

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019041601

湖相介形类壳体微量元素在古环境重建中的应用

姜高磊^{1,2}, 刘林敬^{1,2}, 毛欣^{1,2}

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061
2. 中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 石家庄 050061

摘要:湖相介形类壳体微量元素(本文主要指Mg和Sr)是重建古环境的重要指标之一,可以定性或定量地反映湖水信息。自20世纪80年开始应用以来,经过30余年的发展取得了很大进展。在古环境重建过程中主要存在两类影响因素:(1)其宿生水体中M/Ca比值(M主要指Mg和Sr)的影响因素:季节变化、微环境差异和湖泊演化过程,这类因素通过对宿生水体中M/Ca比值来影响介形虫壳体中的M/Ca比值,进而造成古环境重建结果的误差增大或可靠性降低;(2)介形类壳体微量元素分配系数的影响因素:宿生水体中M/Ca比值、温度、碱度等,这类因素能够直接影响介形类壳体分泌、钙化的生命-化学过程的因素,是定量重建的重要影响因素。加强现代介形类生活习性和微量元素组成变化过程的研究可以消除或减小以上影响因素对古环境重建的影响,提高介形类壳体化石中微量元素组成在古环境重建研究中的精度和可靠性。

关键词:介形类;壳体微量元素;古环境重建;分配系数

中图分类号:P532 文献标识码:A

Trace elements in non-marine Ostracods and their application to paleoenvironment reconstruction

JIANG Gaolei^{1,2}, LIU Linjing^{1,2}, MAO Xin^{1,2}

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China
2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydrological Environment Evolution, CAGS, Shijiazhuang 050061, China

Abstract: The trace elements (Mg and Sr in this paper) in non-marine Ostracoda could be used as proxies to reconstruct the paleoenvironment of paleo-lake qualitatively or quantitatively. Since their first application to paleoenvironmental reconstruction in the 1980s, great progress has been made in the past 30 years. There are two factors which influence the proxies. One is the changes in M/Ca ratio of the host water (M refers to Mg plus Sr in this paper), including seasonal changes, microenvironmental differentiation and lake evolution process. This type of factors affects the M/Ca ratio in Ostracoda shells through the changes in M/Ca ratio in the host water, and may lead to the increase in error or decrease in reliability of the reconstruction results. The other is the partition coefficient of Ostracoda shells, including M/Ca of host water, temperature, alkalinity and so on, which can directly affect the bio-chemical process of shell secretion and calcification. This type of influencing factors may severely influence the quantitative reconstruction of paleoenvironment. For improving the accuracy and reliability of the results of paleoenvironmental reconstruction, living habits of modern Ostracoda and their trace elements composition in different environments should be carefully studied as reference cases.

Key words: ostracoda; trace elements in shell; quantitative reconstruction; partition coefficient

介形类是海洋、湖泊、河流等水域中广泛存在的一种节肢类小型甲壳动物,以浅海和静水湖泊中最为丰富^[1-3]。湖泊中的介形类一般营底栖生活,栖息于沉积物表面、沉积物内部(钻掘深度通常<1 cm)或者水草丛中,取食各种有机质,包括藻类、原生动物、植物残体等^[1,2]。

大多数介形类的寿命短于一年,多数为几周至

几个月。介形类以蜕壳的方式进行生长,由卵孵化成幼虫称为第一龄期,当身体生长对壳体来说已经过大时,坚硬的双壳脱落,随之身体迅速增长和发育,同时形成新的壳并钙化,其完整的生命周期要经历8个这样的龄期,蜕壳8次,在沉积物中留下9对钙质外壳^[1,4]。

介形类壳体大小多数为0.5~2 mm,主要由低

资助项目:国家自然科学基金“巴丹吉林沙漠意外湖花介壳体微量元素分配系数的现代变化过程研究”(41807420);中国地质调查局项目“巴丹吉林沙漠及周边地区1:25万水文地质调查”(12101106000150093)

作者简介:姜高磊(1988—),男,助理研究员,从事第四纪环境演变研究, E-mail: jianggl198899@163.com

收稿日期:2019-04-16; 改回日期:2019-05-10. 文凤英编辑

镁方解石组成, 且壳体的组成物质几乎全部来自于其生存的水体^[5]。介形类每次蜕壳, 新壳壳体的钙化时间特别短, 一般为几个小时至几天时间^[6], 在钙化过程中介形虫吸收宿生水体中的离子进行壳体的钙化, 介形虫除了吸收壳体主要组成物质 Ca 离子、碳酸根离子之外, 还会吸收一些其他微量元素, 如 Mg、Sr、Ba 等(图 1), 且这些元素的含量及其之间的比值受水温、水化学参数等因素的影响^[7-10]。由于不同物种具有特定的生存微环境, 且对其宿生水体水化学条件的变化极其敏感, 而且低镁方解石相对比较稳定, 可以在沉积物中长期保存, 不易受后期成岩作用的影响, 介形类壳体中的微量元素及其比值通常被作为重建古环境、古水文的重要指标^[11-19]。

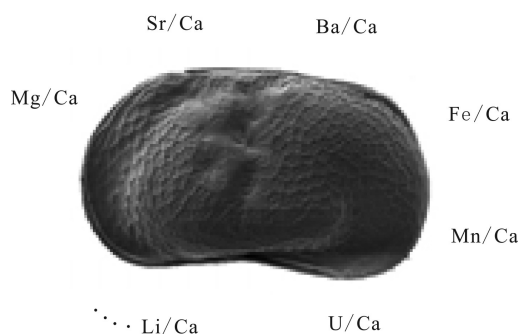


图 1 介形类壳体微量元素比值(中心介形类为意外湖花介壳; 据文献[8]修改)

