

中国北方侏罗系烧变岩露头区 白色砂岩特征与成因分析*

董 燕¹ 王美玲² 陈 彬³ 时志强¹

1 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059

2 中国石化胜利油田孤岛采油厂, 山东东营 257000

3 聊城大学地理与环境学院, 山东聊城 252000

摘 要 中国北方烧变岩广泛发育, 常见侏罗系煤层于中生代、新生代自然形成的烧变岩。在烧变岩露头区, 白色砂岩常与红色烘烤岩伴生, 但国内外对其关注不够, 成因不明。本次研究对伊犁、准噶尔、吐哈、鄂尔多斯等盆地周缘烧变岩区野外露头进行了观察, 采集白色砂岩样品进行薄片鉴定、扫描电镜及能谱等测试与分析, 对白色砂岩岩石学、矿物学特征进行观察和描述, 认为中国北方侏罗系白色砂岩常分布在烧变岩的上覆、下伏或侧边位置, 颜色多以灰白为主, 结构疏松, 孔隙发育, 碎屑颗粒以石英、长石矿物为主, 填隙物主要为高岭石, 发育特殊的流体流动所致的孔洞构造; 据其与烧变岩的空间相关性, 推测白色砂岩的形成与煤层自燃有密切联系, 煤层自燃导致高岭石大量生成、有色金属矿物或金属离子含量变化, 这是砂岩呈现白色的主要诱因, 因此烧变岩区所见白色砂岩为特殊类型的低温烘烤岩, 其形成模式有 3 种: 河谷下切型、裂隙下切型和山丘下渗型。

关键词 烧变岩 白色砂岩 沉积盆地 侏罗系煤层 中国北方

第一作者简介 董燕, 女, 1998 年生, 成都理工大学博士研究生, 地质学专业。E-mail: 2104165595@qq.com。

通讯作者简介 时志强, 男, 1972 年生, 成都理工大学教授, 主要从事沉积学相关研究工作。E-mail: szqcdut@163.com。

中图分类号: P581 文献标志码: A

Characteristic and formation cause of white sandstones in the Jurassic outcrop area of burnt rocks in northern China

DONG Yan¹ WANG Meiling² CHEN Bin³ SHI Zhiqiang¹

1 Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 Gudao Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company of Sinopec, Shandong Dongying 257000, China

3 School of Geography and Environment, Liaocheng University, Shandong Liaocheng 252000, China

Abstract Burnt rocks are widely distributed across northern China, often formed by the spontaneous combustion of Jurassic coal beds during the Mesozoic and Cenozoic. White sandstones are commonly accompanied with the red burnt rocks caused by the spontaneous combustion of Jurassic coals in these areas. These white sandstones have received little attention, and their formation remains poorly understood. In

* 国家自然科学基金 (编号: 42201006) 资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42201006)]

收稿日期: 2023-11-07 改回日期: 2024-05-29

this study, the white sandstones accompanied with burnt rocks are observed at the Jurassic outcrops in the margins of Yili, Junggar, Tuha and Ordos Basins. White sandstone samples were collected and analyzed through thin section identification, scanning electron microscopy (SEM), and energy spectrum analysis to examine their petrological and mineralogical characteristics. The results show that the white sandstones in the Jurassic coal-bearing sequence are distributed at the top, bottom or alongside of burnt rocks, with light-grey white color, loose structure, and well-developed porosity. The clastic grains are mainly quartz and feldspar minerals, and the interstitial material is mainly kaolinite. Unique pore structures caused by fluid movement are also observed. According to the spatial correlation with burnt rocks, we propose that the cause of these white sandstones is closely related to the spontaneous combustion of Jurassic coals. The massive production of kaolinite, removal of nonferrous metals and vanishment of organic matter are likely caused by coal combustion process, which result in the formation of white sandstones. Thus, these white sandstones represent a special type of low-temperature baked rock. Three genetic models are proposed for the formation of these white sandstones: (A) valley incision type, (B) fissure incision type and (C) hill infiltration type.

Key words burnt rock, white sandstone, sedimentary basin, Jurassic coal, northern China

About the first author DONG Yan, born in 1998, is a doctor degree candidate. She is mainly engaged in geology. E-mail: 2104165595@qq.com.

About the corresponding author SHI Zhiqiang, born in 1972, is a professor in Chengdu University of Technology. He is mainly engaged in sedimentology. E-mail: szqcudut@163.com.

在中国北方侏罗系露头区, 地质历史时期煤层自燃所致的烧变岩极为常见, 广泛分布在伊犁、准噶尔、吐哈、塔里木、鄂尔多斯等多个盆地边缘(时志强等, 2021)。在烧变岩区常见有白色砂岩伴生, 其在外观上由于颜色纯白而非常醒目, 常分布于红色烧变岩附近, 结构疏松, 孔隙发育, 固结较差。尽管该类白色砂岩分布广泛, 但前人对其研究较少, 对其特征、成因、分布及研究意义所知甚少。白色砂岩(或称为漂白砂岩)在国内外多个沉积盆地发育(Chan *et al.*, 2000; Beitler *et al.*, 2003; 吴柏林, 2005; 马艳萍等, 2006, 2007a, 2007b), 通常高岭石填隙物含量较高, 可作为良好的油气储集层(季汉成等, 2008), 关于其成因解释较为多样, 如 Gorenc 和 Chan (2015) 认为红层砂岩被漂白是其中的赤铁矿颗粒包壳在中晚期成岩过程中经还原作用使赤铁矿中的 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} , 并被溶解和转移所形成; Parry 等 (2009) 及 Garden 等 (2001) 认为这可能是由于烃类或烃类气体沿着断层或砂岩孔隙向上运移进而将红层砂岩漂白。在烧变岩区发育的白色砂岩, 有观点认为其为低温烘烤岩(时志强等, 2016; 陈彬, 2021)。研究该类白色砂岩的特征及成因, 对深入

了解煤层自燃过程及其对围岩的影响有理论意义; 此外, 白色砂岩极有可能是特殊的自然条件背景下的产物, 蕴含着煤层自燃时期古气候、古地貌等地质信息; 再者, 该白色砂岩有一定矿产意义, 在鄂尔多斯盆地东北部高头窑地区, 古代边民用其筛选高岭石以制作陶器, 目前也有当地居民用之获得河沙作为建筑材料。鉴于其疏松多孔、固结程度低的特点, 在煤田开发过程中应该注意其高渗透性导致的透水事故。

1 地质背景

1.1 构造背景

中国北方多个中生代和新生代沉积盆地大体位于中亚造山带及其周缘, 受西伯利亚板块、塔里木板块和中朝板块相互作用影响, 经历了较为一致的构造-沉积演化过程(吴兆剑等, 2020): 整体以挤压背景为主, 均经历了中生代挤压或弱伸展环境及新生代的构造抬升(吴兆剑等, 2020), 普遍沉积了侏罗系陆相含煤碎屑岩层系。在新疆地区, 伊犁盆地和准噶尔盆地在早一中侏罗世处于弱伸展构造背景(陈发景等, 2005; 何登发等, 2018), 经

历了拗陷阶段后为挤压抬升演化阶段（晚侏罗世—早白垩世）（张永霖，1983）；而吐哈盆地侏罗系煤层则沉积在断陷阶段（李新宁等，2015）。在中国北方，作为位于克拉通基底上的多旋回盆地（刘池洋等，2006；孙建博等，2006），鄂尔多斯盆地基底较稳定，盆内受构造影响相对较小（杨华等，2015），经历了早三叠世—早白垩世的盆地发育阶段和晚白垩世—第四纪的盆地改造阶段（刘池洋等，2006；吴兆剑等，2020）。

1.2 侏罗系煤系地层

中国北方的多个沉积盆地含侏罗系煤层。在伊犁、吐哈和准噶尔等盆地，赋煤层位主要为中侏罗统西山窑组（ J_2x ），其次为八道湾组（ J_1b ）和三工河组（ J_{1-2s} ）（黄以，2002；权志高等，2011；吴亚平，2014；闫晶晶等，2022）；煤层沉积于陆地沼泽环境（鲁静等，2014），在盆地边缘常有露天煤矿被开采。在鄂尔多斯盆地，下侏罗统延安组（ J_1y ）为主要的煤系地层（张雪丽，2016），其次为中侏罗统直罗组（ J_2z ）下部层位。延安组主要沉积于曲流河环境（李凤杰等，2003）或曲流河三角洲平原环境（时志强等，2000），聚煤作用强烈（苗培森等，2017；韩效忠等，2018；焦养泉等，2018）；直罗组主要沉积于河流—湖泊环境（吴仁贵等，2002），可见 5~6 套煤层，主要分布在鄂尔多斯盆地东缘（金若时等，2017）。

1.3 烧变岩

烧变岩是煤层自燃产生的高温对围岩烘烤变质的产物（Heffern and Coates，2004）。在中国北方，侏罗系煤层变质程度较低，抗风化能力差，加之其丝炭组分多、含氢量低、没有粘结性、疏松多孔、吸氧性强等特点，造成煤层本身易于氧化自燃（王庆全，1982）。煤层自燃可引起上覆地层塌陷，在地面形成裂隙，这些裂隙、孔隙为深部煤层的进一步自燃提供了氧气通道，从而使煤层自燃逐步向深部推进（韩德馨和孙俊民，1998）。煤层燃烧时，围岩在热力作用下经烘烤、瓷化、熔融、冷凝，形成烧变岩（韩德馨和孙俊民，1998）。中国北方发育在侏罗系中的烧变岩分布广泛（时志强等，2021），主要分布于沉积盆地边缘（或为造山带前缘），在准噶尔盆地东部及鄂尔多斯盆地东北部见有大面积连片分布（图 1）。

