

鲁西地区含白云石碳酸盐岩的矿物学特征及其形成环境分析

章源隆, 周川野, 黎晏彰, 鲁安怀, 丁竑瑞, 王长秋, 李艳

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 矿物环境功能北京市重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 白云石的成因受到地质学界的广泛关注, 现今在实验室中能够利用微生物合成高有序度的白云石, 但天然白云石的成因与原始沉积环境特征的相关性并未完全揭示。本研究选取鲁西地区馒头组含白云石碳酸盐岩沉积地层为研究对象, 通过矿物学、元素地球化学等分析, 初步判断该地层白云石成因并重建白云石地层的古沉积环境, 探讨了两者之间的关系。结果表明: 白云石含量在本套地层中的均值为 52.45%。Sr/Cu 值(均值为 23.59)与 Ga/Rb 值(均值为 0.17)指示其整体表现为炎热干旱的古气候特征。 $\delta^{13}\text{C}$ 值(均值为 -1.56‰)与 $\delta^{18}\text{O}$ 值(均值为 -6.68‰)指示本套地层为海相沉积, 推测古水温平均为 23.5°C , 古氧化还原特征表现为弱还原至常氧化的平稳过渡。灰岩地层 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 -0.80‰ , 而白云岩地层 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 -6.52‰ , 存在轻碳的明显富集, 结合宏观叠层构造, 判断白云石为生物成因。本研究中白云石沉积环境中的古气候、古氧化还原条件、古水温和古生产力特征与白云石发育情况存在明显耦合, 为白云石生物成因提供了相关依据与指示意义。

关键词: 白云石成因; 鲁西地区; 矿物学; 地球化学; 古沉积环境

中图分类号: P578.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)03-0365-14

Analysis of mineralogical characteristics and formation environment of dolomitic carbonate rocks in western Shandong

ZHANG Yuan-long, ZHOU Chuan-ye, LI Yan-zhang, LU An-huai, DING Hong-rui, WANG Chang-qiu and LI Yan

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Beijing Key Laboratory of Mineral Environmental Function, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The origin of dolomite has been widely concerned by the geologists. Nowadays, microorganisms can be used to synthesize dolomite with high order in the laboratory, but the correlation between the origin of natural dolomite and the characteristics of the original sedimentary environment has yet to be fully revealed. In this study, the dolomitic carbonate sedimentary strata of Mantou Formation in western Shandong Province are selected as the research object. Through the analysis of mineralogy element geochemistry, the origin of dolomite in this formation is preliminarily judged and the paleosedimentary environment of dolomite formation is reconstructed. The relationship between them is discussed. The semiquantitative results show that the average content of dolomite in this set of strata is 52.45%. The ratio of Sr/Cu (mean value is 23.59) and Ga/Rb (mean value is 0.17) indicates that it is

收稿日期: 2022-08-15; 接受日期: 2023-03-10; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91851208)

作者简介: 章源隆(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 环境矿物学, E-mail: zhangyl2020@stu.pku.edu.cn; 通讯作者: 鲁安怀(1962-), 男, 教授, 研究方向: 环境矿物学, E-mail: ahlu@pku.edu.cn。

characterized by hot and arid paleoclimate. $\delta^{13}\text{C}$ (mean value is -1.56‰) and $\delta^{18}\text{O}$ (mean value is -6.68‰) indicate that this set of strata is marine sedimentation, and it is speculated that the average paleotemperature is 23.5°C . Furthermore, the paleoredox features a smooth transition from weak reduction to oxidation. The mean value of $\delta^{13}\text{C}$ in the limestone stratum is -0.80‰ , while that in the dolomite stratum is -6.52‰ . The pronounced enrichment of light carbon in the sample and the combination of macro stack structure indicate that dolomite is of biological origin. In this study, the characteristics of paleoclimate, paleoredox conditions, paleotemperature and paleoproductivity in the dolomite sedimentary environment are obviously coupled with dolomite development, providing a relevant basis and indicating significance for dolomite biogenesis.

Key words: origin of dolomite; western Shandong; mineralogy; geochemistry; paleosedimentary environment

Fund support: Key Projects of National Natural Science Foundation of China (91851208)

白云石作为海相、湖相沉积岩中重要的组成部分,其成因一直是沉积学界和矿物学界的重要问题之一。先前部分学者认为,沉积岩中的白云石是交代成因的,并提出诸多成岩模式,如回流渗透模式(Adams and Rhodes, 1960; Rivers *et al.*, 2012; Lu and Cantrell, 2016)、混合水模式(Zenger *et al.*, 1980)、热液模式(Machel and Lonnee, 2002; Smith Jr and Davies, 2006)等。但 Vasconcelos 等(1995)在实验室利用硫酸盐还原菌实现低温条件高有序白云石的合成之后,白云石的生物成因逐渐变为研究热点,大量与微生物有关的现代、古代白云石被报道和重新认识(Wright, 1999; Warthmann *et al.*, 2000; 由雪莲等, 2011)。

实验室中利用微生物合成白云石很好地为白云石生物成因提供了证据,但是没有关注地层中白云石对应的沉积环境,对白云石的地质学研究大多数集中在作为石油储层以及铁锰白云石的地球化学特征上,微生物成因的白云石对应沉积时的古环境特征并没有被很好地揭示。本文对鲁西地区第二统/苗岭统界线附近馒头组白云石碳酸盐岩地层进行古环境反演,以期对白云石成因提供相关的古环境依据。

1 区域地质概况

研究区位于我国华北地台。华北地台是华北克拉通的简称(王荃, 2011)(图1),被我国地质学家用以描述我国东北南部、华北、西北阿拉善-贺兰山等具有前寒武系结晶基底出露的地区,是我国最大的地台之一(黄汲清, 1954; 冯增昭等, 1989)。自太古宙以来,五台山运动、吕梁运动、印支运动和燕山运动这4次大型造山运动奠定了华北地台的构造格局;早古生代各时期华北地台的古地貌受控于全

球板块构造与海平面变化影响而各不相同,早期是一个稳定的地台,到寒武纪时期总体沉积格局表现为华北地台四周与海洋相连,基本上是一个十分广阔的陆表海沉积(冯增昭等, 1989; 刘本培等, 1996; 金振奎等, 2013)。华北地台寒武系中下部主要是以页岩、粉砂岩为主的陆源碎屑岩沉积,中上部则为碳酸盐岩沉积,一般厚1500~2000 m,岩性及岩相变化平稳而有规律,油气前景良好,其他金属及非金属矿产蕴藏丰富(陈晋镛等, 1997)。鲁西地块位于华北地台东部,西北侧以聊考断裂、齐广断裂为界,东南侧以安丘-莒县断裂为界(辛浩等, 2019)。

华北地台寒武系岩石地层以生物地层划分为主要依据,以山东张夏一带出露的寒武系剖面为研究对象,建立了17个三叶虫化石带(Latif *et al.*, 2019)。研究区所属地层位于寒武系馒头组,岩性以白云岩与泥页岩为主,下部为厚层泥质白云岩夹泥页岩、夹薄层白云质泥岩与泥质白云岩,上部为灰黄色条带状泥质白云岩、泥晶白云岩夹泥页岩与泥晶灰岩层。

2 样品采集与实验方法

采样点位于东经 $117^{\circ}12'30''$ 、北纬 $35^{\circ}34'53''$,倾向北西 58° ,倾角 21° 。按照5~10 cm的间距对鲁西泗水地区馒头组碳酸盐岩地层进行样品采集,确保岩石样品未经后期的风化、蚀变影响以及后期生物碎屑的混入,总计获得样品34块。部分天然碳酸盐岩样品制成光薄片(43块),并在偏光显微镜下(LV100N POL, Nikon, 日本)进行观察。

