

吐哈盆地台北凹陷中侏罗统西山窑组 河湖相层序-古地理及聚煤作用*

陈梦冉¹ 邵龙义¹ 黄蝶芳² 黄杨杨¹ 李新宁² 马跃东¹ 王兴刚²

1 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2 中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009

摘 要 利用露头剖面及钻井岩心资料对吐哈盆地台北凹陷中侏罗统西山窑组层序-古地理及聚煤规律进行研究。将台北凹陷西山窑组划分为 2 个三级层序, 层序 I 对应西山窑组一、二段, 层序 II 对应西山窑组三、四段。基于对地层厚度、砂岩厚度及砂泥比等单因素等值线图的综合分析, 恢复了 2 个三级层序的岩相古地理格局。台北凹陷南北两侧主要发育辫状河三角洲和曲流河三角洲古地理单元, 中部主要发育湖泊古地理单元; 物源来自北部的博格达山和南部的觉罗塔格山。从西山窑组一、二段到西山窑组三、四段, 台北凹陷经历了沼泽化(层序 I)-湖泊化(层序 II)的过程, 总体为河湖相沉积背景。聚煤作用以层序 I 中的西山窑组二段最强, 聚煤中心位于台北凹陷北部山前带柯柯亚地区, 分布在三角洲平原泥炭沼泽古地理单元; 层序 II 聚煤作用弱, 不含或仅含少量薄煤层。研究基于层序地层学与古地理学理论, 系统分析聚煤作用及煤层分布特征, 可为区内煤层气资源的勘探开发及勘探区块的评价和优选提供理论支持。

关键词 吐哈盆地 西山窑组 河湖相 层序地层 聚煤古地理

第一作者简介 陈梦冉, 女, 1999 年生, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院博士研究生, 地质学专业。E-mail: 2544760899@qq.com。

通讯作者简介 邵龙义, 男, 1964 年生, 工学博士, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院教授、博士生导师, 长期从事沉积学和煤田地质学教学及研究工作。E-mail: ShaoL@cumt.edu.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

Sequence-palaeogeography and coal accumulation of fluvio-lacustrine facies in the Middle Jurassic Xishanyao Formation in Taipei sag, Tuha Basin

CHEN Mengran¹ SHAO Longyi¹ HUANG Diefang² HUANG Yangyang¹
LI Xinning² MA Yuedong¹ WANG Xinggang²

1 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2 Exploration and Development Research Institute, Tuha Oilfield Branch, PetroChina, Xinjiang Hami 839009, China

Abstract This study investigates the sequence stratigraphy, palaeogeography, and coal accumulation patterns of the coal-bearing Xishanyao Formation of the Middle Jurassic in the Taipei sag of Tuha

* 国家自然科学基金项目(编号: 42530208)和中国石油天然气股份有限公司“十四五”前瞻性基础与关键科技项目(编号: 2021DJ2306)联合资助。[Co-funded by the the National Natural Science Foundation of China (No. 42530208) and “14th Five-Year Plan” Forward Looking Basic and Important Science and Technology Project of PetroChina Co., LTD. (No. 2021DJ2306)]

收稿日期: 2025-08-11 改回日期: 2025-11-28

Basin, utilizing outcrop profiles and drilling core data. The Xishanyao Formation in the Taibei sag is divided into two third-order sequences, sequence I corresponds to the first and second members of the Xishanyao Formation, while sequence II corresponds to the third and fourth members. Based on a series of contour maps of lithological parameters such as stratigraphic thickness, sandstone thickness, and sandstone-to-mudstone ratio, the palaeogeographic outlines of the two third-order sequences are reconstructed. The northern and southern parts of the Taibei sag primarily were dominated by braided river deltas and meandering river deltas, while the central area was characterized by lacustrine environment. The provenance came from the northern Bogda Mountains and the southern Juelotag Mountains. From the first and second members to the third and fourth members of the Xishanyao Formation, the Taibei sag underwent a transition from swamp-dominated (sequence I) to lacustrine conditions (sequence II), characterizing a fluvio-lacustrine sedimentary environment. The most intensive peat accumulation occurred in the second member of the Xishanyao Formation within sequence I, with the coal accumulation center located in the northern foothills of the sag, especially in the Kekeya area, which was situated in palaeogeographic settings such as delta plains and peat swamps. In contrast, coal accumulation in sequence II was weak, with only thin or no coal seams developed. The results of this study on sequence stratigraphy, palaeogeography, and coal accumulation patterns provide a theoretical basis for coalbed methane exploration and development, as well as for the evaluation and selection of exploration blocks in the Taibei sag.

Key words Tuha Basin, Xishanyao Formation, fluvio-lacustrine facies, sequence stratigraphy, coal accumulation palaeogeography

About the first author CHEN Mengran, born in 1999, is a Ph.D. candidate at School of Earth Sciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), majoring in Geology. E-mail: 2544760899@qq.com.

About the corresponding author SHAO Longyi, born in 1964, doctor of engineering, is a professor and doctoral supervisor at the College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), with main research interests in sedimentology and coal geology. E-mail: shaol@cumt.edu.cn.

吐哈盆地是典型的陆相聚煤盆地,发育侏罗纪含煤岩系,煤的镜质体反射率范围为 0.40%~0.83%,多为褐煤、长焰煤和气煤,盆地内煤和煤层气资源丰富(张鹏飞等,1997),近年来随着深部煤层气勘探开发不断取得突破,该盆地被证明具有很好的深部煤层气勘探开发前景(支东明等,2023)。台北凹陷属于吐哈盆地的一级构造单元吐鲁番坳陷中的次一级构造单元,具有优越的油气地质条件,其构造活动相对稳定,烃源岩层埋深较大且热成熟度较高,具备显著的生烃能力。该区域发育多套完整的生储盖配置体系,长期以来被视为吐哈盆地油气勘探的重点目标区(高岗等,2014;苟红光等,2019;梁世君,2020;缪欢等,2023)。

20 世纪 1990 年代以来,前人曾对台北凹陷层序地层进行过诸多研究(冷胜荣等,1994;吴因

业,1995;张运东等,1996;李文厚,1997;张元等,2005;李松等,2011),但层序划分方案不尽相同。吴因业(1995)将八道湾组、三工河组及西山窑组下部划分为层序 I,将西山窑组上部和三间房组划分为层序 II;李文厚(1997)将三工河组和八道湾组划分为层序 I,西山窑组划分为层序 II,三间房组划分为层序 III。近年来关于吐哈盆地西山窑组层序地层研究较少,针对台北凹陷西山窑组层序地层及聚煤古地理研究更是少见(邵龙义等,2009)。沉积相带对煤系地层的发育特征具有决定性影响,不仅制约着煤层的空间展布、有机质丰度及横向连续性,还直接关系到煤层气的生成能力和储集条件。针对多煤层发育区,层序地层对煤富集规律及气藏形成机制起着关键性控制作用。在层序地层与古地理的理论指导下,油气资源勘探取

得了重大的成功,同时油气勘探的实践也进一步推动了古地理学理论的发展和完善(朱筱敏等,2004)。特别是近几年来,中国非常规油气工业进入快速发展的黄金阶段,非常规油气沉积学研究受到越来越多的关注和重视(邹才能和邱振,2021)。

本研究以钻井岩心和露头剖面资料为基础,对吐哈盆地台北凹陷西山窑组进行层序地层分析,并对各层序的岩相古地理及聚煤规律进行研究,分析层序地层格架下的聚煤中心分布及迁移规律,以期为区内煤层气资源的勘探开发及勘探区块的评价和优选提供理论支持。

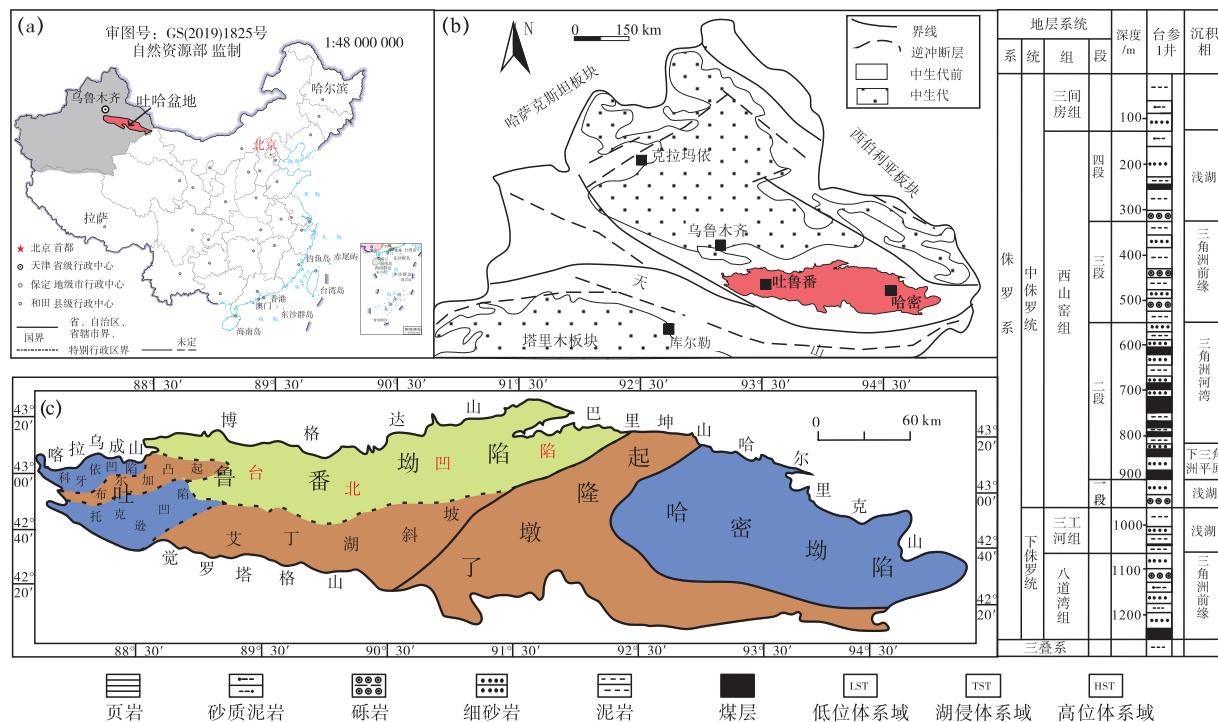
1 地质概况

吐哈盆地位于中国新疆东部(图 1-a, 1-b),作为典型的内陆山间盆地,其平面展布呈东西向狭长形态,东西长 600 km,南北宽 60~80 km,总面积约 50 000 km² (Chen *et al.*, 2001; Shen *et al.*, 2020),从构造演化历史来看,该盆地经历了 4 个重要发展阶段:晚泥盆世至早二叠世期间主要表现为陆间裂谷的形成;至晚二叠世转入裂谷萎缩期;自晚二叠世延续至早中侏罗世演化为前陆盆地;中

