

松辽盆地南部含片钠铝石砂岩储层岩石学特征及成因

曲希玉¹, 朱文慧¹, 刘立², 董福湘³

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

2. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

3. 长春工程学院, 长春 130021

摘要 针对松辽盆地南部白垩系含片钠铝石砂岩储层,应用岩石学及同位素地球化学的原理和方法,对含片钠铝石砂岩储层的岩石类型、成岩共生序列和片钠铝石的产状及成因进行系统研究。研究结果显示,含片钠铝石砂岩储层的岩石类型以长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,成岩共生序列依次为黏土矿物包壳—一次生加大长石—一次生加大石英、自生微晶石英、自生高岭石—方解石—油气充注—CO₂充注—片钠铝石—铁白云石。松辽盆地南部片钠铝石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为-0.342‰~0.329‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 变化范围为-1.922‰~-0.954‰,与已证实形成于无机CO₂背景、且同岩浆活动有成因联系的片钠铝石极为相近;而与片钠铝石平衡的CO₂气的碳同位素值为-0.992‰~-0.423‰,与松辽盆地南部CO₂气藏中CO₂的碳同位素一致,说明松辽盆地南部片钠铝石与气藏中的CO₂具有相同的碳来源,均为幔源-岩浆成因。

关键词 松辽盆地南部;含片钠铝石砂岩;碳氧同位素

中图分类号 P618.13

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.07.001

Petrology characteristics and the origin of dawsonite-bearing sandstone reservoir in southern Songliao Basin

QU Xiyu¹, ZHU Wenhui¹, LIU Li², DONG Fuxiang³

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China

3. Changchun Institute of Technology, Changchun 130021, China

Abstract This paper studies the petrologic characteristics of the dawsonite-bearing sandstone reservoirs of the Cretaceous in southern Songliao Basin, the diagenetic sequence of the dawsonite-bearing sandstone, and the occurrence and the origin of the dawsonite based on the principles and the methods of the petrology and the isotope geochemistry. The petrologic study shows that the dawsonite-bearing sandstones are mainly composed of the arkoses and the feldspathic litharenite. The diagenetic sequence is shown to be the clay coating cementation—secondary feldspar overgrowth—secondary quartz overgrowth, authigenic quartz, kaolinite—calcite—hydrocarbon charging—CO₂ charging—dawsonite—ankerite. The analysis of the carbon and oxygen isotope composition indicates that the dawsonite $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values range from -0.342‰ to 0.329‰, and $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ values range from -1.922‰ to -0.954‰, as is similar to the proved dawsonite formed in the organic background and related to the magmatic activity. The calculated $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of CO₂ gas in the isotope equilibrium with the dawsonite ranging from -0.992‰ to -0.423‰, are consistent with the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of the inorganic CO₂ in the southern Songliao Basin. These values indicate that the CO₂ that forms the dawsonite and that from the gas reservoir have the same source, which is the mantle-sourced origin.

Keywords southern Songliao Basin; dawsonite-bearing sandstone; carbon and oxygen isotope composition

收稿日期:2014-12-24;修回日期:2015-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41372133);吉林省科技发展计划重点项目(20110426);吉林省科技发展计划项目(20140101214JC);中央高校基本科研业务费专项资金(12CX04004A)

作者简介:曲希玉,副教授,研究方向为流体-岩石相互作用、储层及沉积,电子信箱:quxiyu@upc.edu.cn;朱文慧(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为油气地质与勘探,电子信箱:zhuwenhui08@126.com

引用格式:曲希玉,朱文慧,刘立,等.松辽盆地南部含片钠铝石砂岩储层岩石学特征及成因[J].科技导报,2015,33(7):13-19.

片钠铝石属斜方晶系,形成于富含钠、铝的碱性流体和高 CO_2 分压条件下,是一种含水、钠和铝的碳酸盐矿物。导致片钠铝石形成的 CO_2 既可来自岩浆活动^[1,2],也可来自岩浆活动引起的碳酸盐热解^[3]或烃源岩中干酪根热解^[4]。片钠铝石的地质意义在于,它既是 CO_2 注入、运移或逸散的示踪矿物^[1,5],也是 CO_2 地下储存^[6]或地质存储^[7]的主要“圈闭矿物”^[8]。刘立等^[9]按照砂岩的命名原则,将含有片钠铝石自生矿物的砂岩统称为含片钠铝石砂岩。目前,已报道的关于松辽盆地南部含片钠铝石砂岩的研究多局限于红岗^[10-14]、孤店^[15,16]和乾安^[17]等局部地区,缺乏全区范围内的系统分析。本文以松辽盆地南部不同地区含片钠铝石砂岩为研究对象,从储层岩石学特征、成岩共生序列、片钠铝石的产状及成因等方面对其进行详细研究。

