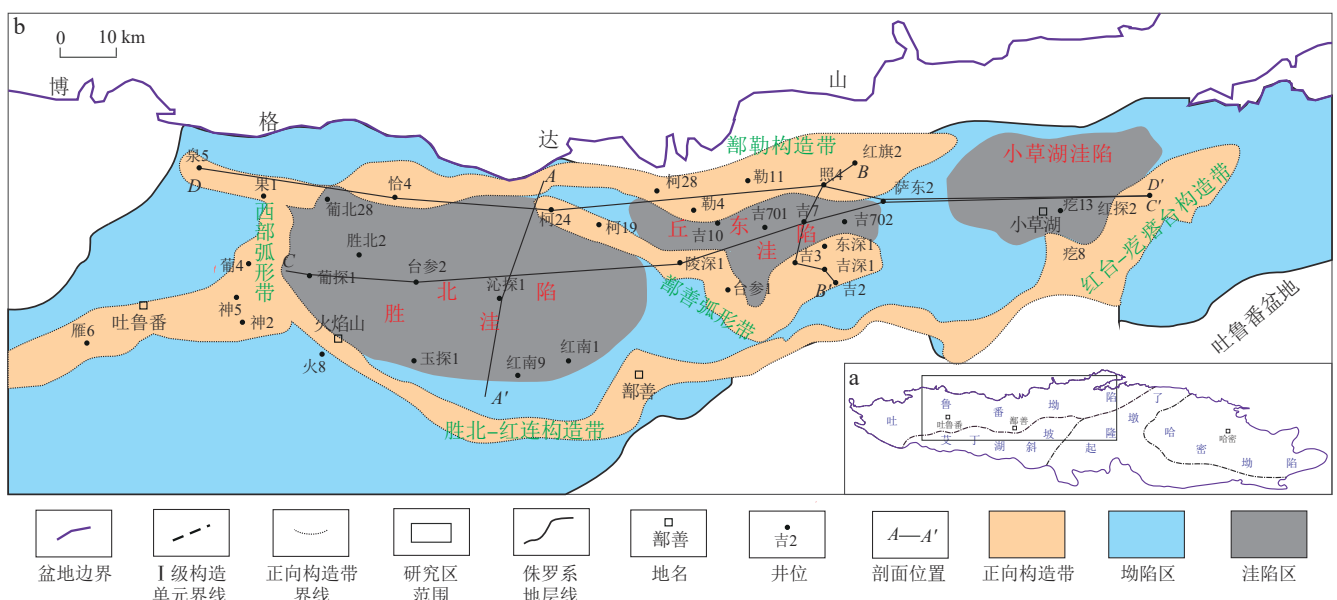


图1 吐哈盆地台北凹陷构造单元与研究区位置

Fig. 1 Location of the structural units and study area in the Taipei Sag, Tuha Basin

a. 研究区位置; b. 台北凹陷构造单元划分

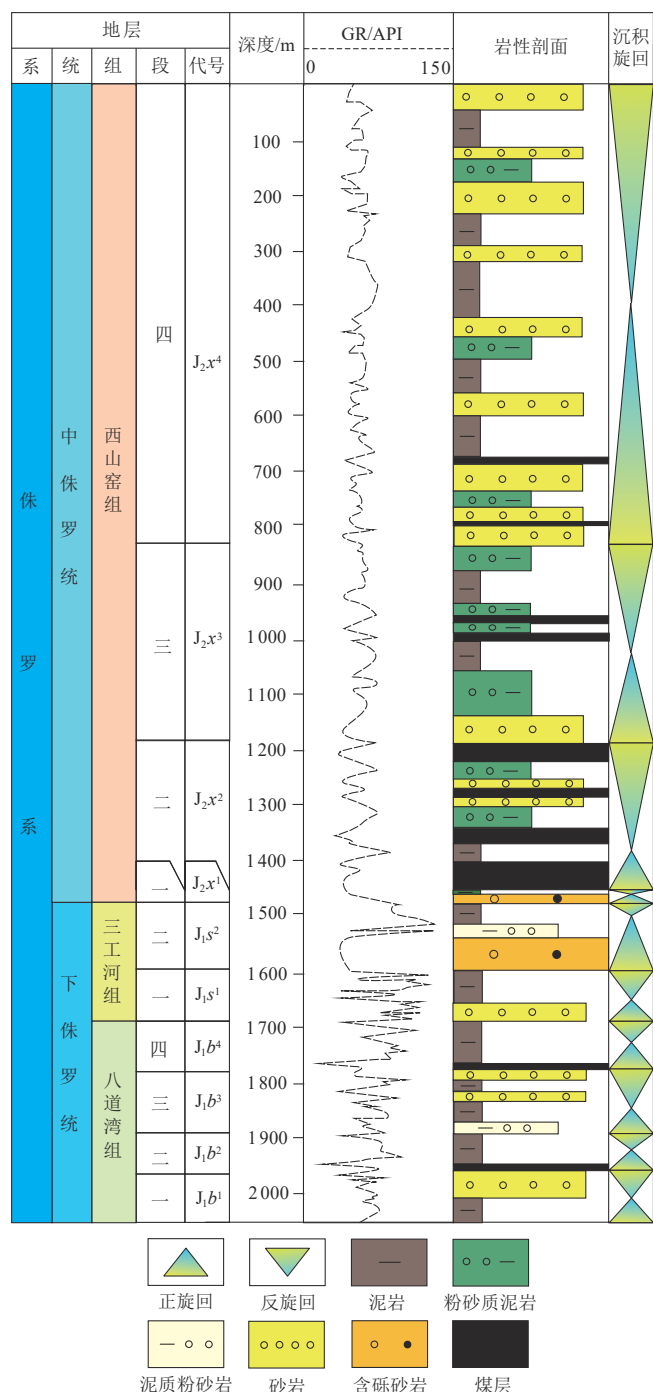


图2 台北凹陷水西沟群地层划分综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Shuixigou Group, Taipei Sag

前人通过岩相古地理分析认为^[10],吐哈盆地从早侏罗世—中侏罗世早期经历了沼泽化—湖化—沼泽化—湖化的演化过程。其中地层两次的沼泽化形成了水西沟群煤层,其对应时期为 J_1b 沉积时期和 J_2x 沉积时期的早—中期,代表着湖退阶段;而两次的湖化形成了水西沟群湖相烃源岩,分别对应 J_1s^2 和 J_2x^4 沉积时期,代表着湖盆扩张阶段。沉积环境的演变对盆地内不同

类型烃源岩的形成及其分布起到重要的影响作用。

2 台北凹陷构造-沉积演化特征

2.1 构造-沉积演化

吐哈盆地的构造发育演化过程受周缘造山带的强烈影响。前人对吐哈盆地北部的博格达山和南部的觉罗塔格山造山过程开展过大量的研究^[23-27],虽然仍存在着较多争议,但越来越多的证据表明,盆地北部隶属于东天山山脉的博格达山,在晚古生代发生过陆内裂陷,在晚二叠世末期开始由陆内裂陷回返造山,在中生代又发生了造山后的伸展断陷,新生代开始强烈挤压抬升并持续至今。盆地南部隶属于东天山大洋岛弧褶皱带的觉罗塔格山,在晚石炭世末—早二叠世洋盆关闭,岛弧碰撞开始持续隆升^[26-27]。盆地南北构造活动总体表现为海西期—印支期南强北弱、燕山期—喜马拉雅期北强南弱。南部物源对盆地的沉积汇聚影响较大,为水西沟群沉积时期的主要物源区;从早侏罗世晚期开始,北部物源逐渐增强,构成了水西沟群沉积汇聚的次要物源区^[23]。本文对烃源岩主要发育区——台北凹陷的关键格架剖面开展地层构造解释,并利用平衡剖面技术恢复出不同时期的构造演化过程,为不同类型烃源岩成烃环境演化提供宏观构造背景。

2.1.1 胜北洼陷和丘东洼陷南北向构造演化特征

从过胜北洼陷南北向剖面的构造演化图(图3a)可以看出,在水西沟群沉积时期盆地表现为伸展断陷阶段,胜北洼陷北部地区发育断陷特征,断陷由盆缘向盆内传递,北部为洼陷的沉降中心。从中侏罗世三间房组沉积开始,受北部博格达山抬升冲断影响,北部地区开始持续抬升并遭受不同程度的剥蚀作用,沉降中心逐渐由北向南迁移至盆地腹部。从整个构造演化过程来看,盆地大幅挤压抬升时间开始于晚侏罗世。以剖面南侧端点为钉线,计算出在晚侏罗世喀拉扎组沉积时期北部地区挤压缩短量为10.29 km,并且从古近纪至今盆地北缘持续抬升,由北向南挤压缩短幅度达到26.15 km,从而在盆地腹部出现山前拗陷挤压,形成现今的沉降中心。丘东洼陷在水西沟群沉积期间,沉降—沉积中心同样位于盆地北部(图3b),而后北部博格达山开始持续抬升,在晚侏罗世沉降—沉积中心开始向腹部迁移,在现今吉7井区形成沉降中心并持续至今。与胜北洼陷类似,丘东洼陷水西沟群沉积最大厚度分布于现今洼陷的北侧。