在完成切片观察之后,取新鲜且避开后期侵入脉体、重结晶的岩样部位磨制粉末,筛选粒径为200~300目的颗粒。样品从上层到下层依次命名为SS-1至

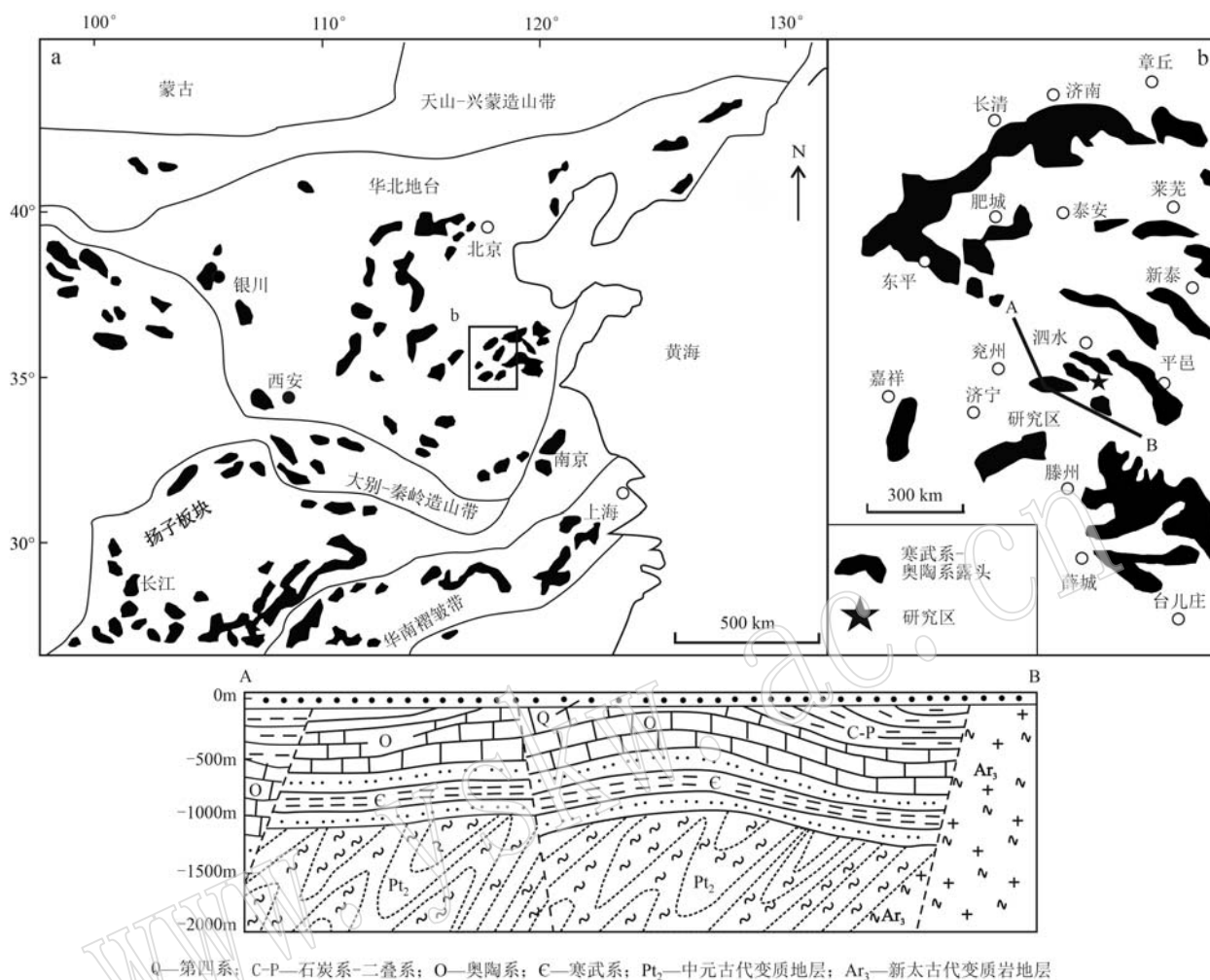


图 1 华北地台地质简图及研究区所在位置 (宋明春等, 2008; Han *et al.*, 2015)

Fig. 1 Geological sketch map of North China platform and location of research area (after Song Mingchun *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2015)

SS-18。

使用 X'Pert Pro 型衍射仪 (PANalytical, 荷兰, 测试单位为北京大学分析测试中心) 对样品粉末进行 X 射线衍射分析 (XRD) 测试, 测试结果采用 Highscore Plus 软件 (version 3.0.5) 用于 X 射线衍射数据物相鉴定与半定量分析, 使用 Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) 卡片中的 Reference Intensity Ratio (RIR) 值作为标准参照和进行含量计算。使用 X 射线荧光光谱仪 (XRF) (ARL ADVANT XP+, Thermo Fisher Scientific, 美国, 测试单位为北京大学地球与空间科学学院) 对样品粉末进行主量元素测试, 采用 50.0 kV 和 50.0 mA 作为工作电流和工作电压, 其检测限为 10×10^{-6} 。使用环境扫描电子显微镜 (ESEM) (Quanta 200FEG, FEI, 美

国, 测试单位为北京大学地球与空间科学学院) 观察矿物的形貌特征, 加速电压为 15.0 kV, 光束尺寸 $4.0 \mu\text{m}$ 。使用 JXA-8230 波长色散电子微探针 (岛津, 日本, 测试单位为北京大学地球与空间科学学院) 进行矿物主要化学成分测定。其工作的加速电压为 15 kV, 电流为 10 nA。在实验过程中束斑的大小设置为 1 至 $2 \mu\text{m}$ 。使用 X 系列电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Thermo Fisher Scientific, 美国, 测试单位为北京大学地球与空间科学学院) 对样品粉末进行微量元素和稀土元素测试。测试过程参照国家标准 JY/T 0568-2020, 各种元素的检出限可以达到 0.1×10^{-6} , 浓度再现性低于 5%。利用稳定同位素质谱仪 (IRMS, Thermo Fisher Scientific, 美国, 测试单位为北达燕园微构分析测试中心) 分析样品的碳

氧同位素特征,测试过程参照国家标准 GB/T 37847-2019,质量数范围:1~80 Dal,加速电压 3 kV;分辨率 $m/\Delta m=110$ (10%峰谷),绝对灵敏度为 1 500 分子/离子(连续流)。

3 结果与讨论

3.1 岩样矿物物相特征

采样地层总厚度为 3.6 m,其中的主要层厚为 1.36 m。通过野外岩性观测得出,研究区域的岩石

组合主要为灰色薄层灰岩、灰黄色薄层状白云质灰岩、白云岩夹泥页岩、红褐色夹薄层白云质泥岩与泥质白云岩、页岩等,顶部常以含有泥云岩、页岩及部分的砂岩为特征(图 2a、2b),有明显的层状构造,中间层的白云岩滴加盐酸起泡较为缓慢,且反应后产物中含一定量的泥质,为泥晶白云岩,其手标本样品为块状构造,贝壳状断口,表面可见同心纹层状构造,颜色偏向于红褐色,判断其中可能含有一定量的含铁物质(图 2c)。样品表面存在明显的叠层状构造,层厚分布不均匀(约为 0.1~0.8 mm)。

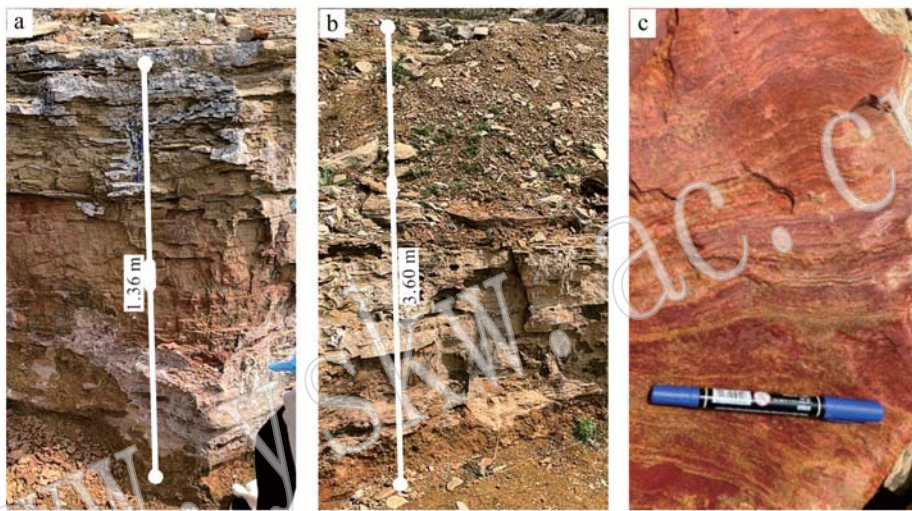


图 2 鲁西地区含白云石碳酸盐岩的野外地层(a,b)及手标本(c)照片

Fig. 2 Photos of field strata (a, b) and hand specimen (c) of dolomitic carbonate rocks in western Shandong

图 3a 显示,矿物粒度分布在几微米到十几微米不等,结晶程度虽有所区别,但大多数颗粒细小,岩石中亮暗条带分布明显且依次分布(图 3b),在亮条带中亮晶体积分数约为 75%,其在偏光镜下可见高级白干涉色,有明显的闪突起,透明度较好,成分为方解石、白云石;暗条带为泥晶胶结,泥晶表面较为污浊,透明度差,局部较为富集(图 3a)。在亮晶条带中生物碎屑较为发育,主要为三叶虫、介壳、腕足类等,在偏光镜下可见玻纤结构(图 3c)。局部可见岩溶角砾,角砾磨圆性差,棱角状,为早期沉积的泥晶灰岩在经历后期的岩溶作用后塌缩形成的(图 3d)。部分切片中出现鲕粒,指示了滨海的沉积环境(图 3e、3f)。整体为粒屑泥晶结构,为生物碎屑泥晶灰岩。中下层样品薄片鉴定结果显示,其矿物组合为方解石 35%~40%,白云石 50%~55%,泥质 5%~10%,白云石矿物颗粒大小均为几微米到十几微米,其中生物碎屑痕迹不明显,为泥质微晶白云岩。

亮晶胶结和泥晶胶结表明其沉积的水体环境依次经历高能环境和低能环境,因此判断其沉积微相为正常浪基面下的中缓坡环境或是高能浅滩相向陆一侧,整体沉积相为泻湖相。

3.2 白云石发育特征

研究地层的 18 个样品粉末的 X 射线衍射分析结果(表 1、图 4)显示,样品中主要的矿物成分为方解石、白云石以及石英。方解石、石英基本在所有的样品中普遍出现,白云石仅在部分样品中没有出现或者含量较低,例如 SS-1、SS-2、SS-6 和 SS-7。其他样品显示均含有白云石,与野外观察的结果相一致,即中间层至中下层的岩性为白云岩。在含有各成分的样品中,XRD 半定量分析的结果显示其中的白云石平均含量为 55.7%,方解石平均含量为 61.5%,石英平均含量为 9.1%。白云石的 3 个最强衍射峰分别位于 30.98° 、 41.18° 和 51.02° ,分别对应白云石的 (104)、 $(11\bar{3})$ 和 $(11\bar{6})$ 晶面(JCPDS75-1654);方解