1 地质背景与研究方法

松辽盆地是中国东部的大型中、新生代陆相沉积盆地,研究区中央坳陷区是松辽盆地南部的一个一级构造单元,面积约 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,区内包括红岗阶地、长岭凹陷、华子井阶地和扶新隆起带4个二级构造单元(图1)。研究区自下而上依次沉积了侏罗系、白垩系、新近系及第四系地层^[18],片钠铝石主要分布于白垩系泉头组、青山口组、姚家组及嫩江组地层中,分布地区遍布华字井阶地、扶新隆起带、长岭凹陷和红岗阶地^[19]。本次研究所用的含片钠铝石砂体采自红岗、孤店、乾安和大安北4个地区,采集样品96块,研究中切制薄片47片,茜红素-S染色47片,碳氧同位素分析10块。

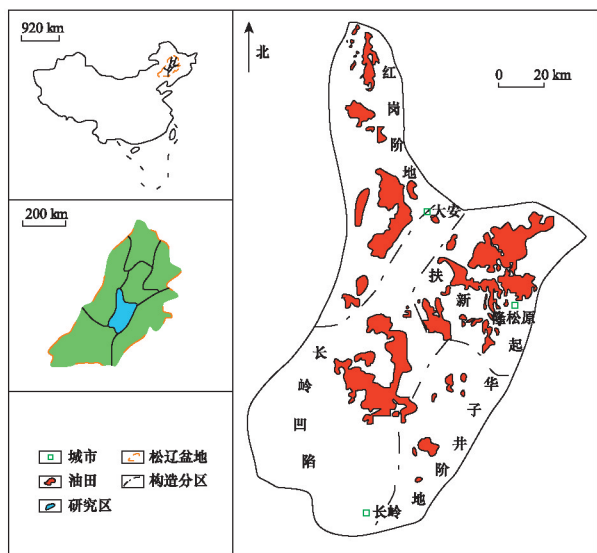


图1 松辽盆地构造分区及研究区位置示意(据文献[19],有改动)
Fig. 1 Geological structure of Songliao Basin and location of the study area (modified from reference[19])

2 含片钠铝石砂岩的岩石学特征

2.1 骨架碎屑组成

通过显微镜对切制薄片进行鉴定,并采用迪金森的点记法^[20]统计骨架碎屑成分。结果表明,松辽盆地南部含片钠铝

石砂岩以长石砂岩和长石岩屑砂岩为主(图2),含片钠铝石砂岩碎屑成分主要为石英、长石和岩屑。其中,石英体积分数总体在34%~62%之间,以单晶石英为主,含少量多晶石英;长石体积分数在13%~38%,以钾长石为主,斜长石含量较少;岩屑体积分数在7%~45%,以花岗岩岩屑为主,变质岩岩屑和火山碎屑岩岩屑次之。砂岩粒度为中细粒,分选中等-差,结构成熟度较低。