晚侏罗世迄今则持续处于盆地整体拗陷阶段。根据前人研究(曹代勇等,1999;邵龙义等,2006),在早中侏罗世区域伸展构造背景下,该盆地主要发育了由冲积扇、三角洲及湖泊相共同构成的沉积体系组合。

吐哈盆地可划分为 3 个一级构造单元,即吐鲁番坳陷、哈密坳陷和了墩隆起(图 1-c)。台北凹陷属于吐鲁番坳陷中的次一级构造单元,它是吐哈盆地中最大的沉积单元,西起喀拉乌成山,东至了墩隆起,北抵博格达山,西南以托克逊凹陷及艾丁湖斜坡为界,整体呈长方形展布,面积约为 9600 km² (曹代勇等,1999;陈彬等,2015;郝爱胜等,2021;雷鸿,2023;董苏醒,2023)。台北凹陷是吐哈盆地多期构造运动中的最主要的沉降区,也是最主要的含油气构造单元(梁世君等,2022)。

吐哈盆地具有双重基底结构,由前寒武纪结晶基底与海西期褶皱基底共同构成。盆地内沉积了厚度近万米的二叠系至新近系地层序列。在这些地层单元中,侏罗系是盆地内发育最全、分布最广、厚度最大的岩性组合以河流—湖泊相碎屑岩及湖沼—河沼相含煤建造为特征的沉积地层,构成盆地内最



a, b—吐哈盆地位置; c—台北凹陷构造位置; d—吐哈盆地综合地层柱状图(八道湾组与三叠系界线以阿 2 井为例)

图 1 吐哈盆地台北凹陷区域地质背景(据 Shao *et al.*, 2003; 邵龙义等, 2009; 有修改)

Fig. 1 Regional geological background in Taipei sag, Tuha Basin (modified from Shao *et al.*, 2003; Shao *et al.*, 2009)

重要的烃源岩层和勘探目标层（吴因业等，1998；支东明等，2024）。根据钻井资料与地震解释成果，台北凹陷侏罗系可划分为7个地层单元，自下而上依次为：下侏罗统八道湾组（ J_1b ）和三工河组（ J_1s ）；中侏罗统西山窑组（ J_2x ）、三间房组（ J_2s ）和七克台组（ J_2q ）；上侏罗统齐古组（ J_3q ）和喀拉扎组（ J_3k ）。其中，八道湾组与西山窑组是主要的含煤地层：前者岩性为砂砾岩夹粉砂岩、泥岩及厚煤层，与下伏三叠系呈不整合接触关系；后者以砂泥岩互层夹厚煤层为特征，与下伏三工河组为整合接触，整体形成于河流-湖泊沉积环境（Shao *et al.*, 2003）。

2 方法

研究数据包括露头剖面及钻测井资料。根据岩性、沉积构造、测井、沉积体几何形状等沉积特征，对西山窑组岩性特征进行描述和对岩相进行分类，对单井进行沉积相和层序划分，并对东西向的连井剖面沉积相及层序地层进行描述和分析。

层序地层格架和古地理重建对于分析沉积环境与聚煤规律之间的关系具有重要意义。本研究依据 Mitchum 等（1977）、Van Wagoner 等（1990）和 Catuneanu（2006）提出的方法，对西山窑组层序地层特征进行分析。层序地层关键面主要表现为层序界面（SB）、初始湖泛面（IFS）和最大湖泛面（MFS）（Posamentier *et al.*, 1988；Posamentier and Allen, 1999）。一个完整的层序由低位体系域（LST）、湖侵体系域（TST）和高位体系域（HST）

组成（Van Wagoner *et al.*, 1990）。

本研究采用冯增昭（2004）提出的单因素分析综合图法进行岩相古地理研究。通过对西山窑组典型露头剖面及钻井岩心的系统分析，选取55口代表性钻孔剖面作为研究样本（图2）。具体研究流程包括：（1）基于钻孔岩心数据，分别统计层序Ⅰ和层序Ⅱ的关键参数：地层厚度、砂岩厚度（砂岩和砾岩的总厚度）、泥岩厚度（泥岩和粉砂岩的总厚度）以及煤层总厚度，并计算出砂岩厚度/泥岩厚度（砂泥比）的值。（2）在数据统计分析的基础上，编制地层厚度、砂岩厚度、泥岩厚度、泥岩百分含量、砂泥比、煤层厚度等一系列岩性参数的等值线图。地层厚度等值线图反映了沉积期古构造格局，是判断相对隆起和相对凹陷格局的主要依据（冯增昭，1992）；砂泥比等值线图反映了主要河道、三角洲砂体以及主要岩相的分布特征，是划分相带和相区的主要依据；泥岩百分含量等值线图指示了湖泊及沉积中心的发育区（邵龙义等，2009）。（3）以砂泥比等值线为基础，参考地层等厚线图、砂岩等厚线图和泥岩等厚线图，通过综合地质分析，绘制出各层序岩相古地理图。该方法有效实现了沉积相带划分与古地理格局重建。

3 西山窑组岩相及沉积体系类型

3.1 岩相类型

岩相作为特定沉积环境中形成的岩石组合，是沉积体系的基本构成单元（Miall, 1985；冯增昭，2020；Zhang *et al.*, 2023）。基于野外地质调查与

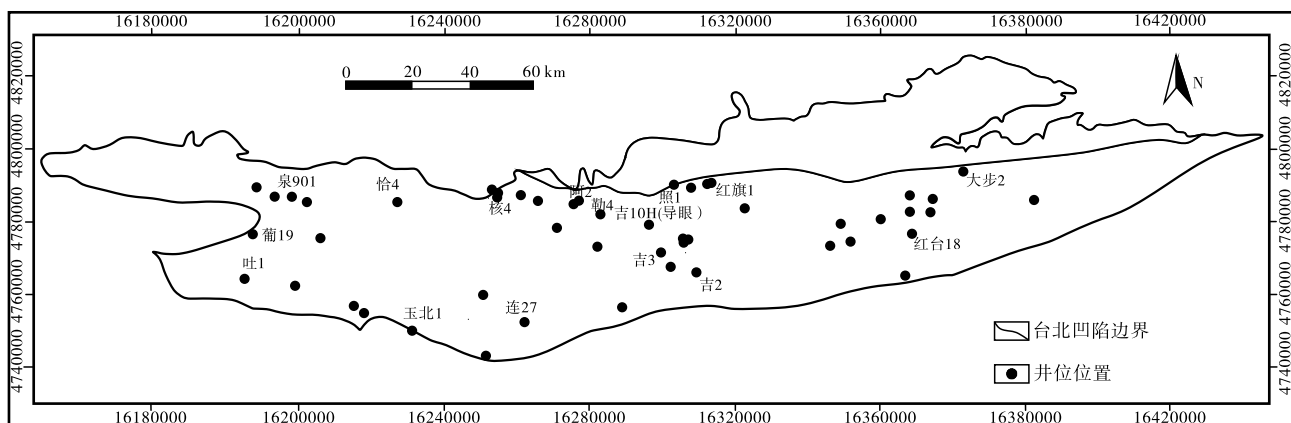


图2 吐哈盆地台北凹陷西山窑组含煤地层层序-古地理分析钻井数据点分布图

Fig.2 Map showing distribution of boreholes used in sequence-stratigraphic and palaeogeographic study of the Xishanyao Formation coal-bearing strata in Taibei sag, Tuha Basin

钻井岩心观察, 研究区西山窑组主要发育砾岩、砂岩、泥岩及煤层。通过系统分析, 本研究识别出 4 大类岩石组合(图 3) 和 17 种岩相类型(表 1)。

3.2 沉积相类型

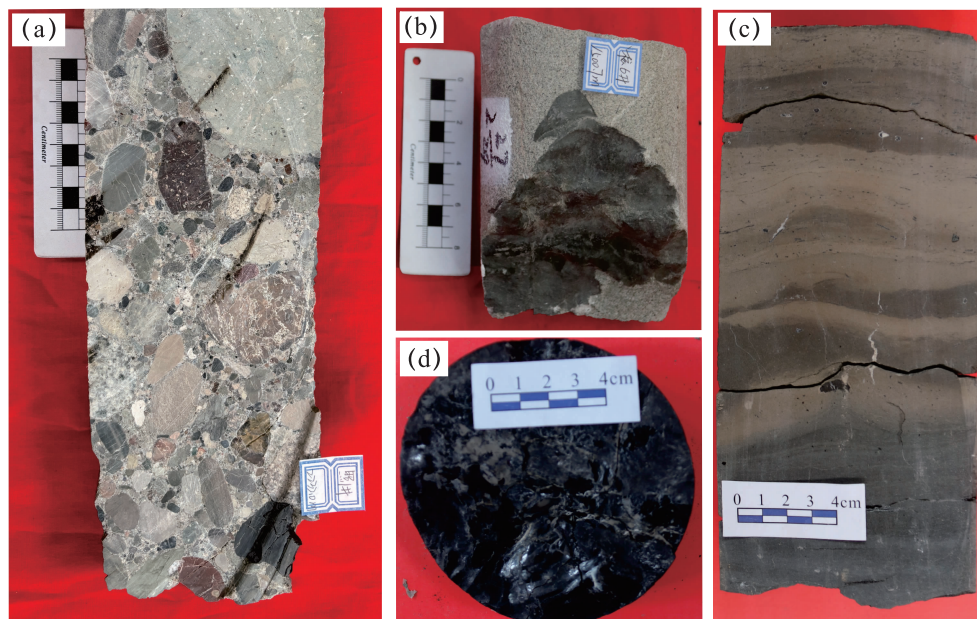
基于岩相组合特征分析, 研究区西山窑组含煤地层主要发育 3 类沉积体系: 辫状河三角洲、曲流河三角洲以及湖泊(表 2)。从垂向演化特征来看, 该组一、二段以三角洲沉积为主(图 2-b, 2-c, 2-e, 2-f), 而三、四段则转变为以湖泊沉积占主导(图 2-a, 2-d, 2-g, 2-h)。西山窑组自下而上呈现明显的可容空间持续增加、水动力强度逐步减弱、湖泊范围显著扩张演化趋势。