2 研究方法及材料

本研究在伊犁、准噶尔、吐哈、鄂尔多斯等沉积盆地周缘侏罗系煤层自燃后形成的烧变岩分布区采集了共 79 个白色砂岩新鲜样品，样品采集剖面见图 1。在野外依据侏罗系煤系沉积岩中鲜艳的颜色、特殊的结构以及 X 衍射显示的典型矿物（陈彬，2021；时志强等，2021）识别烧变岩，白色砂岩常与红色烧变岩共生（图 2；图 3）。

显微薄片制片在成都理工大学完成，厚 0.03 mm，其在偏光显微镜下的观察与照相在成都理工大学沉积地质研究院沉积地质实验室完成，仪器型号为 NikonLV100POL。扫描电镜及能谱测试在成都理工大学油气储层地质与开发工程国家重点实验室完成，利用仪器型号为 Quanta FEG 250 的场发射环境扫描电子显微镜及能谱仪系统对样品进行检测。通过可伸缩的固态背散射电子探测器捕获图像。FESEM-EDS 的工作距离为 10 mm，波束电压为 20.0 kV，孔径为 6 μm ，光斑直径为 4.5~5.5 μm 。

3 白色砂岩特征

3.1 位置及空间分布

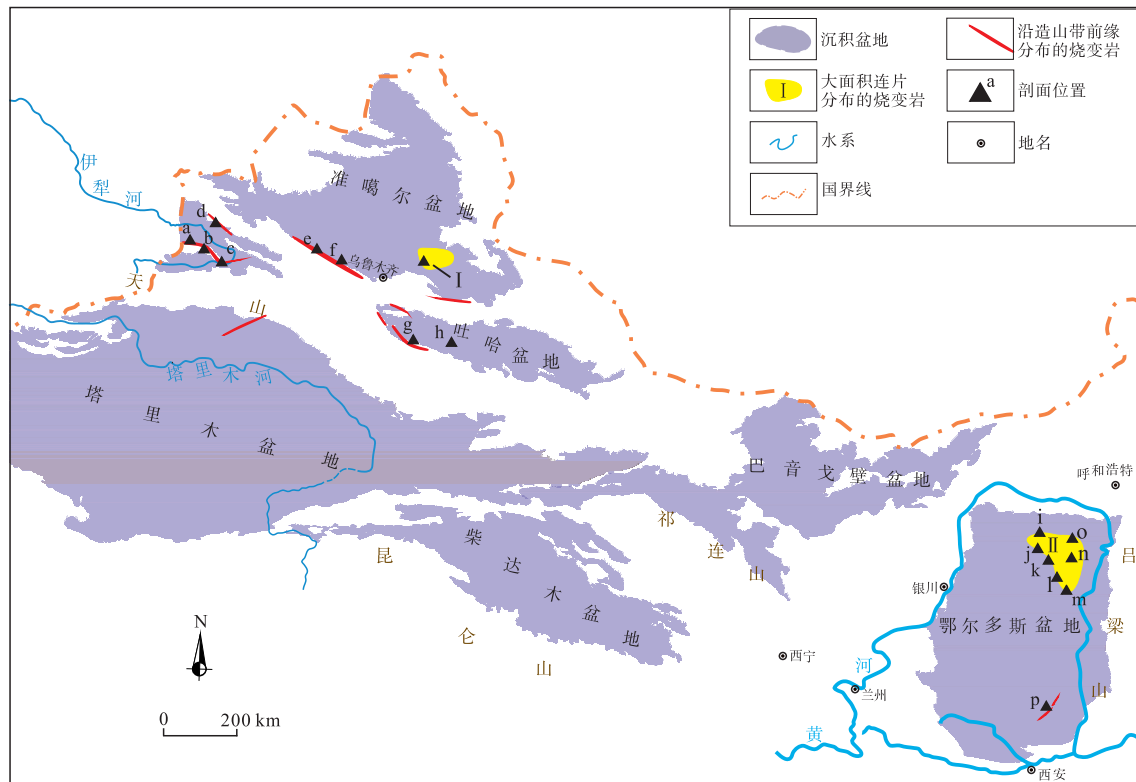
中国北方各沉积盆地侏罗系煤层出露地区，常见烧变岩及与之伴生的白色砂岩，其分布范围广泛，从东向西见于鄂尔多斯、吐哈、准噶尔及伊犁等盆地，横跨约 60° 经度范围。有烧变岩产出的区域一般均有白色砂岩相伴产出（图 2；图 3），二者在空间位置上的关系有以下 3 种：

1) 白色砂岩产于烧变岩之上（图 2-F，2-I），这类白色砂岩常常分布面积大，厚度大；

2) 白色砂岩伏于烧变岩之下（图 2-D；图 3-A，3-C，3-E，3-H），烧变岩常厚度较大，热变质作用强，常见烧熔岩覆盖于白色砂岩之上；

3) 白色砂岩见于烧变岩侧边（图 2-A，2-B，2-C，2-E；3-F，3-G，3-H），伴生的烧变岩常为红色烧熔岩，常见沿裂隙发育的红色烧变岩旁发育白色砂岩（图 2-A，2-B，2-C，2-F；图 3-E，3-F，3-G），亦见未发育裂隙者（图 2-E）。

在第 1 种情况（白色砂岩覆盖烧变岩）和第 3 种情况（白色砂岩位于烧变岩侧边），出现（高温）烧熔岩（位于煤层燃烧中心区）、烧熔岩向白色砂岩的渐变，显示随着燃烧变质作用的逐渐减



I—准噶尔盆地东缘火烧山地区；II—鄂尔多斯东北部地区。伊犁盆地：a—察布查尔乌库尔奇剖面，b—察布查尔蒙奇古尔剖面，c—巩留苏阿苏沟剖面，d—伊宁苏拉宫剖面；准噶尔盆地：e—昌吉硫磺沟剖面，f—阜康五工梁剖面；吐哈盆地：g—高昌十红滩剖面，h—鄯善火焰山剖面；鄂尔多斯盆地：i—达拉特旗呼斯梁剖面，j—达拉特旗高头窑剖面，k—东胜神山沟剖面，l—神木白流兔剖面，m—榆林荒草界剖面，n—神木刘家沟剖面，o—准格尔旗哈拉沟剖面，p—耀州崔家沟剖面。底图源于自然资源部标准地图服务系统，审图号GS(2016)1609