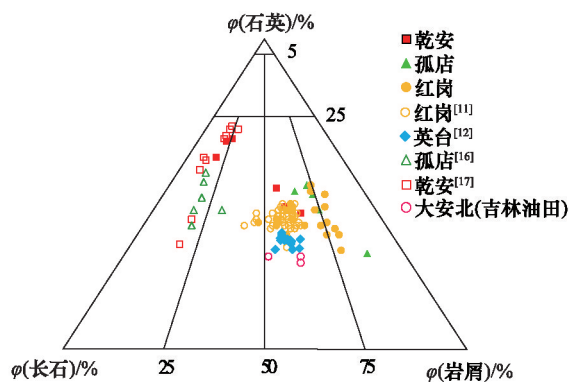


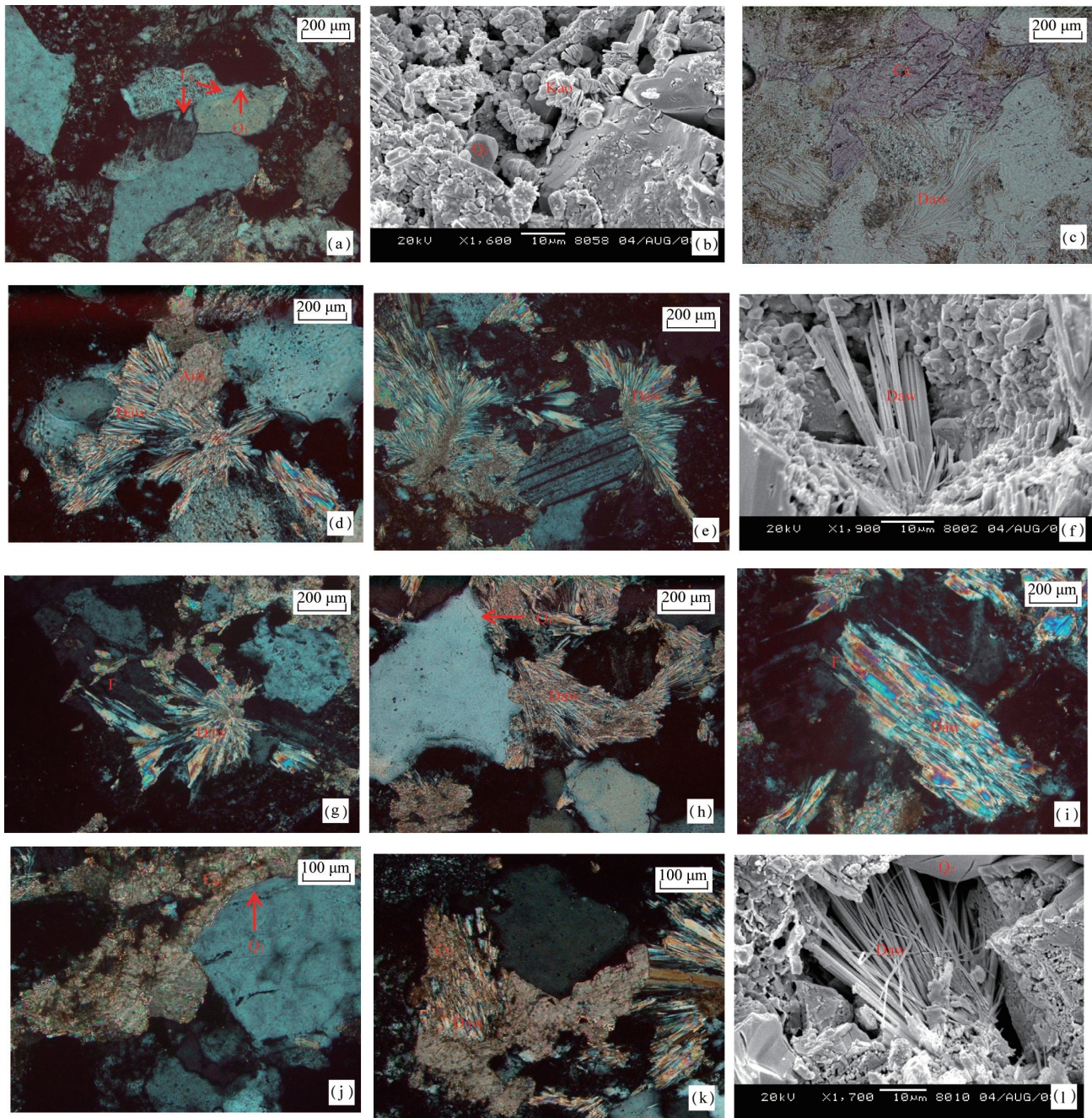
图2 含片钠铝石砂岩的骨架碎屑三角图

Fig. 2 Triangular diagram of clastic components of dawsonite-bearing sandstones

2.2 胶结物类型与特征

偏光显微镜和扫描电镜分析结果表明,松辽盆地南部含片钠铝石砂岩中的胶结物主要有次生加大长石、自生石英、片钠铝石、方解石、铁白云石和自生黏土矿物。次生加大长石不发育,体积分数小于2%,多生长于碎屑长石与其他碎屑颗粒之间(图3(a));自生石英包括次生加大石英和微晶石英,次生加大石英体积分数为2%~4%,分布普遍,主要发育于碎屑石英的边部(图3(a)),扫描电镜观察发现研究区还发育有自生微晶石英(图3(b));方解石经茜红素-S染色后呈粉红色,体积分数为2%~5%,主要充填于粒间孔隙中(图3(c));铁白云石体积分数为2%~10%,相对自形,常交代碎屑颗粒(图3(d));样品中自生黏土矿物主要为伊利石、蒙脱石和高岭石,体积分数为2%~8%,伊利石和蒙脱石以碎屑颗粒包壳形式出现,高岭石在扫描电镜下常呈书页状或蠕虫状(图3(b))。

片钠铝石的体积分数在1%~19%,是砂岩样品中含量最多的胶结物。在偏光显微镜及扫描电镜下观察发现,片钠铝石的产状主要有两种:一种是作为胶结物充填于碎屑颗粒之间的孔隙中,呈放射状(图3(e))、毛发状、针柱状(图3(f))、菊花状(图3(g))集合体,放射状产出的片钠铝石其核心多为密集的微晶片钠铝石集合体,呈团簇状,向末端过渡为放射状集合体(图3(e));第二种是部分或全部交代碎屑颗粒,多呈长柱状、板片状,石英与岩屑往往被片钠铝石部分交代(图3(h)),长石被片钠铝石交代的现象极为普遍(图3(g)),被完全交代者也较为常见(图3(i))。其中,以孔隙充填形式出现的片钠铝石相对较多。



