



移动扫码阅读

张 宁,许 云,宁树正,等.准噶尔煤田阜康矿区小黄山煤矿煤的矿物学特征[J].煤炭科学技术,2021,49(6):242-250.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.029

ZHANG Ning,XU Yun,NING Shuzheng,et al.Mineralogical characteristics in No. 6 coal seam from Xiaohuangshan Coal Mine of Fukang Mining Area,Junggar Coal Field[J].Coal Science and Technology,2021,49(6):242-250.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.029

## 准噶尔煤田阜康矿区小黄山煤矿煤的矿物学特征

张 宁<sup>1,2</sup>,许 云<sup>3</sup>,宁树正<sup>4</sup>,赵 彦<sup>1</sup>

(1.中国煤炭地质总局第一勘探局地质勘查院,河北 邯郸 056001;2.河北工程大学 土木工程学院,河北,邯郸 056038;

3.河北省煤炭资源综合开发与利用协同创新中心,河北 邯郸 056038;4.中国煤炭地质总局,北京 100038)

**摘 要:**煤中矿物类型及组合特征对煤炭的加工利用具有重要意义,其决定了煤在燃烧、气化、液化等方面的性质。为了使准噶尔盆地阜康矿区的煤炭资源得到清洁高效利用,采集发育在小黄山煤矿 6 号煤的 11 个样品,对其进行工业分析、全硫分析和发热量分析,运用 X 射线荧光光谱、低温灰-X 射线衍射、电子探针对煤灰中的常量元素、煤中的矿物进行了分析,并研究其成因。研究结果表明:小黄山煤矿 6 号煤层属中高挥发分、特低灰分、特低硫,特高热值煤。煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  相对质量分数为 10.91%,具有顶部和底部高中部低的特征,分析表明煤中的矿物并非 Na 的主要来源,煤中的 Na 部分可能来自于表土层中的 Na,地表水在下渗透过程中将其带入到煤层中,部分可能来源于中生代地层中具有超压的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水。低温灰化后主要矿物组成为白云石、片钠铝石、石英、钠长石、黏土矿物、方解石及少量的磷灰石、针铁矿等。片钠铝石是由煤化过程中产生的  $\text{CO}_2$  与硅铝酸盐矿物反应形成,白云石和方解石作为后生矿物由煤化过程中产生的 CO 和  $\text{CO}_2$  与赋存在煤中的流体反应形成。磷灰石作为后生矿物由热液活动或者是有机物分解过程释放出的磷在适当的化学条件下再沉淀形成,针铁矿为煤中铁的硫化物被氧化形成。

**关键词:**煤中矿物;片钠铝石;准噶尔煤田;阜康矿区

中图分类号:P57

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)05-0242-09

## Mineralogical characteristics in No. 6 coal seam from Xiaohuangshan Coal Mine of Fukang Mining Area, Junggar Coal Field

ZHANG Ning<sup>1,2</sup>, XU Yun<sup>3</sup>, NING Shuzheng<sup>4</sup>, ZHAO Yan<sup>1</sup>

(1. First Exploration Bureau, China National Administration of Coal Geology, Handan 056001, China; 2. College of Civil Engineering, Hebei

University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Exploitation and Utilization in Hebei Province,

Handan 056038, China; 4. China National Administration of Coal Geology (CNACG), Beijing 100038, China)

**Abstract:** Minerals in coal are of great significance in determining coal properties, washing, combustion, gasification and liquefaction. In order to realize the clean and efficient utilization of coal resource in Fukang, 11 coal samples were collected from Xiaohuangshan Mine in Fukang area. Proximate, total sulfur and gross calorific value were analyzed for these coal samples. The composition, and micro-topography of samples were studied by X-ray fluorescence (XRF), low-temperature ashing-X-ray diffraction (LTA-XRD) and electron probe microanalyzer (EPMA). The results indicate that the No.6 coal of Xiaohuangshan Mine are characterized by low moisture, medium-high volatiles, low ash, and low sulfur coals. The average content of  $\text{Na}_2\text{O}$  in the ash of No. 6 coal seam samples was 10.91%, which was characterized by high content of  $\text{Na}_2\text{O}$  in the top and bottom coal seams and low content of  $\text{Na}_2\text{O}$  in the middle. The analysis showed that the minerals in coal were not the source of Na. Part of the Na in the coal may come from the topsoil, which was carried into the coal seam by the surface water in the process of infiltration. The other part may come from the overpressured  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  water in Mesozoic strata. The mineral composition (low temperature ashes) is as follows: dolomite, dawsonite, quartz, albite, clay minerals, and calcite. In addition, a trace of apatite and

收稿日期:2020-08-02;责任编辑:郭 鑫

基金项目:中国地质调查局地质调查资助项目(DD20160187);河北省自然科学基金资助项目(D201402030)

作者简介:张 宁(1981—),男,河北定兴人,硕士,高级工程师。E-mail:53556613@qq.com

通讯作者:许 云(1981—),女,河北深泽人,博士,讲师。Tel:031-068771, E-mail:10829702@qq.com

goethite also found by the electron probe microanalyzer. It is speculated that during the peat depositional period, silicate minerals were carried to the peat swamp by water and reacted with  $\text{CO}_2$  released from the coalification process to form dawsonite. Dolomite and calcite in coal are formed from  $\text{CO}$  and  $\text{CO}_2$ , which are produced from coalification process, reacting with the fluid in coal. The apatite may either be formed by migration of hydrothermal solutions or from local remobilization of phosphate, formed earlier within the coal seam or associated strata. Goethite is the oxidation product of iron sulfides in coal.

**Key words:** mineral matter in coal; dawsonite; Junggar Coal field; Fukang Mining Area

## 0 引 言

煤由有机质和无机质 2 个部分组成,无机质既包括赋存其中的可识别的矿物,也包括与有机质结合在一起的金属离子和阴离子<sup>[1]</sup>。煤中矿物质除了可以指示煤层形成后所经历的各种地质作用外,还是有益/害元素的载体<sup>[2-4]</sup>。更重要的是煤中矿物质的特征及其组合形式对煤炭的加工利用和环境保护具有重要意义。一般而言,煤中矿物质的含量与煤的发热量成反比,即矿物质含量越高,发热量越低。除此之外,矿物质对煤的挥发分产率、燃烧过程以及煤灰组分都有重要的影响。煤在高温燃烧时大部分矿物质会转变成灰分,而煤灰的熔融特性及黏-温特性是判别动力用煤和气化用煤的重要指标<sup>[5]</sup>。在高温燃烧过程中,赋存在矿物和有机质中的部分  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等碱金属和碱土金属被释放出来,当煤灰中的碱金属元素含量较高时,燃煤锅炉会产生严重的结渣、沾污性<sup>[6]</sup>。煤中的矿物质对煤的气化也有很大影响,在低变质程度的煤中碱土金属和碱金属元素对煤的气化起到积极的作用<sup>[7-8]</sup>,因此煤中

