

doi: 10.12029/gc20200202

张天福, 张云, 金若时, 俞初安, 孙立新, 程银行, 奥琮, 马海林. 2020. 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系层序界面特征对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 47(2): 278-299.

Zhang Tianfu, Zhang Yun, Jin Ruoshi, Yu Reng'an, Sun Lixin, Cheng Yinhang, Ao Cong, Ma Hailin. 2020. Characteristics of Jurassic sequence boundary surfaces on the northeastern margin of Ordos basin and their constraints on the spatial-temporal properties of sandstone uranium mineralization [J]. Geology in China, 47(2): 278-299(in Chinese with English abstract).

## 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系层序界面特征对砂岩型铀矿成矿环境的制约

张天福<sup>1</sup>, 张云<sup>1</sup>, 金若时<sup>1</sup>, 俞初安<sup>1</sup>, 孙立新<sup>1</sup>, 程银行<sup>1</sup>, 奥琮<sup>1</sup>, 马海林<sup>2</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 内蒙古地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:**依据野外露头、钻井岩芯、地震、测井及地球化学等资料,对鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系延安组( $J_{1-2y}$ )和含铀岩系——直罗组( $J_{2z}$ )关键层序界面进行了系统研究。延安组—直罗组层序界面在露头剖面和钻井岩芯上表现为铁质风化壳、削截侵蚀面或岩性岩相转化面等特征;地震剖面上表现为上超、下超、削截等反射特征;测井曲线岩电关系和微量元素地球化学均表现为不同类型的突变特征。由此识别出 10 个不同级次层序界面,其中包括 3 个 I 型层序界面(TSB1~TSB3)和 7 个 II 型层序界面(SB1~SB7)。I 型层序界面主要包括:侏罗系延安组( $J_{1-2y}$ )与上三叠统延长组( $T_{3y}$ )之间的界面 TSB1—对应地震剖面上的  $T_y$ ;延安组( $J_{1-2y}$ )与直罗组( $J_{2z}$ )界面 TSB2—对应地震剖面上的  $T_{z-1}$ ;侏罗系与白垩系层序界面 TSB3—对应地震剖面上的  $T_k$ 。TSB1、TSB2 和 TSB3 I 型层序界面主要为区域性质的不整合面,反映了中生代构造活动在盆地中的响应;II 型层序界面主要为气候转化面,反映了层序地层单元形成过程中古气候因素引起的旋回变化。微量元素 Sr、Cu、Sr/Cu、FeO/MnO、 $Al_2O_3$ /MgO 等比值垂向变化总体上反映延安期至直罗期古气候环境经历了温暖潮湿—干湿交替—干旱—半干旱的转变过程,直罗组底部不整合界面 TSB2 及上段红层广泛发育的起始界面 SB6 为古气候环境突变的关键界面。此外,本区三维地层结构显示,侏罗系延安组至直罗组具有明显的“垂相分带”特征,铀矿层在三维空间中主要呈板状赋存于 TSB2 界面之上的“泛连通厚”辫状河道砂体中,其产出明显受侏罗系垂相分带结构和古气候环境变迁因素的共同制约。本文建立的综合识别层序界面方法减少了层序地层研究中依靠人为经验识别的随意性,为本区侏罗系层序划分和等时地层格架建立提供重要依据。关键层序界面的时空属性及其所指示的地质意义对揭示燕山幕式构造活动发生、发展过程对古气候条件变迁和砂岩型铀大规模成矿作用的影响具有重要意义。

**关键词:**砂岩型铀矿;侏罗系;延安组;直罗组;层序界面;三维建模;矿产勘查工程;鄂尔多斯盆地  
中图分类号:P612 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)02-0278-22

### Characteristics of Jurassic sequence boundary surfaces on the northeastern margin of Ordos basin and their constraints on the spatial-temporal properties of sandstone uranium mineralization

ZHANG Tianfu<sup>1</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, JIN Ruoshi<sup>1</sup>, YU Reng'an<sup>1</sup>, SUN Lixin<sup>1</sup>, CHENG Yinhang<sup>1</sup>,

收稿日期:2018-04-24;改回日期:2019-08-11

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0604200)、中国地质调查局项目(DD20190813)和国家973项目(2015CB4530006)联合资助。

作者简介:张天福,男,1985年生,助理研究员,主要从事地质矿产调查与研究工作;E-mail: tianfuzhang85@163.com。

AO Cong<sup>1</sup>, MA Hailin<sup>2</sup>(1. *Tianjin Geological Survey Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China;*2. *Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China*)

**Abstract:** On the basis of outcrop, drilling cores seismic, logging and geochemical data, the main sequence boundary surfaces of the Yan'an and Zhiluo Formation of Jurassic on the northeast margin of Ordos basin were systematically studied. On outcrop profiles and drilling cores, the sequence boundary surfaces show characteristics of iron weathering crust, truncation and lithologic-lithofacies transformation. On seismic profiles, the boundaries are featured by onlap, downlap and truncation. The rock-electricity relation indicates different types of mutations. The trace elements also show mutation characteristics. Ten different orders of sequence boundaries were identified, including three I-type (TSB1-TSB3) and seven II-type (SB1-SB7) sequence boundary surfaces. I-type boundaries include TSB1 sequence boundary surface between Yan'an ( $J_{1-2y}$ ) and Yanchang Formation ( $T_{3y}$ ), corresponding to  $T_y$  in seismic profiles; TSB2 sequence boundary surface between Yan'an ( $J_{1-2y}$ ) and Zhiluo Formation ( $J_{2z}$ ), corresponding to  $T_{z-1}$  in seismic profiles; TSB3 sequence boundary surface between Jurassic and Lower Cretaceous, corresponding to  $T_k$  in seismic profiles. As regional unconformities, I-type sequence boundaries including TSB1, TSB2, TSB3 reflected tectonic activity during Mesozoic period. The II-type sequence boundaries were main climate transformation surfaces and showed the cyclic changes in climate factors. The vertical variations of values of Sr, Cu, Sr/Cu, FeO/MnO and  $Al_2O_3/MgO$  indicate that the paleoclimate and paleoenvironment experienced a changing process from warm-humid climate to dry-wet alternation, arid and semi-arid climate; TSB2 and SB6 were main climate transformation surfaces. Vertical zonation of stratigraphic structure is obvious between Yan'an and Zhiluo Formation on the 3D models of the study area. The uranium bodies mainly lie in the large sandstone overlying TSB2 sequence boundary surface, in the form of plate on the 3D models of sandstone and uranium mineralization bed. The uranium bed was obviously influenced by the vertical zonation of stratigraphic structure and paleoclimate transformation. The integrated identification of sequence boundaries will not only reduce the casualty of artificial empirical recognition but also provide a basis for the division of Jurassic sequences and the establishment of isochronous sequence stratigraphic framework. The research on space-time attributes and the indicated geological meanings of the main sequence boundary surfaces will be helpful to revealing the process of "Yanshan movement" and its influence on the paleoclimate transformation and sandstone-type uranium mineralization.

**Key words:** sandstone-type uranium ore; Jurassic; Yan'an Formation; Zhiluo Formation; sequence boundary surfaces; 3D model; mineral exploitation engineering; Ordos basin

**About the first author:** ZHANG Tianfu, male, born in 1985, assistant engineer, engages in geological and mineral survey; E-mail: tianfuzhang85@163.com.

**Fund support:** Supported National Key R&D Program of China(No. 2018YFC0604200), China Geological Survey Program (No. DD20190813) and 973 Program (No. 2015CB4530006).

## 1 引言

层序地层学是研究由不整合面或其对应的整合面所限定的一套相对整合、成因上具有成生联系的等时地层单元,层序地层学的基本单元是层序,一个层序的内部可分为若干个体系域(Mitchum, 1977; van Wagoner et al., 1988, 1990; Vail et al., 1991)。因此,层序地层分析的最基本、最关键的问题就是不同级别的层序地层单元界面的识别。层序界面的识别方法、地质特征的研究,对层序划分及全区等时地层格架建立具有重要意义(喻建等,

2019;王龙军等,2019)。鄂尔多斯盆地是叠合在华北古生代克拉通台地之上的中、新生代大型陆相盆地(张抗,1989;李思田等,1990;董树文等,2007),盆地内中生代沉积地层记录完整。其中,侏罗系中下统延安组( $J_{1-2y}$ )、中统直罗组( $J_{2z}$ )分别是该区重要的含煤、含铀岩系。赋存于直罗组辫状河道砂体中铀矿层与下伏延安组煤系地层具有十分密切的空间共存关系(刘正邦等,2013),而且这种“上铀下煤”的空间叠置在整个中国北方陆相盆地具有广泛的普遍性(金若时等,2016,2017)。在鄂尔多斯盆地东北缘发育有皂火壕、纳岭沟、大营等一系列大

型—特大型砂岩型铀矿床,其中,“煤铀兼探”工作发现的大营超大型铀矿是“上铀下煤”空间叠置的最为典型代表。前人在鄂尔多斯中生代盆地构造变形、生物地层、层序地层和同位素年代地层等诸多方面开展了大量研究工作,并取得了丰硕的科研成果(Li Sitian et al., 1995; 夏毓亮等, 2003; 刘池洋等, 2006; 张岳桥等, 2007; 焦养泉等, 2015; 张云等, 2016; 陈印等, 2017; 张天福等, 2018, 2019; 冯晓曦等, 2019; 俞祁安等, 2019)。但由于掌握资料的差异和认识不同,以往在层序界面识别过程中采用的识别标志相对单一,加上陆相盆地本身具有多物源、相带窄、相变快引起纵向标定困难、横向变化剧烈的特征,难免会存在依靠人为经验识别层序地层界面的随意性。近年来,随着煤、石油、铀矿等钻孔和地震数据的不断积累,本文依托“北方砂岩型铀矿调查工程”首次建立了国内最大的煤—铀钻孔数据库,涵盖盆地东北缘重点铀矿集区 3500 余口钻孔和 500 km 二维地震数据,这为区域层序界面追索对比、大比例尺编图及精细的层序地层三维空间研究提供了可靠保证。本文通过野外露头剖面观测,大量钻井、测井和地震资料综合对比分析,并结合侏罗系自下而上不同层位泥岩微量元素垂向上的变化,对延安组—直罗组层序界面的“五位一体”响应特征进行了系统研究。进而探讨侏罗系关键层序界面的时空属性及其所指示的地质意义,这对揭示中生代构造事件对古气候条件变迁及铀矿大规模成矿作用具有重要意义。

## 2 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是中国重要的油气、煤、铀等多种能源共存产出的大型中、新生代陆相盆地之一。在稳定的华北克拉通结晶基地之上,盆地内记录了早古生代碳酸盐台地相沉积、晚古生代海陆交互相沉积和中生代内陆湖盆相沉积等厚达万米的沉积地层。盆地边缘断裂、褶皱较发育,盆内构造相对简单,主要以隆起、坳陷、宽缓褶皱为主(杨俊杰和裴锡古, 1996)(图 1b)。鄂尔多斯盆地东北缘中生代侏罗系陆相沉积是研究区内煤、铀和其他能源矿产主要赋存场所。其中,中下侏罗统延安组和中统直罗组发育最为齐全,且分布广泛(图 1a)。下侏罗统富县组在本区缺失,仅在

盆地东部的准格尔旗、府谷、神木、榆林、延安、富县等地区出露;上侏罗统安定组分布较局限,典型的半深湖—干旱湖相沉积仅在靖边以南、庆阳以北的盆地中东部地区分布;上侏罗统芬芳河组也仅见于盆地西南缘一线,呈带状分布(李思田等, 1990)。

## 3 层序界面“五位一体”识别特征

所谓层序界面的“五位一体”响应特征是指关键层序界面在野外剖面、钻井岩芯、测井、地震剖面及微量元素地球化学五个方面的反映特征。鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系关键层序界面从下至上主要包括延安组( $J_{1-2}y$ )与延长组( $T_{3y}$ )界面(TSB1, 对应地震剖面上的 $T_y$ ),直罗组( $J_{2z}$ )与延安组( $J_{1-2}y$ )界面(TSB2, 对应地震剖面上的 $T_{z-1}$ ),直罗组上段、下段( $J_{2z}^2 / J_{2z}^1$ )之间的界面(SB6, 对应地震剖面上的 $T_{z-2}$ ),志丹群( $K_z$ )与直罗组( $J_{2z}$ )界面(TSB3, 对应地震剖面上的 $T_k$ )(图 2)。

### 3.1 露头、钻井岩芯层序界面特征及识别标志

鄂尔多斯盆地东北缘分布大量近水平的、沿河谷大面积出露的、几乎连续的露头地层剖面,以及数以千计的钻井资料,这为本次侏罗系延安组和直罗组层序界面进行长距离追索对比识别提供了有利条件。通过露头、钻井岩芯对比研究发现,不同层序界面特征差异很大,其识别标志也不尽相同。其中, I 型层序界面主要表现为铁质风化壳、古土壤、长期暴露风化面、底砾岩层、清晰的削截侵蚀作用、深切谷及其充填物; II 型层序界面主要表现为岩性岩相转换面、植物根土层。而且同一层序界面,在盆地不同部位差异较大,如 I 型层序界面在盆缘一般表现不整合面,延伸到盆地内部逐渐过渡为整合接触面。

通过对上述几个关键层序界面的识别结果显示:(1)延安组( $J_{1-2}y$ )/延长组( $T_{3y}$ ) I 型层序界面(TSB1),该界面为一微角度不整合面,野外露头及钻井岩芯比较容易识别,岩性突变较大,界面顶部发育区域性的铁质风化壳(图 3g~h);该界面在盆地边缘区及石油和煤炭深钻中均显示为一起伏不平的剥蚀面,并对侏罗系早期沉积有明显的控制作用。(2)延安组一段至五段 II 型层序界面(SB1~SB4),该四个界面均为延安组连续沉积的整合面,界面上下层序岩性差异性不明显,界面识别难度较

