

文章编号: 1000-0550(2013)05-0898-09

准噶尔盆地西北缘二叠系云质碎屑岩地球化学特征及成因机理研究^①

史基安¹ 邹妞妞^{1,2} 鲁新川¹ 张顺存¹ 张杰¹

(1. 中国科学院油气资源研究重点实验室 兰州 730000; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 通过岩石学、碳氧同位素和元素地球化学等方法对准噶尔盆地西北缘二叠系云质碎屑岩特征进行了研究,分析了白云岩化机理并建立了白云岩化作用成因模式。结果表明,研究区岩石类型为白云质泥岩、白云质粉砂岩、白云化凝灰质粉砂岩和白云化凝灰质泥岩等,白云石化以交代湖相灰泥质和硅质(凝灰质)组分形成的自形或半自形的粉晶—细晶白云石为主,常见残余方解石和晚期方解石胶结物充填。岩石中 V/Ni 比(1.2~4.8)、Sr 含量(95.5~782.2 μg/g)、Mg/Ca 比(0.5~3.0)、有序度(0.36~0.98)、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (-14.8‰~3.2‰)和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (-1‰~5.2‰)的变化范围都较大。研究区云质岩类形成于水动力条件较弱、水体较深、相对安静的半闭塞陆相微咸—咸水湖湾环境,具多期次成因;二叠系时期构造运动复杂,断裂发育,火山活动频繁,不仅提供了白云石化过程中 Mg^{2+} 的来源,且为富镁流体的快速流动和渗透提供了通道。综合研究认为本区的云质岩有准同生白云岩化、埋藏白云岩化和热液白云岩化三种成因类型。

关键词 准噶尔盆地 二叠系 云质碎屑岩 地球化学特征 成因机理

第一作者简介 史基安 男 1958 年出生 研究员 沉积学 E-mail: jashi@lzb.ac.cn

中图分类号 P618.130.2⁺1 **文献标志码** A

“白云岩的问题(dolomite problem)”是困惑了地质学家们二百多年的一个难题,至今仍然没有一个满意的答案^[1,2],这也是白云岩成为沉积学研究热点和受到经久不衰关注的主要原因。世界上碳酸盐储层的50%是白云岩储层,可见白云岩作为良好的碳酸盐岩含油气储层是油气勘探的重要目标^[3,4]。中国近几年在白云岩储层中相继发现了塔里木盆地和田河气田、鄂尔多斯盆地苏里格气田、四川盆地普光超大型气田等^[5],而陆相白云岩储层在准噶尔盆地二叠系,库车坳陷古近系、青海沱沱河古近系、酒泉盆地地下白垩统、内蒙古临河坳陷白垩系—古近系、二连盆地地下白垩统、南—襄盆地泌阳凹陷古近系、江汉盆地潜江凹陷古近系、松辽盆地上白垩统、渤海湾盆地和辽东湾盆地古近系、广东三水盆地古近系等均有分布^[6~8]。2008年,在准噶尔盆地西北缘二叠系风城组的云质碎屑岩储层中发现工业油流,但对云质岩的白云化特征和成因机制有待深入研究,本文应用岩石学、X射线衍射、碳氧同位素分析、微量元素、地球化学分析等多种定性和定量手段相结合的研究方法,对

白云岩储层岩石类型、形成机理及其沉积环境进行探讨,分析盆地富镁流体的来源和水岩相互作用与白云岩化的关系,建立白云岩化成因模式,以期为准噶尔盆地白云岩储层区带的油气勘探提供新的研究思路 and 开发部署。

1 地质背景

准噶尔盆地西北缘介于西准噶尔褶皱山系与准噶尔地块之间,位于扎伊尔老山山前,是一个典型的前陆盆地山前冲断区的油气聚集带,南西到北东包括红一车、克一百、乌—夏构造带^[9,10]。准噶尔盆地西北分布最广、最为典型的云质碎屑岩发育于乌尔禾—风城地区二叠系风城组,乌尔禾—风城地区位于准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带,该区西邻黄羊泉地区,东接夏子街地区,北依哈拉阿拉特山,南望艾里克湖^[11]。该区发育的乌夏断裂带是西北缘前陆冲断带中北面的一段,表现为逆冲断裂带有关的断裂带和断褶带,包括乌尔禾鼻隆带、夏子街鼻隆带和上盘断裂带,这些断裂形成于中晚二叠世,三叠纪仍有较强的活动性,早期表现为顺层活动。乌尔禾—风城大型背

^①国家重点基础研究发展规划“973”项目(编号:2011CB201104)、国家科技重大专项(编号:2011ZX05000-01-06)、2012年中国科学院西部博士基金项目(编号:Y213XC1LXC)、中国科学院油气资源研究重点实验室开放基金(编号:KFJJ2012-07)联合资助
收稿日期:2013-07-31