图 1 中国北方侏罗系露头区烧变岩分布图

Fig. 1 Distribution of outcropped burnt rocks of the Jurassic in northern China

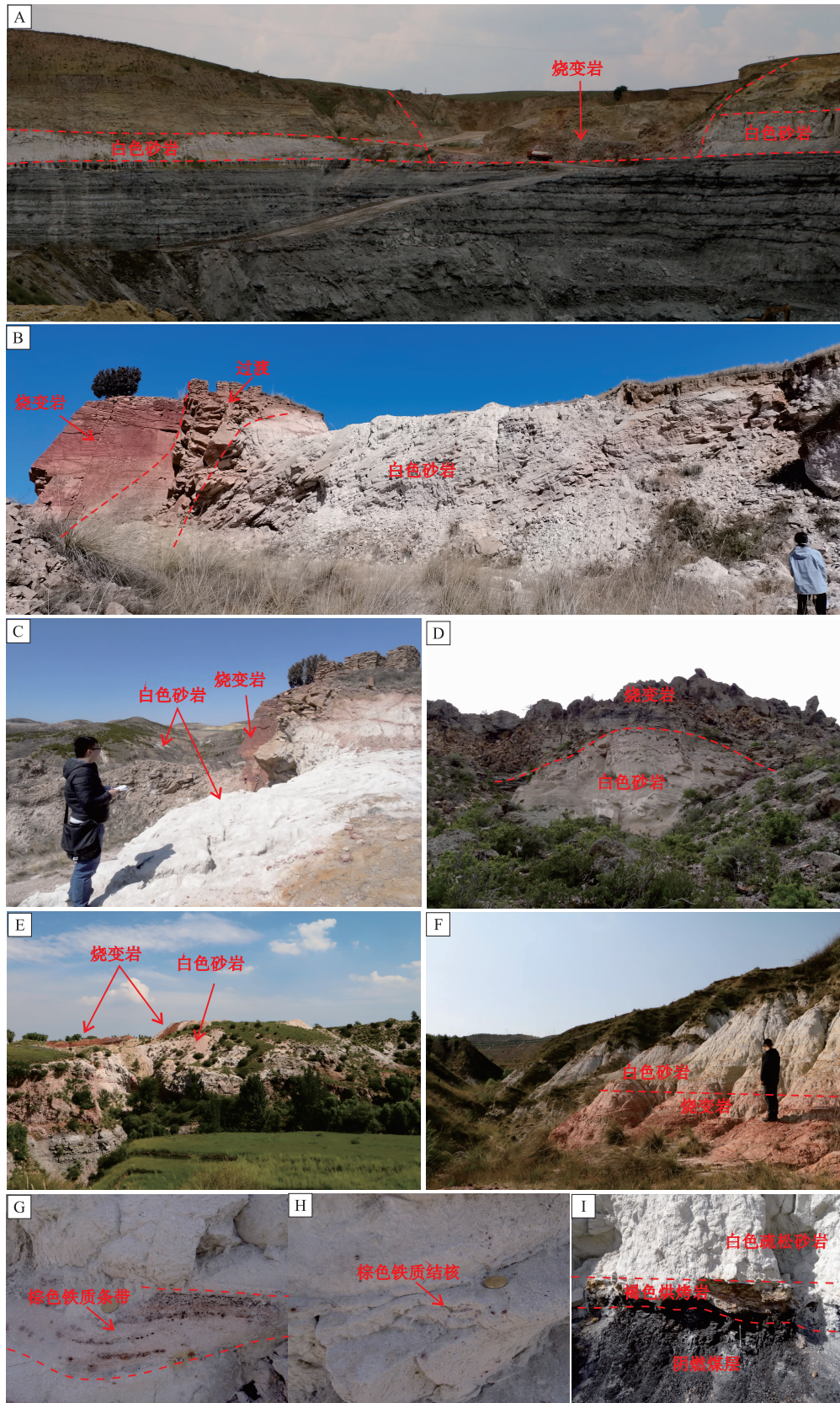
弱，砂岩颜色由红色变为白色。

3.2 宏观岩石学特征

研究区白色砂岩颜色多呈浅灰白色，部分呈浅褐白色，在鄂尔多斯盆地北部延安组顶部呈纯白色。宏观呈褐白色的砂岩中见褐铁矿条带或结核(图 2-G, 2-H)，部分呈现星点状顺层分布，此类白色砂岩常与紫、红色烧变岩过渡接触。白色砂岩一般为中—厚层状，横向延伸十余米到数百米，在鄂尔多斯盆地东北部的延安组顶部亦见大面积分布者；具中、细粒砂状结构，亦见粉砂岩，偶见(含砾)粗砂岩，普遍具疏松多孔、高渗透的性质；与伴生的紫色、红色烧变岩相比，白色砂岩固结程度相对较低，结构疏松，易破碎(图 2-I)。在白色砂岩内部偶见有机物演化而形成的黑色物质，推测为植物茎干化石。

3.3 微观特征

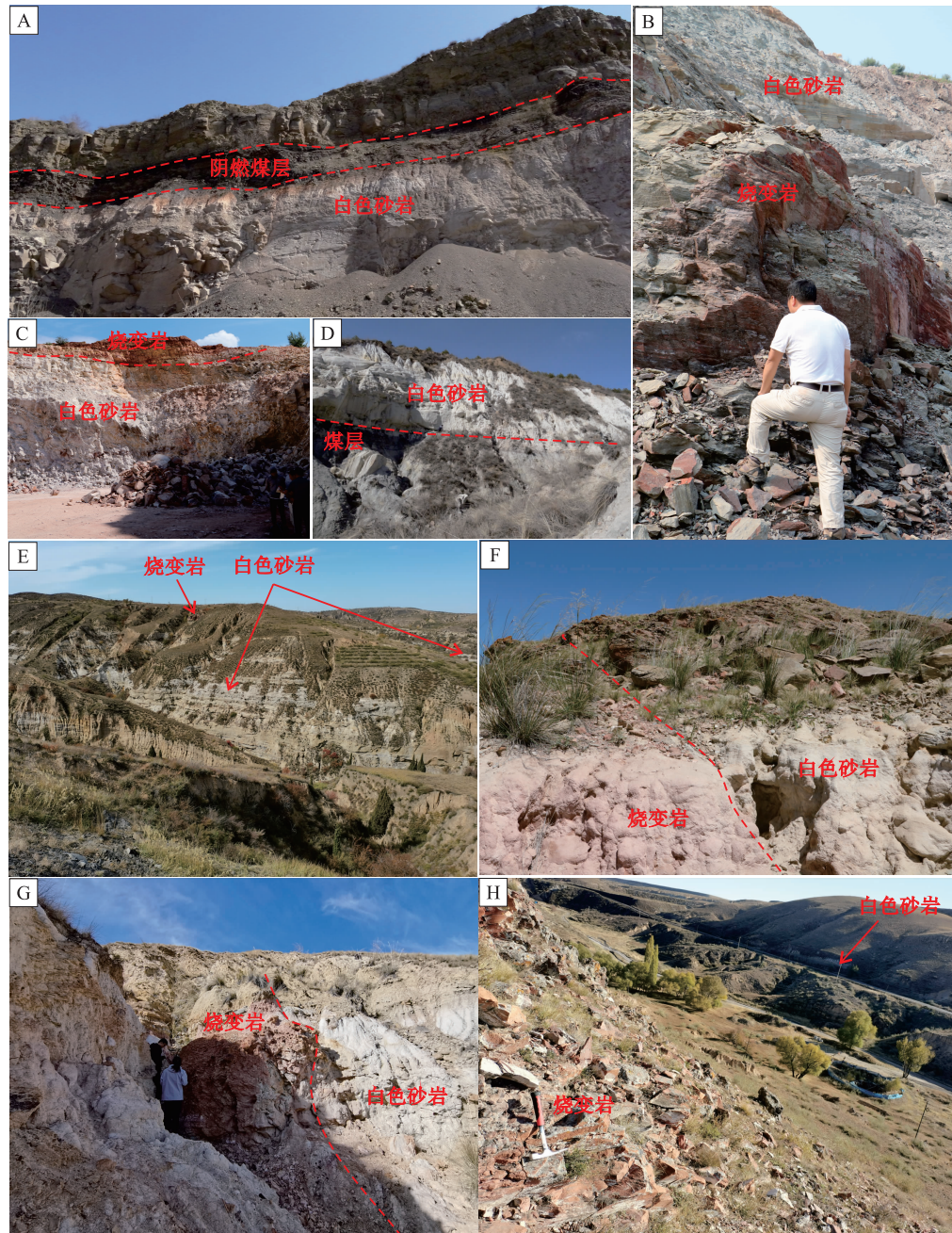
在显微薄片及扫描电镜下可见白色砂岩多具有细粒到中粒砂状结构，颗粒以次棱角状为主(图 4)，分选中等—良好。各碎屑成分含量差异较大，其中石英含量一般为 50%~75%(图 4-A, 4-B, 4-H, 4-I)，部分大于 80%(图 4-G)，个别样品中石英碎裂严重(图 4-I)；长石含量为 5%~25%(图 4-E, 4-F)，以微斜长石为主，见较多的长石被溶解和高岭石化，长石中常见粒内溶孔(图 5-A, 5-B)；岩屑含量为 5%~25%，见较多的变质岩岩屑(图 4-F)；另见含量较少的黑云母、白云母、锆石、金红石等轻、重矿物颗粒。各盆地、各地区碎屑成分类型及含量差异性明显，显示着白色砂岩受控于物源区的显著影响。填隙物主要为高岭石(图 5)，个别样品见较多的铁质胶结物(图 4-D, 4-J, 4-K)和方解石胶结(图 4-L)，偶见以次生加大边存在的



A—鄂尔多斯盆地东北部神山沟煤矿，白色砂岩位于煤层上部，烧变岩的两侧；B—鄂尔多斯盆地东北部神山沟，白色砂岩位于红色烧变岩侧边，烧变岩与白色砂岩之间发育裂隙，二者颜色呈渐变关系；C—图 B 的上部观察照片，可见远处白色砂岩露头区分布比较广泛；D—伊犁盆地南缘苏阿苏沟，白色砂岩位于烧变岩下部；E—鄂尔多斯盆地东北部白流兔，白色砂岩大面积分布，在白色砂岩侧边见有烧变岩出现；F—鄂尔多斯盆地东北部神山沟剖面，白色砂岩位于红色烧变岩侧边，见裂隙发育；G—东胜神山沟剖面，白色砂岩中见棕色铁质条带；H—东胜神山沟剖面，白色砂岩中见棕色铁质结核；I—东胜神山沟剖面，阴燃煤层之上见褐色烘烤岩和白色疏松砂岩（易风化）

图 2 中国北方沉积盆地侏罗系白色砂岩野外特征

Fig. 2 Outcrop characteristics of the Jurassic white sandstones in sedimentary basins of northern China



A—神木刘家沟剖面，白色砂岩位于煤层的下侧；B—耀州崔家沟剖面，白色砂岩位于烧变岩的周边；C—神木白柳兔剖面，白色砂岩位于烧变岩下部；D—东胜神山沟剖面，白色砂岩位于煤层上部；E—准格尔旗哈拉沟剖面，白色砂岩大面积分布，未见烧变岩零星分布；F—达拉特旗高头窑北剖面，白色砂岩位于烧变岩的侧翼；G—达拉特旗呼斯梁剖面，烧变岩在裂隙两侧发育，而在烧变岩的侧翼白色砂岩发育；

