

# 高原湖泊中萝卜螺属壳体研究现状及展望

陈 锋<sup>1,2</sup>, 冯金良<sup>3</sup>

(1. 山西财经大学环境经济学院, 太原 030006; 2. 山西财经大学地表过程与生态环境研究所, 太原 030006;  
3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101)

**摘 要:**湖泊的古水文及古水化学重建是湖泊研究领域最具挑战性的工作之一。在湖泊、河湖相及高湖面沉积物中, 萝卜螺属壳体化石广泛分布; 而且现生萝卜螺属亦广泛地分布于全球的湖泊及河流。这些生物碳酸盐(文石)壳体成为一种潜在的和高分辨率的环境信息记录载体。近年来, 萝卜螺属的生境及其壳体的稳定碳氧同位素和元素已经逐步被用于了解青藏高原及其他地区的古水文、古水化学和古气候的信息。然而, 在萝卜螺属壳体如何记录其宿生水体的古水文、古水化学等信息, 以及如何基于萝卜螺属壳体化石重建古环境等方面, 仍有许多科学问题有待探索。本文在前人研究的基础上, 侧重在作为环境信息载体的萝卜螺属的分类体系、生境研究及其应用和壳体指标( $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\text{Sr}/\text{Ca}$  和  $\text{Mg}/\text{Ca}$ )特征及其在环境重建中的应用等方面进行总结和展望。

**关键词:**高原湖泊; 萝卜螺属; 稳定碳氧同位素; 锶同位素; 壳体元素比值; 古环境重建

## 1 引言

在全球变化背景下, 湖泊水文、水化学及其反映的气候变化得到了广泛关注(张灿等, 2015; 刘翀等, 2017; 傅伯杰, 2018; 杨大文等, 2018)。在定量重建湖泊古水文、古水化学和古气候的研究中, 湖泊沉积物中的化石生物指标发挥了极为重要的作用(沈吉等, 2010), 如孢粉组合(Lü et al, 2011; Chen et al, 2015)、硅藻组合(Yang et al, 2003; 羊向东等, 2003)、摇蚊组合(张恩楼, 2006; Zhang et al, 2007)、介形类组合(Mischke, Almogi-Labin et al, 2010; Mischke, Bößneck et al, 2010; Zhu et al, 2010)、生物标志化合物指标(Liu et al, 2006; Hou et al, 2016)等。然而, 在高原地区, 已报道的古水文、古水化学和古气候定量重建数据的时间分辨率一般是百年或者几十年尺度(Taft et al, 2012)。目前, 该地区还较缺少记录过去水文、水化学和气候变化信息的高分辨率(年、季, 甚至周)的理想载体。

值得注意的是, 在全球众多现代湖泊及河流中发现有大型水生腹足类生物萝卜螺属(*Radix*)生存

(刘月英等, 1979; Jokinen, 1992; von Oheimb et al, 2011; 刘海平等, 2014; Chen et al, 2016)(图 1); 同时其壳体化石亦常见于第三纪以来的湖泊沉积、河湖相沉积及高湖面沉积物中(Yue et al, 2004; Wang et al, 2008; 韩建恩等, 2012; Huntington et al, 2015; Weynell et al, 2016)(图 2)。特别是, 萝卜螺属壳体化石广泛地分布于青藏高原全新世的湖相沉积物及湖岸阶地中(李炳元等, 1982; Hudson et al, 2015; Mischke et al, 2015; Wünnemann et al, 2015; Chen et al, 2017)。萝卜螺属碳酸盐壳体的矿物组成为文石; 并且萝卜螺属全新世时期的壳体化石的XRD衍射表明没有发生相变(陈锋, 2016)。而萝卜螺属的壳体就可记录年、季甚至周内的湖泊水化学、水文和气候信息(Taft et al, 2012; Taft et al, 2013; Taft et al, 2014)。

前人对萝卜螺属的研究主要集中在其生态(王泽长, 1963; 李朝品, 1998; 李宽意等, 2008; 刘海平等, 2014)、生物学(von Oheimb et al, 2011; 王瑞爱等, 2013)、寄生虫(Jouet et al, 2010; Huňová et al, 2012)、地理分布及经济意义(刘月英等, 1979)等方

收稿日期: 2018-02-09; 修订日期: 2018-05-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701224) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41701224]。

作者简介: 陈锋(1988-), 男, 湖北孝感人, 讲师, 从事沉积与环境研究, E-mail: chenfeng\_radix@163.com。

引用格式: 陈锋, 冯金良. 2018. 高原湖泊中萝卜螺属壳体研究现状及展望[J]. 地理科学进展, 37(10): 1430-1441. [Chen F, Feng J L. 2018. Progress and prospects of research on shells of *Radix* sp. in lakes on the Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography, 37(10): 1430-1441.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.10.012

图1 现生耳萝卜螺属 (*Radix auricularia*) 壳体图版Fig.1 Plate of the living shells of *Radix auricularia*

图2 高湖面沉积物中的萝卜螺属壳体化石

Fig.2 Fossil shells of *Radix* sp. in the high lake level sediments

面的研究。同时开始涉及其壳体的年代学(李炳元等, 1982; 朱大岗等, 2003; Mischke et al, 2013; Wünnemann et al, 2015)和地层学(White et al, 2008; 李保生等, 2010; 韩建恩等, 2012)方面的研究。近年来, 学者们才逐步开展利用萝卜螺属壳体进行环境重建方面的研究(Mischke et al, 2002; Taft et al, 2014; Weynell et al, 2016; Chen et al, 2017; 陈锋等, 2017)。