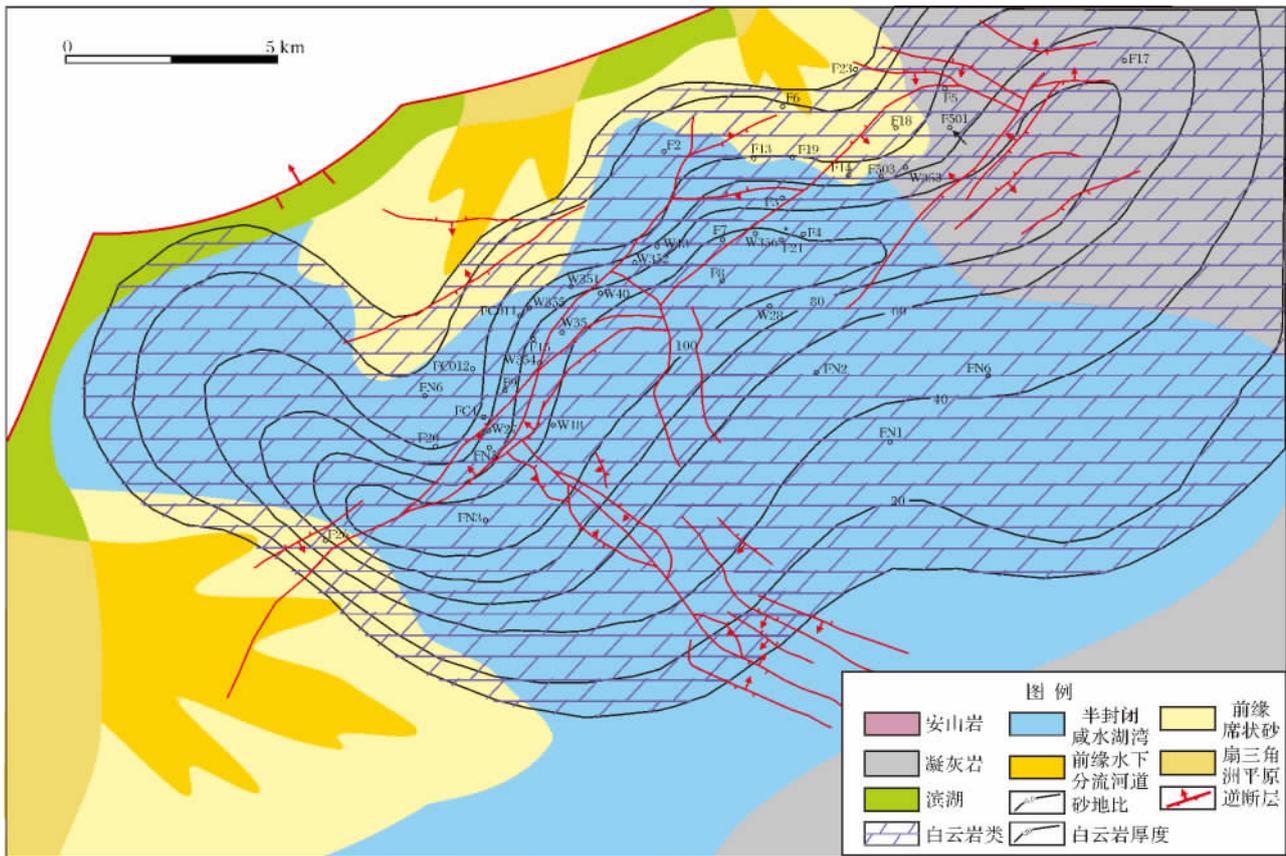


图 1 研究区沉积相与井位图

Fig. 1 The sketch map of the localities of studied wells and sedimentary facies in the study area

斜构造被北东走向的大断裂沿长轴方向切割, 形成一系列有利油气聚集的断鼻构造。准噶尔盆地西北缘二叠系风城组是早二叠世前陆盆地构造背景上发育起来的一套湖相沉积组合^[12-15]。经过多年勘探, 已在乌鲁木齐—风城地区二叠系先后发现乌 27 井、风南 2 井、风 5 井、乌 35 井以及风城 1 井等多个云质岩类油气藏(图 1)。乌鲁木齐—风城地区风城组发育的云质岩类, 主要为白云质泥岩、白云质粉砂岩、白云化凝灰质粉砂岩和白云化凝灰质泥岩, 是良好的油气储层。

2 云质碎屑岩岩石学特征

2.1 云质碎屑岩结构特征

准噶尔盆地西北缘的云质碎屑岩储层, 主要分布于下二叠统风城组及中二叠统夏子街组, 通过岩芯观察、显微薄片鉴定、扫描电镜和能谱分析以及 X 衍射矿物分析表明, 研究区云质碎屑岩岩性比较复杂, 其中白云岩、泥质白云岩、凝灰质白云岩等白云岩类岩性较少 (<10%), 大部分为白云质泥岩(图 2a, b, e)、

白云质粉砂岩、白云化凝灰质粉砂岩和白云化凝灰质泥岩(图 2c)等, 可见少量的硅质岩、硅硼钠石、泥质灰岩等特殊岩性。其中云质碎屑岩是由灰色、深灰色粉砂岩、泥岩、凝灰岩经过白云岩化作用而形成的, 白云石晶体一般呈现半自形(图 2b)、他形, 少数出现自形(图 2f), 白云石晶粒细小, 为泥晶、粉晶, 少数为细晶, 以层状、似层状、条带状、纹层状、星点状、雪花状或团块状, 沿岩石的层理(图 2d)、裂隙充填分布, 可见残余方解石和他形的方解石充填(图 2c)。

2.2 白云石的有序度分析

Goldsmith 与 Graff(1958) 用 X 射线衍射方法研究了白云石晶体结构的有序无序现象, 提出用 $I(015)/I(110)$ 的比值来表征白云石晶体结构的有序无序现象, 称之为有序度^[16, 17]。X 射线衍射分析方法已成为碳酸盐矿物鉴定与研究最重要的手段之一, 利用晶体结构、白云石有序度及形成环境三者之间的关系, 可判别白云岩的成岩环境。白云石的有序度与白云石中 CaCO_3 摩尔浓度具有正相关关系, 准同生成岩环境中形成的白云石具有低的有序度, 随着埋深