H—达拉特旗高头窑剖面，烧变岩发育区附近见有白色砂岩分布，且该层白色砂岩据观察应为研究区烧变岩同层

图 3 鄂尔多斯盆地东北部侏罗系白色砂岩野外特征

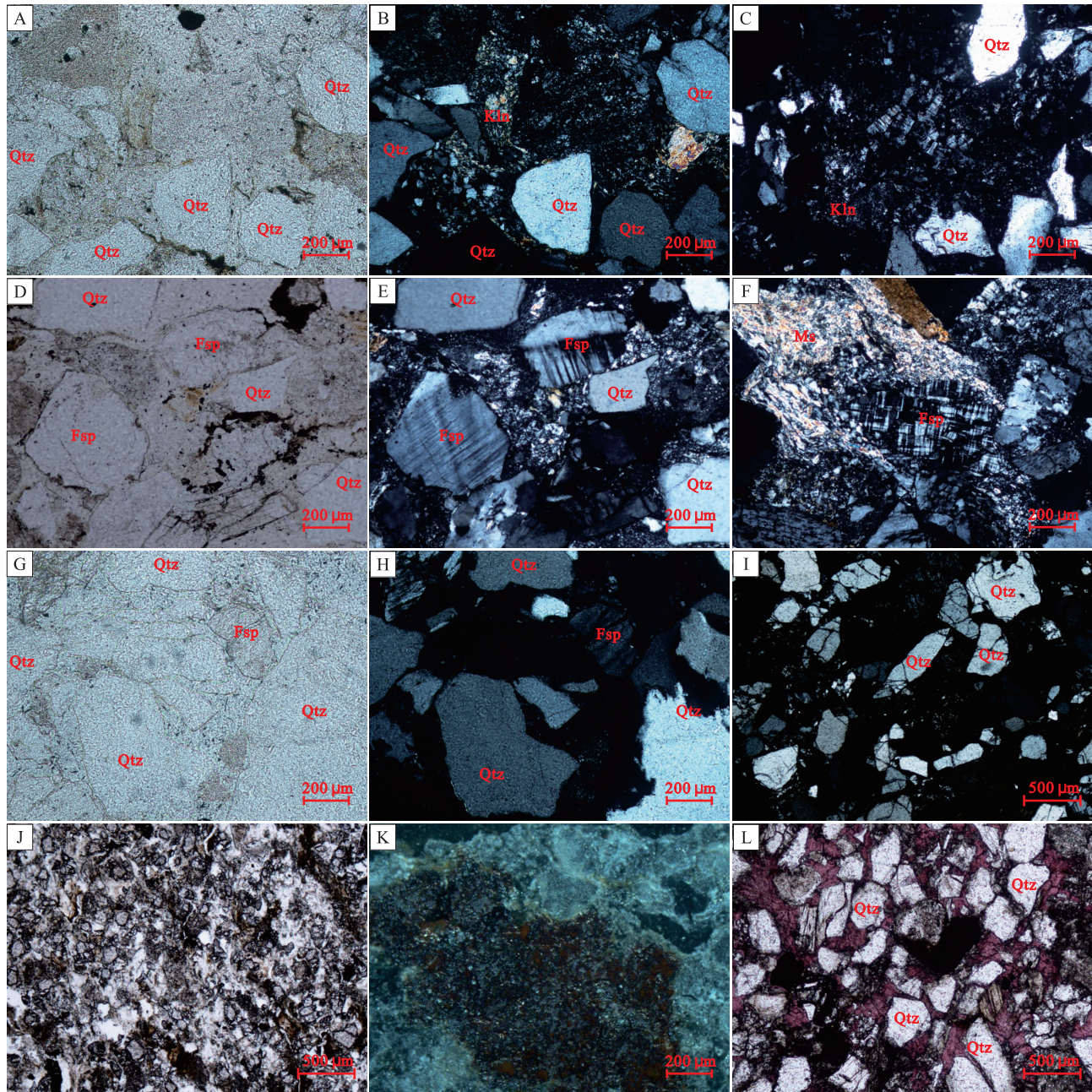
Fig. 3 Field characteristics of the Jurassic white sandstone in northeastern Ordos Basin

自生石英(图 4-E)。大量高岭石填隙物主要分布在粒间，以蠕虫状、书页状和碎片状存在(图 4-C；图 5-D，5-E，5-F)。在扫描电镜下可见白色砂岩中存在连通性较好的圆形孔洞，疑为水汽等流体在一定压差下通过所产生的通道(图 5-A，5-B，5-C)。

4 讨论

4.1 白色砂岩成因分析

砂岩中高含量的高岭石矿物是其呈现白色的主要原因(吴柏林等, 2015)，而造成白色砂岩富含



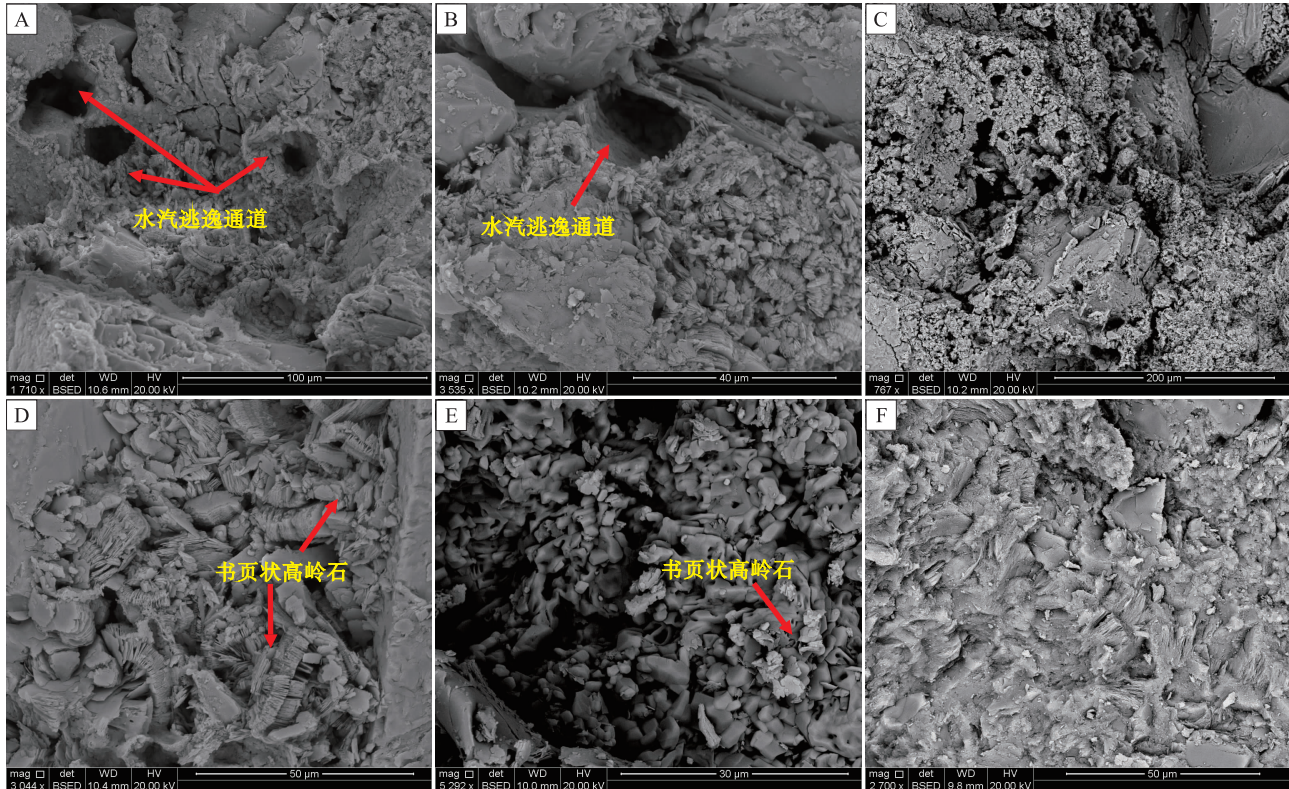
A, B—鄂尔多斯盆地东北部神山沟, 白色砂岩中石英及岩屑, 偶见蚀变高岭石, A 为单偏光, B 为正交偏光; C—鄂尔多斯盆地东北部神山沟, 白色砂岩中见丰富的高岭石充填物, 正交偏光; D, E—鄂尔多斯盆地东北部神山沟, 白色砂岩中见长石颗粒, 充填物中见铁质, D 为单偏光, E 为正交偏光; F—鄂尔多斯盆地东北部神山沟, 白色砂岩中见长石及变质岩岩屑, 正交偏光; G, H—鄂尔多斯盆地东北部准格尔旗哈拉沟富县组, 白色砂岩中的石英发育, G 为单偏光, H 为正交偏光; I—鄂尔多斯盆地东北部白柳兔, 白色砂岩中的石英发育且石英颗粒破碎严重, 正交偏光; J—伊犁盆地南缘扎格斯台, 白色粉砂岩铁质充填普遍, 单偏光; K—鄂尔多斯盆地东北部神山沟, 白色砂岩中见褐色铁质, 反射光; L—鄂尔多斯盆地东北部神山沟, 白色砂岩充填物多为方解石胶结矿物, 单偏光, 茜素红染色。Qtz 为石英; Kln 为高岭石; Fsp 为长石; Ms 为变质岩屑

图 4 中国北方沉积盆地侏罗系白色砂岩显微照片特征

Fig. 4 Micrographs of the Jurassic white sandstones in sedimentary basins of northern China

