

渭北隆起岐山地区蓊县系白云岩地球化学特征及其成因与古环境意义

王琨¹, 任战利^{2,3}, 祁凯², 刘润川², 马骞²

1 甘肃煤炭地质勘查院; 2 西北大学地质学系; 3 西北大学大陆动力学国家重点实验室

摘要 渭北隆起岐山地区蓊县系的浅海相白云岩对鄂尔多斯盆地深层勘探意义重大。在涝川剖面实测及取样的基础上,通过碳氧同位素分析等地球化学分析测试手段,结合蓊县期沉积演化背景与地层展布特征,明确岐山地区蓊县系白云岩地球化学特征,深入探讨蓊县期古环境特征及白云岩成因。研究表明:岐山地区蓊县系岩性以白云岩、硅质白云岩和含燧石条带白云岩为主,发育叠层石,沉积环境为碳酸盐台地潮坪,沉积相类型为潮间带和潮下带;V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)和Ce/La氧化还原环境判别图显示蓊县系整体形成于弱氧化的浅水沉积环境;古水温数据与Sr/Cu值均反映蓊县系沉积期古水温相对较高,应为干燥炎热的气候背景;Sr/Ba、CaO/(CaO+MgO)判别图表明蓊县系白云岩整体形成于海相咸水环境。初步建立鄂尔多斯盆地蓊县系白云岩成因模式:灰质白云岩、晶粒白云岩以埋藏成因为主,残余结构白云岩以混合水成因为主,溶蚀白云岩多为回流渗透成因。

关键词 白云岩; 地球化学特征; 古环境; 成因; 蓊县系; 渭北隆起

中图分类号:TE121.3¹ 文献标识码:A

0 前言

在沉积岩中元素的化学性质及古气候和古环境制约着各个元素的迁移富集规律。近年来,元素地球化学和沉积地球化学快速发展,越来越多学者利用微量及稀土元素作为示踪剂来反映沉积期的环境信息^[1-2]。沉积岩中的微量元素对环境的变化十分敏感,因此通过研究微量元素的含量及变化可以判别和恢复古沉积环境,且具有较高的可信度。

鄂尔多斯盆地是我国重要的含油气盆地,盆地西南部的中元古界作为华北板块固结后的第一套沉积盖层,与之有关的油气地质研究备受关注^[3]。近年来在甘肃省崇信地区发现了蓊县系古油藏沥青,表明这一古老层系具有一定的资源潜力和勘探前景,但有关蓊县系储层及白云岩成因的研究较为薄弱^[4-5]。前人依据熊耳群火成岩地球化学性质,推测中元古代盆地西南部的大地构造背景,并根据沉积构造特征分析了中元古界的沉积环境和石油地质特征^[5-11];根据沉积岩微量元素特征与露头沉积构造特征综合判断盆地西南部长城系沉积环境^[12-13]。但是对于盆地西南部蓊县系的沉积环境,目前还没有开展过较深入的研究。盆地西南部岐山地区蓊县系露头为较完整的边缘海台地相沉积,是探讨蓊县期沉积古环境特征的理想地区。本文选取鄂尔多斯盆地西南部岐山地区涝川剖面为研究对象,通过碳氧同位素、主微量元素等测试分析,明确该地区蓊县系岩性特征及地球化学特征,揭示蓊县期沉积环境特征,厘定古温度、古盐度等古环境条件参数,并初步探讨岐山地区蓊县系白云岩成因。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是我国大型沉积盆地之一,由于构造位置特殊,其形成历史

收稿日期:2020-12-07; 改回日期:2021-11-17; 网络出版日期:2022-09-06

本文受国家重点研发计划课题“超深层及中新元古界油气成藏富集规律与勘探方向”(编号:2017YFC0603106)、国家自然科学基金重点项目“鄂尔多斯、沁水沉积盆地中生代晚期古地温场对岩石圈动力学演化及油气赋存的约束作用”(编号:41630312)、“十三五”国家科技重大专项课题“鄂尔多斯盆地西南部中元古界一下古生界构造演化与保存条件”(编号:2017ZX05005002-008)共同资助

第一作者: 王琨, 硕士, 2021年毕业于西北大学地质系矿产普查与勘探专业, 目前主要从事煤田地质研究工作。通信地址: 730099 甘肃省兰州市城关区团结新村街道241号; E-mail: 2450748830@qq.com

通信作者: 任战利, 研究员, 博士生导师, 主要从事盆地构造-热演化史与油气成藏评价方面的科研与教学工作。通信地址: 710069 陕西省西安市碑林区太白北路229号; E-mail: renzhanli@nwu.edu.cn

十分复杂,经历了多期构造演化,表现为叠加型的复合克拉通盆地。中新元古代,先后经历了熊耳运动、蓟县运动及晋宁运动,是大陆裂谷集中发育时期,此时期在吕梁运动固结的华北克拉通结晶基底之上,沉积了一套巨厚的中上元古界,盆地及其周围地区的中上元古界厚约200~3 000 m^[14]。盆地南部渭北隆起是构造活动带祁连—秦岭构造带与稳定地块(华北地块)的过渡地带,经历了复杂的大陆内部多期次构造造山作用及成盆作用^[15]。前人研究认为,在蓟县纪早期(1.3 Ga左右),华北克拉通南缘发生洋壳俯冲,北秦岭与华北陆块之间形成宽坪洋盆。此时,受长城纪晚期隆升作用的影响,盆地已转变为边缘拗陷型,在鄂尔多斯盆地南缘、西南缘、西缘、北缘以浅海—开阔台地—局限台地为主,沉积了巨厚的蓟县系。鄂尔多斯盆地蓟县系沉积环境主要为潮坪,可分为潮上带、潮间带和潮下带3种类型^[5](图1a)。岐山地区位于渭北隆起西南部(图1b),该区地形以低山丘陵为主,海拔多在1 000~1 500 m,自早白垩世以来渭北隆起整体抬升剥蚀,使中元古界蓟县系白云岩在岐山东北一带大面积出露。

涝川剖面位于岐山县凤鸣镇东北约5 km处,地层发育良好,层序清晰,剖面总长度约为6.2 km,整体发育一套碳酸盐岩沉积。根据野外观察及剖面实测,绘制了岐山地区蓟县系岩性柱状图(图2)。剖面自下而上依次出露龙家园组、巡检司组、杜关组、冯家湾组,巡检司组与上覆杜关组为平行不整合接触,冯家湾组与上覆寒武系昌平组呈角度不整合接触。

研究区蓟县系白云岩有较为清晰的显微特征:大多数白云岩样品在镜下呈现均匀的白云石化,以泥晶—粉晶级白云石为主,局部发育晶形完整无明显边界的中—粗晶白云石。研究区白云岩的分类以曾允孚的研究成果^[17]为依据,按照白云岩的结构—成因、原始结构的保存程度、白云石晶体的形态和大小、岩石主要成分等特征,具体可划分为灰质白云岩、晶粒白云岩、残余结构白云岩和溶蚀白云岩等4类。