本文在前人研究的基础上, 侧重于对萝卜螺属的分类体系、萝卜螺属生境研究及其应用、萝卜螺属壳体指标(稳定碳氧同位素、锶同位素、元素比值)记录环境信息及其在环境重建中的应用等方面进行总结和展望。

## 2 萝卜螺属的分类体系

萝卜螺属是一类地质历史长、地理分布广和生物量大的腹足类动物群。在分类学上, 萝卜螺属属于软体动物门(Mollusca)—腹足纲(Gastropoda)—肺螺亚纲(Pulmonata)—基眼目(Basommatophora)—椎实螺科(Lymnaeidae)。目前, 萝卜螺属属下一共包

含 12 个种(刘月英等, 1979; 齐钟彦等, 1985; von Oheimb et al, 2011), 分别为: 耳萝卜螺(*Radix auricularia*) (图 1)、狭萝卜螺(*Radix lagotis*)、尖萝卜螺(*Radix acuminata* Lamark)、长萝卜螺(*Radix pereger*)、胖萝卜螺(*Radix ovalis*)、椭圆萝卜螺(*Radix swinhoei*)、梯旋萝卜螺(*Radix latispira*)、折叠萝卜螺(*Radix plicatula*)、琵琶萝卜螺(*Radix luteola*)、青海萝卜螺(*Radix cucunorica*)、卵萝卜螺(*Radix ovata*)、微红萝卜螺(*Radix rubiginosa*)。这些种分布的位置和生活习性有所差别(刘月英等, 1979)。以青藏高原为例, 萝卜螺属广泛存在于众多湖泊中(图 3, 表 1), 常见的有耳萝卜螺、青海萝卜螺、狭萝卜螺、尖萝卜螺、卵萝卜螺(刘月英等, 1979; 陈锋, 2016)。其中, 耳萝卜螺的分布最为广, 为优势种。另外, 在发现有萝卜螺属的点位均发现有扁蜷螺(*Gyraulus*) (陈锋, 2016)。目前, 在青藏高原, 利用萝卜螺属进行环境研究, 还未鉴定到种的水平。此前, 萝卜螺属的分类同其他软体动物一样, 主要是基于壳体的外部形态和特征及颜色加以鉴别(刘月英等, 1979; 齐钟彦等, 1985)。近年来, 随着分子生物学的发展, 学者们开始利用 DNA 技术对现生萝卜螺属进行分

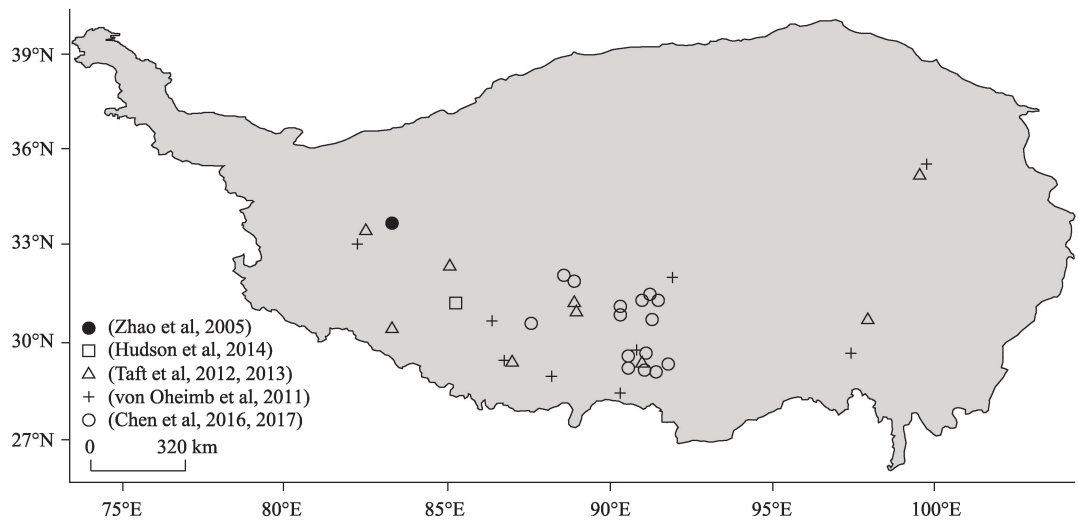


图3 青藏高原上发现有现生萝卜螺属的湖泊点位  
Fig.3 Sites of lakes where *Radix* sp. were found on the Tibetan Plateau