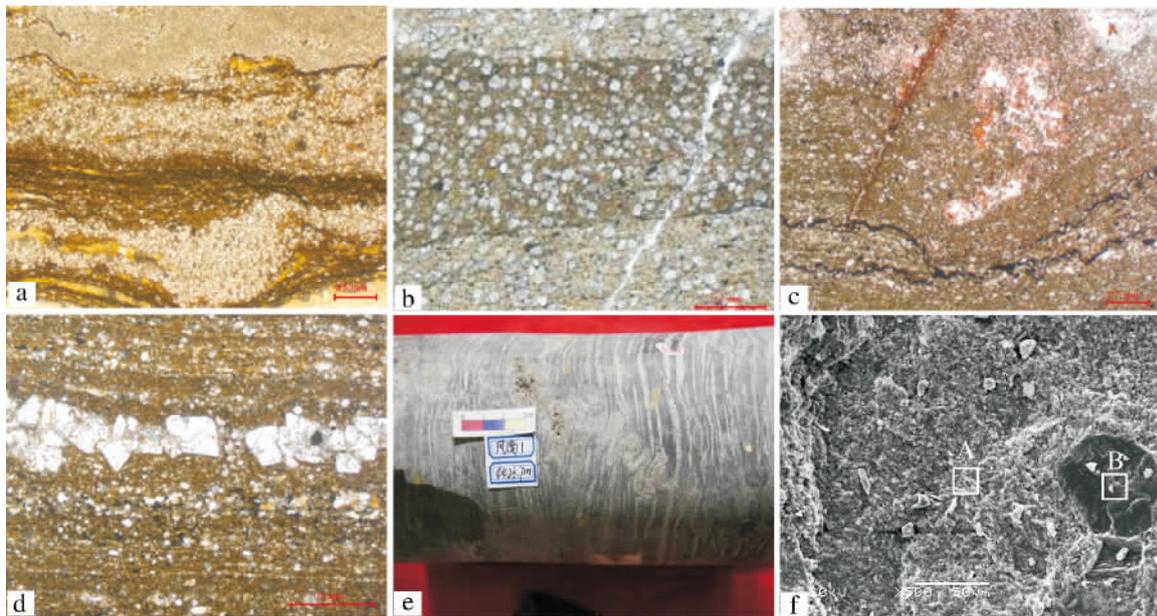


图2 研究区云质碎屑岩的结构构造特征

a. 乌35井 β 421.79 m P_1f_3 , 白云质泥岩中白云岩化作用形成的显微纹理。b. 风5井 β 250.95 m P_1f_2 , 白云质泥岩中星点状半自形白云石分布特征。c. 风6井 β 466.80 m P_1f_3 , 凝灰质泥岩中的白云岩化作用不完全, 可见残余方解石。d. 风7井 β 193.50 m, P_1f_3 , 白云化凝灰质泥岩中细晶白云岩常顺层分布。e. 风南1井 A 423.7 m P_1f_2 , 云质泥岩中的泄水构造特征。f. 风南1井 A 183.4 m P_1f_2 , 云质凝灰岩显微特征, 基质为凝灰质(A), 细晶白云石晶体为半自形和它形(B), 扫描电镜。

Fig. 2 Structure characteristics of dolomitic clastic rocks in the study area

的增加,白云石的有序度相应增加。本文测定了准噶尔盆地西北缘云质碎屑岩的27个样品的有序度(表1),有序度的范围为0.36~0.98,平均为0.60,范围跨度较大,反映云质碎屑岩的白云石化受多种因素影响,可能具有多期成因特征。有序度比较集中分布在0.50~0.65之间,大约占50%,有序度较低,反映出地层中比较富含 Mg^{2+} 离子,且X射线衍射分析中 Mg^{2+}/Ca^{2+} 比值高,所对应的白云石晶体多为泥晶,为准同生白云化的产物,白云石结晶速度快,结晶程度不高,有序度较低。这也可能与白云化过程中,取代阳离子 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 与 Mg^{2+} 竞争和火山活动的影响,使白云石的有序度降低^[18]。有序度为0.8~0.98的约占15%,对应的 $CaCO_3$ 摩尔浓度较低,且研究区的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 的含量较高,说明白云岩形成于还原性较强的环境,是结晶速度较慢、较稳定的成岩条件下交代灰泥的产物,属埋藏成因白云石。

3 云质碎屑岩地球化学特征

3.1 云质碎屑岩微量元素特征

微量元素V/Ni比值是判别沉积相和沉积环境的一个良好指标,海相沉积物的V/Ni比大于陆相环

境沉积物,一般 $V/Ni < 1$ 为海相, $V/Ni > 1$ 为陆相环境,且沉积物中Ni的界限为 $40 \mu g/g$ ^[19]。研究区云质碎屑岩中V/Ni比的范围为1.2~4.8,Ni的含量在 $6.5 \sim 99.9 \mu g/g$ 之间,有三个样品的Ni含量大于 $40 \mu g/g$,绝大多数Ni含量小于 $40 \mu g/g$,可知西北缘云质碎屑岩形成于陆相咸水的沉积环境。Baker^[20]等认为正常海水沉淀方解石组分的镉含量 $600 \mu g/g$,Land^[21-22]认为古代白云岩Sr的含量很少超过 $200 \mu g/g$,杨威^[23]等认为现代海水中白云岩Sr含量为 $1000 \sim 1200 \mu g/g$,与蒸发盐有关的超盐白云岩Sr含量通常为 $400 \sim 550 \mu g/g$,埋藏白云岩Sr含量为 $60 \sim 170 \mu g/g$ 。研究区云质岩类中Sr含量为 $95.5 \sim 782.2 \mu g/g$ (表1),较大的Sr含量变化范围说明白云岩化受多种因素影响,其中 $0 \sim 200 \mu g/g$ 的约11%,较低的Sr含量反映了白云岩可能是后期埋藏成岩作用过程中形成的^[24](图3);而大多集中分布在大于 $400 \mu g/g$,且Sr的平均含量为 $447 \mu g/g$,反映了白云岩是在盐度较高强烈蒸发的咸水环境中形成的,可能受少量大陆淡水的干扰,构造热流体的影响和改造,也反映了白云岩化较早。结合晶体组构,认为该套云质碎屑岩与准同生期高盐度孔隙水流体中白云岩