灰质白云岩 仅在冯家湾组可见,受方解石胶结、交代作用影响,白云石晶粒多呈粉细粒他形结构(图2,照片a)。

晶粒白云岩 为蓟县系主要的白云岩类型,在

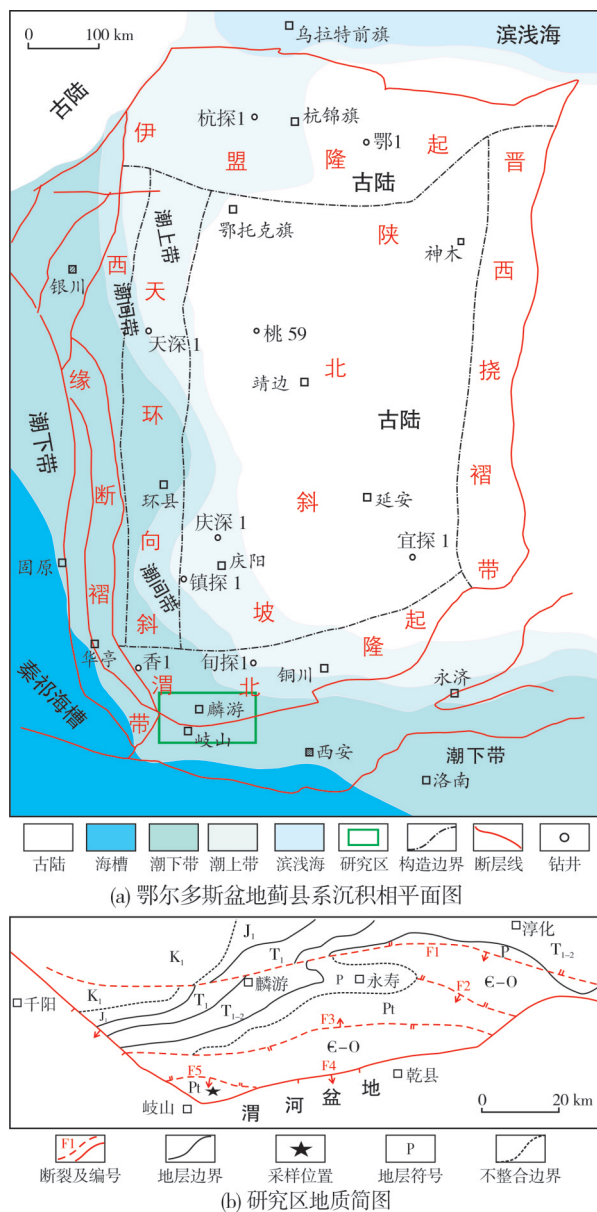


图1 研究区位置及地质背景(据文献^[16]修改)

Fig. 1 The location and geological background of the study area (cited from reference [16], modified)

杜关组最为常见。该类岩石重结晶程度较好,晶形较好,晶粒较大,从粉晶到粗晶均可见到,可见雾心亮边结构(图2,照片b)。

残余结构白云岩 常见于巡检司组,该类岩石经重结晶后,晶体增大,晶体间彼此镶嵌接触,有较多孔隙,且连通性好,后期的方解石或白云石充填溶孔(图2,照片c)。

溶蚀白云岩 在蓟县系各个层位普遍发育,该类岩石遭受不同程度的岩溶作用,方解石、石英作为填隙物充填孔隙(图2,照片d)。

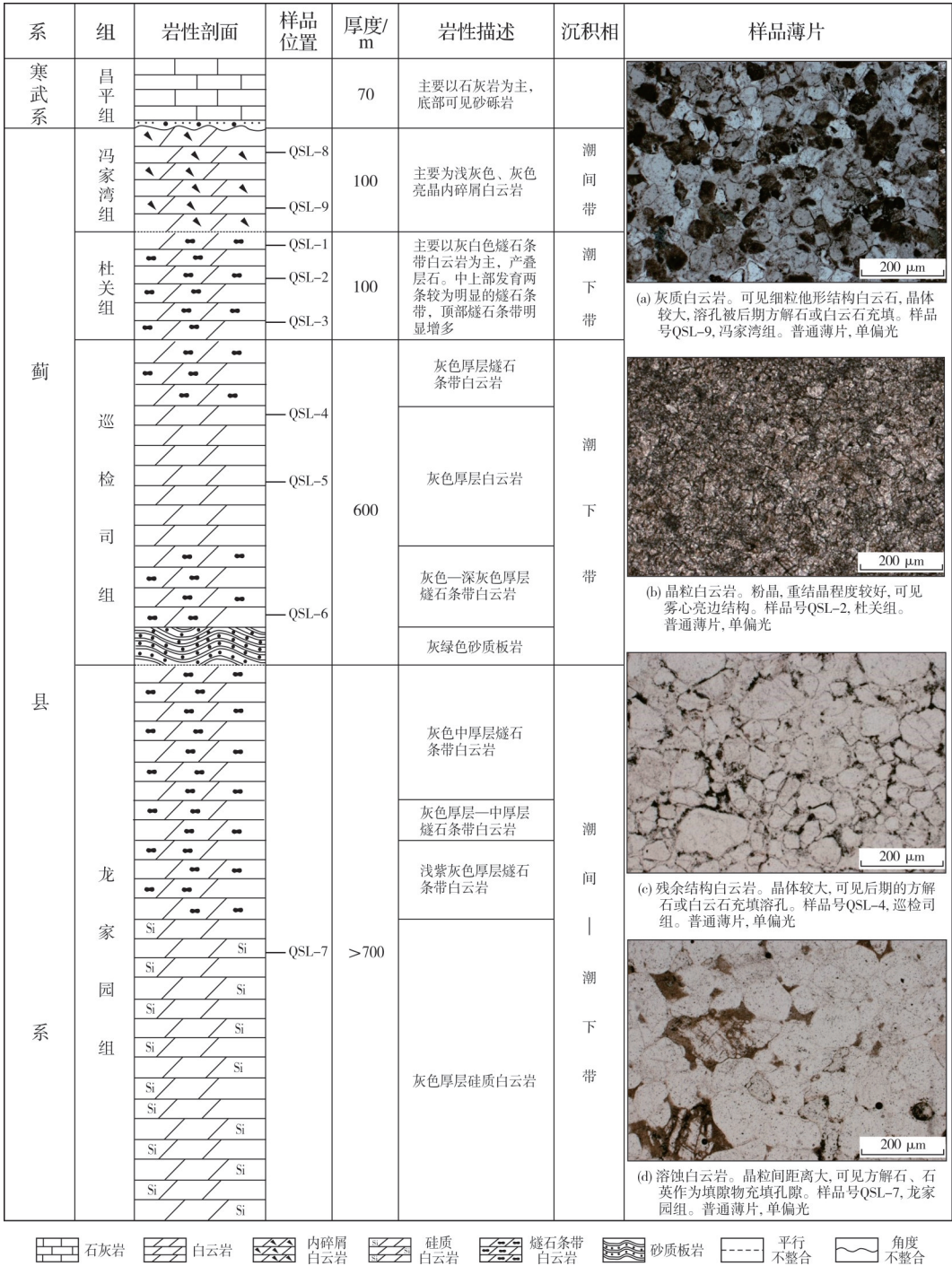


图2 岐山地区涝川剖面蓟县系岩性柱状图及白云岩镜下照片
Fig. 2 Lithologic column and microscopic photograph of dolomite of Jixian System of Laochuan outcrop in Qishan area

总的来看，岐山地区蓟县系主体为一套潮坪环境碳酸盐岩沉积建造。底部龙家园组沉积期，海水入侵使海域扩大，沉积了一套浅海相白云质碳酸盐岩，主要岩性为燧石条带细—粉晶白云岩，发育叠层石，沉积环境为碳酸盐台地潮坪，以潮间—潮下带为主；巡检司早期，海水继续侵入，发育厚层—块状层

白云岩，硅质条带白云岩；至巡检司中—后期，随着板块的抬升，海水退出，沉积区被抬升至地表，接受剥蚀，发育层状叠层石，为潮下带环境。至杜关期，板块下降，海水再次侵入，早期沉积的岩性主要为泥砂岩，随着海水的不断加深，逐渐以碳酸盐岩沉积为主，粒度、厚度较为均一，为潮下带环境。

2 白云岩地球化学特征

2.1 全岩主、微量元素特征

本次研究在涝川剖面露头采集9件样品进行分析测试。考虑到样品的微量元素含量测试结果可能受非碳酸盐矿物含量高于5%时的干扰^[18-19],样品选取时遵循挑选不含或含极少非碳酸盐矿物的原则,对挑选的9个新鲜无风化的样品用碎样器碎成200目以下的粉末样,在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行主量、微量元素分析。样品的制备及具体实验过程与刘晔等的微量元素