Fig.1 Trace element ratio of an ostracod shell (a left valve of *Limnocythere inopinata* in the center; modified from reference[8])

湖湘介形类壳体微量元素在重建古环境中的应用始于 20 世纪 80 年代^[20-23], 在应用过程中出现了一些问题, 方法也在不断地完善和修正。本文在文献研读的基础上, 尝试总结前人利用介形类壳体微量元素(主要指 Mg 和 Sr)定量重建古环境工作中的成果和遇到的问题, 对未来研究工作进行展望。

1 研究历史及应用原理

在 20 世纪 80 年代, Chivas 等^[20]提出非海相介形类壳体中的 Mg、Sr 和 Ba 微量元素与其宿生水体中对应的微量元素成比例, 壳体中的微量元素含量可以用来进行定量恢复其宿生水体的微量元素组成。之后, Chivas 等^[21]利用澳大利亚东南部的 Keilambete 湖泊中现生介形类 *Australocypris robusta* 壳体中 Sr/Ca 比值和湖水中 Sr/Ca 比值计算出其壳体的 Sr 分配系数 K_d 为 0.082。计算公式如下:

$$K_d(\text{Sr/Ca}) = [\text{Sr/Ca}]_{\text{壳体}} / [\text{Sr/Ca}]_{\text{湖水}}$$

式中: Sr/Ca 比值为摩尔比。利用计算得出的分配系数和湖泊沉积物中的介形类壳体中的 Sr/Ca 比值, 定量恢复了 Keilambete 湖一万年以来湖水盐度变化。但在之后一年, Chivas 等^[22-23]在介形类培养试验和野外调查研究过程中发现, 介形类壳体中的 Mg 的分配不仅与宿生水体的 Mg/Ca 比值有关, 而且受温度和个体生长阶段的影响, 而 Sr 的分配与宿生水体中的 Sr/Ca 和盐度有关^[7, 24]。之后越来越多的学者注意到其他地区介形类壳体中 Mg 的含量也受宿生水体温度的影响^[25-27], 而且温度对介形类壳体中 Mg/Ca 比值的影响量很大, 20 °C 的温度变化可以引起 Mg/Ca 比值 50% 的变化^[28]。因此, 学者们将介形类壳体中 Mg 的分配系数计算公式表达如下:

$$K_d(\text{Sr/Ca}) = [\text{Sr/Ca}]_{\text{壳体}} / [\text{Sr/Ca}]_{\text{湖水}}$$

式中: Mg/Ca 比值为摩尔比。当介形虫宿生水体中的 Mg/Ca 比值较为恒定时, 壳体中的 Mg/Ca 比值可以反映宿生水体的温度变化, 这也是利用海水介形类壳体中 Mg/Ca 比值定量重建湖水^[29]或海水^[30-31]温度的基本原理。

利用上述介形类壳体中微量元素与宿生水体中的微量元素的关系可以定性或者定量地进行古环境重建。定性重建古环境主要是利用介形类壳体中微量元素比值 M/Ca 随着湖泊沉积物的深度(时间)序列的变化趋势, 定性描述湖泊演化过程中湖泊水化学的变化趋势。如, Zhai 等^[15]在呼伦湖利用介形类(意外湖花介 *Limnocythere inopinata*)壳体中的 Mg/Ca 和 Sr/Ca 比值结合其他指标定性重建了 11 000 年以来湖泊水文演化历史。定量重建古环境的基本流程如下: 首先通过调查现生湖泊中介形类壳体中 M/Ca(M 指 Mg 和 Sr)比值与湖水的 M/Ca 比值确定现生介形类壳体的分配系数 $K_d[M]$; 与此同时需要调查研究现代湖水中的 M/Ca 比值与古环境指标(多指古盐度)的关系, 建立定量关系式。然后利用沉积物中的介形类壳体化石中的 M/Ca 比值和已经获得的分配系数 $K_d[M]$, 推算得出古湖水中的 M/Ca 比值, 代入 M/Ca 比值与古环境指标的关系式进行定量重建^[16]。依据以上原理, 在之后的二三十年里, 这种方法在很多地区广泛使用进行古环境的定量重建, 如牙买加的 Wallywash Great Pond^[32]、澳大利亚的中部 Frome 湖泊^[33]、意大利南部的西西里岛湖泊^[17]以及我国的内蒙古岱海^[11]、新疆博思腾湖^[34]。

随着研究的深入, 在利用介形类壳体微量元素进行古环境重建的过程中, 部分学者发现重建的结果与其他指标存在较大的偏差。如在云南鹤庆盆

地古环境研究中发现,当沉积物中有自生碳酸盐出现时,介形类壳体中的 Sr/Ca 比值不能很好地响应环境变化^[35]。在苏干湖的研究中发现,当介形类宿生水体内的 Mg/Ca > 40 时,壳体中的 Mg/Ca 比值较为复杂^[36]。利用介形类壳体微量元素重建古环境的影响因素较为复杂,许多学者通过室内培养和野外调查研究,具体影响因素见下文。

2 影响因素

根据介形类壳体微量元素重建古环境的原理,将其影响因素分为两类:影响介形类宿生水体内 Mg/Ca、Sr/Ca 比值的因素以及影响介形类壳体微量元素分配系数的因素。

2.1 宿生水体中 M/Ca 比值变化的影响因素

从上述原理可以看出,利用介形类重建古环境主要是通过壳体的 M/Ca 比值来推断或计算湖泊水体的 M/Ca 比值,进而推断环境变化。但在实际过程中有些影响因素可以造成湖泊的一些水文条件的变化并不能通过水体的 M/Ca 比值反映出来,或者介形类壳体的 M/Ca 比值变化并不是环境变化导致的。主要有以下因素:

2.1.1 季节变化

通过逐月采集北美大平原上湖泊中介形虫 (*Candona rawsoni*) 进行介壳种 Mg、Sr 含量测定,结果发现一年内的单个个体之间介壳 Mg、Sr 元素含量的变化竟然可以达到 35%,湖水中 Mg、Sr 浓度随着季节的变化直接导致了介壳中 Mg/Ca、Sr/Ca 比值随季节的变化^[37]。在对地中海地区一处湖沼研究时发现,水体的碱度、Ca²⁺浓度、Sr/Ca 和 Mg/Ca 比值均具有季节变化,变化幅度约为 10%,而且能体现在介形类壳体的微量元素组成信号上^[38]。因此,在利用介壳中 Mg/Ca、Sr/Ca 比值重建古环境时,同一层位上分散多采样品,避免由于季节变化造成的差异^[37]。近年来,由于技术的发展,在单壳上进行 Mg/Ca、Sr/Ca 比值测试得以实现,这种方法能够让我们更精确地分析介形类壳体上微量元素的分布^[39],但在重建古环境时 also 需要注意季节变化对单个个体的影响^[40]。

2.1.2 生存微环境差异

在进行云南鹤庆盆地的古环境恢复时,胡广等^[35]发现利用 *Ilyocypris microspinata* 和 *Lineocypris jiangsuensis* 两个属种的重建结果具有很好的协同性,但是二者之间存在稳定的差值,分析认为二者

生活水域的差异,水体微环境化学组成可能导致生活期间的壳体化学组成不同,以底栖方式生活的 *L. jiangsuensis* 的壳体中的 Mg/Ca、Sr/Ca 比值较 *I. microspinata* 的值高。

2.1.3 湖泊演化过程(矿物沉淀)

在重建湖水古盐度的过程中,会将恢复的水体的 M/Ca 比值与盐度联系起来,但是在许多湖泊演化过程中湖水的离子浓度和比值与盐度并不是简单的线性关系^[41](图 2),只有在特殊的环境下,如钙亏损的湖泊,水体中的 M/Ca 与盐度才具有正相关关系^[42]。如对地中海地区的一处湖沼进行逐月采样分析发现,介形虫 *Herpetocypris intermedia* 壳体中的 Sr/Ca 和 Mg/Ca 比值随着盐度的增加而降低^[38]。关于湖泊水体演化路径可以查阅文献^[43],湖泊演化过程对利用介形类重建古环境的影响在文献^[41]中做了详细的论述。当湖水咸化沉积物中出现文石沉淀时,水体中的 Sr/Ca 比值会急剧下降,导致介形类壳体中的 Sr/Ca 比值不能真实地反映湖泊环境变化^[35-36]。黏土矿物的沉淀,尤其是含 Mg 的蛭石和蒙脱石会选择性地吸收水体中的 Mg,使得水体中的 Mg 含量降低,也影响到重建结果^[44]。

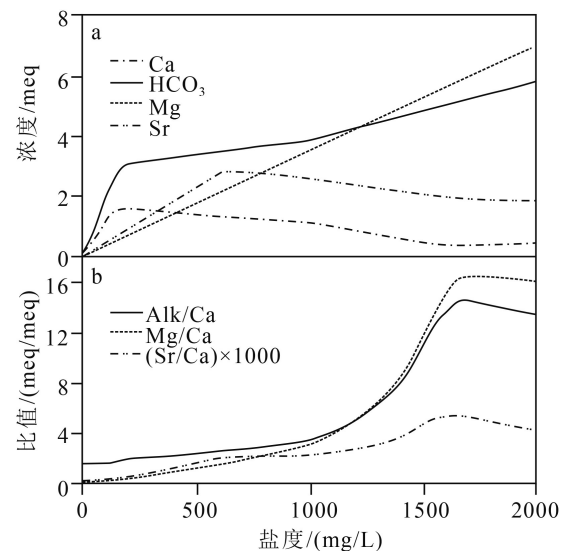


图 2 湖泊水体中离子浓度和比值与盐度关系

(据文献^[41]修改)

Fig.2 Ion concentration and ratio change with salinity in lake water (modified from reference^[41])

2.2 影响分配系数的因素

从利用介形类壳体微量元素定量重建古环境的原理和过程可以看出,分配系数是十分重要的。多数学者在根据现代湖泊调查或者室内培养实验得出分配系数后将其应用到古环境的定量重建^[11,17],

但在研究过程中发现介形类的微量元素分配系数并不是恒定的, 而是受其生存环境影响会发生变化, 影响因素主要有以下几种:

2.2.1 宿生水体中的 M/Ca 比值

在一定的范围内, 介形类壳体的 M/Ca 比值会随着宿生水体中的 M/Ca 比值增大, 这也是利用介形类重建古环境的基础, 但是当水体中的 M/Ca 比值过大或者过小的时候, 壳体的 $K_d[M]$ 会出现偏差。如随着水体中的 Mg/Ca 比值增加, 介形类壳体中的 Mg/Ca 比值增加的速度会减缓以至于不增加, 也就是 $K_d[M]$ 值会变小 (图 3a), 认为介形类在高镁水体中分泌形成低镁方解石壳体时, 壳体吸收的 Mg (和 Sr) 的量是有阈值的, 过多的 Mg 会造成介形类生理上的排斥^[26, 37]。Zhang 等^[36] 在利用介形类重建苏干湖古环境演化时, 发现当水体 Mg/Ca 比值 >45 时, *Eucypris inflata* 的 $K_d[Mg]$ 值为 0.000 3, 要比先前其他属种的研究中 $K_d[Mg]$ 值低一个数量级。当水体中 Mg/Ca 比值过低时 (<2), 介形类壳体 $K_d[Mg]$ 会随着水体中 Mg/Ca 比值的降低迅速增加 (图 3b), $K_d[Sr]$ 十分分散 (图 3c)。从晶体学和介形类壳体钙化过程的角度来说, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的离子半径相差较大, Mg 不能以完全类质同像的方式进入方解石壳体, 当水体中 Mg/Ca 较高时, 一般湖水的盐度也较大, 水体中的 Ca^{2+} 离子充足, 介形类在壳体生长过程中会更倾向于更易吸收的 Ca^{2+} , 导致壳体中的 Mg/Ca 比值偏低; 当水体中 Mg/Ca 比值较低时, 湖水盐度也较低, 两种离子的浓度均较低, 介形类为了形成新的壳体, 会将 Mg 以类质同像的方式吸收, 导致壳体中的 Mg/Ca 比值偏高^[35]。而介形类壳体 $K_d[Mg]$ 随着水体中 Mg/Ca 比值增加而降低是介形类自生在高 Mg 环境中在生理上对 Mg 的吸收能力和在低 Mg 环境中吸收 Mg 的热力学平衡之