Daw—片钠铝石;F—长石;F₁—一次生加大长石;Q₁—一次生加大石英;Q₂—自生微晶石英;Cc—方解石;Kao—高岭石;Ank—铁白云石。
 (a) 次生加大石英与次生加大长石,红146井,普通薄片,正交偏光;(b) 书页状高岭石充填于次生加大石英生长后剩余的孔隙空间,乾1—7井,扫描电镜;(c) 连生方解石交代碎屑颗粒,局部被片钠铝石交代,孤27井,染色薄片,单偏光;(d) 铁白云石交代片钠铝石,孤27井,普通薄片,正交偏光;(e) 纤维状、放射状片钠铝石充填孔隙,红146井,普通薄片,正交偏光;(f) 针柱状片钠铝石充填孔隙,红143井,扫描电镜;(g) 板片状片钠铝石部分交代长石,菊花状片钠铝石充填孔隙,红150井,普通薄片,正交偏光;(h) 片钠铝石交代次生加大石英,孤27井,普通薄片,正交偏光

图3 成岩作用特征显微照片

Fig. 3 Micrograph of diagenetic characteristics

2.3 成岩共生序列

成岩共生序列是指成岩作用过程中,成岩作用方式及成岩自生矿物(或胶结物)形成的先后顺序^[21]。含片钠铝石砂岩中,自生黏土矿物(伊利石和蒙脱石)以碎屑颗粒包壳形式出

现,随温度升高及成岩环境的变化,黏土矿物包壳逐渐分解形成伊/蒙混层及自生伊利石^[14]。研究过程中未在次生加大长石、次生加大石英、片钠铝石、方解石、铁白云石和自生高岭石充填后剩余的孔隙中发现伊/蒙混层和伊利石,由此认为

黏土矿物包壳是含片钠铝石砂岩中最早形成的自生矿物。次生加大长石多生长于碎屑长石与其他碎屑颗粒之间,而在石英与其他碎屑颗粒接触处次生加大石英并不发育,且次生加大石英的生长明显受长石加大的限制(图3(a)),说明次生加大长石形成于强烈压实作用之前,其形成时间早于次生加大石英^[14]。方解石晶体粗大,连生现象发育且强烈交代碎屑颗粒(图3(c)),局部可见其充填于次生加大石英生长后剩余的孔隙空间(图3(j)),故其形成时间要晚于次生加大石英^[13]。片钠铝石或交代次生加大长石、次生加大石英(图3(h))和部分方解石(图3(e)、(k)),或充填于自生微晶石英及自生高岭石生长后的孔隙空间(图3(l)),说明片钠铝石的形成晚于上述矿物。扫描电镜下,书页状自生高岭石与自生微晶石英共生,充填于次生加大石英生长后的剩余孔隙空间内(图3(b))。考虑到自生高岭石与长石溶蚀溶解之间有密切成因关系,推断长石溶解、自生高岭石、自生微晶石英和次生加大石英为同一酸性流体环境的产物,其形成应是准同时的。铁白云石经茜黄素-S染色后呈蓝色,镜下可见片钠铝石被铁白云石交代现象,放射状片钠铝石被铁白云石晶体切割(图3(d)),说明铁白云石在片钠铝石之后形成^[13]。

由于片钠铝石形成于含钠和铝、碱性流体和高CO₂分压条件下,是CO₂注入、运移或逸散的示踪矿物^[5],而CO₂气往往是在成岩阶段中晚期注入到砂岩中的^[17],因此,CO₂注入在片钠铝石形成之前。前人研究表明,松辽盆地南部曾发生了3期资源性流体充注,即2期油气充注和1期CO₂充注^[19,22]。第1期油气充注时间为85~65 Ma,相当于嫩江—明水期;第2期油气充注的时间为50~25 Ma,主体为古近系。刘立等^[19]研究还发现,石英次生加大边的内侧发育第1期油气包裹体,外侧发育第2期油气包裹体,示踪CO₂充注的片钠铝石普遍充填于石英次生加大边结晶后剩余的孔隙空间,同时,切穿碎屑石英及其次生加大边的微裂隙中赋存CO₂包裹体和第2期油气包裹体,且宏观微裂缝中也见有片钠铝石充填物及含油现象。由此可见,第1期油气充注早于石英次生加大边的形成,第2期油气充注在石英次生加大边之后,且CO₂充注略晚于第2期油气充注,或与其大致相同。

综合镜下观察及前人研究成果^[10,11,13-17],以含片钠铝石砂岩的自生矿物共生序列为基础,结合油气与CO₂注入时间,归纳出松辽盆地南部含片钠铝石砂岩的成岩共生序列依次为:黏土矿物包壳—次生加大长石—次生加大石英、自生微晶石英、自生高岭石—方解石—油气充注—CO₂充注—片钠铝石—铁白云石(图4)。其中,CO₂充注之前形成的自生矿物组合主要为黏土矿物包壳、次生加大长石、次生加大石英、自生微晶石英、自生高岭石、方解石;CO₂充注之后形成的自生矿物组合主要为片钠铝石和铁白云石。