分析方法相同^[20]。

样品白云岩氧化物(表1)以CaO(24.27%~30.64%,平均值为28.87%)和MgO(18.24%~22.06%,平均值为20.94%)为主,Al₂O₃(0.08%~1.38%,平均值为0.38%)、TiO₂(0.02%~0.09%,平均值为0.03%)和Fe₂O₃(0.08%~0.95%,平均值为0.30%)含量均较低。SiO₂/(CaO+MgO)值较低(0.001~0.842,平均值为0.171),所有样品的SiO₂含量均小于40%,Al₂O₃含量介于0.08%~1.38%,低于白云质泥岩的SiO₂和Al₂O₃含量^[21](SiO₂>40%,Al₂O₃>12%),表明其沉积时受陆源碎屑物质的影响极其微弱。

表1 岐山地区蓟县系白云岩氧化物含量与参数

Table 1 Oxide content and parameters of dolomite of Jixian System in Qishan area

| 样品 编号 | 样品层位及类型 | 氧化物含量/% | | | | | | | 氧化物参数 | | |
|----------|-----------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|---------------------------------|-----------|
| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | K ₂ O | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO/ (CaO+MgO) | SiO ₂ / (CaO+MgO) | M值 |
| QSL-1 | 杜关组 晶粒白云岩 | 17.09 | 0.10 | 18.24 | 25.56 | 0.01 | 0.19 | 0.02 | 0.58 | 0.390 | 18 240.00 |
| QSL-2 | | 0.07 | 0.10 | 22.03 | 30.64 | 0.02 | 0.08 | 0.02 | 0.58 | 0.001 | 22 030.00 |
| QSL-3 | | 0.86 | 0.08 | 21.89 | 30.25 | 0.01 | 0.09 | 0.02 | 0.58 | 0.016 | 27 362.50 |
| QSL-4 | 巡检司组 残余结构白云岩 | 10.47 | 1.29 | 20.79 | 27.76 | 0.27 | 0.77 | 0.09 | 0.57 | 0.216 | 1 611.63 |
| QSL-5 | | 0.52 | 0.10 | 22.06 | 30.54 | 0.03 | 0.12 | 0.02 | 0.58 | 0.010 | 22 060.00 |
| QSL-6 | 巡检司组 溶蚀白云岩 | 1.14 | 0.09 | 21.55 | 30.31 | 0.01 | 0.14 | 0.02 | 0.58 | 0.022 | 23 944.44 |
| QSL-7 | 龙家园组 溶蚀白云岩 | 0.72 | 0.12 | 21.68 | 30.35 | 0.02 | 0.27 | 0.02 | 0.58 | 0.014 | 18 066.67 |
| QSL-8 | 冯家湾组 | 35.93 | 1.38 | 18.39 | 24.27 | 0.36 | 0.95 | 0.07 | 0.57 | 0.842 | 1 332.61 |
| QSL-9 | 灰质白云岩 | 1.25 | 0.14 | 21.85 | 30.19 | 0.03 | 0.12 | 0.02 | 0.58 | 0.024 | 15 607.14 |

注:M=100×MgO/Al₂O₃(据文献[22])

不同种类样品微量元素含量和特征参数见表2。灰质白云岩具有低Sr含量,高Fe、Mn、Na、K含量: Sr含量平均为20.65 μg/g, Fe含量平均为7 143 μg/g, Mn含量平均为175 μg/g, Na含量平均为1 380 μg/g, K含量平均为8 978 μg/g。晶粒白云岩具有高Sr含量,低Fe、Mn含量: Sr含量平均为45.17 μg/g, Fe含量平均为1 282 μg/g, Mn含量平均为42 μg/g, Na含量平均为446 μg/g, K含量平均为1 339 μg/g。残余结构白云岩具有低Sr、Na含量,高Fe、Mn、K含量: Sr含量平均为24.95 μg/g, Fe含量平均为7 029 μg/g, Mn含量平均为148 μg/g, Na含量平均为139 μg/g, K含量平均为11 914 μg/g。溶蚀白云岩具有高Sr、Na含量,低Fe、Mn、K含量: Sr含量平均为50.10 μg/g, Fe含量平均为576 μg/g, Mn含量平均为42 μg/g, Na含

量平均为909 μg/g, K含量平均为1 244 μg/g。4类样品微量元素含量的差异,可能表明了其具有不同的沉积环境。

稀土元素测试结果采用球粒陨石进行标准化^[23],用下角标N标注标准化后的数据。从表3可以看出,样品ΣREE波动范围为(0.71~64.63) μg/g,平均值为10.54 μg/g,远低于大陆上地壳的平均稀土元素总量(UCC=146.40 μg/g)。样品ΣLREE/ΣHREE值为6.10~8.84,平均值为7.29; (Nd/Yb)_N为0.54~0.91,平均值为0.70,比值均小于1。这表明轻稀土元素(LREE)较重稀土元素(HREE)富集^[24]。样品(La/Sm)_N为3.61~5.66,平均值为4.51,表明轻稀土元素具有轻度—中度分异。

通过白云岩稀土元素配分模式计算^[25]分析,

表2 岐山地区蓟县系白云岩微量元素含量及特征参数

Table 2 Contents and characteristic parameters of trace element of dolomite of Jixian System in Qishan area

| 样品号 | 样品类型 | 微量元素含量/(μg·g ⁻¹) | | | | | | | | | | | | | | 特征参数 | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|------------------------------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-----|-------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|----------|-------|------|-------|
| | | Be | Sc | V | Cr | Co | Ni | Zn | Ga | Sr | Fe | Mn | Na | K | Zr | Ba | Hf | Y | Cu | Th | U | Y/Ho | V/Cr | Ni/Co | V/(V+Ni) | Sr/Cu | U/Th | Sr/Ba |
| QSL-1 | 晶粒白云岩 | 0.05 | 0.34 | 3.44 | 1.08 | 2.80 | 4.01 | 7.94 | 0.09 | 42.00 | 1 417 | 59 | 438 | 1 238 | 0.59 | 7.82 | 0.01 | 1.42 | 3.23 | 0.07 | 0.07 | 35.50 | 3.19 | 5.90 | 0.46 | 13.00 | 1.04 | 5.37 |
| QSL-2 | | 0.05 | 0.33 | 4.31 | 1.46 | 3.27 | 4.82 | 5.87 | 0.11 | 50.90 | 1 214 | 35 | 501 | 1 458 | 0.87 | 6.87 | 0.02 | 0.45 | 2.30 | 0.07 | 0.12 | 45.00 | 2.95 | 5.48 | 0.47 | 22.13 | 1.52 | 7.40 |
| QSL-3 | | 0.03 | 0.32 | 3.25 | 1.55 | 5.41 | 3.28 | 4.43 | 0.07 | 42.60 | 1 214 | 32 | 398 | 1 320 | 0.44 | 5.75 | 0.01 | 1.72 | 3.05 | 0.04 | 0.15 | 34.40 | 2.10 | 5.13 | 0.50 | 13.97 | 3.23 | 7.41 |
| QSL-4 | 残余结构 | 0.11 | 0.36 | 2.84 | 1.23 | 6.70 | 2.23 | 5.67 | 0.14 | 33.70 | 6 857 | 97 | 148 | 12 000 | 1.01 | 8.57 | 0.02 | 0.48 | 2.26 | 0.06 | 0.32 | 48.00 | 2.31 | 5.58 | 0.56 | 14.89 | 5.37 | 3.93 |
| QSL-5 | 白云岩 | 0.36 | 1.53 | 9.00 | 3.96 | 26.80 | 7.00 | 13.60 | 1.81 | 16.20 | 7 201 | 198 | 130 | 11 828 | 17.60 | 8.10 | 0.47 | 0.54 | 1.44 | 1.47 | 0.20 | 54.00 | 2.27 | 5.30 | 0.56 | 11.23 | 0.14 | 2.00 |
| QSL-6 | 溶蚀结构 | 0.31 | 0.38 | 2.97 | 1.13 | 2.59 | 2.80 | 4.43 | 0.17 | 33.50 | 472 | 40 | 928 | 1 362 | 1.16 | 6.81 | 0.03 | 0.47 | 2.68 | 0.08 | 0.14 | 47.00 | 2.63 | 5.83 | 0.51 | 12.48 | 1.72 | 4.92 |
| QSL-7 | 白云岩 | 0.07 | 0.62 | 5.67 | 1.64 | 14.60 | 3.83 | 5.78 | 0.45 | 66.70 | 680 | 43 | 890 | 1 126 | 2.81 | 23.91 | 0.07 | 0.89 | 2.72 | 0.16 | 0.45 | - | 3.46 | 5.63 | 0.60 | 24.55 | 2.73 | 2.79 |
| QSL-8 | 灰质 | 0.04 | 0.35 | 6.24 | 1.53 | 15.20 | 6.22 | 5.13 | 0.14 | 20.10 | 7 200 | 160 | 1 485 | 9 658 | 1.00 | 2.57 | 0.02 | 1.85 | 2.13 | 0.05 | 0.11 | 46.25 | 4.08 | 5.98 | 0.50 | 9.44 | 2.03 | 7.80 |
| QSL-9 | 白云岩 | 0.18 | 0.34 | 4.93 | 2.24 | 3.11 | 5.52 | 2.90 | 0.15 | 21.20 | 7 086 | 189 | 1 275 | 8 298 | 1.33 | 2.91 | 0.03 | 9.84 | 1.29 | 0.11 | 0.38 | 30.75 | 2.20 | 5.02 | 0.47 | 16.43 | 3.51 | 7.28 |