的矿物质对煤炭的加工利用具有重要的影响。

准噶尔盆地是我国重要的煤炭资源基地,它包括准北、准东、淮南 3 大煤田。其中准东煤田是中国最大的整装煤田,截止到 2009 年已获得 2 136 亿 t 的探明储量<sup>[9]</sup>,相对于准东煤田而言,淮南储量相对较少,约为 300 亿 t<sup>[10]</sup>,因此在对准东煤田的煤质特征及分布规律、地球化学特征、煤中矿物特征等方面的研究程度相对较高<sup>[11-13]</sup>,而对淮南煤田的报道相对较少,尤其是对煤中矿物特征方面更少。笔者研究了淮南煤田阜康矿区侏罗纪八道湾组煤中的矿物学特征,其结果对煤质评价和选择合理的煤加工利用途径等有重要意义。

## 1 地质背景

阜康矿区位于准噶尔盆地南缘,面积约 250  $\text{km}^2$ ,呈现南高北低、东高西低的地势。自晚古生代的二叠纪至第四纪,准噶尔盆地南缘总体经历了 4 个演化阶段,分别是早二叠世的前陆型海相—残留海相盆地、中—晚二叠世的拗陷型陆相盆地、侏罗纪—古近纪的振荡型陆相盆地以及新近纪—第四纪

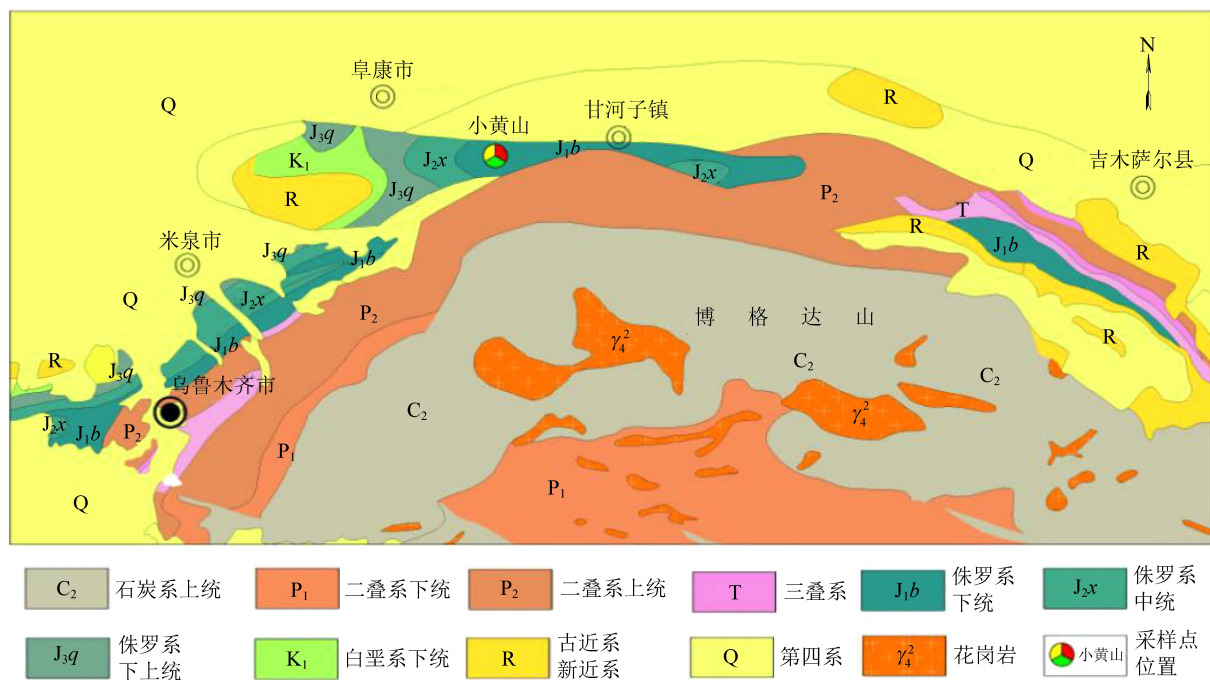


图 1 研究区及周缘地质图与采样位置

Fig.1 Geological sketch map of study and adjacent areas and sampling location

前陆型陆相盆地<sup>[14-15]</sup>。准噶尔盆地南缘部分在早中侏罗世处于弱伸展构造背景,主要发育扇三角洲、辫状河三角洲、湖泊等沉积体系<sup>[16-18]</sup>。

小黄山煤矿位于阜康东南约18 km,矿区出露的地层由老到新分别有上古生界石炭系、二叠系,中生界三叠系、侏罗系、白垩系及新生界古近系、新近系和第四系。石炭系下统巴塔玛依内山组是含煤盆地的基底,岩性为安山玢岩,出露于南部的天山山前地带。受喜马拉雅运动的影响,侏罗系在准噶尔盆地南缘山前地带广泛出露,出露地层总体呈条带状沿天山山脉分布<sup>[19-20]</sup>,如图1所示。区内含煤地层为下侏罗统八道湾组( $J_1b$ )、三工河组( $J_1s$ )和中侏罗统西山窑组( $J_2x$ )。八道湾组岩相建造为以河流—沼泽相为主,岩性为灰白色砂岩、灰色砂质页岩、泥岩夹煤层,含煤44层,煤层总厚98.25 m,平均厚度为2.21 m。小黄山煤矿含可采煤层7层,其中主采煤层为八道湾组的6号煤层,平均厚度为14.67 m,如图2所示。

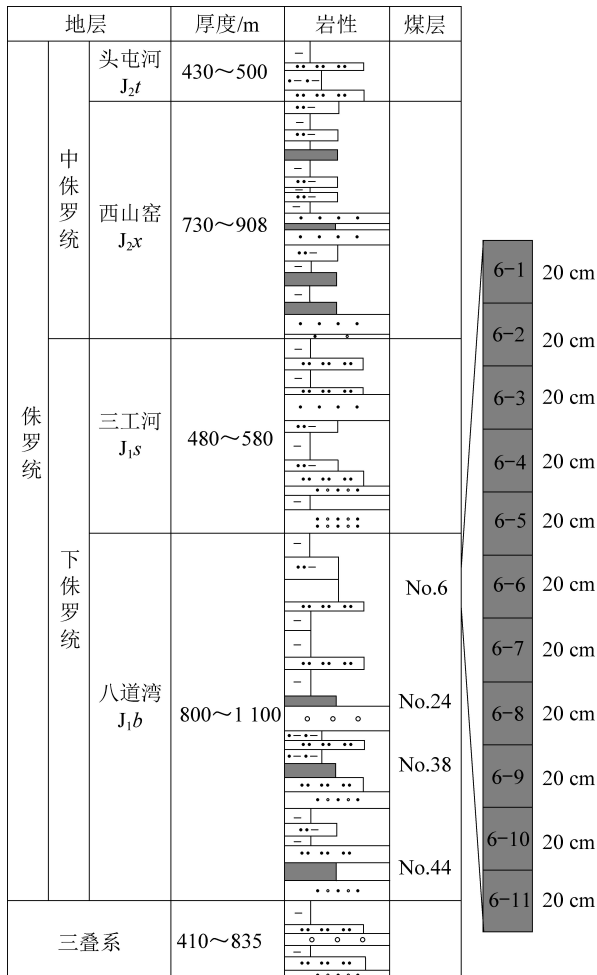


图2 淮南煤田含煤地层柱状

Fig.2 Stratigraphic column of Sourthern Junggar Basin

## 2 样品的采集和分析过程

采集小黄山煤矿八道湾组的6号煤层11个煤样,煤样编号从上到下为6-1—6-11。样品的采集按照GB/T 482—2008《煤层煤样采取方法》<sup>[21]</sup>进行。