1) 辫状河三角洲。辫状河三角洲是陆相盆地中常见的粗粒沉积类型(朱筱敏等, 2016), 以吐哈盆地砾质三角洲沉积为代表, 吐哈盆地在早、中侏罗世主要为潮湿气候, 山前冲积扇主要为辫状河沉积, 泥石流沉积缺乏, 这种辫状河入湖后形成的三角洲, 称为辫状河三角洲(图 4-a; 图 5-a)。沉积相包括三角洲平原、三角洲前缘及前三角洲, 沉积类型包括分流河道、分流间湾、远沙坝和河口坝, 煤层和碳质泥岩主要发育在三角洲平原的分流间湾中。

2) 曲流河三角洲。曲流河三角洲是以砂质沉

积为主的三角洲类型, 其形成于盆缘断裂活动相对稳定的构造背景下, 与以粗碎屑为主的辫状河三角洲存在显著差异。在吐哈盆地范围内, 该沉积体系广泛发育, 西山窑组三段和四段即为典型代表(图 4-b; 图 5-b, 5-c)。其特征表现为: (1) 具有明显的旋回性, 对湖平面波动响应敏感 (Zavala *et al.*, 2026); (2) 总体属于浅水三角洲类型; (3) 煤层横向展布范围广 (张鹏飞等, 1997)。该体系可划分为 3 个沉积相: 三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲。其中, 三角洲平原进一步细分为分流河道、决口扇、泛滥盆地、分流间湾和泥炭沼泽等沉积类型; 三角洲前缘则发育河口坝 (图 5-e)、远沙坝等沉积类型。煤层和碳质泥岩主要赋存于分流间湾和泥炭沼泽中 (图 5-f)。

3) 湖泊。西山窑组晚期, 整个湖盆范围开始扩张, 形成西山窑组沉积期的一个统一湖化期的沉积(图 4-c; 图 5-d)。湖泊沉积水动力较弱, 多为粉砂岩、泥岩、砂质泥岩等颗粒细小的沉积物, 较弱的水动力条件使得水平层理和波状层理最为发育。沉积相包括滨浅湖 (由于滨湖相和浅湖相缺乏明显鉴别标志, 因此统称为滨浅湖相) 和半深湖, 进一步划分为滨湖沙坝、浅湖泥和半深湖沉积类型。



a—砾岩, 照 1 井, 井深约 2232.00 m 处; b—砂岩, 核 6 井, 井深约 1500.7 m 处;
c—泥岩, 勒 101 井, 井深约 2722.97 m 处; d—煤, 勒 101 井, 井深约 2737.65 m 处

图 3 吐哈盆地台北凹陷西山窑组 4 种岩石类型

Fig. 3 Four rock types of the Xishanyao Formation in Taibei sag, Tuha Basin

表 1 吐哈盆地台北凹陷西山窑组含煤岩系岩相类型

Table 1 Lithofacies types of the Xishanyao Formation coal-bearing strata in Taibei sag, Tuha Basin

岩石类型	岩相	代码	岩石特征	沉积环境解释
砾岩	基质支撑砾岩	Gms	杂色砾岩,分选性差,基质支撑砾石,无叠瓦状排列,无内部层理,层面偶见碳屑,有冲刷面	分流河道
	砂纹层理砂岩	Sr	浅灰色—深灰色,分选性好,磨圆度圆状—次圆状	分流间湾
	块状砂岩	Sm	呈厚层状,内部层理不清晰	河口坝
	楔状层理砂岩	Sta	浅灰色—深灰色,部分具风化面,浅黄褐色,砂岩粒径较细	河口坝
	平行层理砂岩	Sh	灰白色,分选较好,磨圆度圆状—次圆状,层理面可见剥离线理	分流河道
	块状含砾砂岩	Smg	砾石定向性差,分选差,常含树干,具冲刷面	分流河道
	包卷层理砂岩	Sc	准同生变形层理发育	河口坝
	透镜状层理砂岩	SI	灰色中粗粒砂岩,呈小规模透镜状产出	分流河道
	块状粉砂岩	Sim	层理不清晰	泛滥平原、远沙坝
	水平层理粉砂岩	Sih	浅灰色—灰色,多为泥质粉砂岩,分选磨圆较好,硅质胶结	各种环境
砂岩	砂纹层理粉砂岩	Sir	有时为波状层理或发育波痕	分流间湾
	碳质泥岩	Mc	黑灰色,性脆,富含大量植物化石,小刀可刻划,其粉末具有滑腻感,偶见暗煤条带,含树干化石	泥炭沼泽
	暗色泥岩	Md	具水平层理或呈块状	滨浅湖
	紫红色、杂色泥岩	Mr	具水平层理或呈块状	滨浅湖
	灰色、灰绿色泥岩	Mg	具水平层理	滨浅湖
泥岩	菱铁质结核及泥岩	Msi	包括菱铁质结核、菱铁质泥岩及菱铁质粉砂岩	分流间湾
煤	煤	C	黑色煤,薄层—中厚层状	泥炭沼泽、分流间湾、滨湖

表 2 吐哈盆地台北凹陷西山窑组含煤岩系沉积体系及沉积相类型

Table 2 Sedimentary systems and sedimentary facies types in coal-bearing strata of the Xishanyao Formation in Taibei sag, Tuha Basin

沉积体系	沉积相	沉积类型	岩相类型
辫状河三角洲	辫状河三角洲平原	分流河道	Gms, Sh, Smg, SI, Sm
		分流间湾	Sr, Sir, Sih, Mc, C
	辫状河三角洲前缘	河口坝	Sta, Sc
		远沙坝	Sir
	前三角洲	前三角洲	Sir, Md
曲流河三角洲	曲流河三角洲平原	分流河道	Gms, Sh, Smg, SI
		决口扇	Sih
		泛滥盆地	Sim, Mg
	曲流河三角洲前缘	分流间湾	Sr, Sir, Sih, Mg, Mc, C
		泥炭沼泽	
	前三角洲	前三角洲	Sir, Md
湖泊	滨浅湖	浅湖泥	Mg, Md
		滨湖沙坝	Sta, Sc, Sir, Sh
	半深湖	半深湖	Md

4 含煤岩系层序地层格架

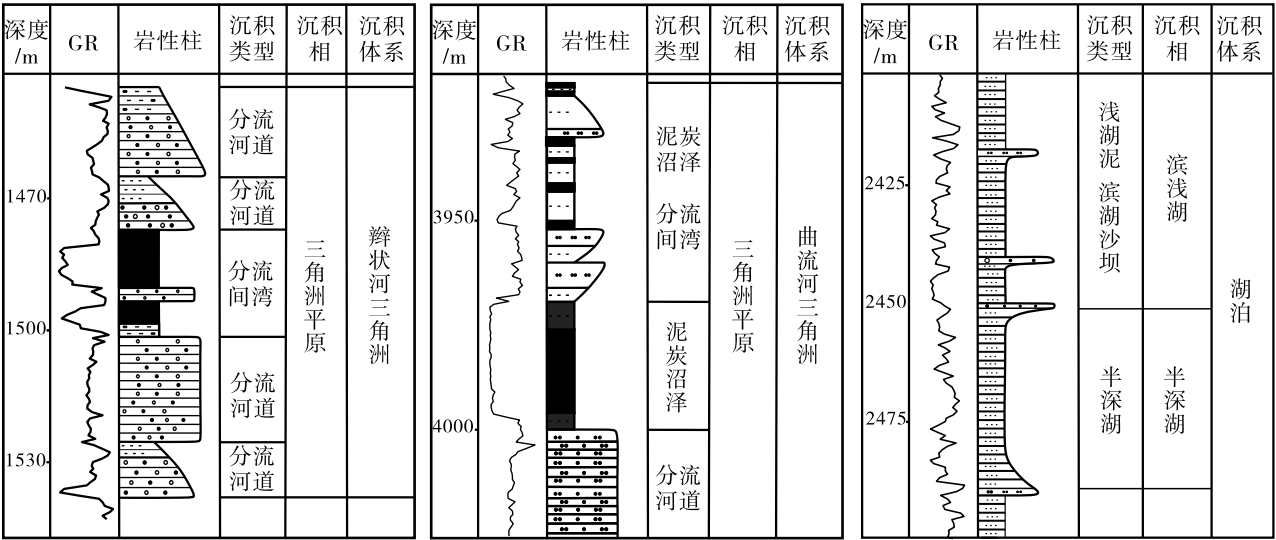
4.1 层序地层关键界面

层序地层关键界面包括层序界面、初始湖泛面、最大湖泛面,主要依靠野外露头、钻井岩心及测井曲线的综合分析。

4.1.1 层序界面识别

1) 区域不整合面。区域不整合面作为层序划分的重要界面类型,其形成与区域构造活动密切相关。这类界面产生于特定地质时期,当构造抬升作用使下伏地层暴露地表并遭受剥蚀时,导致地层记录出现区域性缺失。以吐哈盆地为例,三道岭矿区西山窑组直接覆盖于二叠系之上,这种不整合接触关系清晰地记录了该区曾发生的构造隆升事件(王佟和邵龙义,2013)。

2) 下切谷充填砂岩底部冲刷面。研究区内广泛发育的大型砂体主要形成于低位体系域的下切谷充填过程中。这类砂体底部普遍发育侵蚀不整合面,可作为三级层序界面的重要识别标志。典型实例包括:(1)西山窑组底部厚层砂岩;(2)西山窑组三段和四段底部的砂砾岩层。这些粗碎屑岩的底界通常表现为由河道强烈侵蚀作用形成的区域性冲



a—辫状河三角洲（照1井）；b—曲流河三角洲（吉10H井）；c—湖泊沉积序列（勒4井）

图 4 吐哈盆地台北凹陷西山窑组典型沉积序列

Fig.4 Typical sedimentary sequences of the Xishanyao Formation in Taibei sag, Tuha Basin