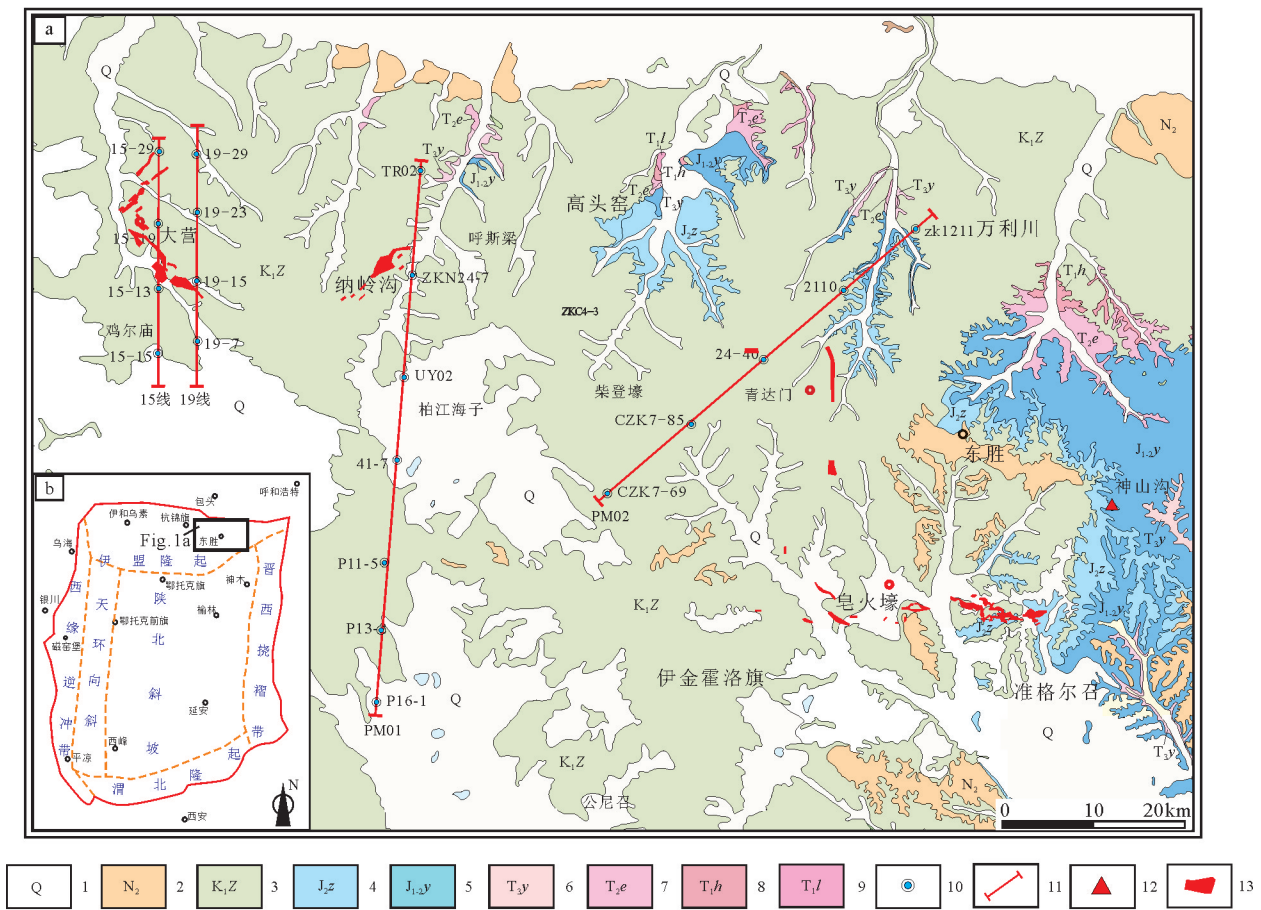


图1 鄂尔多斯盆地东北缘东胜地区地质简图(a)及构造位置图(b,据杨俊杰和裴锡古,1996修改)

1—第四系;2—新近系上新统;3—下白垩统志丹群;4—中侏罗统直罗组;5—中一下侏罗统延安组;6—上三叠统延长组;7—中三叠统二马营组;8—下三叠统和尚沟组;9—下三叠统刘家沟组;10—主要钻孔位置;11—文中剖面位置;12—地球化学和孢粉样品取样位置;13—砂岩型铀矿床

Fig.1 Simplified geological map of Dongsheng area on the northeastern margin of Ordos basin (a) and tectonic division of the study area (b, modified from Yang Junjie and Pei Xigu, 1996)

1—Quaternary; 2—Pliocene; 3—Lower Cretaceous Zhidan Group; 4—Middle Jurassic Zhiluo Formation; 5—Lower-Middle Jurassic Yanan Formation; 6— Upper Triassic Yanchang Formation; 7— Middle Triassic Ermaying Formation; 8— Lower Triassic Heshanggou Formation; 9— Lower Triassic Liujiagou Formation; 10— Location of drill hole; 11— Location of stratigraphic correlation profiles; 12— Sampling location; 13— Sandstone-type uranium deposits

大。大量钻孔对比研究发现以下两种界面具有较高的区域可比性,其识别标志主要为:①区域性水进界面,主要是大面积发育的湖相泥岩层,野外露头以植物根土层和其中的化石组合为标志(图3f);②主煤期的顶界面,通过本区钻孔资料大范围追索和对比,发现主煤的形成期具有近似的等时性;从富煤单元的面积(数百千米至千余千米)及富煤单元的密度来看,古水系、古三角洲群具有同时大范围废弃的情况。因此主煤的顶界面事实上代表着一个小间断面。(3)直罗组(J<sub>2z</sub>)/延安组(J<sub>1-2y</sub>) I型层序界面(TSB<sub>2</sub>),该界面为平行不整合面(图2),

岩性突变大,界面之下主要为灰色细碎屑岩系,界面之上为灰色-灰绿色大型辫状河道砂体,岩性以中粗砂为主,其底部普遍发育一套全区可以对比的厚层砾岩、含砾砂岩(图3d)。该套砂体对下伏延安组上部地层下切冲蚀改造作用明显,在某些地区甚至具有深切谷性质。在盆地东北部,延安组五段上部煤层存在不同程度的冲蚀缺失,直罗组底部砂体普遍含有大量被改造卷入的延安组炭屑。此外,研究区内的露头和岩芯均显示TSB<sub>2</sub>界面之下发育大面积的“漂白砂岩”,即强高岭土化的砂岩(图2e),其顶部还有硅结层。这说明该界面之下延安组沉

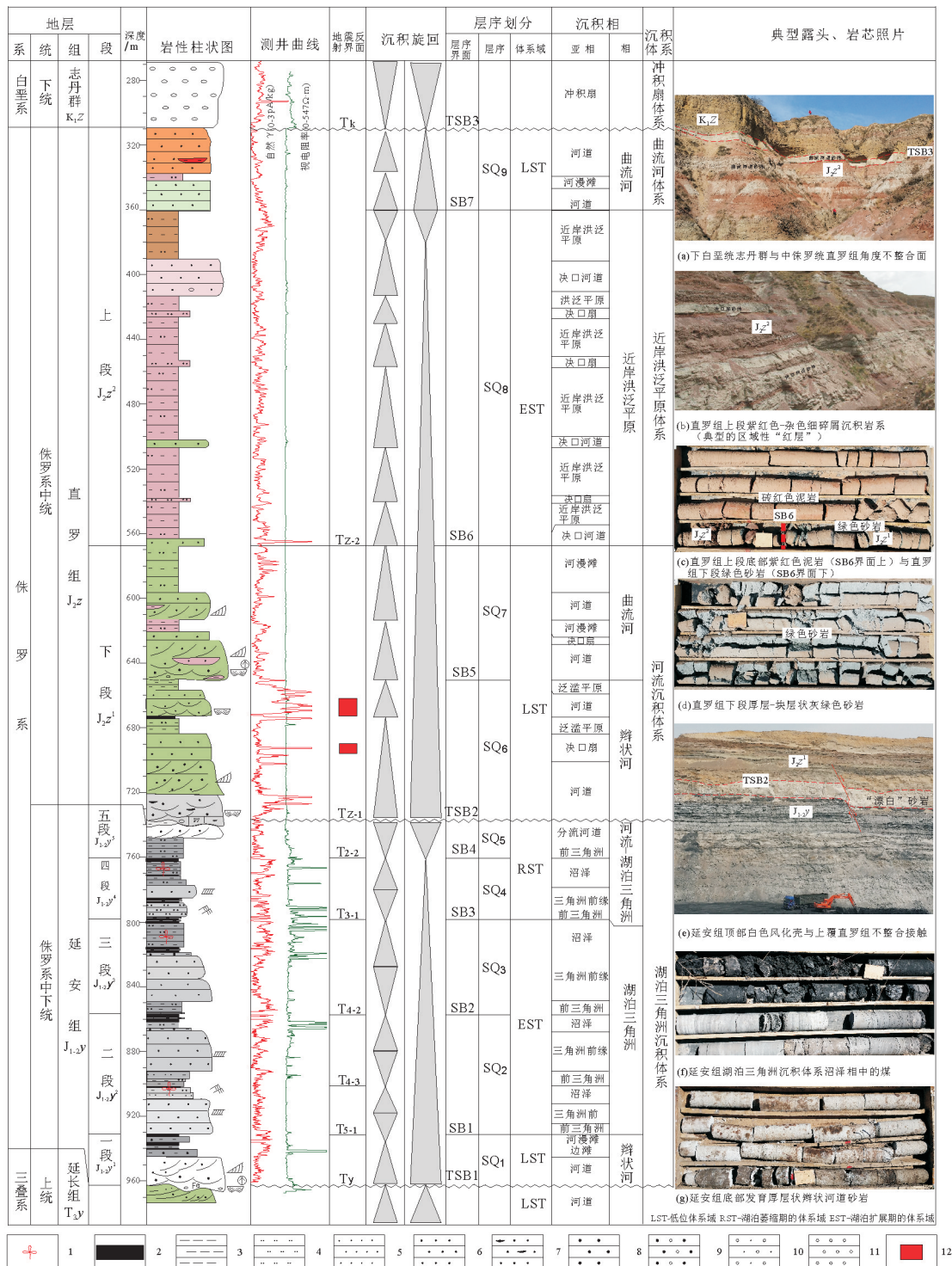


图2 鄂尔多斯盆地大营地区侏罗系典型剖面层序地层划分及关键层序界面

1—植物化石;2—煤层;3—泥岩;4—粉砂岩;5—细砂岩;6—中砂岩;7—含炭屑砂岩;8—粗砂岩;  
9—含砾粗砂岩;10—砂质砾岩;11—砾岩;12—铀矿层

Fig. 2 Sequence classification and main sequence boundary surfaces of the Jurassic in the Daying area on the northeastern margin of Ordos basin

1—Fossil; 2—Coal bed; 3—Mudstone; 4—Siltstone; 5—Fine sandstone; 6—Sandstone; 7—Carbon-bearing sandstone; 8—Gritstone;  
9—Conglomerate-bearing gritstone; 10—Sandy conglomerate; 11—Conglomerate; 12—Uranium bed

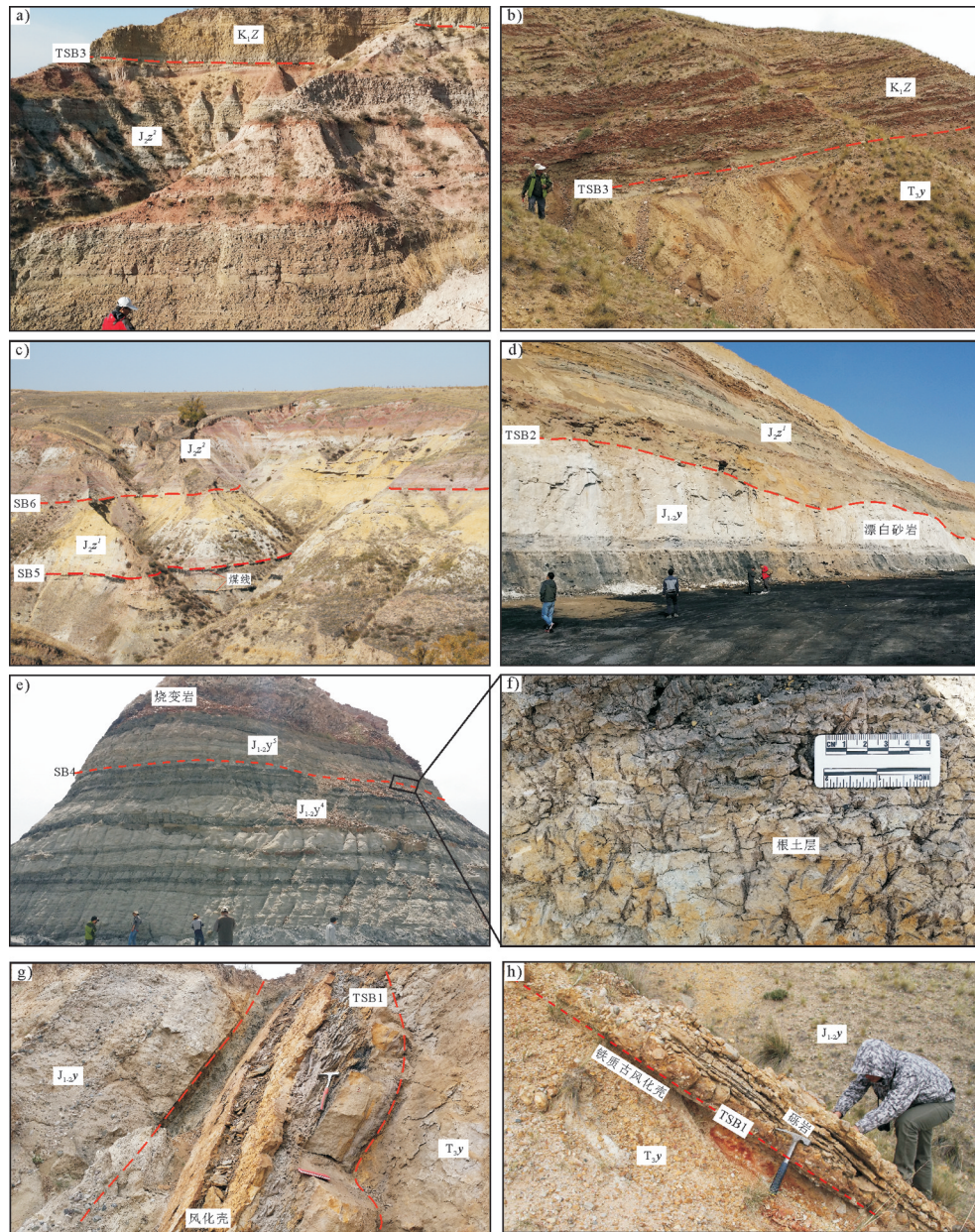


图3 鄂尔多斯盆地东北缘高头窑—神山沟地区侏罗系延安组—直罗组层序界面露头特征

a、b—神山沟和高头窑地区下白垩统志丹群不整合超覆于侏罗系、三叠系不同地层单元之上,不整合界面TSB3之上砂砾充填切削了下伏的部分地层;c—神山沟地区直罗组上段与下段整合接触面(层序界面SB6),直罗组下段内部发育1~2条薄煤层(区域上连续性差);d—神山沟地区直罗组与延安组微角度不整合面(层序界面TSB2);延安组顶部发育厚层高岭土化“漂白”砂岩;e—神山沟地区延安组内部四段与五段整合面(层序界面SB4),延安组五段顶部由于煤自燃形成的烧变岩;f—延安组区域性水进界面的露头识别标志—植物根土层;g、h—高头窑地区延安组与延长组角度不整合面(层序界面TSB1),发育区域性的铁质风化壳