3 片钠铝石成因探讨

3.1 片钠铝石的碳氧同位素组成

由松辽盆地南部片钠铝石的碳氧同位素数据(表1)可

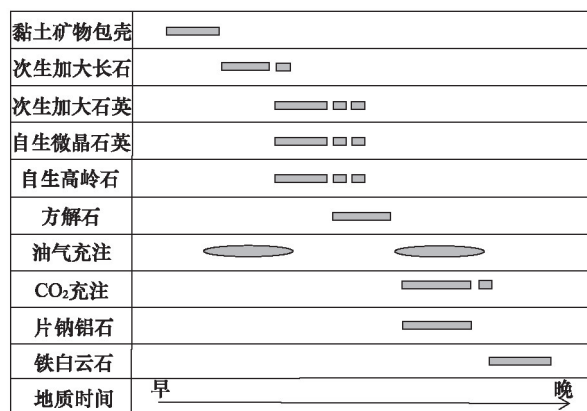


图4 含片钠铝石砂岩的成岩共生序列

Fig. 4 Diagenetic sequence of dawsonite-bearing sandstones

知:松辽盆地南部片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 范围较窄,分布连续,为 $-0.342\%\sim-0.329\%$,主要分布在 $-0.190\%\sim-0.157\%$,平均为 -0.030% ;片钠铝石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 变化范围为 $-1.922\%\sim-0.954\%$,主要分布在 $-1.890\%\sim-1.405\%$,平均为 -1.654% ;片钠铝石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 分布范围为 $1.067\%\sim2.104\%$,主要分布在 $1.111\%\sim1.638\%$,平均为 1.383% 。

3.2 片钠铝石成因探讨

片钠铝石中“碳”来源是揭示片钠铝石成因的关键^[23]。目前,国内外学者对不同盆地中片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 进行了测定,如澳大利亚 Bowen-Gunnedah-Sydney (BGS) 盆地系片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-0.40\%\sim-0.40\%$ ^[2],澳大利亚 Upper Hunter Valley 地区片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 集中在 $-0.17\%\sim-0.24\%$ ^[24],蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-0.815\%\sim-0.281\%$ ^[23],海拉尔盆地片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-0.53\%\sim-0.15\%$ ^[9]。松辽盆地南部片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 分布范围($-0.342\%\sim-0.329\%$)与澳大利亚 BGS 盆地系、澳大利亚 Upper Hunter Valley 地区较为相似,且相对于澳大利亚 BGS 盆地系分布更集中,与蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷和海拉尔盆地相差较大(图5)。澳大利亚 BGS 盆地系 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 分布范围($-0.40\%\sim-0.40\%$)表明片钠铝石中碳的来源可能为海相碳酸盐岩,也可能为岩浆成因。由于澳大利亚 BGS 盆地系海相碳酸盐的溶解并不明显,片钠铝石在海相及非海相地层均有分布,且区内曾发生大规模火山活动,局部存在岩浆成因CO₂聚集,可判定澳大利亚 BGS 盆地系片钠铝石为岩浆成因^[2]。澳大利亚 Upper Hunter Valley 地区的片钠铝石也已被证实形成于无机CO₂背景,且与岩浆活动具有成因联系^[24]。研究区已证实的有机成因的油伴生气中烃类气体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 大部分在 $-5.016\%\sim-2.32\%$ ^[25],与片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 相差较大。因此,松辽盆地南部片钠铝石可能为无机CO₂成因。

为进一步确定松辽盆地南部片钠铝石的成因,需要计算与片钠铝石平衡的CO₂气的碳同位素数据。由于目前尚无片钠铝石-CO₂的分馏系数,本文采用 Baker 等^[2]的方法,将方解石-CO₂的分馏系数视为相当于同温度下片钠铝石-CO₂的分馏系数,采用 Ohmoto 和 Rye 的方解石-CO₂分馏方程^[26]计算。

表1 松辽盆地南部片钠铝石碳氧同位素及与片钠铝石平衡的CO₂气碳同位素数据Table 1 Dawsonite carbon and oxygen isotope composition and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of CO₂ gas in isotope equilibrium with dawsonite in southern Songliao Basin

