Ca/Mg 比值对古环境的指示意义及其影响因素

张祥玉，李守军，赵秀丽，崔肖辉，章　磊，王德健
（山东科技大学 地球科学与工程学院，山东 青岛 266590）

摘　要：Ca/Mg 比值作为古环境的判断指标已经得到广泛应用，但是由于其影响因素的多样性，导致其揭示的古气候意义还无法统一。本研究通过对济阳坳陷东营凹陷的坨 712 井、博 16 井、辛 15 井、梁 28 井、樊 128 井、樊 31 井的样品进行 Ca、Mg 元素的 EDTA 容量法分析，得出 Ca/Mg 比值对古环境的盐度、酸碱度具有指示作用，Ca/Mg 比值与盐度和酸碱度均呈正相关，并分析了其影响因素；同时提出利用 Ca/Mg 比值进行相关研究时出现数值交叉或与所规定指标不相符的可能原因：①同一地区，同一时期的岩石，岩性发生了变化；②同一地区，相同岩性的岩石，不在同一层位；③同一地区，同一岩性的岩石，其母岩的来源不同。该研究为今后运用 Ca/Mg 比值恢复古环境和进行沉积相划分等研究工作提供了依据和参考。

关键词：Ca/Mg 比值；影响因素；指示作用；古环境

中图分类号：P736　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-3767(2017)03-0009-08

Indicative Significance of Ca/Mg Ratio to Paleoenvironment and Its Influencing Factors

ZHANG Xiangyu, LI Shoujun, ZHAO Xiuli, CUI Xiaohui, ZHANG Lei, WANG Dejian
(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Ca/Mg ratio has been widely used as a judgment index for the paleoenvironment. However, because of the diversity of its influencing factors, its paleoclimatic significance can not be unified. In this paper, samples from the wells of Tuo712, Bo16, Xin15, Liang28, Fan128, and Fan31 in Dongying sag of Jiyang depression were processed and analyzed by using EDTA volumetric method. The indicative function of Ca/Mg ratio on the salinity, acid-alkaline degree of paleoenvironment was obtained, indicating that there was a positive correlation between Ca/Mg ratio and salinity and acid-alkaline degree. The influence factors of Ca/Mg ratio were also analyzed. Possible reasons for the inconsistency between numerical cross and stipulated indexes Ca/Mg ratio was used for related researches were put forward as follows: the change of lithology of rocks in the same area during the same period, the different positions of rocks with the same lithology in the same area, and the different sources of parent rocks with the same lithology and of the same region. The research provides reference for further research of restoring the paleoenvironment and classifying sedimentary facies.

Key words: Ca/Mg ratio; influence factors; indicative function; palaeoenvironment

目前，地球化学方法在古环境分析中的应用日趋广泛，元素地球化学也越来越受到重视。人们常将生物

收稿日期：2016-07-04
基金项目：山东科技大学研究生科技创新基金项目(YC150320)
作者简介：张祥玉(1988—)，男，山东潍坊人，硕士研究生，从事古生物地层学和油气地质学方面的研究.
E-mail: xiangyu_159@126.com
李守军(1962—)，男，山东临朐人，教授，博士生导师，主要从事古生物地层学和油气地质学方面的研究工作，本文通信作者. E-mail: lishoujun@126.com

壳体和岩石中的化学元素及其比值运用到古环境分析中，从而得到物理标志和生物标志所不能完全反映的环境信息，并利用这些信息对沉积矿产做出综合评价[1-3]。Ca/Mg 比值作为一个有重要意义的环境判别标准，常用来判断古环境水体的盐度、温度、古气候以及沉积时的海陆相等沉积特征[4-7]。赵鸿泉等[8]进行活介形虫壳体中 Ca/Mg 比值与温度和盐度关系试验，证明 Ca/Mg 比值具有指温意义，认为将介形虫壳体化学分析用于再造古环境时，只有挑选壳体完全钙化、龄期相同的个体，才能保证分析结果的可比性。李彬等[9]利用洞穴次生沉积物中的 Ca、Mg 比值作为古气候指标进行研究，指出尽管在一定条件下利用 Ca/Mg 比值可获得高分辨率的信息，但由于 Ca、Mg 元素地球化学习性的复杂性及其影响因素的多元化，如果把该指标作为单独指标应用就会十分危险。贾玉鹤等[10]通过对有孔虫、介形虫、腹足类生物壳体 Ca/Mg 比值的对比研究，恢复生物壳体沉积时泥河湾古湖水的温度、盐度，进而进行古气候、古环境的恢复。郑丽娜等[11]讨论了洞穴次生沉积物的 Ca/Mg 比值影响机制，认为今后应进一步加强对这些微量元素的影响机制研究，尤其是影响因素与微量元素含量的定量关系。为此，从 Ca/Mg 比值对古环境的指示意义及其比值的影响因素进行研究，进一步规范 Ca/Mg 比值的应用条件，提高 Ca/Mg 比值恢复古环境的准确性。

