

## 青藏高原湖泊 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $Mg/Ca$ 盐度指示意义的初步分析\*

王海雷<sup>1,2,3</sup>, 王云生<sup>1,2,3</sup>

(1:中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

(2:国土资源部盐湖资源与环境重点实验室,北京 100037)

(3:中国地质科学院盐湖与热水研究发展中心,北京 100037)

**摘要:** 总结了青藏高原地区 400 多个湖泊湖水的  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Mg/Ca$  等水化指标与湖水盐度的相关关系,以及这种关系随着湖水变化(不同采样时间和采样点以及自然蒸发)而产生的变化规律。结果表明:青藏高原湖泊湖水的  $Mg^{2+}$  浓度与盐度具有较为稳定的正相关关系,而  $Ca^{2+}$  和  $Mg/Ca$  与盐度的相关性较弱。在对于某一特定水化学类型的湖泊,一般碳酸盐型湖泊的  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  等指标与盐度均没有明显的关系;硫酸盐型湖泊中  $Mg^{2+}$  浓度和盐度呈现较高的正相关关系,而  $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关性仍很弱;而在氯化物型湖泊中,  $Mg^{2+}$  浓度与盐度呈更高的正相关性,  $Ca^{2+}$  浓度也与盐度呈一定的正相关性,  $Mg/Ca$  这一指标与盐度的相关性依然很弱。而对某一特定湖泊,在不同演化阶段或不同的采样地点,  $Mg^{2+}$  浓度与盐度仍然保持明显的正相关关系,而  $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关性仍然不稳定或很弱。在青藏高原作古环境重建应用的时候,湖水  $Mg^{2+}$  浓度是古盐度一个较好的转换指标,而  $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  的古盐度指示意义相对较弱。

**关键词:** 青藏高原; 湖泊;  $Mg^{2+}$ ;  $Ca^{2+}$ ;  $Mg/Ca$ ; 盐度; 相关性

### Preliminary analysis on $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$ and $Mg/Ca$ as salinity indicators of lakes in the Qinghai-Tibetan Plateau

WANG Hailei<sup>1,2,3</sup> & WANG Yunsheng<sup>1,2,3</sup>

(1: Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS), Beijing 100037, P. R. China)

(2: Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, P. R. China)

(3: R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposits, CAGS, Beijing 100037, P. R. China)

**Abstract:** This paper summarizes the relationships between hydrochemical proxies of  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg/Ca$  and the salinity from more than four hundred lakes in the Qinghai-Tibetan Plateau. We discuss its variation characteristics by different samples from varied place and time, as well as natural evaporation.  $Mg^{2+}$  shows a stable positive relationship with salinity in lakes in the Qinghai-Tibetan Plateau, while  $Ca^{2+}$ ,  $Mg/Ca$  show poor and unstable relationships with salinity. For carbonate water types in the lakes, however, no significant relationship is observed between  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  and  $Mg/Ca$  and salinity in carbonate typed lakes.  $Mg^{2+}$  shows positive relationship with salinity in sulphate typed lakes, and  $Ca^{2+}$ ,  $Mg/Ca$  remains poor relationship with salinity. While in chloride typed lakes,  $Mg^{2+}$  shows distinct positive relationship with salinity, and  $Ca^{2+}$  also shows positive relationship to some extent with salinity.  $Mg/Ca$  still shows no clear relationship with salinity. In individual lakes,  $Ca^{2+}$  and  $Mg/Ca$  still show unstable and/or poor relationship with salinity, while  $Mg^{2+}$  keeps remarkable positive relationship with salinity. It is concluded that  $Mg^{2+}$  is a useful indicator for paleosalinity reconstruction in the Qinghai-Tibetan Plateau.

**Keywords:** Qinghai-Tibetan Plateau; lakes;  $Mg^{2+}$ ;  $Ca^{2+}$ ;  $Mg/Ca$ ; salinity; relationship

古气候、古环境研究的发展趋势是由定性研究逐渐向定量研究转变,但目前由于缺少可靠的古气候定量转换指标,常常需要有几种转换指标来相互印证,并且这种印证有时候也是相互矛盾的。目前比较成熟的转换指标如基于沉积物中自生碳酸盐的碳氧同位素,取得了较为广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。但是由于影响湖泊沉积同位素组成的因素比较复杂,因而在分析其指示的古环境意义时仍有一定的困难。

\* 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K2007-3-2, K0918)、中国地质科学院重点实验室专项基金项目(K0915)、国家自然科学基金重点项目(40531002)和国家地质大调查项目(1212010818057)联合资助。  
2010-03-31 收稿; 2010-08-25 收修改稿。王海雷,男,副研究员; E-mail: whailei@sohu.com.