Fig.3 Outcrop profiles characteristics of sequence boundary surfaces from Yan'an Formation to Zhiluo Formation in the Gaotouyao and Shenshangou area on the northeastern margin of Ordos basin

a, b—Unconformable contact between Lower Cretaceous Zhidan Formation and Jurassic/Triassic in the Gaotouyao and Shenshangou area; c—SB6 sequence boundary between upper and lower member of Zhiluo Formation.1-2 coal line inside lower member of Zhiluo Formation; d—Micro-unconformable contact between Yan'an and Zhiluo Formation in the Shenshangou area; kaolinization sandstone on the top of Yan'an Formation; e—SB4 sequence boundary conformable contact inside Yan'an Formation; burned sandstone on the top of Yan'an Formation; f—Plant root soil being the identification symbol of the sequence boundary inside Yan'an Formation; g,h—Regional iron weathering crust (TSB1): Unconformable contact between Yan'an and Yanchang Formation

积之后,经历了长期风化暴露沉积间断,由于砂体中的长石长期遭受风化作用而蚀变为高岭石,从而形成了延安组顶部“漂白砂岩”。甚至在东胜某些地区还形成了砂岩型高岭土矿床(李思田等,1990;刘池洋等,2006)。(4)直罗组内部的Ⅱ型层序界面(SB5~SB7),该三个界面均为整合面。其中,层序界面SB5为直罗组下段两个沉积旋回的分界面,焦养泉等(2005)将直罗组下段再划分为两个亚段—下亚段( $J_2z^{1-1}$ )和上亚段( $J_2z^{1-2}$ ),下亚段的多河道砂体相互叠置构成了空间上“泛连通厚”的大型砂体;而上亚段的砂体规模及含砂率明显低于下亚段,两者界面(SB5)突出的识别标志为下亚段顶部的薄煤线或薄层泥岩(图3e)。层序界面SB6为直罗组上段( $J_2z^2$ )和直罗组下段( $J_2z^1$ )层序界面,其最突出的识别标志是岩性组合和地层颜色的突变(图2c~d)。该界面之下为灰色、灰绿色粗碎屑岩,界面之上为一套“红色-杂色”细碎屑沉积物,其厚度可达百米,甚至在大营地区厚度近两百多米,且有区域分布特征(图2b)。在野外露头及钻孔岩芯中,SB6界面上下的岩石地层颜色构成了明显的“上红-下灰绿”二分性(图2c)。层序界面SB7不具备普遍的区域对比性,在某些地区,如东胜大营地区,直罗组顶部局部保留有粗碎屑岩段,以薄层砂富集为特征,界面SB7为该粗碎屑岩段与下部“红层”细碎屑岩段的分界面(图2a)。(5)志丹群(K<sub>2</sub>Z)与侏罗系、三叠系Ⅰ型层序界面(TSB3),该界面在整个研究区比较容易识别,野外露头表现为十分明显的区域性角度不整合面(图2a;图3a~b)。其岩性突变较大,TSB3界面之上岩性一般为厚层-巨厚层砂砾岩、砾岩(图10),界面底部一般为中侏罗统直罗组上段的红色细碎屑岩或薄层砂岩。其中,在盆缘高头窑一带,志丹群底部冲积砂砾岩呈高角度削截下伏的侏罗系和三叠系地层单元(图3a~b),这在大营地区二维地震剖面中亦为突出。

### 3.2 地震剖面层序界面识别

地震时间剖面上反射波同相轴较多,为减少地震相的多解性,本文把研究区内岩芯和测井资料标定到地震剖面上(如大营地区D15线和L76线二维地震剖面),利用确定的钻井信息验证和约束地震相的解释。通过对特征明显、能量强、连续性好、层位明确的主要反射波组的地质属性标定,从而可以

对地震时间剖面上主要层序界面反射波进行综合对比和追踪。从大营地区D15线和L76线二维地震剖面可以看出,本区Tk、 $T_{z-1}$ 、 $T_{z-2}$ 、T5四个层序界面和延安组3至5煤组反射波特征最为显著(图4)。二维地震剖面显示,白垩系志丹群底界(层序界面TSB3)为明显的区域性角度不整合界面:在盆缘,志丹群与下伏侏罗系、三叠系不同地层单元接触,向盆内过渡为与直罗组上段呈角度不整合接触。Ⅰ型层序界面TSB3和TSB2下部常表现为削截、顶超,上部表现为上超反射终止(图4a)。此外,白垩系底部砂砾岩充填下切谷刻蚀现象显著,表现为顶平、低凹的外部形态,常切割下伏同向轴,其底界呈削截反射终止类型(图4b)。直罗组上段与下段的层序界面SB6在地震剖面上表现也较为显著,反映了区域性的岩性突变。直罗组下段规模较大的河道砂体在地震剖面上也常具有典型的反射特征:其外形为顶平地凹的透镜状,内部无反射(图4b),其他规模小的河道砂体,由于厚度小于地震分辨率,一般表现为短轴状的振幅异常。延安组发育的五组煤组中,3煤组、4煤组和5煤组的反射波组成一个良好的反射组, $T_3$ 、 $T_{4-2}$ 、 $T_{4-3}$ 和 $T_5$ 在时间剖面上表现能量强、信噪比高、全区发育(或大部发育)的特征(图4b)。

### 3.3 单井及测井剖面上层序界面的岩电特征及识别标志

层序界面反映了一定时期的沉积间断或沉积环境突变,必然会在岩性和电性上有所表现。与地震资料相比,测井资料虽然只是岩石垂相物性变化的反映,但其较高的分辨率和定量化水平表现出明显优势,尤其是在层序界面识别上表现为明显的突变特征。为了便于更直观地反映测井曲线的信息,避免单一测井曲线所代表的多解性,本次选用自然伽马-视电阻率和双收时差-视电阻率等测井曲线组合。通过对延安组和直罗组不同层序界面岩电特征进行研究,识别出不同成因层序界面测井曲线表现特征。

(1)不整合(层序界面)引起的沉积地层缺失。该类界面通常界面之下双收时差会较大,界面之上双收时差较小,处于正常压实。如层序界面TSB3之上白垩系志丹群底部砂砾岩削截下伏地层导致安定组及直罗组上段的部分缺失,该界面之下双收

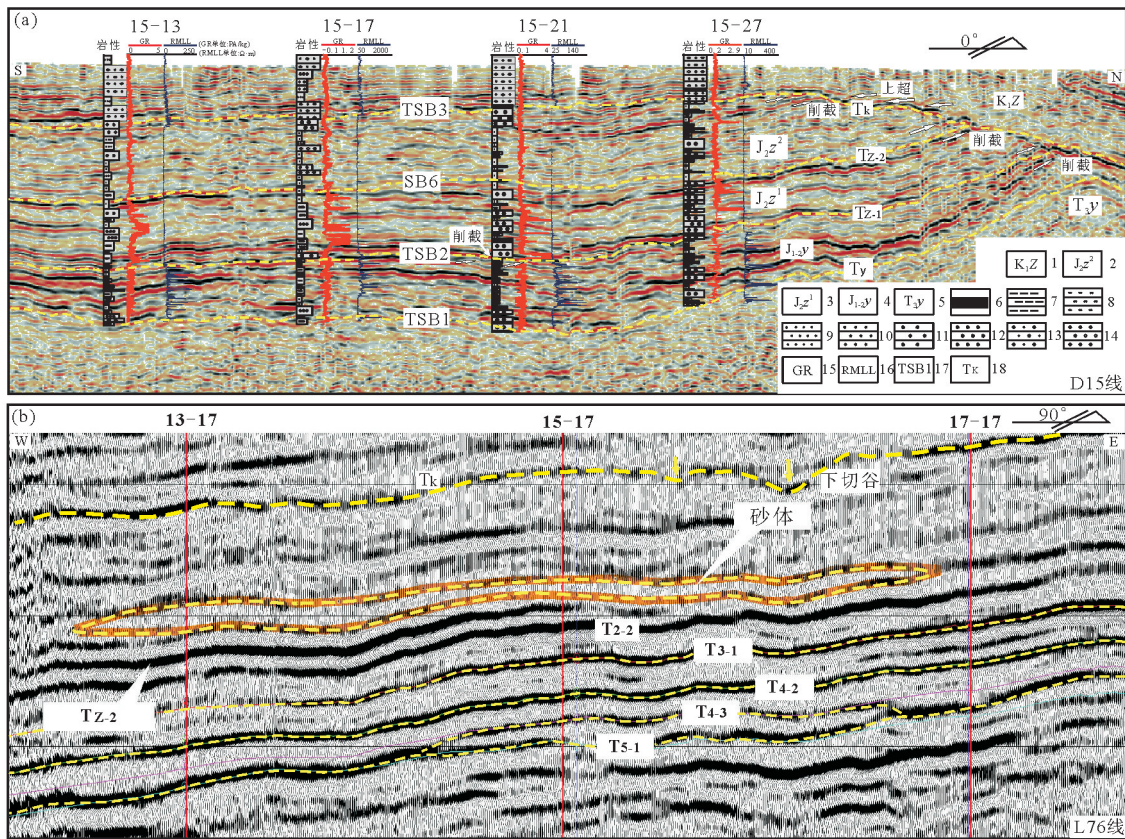


图4 鄂尔多斯盆地大营地区侏罗系延安组一直罗组在地震剖面上的反射终止类型与层序界面的识别  
 1—下白垩统志丹群;2—中侏罗统直罗组上段;3—中侏罗统直罗组下段;4—中一下侏罗统延安组;5—上三叠统延长组;6—煤层;7—泥岩;  
 8—粉砂岩;9—细砂岩;10—中砂岩;11—粗砂岩;12—含砾砂岩;13—砂质砾岩;14—砾岩;15—自然γ曲线;16—视电阻率曲线;17—层序  
 界面;18—地震反射界面

Fig. 4 Types of reflection termination and sequence boundaries identification of the Jurassic Yan'an—Zhiluo Formation on seismic profiles in the Daying area, Ordos basin

1—Lower Cretaceous Zhidan Group; 2—The upper member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 3—The lower member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 4—Lower—Middle Jurassic Yan'an Formation; 5—Upper Triassic Yanchang Formation; 6—Coal bed; 7—Mudstone; 8—Siltstone; 9—Fine sandstone; 10—Sandstone; 11—Gritstone; 12—Conglomerate-bearing gritstone; 13—Sandy conglomerate; 14—Conglomerate; 15—Natural gamma ray curve; 16—Apparent resistivity curve; 17—sequence boundary; 18—Reflection termination of seismic profile

时差变大,界面之上双收时差较小(图5a)。其原因在于不整合面代表沉积间断,在该界面之下的地层由于燕山运动构造运动的抬升,经历了长时间的压实间断,而界面之上为正常沉积-压实成岩,因此双收时差及视电阻率等其他测井曲线必然会有所表现。(2)沉积环境及岩性差异引起的岩电突变。视电阻率和自然伽马(或FD3019)在层序界面上下出现折线,或者突变,这种岩电差异容易辨别。其中,TSB3、SB6和TSB2界面附近的岩电突变最为明显:①界面TSB3,该界面之上为一套区域性砾岩层(图7),界面之下为直罗组上段杂色细碎屑岩,电性特征表现为视电阻率骤减(图5a),尤其在视电阻率连

井剖面上骤减突变尤为突出(图6);②界面SB6,该界面之上主体为一套红色细碎屑岩沉积,整体呈现为低电阻率、高自然伽马等曲线特征。界面之下直罗组下段主要为河流相沉积,下部以辫状河相块状砂岩为主,向上逐渐变细,砂层减少,泥岩增多(图7),电性特征表现为电阻率由下向上降低、自然伽马增高的趋势。到了界面SB6之下的泥岩段,电阻率具有明显降低特征(图5b);③界面TSB2,该界面之下为一套灰色含煤细碎屑沉积,电性特征表现为大锯齿状高视电阻率、低的锯齿状自然伽马(图5d);界面之上为粗碎屑沉积,视电阻率呈现骤减特征(图5c)。在视电阻率连井剖面上,延安组的视电