表3 岐山地区蓟县系白云岩稀土元素含量及特征参数

Table 3 Contents and characteristic parameters of REE of dolomite of Jixian System in Qishan area

| 样品 号 | 样品类型 | 稀土元素含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) | | | | | | | | | | | | | | 特征参数 | | | | | |
|---------|-----------|--|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| | | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | ΣREE | $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ | (Nd/Yb) _N | (La/Sm) _N | δCe | δEu |
| QSL-1 | 晶粒 白云岩 | 2.20 | 3.86 | 0.38 | 1.55 | 0.28 | 0.05 | 0.34 | 0.05 | 0.22 | 0.04 | 0.15 | 0.02 | 0.13 | 0.02 | 9.29 | 8.58 | 0.64 | 4.94 | 0.85 | 0.49 |
| QSL-2 | | 0.24 | 0.35 | 0.05 | 0.20 | 0.04 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 1.03 | 6.85 | 0.54 | 3.77 | 0.69 | 0.76 |
| QSL-3 | | 1.72 | 2.28 | 0.36 | 1.45 | 0.30 | 0.07 | 0.28 | 0.05 | 0.26 | 0.05 | 0.16 | 0.02 | 0.12 | 0.02 | 7.14 | 6.44 | 0.65 | 3.61 | 0.63 | 0.73 |
| QSL-4 | 残余结构 | 0.58 | 0.42 | 0.11 | 0.40 | 0.07 | 0.02 | 0.08 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 1.84 | 6.96 | 0.72 | 5.21 | 0.35 | 0.81 |
| QSL-5 | 白云岩 | 0.64 | 0.48 | 0.11 | 0.40 | 0.08 | 0.02 | 0.08 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 1.98 | 7.21 | 0.72 | 5.03 | 0.37 | 0.76 |
| QSL-6 | 溶蚀结构 | 0.48 | 0.67 | 0.10 | 0.34 | 0.07 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 1.88 | 8.84 | 0.91 | 4.31 | 0.68 | 0.86 |
| QSL-7 | 白云岩 | 0.18 | 0.23 | 0.03 | 0.14 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.70 | 6.10 | 0.75 | 5.66 | 0.61 | 1.25 |
| QSL-8 | 灰质 | 1.45 | 2.38 | 0.32 | 1.14 | 0.23 | 0.05 | 0.28 | 0.04 | 0.20 | 0.04 | 0.12 | 0.01 | 0.09 | 0.01 | 6.36 | 7.05 | 0.68 | 3.97 | 0.79 | 0.60 |
| QSL-9 | 白云岩 | 14.68 | 24.82 | 2.86 | 12.08 | 2.24 | 0.42 | 2.58 | 0.42 | 2.58 | 0.42 | 1.92 | 0.32 | 1.12 | 0.14 | 64.63 | 7.58 | 0.73 | 4.12 | 0.80 | 0.53 |

注: $\delta\text{Eu}=2\text{Eu}_N/(\text{Sm}_N+\text{Gd}_N)$; $\delta\text{Ce}=3\text{Ce}_N/(2\text{La}_N+\text{Nd}_N)$; LREE: 轻稀土元素; HREE: 重稀土元素; ΣREE : 稀土元素总量; (Nd/Yb)_N, (La/Sm)_N, (Gd/Yb)_N: 标准化后元素含量比值。
球粒陨石标准化数据引自文献[25]。

晶粒白云岩和残余结构白云岩的稀土元素配分模式有微弱右倾的趋势,指示了在成岩过程中,重稀土元素比轻稀土元素更容易迁移;溶蚀白云岩的稀土元素配分模式右倾趋势更明显,反映出成岩过程中重稀土元素迁移能力较轻稀土元素强;灰质白云岩的稀土元素配分模式图右倾趋势更为显著,表明其重稀土元素的迁移能力更强,且稀土元素总量明显比其他3类白云岩高(图3)。

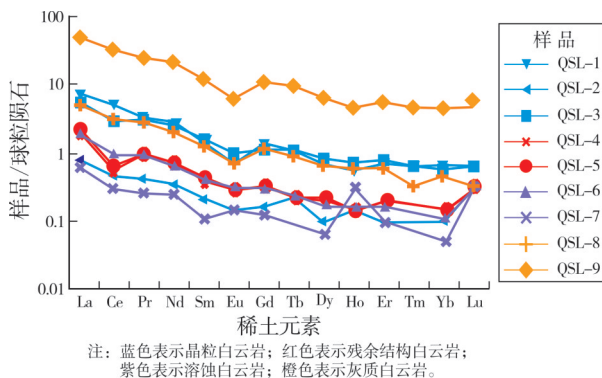


图3 岐山地区蓟县系白云岩REE配分模式

Fig. 3 Chondrite-normalized rare earth element patterns of dolomite of Jixian System in Qishan area

此外,样品 δCe 范围为0.35~0.85,平均值为0.64,Ce均表现为负异常,反映了蓟县系白云岩沉积期处于氧化环境。 δEu 范围为0.49~1.25,平均值为0.75,Eu元素除溶蚀白云岩外,其余均为明显负异常,表明研究区白云岩形成过程中几乎未受热液改造。

2.2 碳氧同位素特征

前人常通过碳、氧同位素分析碳酸盐岩沉积古环境、古温度和古盐度等,用其来指示白云岩的成因及形成条件^[26]。根据碳氧同位素的性质,可以判断白云岩流体的来源和性质,进一步可推测其沉积环境和成因。

研究区蓟县系白云岩样品碳氧同位素组成值见表4: $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在-2.45‰~1.41‰之间,平均值为-0.42‰; $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在-8.88‰~-4.01‰之间,平均值为-6.09‰。碳氧同位素组成值分布相对较为集中(图4),反映了成岩流体性质相同或相似的海相沉积。仅在局部地区,由于后期埋藏作用和成岩后期的风化作用分别导致了灰质白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现偏差。进一步通过Z值判断成岩流体的性质,Z值的计算公式^[27]如下:

$$Z=2.048(\delta^{13}\text{C}+50)+0.498(\delta^{18}\text{O}+50) \quad (1)$$

计算结果显示(表4):绝大多数样品Z值大于120,可确定其来自海相沉积;只有1个样品小于120,推测在成岩过程后期有淡水加入。

表4 岐山地区蓟县系白云岩样品碳氧同位素组成及盐度指数

Table 4 Carbon and oxygen isotopic compositions and salinity index of dolomite samples of Jixian System in Qishan area

| 样品编号 | 样品岩性 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$ | Z值 |
|-------|---------|---|---|-------|
| QSL-1 | 晶粒白云岩 | -0.77 | -4.01 | 123.7 |
| QSL-2 | | 0.52 | -6.81 | 125.0 |
| QSL-3 | | 0.00 | -5.60 | 124.5 |
| QSL-4 | 残余结构白云岩 | -0.10 | -6.10 | 124.1 |
| QSL-5 | | -0.61 | -6.02 | 123.1 |
| QSL-6 | 溶蚀白云岩 | 0.47 | -6.23 | 125.2 |
| QSL-7 | | 1.41 | -6.56 | 126.9 |
| QSL-8 | 灰质白云岩 | -2.27 | -4.62 | 120.3 |
| QSL-9 | | -2.45 | -8.88 | 117.9 |