Chivas 等<sup>[5-7]</sup>利用室内培养和野外调查采样相结合的方法,较为系统地研究了介形虫壳体微量元素与其缩生水体元素含量的相关关系,结果表明介形虫壳体微量元素( $Mg/Ca$ , $Sr/Ca$ )与缩生水体的水化学( $Mg/Ca$ , $Sr/Ca$ )及盐度有很大的相关关系,提出了壳体微量元素的分布系数; $K_d(M) = (M/Ca)_{\text{介形类}} / (M/Ca)_{\text{湖水}}$ ,并通过大量的统计分析和室内实验,认为在同样的温度和盐度条件下,相同或相似的种有相近的分布系数,分布系数与形成时的温度和盐度呈一定的相关关系,这为利用介形虫壳体定量恢复古环境提供了广阔的前景<sup>[8-9]</sup>。国内学者利用这种关系开展了一些古盐度重建的尝试,在一定范围内定量地恢复了湖水的古盐度<sup>[10-11]</sup>。但是,这种定量恢复,是建立在假定湖水  $Mg/Ca$  和  $Sr/Ca$  与盐度呈正相关关系的基础上的。Engstrom<sup>[12]</sup>和 Williams<sup>[13]</sup>等发现,当湖水  $Ca^{2+}$  在矿物结晶沉积达到平衡后,湖水的盐度和  $Mg/Ca$  及  $Sr/Ca$  确实存在一定的正相关关系。但是 Homes<sup>[14]</sup>后来的研究表明,在湖相沉积系统中这种关系是不稳定的,利用这种关系时须谨慎。

本文总结了盐湖中心 20 世纪 80 年代以来数次青藏高原湖泊调查取得的大量湖泊水化学数据,以及郑绵平等<sup>[4]</sup>、陈敬清等<sup>[15]</sup>、郑喜玉等<sup>[16]</sup>和高世扬等<sup>[17]</sup>的专著中给出的一些湖泊水化学数据,并结合青藏高原几个盐湖卤水的天然蒸发实验数据,分析了青藏高原湖泊湖水  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关关系,为正确认识  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Mg/Ca$  等指标的盐度指示意义,提供一定的理论基础。

## 1 各类型湖泊的 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 以及 $Mg/Ca$ 与盐度的相关性

为了检验  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  在广泛意义上与盐度的相关关系,本文收集了青藏高原包括藏南、藏北、藏东和青海柴达木盆地几乎所有区域,以及各种水化学类型的湖泊湖水盐度、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  等数据,首先对湖泊不进行任何分类,将所有类型的湖泊水化学数据一起分析,  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  等指标与盐度的相关关系可以看出,在青藏高原地区,未分湖泊水化学类型的情况下,  $Ca^{2+}$  和  $Mg/Ca$  与盐度的相关性均很弱,相关系数分别为 0.236 和 0.149。而  $Mg^{2+}$  浓度则与盐度呈现一定的正相关关系,相关系数为 0.563(图 1a)。