刷面。通过沉积学分析发现，冲刷面上下地层在沉积环境特征、古生物群落、碎屑组分及地球化学指标等方面均表现出显著差异，这种突变现象为层序界面的识别提供了可靠依据。

3) 地层岩性和颜色突变面。上下地层的岩性和颜色突变为层序界面（侯海海等，2022）。其主要表现为砂岩与泥岩、砂砾岩与煤层、砂砾岩与砂岩或泥岩及砾岩与砂岩之间的转换面等。如果上、下2套岩层颜色发生突变，说明2种岩性形成条件有明显差别（古气候、沉积环境等），可将这种颜色突变面视为层序界面。在本研究区内，部分层段可见西山窑组顶部发育灰色泥岩，而其上覆的三间房组底部则主要为紫红色泥岩。这一岩性组合特征指示了古气候环境由湿润向干旱的转变，代表了一次区域性的气候旋回转换界面，因而可作为三级层序划分的重要标志。

4.1.2 初始湖泛面和最大湖泛面识别

1) 初始湖泛面。据经典层序地层学理论，初始湖泛面代表湖水首次越过坡折带或充填下切河谷后形成的沉积界面，该界面构成了低位体系域与湖侵体系域之间的分界。在研究区内，初始湖泛面通常表现为一套河道砂砾岩被细粒沉积物（如泥岩、粉砂质泥岩或粉砂岩）所覆盖，并以该类细粒沉积单元的底界为识别标志。在测井响应上，该界面多对应于自然伽马值显著升高和电阻率明显降低的

特征。

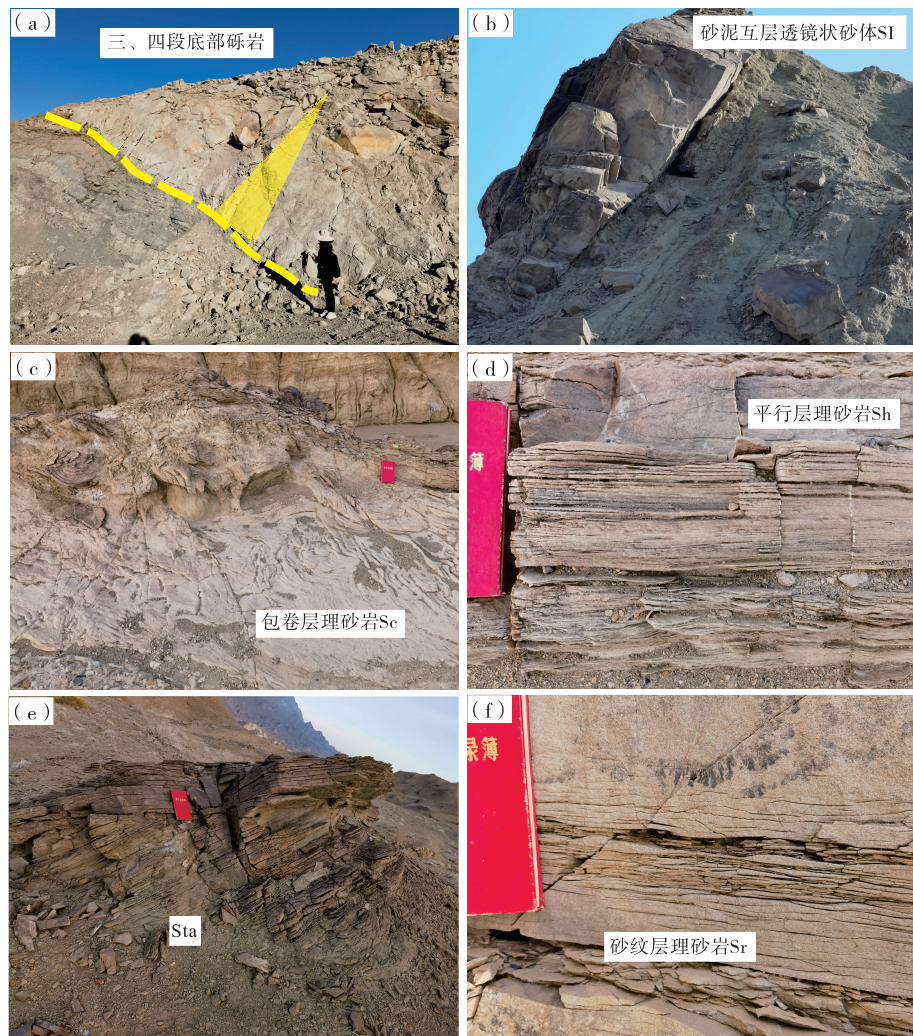
2) 最大湖泛面。该类界面在区域内分布广泛，构成了湖侵体系域与高位体系域之间的分界。其典型特征常表现为以下2种形式：一是在向上粒度变细、水体加深的沉积序列中，相对厚层泥岩或粉砂质泥岩的顶面；二是在具有规律性重复出现的沉积旋回中，末次旋回内厚层泥岩或其他细粒沉积物的顶面。该类界面具有层位稳定、岩性均一、等时性良好及识别特征明显等特点，因而常被选作时间地层单元进行等时对比的关键界面。在测井响应上，通常显示为高自然伽马和低电阻率的特征（Li *et al.*, 2018）。

4.2 吐哈盆地台北凹陷中侏罗统西山窑组层序地层格架

根据层序地层关键界面的识别，将台北凹陷西山窑组划分为2个三级层序，层序Ⅰ对应西山窑组一、二段，主要为三角洲沉积，层序Ⅱ对应西山窑组三、四段，主要为湖泊沉积。

4.2.1 单井剖面层序地层分析

勒4井位于吐哈盆地台北凹陷北部山前带，该钻井剖面中西山窑组累计厚度为593 m（图6）。西山窑组与下伏三工河组及上覆三间房组均为整合接触。西山窑组一、二段发育细砂岩、粉砂岩、泥岩和煤层，以粉砂岩、泥岩和煤



a—辫状河三角洲砾岩，向上粒度变细，为三角洲平原分流河道亚相，三道岭剖面西山窑组三段底部；b—分流间湾相砂泥互层及决口扇透镜状砂体，为三角洲平原分流河道亚相，七泉湖剖面西山窑组二段；c—包卷层理砂岩，为三角洲前缘河口坝亚相，位于河道口，极易发生液化变形，柯柯亚剖面西山窑组二段；d—平行层理砂岩，向上粒度变细，变为砂纹层理，为滨湖沙坝亚相，柯柯亚剖面西山窑组三、四段；e—楔状层理砂岩，为三角洲前缘河口坝亚相，柯柯亚剖面西山窑组二段；f—砂纹层理砂岩，反映了分流间湾沉积环境，柯柯亚剖面西山窑组二段

图 5 吐哈盆地台北凹陷中侏罗统沉积相特征

Fig. 5 Sedimentary facies characteristics of the Middle Jurassic in Taibei Sag, Tuha Basin

层为主，以曲流河三角洲平原沉积为主；三、四段以厚层泥岩为主，仅含少量薄煤层，以滨浅湖沉积为主。根据层序界面及综合研究资料分析，将西山窑组划分为 2 个层序。层序 I 对应于西山窑组一、二段，发育低位体系域、湖侵体系域和高位体系域，低位体系域底部以西山窑组与三工河组之间的岩性突变面为界，低位体系域和湖侵体系域之间的初始湖泛面以细砂岩之上粉砂岩底部为界，湖侵体系域和高位体系域之间的最大湖泛面以中部大段粉砂岩、泥岩夹煤层顶部为界，低位体系域发育分流河道沉积，湖侵体系域发育

分流间湾和泥炭沼泽沉积，高位体系域发育分流间湾沉积。层序 II 对应于西山窑组三、四段，发育低位体系域、湖侵体系域和高位体系域，低位体系域底部以西山窑组三段和二段之间的岩性突变面为界，低位体系域和湖侵体系域之间的初始湖泛面以细砂岩之上泥岩底部为界，湖侵体系域和高位体系域之间的最大海泛面以中部大段泥岩顶部为界，低位体系域发育滨湖沙坝沉积，湖侵体系域发育浅湖泥沉积，高位体系域发育浅湖泥沉积。