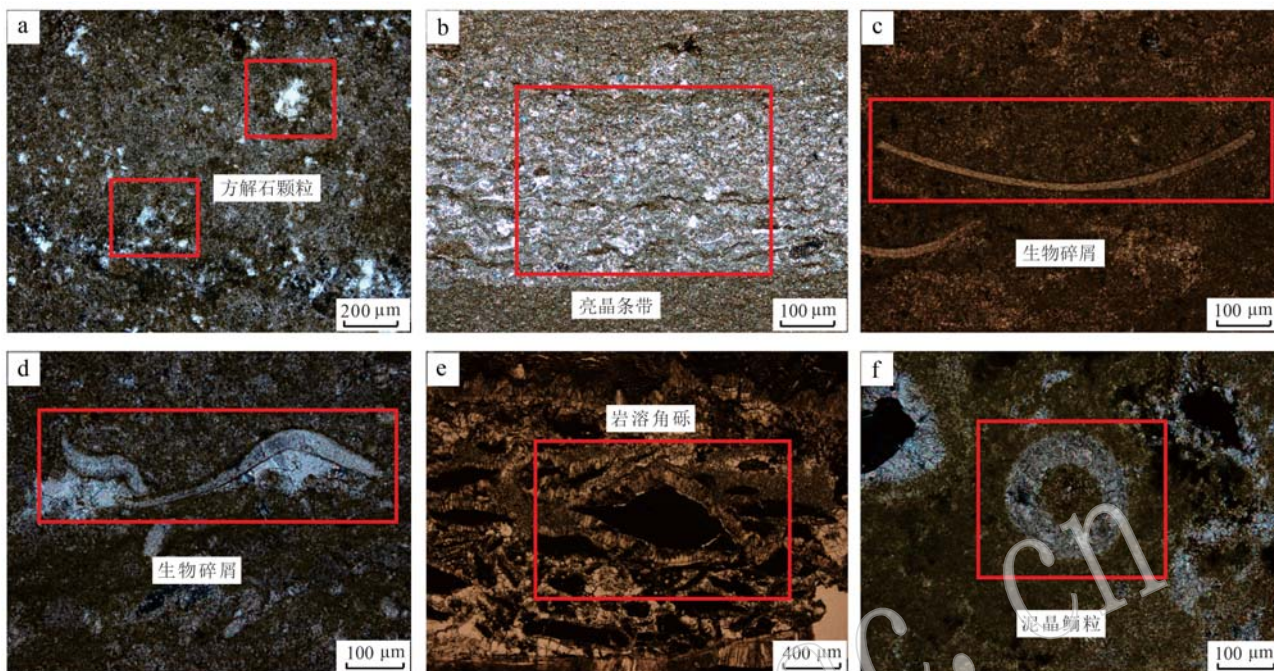


图 3 鲁西地区含白云石碳酸盐岩样品的显微镜下照片

Fig. 3 Micrographs of dolomitic carbonate rocks in western Shandong

a—泥灰岩中细小的矿物颗粒; b—泥灰岩中的亮暗条带(亮色为方解石,灰黑色为泥晶颗粒); c、d—泥灰岩中的三叶虫碎屑,可见明显的玻纤结构; e—磨圆度差的岩溶角砾; f—泥晶鲕粒
 a—tiny mineral particles in marlite; b—bright and dark strips in marlite (bright is calcite, gray black is muddy crystal particles);
 c, d—trilobite fragments in marl; e—karst breccia; f—micrite oolite

表 1 鲁西地区含白云石碳酸盐岩的 XRD 结果 $w_B/\%$

Table 1 XRD result of dolomitic carbonate rocks in western Shandong

编号	方解石	石英	白云石	编号	方解石	石英	白云石
SS-1	86	14	-	SS-10	28	4	68
SS-2	90	10	-	SS-11	75	2	23
SS-3	76	24	-	SS-12	22	7	71
SS-4	37	6	57	SS-13	22	4	74
SS-5	60	2	38	SS-14	28	4	68
SS-6	100	-	-	SS-15	11	25	64
SS-7	100	-	-	SS-16	22	7	71
SS-8	100	-	-	SS-17	75	2	23
SS-9	95	5	-	SS-18	80	-	20

注:“-”表示低于检测限。

石的 3 个最强衍射峰分别为 29.47°、47.63° 和 48.62°, 分别对应方解石的 (104)、(018) 和 (116) 晶面 (JCPDS 85-1108); 石英的 3 个最强衍射峰分别位于 26.75°、20.96° 和 50.32°, 分别对应石英的 (101)、(100) 和 (112) 晶面 (JCPDS 83-2466)。

结合野外观察记录以及 XRD 分析结果数据, 绘制柱状图 (图 5)。在本套地层中, 方解石从剖面的

顶部到底部均有发育, 因此白云石与方解石的质量分数比值可以作为白云石在本套地层中发育情况的一个衡量指标, 以 0 代表仅有方解石发育没有白云石发育的情况。在本研究中, 基于 XRD 分析数据 (表 1), 白云石与方解石的质量分数比值范围为 0~5.82, 平均值为 1.29, 可见在整体剖面样品中白云石含量略大于方解石, 显著高于石英, 该结果与镜下观察一致。白云石在地层中纵向发育情况见图 5。

对含白云石样品的扫描电镜 (SEM) 结果显示, 在矿物集合体中, 矿物颗粒直径较小, 均为微米级 (图 6a~6f)。部分矿物颗粒表面呈现一定的破碎, 部分表面呈现糜棱状 (图 6b、6c), 可能是后期成岩压实作用改造的结果; 部分颗粒表面光洁, 表现出典型的自形菱面体状, 与白云石形貌特征一致 (图 6d~6f)。其对应的 EDS 能谱分析结果见图 7, 结果显示样品中含有大量的 Ca、C、O、Mg 元素, 当矿物颗粒中 Ca 含量远大于 Mg 含量时物相为方解石, 当 Mg/Ca 值 (摩尔比) 接近 1:1 时, 则物相组成为白云石, 而颗粒中含有的 Al、K、Fe、Mg、Si 元素可能是石英、褐铁矿、针铁矿和少量硅酸盐矿物的重要组成元素。

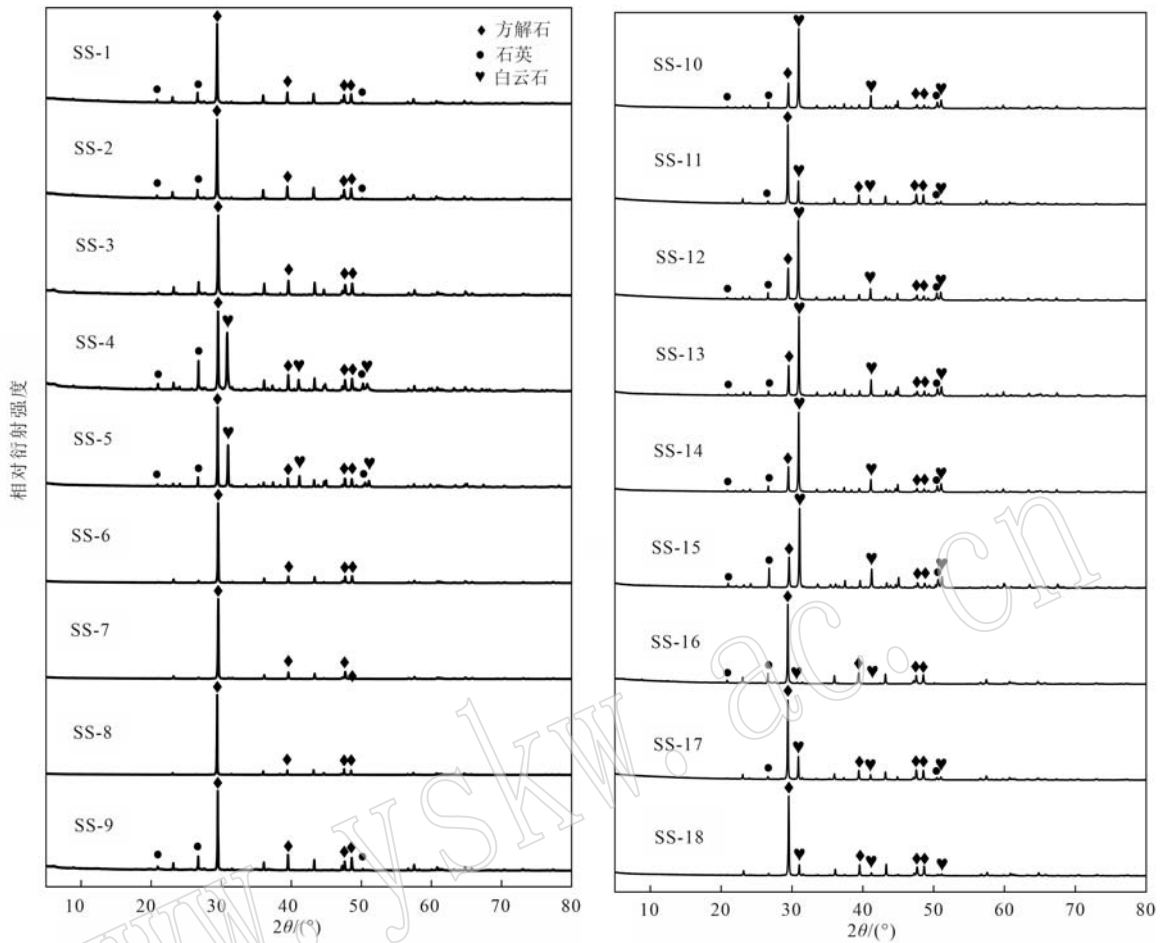


图4 鲁西地区含白云石碳酸盐岩的XRD分析图谱

Fig. 4 XRD analysis pattern of dolomitic carbonate rocks in western Shandong

利用电子微探针对含白云石样品探针片进行化学成分分析,列出主要的矿物成分,结果见表2。依据矿物化学式计算显示,白云石中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 比值接近1:1,且出现轻微的铁离子替代,这与EDS能谱结果一致。

