



· 地球科学 ·

浅埋煤层烧变岩地球化学与变质矿物相特征

杨帆¹, 热西提·亚力坤², 薛小渊^{3,4}, 宋世骏², 胡俭¹, 张泽宇², 姬中奎^{3,4}, 黄雷²

(1. 陕西煤业化工集团神木张家峁矿业有限公司, 陕西 神木 719316; 2. 西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 3. 中国煤炭科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710054; 4. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘要 以陕北张家峁井田延安组², ³段烧变岩为研究对象, 对其进行岩石地球化学迁移规律以及变质矿物相特征分析。结果表明, 该区烧变岩为低碱性硅铝质变质岩, 横向上钙碱性分布不均一, 少部分烧变样品烧失量大且CaO含量高, Fe元素迁移聚集。Zr相容性比Hf更好, Ba元素富集可能与后期水文作用有关, 稀土元素分配趋势线为略微轻稀土富集型, 烧变作用对稀土元素的分配影响相对有限。烧变岩原生矿物多具有烧蚀特征, 镜下发育烧蚀边、气孔构造等, 新生矿物呈集合体充填矿物间或矿物裂缝中。矿物相组合与热接触变质作用中发生高热变质的透长岩相相近, 但变质压力更低, 温度更高。烧变岩层由下而上可分为薄层板状烧变岩、烧熔岩、厚层板状烧变岩、厚层层状烧变岩的岩石组合, 鳞石英+方石英相较莫来石+堇青石+赤铁矿能更好表征岩石烧变程度的强弱, 同层烧变岩下部烧变程度高于上部, 烧熔岩上部板状烧变岩烧变程度高于下部板状烧变岩。研究区烧变岩具有“隐伏”的特点, 且存在同沉积期烧变作用, 除暴露在河谷阶地的烧变岩层外, 部分烧变岩层埋于更新世地层和残余延安组地层之下。早期形成的烧变岩层后期被破坏, 多期烧变地层相互叠置形成现今火烧区。

关键词 烧变岩; 张家峁井田; 地球化学; 变质矿物相; 热接触变质作用; 透长岩相

中图分类号: P618.11 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-02-017

Geochemistry and metamorphic mineral facies of burned rocks in shallow coal beds

YANG Fan¹, YALIKUN Re Xiti², XUE Xiaoyuan^{3,4}, SONG Shijun²,
HU Jian¹, ZHANG Zeyu², JI Zhongkui^{3,4}, HUANG Lei²

(1. Shaanxi Coal and Chemical Industry Group, Shenmu Zhangjiamao Mining Co., Ltd., Shenmu 719316, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3. China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

4. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China)

Abstract The study focuses on the burnt rocks of the ² and ³ sections of the Yan'an Formation in Zhangjiamao Coalfield, Northern Shaanxi, and analyzes their geochemical migration patterns and metamorphic

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(42272148)

第一作者: 杨帆, 男, 高级工程师, 从事煤矿开采技术研究, 1311717786@qq.com。

通信作者: 黄雷, 男, 教授, 从事盆地分析和油气勘探研究, huanglei@nwu.edu.cn。

mineral facies characteristics. The results indicate that the burnt rocks in this area are low alkaline silicoaluminous metamorphic rocks, with uneven distribution of calcium and alkali horizontally. A small number of burnt rock samples have high loss on ignition and high CaO content, with Fe elements migrate and accumulate. Zr has better compatibility than Hf, and the enrichment of Ba element may be related to later hydrological processes. The trend line of rare earth element distribution is little L-REE enrichment, and the effect of burning on the distribution of rare earth elements is relatively limited. The primary minerals in burnt rocks often exhibit ablative characteristics, with the development of ablative edges and pore structures under the microscope. Newly formed minerals form aggregates and fill mineral spaces or fractures. The mineral facies combination is similar to the diorite facies that undergoes high thermal metamorphism during thermal contact metamorphism, but the metamorphic pressure is lower and the temperature is higher. The burnt rock layers can be divided from bottom to top into a combination of thin plate-like burnt rock, burnt lava, thick plate-like burnt rock, and thick layered burnt rock. tridymite + cristobalite content can better characterize the burning degree compared to mullite + cordierite + hematite content. The degree of burning in the lower part of the same layer burnt rock is higher than that in the upper part, and the burning degree of plate-like burnt rock in the upper part of the burnt lava is higher than that in the lower part. The burnt rocks in the research area have the "hidden" characteristic and have the same sedimentary period burnt effect. Except for the burnt rock layers exposed in the valley terrace, some of the burnt rock layers are buried under the Pleistocene strata and residual fan Formation strata. The early formation of burnt rock layers was later destroyed, and multiple stages of burnt rock layers overlapped to form the current burnt area.

Keywords burnt rock; Zhangjiamao minefield; geochemistry; metamorphic mineral facies; thermal contact metamorphism; diorite facies

近地表煤层自燃发生烧变作用,使沉积岩层热变质形成烧变岩,可根据烧变程度、岩石颜色和结构等特征分为烧熔岩和烧烤岩两类^[1]。这类岩石在世界范围内普遍存在,中国主要分布在北方煤田区侏罗系中、下统中的低变质特厚煤系地层中^[2-3]。鄂尔多斯盆地北部侏罗系煤层在地史时期的自燃烧变现象普遍发生,由于其与水文地质及煤矿开采安全问题相关性较大,得到较多关注与研究^[3-9]。

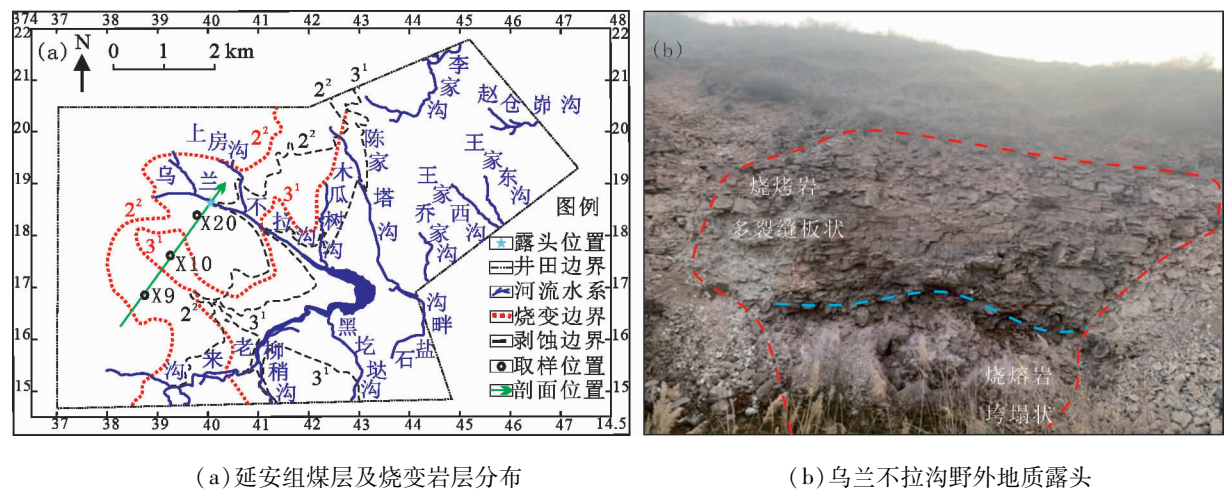
煤层自燃引起围岩的烧变过程可看作是一种特殊的高温热变质作用,这一变质作用是引起原岩物理性质和化学性质变化的关键。前人研究揭示,烧变作用使原岩层的岩石结构和物理性质发生改变,地层产生规模不等的断裂缝和不规则的通风口,并引起顶部地层塌陷^[10-11],而这种岩石力学性质改变与岩石高温相变有关^[12]。实际上,烧变岩作为一类常压下的高温变质岩石,可以很好地反映此类变质作用中的矿物相特征,以及不同温度作用下相应的矿物相转变规律,可为相关科学问题提供天然实验研究。因此,对岩石烧变特征的研究不仅有利于建立烧变岩的矿物学和岩相学格架,提高对烧变作用这一地质现象的认识,

而且还可为煤田安全生产、绿色开采等研究提供基础地质保障。本研究针对鄂尔多斯盆地北部张家塬煤田西部烧变岩的元素迁移和矿物相转化特征进行研究,旨在明确烧变岩在热变质形成过程中的矿物相及其转化规律。

1 研究区概况与样品特征

张家塬煤田研究区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡带上,构造简单,断层不发育,地层近水平向 NW 倾斜,倾角在 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 。井田地表大部分被第四系风积沙及黄土所覆盖,煤系地层延安组(J₂y)煤层及火烧区多出露于 SE 向的沟谷之中。前人在研究大量钻孔资料的基础上,勾划出延安组 2², 3¹段煤层剥蚀边界和火烧区边界:其走向为 NE—SW 向,火烧区范围自煤层剥蚀线(露头)沿延安组倾向向 NW 向延伸,达到一定深度后过渡为正常煤层[见图 1(a)]^[9]。对该区火烧区钻孔的富水性测试证实,不同烧变岩的含水性差异较大,前人研究认为这与火烧区的分布延伸、烧变岩本身性质、垂向位置组合等相关^[13]。井区内位于乌兰不拉沟内的野外露头剖面较好地展示了烧变

岩的发育特征〔见图 1(b)〕。



(a) 延安组煤层及烧变岩层分布 (b) 乌兰不拉沟野外地质露头

图 1 陕北神木地区张家峁井田火烧区概况

Fig. 1 Overview of Zhangjiamao coalfield burning area in Shenmu, Northern Shaanxi

露头区为延安组地层,内可见大块紫红色、砖红色岩体,厚度近 10 m,裂隙大规模发育且有泉水渗出。岩体分为上下两部分,上部颜色为砖红色,纵向裂缝发育,横向成层性差,呈相对孤立的板状产出,属板状烧烤岩;下部为紫红色,纵横向差异不明显,整体呈块状,岩石多呈角砾状从表面剥落,新鲜面可观察到发育孔洞,属烧熔岩。岩体整体向下发生垮塌,坡下有较多堆积物,向远离岩体一侧逐渐变少;邻近沉积层多为白色、黄白色,