表 1 已报道有现生萝卜螺属的青藏高原上的湖泊点位信息

Tab.1 Published sites of lakes where living <i>Radix</i> sp. were found on the Tibetan Plateau						
编号	湖泊名称	文献中名称	纬度	经度	海拔/m	来源
1	太错	Tai Co	33°43'N	80°43'E	4504	Zhao et al, 2005
2	普莫雍错	Phuma Yumtso	28°29'N	90°25'E	5030	von Oheimb et al, 2011
3	班公错 1	Pangong Tso	33°26'N	79°47'E	4241	von Oheimb et al, 2011
4	朗错	Lang Tso	29°12'N	87°25'E	4294	von Oheimb et al, 2011
5	冬给措纳湖 1	Dongi Tsona	35°22'N	98°28'E	4090	von Oheimb et al, 2011
6	然乌湖	Rawok Tso	29°29'N	96°39'E	3913	von Oheimb et al, 2011
7	错那湖	Tso Nak	32°01'N	91°31'E	4800	von Oheimb et al, 2011
8	羊卓雍错 1	Yamdrok Yumtso	29°05'N	90°22'E	4436	von Oheimb et al, 2011
9	亚当错 1	Yadang Tso	29°37'N	85°44'E	5060	von Oheimb et al, 2011
10	嘎仁错	Kyering Tso	30°45'N	85°00'E	4650	von Oheimb et al, 2011
11	邦达错	Bangda Co	30°29'N	97°04'E	4450	Taft et al, 2012
12	格仁错 1	Kyaring Co	31°10'N	88°10'E	4650	Taft et al, 2012
13	格仁错 2	Kyaring Co	31°17'N	88°17'E	4650	Taft et al, 2012
14	冬给措纳湖 2	Donggi Cona	35°15'N	98°30'E	4090	Taft et al, 2013
15	玛旁雍错	Lake Manasarovar	30°45'N	81°22'E	4595	Taft et al, 2013
16	羊卓雍错 2	Yamdrok Yumco	29°02'N	90°25'E	4437	Taft et al, 2013
17	班公错 2	Banggong Co	33°33'N	79°55'E	4250	Taft et al, 2013
18	达热不错	Tarab Co	32°26'N	83°12'E	4450	Taft et al, 2013
19	亚当错 2	Yadang Co	29°39'N	85°44'E	5060	Taft et al, 2013
20	昂拉仁错	Ngangla Ring Tso	31°27'N	83°21'E	4689	Hudson et al, 2015
21	纳木错 1	Nam Co	30°47'N	90°16'E	4728	Chen et al, 2016
22	纳木错 2	Nam Co	30°53'N	90°14'E	4728	Chen et al, 2016
23	纳木错 3	Nam Co	30°55'N	90°57'E	4728	Chen et al, 2016
24	纳木错 4	Nam Co	30°53'N	90°52'E	4728	Chen et al, 2016
25	白马纳木错	Baima Nam Co	30°46'N	90°57'E	4438	Chen et al, 2016
26	空姆错	Gongmo Tso	28°59'N	90°23'E	4438	Chen et al, 2016
27	沉错	Chen Co	28°57'N	90°29'E	4434	Chen et al, 2016
28	巴纠错	Pagyu Tso	28°44'N	90°50'E	4511	Chen et al, 2016
29	羊卓雍错 3	Yamdrok Yumtso	28°46'N	90°31'E	4436	Chen et al, 2016
30	羊卓雍错 4	Yamdrok Yumtso	28°50'N	91°03'E	4444	Chen et al, 2016
31	农针错	Nongzhen Tso	28°53'N	90°24'E	4564	Chen et al, 2016
32	姆错丙尼	Mucuobingni	30°33'N	86°17'E	4680	Chen et al, 2016
33	恰规错	Qiagui Co	31°51'N	88°17'E	4552	Chen et al, 2016
34	色林错	Selin Co	31°47'N	88°26'E	4545	Chen et al, 2016
35	纳木错 5	Nam Co	30°55'N	90°53'E	4728	Chen et al, 2017



类(von Oheimb et al, 2011; 王瑞爱等, 2013),使得分类结果的可靠性更高,进而有利于合理评价软体动物壳体同位素和元素种内和种间变化。一般地,利用软体动物壳体进行同位素和元素序列分析时,首先应尽量挑选相同属种的样品,其次为相同属不同种的样品,这样壳体同位素和元素才能够更好地指示古气候或古环境变化(宋磊等, 2013)。

### 3 萝卜螺属的生境

萝卜螺属是淡水中常见的螺类,寿命约为1年(Young, 1975),其壳体增长速率夏季约为2.41~2.86 mm/月;冬季约为0.35 mm/月(Gaten, 1986)。萝卜螺属能够记录高分辨率的环境信息正是得益于其较慢的生长速率(Taft et al, 2012)。萝卜螺属个体越大,生活时间越长;其活动时间约为3-11月份,其中7-10月为高峰期,孳生密度很高(李朝品, 1998)。因而,要想捕获现生萝卜螺属进行研究,最好在7-8月份进行。值得注意的是,除了地理分布广以外,萝卜螺属对水的酸碱度适应性也较强,pH值在5.8~9.9范围内皆可孳生,最适的pH值范围是7.0~9.6(Økland, 1990)。尽管Zhao等(2005)在西藏北部盐度为20 g/L的超咸水体(Tai Co)中发现了萝卜螺属的活动,但它们更喜欢生活在淡水或者低到中盐度的水体中(Taft et al, 2012)。因此,基于这一特性,在古环境研究中,萝卜螺属等生物化石的发现,本身就说明了重要的环境信息。例如,位于青藏高原北部的柴达木盆地(36. 9°N; 95. 3°E)察尔汗盐湖东侧的贝壳层沉积中的腹足类、瓣鳃类和介形类古生物化石记录表明,当时该湖为淡水—微咸水,说明至少在38-28 ka BP之间,察尔汗古湖湖泊范围较大、湖面较高,为水质较淡的大湖(李炳元, 2000)。Chen等(2017)对纳木错高湖面沉积物进行了多指标研究,认为在大约4.4-2.2 ka期间,纳木错比现今湖泊范围更大、湖面更高,为水质更淡的大湖,并且这些沉积物中广泛分布的萝卜螺属壳体化石进一步支持了这一结论。