前的一个权衡, 也就是说介形类会在尽量消耗低能量的情况下完成壳体的分泌、钙化^[45]。

2.2.2 温度

一定的温度、盐度范围内, 介形类壳体 $K_d[Mg]$ 值随着温度的升高而增加^[7, 23, 25-26, 47]。早期研究^[23] 发现, 在 11~25 °C 时, 温度每升高 1 °C, *Mytilocypris hericae* 壳体的 Mg/Ca 比值增加 0.0015, 导致壳体 Mg 的分配系数升高。Chivas 等^[21, 23] 在 1985 和 1986 年的论文中均认为介形类壳体 $K_d[Sr]$ 不受温度变化的影响, 但 De Deckker 等^[7] 通过介形类 *Cyprideis australiensis* 培养实验, 认为宿生水体的盐度并不影响壳体对 Mg、Sr 的吸收, 而温度不仅与壳体 $K_d[Mg]$ 具有正相关, 而且对 $K_d[Sr]$ 有一定的影响。Dettman 等^[9] 在总结前人资料的过程中, 将 Chivas 等^[21, 23] 的数据进行了整理, 发现在水化学条件相同的水体中, 壳体中的 Sr/Ca 比值是随着温度的升高而升高的, 因此, 他们认为温度对介形类壳体 $K_d[Sr]$ 虽然影响较小, 但还是有一定的影响 (图 4)。

2.2.3 碱度

Gouramanis 等^[45] 在对澳大利亚一系列的咸水、超咸水湖泊中现生介形类研究发现, 高碱度 (碳酸氢根离子活度) 对介形类壳体的 $K_d[Sr]$ 影响很大, 较高的碱度会导致 $K_d[Sr]$ 显著下降。

以上几种影响因素是通过直接影响介形类壳体的分配系数来影响古环境的重建, 这些影响因素最终是影响介形类壳体分泌、钙化过程中的生命-化学过程, 是利用介形类定量重建古环境的重要障碍, 只有通过足够多的现代过程研究, 充分了解不同环境下介形类壳体的分泌、钙化过程, 才能保证古环境重建结果的可靠性。值得一提的是, 以上有关影响因素和古环境重建过程中所用的介形类均是成体, 不同发育阶段的介形虫壳体中的微量元

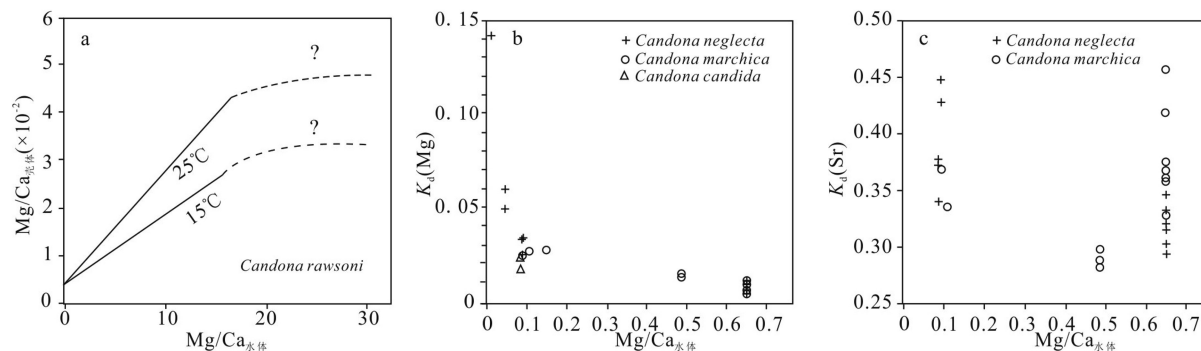


图 3 介形类壳体 Mg/Ca 比值、 $K_d[Mg]$ 与湖水 Mg/Ca 比值关系 (a 据文献^[37] 修改; b 和 c 据文献^[46] 修改)

Fig.3 The relationship between Mg/Ca ratio, $K_d[Mg]$ of shell and Mg/Ca ratio of lake water

(a modified from reference^[37]; b and c modified from reference^[46])

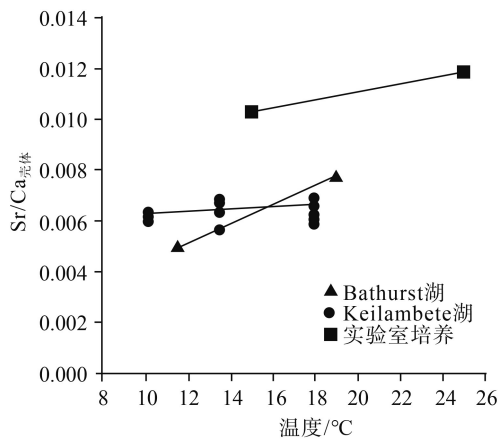


图4 介形类壳体 Sr/Ca 与温度的关系 (据文献 [9] 修改)
Fig.4 The relationship between Mg/Ca ratio and temperature (modified from reference[9])