脆弱且易碎,变为层状烧烤岩。本次研究对象为延安组 2²和 3¹ 煤层自燃形成的烧变岩,分别位于延安组第四段顶部和第三段顶部。研究中,基于钻孔岩心共采集 12 个样品进行详细的测试化验分析(见图 2);选取了 2 个原岩样品和 10 个具有典型烧变特征的样品进行对比研究(见表 1),开展主微量元素测试、XRD 衍射物相分析、扫描电镜和镜下薄片观察,并在此基础上对烧变岩的地球化学和矿物学特征进行研究。

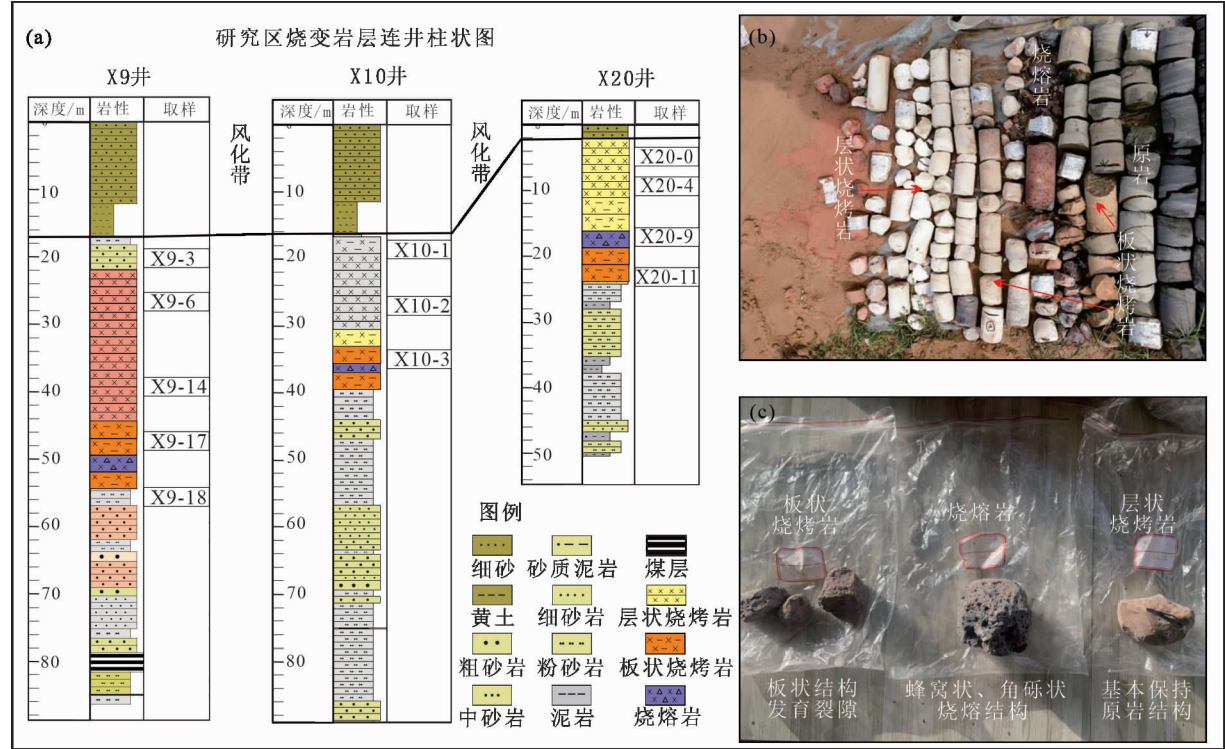


图 2 连井剖面岩性柱状图和岩心取样

Fig. 2 Bar graph of continuous well profile and lith

表 1 岩心取样井及岩性分类
Tab. 1 Sampling wells and lithology classification

样品号	层位	结构	钻孔岩性	烧变岩分类
X9-3	2 ²	砂质沉积层状	黄白色粉砂岩	原岩
X9-6	2 ²	层状,原岩结构略显	肉红色粉砂烧烤岩	层状烧烤岩
X9-14	2 ²	层状,原岩结构略显	肉红色细砂烧烤岩	层状烧烤岩
X9-17	2 ²	板状,局部发育碳化粗粒孔	棕红色中砂烧烤岩	板状烧烤岩
X9-18	2 ²	砂质沉积层状	黄色粉砂岩	原岩
X10-1	3 ¹	黏土泥质板状	白色泥质烧烤岩	板状烧烤岩
X10-2	3 ¹	黏土泥质层状	白色泥质烧烤岩	层状烧烤岩
X10-3	3 ¹	板状,原岩结构略显	黄白色中砂烧烤岩	板状烧烤岩
X20-0	2 ²	层状,原岩结构略显	黄白色细砂烧烤岩	层状烧烤岩
X20-4	2 ²	黏土泥质层状	黄白色泥质烧烤岩	板状烧烤岩
X20-9	2 ²	炉渣蜂窝状,原岩结构不可见	紫黑色烧熔岩	烧熔岩
X20-11	2 ²	板状,发育裂隙及碳化孔	棕红色细砂烧烤岩	板状烧烤岩

2 地球化学特征

2.1 主量元素

样品的主量元素质量分数和烧失量见表 2。样品中 SiO₂ 质量分数除 X20-9 烧熔岩样品

(48.89%)外,质量分数介于 61.98% ~ 77.77%; Al₂O₃ 质量分数除 X9-3 原岩样品(1.48%)外,其质量分数介于 11.59% ~ 22.35%,X20 井样品略低于其他井;CaO 质量分数 X20 井与 X9-3 样品大于 5%,其他样品则小于 1%。

表 2 主量元素化学分析结果
Tab. 2 Chemical analysis results of major elements

编号	氧化物质量分数/%											岩性
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LoI	
X9-3	71.82	0.37	1.48	0.51	0.95	0.74	12.8	0.10	0.13	0.02	10.69	原岩
X9-6	71.56	1.03	20.58	2.02	<0.01	0.58	0.15	0.19	2.97	0.12	0.56	层状烧烤岩
X9-14	72.23	1.04	17.25	3.04	0.03	0.97	0.51	0.93	2.70	0.25	0.95	层状烧烤岩
X9-17	69.14	0.74	16.89	5.79	0.09	1.08	0.93	1.24	2.81	0.12	0.96	板状烧烤岩
X9-18	66.30	0.85	17.33	3.34	0.02	1.21	0.63	2.28	2.85	0.18	4.91	原岩
X10-1	62.87	0.90	22.35	7.07	0.08	2.10	0.49	1.02	2.76	0.21	0.41	板状烧烤岩
X10-2	77.77	0.72	19.33	1.04	<0.01	0.14	0.05	0.06	0.38	0.02	0.69	层状烧烤岩
X10-3	65.60	0.92	21.88	4.99	0.03	2.02	0.33	0.39	2.59	0.19	0.90	板状烧烤岩
X20-0	69.01	0.68	13.34	4.89	0.08	2.12	5.18	1.50	2.48	0.10	0.55	层状烧烤岩
X20-4	61.98	0.89	17.61	7.61	0.17	2.15	5.56	0.95	2.39	0.15	0.34	板状烧烤岩
X20-9	48.89	0.60	11.59	4.27	0.07	2.11	19.6	0.96	1.76	0.12	9.63	烧熔岩
X20-11	62.09	0.65	12.59	4.78	0.10	1.22	11.5	1.28	1.69	0.12	3.69	板状烧烤岩

注:数据来自西北大学大陆动力学国家重点实验室测试结果。

由 Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂ 三元相图可知〔见图 3 (a)],岩样主要为硅铝质,镁铁组分含量相对较少,TFe₂O₃ + MgO 质量分数平均值为 4.76%,而原岩与烧变岩差异性小,即使烧熔岩样也相差不大。P₂O₅ 的质量分数极低,均小于 0.25%。金属氧化物 Fe + Mn + Mg + Ti-CaO-Na₂O + K₂O 的三

端元图中[见图 3(b)],烧变岩烧变程度与元素分布之间相关性较差,表现出与样品所在钻孔的不同相关,X20 井样品表现为低碱高钙,而 X9

井、X10 井除 X9-3 样品外表现为低碱低钙。处于同层段的 X9 井和 X20 井差异却较大,表明岩石横向具有不均一性。

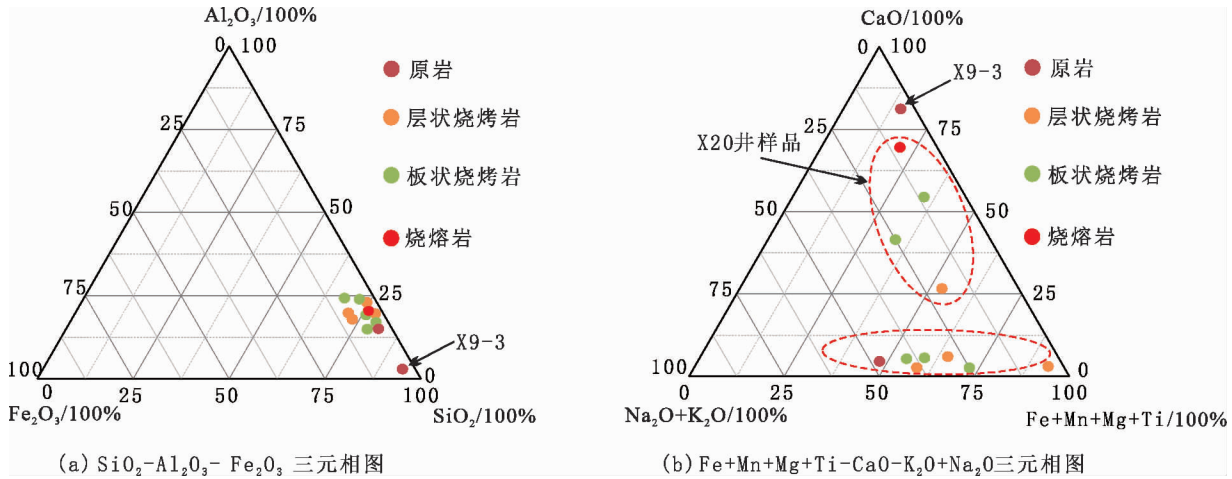


图 3 烧变岩元素质量分数关系图

Fig. 3 Relationship between main elements of burnt rock

此外,从几个样品的 Fe 质量分数来看(见表 2),原岩与烧变岩全铁质量分数差别较大,原岩样品 TFe_2O_3 平均质量分数为 1.92%,X9 井、X10 井和 X20 井烧变岩 TFe_2O_3 平均质量分数分别为 3.62%、4.37% 和 5.39%,这说明 Fe 元素在烧变过程中可能发生了局部聚集。样品中原岩的烧失量分别为 4.91% 和 10.69%,烧变岩中 X20-9 烧熔岩和 X20-11 板状烧变岩的烧失量为 9.63% 和 3.69%,其余均小于 1%。烧变岩经历了高温烘烤作用,其烧失量应当较小,X20-9、X20-11 的高烧失量可能是由于其 CaO 质量分数较高造成的(二者质量分数分别为 19.6% 和 11.45%),烧变后充填方解石脉未经高温,易挥发成分含量较高。

整体而言,研究区烧变岩是一类长英质变质岩(硅铝质系列),烧变过程中 Fe 元素发生迁移聚集,铁元素质量分数高于原岩,与前人在该区烧变岩地化特征研究结果一致^[14];同层样品钙碱性不同表明岩石横向不均一,后期 CaO 等充填影响了烧变岩烧失量的变化。

2.2 微量元素

各样品的微量元素质量分数见表 3。样品中,烧变岩亲石元素的 Rb、Ba 质量分数高于原岩[(见图 4(a))],Sr 质量分数低,Cs、Eu 相对亏损。高场强元素中 Zr 质量分数在所有样品中普遍较高[见图 4(b)](层状烧变岩样略高于其他岩样),除 Zr 外其余元素丰度较低,不同类型岩样均具有 Y、Zr、Pb 富集的特征;高场强元素在烧变作

用下变化不显著;而样品中过渡族元素分布规律性较差[见图 4(c)]。高场强元素中,Zr 与 Hf 电价和离子半径相近,二者在岩浆演化中往往具有相似的化学性质^[15],但在所研究样品中,即使是在烧熔岩中也表现为 Zr 质量分数异常高,表现为 Zr 相容性比 Hf 更高,这表明元素迁移过程在这种近地表烧变过程和地下岩浆熔融再冷却过程中存在差异。此外,在所有样品中,Ba 元素的质量分数平均值高于 0.000 2%。Ba 是一类地球化学性质活泼的金属,易受到岩石风化、植物根吸、大气水循环等因素影响^[16],本研究中,所有样品中 Ba 出现富集,推测可能与烧变后发生的水文地质作用有关。

2.3 稀土元素

各样品的稀土元素质量分数见表 3。分别利用球粒陨石和上地壳稀土元素丰度值对样品的稀土元素数据进行标准化后做蛛网图^[17](见图 5)。由图 5 可知,样品的稀土元素丰度趋势曲线出现差异化分布,分为 3 类不同的趋势。①X9-6 烧变岩明显右倾,与其他样品之间存在一个数量级的差距,且 LREE 明显富集,配分相对趋缓,HREE 则彼此相差较大,表现为明显的轻稀土富集型曲线。②X10-2 烧变岩和 X9-3 原岩的趋势相近,HREE 丰度略高,曲线向左侧略微倾斜,表现为轻稀土略微亏损。③其他样品则均趋于平坦,轻稀土略微富集右倾,稀土元素丰度更接近碎屑岩整体水平。

表 3 微量元素和稀土元素化学分析结果

Tab. 3 Chemical analysis results of trace elements & rare earth elements

单位:10⁻⁶

名称	X10-1	X10-2	X10-3	X20-0	X20-4	X20-9	X20-11	X9-3	X9-6	X9-14	X9-17	X9-18
Li	77. 6	5. 2	47. 0	29. 4	23. 6	24. 8	27. 5	9. 9	18. 2	13. 3	16. 7	36. 2
Be	2. 2	2. 0	4. 0	2. 1	2. 6	1. 8	2. 0	0. 7	5. 4	2. 4	3. 1	2. 2
Sc	16. 4	8. 2	20. 4	12. 5	15. 9	11. 5	11. 3	1. 7	29. 6	12. 8	16. 1	13. 7
V	115. 0	59. 4	139. 5	62. 8	119. 6	77. 0	87. 7	27. 3	131. 5	104. 5	125. 2	101. 8
Cr	108. 5	94. 0	117. 4	73. 3	90. 8	70. 4	68. 8	12. 2	122. 9	95. 4	97. 0	260. 4
Co	89. 1	172. 3	139. 4	78. 0	83. 0	37. 1	68. 3	112. 2	150. 4	127. 6	99. 5	33. 2
Ni	54. 1	13. 2	51. 3	39. 2	48. 1	33. 1	32. 4	11. 4	22. 7	37. 0	32. 9	24. 3
Cu	36. 7	5. 5	28. 3	21. 3	6. 1	23. 2	34. 3	3. 8	42. 0	15. 9	21. 8	27. 9
Zn	193. 3	24. 9	116. 8	72. 7	92. 9	57. 7	74. 5	7. 8	160. 5	85. 2	11. 6	95. 6
Ga	29. 1	18. 1	28. 8	16. 2	23. 4	15. 2	16. 4	2. 1	29. 9	19. 9	21. 6	21. 3
Ge	1. 0	0. 4	0. 7	0. 7	1. 1	1. 0	0. 9	1. 9	3. 0	0. 7	1. 1	0. 8
Rb	100. 3	28. 7	104. 6	98. 0	113. 7	76. 6	63. 1	4. 2	212. 1	90. 5	93. 3	94. 7
Sr	95. 4	22. 9	72. 3	161. 1	198. 5	185. 3	160. 8	94. 2	89. 9	87. 4	144. 6	280. 5
Y	30. 7	6. 4	34. 7	26. 3	25. 5	23. 8	22. 0	12. 3	100. 8	28. 2	32. 8	29. 9
Zr	148. 7	292. 0	168. 3	234. 8	227. 3	157. 4	251. 3	123. 0	351. 5	539. 1	247. 0	250. 3
Nb	18. 0	11. 5	17. 0	13. 8	17. 9	12. 4	12. 5	6. 8	19. 0	18. 6	14. 4	15. 6
Cs	4. 5	5. 7	6. 9	5. 8	7. 7	4. 7	2. 8	0. 2	21. 5	2. 5	6. 6	5. 4
Ba	690. 1	164. 4	608. 6	548. 0	707. 5	453. 0	560. 1	290. 9	774. 4	654. 3	590. 8	502. 8
La	50. 0	7. 7	60. 5	32. 1	43. 1	31. 4	34. 2	11. 8	322. 1	59. 7	55. 7	37. 1
Ce	100. 2	19. 2	125. 3	64. 3	92. 1	59. 1	67. 3	19. 0	701. 2	121. 8	108. 9	74. 8
Pr	10. 8	1. 5	13. 3	7. 3	9. 5	7. 0	7. 6	1. 9	78. 8	13. 5	12. 0	8. 8
Nd	41. 2	5. 6	50. 9	28. 7	36. 0	27. 0	29. 0	7. 0	292. 8	51. 5	45. 6	34. 6
Sm	7. 5	1. 1	9. 4	5. 6	6. 6	5. 0	5. 3	1. 3	50. 0	9. 2	8. 3	7. 1
Eu	1. 5	0. 2	1. 8	1. 1	1. 3	1. 0	1. 1	0. 3	10. 0	1. 8	1. 8	1. 4
Gd	6. 5	1. 0	8. 1	5. 0	5. 6	4. 5	4. 6	1. 4	40. 1	7. 5	7. 3	6. 2
Tb	0. 9	0. 1	1. 1	0. 8	0. 8	0. 7	0. 7	0. 2	5. 3	1. 0	1. 0	0. 9
Dy	5. 4	0. 9	6. 4	4. 6	4. 4	3. 9	3. 8	1. 3	25. 1	5. 6	5. 6	5. 4
Ho	1. 1	0. 2	1. 2	0. 9	0. 9	0. 8	0. 8	0. 3	4. 1	1. 1	1. 1	1. 1
Er	3. 0	0. 6	3. 5	2. 6	2. 5	2. 2	2. 2	0. 8	10. 0	2. 9	3. 1	3. 0
Tm	0. 4	0. 1	0. 5	0. 4	0. 4	0. 3	0. 3	0. 1	1. 3	0. 4	0. 5	0. 5
Yb	2. 8	0. 7	3. 3	2. 6	2. 5	2. 2	2. 1	0. 8	7. 5	2. 7	2. 9	2. 9
Lu	0. 4	0. 1	0. 5	0. 4	0. 4	0. 3	0. 3	0. 1	1. 0	0. 4	0. 4	0. 4
Hf	4. 2	7. 3	4. 6	6. 1	5. 9	4. 0	6. 2	2. 9	9. 0	13. 4	6. 2	6. 5
Ta	1. 3	1. 2	1. 4	1. 2	1. 4	0. 9	1. 0	0. 8	1. 7	1. 6	1. 1	1. 2
Pb	34. 7	8. 2	5. 4	5. 5	11. 7	3. 4	8. 5	1. 3	44. 0	10. 0	1. 1	19. 6

续表 3											单位:10 ⁻⁶	
名称	X10-1	X10-2	X10-3	X20-0	X20-4	X20-9	X20-11	X9-3	X9-6	X9-14	X9-17	X9-18
Th	15. 0	7. 4	15. 4	11. 0	12. 4	8. 5	8. 5	1. 7	14. 8	12. 7	13. 4	11. 3
U	3. 1	1. 7	4. 2	2. 1	2. 9	2. 1	2. 1	0. 8	3. 7	2. 9	4. 6	3. 7
La	50. 02	7. 72	60. 54	32. 15	43. 10	31. 43	34. 20	11. 8	322. 0	59. 74	55. 67	37. 14
Ce	100. 2	19. 1	125. 2	64. 34	92. 06	59. 10	67. 34	19. 1	701. 2	121. 8	108. 8	74. 82
Pr	10. 84	1. 54	13. 34	7. 30	9. 52	6. 97	7. 57	1. 90	78. 81	13. 49	12. 04	8. 81
Nd	41. 16	5. 63	50. 91	28. 73	36. 02	27. 01	29. 02	7. 04	292. 7	51. 49	45. 64	34. 57
Sm	7. 45	1. 06	9. 43	5. 64	6. 63	5. 04	5. 34	1. 26	50. 03	9. 20	8. 34	7. 06
Eu	1. 51	0. 19	1. 76	1. 14	1. 34	1. 04	1. 11	0. 27	10. 05	1. 77	1. 77	1. 41
Gd	6. 52	0. 97	8. 15	5. 03	5. 63	4. 52	4. 60	1. 36	40. 13	7. 54	7. 26	6. 18
Tb	0. 95	0. 14	1. 14	0. 76	0. 79	0. 66	0. 66	0. 21	5. 27	1. 02	1. 00	0. 93
Dy	5. 44	0. 87	6. 40	4. 55	4. 45	3. 88	3. 82	1. 32	25. 07	5. 63	5. 64	5. 40
Ho	1. 06	0. 19	1. 23	0. 92	0. 88	0. 78	0. 75	0. 29	4. 13	1. 06	1. 11	1. 06
Er	2. 96	0. 61	3. 46	2. 65	2. 48	2. 20	2. 16	0. 85	10. 02	2. 91	3. 11	2. 97
Tm	0. 43	0. 10	0. 51	0. 40	0. 38	0. 33	0. 33	0. 12	1. 31	0. 43	0. 45	0. 45
Yb	2. 79	0. 72	3. 30	2. 62	2. 47	2. 16	2. 13	0. 79	7. 52	2. 74	2. 88	2. 94
Lu	0. 41	0. 12	0. 49	0. 39	0. 36	0. 32	0. 32	0. 13	0. 96	0. 40	0. 43	0. 43
Y	30. 68	6. 40	34. 68	26. 29	25. 45	23. 82	22. 02	12. 3	100. 8	28. 23	32. 79	29. 85
ΣREE	262. 4	45. 3	320. 5	182. 9	231. 5	169. 2	181. 3	58. 6	1650	307. 4	286. 9	214. 0
LREE	211. 2	35. 2	261. 2	139. 3	188. 6	130. 5	144. 5	41. 3	1454	257. 5	232. 3	163. 8
HREE	51. 25	10. 1	59. 35	43. 61	42. 89	38. 67	36. 78	17. 3	195. 2	49. 96	54. 66	50. 22
L/H _{REE}	4. 12	3. 49	4. 40	3. 19	4. 40	3. 38	3. 93	2. 38	7. 45	5. 15	4. 25	3. 26
δEu (UCC)	0. 98	0. 84	0. 91	0. 97	0. 99	0. 99	1. 01	0. 93	1. 01	0. 96	1. 02	0. 96
δCe (UCC)	1. 05	1. 35	1. 07	1. 02	1. 10	0. 97	1. 02	0. 97	1. 07	1. 04	1. 02	1. 00
δEu (CI)	0. 65	0. 56	0. 60	0. 64	0. 66	0. 65	0. 67	0. 63	0. 66	0. 63	0. 68	0. 64
δCe (CI)	0. 99	1. 26	1. 02	0. 97	1. 05	0. 92	0. 97	0. 88	1. 03	0. 99	0. 97	0. 96

注:数据来自西北大学大陆动力学国家重点实验室测试结果。

对烧变岩运用球粒陨石 (CI) 标准化后发现 [见图 5(a)], 样品平均 δEu < 0. 7 (见表 4), δEu 为负异常, 表明该处烧变作用对 Eu 元素的分配可能影响不大, δCe 异常特征亦不明显; 但在大陆上地壳 (UCC) 碎屑岩标准化中 [见图 5(b)], δEu 的异常特征不明显, 部分烧变岩样品 (如 X9-6、X9-16、X20-11) 甚至出现了正异常, 烧变岩样品除 X20-9 之外, δCe 均表现为正异常, 而原岩样品为负异常。

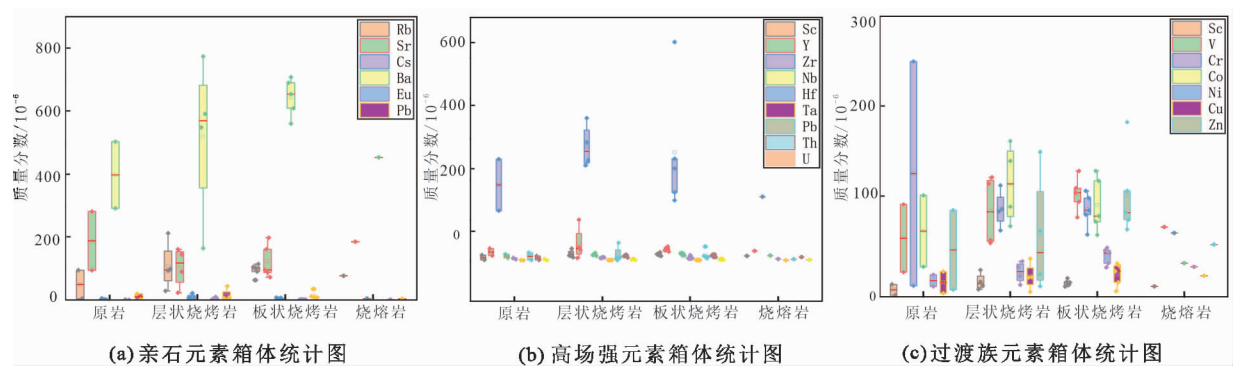


图 4 烧变岩微量元素质量分数关系图
Fig. 4 Relationship between main elements of burnt rock

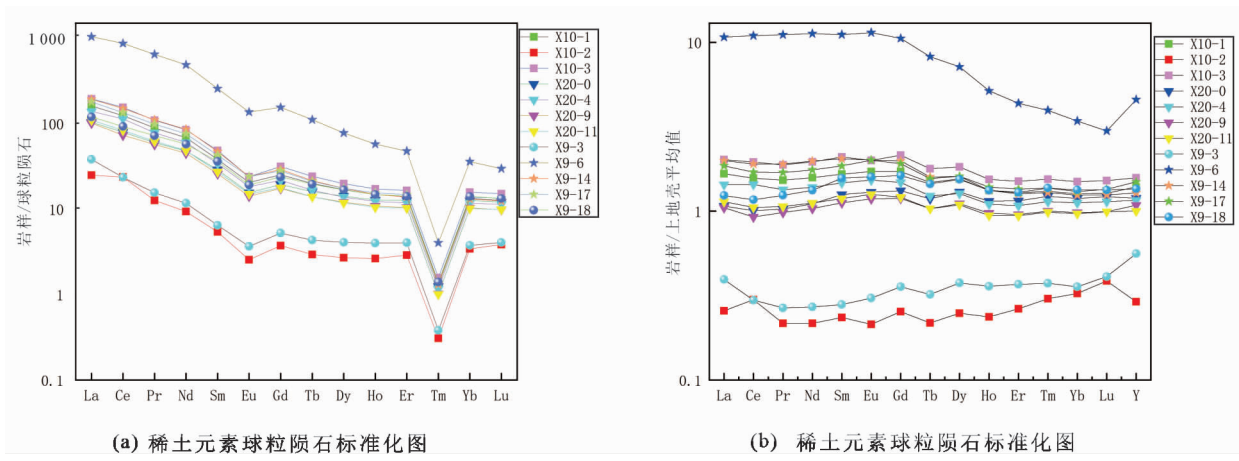


图 5 烧变岩元素质量分数关系图
Fig. 5 Standardization of rare earth elements in the chondrites

岩石在高级变质和强烈蚀变作用过程中,稀土元素的丰度发生变化^[18]。若将岩石烧变作用近似看成岩浆熔融分异过程,参考与沉积岩性质相近的长英质火成岩的分馏结晶过程来看^[19],部分熔融作用中,长石遗留在源区会带来 Eu 的负异常,而变质矿物的出现常带来 Eu 的正异常。因此,烧变岩球粒陨石标准化中 Eu 负异常可能说明烧变过程存在熔融作用,而上地壳标准化中部分样品的正异常则可解释为存在相对原岩的变质作用。

3 矿物学特征

3.1 矿物类型

研究区延安组烧变岩属于古煤火事件的产物,因此,自烧变作用发生至今经历了较长的地质历史时期,除烧变作用外,还经历了风化以及地下水的改造成岩作用,岩石烧变后变得疏松多孔,进一步促进了这一过程。利用 X 射线衍射分析方

法,测得各样品的矿物相组成及质量分数(见表 4)。根据实验测试结果以及各类矿物成因,将样品中出现的矿物分为以下 3 类。

3.1.1 一般矿物

这类矿物为沉积岩中主要的成岩矿物,主要包括石英、长石和伊利石等。

1) 石英是一般沉积岩最基础的组成矿物,从原岩样 X9-3 和 X9-18 来看,总质量分数为 76.3% 和 62%。石英是研究区烧变岩样品中普遍存在的矿物,在原岩中含量最高,烧变岩含量明显减少,其原因是烧变作用下矿物相发生了转变。

2) 斜长石和钾长石同属长石类矿物,这类架状硅酸盐矿物往往在煤自燃初期低温时发生成岩溶蚀作用^[20],且随着温度的升高不再发生变化或发生重结晶,并在低温热液流体的影响下发生蚀变作用。从斜长石和钾长石的质量分数上看,其分布与岩样所在的层段有关、而与是否烧变无关,如 2² 段岩样斜长石 + 钾长石平均质量分数为 4.34%, 3¹ 段平均质量分数则为 29.56%。

表 4 X 射线衍射物相分析结果

Tab. 4 X-ray diffraction phase analysis results

单位: %

矿物样品	石英	方石英	磷石英	斜长石	钾长石	硫铁矿	针铁矿	赤铁矿	磁铁矿	堇青石	方解石	高岭石	莫来石	伊利石	辉石	非晶相	黄铁矿
X9-3	76.3	-	-	1.0	0.7	-	-	-	-	-	17.0	-	-	-	-	5	-
X9-6	69.6	8.5	-	-	8.8	-	-	1.4	-	-	-	-	11.7	-	-	-	-
X9-14	41.0	5.7	7.8	2.2	-	-	-	3.6	-	7.5	1.8	-	20.4	-	-	10	-
X9-17	18.2	10.3	5.1	3.7	-	-	-	2.5	-	14.9	4.2	-	31.1	-	-	10	-
X9-18	62.0	-	-	23.6	5.4	-	-	-	-	-	-	-	-	7.9	-	-	1.1
X10-1	20.5	23.4	9.0	5.8	6.9	1.1	10.1	7.3	-	9.9	2.3	3.7	-	-	-	-	-
X10-2	59.5	5.2	18.4	-	0.6	-	-	2.2	-	-	-	-	14.1	-	-	-	-
X10-3	3.0	3.0	39.1	-	-	-	-	3.2	-	22.6	-	-	19.1	-	-	10	-
X20-0	36.9	11.2	17.2	23.4	5.7	-	-	5.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X20-4	4.2	10.2	22.4	22.9	4.9	-	-	-	13.5	14.3	7.6	-	-	-	-	-	-
X20-9	1.7	-	-	27.4	2.5	-	-	-	-	-	17.4	-	-	-	41.0	10	-
X20-11	33.6	10.1	12.3	26.1	5.9	-	-	3.9	-	-	8.1	-	-	-	-	-	-

注:数据来自西北大学大陆动力学国家重点实验室测试结果。

3)伊利石在原岩中发现,说明该地区沉积物中包括伊利石等黏土矿物;此外,烧变过程在常压、550 ℃的高温条件下^[21],伊利石亦可由高岭石等黏土矿物转变而来。

3.1.2 烧变矿物

烧变矿物是特征变质矿物,根据烧变程度和原岩所含矿物的差异,会产生不同的烧变产物。有些矿物组分不仅在烧变作用下形成,在沉积、风化作用下也可能由原生矿物转化而来,而具有多成因特征。研究中发现的此类矿物主要有以下几种。

1)磷石英、方石英等石英同质变体。据相关岩石物理学模拟实验^[22],磷石英完全转化温度为 870 ℃,而在 1 470 ℃时全部变成方石英,如果烧变岩中存在这两种矿物,则表明烧变岩形成的温度区间为 767~1 125 ℃。当然,岩石是具多个矿物和化学成分的复杂体系,更多的材料学实验也证实了这一点,如 Fe₂O₃ 能促进岩石烧结而改变其组成矿物的相变温度^[23]。

2)堇青石是硅酸盐矿物高温变质作用产生的典型矿物^[24],经过中度到高度热力变质作用所形成,其变质温度高于 1 000 ℃。

3)莫来石是与黏土矿物直接相关的烧变矿物,镁绿泥石、伊利石、高岭石都能在一定条件相变为莫来石和赤铁矿,尤以高岭石为其形成的主要来源。

4)磁铁矿是在高温阶段层状硅酸盐矿物分解的产物熔化形成,菱铁矿在 300 ℃时开始转化为磁铁矿^[24]。

5)辉石在沉积岩中并不常见,但在本研究中,在烧熔岩中发现其质量分数达到 41%。研究表明,高温下,镁绿泥石在 1 000 ℃转化为莫来石以及辉石,且在 1 200 ℃时辉石的含量会逐渐增加^[25],因此这些辉石极可能是高温烧变的产物。

6)赤铁矿多由黄铁矿在 300~530 ℃时转变而来,随着温度升高至 680 ℃,磁铁矿也会向赤铁矿转化^[26]。

7)方解石一般与沉积作用有关,但碳酸盐矿物高温熔融下,也可形成具良好晶形的方解石晶体。

8)非晶态组分(SiO₂, Al₂O₃)一般认为与高温下物质相变有关,但在原岩样品 X9-3 中出现,可能说明其参与了风化再沉积过程。

3.1.3 其他矿物

研究中还发现一些除沉积作用、烧变作用之外的其他与风化沉积和低温热液有关的矿物。

1)由黄铁矿在氧化条件下分解形成的氢氧化铁,如针铁矿和纤铁矿等;针铁矿是含铁矿物风化作用的产物,常分布在铜铁硫化物矿床的露头部分而构成“铁帽”,沉积成因的针铁矿见于湖沼和泉水中,某些热液脉的空隙中也可见低温热液成因的针铁矿。

2)四方硫铁矿是矿床中热液成因的矿物^[26],见于蛇纹石化的橄榄岩和辉石岩中,亦见于碳酸岩和伟晶岩中,也见于河底泥沙环境中;可能是由于硫酸盐将细菌还原发生变质作用,极少量见于铁和碳质粒状陨石中。

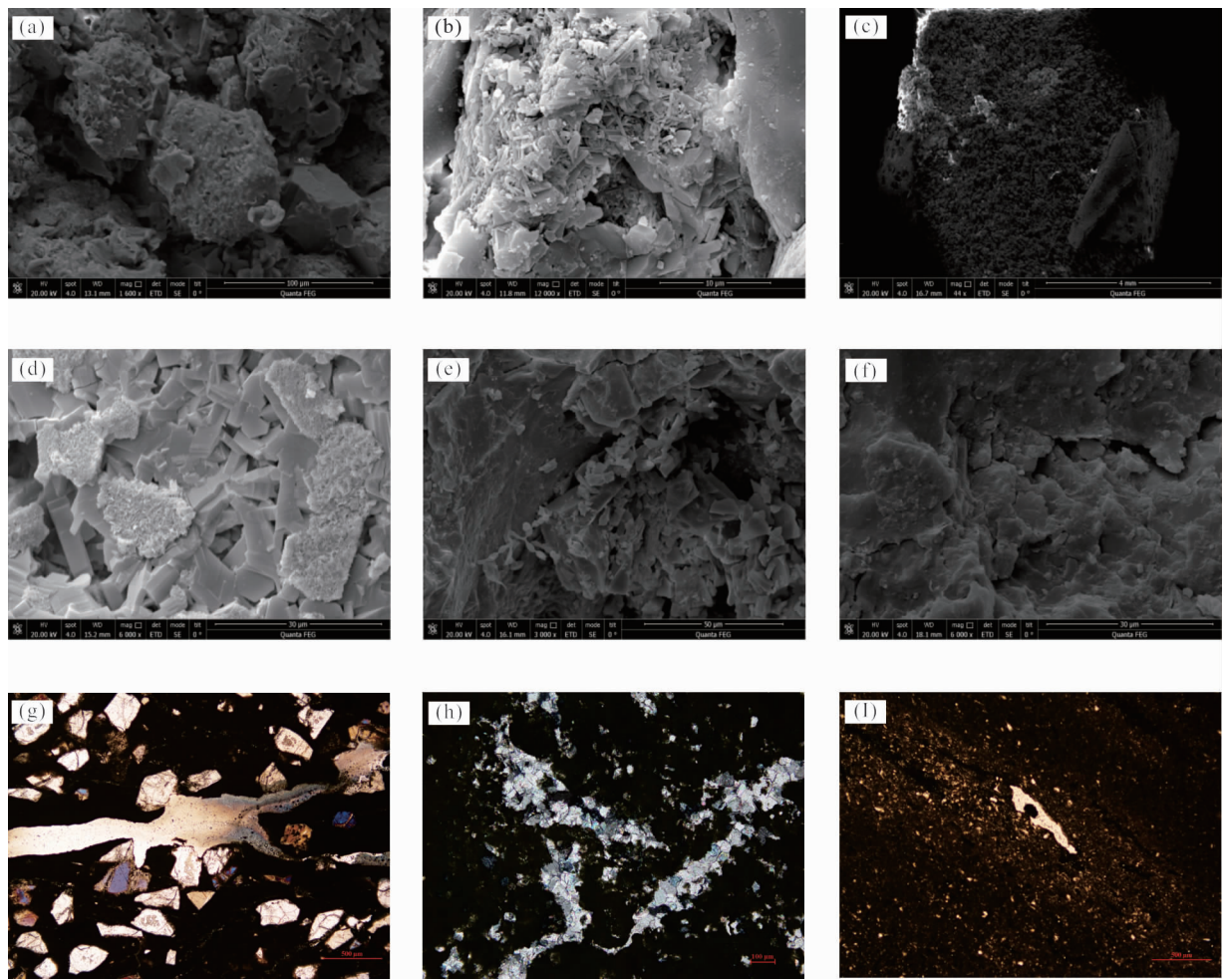
3)高岭石仅在 X10-1 烧变样品中出现,但从

其发育方石英的特征判断烧变温度要高于 600℃,这一烧变温度极可能会使高岭石等黏土矿物全部转化为伊利石或莫来石等其他矿物^[24];考虑到高岭石质量分数仅为 3.7%,推测高岭石矿物可能是在烧变作用后形成的化学沉积作用的产物。

3.2 镜下特征

烧变岩中,石英、长石等矿物具有明显的烧熔特征,且在烧熔岩中更为明显。在本次研究的烧变岩样品中均发现了烧熔痕迹〔见图 6(a)〕,自形晶较为少见,以半自形晶体、烧蚀细小矿物居多,同时局部富集不定型的变质矿物〔见图 6(b)、6(d)〕;新生矿物集合体呈缝状充填,分布在块状不规则的石英、长石等颗粒之间。晶体间常常有烧熔残余的碎屑颗粒、泥质及微晶充填,是强烈烧熔作用后局部富集的泥晶交代、方解石等后生矿

物重结晶的结果〔见图 6(c)〕。样品中石英的形态发生改变,出现晶簇状、绒毛状和针状石英晶体〔见图 6(e)〕,这类石英的特征为单晶粒径往往较小,反映了在高温熔融状态下快速冷却的特征。晶簇状石英是硅酸盐矿物彻底熔融后,晶体重新发生结晶的结果,其形成温度相对较高,而且绒毛状-细针状石英出现在原石英颗粒表面,形成温度相对较低,二者均表明岩石发生了烧熔作用。原岩样品中发育裂纹〔见图 6(f)〕,其内部未充填变质矿物,证实烧变作用对原岩影响有限。烧熔岩样品在正交偏光显微镜下可以观察到变形矿物〔见图 6(g)〕,板状烧熔岩样品矿物边大多不规则,并存在港湾状熔蚀,孔隙之间有大量石英矿物集合体充填〔见图 6(h)〕。层状烧熔岩样品可见不规则气孔,指示高温下可能的流体活动〔见图 6(i)〕。



(a) 烧熔边构造;(b) 针柱状莫来石;(c) 晶体过烧现象;(d) 纤维状堇青石;(e) 石英晶簇;(f) 原岩裂缝;(g) 矿物变形(烧熔岩);(h) 矿物边熔蚀(板状烧熔岩);(i) 不规则气孔(层状烧熔岩)

图 6 各样品镜下典型特征

Fig. 6 Typical under-microscope characteristics of samples

4 讨论

4.1 变质相组合特征

根据样品的烧变程度,结合上述烧变岩岩石矿物学特征分析结果,将烧变岩的变质矿物组合由低到高分为以下3个系列。

1) 层状烧烤岩:鳞石英 + 方石英 + 赤铁矿 + 堇青石(少) + 方解石 + 莫来石(少) + 非晶态。

2) 板状烧烤岩:鳞石英(多) + 方石英(多) + 赤铁矿 + 堇青石 + 方解石 + 莫来石 + 非晶态。

3) 烧熔岩:辉石 + 方解石(多) + 非晶态。

其中,层状和板状烧变岩的矿物组成相差不大,主要变质矿物类型相近,区别主要在含量上,这与其烧变程度有关。据前人对高温、低压下矿物相变关系的研究^[20-21,25,27-30],研究区可能存在以下变质反应:

1) $\alpha\text{Qz}(\text{石英}) \rightarrow \beta\text{Qz} \rightarrow \beta\text{Trd}(\text{鳞石英}) \rightarrow \beta_1\text{Trd}(\text{英})\text{Trd}(\text{鳞石英})$;

2) $\beta\text{Trd}(\text{鳞石英}) \rightarrow \beta\text{CrS}(\text{方石英}) \rightarrow \alpha\text{CrS}(\text{方石英})$;

3) $\text{Kln}(\text{高岭石}) \rightarrow \text{Chl}(\text{绿泥石})$

$\rightarrow \text{Px}(\text{辉石}) + \text{Mul}(\text{莫来石})$

$\rightarrow \text{Px}(\text{辉石}) + \text{Hem}(\text{赤铁矿})$;

4) $\text{Mnt}(\text{蒙脱石}) \rightarrow \text{蒙脱}(\text{钙长石}) \rightarrow \text{镁铝硅酸盐}(\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}) \rightarrow \text{Crd}(\text{堇青石}) + \text{Mul}(\text{莫来石})$;

5) $\text{Sd}(\text{菱铁矿}) \rightarrow \text{菱铁矿}(\text{磁铁矿}) \rightarrow \text{磁铁矿}(\text{赤铁矿})$;

6) $\text{Py}(\text{黄铁矿}) \rightarrow \text{黄铁}(\text{磁黄铁矿}) \rightarrow \text{磁黄铁}(\text{磁铁矿}) \rightarrow \text{磁铁矿}(\text{赤铁矿})$ 。

蒙脱石、绿泥石在所有样品中均未出现,但作为沉积岩泥质组分,在一般沉积物中往往广泛发育。本次研究发现,样品中却缺失黏土类矿物,仅发育少量高岭石和伊利石,这可能是在烧变作用下伴随温度升高发生相变而消失,由此造成了烧变岩的黏土矿物缺失。地表岩石烧变过程近似低压条件下的热接触变质作用,原岩矿物在高温下发生变质结晶和重结晶,其变质条件与热接触变质作用具有可比性^[28]。烧变作用矿物相与透长岩变质相相近,这种变质相与热接触变质作用中的高热变质作用相近,在喷出岩或次火山岩接触的围岩或捕虏体中发育^[30],特征为小范围极高温的变质作用,作用时间短,压力小,降温快。围岩

或捕虏体发生褪色,常局部熔融出现玻璃质,并发育莫来石 + 鳞石英 + 堇青石等矿物,温度在 800 ~ 1 000℃。

根据相关变质矿物的成分关系分类,研究区烧变岩矿物相与透长岩矿物相之间的异同点有:①二者黏土类、云母类矿物缺失,说明相变温度和岩石变质程度较高;②均发育长石类、石英类等贯通矿物,且与其他热接触变质相相比(除烧熔岩外)均发育了鳞石英,烧烤岩中还发育代表更高变质温度的方石英,可作为其变质特征矿物;③均发育辉石矿物,但缺少角闪石类矿物,且仅在烧熔岩发育,烧烤岩不发育角闪石类 - 辉石类暗色矿物系列;④钙质硅酸盐类中烧变岩仅发育方解石,而透长岩相发育硅灰石、钙镁橄榄石;⑤均发育莫来石,烧变岩中夕线石不发育;⑥二者发育的富铁硅酸盐类高度相似;⑦二者均发育非晶态玻璃质成分,这一现象实质反映了未达到化学平衡的快速出融环境,与反应时间短、降温速度快有关。

烧变岩变质相与热接触变质透长岩相之间也存在差异,如钙质硅酸盐仅发育方解石,缺少相对应的硅灰石与钙镁橄榄石发育。这可能与近地表压力相对硅灰石和钙镁橄榄石常发育的深成变质岩要低有关,烧变岩中缺少透长岩相中指示一定压力环境的夕线石,也可证实这一点。此外,烧变岩中发育相对鳞石英更高温变质的方石英,方石英相变温度可能超过 1 000℃^[30]。因此,与接触变质作用而形成的透长岩相相比,烧变岩相代表了更高温度和更低压力的变质环境。

值得注意的是,烧熔岩中出现辉石,虽然热接触变质透长岩相中也发育辉石矿物,但样品中石英的含量极高,质量分数达到了 41%,且不发育高温相变石英,普通石英质量分数也仅为 1.7%,同时富铝硅酸盐类和富铁氧化物也不发育,但方解石质量分数达 17.4%,这一现象值得进一步研究。

4.2 烧变岩变质特征

本研究所采样品主要由晶态变质矿物组成,但多个样品在衍射图谱上存在宽化的馒头峰[见图 7(a)、(b)]或主峰之间形成背底[见图 7(c)]的非晶相区。矿物非晶态一般代表在超高温下形成的(硅质、富钾质或富铝质)玻璃^[31]。非晶相成分形成时不具有固定温度,当温度达到初始相变温度时,矿物晶体形态即可能开始发生转变,矿物硅酸盐骨架开始破解并重组,表现为原 2θ 值范围

内衍射峰背景逐渐加厚,直至达到彻底相变温度时消失,并出现了新物相的衍射峰。如高岭石相变温度为 500 ℃,但在到 900 ℃ 时高岭石才会完全消失并彻底相变为莫来石^[27]。

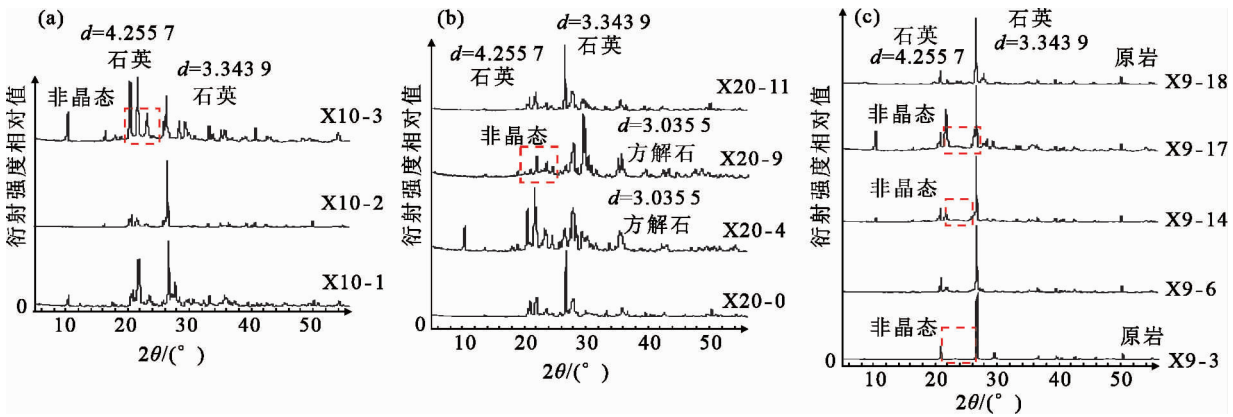


图 7 样品 X 射线衍射图

Fig. 7 X-ray diffraction patterns of samples from various wells

X20-0 和 X20-4 样品取样位置为同一钻孔、同一岩层的上下段,长石类矿物含量相近,但石英类和铁氧化物含量却存在明显差异,X20-4 样品鳞石英、方石英含量更多,且铁氧化物为烧变形成温度相较赤铁矿更高的磁铁矿,这种特征在其他样品中也存在。板状烧烤岩中,鳞石英 + 方石英总含量大于层状烧烤岩(见图 8)。此外,在同一口井中,处于相对靠近底部的烧变岩莫来石和堇青石含量高于上部(如层状烧烤岩 X9-6、X9-14),且堇青石除 X9-14 样品外只在板状烧变岩中出现,莫来石在 X20 井烧变岩中未出现,

X20-0 烧变岩样中既未发育堇青石,也未发育莫来石,仅有方石英和鳞石英出现,由此可见,利用石英及其高温变体是否存在对烧变作用进行判断更可靠。赤铁矿虽然存在多成因来源,除 X20-4 板状烧烤岩和 X20-9 烧熔岩外,其余样品中均出现了原岩中未出现的赤铁矿,但烧熔岩中石英相、堇青石、莫来石和赤铁矿均不发育的原因值得探究。相较前人认为的堇青石、莫来石作为烧变特征变质矿物^[32],研究区中石英的同质异象体方石英、鳞石英等更能有效表征烧变作用。

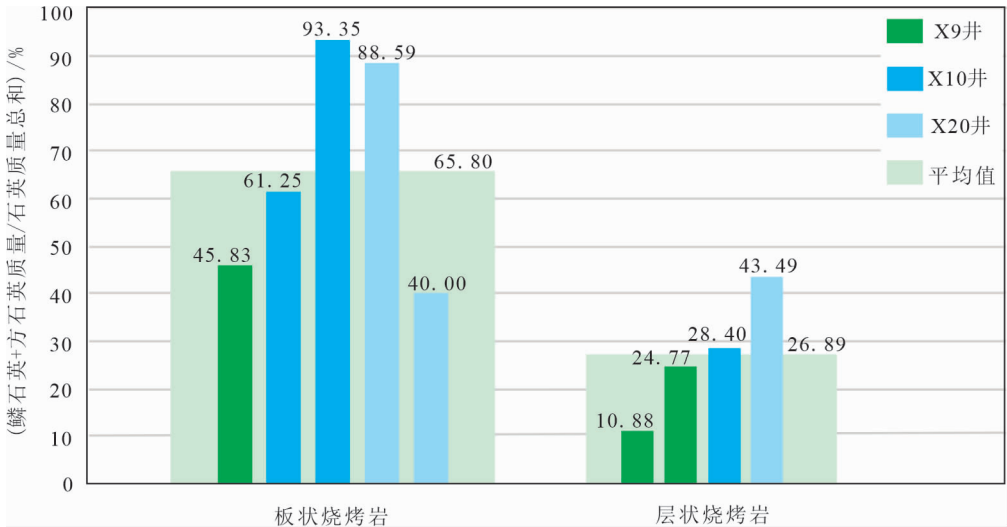


图 8 鳞石英 + 方石英与三类石英总和比

Fig. 8 Total ratio of tridymite + cristobalite to all types of quartz

烧变岩是一套在成因上有联系的热变质岩组合,包括底部与自然煤层相近的较薄烧熔岩层,该层顶底发育板状烧烤岩,顶板状烧烤岩上发育层状烧烤岩。X20 井顶底板烧烤岩的烧变石英质

量与所有石英质量的比值分别为 88.59%, 40.00%, 且只在顶板状烧烤岩中磁铁矿、堇青石等发育。X10 井板状烧烤岩中烧变石英与所有石英质量分数比值分别为 93.35%, 61.25%, 二者

虽然均发育堇青石,但 X10-3 烧变岩堇青石质量分数为 22.6%,X10-1 仅为 9.9%,因此,X10-1 板状烧岩可能是一期已经被剥蚀的烧变岩组合的底板。

4.3 烧变岩分布

一般来说,煤层越厚,烧变岩厚度越厚,例如火烧区边界位置也是煤层减薄的位置。除此之外,烧变岩的分布与煤自燃时间、出露高度、古地理气候环境等相关。从平面来看,研究区烧变岩最大的特点是“隐伏”,除一部分在露头显示之外,烧变岩大体深埋于地下,表层覆盖最大 20 m

厚的第四纪沉积。这种特点在西部紧邻的柠条塔井田南部亦有出现^[33],该邻区仅延安组 1²段发生烧变,其下 2²段煤层完全保留,且上覆的直罗组风化基岩仍存在,顶部保德组红土层不整合上覆于直罗组之上,因此其烧变作用发生的时间从侏罗世晚期至晚中新世保德期前均有可能。研究区张家崙煤田缺失延安组 1²段,延安组 2²、3¹段及以下的延安组 4¹、5¹段均发生了烧变作用,不同时期的“隐伏”烧变岩层相互叠置,可见历史时期中该地层应该被抬升接近地表发生烧变,而后再次隐伏下来(见图 9)。

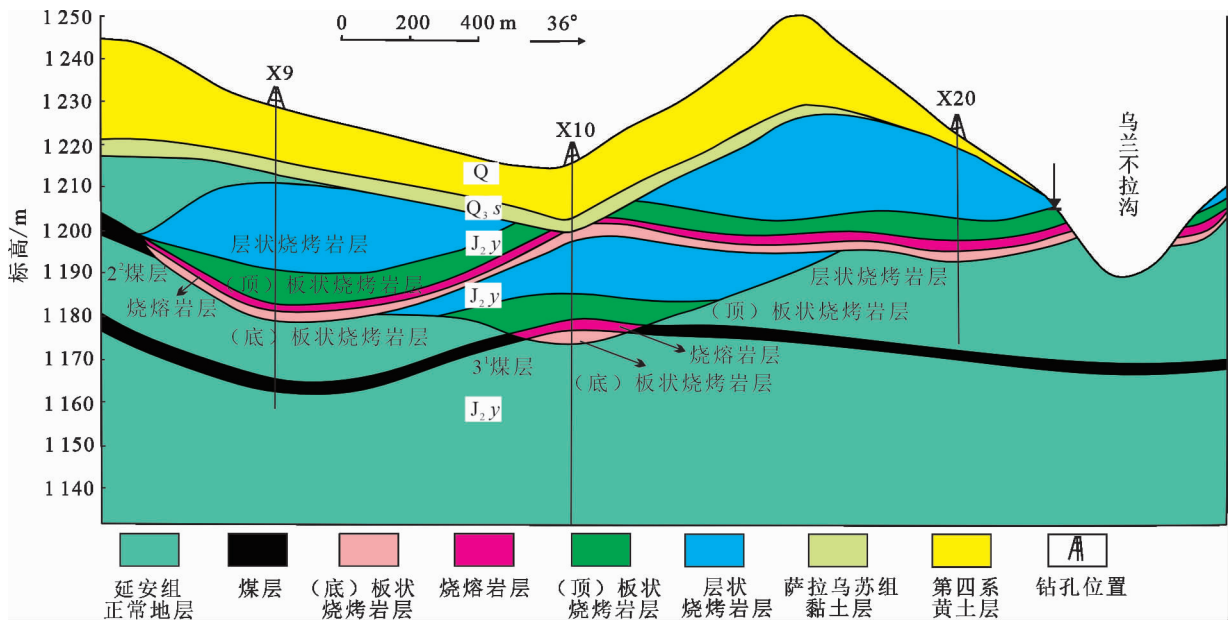


图 9 张家崙井田延安组烧变岩层地质剖面

Fig. 9 Geological profile of the Yan'an formation burnt rock strata in Zhangjiamao Well Field

对研究区烧变岩的形成期次问题目前争议颇多,前人利用地层接触关系、磷灰石裂变径迹测年、锆石测年,得到了中晚侏罗世、晚白垩世、渐新世、第四纪不同时期等多个年龄,时间跨度从 (1.43 ± 0.09) Ma 至 (148.6 ± 9.2) Ma 多个时期^[3,4,34-35]。目前主流的认识是,掩埋地层抬升风化暴露地表发生烧变作用,并结合黄河等河流侵蚀时间认为烧变发生的主要时间为上新世早期以来^[36-38]。但本研究发现,不同层段隐伏的烧变岩具有叠置关系,X10 井顶部发现了底板状烧变岩,且在 X9 井延安组 2²段烧变岩层上的正常延安组地层中发现了非晶态成分,这些证据都说明,在上新世沉积前,甚至侏罗世沉积时期即可能存在烧变作用。研究区所在的鄂尔多斯盆地东北部受燕山运动主幕构造变动的影响^[39-40],自晚侏罗世以来持续遭受抬升剥蚀,晚白垩世至古近纪,全

区处于缓慢隆升状态,这一构造背景为烧变作用的发生提供了有利条件。许云对鄂尔多斯盆地中侏罗世延安组古野火事件进行了研究,确定该时期鄂尔多斯盆地大气中的古氧气体积分数可高达 27.9%,仅中国西北地区泥炭沼泽系统野火释放的 CO₂ 量就相当于目前大气圈中 CO₂ 总量的 57.7%,5 组主要煤层的顶底板中均发现了大量炭屑,因此侏罗世延安组同沉积时期中存在烧变作用也有可能^[41]。

5 结论

1) 张家崙煤田延安组 2²、3¹ 段烧变岩为低碱性硅铝质(长英质)变质岩,其镁铁组分含量相对较少,相较原岩 Fe 元素迁移聚集。微量元素 Rb、Ba、Y、Zr、Pb 相对富集,其中 Zr 含量异常高,Zr 相

容性比 Hf 更高。稀土元素分配模式相较于球粒陨石而言,与上地壳更具有相似性,趋势线表现为轻稀土富集型,烧变作用对稀土元素的分配影响相对有限。

2) 烧变岩的矿物变质相组合可以分为两类。

① 烧烤岩:鳞石英+方石英+赤铁矿+堇青石+方解石+莫来石+非晶态。② 烧熔岩:辉石+方解石+非晶态。黏土矿物含量极少,没有云母类矿物,长石以斜长石为主,发育具烧蚀特征的高温斜长石,发育具高温特征的鳞石英和方石英。角闪石类-辉石类暗色矿物在烧熔岩中发育,钙质硅酸盐仅发育方解石,富铝硅酸盐发育莫来石,富铁氧化物种类较多,如堇青石、赤铁矿、磁铁矿等。矿物相组合也与热接触变质作用中发生高热变质的透长岩相相近,二者均是低压、高温变质环境的产物,但变质矿物组合之间存在差异。

3) 研究区烧变岩具有“多层叠置、主体隐伏”的特点。研究区张家峁煤田火烧区是在长时间跨度的地质历史中逐渐形成的,同沉积烧变作用发生后混入同期沉积物中;而早期形成的烧变岩层后期被破坏,在长期抬升剥蚀的暴露环境下,多期烧变地层相互叠置形成。

参考文献

- [1] 黄雷,刘池洋.鄂尔多斯盆地北部地区延安组煤层自燃烧变产物及其特征[J].地质学报,2014,88(9):1753-1761.
HUANG L, LIU C Y. Products of combustion of the Yan'an formation coal seam and their characteristics in the Northeastern Ordos Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9): 1753-1761.
- [2] 孙云博,孙文植,焦振华.陕北烧变岩的工程地质特征[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(增刊):71-73.
SUN Y B, SUN W Z, JIAO Z H. Engineering geological characteristics of burnt rock in Northern Shaanxi[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2019, 41(S): 71-73.
- [3] ZHANG L, LIU C Y, FAYEK M, et al. Hydrothermal mineralization in the sandstone-hosted Hangjinqi uranium deposit, North Ordos Basin, China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 80(1): 103-115.
- [4] 陈彬.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[D].成都:成都理工大学,2021.
- [5] 江桂,史朝洋.高精度磁法在煤田火烧区圈定中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2016,115(2):152-154.
JIANG G, SHI C Y. Application of high-precision magnetic method in delineating coalfield fire zones [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2016, 115(2): 152-154.
- [6] 袁利东,屈波.磁法勘探在内蒙古准格尔旗煤层火烧区探测中的应用[J].山西煤炭,2010,30(2):74-76.
YUAN L D, QU B. Fired coal seam exploration with magnetic method in Zunger Area [J]. Shanxi Coal, 2010, 30(2): 74-76.
- [7] 闫朝波.张家峁煤矿煤层顶板涌(突)水危险性分区预测研究[D].西安:西安科技大学,2013.
- [8] 姬中奎.张家峁井田烧变岩与水库水力联系及帷幕截流技术研究[D].西安:西安科技大学,2018.
- [9] 孙强,王少飞,葛振龙,等.基于热声发射技术的陕北火烧岩烧变温度识别[J].煤田地质与勘探,2022,50(5):82-88.
SUN Q, WANG S F, GE Z L, et al. Identification of burning temperature of burnt rocks in northern Shaanxi based on thermoacoustic emission technology[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(5): 82-88.
- [10] 侯恩科,谢晓深,冯栋,等.浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):30-40.
HOU E K, XIE X S, FENG D, et al. Laws and prevention methods of ground cracks in shallow coal seam-mining [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 30-40.
- [11] 王双明,孙强,乔军伟,等.论煤炭绿色开采的地质保障[J].煤炭学报,2020,45(1):8-15.
WANG S M, SUN Q, QIAO J W, et al. Geological guarantee of coal green mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8-15.
- [12] 孙强,张志镇,薛雷,等.岩石高温相变与物理力学性质变化[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):935-942.
SUN Q, ZHANG Z Z, XUE L, et al. Physico-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 935-942.
- [13] 王家乐.张家峁井田22煤烧变岩地下水场数值模拟[D].西安:西安科技大学,2017.
- [14] 陈练武,冯富成.陕西神府煤田新民区煤层自燃及其烧变特征[J].西安矿业学院学报,1991,8(3):53-58.
CHEN L W, FENG F C. Characteristics of coal seam spontaneous combustion and its alteration in Xinmin District, Shenfu Coalfield, Shaanxi [J]. Journal of

- Xi'an Institute of Mining and Technology, 1991, 8 (3): 53-58.
- [15] 鄢明才,迟清华,顾铁新,等. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 451-459.
- YAN M C, CHI Q H, GU T X, et al. A study on the abundance of crustal elements and the average chemical composition of rocks in eastern China [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21(6): 451-459.
- [16] SCOTT M, MCLENNAN S, TAYLORS R. Geochemical constraints on the growth of the continental crust[J]. The Journal of Geology, 1982, 90(4): 347-361.
- [17] MICHARD A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(3): 745-750.
- [18] JOHN W G, JAMES T C, JOHN S O, et al. Paleomagnetic assessment of oroflexural deformation in west-central Nevada and significance for emplacement of allochthonous assemblages[J]. Tectonics, 1984, 3(2): 179-200.
- [19] ELDERFIELD H, HAWKESWORTH C J, GREAVES M J, et al. Rare earth element zonation in Pacific ferromanganese nodules[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, 45(7): 1231-1234.
- [20] 杨小康. 煤层自燃对含煤盆地陆源碎屑岩的改造作用[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [21] 王志宇, 史波波, 刘鹏. 煤田火区烧变岩成岩机理与利用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15): 6004-6010.
- WANG Z Y, SHI B B, LIU P. Formation and utilization of burnt rock in coalfield fire area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(15): 6004-6010.
- [22] 邢东明, 李勇, 张秀华, 等. 热风炉高温区用硅砖中鳞石英的结构演变[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(12): 1818-1824.
- XING D M, LI Y, ZHANG X H, et al. Behavior of tridymite in silica bricks at high-temperature zone in hot stove[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(12): 1818-1824.
- [23] 廖世勇, 王英, 蒋云, 等. 钙长辉长无球粒陨石中普通石英与鳞石英成因研究[J]. 地质学报, 2021, 95(9): 2909-2919.
- LIAO S Y, WANG Y, JIANG Y, et al. Genesis of quartz and tridymite in Eucrites[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(9): 2909-2919.
- [24] 黄雷, 刘池洋. 烧变岩岩石学及稀土元素地球化学特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008, 33(4): 515-522.
- HUANG L, LIU C Y. Petrologic and REE geochemical characters of Burnt Rocks. [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2008, 33(4): 515-522.
- [25] 杜佳宗, 蔡进功, 谢忠怀, 等. 泥岩埋藏成岩过程中绿泥石的演化途径及意义[J]. 高校地质学报, 2018, 24(3): 371-379.
- DU J Z, CAI J G, XIE Z H, et al. Chloritization sequences in mudstone during diagenesis and its geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(3): 371-379.
- [26] 李景阳, 朱立军, 梁凤, 等. 碳酸盐岩残积红黏土微观结构的扫描电镜研究[J]. 中国岩溶, 2002, 21(4): 2-7.
- LI J Y, ZHU L J, LIANG F, et al. Study with scanning electron microscope on micro-texture of the residual red clay from carbonate rocks[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(4): 2-7.
- [27] 刘长龄. 论烧变矿床与烧变岩研究及其意义[J]. 地质找矿论丛, 1988, 3(3): 54-61.
- LIU C L. On the study of Burnt Deposits and Burnt Rocks and their significance [J]. Geological Exploration Review, 1988, 3(3): 54-61.
- [28] 贺同兴, 卢良兆, 李树勋, 等. 变质岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [29] 蔡周荣, 卢丽娟, 黄强太, 等. 红河断裂带类微生物状纳米颗粒的发现及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(2): 270-279.
- CAI Z R, LU L J, HUANG Q T, et al. Discovery of microbial-like Nanoparticles in the Red River Fault Zone and its tectonic significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(2): 270-279.
- [30] 葛绍坤, 史波波. 煤火烧变作用下岩石微观结构与力学特性的变化[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 64-70.
- GE S K, SHI B B. The change of microstructure and mechanical properties of rocks under coal fire burning effect[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(12): 64-70.
- [31] 李军华. 黏土矿物分析及其在石油地质应用中存在的问题[J]. 石化技术, 2016, 23(6): 38.
- LI J H. Clay mineral analysis and some problems of application in petroleum geology [J]. Petro-chemical Technology, 2016, 23(6): 38.
- [32] 杨凯, 文雪琴. 自燃后煤矸石的 XRD 定性分析[J]. 煤炭技术, 2017, 36(1): 313-314.

- YANG K, WEN X Q, XRD qualitative analysis of spontaneous combustion of coal gangue[J]. Coal Technology, 2017, 36(1): 313-314.
- [33] 侯恩科, 杨斯亮, 文强, 等. 柠条塔井田南翼隐伏火烧区特征及富水性评价[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 191-199.
- HOU E K, YANG S L, WEN Q, et al. Characteristics and water abundance evaluation of concealed burning area in southern of Ningtiaota Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(11): 191-199.
- [34] 尚桂林, 蒋新民, 刘大民. 神木北部侏罗纪煤层自然因素及其烧变特征[J]. 中国煤田地质, 1990, 2(1): 29-33.
- SHANG G L, JIANG X M, LIU D M. Factors and characteristics of spontaneous combustion of Jurassic coal seams in Northern Shenmu[J]. Coalfield Geology of China, 1990, 2(1): 29-33.
- [35] 陈练武, 冯富成. 陕西神府煤田新民区煤层自燃及其烧变特征[J]. 西安矿业学院学报, 1991, 1(3): 53-58.
- CHEN L W, FENG F C. Characteristics of coal seam spontaneous combustion and its alteration in Xinmin District, Shenfu Coalfield, Shaanxi[J]. Journal of Xi'an Institute of Mining and Technology, 1991, 1(3): 53-58.
- [36] 时志强, 王美玲, 陈彬. 中国北方烧变岩的分布、特征及研究意义[J]. 古地理学报, 2021, 23(6): 1067-1081.
- SHI Z Q, WANG M L, CHEN B. Distribution, characteristics, and significances of burnt rocks in Northern China[J]. Journal of Paleogeography, 2021, 23(6): 1067-1081.
- [37] 王小端. 东胜神山沟烧变岩: 从干旱到湿润气候变化的反映[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [38] 袁宝印, 郭正堂, 郝青振, 等. 天水—秦安一带中新世黄土堆积区沉积—地貌演化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 161-171.
- YUAN B Y, GUO Z T, HAO Q Z, et al. Sedimentary and geomorphological evolution of the Miocene loess accumulation area in the Tianshui-Qin'an area[J]. Quaternary Research, 2007, 27(2): 161-171.
- [39] 郭顺, 王震亮, 闫继福. 陕北地区侏罗系层序地层与油气聚集关系[J]. 地层学杂志, 2010, 34(2): 212-218.
- GUO S, WANG Z L, YAN J F. Relationship between Jurassic sequence stratigraphy and oil and gas accumulation in the Northern Shaanxi Region[J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(2): 212-218.
- [40] 张泓, 晋香兰, 李贵红, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪—白垩纪原始面貌与古地理演化[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 1-11.
- ZHANG H, JIN X L, LI G H, et al. Original features and palaeogeographic evolution during the Jurassic-Cretaceous in Ordos Basin[J]. Journal of Paleogeography, 2008, 10(1): 1-11.
- [41] 许云. 中国西北地区中侏罗世煤中古野火证据及对古气候的影响[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.

(编辑 雷雁林)