1 地质背景

东营凹陷位于济阳坳陷东南部，北靠陈家庄凸起，南临鲁西隆起，西临青城凸起，面积约 5 700 km^2。

凹陷内可进一步细分为陡坡带、缓坡带、洼陷带及中央背斜带等。北部陡坡带指民丰和利津洼陷以北、陈家庄和滨县凸起以南、林樊家构造以东、青坨子凸起以西的广大地区；中央隆起带位于东营凹陷中央深陷区，呈 NE 或近 EW 走向，三面被洼陷包围(北为民丰洼陷，西为利津洼陷，南为牛庄洼陷)；南部缓坡带是指广饶凸起、鲁西隆起以北，牛庄凹陷、博兴凹陷以南，青坨子凸起以西，青城凸起以东的地区。

东营凹陷内发育牛庄、利津和博兴等 3 个主要洼陷，主要发育深湖-半深湖相泥岩、盐湖相及浊积扇相沉积。辛 15 井处于东营凹陷的中部，成岩相带隶属于中央隆起带。梁 28 井位于东营凹陷中央隆起带的西南倾没端、纯化镇-草桥断鼻带向北倾没部及中央隆起带向西延伸部位上。樊 31 井和樊 128 井位于济阳坳陷东营凹陷博兴洼陷带大芦湖鼻状构造上，隶属于北部陡坡带。

2 材料、方法和数据

对济阳坳陷东营凹陷坨 712 井、博 16 井、辛 15 井、梁 28 井、樊 128 井、樊 31 井等进行取样，按深度每口井取 6～7 个样品，由胜利油田地质院进行 Ca、Mg 元素的 EDTA 容量法分析。岩石中的 Ca 和 Mg 用 EDTA 容量法分析，分析精度 0.03%，分析误差 0.05。得到济阳坳陷东营凹陷的 Ca、Mg 含量及其比值如表 1 和表 2 所示。

3 Ca/Mg 比值对古环境的指示意义

3.1 Ca/Mg 比值对盐度的指示意义

孙镇城等[12]提出："Ca/Mg 比值在判断介形类生活方面是一个极有意义的指标，它能够把海、陆两大不同沉积相区分开来"。在不考虑温度及其他因素影响前提下，生物壳体中的 Ca/Mg 比值是盐度指标。大量数据表明，当介形类的 Ca/Mg 比值大于 80 时，为淡水相；该比值小于 80 时，可能是海相，也能是咸化湖泊相[12-13]，此标准已被广泛应用于海、陆相及海侵问题的讨论中。

一般地，壳体中 Ca/Mg 比值与盐度呈正相关，即随着 Ca/Mg 比值的增大，水体盐度呈递增趋势[6,8]。从世界上一些盐湖和淡水湖的比较上来看，淡水中 Ca 离子一般高于 Mg 离子，而青海、西藏、新疆数百个盐湖绝大多数 Mg 离子高于 Ca 离子，盐湖与海洋内介形类壳体内 Ca/Mg 比值较接近，且都明显低于淡水介形类[13]。

Ca/Mg 比值在湖泊相中也有一定指示意义。随着由湖岸到湖心沉积岩性粒度由粗变细，其 Ca/Mg 比值也随之变化，呈一定递减趋势[13]。研究区泥岩、含灰质泥岩、泥质灰岩、灰岩的粒度相对较小，所形成环境代表一种低流态的环境，属于深湖、半深湖相，可代表高盐度环境，其 Ca/Mg 比值相对较大；泥质砂岩、油页