3.3 元素含量及成岩改造程度分析

本研究中馒头组样品CaO含量为37.94%~55.45%,平均47.84%,MgO含量为0.09%~6.19%,平均2.62%。 SiO_2 含量介于0.07%~9.43%之间,平均2.58%, Al_2O_3 含量为0.04%~3.22%,平均0.79%。此外,本次研究样品具有低硅铝、高钙高镁特征,表明了陆源沉积物质参与程度较低。样品中其他主量元素如 Fe_2O_3 平均值为3.94%, Na_2O 平均值为0.99%, K_2O 平均值为0.72%(表3)。

成岩作用、外来物质的混染等因素都会在碳酸盐岩沉积过程中对其组分产生影响,即发生成岩改造作用。根据样品的镜下结果显示,矿物颗粒细小,

主要为微米级别的泥晶颗粒(图3a~3f),反映后期的成岩作用对岩石样品的影响有限。

前人的研究指出,若是 Ce/Ce^* 值与 ΣREE 和 Eu/Eu^* 值存在强相关性,则表明沉积物已经历成岩改造作用的影响,并且导致其成分发生变化(Shields and Stille, 2001)。在本研究中,经计算样品的 Ce/Ce^* 值与 ΣREE 的相关性系数 R^2 为0.37而 Ce/Ce^* 值与 Eu/Eu^* 值的相关性系数 R^2 为0.03,数据显示 Ce/Ce^* 值与两者之间没有明显的相关性,即沉积物成岩改造作用程度低,其组分仍能保留原始海洋的信息。

3.4 白云石形成环境特征

3.4.1 古气候特征

研究表明,沉积岩沉积时的古气候条件可以通过其中的主量元素和微量元素的相对含量及其分布情况进行推断,如Fe、Mn、V、Cr和Co元素等(Cao *et al.*, 2012; Roy and Roser, 2013; Xie *et al.*, 2018)。

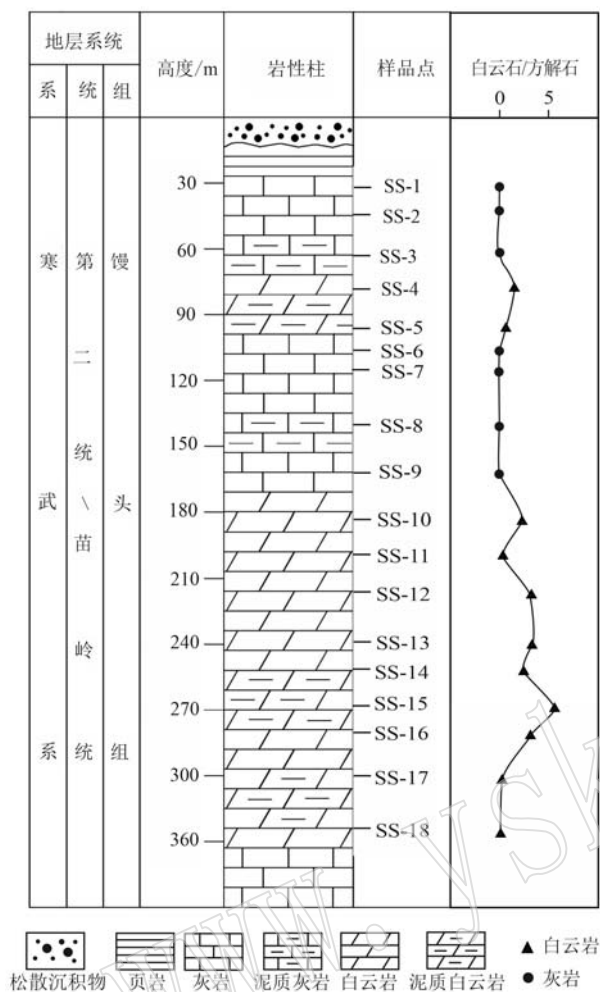


图5 鲁西地区含白云石地层岩性柱状图及白云石纵向发育特征

Fig. 5 Lithological histogram of dolomitic strata and longitudinal development characteristics of dolomite in western Shandong

一些特定的微量元素的比值也可以用于反映古气候条件,例如 Ga/Rb 值和 Sr/Cu 值 (Yandoka *et al.*, 2015; Xie *et al.*, 2018)。Ga 元素易富集于黏土矿物中,特别是高岭石,代表了温暖潮湿的古气候条件 (Beckmann *et al.*, 2005; Roy and Roser, 2013)。而 Rb 元素与伊利石存在密切的关系,代表了寒冷干旱的古气候条件 (Roy and Roser, 2013)。当 Sr/Cu 值介于 1.3~5.0 时,表示温暖的古气候条件;而比值大于 5.0 则表示炎热的古气候条件 (Ding *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2020)。

在本次的研究中,样品的 Sr/Cu 值在 0.97~78.37 之间,平均值为 23.59; Ga/Rb 值在 0.22~0.13 之间变化,平均值为 0.17 (数据见表 4)。 Sr/Cu 值与 Ga/Rb 值的散点图 (图 8) 显示,除了零星样品

点位于代表炎热潮湿的区域外,大部分的样品均位于代表炎热干旱的区域,反映出本研究中沉积时温度高且蒸发速率较快的古气候特征。在本套地层中,白云岩地层位于中下部,灰岩地层位于底部和顶部,而灰岩 Sr/Cu 值相较于白云岩的 Sr/Cu 值存在明显的增长。推测在对应沉积时期,可能出现古海洋升温并导致蒸发速率的加快,这在下文古水温的计算值中也得到表现。

3.4.2 古氧化还原特征

Bai (1994) 提出用 Ce/La 值作为判定沉积环境氧化还原特征的指标: $Ce/La > 2$ 时,指示沉积水体为厌氧环境; Ce/La 介于 1.8~1.5 时,指示沉积水体为贫氧化(弱还原)环境; $Ce/La < 1.5$ 时,指示沉积水体为常氧化环境。在本研究中,仅有 1 个样品的 Ce/La 值大于 2,达到 2.07,其余数值介于 1.45~1.98 之间,平均值为 1.74,反映出沉积环境可能在贫氧化(弱还原)和常氧化之间相互转化。

除了上述提到的元素,过渡族元素中如 U、Th、Ni 和 V 等亲 Fe 和亲 S 元素,在不同的氧化还原水体中也存在特定的行为特征,进而在沉积物中的富集程度上表现出一定的差异。前人建立并完善了 U/Th 和 $V/(V+Ni)$ 的参考标准,在以上的 4 个指标中分别建立厌氧化(强还原)、贫氧化(弱还原)和常氧化环境三大类。其中,当 $U/Th < 0.75$ 时,表示沉积水体为常氧化;当 U/Th 值介于 0.75~1.25 时,表明沉积水体为贫氧化(弱还原)性;当 $U/Th > 1.25$ 时,表示沉积水体为厌氧化(强还原)性。当 $V/(V+Ni) < 0.6$ 时,表明沉积水体为氧化性;当 $V/(V+Ni)$ 介于 0.6~0.85 时,表明沉积水体为贫氧化(弱还原);当 $V/(V+Ni) > 0.85$ 时,表明沉积水体为厌氧化(强还原) (Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994; Tribovillard *et al.*, 2006)。

基于上述指标和对应的界限,将本次研究中的元素数据绘制对应曲线 (图 9)。海水环境为弱还原-常氧化环境。海水环境变化较为缓慢,表现为从弱还原过渡到常氧化。SS-8 与其他样品特征以及在 U/Th 和 $V/(V+Ni)$ 结果上相悖,考虑到是沉积环境波动带来的影响。

3.4.3 碳氧同位素特征及其环境指示意义

碳氧同位素对示踪古气候古环境一直有较可靠的应用 (王春连等, 2013; 张春宇等, 2021)。鲁西地区寒武系馒头组地层碳酸盐岩样品同位素分析结果显示 (表 4), $\delta^{13}C$ 值分布在 $-4.5\text{‰} \sim 0.8\text{‰}$ 之