表 1 研究区云质碎屑岩微量元素和碳氧同位素分析结果表

Table 1 Test data for elements and carbon oxygen isotope of dolomitic rocks

井号	样品编号	岩性	V /($\mu\text{g/g}$)	Ni /($\mu\text{g/g}$)	Mn /($\mu\text{g/g}$)	Fe ₂ O ₃ /%	Sr /($\mu\text{g/g}$)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ /‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ /‰	有序度 (δ)	Mg/Ca	V/Ni	盐度 指数 Z	古温 度 T
F18	F18-11	白云质泥岩	63.4	28.1	747.5	2.63	533.4	4.4	1.1	0.55	0.90	2.26	136.86	8.85
F18	F18-12	白云质泥岩	87.3	17.9	985.8	3.29	663.6	4.8	1.6	0.59	0.99	4.88	137.93	6.14
F18	F18-13	白云质泥岩	44.7	17.9	505.9	2.86	363.2	5.1	0.9	0.66	1.37	2.50	138.19	9.93
F18	F18-14	白云质泥岩	67.1	29.6	496.2	3.48	352.8	5.2	0.9	0.46	1.97	2.27	138.40	9.93
F18	F18-15	白云质泥岩	87.8	36.4	529.9	3.72	209.3	3.5	-6.7	0.68	0.57	2.41	131.13	51.05
F18	F18-5	白云质泥岩	86.6	84.8	857.1	5.18	202.4	0	-13	-	1.08	1.02	120.83	85.13
F18	F18-6	白云质泥岩	77.6	99.9	883.4	5.18	178.1	-0.6	-14.8	-	1.00	-	118.70	94.87
F18	F18-7	白云质泥岩	67.9	20.4	470.9	2.15	782.2	2.6	-4	0.53	0.87	3.33	130.63	36.44
F18	F18-8	白云质泥岩	68.9	20.2	509	2.46	631.7	2.8	-2.8	0.65	1.01	3.41	131.64	29.95
F18	F18-9	白云质泥岩	94.3	24.9	286.5	3.83	144.6	3.2	1.1	0.9	2.95	3.79	134.40	8.85
F19	F19-1	白云质泥岩	77.3		361.6	7.25	95.9	0.3	-11	-	0.81	-	122.44	74.31
FC1	FC1-1	云化泥质粉砂岩	68.1	30.3	589.2	2.76	420.7	-0.4	-0.7	0.7	1.24	2.25	126.13	18.59
FN1	FN1-10	灰色白云质泥岩	15.4	6.5	377.9	1.39	138.9	3.6	-3.9	-	0.66	2.37	132.73	35.90
FN1	FN1-3	灰色白云质泥岩	48.2	22.2	592.9	2.8	598.4	-1	-0.8	0.68	0.64	2.17	124.85	19.13
FN1	FN1-4	灰色白云质泥岩	50.1	21.7	524.7	2.92	423.6	5	0.1	0.48	1.22	2.31	137.59	14.26
FN1	FN1-5	灰色白云质泥岩	61.1	28.7	499.7	3.74	222.8	4.3	-9.7	-	0.87	2.13	131.28	67.28
FN1	FN1-6	灰色白云质泥岩	60.6	17.1	494.9	2.58	560.5	5	-7.3	0.39	0.91	3.54	133.90	54.29
FN1	FN1-7	灰色白云质泥岩	46.6	32.3	441.6	2.57	420.7	4.8	-0.6	0.4	1.23	1.44	136.83	18.05
FN1	FN1-9	灰色白云质泥岩	73.6	22.1	888.8	3.54	593.7	4	1.9	0.75	1.13	3.33	136.44	4.52
FN2	FN2-11	白云化凝灰质粉砂岩	81.5	29.9	847.2	4.21	532.8	3.1	-6.4	0.43	0.51	2.73	130.46	49.42
FN2	FN2-5	白云化凝灰质粉砂岩	46.1	19.8	361.9	2.2	499.4	4.3	-0.8	0.57	0.87	2.33	135.71	19.13
FN2	FN2-6	白云化凝灰质粉砂岩	29.4	25.9	535.3	2.31	760.3	3.6	3.2	0.51	0.94	1.14	136.27	-2.51
FN2	FN2-7	白云化凝灰质粉砂岩	62.4	26.3	698.6	2.96	575.4	4.1	1.5	0.69	1.04	2.37	136.44	6.69
FN2	FN2-8	白云化凝灰质粉砂岩	50.6	35.1	577.8	3.41	586.1	3.5	-1.5	0.72	1.02	1.44	133.72	22.92
FN2	FN2-9	白云化凝灰质粉砂岩	74.5	22	911.5	3.41	658.6	4	0.5	0.59	1.04	3.39	135.74	12.10
FC011	FC011-1	白云质粉砂岩	44	24	338.7	3.05	600.8	2.3	-5	0.98	1.30	1.83	129.52	41.85
FC011	FC011-2	白云质粉砂岩	50.7	24.1	455.8	2.56	376.5	2.2	-5.1	0.85	1.07	2.10	129.27	42.39

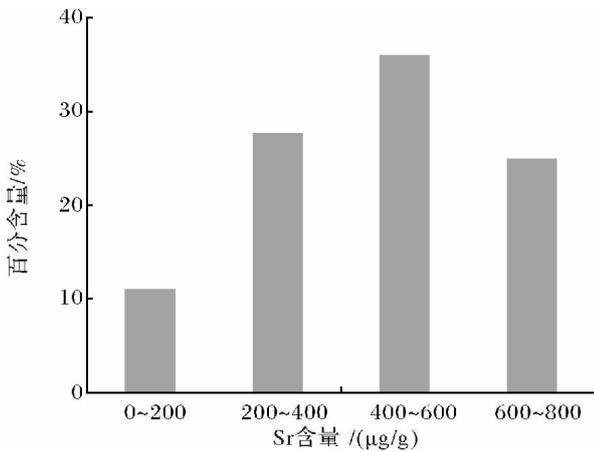


图 3 研究区云质碎屑岩中 Sr 元素丰度分布图

Fig. 3 Sr abundance distribution of dolomitic clastic rocks in the study area

化有关。

3.2 碳氧同位素地球化学特征

白云石的碳氧同位素组成主要受介质的温度和

盐度影响。在成岩作用中, 沉积物的埋深、温度、压力增加, 大气降水的淋滤溶解, 生物有机体降解等都对 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 产生一定的影响。由于氧同位素的蒸发分馏作用, 随着温度升高, 蒸发强烈, 使得湖水中盐度越高, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值也越高; 碳同位素组成受不同来源碳的影响, 可根据不同的碳源来判断白云化流体的来源, 进而判别成岩环境。总体上, 盐度升高, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值增大; 温度升高, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 变轻; 此外在成岩作用中, 淡水淋滤和生物降解均可使 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 变轻^[25-27]。研究区 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 最低值为 -14.8‰ , 最高值为 3.2‰ , 平均值为 2.94‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 最低值为 -1‰ , 最高值为 5.2‰ , 平均值 -3.01‰ (表 1), 碳氧同位素组成的变化范围较大, 这预示着白云岩化的形成环境的不同和形成机理的多样。盐度指数 Z 和古温度 T 是利用碳氧同位素来判别白云岩化盐度和温度的良好指标^[28], 其中 $Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)$, $T = 14.8 - 5.41 \times \delta^{18}\text{O}$ (表 1), 研究区除一个样品 $Z < 120$ 之外, 其他的都大于 120, 这