岩等粒度相对较大的，形成环境的流态相对高一些，属于浅湖、滨湖相，其盐度较深湖相的低，Ca/Mg 比值相对较小。由表 2 数据可以看出，随着粒度变细，湖泊相由滨湖、浅湖、半深湖到深湖，盐度也由低到高，Ca/Mg 比值呈一定递增趋势，因此 Ca/Mg 比值与盐度呈正相关，可用来判断古盐度。表 2 中砾岩和含砾砂岩数据来自坨 712 井和博 16 井，由于其粒度较大，颗粒间为钙质胶结，Ca/Mg 比值偏大，但这并不能否定前面的结论，因此样品选择时要尽量避开钙质胶结的岩石。

表 1　济阳坳陷东营凹陷 Ca、Mg 含量及其比值

Tab. 1　Content of Ca and Mg and Ca/Mg ratio in the Dongying sag of the Jiyang depression

井名	层位	岩性	成岩相带	深度/m	Ca/%	Mg/%	Ca/Mg
辛 15	Es3s	泥岩	中央隆起带	2 456.6	0.18	0.62	0.29
辛 15	Es3s	泥岩		2 530.2	0.20	0.62	0.32
辛 15	Es3s	泥岩		2 541.6	0.25	0.74	0.34
辛 15	Es3s	泥岩		2 631.0	0.34	0.78	0.44
辛 15	Es3s	泥岩		2 658.3	0.64	1.31	0.49
辛 15	Es3x	泥岩		2 959.4	1.47	1.31	1.12
梁 28	Es3z	泥岩	中央隆起带	2 822.0	1.87	1.77	1.06
梁 28	Es3z	泥岩		2 839.0	1.38	1.02	1.35
梁 28	Es3z	泥岩		2 840.0	4.82	1.80	2.68
梁 28	Es3z	泥岩		2 841.5	5.14	1.54	3.34
梁 28	Es3z	泥岩		2 842.5	5.05	1.47	3.44
樊 128	Es3z	粉砂岩	北部陡坡带	2 560.0	1.17	1.06	1.10
樊 128	Es3z	粉砂岩		2 561.0	1.12	0.98	1.14
樊 128	Es3z	粉砂岩		2 562.0	1.17	0.31	3.77
樊 128	Es3z	粉砂岩		2 562.0	2.14	0.44	4.86
樊 31	Es3x	粉砂岩	北部陡坡带	2 934.0	1.03	0.35	2.94
樊 31	Es3x	粉砂岩		2 959.3	2.06	0.44	4.68
樊 31	Es3x	粉砂岩		2 966.9	1.76	0.37	4.76

表 2　济阳坳陷部分样品的 Ca、Mg 含量

Tab. 2　Content of Ca and Mg in Jiyang depression

岩性	Ca 的平均含量/%	Mg 的平均含量/%	Ca/Mg	样品数量/个
砾岩	5.01	1.09	4.59	7
含砾砂岩	2.77	0.82	3.39	28
粉砂岩	1.96	0.76	2.58	40
泥质砂岩	1.74	0.91	1.90	9
油页岩	15.23	5.71	2.67	8
泥岩	3.10	1.02	3.05	59
含灰质泥岩	4.46	1.30	3.42	15
灰质粉砂岩	3.80	1.00	3.80	2
页岩	16.08	3.99	4.03	5
泥质灰岩	14.51	1.83	7.93	5
灰岩	6.62	0.68	9.73	2

3.2 Ca/Mg 比值对介质酸碱性的指示意义

钙盐和镁盐在湖泊中的溶解度不同，按化学沉积分异规律，镁盐要比钙盐难于沉积，而 Ca 的沉积作用受介质酸碱性的影响更明显，因此湖相泥岩中 Ca/Mg 比值明显高于河流相泥岩[3,13]。邓宏文等[13]以济阳坳陷东营凹陷为例研究 Ca/Mg 比值的相标志时指出，在湖盆演化过程中随着古水体水质变淡，pH 值降低，沉积物搬运距离减小，Ca/Mg 比值也随之变化。由表 2 中数据可以看出，研究区泥岩、含灰质泥岩、泥质灰岩、灰岩的粒度相对较小，沉积物的搬运距离较长，形成环境为低流态环境，属于深湖、半深湖相，代表高盐度环境，古水体水质较咸，古水体水质中 pH 值较大，其 Ca/Mg 比值也相对较大；泥质砂岩、油页岩等粒度相对较大，沉积物的搬运距离较短，形成环境的流态相对较高，属浅湖、滨湖相，古水体水质较淡，古水体的 pH 值较小，Ca/Mg 比值相对较小。因此，Ca/Mg 比值与介质的酸碱性有一定关系，即 Ca/Mg 比值越高，碱性越强。