地区	井号	深度/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\%$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\%$	古地温/ ℃	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2\text{PDB}}/\%$	资料来源
红岗	红 146	1506.66	-0.121	-1.910	1.123		-0.782	文献[11]
		1506.90	-0.096	-1.246	1.802		-0.758	
		1507.21	-0.169	-1.689	1.308		-0.830	
		1508.16	-0.125	-1.922	1.111		-0.786	
		1518.35	-0.083	-1.890	1.144		-0.740	
		1518.65	-0.112	-1.875	1.155		-0.769	
		1548.90	0.021	-1.637	1.399		-0.627	
		1550.41	-0.143	-1.719	1.319		-0.790	
	红 143	1256.00	0.329	-1.466	1.575		-0.4.23	
		1256.50	0.252	-1.766	1.271		-0.500	
		1257.86	0.122	-1.639	1.397		-0.628	
		1258.80	0.155	-1.647	1.389		-0.595	
		1553.65	-0.068	-1.960	1.067		-0.714	
	红 150	1556.80	0.001	-1.912	1.121		-0.645	
	红 152	1536.15	-0.342	-1.597	1.445		-0.992	
孤店	孤 27	1203.75	0.030	-1.760	1.280	56.6	-0.690	文献[15]
		1196.70	-0.090	-1.860	1.170	56.2	-0.810	
		1297.24	-0.190	-1.900	1.140	61.0	-0.870	
		1231.38	-0.030	-1.780	1.260	57.9	-0.730	
		1188.88	-0.120	-1.830	1.210	55.9	-0.840	
		1211.56	-0.050	-1.830	1.200	56.9	-0.770	
	孤 5	1263.03	-0.011	-1.648	1.388	53.0	-0.757	
		1277.63	-0.176	-1.822	1.209	53.7	-0.915	
		1282.25	-0.062	-1.572	1.466	53.9	-0.801	
大安北	大 21	1429.19	0.003	-1.615	1.422	60.0	-0.684	本次实测
	大 27	1436.60	0.157	-1.405	1.638	60.3	-0.529	
乾安	乾 1-7	1792.02	0.097	-1.184	1.865	75.3	-0.472	本次实测
		1801.25	-0.012	-1.236	1.813	75.7	-0.578	
		1801.61	-0.088	-1.499	1.542	75.7	-0.653	
		1802.12	0.113	-0.954	2.104	75.7	-0.453	
		1803.75	-0.134	-1.514	1.527	75.8	-0.699	

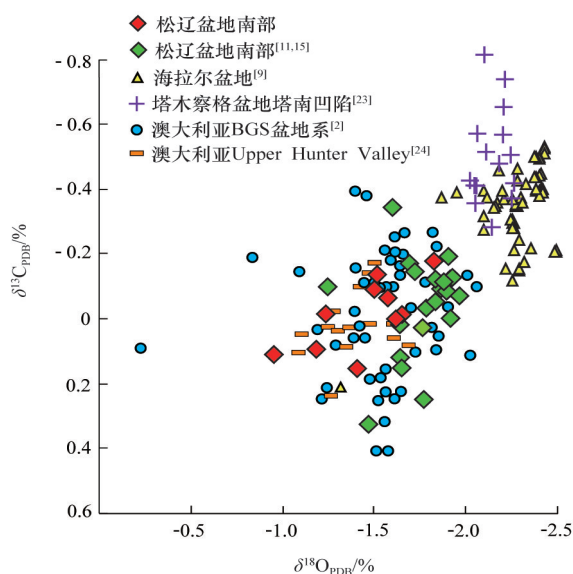


图5 松辽盆地南部片钠铝石 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 图解及相关数据比较

Fig. 5 Plot of $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ values of dawsonite in southern Songliao Basin and comparison with relative data

此外,古地层温度通过古地温梯度与现今埋深乘积获取,古地温梯度采用郭巍等^[27]所恢复的松辽盆地南部的平均地温梯度($4.2^\circ\text{C}/100\text{ m}$)。计算结果表明,与片钠铝石平衡的 CO_2 气碳同位素分布范围为 $-0.992\%\sim-0.423\%$ 。无机成因 CO_2 的碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2, \text{PDB}}$)大于 -0.8% ,主要分布在 $-0.8\%\sim-0.3\%$,当 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2, \text{PDB}}$ 小于 -1.0% ,则为有机成因,当 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2, \text{PDB}}$ 在 $-1.0\%\sim-0.8\%$,为无机和有机 CO_2 混合^[28]。按照上述标准,松辽盆地南部的片钠铝石绝大部分形成于无机 CO_2 背景,少量形成于无机 CO_2 与有机 CO_2 混合背景。

目前的数据及资料显示,片钠铝石中的碳多为幔源岩浆来源。例如,澳大利亚BGS盆地系与片钠铝石平衡的 CO_2 气的碳同位素范围为 $-1.13\%\sim-0.46\%$,基于该盆地系第三纪岩床、岩脉和喷出岩广泛分布,且Bowen盆地和Sydney盆地煤层中赋存高含量岩浆成因的 CO_2 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-0.7\%\sim\pm 0.2\%$),Baker等^[2]将片钠铝石中的碳确定为岩浆来源;海拉尔盆地中与片钠铝石平衡的 CO_2 气的碳同位素范围为 $-1.07\%\sim-0.70\%$,乌尔逊凹陷 CO_2 气的碳同位素为 $-1.136\%\sim-0.802\%$,与形成片钠铝石的 CO_2 的同位素范围基本一致,且与 CO_2 伴生的氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 2.08×10^{-6} ,氦气的同位素分布特征值为1.49,具有明显的幔源特征^[9]。松辽盆地南部 CO_2 气碳同位素分布区间为 $-0.844\%\sim-0.337\%$,与形成片钠铝石的 CO_2 的同位素范围基本一致,其伴生的氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值一般在 $2.65\times 10^{-6}\sim 4.53\times 10^{-6}$ ^[29],结合片钠铝石砂岩与 CO_2 气的分布都受控于深大断裂和火山岩等特点^[30],可以确定 CO_2 气和形成片钠铝石中的无机 CO_2 为幔源成因。