4.2.2 东西向连井剖面沉积相及层序地层特征

为揭示台北凹陷西山窑组沉积相在层序地层格

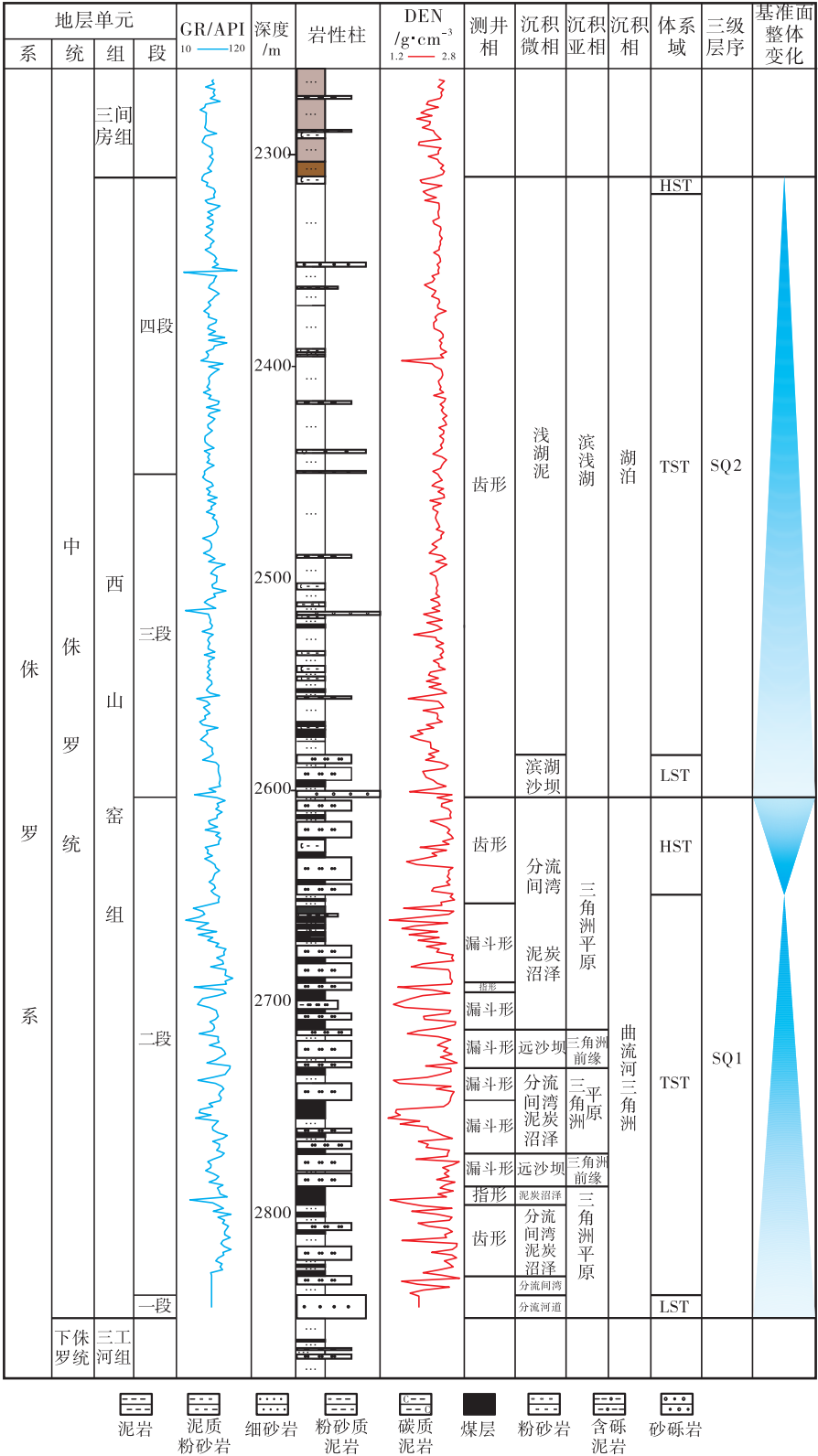


图 6 吐哈盆地台北凹陷勒 4 井西山窑组沉积相及层序地层综合柱状图

Fig.6 Comprehensive column showing sedimentary facies and sequence stratigraphy of the Xishanyao Formation, Well Le4 in Taibei sag, Tuha Basin

架中的空间分布规律,本研究选取近东西向连井剖面进行分析。该连井剖面从西向东依次包括:胜北洼陷的泉 901 井、恰 1 井,丘东洼陷的核 4 井、阿 2 井、勒 4 井、照 1 井及红旗 1 井,小草湖洼陷的大步 2 井。

该剖面从西向东,地层呈现“薄—厚—薄”的分布格局(图 7),其中丘东洼陷的红旗 1 井地层厚度显著大于邻近钻井。且以湖相泥质沉积为主,说明该井位可能位于或邻近沉积中心区域。在层序 I 沉积期,研究区主要发育曲流河三角洲沉积:(1)低位体系域以分流河道砂砾岩和厚层砂岩为主,砂砾岩主要见于照壁山地区(照 1 井);(2)湖侵体系域及高位体系域则主要发育粉砂岩、泥岩夹煤层沉积。这种岩性组合变化反映了基准面升降旋回对沉积过程的控制作用。在层序 II 沉积期,以滨浅湖沉积为主,普遍发育滨湖沙坝和浅湖泥。其中,东部的照 1 井和红旗 1 井存在多层辫状河三角洲砾岩,这可能是因为在层序 II 沉积期,燕山运动使得博格达山开始隆升,在快速隆升时期,凹陷基底进一步下降,水体加深,碎屑物质向湖盆中央进积,但北部盆地边缘沉积物易向前滑塌,并且发育辫状河三角洲砾岩的钻井基本上都位于台北凹陷北侧,靠近北部物源博格达山。

5 岩相古地理分析

5.1 层序 I 岩相古地理

层序 I 对应西山窑组一、二段,地层厚度在 68.8~858 m 之间,平均厚度 426 m,整体厚度变化较大。地层厚度横向上由西向东逐渐变厚,纵向上由南向北逐渐变厚。整体上,最厚处出现在北部山前带地区,平均达 700~800 m(图 8)。沉积期内砂泥比是划分沉积相带的主要依据(Li *et al.*, 2018)。砂泥比高、砂岩厚度大的区域,一般是冲积扇、古河道发育的位置;砂泥比低、泥岩厚度较大的区域,一般是湖泊等水体相对较深的位置(冯增昭, 2004)。研究区砂泥比高值区位于南部跃 1 井附近,中北部整体砂泥比均较小,基本小于 0.5(图 9;图 10)。煤层厚度变化在 0~142 m 之间,平均为 39.6 m,主要分在北部山前带柯柯亚地区,发育 2 个聚煤中心,分别位于柯柯亚地区和红探 2 井附近,其中柯柯亚地区煤层厚度可达

142 m(图 11),向东、西逐渐递减,反映出沼泽环境发育位置。

结合地层厚度、砂岩厚度以及砂泥比等值线图变化等特征,对西山窑组层序 I 岩相古地理进行恢复。层序 I 在台北凹陷南、北部发育曲流河三角洲沉积,南部物源方向来自南部的觉罗塔格山,北部物源方向来自北部的博格达山。南部三角洲规模明显大于北部,可能因为在西山窑组沉积初期,北部博格达山刚刚开始发生隆升,物源有限。层序 I 时期属于早期的泥炭化沼泽沉积阶段,水体较浅,三角洲发育,聚煤作用广泛发生,形成区内主要可采厚煤层。

5.2 层序 II 岩相古地理

层序 II 对应西山窑组三、四段,整体厚度变化较大,地层厚度在 35.8~667.5 m 之间,平均厚度 308 m(图 12)。地层厚度变化与层序 I 时期相似,横向上变化由西向东逐渐变厚,纵向上由南向北逐渐变厚,最厚处依旧出现在北部山前带地区。但沉积中心与沉降中心明显向北迁移。东部的砂泥比值明显比西部更大,西部泉 901 井和东部跃 1 井附近存在砂泥比较高值(图 13;图 14)。煤层厚度变化在 0~48.5 m 之间,平均 6.12 m。平面上,聚煤作用呈现明显的单中心发育特征,聚煤中心位于柯柯亚地区,其他区域仅含薄煤层或不发育煤层(图 15)。层序 II 时期为持续湖化期,以湖泊沉积为主,水体比较深,不利于聚煤。博格达山和哈尔里克山在当时多已沉入水下,不再提供主要物源。

6 层序—古地理演化及聚煤规律分析

台北凹陷西山窑组是在三工河期扩张湖盆基础上形成的充填序列。该时期吐哈盆地边缘构造活动相对稳定,地形平缓,因此西山窑组整体以细粒沉积为主(张鹏飞等, 1997)。研究识别出的沉积相主要包括辫状河三角洲、曲流河三角洲及湖泊。

从吐哈盆地中侏罗世古地理演化特征可以看出,吐哈盆地经历了沼泽化—湖泊化过程,沼泽化时间为中侏罗世西山窑组层序 I 沉积期,沼泽化之前均有陆源碎屑的充填过程;湖泊扩张期为中侏罗世西山窑组层序 II 沉积期,在湖水较深的背景下,沼泽多已消失,代之而起的是三角洲砂体和湖相泥岩。但层序 I 和层序 II 物源区及物源方向均未发生

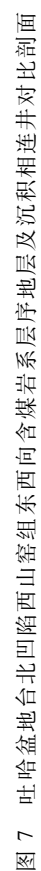


Fig. 7 West-to-east cross section showing sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Xishanyao Formation in Taipei sag, Tuha Basin

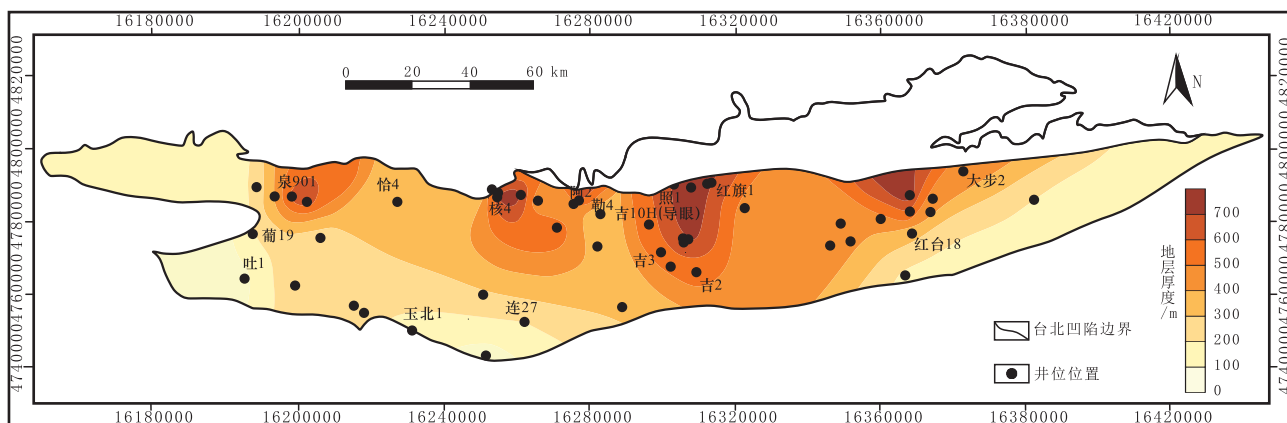


图 8 吐哈盆地台北凹陷西山窑组层序 I 地层等厚线图

Fig. 8 Isopach map of sequence I formation in the Xishanyao Formation in Taibei sag, Tuha Basin