萝卜螺属属于少有的能栖息在极端寒冷环境的腹足类动物,White等(2008)发现其可在冰雪覆盖超过半年的西伯利亚中南部的Basovo湖(55°52'N, 105°47'E; 345 m)中生存。Gaten(1986)观察到,在冬季萝卜螺属为了避免湖冰的侵袭或影响,会从浅水区向深水区移动。因此,萝卜螺属可以在寒冷的水

环境中存活(Glöer, 2002; Young, 1975)。同时,这种习性在古环境研究中也得到了验证。Hu等(2017)在雅鲁藏布江中游河谷阶地及古堰塞湖的研究中证实了在青藏高原萝卜螺属度过了末次冰期的寒冷气候期。值得注意的是,海拔对于萝卜螺属的生存似乎影响不大,在超高海拔的湖泊普莫雍错(5030 m; 表1)和亚当错(海拔5060 m; 表1)中也能发现萝卜螺属,甚至在海拔超过6000 m的地方也有它们的分布(刘月英等, 1979)。总之,在青藏高原,发现有萝卜螺属活动的湖泊,其海拔大都集中在3000~6000 m。Taft等(2012)认为,萝卜螺属生长的限制因子不是低温而是营养。萝卜螺属的食物来源主要有绿藻门、蓝藻细菌、硅藻、原生动物、杂草(Gittenberger et al, 1998)。因此,在萝卜螺属野外调查过程中,要优先在水草等植物密集的地区勘查,因为它们每天的活动范围依赖于食物的供给(Knecht et al, 1977)。另外,笔者野外观察到,在光照充足的中午,萝卜螺属偶尔会出露在近岸或者近岸的水生植物上。

萝卜螺属倾向于栖息在地势平坦、平静的浅水地带,如湖水、河水的回水区、湿地等(Glöer, 2002)。在青藏高原的湖泊中,它们倾向于栖息在平静的浅水地带,多集中在有水草的近岸地带,在0~1.5 m的水深范围内很常见(von Oheimb et al, 2011; Taft et al, 2012, 2013; Chen et al, 2016)。根据Mischke、Almogi-Labin等(2010)在冬给措纳湖的调查,获得萝卜螺属壳体的最大水深是47.9 m,然而萝卜螺属壳体更高频的收集为水深小于25 m的地带。另外,Mischke、Bößneck等(2010)在卡拉库里湖(Lake Karakul)的调查发现,活体萝卜螺属的种的分布水深在5.7~22.2 m。目前,基于萝卜螺属的生境推断古环境信息已经有了新的进展,例如Hu等(2017)利用青藏高原雅鲁藏布江古堰塞湖沉积物中萝卜螺属的习性及其壳体化石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ ,推断出古堰塞湖的回水末端位于日喀则附近;并进一步结合高精度GPS测量,证实古堰塞湖湖面海拔高度大约为3811 m。

### 4 萝卜螺属壳体指标

#### 4.1 萝卜螺属壳体的稳定碳氧同位素

长期以来,湖泊中腹足类生物碳酸盐壳体的稳定碳氧同位素及元素被广泛用于推测环境和气候

的变化(李玉成等, 1990; 吴敬禄等, 2001; Leng et al, 2004; 常凤琴等, 2007; Szymanski, 2016)。近年, 萝卜螺属壳体的稳定碳氧同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ )及元素已开始被用于了解青藏高原及其他地区的古水文、古水化学和古气候的信息(Hailemichael et al, 2002; Mischke et al, 2002; Taft et al, 2014; Chen et al, 2017; 陈锋等, 2017)。其中, 根据现生萝卜螺属的捕获时间及其生长规律, Taft等(2012)和Taft等(2013)对青藏高原9个湖泊的现生萝卜螺属按壳体的生长线连续测试稳定碳氧同位素, 并同湖区的气象数据对比发现, 在季节到逐月的时间尺度上, 萝卜螺属壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 基本上反映的是水体 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化, 进而首次阐述了现生萝卜螺属壳体能在半个月分辨率的水平上记录青藏高原的水文和气候信息; 随后还讨论了影响萝卜螺属壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 的可能机制。此外, 鉴于萝卜螺属壳体化石常见于第三纪以来的湖泊沉积、河湖相沉积及高湖面沉积物中, 因而认为萝卜螺属壳体是记录青藏高原上季风强度变化的一种极有潜力的载体, 利用萝卜螺属壳体化石记录可以重建几千万年前的年际或季节变化环境信息。在此基础上, Taft等(2014)利用萝卜螺属壳体化石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 结合介形虫壳体和湖泊自生文石 $\delta^{18}\text{O}$ , 重建了帕米尔高原东部的卡拉库里湖4200 cal yr BP以来的冰川融水和温度变化的情况; 研究结果同时表明, 萝卜螺属壳体化石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 同介形虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 在长时间尺度上保持了一致的变化趋势, 并指示了降水同位素组成的变化。由此进一步表明, 萝卜螺属壳体化石同介形虫壳体化石环境记录一样, 也可作为一种重要的可信的环境记录载体。