高岭石的原因, 总结起来有以下 3 种观点: 一是和风化淋滤作用有关 (张龙等, 2017; 丁波等, 2019); 二是与煤层自燃有关的低温热液作用 (时

志强等, 2016; Chen *et al.*, 2020; 陈彬, 2021); 三是油气蚀变成因, 即认为深部煤系烃源岩热演化过程中释放酸性流体和天然气, 运移至浅层的酸性



A, B, C—神山沟剖面, 白色砂岩中的孔洞疑为水汽等流体通过所产生; D—白柳兔剖面, 白色砂岩中见丰富的书页状高岭石充填物; E—鄂尔多斯盆地东北部高头窑剖面, 白色砂岩中见长石被高岭石交代充填; F—神山沟剖面, 白色砂岩中见丰富的高岭石充填物

图 5 鄂尔多斯盆地侏罗系白色砂岩扫描电镜照片

Fig. 5 SEM photos of the Jurassic white sandstones from Ordos Basin

流体使长石发生溶蚀而形成高岭石 (Garden *et al.*, 2001; 马艳萍等, 2007a, 2007b; Parry *et al.*, 2009; 宋土顺等, 2014; 刘红旭等, 2017)。文中所涉及的研究区侏罗系较为平缓, 穿越深部地层的断裂一般不发育, 所见裂隙多为煤层在地腹燃烧后地层垮塌所致 (陈彬, 2021), 如果为油气蚀变成因, 则无法解释原岩与烧变岩相似的铁元素含量、而白色砂岩中铁元素相对匮乏的地质事实, 因此认为油气蚀变成因可能不适用本次研究所涉及的白色砂岩。白色砂岩与红色烧变岩毗邻的地质事实显示其与煤层自燃有关, 煤层在地表燃烧时形成的低温热液可促使长石的溶解和高岭石化, 从而促进白色砂岩的形成 (时志强等, 2016; 陈彬, 2021)。本研究进一步认为白色砂岩的成因, 即砂岩呈现白色的因素, 一是取决于所含黏土矿物, 二是受有色金属离子影响。鉴于烧变岩区所见白色砂岩的成因与煤层自燃密切相关, 本次研究认为该类白色砂岩为一种特殊类型的低温烘烤岩。

4.1.1 煤层自燃所致的高岭石大量生成

煤炭本身含有碳、氢、氧、硫、氮等元素, 在煤发生自燃过程中, 会产生二氧化碳、水蒸气、二氧化硫、二氧化氮等气体。此外在空气流通较差的地下环境, 也会因氧气不足而产生一氧化碳、硫化氢、一氧化氮、甲烷、氢气等还原性气体 (图 6)。而在煤自燃过程中产生的这些酸性、还原性气体向周围扩散遇到 (近) 地表流水、大气降水下渗以及砂岩孔隙水等流体, 与之融合后会在煤自燃中心区附近形成低温酸性热液。有研究证实较高温度 (100~300 °C) 以及流体的酸性都会加快长石的高岭石化 (孙海涛等, 2011; 武文慧等, 2011; 刘子威, 2013; 魏新善等, 2017; 许喆, 2018; 李美蓉等, 2021)。

在中国北方, 侏罗纪沉积的煤均为陆相环境, 其含硫量 0.51%~1% (孙翠芝和叶大武, 2012), 照此计算 1 t 煤含硫量高达 5~10 kg, 燃烧后可产生大量二氧化硫, 致使长石被高岭石溶蚀交代, 同

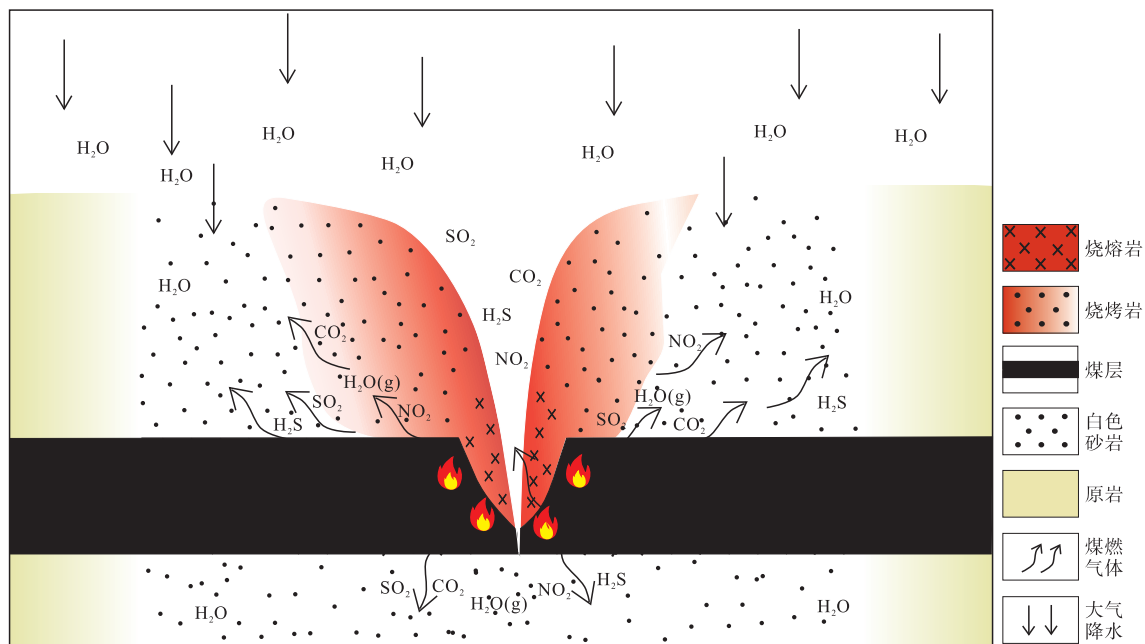


图 6 煤自燃过程模拟图

Fig. 6 Simulation diagram of coal combustion process

时长石的溶解促进砂岩孔隙生成（李美蓉等，2021），从而有利于地表流体在砂岩中流动，进一步促进砂岩的风化及长石的高岭石化。除此之外，含二氧化碳流体对长石的溶解亦有影响（曲希玉等，2008；迟恩先等，2014），煤层自燃时会产生大量二氧化碳气体，进入砂岩后溶于水形成含碳酸的流体，此外，自燃煤层遇水会电离出氢离子，其溶于水也具有一定的酸性，也会促进溶解长石等矿物，且长石的溶解度随着温度的逐渐升高而增大（梁冰等，2012）。概括来说，煤层自燃过程形成的气体在遭遇大气降水、地表流水时形成相对高温的酸性流体，这是促进高岭石形成（长石等矿物的高岭石化）及砂岩呈现白色的主要诱因。