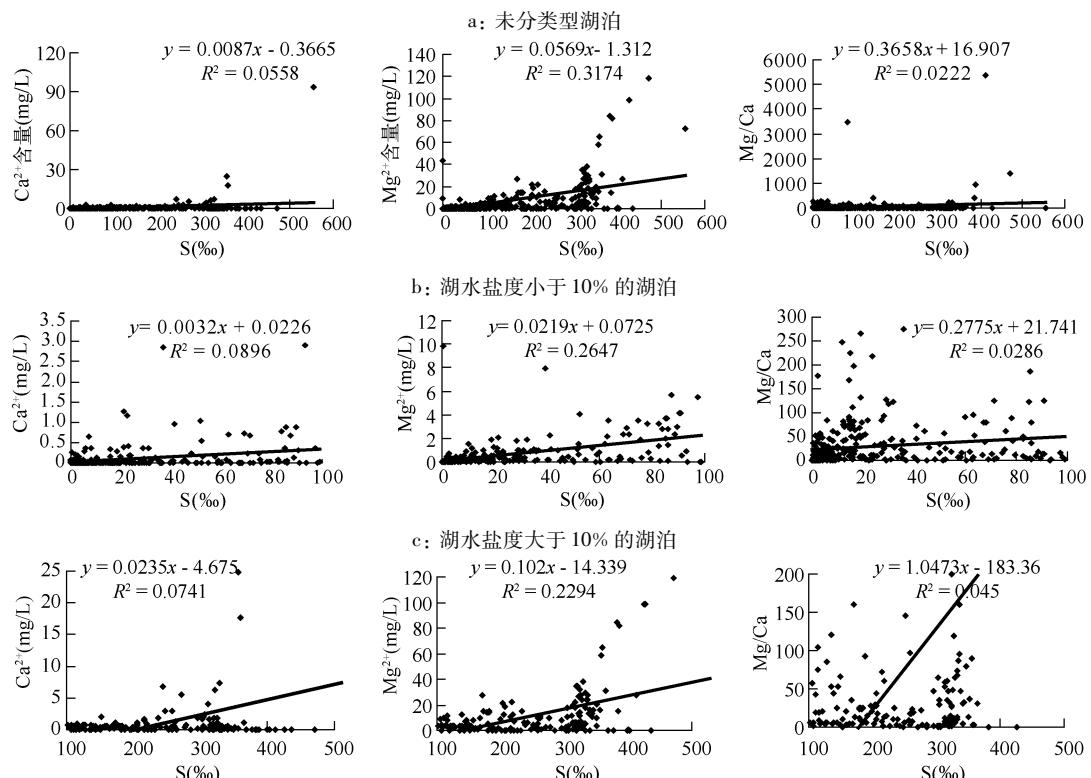


图 1 未分类型湖泊(a)、湖水盐度小于 10% (b)、湖水盐度大于 10% (c)  
湖泊的  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关关系

Fig. 1 Relationship between  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mg/Ca$  and salinity in non-classified lakes(a), in lakes with salinity lower than 10% (b) and in lakes with salinity higher than 10% (c)

有些学者<sup>[18]</sup>认为在盐度小于10%的时候,  $Mg^{2+}$ 与盐度有很好的正相关性,而在盐度超过10%时,则相关性较弱,并且10%也是绝大多数介形虫的生存极限,本文又分别分析了盐度小于10%和大于10%情况下  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关性(图1b、图1c).无论湖水盐度小于还是大于10%,  $Ca^{2+}$  和  $Mg/Ca$  与盐度的相关性均很弱,相关系数分别为盐度小于10%时的0.299和0.169以及盐度大于10%时的0.272和0.212,而  $Mg^{2+}$  与盐度无论是在湖水盐度小于10%还是在大于10%的时候都呈现一定的正相关性,相关系数分别为0.514和0.479,在盐度小于10%的湖水中  $Mg^{2+}$  与盐度具有更高的相关性.

为更好地研究湖泊不同沉积阶段  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关关系,本文将各湖泊按水化学类型分类,分别为碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型湖泊,碳酸盐型湖泊的  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关性均很弱,相关系数低于0.2(图2a).而硫酸盐型湖泊中,  $Mg^{2+}$  与盐度呈一定的正相关关系,相关系数为0.584,而  $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关性仍很弱,相关系数分别仅0.281和0.181(图2b).氯化物型湖泊中,  $Mg^{2+}$  与盐度呈更强的正相关关系,相关系数达0.626,  $Ca^{2+}$  与盐度也呈一定的正相关关系,相关系数为0.559,而  $Mg/Ca$  与盐度的相关性依然很弱,仅为0.048(图2c).