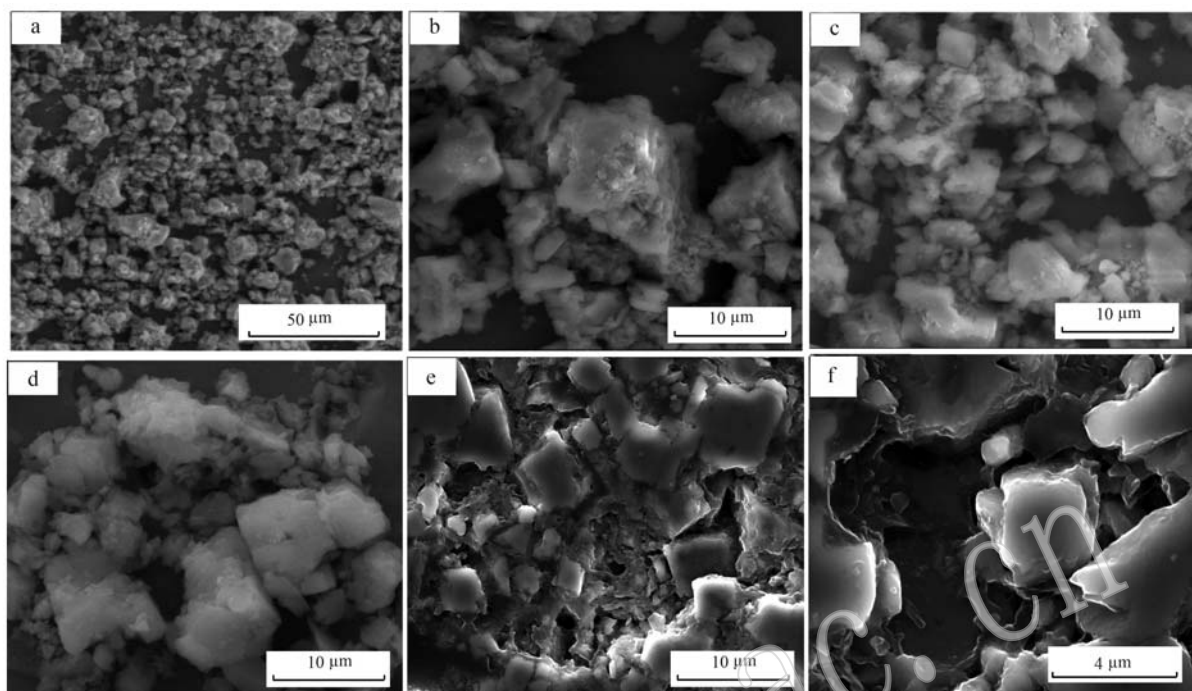


图6 含白云石碳酸盐岩的微形貌特征

Fig. 6 Micromorphological characteristics of dolomitic carbonate rocks

a—微米级白云石颗粒; b,c—白云石颗粒的糜棱状边缘; d,e,f—边缘分明的白云石颗粒

a—micron dolomite particles; b, c—mylonite edge of dolomite particles; d, e, f—dolomite particles with distinct edges

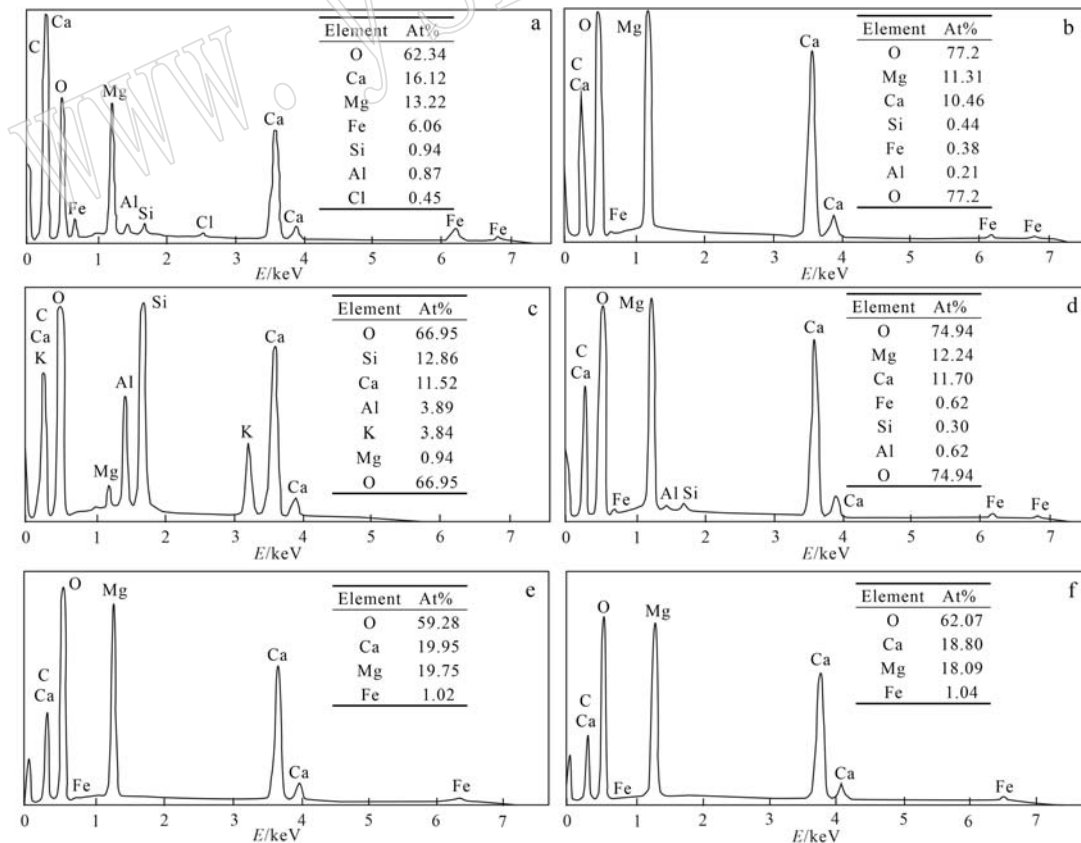


图7 天然碳酸盐岩的EDS光谱及相应的元素分析

Fig. 7 The EDS spectrums of natural carbonate and its elemental analysis

表 2 鲁西地区含白云石碳酸盐岩样品的 EPMA 矿物化学成分表
 Table 2 Mineral chemical composition of dolomitic carbonate rocks samples in western Shandong

实验编号	样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	NiO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	化学式	w _B /%
BY-1	SS-2	0.06	0.02	0.04	-	0.29	0.01	-	22.47	36.71	0.01	-	59.61	Ca _{1.07} Mg _{0.92} Fe _{0.01} (CO ₃) ₂	
BY-2	SS-2	0.01	-	0.02	0.05	0.04	-	0.14	21.14	37.25	0.03	-	58.68	Ca _{1.08} Mg _{0.92} (CO ₃) ₂	
BY-3	SS-5	0.13	0.01	0.07	0.04	0.79	0.03	-	21.38	39.14	-	-	61.59	Ca _{1.12} Mg _{0.86} Fe _{0.02} (CO ₃) ₂	
BY-4	SS-5	0.01	0.07	-	0.01	0.08	-	-	21.37	37.32	0.05	-	58.91	Ca _{1.11} Mg _{0.89} (CO ₃) ₂	
BY-5	SS-10	0.03	0.02	0.02	-	0.13	-	0.03	21.13	37.65	-	0.04	59.06	Ca _{1.12} Mg _{0.88} (CO ₃) ₂	
BY-6	SS-10	0.03	0.04	0.01	-	0.08	-	-	20.88	36.48	0.03	0.01	57.56	Ca _{1.12} Mg _{0.88} (CO ₃) ₂	
BY-7	SS-11	0.04	0.09	0.05	0.02	0.19	0.04	-	21.37	37.99	0.01	-	59.80	Ca _{1.11} Mg _{0.88} (CO ₃) ₂	
BY-8	SS-11	0.22	0.01	0.12	-	0.99	0.03	0.01	21.64	33.24	0.03	-	56.29	Ca _{1.05} Mg _{0.94} Fe _{0.02} (CO ₃) ₂	
BY-9	SS-12	0.43	-	0.04	-	0.66	0.02	0.04	21.29	33.22	0.03	-	55.73	Ca _{1.04} Mg _{0.93} Fe _{0.02} (CO ₃) ₂	
BY-10	SS-12	0.11	-	0.07	-	0.98	0.02	-	18.37	31.18	0.02	0.03	50.77	Ca _{1.08} Mg _{0.89} Fe _{0.03} (CO ₃) ₂	
BY-11	SS-13	0.09	0.06	0.01	0.02	0.58	0.12	-	22.87	34.03	-	0.05	57.83	Ca _{1.02} Mg _{0.96} Fe _{0.01} (CO ₃) ₂	
BY-12	SS-13	0.10	-	0.12	0.04	1.86	0.02	-	23.93	32.12	0.03	0.01	58.23	Ca _{0.95} Mg _{1.00} Fe _{0.04} (CO ₃) ₂	
BY-13	SS-14	0.01	-	0.14	-	1.86	0.08	-	22.60	33.15	0.03	0.00	57.88	Ca _{1.00} Mg _{0.95} Fe _{0.04} (CO ₃) ₂	
BY-14	SS-14	0.06	-	0.01	-	0.37	0.03	0.03	22.16	31.37	0.02	0.01	54.06	Ca _{1.00} Mg _{0.99} Fe _{0.01} (CO ₃) ₂	
BY-15	SS-15	0.22	-	0.02	0.04	1.50	0.11	0.07	22.25	32.40	0.01	0.03	56.64	Ca _{1.00} Mg _{0.96} Fe _{0.04} (CO ₃) ₂	
BY-16	SS-15	0.09	-	0.06	0.00	1.40	0.14	0.00	22.23	31.29	0.03	0.01	55.25	Ca _{0.98} Mg _{0.98} Fe _{0.03} (CO ₃) ₂	
BY-17	SS-16	0.05	0.02	0.06	0.01	0.19	0.02	0.00	21.54	41.17	0.01	-	63.07	Ca _{1.15} Mg _{0.84} (CO ₃) ₂	
BY-18	SS-16	0.29	0.04	0.10	0.03	1.14	0.07	0.04	21.59	31.17	-	0.04	54.51	Ca _{0.99} Mg _{0.96} Fe _{0.03} (CO ₃) ₂	
BY-19	SS-17	0.02	-	-	-	0.77	0.11	-	22.09	29.70	-	0.02	52.72	Ca _{0.97} Mg _{1.01} Fe _{0.02} (CO ₃) ₂	
BY-20	SS-17	0.13	-	0.05	0.01	1.00	0.14	-	21.18	33.13	0.05	0.04	55.72	Ca _{1.04} Mg _{0.93} Fe _{0.02} (CO ₃) ₂	