4 影响 Ca/Mg 比值的因素

Ca/Mg 比值受多种因素控制，除了元素本身性质的影响外，还受到外界环境中诸多因素的影响。

4.1 岩性、母岩的来源及风化作用的影响

岩石的形成机理、产出状态以及形成时的环境差异，导致其矿物组成和元素组成各不相同，因而 Ca、Mg 含量和 Ca/Mg 比值也有一定差别。

在强烈的岩浆结晶作用早期，岩浆结晶过程中耗尽了岩浆中的 MgO，残余岩浆中结晶出的矿物中含有的 Mg 就为数不多了，而 Ca 则无此现象[3]。因此，随着岩浆岩结晶程度的变化，其 Ca/Mg 比值有增长趋势。表 3 列出的是各种主要类型岩浆岩中 Ca、Mg 含量及 Ca/Mg 比值，其中最高的 Ca/Mg 比值是最低的 27 倍。

表 3 主要类型岩浆岩中 Ca、Mg 含量及 Ca/Mg 比值[3]

Tab. 3 Content of Ca and Mg in the main types of magmatic rocks and Ca/Mg ratio

岩性 / 元素符号	超基性岩	基性岩（玄武岩）	中性岩		酸性岩		
			正长岩	闪长岩	富 Ca	贫 Ca	花岗岩等
Ca/%	25	76	1.8	4.65	2.53	0.51	1.58
Mg/%	204	46	0.58	21.8	0.94	0.16	0.56
Ca/Mg	0.12	1.65	3.10	2.13	2.69	3.18	2.82

在沉积岩中，海相和陆相中形成的不同类型的岩石差别也很大，周瑶琪[14]对我国华南地区二叠纪—三叠纪海相地层的地球化学元素进行测定（表 4），发现岩性对 Ca/Mg 比值影响很大。济阳坳陷东营凹陷沙河街组的元素组成（陆相地层）也可以发现这一现象（表 5）[13]。

表 4 P/T 界线廊坊地区各种岩石中 Ca、Mg 元素平均丰度（海相地层）[14]

Tab. 4 P/T boundary Langfang regional average abundance of Ca and Mg element in all kinds of rocks (marine strata)

岩性 / 丰度	硅质岩	灰岩	泥质碳酸岩	含 Ca 质泥岩	泥质粉砂岩	黑页岩	非界线粘土岩	界线粘土岩
样品数	13	12	16	10	12	30	18	23
Ca/%	4.32	31.5	1240	4.89	2.11	3.51	2.27	3.56
Mg/%	0.50	0.56	1.38	1.93	/	1.24	1.43	1.69
Ca/Mg	8.64	56.25	8.99	2.53	/	2.83	1.59	2.11

沉积物母岩的成分是不大相同的，因此其 Ca、Mg 的含量 Ca/Mg 比值亦有差异。母岩经过不同程度的风化作用之后，其矿物成分及元素组成发生了极大变化[13,15]。在风化过程中，矿物发生化学分解，新矿物形成、化学元素也在不断地发生分异。风化作用的强度和性质对元素的分异也有极大影响，如从母岩到土壤的形成过程中，伴有 Ca、Mg、Na、K 的明显减少[13]。风化作用越强，母岩的矿物成分破坏越严重，元素在搬运过程中分异作用也越明显[13]，由于元素迁移能力的差异，一般 Ca 的迁移能力大于 Mg，所以当风化作用达到一定程度时便导致 Mg 的富集，Ca 的流失，从而使得 Ca/Mg 比值降低。