素组成是不同的,一般发育早期的壳体中 Mg 的含量偏高 [22, 27, 48], 钙化程度较弱的壳体中的 Sr 含量偏低 [49]。

由于上述众多影响因素,介形类壳体的微量元素分配系数变化很大,即使是同一属种在不同的环境中也存在很大的差异。下面以我国西北和北方常见属种意外湖花介 (*Limnocythere inopinata*) 为例进行讨论,意外湖花介在我国西北和北方干旱、半干旱地区的现代湖泊和新生代地层中大量出现 [50-54], 该种的生活习性研究也较多 [4, 55-56]。在利用意外湖花介壳体 Sr/Ca 比值定量重建岱海古盐度的研究

中,根据现代壳体 Sr/Ca 比值和湖水 Sr/Ca 比值计算得出分配系数为 1.064 [11], 而日内瓦湖内的分配系数平均值为 0.306 [47], 澳大利亚湖泊中计算的现代湖花介属 Sr 的分配系数为 0.35 [22]。前人分别研究了日内瓦湖泊 [47] 和蒙古国西部湖泊 [42] 的意外湖花介在内的介形类壳体的地球化学与水体化学参数的关系,本文将涉及意外湖花介壳体微量元素组成与水体中 M/Ca 比值的数据重新整理,得到分配系数与水体 M/Ca 比值的关系如图 5。由图 5 可以看出, *L. inopinata* 壳体的 K_d [M] 随着宿生水体的 M/Ca 变化较大,尤其是在 M/Ca 较低的水体中,还存在其他的影响因素,甚至这种影响因素占到了主导地位。介形虫壳体中的 Mg 和 Sr 具体在壳体方解石中的哪个位置,对于壳体的形成有什么作用还不很清楚。在矿物方解石的形成过程中, Mg 十分重要,具有动力学和热力学上的控制作用 [57-58]。因此,介形类壳体中的 Mg 和 Sr 的含量可能存在生物学和/或矿物结晶学方面的控制因素,但目前还不是很清楚。

3 存在问题及展望

经过几十年的发展和完善,利用介形类壳体的微量元素进行古环境重建取得了很大的进展,但也存在着一些问题:

不同学者在对介形类壳体中微量元素的影响

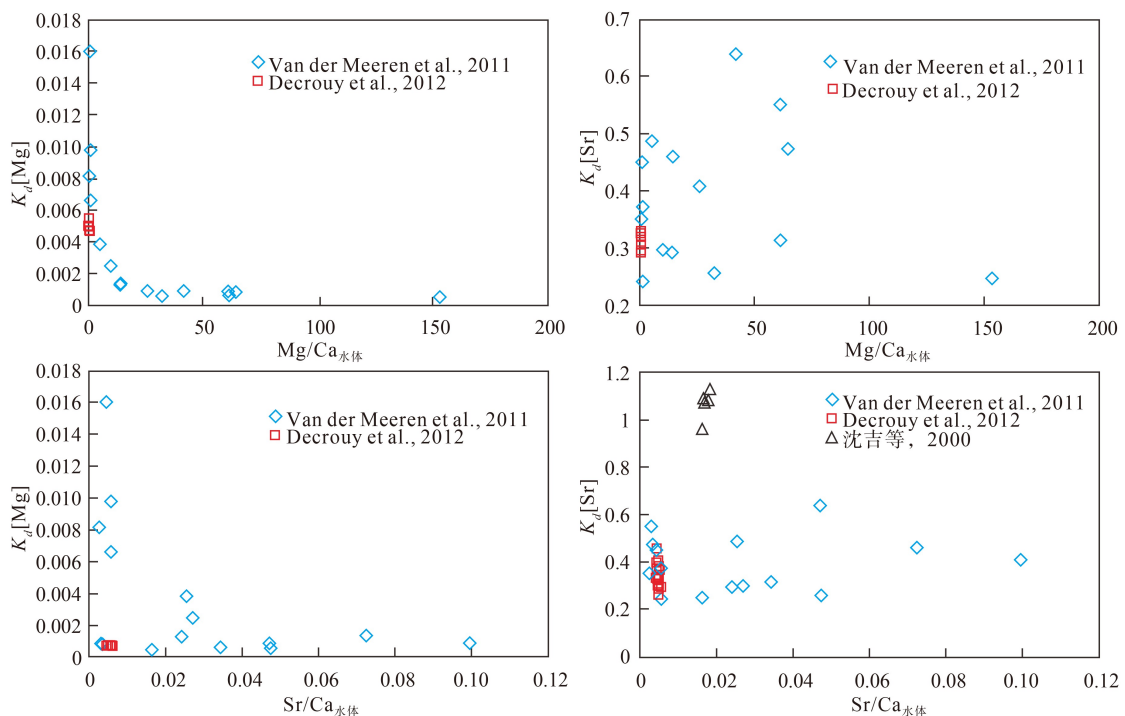


图5 意外湖花介壳体 K_d [M] 与水体中 M/Ca 比值关系 (数据来源于文献 [11, 42, 47])

Fig.5 The relationship between K_d [M] of *Limnocythere inopinata* shell and M/Ca ratio of lake water (data from reference [11, 42, 47])