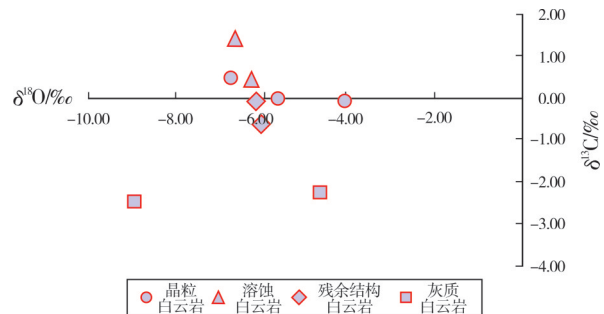


图4 岐山地区蓟县系白云岩样品碳氧同位素组成交会图

Fig. 4 Crossplot of carbon and oxygen isotopic compositions of dolomite samples of Jixian System in Qishan area

3 讨论

3.1 数据的可靠性分析

利用白云岩的地球化学数据来分析其所蕴含的环境信息,需要确定样品是否遭受后期成岩作用的影响。蓟县系白云岩可能会因为在漫长的地质历史时期中受到地质作用的影响而使其地球化学数据在反映环境时出现偏差。本次野外采集的白云岩样品中,MgO与CaO含量比值接近1:1;微量元素含量 $\text{Sc} \leq 1.53 \mu\text{g/g}$, $\text{Th} \leq 1.47 \mu\text{g/g}$, $\text{Hf} \leq 0.47 \mu\text{g/g}$, $\text{Zr} \leq 17.6 \mu\text{g/g}$ (表2),均小于上地壳中所对应元素的含量($\text{Sc}=14.9 \mu\text{g/g}$, $\text{Th}=2.3 \mu\text{g/g}$, $\text{Hf}=5.8 \mu\text{g/g}$, $\text{Zr}=240.0 \mu\text{g/g}$),表明白云岩在成岩过程中受到陆源组分的影响极其微弱。样品Y/Ho值为30.75~54.00,平均值为42.61,与后太古代澳大利亚页岩对应值

(27.25)相差较大,接近现代海水值(44~72)^[19,28]; $\Sigma \text{REE} + \text{Y}$ 平均值为 $12.50 \mu\text{g/g}$,远小于陆源碎屑物的 $100 \mu\text{g/g}$ 。这同样表明样品受到陆源组分的影响极其微弱^[29-30]。另外,岩石中稀土元素的含量会由于成岩作用影响而发生改变,使 δCe 与 δEu 及

δCe 与 ΣREE 表现出较好的相关性。本次获得的蓊县系 9 个样品的稀土元素数据中, δCe 与 δEu 及 δCe 与 ΣREE 的相关性均较差(图 5),也表明样品受成岩作用的影响很微弱。因此,本次测试获得的地球化学数据可以有效指示白云岩的形成环境。

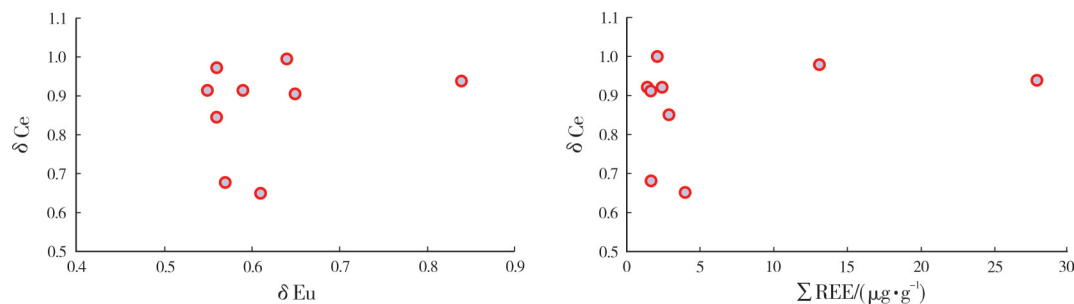


图 5 岐山地区蓊县系白云岩的 δCe - δEu 和 δCe - ΣREE 交会图

Fig. 5 Crossplots of δCe - δEu and δCe - ΣREE of dolomite of Jixian System in Qishan area

3.2 古环境分析

碳酸盐岩中微量元素、稀土元素的含量记录了沉积环境和周围水体的地球化学特征,通过分析蓊县系白云岩样品中微量元素和稀土元素的含量、分布及比值等参数得到了岐山地区蓊县系多种沉积环境指标,再结合碳、氧同位素组成特征,初步探讨了研究区不同类型的白云岩成因。

3.2.1 氧化还原环境判别

U、V 和 Mo 是微量元素中对氧化还原条件十分敏感的元素(U、V 富集在缺氧的条件下),可以作为恢复古海洋氧化还原状态的理想指标。同时, $V/(V + \text{Ni})$ 、 Ni/Co 及 V/Cr 的值对于判断氧化还原条件十分有效^[31-32]。U/Th 值会因为 Th 元素放射性衰变减少或热液活动导致 U 元素增多的影响变大,因此对古老地层沉积环境的指示作用受限^[33]。对于元古界沉积而言, V/Cr 、 Ni/Co 的值对氧化还原环境的判别相对准确^[31], $V/(V + \text{Ni})$ 值次之, U/Th 值判别结果不太理想。研究区内样品的 V/Cr 值为 2.10~4.08,平均值为 2.80; Ni/Co 值为 5.02~5.98,平均值为 5.54; $V/(V + \text{Ni})$ 值为 0.46~0.60,平均值为 0.51(表 2)。结合 V/Cr 、 Ni/Co 和 $V/(V + \text{Ni})$ 的氧化还原环境判别图(图 6a—6c),判断研究区蓊县系沉积期整体处于弱氧化环境。

3.2.2 气候(干旱)环境判别

Sr 元素在干燥气候条件下会随着水分的蒸发

大量析出形成盐类在水底沉积,导致 Sr 含量在岩石中相对增高。大量研究表明,温湿气候条件下 Sr/Cu 值介于 1.3~5.0,若为干热气候其值大于 5.0^[34-35]。研究区样品 Sr/Cu 值均大于 5.0(9.44~24.55,平均值为 15.35)(表 2),表明研究区白云岩均形成于干热气候条件下(图 6d)。

U/Th 值在热水环境下大于 1,研究区 U/Th 值除 1 个样品外其他均大于 1。Sr 在岩石中的含量与古温度具有良好的相关关系,通过前人总结出的岩石中 Sr 含量与古水温度之间的关系^[36-37]: $\text{Sr} = 2\,578 - 80.8 t_{\text{古水温}}$,计算得到研究区蓊县系沉积时期的古水温(表 5)。由表 5 可见,研究区蓊县系古水温的整体较高,平均温度达到 31.46°C 。古水温数据与 Sr/Cu 值反映的结果一致,即蓊县系沉积期区域古水温相对较高,应为干燥炎热的气候背景,说明岐山地区蓊县系沉积期处于热带—亚热带地区。

表 5 岐山地区蓊县系沉积时期古水温数据表

Table 5 Paleo-water-temperature of Jixian System in Qishan area during deposition period

| 样品号 | QSL-1 | QSL-2 | QSL-3 | QSL-4 | QSL-5 | QSL-6 | QSL-7 | QSL-8 | QSL-9 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 古水温/ $^\circ\text{C}$ | 31.39 | 31.28 | 31.38 | 31.49 | 31.71 | 31.49 | 31.08 | 31.66 | 31.64 |