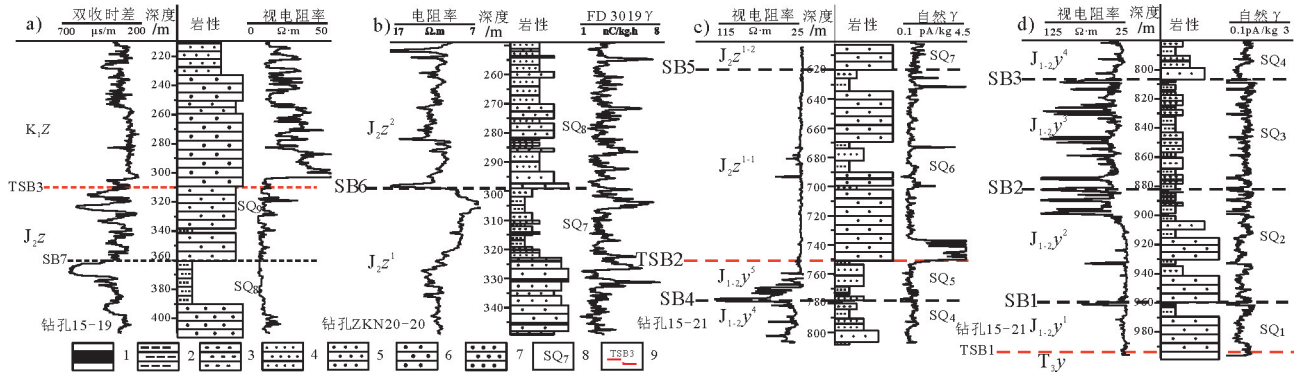


图5 鄂尔多斯盆地大营地区侏罗系延安组—直罗组层序界面岩—电响应特征

1—煤层;2—泥岩;3—粉砂岩;4—细砂岩;5—中砂岩;6—粗砂岩;7—砾岩;8—层序;9—层序界面

Fig. 5 Electrical properties of sequence boundary surfaces from the Jurassic Yan'an Formation to Zhiluo Formation in the Daying area, Ordos basin  
1—Coal bed; 2—Mudstone; 3—Siltstone; 4—Fine sandstone; 5—Sandstone; 6—Gritstone; 7—Conglomerate; 8—Sequence; 9—Sequence boundary

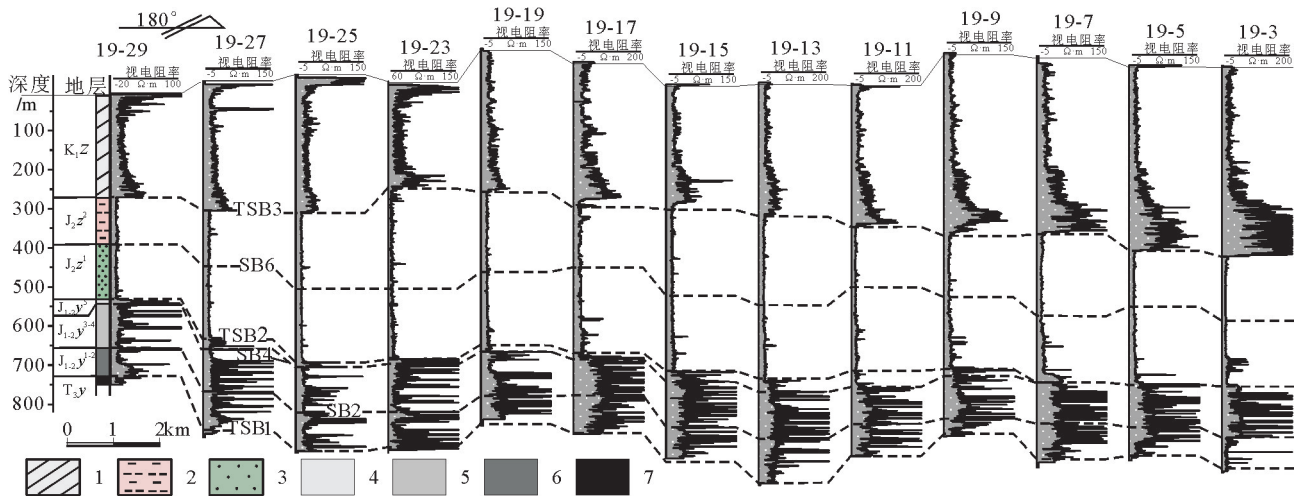


图6 鄂尔多斯盆地大营地区侏罗系延安组—直罗组视电阻率连井剖面图(19号勘探线)

1—下白垩统志丹群;2—中侏罗统直罗组上段;3—中侏罗统直罗组下段;4—中—下侏罗统延安组五段;5—中—下侏罗统延安组三至四段;6—中—下侏罗统延安组一至二段;7—上三叠统延长组

Fig. 6 Apparent resistivity profile of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formation in the Daying area, Ordos basin (No. 19 exploration line)

1—The lower Cretaceous Zhidan Group; 2—The upper member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 3—The lower member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 4—The fifth part of Yan'an Formation, Lower–Middle Jurassic; 5—The third–fourth part of Yan'an Formation, Lower–Middle Jurassic; 6—The first–second part of Yan'an Formation, Lower–Middle Jurassic; 7—Upper Triassic Yanchang Formation

阻率整体明显高于界面之上的直罗组地层,而且表现为大锯齿状特征(图6)。(3)煤层的地震—测井响应特征:延安组煤层的低波阻抗、低密度是本区最明显的测井响应特征。煤层组作为反射层反射系数大,全区连续性好,一般为全区标志层;在速度曲线上,速度由高向低变化,岩性由砂岩层变为煤层,岩性变化导致速度差异,从而形成较强反射相位。煤层相对于泥岩、砂岩,自然伽玛曲线呈低值大锯齿状、视电

阻率呈高值大锯齿状(图5d,图6),密度曲线则表现为小尖刀状至大尖刀状的低密度特征。根据以上煤层显著的地震—测井响应特征,延安组内部的层序界面SB1—SB4能够较容易的识别。

### 3.4 微量元素特征对层序界面的识别

微量元素在水体及沉积物中的分布、循环及分异(亏损、富集)与它们本身的化学性质有关外,还受到沉积介质物理化学条件及古气候条件的支配



图7 鄂尔多斯盆地大营地区侏罗系延安组—直罗组关键层序界面及地层结构特征(15勘探线)  
 1—下白垩统志丹群;2—中侏罗统直罗组上段;3—中侏罗统直罗组下段;4—中—下侏罗统延安组五段;5—中—下侏罗统延安组三至四段;  
 6—中—下侏罗统延安组一至二段;7—上三叠统延长组;8—自然γ曲线;9—层序界面

Fig.7 Characteristics of the main sequence boundary surfaces and stratigraphic structure of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formation in the Daying area, Ordos basin (No. 15 exploration line)

1-The lower Cretaceous Zhidan Group; 2-The upper member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 3-The lower member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 4-The fifth part of Yan'an Formation, Lower-Middle Jurassic; 5-The third-fourth part of Yan'an Formation, Lower-Middle Jurassic; 6-The first-second part of Yan'an Formation, Lower-Middle Jurassic; 7-Upper Triassic Yanchang Formation; 8-Natural gamma ray curve; 9-Sequence boundary

(Nameroff et al., 2004; Tribovillard et al., 2004, 2006)。层序界面上下地层形成于不同的沉积环境,沉积水介质以及古气候等条件有所异性,从而导致沉积物中的微量元素及其比值的差异性(谭先锋, 2014)。因此,沉积物中的微量元素及其比值在层序界面识别方面具有十分重要的示踪作用,从而使宏观标志不明显的层序界面识别和层序划分更加定量化。张天福等(2016)在鄂尔多斯盆地北缘神山沟地区延安组至直罗组露头剖面上系统采集了28件原生沉积的泥岩、粉砂质泥岩样品,采用ICP-MS和扫描电镜(SEM)对进行了微量、稀土元素测试和粘土矿物分析,其测试方法及分析结果已在张天福等(2016)一文详细报道,在此不再赘述。从图8可以看出,反映沉积水介质古盐度元素B、Sr/Ba、B/Ga组合及反映水介质氧化-还原元素U/Th、V/V+Ni、V/Cr、Ni/Co组合变化趋势存在明显的突变效应,这与Sr、Cu、Sr/Cu、FeO/MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO等比值和CIA、ICV指数突变位置具有很好的一致性,且与层

序界面也具有较好的耦合性(图9)。

### 3.4.1 古盐度参数、古沉积水体介质的氧化还原性参数对层序界面的识别

Sr、Ba含量和Sr/Ba值可以定性判别古水介质古盐度,U/Th、V/Cr、Ni/Co和V/(V+Ni)比值常被用于判断沉积物沉积时底层水体氧化-还原环境的可靠参数(Jones and Manning, 1994)。而古盐度、古沉积水体介质的氧化还原性与古水深、古环境具有一定的相关性(邓宏文和钱凯, 1993)。因此,可以利用上述特征元素来厘定古水深以及干湿条件的变化,最终利用相对古水深的变化反映基准面变化从而进行高分辨率层序地层的划分。从图8可以看出,古盐度和古沉积水体介质的氧化还原性参数变化存在5个明显突变界面(SB1、SB4、TSB2、SB6、SB7),反映了从延安组一段至二段水体明显加深—延安组二段至四段古水体缓慢加深—延安组五段水体变浅—直罗组下段缓慢加深—直罗组上段水体明显变浅的整体变化趋势。尤其是直罗组下段

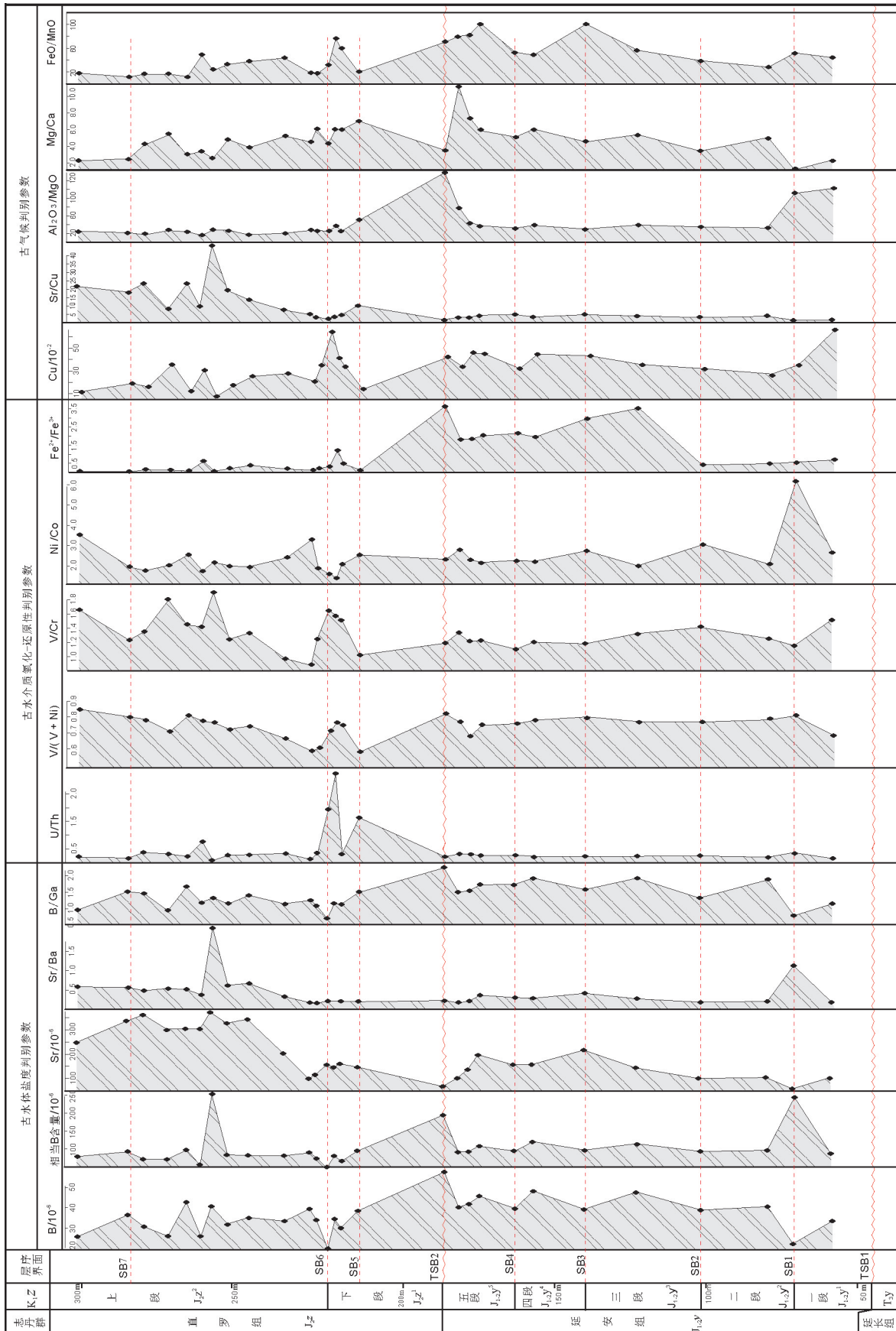


图 8 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系关键层序界面在微量元素比值上的响应特征 (据张天福等, 2016 修改)  
 Fig. 8 Trace elements ratios characteristics of main Jurassic sequence boundary surfaces on the northeastern margin of Ordos basin (modified from Zhang Tianfu et al., 2016)

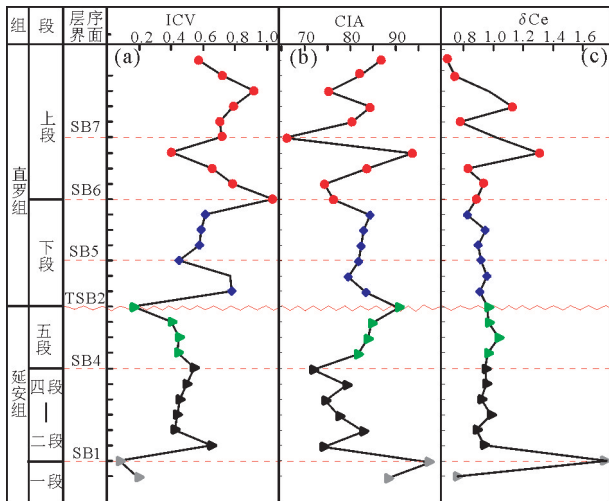


图9 鄂尔多斯盆地北缘侏罗系延安组、直罗组ICV、CIA指数值及 $\delta Ce$ 值随剖面垂向上变化趋势图(样品均采自鄂尔多斯市神山沟地区,岩性为泥岩、粉砂质泥岩,图据张天福等,2016修改)