近年来, Chen等(2016)建立了青藏高原中南部区域上多个湖泊中现生萝卜螺属壳体地球化学与其宿生水体水化学之间的关系, 即萝卜螺属壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 的变化主要反映了湖水氧同位素( $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ )的变化, 例如湖水蒸发或者降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化(Tyler et al, 2008); 萝卜螺属壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 取决于湖水的溶解无机碳(DIC)的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , 并初步探讨了萝卜螺属壳体—水体 $\delta^{18}\text{O}$ 分馏系数(变化范围在1.031~1.040)及其温度依赖性(较低)。在此基础上, Chen等(2017)利用纳木错周边的高湖面沉积物中的萝卜螺属壳体化石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 结合高湖面沉积物的理化性质探讨了纳木错中晚全新世高湖面的变化机制。

在青藏高原, 萝卜螺壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 主要受宿生水

体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 控制(Chen et al, 2016)。水体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 主要受降水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 控制(Tyler et al, 2008), 其他影响因素有: 水温、蒸发、水体大小、湿度以及居留时间 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 影响因素众多, 水汽来源也较为复杂(Tian et al, 2001; Hu et al, 2017)。大多数湖泊水体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 受到区域降水和入湖水流的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 影响。但强烈的蒸发作用和居留时间使得不同水体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 产生较大的差异, 进而使封闭湖泊中萝卜螺 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 比开放湖泊中萝卜螺 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 偏正(Taft et al, 2013)。因此, 鉴于萝卜螺属壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 与其宿生湖泊水文状态存在一定的关系(Hu et al, 2017; 陈锋等, 2017)(图4), 萝卜螺属壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 可用于判断水体的水环境(封闭或者开放)。河流、池塘、过水湖、半封闭湖和封闭湖中现生壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 值的变化范围分别为:  $-16.2\text{‰} \sim -15.5\text{‰}$ (Hu et al, 2017)、 $-14.6\text{‰} \sim -14.5\text{‰}$ (Hu et al, 2017)、 $-12.1\text{‰} \sim -10.9\text{‰}$ (Chen et al, 2016)、 $-5.9\text{‰} \sim -5.8\text{‰}$ (Chen et al, 2016)和 $-7.3\text{‰} \sim -0.9\text{‰}$ (Chen et al, 2016)。可见, 萝卜螺属壳体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 值随湖泊水文状态开放程度的提高而逐渐降低。基于此, 陈锋等(2017)应用Chen等(2016)建立的相关关系并结合纳木错高湖面沉积物中萝卜螺属的壳体化石, 定量重建了该湖中晚全新世古湖水的水化学特征; 并利用萝卜螺属壳体化石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ , 结合古湖岸线地貌证据, 讨论了古湖水水文状态, 认为萝卜螺属化石壳体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 值指示, 纳木错在约距今约4.4~2.2 ka的高湖面期间可能处于一种间歇性外流状态。

## 4.2 萝卜螺属壳体的锶同位素

陆地与海洋锶等同位素的研究, 是目前全球变

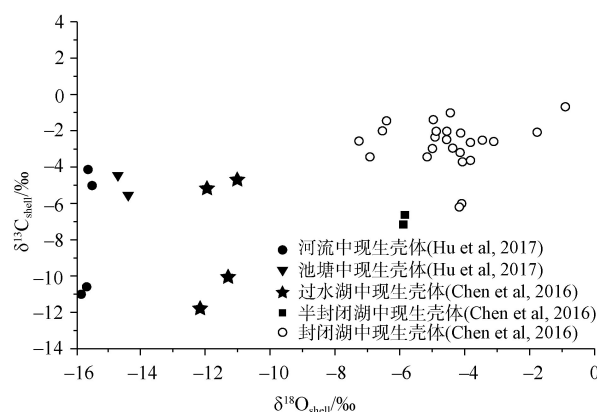


图4 不同水生环境中现生萝卜螺属壳体稳定氧碳同位素

Fig.4  $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$  of living *Radix* sp. in different aquatic environments

化以及古生态环境研究的前沿之一。一个很重要的原因是由于锶同位素与碳、氧和硫这样的轻同位素不同,相变、蒸发作用、化学状态或生物同化作用对 Sr 同位素分馏影响不明显。锶同位素被广泛应用于海平面变化、湖面变化、气候变化、风化作用、地层年代学与地层学对比、水岩作用以及地下水的循环与演化研究(Dia et al, 1992; 刘昊年等, 2007; Jin et al, 2011; Placzek et al, 2011; Korte et al, 2018)。此外,在沉积环境中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值仅有的变化是由于不同来源 Sr 的混合造成的(许翔等, 2009)。因此,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  在研究物质迁移和变化过程中是有效的示踪剂,可用于追踪海面或者湖面的变化机制。其理论依据为:在地质历史进程中,海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值是随时间变化的函数,地质年代越久远,  $^{87}\text{Sr}$  积累就越多,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值也就越高。因此,可根据沉积物  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  组成及其变化规律判读其物质来源。湖泊沉积物中存在大量的腹足纲生物壳体(方解石和文石壳体),这些壳体记录了形成时水体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值。利用这类壳体记录的锶同位素进行示踪,已成功地应用于古湖泊的水文和气候演化等研究(Grove et al, 2003; Hart et al, 2004; Flusche et al, 2005; Placzek et al, 2011),如在追踪湖面的变化机制方面已有一些成果(Benson et al, 1996; Hart et al, 2004)。