注:“-”表示未检出。

表3 鲁西地区碳酸盐岩样品元素含量表 $w_B/\%$
Table 3 Element content data of carbonate rock samples in western Shandong

指标	含量
SiO ₂	0.07~9.43 (2.58)
TiO ₂	0.03~0.65 (0.22)
Al ₂ O ₃	0.04~3.22 (0.79)
Fe ₂ O ₃	0.05~10.61 (3.94)
MnO	0.05~0.22 (0.11)
MgO	0.09~6.19 (2.62)
CaO	37.94~55.45 (47.84)
Na ₂ O	0.21~2.49 (0.99)
K ₂ O	0.07~1.95 (0.72)
P ₂ O ₅	0.01~0.06 (0.02)
LOI	31.49~42.56 (39.34)
$\Sigma(CaO+MgO+LOI)$	75.98~96.74 (89.8)
$\Sigma REE/10^{-6}$	0.47~44.34 (22.76)

注: 括号内数据为平均值, $n=18$ 。

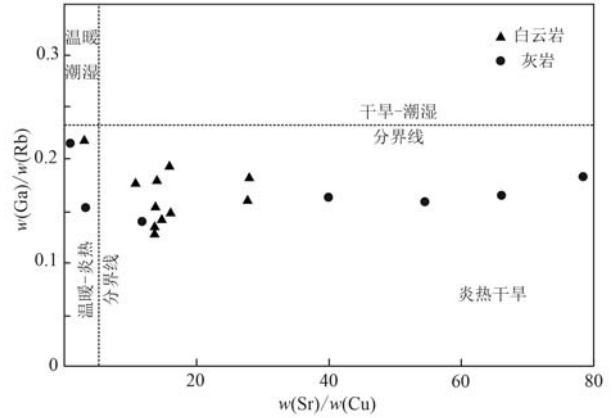


图8 沉积古气候散点图(底图据 Han et al., 2020)
Fig. 8 Scatter diagram of sedimentary paleoclimate (base drawing according to Han et al., 2020)

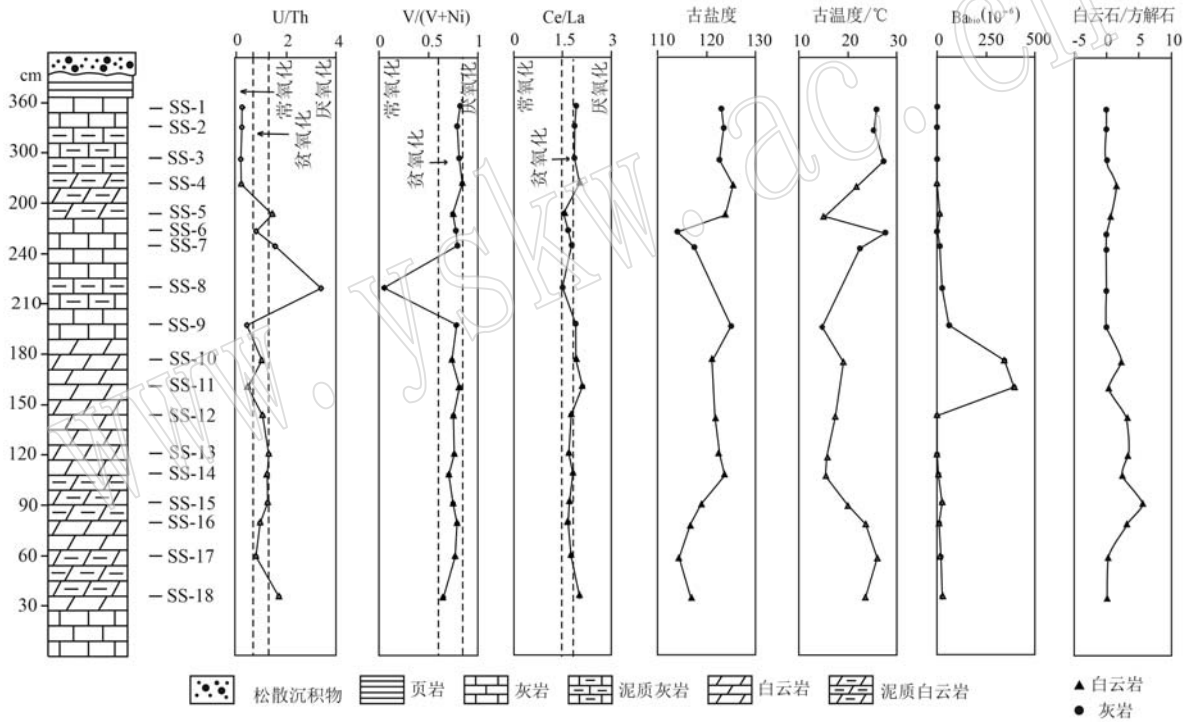


图9 古沉积环境指标、生物钡和白云石相对含量纵向变化特征

Fig. 9 Vertical variation characteristics of paleosedimentary environment indicators, biological barium and relative contents of dolomite

间,平均-1.56‰; $\delta^{18}O$ 变化在-8.1‰到-5.2‰之间,平均-6.68‰。

本研究中选取了较为稳定的碳氧同位素进行古盐度的示踪与计算。Mckenzie (1985) 指出不同源区的 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 具有不同的范围: 河水与地下水 $\delta^{13}C_{PDB}$ 在 -10‰左右, 淡水湖 $\delta^{13}C_{PDB}$ 在 -6‰到 -12‰之间, 而咸水湖的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 则显示出正值。本次 14 个样品的碳同位素值更接近于咸水区域。而在 $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ 图中, 多数样品落入了正常海水范围

内,代表了研究区为咸水的沉积环境特征(图10)。

此外,Keith 等(1964)提出使用古盐度 Z 值来区分淡水与咸水水体环境。其计算公式如下:

$$Z = 2.048[\delta^{13}C_{PDB} + 50] + 0.498 \delta^{18}O_{PDB}$$

Z 值大于 120 为海水来源,小于 120 则为陆相淡水。根据 16 个样品碳氧同位素 Z 值计算结果,SS-1 至 SS-12 显示出大于 120 的 Z 值,而 SS-13 至 SN-18 显示出略低于 120 的 Z 值,与 $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ 图解有一致性,表明了后期沉积环境中古流体为盐度偏高的咸

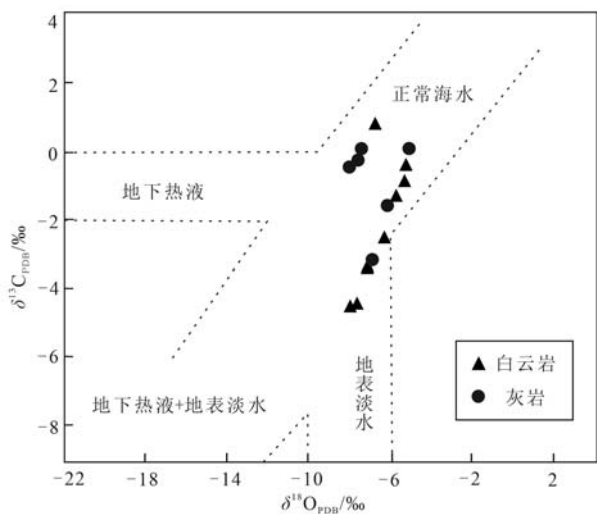


图 10 沉积水环境指示图[据伊海生等(2007)修改]
Fig. 10 Sedimentary water environment indicator diagram
(base drawing according to Yi Haisheng *et al.*, 2007)