Fig.9 Variable trend map of ICV, CIA&Ce for Yan'an Formation and Zhiluo Formation on the northeastern margin of Ordos basin(All of 28 mudstone and siltstone samples from Shen Shangou area, the northeastern margin of Ordos basin; modified from Zhang Tianfu et al., 2016)

与上段层序界面SB6之上,B、Sr、Sr/Ba值明显增高,反映了古水介质盐度突然增高,在一定程度上指示着在中侏罗世直罗晚期古气候明显干旱化。

### 3.4.2 古气候参数对层序界面的识别

微量元素 Sr、Cu 及 Sr/Cu、FeO/MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO、Mg/Ca 对判别古气候具有较好的指示作用。比如,Sr/Cu 比值介于 1.3~5.0 指示温湿气候,该值大于 5.0 则指示干旱气候(Lermanm, 1978)。Mn 在干旱环境中含量比较高,在相对潮湿的条件下含量较低。Cu 主要靠有机质输送到沉积物中是进入沉积

物,因此常被作为有机质通量的理想指标(Tribovillard et al., 2006)。Fe 在潮湿环境中易以 Fe(OH)胶体快速沉淀,因此,沉积物中 FeO/MnO 比的高值对应温湿气候,低值是干热气候的响应。黏土矿物的中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO 的大小及其变化也可反映沉积过程中古气候,其值越大,表明水体淡化,反映温湿气候,值越小,则表明干旱气候(刘刚和周东升, 2007)。

从图8可以看出,古气候参数变化存在2个明显突变界面(TSB2、SB6)。其中,界面TSB2之下的延安组Sr/Cu比值较为集中,与之相比,界面TSB2之上的直罗组下段Sr/Cu比值整体高于延安组,且呈高低交替变化,指示着中侏罗世直罗早期为干湿交替的气候特征;直罗组下段与上段界面SB6之上,Sr/Cu比值的急剧升高指示着直罗组上段沉积时为干旱气候环境。FeO/MnO比值在垂向上的变化与Sr/Cu具有很好的一致性,表现为延安组FeO/MnO比值整体高于直罗组,且在直罗组底部存在着FeO/MnO比值的突然降低和之后的“低—高一低”波动性变化(图2),进一步印证了直罗期间波动性升温事件及直罗组早期干湿交替的气候特征。Mg/Ca、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO比值也指示了同样的结果(表1,张天福等,2016)。

### 3.4.3 CIA、ICV 指数对层序界面的识别

通常采用CIA指数(chemical index alteration)来确定物源区的化学风化程度(Nesbitt and Young, 1982)。一般认为,CIA值在50左右的碎屑沉积岩,其物源区岩石未遭受化学风化,CIA值50~100时,表明其物源区岩石遭受一定强度的化学风化。成分成熟度与沉积物形成的气候背景和构造背景有关,ICV(index chemical variation)指数可以用来确定

表1 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系延安组一直罗组泥岩微量元素比值判别指标统计表(数据引用张天福等,2016)  
Table 1 Geochemical statistics of trace elements ratios of mudstone from Yan'an Formation and Zhiluo Formation on the northeastern margin of Ordos basin(data from Zhang Tianfu et al., 2016)

层位	Sr/Ba	B/Ga	U/Th	V/(V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup>	Sr/Cu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO	FeO/MnO
直罗组上段	0.68	1.28	0.30	0.76	1.44	2.22	0.19	19.10	22.02	25.68
	2.11/0.33	1.66/0.96	0.76/0.08	0.85/0.66	1.90/0.98	3.52/1.75	0.36/0.04	46.05/7.47	27.75/15.60	47.67/11.94
直罗组下段	0.20	1.15	1.26	0.67	1.31	2.15	0.57	4.87	30.77	41.33
	0.22/0.17	1.5/0.72	3.24/0.12	0.76/0.58	1.64/0.89	3.31/1.42	1.56/0.12	10.35/2.41	49.65/23.44	75.67/17.18
延安组	0.33	1.61	0.25	0.76	1.26	2.73	1.84	3.30	63.01	62.70
	1.13/0.17	2.24/0.80	0.35/0.16	0.81/0.68	1.50/1.12	6.17/2.12	3.66/0.41	4.98/1.59	121.25/32.28	101.08/28.03

注:上为平均值,下为最高值和最低值。

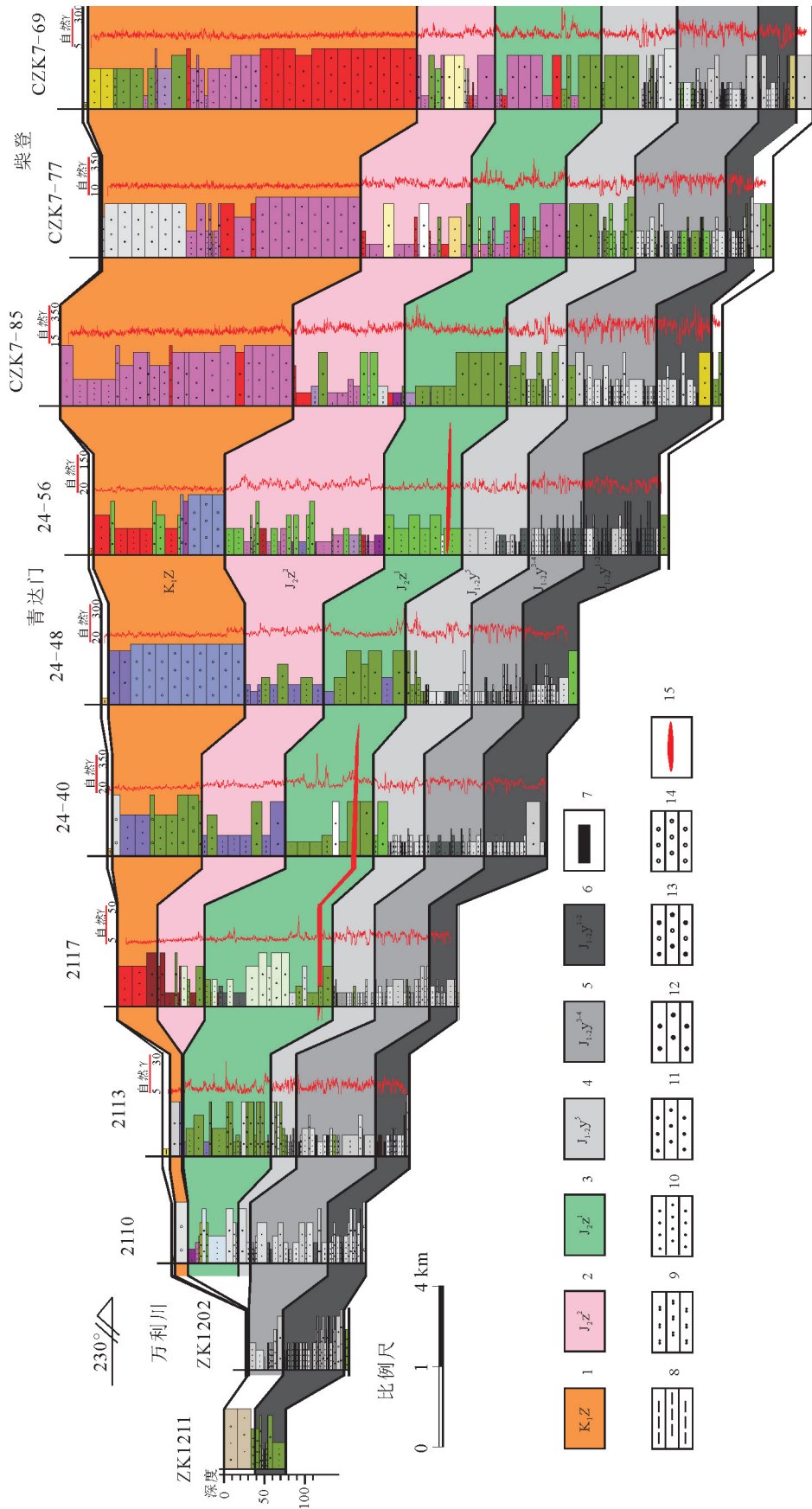


图10 鄂尔多斯盆地东北缘万利川—柴登地区侏罗系—下白垩统地层对比剖面(PM2, 北东—南西向)

1—下白垩统志丹群; 2—中侏罗统直罗组上段; 3—中侏罗统直罗组下段; 4—中—下侏罗统延安组五段; 5—中—下侏罗统延安组三至四段; 6—中—下侏罗统延安组一至二段; 7—煤层; 8—泥岩; 9—粉砂岩; 10—细砂岩; 11—中砂岩; 12—粗砂岩; 13—含砾粗砂岩; 14—砾岩; 15—轴砾层

Fig.10 Stratigraphic correlation profile of Jurassic and lower Cretaceous in the Wanlichuang-Chaideng area, the northeastern margin of Ordos basin (PM2, Direction NE-SW)

1-The lower Cretaceous Zhidan Group; 2-The upper member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 3-The lower member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 4-The fifth part of Yan'an Formation, Lower-Middle Jurassic; 5-The third-fourth part of Yan'an Formation, Lower-Middle Jurassic; 6-The first-second part of Yan'an Formation, Lower-Middle Jurassic; 7-Coal bed; 8-Mudstone; 9-Siltstone; 10-Fine sandstone; 11-Sandstone; 12-Gritstone; 13-Conglomerate-bearing gritstone; 14-Conglomerate; 15-Uranium bed

沉积物的成分成熟度(Cox et al., 1995),ICV越高,其代表的成分成熟度越低。构造活动区泥质岩石的成分成熟度低,而在构造稳定区或强烈的化学风化背景下泥质岩的成分成熟度高(梁斌,2006)。

神山沟剖面28件泥岩样品的CIA及ICV指数从下到上具有明显的变化规律(图9a,b),而且直罗组下段底部和上段底部存在着两次明显突变(层序界面TSB2和SB6)。CIA及ICV指数每次突变均是物源区构造活动或古气候变迁的响应:①层序界面SB1至SB4之间(延安组二段~四段)泥岩的CIA和ICV指数均较为集中,说明物源区构造稳定。层序界面SB4之上的CIA逐渐增大,ICV指数逐渐减小,反映物源区此时仍处于构造稳定区的强烈化学风化背景下。②整体上,直罗组泥岩的ICV指数明显高于延安组,标志着直罗组泥岩成分成熟度远低于延安组。尤其是TSB2层序界面之上的CIA骤降、ICV急剧上升(图9a,b),反映了物源区化学风化作用明显减弱、沉积物成分成熟度显著降低。暗示着中侏罗世直罗期,鄂尔多斯盆地周缘物源区进入了构造强烈活动的时期。这与本研究区直罗组底部普遍存在区域性的平行不整合面相吻合。③直罗组下段从底部界面TSB2到顶部界面SB6,CIA整体逐渐降低,ICV指数整体逐渐升高,反映物源区化学风化作用减弱,在一定程度上指示着直罗期物源区古气候由潮湿逐渐向干旱转变。

## 4 层序界面地质意义及其时空属性

上述层序界面的识别不仅是本区侏罗系层序划分和对比的关键,而且不同次级的层序界面及其沉积特征记录了中晚侏罗世盆地的形成演化、区域构造活动及古气候变迁过程。

### 4.1 层序界面时空属性与盆地演化关系讨论

鄂尔多斯盆地在印支运动的影响下在沉积上实现了由海相、过渡相向陆相转变的重大变革,自晚三叠世以来开始进入大型内陆沉积盆地的形成和发展时期,发育完整的陆相碎屑岩沉积体系。其中,三叠期末印支运动使盆地整体不均匀抬升,致使上三叠统延长组顶部遭受较长时期的侵蚀。在印支运动所形成的TSB1层序界面之上,早侏罗世区域性沉积缺失,形成了局限性的富县组沉积。大量深孔及野外露头证实,TSB1层序界面为一起伏

不平的剥蚀面,地震剖面表现为 $T_7$ 反射层,界面之上侏罗系与下伏三叠系呈微角度不整合接触。TSB1界面之上的富县组为侏罗系最早沉积的地层,多以填平补齐为特点,沉积类型多样,粒度有粗、有细,颜色亦黑、亦红,与界面之下延长组沉积有很明显的岩性-岩电差异性。TSB1层序界面不仅对早侏罗世富县组、中侏罗世延安组早期沉积有明显的控制作用,其构造背景与晚三叠世具有明显区别;该界面之上的富县组或延安组底部的河流相砂体与延长组烃源岩接触,不但可以成为油气运移的通道,也为中生界“下生上储”或“湖生河储”古地貌油藏的形成创造了有利条件。

早中侏罗世延安期,鄂尔多斯盆地发育了一套稳定的湖泊三角洲及沼泽交互沉积,延安组普遍发育5组煤组,煤层6~20层,单层最大厚度可达10 m多(李思田等,1990)(图10)。延安组内部的4个II型层序界面(SB1—SB4)是划分5个三级层序的界面,在岩芯和露头上表现为连续整合接触,其性质为大范围区域性水进界面,宏观识别标志为主煤期的顶界面。该4组界面在电阻率、地震-测井响应特征明显,反射层反射系数大,反射相位强,全区连续性好,一般为全区标志层。在延安组较长的演化阶段中,层序SQ1继承了早侏罗世河流相沉积的特点;层序SQ2—SQ4是盆地发育的稳定充填时期,此期间三角洲平原面积明显扩大,河流作用减弱,是主要的成煤期;层序界面SB1至SB4之间泥岩的微量元素指标及CIA和ICV指数均较为集中,表明物源区构造相对稳定;进入SQ5阶段以后,盆地构造明显抬升,河流回春,湖泊大面积萎缩。古水体盐度参数Sr、Ba含量和Sr/Ba值亦显示SB4层序界面之后河流作用强化和水体变浅的趋势。