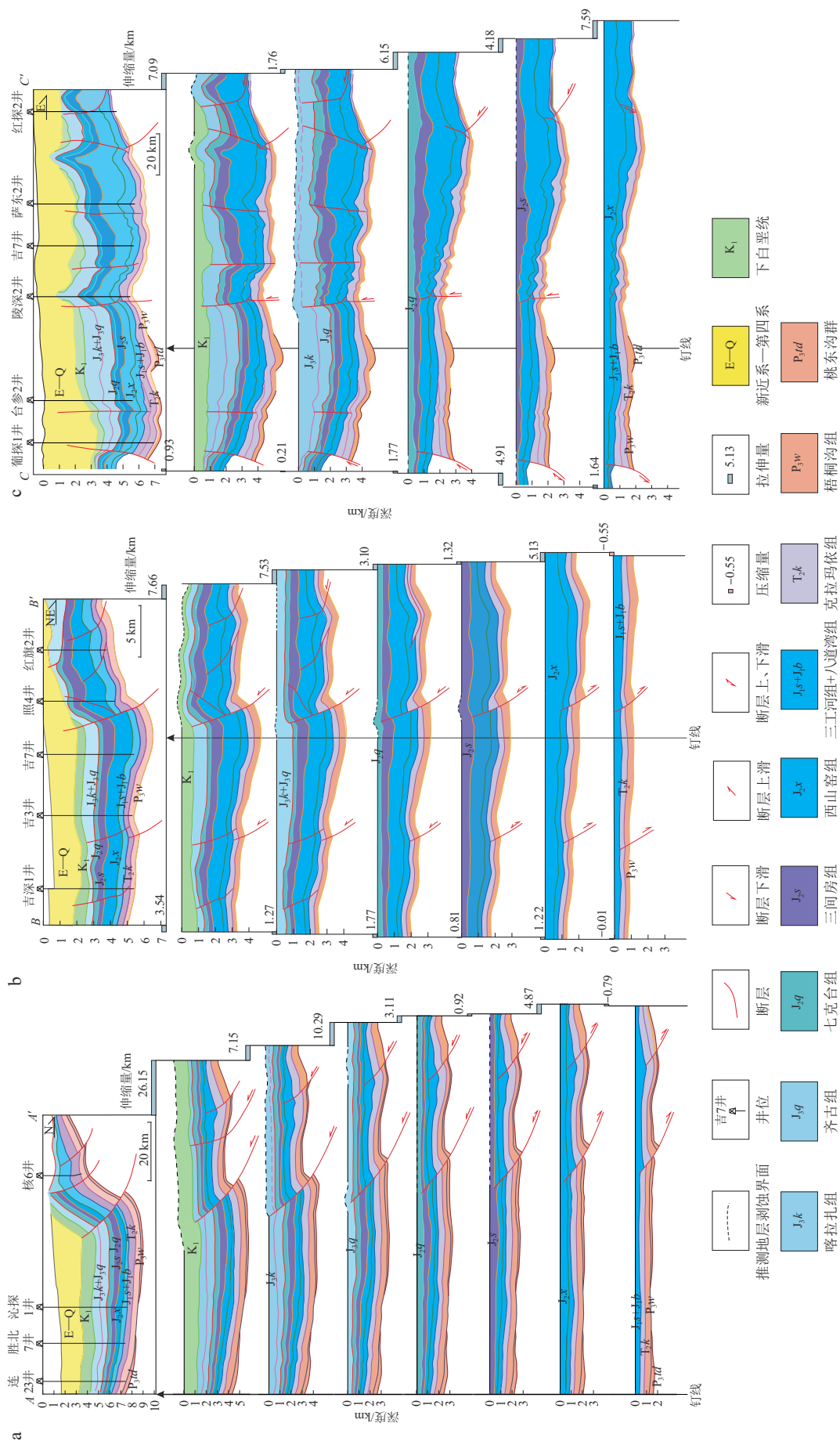


图3 台北凹陷构造演化剖面(剖面位置见图1b)
Fig. 3 Structural evolution profile of the Taibei Sag (see Fig. 1b for the section locations)

2.1.2 台北坳陷东西向构造演化特征

早-中侏罗世 J_1b-J_{2x} 沉积期间,盆地西缘高、东缘低,东、西两侧均发育断陷盆地(图3c),形成2个沉积中心,但沉降中心位于盆地东缘(现今小草湖洼陷)。到中侏罗世三间房组-七克台组沉积时期,盆地整体仍是西缘高、东缘低,但盆地东缘开始发育坳陷盆地,东缘的沉降中心更加显著。到晚侏罗世齐古组-喀拉扎组沉积期间,盆地西缘高,腹部-东缘低,沉降中心开始向西转移到盆地腹部(现今丘东洼陷),随后盆地腹部-东缘整体抬升,并发育山前坳陷盆地,而盆地西缘挤压作用逐渐减弱,沉积厚度不断增大,形成了台北凹陷的双沉积中心——胜北洼陷和小草湖洼陷。到早白垩世,盆地东缘高、西缘低,东部进一步抬升,而西缘(胜北洼陷)持续沉降。古近纪至今,盆地整体沉降,东缘相对较高,沉降中心已经转移到西缘。

2.2 沉积环境的变迁

沉积岩中元素的分布可以用来判断古水介质的物理性质、化学性质、古气候和物源区特征。早些年通常用古生物法恢复盆地的古水深^[27-28],近些年对现代沉积物元素地球化学的研究发现,元素的聚集和分散,与水体深度(或者是离岸距离的远近)具有一定的关系^[27-30]。主要是元素在沉积作用中发生机械分异作用、化学分异作用、生物分异作用和生物化学分异作用的结果。利用元素地球化学特点推断古盐度是最常用且效果较为理想的一种方法^[30-35],包括硼元素分析法、元素比值分析法、沉积磷酸盐分析法和自生铁矿物分析法等。这些方法可以定量的计算出古盐度,并通过沉积剖面纵向上的盐度变化旋回性分析出古气候的变迁和随盆地演化而发生的水介质条件的变化。因此,可以借助岩心中烃源岩层的主微量元素含量的分布特征判识水西沟群沉积环境的变迁。

本次研究对吐哈盆地内34口井的745块水西沟群岩心样品开展主微量元素分析与对比。同一层系的微量元素数值分布范围采用箱形法成图,它能显示出一组数据的最大值、最小值、中位数和上、下四分位数,并尽可能排除异常值(图4中的散点)的影响,箱子的宽度在一定程度上反映了数据的波动程度。

2.2.1 古水深的分布与演变

优选Ba, Ti, Fe, Al和Mg元素对水西沟群时期的水体深度演变规律进行分析。其中Ba元素含量正比于水深,Al, Ti, Fe和Mg元素含量反比于离陆距离(图4)。

研究区 J_1b-J_{1s} 沉积时期, Ba元素含量上升,而Ti, Fe和Al元素含量均下降,说明该时期水体逐渐加深; J_1s-J_{2x} 沉积时期, Ba元素含量下降,而Ti, Fe和Al元素含量均上升,说明该时期水体逐渐变浅。综合中值与极值变化幅度,对4种元素在3个时期的数值变化进行对比,发现 J_1b-J_{1s} 沉积期间元素含量的变化趋势大于 J_1s-J_{2x} 沉积期间元素含量的变化趋势,表明 J_1b-J_{1s} 沉积期间水体加深的幅度要大于 J_1s-J_{2x} 沉积期间水体变浅的幅度。

通过对多种微量元素含量的平面分布特征对比分析,发现Mg元素含量与区域水体深度具有较好的相关性,具体表现为相同层段内Mg元素含量越低,所反映的水体深度越深。因此,可以利用Mg元素含量平面分布规律对区域内水体变化规律开展分析。通过本次研究所获取的丰富的全盆地微量元素数据,对水西沟群开展水体分布与演变规律的分析。可以看出在 J_1b 沉积期间,盆地东部地区的水体较深,湖盆中心位于丘东区域,区域内总体表现为东深、西浅的特点。 J_1b-J_{1s} 沉积时期,区域内Mg元素含量值减小,代表着 J_1s 沉积时期区域内水体普遍加深,特别是现今盆地的北部地区水体加深明显,湖盆中心开始向西部和北部迁移。到 J_{2x} 沉积时期,区域内Ba和Mn元素含量整体较低,而Mg元素含量在整个平面上普遍增加,说明 J_{2x} 沉积时期水体水位有所下降,但北部地区仍然发育相对较深的水体,水体中心持续向北、向西迁移。