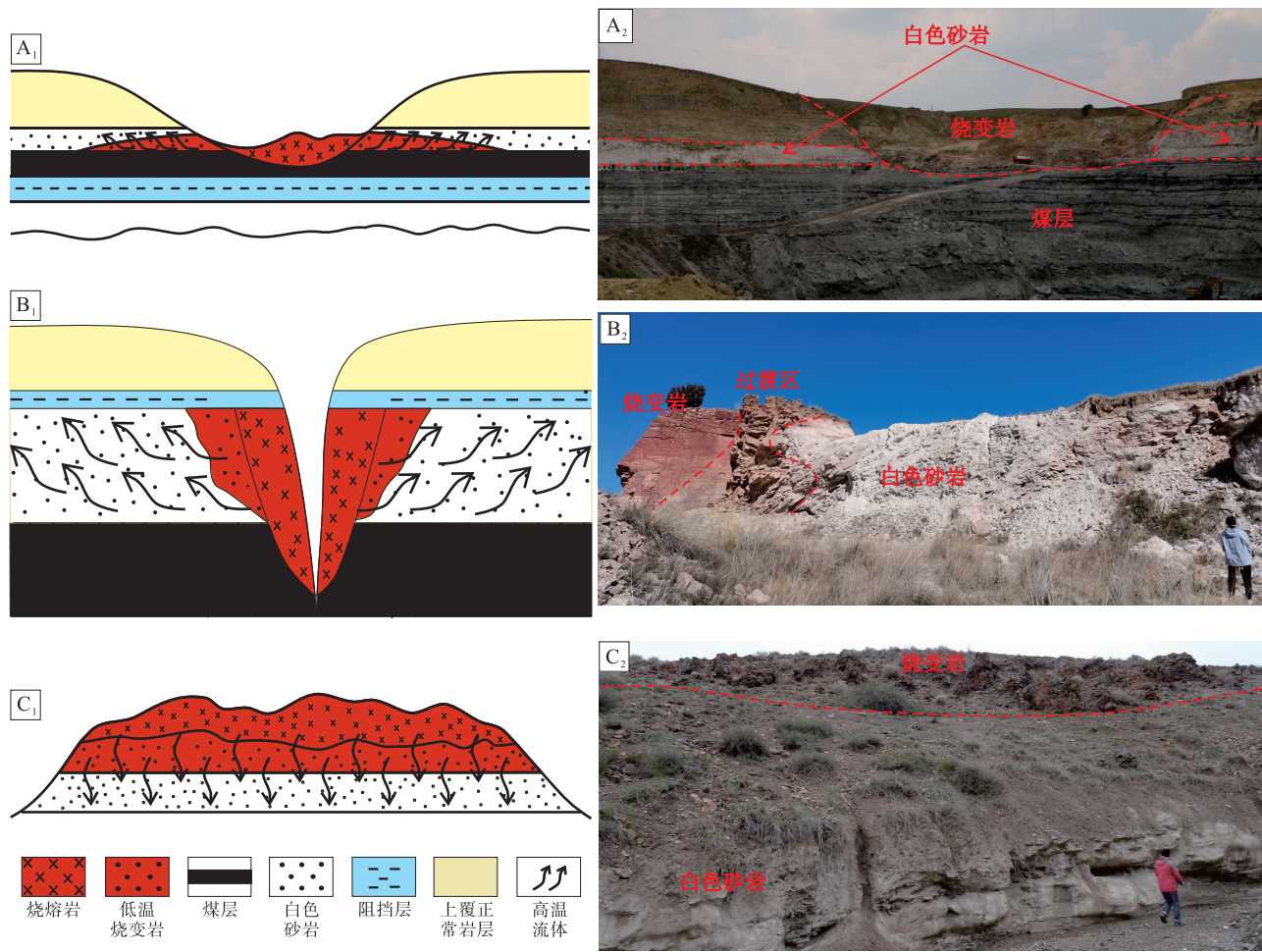
4.1.2 有色金属矿物或金属离子含量变化致使砂岩白色化

白色砂岩中的有色金属离子发生了还原或者是运移流失，也是致使砂岩呈现白色的主要因素。本次研究发现白色砂岩中含有的有色金属矿物主要为铁质矿物，多数研究者认同白色砂岩中三价铁离子发生了化学还原作用（Garden *et al.*, 2001；Beitler *et al.*, 2003；马艳萍等，2006；Gorenc and Chan, 2015；张龙等，2017），但是各学者对三价铁离子的还原成因存在分歧。有研究认为是由于油气运移，其中的还原性流体使红色砂岩中的三价铁离子

还原（马艳萍等，2006，2007a，2007b），也有学者提出三价铁离子不仅发生了还原还发生了流失（马艳萍等，2006，2007b；吴柏林，2015；张龙等，2017）。本次研究认为如果三价铁离子仅仅是发生还原，那么在还原之后的漫长历史时期，暴露在大气中的白色砂岩不可能没有发生再度氧化。另外根据研究区白色砂岩及其围岩样品元素分析，在同一砂岩层，原岩与烧变砂岩的铁含量几乎没有变化，而同层的烧变岩与白色砂岩相比，白色砂岩的铁元素含量有显著降低，这表明白色砂岩的成因极有可能和铁离子的流失有关。铁离子流失的原因大致有以下观点：（1）红砂岩的漂白过程发生在中晚期成岩作用期间，存在还原性流体，将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ，使铁的活泼性增加，并将铁带走（Gorenc and Chan, 2015）。（2）有学者认为这是由于在烃类还原性流体进入砂岩时，氧化铁中的 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} 后易于迁移，造成铁的大量淋滤并从砂岩中移走的结果（吴柏林，2015）。但笔者认为与烧变岩伴生的白色砂岩可能不适用这 2 种情况，鉴于研究区的地质实际，铁离子的流失可能与煤层自燃形成的酸性、还原性流体有关（图 6）。

4.2 白色砂岩成因模式

根据伊犁、准噶尔和鄂尔多斯等盆地白色砂岩与烧变岩（煤自燃区）在空间上的叠置关系，推测



A₁—河谷下切型；A₂—河谷下切型野外实例：鄂尔多斯盆地东北部神山沟附近煤矿；B₁—裂隙下切型；B₂—裂隙下切型野外实例：鄂尔多斯盆地东北部神山沟；C₁—山丘下渗型；C₂—山丘下渗型野外实例：伊犁盆地南缘杂格斯台

图 7 中国北方沉积盆地侏罗系白色砂岩形成模式图

Fig. 7 Formation pattern diagram of the Jurassic white sandstone in sedimentary basins of northern China

白色砂岩的形成有以下 3 种可能成因模式 (图 7)。

1) 河谷下切型 (图 7-A)：由于构造抬升，河流发生下切侵蚀，导致侏罗系煤层出露，煤自燃现象易发。在煤自燃时，河谷两侧煤层暴露明显，因而煤火旺盛，产生的温度也极高，导致围岩变质程度比较高，同时铁离子也易氧化，使砂岩变成砖红色；而在离煤层自燃区较远的地区，煤层阴燃时释放更多的 H₂O (水汽)、CO₂、SO₂、NO₂、NO、H₂S 等，向上逸散到附近砂岩中，形成了相对低温 (仍大于 100°) 的酸性还原性蒸汽流体。该蒸汽与砂岩中铁离子发生氧化还原反应，三价铁转变为较活跃的二价铁，随蒸汽的运移而发生流失。另一方面，长石在较高的温度以及酸性流体的作用下发生交代溶蚀，加快了其高岭石化的进程，二者致使砂

岩呈现白色。

2) 裂隙下切型 (图 7-B)：煤层燃烧过程与河谷下切型类似，区别在于该类型的煤层自燃主要是由于构造活动而产生裂隙，使下部煤层与空气接触，煤层发生自燃，煤层上部裂隙两侧暴露的砂岩发生高温变质，或因为下部煤层燃空后发生坍塌，而远离煤自燃中心的砂岩，受到低温酸性还原性流体 (即溶解了硫化氢、二氧化硫、一氧化碳、二氧化碳、氢气等气体的蒸汽) 的作用，形成白色砂岩。

3) 山丘下渗型 (图 7-C)：在此模型中，自燃煤层及烧变岩位于上部，白色砂岩下伏于高温烧变岩及煤灰之下，构造抬升导致上覆煤层暴露而发生自燃，同时季节性大气降水 (雨水) 淋滤高温燃烧的煤层或正处于高温状态的烧变岩，从而溶解了

煤燃烧时产生的 CO_2 、 NO_2 、 SO_2 、 H_2S 等气体, 形成酸性还原性流体下渗进入下伏的渗透性砂岩, 从而促进白色砂岩的形成。

5 结论

1) 在中国北方侏罗系含煤层系中, 与烧变岩伴生的白色砂岩分布于烧变岩的上覆、下伏位置或侧边位置, 颜色多以浅灰白色为主, 结构疏松, 孔隙发育, 碎屑颗粒以石英、长石矿物为主, 填隙物主要为高岭石, 岩石中发育特殊的流体流动所致的孔洞构造。

2) 据白色砂岩与烧变岩的空间相关性以及砂岩内特殊的结构构造(如流动成因的孔洞等), 推测白色砂岩的形成与煤层自燃有密切联系, 煤层自燃导致高岭石大量生成、有色金属矿物或金属离子含量减少, 这是砂岩呈现白色的主要诱因。烧变岩区所见白色砂岩为特殊类型的低温烘烤岩, 其形成模式有3种: 河谷下切型、裂隙下切型和山丘下渗型。

致谢 参加野外工作的还有成都理工大学的段雄、杜怡星、王小端、葛禹、王艳艳等。感谢成都理工大学冯明石博士和李云博士在室内扫描电镜及显微薄片观察研究中提供的帮助! 感谢评审专家及编辑同志的意见和建议!

参考文献 (References)