说明白云岩形成于高盐度咸水的环境; 古温度 T 介于 $-2.51^{\circ}\text{C} \sim 94.87^{\circ}\text{C}$ (表 1), 变化范围较大, 说明白云岩是不同期次形成的, 近地表温度 (50°C) 占 60% 以上, 这正好说明白云岩化是准同生蒸发环境下进行的, $50^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的占 15% 在, 说明研究区也有埋藏成因的白云石, 温度很高的可能是受火山活动的影响, 与热液活动相关。在白云岩碳—氧同位素协变图上 (图 4a) [27], 研究区白云石投点主要出现在 (M1, G2, G1) 的区域内及其周围, 反映了白云岩主要为埋藏成因, 也反映镁离子的来源为黏土矿物转化和热液来源。此外出现在混合水成因和回流渗透区之间的点, 可能与蒸发作用和深部热卤水的影响有关。在白云岩的碳—氧同位素成因判别图上 (图 4b) [1], 研究区白云岩的形成与世界其他地区典型的准同生蒸发环境形成的白云岩和埋藏成因白云岩表现出较高的一致性, 这与二叠系西北缘云质碎屑岩沉积期的沉积环境和构造特征都十分吻合。

4 云质碎屑岩成因机制及成因模式

白云岩成因问题是一个非常复杂的问题, 不仅涉及地质学、水文学, 而且还涉及到化学热力学、动力学乃至微生物学等问题, 它们可以形成于同生、准同生至埋藏及构造—热液的各种环境中, 并且还可能相互叠加, 造成前期结构的破坏, 这些使判别白云岩成因和机制更加复杂化。本文根据白云岩形成的沉积环境、岩石类型特征、微量元素含量的差异和碳氧同位素情况, 分析准噶尔西北缘二叠系云质碎屑岩的白云岩化机理, 并根据云质碎屑岩的展布和区域地质背景建立白云岩化成因模式。

4.1 富 Mg^{2+} 流体的来源

丰富的 Mg 的来源是发生白云岩化的首要问题, 前人研究认为海水或浓缩海水是白云岩化的主要 Mg 源 [21, 22]。经过矿物学和岩石地球化学结合动力学分析, 可判断西北缘二叠系白云石形成过程中镁的来源

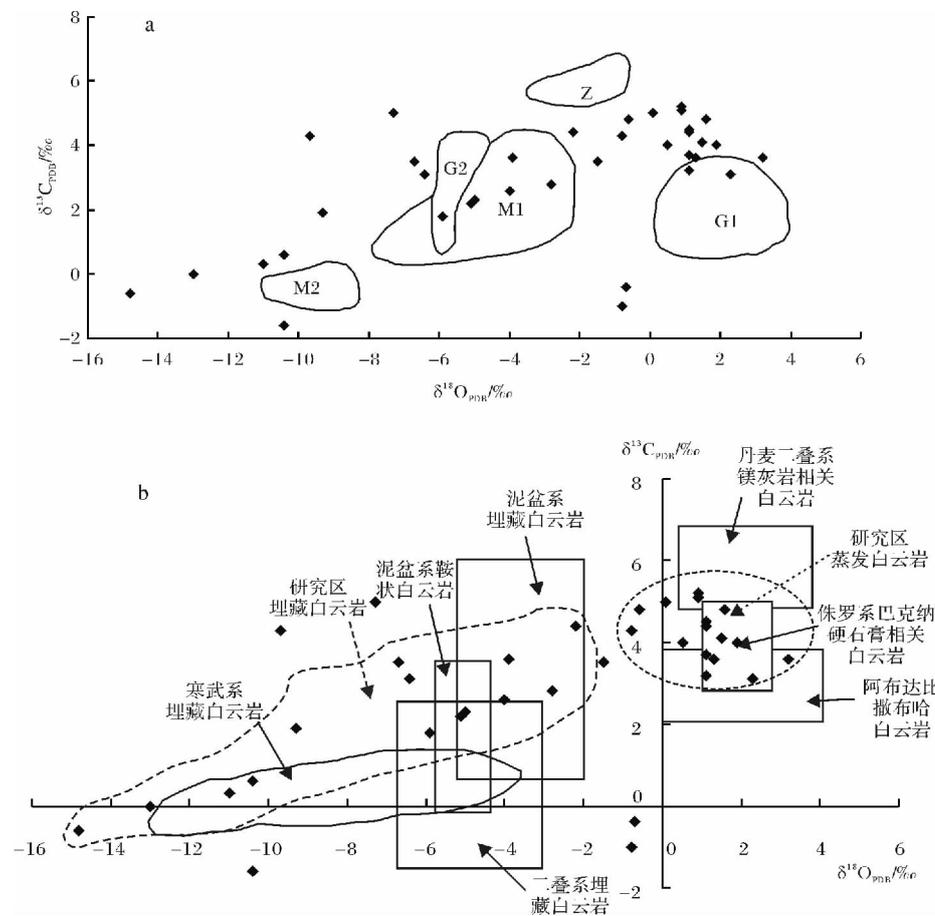


图 4 研究区白云石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 协变图和成因判别

a: 白云岩成因判别图(据文献 27 图版) Z-回流渗透成因; G1-混合水成因; G2-埋藏成因的含铁白云石; M-埋藏成因(含泥岩脱水作用); M2-埋藏成因的白云石胶结物; b. 典型蒸发环境白云岩和埋藏成因白云岩碳氧同位素变化 (Warren 2000)

Fig. 4 Covariant diagram showing the relationship of $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ and genetic mechanism in the study area