按GB/T 474—2008《煤样的制备方法》制备样品,将自然晾干样品用粉碎机粉碎至粒径78  $\mu\text{m}$ 和粒径74  $\mu\text{m}$ <sup>[22]</sup>。煤中水分按照GB/T 211—2007《煤中全水分的测定方法》<sup>[23]</sup>测定,煤中灰分、挥发分按GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》<sup>[24]</sup>测定,煤中全硫含量按GB/T 214—2007《煤中全硫的测定方法》<sup>[25]</sup>测定。煤的发热量按GB/T 213—2008《煤的发热量测定方法》<sup>[26]</sup>测定。

采用日本电子电子探针显微分析仪JXA8230观察样品中矿物,电压20 kV,电流10 mA。采用EmitechK1050X等离子灰化仪对样品进行低温灰化,电源:230 V,50 Hz,灰化功率75 W。样品的X射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)图谱由RigakuD/MAX-2200PC型衍射仪测得,采用Cu-K $\alpha$ 射线, Ni滤光片;所用光管电压40 kV,电流20 Ma;  $2\theta$ 测角为 $3^\circ\sim 70^\circ$ ,步长为 $4^\circ$ <sup>[27]</sup>。采用X射线荧光光谱(XRF,型号:ARL9800)测定样品中常量元素,测试条件:铑阳极端窗式X射线光管,真空光路,试样旋转角 $2\theta$ 为 $5^\circ\sim 150^\circ$ ,分析电压和电流分别为30 kV,80 mA。

## 3 结果和讨论

### 3.1 工业分析、全硫分析和发热量分析

小黄山6号煤层样品的工业分析、发热量、各种形态硫分析结果见表1。6号煤层煤中含水量较低,平均值为4.72%;煤挥发分为31.32%~35.91%,均值为33.26%;煤灰分产率为1.6%~4.31%,均值为2.71%;全硫相对质量分数为0.21%~0.42%,均值为0.31%。根据GB/T15224—2010《煤炭质量分级》<sup>[28]</sup>,小黄山6号煤属中高挥发、特低灰分、特低硫,特高热值煤,符合该地区的陆相沉积环境特征。

### 3.2 煤中的常量元素

小黄山煤矿6号煤层煤灰中常量元素氧化物含量见表2,其中 $\text{Na}_2\text{O}$ 相对质量分数平均值达到10.91%,由于小黄山煤矿6号煤层灰分产率低(平均值为2.71%),换算成煤中Na的相对质量分数为0.19%,略高于中国煤中 $\text{Na}_2\text{O}$ 的相对质量分数(0.16%)。相对 $\text{Na}_2\text{O}$ 相对质量分数而言,煤灰中的 $\text{K}_2\text{O}$ 的相对质量分数较低,平均值为0.71%,根据MT/T 1074—2008《煤中碱金属含量分级》<sup>[29]</sup>,小黄山6号煤属于低碱煤。中国动力煤煤灰中氧化钠相



对质量分数小于 1%<sup>[6,30]</sup>,因此许多学者认为当煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  的相对质量分数大于 2%时应划分为高钠煤<sup>[31-32]</sup>,小黄山煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  的相对质量分数远高于 2%,若根据这一标准应属于高钠煤。

$\text{Na}$  主要以无机形态和有机形态赋存在煤中,前者主要是以矿物、无机盐类和水合离子形式存在,后者主要以羧酸盐和配位体的形式存在于煤的有机质中<sup>[33-34]</sup>。小黄山 6 号煤中  $\text{Na}_2\text{O}$  与灰分的相关系数  $R=-0.88$ (图 3),为明显的负相关,这表明煤中含  $\text{Na}$  的矿物(如片钠铝石、钠长石)并不是煤中  $\text{Na}$  元素的主要载体。尽管含  $\text{Na}$  的矿物在风化过程中释放的  $\text{Na}^+$  可被煤中的有机质吸附,然而白向飞等<sup>[35]</sup>通过对准噶尔盆地的准东煤田 600 余组钻孔煤样进行研究表明煤中的  $\text{Na}$  主要以水溶态的形式存在于煤中;刘大海等<sup>[34]</sup>对新疆的高钠煤研究也表明煤中的  $\text{Na}$  主要以水溶性的钠存在。

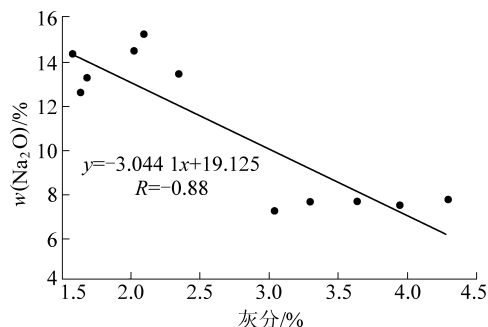


图 3 小黄山 6 号煤  $\text{Na}_2\text{O}$  与灰分的相关性分析

Fig.3  $\text{Na}_2\text{O}$  and ash yield coefficient of No. 6 Xiaohuangshan Coal

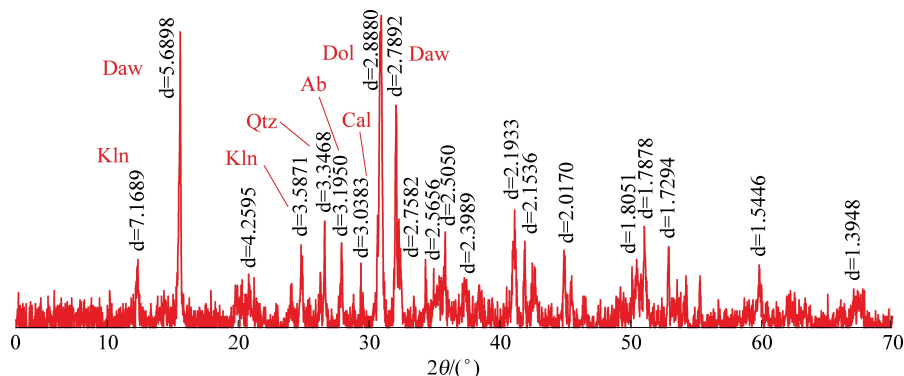
由于目前工作未进行钠的赋存形态相关试验研究,因此未能确定小黄山煤中  $\text{Na}$  的赋存形态,阜康矿区小黄山煤矿位于淮南煤田的西北部紧邻准东煤