- 陈彬. 2021. 中国西北地区侏罗系中烧变岩的特征、形成时代及地质意义. 成都理工大学博士学位论文. [Chen B. 2021. Characteristics, ages and geological significance of the Jurassic combustion metamorphic rocks in northwestern China. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 2005. 准噶尔盆地的原型和构造演化. 地学前缘, 12(3): 77-89. [Chen F J, Wang X W, Wang X W. 2005. Prototype and tectonic evolution of the Junggar Basin, northwestern China. Earth Science Frontiers, 12(3): 77-89]
- 迟恩先, 兰波, 肖延卿. 2014. 溶液温度及 CO_2 含量对长石溶解度的影响. 水资源与水工程学报, 25(2): 230-232. [Chi E X, Lan B, Xiao Y Q. 2014. Impact of temperature and CO_2 in solution on feldspar solubility. Journal of Water Resources and Water Engineering, 25(2): 230-232]
- 丁波, 刘红旭, 杨胜富, 杨龙, 任志勇, 李平, 张宾. 2019. 鄂尔多斯盆地东北部延安组白色砂岩中高岭石成因探讨. 地质论评, 65(s1): 51-52. [Ding B, Liu H X, Yang S F, Yang L, Ren Z Y, Li P, Zhang B. 2019. Discussion on the genesis of kaolinite in white sandstone of Yan'an Formation in the northeast of Ordos Basin. Geological Review, 65(s1): 51-52]
- 韩德馨, 孙俊民. 1998. 中国煤的燃烧变质作用与煤层自燃特征. 中国煤田地质, 10(4): 15-16, 56. [Han D X, Sun J M. 1998. Combustion metamorphism and selfignition characteristics of coal beds in China. Coal Geology of China, 10(4): 15-16, 56]
- 韩效忠, 吴兆剑, 司马献章, 俞弼安, 李建国, 胡航, 蒋喆. 2018. 二连盆地马尼特坳陷南北双向供源铀成矿模式探讨. 煤田地质与勘探, 46(6): 1-10. [Han X Z, Wu Z J, Sima X Z, Yu R G, Li J G, Hu H, Jiang Z. 2018. Metallogenic model of uranium with source supply from the south and the north in Manite depression of Erlian basin, Inner Mongolia. Coal Geology & Exploration, 46(6): 1-10]
- 何登发, 张磊, 吴松涛, 李涤, 甄宇. 2018. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征. 石油与天然气地质, 39(5): 845-861. [He D F, Zhang L, Wu S T, Li D, Zheng Y. 2018. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin. Oil & Gas Geology, 39(5): 845-861]
- 黄以. 2002. 新疆伊犁盆地南缘层间氧化带及铀矿化特征. 新疆地质, 20(2): 141-145. [Huang Y. 2002. Uranium mineralization and character of uranium-bearing interlayer oxidization zones at the southern margin of Ili Basin. Xinjiang Geology, 20(2): 141-145]
- 季汉成, 翁庆萍, 杨潇. 2008. 鄂尔多斯盆地东部下二叠统山西组2段成岩相划分及展布. 古地理学报, 10(4): 409-418. [Ji H C, Weng Q P, Yang X. 2008. Division and distribution of diagenetic facies of the Member 2 of Lower Permian Shanxi Formation in eastern Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 10(4): 409-418]
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉. 2018. 砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理: 兼论大营和钱家店铀矿床. 地球科学, 43(2): 459-474. [Jiao Y Q, Wu L Q, Rong H. 2018. Model of inner and outer reductive media within uranium reservoir sandstone of sandstone-type uranium deposits and its ore-controlling mechanism: case studies in Daying and Qianjiadian uranium deposits. Earth Science, 43(2): 459-474]
- 金若时, 程银行, 李建国, 司马献章, 苗培森, 王少轶, 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. 中国地质, 44(2): 205-223. [Jin R S, Cheng Y H, Li J G, Sima X Z, Miao P Z, Wang S Y, Ao Z, Li H L, Li Y F, Zhang T F. 2017. Late Mesozoic continental basin "Red and Black Beds" coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China. China Geology, 44(2): 205-223]
- 李凤杰, 王多云, 郑希民, 刘自亮, 王峰, 王志坤, 李树同. 2003. 测井曲线频谱分析在含煤地层沉积旋回研究中的应用. 煤田地质与勘探, 31(6): 14-18. [Li F J, Wang D Y, Zheng X M, Liu Z L, Wang F, Wang Z K, Li S T. 2003. The application of frequency spectral analysis of logging curves on sedimentary cycle studies in coal-bearing strata. Coal Geology & Exploration, 31(6): 14-18]
- 李芙蓉, 宋来弟, 于海鹏, 操应长, 远光辉. 2021. 酸碱度对长石溶蚀及增孔效应的影响. 中国石油大学学报(自然科学版), 45(5): 33-41. [Li M R, Song L D, Yu H P, Cao Y C, Yuan G H. 2021. Influence of pH value on feldspar dissolution and pore-increasing effect. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 45(5): 33-41]
- 李新宁, 梁辉, 姚梦多, 蒲振山, 郑玉萍, 张品, 李宏伟, 贾雪莉, 王德润. 2015. 吐哈盆地沙尔湖凹陷侏罗系煤层气勘探新认识. 科学技术与工程, 15(16): 33-39. [Li Xi N, Liang H, Yao M D, Pu Z

- S, Zheng Y P, Zhang P, Li H W, Jia X L, Wang D R. 2015. A new understanding of exploration of coalbed methane in Sha'erhu sag. *Science Technology and Engineering*, 15(16): 33-39]
- 梁冰, 郑训臻, 金佳旭. 2012. 温度及硫酸盐溶液对长石溶解度影响的数值模拟. *广西大学学报(自然科学版)*, 37(5): 1008-1012. [Liang B, Zheng X Z, Jin J X. 2012. Numerical simulation of the influence of temperature and sulfate solution on the solubility of feldspar. *Journal of Guangxi University (Earth & Science Edition)*, 37(5): 1008-1012]
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 岳乐平, 赵俊峰, 王剑强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. *地质学报*, 80(5): 617-638. [Liu C Y, Zhao H G, Gui X J, Yue L P, Zhao J F, Wang J Q. 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617-638]
- 刘红旭, 丁波, 刘章月, 张晓, 潘澄雨. 2017. 伊犁盆地蒙古古尔铀矿床含矿目的层强高岭石化成因. *矿物学报*, 37(Z1): 40-48. [Liu H X, Ding B, Liu Z Y, Zhang X, Pan C Y. 2017. Genesis of strong kaolinization in ore-bearing sandstone from Mengqiguer uranium deposit, Yili Basin, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(Z1): 40-48]
- 刘子威. 2013. 鄂尔多斯盆地榆林北部地区山2段储层成岩作用研究. 成都理工大学硕士学位论文: 57. [Liu Z W. 2013. Research on diagenesis of Shan 2 sandstone reservoir in northern Yulin area in Ordos Basin. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology: 57]
- 鲁静, 邵龙义, 杨敏芳, 李永红, 张正飞, 王帅, 云启成. 2014. 陆相盆地沼泽体系煤相演化、层序地层与古环境. *煤炭学报*, 39(12): 2473-2481. [Lu J, Shao L Y, Yang M F, Li Y H, Zhang Z F, Wang S, Yun Q C. 2014. Coal facies evolution sequence stratigraphy and palaeoenvironment of swamp in terrestrial basin. *Journal of China Coal Society*, 39(12): 2473-2481]
- 马艳萍, 刘池洋, 王建强, 赵俊峰, 房建军, 桂小军, 喻林. 2006. 盆地后期改造中油气运散的效应: 鄂尔多斯盆地东北部中生界漂白砂岩的形成. *石油与天然气地质*, 27(2): 233-238. [Ma Y P, Liu C Y, Wang J Q, Zhao J F, Fang J J, Gui X J, Yu L. 2006. Effects of hydrocarbon migration and dissipation in later reformation of a basin: formation of Mesozoic bleached sandstone in northeastern Ordos basin. *Oil & Gas Geology*, 27(2): 233-238]
- 马艳萍, 刘池洋, 张复新, 赵俊峰, 喻林, 黄雷. 2007a. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型高岭土矿特征及成因机制. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(5): 929-936. [Ma Y P, Liu C Y, Zhang F X, Zhao J F, Yu L, Huang L. 2007a. Genesis and characteristics of the Dongsheng Kaolin deposits in Ordos Basin. *Journal of Jilin University (Earth & Science Edition)*, 37(5): 929-936]
- 马艳萍, 刘池洋, 赵俊峰, 黄雷, 喻林, 桂小军, 房建军, 王建强. 2007b. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩漂白现象与天然气逸散的关系. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 37(S1): 127-138. [Ma Y P, Liu C Y, Zhao J F, Huang L, Yu L, Gui X J, Fang J J, Wang J Q. 2007b. Relationship between sandstone bleaching and natural gas fugitive in northeast Ordos Basin. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 37(S1): 127-138]
- 苗培森, 李建国, 汤超, 金若时, 程银行, 赵龙, 肖鹏, 魏佳林. 2017. 中国北方中生代盆地深部砂岩铀矿成矿条件与找矿方向. *地质通报*, 36(10): 1830-1840. [Miao P S, Li J G, Tang C, Jin R S, Cheng Y H, Xiao P, Wei J L. 2017. Metallogenic condition and prospecting orientation for deep sandstone-hosted uranium deposits in Mesozoic-Cenozoic basins of North China. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1830-1840]
- 曲希玉, 刘立, 马瑞, 胡大千, 陈雪, 王彦明. 2008. CO₂ 流体对岩屑长石砂岩改造作用的实验. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(6): 959-964. [Qu X Y, Liu L, Ma R, Hu D Q, Chen X, Wang Y M. 2008. Experiment on debris-arkosic sandstone reformation by CO₂ fluid. *Journal of Jilin University (Earth & Science Edition)*, 38(6): 959-964]
- 权志高, 张甲民, 傅成铭, 姬海军, 张发. 2011. 新疆吐哈盆地铀成矿远景区构造式样与铀成矿潜力评价. *地质论评*, 57(5): 749-753. [Quan Z G, Zhang J M, Fu C M, Ji H J, Zhang F. 2011. Structural styles and an evaluation for uranium ore-forming potentials in the uranium prospective areas in Turpan-Hami Basin, Xinjiang. *Geological Review*, 57(5): 749-753]
- 时志强, 赵冠军, 胡宗全. 2000. 天山南缘中小型沉积盆地侏罗系储层成岩作用分析. *成都理工学院学报*, 29(S1): 139-142. [Shi Z Q, Zhao G J, Hu Z Q. 2000. Diagenetic analysis of Jurassic reservoir in medium-small sized sedimentary basins on south edge of Tianshan mountains. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(S1): 139-142]
- 时志强, 杨小康, 王艳艳, 杜怡星, 肖凯, 段雄. 2016. 含煤盆地表生热液铀成矿理论及证据: 以伊犁盆地南缘及鄂尔多斯盆地东北部侏罗系为例. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 43(6): 703-718. [Shi Z Q, Yang X K, Wang Y Y, Du Y X, Xiao K, Duan X. 2016. Theory of uranium mineralization caused by supergene hydrothermal fluid in coal-bearing basins: evidences from Jurassic sandstone in southern Yili Basin and northeastern Ordos Basin China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(6): 703-718]
- 时志强, 王美玲, 陈彬. 2021. 中国北方烧变岩的分布、特征及研究意义. *古地理学报*, 23(6): 1067-1081. [Shi Z Q, Wang M L, Chen B. 2021. Distribution characteristics and significances of burnt rocks in northern China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(6): 1067-1081]
- 宋士顺, 刘立, 王玉洁, 刘娜, 于森. 2014. 鄂尔多斯盆地漂白砒砂岩特征及成因. *石油与天然气地质*, 35(5): 679-684. [Song T S, Liu L, Wang Y J, Liu N, Yu M. 2014. Characteristics and genesis of the bleached Pisha sandstone in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 35(5): 679-684]
- 孙翠芝, 叶大武. 2012. 中国原煤及商品煤硫分分布概况. *煤质技术*, 27(2): 5-9. [Sun C Z, Ye D W. 2012. Overview of sulfur content distribution in raw coal and commercial coal in China. *Coal Technology*, 27(2): 5-9]
- 孙海涛, 钟大康, 张湘宁, 柳慧林. 2011. 鄂尔多斯盆地长北气田山西组二段低孔低渗储层特征及形成机理. *沉积学报*, 29(4): 724-733. [Sun H T, Zhong D K, Zhang X N, Liu H L. 2011. Characteristics and mechanism of Permian Shanxi tight reservoir of Changbei gas field in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(4): 724-733]
- 孙建博, 陈刚, 章辉若, 白国缙, 李向东, 李向平. 2006. 鄂尔多斯盆地中生代构造事件的峰值年龄及其沉积响应. *西北地质*, 39(3): 91-96. [Sun B J, Chen G, Zhang H R, Bai G J, Li X D, Li X P. 2006. Peak ages and sedimentary responses of the Mesozoic-