2.2.2 古盐度的分布与演变

利用B/Ga, Rb/K, V/Ni和Sr/Ca元素含量比值与水体盐度呈正相关的性质,对 J_1b , J_{1s} 和 J_{2x} 沉积时期的水体盐度及演变规律展开分析(图6,图7)。 J_1b-J_{2x} 沉积时期,整体呈现出比值增大的趋势, B/Ga与Rb/K元素含量比值在3个沉积时期一直呈现上升趋势,说明水体的盐度总体呈上升的特点。而Sr/Ca与V/Ni元素含量比值在3个沉积时期则呈现出先下降后上升的变化趋势。通过前面对研究区水体深度演变规律的分析可知, J_1b-J_{1s} 沉积时期,水体深度增加,并达到水西沟群沉积时期的最大湖侵阶段。水体的加深造成湖体盐度降低,这与Sr/Ca和V/Ni元素含量比值所反映出来的特征相一致。由于这两对元素含量比值上升的幅度皆大于下降的幅度,即 J_{2x} 沉积时期的元素含量比值较 J_1b 更高,说明 J_1s-J_{2x} 沉积时期盐度虽然经历了一次下降,但后期又逐渐升高。这一现象与研究区古气候逐渐炎热带来的蒸发量的上升以及逐渐增加的物源供给存在一定关系^[25, 36-37]。同时,箱形图分析显示, J_1b 和

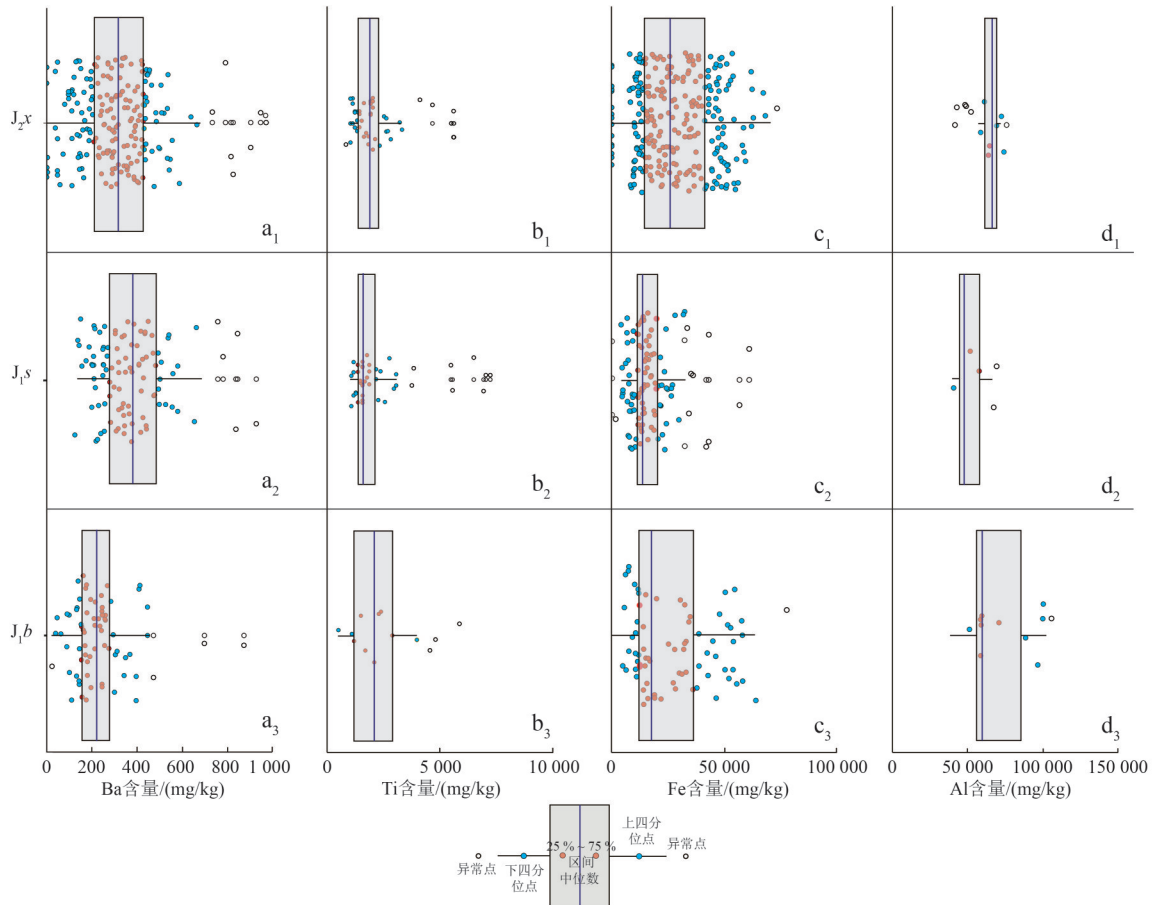


图4 台北凹陷水西沟群反映古水深的微量元素分布箱形图

Fig. 4 Box plots showing the distributions of trace elements as proxies of the paleo-water depth in the Shuixigou Group, Taibei Sag

a_1 — a_3 , b_1 — b_3 , c_1 — c_3 , d_1 — d_3 . 分别为 Ba, Ti, Fe 和 Al 微量元素分布箱形图; a_1 — d_1 , a_2 — d_2 , a_3 — d_3 . 分别为 J_{2x} , J_{1s} 和 J_{1b}

J_{1s} 沉积时期, 元素含量比值的中值整体偏低, 但上四分位数明显偏高, 表明 J_{1b} 沉积时期盐度整体偏低, 但存在一定的高盐度区。B/Ga 与 Rb/K 元素含量比值在 J_{1s} 沉积时期增大可能受局部地区水体深度减小的影响。

由于吐哈盆地油气勘探主要集中在中-上侏罗统, 所以下侏罗统数据点较少, 由于数据点不均衡, 平面上微量元素值分布特征未能全面反映出水体盐度的分布规律, 但对整个区域平面变化仍然具有一定的体现。从 J_{1b} 沉积时期的 V/Ni 元素含量比值来看, 盆地西部地区水体盐度有一个高值。同时, 在丘东洼陷南部区域存在一处相对高值的区域, 并且 Fe/Mn 和 Mg/Ca 元素含量比值均显示该处存在一个高值, 表明 J_{1b} 沉积时期丘东洼陷南部水体盐度略高于东部的特征。到 J_{1s} 沉积时期, 水体盐度整体变小, 但是在胜北和丘东洼陷之间发育一个北东向的相对中-高值区, 显示此区域该时期可能为相对的构造高部位, 水体盐度略大于东、西两侧的次洼, 对两侧的次洼具有一定的分割作用, J_{1s} 沉积时期的水体深度分布图上也能体现出这种现象(图5)。 J_{2x} 沉积时期, 盆地局部地区盐度较 J_{1s} 略

有增加, 相对高值区主要位于胜北洼陷的南部、丘东洼陷和盆地的北部地区。

3 构造-沉积演化对煤系烃源岩分布的影响

3.1 烃源岩类型与厚度分布

构造的抬升与沉降直接影响了沉积水体的深浅和分布, 进而控制了地层沉积类型与展布。通过对整个台北凹陷钻遇水西沟群录井资料的统计, 结合区域地震资料编制水西沟群3个层段暗色泥岩和煤层厚度分布图(图8)。

J_{1b} , J_{1s} 和 J_{2x} 沉积时期的暗色泥岩厚度中心都位于现今台北凹陷的北侧。其中 J_{1b} 泥岩厚度主要分布在盆地的中东部。从东西向构造演化图(图3c)上可以看出, 在 J_{1b} 沉积期间, 虽然盆地两侧均发育断陷特征, 但是整体表现为东低、西高, 东部地区为沉降和沉积中心, 水体更深, 这点与反映水体深度的微量元