田,推测煤中的  $\text{Na}$  可能也是水溶态形式存在。

白向飞等<sup>[35]</sup>通过对准东的高  $\text{Na}$  煤研究认为准东煤田煤中的  $\text{Na}$  主要是地表水在向下渗透过程中将地表土中的  $\text{Na}$  带入到煤层中,从而使煤层的顶部  $\text{Na}$  的含量高,底部  $\text{Na}$  的含量低。然而小黄山煤矿 6 号煤中具有煤层顶部和底部  $\text{Na}$  的含量高,而中部  $\text{Na}$  的含量较低的趋势(表 2),这表明地表水的溶滤作用可能不是煤中  $\text{Na}$  的唯一来源。宫亚军<sup>[36]</sup>认为准格尔盆地阜康矿区中生界的地层水以超压的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水为主,且  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型地层水超高压通常与煤系烃源岩生烃有关<sup>[37]</sup>。阜康地区煤、石油、天然气等资源丰富,其中大部分煤矿属于高瓦斯矿区,煤层中蕴含有丰富的煤层气资源,煤层气储量为  $2.82 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ <sup>[38-40]</sup>,为超高压  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水的形成提供了条件。小黄山煤矿 6 号煤变质程度低,孔隙率高、吸水性强,地层中超高压的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  型水中的钠可能会以  $\text{Na}$  离子的形式分布在煤孔隙中导致煤层底部  $\text{Na}$  的含量偏高。

### 3.3 煤中的矿物

X 射线衍射分析表明小黄山 6 号煤中的矿物主要由碳酸盐矿物(片钠铝石、白云石、方解石)、硅酸盐矿物(钠长石、黏土矿物)和氧化物矿物(石英)组成,如图 4 所示。用 Siroquant 软件对矿物含量进行半定量分析,其中白云石相对质量分数为 45.57%,片钠铝石相对质量分数为 24.16%,石英相对质量分数为 12.26%,钠长石相对质量分数为 7.67%,黏土矿物相对质量分数为 7.43%,方解石相对质量分数为 2.91%。在电子探针(含能谱)下还观察到少量的磷灰石和针铁矿。



Kln—高岭石;Daw—片钠铝石;Qtz—石英,Ab—钠长石,Dol—白云石,Cal—方解石

图 4 小黄山 6 号煤 X 射线衍射

Fig.4 X-ray powder diffraction patterns of LTA ash of Xiaohuangshan coal.

#### 3.3.1 硅酸盐矿物

小黄山 6 号煤中的硅酸盐矿物主要为黏土矿物和钠长石。X 射线衍射检测显示煤中的钠长石相对

质量分数为 7.67%(图 4)。钠长石呈现次圆状分散在煤层中表明钠长石为同沉积矿物且经过长距离的搬运沉积在泥炭沼泽中,如图 5a 和 5b 所示。方世

虎<sup>[41]</sup>、张泓<sup>[17]</sup>通过对淮南地区沉积地层的研究认为阜康地区八道湾组沉积时期盆地南缘受天山物源体系的控制作用较大。矿区的东部和东南部有石英钠长斑岩侵入体<sup>[42]</sup>,煤中的钠长石可能被水体携带进入泥碳中沉积形成。高岭石和伊利石是煤中常见的黏土矿物,其来源可能是长石和云母的风化,也有可能来自于火山物质的分解<sup>[43]</sup>。煤中黏土矿物的含量和种类对煤炭的燃烧利用方面影响较大,同时也是微量元素富集的重要载体<sup>[44-45]</sup>。如图5c和5d

所示,充填在细胞腔中的高岭石是自生矿物,充填在裂隙中的伊利石为后生矿物。在阜康矿区八道湾组泥炭形成过程中,沉积物质来自于南部的天山物源体系,其中的矿物如长石,石英和云母等可以在风化作用中转变为黏土矿物<sup>[46-48]</sup>。

3.3.2 碳酸盐矿物

片钠铝石主要发育于富含长石的砂岩中<sup>[49-50]</sup>,除此之外陆相地层的白云岩、油页岩、火山灰中也有分布,甚至在海相地层、煤系地层中也有发现<sup>[51-53]</sup>。