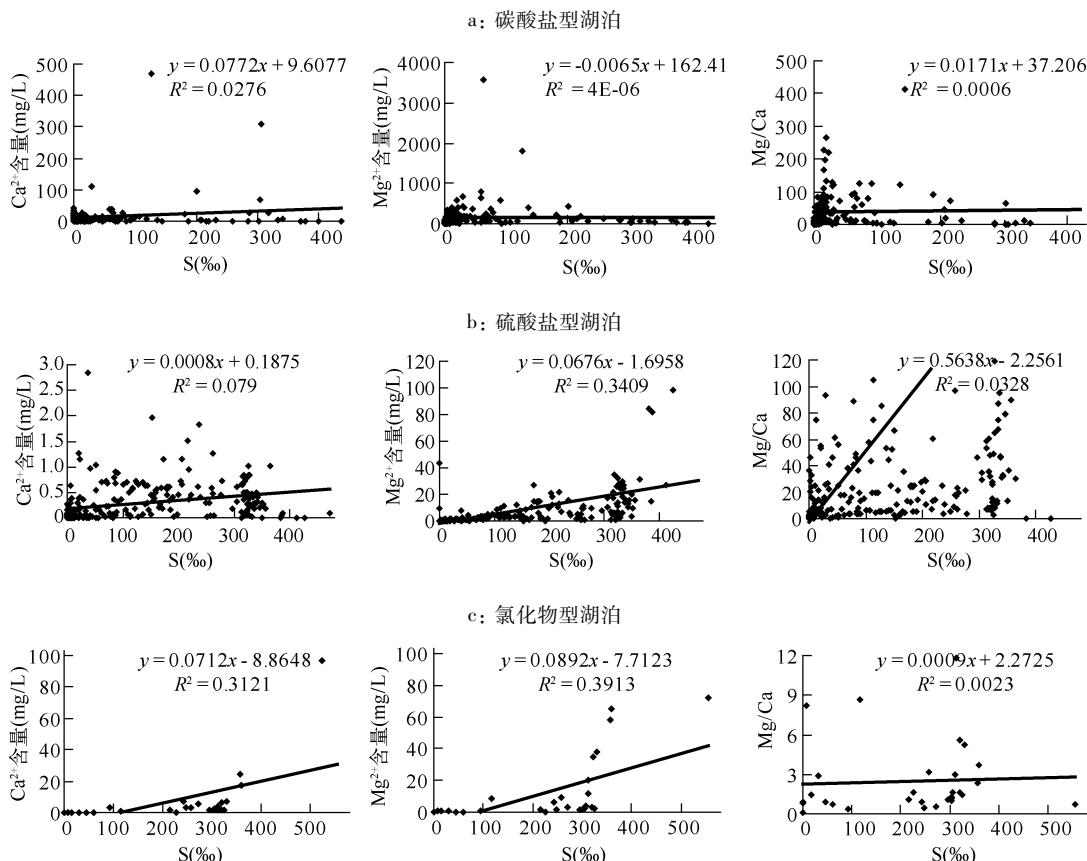


图2 碳酸盐型湖泊(a)、硫酸盐型湖泊(b)、氯化物型湖泊(c)  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关关系

Fig. 2 Relationship between  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mg/Ca$  and salinity in carbonate type lakes (a), in sulphate type lakes (b) and in chloride type lakes (c)

## 2 湖泊不同演化阶段和不同采样点 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 以及 $Mg/Ca$ 与盐度的相关性

在湖泊古环境演变应用方面,往往要考虑某一特定的湖泊在不同的演化阶段  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  等指标的盐度指示意义.本文分析了同一个湖泊不同采样时间和不同采样地点的数据(如图3),  $Mg/Ca$  与盐

度的相关性很不稳定,在某些湖泊中呈现较强的正相关(图3Ca),但在某些湖泊中甚至呈现弱的负相关(图3Cb,图3Cd).  $Ca^{2+}$ 与盐度呈现较为稳定的正相关关系,但是相关性相对较弱,相关系数最高的为0.688(图3Ac),最低的仅0.381(图3Ab).而  $Mg^{2+}$ 与盐度呈现了相对稳定的较强的正相关关系,最低的为0.624(图3Bb),最高的达0.972(图3Ba).对于某些封闭湖盆而言,其演化过程中没有物质和能量的输入和输出,其演化环境接近于天然蒸发.因此本文又分析了同一个湖泊湖水在天然蒸发过程中  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的变化规律(图4),结果显示,  $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度相关关系均不稳定,甚至呈现弱的负相关,达布逊盐湖卤水<sup>[15]</sup>天然蒸发过程中甚至出现了  $Ca^{2+}$  与盐度呈显著的负相关关系(图4Ab),相关系数达0.962.而  $Mg^{2+}$  与盐度则仍然呈现稳定的正相关关系,相关系数分别为0.727和0.985.