4 结论

1) 松辽盆地南部含片钠铝石砂岩的岩石类型以长石砂

岩和长石岩屑砂岩为主。片钠铝石的产状一种是呈放射状、毛发状、针柱状、菊花状集合体充填于碎屑颗粒之间的孔隙中,另一种是呈长柱状、板片状部分或全部交代碎屑颗粒。

2) 含片钠铝石砂岩的成岩共生序列依次为黏土矿物包壳—一次生加大长石—一次生加大石英、自生微晶石英、自生高岭石—方解石—油气充注— CO_2 充注—片钠铝石—铁白云石。 CO_2 充注之前的自生矿物组合为黏土土包壳、次生加大长石、次生加大石英、自生微晶石英、自生高岭石、方解石, CO_2 充注之后为片钠铝石和铁白云石。

3) 片钠铝石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-0.342\%\sim-0.329\%$,与片钠铝石平衡的 CO_2 气的碳同位素值为 $0.423\%\sim-0.992\%$,与松辽盆地南部 CO_2 气碳同位素值($-0.844\%\sim-0.337\%$)一致,表明形成片钠铝石的 CO_2 气与气藏中的 CO_2 具有相同的碳来源,均为幔源成因。

参考文献 (References)

- [1] 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, 15(4): 322-327.
Xu Yanbin, Chen Ping, Xu Yongcheng. Dawsonite distribution and its relationship with oil and gas in Hailar basin[J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(4): 322-327.
- [2] 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, A65(3): 522-530.
- [3] 杜运华. 一种次生的片钠铝石[J]. 地质科学, 1982(4): 434-437.
Du Yunhua. Secondary dawsonite in Shengli Oil Field, China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1982(4): 434-437.
- [4] 黄善炳. 金湖凹陷阜宁组砂岩中片钠铝石特征及对物性的影响[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 32-34.
Huang Shanbing. The character of dawsonite in sandstone reservoirs of the Funing Formation in Jinhu Sag and its influence on reservoir properties[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(2): 32-34.
- [5] 高玉巧, 刘立, 曲希玉. 片钠铝石的成因及其对 CO_2 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_2 migration and accumulation[J]. Advance in Earth Science, 2005, 20(10): 1083-1088.
- [6] 曾荣树, 孙枢, 陈代钊, 等. 减少二氧化碳向大气层的排放——二氧化碳地下储存研究[J]. 中国科学基金, 2004, 4: 196-200.
Zeng Rongshu, Sun Shu, Chen Daizhao, et al. Decrease carbon dioxide emission into the atmosphere—underground disposal of carbon dioxide [J]. China Science Funds, 2004, 4: 196-200.
- [7] 周蒂. CO_2 的地质储存——地质学的新课题[J]. 自然科学进展, 2005, 15(7): 782-787.
Zhou Di. CO_2 sequestration: A new project of geology[J]. Nature Science Development, 2005, 15(7): 782-787.
- [8] Xu T F, Apps J A, Pruess K. Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system[J]. Chemical Geology, 2005, 217: 295-318.
- [9] 刘立, 高玉巧, 曲希玉, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机 CO_2 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 CO₂ gas reservoir in Wuerxun depression, Hailaer Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2229–2236.
- [10] 董林森, 刘立, 曲希玉, 等. 松辽盆地南部红岗油田青山口组片钠铝石的结晶特征及成因探讨[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(6): 1031–1041.
- Dong Linsen, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Crystal characteristic and genesis of dawsonite of the Qingshankou Formation in the Honggang Oilfield in the Southern Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39(6): 1031–1041.
- [11] Liu N, Liu L, Qu X Y, et al. Genesis of authigenic carbonate minerals in the Upper Cretaceous reservoir, Honggang Anticline, Songliao Basin: A natural analog for mineral trapping of natural CO₂ storage[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 237: 166–178.
- [12] 刘娜, 刘立, 杨会东, 等. 松辽盆地南部片钠铝石形成与碎屑长石的成因联系[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(1): 54–63.
- Liu Na, Liu Li, Yang Huidong, et al. Genetic relationship between dawsonite and clastic feldspar in Southern part of Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(1): 54–63.
- [13] 于志超, 刘立, 曲希玉, 等. 松辽盆地南部红岗油田青山口组砂岩中片钠铝石的形成温度[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 293–302.
- Yu Zhichao, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Formation temperature of dawsonite from Qingshankou Formation in the Honggang Oilfield, Southern Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 293–302.
- [14] 刘娜, 刘立, 杨会东, 等. 松辽盆地红岗油田白垩系青山口组含片钠铝石砂岩自生矿物共生序列[J]. *古地理学报*, 2011, 13(2): 175–184.
- Liu Na, Liu Li, Yang Huidong, et al. Authigenetic mineral association of dawsonite-bearing sandstones of the Cretaceous Qingshankou Formation in Honggang Oilfield, Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(2): 175–184.
- [15] 高玉巧, 刘立, 杨会东, 等. 松辽盆地孤店二氧化碳气田片钠铝石的特征及成因[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 62–67.
- Gao Yuqiao, Liu Li, Yang Huidong, et al. Characteristics and origin of dawsonite in Gudian carbon dioxide gas field of Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 28(4): 62–67.
- [16] 高玉巧, 刘立, 曲希玉, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷与松辽盆地孤店CO₂气田含片钠铝石砂岩的岩石学特征[J]. *古地理学报*, 2008, 10(2): 111–123.