中侏罗世延安期末,盆地在燕山运动早幕影响下又再度抬升,延安组顶部经历了长期风化暴露沉积间断,局部强风化区形成了典型的高岭土化“漂白砂岩”。沉积间断形成了延安组与上覆直罗组底部大型辫状河道砂岩之间的侵蚀不整合面(TSB2界面),地震剖面表现为 $T_{2-1}$ 反射层。该界面之上的直罗组以河流体系为主,其下部的辫状河道砂体对延安组可造成数十米的侵蚀,底部发育一套全区可对比的厚层砾岩、含砾砂岩(图10)。TSB2界面之上ICV指数整体明显高于界面之下的延安组,标志着

直罗组泥岩成分成熟度远低于延安组。尤其TSB2界面附近CIA骤降、ICV急剧上升(图9a、b),反映了物源区化学风化作用明显减弱、沉积物成分成熟度显著降低,这些信息表明中侏罗世直罗期构造活动的增强。中侏罗世晚期至晚侏罗世,燕山运动主幕导致鄂尔多斯盆地周缘挤压逆冲构造带的形成,盆地大部分地区未接受沉积。仅在盆地西缘逆冲构造带前陆地区,发育上侏罗统芬芳河组磨拉石堆积,其厚度可达1200~1300 m,记录了中侏罗世晚期至晚侏罗世时期西缘逆冲推覆构造过程(张岳桥和廖昌珍,2006)。

早白垩世初期鄂尔多斯盆地又恢复沉降,东北缘早白垩世志丹群下部沉积了一套巨厚洪积相砾岩(图11~图14)。二维地震剖面显示,该套砾岩层不整合超覆在下伏侏罗系和三叠系不同时代的地层之上。在层序界面(TSB3)附近,电性突变特征表现尤为突出,地震剖面亦表现为明显的 $T_r$ 反射层(图6)。白垩系底部的TSB3界面形成于鄂尔多斯盆地构造体制由挤压变形转变为引张伸转换阶段,此时,盆地北缘和南缘发生地壳引张,导致盆地南北两侧的翘倾运动。翘倾的结果加深了周缘地表侵蚀作用和盆内快速接受沉降沉积作用。前人对此时期的引张变形年代学研究结果指示起始于140~

135 Ma(Ratschbacher et al., 2000)。早白垩世中晚期,受区域构造挤压,鄂尔多斯盆地再次整体隆升,这种隆升格局一直持续到晚白垩世至新生代时期(张岳桥和廖昌珍,2006)。盆地东北缘侏罗系—白垩系地层三维结构显示,下白垩统志丹群被后期剥蚀改造具有东强西弱、边缘强内部弱的特点,残留下白垩统总体呈东薄西厚(图11)。其中,在新胜—阿彦布鲁以南至纳林希里一带,下白垩残留地层最厚,厚度一般在700~900 m,纳林希里以南有一小范围厚度可达1000 m,向东厚度递减,直到缺失(图11b)。

4.2 层序界面与古气候环境的变迁

以东胜地区典型地层对比剖面 and 神山沟侏罗系微量元素地球化学剖面来纵观盆地东北缘整个地层序列,中侏罗统直罗组上段巨厚“红层”具有独特沉积特征(图10,图14)。“红层”底部的SB6层序界面代表了古气候环境突变界面,主要体现在以下方面:(1)地层颜色的变化。中侏罗统延安组至直罗组下段,地层序列的颜色主色调由灰色、灰黑色转变为灰绿色,而直罗组上段地层的颜色突变为紫红色,反映了沉积环境有早期的还原环境向氧化环境突变(图2,图10,图14)。界面SB6附近泥岩CIA、ICV指数发生突变,其变化频率、变化幅度也随之明显加大(图9a~b),很可能由盆地周缘造山带构造活

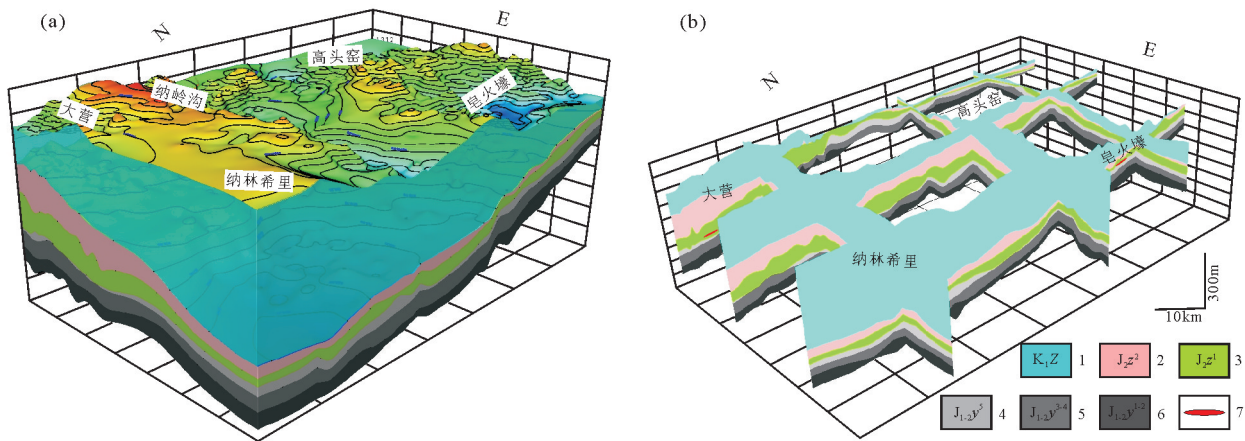


图11 鄂尔多斯盆地东北缘三维地层结构模型及栅格图(基于3200口钻孔数据,平均钻孔网度2km×2km)  
 1—下白垩统志丹群;2—中侏罗统直罗组上段;3—中侏罗统直罗组下段;4—中—下侏罗统延安组五段;5—中—下侏罗统延安组三至四段;  
 6—中—下侏罗统延安组一至二段;7—铀矿层

Fig. 11 Models of 3D stratigraphic structure and grid map on the northeastern margin of Ordos basin (based on 3200 drill holes, average drilling grid 2km×2km)

1— The lower Cretaceous Zhidan Group; 2— The upper member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 3— The lower member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 4— The fifth part of Yan'an Formation, Lower–Middle Jurassic; 5— The third–fourth part of Yan'an Formation, Lower–Middle Jurassic; 6—The first–second part of Yan'an Formation, Lower–Middle Jurassic; 7—Uranium bed

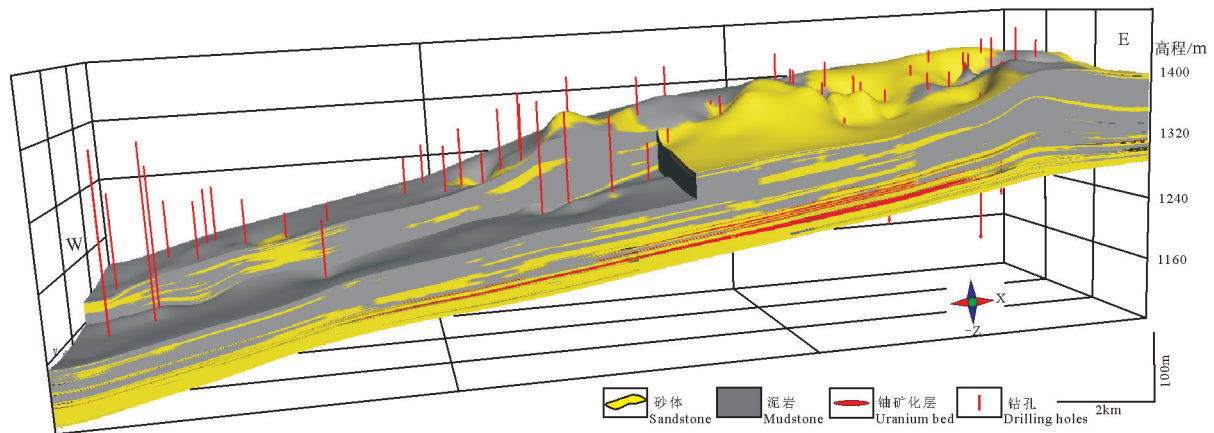


图12 鄂尔多斯盆地东北缘皂火壕铀矿床含铀岩系直罗组三维砂体及三维铀矿化层模型  
(基于195口钻孔数据,平均钻孔网度200 m×200 m)

Fig.12 3D models of sandstone and uranium mineralization bed of Zaohuohao uranium deposit on the northeastern margin of Ordos basin (based on 195 drill holes, average drilling grid 200 m×200 m)

动性突然加强所引起。李振宏等(2015)和黄岗等(2009)对鄂尔多斯盆地延安组、直罗组砂岩进行Qm-F-Lt投图,延安组样品点全部落入克拉通范围,直罗组样品点均落入石英再造山旋回的范围内,表明延安期的构造环境相对稳定,直罗期构造活动大大增强,预示着盆地发生了强烈抬升。(2)古气候及古盐度参数垂相上的变化。界面TSB2之下的延安组Sr/Cu比值较为集中,均小于5.0,说明中侏罗世延安期为稳定的温湿气候;与之相比,界面TSB2之上的直罗组下段Sr/Cu比值(2.41~10.35,平均4.87)整体高于延安组(1.59~4.98,平均3.30)(表1),而且表现出“升高—降低—再升高”波动性变化(图2),指示着中侏罗世直罗早期(直罗组下段沉积时)为干湿交替的气候特征;直罗组下段/上段界面SB6之上,Sr/Cu比值急剧升高(7.47~46.05,平均19.10),且均大于5.0(表1),指示下段沉积时为干旱气候环境,同时,Sr/Cu比值的骤增还反映了直罗组晚期存在着一次古气温明显升高事件。层序界面SB6之上,B、Sr、Sr/Ba值同样出现明显增高趋势,反映了古水介质盐度突然增高,在一定程度上指示着在中侏罗世直罗期晚期古气候明显干旱化。(3)古生物化石垂向上的变化。延安组中部及中上部地层中含有大量的真蕨类、裸子植物化石,反映了延安组沉积形成于温暖潮湿气候环境下。直罗组下段含有煤线和薄层煤,发育的古植物化石与延安组近似,但以真蕨

类、苏铁类为主,有一定量的本内苏铁类、银杏类(张天福等,2016);此外,笔者还发现掌鳞杉科Classopollis含量在延安组仅为直罗组的一半,而掌鳞杉科Classopollis的高含量与古气温较高和干燥温带-亚热带气候间具有对应关系。孙立新等(2017)在神山沟剖面延安组中识别出中侏罗世早期Cyathidites-Dictyophyllidites-Cycadopites(CDC)和Cyathidites-Osmundacidites-Lycopodiumsporites-Concentrisporites-Disacciatrileti(COLCD)二个孢粉组合带,在直罗组中识别出中侏罗世中期Cyathidites-Osmundacidites-Cycadopites-Disacciatrileti(COCD)孢粉组合带(图13)(孙立新等,2017)。以上孢粉组合垂相上的分带也进一步印证了中侏罗世中晚期存在明显升温事件。

关于中侏罗世中晚期古环境的变化,邵宏舜和黄第藩(1965)通过对鄂尔多斯盆地中生代湖盆泥岩的含盐量变化系统研究后发现,早中侏罗世延安期到中侏罗世的直罗期氯离子的含量基本都在0.01%以下,而到中侏罗世晚期氯离子的含量骤然增加到0.07%以上。同时,准格尔盆地中侏罗世三工河期至齐古期的氯离子变化研究也得出了相应的结论,氯离子含量由三工河组0.01%~0.014%迅速增加到0.066%(邵宏舜和黄第藩,1965)。许多学者认为这种变化可能是由于中侏罗世晚期板块的多向汇聚作用引起东部高原的隆升,进而导致古气候



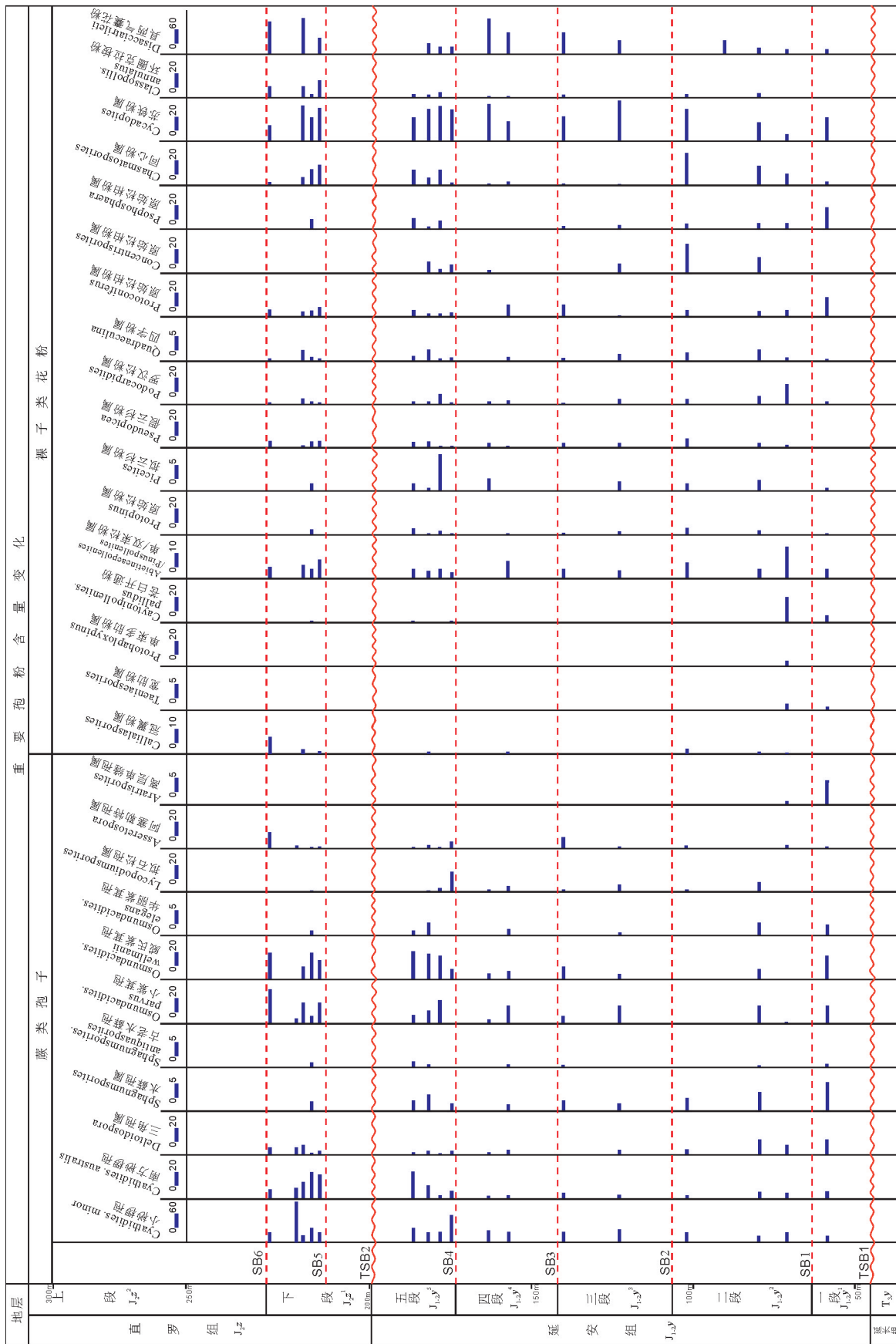


图 13 鄂尔多斯盆地东北缘神山沟延安组—直罗组孢粉含量变化图(据孙立新等, 2017 修改)  
Fig. 13 The variation of sporopollen content of the Yan'an Formation and Zhiluo Formation in Shenshangou area, the northeastern margin of Ordos basin (modified from Sun Lixin et al., 2017)