我们于 2015 年在核工业北京地质研究院测试了 3 个湖泊点位(纳木错 2 个点,羊卓雍错 1 个点)的萝卜螺属壳体 and 对应湖水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值,测试结果见表 2。  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  分析采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计,质量分馏用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$  校正,标准测量结果:NBS987 为  $0.710250\pm 7$ ,实验数据可靠。由此可见,不同湖泊的湖水中萝卜螺属壳体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值存在较大的差异;同时,纳木错不同地点(表 2)湖水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值也不完全相同。但是萝卜螺属壳体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值与其生活水域的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值还是比较接近的。总体来看,这 2 个不同湖泊的 3 组数据说明,萝卜螺属壳体可比较好地记录其湖水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值的变

化。这表明今后可据此研究青藏高原湖泊的湖面变化机制。

4.3 萝卜螺属壳体的元素比值

现生萝卜螺属壳体主要包含三种元素,即 Ca、Sr 和 Mg,其含量的变化范围分别为:Ca 35.8~39.67(%)、Sr 849.5~2383(ppm)、Mg 24.35~164.6(ppm)(Chen et al, 2016)。上述数据表明,萝卜螺属壳体钙的含量很高,基本上是纯净的碳酸盐;不同湖泊获取的萝卜螺属壳体的特征元素具有较大的差异性,这与其所生活的水体环境有关(Chen et al, 2016)。

由于在腹足类等水生生物壳体形成时,Ca、Mg、Sr 等元素会从其宿生水体进入壳体,当时水体的环境条件就被壳体包含的微量元素特征所记录。贾玉鹤等(2002)认为,生物壳体的 Sr/Ca、Mg/Ca 比值能反映其宿生水体的 Sr/Ca、Mg/Ca 比值,在一定条件下反映了水体的盐度、温度,并分别与生活水体的盐度、温度呈正比关系。因此,通过对生物壳体微量元素的地球化学特征分析,可以恢复其形成时的水化学和水环境信息。

前人研究已表明,软体动物壳体的 Sr/Ca 比值与其生活水域的水体的温度(Dodd, 1965; Surge et al, 2006)或者盐度(Wolf et al, 1967; Eisma et al, 1976)存在显著的关系。Chen 等(2016)对青藏高原中南部湖泊中现生萝卜螺属壳体元素与其宿生水体元素之间的关系进行了探讨,结果表明:萝卜螺属壳体的  $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{shell}}$  与其生活水体的  $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{water}}$  呈显著的线性正相关( $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{shell}} = 0.118 \times \text{Sr}/\text{Ca}_{\text{water}} + 0.0008$ ;  $R^2=0.78$ );  $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{shell}}$  与湖水的电导率(EC)也呈显著的线性正相关( $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{shell}} = 9 \times 10^{-7} \times \text{EC} + 0.0001$ ;  $R^2=0.71$ );  $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{shell}}$  与其生活水体的温度和 pH 值均没有明显的关系;现生萝卜螺属壳体 Sr 的分配系数的变化范围在 0.167~0.867 之间,平均值是 0.317,这一分配系数与以往的研究结果相接近。基于萝卜螺属壳体与宿生水体已建立的地球化学关系,陈锋等(2017)结合纳木错高湖面沉积物中萝卜螺属壳体化石定量重建了该湖 4.4~2.2 ka 期间湖水的古  $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{Palaeo-water}}$  和

表 2 湖水和萝卜螺属现代壳体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值  
Tab.2  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values of lake water and modern shells of *Radix* sp.

编号	现代壳体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	性质	湖水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	性质	相对变化
21	0.713655	纳木错现代壳体	0.713753	相应点湖水	0.000098
24	0.713860	纳木错现代壳体	0.713694	相应点湖水	0.000165
29	0.709575	羊卓雍错现代壳体	0.709760	相应点湖水	0.000185

注:表中编号对应表 1 中的编号。



古电导率。

然而,尽管Chen等(2016)在其论文中给出了萝卜螺属壳体Mg的含量数据,但是并未进行深入解读。本文重新整理了Chen等(2016)发表的数据,进一步地分析萝卜螺属壳体的Mg/Ca<sub>shell</sub>摩尔比与水化学之间的关系(图5)。结果表明,萝卜螺属壳体的Mg/Ca<sub>shell</sub>与其生活水体的Mg/Ca<sub>water</sub>呈比较显著的线性正相关(图5a),表明萝卜螺属生活水域水体的Mg/Ca<sub>water</sub>显著影响着萝卜螺属壳体Mg/Ca<sub>shell</sub>的变化;Mg/Ca<sub>shell</sub>与其生活水体的EC有一定的线性正相关关系(图5b),但仍需有更多数据的支持;Mg/Ca<sub>shell</sub>与其生活水体的温度和pH值均无明显的关系(图5c-5d)。

显然,现生萝卜螺属壳体的Sr/Ca、Mg/Ca比值能较好地反映其宿生水体的Sr/Ca、Mg/Ca比值。因此,通过对化石萝卜螺属壳体元素地球化学特征的分析,可尝试定量重建其形成时的水化学信息。如将此处建立的Mg/Ca<sub>shell</sub>与Mg/Ca<sub>water</sub>的关系应用到纳木错高湖面沉积物剖面中的萝卜螺属壳体化石(陈锋等, 2017),就可定量重建该湖4.4–2.2 ka期间湖水的古Mg/Ca<sub>Palaeo-water</sub>。

综上所述,萝卜螺属可以敏感地反映湖泊水体环境的变化,它们的生态习性及其壳体中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和元素比值特征,都可以提供过去

湖泊的水化学、水文及其气候变化信息。因此,萝卜螺属壳体记录的水化学信息,在湖泊沉积环境变化的定性和定量研究中发挥着越来越重要的作用。

## 5 存在问题及研究展望

目前,萝卜螺壳体指标研究中存在的主要问题有:

(1) 对萝卜螺属的生境研究仍相对较少,特别是湖泊水化学组成及水深对萝卜螺属的分布与存活的影响尚未明确。

(2) 在湖泊沉积和古环境研究方面,萝卜螺属还没有达到鉴定种的水平;已有的研究使用的均是未定种的萝卜螺属;其种间差异可能产生的误差或者不确定性是否对研究结果有影响仍需进一步调查。

(3) 众多研究表明,文石类软体动物的壳体与水体达到了 $\delta^{18}\text{O}$ 平衡。然而,具体到萝卜螺属文石壳体,在属的水平,现有的数据表明壳体—水体 $\delta^{18}\text{O}$ 为基本平衡。鉴于萝卜螺属中包括多个种,生长过程中影响壳体—水体 $\delta^{18}\text{O}$ 分馏的因素可能不同。因此,需要在种的分类水平,并用更多的样本进一步确认萝卜螺属文石壳体与其宿生水体 $\delta^{18}\text{O}$ 的平衡问题。此外,萝卜螺属氧同位素平衡问题还需进一

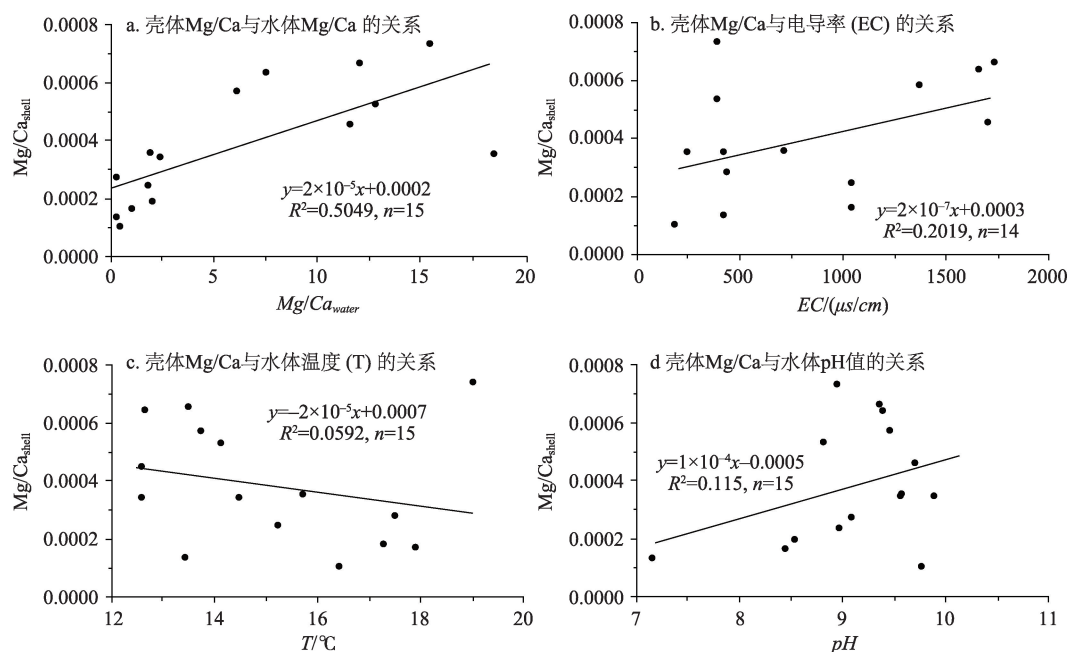


图5 现生萝卜螺属壳体Mg/Ca摩尔比与水化学之间的关系(数据源自Chen et al, 2016)

Fig.5 Relationship between Mg/Ca molar ratio of *Radix* sp. shells and hydrochemistry. Data from Chen et al (2016)

步开展相关研究: 培养实验、分馏系数、影响因素(温度、盐度、pH)等。

(4) 现有数据表明: 萝卜螺属壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 可能取决于湖水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ; 并且湖水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 主要受水体中碳酸盐种类的控制。然而, 高原不同地区的湖泊中湖水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值与碳酸盐种类的差异较大(类延斌等, 2011)。此外, 影响软体动物壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的因素还有有机物分解、大气 $\text{CO}_2$ 等, 以及生命效应、动力学效应等。因此, 目前对于萝卜螺属壳体中碳同位素成分的形成机制还难以给出十分肯定的解释。

(5) 关于萝卜螺属微量比值与环境重建问题, 包括 $\text{Sr}/\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}/\text{Ca}$ 等。利用萝卜螺属壳体化石的 $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{shell}}$ 重建湖泊古湖水的EC可能需要利用本湖泊萝卜螺属壳体 $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{shell}}$ 与湖水EC建立的关系, 而基于多个湖泊所建立的相关关系方程可能不适用。因此, 无论是单个大型湖泊还是高原的多个湖泊, 在种的分类水平上, 均亟待建立萝卜螺属壳体与其宿生水体水化学组分的关系。

(6) 萝卜螺属化石埋藏问题, 萝卜螺属壳体的矿物组分为文石, 那么壳体记录的信号可以保存到什么年代? 壳体何时发生相变成方解石, 壳体发生相变的时间是否存在区域差异及其差异性等, 需要进一步的研究。