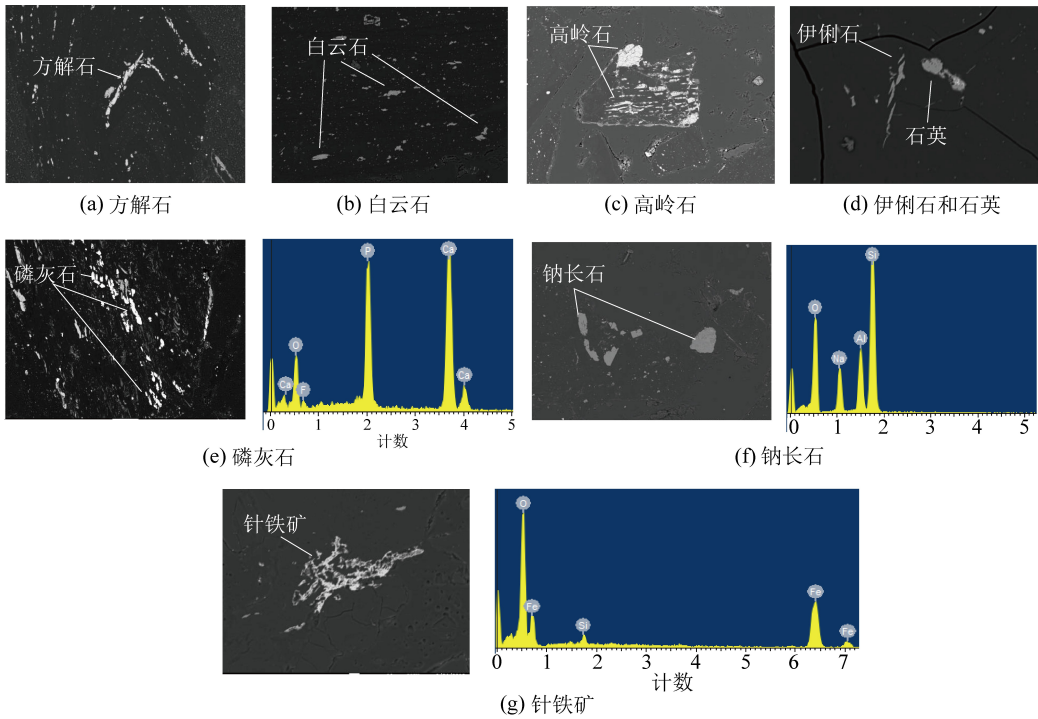


图5 电子探针下6号煤中的矿物

Fig.5 Minerals in No.6 coals under SEM-EDX

表1 小黄山6号煤的工业分析、全硫及形态硫分析和发热量分析

Table 1 Proximate, forms of sulfur, and gross calorific value of No. 6 coals from Xiaohuangshan Coal Mine								
样品	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	$w(S)_{t,d}/\%$	$w(S)_{p,d}/\%$	$w(S)_{s,d}/\%$	$w(S)_{o,d}/\%$	$Q_{gr,ad}/MJ$
6-1	4.09	2.03	31.32	0.29	0.03	0.08	0.17	33.28
6-2	4.39	2.11	31.62	0.29	0.03	0.08	0.18	34.72
6-3	4.46	4.31	32.27	0.27	0.03	0.17	0.07	33.69
6-4	4.51	3.95	33.41	0.42	0.15	0.23	0.04	35.68
6-5	5.27	3.05	37.45	0.38	0.20	0.17	0.01	32.76
6-6	4.78	3.65	33.43	0.41	0.19	0.21	0.01	34.91
6-7	4.85	3.31	33.49	0.38	0.15	0.20	0.03	35.76
6-8	4.88	1.65	34.19	0.27	0.14	0.08	0.05	33.46
6-9	4.93	1.69	34.22	0.23	0.02	0.05	0.16	32.17
6-10	5.06	2.35	34.64	0.21	0.02	0.04	0.15	33.56
6-11	5.64	1.60	35.91	0.23	0.02	0.04	0.17	34.89
平均值	4.81	2.70	33.81	0.31	0.09	0.12	0.09	34.08

表 2 小黄山 6 号煤煤灰中的常量元素含量

Table 2 Contents of major elements (in form of oxide) in coal ashes from Xiaohuangshan Coal Mine (%)

样品编号	w(SiO <sub>2</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(MgO)	w(CaO)	w(Na <sub>2</sub> O)	w(K <sub>2</sub> O)	w(TiO <sub>2</sub> )	w(MnO <sub>2</sub> )	w(SO <sub>3</sub> )
6-1	19.04	12.23	12.14	1.75	10.44	14.38	0.80	0.65	0.16	28.41
6-2	20.17	13.25	14.75	2.96	6.98	15.21	0.98	0.52	0.14	25.04
6-3	18.50	9.18	7.50	11.50	12.44	7.53	0.20	0.73	0.26	32.16
6-4	19.72	6.32	7.41	12.79	13.28	7.41	0.26	0.65	0.02	32.14
6-5	20.33	5.66	7.89	13.57	12.38	6.99	0.29	0.54	0.02	32.33
6-6	20.34	6.23	28.47	0.83	11.21	7.64	0.34	0.45	0.21	24.28
6-7	19.06	6.66	26.96	1.17	11.46	7.46	0.41	0.52	0.2	26.10
6-8	24.38	18.57	9.35	3.58	11.29	12.51	1.32	0.35	0.17	18.48
6-9	23.79	20.01	6.16	2.34	8.34	13.26	1.19	0.76	0.13	24.02
6-10	20.35	13.07	17.82	1.71	9.31	13.32	0.93	0.62	0.28	22.59
6-11	25.02	14.78	12.39	1.82	6.52	14.26	1.10	0.82	0.11	23.17
平均值	20.97	11.45	13.71	4.91	10.33	10.91	0.71	0.60	0.15	26.25

煤中的片钠铝石最早发现在新南威尔士东部悉尼盆地的二叠纪—三叠纪煤系地层中<sup>[54]</sup>,但对煤中的片钠铝石的报道很少,研究发现小黄山 6 号煤层的低温灰中片钠铝石(图 4)相对质量分数高达 24.16%,仅次于白云石(45.57%)。地质现象和矿物试验研究表明片钠铝石形成于高 CO<sub>2</sub> 分压,碱性流体环境中<sup>[55-57]</sup>,如发育在海拉尔盆地乌尔逊凹陷中的片钠铝石与 CO<sub>2</sub> 含量成正比,CO<sub>2</sub> 含量高则片钠铝石含量高,反之亦然<sup>[58]</sup>。同时乌尔逊凹陷中含片钠铝石的地层水 pH 为 8.2~8.7。研究发现将 CO<sub>2</sub> 注入富含铝硅酸盐矿物的地层中时,CO<sub>2</sub> 会与这些矿物反应形成片钠铝石<sup>[59]</sup>,其原因是铝硅酸盐矿物易被片钠铝石交代,其中斜长石被片钠铝石交代的现象尤为普遍,片钠铝石有时会选择性的交代条纹长石中的钠长石部分<sup>[60]</sup>,钾长石和伊利石被片钠铝石交代也有所见,其反应过程见文献<sup>[59]</sup>。代世峰等<sup>[61]</sup>发现云南砚山煤层中的片钠铝石是透长石矿物在碱性流体热液环境下被交代形成,片钠铝石对铝硅酸盐矿物的交代实际上是获取片钠铝石形成所需 Na<sup>+</sup> 和 Al<sup>3+</sup>。当钠长石水解时可释放出 Na<sup>+</sup> 和 Al<sup>3+</sup>,而钾长石可释放出 Al<sup>3+</sup>,其他矿物如蒙脱石,云母等铝硅酸盐矿物也是 Na<sup>+</sup> 和 Al<sup>3+</sup> 的来源。研究表明在 Na<sub>2</sub>O—CaO—SiO<sub>2</sub>—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—CO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O 体系中,当钠长石、蒙脱石和云母所处 CO<sub>2</sub> 分压分别在 102.91、105.21、103.17 Pa 甚至更低时这些矿物便可变成成为片钠铝石<sup>[58,62]</sup>,出露于南部的天山山前地带的石炭系下统的中酸性火成岩为片钠铝石的形成提供了硅铝酸盐类矿物(如前所述的钠长石)。

阜康地区煤、石油、天然气等资源丰富,有机质在煤化过程中释放的 CO、CO<sub>2</sub>,为片钠铝石的形成提供给了条件。八道湾组沉积时期物源区为南部的

天山区域<sup>[41]</sup>,古河流沿岩石裂隙及构造破碎带由高处向低洼处运移至泥炭沼泽区域,在流动时经过不同的地质单元时,会溶解其中的离子使水体化学成分发生变化,石炭系的中酸性火山岩(岩性主要为安山质火山岩、中酸性凝灰岩)中矿物水解提供了形成片钠铝石所需要的 Na<sup>+</sup> 和 Al<sup>3+</sup><sup>[42]</sup>。因此推测 6 号煤中的片钠铝石是由流水带入的 Na<sup>+</sup> 和 Al<sup>3+</sup>(或硅酸盐矿物在水解过程中释放的 Na<sup>+</sup> 和 Al<sup>3+</sup>) 在高的 CO<sub>2</sub> 分压下形成。研究区地表水 pH 为 8.9,地下水 pH 为 7.5~9.0,均属于弱碱性水<sup>[40]</sup>,这为片钠铝石的保存提供了条件。