- Cenozoic tectonic events in Ordos Basin. *Northwestern Geology*, 39(3): 91-96]
- 王庆全. 1982. 大同侏罗系煤层古火区地质特征. *煤田地质与勘探*, (6): 25-30. [Wang Q Q. 1982. Geological characteristics of the palaeo coal-fire area of the Datong Jurassic coal seam. *Coal Geology & Exploration*, (6): 25-30]
- 魏新善, 肖红平, 刘锐娥, 南珺祥, 郝爱胜. 2017. 热异常酸洗作用与鄂尔多斯盆地上古生界长石消失事件. *地质学报*, 91(9): 2139-2149. [Wei X S, Xiao H P, Liu R E, Nan J X, Hao A S. 2017. Pickling effect of the abnormal heat and its relation to disappearance of feldspar of the Upper Paleozoic in the Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 2139-2149]
- 吴柏林. 2005. 中国西北地区中生代盆地砂岩型铀矿地质与成矿作用. 西北大学博士学位论文. [Wu B L. 2005. Sandstone-type uranium ore geology and mineralization in the Mesozoic basin of Northwest China. Doctoral dissertation of Northwest University]
- 吴柏林, 魏安军, 刘池洋, 宋子升, 胡亮, 王丹, 寸小妮, 孙莉, 罗晶晶. 2015. 鄂尔多斯盆地北部延安组白色砂岩形成的稳定同位素示踪及其地质意义. *地学前缘*, 22(3): 205-214. [Wu B L, Wei A J, Liu C Y, Song Z S, Hu L, Wang D, Cun X N, Sun L, Luo J J. 2015. Stable isotope tracing on the formation of white sandstone in Yan'an Group, northern Ordos Basin, and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 205-214]
- 吴仁贵, 祝民强, 余达淦, 陈安平. 2002. 沉积体系分析与底河道型砂岩铀成矿条件讨论: 以鄂尔多斯中生代盆地北部东胜地区为例. *矿床地质*, 21(S1): 878-880. [Wu R G, Zhu M Q, Yu D G, Chen A P. 2002. Analyses of depositional system and studies on metallogenic condition of basal-channel sandstone Uranium Deposit. *Geology of Ore Deposits*, 21(S1): 878-880]
- 吴亚平. 2014. 准噶尔盆地南缘硫磺沟地区砂岩铀矿化特征研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Wu Y P. 2014. The uranium mineralization characteristics research of the Liuhuanguo area in the southern margin of Junggar Basin. Masteral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 吴兆剑, 韩效忠, 林中湘, 李紫楠, 季辉, 殷栋法, 蒋喆, 胡航. 2020. 中国北方主要中生代盆地构造沉积气候演化及其成煤、铀意义. *大地构造与成矿学*, 44(4): 710-724. [Wu Z J, Han X Z, Lin Z X, Li Z N, Ji H, Yin D F, Jiang Z, Hu H. 2020. Tectonic, sedimentary, and climate evolution of Meso-Cenozoic basins in North China and its significance of coal accumulation and uranium mineralization. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 710-724]
- 武文慧, 黄思静, 陈洪德, 李智武, 赵俊兴. 2011. 鄂尔多斯盆地上古生界碎屑岩硅质胶结物形成机制及其对储集层的影响. *古地理学报*, 13(2): 193-200. [Wu W H, Huang S J, Chen H D, Li Z W, Zhao J X. 2011. Origin of siliceous cement in the Upper Paleozoic clastic rocks in Ordos Basin and its effects on reservoir quality. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 13(2): 193-200]
- 许喆. 2018. 长石成岩过程中的热力学分析: 以鄂尔多斯盆地上古生界为例. 长江大学硕士学位论文: 69. [Xu Z. 2018. Thermodynamic analysis of feldspar diagenesis in the Upper Paleozoic reservoir in Ordos Basin. Masteral dissertation of Yangtze University: 69]
- 闫晶晶, 贾为卫, 黄松. 2022. 准噶尔盆地南缘硫磺沟地区中—新生代构造演化与侏罗系铀成矿的关系. *铀矿地质*, 38(6): 1022-1031. [Yan J J, Jia W W, Huang S. 2022. Relationship between Mesozoic-Cenozoic structural evolution and Jurassic uranium mineralization in Liuhuanguo area, southern margin of Junggar Basin. *Uranium Geology*, 38(6): 1022-1031]
- 杨华, 刘新社, 闫小雄. 2015. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏. *地学前缘*, 22(3): 174-183. [Yang H, Liu X S, Yan X X. 2015. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 174-183]
- 张龙, 刘池洋, 雷开宇, 孙莉, 寸小妮, 杜芳鹏, 邓辉. 2017. 鄂尔多斯盆地东北部侏罗系延安组漂白砂岩成因和古风化壳形成环境探讨. *地质学报*, 91(6): 1345-1359. [Zhang L, Liu C Y, Lei K Y, Sun L, Cun X N, Du F P, Deng H. 2017. White bleached sandstone genesis and paleo-weathered crust forming environment of the Jurassic Yan'an Formation in the northeastern Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1345-1359]
- 张雪丽. 2016. 中国北方主要盆地地下咸水中CO₂溶解度研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Zhang X L. 2016. Measurement and modeling of CO₂ solubility in formation brine in major basins in North China. Masteral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 张永霖. 1983. 鄂尔多斯盆地东南缘早、中侏罗世延安组沉积环境与煤炭资源分布规律. *地质论评*, 29(4): 358-364. [Zhang Y L. 1983. The sedimentary environment of early-middle Jurassic Yan'an Formation and distribution of coal resources in the southeastern border of Ordos Basin. *Geological Review*, 29(4): 358-364]
- Beitler B, Chan M A, Parry W T. 2003. Bleaching of Jurassic Navajo Sandstone on Colorado Plateau Laramide highs: evidence of exhumed hydrocarbon supergiants? *Geology (Boulder)*, 31(12): 1041-1044.
- Chan M A, Parry W T, Bowman J R. 2000. Diagenetic hematite and manganese oxides and fault-related fluid flow in Jurassic sandstones, southeastern Utah. *AAPG Bulletin*, 84(9): 1281-1310.
- Chen B, Wang Y Y, Franceschi Marco, Duan X, Li K Z, Yu Y, Wang M L, Shi Z Q. 2020. Petrography, mineralogy, and geochemistry of combustion metamorphic rocks in the northeastern Ordos Basin, China: implications for the origin of "White Sandstone". *Minerals*, 10(12): 1-22.
- Garden I R, Guscott S C, Burley S D, Foxford K A, Walsh J J, Marshall J. 2001. An exhumed palaeo-hydrocarbon migration fairway in a faulted carrier system, Entrada Sandstone of SE Utah, USA. *Geofluids*, 1(3): 195-213.
- Gorenc M A, Chan M A. 2015. Hydrocarbon-induced diagenetic alteration of the Permian White Rim Sandstone, Elaterite Basin, southeast Utah. *AAPG Bulletin*, 99(5): 807-829.
- Heffern E L, Coates D A. 2004. Geologic history of natural coal-bed fires, Powder River basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, 59(1): 25-47.
- Parry W T, Chan M A, Nash B P. 2009. Diagenetic characteristics of the Jurassic Navajo Sandstone in the Covenant oil field, central Utah thrust belt. *AAPG Bulletin*, 93(8): 1039-1061.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐杰)