刘金, 王剑, 王桂君,等. 利用电子探针和 X 射线衍射研究准噶尔盆地风城组淡钡钛石矿物学特征[J]. 岩矿测试,2022, 41(5):764-773.
LIU Jin, WANG Jian, WANG Guijun, et al. Analysis of Mineralogical Characteristics of Leucosphenite from the Fengcheng Formation in the Junggar Basin by Electron Probe Microanalyzer and X-ray Diffractometer[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(5): 764-773.
【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202108190101】

利用电子探针和 X 射线衍射研究准噶尔盆地风城组淡钡钛石矿物学特征

刘金[1,2], 王剑[1,2], 王桂君[2], 张晓刚[2], 尚玲[2]
(1. 新疆页岩油勘探开发实验室, 新疆 克拉玛依 834000;
2. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 淡钡钛石为含硼硅酸盐矿物,晶体结构属二轴晶单斜晶系,是典型的热液成因矿物。产于中国准噶尔盆地风城组页岩中的淡钡钛石尚未开展矿物学研究,其成因尚不明确。本文选取了该地玛页 1 钻井岩心中的淡钡钛石,采用电子探针(EPMA)、X 射线能谱(EDS)和 X 射线衍射(XRD)分析其矿物成分和晶体结构特征。结果表明:风城组淡钡钛石晶体大小为微米级,形态呈板状或短柱状,与硅硼钠石共生。矿物主要元素组成为:BaO 12.64%, TiO_2 13.47%, Na_2O 10.69%, SiO_2 53.46%, B_2O_3 10.11%; d = 4.22(-220)、d = 8.45(-110)、d = 3.37(-112)对应的三个晶面最发育。风城组淡钡钛石元素组成及晶体衍射特征与国外发现的淡钡钛石相吻合,但更富硼元素。由于热液流体中硼含量与盐度呈明显正相关,因此风城组淡钡钛石形成于更高盐度热液流体中,深部热液流体侵入到风城组页岩中依次形成硅硼钠石、淡钡钛石。该研究结果为准噶尔盆地风城组淡钡钛石矿物学的进一步研究提供了基础资料。

关键词: 淡钡钛石; 电子探针; X 射线衍射; 风城组; 准噶尔盆地

要点:

(1) 利用 EPMA 和 XRD 分析了准噶尔盆地风城组低含量、微米级淡钡钛石的成分和晶体结构。

(2) 风城组淡钡钛石与硅硼钠石共生,较国外淡钡钛石更富硼元素,形成于更高盐度热液流体中。

(3) 深部热液流体侵入到风城组页岩中依次形成硅硼钠石、淡钡钛石。

中图分类号: P575.1 **文献标识码:** A

淡钡钛石(Leucosphenite)为一种含硼的硅酸盐矿物,矿物晶体结构属二轴晶单斜晶系矿物,理想化学式为 $Na_4BaTi_2B_2Si_{10}O_{30}$。淡钡钛石形成环境多样,产于正长伟晶岩、霓长岩脉及页岩,属于典型的热液成因矿物,其矿物学特征及成因对于指示热液类型和性质具有重要意义。淡钡钛石在国外研究得较为详细,前人利用化学分析法、电子探针(EPMA)、粉晶 X 射线衍射(XRD)及拉曼光谱(RM)测试方法[1-2],对淡钡钛石的晶体化学式、晶胞参数进行了精细分析,获得淡钡钛石化学式为:$(Ba_{0.94}Fe_{0.04}Mg_{0.04})_{\Sigma=1.02}(Na_{3.82}K_{0.18})_{\Sigma=4.00}Ti_{1.92}B_{2.02}Si_{10}O_{29.95}$, 或 $(Ba_{0.94}Ca_{0.01})_{\Sigma=0.95}(Na_{4.10}K_{0.12})_{\Sigma=4.22}(Ti_{1.99}Nb_{0.06})_{\Sigma=2.05}B_{2.08}Si_{9.78}O_{29.90}$,空间群 $C2/m$,晶胞参数 a = 9.814(4) Å, b = 16.851(5) Å, c = 7.210(3) Å, β = 93.35(3)°, Z = 2。

2018 年淡钡钛石在中国首次报道,该矿物产于新疆维吾尔自治区准噶尔盆地风城组[3]。张元元等[3]、李威等[4]分析了淡钡钛石的正交偏光和背散射图像特征,认为风城组淡钡钛石的形成可能与热

收稿日期: 2021-08-19; **修回日期:** 2022-04-15; **接受日期:** 2022-05-14
基金项目: 中国石油集团科技重大专项项目(2019E-2602)
作者简介: 刘金,硕士,工程师,主要从事微束微区分析、非常规油气地质、纳米地球科学研究。E-mail: 602393581@qq.com。

液活动或碱性火山岩参与有关[4]。目前学者们尚未开展淡钡钛石的元素组成、晶体结构特征研究,淡钡钛石形成环境还需进一步明确。

淡钡钛石为含超轻元素硼的矿物。针对含超轻元素矿物分析,秦玉娟等[5]应用电子探针原位微区分析技术测试硅硼钠石矿物,超轻元素 B 测量选用 BN 标样,测试电压为 15kV;代鸿章等[6]采用电子探针和微区 X 射线衍射研究了含超轻元素 Be、Li 的绿柱石矿物学特征,电子探针测试电压为 15kV。在矿物众多分析测试方法中,EPMA 和 XRD 是应用最广泛的矿物学基础分析方法。鉴于此,本文采用 EPMA、X 射线能谱(EDS)及 XRD 实验方法,对准噶尔盆地风城组淡钡钛石的岩相学、矿物成分及晶体结构特征进行分析,并初步探讨了淡钡钛石的成因,以期为中国淡钡钛石矿物学研究提供基础数据。

1　淡钡钛石产出的地质背景

风城组淡钡钛石矿物产出于准噶尔盆地西部隆起乌夏断裂带(图 1a)。晚石炭世,伴随西准噶尔洋壳俯冲、消减于哈萨克斯坦板块,洋盆闭合发生陆陆碰撞,产生达拉布特蛇绿岩和断裂,盆地西部隆起成陆,出现强烈的碰撞造山运动,二叠纪准噶尔盆地西部隆起处于前陆盆地逆冲推覆阶段[7]。位于西部隆起的乌夏断裂带深大断裂发育,围绕主体断裂衍生了许多次级断层,构造格局整体为与北东走向逆冲断裂有关的断裂带和断褶带。

二叠系风城组主体为深水湖盆热液喷流含盐火山-沉积建造,储层岩石类型丰富多样,特殊碱类矿物极为发育[3,8],已发现的碱类矿物有硅硼钠石、天然碱、水硅钠石、碳酸钠钙石、氯碳钠镁石、丝硅镁石、磷钠镁石等[9-11]。风城组是玛湖凹陷北斜坡带主要烃源岩,自下而上分为风一段、风二段和风三段。风一段以火山岩相和冲积扇砂砾岩为主,风一段上部至风三段以湖相细粒混积岩为主,发育沉凝灰岩、白云岩、硅质岩、云质泥岩等,其中风二段为强成碱阶段,水体强烈浓缩,盐度高,发育大量碱类矿物,是碱湖发育最强烈的阶段[12]。

2　实验部分

2.1　实验样品

实验样品选取自准噶尔盆地风城组碱湖页岩油“铁柱子”井玛页 1 井,层位为风城组二段(P_1f_2),深度为 4697.15~4697.32m 和 4697.52~4698.08m 两段(图 1b),共选取 6 块样品进行 EPMA 和 EDS 分析,并在这 6 块样品中选取 2 块样品进一步进行 XRD 分析。两段录井岩性初步定为(浅)灰色油斑

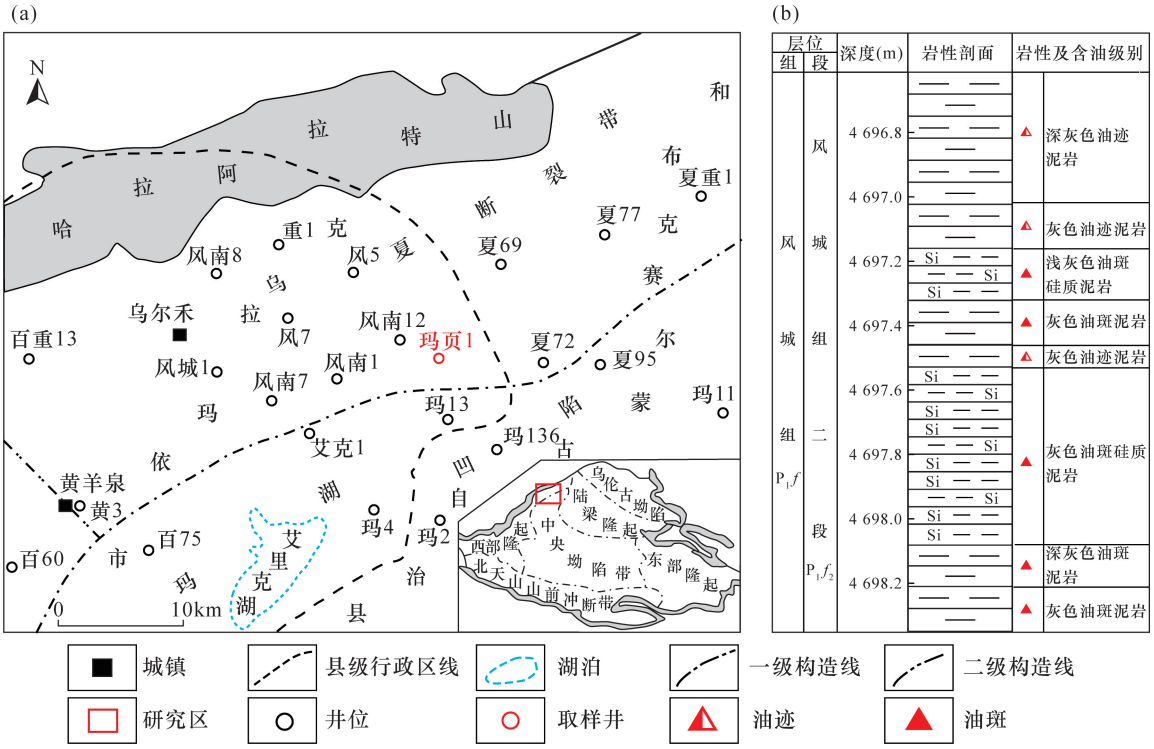


图 1　研究样品(a)采集位置及(b)玛页 1 井风城组地层柱状图

Fig. 1　(a) Sampling location and (b) stratigraphic histogram of the Fengcheng Formation of Maye1 well

硅质泥岩,岩石薄片鉴定岩性为含泥质硅硼钠石岩。

EPMA 分析采用的标准样品为中国地质科学院矿产资源研究所研制的国家级标准样品和全国微束标准化技术委员会认可的研究标样。选用的标准样品分别为:钛酸钡($BaTiO_3$,研究标样),硬玉($NaAlSi_2O_6$,研究标样),正长石($KAlSi_3O_8$,研究标样),锰铁石榴石($Mn_3Fe_2[SiO_4]_3$,GBW07525),硼酸钡(β-BaB_2O_4,研究标样)。

2.2 样品测试方法

淡钡钛石的微区形貌、成分分析在中国石油新疆油田分公司实验检测研究院完成。

采用 Oxford X-Max^N 型 X 射线能谱仪(元素检测范围^{5}B~^{92}U)进行矿物定性分析,定性分析加速电压为 15kV,探针电流为 10nA,仪器谱峰分辨率为 127eV(Mn 元素 Kα 谱线在 5.9keV 的峰位分辨率)。用于 EDS 及 EPMA 分析的样品制备成 0.05mm 的光薄片[13],并采用 LEICA EM ACE200 型镀碳仪进行镀碳,导电碳膜厚度约为 20nm。

采用日本电子 JEOL 8230 型 EPMA 分析仪(元素检测范围^{5}B~^{92}U)进行矿物定量分析和面分析,测试方法依据《电子探针定量分析方法通则》(GB/T 15074—2008)。定量分析中稳定元素检测限低于 0.01%,原子序数大于 Na 元素的主量元素含量测量相对误差<2%。EPMA 分析条件选择加速电压为 15kV,定量分析束流为 10nA,面分析束流为 50nA,束斑直径 5μm。淡钡钛石 EPMA 定量分析中,Na 采用 TAP 晶体,Si、K、Ba 采用 PETJ 晶体,B 采用 LDE2H 晶体,Ti、Fe 采用 LIFH 晶体。标准样品选择方面,Ba、Ti 采用钛酸钡($BaTiO_3$,GSB A70089—93),Na、Si 采用硬玉($NaAlSi_2O_6$,BM451),K 采用正长石($KAlSi_3O_8$,BM1012),Fe 采用锰铁石榴石($Mn_3Fe_2[SiO_4]_3$,GBW07525),B 采用硼酸钡(β-BaB_2O_4,GSB01-1444—2001)。为确保超轻元素 B 的测试准确性,采用加速电压为 10kV 或更换为 BN 研究标样进行尝试测试,同时将相同探针薄片和分析点送到新疆维吾尔自治区矿产实验研究所进行比对测试,该研究所电子探针实验分析符合中国合格评定国家认可委员会(CNAS)认证和中国计量认证(CMA)。

XRD 分析在日本理学株式会社完成,仪器型号为理学 New Smartlab 型 X 射线衍射仪,测角仪测角准确度优于 0.01°(2θ),矿物含量检测限在 1%左右。测试方法参照《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2018)。X 射线发生器功率为新型 9kW 转靶,射线源为 Cu Kα(λ=1.54186Å),工作电压 45kV,工作电流 200mA,扫描范围(2θ)为 3°~90°,扫描速度为 2°(2θ)/min。样品为块状和粉末状样品。粉末状样品(全岩分析)用玛瑙研钵磨制成 400 目以下,用于分析含淡钡钛石样品的矿物组成,探索粉晶 XRD 分析低含量淡钡钛石的可行性。块状样品分析面进行机械抛光,选取淡钡钛石富集区进行原位 XRD 分析,原位 XRD 分析有利于鉴定细粒矿物,可为特殊矿物鉴定提供可靠结果[6,14]。

3 结果与讨论

3.1 淡钡钛石矿物的岩相学特征

根据岩心肉眼观察和偏光显微镜鉴定结果,准噶尔盆地风城组含有淡钡钛石的硅硼钠石呈次生成因的纹层状、高角度裂缝状、星散状和雪花状产出,在岩石局部富集。背散射电子图像(BSE)中,淡钡钛石晶体长轴方向多为板状、板柱状或短柱状,晶体长度在 20~100μm 之间,主体为 50μm 左右,宽度在 20~50μm 之间(图 2 中 a~d)。淡钡钛石主要与硅硼钠石共生,常被硅硼钠石包裹,或与硅硼钠石呈交代状接触(图 2 中 c~d),其形成时间晚于硅硼钠石。

3.2 淡钡钛石矿物成分特征

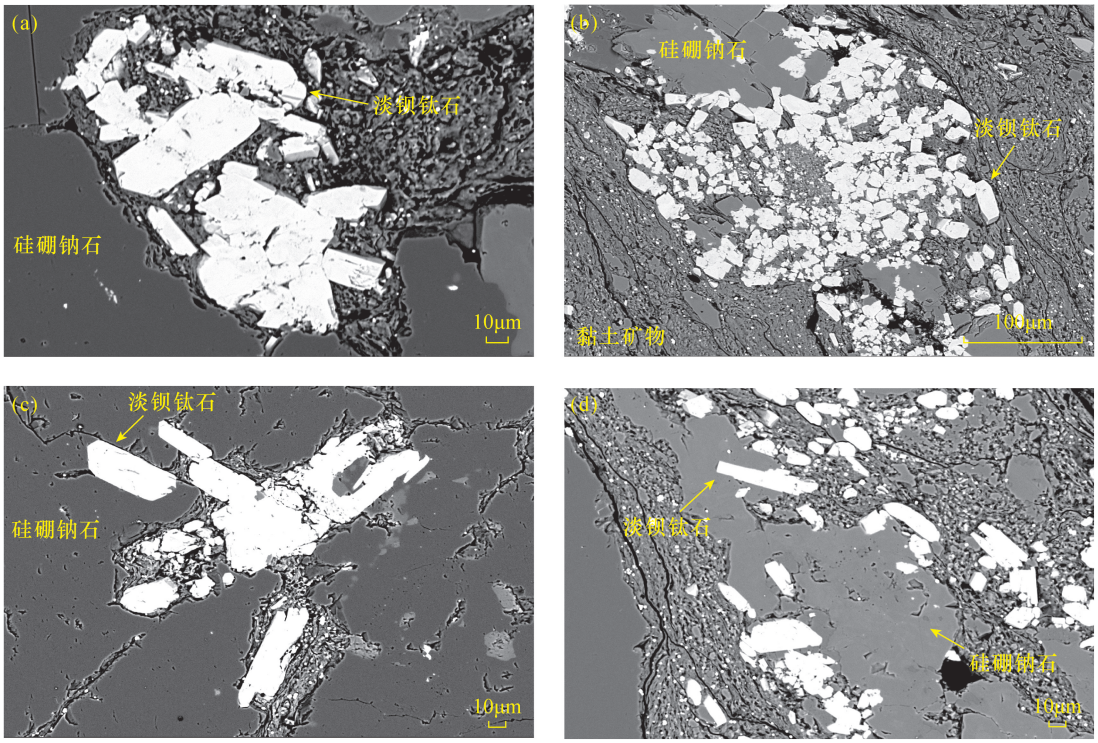
3.2.1 淡钡钛石元素分布特征

淡钡钛石 EDS 定性分析结果表明,矿物元素组成主要有 Ba、Ti、Na、Si、B、O,含微量 K 元素(图 3)。背散射电子图像(BSE)上,淡钡钛石由于含有较重元素 Ba、Ti 而呈白色,与灰黑色-灰白色的硅硼钠石形成鲜明对比(图 2 中 a~d)。EPMA 面分析显示,矿物主要元素 Na、B、Si、Ba、Ti 在淡钡钛石矿物相内部分布均质(图 4)。与硅硼钠石矿物相比,淡钡钛石 B、Na、Si 含量相对较低,富 Ba、Ti 元素(图 4)。

3.2.2 淡钡钛石元素定量分析结果及讨论

从淡钡钛石 EPMA 定量分析结果来看,矿物元素组成为:BaO 12.64%,TiO_2 13.47%,Na_2O 10.69%,SiO_2 53.46%,K_2O 0.19%,FeO 0.18%,B_2O_3 10.11%(表 1),计算的淡钡钛石分子式为 $Na_{3.45}Ba_{0.82}Ti_{2.11}B_{2.90}Si_{8.90}O_{26.86}$。表 1 中各个分析点的淡钡钛石元素种类和含量基本一致。

与产地为加拿大和俄罗斯的淡钡钛石分析数据相比较,风城组淡钡钛石的 Ba、Ti、Si 元素氧化物含量与其基本一致,B 元素氧化物含量有一定的偏差(表 1)。分析可能有两种原因:①B 为超轻元素,



a—硅硼钠石(灰黑色)与板柱状淡钡钛石(白色);b—短柱状淡钡钛石、硅硼钠石与定向分布的黏土矿物;
c—淡钡钛石交代硅硼钠石现象;d—柱状、板柱状淡钡钛石及硅硼钠石,淡钡钛石具有交代硅硼钠石现象。

图 2　背散射电子图像中淡钡钛石晶体特征

Fig. 2　Characteristics of leucosphenite in backscattered electron images

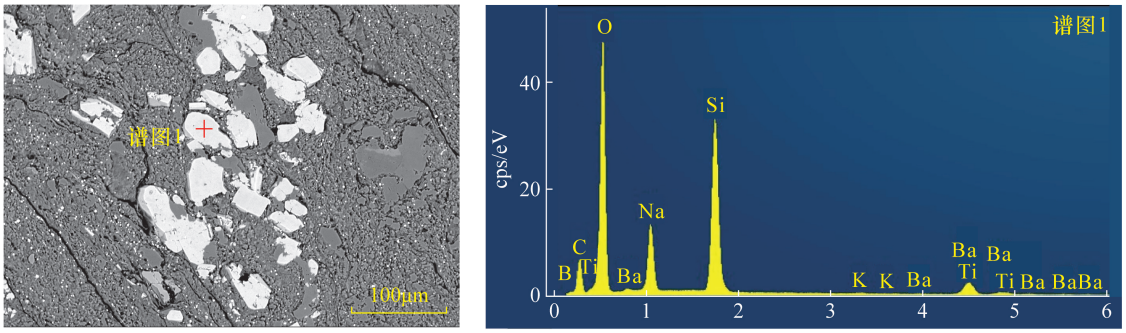


图 3　基于能谱分析的淡钡钛石元素组成特征

Fig. 3　Element composition characteristics of leucosphenite based on EDS analysis

不易准确测量[5];②研究测试的淡钡钛石 B 含量确实高于表 1 中所列的其他地区。针对超轻元素 B 的测量,降低加速电压为 10kV 进行了尝试测试,但测试结果总量超出了 100%±2%的准确度要求,因此在淡钡钛石混合超轻元素、轻元素和重元素的情况下,15kV 的加速电压测试结果准确(表 1)。此外,淡钡钛石含有易迁移的 Na 元素[15],且矿物晶体小,束斑直径不能进行较大范围的调整,对电子探针定量分析具有一定挑战。但从表 1 分析结果对比来看,Na 元素氧化物含量基本稳定,因此选用 5μm 束斑直径分析的结果是可靠的。

本次研究样品送至新疆维吾尔自治区矿产实验研究所进行比对分析,测试结果与中国石油新疆油田分公司实验检测研究院分析结果基本一致,验证了风城组淡钡钛石具有富 B 的特征。根据海底热液及大陆热泉地球化学研究,热液流体中 B 含量与盐度呈明显正相关,高盐度热液中 B 的含量会明显增高[16-17]。风城组地层中 B 元素来源于岩浆及深部热液,因此淡钡钛石形成于高盐度热液流体中。

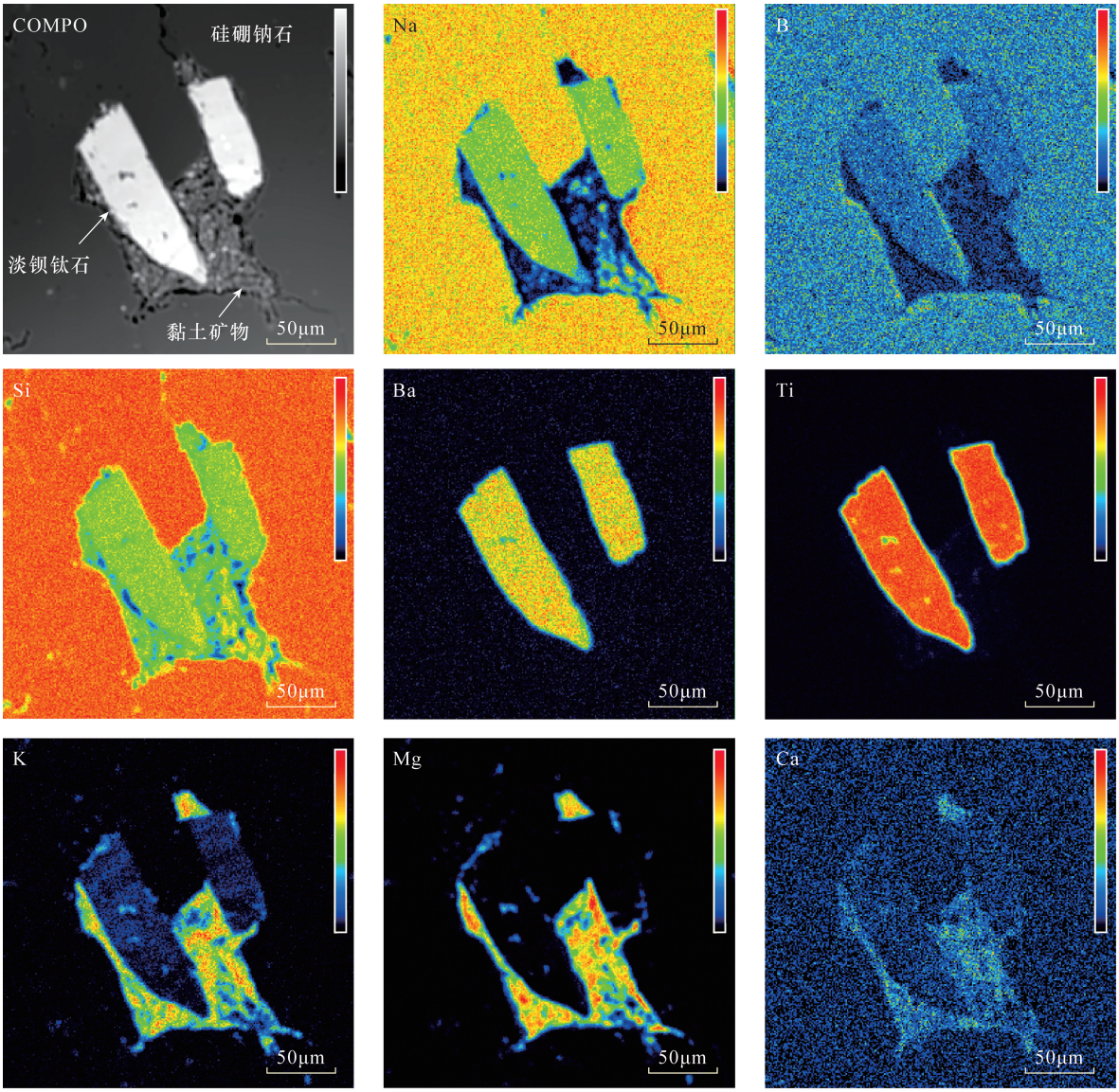


图 4　基于 EPMA 面分析的淡钡钛石和硅硼钠石元素分布特征(分析区域为 COMPO 像所示范围)

Fig. 4　Element distribution characteristics of leucosphenite and reedmergnerite based on EPMA surface analysis

3.3　淡钡钛石矿物晶体结构特征

研究区淡钡钛石 XRD 分析存在的主要难点是:矿物含量低,处于 X 射线衍射仪矿物含量检测下限附近。根据粉晶 XRD 分析结果,样品中主要含有硅硼钠石、白云石、黏土矿物、石英、斜长石 5 类矿物。由于风城组含泥质硅硼钠石岩中淡钡钛石晶体大小为微米级,含量低,且分布不均质,因此在 XRD 图谱中,淡钡钛石衍射峰强度低,很难与背底进行区分,粉晶 XRD 对淡钡钛石的分析效果差。