包括: 地层中高镁封存水、孔隙卤水及黏土矿物释放的镁、火山玻璃脱玻化和地球深部岩浆热液带来的镁。

由于西北缘二叠系风城组沉积于盐度和 pH 值偏高的半封闭的湖湾, 泥组分的孔隙水或地层水中富含 Mg^{2+} , 镁方解石和文石矿物本身就富 Mg^{2+} , 此外, 乌风地区处于断裂带上, 深层地下富 Mg^{2+} 流体沿断层上涌, 增加地层孔隙水的 Mg^{2+} 含量。且准噶尔盆地二叠纪是火山活动期, 地层中云质碎屑岩与凝灰岩共生, 火山玻璃在脱玻化后分离的 Mg^{2+} 和富镁火山岩矿物自身转化或流体淋滤及溶蚀产生的 Mg^{2+} 都是 Mg 的可能来源。

4.2 云质碎屑岩成因机制

通过对二叠系云质碎屑岩的岩矿特征、地球化学分析及准噶尔盆地二叠系古气候的演化, 认为准噶尔西北缘二叠系云质碎屑岩有准同生白云岩化、埋藏白云岩化和热液白云岩化三种成因类型。

在西北缘二叠系风城组沉积期, 沿夏子街—玛湖区呈串珠状分布的火山使乌风地区与玛湖大湖局部隔离, 形成半闭塞的湖湾环境, 加上二叠纪气候炎热, 蒸发作用强烈, 淡水资源补给较少, 在成岩作用早期, 高强度蒸发形成的高盐度富 Mg^{2+} 卤水, 与湖盆中富含高镁方解石和文石的凝灰质或粉砂质的灰泥组分发生白云岩化作用, 形成准同生成因的白云质泥岩、白云质凝灰岩等。研究区白云石主要为泥—微晶结构, 岩性致密, 有序度比较低, Mg/Ca 比较低, 碳氧同位素值集中偏高为特征^[29]。 $\delta^{13}C_{PDB}$ 大多分布在 1.5‰~4‰。 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值变化较大, 位于 -3.5‰~4‰之间(图 4)。泥—微晶白云岩与凝灰岩成互层产出^[30], 并伴有膏岩沉积, 常见波状纹层、水平层理、泄水构造(图 2e)等, 镜下泥—微晶白云石呈纹层条带

状(图 2d)分布, 富含有机质, 这些都是准同生白云岩化的直观表现。

埋藏作用下形成的白云石有序度一般都较高, $\delta^{18}O_{PDB}$ 常为负值, 分布范围极为宽广, 一般在 -15‰~0‰之间(图 4)。Sr 和 Na 的含量比较低。且准噶尔盆地在晚石炭世—早二叠世盆地周缘碰撞作用加剧, 西北缘推覆体形成, 为裂缝的发育提供了构造基础, 埋藏白云石化常与裂缝和缝合线的发育密切相关, 研究区乌夏断裂同生逆掩活动加快深层富镁流体上侵, 并使流体在层间快速渗透、流动, 顺着构造作用产生的裂缝或断裂对富含碳酸钙的沉积物进一步的改造, 形成埋藏成因的半自形—自形的细晶或中晶白云石, 岩浆没有直接的侵入风城组地层, 埋藏较浅, 并通过扫描电镜和能谱分析发现云质岩类的基质中含有大量硅铝组分($SiO_2 + Al_2O_3$), 白云石主要呈半自形的细晶、粉晶或微晶状分布于凝灰质或泥质基质组分中, 属浅埋藏—中埋藏阶段交代作用形成。

二叠纪沉积期火山活动强烈, 富镁流体运移受火山喷发产生的热流驱动, 使压力较大、温度较高的流体渗透到上覆地层当中或沿断层向上运移, 形成热液成因的白云岩, 且热液成因的白云岩常与硅硼钠石、钠长石、重晶石、方沸石及碳酸钠钙石等盐类矿物共生, 研究区硅硼钠石、方沸石和碳酸钠钙石较为常见。乌夏地区风城组晚期存在热液活动, 可见沿裂隙分布的脉状方解石及白云岩(图 2c)^[12, 31-33]。在研究区虽未发现典型热液作用的鞍状白云岩, 但可见少量的铁白云石, 为热液成因提供了证据。

4.3 云质碎屑岩成因模式建立

综合白云石结构和白云岩的地球化学特征, 结合白云岩的形成环境和形成机理和沉积相特征, 建立西

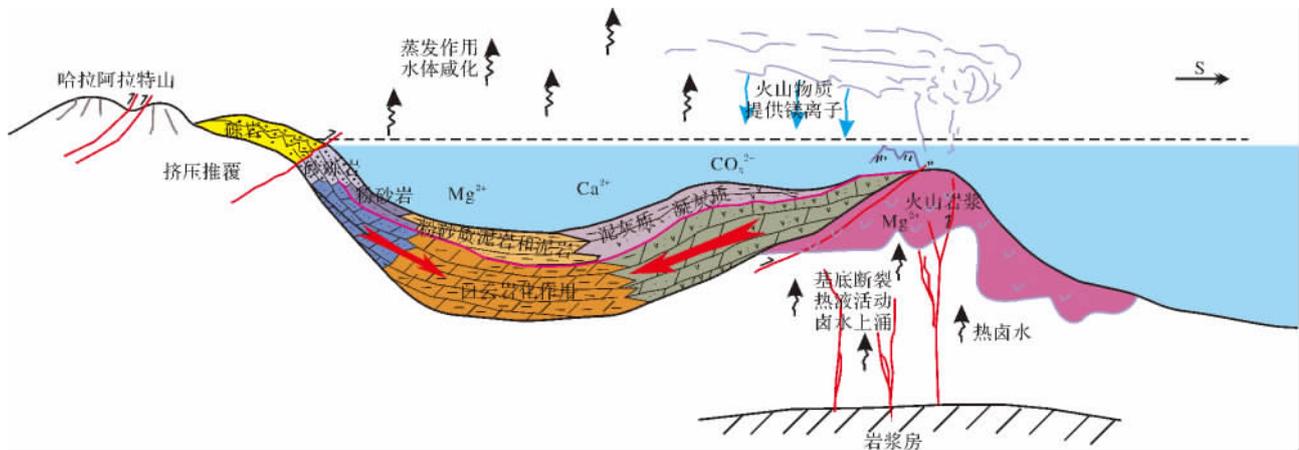


图 5 研究区白云岩化作用模式图

Fig. 5 The dolomitization chart of dolostones in study area

北缘二叠系云质碎屑白云岩化模式(图5)。即西北缘安静的半闭塞陆相微咸—咸水湖湾中沉积的文石和高镁方解石随泥质、粉砂质和凝灰质沉积物同时沉积,由于气候炎热,蒸发作用强烈,使水体盐度升高,在成岩早期发生准同生白云岩化;加上强烈的构造活动,间歇的火山活动,深部富镁热液沿断裂上升,在成岩中晚期形成埋藏成因和热液成因的白云石。