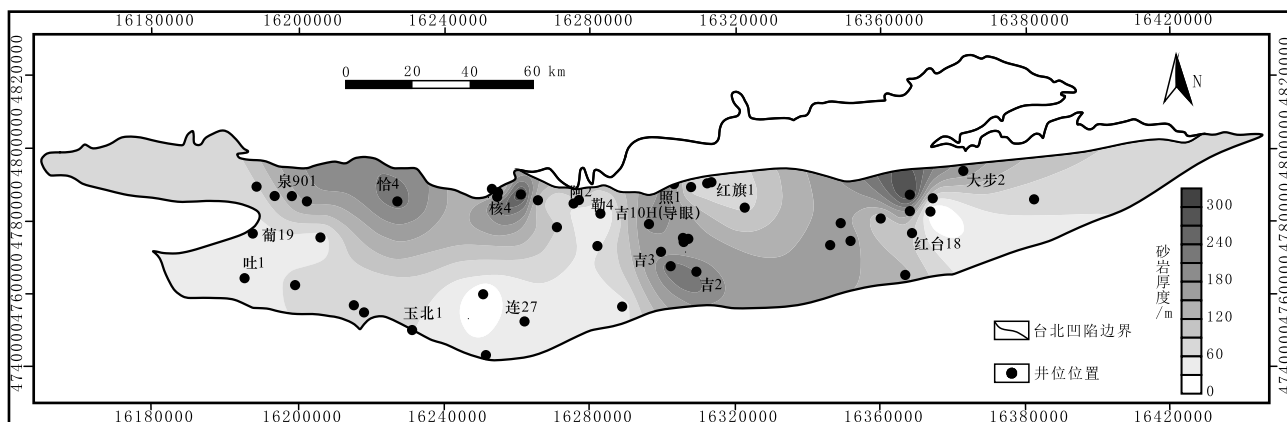


图 9 吐哈盆地台北凹陷西山窑组层序 I 砂岩等厚线图

Fig. 9 Sandstone isopach map of sequence I in the Xishanyao Formation in Taibei sag, Tuha Basin

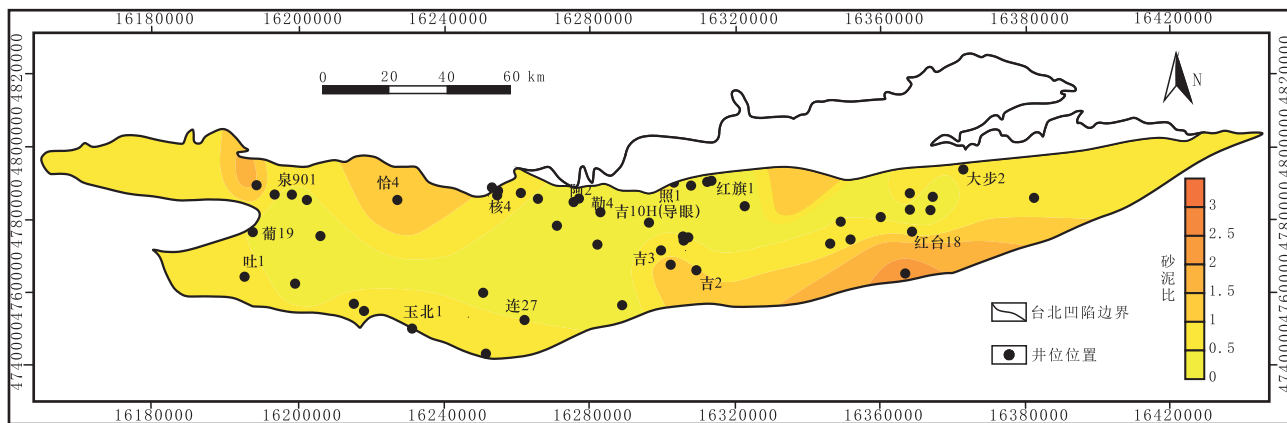


图 10 吐哈盆地台北凹陷西山窑组层序 I 砂泥比等值线图

Fig. 10 Contour map of sand-mud ratio of sequence I in the Xishanyao Formation in Taibei sag, Tuha Basin

改变，沉积中心和聚煤中心有较好的对应关系，且两者均位于北部山前带地区。台北凹陷西山窑组的主要聚煤环境包括三角洲间湾沼泽、分流间湾沼泽

和湖湾沼泽(图 16；表 3)。

稳定的构造沉降是发生大规模聚煤作用的关键控制因素，在此基础上形成的泥炭层才可以保存下

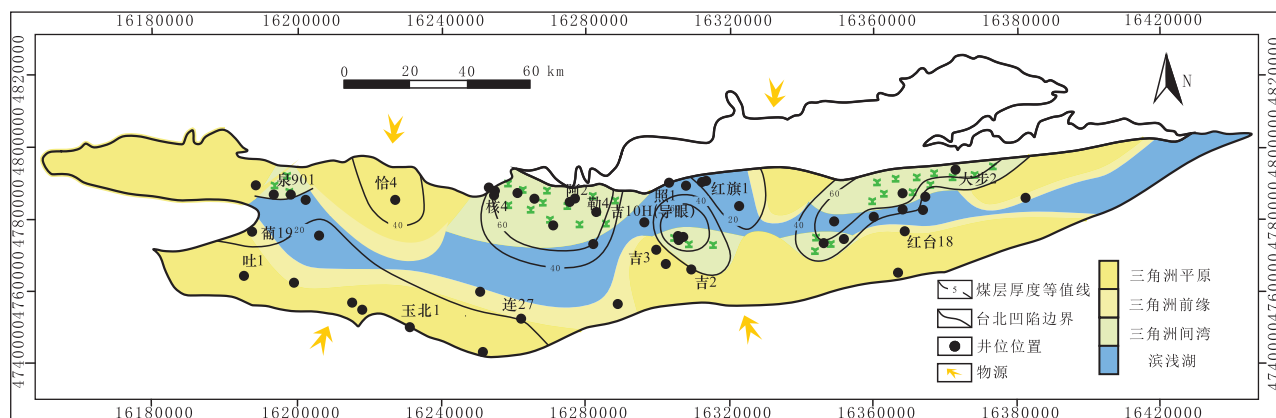


图 11 吐哈盆地台北凹陷西山窑组层序 I 岩相古地理与煤层厚度图

Fig. 11 Lithofacies palaeogeography and coal seam isopach map of sequence I in the Xishanyao Formation in Taipei sag, Tuha Basin

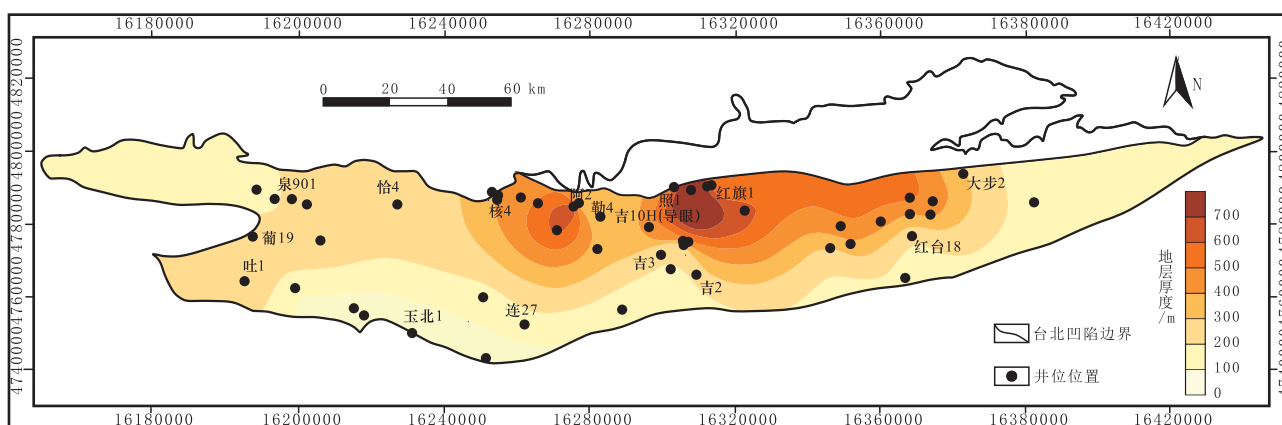


图 12 吐哈盆地台北凹陷西山窑组层序 II 地层厚度等值线

Fig. 12 Isopach map of sequence II formation in the Xishanyao Formation in Taipei sag, Tuha Basin

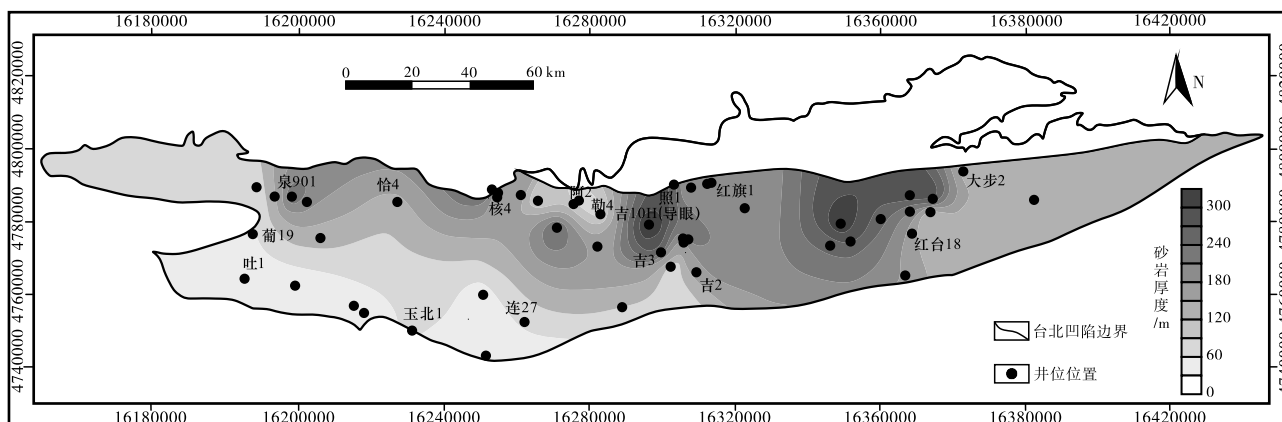


图 13 吐哈盆地台北凹陷西山窑组层序 II 砂岩厚度等值线

Fig. 13 Sandstone isopach map of sequence II in the Xishanyao Formation in Taipei sag, Tuha Basin

来 (Taylor *et al.*, 1998)。由于水动力减弱、水体封闭、构造稳定以及温暖湿润的古气候条件, 曲流河三角洲平原分流间湾沼泽和三角洲间湾沼泽为植被的大量繁殖与有机质保存提供了理想环境。三角

洲间湾是指 2 个三角洲朵体之间的低能浅水环境, 受两侧朵体遮挡, 沉积动力较弱, 以泥质和菱铁质细粒沉积为主。在弱氧甚至缺氧的静水条件下, 泥炭层持续发育, 最终在适度的沉积速率与构造沉降

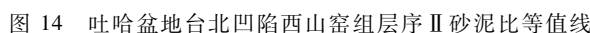


Fig. 14 Contour map of sand-mud ratio of sequence II in the Xishanyao Formation in Taipei sag, Tuha Basin