4.2 胶结作用的影响

如图 1 所示，东营凹陷沙河街组不同构造区带碳酸盐胶结作用存在共同特征：随着埋藏深度增加，碳酸盐含量逐渐增高，胶结作用增强[16]。如表 1 所示，在对济阳坳陷东营凹陷辛 15 井、梁 28 井不同深度的泥岩和樊 128 井、樊 31 井的粉砂岩进行样品分析时发现，在一定范围内，随着深度的加大，Ca/Mg 比值也随之升高。成岩晚期的碳酸盐胶结作用随着深度的增加而增强，Ca 含量随着深度的增加而增多，Ca/Mg 比值也随之升高。碳酸盐胶结作用使得 Ca/Mg 比值在一定范围内随着深度的增加而增大，因此，碳酸盐胶结作用会影响 Ca/Mg 比值。

表 5 济阳坳陷东营凹陷沙河街组的元素组成(陆相地层)[13]

Tab. 5 Elements of Shahejie formation in Dongying sag of Jiyang depression(continental strata)

岩性 / 丰度	泥岩	黑页岩	砂岩	灰岩
Ca/%	5.1	12.2	0.5	27.3
Mg/%	1.3	1.0	0.4	3.4
Ca/Mg	3.92	12.20	1.25	8.03

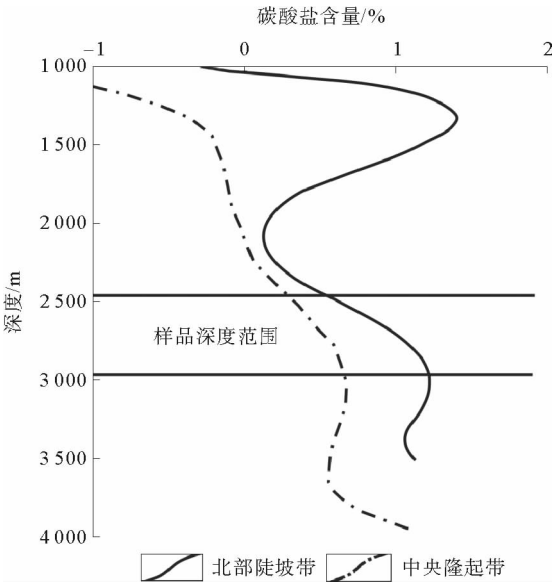

图 1 东营凹陷不同地区碳酸盐含量的纵向分布特征[16]

Fig. 1 Distribution of carbonate content of different structural belts in Dongying depression

4 讨论

由表 3 可以看出：各种主要类型的岩浆岩中随着岩性的不同，Ca、Mg 含量出现变化，Ca/Mg 比值差异较大，其中最高的 Ca/Mg 比值是最低的 27 倍。表 4 海相地层中灰岩的 Ca/Mg 比值达到 56.25%，而泥质粉砂岩却不含有 Mg，各类岩石中 Ca/Mg 比值由 1.59%到 56.25%变化，变化较大，且无规律可循。表 5 中陆相地层中不同岩性沉积岩的 Ca、Mg 含量不同，其中，灰岩的含 Ca 量为 27.3%，黑页岩的含 Ca 量为 12.2%，灰岩的含 Ca 量明显大于黑页岩的含 Ca 量，但是黑页岩的 Ca/Mg 比值却比灰岩的 Ca/Mg 比值大很多。对比陆相地层和海相地层中各类岩石的 Ca、Mg 含量和 Ca/Mg 比值，发现陆相地层中沉积岩和海相地层中沉积岩的 Ca、Mg 含量无可比性，Ca/Mg 比值差异较大。因此，不同岩性条件下，Ca/Mg 比值有较大差异，在使用 Ca/Mg 比值恢复古环境时，要注意岩性的变化，否则，会导致数值交叉或与所规定的指标不相符。

由表 4 和 5 中的数值可以看出：海相地层中灰岩的 Ca/Mg 比值为 56.25%，陆相地层中灰岩的 Ca/Mg 比值为 3.92%，两者含 Ca 和 Mg 都不相同，岩性虽然相同，但是 Ca/Mg 比值无可比性；海相地层与陆相地层中泥岩、黑页岩的 Ca/Mg 比值也相差较大，无规律可循；陆相地层中砂岩的 Ca/Mg 比值为 1.25%，而海相地层中砂岩不含 Mg 元素。因此，即使是相同的岩性因产出环境及母岩来源的不同其 Ca/Mg 比值不同，