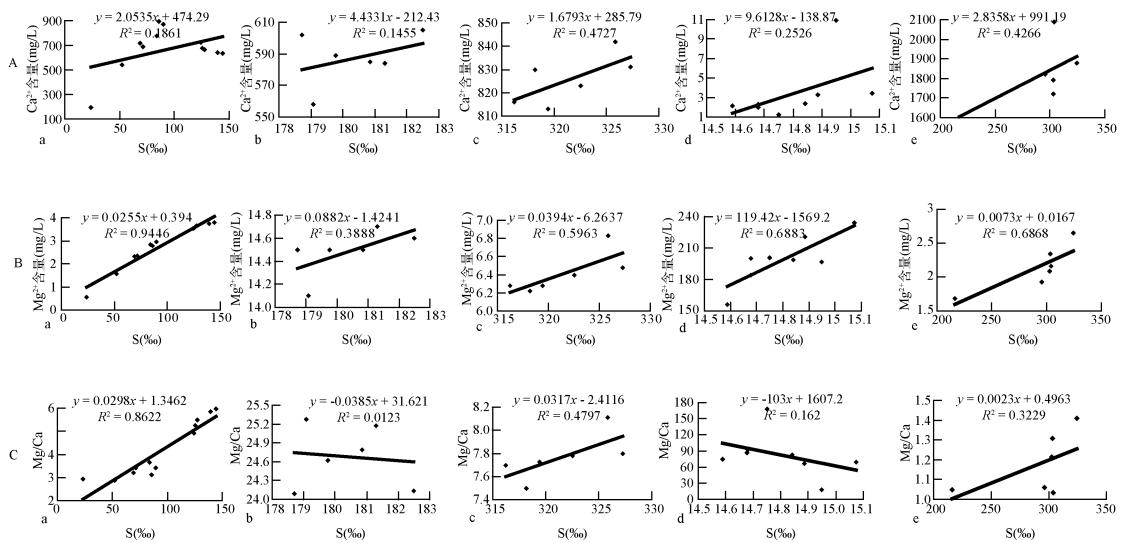


图3 单个湖泊  $Ca^{2+}$  (A)、 $Mg^{2+}$  (B)、 $Mg/Ca$  (C) 与盐度的相关关系 (a,b,c,d,e 表示不同的湖泊)

Fig. 3 Relationship between  $Ca^{2+}$  (A),  $Mg^{2+}$  (B),  $Mg/Ca$  (C) and salinity in single lakes (a, b, c, d, e represent for different lakes respectively)

### 3 讨论与结论

一般认为在  $Ca^{2+}$  达到沉积平衡后,  $Mg/Ca$ 、 $Sr/Ca$  随着水体浓缩、盐度升高而逐渐增大,两者呈一定的正相关关系<sup>[12-13]</sup>,据此进行了一系列古盐度重建的尝试<sup>[7-11,18]</sup>. Chivas 等<sup>[18]</sup>研究澳大利亚绝大部分已发表的大陆湖泊数据后认为,在湖水盐度小于10%时,  $Mg^{2+}$  浓度与盐度呈现较高的正相关性,而在盐度大于10%时,则相关性较弱.因为澳大利亚大部分大陆湖泊几乎均为  $NaCl-SO_4^{2-}-HCO_3^-$  体系,它们具有相同的化学演化途径<sup>[19]</sup>.

事实上,  $Mg$ 、 $Ca$  等在卤水体系中的沉积沉淀是一个相当复杂的过程,与湖泊的演化也有着密切的联系.在演化过程中物质来源以及物质组成均对卤水中  $Mg$ 、 $Ca$  的浓度产生重要的影响.湖泊演化一般趋势是从淡水湖到咸水湖再到盐湖,直至干盐湖结束其演化.其水化学类型也遵循一定的演化规律:即一般为碳酸盐型-硫酸钠型-硫酸镁型-氯化物型<sup>[20]</sup>.湖泊一般最先沉积的是碳酸盐矿物,此时如果  $Mg/Ca$  较低,一般生成文石、方解石或低镁方解石,如果  $Mg/Ca$  较高,则有可能生成高镁方解石、原白云石、碳钙镁石甚至水菱镁石和菱镁矿.很显然,此时  $Mg$  和  $Ca$  浓度并不随湖水浓缩、盐度升高而同比例增加.而在  $CO_3^{2-}$  和  $HCO_3^-$  消耗掉以后,随着湖水的进一步浓缩,开始出现  $CaSO_4$  为主的沉淀,此时  $Ca^{2+}$  浓度保持平衡或逐渐降低,而  $Mg^{2+}$  则相对富集.