因素研究得到了一些相矛盾的结论,如一些学者认为温度对介形类壳体中的Mg/Ca比值影响很大^[25,41],而另一些学者认为温度对壳体中Mg的含量几乎没有任何影响^[59],这可能是由于不同属种的介形虫具有不同的生活习性,有些属种属于浮游类,有些属种属于底栖类,其壳体的元素组成代表了不同的水体微环境信息;有些生命周期几周至几个月,有些能够存活一两年,其壳体的元素组成代表了不同季节或者不同时间的水体信息^[9]。

在定量重建过程中,多数学者在一套沉积物序列中使用一个固定的分配系数,如上文所述,介形类壳体的微量元素分配系数并不是恒定的,即使是同一属种在不同的环境下变化也很大。一些研究中定量重建研究时间跨度上千年甚至上万年,沉积环境复杂多变,利用同一个分配系数进行定量重建难免会增大误差。介形类生存水域广阔,属种繁多,是重建古环境的良好材料,但生存环境和属种的多样也给重建工作带来了复杂性,如上述两个问题。建议在以后的研究工作中加强现代过程的研究,对于不同属种的介形虫应在生活习性和壳体微量元素组成的影响因素两个方面加强现代过程研究。

经过30余年的发展,湖相介形类壳体微量元素组成及比值已然成为了重建古环境的重要指标。随着测试技术的发展,现在已经能够对壳体的不同区域和同一位置不同厚度进行元素测试^[39-40],这对以后更加精细地重建古环境提供了基础。另外,除了常用的Mg/Ca、Sr/Ca比值,湖相介形类壳体Gd/Ca和Mn/Ca^[10]、Ba/Ca和U/Ca等^[40]、Li/Ca和Mg/Li^[60-61]、Na/Ca^[62]也更多地在古环境研究中使用。随着技术的提高和研究的深入,湖相介形类壳体微量元素组成会有更加广泛的应用。

参考文献 (References)

- [1] 郝诒纯, 茅绍智. 微体古生物学教程[M]. 2版. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 44-67. [HAO Yichun, MAO Shaozhi. A Course in Micropalaeontology[M]. 2nd ed. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 44-67.]
- [2] 禹娜. 中国非海水介形类[M]. 上海: 上海教育出版社, 2014: 1-25. [YU Na. Non-marine Ostracoda from China[M]. Shanghai: Shanghai Education Publishing House, 2014: 1-25.]
- [3] Meisch C. Freshwater Ostracoda of western and Central Europe[M]//Schwoerbel J, Zwick P. Süßwasserfauna von Mitteleuropa 8/3. Heidelberg, Berlin, 2000: 522.
- [4] Zhai D Y, Xiao J L, Fan J W, et al. Spatial heterogeneity of the population age structure of the ostracode *Limnocythere inopinata* in Hulun Lake, Inner Mongolia and its implications [J]. *Hydrobiologia*, 2013, 716(1): 29-46.
- [5] Turpen J B, Angell R W. Aspects of molting and calcification in the ostracod *Heterocypris* [J]. *Biological Bulletin*, 1971, 140(2): 331-338.
- [6] Roca J R, Wansard G. Temperature influence on development and calcification of *Herpetocypris brevicaudata* Kaufmann, 1900(Crustacea: Ostracoda) under experimental conditions [J]. *Hydrobiologia*, 1997, 347(1-3): 91-95.
- [7] De Deckker P, Chivas A R, Shelley J M G. Uptake of Mg and Sr in the euryhaline ostracod *Cyprideis* determined from in vitro experiments [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 148(1-3): 105-116.
- [8] Holmes J A, De Deckker P. Chapter 8-The chemical composition of ostracod shells: Applications in quaternary palaeoclimatology [J]. *Developments in Quaternary Sciences*, 2012, 17: 131-143.
- [9] Dettman D L, Dwyer G S. Chapter 9- The calibration of environmental controls on elemental ratios in ostracod shell calcite: A critical assessment [J]. *Developments in Quaternary Sciences*, 2012, 17: 145-163.
- [10] Börner N, De Baere B, Yang Q C, et al. Ostracod shell chemistry as proxy for paleoenvironmental change [J]. *Quaternary International*, 2013, 313-314: 17-37.
- [11] 沈吉, 王苏民, Matsumoto R, 等. 内蒙古岱海古盐度定量复原初探 [J]. *科学通报*, 2000, 45(17): 1885-1889. [SHEN Ji, WANG Sumin, Matsumoto R, et al. A preliminary study on palaeosalinity recovery in Daihai, Inner Mongolia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(17): 1885-1889.]
- [12] 张恩楼, 沈吉, 王苏民, 等. 近0.9 ka来青海湖湖水盐度的定量恢复 [J]. *科学通报*, 2004, 49(7): 730-734. [ZHANG Enlou, SHEN Ji, WANG Sumin, et al. Quantitative reconstruction of the paleosalinity at Qinghai Lake in the past 900 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(7): 730-734.]
- [13] 杨红梅. 青藏高原通天河盆地五道梁组介形虫壳体Mg/Ca和Sr/Ca地球化学特征及古环境意义 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(3): 311-319. [YANG Hongmei. The Palaeolimnological record from Northern Tibet based on trace element chemistry of ostracod shells and the paleoenvironment implication in Tongtianhe basin, Tibet, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2009, 36(3): 311-319.]
- [14] Kober B, Schwalb A, Schettler G, et al. Constraints on paleowater dissolved loads and on catchment weathering over the past 16 ka from ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios and Ca/Mg/Sr chemistry of freshwater ostracode tests in sediments of Lake Constance, Central Europe [J]. *Chemical Geology*, 2007, 240(3-4): 361-376.
- [15] Zhai D Y, Xiao J L, Zhou L, et al. Holocene East Asian monsoon variation inferred from species assemblage and shell chemistry of the ostracodes from Hulun Lake, Inner Mongolia [J]. *Quaternary Research*, 2011, 75(3): 512-522.
- [16] Holmes J A. Trace-element and stable-isotope geochemistry of non-marine ostracod shells in Quaternary palaeoenvironmental reconstruction [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1996, 15(3): 223-235.