方解石、白云石、铁白云石、菱铁矿等碳酸盐矿物通常作为后生矿物充填在煤的裂隙中<sup>[43]</sup>,主要是由煤化过程中产生的 CO 和 CO<sub>2</sub> 与赋存在煤中的流体反应形成。如图 5e 和 5f 所示,白云石和方解石主要充填在裂隙中,为后生矿物。此外,阜康地区地下水相对于方解石和白云石接近饱和,方解石和白云石饱和指数分别为 -2.33~1.06 和 -4.25~2.00<sup>[40]</sup>。由于地下水活动的影响,碳酸钙容易沉淀在煤的裂隙和层面,导致煤中的方解石通常呈脉状分布。

3.3.3 磷酸盐矿物

磷是煤中的有害元素之一,在炼焦过程中部分磷会进入焦炭中,用焦炭冶炼时,其中的磷又会和铁发生从而反应影响钢材的质量,因此磷含量是煤质的重要指标之一<sup>[63-64]</sup>。磷灰石是煤中常见的磷酸盐矿物,根据附加阴离子的不同分为氟磷灰石 Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F、氯磷灰石 Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Cl、羟磷灰石 Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)和碳酸盐磷灰石等<sup>[65]</sup>,一般意义上的磷灰石指的是氟磷灰石。煤中的磷通常与夹矸共生,或受火山灰影响而成<sup>[65-69]</sup>。除此之外在泥炭形



成时期有机物中含磷蛋白质的分解可以将磷释放出来,并在适当的化学条件下形成含磷的矿物沉积在泥炭沼泽中<sup>[70]</sup>。地质资料表明阜康地区在成煤时期未受到火山活动的影响,如图5g和5h所示,充填在裂隙中的磷灰石为后生矿物,其形成可能与热液活动或者是有机物分解过程释放出的磷再沉淀形成。

### 3.3.4 氧化物矿物

研究观察到的氧化物矿物有石英和针铁矿。石英是煤中最主要的氧化物矿物,针铁矿在煤中较为少见,虽然XRD图谱中没有出现,但在电子探针下见。如图5i和5j所示,针铁矿呈网状充填在煤的裂隙中,表明为后生矿物。煤中的赤铁矿和结晶能力弱的铁氧化物可能来自于煤中的铁硫化物(如黄铁矿)暴露在大气环境中形成<sup>[1]</sup>。在矿区北部处于风氧化带内的煤层具有自燃现象,火烧区在地表多沿煤层露头呈带状东西向展布<sup>[71]</sup>,小黄山煤矿正处于煤层自然带上,因此煤中铁的硫化物极有可能被氧化为赤铁矿,针铁矿等氧化物。煤中的石英呈次圆状分布在煤中,如图5c和5d所示,表明石英经过长距离搬运沉积在泥炭中,推测其来源于天山物源区。

## 4 结 论

1)阜康矿区小黄山煤矿侏罗纪八道湾组6号煤属中高挥发、特低灰分、特低硫、特高热值煤;煤灰中 $\text{Na}_2\text{O}$ 的平均相对质量分数为10.91%,远高于中国动力煤煤灰中 $\text{Na}_2\text{O}$ (1%)的相对质量分数。煤中的矿物并非Na的主要来源,煤中的Na可部分来自于表土层中的Na,地表水在下渗透过程中将其带入到煤层中,部分来源于中生代地层中具有超压的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 型水。

2)6号煤的低温灰中含有较高的片钠铝石(相对质量分数24.16%),这在煤中较少见,此之外鉴定出的矿物还有白云石(45.57%)、石英(12.26%)、钠长石(7.67%)、方解石(2.91%),且在电子探针下还发现了少量的伊利石、磷灰石、针铁矿等矿物。

3)泥炭在煤化过程中产生的CO和 $\text{CO}_2$ 与在泥炭沉积时期由流水带入沼泽的硅酸盐矿物(如钠长石等)反应形成片钠铝石,研究区的碱性地下水为片钠铝石的保存提供了条件。白云石和方解石主要充填在煤的裂隙中为后生矿物,为地下水中溶解的矿物质沉淀而成;磷灰石作为后生矿物由热液活动或者是有机物分解过程释放出的磷在适当的化学条件下再沉淀形成;针铁矿为煤中铁的硫化物被氧化形成。

### 参考文献(References):

- [1] WARD C R. Analysis, origin and significance of mineral matter in coal: an updated review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 165, 1–27.
- [2] SUN Y Z, ZHAO C L, QIN S J. Occurrence of some valuable elements in the unique high-aluminium coals from the Jungar Coalfield, China. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72, 659–668.
- [3] DAI S, REN D, CHOU C, *et al.* Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94, 3–21.
- [4] TIAN H, LU L, HAO J, *et al.* A review of key hazardous trace elements in Chinese Coals: abundance, occurrence, behavior or during coal combustion and their environmental impacts[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(2), 601–614.
- [5] 张德祥, 龙永华, 高晋生, 等. 煤灰中矿物的化学组成与灰熔融性的关系[J]. *华东理工大学学报*, 2009, 29(6), 590–594.  
ZHANG Dexiang, LONG Yonghuang, GAO Jinsheng, *et al.* Relationship between the coal ash fusibility and its chemical composition[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2009, 29(6), 590–594.
- [6] 张守玉, 陈川, 施大钟, 等. 高钠煤燃烧利用现状[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(5), 1–12.  
ZHANG Shouyu, CHEN Chuan, SHI Dazhong, *et al.* Situation of Combustion Utilization of High Sodium Coal[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(5), 1–12.
- [7] 赵新法, 杨黎燕, 石振海. 煤中矿物质在气化反应中的催化作用分析[J]. *煤炭技术*, 2005(1), 106–108.  
ZHAO Xinfu, YANG Liyan, SHI Zhenhai. Analysis on catalysis of mineral in coal gasification[J]. *Coal Technology*, 2005(1), 106–108.
- [8] 赵俊梅, 王雄, 卢财, 等. 煤中矿物质对高温气化反应的影响[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(9), 368–369.  
ZHAO Junmei, WANG Xiong, LU Cai, *et al.* Influence of minerals in coal to high temperature gasification reaction[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(9), 368–369.
- [9] 李鑫, 庄新国, 周继兵, 等. 准东煤田中部矿区西山窑组巨厚煤层煤相分析[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(5), 84–89.  
LI Xin, ZHUANG Xinguo, ZHOU Jibing, *et al.* Coal facies analysis of thick coal seam of middle jurassic xishanyao formation in the Middle Part of Eastern Junggar Coal Field, Xinjiang[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(5), 84–89.
- [10] 程爱国, 曹代勇, 袁同兴, 等. 中国煤炭资源赋存规律与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [11] 庄新国, 王平, 周继兵, 等. 准东煤田煤地球化学特征[J]. *新疆地质*, 2013, 31(1), 94–98.  
ZHUANG Xinguo, WANG Ping, ZHOU Jibing, *et al.* Geochemical characteristics of Zhundong Coalfield[J]. *Xinjiang Geological*, 2013, 31(1), 94–98.
- [12] 周继兵, 庄新国, 张东亮. 新疆准东煤田东部层序地层学及聚煤规律研究[J]. *新疆地质*, 2010, 28(3), 334–338.  
ZHOU Jibing, ZHUANG Xinguo, ZHANG Dongliang. Sequence stratigraphy analysis and coal accumulation in the east of zhundong[J]. *Xinjiang Geology*, 2010, 28(3), 334–338.