由温暖潮湿迅速转变为寒冷干旱环境(董树文等, 2007; 张旗等, 2008; 王清晨, 2009; 李振宏等, 2015)。这次由燕山运动引发的生态环境巨变不仅仅局限于鄂尔多斯盆地,也导致冀北—辽西地区燕辽生物群在晚侏罗—早白垩世早期发生大规模的灭绝(季强等, 2004; 董树文等, 2007)。曹珂等(2010)在四川广元地区开展中侏罗世至早白垩世粘土矿物特征与古气候关系研究中发现,该地区在中侏罗世晚期气候环境突然变得寒冷干燥,预示着区域古构造背景的改变。以上表明中侏罗世中晚期—早白垩世早期发生的气候环境的突变在中国中东部甚至亚洲东部都具有很强的广泛性。

### 4.3 关键层序界面与煤、铀成矿作用关系讨论

研究区内侏罗纪沉积序列及微量元素地球化学显示本区自早—中侏罗世延安期至中侏罗世直罗期,古气候经历了温暖潮湿到干湿交替再到干旱—半干旱的转变过程。中侏罗统直罗组底部 TSB2 界面及直罗组上段底部 SB6 界面为古气候转换的关键界面。在此过程中,形成了本区侏罗纪重要的含煤岩系和含铀岩系,其中,古气候是聚煤作用的前提和决定性因素,同时也是铀储层砂体和铀成矿氧化—还原地球化学条件形成的重要条件。延安期旋回性温暖潮湿的湖泊三角洲沉积环境为成煤植物生长、繁殖提供了有利条件,聚煤成岩作用形成了区域性的原生还原层和隔挡层。直罗期,古气候

和沉积体系的转变形成了直罗组下段辫状河道沉积砂体+上段干旱环境下的红色泥岩层。TSB2 界面之上的灰色含炭屑还原性地层和 SB6 界面之上的红层构成了铀成矿所需的氧化—还原序列。

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿层主要赋存于 TSB2 界面之上的直罗组下部辫状河道砂体中(图 12),因而可以推断铀主成矿时代应在中侏罗世直罗期之后,即中侏罗世中晚期之后。而此时恰是东亚板块多向挤压汇聚构造体制重大转换阶段,中国东部从此开始进入了陆内俯冲和陆内造山为特征的东亚汇聚构造体系(张岳桥和廖昌珍, 2006; 董树文等, 2007);鄂尔多斯盆地也由三叠纪—早侏罗世的引张构造应力环境转换为多向挤压背景,本区直罗组底部的 TSB2 界面即是燕山运动 A 幕在鄂尔多斯盆地中的响应。燕山运动使早期大华北统一盆地解体,鄂尔多斯盆地北缘、东缘抬升,湖泊萎缩,沉积体系由湖泊三角洲转变为辫状河沉积,大型辫状河道下切侵蚀改造下伏延安组含煤岩系,大量炭屑、黄铁矿等还原性物质携带进入直罗组下段沉积砂体中,继而在 TSB2 层序界面之上形成了一套具较好连通性的还原性储层砂体,该套“泛连通厚”的砂体为后期含铀表生流体提供了运移通道和赋存空间(图 12,图 14)。中侏罗世直罗晚期,古气候环境发生突变,气候趋于干旱,SB6 界面之上沉积了一套红色岩系(图 14)。有学者认为该套红色岩系为表生流体

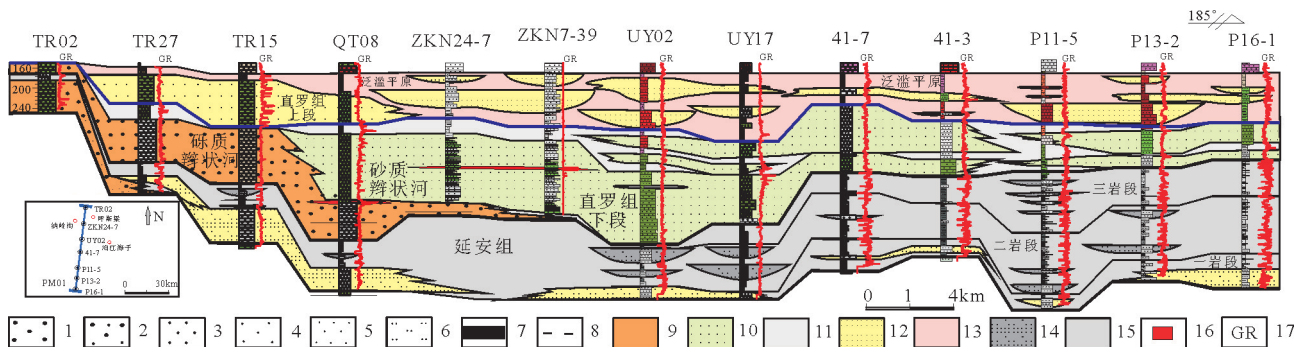


图 14 鄂尔多斯盆地东北缘呼斯梁—纳林希里地区延安组和直罗组沉积相剖面(PM01)

- 1—砾岩; 2—砂砾岩; 3—粗砂岩; 4—中砂岩; 5—细砂岩; 6—粉砂岩; 7—煤层; 8—泥岩; 9—冲积沉积; 10—辫状河道;
- 11—河道间; 12—曲流河道; 13—泛滥平原; 14—湖泊三角洲前缘砂体; 15—湖相细碎屑岩; 16—铀矿体; 17—伽马曲线

Fig. 14 Sedimentary facies profile of the Yan'an and Zhiluo Formation in the Husiliang—Nalinixili area, the northeastern margin of Ordos basin (PM01)

- 1—Conglomerate; 2—Gritstone-bearing conglomerate; 3—Gritstone; 4—Sandstone; 5—Fine sandstone; 6—Siltstone; 7—Coal bed;
- 8—Mudstone; 9—Alluvial; 10—The channel of braided river; 11—Inter-channel; 12—The channel of meandering river; 13—Floodplain;
- 14—Lake delta front sandstone; 15—Lacustrine fine clastic rock; 16—Uranium orebody; 17— $\gamma$  curve

溶解铀提供了“场”(金若时等,2017)。

早白垩世时期,鄂尔多斯盆地处于引张构造应力体制,在此环境下盆地处于相对松弛和开放的构造环境,为流体运移和成藏过程提供了有利的条件。尤其是盆-山转换带的地表水动力系统活跃,水力梯度大,加上中侏罗世晚期—早白垩世长期干旱氧化的沉积环境,对蚀源区铀离子的活化迁移和富集成矿极为有利。鄂尔多斯盆地周缘有限的年代学分析结果也显示铀矿成矿时代主要集中在白垩纪时期(夏毓亮等,2003),可能与这个时期的引张构造环境有关。

通过上述研究纵观整个侏罗系地层结构不难发现,自延安组至直罗组地层“垂相分带”尤为明显:下部灰色—灰黑色含煤细碎屑岩系—中部灰色—灰绿色粗碎屑岩系—上部红色细碎屑岩系(图11;图14)。而中国北方主要砂岩型工业铀矿层多耦合产于红—黑岩系中间过渡的粗碎屑岩系中。而且这种“红—黑”岩系组合不仅仅局限于侏罗系,在白垩系中也普遍发育,如松辽盆地早白垩世晚期—晚白垩世发育了3套红色沉积建造和2套黑色沉积建造(金若时等,2017)。金若时等(2017)所定义的“红—黑岩系”其实是受古气候作用形成的,气候转变才是“红—黑岩系”关键层序界面形成的最主要制约因素:温暖潮湿环境有利于形成煤层和原生还原性地层,干旱期有利于形成原生氧化性的红层,而古气候转变则形成了铀成矿所需的氧化—还原序列(“红—黑”序列)。本区砂岩铀矿的赋存层位是在相对温暖潮湿气候条件下形成的,而成矿很可能是在干旱—半干旱转变时期,富氧的古水体条件有利于铀的活化、迁移和再次富集。因此,“红—黑岩系”控制铀矿化实际上是古气候因素所决定的,外部表现为岩石的原生沉积颜色(即所谓的“红—黑岩系”)控矿。燕山运动早期多向挤压和陆内造山与晚期大规模伸展是本区铀大规模成矿作用有利条件耦合的驱动力和决定性因素。

## 5 结 论

(1) 通过野外露头、钻井岩芯、地震、测井及微量元素地球化学“五位一体”层序界面综合识别方法,在鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系中识别出了10个不同级次层序界面,其中包括3个I型层序界面

(TSB1—TSB3)和7个II型层序界面(SB1—SB7)。层序界面在露头剖面和钻井岩芯上表现为铁质风化壳、削截侵蚀面或岩性岩相转化面等特征;地震剖面上表现为上超、下超、削截等反射特征;测井曲线岩电关系和微量元素地球化学均表现为不同类型的突变特征。

(2) 不同层序界面具有不同时空属性。其中,I型层序界面TSB1至TSB3主要为区域性不整合面,整体反映了三叠世末印支运动至燕山构造运动在盆地中的远程效应;II型层序界面主要反映了层序地层单元形成过程中古气候因素引起的旋回变化,其中,延安组中SB1至SB4界面反映了延安期旋回性温暖潮湿的湖泊三角洲沉积环境,直罗组中的SB5和SB6界面反映了中侏罗世中晚期古气候变迁过程。

(3) 鄂尔多斯盆地侏罗系沉积序列及微量元素地球化学显示,自早—中侏罗世延安期至中侏罗世直罗期,古气候经历了温暖潮湿到干湿交替再到干旱—半干旱的转变过程。中侏罗世晚期古气候环境发生突变,直罗组底部TSB2界面及直罗组上段“红层”底部SB6界面为古气候突变的关键界面。此次古气候突变事件很可能与冀北—辽西地区燕辽生物群大规模灭绝同为燕山运动引发的地质环境巨变所致。

(4) 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系延安组至直罗组地层显示明显的“垂相分带”:下部灰色—灰黑色含煤细碎屑岩系—中部灰色—灰绿色粗碎屑岩系—上部红色细碎屑岩系,而TSB2、SB5和SB6为垂相分带的主要界面,铀矿层主要呈板状赋存于TSB2界面之上的“泛连通厚”辫状河道砂体中。该地区砂岩型铀矿大规模成矿作用明显受侏罗系垂相分带结构和古气候环境变迁因素的共同制约。

## References

- Cao Ke, Li Xianghui, Wang Chenshan, Wang Licheng, Wang Pingkang. 2010. Clay minerals of the Middle Jurassic—Lower Cretaceous in the Guangyuan area, Northern Sichuan: Implications to paleoclimate[J]. *Journal of Mineral and Petrology*,30(1): 41–46(in Chinese with English abstract).
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the south—western United States[J]. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta, 59: 2919–2940.
- Chen Yin, Feng Xiaoxi, Chen Lulu, Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Miao Aisheng, Tang Chao, Wang Gui, Liu Zhongren. 2017. An analysis of U–Pb dating of detrital zircons and modes of occurrence of uranium minerals in the Zhiluo Formation of northeastern Ordos Basin and their indication to uranium sources[J]. *Geology in China*, 44(6): 1190–1206(in Chinese with English abstract).
- Deng Hongwen, Qian Kai. 1993. *Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis*[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1–154(in Chinese).
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, Yang Zhenyu, Ji Qiang, Wang Tao, Hu Jianmin, Chen Xuanhua. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449–1461(in Chinese with English abstract).
- Feng Xiaoxi, Teng Xueming, He Youyu. 2019. Study on land subsidence assessment in evaluation of carrying capacity of geological environment[J]. *Geological Survey and Research*, 42(2): 96–103 (in Chinese with English abstract).
- Huang Gang, Zhou Xiqiang, Wang Zhengquan. 2009. Provenance analysis of the Yanan Formation in Mid–Jurassic at the Southeast area of Ordos Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(3): 252–258.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111(1/4): 111–129.
- Ji Qiang, Chen Wen, Wang Wuli, Jin Xiaochi, Zhang Jianping, Liu Yongqing, Zhang Hong, Yao Peiyi, Ji Shu'an, Yuan Chongxi, Zhang Yan, You Hailu. 2004. *Mesozoic Jehol Biota of Western Liaoxi, China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–357 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Chen Anping, Wang Minfang, Wu Liqun, Yuan Haitao, Yang Qin, Zhang Chengze, Xu Zhicheng. 2005. Genetic Analysis of the Bottom Sandstone of Zhiluo Formation, Northeastern Ordos Basin– Predictive base of spatial orientation of sandstone– type uranium deposit[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 371–379 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Peng Yunbiao, Rong Hui, Ji Dongmin, Miao Aisheng, Li Hongliang. 2015. Sedimentary– tectonic setting of the deposition– type uranium deposits forming in the Paleo–Asian tectonic domain, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 189–205 (in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Yang Jun, Ao Cong, Li Jianguo, Li Yanfeng, Zhou Xiaoxi. 2016. Classification and correlation of Jurassic uranium bearing series in the Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3293–3309 (in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yangfeng, Zhang Tianfu. 2017. Late Mesozoic continental basin “Red and Black beds” coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China[J]. *Geology in China*, 44(2): 205–223(in Chinese with English abstract).
- Lerman, A. 1978. *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*[M]. Berlin: Springer–Verlag, 79–83.
- Liang Bin, Wang Quanwei, Kan Zezhong. 2006. Geochemistry of early Jurassic mudrocks from Ziliujing Formation and implications for source–area and weathering in dinosaur fossils site in Gongxiang, Sichuan Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(3): 94–99(in Chinese with English abstract).
- Li Sitian, Cheng Shoutian, Yang Shigong, Huang Qisheng, Xie Xinong, Jiao Yangquan, Lu Zongsheng, Zhao Genrong. 1990. *Sequence Stratigraphy and Depositional System Analysis of the Northeastern Ordos Basin*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–194 (in Chinese).
- Li S T, Yang S G, Tomasz J. 1995. Upper Triassic–Jurassic foreland sequences of the Ordos Basin in China stratigraphic, evolution of foreland basins[J]. *SEPM Special Publication*, 52: 233–241.
- Li Zhenghong, Dong Shuwen, Feng Shengbin, Qu Hongjie. 2015. Sedimentary response to Middle–Late Jurassic tectonic events in the Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(1): 22–30(in Chinese with English abstract).
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, Yue Leping, Zhao Junfeng, Wang Jianqiang. 2006. Space–time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617–638(in Chinese with English abstract).
- Liu Gang, Zhou Dongsheng. 2007. Application of micro elements analysis in identifying sedimentary environment[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 29(3): 307–314(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhengbang, Jiao Yangquan, Xue Chunji, Miao Aisheng, Gu hao, Wu Yaping, Rong Hui, Ding Ye. 2013. The correlation between sandstone uranium ore–body and coal bed in Jurassic System, Dongsheng, Inner Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 146–153(in Chinese with English abstract).
- Mitchum R M. 1977. *Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 1: Glossary of terms used seismic stratigraphy*[C]//Payton C E(eds.). *Seismic Stratigraphy– Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir, 26: 205–212.
- Nameroff T J, Calvert S E, Murray J W. 2004. Glacial– interglacial variability in the eastern tropical North Pacific oxygen minimum zone recorded by redox– sensitive trace metals[J]. *Paleoceanography* 19, PA1010. doi:10. 1029/2003PA000912.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299: 715–717.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliam M, Ireland T,

- Dong S W, Calvert A, Chateigner D, Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tanlu fault[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105: 13303–13338.
- Shao Hongshun, Huang Difan. 1965. Some preliminary data of the salt content of the Paleo-lakes in the Dzungar and Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 45(3): 337–347(in Chinese with English abstract).
- Sun Lixin, Zhang Yun, Zhang Tianfu, Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Ma Hailin, Lu Chao, Yang Cai, Guo Jiacheng, Guo Genwan, Zhou Xiaoguang. 2017. Jurassic sporopollen of Yanan Formation and Zhiluo Formation and its paleoclimatic significance in the northeast Ordos basin, Inner Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 32–51 (in Chinese with English abstract).
- Tan Xianfeng, Jiang Yanxia, Tian Jingchun, Zou Guoliang, Li Hang, Wang Weiqing. 2014. Sequence interface characteristics and spatial and temporal properties of Kongdian Formation of Paleogene in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(2): 136–143(in Chinese with English abstract).
- Tribouillard N, Averbuch O, Devleeschouwer X, Racki G, Riboulleau A. 2004. Deep-water anoxia over the Frasnian–Famennian boundary (La Serre, France): A tectonically-induced oceanic anoxic event?[J]. *Terra Nova*, 16: 288–295.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chem. Geol.*, 232: 12–32.
- Vail P R, Audemard F, Bowman S A. 1991. The stratigraphic signature of tectonics, eustasy and sedimentation—An overview[C]//Einsle G, et al. (eds.). *Cycles and Events in Stratigraphy*[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 617–659.
- van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M. 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and Key definitions. In C K Wilgus, B S Hastings, G G St C Kendall, H W Posamentier, C A Ross, J C Van Wagoner, eds. *Sea level changes: an integrated approach*[J]. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42: 39–45.
- van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M. 1990. Siliciclastic sequences stratigraphy in well logs, cores and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies[J]. *AAPG Methods in Exploration Series*, 7: 1–57.
- Wang Qingchen. 2009. Topographic evolution and lithosphere dynamics in Central Asia since Mesozoic[J]. *Chinese Journal of Geology*, 44(3):791–810(in Chinese with English abstract).
- Wang Longjun, Lei Huawei, Zhou Shenglun. 2019. Analysis on the main controlling factors of Y-9 reservoir in Jingbian oilfield[J]. *Geology and resources*, 28(4):372–377 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang, Liu Hanbin, Lin Jinrong, Fan Guang, Hou Yanxian. 2003. Research on geochronology and uranium source of sandstone-hosted uranium ore-formation in major uranium productive basins, Northern China[J]. *Uranium Geology*, 19(3):129–136. (in Chinese with English abstract).
- Yang Junjie, Pei Xigu. 1996. *Naturalgas Geology in China*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press:3–20 (in Chinese).
- Yu Jian, Zhang Yan, Zhao Huitao, Hou Xiao, Hou Yingdong, Luo Shunshu. 2019. Characteristics and evaluation of C-10 reservoir in Zhijiang-Ansai area, Ordos basin[J]. *Geology and resources*, 28(4): 364–371 (in Chinese with English abstract).
- Yu Reng'an, Sima Xianzhang, Jin Ruoshi, Miao Peisen, Peng Shenglong. 2019. The new discovery of the Large-scale uranium deposit in the Northeast Ordos Basin[J]. *Geology in China*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191226.1700.014.html> (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kang. 1989. *Tectonics and Resources of Ordos Fault Block*[M]. Xian: Shanxi Science and Technology Press, 1–94(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Li Chengdong. 2008. Eastern China Plateau during the Late Mesozoic: evidence, problems and implication[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(9):1404–1430(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun, Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Ma Haili, Lu Chao, Yang Cai, Guo Genwan. 2016. Geochemical characteristics and paleoenvironmental implications of Jurassic Yan, an & Zhiluo Formation, northern margin of Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12):3454–3472 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Zhang Yun, Cheng Yinhang, Miao Peisen, Ao Cong, Jin Ruoshi, Duan Lianfeng, Duan Xiaolong. 2019. Integrated identification of sequence boundary through outcrop, seismic, logging and geochemistry: A case of Jurassic, the northeastern margin of Ordos basin[J]. *COAL Geology & Exploration*, 47(1): 40–48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Zhang Yun, Miao Peisen, Yu Reng'an, Li Jianguo, Jin Ruoshi. 2018. Study on the chemical index of alteration of the Middle and Late Jurassic Strata in the western margin of Ordos basin and its implications[J]. *Geological Survey and Research*, 41(4):258–279 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. 2006. Transition of the Late Mesozoic–Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin[J]. *Geology in China*, 33(1): 28–40(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, Zhang Tian, Guo Fangfang. 2007. On the Jurassic tectonics in and around the Ordos basin, north China[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(2):186–196(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yun, Sun Lixin, Zhang Tianfu, Ma Haili, Lu Chao, Li Yanfeng, Cheng Yinhang, Yang Cai, Guo Jiacheng, Zhou Xiaoguang. 2016. The study on sequence stratigraphy of coal-uranium bearing

measures and occurrence regularity of coal-uranium in northeastern Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*,90(12): 3424-3440(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 曹珂,李祥辉,王成善,王立成,王平康. 2010. 四川广元地区中侏罗世—早白垩世黏土矿物与古气候[J]. *矿物岩石*,30(1): 41-46.
- 陈印,冯晓曦,陈路路,金若时,苗培森,司马献章,苗爱生,汤超,王贵,刘忠仁. 2017. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组内碎屑锆石和铀矿物赋存形式简析及其对铀源的指示[J]. *中国地质*,44(6): 1190-1206.
- 邓宏文,钱凯. 1993. 沉积地球化学与环境分析[M]. 甘肃:甘肃科学技术出版社,1-154.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,杨振宇,季强,王涛,胡建民,陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*,81(11): 1449-1461.
- 冯晓曦,滕雪明,何友宇. 2019. 初步探讨鄂尔多斯盆地东胜铀矿田成矿作用研究若干问题[J]. *地质调查与研究*,42(2):96-103.
- 黄岗,周锡强,王正权. 2009. 鄂尔多斯盆地东南部中侏罗统延安组物源分析[J]. *矿物岩石地球化学通报*,28(3): 252-258.
- 季强,陈文,王五力,金小赤,张建平,柳永清,张宏,姚培毅,姬书安,袁崇喜,张彦,尤海鲁. 2004. 中国辽西中生代热河生物群[M]. 北京:地质出版社,1-357.
- 焦养泉,陈安平,王敏芳,吴立群,原海涛,扬琴,张承泽,徐志成. 2005. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析——砂岩型铀矿床预测的空间定位基础[J]. *沉积学报*,23(3): 371-379.
- 焦养泉,吴立群,彭云彪,荣辉,季东民,苗爱生,里宏亮. 2015. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J]. *地学前缘*,22(1): 189-205.
- 金若时,程银行,杨君,奥琮,李建国,李艳锋,周小希. 2016. 准噶尔盆地侏罗纪含铀岩系的层序划分与对比[J]. *地质学报*,90(12): 3293-3309.
- 金若时,程银行,李建国,司马献章,苗培森,王少铁,奥琮,里宏亮,李艳锋,张天福. 2017. 中国北方晚中生代陆相盆地红-黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. *中国地质*,44(2): 205-223.
- 梁斌,王全伟,阚泽忠. 2006. 珙县恐龙化石埋藏地自流井组泥质岩地球化学特征及其对物源区和古风化作用的指示[J]. *矿物岩石*,26(3): 94-99.
- 李思田,程守田,杨士恭,黄其胜,解习农,焦养泉,卢宗盛,赵根榕. 1990. 鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系[M]. 北京:地质出版社,1-194.
- 李振宏,董树文,冯胜斌,渠洪杰. 2015. 鄂尔多斯盆地中—晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. *地球学报*,36(1): 22-30.
- 刘池洋,赵红格,桂小军,岳乐平,赵俊峰,王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化——改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*,80(5): 617-638.
- 刘刚,周东升. 2007. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用[J]. *石油实验地质*,29(3): 307-314.
- 刘正邦,焦养泉,薛春纪,苗爱生,顾浩,吴亚平,荣辉,丁叶. 2013. 内蒙古东胜地区侏罗系砂岩型铀矿体与煤层某些关联性[J]. *地学前缘*,20(1): 146-153.
- 邵宏舜,黄第藩. 1965. 对准噶尔与鄂尔多斯盆地古湖含盐量的初步认识[J]. *地质学报*,45(3): 337-347.
- 孙立新,张云,张天福,程银行,李艳峰,马海林,杨才,郭佳成,鲁超,周晓光. 2017. 鄂尔多斯北部侏罗纪延安组、直罗组孢粉化石及其古气候地质意义[J]. *地学前缘*,24(1): 32-51.
- 谭先锋,蒋艳霞,田景春,邹国亮,李航,王伟庆. 2015. 济阳拗陷古近系孔店组层序界面特征及时空属性[J]. *石油实验地质*,36(2): 136-143.
- 王清晨. 2009. 中亚地区中生代以来的地貌巨变与岩石圈动力学[J]. *地质科学*,44(3): 791-810.
- 王龙军,雷华伟,周升沧. 2019. 鄂尔多斯盆地靖边油田东坑大阳湾区延9油藏主控因素分析[J]. *地质与资源*,28(4): 372-377.
- 夏毓亮,刘汉彬,林锦荣,范光,侯艳先. 2003. 中国北方主要产铀盆地砂岩铀矿成矿年代学及成矿铀源研究[J]. *铀矿地质*,19(3): 129-136.
- 俞初安,司马献章,金若时,苗培森,彭胜龙. 2019. 鄂尔多斯盆地东北缘发现大型砂岩型铀矿床[J]. *中国地质*,<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191226.1700.014.html>.
- 喻建,张严,赵会涛,杨孝,侯英东,罗顺社. 2019. 鄂尔多斯盆地靖一安塞地区延长组长10储层特征及评价[J]. *地质与资源*,28(4):364-371.
- 杨俊杰,裴锡古. 中国天然气地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1996:3-20.
- 张抗. 1989. 鄂尔多斯断块构造和资源[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1-94.
- 张旗,王元龙,金惟俊,李承东. 2008. 晚中生代的中国东部高原:证据、问题和启示[J]. *地质通报*,27(9): 1404-1428.
- 张天福,孙立新,张云,程银行,李艳峰,马海林,鲁超,杨才,郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量元素、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J]. *地质学报*,90(12): 3454-3472.
- 张天福,张云,程银行,苗培森,奥琮,金若时,段连峰,段宵龙. 2019. 利用露头、井震及地球化学综合厘定层序界面——以鄂尔多斯盆地北缘侏罗系为例[J]. *煤田地质与勘探*,47(1): 40-48.
- 张天福,张云,苗培森,俞初安,李建国,金若时,孙立新. 2018. 鄂尔多斯盆地西缘中晚侏罗世地层化学蚀变指数(CIA)研究及其意义[J]. *地质调查与研究*,41(04):258-279.
- 张岳桥,廖昌珍. 2006. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. *中国地质*,33(1): 28-40.
- 张岳桥,廖昌珍,施炜,张田,郭芳芳. 2007. 论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形[J]. *地学前缘*,14(2): 186-96.
- 张云,孙立新,张天福,马海林,鲁超,李艳峰,程银行,杨才,郭佳城,周晓光. 2016. 鄂尔多斯盆地东北缘煤岩系层序地层与煤铀赋存规律研究[J]. *地质学报*,90(12): 3424-3440.