5 结论

(1) 云质碎屑岩岩性比较复杂,主要为白云质泥岩、白云质粉砂岩、白云化凝灰质粉砂岩和白云化凝灰质泥岩,是水体安静的半闭塞湖湾中沉积的富含凝灰质或灰泥质组分的粉砂质泥或泥质沉积物白云岩化作用形成的顺裂隙和层理等发育的半自形或自形的细—中晶白云石。

(2) 乌风地区风城组二叠系云质碎屑岩主要形成于陆源咸水湖湾,由于构造、气候、火山活动和地层水岩反应提供了白云岩化的富镁流体和发生白云化交代作用的条件,形成了风城组独具特征的云质岩含油气储层。

(3) 本区云质岩具多期成因,白云岩化机理较为复杂。云质岩的岩石学、地球化学证据、二叠系复杂的构造运动和气候特征、火山作用等表明白云化主要为准同生白云岩化、埋藏白云岩化和热液白云岩化,正是这些不同成岩期和不同深度内的白云岩化孕育了准噶尔西北缘二叠系云质碎屑岩油气藏。

参考文献(References)

- Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth Science Review* 2000, 52: 1-81
- Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal[C]//Braithwaite C J R, Rizzi G, Darke G. *The Geometry and Petrogenesis of Dolomite Hydrocarbon Reservoirs*. Special Publications 235. London: Geological Society 2004: 7-63
- Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L. Concepts and Models of Dolomitization [M]. [S. L.]: Society Economic Paleontologists Mineralogists Special Publication, 1980
- Sun S Q. A reappraisal of dolomite abundance and occurrence in the Phanerozoic [J]. *Sediment. Res. Sect.* 1994, 64(2): 396-404
- 张学丰, 胡文瑄, 张军涛, 等. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. *地质科技情报* 2006, 25(5): 32-40 [Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao *et al.* Critical problems for dolomite formation and dolomitization models[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(5): 32-40]
- 田景春, 曾允孚, 郑和荣, 等. 陆相含油盆地泥岩中白云岩夹层的聚集性研究—以东营凹陷沙三段上部白云岩为例[J]. *成都理工大学学报*, 2000, 27(1): 88-91 [Tian Jingchun, Zeng Yunfu, Zheng Ronghe *et al.* The research of the reservoir characteristics of the dolomite intercalated in mudstone in terrigenous oil bearing basin-taking the dolomite on the upper of Sha 3 in Dongying sag as an example [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2000, 27(1): 88-91]
- 张晓宝. 准噶尔盆地南缘东部中二叠统芦草沟组黑色页岩中白云岩夹层的成因探讨[J]. *沉积学报*, 1993, 11(2): 132-138 [Zhang Xiaobao. Study on the origin of the dolomite intercalated in the black shales in Middle Permian Lucaogou Formation in eastern part of southern margin of Junggar Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1993, 11(2): 132-138]
- 李红, 柳益群. “白云石(岩)问题”与湖相白云岩研究[J]. *沉积学报* 2013, 31(2): 302-315 [Li Hong, Liu Yiqun. "Dolomite problem" and research of ancient lacustrine dolostones [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(2): 302-315]
- 张义杰. 新疆准噶尔盆地断裂控油气规律研究[D]. 中国石油大学(北京), 2002 [Zhang Yijie. Control of fault activity on hydrocarbon accumulation in Junggar Basin [D]. China University of Petroleum (Beijing), 2002]
- 何登发, 尹成, 杜社宽, 等. 前陆冲断带构造分段特征—以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例[J]. *地学前缘* 2004, 11(3): 91-101 [He Dengfa, Yin Cheng, Du Shekuan, *et al.* Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts: A case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 91-101]
- 张义杰, 齐雪峰, 程显胜, 等. 准噶尔盆地晚石炭世和二叠纪沉积环境[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(6): 673-675 [Zhang Yijie, Qi Xuefeng, Cheng Xiansheng, *et al.* Approach to sedimentary environment of Late Carboniferous-Permian in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(6): 673-675]
- 冯有良, 张义杰, 王瑞菊, 等. 准噶尔盆地西北缘风城组白云岩成因及油气富集因素[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 685-692 [Feng Youliang, Zhang Yijie, Wang Ruiju, *et al.* Dolomites genesis and hydrocarbon enrichment of the Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 685-692]
- 陈新, 卢华复, 舒良树, 等. 准噶尔盆地构造演化分析新进展[J]. *高校地质学报*, 2002, 8(3): 257-267 [Chen Xin, Lu Huaifu, Shu Liangshu, *et al.* Study on structural evolution of Junggar Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(3): 257-267]
- 吴孔友, 查明, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识[J]. *地球学报*, 2005, 26(3): 217-222 [Wu Kongyou, Zha Ming, Wang Xulong, *et al.* Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2005, 26(3): 217-222]
- 陶国亮, 胡文瑄, 张义杰, 等. 准噶尔盆地西北缘北西向横断裂与油气成藏[J]. *石油学报*, 2006, 27(4): 23-28 [Tao Guoliang, Hu Wenxuan, Zhang Yijie, *et al.* NW-trending transverse faults and hydrocarbon accumulation in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(4): 23-28]