采用原位 XRD 方法对淡钡钛石富集区进行分析,结果表明风城组淡钡钛石特征峰(图 5)为:$d=8.45$($2\theta=10.46°$),$d=4.22$($2\theta=21.03°$),$d=3.56$($2\theta=24.96°$),$d=3.37$($2\theta=26.43°$),$d=3.31$($2\theta=26.91°$),$d=2.28$($2\theta=39.49°$)。美国 PDF 衍射数据库卡片中的淡钡钛石(产自加拿大魁北克省圣希莱尔山)的 X 射线衍射特征峰 $d=8.45$($2\theta=10.46°$),$d=4.22$($2\theta=21.03°$),$d=3.57$($2\theta=24.92°$),$d=3.37$($2\theta=26.43°$),$d=3.31$($2\theta=26.91°$),$d=2.28$($2\theta=39.49°$)。风城组淡钡钛石与美国 PDF 衍射数据库的 XRD 峰位分析结果相吻合。淡钡钛石衍射峰中相对强度较高的三个峰分别为:$d=4.22$(−220),$d=8.45$(−110),$d=3.37$(−112),对应的三个晶面最发育,也与美国 PDF 衍射数据库相吻合。以上实验分析结果表明风城组淡钡钛石晶体结构与国外发现的淡钡钛石一致,可以确证风城组发现的矿物为淡钡钛石。

表 1　准噶尔盆地风城组淡钡钛石 EPMA 定量分析结果

Table 1　EPMA quantitative analysis results of leucosphenite in the Fengcheng Formation, Junggar Basin

淡钡钛石产地	点位	氧化物含量(%)														
		BaO	TiO_2	Na_2O	SiO_2	K_2O	FeO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Nb_2O_5	MnO	MgO	CaO	SrO	B_2O_3	总计
中国准噶尔盆地（中国石油新疆油田分公司实验检测研究院分析结果）	1	13.21	13.46	10.80	53.31	0.11	0.12	/	/	/	/	/	/	/	10.11	101.12
	2	12.80	13.91	10.95	53.75	0.19	0.12	/	/	/	/	/	/	/	10.02	101.74
	3	11.99	13.11	10.96	53.70	0.23	0.44	/	/	/	/	/	/	/	10.51	100.94
	4	12.97	13.58	10.40	52.87	0.10	0.19	/	/	/	/	/	/	/	9.83	99.94
	5	12.55	13.28	10.54	53.54	0.27	0.09	/	/	/	/	/	/	/	9.82	100.09
	6	12.29	13.50	10.50	53.61	0.23	0.11	/	/	/	/	/	/	/	10.34	101.58
	平均值	12.64	13.47	10.69	53.46	0.19	0.18	/	/	/	/	/	/	/	10.11	100.74
中国准噶尔盆地（新疆维吾尔自治区矿产实验研究所分析结果）	1	10.38	14.24	10.07	52.94	–	–	/	/	/	/	/	/	/	11.66	99.29
	2	10.81	14.04	10.83	53.71	–	–	/	/	/	/	/	/	/	11.98	101.37
	3	10.17	14.41	10.69	54.18	–	–	/	/	/	/	/	/	/	9.15	98.60
	4	11.16	14.30	10.90	53.17	–	–	/	/	/	/	/	/	/	8.59	98.12
	5	10.22	14.35	10.77	53.16	–	–	/	/	/	/	/	/	/	11.35	99.85
	6	10.96	14.08	11.20	53.57	–	–	/	/	/	/	/	/	/	11.66	101.47
	平均值	10.62	14.24	10.74	53.46	–	–	/	/	/	/	/	/	/	10.73	99.78
俄罗斯 Inagli 地块	平均值	13.00	13.92	10.70	54.30	0.79	/	0.28	/	0.10	trace	0.15	/	0.03	6.36	99.63
加拿大魁北克省圣希莱尔山	平均值	11.98	14.52	11.61	53.66	0.51	0.04	/	0.11	0.77	/	/	0.06	/	6.60	99.86

注："–"表示未进行测试，"/"表示低于检测限或不含该元素。

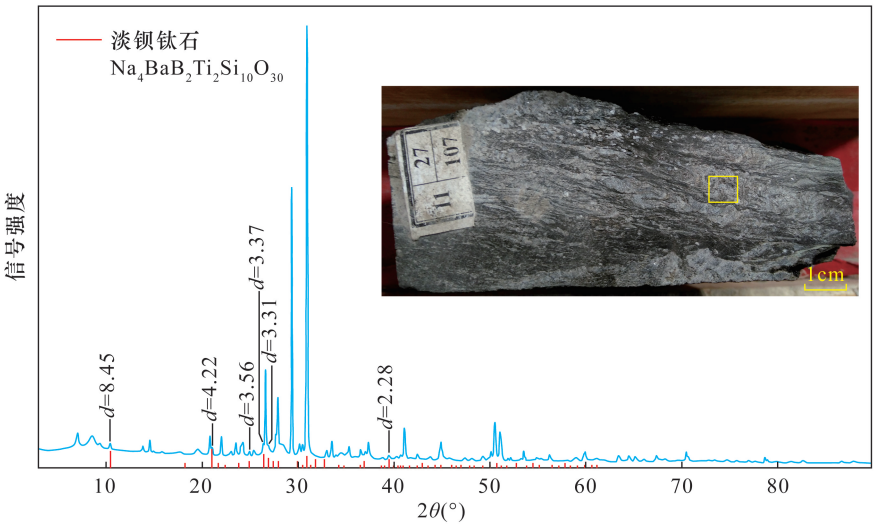


图 5　准噶尔盆地风城组淡钡钛石原位 XRD 分析结果

Fig. 5　*In situ* X-ray diffraction characteristics of leucosphenite in the Fengcheng Formation, Junggar Basin

3.4　淡钡钛石矿物成因探讨

3.4.1　淡钡钛石矿物地球化学特征

淡钡钛石以富集 Ba、Ti、B 三种元素为特征。Ba 含量在热液活动地区高于一般沉积物和陆地地壳含量 5~7 倍，可作为热液活动的证据之一[18-19]。Ti 元素占地壳总质量的 0.7%，是自然界中丰度最高的高场强亲石元素，浅部热液流体和深部热液体系中 Ti 都能大量溶解进入流体，热液中的 CO_2、F、Na、Si 等能显著提高 Ti 的迁移能力[20-21]，促进热液中 Ti 的富集。Ti 与多种元素和化合物发生化学反应，在地壳中常形成含钛氧化物或硅酸盐。B 元素是质量轻的流体活动性元素，含 B 矿物有多种形成环境，如发育于陆相蒸发环境中，以硼酸盐形式赋存的硼钠钙石、硼砂等[9]，或发育于古老碱湖中，以硼硅酸盐形式赋存的硅硼钠石、硅硼钠钙石等。发育于古老碱湖的含硼矿物一般为次生成因，其形成需要较高的温度和压力，在近地表和浅埋藏环境则无法形成。