水,而早期由于气候变化等因素(如大量大气降水),流体咸度较低,处于半咸水-淡水沉积环境。

目前对于古水温的计算方法同样主要依据碳氧同位素的计算(张春宇等, 2021; 杨虎城等, 2022)。利用碳氧同位素对古温度进行定量分析时,通常适用于中生代以后的样品,对于更老的样品由于“年代效应”,即由于成岩作用 $\delta^{18}\text{O}$ 值会随着样品年龄越大而呈现越小的特征,使得计算结果与实际会有较大偏差,且样品年代越久远,偏差程度越大。因而需要对样品进行校正,通常使用第四纪海相碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值 (-1.2‰)。但该方法的前提是成岩作用对样品影响程度较为接近(邵龙义, 1994)。本次研究表明鲁西地区寒武纪馒头组地层 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围在 $-8.05 \sim -5.17\text{‰}$, 平均值为 -6.68‰ , 用校正值 $\Delta\delta^{18}\text{O} = -5.48\text{‰}$ 将本研究样品进行校正。再利用古

表 4 鲁西碳酸盐岩样品微量元素特征数据

Table 4 Characteristic data of trace elements in carbonate rock samples in western Shandong

样品号	岩性	Sr/Cu	Ga/Rb	U/Th	V/(V+Ni)	Ce/La	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	古盐度 Z 值	古海洋 温度/°C	Ba _{bio} / 10 ⁻⁶	白云石/ 方解石
SS-1	灰岩	39.76	0.16	0.24	0.81	1.88	-0.20	-7.69	123.1	25.78	0.00	0.00
SS-2	灰岩	65.75	0.17	0.24	0.78	1.83	0.06	-7.59	123.6	25.31	0.00	0.00
SS-3	灰岩	13.96	0.18	0.20	0.80	1.82	-0.29	-7.99	122.7	27.21	0.00	0.00
SS-4	白云岩	78.38	0.18	0.22	0.84	1.98	0.8	-6.83	125.5	21.82	0.00	1.54
SS-5	泥晶白云岩	27.88	0.18	1.43	0.74	1.48	-0.39	-5.3	123.9	15.25	16.18	0.63
SS-6	灰岩	3.38	0.15	0.80	0.77	1.63	-4.47	-8.05	114.1	27.50	2.20	0.00
SS-7	泥灰岩	11.71	0.14	1.55	0.79	1.73	-3.05	-6.96	117.6	22.40	15.90	0.00
SS-8	泥灰岩	54.38	0.16	3.33	0.05	1.45	-	-	-	-	29.81	0.00
SS-9	灰岩	0.97	0.22	0.43	0.78	1.86	0.18	-5.17	125.1	14.72	70.50	0.00
SS-10	白云岩	2.93	0.22	1.02	0.73	1.86	-1.49	-6.2	121.2	19.04	400.00	2.43
SS-11	白云岩	10.66	0.18	0.47	0.81	2.07	-	-	-	-	457.00	0.31
SS-12	白云岩	13.66	0.15	1.05	0.75	1.72	-1.28	-5.81	121.8	17.37	0.00	3.23
SS-13	白云岩	14.68	0.14	1.29	0.76	1.64	-0.86	-5.4	122.8	15.66	0.00	3.36
SS-14	白云岩	16.00	0.15	1.23	0.70	1.77	-0.39	-5.33	123.8	15.37	8.00	2.43
SS-15	白云岩	27.71	0.16	1.25	0.74	1.66	-2.49	-6.38	119.0	19.83	29.59	5.82
SS-16	白云岩	13.47	0.13	0.95	0.78	1.62	-3.36	-7.22	116.8	23.60	11.85	3.23
SS-17	白云岩	13.39	0.13	0.79	0.76	1.71	-4.39	-7.72	114.5	25.93	22.77	0.31
SS-18	白云岩	15.84	0.19	1.69	0.65	1.98	-3.31	-7.2	116.9	23.50	30.86	0.25

水温计算公式(Keith and Weber, 1964):

$$t = 16.9 - 4.2 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}} + 0.22) + 0.13 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}} + 0.22)^2$$

计算出馒头组古水温介于 $14.7 \sim 27.5^\circ\text{C}$, 平均为 23.5°C 。整体上较为均匀,具体呈现出温度上部和下部较高、中部较低的特点。

3.5 白云石成因及其古环境标识

自实验室中利用硫酸盐还原菌实现白云石的合

成以来,微生物成因逐渐在白云石成因中占据一定地位。前人研究认为,硫酸盐还原菌是利用环境中其余微生物产生的有机质还原硫酸盐,提高环境中的 pH 值以及碳酸根离子浓度,在亚微米尺度范围内产生高镁方解石和原白云石晶核,之后经历熟化与无机生长,并逐渐变得有序最终形成了白云石(Vasconcelos and McKenzie, 1997; 刘丽红等, 2021)。

微生物成因的白云石,会导致碳同位素的分馏,

这是由于微生物优先利用轻碳(^{12}C)的结果(赵东方等, 2022)。在本次研究中,白云岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -8.05‰ 到 -5.30‰ 之间,平均值为 -6.5‰ ,而方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -3.05‰ ~ 0.18‰ 之间,平均值为 -0.79‰ ,白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 较方解石有明显负偏移。同时,根据野外观察及样品手标本(图2),本套白云岩地层存在明显的叠层状构造,为叠层石白云岩。这为本地层中白云石的微生物成因提供有力的支持。

硫酸盐还原菌所需的有机质含量可以用地层中的古生产力来指示,而海相沉积物中的古生产力波动常用生物钡(Ba_{bio})来表示(Dymond *et al.*, 1992; Francois *et al.*, 1995)。但在海相沉积物中,钡除了生物来源外,还可以由水热沉积物、碎屑铝硅酸盐等来源。前人研究指出,区分生物来源钡和碎屑来源钡通常基于以下方程(Dymond *et al.*, 1992):

$$\text{Ba}_{\text{bio}} = \text{Ba}_{\text{sample}} - (\text{Al}_{\text{sample}} \times \text{Ba}/\text{Al}_{\text{alu}}) = \text{Ba}_{\text{sample}} - (\text{Al}_{\text{sample}} \times 0.0075)$$

根据计算显示,生物钡含量介于 $0.00 \sim 457.00$ 之间,平均值为 60.81 (见表4)。在本地层的沉积中期存在古生产力高值,而白云石在本套地层中也是于沉积中期发育。这表明在相应地层沉积时,海水中的微生物产生有机质含量较高。这些有机质可以为硫酸盐还原菌提供能量来源进而促进白云石的生成,这可以合理解释相应地层中白云石较为富集的发育现象。

促进白云石形成的硫酸盐还原菌一般在碱性环境中存活,同时碱性环境有助于白云石以及原白云石的形成。本套地层沉积时的古气候为炎热干旱环境,且为碱性环境。白云岩相对富集的区域表现出一定的弱还原性古沉积环境,也符合硫酸盐还原菌的生存条件。根据古水温的计算,后期水体温度呈一定的上浮,可能超过硫酸盐还原菌的适应温度,导致沉积早期至沉积中期主要沉积矿物为白云石,而沉积晚期为方解石。结合镜下亮晶胶结和泥晶胶结交替出现的特征,判断本套地层发育于泻湖沉积环境中。

4 结论

(1) 白云石在本套地层中发育时期集中在沉积早期至沉积中期,颗粒细小,粒径集中在数微米至数十微米的范围内,部分结晶情况较好。部分颗粒边

缘为糜棱状判断为后期成岩压实作用的影响。 Fe 、 Mn 未见明显富集,表明没有发生后期流体的重结晶作用。整体剖面中,白云石含量略大于方解石,且其 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 摩尔比接近 $1:1$,并存在轻微的铁离子替代。

(2) 含白云石地层中出现明显的轻碳(^{12}C)富集,结合手标本叠层状构造且未见鸟眼、干裂构造及膏盐,判断白云石为微生物成因。在沉积中期出现古生产力峰值,与白云石发育情况一致。本套地层的沉积古气候特征表现为炎热干旱,碳氧同位素指示为海水沉积环境,古盐度在沉积时期中逐渐增加,且海水温度经历了先下降后上升的变化。在古氧化还原特征上,本套地层呈现弱还原至常氧化的变化趋势,在沉积时期中变化较为平稳。古氧化还原特征、古水温条件与白云石发育情况耦合程度高,为白云石的微生物成因提供了沉积古环境支持,且结合镜下特征判断该地层的沉积发生于泻湖水体环境中。

References

- Adams J E and Rhodes M L. 1960. Dolomitization by seepage refluxion [J]. AAPG Bulletin, 44(12): 1 912~1 920.
- Bai S L. 1994. Devonian Events and Biostratigraphy of South China[M]. Beijing: Peking University Press.
- Beckmann B, Flögel S, Hofmann P, *et al.* 2005. Orbital forcing of Cretaceous river discharge in tropical Africa and ocean response[J]. Nature, 437(7 056): 241~244.
- Cao J, Wu M, Chen Y, *et al.* 2012. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China[J]. Geochemistry, 72(3): 245~252.
- Chen Jinbiao, Wu Tieshan, Zhang Pengyuan, *et al.* 1997. Regional Stratigraphy in North China—— Study on Multiple Stratigraphic Division and Correlation in China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Ding J, Zhang J, Tang X, *et al.* 2018. Elemental geochemical evidence for depositional conditions and organic matter enrichment of black rock series strata in an inter-platform basin: The Lower Carboniferous Datang Formation, Southern Guizhou, Southwest China[J]. Minerals, 8(11): 509.
- Dymond J, Suess E and Lyle M. 1992. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity[J]. Paleoceanography, 7(2): 163~181.