3.2.3 海陆环境判别

区别海相沉积和陆相沉积主要通过介质中所有可溶盐的质量分数——盐度。Sr 在海水中的含量较高,在大气水中的含量低,超咸水中 Sr 含量更

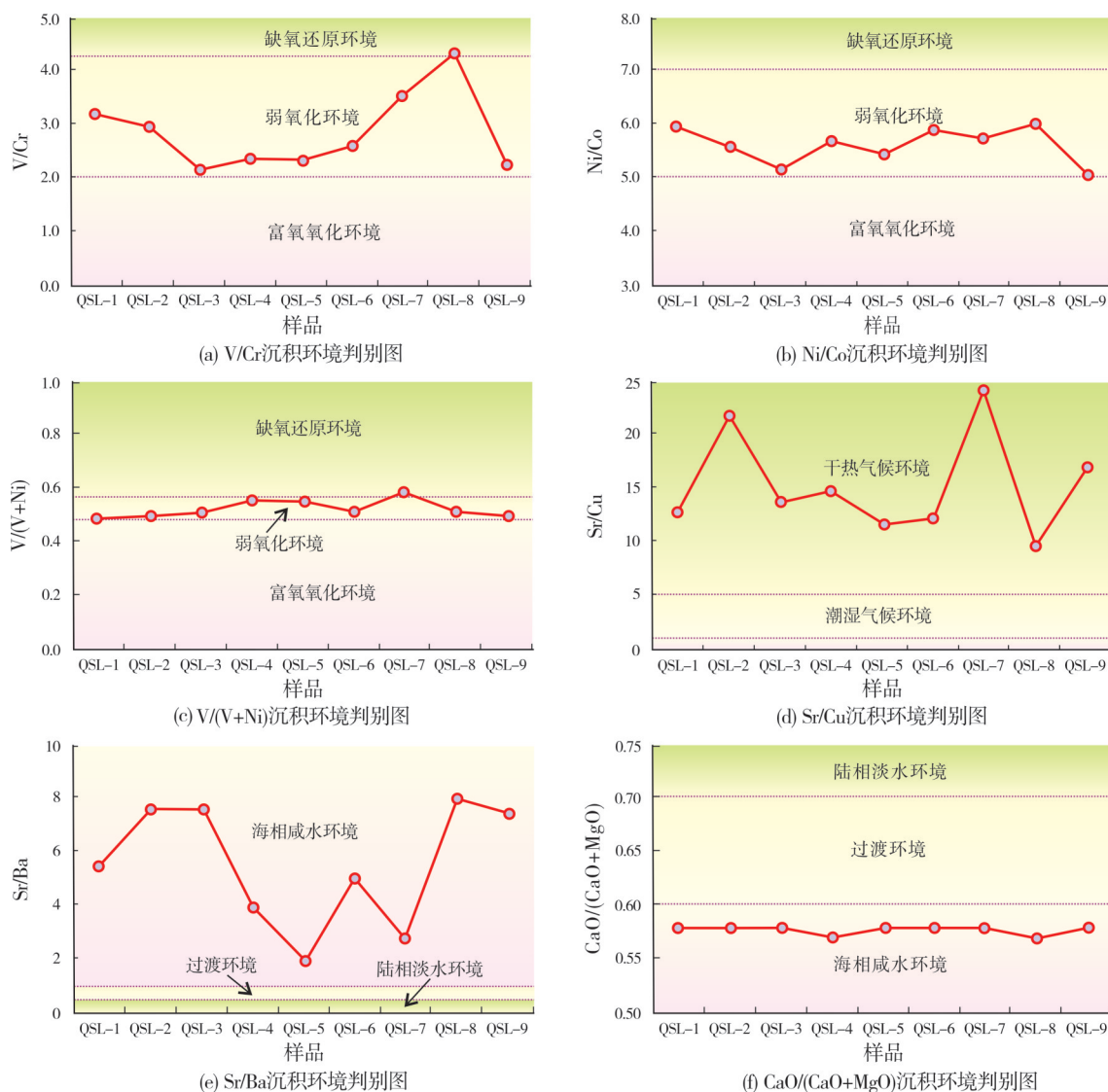


图6 岐山地区蓆县系白云岩沉积环境判别图

Fig. 6 Sedimentary environment discrimination diagram of dolomite of Jixian System in Qishan area

高,然而Sr会由于白云石化作用而不断丢失。因此,Sr/Ba值可以较好地指示成岩介质的盐度^[28]。海相咸水环境中Sr/Ba值大于1.00,陆相淡水环境时Sr/Ba值小于0.60,过渡环境沉积时介于0.60~1.00^[29]。此外,CaO/(CaO+MgO)值也可以有效地判别沉积岩的介质环境。海相咸水环境沉积CaO/(CaO+MgO)值小于0.60,若为陆相淡水环境沉积则大于0.70。本次研究样品的Sr/Ba值在2.00~7.80之间,均值为5.43,样品值均大于1.00;CaO/(CaO+MgO)值在0.57~0.58之间,均值为0.58,样品值均小于0.60。结合Sr/Ba和CaO/(CaO+MgO)海陆环境判别图(图6e,6f),认为岐山地区蓆县系沉积期为海相咸水沉积环境。

3.3 白云岩成因认识

微量元素中Sr、Fe、Mn、Na等元素含量特征在碳酸盐岩沉积环境和成岩作用中具有重要意义。K、Na元素的含量与成岩流体的盐度呈正相关关系;Fe、Mn元素的含量与成岩时的埋藏深度和成岩强度也呈正相关关系;Mn在深水环境含量较高(>200 μg/g),而在浅水环境含量较低(20~50 μg/g)。在主要元素含量特征中,可用M值($M=100 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$)来判别白云岩的沉积环境:当 $M \leq 1$ 时,为淡水沉积;当 $1 < M \leq 10$ 时,沉积环境为海陆过渡;当 $10 < M \leq 500$ 时,为海水沉积;当 $M > 500$ 时,为陆表海沉积^[24]。

从 M 值来看(表1),本次研究的白云岩样品均为陆表海沉积,前文已述及研究区不同种类样品微量元素和稀土含量差异性明显,可依据其综合分析不同类型白云岩的成因。

灰质白云岩 Sr含量低,可能是由于长期为开放环境,后期加入淡水造成;Fe、Mn含量高,推测其成岩时埋藏较深;K、Na含量也高,反映为高盐度成岩流体。因此,灰质白云岩应是混合水成因和埋藏成因。而灰质白云岩稀土元素配分模式图右倾趋势显著,具有明显Eu负异常及轻微Ce负异常特征,表明其总体为埋藏成因。

晶粒白云岩 Sr含量高,Fe、Mn含量低,反映成岩环境封闭。其稀土元素配分模式图都有右倾趋势,具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损、Eu和Ce负异常特征,因此晶粒白云岩应为埋藏成因。

残余结构白云岩 Fe、Mn含量高,反映成岩时期埋藏深;Sr含量低,可能是后期加入淡水造成。因此,残余结构白云岩应为混合水成因。

溶蚀白云岩 Sr含量高,Fe、Mn含量低,反映其长期处于封闭环境,也可能为白云石化不彻底;Na含量高,可能为渗透回流的高盐度流体所致。结合其稀土元素具有Ce、Eu负异常,与海水稀土元素配分模式具有一定相似性,因此推测溶蚀白云岩主要为封闭环境下的渗透回流成因模式。

Hird在1987年利用 $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ 的交会图建立相应的图解,可以有效地识别出埋藏成因、渗透回流成因和混合水成因的白云岩,因此研究区的白云岩成因类型也可通过Hird的白云岩成因判识图^[38]进行确定(图7)。

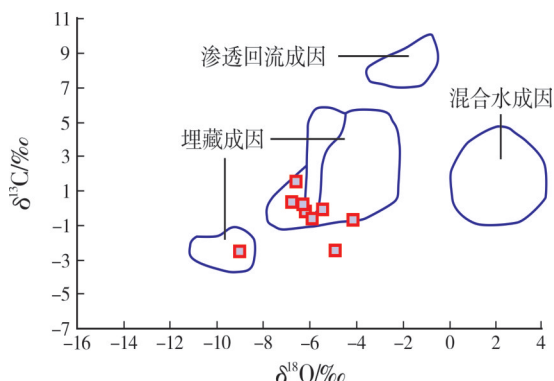


图7 岐山地区蓊县系白云岩成因类型图解
(判识图版据文献^[38])