由于本次研究的淡钡钛石晶体为微米级,包裹体很难找到,但风城组地层中与淡钡钛石共生的硅硼钠石中的包裹体均一温度为 100~116℃,盐度高,$\delta^{11}B$ 值在 0.33‰~2.13‰之间,B 元素来源于深部热液流体[8]。侵入到风城组的热液具有碱性-还原、高盐度及深部来源特征[22-24]。硅硼钠石矿物中 B 元素氧化物(B_2O_3)含量为 14.15%~16.80%,高于淡钡钛石 B_2O_3 含量(10.11%),反映了硅硼钠石形成的热液流体盐度高于淡钡钛石,淡钡钛石晚于硅硼钠石形成。风城组淡钡钛石产自于受热液影响的碱湖页岩层系中,发育于断裂带附近(图 6),这与产自美国犹他州和怀俄明州页岩中的淡钡钛石的岩性一致,进一步佐证了风城组淡钡钛石的形成与热液相关。

3.4.2　淡钡钛石矿物形成的构造环境探讨

国外发现的淡钡钛石矿物一般产于正长伟晶岩、霓长岩脉及页岩中。产于正长伟晶岩、霓长岩脉中的淡钡钛石 B_2O_3 含量在 6.36%~6.60%。整体来看,风城组淡钡钛石晶体结构与国外发现的淡钡钛石基本一致,但化学组成上更富集 B 元素,指示着风城组淡钡钛石形成时期更晚或岩浆演化的阶段更晚,热液分异得更彻底。含 B 矿物的形成均认为与火山活动或热液活动有直接或间接的关系,聚合型板块边缘是 B 元素活跃和循环的重要场所[25]。

晚石炭世,伴随西准噶尔洋壳俯冲、消减[7],在洋-陆俯冲环境中弧前蛇纹岩通过俯冲再循环到火山弧岩浆中,使得岩浆富集 B。在弧火山喷发及岩浆冷却分异后期,富 B 热液逐渐形成[26-27]。准噶尔盆地西北缘石炭系碱性火山岩发育[4],碱性岩类以富含 Ti、Ba 为特征,热液在上升期间与碱性岩石作用,富集 Ti、Ba 等元素。二叠纪富 Si、Na、B、Ti、Ba 的热液流体喷流到碰撞造山带的封闭湖盆水体中或侵入到湖盆沉积地层中进行沉淀(图 6)。进入风城组页岩层系的热液与沉积成因的矿物和孔隙流体作用,形成了硅硼钠石、淡钡钛石、石英(燧石)脉体、霓石等[28]。

4　结论

采用 EPMA、EDS 和 XRD 分析了准噶尔盆地风城组淡钡钛石矿物学特征。风城组淡钡钛石晶体大小为微米级,晶体形态呈板状或短柱状,与硅硼钠石共生。与国外淡钡钛石矿物学测试数据相比较,风城组淡钡钛石的 Ba、Ti、Si 元素氧化物含量及 XRD 分析结果与其基本一致,但更富集 B(B_2O_3 含量为 10.11%),形成于更高盐度的热液流体环境中。

本文研究为产自中国的淡钡钛石研究提供了基础测试数据。富 Si、Na、B、Ti、Ba 的碱性、还原、高盐度深部热液流体侵入到风城组页岩中先后形成硅硼钠石、淡钡钛石。但主要是依据 EPMA、EDS 和 XRD 测试方法对风城组淡钡钛石的矿物学特征进行了初步分析,今后还应寻找结晶较大的晶体进行淡钡钛石晶体化学式、晶胞参数和晶体结构的进一步研究。

致谢: 在淡钡钛石 EPMA 测试结果比对中,新疆维吾尔自治区矿产实验研究所况守英高级工程师和李健工程师提供了无私帮助,在此表示衷心的感谢!

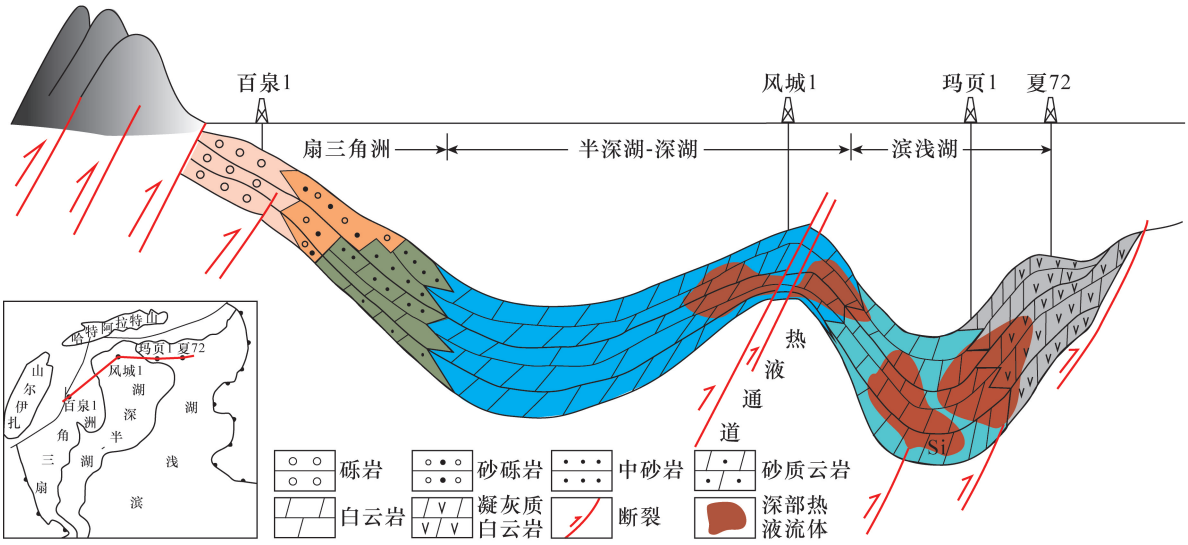


图 6　准噶尔盆地风城组淡钡钛石等碱类矿物形成模式图

Fig. 6　Formation model of alkali minerals such as leucosphenite in the Fengcheng Formation, Junggar Basin

5 参考文献

[1] 张龙,陈振宇,汪方跃,等. 电子探针技术研究粤北龙华山岩体中独居石蚀变晕圈的结构与成分特征[J]. 岩矿测试,2022,41(2):174-184.
Zhang L, Chen Z Y, Wang F Y, et al. Application of electron probe microanalyzer to study the textures and compositions of alteration coronas of monazite from the Longhuashan granite, northern Guangdong Province[J]. Rock and Mineral Analysis,2022,41(2):174-184.