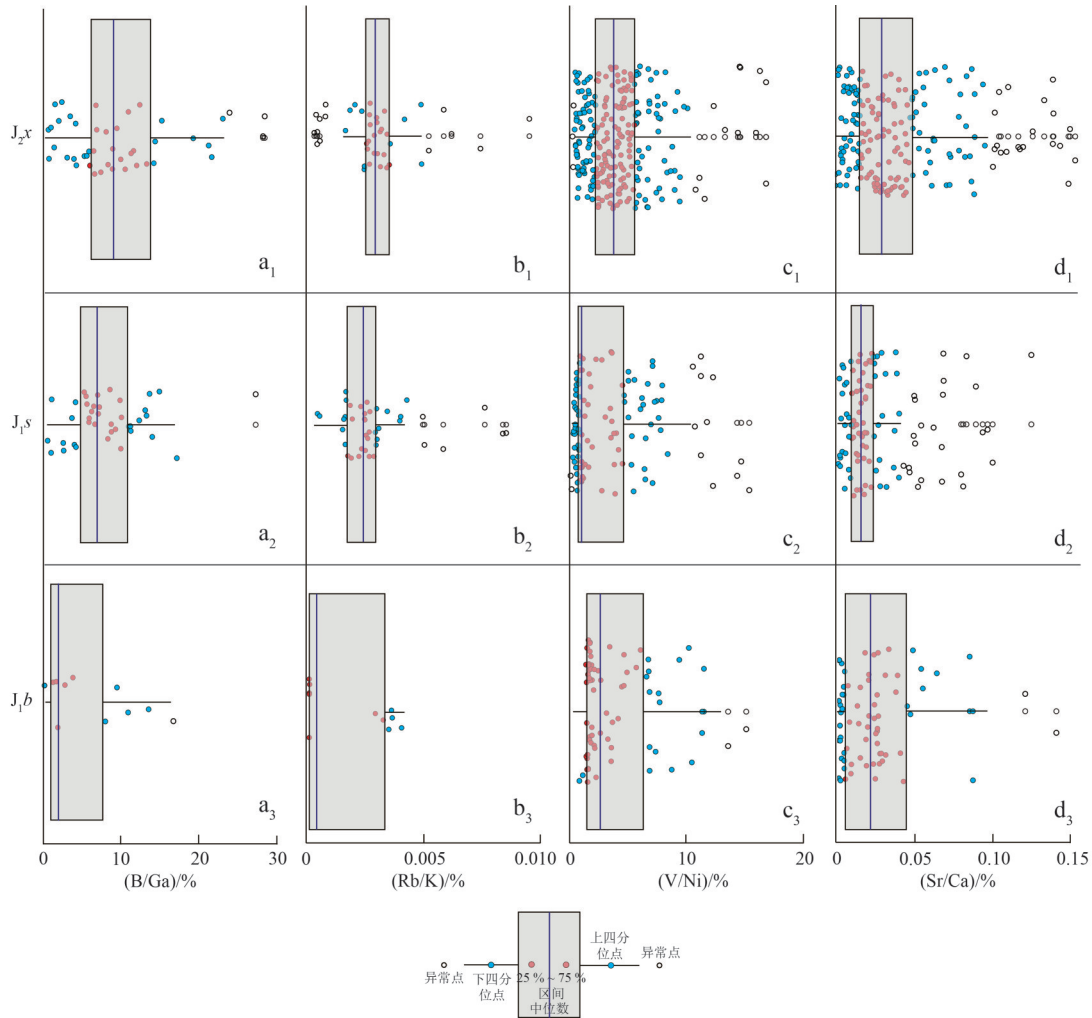


图6 台北凹陷水西沟群反映古水体盐度的微量元素含量比值分布箱形图

Fig. 6 Box plots showing the distributions of trace element content ratios as proxies of the salinity of paleo-water bodies in the Shuixigou Group, Tabei Sag

a_1 — a_3 , b_1 — b_3 , c_1 — c_3 , d_1 — d_3 . 分别为 B/Ga, Rb/K, V/Ni 和 Sr/Ca 微量元素含量比值分布箱形图; a_1 — d_1 , a_2 — d_2 , a_3 — d_3 . 分别为 J_{2x} , J_{1s} 和 J_{1b}

水退旋回,厚煤层的形成与分布受湖盆水体变动的影响明显,在水进沼泽化界面与水退沼泽化界面之间形成的富营养沼泽相是聚煤的有利空间,此时可容纳空间满足泥炭堆积的最佳速率^[43]。因此,在水进刚开始阶段水体相对较浅的 J_{1b} 沉积早期(图9)和 J_{2x} 沉积早—中期(图10)以及水退阶段水体变浅的 J_{1b} 沉积晚期是有利的聚煤环境。 J_{1b} 煤层厚度中心位于胜北洼陷北部核桃沟地区,最大累计厚度超 100 m。 J_{2x} 底部发育区域较稳定的厚煤层,单煤层厚度在 15 m,分布范围广,在整个台北凹陷中几乎都有分布,其中在北部的山前带地区沉积厚度最大,煤岩累计厚度最大超 200 m。

3.3 成烃环境的演变对有机质类型和有机质丰度的影响

水体盐度的变化对有机质富集起到了重要的影

响^[44-45],盐度的变化与湖盆生物类型的发育有着密切关系^[46]。研究表明,有机质的丰度随盐度指数(Sr/Ca)的增加表现出先增大后减小的特征^[47-48],较高的盐度以及缺氧环境下的湖盆水,为有机质的保存提供了优质的条件,有利于有机质的保存。台北凹陷 J_{1b} 沉积时期水体盐度整体为淡水特征,从微量元素的平面分布特征图上(图7)可以看出,局部地区存在盐度异常,有机质以陆源物质输入为主。到 J_{1s} 沉积时期,水体加深,盆地整体盐度较均衡,从反映盐度的微量元素分布箱形图上可以看出, J_{1s} 沉积时期盐度整体分布范围较集中,说明盆地内盐度整体较为一致。源岩母源物质以硅藻与苔藓植物、浮游生物与陆源植物混合为主。到 J_{2x} 沉积时期,水体盐度开始明显增加,盐度的增加对有机质的富集起到了明显的作用^[37]。胜北洼陷水西沟群烃源岩有机质类型和有机碳含量的纵向分布显示,从 J_{1b} — J_{2x}

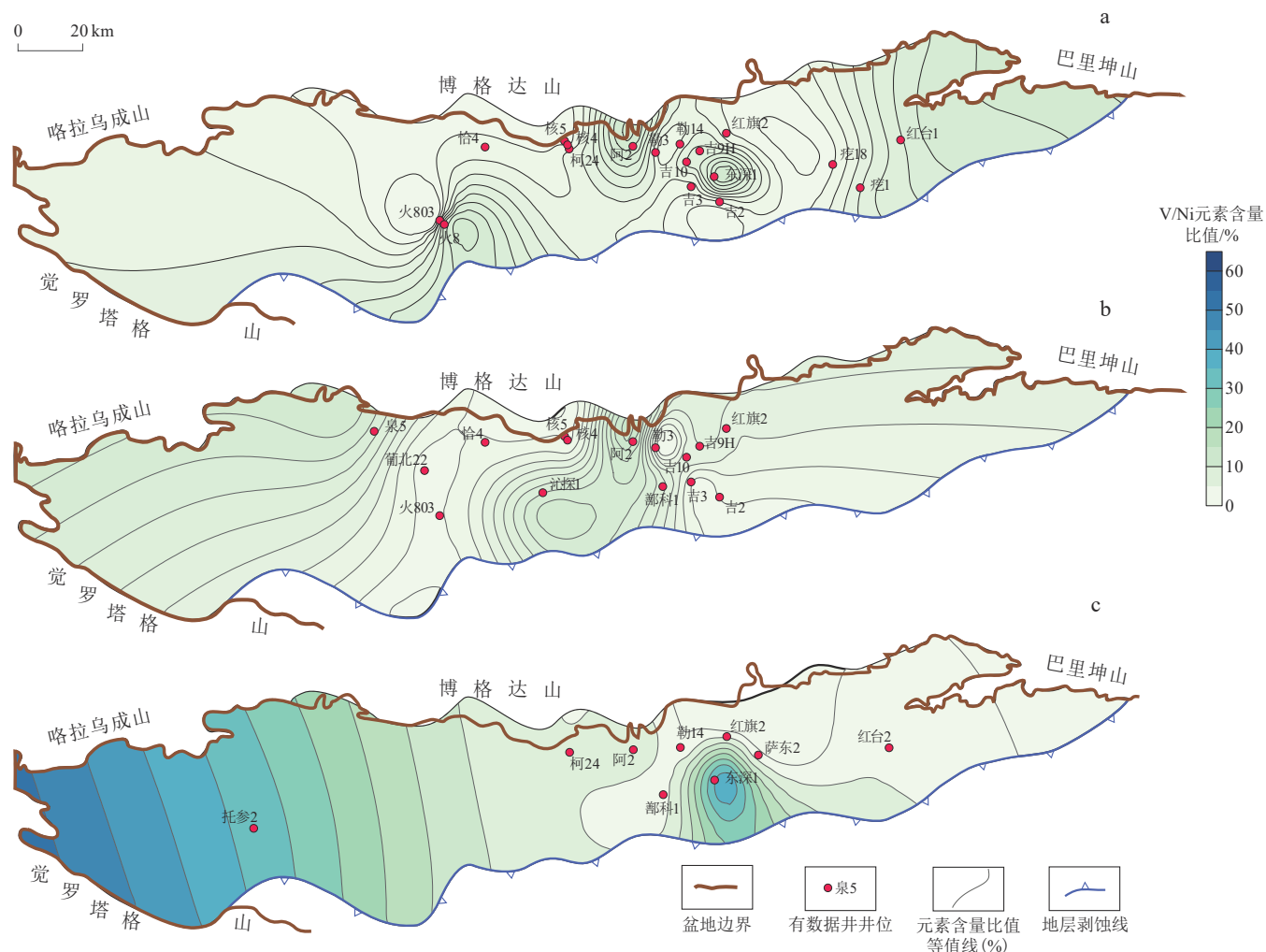


图7 台北凹陷水西沟群反映古水体盐度特征的V/Ni元素含量比值平面分布

Fig. 7 Contour maps showing the V/Ni ratio as a proxy of the salinity of paleo-water bodies in the Shuixigou Group, Tabei Sag

a. J_{2x} ; b. J_{1s} ; c. J_{1b}

沉积时期具有有机质类型变好及有机碳含量增大的趋势。 J_{1b} 烃源岩以Ⅲ型和Ⅱ₂型为主, J_{1s} 以Ⅱ型为主,而在 J_{2x} 泥岩中部分有机质类型逐渐转变为Ⅱ型和Ⅰ型,暗色泥岩总有机碳含量可达5.8%,此时的有机质主要由水生生物和陆生植物混合母质生成,但总体母质中仍以陆源有机质为主。