Fig. 7 Diagram of genetic types of dolomite of Jixian System in Qishan area (identification chart cited from reference ^[38])

判识结果表明,鄂尔多斯盆地岐山地区蓊县系白云岩以埋藏成因为主,仅局部地区存在混合水成因白云岩及回流渗透成因白云岩,这与微量元素得出的白云岩成因认识一致。由于蓊县系经历两次海退,可能有部分海水留在了原地,随着蒸发作用的加强,高盐度流体顺着缝隙向下渗透,使下伏石灰岩发生白云石化,生成白云岩。

4 结 论

(1)岐山地区蓊县系主要发育一套以微晶白云岩、粉晶白云岩、含燧石条带白云岩、含硅质条带白云岩为主的潮坪相碳酸盐岩沉积,沉积相类型主要为潮下带和潮间带。按照结构类型可将白云岩划分为灰质白云岩、晶粒白云岩、残余结构白云岩和溶蚀白云岩。

(2)蓊县系白云岩样品的Sc、Th、Hf、Zr含量远低于大陆上地壳中的含量,表明样品受陆源碎屑物质的影响极其微弱;Sr含量平均值为36.32 μg/g, Sr/Ba平均值为5.43,表明盐度较高,为海相环境;V/(V+Ni)平均值为0.51, Ni/Co平均值为5.54, V/Cr平均值为2.80, U/Th平均值为2.37,表明整体处于弱氧化环境;ΣREE平均值为10.54 μg/g, ΣLREE/ΣHREE平均值为7.29, (Nd/Yb)_N平均值为0.70, (La/Sm)_N平均值为4.51,表明各类型白云岩对轻稀土元素的富集能力远强于重稀土元素;δCe平均值为0.64,整体呈现负异常, δEu平均值为0.75,负异常明显,反映研究区白云岩几乎未受热液改造。研究区沉积时期古水温平均值达到31.46℃,为干燥炎热的气候背景。

(3)鄂尔多斯盆地岐山地区蓊县系白云岩成因复杂。其中,灰质白云岩成岩时埋藏较深,并有大气淡水的加入,总体为埋藏成因;晶粒白云岩长期处于封闭环境,以埋藏成因为主;残余结构白云岩成岩时期埋藏较深,并且成岩过程中可能有淡水的加入,以混合水成因为主;溶蚀白云岩成岩环境较为封闭,成岩流体盐度较高,多为回流渗透成因。

参考文献

- [1] BOLHAR R, VAN KRANENDONK M J. A non-marine depositional setting for the northern Fortescue Group, Pilbara Craton, inferred from trace element geochemistry of stromatolitic carbonates[J]. Precambrian research, 2007, 155(3/4): 229-250.
- [2] 杨守业, 李从先, LEE C B, 等. 黄海周边河流的稀土元素地

- 球化学及沉积物源示踪[J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1233-1236.
- YANG Shouye, LI Congxian, LEE C B, et al. Rare earth element geochemistry and sediment source tracing of the Yellow Sea surrounding rivers[J]. Chinese science bulletin, 2003, 48(11): 1233-1236.
- [3] 周鼎武, 张成立. 论北秦岭加里东期造山作用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1994(3): 245-250.
- ZHOU Dingwu, ZHANG Chengli. On the Caledonian orogeny of the Northern Qinling [J]. Journal of Northwest University (natural science edition), 1994(3): 245-250.
- [4] 刘波, 张秀莲. 天津蓟县中元古界蓟县系杨庄组岩石特征及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(4): 601-610.
- LIU Bo, ZHANG Xiulian. Petrology of Yangzhuang Formation and its geological significance, Middle Proterozoic Jixian System from Jixian, Tianjin, North China [J]. Acta scientiarum naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(4): 601-610.
- [5] 刘晓峰. 岐山地区蓟县系白云岩成因研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- LIU Xiaofeng. The analysis of dolomite genesis of Jixian System, Qishan area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [6] CUI Minli, ZHANG Lianchang, ZHANG Baolin, et al. Geochemistry of 1.78 Ga A-type granites along the southern margin of the North China Craton: implications for Xiong'er magmatism during the breakup of the supercontinent Columbia [J]. International geology review, 2013, 55(4): 496-509.
- [7] ZHAO Taiping, ZHOU Meifu. Geochemical constraints on the tectonic setting of Paleo-proterozoic A-type granites in the southern margin of the North China Craton [J]. Journal of Asian earth sciences, 2009, 36(2): 183-195.
- [8] ZHAI Mingguo, BIAN Aiguo, ZHAO Taiping. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic[J]. Science in China series D: earth sciences, 2000, 43(S1): 219-232.
- [9] HE Yanhong, ZHAO Guochun, SUN Min. Geochemical and isotopic study of the Xiong'er volcanic rocks at the southern margin of the North China Craton: petrogenesis and tectonic implications [J]. The journal of geology, 2010, 118(4): 417-433.
- [10] ZHAO Guochun, SUN Min, WILDE S A, et al. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent: records in the North China Craton [J]. Gondwana research, 2003, 6(3): 417-434.
- [11] ZHAO Guochun, HE Yanhong, SUN Min. The Xiong'er volcanic belt at the southern margin of the North China Craton: petrographic and geochemical evidence for its outboard position in the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent [J]. Gondwana research, 2009, 16(2): 170-181.
- [12] 陈友智, 朱望明. 鄂尔多斯地块南缘中元古界沉积岩地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 81-87.
- CHEN Youzhi, ZHU Wangming. Geochemical characteristics of Mesoproterozoic sedimentary rock in the southern margin of Ordos block [J]. Geological science and technology information, 2019, 38(3): 81-87.
- [13] BAI OUMY H M, GILG H A, TAUBALD H. Geochemistry of the sedimentary kaolin deposits from Sinai, Egypt: implications for control by the source rocks [J]. Clays and clay minerals, 2012, 60(6): 633-654.
- [14] 张小龙. 鄂尔多斯地区中上元古界分布与沉积环境及其油气勘探潜力[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- ZHANG Xiaolong. Distribution and sedimentary environment of Meso-Neoproterozoic in Ordos area and its oil and gas exploration potential[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [15] 任战利, 崔军平, 郭科, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析[J]. 科学通报, 2015, 60(14): 1298-1309.
- REN Zhanli, CUI Junping, GUO Ke, et al. Fission-track analysis of uplift times and processes of the Weiwei Uplift in the Ordos Basin [J]. Chinese science bulletin, 2015, 60(14): 1298-1309.
- [16] 任战利, 祁凯, 邢光远, 等. 超深层及中新元古界油气成藏富集规律与勘探方向[R]. 西安: 西北大学, 2020.
- REN Zhanli, QI Kai, XING Guangyuan, et al. Accumulation regularity and exploration direction of oil and gas in ultra deep layer and Middle Neoproterozoic [R]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [17] 曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- ZENG Yunfu, XIA Wenjie. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Geology Press, 1986.
- [18] BANNER J L, HANSON G N, MEYSERS W J. Rare earth element and Nd isotopic variations in regionally extensive dolomites from the Burlington-Keokuk Formation (Mississippian); implications for REE mobility during carbonate diagenesis [J]. Journal of sedimentary petrology, 1988, 58(3): 415-432.
- [19] WEBB G E, KAMBER B S. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: a new shallow seawater proxy [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2000, 64(9): 1557-1565.
- [20] 刘晔, 柳小明, 胡兆初, 等. ICP-MS测定地质样品中37个元素的准确度和长期稳定性分析[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 1203-1210.
- LIU Ye, LIU Xiaoming, HU Zhaochu, et al. Evaluation of accuracy and long-term stability of determination of 37 trace elements in geological samples by ICP-MS [J]. Acta petrologica sinica, 2007, 23(5): 1203-1210.