[2] 闵红,刘倩,张金阳,等. X 射线荧光光谱-X 射线粉晶衍射-偏光显微镜分析 12 种产地铜精矿矿物学特征[J]. 岩矿测试,2021,40(1):74-84.
Min H, Liu Q, Zhang J Y, et al. Study on the mineralogical characteristics of 12 copper concentrates by X - ray fluorescence spectrometry, X - ray powder diffraction and polarization microscope[J]. Rock and Mineral Analysis,2021,40(1):74-84.

[3] 张元元,李威,唐文斌. 玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩发育的构造背景和形成环境[J]. 新疆石油地质,2018,39(1):48-54.
Zhang Y Y, Li W, Tang W B. Tectonic setting and environment of alkaline lacustrine source rocks in the lower Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2018,39(1):48-54.

[4] 李威,张元元,倪敏婕,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统古老碱湖成因探究:来自全球碱湖沉积的启示[J]. 地质学报,2020,94(6):1839-1852.
Li W, Zhang Y Y, Ni M J, et al. Genesis of alkaline lacustrine deposits in the lower Permian Fengcheng Formation of the Mahu Sag, northwestern Junggar Basin: Insights from a comparison with the worldwide alkaline lacustrine deposits[J]. Acta Geologica Sinica,2020,94(6):1839-1852.

[5] 秦玉娟,余朝丰,徐洋,等. 应用电子探针原位微区分析技术测试硅硼钠石矿物[J]. 电子显微学报,2016,35(3):217-222.
Qin Y J, Yu C F, Xu Y, et al. A microarea analysis technique of EPMA to probe reedmergnerite[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society,2016,35(3):217-222.

[6] 代鸿章,王登红,刘丽君,等. 电子探针和微区 X 射线衍射研究陕西镇安钨-铍多金属矿床中祖母绿级绿柱石[J]. 岩矿测试,2018,37(3):336-345.
Dai H Z, Wang D H, Liu L J, et al. Study on emerald-level beryl from the Zhen'an W-Be polymetallic deposit in Shaanxi Province by electron probe microanalyzer and micro X - ray diffractometer[J]. Rock and Mineral Analysis,2018,37(3):336-345.

[7] 李萧,劳海港,胡秋媛,等. 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带构造特征及物理模拟实验[J]. 石油实验地质,2017,39(4):567-572.
Li X, Lao H G, Hu Q Y, et al. Tectonic evolution and its physical simulation of Wuxia Fault Belt in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2017,39(4):567-572.

[8] 蒋宜勤,文华国,祁利祺,等. 准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组盐类矿物和成因分析[J]. 矿物岩石,2012,32(2):105-114.
Jiang Y Q, Wen H G, Qi L Q, et al. Salt minerals and their genesis of the Permian Fengcheng Formation in Urho area, Junggar Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology,2012,32(2):105-114.

[9] 汪梦诗,张志杰,周川闽,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统风城组碱湖岩石特征与成因[J]. 古地理学报,2018,20(1):147-162.
Wang M S, Zhang Z J, Zhou C M, et al. Lithological characteristics and origin of alkaline lacustrine of the lower Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),2018,20(1):147-162.

[10] 孙玉善. 中国西部地区首次发现硅硼钠石[J]. 石油与天然气地质,1994,15(3):264-265.
Sun Y S. Reedmergneite was first discovered in western China[J]. Oil & Gas Geology,1994,15(3):264-265.

[11] 赵研,郭佩,鲁子野,等. 准噶尔盆地下二叠统风城组硅硼钠石发育特征及其富集成因探讨[J]. 沉积学报,2020,38(5):966-979.
Zhao Y, Guo P, Lu Z Y, et al. Genesis of reedmergnerite in the lower Permian Fengcheng Formation of the Junggar Basin, NE China[J]. Acta Sedimentologic Sinica,2020,38(5):966-979.

[12] 张志杰,袁选俊,汪梦诗,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖沉积特征与古环境演化[J]. 石油勘探与开发,2018,45(6):972-984.
Zhang Z J, Yuan X J, Wang M S, et al. Alkaline - lacustrine deposition and paleoenvironmental evolution in Permian Fengcheng Formation at the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2018,45(6):972-984.

[13] 郑庆华,刘行军,刘乔,等. 利用偏光显微镜反射光系统观察黑色生油岩电子探针薄片中的生烃母质特征[J]. 岩矿测试,2020,39(3):442-450.
Zheng Q H, Liu X J, Liu Q, et al. A method for observation of characteristics of hydrocarbon generation materials in electron probe thin sections of black source rock by the reflected-light viewing system of a polarized

optical microscope [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020,39(3):442-450.

[14] 杨波,杨莉,孟文祥,等.利用探针片进行 X 射线粉晶衍射分析在白云鄂博矿床中的应用[J].有色金属(选矿部分),2021(6):34-42.
Yang B,Yang L,Meng W X,et al. Application of X-ray powder diffraction analysis in Bayan Obo Deposit with microprobe slice [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2021(6):34-42.

[15] 张文兰,胡欢,谢磊,等.Na 元素的 EPMA 定量分析:矿物晶体结构对 Na 行为的制约[J].高校地质学报,2021,27(3):327-339.
Zhang W L,Hu H,Xie L,et al. Quantitative analysis of Na by EPMA:Constraints for the Be avior of Na by the crystal structure [J]. Geological Journal of China Universities,2021,27(3):327-339.

[16] Brumsack H J,Zuleger E. Boron and boron isotopes in pore waters from ODP Leg 127,Sea of Japan[J]. Earth and Planetary Science Letters,1992,113(3):427-433.

[17] Spivack A J,Edmond J M. Boron isotope exchange between seawater and the oceanic crust [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1987,51(5):1033-1043.

[18] 李方林.两类不同矿床中 Ba 的地球化学特征及指示意义[J].地质科技情报,1993,12(3):68-72.
Li F L. Geochemical characteristics and indicatives significances of barium in two types of deposits [J]. Geological Science and Technology Information,1993,12(3):68-72.

[19] 沈敢富,李国武,王凯怡,等.白云鄂博原型钡铁钛石晶体化学研究的新进展[J].地质学报,2012,86(5):829-836.
Shen G F,Li G W,Wang K Y,et al. Advances in crystal-chemistry study of type bafertisite from Bayan Obo, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86 (5): 829-836.

[20] 孙赛军,廖仁强,丛亚楠,等.钛的地球化学性质与成矿[J].岩石学报,2020,36(1):68-76.
Sun S J,Liao R Q,Cong Y N,et al. Geochemistry and mineralization of titanium[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020,36(1):68-76.