- Gao Yuqiao, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Petrologic characteristics of dawsonite-bearing sandstones in Wuerxun Sag of Hailaer Basin and Gudian CO₂ Gasfield in Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(2): 111–123.
- [17] 李福来, 刘立, 杨会东, 等. 松辽盆地南部乾安油田青山口组含片钠铝石砂岩的成岩作用[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(2): 217–224.
- Li Fulai, Liu Li, Yang Huidong, et al. Lithification of dawsonite-bearing sandstone in the Qingshankou Formation in the Qian'an Oil Field of the South Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39(2): 217–224.
- [18] 赵志魁, 张金亮, 赵占银. 松辽盆地南部坳陷湖盆沉积相和储层研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- Zhao Zhikui, Zhang Jinliang, Zhao Zhanyin. The research of lake sedimentary and reservoir in the southern depression of Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [19] 刘立, 侯启军, 刘娜, 等. 松辽盆地南部幔源CO₂与油气充注时序——来自含片钠铝石砂岩的证据[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(54): 873–881.
- Liu Li, Hou Qijun, Liu Na, et al. Charging time sequence of mantle CO₂ and hydrocarbon in Southern Songliao Basin: An evidence from dawsonite-bearing sandstones[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(54): 873–881.
- [20] Ingersoll R V, Bullard T F, Ford R L, et al. The effects of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi–Dickinson point-counting method[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1984, 54: 103–116.
- [21] Worden R H, Burley S D. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone[C]//Burley S D, Worden R H. Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient. [s. l.]: Blackwell Publish, 2003: 1–44.
- [22] 邹才能, 陶士振, 张有瑜. 松辽南部岩性地层油气藏成藏年代研究及其勘探意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(19): 2319–2329.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhang Youyu. Research on accumulation period and exploration significance of lithostratigraphic reservoirs in south Songliao Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(19): 2319–2329.
- [23] 董林森, 刘立, 蒙启安, 等. 蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷铜钵庙组火山碎屑岩中片钠铝石胶结物的成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(2): 421–431.
- Dong Linsen, Liu Li, Meng Qi'an, et al. Generation of dawsonite cement of pyroclastic rocks in Tongbomiao Formation in Tanan Sag of Tamsag Basin in Mongolia[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(2): 421–431.
- [24] Golab A N, Carr P F, Palamara D R. Influence of localized igneous activity on cleat dawsonite formation in Late Permian coal measure, Upper Hunter Valley, Australia[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66: 296–304.
- [25] 曲希玉, 杨会东, 刘立, 等. 松南油伴生CO₂气的成因及其对油气藏的影响[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2013, 43(1): 39–48.
- Qu Xiyu, Yang Huidong, Liu Li, et al. The genesis and its impact on oil and gas reservoir of oil-associated CO₂ in Southern part of Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2013, 43(1): 39–48.
- [26] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon[C]//Barnes H L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York: Wiley Press, 1979: 509–567.
- [27] 郭巍, 方石, 刘招君, 等. 松辽盆地南部泉头组–嫩江组热演化史研究[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(3): 1–6.
- Guo Wei, Fang Shi, Liu Zhaojun, et al. Research on thermal evolutionary history during the period of Quantou–Nenjiang Formation in the South of Songliao Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(3): 1–6.
- [28] 戴金星, 石听, 卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J]. *石油学报*, 2001, 22(6): 5–10.
- Dai Jinxing, Shi Xin, Wei Yanzhao. Summary of the abiogenic origin theory and the abiogenic gas pools (fields) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 22(6): 5–10.
- [29] 杨会东, 姚萍, 张旭, 等. 松辽盆地南部无机成因CO₂成藏机制研究[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(5): 634–638.
- Yang Huidong, Yao Ping, Zhang Xu, et al. Distribution of inorganic carbon dioxide in Southern Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(5): 634–638.
- [30] 邵明礼, 门吉华, 魏志平. 松辽盆地南部二氧化碳成因类型及富集条件初探[J]. *大庆石油地质与开发*, 2000, 19(4): 1–3.
- Shao Mingli, Men Jihua, Wei Zhiping. The genesis type and enrichment condition of the CO₂ in the southern part of Songliao Basin[J]. *Petrology Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2000, 19(4): 1–3.

(责任编辑 刘志远)