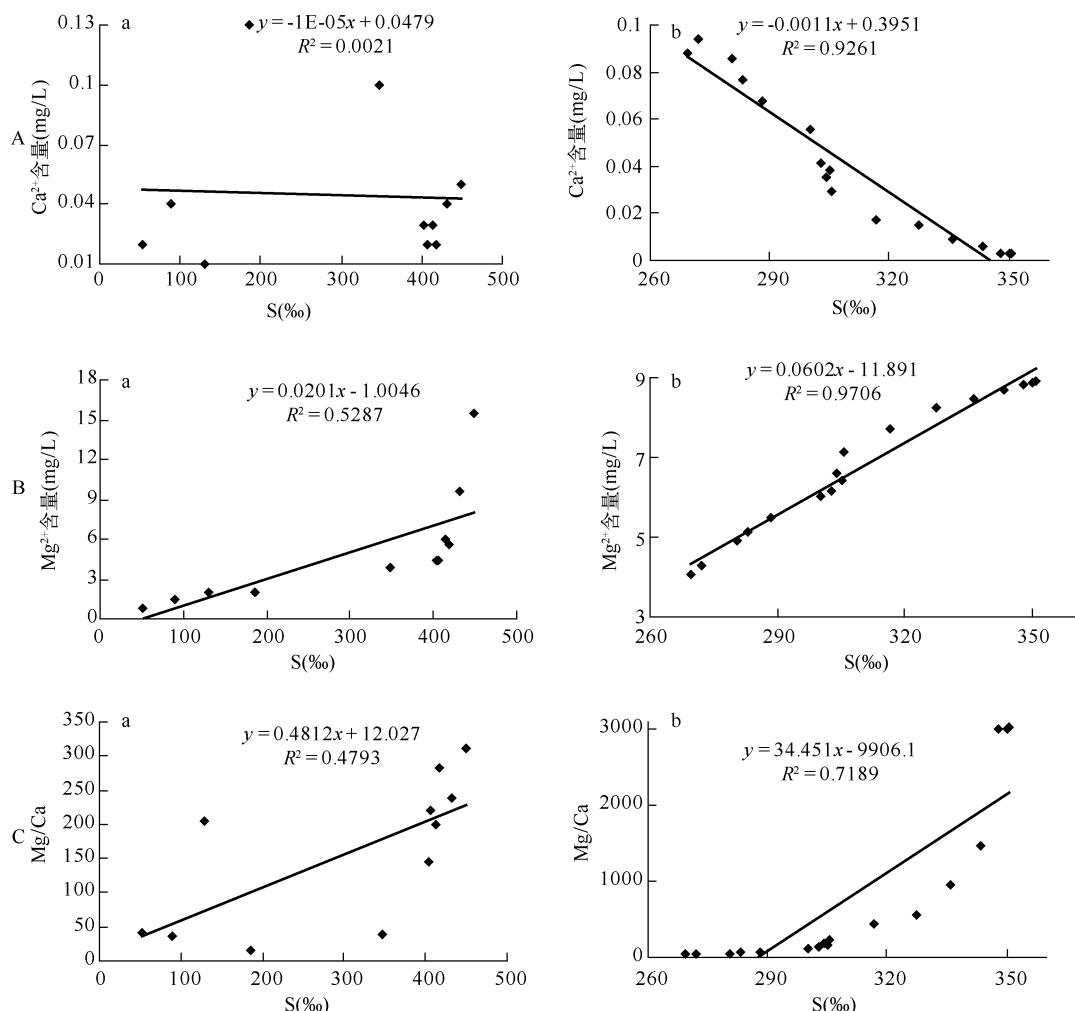


图 4 单个湖泊湖水天然蒸发过程中  $\text{Ca}^{2+}$  (A),  $\text{Mg}^{2+}$  (B),  $\text{Mg/Ca}$  (C) 与盐度的相关关系图  
(a, b 表示不同的湖泊)

Fig. 4 Relationship between  $\text{Ca}^{2+}$  (A),  $\text{Mg}^{2+}$  (B),  $\text{Mg/Ca}$  (C) and salinity during nature evaporation in single lakes (a, b represent for different lakes respectively)

青藏高原因其特殊的地理位置和构造活动,发育了众多类型的湖泊,而且其分布也有一定的规律可循,从南到北大致为碳酸盐型-硫酸钠型-硫酸镁型-氯化物型<sup>[21]</sup>.