所以母岩的来源对 Ca/Mg 比值的影响是很大的。因此，同一岩性的岩石其母岩的来源不同，使用 Ca/Mg 比值恢复古环境时，也会出现数值交叉或与所规定的指标不相符。

从前面的论述中不难看出，Ca/Mg 比值对古环境具有重要的指示意义，对恢复古环境有重要的作用，但是使用 Ca/Mg 比值恢复古环境具有一定的局限性。

运用 Ca/Mg 比值高低来比较盐度以及酸碱度的高低还是可以值得相信的，但是在划分海陆相时就会出现数值交叉，与所规定的指标不相符，Ca/Mg 比值的指示意义也有一定的不确定性。由表 4、表 5 可以看出，陆相古近系沙河街组的岩石与华南 P/T 界线岩石的数值有很大相似性，给区分盐度和划分海陆相造成了一定的困难。

一般来说，海水中 Mg 含量较高，Mg 含量 0.988%；化石海相介形类 Mg 含量平均 0.615%，淡水湖现代介形类壳体只有一半个体含 Mg，平均含 Mg 量 0.128%，这些数据说明介形类壳体 Ca/Mg 比值能反映介形类生活的水体介质的咸淡。中原油田相关研究[17]也作了类似的实验，并取得了渤海咸水中介形类壳体 Ca/Mg 比值平均值为 19.56，武汉淡水湖介形类壳体 Ca/Mg 比值平均值为 107.7 的数据。由此看出，海相介形类壳体 Ca/Mg 比值低于 60 的观点是可信的，问题在于 Ca/Mg 比值小于 60 不一定归入海相或海侵，低 Ca/Mg 比值可能是陆相咸化湖泊中的介形类。诚然介形类壳体 Ca/Mg 比值属于淡水介形类，可以认为是陆相，而不是海相的，但是，有人测得现代海相介形类，可以认为是陆相，而不是海相的。因此可以看出，划分海陆相时，Ca/Mg 比值数值出现了交叉，与所规定的指标不相符。

由表 1 数据可知，运用 Ca/Mg 比值恢复古环境时，即使选取样品的岩性相同，但是不属于同一个层位，或同一时期不同沉积相的岩性不同，依然会导致数值交叉，与所规定的指标不符。