- [17] Curry B, Henne P D, Mezquita-Joanes F, et al. Holocene paleoclimate inferred from salinity histories of adjacent lakes in southwestern Sicily (Italy) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 150: 67-83.
- [18] Lev L, Stein M, Ito E, et al. Sedimentary, geochemical and hydrological history of Lake Kinneret during the past 28 000 years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 209: 114-128.
- [19] Jin Z D, Bickle M J, Chapman H J, et al. Ostracod Mg/Sr/Ca and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ geochemistry from Tibetan lake sediments: Implications for early to mid-Pleistocene Indian monsoon and catchment weathering [J]. *Boreas*, 2011, 40 (2): 320-331.
- [20] Chivas A R, De Deckker P, Shelly J M G. Magnesium, Strontium and barium partitioning in nonmarine ostracode shells and their use in paleoenvironmental reconstructions - a preliminary study [M]// Maddocks R F. Applications of Ostracoda. Houston: University Houston Geosciences, 1983: 238-249.
- [21] Chivas A R, De Dekker P, Shelley J M G. Strontium content of ostracods indicates lacustrine palaeosalinity [J]. *Nature*, 1985, 316(6025): 251-253.
- [22] Chivas A R, De Deckker P, Shelley J M G. Magnesium and strontium in non-marine ostracod shells as indicators of palaeosalinity and palaeotemperature [J]. *Hydrobiologia*, 1986, 143 (1): 135-142.
- [23] Chivas A R, De Deckker P, Shelley J M G. Magnesium content of non-marine ostracod shells: A new palaeosalinometer and palaeothermometer [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 54 (1-4): 43-61.
- [24] De Deckker P, Chivas A R, Shelley J M G, et al. Ostracod shell chemistry: A new palaeoenvironmental indicator applied to a regressive/transgressive record from the gulf of Carpentaria, Australia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1988, 66 (3-4): 231-241.
- [25] Engstrom D R, Nelson S R. Paleosalinity from trace metals in fossil ostracodes compared with observational records at Devils Lake, North Dakota, USA [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1991, 83 (4): 295-312.
- [26] Xia J, Ito E, Engstrom D R. Geochemistry of ostracode calcite: Part 1. An experimental determination of oxygen isotope fractionation [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (2): 377-382.
- [27] Palacios-Fest M R, Dettman D L. Temperature controls monthly variation in Ostracode valve Mg/Ca: *Cypridopsis vidua* from a small lake in Sonora, Mexico [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65 (15): 2499-2507.
- [28] 夏娟娟. 湖相介形虫壳的稳定同位素和微量元素在古气候研究中的应用 [J]. *第四纪研究*, 1997, 16 (4): 345-352. [XIA Juanjuan. Stable-isotope and trace-element composition on ostracode shells and their application to paleoclimatic reconstruction [J]. *Quaternary Sciences*, 1997, 16 (4): 345-352.]
- [29] Wansard G. Quantification of paleotemperature changes during isotopic stage 2 in the La Draga continental sequence (NE Spain) based on the Mg/Ca ratio of freshwater ostracods [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1996, 15 (2-3): 237-245.
- [30] Dwyer G S, Cronin T M, Baker P A, et al. North Atlantic deepwater temperature change during Late Pliocene and Late Quaternary climatic cycles [J]. *Science*, 1995, 270 (5240): 1347-1351.
- [31] Cronin T M, Dwyer G S, Baker P A, et al. Orbital and suborbital variability in North Atlantic bottom water temperature obtained from deep-sea ostracod Mg/Ca ratios [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 162 (1-2): 45-57.
- [32] Holmes J A, Street-Perrott F A, Ivanovich M, et al. A late Quaternary palaeolimnological record from Jamaica based on trace-element chemistry of ostracod shells [J]. *Chemical Geology*, 1995, 124 (1-2): 143-160.
- [33] De Deckker P, Magee J W, Shelley J M G. Late Quaternary palaeohydrological changes in the large playa Lake Frome in central Australia, recorded from the Mg/Ca and Sr/Ca in ostracod valves and biotic remains [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75 (1): 38-50.
- [34] Mischke S, Wünnemann B. The Holocene salinity history of Bosten Lake (Xinjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and shell chemistry: Possible palaeoclimatic implications [J]. *Quaternary International*, 2006, 154-155: 100-112.
- [35] 胡广, 金章东, 张飞. 利用介形类壳体Sr, Mg重建古环境受自生碳酸盐矿物的限制及机理探讨 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2008, 51 (5): 654-664. [HU Guang, JIN Zhangdong, ZHANG Fei. Constraints of authigenic carbonates on trace elements (Sr, Mg) of lacustrine ostracod shells in paleoenvironment reconstruction and its mechanism [J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 2008, 51 (5): 654-664.]
- [36] Zhang J W, Holmes J A, Chen F H, et al. An 850-year ostracod-shell trace-element record from Sugan Lake, northern Tibetan Plateau, China: Implications for interpreting the shell chemistry in high-Mg/Ca waters [J]. *Quaternary International*, 2009, 194 (1-2): 119-133.
- [37] Xia J, Engstrom D R, Ito E. Geochemistry of ostracode calcite: Part 2. The effects of water chemistry and seasonal temperature variation on *Candona rawsoni* [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (2): 383-391.
- [38] Wansard G, Mezquita F. The response of ostracod shell chemistry to seasonal change in a Mediterranean freshwater spring environment [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25 (1): 9-16.
- [39] De Deckker P. Trace elemental distribution in ostracod valves. From solution ICPMS and laser ablation ICPMS to microprobe mapping: a tribute to Rick Forester [J]. *Hydrobiologia*, 2017, 786 (1): 23-39.
- [40] Yang Q C, Jochum K P, Stoll B, et al. Trace element variability in single ostracod valves as a proxy for hydrochemical change in Nam Co, central Tibet, during the Holocene [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 399: 225-235.
- [41] Ito E, Forester R M. Changes in continental ostracode shell chemistry: uncertainty of cause [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 620 (1): 1-15.
- [42] Van der Meeren T, Ito E, Verschuren D, et al. Valve chemistry of *Limnocythere inopinata* (Ostracoda) in a cold arid environment - Implications for paleolimnological interpretation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 306 (3-4): 116-126.
- [43] Eugster H P, Jones B F. Behavior of major solutes during closed-basin brine evolution [J]. *American Journal of Science*, 1979, 279 (6): 609-631.
- [44] 李军, 余俊清. 湖相介形类壳体地球化学在环境变化研究中的应用