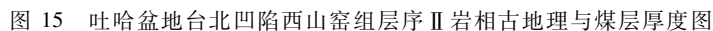


Fig. 15 Lithofacies palaeogeography and coal seam isopach map of sequence II in the Xishanyao Formation in Taipei sag, Tuha Basin

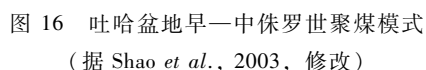


Fig. 16 Coal accumulation model of the Early to Middle Jurassic in Tuha Basin (Modified from Shao *et al.*, 2003)

台北凹陷煤层分布规律及其主控因素研究表明,该区域煤层空间展布具有明显的分带性特征,主要富集于北部山前构造带,且煤层呈现南薄北厚的分布格局。煤层形成的关键控制因素在于古构造

表 3 吐哈盆地台北凹陷西山窑组 3 种沉积环境的聚煤特征对比
Table 3 Comparison of coal accumulation characteristics among three sedimentary environments
of the Xishanyao Formation in Taibei sag, Tuha Basin

聚煤环境	沉积相	煤层层数	稳定程度	煤层总厚	共生的主要岩石类型
分流间湾	辫状河三角洲	少	不稳定	薄—中等	砾岩
分流间湾	曲流河三角洲	多	稳定	厚	砂岩、泥岩、粉砂岩
	三角洲间湾	多	稳定	特厚	泥岩、粉砂岩
湖湾沼泽	湖泊	少	较稳定	薄	粉砂岩、泥岩、碳质泥岩

背景与沉积环境的协同作用。具体而言，台北凹陷过渡相沉积体系为煤层聚集提供了理想的可容空间，同时温暖湿润的古气候条件促进了植被繁盛，为泥炭堆积提供了充足的有机质来源。这种多因素耦合作用最终导致西山窑组二段发育了大面积的聚煤作用。从层序地层学视角来看，各体系域的聚煤特征呈现明显的差异性：（1）在低位体系域阶段，由于碎屑供给充分、水动力条件活跃，基准面总体呈下降趋势，仅在末期形成少量薄而不连续的煤层；（2）在湖侵体系域阶段，可容空间增加速率与泥炭堆积速率达到动态平衡，形成厚度大且分布稳定的优质煤层；（3）在高位体系域阶段，虽然基准面变化趋于平缓，但较大的可容空间配合细粒沉积物的广泛发育，有利于形成厚度中等、连续性较好的煤层。即便处于聚煤有利环境，低位体系域中也往往难以形成厚度大且连续分布的煤层，这主要是由于该阶段碎屑沉积作用较为活跃，阻碍了泥炭的长期聚集与保存。而在湖侵及高位体系域发育期，碎屑物质供应趋于减少甚至暂停，可容空间增加，同时水动力条件减弱，在适宜的古地理背景配合下，更有利于形成厚而稳定的煤层。因此，煤层的发育与分布受碎屑沉积体系的减弱/废弃与有利聚煤古地理单元的共同控制。从盆地演化的宏观尺度分析，陆相含煤盆地的形成可理解为多期碎屑沉积与沉积静息阶段交替作用的结果。研究区内碎屑沉积强度的变化，很可能与物源区的构造隆升活动存在成因上的关联，这一观点也为认识煤层非均质性提供了新的思路。

本区聚煤特征的形成主要受控于其远离物源区、水动力条件较弱的地理背景，加之三角洲间湾、三角洲平原分流间湾环境中泥炭的堆积速率与可容空间增长速率长期保持平衡，从而有利于形成厚煤层（Fielding, 1984；Bohacs and Suter, 1997）。

在层序Ⅱ发育阶段，柯柯亚地区仍为聚煤中心，煤层累计厚度达 48.5 m，其形成机制与持续存在的分流间湾—泥炭沼泽沉积密切相关。结合煤层厚度分布特征及古地理重建成果，建议将台北凹陷北部山前带的柯柯亚地区列为煤层气勘探的优先目标。

7 结论

1) 通过系统分析吐哈盆地台北凹陷区域地质特征及钻井岩心数据，共识别出西山窑组 4 大类岩石（砾岩、砂岩、泥岩及煤）和 17 种岩相类型。该组含煤地层发育辫状河三角洲、曲流河三角洲和湖泊 3 种沉积体系，进一步可细分为 8 种沉积相和 17 种沉积类型。

2) 在西山窑组识别出区域不整合面、下切谷充填砂岩底部冲刷面及地层岩性和颜色突变面 3 类层序界面，在此基础上将西山窑组划分为 2 个三级层序。厚煤层主要形成于碎屑沉积体系显著减弱的湖侵体系域和高位体系域。湖侵期因可容空间增加速率与泥炭堆积速率平衡，发育优质厚煤层。

3) 层序Ⅰ以曲流河三角洲沉积为主，层序Ⅱ则转变为湖泊沉积为主。从层序Ⅰ到层序Ⅱ，聚煤作用逐渐减弱。层序Ⅰ煤层主要分布于曲流河三角洲平原泥炭沼泽古地理单元。层序Ⅱ大规模聚煤作用基本终止，仅含少量薄煤层或不发育。

4) 台北凹陷聚煤中心位于北部山前带，聚煤古地理单元主要包括三角洲间湾沼泽、三角洲平原分流间湾沼泽和滨浅湖湖湾沼泽。提出研究区三角洲间湾沼泽为主、分流间湾沼泽与湖湾沼泽相辅的聚煤模式。结合煤层厚度分布特征及古地理重建成果，建议将台北凹陷北部山前带的柯柯亚地区列为煤层气勘探的优先目标。

参考文献 (References)

- 曹代勇, 邵龙义, 张鹏飞. 1999. 吐哈盆地早、中侏罗世聚煤期古构造. 古地理论, 1(2): 46-52. [Cao D Y, Shao L Y, Zhang P F. 1999. Palaeotectonics in the early and Middle Jurassic coal-forming periods of the Turpan-Hami basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 1(2): 46-52]
- 陈彬, 钟建华, 曲俊利, 魏婷, 徐杰. 2015. 吐哈盆地台北凹陷柯柯亚构造中深层储层特征及成因. 沉积与特提斯地质, 35(3): 27-34. [Chen B, Zhong J H, Qu J L, Wei T, Xu J. 2015. Characteristics and genesis of the middle to deep reservoir rocks in the Kekeya structure, Taibei depression, Xinjiang. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 35(3): 27-34]
- 董苏醒. 2023. 吐哈盆地台北凹陷水西沟群油气来源及成因分析. 东北石油大学硕士学位论文. [Dong S X. 2023. Analysis of the sources and origin of oil and gas in the shuixigou group, Taibei sag, Turpan-Hami basin. Masteral dissertation of Northeast Petroleum University]
- 冯增昭. 1992. 单因素分析综合作图法: 岩相古地理学方法论. 沉积学报, 10(3): 70-77. [Feng Z Z. 1992. Single factor analysis and comprehensive mapping method-methodology of lithofacies paleogeography. Acta Sedimentologica Sinica, 10(3): 70-77]
- 冯增昭. 2004. 单因素分析多因素综合作图法: 定量岩相古地理重建. 古地理论, 6(1): 3-19. [Feng Z Z. 2004. Single factor analysis and multifactor comprehensive mapping method: reconstruction of quantitative lithofacies Palaeogeography. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 6(1): 3-19]
- 冯增昭. 2020. 沉积相的一些术语定义的评论. 古地理论, 22(2): 207-220. [Feng Z Z. 2020. A review on the definitions of terms of sedimentary facies. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(2): 207-220]
- 高岗, 刚文哲, 梁浩, 焦立新. 2014. 风化作用对烃源岩地球化学特征的影响: 以吐哈盆地石炭系一下二叠统烃源岩为例. 中国石油勘探, 19(6): 33-39. [Gao G, Gang W Z, Liang H, Jiao L X. 2014. Weathering effects on source rock geochemical characteristics: taking Carboniferous-Lower Permian source rock in Turpan-Hami Basin for instance. China Petroleum Exploration, 19(6): 33-39]
- 苟红光, 张品, 余家朝, 王志勇, 林霖, 张亦婷. 2019. 吐哈盆地石油地质条件、资源潜力及勘探方向. 海相油气地质, 24(2): 85-96. [Gou H G, Zhang P, She J C, Wang Z Y, Lin L, Zhang Y T. 2019. Petroleum geological conditions, resource potential and exploration direction in Turpan-Hami Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 24(2): 85-96]
- 郝爱胜, 李剑, 国建英, 吴浩, 冉启贵, 李志生, 齐雪宁, 张璐, 王晓波. 2021. 吐哈盆地下侏罗统致密砂岩气藏特征与勘探方向. 天然气地球科学, 32(8): 1212-1222. [Hao A S, Li J, Guo J Y, Wu H, Ran Q G, Li Z S, Qi X N, Zhang L, Wang X B. 2021. Characteristics and exploration direction of tight sandstone gas reservoirs in the Lower Jurassic of Turpan-Hami Basin. Natural Gas Geoscience, 32(8): 1212-1222]
- 侯海海, 李强强, 邵龙义, 范雪洁, 梁国栋, 李雅楠. 2022. 珙春盆地古近纪含煤地层层序-古地理与聚煤规律. 煤田地质与勘探, 50(6): 41-55. [Hou H H, Li Q Q, Shao L Y, Fan X J, Liang G D, Li Y N. 2022. Sequence-paleogeography and coal accumulation of the Paleogene Hunchun Formation in the Hunchun Basin. Coal Geology & Exploration, 50(6): 41-55]
- 雷鸿. 2023. 吐哈盆地台北凹陷东部地区中下侏罗统断裂特征及其演化. 东北石油大学硕士学位论文. [Lei H. 2023. Fault characteristics and evolution of Middle-Lower Jurassic in eastern Taibei sag, Turpan-Hami basin. Masteral dissertation of Northeast Petroleum University]
- 冷胜荣, 纪友亮, 张世奇, 张立强. 1994. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系层序地层学研究. 地质论评, 40(S1): 168-174. [Leng S R, Ji Y L, Zhang S Q, Zhang L Q. 1994. The sequence stratigraphy of the Jurassic in the Taibei hollow of the tuha basin. Geological Review, 40(S1): 168-174]
- 李松, 汤达楨, 王炜, 许浩, 杨紫, 陈晓智, 崔立伟. 2011. 鄯勒油田西山窑组层序地层格架及其油气地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 41(4): 983-991. [Li S, Tang D Z, Wang W, Xu H, Yang Z, Chen X Z, Cui L W. 2011. Sequence stratigraphic framework and geological significance for petroleum of Xishanyao Formation in Shanle oilfield. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41(4): 983-991]
- 李文厚. 1997. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系层序地层学研究. 石油与天然气地质, 18(3): 42-47. [Li W H. 1997. Study on Jurassic sequence stratigraphy in Taibei sag of Turpan-Hami basin. Oil & Gas Geology, 18(3): 42-47]
- 梁世君. 2020. 吐哈探区油气勘探成果及潜力. 新疆石油地质, 41(6): 631-641. [Liang S J. 2020. Achievements and potential of petroleum exploration in tuha oil and gas province. Xinjiang Petroleum Geology, 41(6): 631-641]
- 梁世君, 钱峰, 肖冬生. 2022. 吐哈盆地台北凹陷吉7H井侏罗系致密砂岩油气藏勘探发现与启示. 中国石油勘探, 27(1): 50-59. [Liang S J, Qian F, Xiao D S. 2022. Exploration discovery and implications of the Jurassic tight sandstone oil and gas reservoir in Well J7H in Taibei Sag, Turpan-Hami Basin. China Petroleum Exploration, 27(1): 50-59]
- 缪欢, 王延斌, 国建英, 付媛, 李建红. 2023. 吐哈盆地台北凹陷桃东沟群烃源岩风化校正及生排烃潜力. 大庆石油地质与开发, 42(2): 22-32. [Miao H, Wang Y B, Guo J Y, Fu Y, Li J H. 2023. Weathering correction and hydrocarbon generation and expulsion potential of Taodonggou Group source rocks in Taibei Sag in Turpan-Hami Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 42(2): 22-32]
- 邵龙义, 刘天绩, 冉茂云, 罗忠, 鲁静. 2006. 吐哈盆地早侏罗世八道湾组古环境与聚煤作用分析. 辽宁工程技术大学学报, 25(2): 189-191. [Shao L Y, Liu T J, Ran M Y, Luo Z, Lu J. 2006. Palaeo environments and coal accumulation of Early Jurassic Badaowan Formation in Turpan-Hami oil basin northwestern China. Journal of Liaoning Technical University, 25(2): 189-191]
- 邵龙义, 高迪, 罗忠, 张鹏飞. 2009. 新疆吐哈盆地中、下侏罗统含煤岩系层序地层及古地理. 古地理论, 11(2): 215-224. [Shao L Y, Gao D, Luo Z, Zhang P F. 2009. Sequence stratigraphy and Palaeogeography of the Lower and Middle Jurassic coal measures in Turpan-Hami Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 11(2): 215-224]
- 王佟, 邵龙义. 2013. 中国西北地区侏罗纪煤炭资源形成条件及资源