- [13] 白向飞,王 越,丁 华,等.准东煤中钠的赋存状态[J]. 煤炭学报,2015,40(12):2909–2915.  
BAI Xiangfei, WANG Yue, DING Hua, *et al.* Modes of occurrence of sodium in Zhundong coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12):2909–2915.
- [14] 宋 岩. 准噶尔盆地天然气聚集区带地质特征[M]. 北京:石油工业出版社 1995.
- [15] 王 佟,冯 帆,江 涛,等. 新疆准噶尔含煤盆地基本构造格架与认识[J]. 地质学报,2016,90(4):628–638.  
WANG Tong, FENG Fan, JIANG Tao, *et al.* Fundamental structural framework and cognition of Junggar Coal Basin, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4):628–638.
- [16] 鲍志东,刘 凌,张冬玲,等.准噶尔盆地侏罗系沉积体系纲要[J]. 沉积学报,2005,23(2):194–202  
BAO Zhidong, LIU Ling, ZHANG Dongling, *et al.* Depositional system frameworks of the Jurassic in Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2):194–202
- [17] 张 泓. 中国西北侏罗纪含煤地层与聚煤规律[M]. 北京:地质出版社 1998.
- [18] 陈彬滔,于兴河,王天奇,等. 准噶尔盆地南缘中下侏罗统含煤层系层序地层及聚煤控制因素[J]. 沉积学报,2014,32(1):61–67.  
CHEN Bintao, YU Xinghe, WANG Tianqi, *et al.* Characteristics of sequence stratigraphy and coal accumulation controlling factors of Lower – Middle Jurassic Coal – bearing Series, South Margin of Junggar Basin, NW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1):61–67.
- [19] 方世虎,郭召杰,吴朝东,等. 准噶尔盆地南缘侏罗系碎屑成分特征及其对构造属性、盆山格局的指示意义[J]. 地质学报,2006,80(2):30–43.  
FANG Shihu, GUO Zhaojie, WU Chaodong, *et al.* Jurassic clastic Composition in the Southern Junggar Basin, Northwest China: implications for Basin – Range Pattern and Tectonic Attributes[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2):30–43.
- [20] 陈丹丹,吉鸿杰,陶辉飞,等. 准东地区阜康凹陷南部中下侏罗统沉积特征与沉积演化模式[J]. 天然气地球科学,2015,26(11):2093–2106.  
CHEN Dandan, JI Hongjie, TAO Huifei, *et al.* Sedimentary characteristics and evolution model of the Middle–Early Jurassic on the south of Fukang Sag in eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(11):2093–2106.
- [21] GB/T 482—2008, 煤层煤样采取方法[S].
- [22] GB/T 474—2008, 煤样的制备方法[S].
- [23] GB/T 211—2007, 煤中全水分的测定方法[S].
- [24] GB/T 212—2008, 煤的工业分析方法[S].
- [25] GB/T 214—2007, 煤中全硫的测定方法[S].
- [26] GB/T 213—2008, 煤的发热量测定方法[S].
- [27] GB/T 25189—2010, 微束分析扫描电镜能谱仪定量分析参数的测定方法[S].
- [28] GB/T 15224—2010, 煤炭质量分级标准[S].
- [29] MT/T 1074—2008, 煤中碱金属(钾、钠)含量分级[S].
- [30] LI X, LI J, WU GG, *et al.* Clean and efficient utilization of sodium rich Zhundong coals in China: behaviors of sodium species during thermal conversion processes[J]. Fuel, 2018, 218:162–173.
- [31] LI G, LI S, HUANG Q, *et al.* Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high – sodium lignite in a down-fired furnace[J]. Fuel, 2015, 143:430–437.
- [32] SONG G L, QI X B, SONG W J, *et al.* Slagging and fouling of Zhundong coal at different air equivalence ratios in circulating fluidized bed[J]. Fuel, 2017, 205:46–59.
- [33] 汉春利,张 军,刘坤磊,等. 煤中钠存在形式的研究[J]. 燃料化学学报,1999,27(6):575–578.  
HAN Chunli, ZHANG Jun, LIU Kunlei, *et al.* Modes of occurrence of sodium in coals[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1999, 27(6):575–578.
- [34] 刘大海,张守玉,陈 川,等. 新疆高钠煤脱钠提质过程中钠存在形式[J], 煤炭学报,2014,39(12):2519–2524.  
LIU Dahai, ZHANG Shouyu, CHEN Chuan, *et al.* Existence form of sodium in the high sodium coals from Xinjiang during its sodium removal process[J], Journal of the China Coal Society, 2014, 39(12):2519–2524.
- [35] 白向飞,王 越,丁 华,等. 准东煤中钠的赋存状态[J]. 煤炭学报,2015,40(12):2909–2915.  
BAI Xiangfei, WANG Yue, DING Hua, *et al.* Modes of occurrence of sodium in Zhundong coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12):2909–2915.
- [36] 宫亚军. 准噶尔盆地腹部中生界地层水特征及油气地质意义[J]. 新疆石油地质,2017,38(5):524–529.  
GONG Yajun. Mesozoic formation water characteristics and hydrocarbon geological significance in the Hinterland of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(5):524–529.
- [37] VOAST W, MONTANA V. Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87:667–676.
- [38] 王建涛. 阜康矿区煤层气开发区块划分与潜力评价[D]. 焦作:河南理工大学,2016.
- [39] 李 勇,曹代勇,魏迎春,等. 准噶尔盆地南缘中低煤阶煤层气富集成藏规律[J]. 石油学报,2016,37(12):1472–1482.  
LI Yong, CAO Daiyong, WEI Yingchun, *et al.* Middle to low rank coalbed methane accumulation and reservoiring in the southern margin of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12):1472–1482.
- [40] 李 巧. 准噶尔盆地平原区地下水水质时空演化研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.
- [41] 方世虎,郭召杰,宋 岩,等. 准噶尔盆地南缘侏罗纪沉积相演化与盆地格局[J]. 古地志学报,2005,7(3):347–356.  
FANG Shihu, GUO Zhaojie, SONG Yan, *et al.* Sedimentary facies evolution and basin pattern of the Jurassic in southern margin area of Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(3):347–356.
- [42] 白 斌. 准噶尔南缘构造沉积演化及其控制下的基本油气地质条件[D]. 西安:西北大学,2008.
- [43] WARD C R. Analysis and significance of mineral matter in coal seams[J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 50(1):135–168.
- [44] DAI SF, REN DY, CHOU CL, *et al.* Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. International Journal of Coal[J]. Geology, 2012, 94(3):3–21.
- [45] 任德贻,赵峰华,代世峰,等. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [46] STOCH L, SM GRA W. Transformation of micas in the process of