- 与进展[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(4): 367-375. [LI Jun, YU Junqing. Lacustrine ostracodes as environmental change indicators: application and advance [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(4): 367-375.]
- [45] Gouramanis C, De Deckker P. Alkalinity control on the partition coefficients in lacustrine ostracodes from Australia [J]. *Geology*, 2010, 38(4): 359-362.
- [46] Wansard G, De Deckker P, Julià R. Variability in ostracod partition coefficients $D(\text{Sr})$ and $D(\text{Mg})$: Implications for lacustrine palaeoenvironmental reconstructions [J]. *Chemical Geology*, 1998, 146(1-2): 39-54.
- [47] Decrouy L, Vennemann T W, Ariztegui D. Mg/Ca and Sr/Ca of ostracod valves from living species of Lake Geneva [J]. *Chemical Geology*, 2012, 314-317: 45-56.
- [48] 赵泉鸿, 戴中宁, 任焯刚, 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. The experiment about relations between Mg/Ca ratios and temperature or salinity in the ostracode shell [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(15): 1409-1412.]
- [49] Wansard G, Roca J R, Mezquita F. Experimental determination of strontium and magnesium partitioning in calcite of the freshwater ostracod *Herpetocypris intermedia* [J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 1999, 145(2): 237-253.
- [50] 杨藩, 董宁, 乔子真, 等. 青海柴达木盆地与青海湖第四纪介形类 *Limnocythere* 的分类与生境[J]. *微体古生物学报*, 2008, 25(4): 316-332. [YANG Fan, DONG Ning, QIAO Zhizhen, et al. Taxonomy and habitat of Quaternary *Limnocythere* (ostracoda) from the Qaidam Basin and the Qinghaihu Lake, Qinghai [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2008, 25(4): 316-332.]
- [51] 庞其清, 翟大有, 赵筑簾, 等. 泥河湾盆地晚新生代微体古生物地层及环境演化的探讨[J]. *地质学报*, 2015, 89(5): 817-842. [PANG Qiqing, ZHAI Dayou, ZHAO Zhulian, et al. Late Cenozoic micropalaeontology in the Nihewan Basin and its implications for environmental evolution [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(5): 817-842.]
- [52] Li X Z, Liu W G, Zhang L, et al. Distribution of Recent ostracod species in the Lake Qinghai area in northwestern China and its ecological significance [J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(4): 880-890.
- [53] Zhai D Y, Xiao J L, Fan J W, et al. Differential transport and preservation of the instars of *Limnocythere inopinata* (Crustacea, Ostracoda) in three large brackish lakes in northern China [J]. *Hydrobiologia*, 2015, 747(1): 1-18.
- [54] Zhang W Y, Mischke S, Zhang C J, et al. Ostracod distribution and habitat relationships in the Kunlun Mountains, northern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*, 2013, 313-314: 38-46.
- [55] 李燕, 金章东. 青海湖介形虫壳体丰度与氧碳同位素的季节和年际变化及其控制因素——来自沉积物捕获器的研究[J]. *地球环境学报*, 2013, 4(3): 1328-1337. [LI Yan, JIN Zhangdong. Seasonal and interannual variations in abundance and oxygen-carbon isotopic compositions of ostracod shells from Lake Qinghai and their controlling factors: A case study on the sediment trap [J]. *Journal of Earth Environment*, 2013, 4(3): 1328-1337.]
- [56] von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Trumborn P. Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 148(1-3): 133-152.
- [57] Davis K J, Dove P M, De Yoreo J J. The role of Mg^{2+} as an impurity in calcite growth [J]. *Science*, 2000, 290(5494): 1134-1137.
- [58] Stephenson A E, De Yoreo J J, Wu L, et al. Peptides enhance magnesium signature in calcite: insights into origins of vital effects [J]. *Science*, 2008, 322(5902): 724-727.
- [59] Teeter J W, Quick T J. Magnesium-salinity relation in the saline lake ostracode *Cyprideis americana* [J]. *Geology*, 1990, 18(3): 220-222.
- [60] 朱正杰, 李航, 任世聪, 等. 青海湖近800年来沉积物介形虫Li/Ca比值的古环境指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 115-121. [ZHU Zhengjie, LI Hang, REN Shicong, et al. Palaeoenvironmental implications of Li/Ca ratios of ostracod shells from Lake Qinghai During the past 800 years [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 115-121.]
- [61] Zhu Z J, Xiang Y, Li Y J. A 1000-year record of Mg/Li and Li/Ca ratios of ostracod shells in Lake Qinghai, NE Tibetan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(S1): 39-40.
- [62] Gouramanis C, Wilkins D, De Deckker P. 6000 years of environmental changes recorded in Blue Lake, South Australia, based on ostracod ecology and valve chemistry [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 297(1): 223-237.