1）相同层位中同一岩性条件下，Ca/Mg 比值随深度的增加而增大，Ca/Mg 比值与深度呈正相关，如图 2 所示。

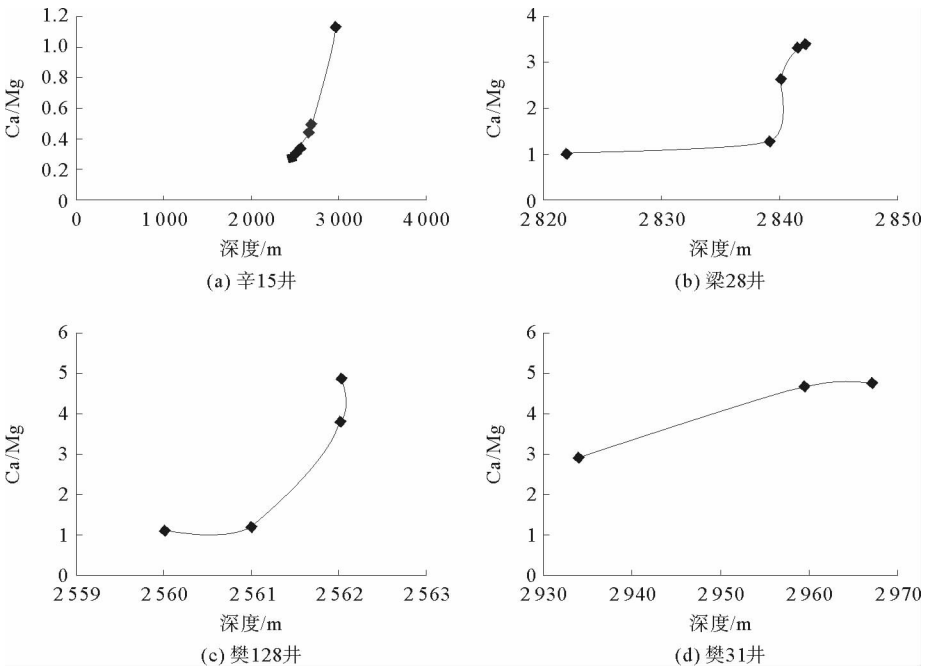

图 2　Ca/Mg 比值随深度变化曲线

Fig. 2　The variation curve of Ca/Mg ratio with depth

2）同为沙河街组沙三段中亚段深湖相沉积环境形成的泥岩与粉砂岩，两者的 Ca/Mg 比值不具有可比性，虽然粉砂岩的深度比泥岩的小，但是粉砂岩中的 Ca/Mg 比值与泥岩中的 Ca/Mg 比值交叉，单从 Ca 的

含量来看，泥岩含 Ca 量要明显高于粉砂岩的，但有时粉砂岩中 Mg 的含量低，导致粉砂岩中 Ca/Mg 比值增大，从而使得粉砂岩中 Ca/Mg 比值与泥岩中的 Ca/Mg 比值交叉。

3）沙河街组沙三段上亚段和中亚段的泥岩，虽然岩性均为泥岩。但含 Ca 量却不相同，因为沙三段中亚段的泥岩处在碳酸盐高含量带，碳酸盐胶结程度强烈，而沙三段上亚段碳酸盐胶结程度较弱，因此，沙三段中亚段泥岩比上亚段泥岩含 Ca 量高。张永旺等[18]通过梁 28 井取样研究东营凹陷古近系碳酸盐储层特征时发现沙三段存在两个碳酸盐的高含量带，这两个高含量带峰值分别出现在 1 500 m 和 3 000 m 左右，本文样品中梁 28 井泥岩深度接近 3 000 m，所以含 Ca 量要高，这就解释了中亚段泥岩含 Ca 量高的原因。

4）沙河街组沙三段中亚段与沙河街组沙三段下亚段相比较，虽然岩性均为粉砂岩，但是 Ca 含量和 Ca/Mg 比值出现数值交叉，原因是沙三段中亚段属于深湖相沉积，沙三段下亚段属于深水浊积扇沉积，两种沉积相均为含碳酸盐胶结物发育的有利相带，含 Ca 量均较高。

5 结论

1）Ca/Mg 比值对古环境具有重要的指示意义，可以用来判断古盐度，即 Ca/Mg 比值与盐度呈负相关；Ca/Mg 比值与介质的酸碱性有一定的关系，即 Ca/Mg 比值越高，碱性越强。

2）运用 Ca/Mg 比值恢复古环境时，要考虑影响 Ca/Mg 比值的因素除了元素本身的化学性质外，还有岩性、母岩的来源及风化作用和胶结作用。

3）使用 Ca/Mg 比值恢复古环境时，为避免产生数值交叉或与所规定的指标不相符，要注意以下三点：一是同一地区，同一时期的岩石，要注意岩性的变化；二是同一地区，同一岩性的岩石，要注意层位的变化；三是同一地区，同一时期的岩性相同的岩石，要注意其母岩的来源不同。

参考文献：

[1]刘英俊，张景荣，李兆麟，等. 元素地球化学[M]. 北京：科学出版社，1984：332-335.

[2]张彬，姚益民. 利用微量元素统计分析东营凹陷新生代沙四晚期湖泊古环境[J]. 地层学杂志，2013，37(2)：186-192.
ZHANG Bin，YAO Yimin. Trace element and palaeoenvironmental analyses of the Cenozoic lacustrine deposits in the upper Es4 submember of the Dongying basin[J]. Journal of Stratigraphy，2013，37(2)：186-192.

[3]南京大学地质学系. 地球化学(修订本)[M]. 北京：科学出版社，1979：339-359.

[4]杨克红，初凤友，朱继浩，等. 南海北部冷泉碳酸盐岩中钙质生物壳体和自生碳酸盐矿物的 Mg/Ca，Sr/Ca 及其环境指示[J]. 海洋学报，2014，36(8)：39-48.
YANG Kehong，CHU Fengyou，ZHU Jihao，et al. Mg/Ca and Sr/Ca ratios of authigenic carbonate minerals and calcareous biogenic shells in the cold-seep carbonates，north of the South China Sea and their environmental implication[J]. Acta of Oceanoloogica Sinica，2014，36(8)：39-48.