4 沉积环境变迁下有利于煤岩气保存的顶-底板岩性组合及其空间分布

煤岩顶-底板的封盖条件决定了煤岩储层中煤岩气是否能够有效富集^[12,17],因此,对煤岩顶板和底板岩性组合的研究是预测有利煤岩气富集区的重要手段。

早-中侏罗世,吐哈盆地台北凹陷总体表现为南缓北陡的特征(图11),南、北两侧物源提供的碎屑物质不断地向湖盆中心搬运,近物源区主要发育辫状河三角洲

上平原相带,沉积的砂体粒度整体偏粗,分选性较差,颗粒磨圆度差(以棱角状和次棱角状为主),煤层不发育,仅在湖泛时期形成有限分布的沼泽相。靠近湖盆中心地区发育辫状河三角洲下平原相带,主要以水下分流河道微相为主,砂体粒度偏细,在水退时期湖盆中心受南、北两侧物源的汇聚作用影响,发育较厚的粗砂体,整体分选性和磨圆度较上平原相带有所提高。同时,辫状河三角洲下平原相带是沼泽相发育的主要地区,特别是水退时期可以使整个湖盆发生沼泽化,是有利的聚煤区。

构造-沉积环境的演变造成煤岩在纵向上与不同沉积相岩性体叠置发育,在不同的构造位置形成了多种类型的煤岩顶-底板岩性组合。基于煤岩的分布位置,对台北凹陷南北缓坡带、中间洼陷带和北部陡坡带关键煤层发育区的10个煤岩顶-底板岩性组合开展分析,指出有利于煤岩气保存的顶-底板组合类型及其空间分布位置。

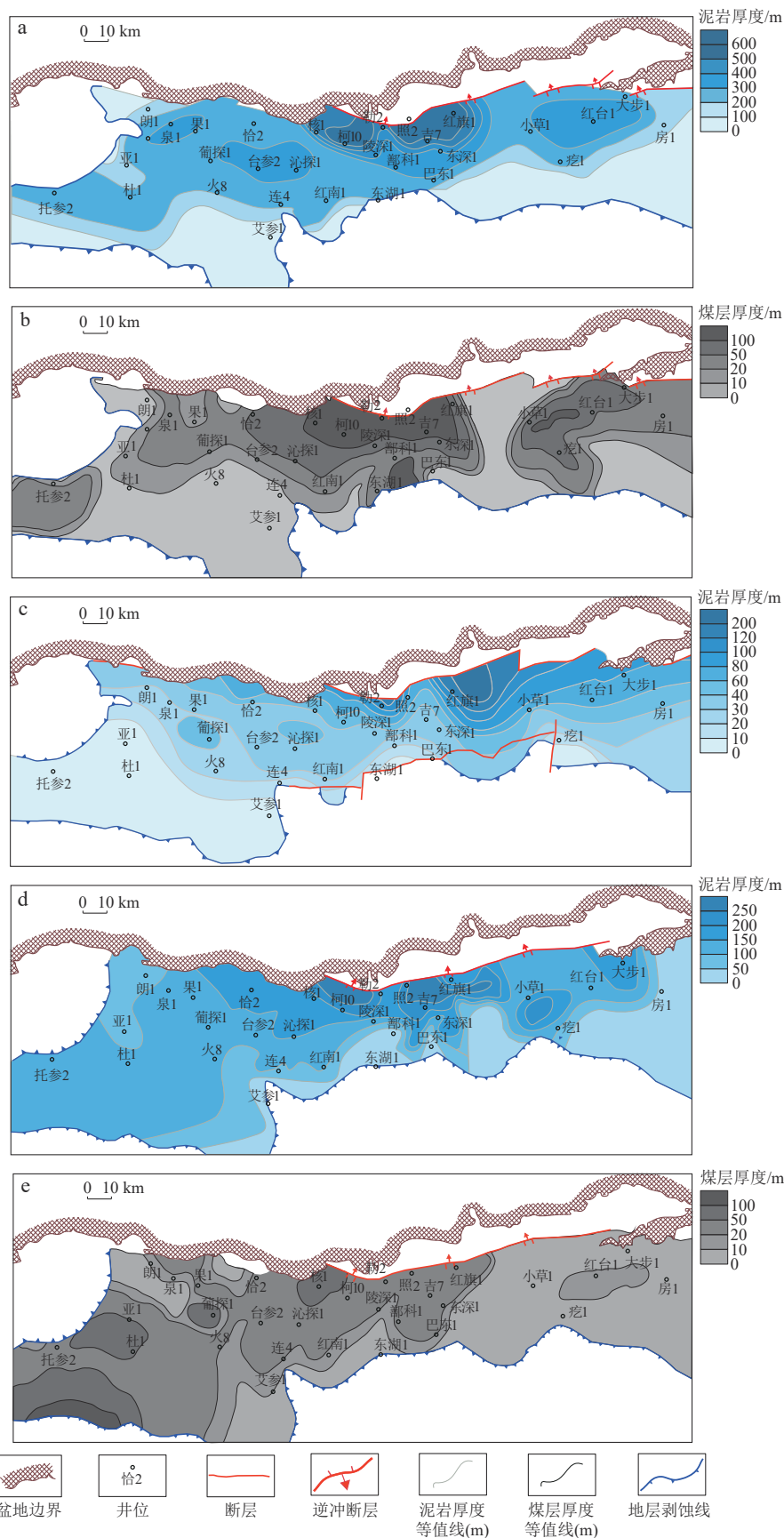


图8 台北凹陷水西沟群不同层段暗色泥岩和煤层厚度分布

Fig. 8 Isopach maps of dark mudstones and coal seams in various intervals of the Shuixigou Group, Taibei Sag

a. J_{2x} , 暗色泥岩; b. J_{2x} , 煤层; c. J_{1s} , 暗色泥岩; d. J_{1b} , 暗色泥岩; e. J_{1b} , 煤层

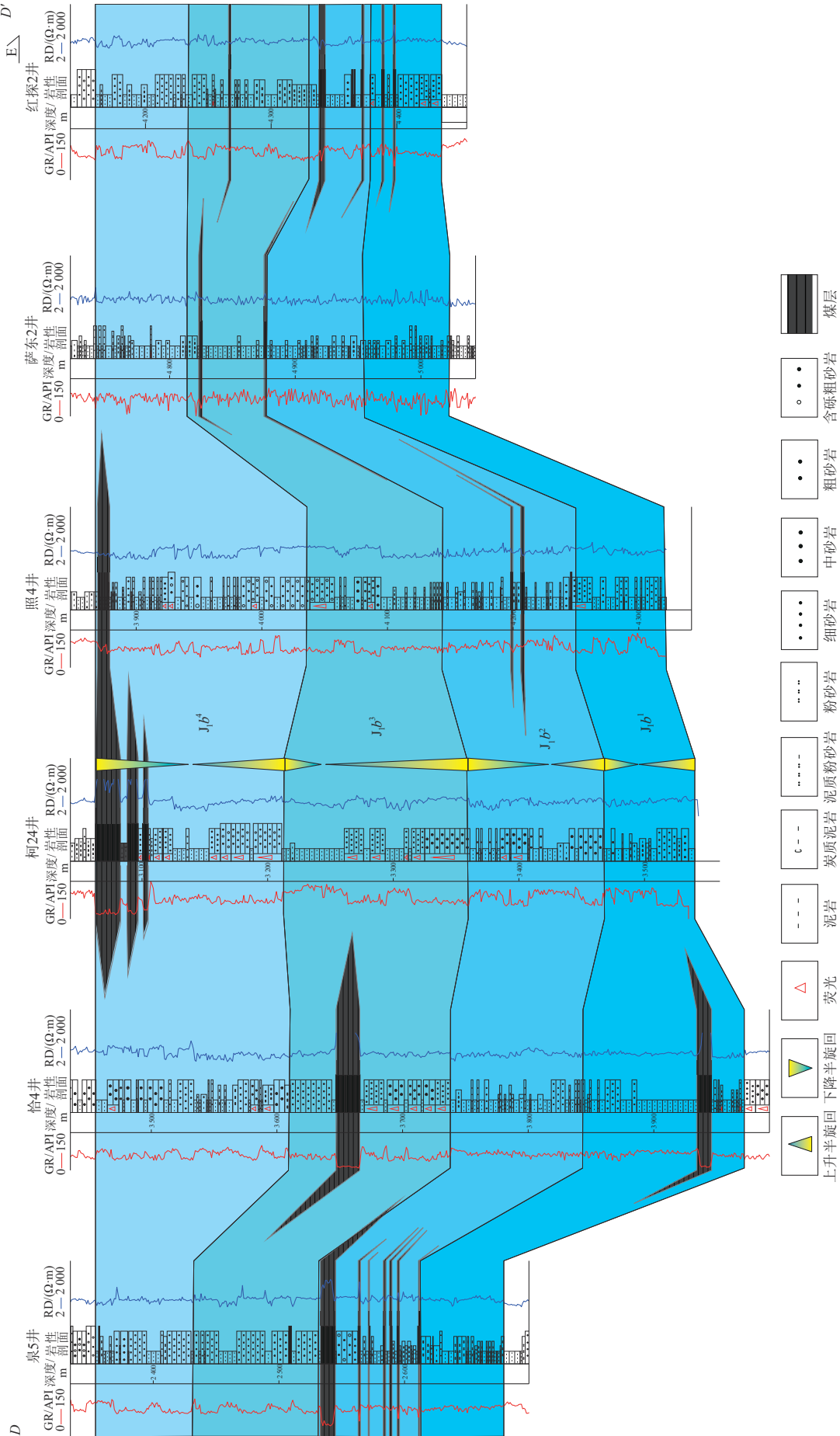


图9 台北凹陷八道湾组东西向煤岩展布特征(剖面位置见图1b)