- [21] 李乐, 姚光庆, 刘永河, 等. 塘沽地区沙河街组下部含云质泥岩主微量元素地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(9): 1480-1496.
- LI Le, YAO Guangqing, LIU Yonghe, et al. Major and trace elements geochemistry and geological implications of dolomite-bearing mudstones in lower part of Shahejie Formation in Tanggu area, Eastern China[J]. Earth science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40(9): 1480-1496.
- [22] 杨扬. 白云岩地球化学特征与古气候和海侵事件的关系: 以岐口凹陷沙河街组为例[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- YANG Yang. The relationship between geochemistry of dolostone and paleoclimate, transgression: taking Shahejie Formation in the Qikou Depression for example[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [23] MCLENNAN S M. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes [J]. Reviews in mineralogy and geochemistry, 1989, 21(1): 169-200.
- [24] NOTHDURFT L D, WEBB G E, KAMBER B S. Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia: confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2004, 68(2): 263-283.
- [25] BOYNTON W V. Chapter 3 - Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. Developments in geochemistry, 1984, 2: 63-114.
- [26] 刘岫峰. 沉积岩实验室研究方法[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- LIU Xiufeng. Laboratory research methods of sedimentary rocks[M]. Beijing: Geology Press, 1991.
- [27] 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. 沉积学报, 1985(4): 17-30.
- ZHANG Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. Acta sedimentologica sinica, 1985 (4): 17-30.
- [28] BAU M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect [J]. Contributions to mineralogy and petrology, 1996, 123(3): 323-333.
- [29] 胡俊杰, 李琦, 方念乔, 等. 藏北羌塘盆地中央隆起带下二叠统展金组沉积岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 古地学报, 2014, 16(6): 926-934.
- HU Junjie, LI Qi, FANG Nianqiao, et al. REE geochemical characteristics and geological significance of sedimentary rocks of the Lower Permian Zhanjin Formation in central uplift zone of Qiangtang Basin, Northern Tibet Plateau[J]. Journal of palaeogeography, 2014, 16(6): 926-934.
- [30] 董云鹏, 张国伟, 朱炳泉. 北秦岭构造属性与元古代构造演化[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 3-10.
- DONG Yunpeng, ZHANG Guowei, ZHU Bingquan. Proterozoic tectonics and evolutionary history of the North Qinling Terrane[J]. Acta geoscientia sinica, 2003, 24(1): 3-10.
- [31] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical geology, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [32] BAI S L, BAI Z O, MA X P, et al. Devonian events and biostratigraphy of South China: conodont zonation and correlation, bio-event and chemo-event, Milankovitch cycle and nickel-episode [M]. Beijing: Peking University Press, 1994: 21-24.
- [33] 杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙, 等. 黔东南寒武纪—寒武纪转换时期微量元素地球化学特征研究[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1391-1397.
- YANG Xinglian, ZHU Maoyan, ZHAO Yuanlong, et al. Trace element geochemical characteristics from the Ediacaran Cambrian transition interval in Eastern Guizhou, South China[J]. Acta geologica sinica, 2007, 81(10): 1391-1397.
- [34] LERMAN A. Lakes: chemistry, geology, physics [M]. New York: Springer, 1978.
- [35] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307-310, 314.
- LIU Gang, ZHOU Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: taking Qianjiang Formation in the Jiangnan Basin as an example[J]. Petroleum geology and experiment, 2007, 29(3): 307-310, 314.
- [36] 袁海军, 赵兵. 川西雅安一名山地区白垩系泥岩的地球化学特征及古气候探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(1): 78-83.
- YUAN Haijun, ZHAO Bing. Geochemical and palaeoclimatic approaches to the Cretaceous mudstones in the Ya'an-Mingshan zone, Western Sichuan [J]. Sedimentary geology and Tethyan geology, 2012, 32(1): 78-83.
- [37] 罗顺社, 汪凯明. 元素地球化学特征在识别碳酸盐岩层序界面中的应用: 以冀北拗陷中元古界高于庄组为例[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 430-437.
- LUO Shunshe, WANG Kaiming. The application of element geochemical characteristics to the recognition of carbonate sedimentary sequence boundary: a case study of the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in Northern Hebei Depression[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 430-437.
- [38] HIRD P L. The composition of carbonate and oxygen isotope in the ancient dolomite [J]. AAPG bulletin, 1987, 34(4): 156-232.

Geochemical characteristics and genesis of dolomite of Jixian System in Qishan area, Weibei Uplift: implications for paleoenvironment

WANG Kun, REN Zhanli, QI Kai, LIU Runchuan, MA Qian

Abstract: The shallow marine dolomite of Jixian System in Qishan area of Weibei Uplift is of great significance for the deep exploration in Ordos Basin. Based on the field survey and sampling of Laochuan outcrop, by means of geochemical analysis and testing such as carbon and oxygen isotope analysis, combined with the sedimentary evolution background and stratigraphic distribution characteristics, the geochemical characteristics of the dolomite of Jixian System in Qishan area are clarified, and the characteristics of the paleoenvironment and the genesis of the dolomite are deeply discussed. It is shown that: (1) The lithology of Jixian System in Qishan area is mainly dolomite, siliceous dolomite and flint-bearing banded dolomite, which develop stromatolites. According to their structure types, they can be divided into calcareous dolomite, crystalline dolomite, residual structure dolomite, and dissolved dolomite. The sedimentary environment is tidal flat of carbonate platform, and the sedimentary facies are intertidal zone and subtidal zone. (2) The mean value of δCe is 0.64, and Ce is negative anomaly, which indicates that the dolomite of Jixian System is in an oxidized environment during the sedimentary period. Discrimination parameters of redox environment, such as V/Cr , Ni/Co , $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ and Ce/La , indicate that the Jixian System is deposited in shallow water sedimentary environment with weak oxidation. (3) Paleowater-temperature is in good agreement with values of Sr/Cu , which suggest that regional temperatures were much higher during deposition period of Jixian System, furtherly indicating an arid and scorching climate background. (4) The contents of $\text{Sc} \leq 1.53 \mu\text{g/g}$, $\text{Th} \leq 1.47 \mu\text{g/g}$, $\text{Hf} \leq 0.47 \mu\text{g/g}$, $\text{Zr} \leq 17.6 \mu\text{g/g}$, which are lower than those of the corresponding elements in the upper crust ($\text{Sc} = 14.9 \mu\text{g/g}$, $\text{Th} = 2.3 \mu\text{g/g}$, $\text{Hf} = 5.8 \mu\text{g/g}$, $\text{Zr} = 240.0 \mu\text{g/g}$); the mean value of $\sum \text{REE} + \text{Y}$ is $12.50 \mu\text{g/g}$, which is much smaller than that of terrigenous detritus ($100 \mu\text{g/g}$). These indicate that the influence of terrigenous detritus is very weak. (5) The mean value of δEu is 0.75, and the negative anomaly is obvious, indicating that the dolomite in the study area has hardly been modified by hydrothermal fluid; the average value of $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO})$ is 0.58, and the average value of Sr/Ba is 5.43, indicating that the salinity is high, and it is a marine environment. (6) The carbon and oxygen isotope analysis shows that the dolomites of the study area are all formed in marine fluids; environment discriminant graphs of Sr/Ba and $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO})$ show that the dolomites of Jixian System are formed in marine saltwater. (7) The genetic identification diagram of dolomite shows that the dolomite of Jixian System in Qishan area of Ordos Basin is mainly of burial origin, and there are mixed water origin dolomite and reflux permeability origin dolomite only in some areas. At last, the genetic model of dolomite in Jixian System in Ordos Basin is preliminarily established: the calcareous dolomite and crystalline dolomite are mainly of burial origin, the residual structure dolomite is mainly of mixed water origin, and the dissolution dolomite is mainly of reflux seepage origin.

Key words: dolomite; geochemical characteristics; palaeo-environment; genesis; Jixian System; Weibei Uplift

WANG Kun, First author: MSc, graduated from the Department of geology of Northwest University in 2021, mainly engaged in research related to coalfield geology. Add: No.241 Tuanjie Xincun Street, Chengguan District, Lanzhou, Gansu 730099, China

REN Zhanli, Corresponding author: Researcher, Doctoral Supervisor, mainly engaged in scientific research and teaching related to basin tectonic-thermal evolution and hydrocarbon accumulation evaluation. Add: No.229 Taibai North Rd., Beilin District, Xi'an, Shaanxi 710069, China