- ka olinization of granites and gneisses[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1976, 22: 156–162.
- [47] BERNER R A, HOLDREN G R. Mechanism of feldspar weathering; some observational evidence[J]. *Geology*, 1977(5): 369–372.
- [48] BANFIELD J F, EGGLETON R A. Analytical transmission electron microscope studies of plagioclase, muscovite and K-feldspar weathering[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1990, 38(1): 77–89.
- [49] 刘立, 高玉巧, 曲希玉, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机CO<sub>2</sub>气储层的岩石学与碳氧同位素特征[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2229–2236.
- LIU Li, GAO Yuqiao, QU Xiyu, *et al.* Petrology and carbon-oxygen isotope of inorganic CO<sub>2</sub> gas reservoir in Wuerxun depression, Hailaer basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2229–2236.
- [50] 高玉巧, 刘立. 含片钠铝石砂岩的基本特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2007, 53(1): 104–111.
- GAO Yuqiao, LIU Li. Basic characteristics of dawsonite-bearing sandstone and its geologic significance[J]. *Geological Review*, 2007, 53(1): 104–111.
- [51] BAKER J C, BAI G P, HAMILTON P J, *et al.* Continental-scale magmatic carbon dioxide seepage recorded by dawsonite in the Bowen—Gunnedah—Sydney basin system, eastern Australia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65(3): 522–530.
- [52] LOUGHNAN F C, SEE G T. Dawsonite in the greta coal measure muswellbrook, New South Wales[J]. *American Mineralogist*, 1967, 52: 216–219.
- [53] GOLDBERY R, LOUGHNAN F C. Dawsonite and nordstrandite in Permian Berry Formation of the Sydney Basin[J]. *American Mineralogist*, 1970, 55: 477–490.
- [54] LOUGHNAN F C, GOLDBERG R. Dawsonite and analcite in the Singleton coal measures of the Sydney Basin[J]. *Am Mineral*, 1972, 57: 1437–1447.
- [55] 徐衍彬, 陈平, 徐永成. 海拉尔盆地碳钠铝石分布与油气的关系[J]. *石油与天然气地质*, 1994(4): 322–327.
- XU Yanbin, CHEN Ping, XU Yongcheng. NaAlCO<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub> distribution and its relationship with oil and gas in Hailar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994(4): 322–327.
- [56] 高玉巧, 刘立. 自生片钠铝石的碳氧同位素特征及其成因意义[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 522–529.
- GAO Yuqiao, LIU Li. Carbon-Oxygen Isotopic Characteristics of authigenic dawsonite and its genetic significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(4): 522–529.
- [57] 高玉巧, 刘立, 曲希玉. 片钠铝石的成因及其对CO<sub>2</sub>天然气运聚的指示意义[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(10): 1083–1088.
- GAO Yuqiao, LIU Li, QU Xiyu. Genesis of dawsonite and its indication significance of CO<sub>2</sub> migration and accumulation[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(10): 1083–1088.
- [58] 曲希玉, 刘立, 高玉巧, 等. 砂岩中片钠铝石的特征及其稳定性研究[J]. *地质论评*, 2008, 54(6): 837–844.
- QU Xiyu, LIU Li, GAO Yuqiao, *et al.* Characteristics and stability analysis of dawsonite in sandstone[J]. *Geological Review*, 2008, 54(6): 837–844.
- [59] AMIN S M, WEISS D J, BLUNT M J. Reactive transport modelling of geologic CO<sub>2</sub> sequestration in saline aquifers: the influence of pure CO<sub>2</sub> and of mixtures of CO<sub>2</sub> with CH<sub>4</sub> on the sealing capacity of cap rock at 37°C and 100 bar[J]. *Chemical Geology*, 2014, 367: 39–50.
- [60] WORDEN R H. Dawsonite cement in the Triassic Lam Formation, Shabwa Basin, Yemen: a natural analogue for a potential mineral product of subsurface CO<sub>2</sub> storage for greenhouse gas reduction[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2006, 23(1): 61–77.
- [61] DAI S, REN D, ZHOU Y, *et al.* Mineralogy and geochemistry of a superhigh-organic-sulfur coal, Yanshan Coalfield, Yunnan, China: evidence for a volcanic ash component and influence by submarine exhalation[J]. *Chemical Geology*, 2008, 255(1): 182–194.
- [62] RYZHENKO B N. Genesis of dawsonite mineralization: thermodynamic analysis and alternatives[J]. *Geochemistry International*, 2006, 44(8): 835–840.
- [63] 涂华, 李文华, 白向飞. 中国煤中磷的分布特征[J]. *燃料化学学报*, 2011, 39(9): 641–646.
- TU H, LI W, BAI X. Distribution of phosphorus in Chinese coals[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2011, 39(9): 641–646.
- [64] RAO P, WALSH D. Influence of environments of coal deposition on phosphorous accumulation in a high latitude, northern Alaska, coal seam[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 38: 261–284.
- [65] WARD CR, CORCORAN JF, SAXBY JD, *et al.* Occurrence of phosphorus minerals in Australian coal seams[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1996, 31: 185–210.
- [66] 康健. 乌海石炭二叠纪煤中元素的分布规律和矿物质富集机理[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
- [67] CROWLEY S S, STANTON R W, RYER T A. The effects of volcanic ash on the maceral and chemical composition of the coal bed, Emery Coal Field, Utah[J]. *Organic Geochemistry*, 1989, 14: 315–331.
- [68] HOWER J C, RUPPERT L F, EBLE C F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the fire clay coal bed, eastern Kentucky[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 39: 141–153.
- [69] BROWNFIELD M E, AFFOLTER R H, STRICKER G D. Crandallite group minerals in the Capps and Q Coal beds, Tyonek Formation, Beluga energy resource area, south-central Alaska. In: Rao PD (ed). *Focus on Alaska's Coal 86*, Mineral Industry Research Laboratory Report[R]. 1986, 72: 142–149.
- [70] KANG J, LI X. Modes of occurrence of minerals in the Carboniferous coals from the Wuda Coalfield, northern China: with an emphasis on apatite formation[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(12): 606.
- [71] 寇宏杰, 王琰章. 新疆淮南煤田阜康市煤圈沟井田火烧区特征及煤层自燃因素探析[J]. *中国煤炭地质*, 2017, 29(10): 15–17.
- KOU Hongjie, WANG Yanzhang. Probe into Fukang City Meiquangou Minefield Burning Area Features and coal spontaneous combustion factors in Southern Junggar Coalfield, Xinjiang[J]. *Coal Geology of China*, 2017, 29(10): 15–17.