Fig. 9 EW-striking section showing the distribution of coals in the Badaowan Formation, Taibei Sag (see Fig. 1b for the section location)

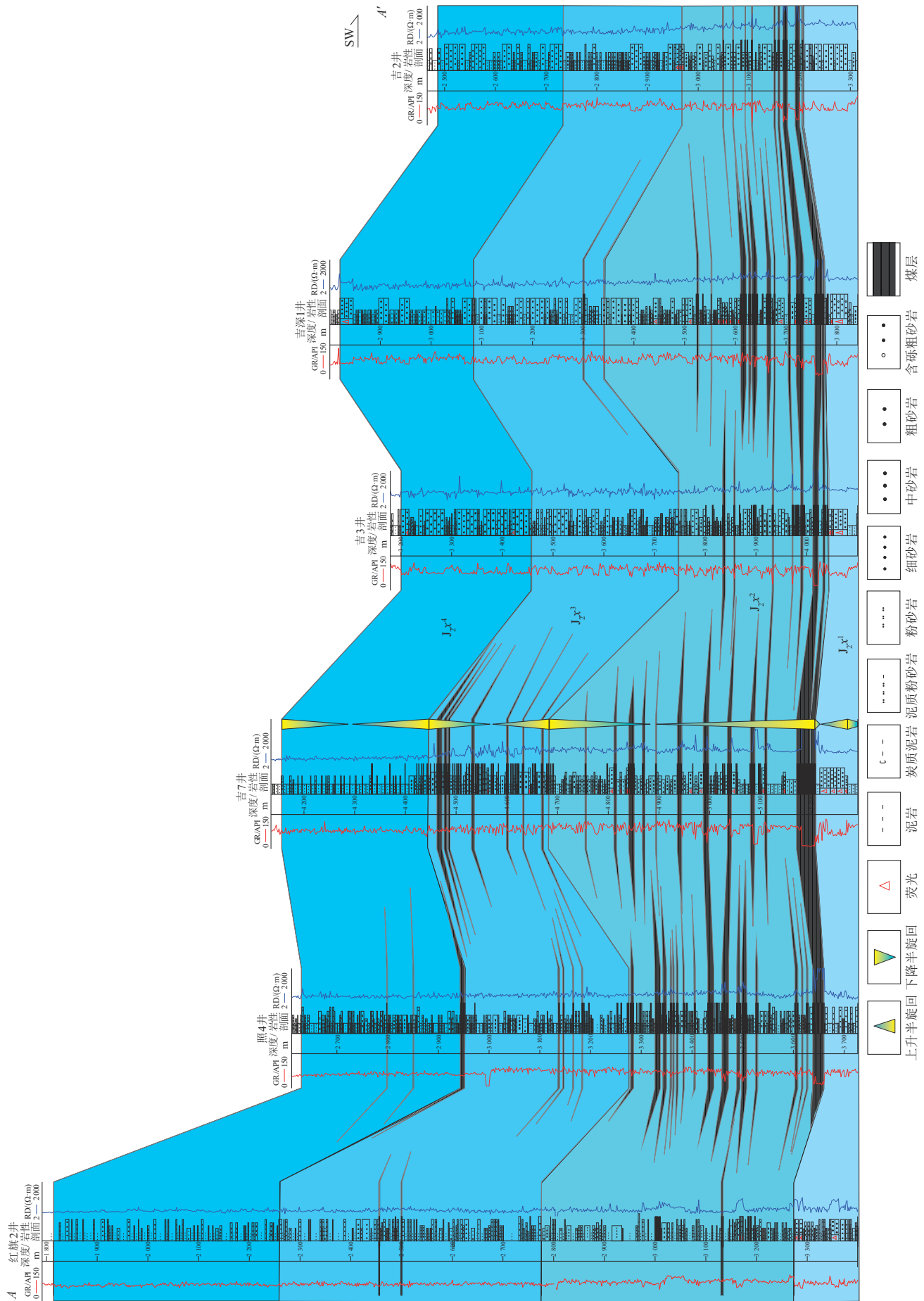


图 10 丘东洼陷西山窑组南北向煤岩展布特征(剖面位置见图 1b)
Fig. 10 SN-striking section showing the distribution of coals in the Xishanyao Formation, Qiudong sub-sag
(see Fig. 1b for the section location)

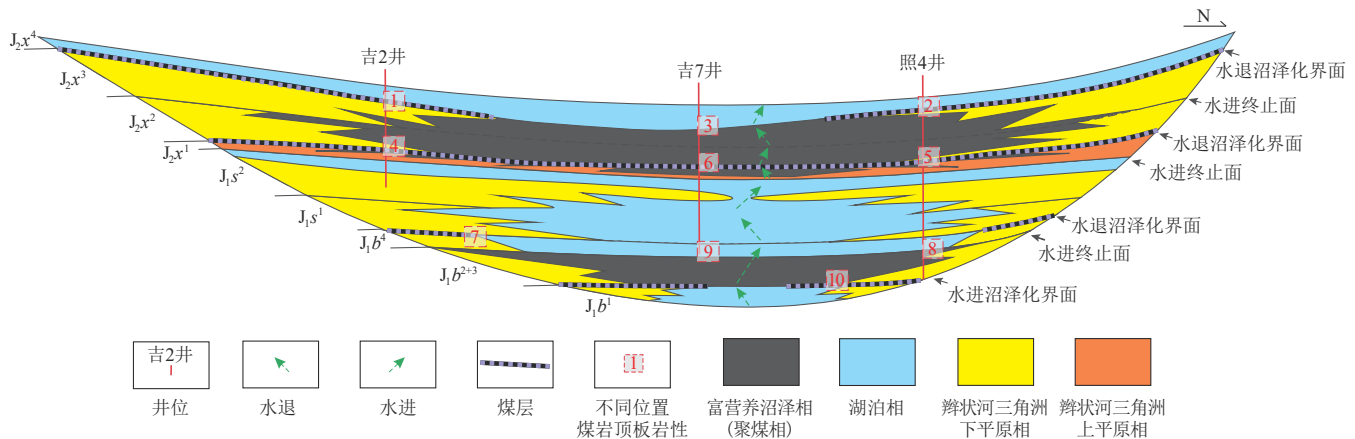


图11 台北凹陷水西沟群煤层成因与分布模式示意图

Fig. 11 Schematic diagram showing the origin and distribution pattern of coal seams in the Shuixigou Group, Taibei Sag

J_2x^3 — J_2x^4 煤岩在台北凹陷南部地区煤层薄(图11中1区),并且煤层在空间上位于辫状河三角洲砂体发育区,顶-底板保存条件差;盆地北部的照4井区(图11中2区),煤层累计厚度大,泥岩发育,煤层的顶-底板以细粒的泥质粉砂岩或者泥岩为主,组合类型好,有利于煤岩气的保存;洼陷区(吉7井区为例;图11中3区)煤层十分发育,煤层多且单层厚,煤层整体位于 J_2x^4 厚层泥岩之下,与 J_2x^3 泥岩互层,组合类型十分优越。 J_2x^2 是 J_2x 的主要煤层发育段,特别是在 J_2x^2 底部发育一套区域较稳定的厚煤层,是吐哈盆地主力的煤岩气勘探目的层。由于 J_2x^1 沉积时期盆地整体水退,两侧物源供给充足, J_2x^1 普遍发育一套含砾粗砂岩,因此,发育于这套砂体之上的煤岩底板条件较差,特别是在凹陷的两侧(图11中4区和5区)。但是,位于凹陷中心区湖盆水体仍较发育,在 J_2x^1 砂体之上发育一层近10 m厚的泥岩(图11中6区),对顶部的厚煤层起到了很好的底板遮挡作用。因此,洼陷的中心区 J_2x^3 — J_2x^4 和 J_2x^2 煤岩顶-底板组合类型优越,是煤岩气富集和保存的有利发育区。

J_1b 煤层规模和厚度整体都逊色于 J_2x ,在台北凹陷的东、西两侧煤层发育较差,南部地区煤层薄(图11中7区),北部地区煤层厚(图11中8区)。针对 J_1b 煤岩叠置组合类型分析,认为 J_1b 上部煤层(J_1b^4)(图11中8区和9区)具备有利的保存条件。该区位于台北凹陷的中北部,是整个水西沟群的沉积中心,由于水体相对较深, J_1s 底部砂体并不发育,使得 J_1b 顶部煤层之上发育(泥质)粉砂岩顶板,同时煤岩底部发育以泥岩为主夹少量薄砂层的底板,保存条件好。 J_1b 沉积早期,区域整体以水退为主,发育了一套向湖盆中心进积的砂体,后期水体开始逐渐加深,在砂体之上形成了水进沼泽化界面,开