[5]ELMORE A C，SOSDIAN S，ROSENTHAL Y，et al. A global evaluation of temperature and carbonate ion control on Mg/Ca ratios of ostracoda genus Krithe[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems，2012，13(9)：639-644.

[6]ZAKHAROV Y D，UKHANEVA N G，IGNATYEV A V，et al. Latest Permian and Triassic carbonates of Russia：New palaeontological findings，stable isotopes，Ca-Mg ratio，and correlation[J]. Developments in Palaeontology and Stratigraphy，2000，18：141-171.

[7]CHEN T R，YU K F，ZHAO J X，et al. Testing coral paleothermometers (B/Ca，Mg/Ca，Sr/Ca，U/Ca and $\delta_{18}O$) under impacts of large riverine runoff[J]. Acta Oceanologica Sinica，2015(8)：20-26.

[8]赵泉鸿，戴中宁，任炽刚，等. 活介形虫壳体中 Mg/Ca 比值与温度和盐度关系的试验[J]. 科学通报，1994，39(15)：1409-1412.
ZHAO Quanhong，DAI Zhongning，REN Chigang，et al. Test of the relationship between temperature，salinity and Mg/Ca ratio in live ostracod shell[J]. Chinese Science Bulletin，1994，39(15)：1409-1412.

[9]李彬，李红春. 洞穴次生化学沉积物中 Mg，Sr，Ca 及其比值的环境指代意义[J]. 中国岩溶，2000，19(2)：115-122.
LI Bin，LI Hongchun. The ratios of Mg/Ca，Mg/Sr in the speleothems and their environmental meanings in Guilin area[J].

Carsologica Sinica,2000,19(2):115-122.

[10]贾玉鹤,王世杰.生物壳体Sr/Ca,Mg/Ca,$^{87}Sr/^{86}Sr$比值在恢复古气候,古环境中的应用:以小渡口剖面为例[J].地质地球化学,2002,30(2):54-58.

JIA Yuhe,WANG Shijie. The application of Mg/Ca,Sr/Ca and $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios of biogenic shells in reconstruction of palaeoclimate and palaeoenvironment as exemplified by Xiaodukou section[J]. Geology-Geochemistry,2002,30(2):54-58.

[11]郑立娜,周厚云,朱照宇.洞穴次生碳酸盐沉积的Mg/Ca与Sr/Ca比值研究进展:兼论洞穴次生沉积物Mg/Ca与Sr/Ca的影响机制[J].中国岩溶,2010,29(2):212-218.

ZHENG Lina,ZHOU Houyun,ZHU Zhaoyu. Progress of study on Mg/Ca and Sr/Ca ratios of speleothem in caves[J]. Carsologica Sinica,2010,29(2):212-218.

[12]孙镇城,杨藩,张枝焕,等.中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M].北京:石油工业出版社,1997:48-62.

[13]邓宏文,钱凯.沉积地球化学与环境分析[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1993:4-28.

[14]周瑶琪.二叠三叠系界线事件研究[M].北京:石油大学出版社,2005:99-105.

[15]冯增昭.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,1993:103-113.

[16]田景春,谭先锋,林小兵,等.箕状断陷湖盆不同构造区带成岩作用特征及差异性研究:以东营凹陷沙河街组为例[J].现代地质,2009,23(4):683-690.

TIAN Jingchun,TAN Xianfeng,LIN Xiaobing,et al. Research on diagenetic difference of various structural belts in the half graben-like rift lake basin:Taking Shahejie formation in Dongying depression as an example[J]. Geoscience,2009,23(4):683-690.

[17]魏美田.东濮凹陷沙三段生物群及其古沉积环境[J].中国海上油气(地质),1990,4(3):13-18.

WEI Meitian. Fauna and flora and their depositional environment of member 3 of Shahejie formation,Dongpu sag[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology),1990,4(3):13-18.

[18]张永旺,曾溅辉,高霞,等.东营凹陷古近系储层碳酸盐胶结物分布特征及主控因素[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(1):16-22.

ZHANG Yongwang,ZENG Jianhui,GAO Xia,et al. Distribution characteristics and main controlling factors of carbonate cements in the Paleogene reservoirs in Dongying depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2009,9(1):16-22.

(责任编辑:高丽华)