- 16 Goldsmith J R , Graff D R. Structural and compositional variations in some natural dolomites [J]. *Journal of Geology*, 1958, (66): 678-693
- 17 邓敏, 钱光人, 唐明述. 白云石晶体的有序度与去白云石化反应 [J]. *南京化工大学学报*, 2001, 23(1): 1-5 [Deng Min, Qian Guangren, Tang Mingshu. Ordered Index and dedolomitization of dolomite crystals [J]. *Journal of Nanjing University of Chemical Technology*, 2001, 23(1): 1-5]
- 18 王小芬, 杨欣, 王起琮. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组白云石有序度研究 [J]. *新疆石油天然气*, 2011, 7(1): 12-15 [Wang Xiaofen, Yang Xin, Wang Qicong. Research on the order degree of dolomite of Ordovician Majiagou Group in Ordos Basin [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2011, 7(1): 12-15]
- 19 刘春, 张惠良, 张荣虎, 等. 库车坳陷古近系白云岩地球化学特征及成因 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(3): 518-524 [Liu Chun, Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, et al. Geochemistry characteristic and origin of Paleogene dolomite in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3): 518-524]
- 20 Baker P A, Burns S J. Occurrence and formation of dolomite in organic rich continental margin sediments [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(11): 1917-1930
- 21 Land L S. 白云化作用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1985: 1-12 [Land L S. Dolomitization [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985: 1-12]
- 22 Land L S. Contemporaneous Dolomitization of Middle Pleistocene Reefs by Meteoric Water, North Jamaica [J]. *Bulletin of Marine Science (Coral Reef Project Papers in Memory of Dr. Thomas F. Goreau. 4)*, 1973, 23(1): 64-92
- 23 杨威, 王清华, 刘效曾. 塔里木盆地和田河气田下奥陶统白云岩成因 [J]. *沉积学报*, 2000, 18(4): 544-547 [Yang Wei, Wang Qinghua, Liu Xiaozeng. Dolomite origin of Lower Ordovician in Hetian River gas field, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4): 544-547]
- 24 黄成刚, 黄思静, 吴素娟, 等. 100 Ma 来海水的锶同位素组成演化及主要控制因素 [J]. *地球科学与环境学报*, 2006, 28(2): 19-24 [Huang Chenggang, Huang Sijing, Wu Sujuan, et al. Sr-isotope composition and evolution in sea water over past 100 Ma and control factors [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(2): 19-24]
- 25 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985: 1-266 [Zhang Ligang. The Application of the Stable Isotope to Geology [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1985: 1-266]
- 26 吴素娟, 黄思静, 孙治雷, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩中的白云石胶结物及形成机制 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(6): 569-575 [Wu Sujuan, Huang Sijing, Sun Zhilei, et al. Dolomite cement and its formation mechanism in the Triassic Yanchang sandstone, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengde University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2005, 32(6): 569-575]
- 27 李亚林, 黄永建, 王成善, 等. 西藏措勤盆地白垩系白云岩地球化学特征及其成因分析 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(3): 609-615 [Li Yalin, Huang Yongjian, Wang Chengshan, et al. Geochemical characteristics and genetic analysis of the Cretaceous dolomite in the Cuqin Basin, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(3): 609-615]
- 28 Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestone and fossils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28: 1787-1816
- 29 陈琪, 胡文璋, 李庆, 等. 川东北盘龙洞长兴组-飞仙关组白云岩化特征及成因 [J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 84-93 [Chen Qi, Hu Wenxuan, Li Qing, et al. Characteristics and genesis of dolomitization in Changxing and Feixianguan Formations in Panlongdong, northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 84-93]
- 30 郭建钢, 赵小莉, 刘巍, 等. 乌尔禾地区风城组白云岩储集层成因及分布 [J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(6): 699-701 [Guo Jiangan, Zhao Xiaoli, Liu Wei, et al. Origin and distribution of dolomite reservoir of Permian Fengcheng Formation in Wuerhe Area, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(6): 699-701]
- 31 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 657-667 [Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China [J]. 2012, 39(6): 657-667]
- 32 朱世发, 朱筱敏, 陶文芳, 等. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系风城组云质岩类成因研究 [J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1): 38-45 [Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Tao Wenfang, et al. Origin of dolomitic reservoir rock in the Permian Fengcheng Formation in Wu-Xia Area of the Junggar Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1): 38-45]
- 33 赫云兰, 刘波, 秦善. 白云石化机理与白云岩成因问题研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(6): 1010-1020 [He Yunlan, Liu Bo, Qin Shan. Study on the dolomitization and dolostone genesis [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(6): 1010-1020]

Geochemical Characteristics and Genetic Mechanism of Permian Dolomitic Clastic Rocks in Northwestern Junggar Basin

SHI Ji-an¹ ZOU Niu-niu^{1,2} LU Xin-chuan¹ ZHANG Shun-cun¹ ZHANG Jie¹

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The types and lithology characters of Permian dolomitic clastic rocks in northwestern Junggar Basin are investigated by means of petrologic analysis, X-ray identification, carbon and oxygen isotope geochemistry and element geochemistry analysis, also analyzed Dolomitization mechanism, Established dolomitization model. dolomitic clastic rocks in study areas include dolomitic mudstone, dolomitic siltstone, dolomitic tuffaceous siltstone, dolomitic tuffaceous shale etc. And dolostones which are formed through dolomitization by replacing lacustrine plaster and siliceous (tuffaceous) components mainly consist of powder-fine dolomites with automorphic or hypidiomorphic crystals, while residual calcite and late filled calcite cement commonly exist. The ratio of V/Ni (1.2 ~ 4.8), content of Sr (95.5 ~ 782.2 $\mu\text{g/g}$), Mg/Ca (0.5 ~ 3.0), the degree of order (0.36 ~ 0.98), $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (-14.8‰ ~ 3.2‰) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (-1‰ ~ 5.2‰) all have larger variation range. The dolomitic rocks in this area mainly formed in a relatively weak hydrodynamic conditions, deep, peaceful, salt and low-salt semi-closed terrestrial bay environment, have a characteristic of several stages and various causes. During Permian periods, in the researching zone the tectonics is complex, fault development, subtropical hot climate and frequent volcanic which provide favourable source of Mg^{2+} and permeability channel for the rich magnesium fluid fast flow. Comprehensive research show that these dolomitic rocks have three kinds of genetic types: Penecontemporaneous dolomitization, buried dolomitization, hydrothermal dolomitization.

Key words: Junggar Basin; Permian; dolomitic clastic rocks; geochemical characteristics; genetic mechanism