始发生聚煤作用并形成了 J_1b 中-下部的煤层(J_1b^1 — J_1b^3)。该煤层顶板以泥岩为主,封闭性好,但是底板条件整体较差(图11中10区),主要以辫状河三角洲的水下分流河道砂体为主,因而 J_1b 中-下部的煤岩整体保存条件较差。

5 结论

1) 早-中侏罗世吐哈盆地台北凹陷发育东、西2个沉降-沉积中心,西高、东低;此后受北部博格达山的持续挤压推覆作用,沉积中心由北向南逐渐迁移;在晚侏罗世末期,北部发生构造强烈抬升,沉积中心继续向腹部迁移并造成东高西低的地势特征,形成了现今的胜北、丘东和小草湖洼陷,3个沉降中心逐渐向东抬升变浅。

2) 区域钻井岩心微量元素分析揭示,水西沟群八道湾组—三工河组水体加深,盐度变小;三工河组—西山窑组水体逐渐变浅,盐度增大。八道湾组沉积期间,盆地东部地区的水体较深,湖盆中心位于小草湖区域,区域内总体表现为东深、西浅,西部盐度偏高的特点。三工河组沉积时期区域内水体普遍加深,湖盆中心开始向西部和北部迁移。西山窑组沉积时期水位略有下降,盐度有所增大,但北部地区仍然发育相对较深的水体,水体中心持续向南、向西迁移。

3) 受构造-沉积演变的影响,平面上泥岩的厚度中心具有自西向东迁移的特征,但均位于盆地的北侧,且泥岩的厚度分布规律与反映古水深的微量元素平面分布规律十分吻合。纵向上,受古水体盐度的影响,八道湾组—西山窑组有机质类型和丰度具有逐渐变好的趋势。

4) 水西沟群沉积期发生频繁的水体变动,在八道湾组早期和晚期、西山窑组早-中期水体相对较浅,为有利的聚煤环境,是吐哈盆地煤岩发育的主要层段;依据煤岩沉积环境演变成煤岩在纵向上与不同沉积相岩性体叠置组合的特征,指出了西山窑组和八道湾组发育5个有利的煤岩顶-底板组合区。这些认识为下一步煤岩气的勘探部署提供了指导。

参 考 文 献

- [1] 支东明, 李建忠, 陈旋, 等. 吐哈盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2122-2140.
ZHI Dongming, LI Jianzhong, CHEN Xuan, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Tuha Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2122-2140.
- [2] 倪云燕, 廖凤蓉, 龚德瑜, 等. 吐哈盆地台北凹陷天然气碳氢同位素组成特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 509-520.
NI Yunyan, LIAO Fengrong, GONG Deyu, et al. Stable carbon and hydrogen isotopic characteristics of natural gas from Taibei sag, Turpan-Hami Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 509-520.
- [3] 倪良田, 钟建华, 王桂林, 等. 吐哈盆地水西沟群致密砂岩气成藏机制新理论——近生近储和自生自储[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 176-186.
NI Liangtian, ZHONG Jianhua, WANG Guilin, et al. A new gas-accumulation theory of tight sandstone gas accumulation in Turpan-Hami Basin-proximal-generation and proximal-storage type and self-generation and self-storage type[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 176-186.
- [4] 何海清, 梁世君, 郭绪杰, 等. 吐哈盆地洼陷区中下侏罗统岩性油气藏风险勘探新发现及勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(7): 1025-1035.
HE Haiqing, LIANG Shijun, GUO Xujie, et al. New discoveries and exploration prospects of middle and Lower Jurassic lithologic reservoirs in depression area of Turpan-Hami basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(7): 1025-1035.
- [5] 陈旋, 王居峰, 肖冬生, 等. 台北凹陷下侏罗统致密砂岩气成藏条件与勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(5): 505-512.
CHEN Xuan, WANG Jufeng, XIAO Dongsheng, et al. Accumulation conditions and exploration direction of Lower Jurassic tight sandstone gas reservoirs in Taibei Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 505-512.
- [6] 刘玉虎, 赵丹丹, 刘兴旺, 等. 吐哈侏罗纪原型盆地演化对烃源岩分布的控制[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(4): 29-39.
LIU Yuhu, ZHAO Dandan, LIU Xingwang, et al. The evolution of Turpan-Hami Jurassic prototype basin and its control on the distribution of source rocks[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(4): 29-39.
- [7] 赵长毅, 程克明, 何忠华. 吐哈盆地侏罗纪煤系有机质成烃作用[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(4): 23-27.
ZHAO Changyi, CHENG Keming, HE Zhonghua. Hydrocarbon generation from Jurassic coal and coaly organic matters in Turpan-Hami Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(4): 23-27.
- [8] 赵长毅, 赵文智, 程克明, 等. 吐哈盆地煤成油形成的地质条件[J]. 沉积学报, 1997, 15(增刊1): 16-23.
ZHAO Changyi, ZHAO Wenzhi, CHENG Keming, et al. Geological conditions on forming oil-gas field from Jurassic coals in Tuha Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(S1): 16-23.
- [9] GREENE T J, ZINNIKER D, MOLDOWAN J M, et al. Controls of oil family distribution and composition in nonmarine petroleum systems: A case study from the Turpan-Hami basin, northwestern China[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(4): 447-481.
- [10] 曹代勇, 邵龙义, 张鹏飞. 吐哈盆地早、中侏罗世聚煤期古构造[J]. 古地理学报, 1999, 1(2): 46-52.
CAO Daiyong, SHAO Longyi, ZHANG Pengfei. Palaeotectonics in the Early and Middle Jurassic coal-forming periods of the Turpan-Hami Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 1999, 1(2): 46-52.
- [11] 肖冬生, 王柏然, 姚宗森, 等. 吐哈盆地丘东洼陷三工河组致密砂岩油气成藏过程分析[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(2): 275-287.
XIAO Dongsheng, WANG Boran, YAO Zongsen, et al. Hydrocarbon accumulation process analysis of tight sandstone reservoirs in Sangonghe Formation, Qiudong sub-sag, Turpan-Hami Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(2): 275-287.
- [12] 郭绪杰, 支东明, 毛新军, 等. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 38-49.
GUO Xujie, ZHI Dongming, MAO Xinjun, et al. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 38-49.
- [13] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1764-1780.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1764-1780.
- [14] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1791-1811.
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1791-1811.
- [15] 郭旭升, 周德华, 赵培荣, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1013-1023.
GUO Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata,

- Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1013–1023.
- [16] 康永尚, 皇甫玉慧, 张兵, 等. 含煤盆地深层“超饱和”煤层气形成条件[J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1426–1438.
- KANG Yongshang, HUANGFU Yuhui, ZHANG Bing, et al. Formation conditions for deep oversaturated coalbed methane in coal-bearing basins [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(12): 1426–1438.
- [17] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 277–285.
- HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 277–285.
- [18] 刘洪林, 李黎明, 王红岩, 等. 水动力对煤层气成藏的差异性研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(3): 35–37.
- LIU Honglin, LI Jingming, WANG Hongyan, et al. Different effects of hydrodynamic conditions on coal-bed gas accumulation [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(3): 35–37.
- [19] 李新宁, 梁辉, 姚梦多, 等. 吐哈盆地沙尔湖凹陷侏罗系煤层气勘探新认识[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(16): 33–39.
- LI Xinning, LIANG Hui, YAO Mengduo, et al. A new understanding of exploration of coalbed methane in Sha'erhu sag[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(16): 33–39.
- [20] 王涛, 邓泽, 胡海燕, 等. 吐哈盆地侏罗系煤层气资源潜力分析[J]. *中国科技论文*, 2021, 16(9): 1023–1029, 1034.
- WANG Tao, DENG Ze, HU Haiyan, et al. Potential analysis of Jurassic coal-bed gas resources in Tuha Basin [J]. *China Sciencepaper*, 2021, 16(9): 1023–1029, 1034.
- [21] 支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 吐哈盆地丘东洼陷侏罗系致密砂岩气勘探突破及意义[J]. *石油学报*, 2024, 45(2): 348–357.
- ZHI Dongming, LI Jianzhong, YANG Fan, et al. Exploration breakthrough and significance of Jurassic tight sandstone gas in Qiudong subsag of Tuha Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(2): 348–357.
- [22] 章惠, 旷红伟, 柳水清, 等. 北疆东部三塘湖与吐哈地区中侏罗统西山窑组沉积差异性对博格达山隆升时间的约束[J]. *地质通报*, 2013, 32(2): 443–455.
- ZHANG Hui, KUANG Hongwei, LIU Yongqing, et al. The sedimentary differences of the Middle Jurassic Xishanyao Formation between Santanghu area and Turpan-Hami area and their constraint on the uplifting of the Bogda Mountain [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(2): 443–455.
- [23] 杨浩, 李涤, 侯烁钦, 等. 准噶尔盆地东北缘石炭系年代—地层格架: 对卡拉麦里洋闭合时限的启示[J]. *地质科学*, 2023, 58(1): 105–123.
- YANG Hao, LI Di, HOU Shuoqin, et al. Carboniferous chronostratigraphic framework in the northeastern margin of the Junggar Basin: Implications for the closure time of Karamaili Ocean[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2023, 58(1): 105–123.
- [24] 张晶, 郝彬, 李双文, 等. 吐鲁番坳陷侏罗系物源体系变迁及其油气意义[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(4): 730–741.
- ZHANG Jing, HAO Bin, LI Shuangwen, et al. Changes of Jurassic provenance system in Turpan depression and its oil and gas exploration significance [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(4): 730–741.
- [25] 甄宇, 陈旋, 焦立新, 等. 东疆地区石炭纪—二叠纪构造古地理与原型盆地演化[J]. *古地理学报*, 2024, 26(1): 78–99.
- ZHEN Yu, CHEN Xuan, JIAO Lixin, et al. Carboniferous–Permian tectono-palaeogeography and prototype basin evolution in eastern Xinjiang, NW China [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2024, 26(1): 78–99.
- [26] 朱文斌, 马瑞士, 胡德昭, 等. 新疆觉罗塔格山与吐哈盆地的构造接触关系[J]. *大地构造与成矿学*, 2001, 25(2): 128–135.
- ZHU Wenbin, MA Ruishi, HU Dezhao, et al. Structural contact relationship between Jiaolotage Mountain and Tu-Ha Basin, Xinjiang Province [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2001, 25(2): 128–135.
- [27] 李学杰, 陈芳, 陈超云, 等. 南海西部浮游有孔虫含量与水深关系定量研究[J]. *古地理学报*, 2004, 6(4): 442–447.
- LI Xuejie, CHEN Fang, CHEN Chaoyun, et al. Quantitative research on relationship between planktonic foraminifera content and water depth in western South China Sea [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2004, 6(4): 442–447.
- [28] 郭晓强, 李好斌, 魏荣珠, 等. 山西沁水盆地西缘寒武系碳酸盐岩的元素地球化学特征及其古环境意义[J]. *古地理学报*, 2020, 22(2): 349–366.
- GUO Xiaoqiang, LI Haobin, WEI Rongzhu, et al. Characteristics of elemental geochemistry of the Cambrian carbonate rocks and their palaeoenvironmental implication in western margin of Qinshui Basin, Shanxi Province [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2020, 22(2): 349–366.
- [29] 康波, 解习农, 杜学斌, 等. 基于滨线轨迹的古水深定量计算新方法——以古近系沙三段东营三角洲为例[J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 443–450.
- KANG Bo, XIE Xinong, DU Xuebin, et al. A new paleobathymetric approach based on shoreline trajectory: An example from Dongying delta in the third member of Paleogene Shahejie Formation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(3): 443–450.
- [30] 孙立东, 杨亮, 李笑梅, 等. 徐家围子断陷沙河子组烃源岩形成古环境及主控因素[J/OL]. *沉积学报*, 2024, 42(5): 1753–1764.
- SUN Lidong, YANG Liang, LI Xiaomei, et al. Paleoenvironment and main controlling factors of source rocks in the Shahezi Formation, Xujiaweizi fault depression [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1753–1764.
- [31] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. *地球化学*, 2008, 37(1): 59–64.
- ZHANG Wenzheng, YANG Hua, YANG Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin [J]. *Geochimica*, 2008, 37(1): 59–64.
- [32] 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.
- LIN Zhijia, CHEN Duofu, LIU Qian. Geochemical indices for

- redox conditions of marine sediments[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(1): 72–80.
- [33] 余文强, 杨田, 蔡来星, 等. 四川盆地中部中侏罗统沙溪庙组沉积期古环境与古气候演化——以永浅1井为例[J]. *地质学报*, 2024, 98(4): 1211–1228.
- YU Wenqiang, YANG Tian, CAI Laixing, et al. Paleoenvironment and paleoclimate evolution during the depositional period of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin: A case study of Well Yongqian 1[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(4): 1211–1228.
- [34] 王敏芳, 焦养泉, 王正海, 等. 沉积环境中古盐度的恢复——以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(6): 719–722.
- WANG Minfang, JIAO Yangquan, WANG Zhenghai, et al. Recovery paleosalinity in sedimentary environment—An example of mudstone in Shuixigou group, southwestern margin of Turpan-Hami Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(6): 719–722.
- [35] 张代生, 付国斌, 秦恩鹏, 等. 新疆吐哈盆地侏罗纪古植被与古气候及古环境的探讨[J]. *现代地质*, 2002, 16(2): 147–152.
- ZHANG Daisheng, FU Guobin, QIN Enpeng, et al. Jurassic palaeoclimate, palaeovegetation and palaeoenvironment in the Tuha Basin in Xinjiang[J]. *Geoscience*, 2002, 16(2): 147–152.
- [36] YAN Zhiming, WANG Jinlong, WANG Xuetian. Sedimentary environments and coal accumulation of the Middle Xishanyao Formation, Jurassic, in the western Dananhu Coalfield, Turpan-Hami Basin[J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 6034055.
- [37] 郑克涛, 李吉君, 张春林, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下烃源岩有机质富集机制[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(1): 128–144.
- ZHENG Ketao, LI Jijun, ZHANG Chunlin, et al. Organic matter enrichment mechanism of Ordovician pre-salt source rocks in the eastern-central Ordos Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(1): 128–144.
- [38] 王东东, 邵龙义, 刘海燕, 等. 超厚煤层成因机制研究进展[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6): 1487–1497.
- WANG Dongdong, SHAO Longyi, LIU Haiyan, et al. Research progress in formation mechanisms of super-thick coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1487–1497.
- [39] 邵龙义, 党星宇, 高祥宇, 等. 厚煤层成因机制——天文周期控制的多期次泥炭沼泽叠加模式[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 186–195.
- SHAO Longyi, DANG Xingyu, GAO Xiangyu, et al. Genetic mechanism of thick coal seams: Astronomical-forcing superimposed multi-staged swamp model [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 186–195.
- [40] 邵龙义, 徐小涛, 王帅, 等. 中国含煤岩系古地理及古环境演化研究进展[J]. *古地理学报*, 2021, 23(1): 19–38.
- SHAO Longyi, XU Xiaotao, WANG Shuai, et al. Research progress of palaeogeography and palaeoenvironmental evolution of coal-bearing series in China [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2021, 23(1): 19–38.
- [41] WADSWORTH J, DIESSEL C, BOYD R. The sequence stratigraphic significance of paralic coal and its use as an indicator of accommodation space in terrestrial sediments[M]//RATCLIFFE K T, ZAITLIN B A. *Application of Modern Stratigraphic Techniques: Theory and Case Histories*. Broken Arrow, OK: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2010: 201–219.
- [42] JERRETT R M, FLINT S S, DAVIES R C, et al. Sequence stratigraphic interpretation of a Pennsylvanian (Upper Carboniferous) coal from the central Appalachian Basin, USA[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(5): 1180–1207.
- [43] 杨秀春, 宋柏荣, 陈国辉, 等. 大宁—吉县区块深层煤岩多尺度孔缝结构特征[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(5): 94–100.
- YANG Xiuchun, SONG Bairong, CHEN Guohui, et al. Characteristics of Multi-Scale Pore-Fracture Structure of Deep Coal Rocks in the Daning–Jixian Block [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(5): 94–100.
- [44] 李国欣, 张斌, 伍坤宇, 等. 柴达木盆地咸化湖盆低有机质丰度烃源岩高效生烃模式[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(5): 898–910.
- LI Guoxin, ZHANG Bin, WU Kunyu, et al. Low organic matter abundance and highly efficient hydrocarbon generation of saline source rock in the Qaidam Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(5): 898–910.
- [45] 于乐丹, 彭军, 许天宇, 等. 陆相断陷咸化湖盆细粒沉积地层有机质富集特征及控制因素分析——以东营凹陷沙河街组第四段上亚段纯上次亚段为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(2): 701–722.
- YU Ledan, PENG Jun, XU Tianyu, et al. Analysis of organic matter enrichment and influences in fine-grained sedimentary strata in saline lacustrine basins of continental fault depressions: Case study of the upper sub-section of the upper 4th member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(2): 701–722.
- [46] 孙中良, 王芙蓉, 侯宇光, 等. 盐湖页岩有机质富集主控因素及模式[J]. *地球科学*, 2020, 45(4): 1375–1387.
- SUN Zhongliang, WANG Furong, HOU Yuguang, et al. Main controlling factors and modes of organic matter enrichment in salt lake shale [J]. *Earth Science*, 2020, 45(4): 1375–1387.
- [47] 王波, 吴志雄, 周飞, 等. 柴达木盆地西北区新近系咸化湖盆生烃母质类型与有机质富集机理[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(3): 496–509.
- WANG Bo, WU Zhixiong, ZHOU Fei, et al. The types of hydrocarbon source rocks and the mechanism of organic matter enrichment in the saline lacustrine basin of the Neogene in the northwestern of Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(3): 496–509.
- [48] SHAO Longyi, WANG Xuetian, WANG Dongdong, et al. Sequence stratigraphy, paleogeography, and coal accumulation regularity of major coal-accumulating periods in China [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2020, 7(2): 240–262.