通过总结分析青藏高原 400 多个湖泊水化学数据发现,在青藏高原,湖水  $\text{Mg}^{2+}$  与盐度表现出较为稳定的正相关关系,而  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg/Ca}$  与盐度的相关性较弱且不稳定。这与 Homes<sup>[14]</sup> 的研究结果较为相近,进一步证明了  $\text{Mg/Ca}$  与盐度不稳定的相关性具有全球普遍性。单独应用这一关系重建古盐度是需要谨慎的。但是,  $\text{Mg}^{2+}$  与盐度之间存在较为稳定的正相关关系,表明在青藏高原湖泊演化过程中,盐度与  $\text{Mg}^{2+}$  有较为相似的行为。

当然,在未分类型的所有湖泊中,  $\text{Mg}^{2+}$  与盐度的正相关关系并不是很强,可能是因为有些湖泊为盐类沉积初期,有  $\text{Mg}^{2+}$  的碳酸盐沉积的影响。

在相同水化学类型的湖泊中,碳酸盐型湖泊中  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  以及  $\text{Mg/Ca}$  与盐度的相关性均较弱。硫酸盐型湖泊中  $\text{Mg}^{2+}$  和盐度呈现较高的正相关关系,而  $\text{Ca}^{2+}$  以及  $\text{Mg/Ca}$  与盐度的相关性仍很弱。而在氯化物型湖泊中,  $\text{Mg}^{2+}$  与盐度呈更强的正相关关系,  $\text{Ca}^{2+}$  与盐度也呈一定的正相关关系,而  $\text{Mg/Ca}$  与盐度的相关性依然

很弱。在特定的单个湖泊中，不同采样时间和地点的  $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  与盐度的相关性仍然不稳定或很弱，而  $Mg^{2+}$  与盐度仍然保持显著的正相关关系。

青藏高原湖泊演化的顺序大致是从碳酸盐型到硫酸盐型再到氯化物型。在碳酸盐型阶段，随着湖水浓缩，盐度升高，此时  $Mg^{2+}$  的碳酸盐开始沉积，同时有  $Ca^{2+}$  的碳酸盐沉积的影响，所以  $Mg^{2+}$  的浓缩并不与盐度的增大同步， $Mg^{2+}$  浓度以及  $Mg/Ca$  与盐度没有明显的关系。到硫酸盐型阶段，大部分湖泊  $Mg^{2+}$  的碳酸盐沉积已结束，除了一些溶解度较小的镁盐，如库水硼镁石和柱硼镁石等， $Mg^{2+}$  一般以易溶盐的形式出现，此时随着湖水浓缩，盐度和  $Mg^{2+}$  浓度同时升高而呈现较高的正相关性。而  $Ca^{2+}$  因为有  $CaSO_4$  沉积的影响，浓度基本保持平衡，所以  $Ca^{2+}$  和  $Mg/Ca$  在此阶段与盐度的相关性仍然较弱。而到了氯化物型阶段，这种关系进一步加强，随着  $Mg^{2+}$  其它形式盐类的进一步沉积， $Mg^{2+}$  主要以易溶盐的形式出现， $Mg^{2+}$  与盐度呈现更高的正相关性。此阶段  $Ca^{2+}$  的难溶性盐基本沉淀完全， $Ca^{2+}$  也以部分易溶盐形式出现，使得  $Ca^{2+}$  在溶液里相对富集，而与盐度呈现一定的正相关性，而  $Mg/Ca$  与盐度的相关性则仍然较弱。

在同一个湖泊中，随着湖水的浓缩或稀释，湖水盐度与  $Mg^{2+}$  呈现出极显著的正相关性，但是盐度与  $Ca^{2+}$  以及  $Mg/Ca$  的相关关系很不稳定。达布逊盐湖卤水天然蒸发过程中甚至出现  $Ca^{2+}$  与盐度呈显著的负相关关系。因为物质来源和卤水演化历史的不同，即使是在同一个地区，湖泊的水化学类型以及盐度与  $Mg^{2+}$  的这种相关关系也会有所不同。湖水  $Mg^{2+}$  与盐度稳定的正相关性充分说明可以利用  $Mg^{2+}$  与盐度的这种关系来定量恢复湖泊古盐度，这为利用湖相介形虫壳体微量元素恢复湖泊古盐度提供坚实的理论基础。

在青藏高原，利用湖相沉积恢复特定湖区古环境演化的时候， $Mg^{2+}$  浓度是古盐度一个较好的转换指标，而在应用  $Mg/Ca$  这一指标时应谨慎。青藏高原的湖泊演化一般遵循从碳酸盐型到硫酸盐型再到氯化物型的正演化序列，如果在定量恢复古盐度的时候能够利用沉积物，如沉积盐类矿物<sup>[22]</sup>等，先确定古湖泊的演化阶段或古湖水的水化学类型，则能进一步区分出  $Mg^{2+}$  和  $Mg/Ca$  等的适用范围，从而提供更为可靠的古盐度的定量恢复。