[21] Manning C E. The chemistry of subduction-zone fluids [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 223 (1-2):1-16.

[22] 常海亮,郑荣才,郭春利,等.准噶尔盆地西北缘风城组喷流岩稀土元素地球化学特征[J].地质论评,2016,62(3):550-568.
Chang H L,Zheng R C,Guo C L,et al. Characteristics of rare earth elements of exhalative rock in Fengcheng Formation, northwestern margin of Jungger Basin [J]. Geological Review,2016,62(3):550-568.

[23] 贾斌,文华国,李颖博,等.准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组盐类矿物流体包裹体特征[J].沉积与特提斯地质,2015,35(1):33-42.
Jia B,Wen H G,Li Y B,et al. Fluid inclusions in the salt minerals from the Permian Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,2015,35(1):33-42.

[24] 傅饶,郑荣才,常海亮,等.湖相"白烟型"喷流岩-新型的致密油储层类型——以准噶尔盆地西缘乌尔禾地区风城组为例[J].岩性油气藏,2015,27(3):32-42.
Fu R,Zheng R C,Chang H L,et al. Lacustrine "white smoke type" exhalative rock—A new type of tight oil reservoir:A case study from lower Permian Fengcheng Formation in Urho area,western margin of Junggar Basin [J]. Lithologic Reservoirs,2015,27(3):32-42.

[25] 郭顺.俯冲-碰撞带硼循环[J].矿物岩石地球化学通报,2021,40(5):1049-1060,997.
Guo S. Boron cycling in subduction-collision zones[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021,40(5):1049-1060,997.

[26] 林秋婷,陈晨,刘海洋.硼的地球化学性质及其在俯冲带的循环与成矿初探[J].岩石学报,2020,36(1):5-12.
Lin C T,Chen C,Liu H Y. Boron prospecting based on boron cycling in subduction zone[J]. Acta Petrologica Sinica,2020,36(1):5-12.

[27] 张生,陈根文,Seward T M,等.硼在共存水蒸气-富硼熔体之间分配的实验研究及其地质意义[J].地球化学,2014,43(6):583-591.
Zhang S,Chen G W,Seward T M,et al. Experimental study on boron distribution between coexisting water vapor and boron-rich melt and its geological implications [J]. Geochimica,2014,43(6):583-591.

[28] 高媛,王国芝,李娜.准噶尔盆地西北缘二叠系风城组硅质岩地球化学特征及成因[J].古地理学报,2019,21(4):647-660.
Gao Y,Wang G Z,Li N. Geochemical features and origin of siliceous rocks of the Permian Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21 (4): 647-660.

Analysis of Mineralogical Characteristics of Leucosphenite from the Fengcheng Formation in the Junggar Basin by Electron Probe Microanalyzer and X-ray Diffractometer

LIU Jin[1,2], *WANG Jian*[1,2], *WANG Guijun*[2], *ZHANG Xiaogang*[2], *SHANG Ling*[2]

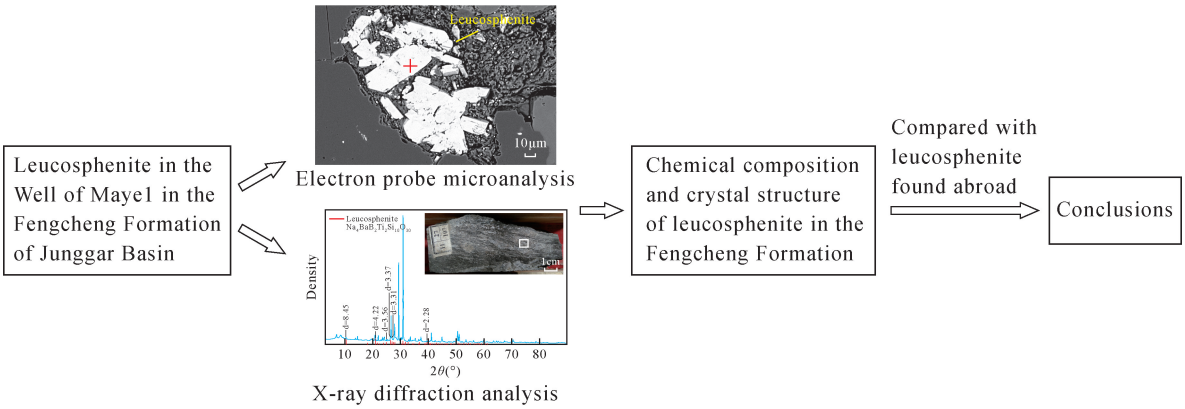
(1. Xinjiang Shale Oil Exploration and Development Laboratory, Karamay 834000, China;
2. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China)

HIGHLIGHTS

(1) The composition and crystal structure of leucosphenite in low content and micron scale from the Fengcheng Formation in the Junggar Basin were analyzed by EPMA and XRD.

(2) Leucosphenite is symbiosis with reedmergnerite in the Fengcheng Formation, which is richer in B element than the leucosphenite found abroad, and is formed in hydrothermal fluids with higher salinity.

(3) Deep hydrothermal fluids intruded into the shale of the Fengcheng Formation and formed reedmergnerite and leucosphenite in turn.



ABSTRACT

BACKGROUND: Leucosphenite, a borosilicate mineral with a biaxial monoclines crystal structure, is a typical hydrothermal mineral. The mineralogy of leucosphenite in the shale of the Fengcheng Formation in the Junggar Basin in China has not been studied, and its genesis is not clear.

OBJECTIVES: To understand the mineralogical characteristics of leucosphenite in the Fengcheng Formation and its genesis.

METHODS: Electron probe microanalysis (EPMA), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) were used to analyze the mineral composition and crystal structure.

RESULTS: The crystal size of the leucosphenite in the Fengcheng Formation is at micron scale, and the morphology is plate-like or short columnar. Leucosphenite is associated with reedmergnerite. Leucosphenite is composed of 12.64% BaO, 13.47% TiO_2, 10.69% Na_2O, 53.46% SiO_2, and 10.11% B_2O_3. Crystal planes corresponding to $d=4.22(-220)$, $d=8.45(-110)$, $d=3.37(-112)$ are the three most developed planes.

CONCLUSIONS: The element composition and crystal diffraction characteristics of leucosphenite in the Fengcheng Formation are consistent with that found abroad, but the former is richer in B. Due to the obvious positive correlation between B content and salinity in the hydrothermal fluid, the leucosphenite of the Fengcheng Formation was formed in the hydrothermal fluid with higher salinity. Deep hydrothermal fluids intruded into the shale of the Fengcheng Formation, forming reedmergnerite and leucosphenite in turn.

KEY WORDS: leucosphenite; electron probe microanalyzer; X-ray diffractometer; Fengcheng Formation; Junggar Basin