- 评价. 北京: 地质出版社. [Wang T, Shao L Y. 2013. Formation Conditions and Resource Evaluation of Jurassic Coal Resources in Northwest China. Beijing: Geological Publishing House]
- 吴因业. 1995. 吐哈盆地侏罗系含煤沉积层序特征研究. 石油勘探与开发, 22(5): 35–39. [Wu Y Y. 1995. A study on depositional sequence feature of Jurassic coal formation in Tu-Ha basin. Petroleum Exploration and Development, 22(5): 35–39]
- 吴因业, 罗平, 唐祥华, 杨永泰. 1998. 西北侏罗纪盆地沉积层序演化与储层特征. 地质论评, 44(1): 90–99. [Wu Y Y, Luo P, Tang X H, Yang Y T. 1998. Evolution of depositional sequences and reservoir features of Jurassic basins in northwestern China. Geological Review, 44(1): 90–99]
- 张鹏飞, 金奎勋, 吴涛, 王昌桂. 1997. 吐哈盆地含煤沉积与煤成油. 北京: 煤炭工业出版社. [Zhang P F, Jin K L, Wu T, Wang C G. 1997. Coal-bearing Deposits and Coal-to-oil in the Turpan-Hami Basin. Beijing: China Coal Industry Publishing House]
- 张元, 李树新, 郭翔, 邓勇. 2005. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系高分辨率层序地层学研究. 石油地球物理勘探, 40(S1): 102–107, 138. [Zhang Y, Li S X, Guo X, Deng Y. 2005. Study on Jurassic high resolution sequence stratigraphy in TaiBei depression of Turpan-Hami Basin. Oil Geophysical Prospecting, 40(S1): 102–107, 138]
- 张运东, 李宝芳, 张惠良. 1996. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系层序地层及聚煤特征. 煤田地质与勘探, 24(6): 3–6. [Zhang Y D, Li B F, Zhang H L. 1996. Sequence stratigraphy and coal accumulation characteristics of the Jurassic in the TaiBei depression of the Turpan-Hami Basin. Coal Geology & Exploration, 24(6): 3–6]
- 支东明, 李建忠, 陈旋, 杨帆, 刘俊田, 苟红光, 张华, 林霖, 李斌, 孙玉峰, 胡军. 2023. 吐哈盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 44(12): 2122–2140. [Zhi D M, Li J Z, Chen X, Yang F, Liu J T, Gou H G, Zhang H, Lin L, Li B, Sun Y F, Hu J. 2023. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Tuha Basin. Acta Petrolei Sinica, 44(12): 2122–2140]
- 支东明, 李建忠, 杨帆, 陈旋, 肖冬生, 王波, 武超, 于海跃. 2024. 吐哈盆地丘东洼陷侏罗系致密砂岩气勘探突破及意义. 石油学报, 45(2): 348–357. [Zhi D M, Li J Z, Yang F, Chen X, Xiao D S, Wang B, Wu C, Yu H Y. 2024. Exploration breakthrough and significance of Jurassic tight sandstone gas in Qiudong subsag of Tuha Basin. Acta Petrolei Sinica, 45(2): 348–357]
- 朱筱敏, 杨俊生, 张喜林. 2004. 岩相古地理研究与油气勘探. 古地理学报, 6(1): 101–109. [Zhu X M, Yang J S, Zhang X L. 2004. Application of lithofacies palaeogeography in petroleum exploration. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 6(1): 101–109]
- 朱筱敏, 钟大康, 袁选俊, 张惠良, 朱世发, 孙海涛, 高志勇, 鲜本忠. 2016. 中国含油气盆地沉积地质学进展. 石油勘探与开发, 43(5): 820–829. [Zhu X M, Zhong D K, Yuan X J, Zhang H L, Zhu S F, Sun H T, Gao Z Y, Xian B Z. 2016. Development of sedimentary geology of petroliferous basins in China. Petroleum Exploration and Development, 43(5): 820–829]
- 邹才能, 邱振. 2021. 中国非常规油气沉积学新进展: “非常规油气沉积学”专辑前言. 沉积学报, 39(1): 1–9. [Zou C N, Qiu Z. 2021. Preface: new advances in unconventional petroleum sedimentology in China. Acta Sedimentologica Sinica, 39(1): 1–9]
- Bohacs K, Suter J. 1997. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: fundamental controls and paralic examples. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 81: 1612–1639.
- Catuneanu O. 2006. Principle of Sequence Stratigraphy. Amsterdam: Elsevier, 1–375.
- Chen J P, Qin Y, Huff B G, Wang D R, Han D X, Huang D F. 2001. Geochemical evidence for mudstone as the possible major oil source rock in the Jurassic Turpan Basin, Northwest China. Organic Geochemistry, 32(9): 1103–1125.
- Fielding C R. 1984. A coal depositional model for the Durham Coal Measures of NE England. Journal of the Geological Society, 141(5): 919–931.
- Li Y N, Shao L Y, Hou H H, Tang Y, Yuan Y, Zhang J Q, Shang X X, Lu J. 2018. Sequence stratigraphy, palaeogeography, and coal accumulation of the fluvio-lacustrine Middle Jurassic Xishanyao Formation in central segment of southern Junggar Basin, NW China. International Journal of Coal Geology, 192: 14–38.
- Miall A D. 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. Earth-Science Reviews, 22: 261–308.
- Mitchum Jr R M, Vail P R, Thompson III S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 2. The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: Payton C E (ed). Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir, 53–62.
- Posamentier H W, Allen G P. 1999. Siliciclastic Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications: Tulsa, Oklahoma. SEPM Society for Sedimentary Geology 7, 210.
- Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition I: conceptual framework. In: Sea-Level Changes: An Integrated Approach. SEPM Special Publication 42, 109–124.
- Shao L Y, Zhang P F, Hilton J, Gayer R, Wang Y B, Zhao C Y, Luo Z. 2003. Palaeoenvironments and paleogeography of the Lower and lower Middle Jurassic coal measures in the Turpan-Hami oil-prone coal basin, northwestern China. AAPG Bulletin, 87: 335–355.
- Shen T Y, Chen Y, Wang G C, Ji J L, Wang Y, Zhang P, Sotiriou P, Guo R, Xu Z Z. 2020. Detrital zircon geochronology analysis of the Late Mesozoic deposition in the Turpan-Hami basin: implications for the uplift history of the Eastern Tian Shan, north-western China. Terra Nova, 32(2): 166–178.
- Taylor G H, Teichmüller M, Davis A, Diesselet C F K, Littke R, Robert P. 1998. Organic Petrology. Berlin: Gebrüder Borntraeger.
- Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion KM, Rahmanian V D. 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops: concepts for high resolution correlation of time and facies. AAPG, Methods in Exploration Series, (7): 55.
- Zavala C, Liu H Q, Li X B, Yang Z L, Li Y, Wang J, Trobbiani V, Arcuri M. 2026. Progress in high-frequency sequence stratigraphy of clastic lakes: Implications from ancient sedimentary sequences. Lithologic Reservoirs, 38(1): 38–54.
- Zhang C M, Yin T J, Wu S H, Yin Y S, Feng W J, Li Y, Jia A L, Lin C Y, Ma S Z, Hu G Y. 2023. Architectural element analysis of nonmarine oil and gas reservoir in China, the research history, progress, and future trend: a review. Interpretation-A Journal of Subsurface Characterization, 11(1): SA127–SA154.