致谢：感谢郭秀红博士提供部分湖泊蒸发试验数据。

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Bartolini A, Pittet B, Mattioli E et al. Shallow-platform plaeoenvironmental conditions recorded in deep-shelf sediments: C and O stable isotopes in Upper Jurassic sections of southern Germany (Oxfordian-Kimmeridgian). *Sedimentary Geology*, 2003, **160**: 107-130.
- [ 2 ] 伊海生, 林金辉, 周恩恩等. 青藏高原北部新生代湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义. 古地理学报, 2007, **9**(3):303-312.
- [ 3 ] 张成君, 郑绵平, Prokopenko A 等. 博斯腾湖碳酸盐和同位素组成的全新世古环境演变高分辨记录及与冰川活动的响应. 地质学报, 2007, **81**(12):1658-1672.
- [ 4 ] 郑绵平, 向军, 魏新俊等. 青藏高原盐湖. 北京:北京科学技术出版社, 1989:431.
- [ 5 ] Chivas AR, De Deckker P, Shelley JMG. Magnesium, strontium, and barium partitioning in nonmarine ostracode shells and their use in paleoenvironmental reconstructions-a preliminary study. In: Maddocks RF ed. Applications of Ostracoda. University of Houston, Geosci. Dep., Houston, 1983: 238-249.
- [ 6 ] Chivas AR, De Deckker P, Shelley JMG. Strontium content of ostracods indicates lacustrine palaeosalinity. *Nature*, 1985, **316**: 251-253.
- [ 7 ] Chivas AR, De Deckker P, Shelley JMG. Magnesium and strontium in non-marine ostracod shells as indicators of palaeosalinity and palaeotemperature. *Hydrobiologia*, 1986, **143**: 135-142.
- [ 8 ] Deckker de P, Chivas AR, Michael J et al. Ostracod shell chemistry: A new palaeoenvironmental indicator applied to a regressive/transgressive record from the Gulf of Carpentaria, Australia. *Palaeogeograph Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1988, **66**: 231-241.
- [ 9 ] McCulloch MT, Deckker de P, Chivas AR. Strontium isotope variations in single ostracod valves from the Gulf of Carpentaria, Australia: A palaeoenvironmental indicator. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, **53**: 1703-1710.
- [ 10 ] 沈吉, 王苏民, Matsumoto R 等. 内蒙古岱海古水温定量恢复及其古气候意义. 中国科学(D辑), 2001, **31**(12): 1017-1023.

- [11] 张恩楼, 沈吉, 王苏民等. 近0.9ka来青海湖湖水盐度的定量恢复. *科学通报*, 2004, **49**(7): 697-701.
- [12] Engstrom DR, Nelson SR. Paleosalinity from trace metals in fossil ostracodes compared with observational records at Devils Lake, North Dakota, USA. *Palaeogeograph Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1991, **83**: 295-312.
- [13] Williams WD. The relationship between salinity and Sr/Ca in the lake water. *Aust J Mar Freshwat Res*, 1966, **17**: 169-176.
- [14] Homes JA. Trace-element and stable-isotope geochemistry of non-marine ostracod shells in Quaternary palaeoenvironmental reconstruction. *Journal of Palaeolimnology*, 1996, **15**: 223-235.
- [15] 陈敬清, 刘子琴, 柳大纲. 氯化物类型盐湖卤水等温蒸发和天然蒸发. 见:《柳大纲科学论著选集》编辑委员会编. 柳大纲科学论著选集. 北京:科学出版社, 1997:257.
- [16] 郑喜玉, 张明刚等. 中国盐湖志. 北京:科学出版社, 2002:415.
- [17] 高世扬, 宋彭生, 夏树屏等. 盐湖化学——新类型硼锂盐湖. 北京:科学出版社, 2007:521.
- [18] Chivas AR, De Deckker P, Shelley JMG. Magnesium content of non-marine ostracod shells: a new palaeosalinometer and palaeothermometer. *Palaeogeograph Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1986, **54**: 43-61.
- [19] Eugster HP, Jones BF. Behavior of major solutes during closed basin brine evolution. *American Journal of Science*, 1979, **279**: 609-631.
- [20] 天津化工研究院. 无机盐工艺学. 北京:化学工业出版社, 1982:479.
- [21] Zheng MP, Liu XF. Hydrochemistry of salt lakes of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Aquat Geochem*, 2009, **15**: 293-320.
- [22] 张彭熹, 张保珍, 唐渊等. 中国盐湖自然资源及其开发利用. 北京:科学出版社, 1999:325.