- Feng Zengzhao, Chen Jixin and Wu Shenghe. 1989. Early Paleozoic lithofacies palaeogeography of North China platform[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(4): 15~55(in Chinese with English abstract).
- Francois R, Honjo S, Manganini S J, *et al.* 1995. Biogenic barium fluxes to the deep sea: Implications for paleoproductivity reconstruction [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 289~303.
- Han S, Zhang Y, Huang J, *et al.* 2020. Elemental geochemical characterization of sedimentary conditions and organic matter enrichment for lower cambrian shale formations in northern guizhou, south China [J]. *Minerals*, 10(9): 793.
- Han Z, Zhang X, Chi N, *et al.* 2015. Cambrian oncoids and other microbial-related grains on the North China Platform[J]. *Carbonates and Evaporites*, 30(4): 373~386.
- Hatch J and Leventhal J. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA[J]. *Chemical Geology*, 99(1~3): 65~82.
- Huang Jiqing. 1954. Characteristics of regional geology in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 34(3): 217~244(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhenkui, Shi Liang, Gao Baishui, *et al.* 2013. Carbonate facies and facies models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 965~979 (in Chinese with English abstract).
- Jones B and Manning D A. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 111(1~4): 111~129.
- Keith M and Weber J. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10~11): 1 787~1 816.
- Latif K, Xiao E, Riaz M, *et al.* 2019. Calcified cyanobacteria fossils from the leiolitic bioherm in the Furongian Changshan Formation, Datong (North China Platform) [J]. *Carbonates and Evaporites*, 34(3): 825~843.
- Liu Benpei, Quan Qiuqi, Feng Qinglai, *et al.* 1996. *Geohistory Course* [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Liu Lihong, Gao Yongjin, Wang Dandan, *et al.* 2021. The impact of gypsum salt rock on Cambrian subsalt dolomite reservoir in Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 109~120(in Chinese with English abstract).
- Lu P and Cantrell D. 2016. Reactive transport modelling of reflux dolomitization in the Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia[J]. *Sedimentology*, 63(4): 865~892.
- Machel H G and Lonnee J. 2002. Hydrothermal dolomite—A product of poor definition and imagination[J]. *Sedimentary Geology*, 152(3~4): 163~171.
- McKenzie J A. 1985. Carbon isotopes and productivity in the lacustrine and marine environment [C]// Stumm W. *Chemical Processes in Lakes*. Wiley: New York, 99~118.
- Rivers J M, Kurt K T and James N P. 2012. Salinity reflux and dolomitization of southern Australian slope sediments: The importance of low carbonate saturation levels[J]. *Sedimentology*, 59(2): 445~465.
- Roy D K and Roser B P. 2013. Climatic control on the composition of Carboniferous-Permian Gondwana sediments, Khalaspir basin, Bangladesh[J]. *Gondwana Research*, 23(3): 1 163~1 171.
- Shao Longyi. 1994. Relationship between oxygen and carbon isotopes of carbonate rocks and paleotemperature[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 23(1): 39~45(in Chinese with English abstract).
- Shields G and Stille P. 2001. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: An isotopic and REE study of Cambrian phosphorites [J]. *Chemical Geology*, 175(1~2): 29~48.
- Smith Jr L B and Davies G R. 2006. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs; Introduction[J]. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1 635~1 640.
- Song Mingchun, Li Peiyuan, Xiong Yuxin, *et al.* 2008. Deep iron deposit of the Jining intense magnetic anomaly area in Shandong Province and its significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(9): 1 285~1 291(in Chinese with English abstract).
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, *et al.* 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chemical Geology*, 232(1~2): 12~32.
- Vasconcelos C and McKenzie J A. 1997. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 67(3): 378~390.
- Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, *et al.* 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures[J]. *Nature*, 377(6 546): 220~222.
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Xu Haiming, *et al.* 2013. Carbon and oxygen isotopes characteristics of Paleocene saline lake facies carbonates in Jiangling depression and their environmental significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(5): 567~576(in Chinese with English abstract).
- Wang Quan. 2011. North China Craton and global tectonics[J]. *Geology*

- ical Bulletin of China, 30(1): 1~18 (in Chinese with English abstract).
- Warthmann R, van Lith Y, Vasconcelos C, *et al.* 2000. Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments[J]. *Geology*, 28(12): 1 091~1 094.
- Wright D T. 1999. The role of sulphate-reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 126(1~4): 147~157.
- Xie G, Shen Y, Liu S, *et al.* 2018. Trace and rare earth element (REE) characteristics of mudstones from Eocene Pinghu Formation and Oligocene Huagang Formation in Xihu Sag, East China Sea Basin: Implications for provenance, depositional conditions and paleoclimate [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 92: 20~36.
- Xin Hao, Xiao Enzhao, Qin Yinglun, *et al.* 2019. Sedimentary characteristics of large columnar stromatolites in Fengshan Formation of Xianrendong section of western Shandong area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 43(3): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Yandoka B M S, Abdullah W H, Abubakar M, *et al.* 2015. Geochemical characterisation of Early Cretaceous lacustrine sediments of Bima Formation, Yola Sub-basin, Northern Benue Trough, NE Nigeria: Organic matter input, preservation, paleoenvironment and palaeoclimatic conditions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 61: 82~94.
- Yang Hucheng, Lin Liangbiao, Yu Yu, *et al.* 2022. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of Middle Permian carbonate rocks in Tianquan area, southwestern Sichuan Province, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 42(2): 47~59 (in Chinese with English abstract).
- Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhou Kenken, *et al.* 2007. Carbon and oxygen isotope characteristics and paleoenvironmental implication of the Cenozoic lacustrine carbonate rocks in northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Paleogeography*, 9(3): 303~312 (in Chinese with English abstract).
- You Xuelian, Sun Shu, Zhu Jingquan, *et al.* 2011. Progress in the study of microbial dolomite model[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 52~64 (in Chinese with English abstract).
- Zenger D H, Dunham J B and Ethington R L. 1980. Concepts and models of dolomitization: Based on a symposium sponsored by the Society of Economic Paleontologists and Mineralogists[M]. The Society.
- Zhang Chunyu, Guan Shuwei, Wu Lin, *et al.* 2021. Geochemical characteristics and its paleoenvironmental significance of the lower Cambrian carbonate in the northwestern Tarim Basin: A case study of well Shutan-1 [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(5): 99~111 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Dongfang, Tan Xiucheng, Luo Bing, *et al.* 2022. A review of microbial dolomite: Advances and challenges [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(2): 335~349 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈晋鏊, 武铁山, 张鹏远, 等. 1997. 华北区区域地层——全国地层多重划分对比研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 冯增昭, 陈继新, 吴胜和. 1989. 华北地台早古生代岩相古地理[J]. *沉积学报*, 7(4): 15~55.
- 黄汲清. 1954. 中国区域地质的特征[J]. *地质学报*, 34(3): 217~229.
- 金振奎, 石良, 高白水, 等. 2013. 碳酸盐岩沉积相及相模式[J]. *沉积学报*, 31(6): 965~979.
- 刘本培, 全秋琦, 冯庆来, 等. 1996. 地史学教程[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘丽红, 高永进, 王丹丹, 等. 2021. 塔里木盆地寒武系膏盐岩对盐下白云岩储层的影响[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(1): 109~120.
- 邵龙义. 1994. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系[J]. *中国矿业大学学报*, 23(1): 39~45.
- 宋明春, 李培远, 熊玉新, 等. 2008. 山东省济宁强磁异常区深部铁矿初步验证及其意义[J]. *地质学报*, 82(9): 1 285~1 291.
- 王春连, 刘成林, 徐海明, 等. 2013. 江陵凹陷古新世盐湖沉积碳酸盐岩碳氧同位素组成及其环境意义[J]. *地球学报*, 34(5): 567~576.
- 王荃. 2011. 华北克拉通与全球构造[J]. *地质通报*, 30(1): 1~18.
- 辛浩, 肖恩照, 覃英伦, 等. 2019. 鲁西地区仙人洞剖面风山组大型柱状叠层石沉积特征[J]. *东北石油大学学报*, 43(3): 1~11.
- 杨虎城, 林良彪, 余瑜, 等. 2022. 川西南天全地区中二叠统碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义[J]. *矿物岩石*, 42(2): 1~18.
- 伊海生, 林金辉, 周恩恩, 等. 2007. 青藏高原北部新生代湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古环境意义[J]. *古地理学报*, 9(3): 303~312.
- 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 等. 2011. 微生物白云岩模式研究进展[J]. *地学前缘*, 18(4): 52~64.
- 张春宇, 管树巍, 吴林, 等. 2021. 塔西北地区下寒武统碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义: 以舒探1井为例[J]. *地质科技通报*, 40(5): 99~111.
- 赵东方, 谭秀成, 罗冰, 等. 2022. 微生物诱导白云石沉淀研究进展及面临的挑战[J]. *沉积学报*, 40(2): 335~349.