(7) 目前仅有一条萝卜螺属化石记录得到验证, 仍需进一步的研究验证萝卜螺属与其他壳体的环境记录。

综上所述, 萝卜螺属壳体如何记录其宿生水体的古水文、古水化学等信息, 以及如何基于萝卜螺属壳体化石重建古环境等科学问题仍有待进一步探索。

## 参考文献(References)

- 常凤琴, 张虎才, 陈玥, 等. 2007. 柴达木盆地察尔汗古湖贝壳剖面碳酸盐和瓣鳃化石碳氧稳定同位素[J]. 第四纪研究, 27(3): 427-436. [Chang F Q, Zhang H C, Chen Y, et al. 2007. Stable isotopes of carbonate and fossil shells from the Shell Bar section of the Paleolake Qarhan, Qaidam Basin[J]. Quaternary Research, 27(3): 427-436.]
- 陈锋. 2016. 藏中南典型湖泊全新世高湖面沉积及其古环境意义[D]. 北京: 中国科学院大学. [Chen F. 2016. Holocene high lake-level sediments of typical lakes in the south-central Tibetan Plateau and their paleoenvironment implication[D]. Beijing, China: The University of Chinese Academy of Sciences.]
- 陈锋, 冯金良, 胡海平, 等. 2017. 纳木错高湖面时期的溢流:

- 基于萝卜螺壳体氧同位素及地貌证据[J]. 第四纪研究, 37(2): 271-280. [Chen F, Feng J L, Hu H P, et al. 2017. Overflow of the Lake Nam Co during its high level period: Inferences from oxygen isotope of *Radix* shells and geomorphological evidences[J]. Quaternary Research, 37(2): 271-280.]
- 傅伯杰. 2018. 新时代自然地理学发展的思考[J]. 地理科学进展, 37(1): 1-7. [Fu B J. 2018. Thoughts on the recent development of physical geography[J]. Progress in Geography, 37(1): 1-7.]
- 韩建恩, 余佳, 贺承广, 等. 2012. 西藏札达盆地腹足类组合及生物地层学[J]. 地球学报, 33(2): 153-166. [Han J E, Yu J, He C G, et al. 2012. The assemblage of gastropod fossils in Zanda Basin of Tibet and its biostratigraphy[J]. Acta Geoscientia Sinica, 33(2): 153-166.]
- 贾玉鹤, 王世杰. 2002. 生物壳体 $\text{Sr}/\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}/\text{Ca}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 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, 30(2): 54-58. [Jia Y H, Wang S J. 2002. The application of  $\text{Mg}/\text{Ca}$ ,  $\text{Sr}/\text{Ca}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of biogenic shells in reconstruction of palaeoclimate and palaeoenvironment as exemplified by Xiaodukou section[J]. Geology Geochemistry, 30(2): 54-58.]
- 类延斌, 姚檀栋, 张恩楼, 等. 2011. 羌塘高原湖水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值特征及影响因素分析[J]. 湖泊科学, 23(5): 673-680. [Lei Y B, Yao T D, Zhang E L, et al. 2011. Characteristics of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  value in lakes on Qiangtang Plateau and its affected factors[J]. Journal of Lake Sciences, 23(5): 673-680.]
- 李保生, Hofmann Jürgen, 陈德牛, 等. 2010. 全新世大暖期时中国夏季风向西北大幅度漂移的一个古生物地层学证据[J]. 地球环境学报, 1(2): 133-138. [Li B S, Hofmann J, Chen D N, et al. 2010. A bio-stratigraphy evidence of summer monsoon drift on a large scale toward NW China during the Holocene Megathermal[J]. Journal of the Earth Environment, 1(2): 133-138.]
- 李炳元. 2000. 青藏高原大湖期[J]. 地理学报, 55(2): 174-182. [Li B Y. 2000. Pan-lake stage on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 55(2): 174-182.]
- 李炳元, 王富葆, 杨逸畴, 等. 1982. 试论西藏全新世古地理的演变[J]. 地理研究, 1(4): 26-35. [Li B Y, Wang F B, Yang Y C, et al. 1982. On the environmental evolution of Xizang (Tibet) in Holocene[J]. Geographical Research, 1(4): 26-35.]
- 李朝品. 1998. 淮河水系耳萝卜螺生态的初步研究[J]. 淮南矿业学院学报, 18(1): 57-60. [Li C P. 1998. A preliminary study on the ecology of *Radix auricularia* in Huaihe[J]. Journal of huainan mining college, 18(1): 57-60.]
- 李宽意, 刘正文, 李传红, 等. 2008. 太湖椭圆萝卜螺的食物来源分析[J]. 湖泊科学, 20(3): 339-343. [Li K Y, Liu Z W, Li C H, et al. 2008. Food sources of snail *Radix swinhoei* in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 20(3): 339-



- 343.]
- 李玉成, 徐永昌, 沈平. 1990. 淡水软体动物壳化石碳氧同位素组成及其在恢复古气候环境中的应用[J]. 沉积学报, 8(2): 105-111. [Li Y C, Xu Y C, Shen P. 1990. Lacustrine environment and climatic evolution recorded by isotope of inorganic carbon and oxygen[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 8(2): 105-111.]
- 刘翀, 朱立平, 王君波, 等. 2017. 基于MODIS的青藏高原湖泊透明度遥感反演[J]. 地理科学进展, 36(5): 597-609. [Liu C, Zhu L P, Wang J B, et al. 2017. Remote sensing-based estimation of lake water clarity on the Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography, 36(5): 597-609.]
- 刘海平, 叶少文, 杨雪峰, 等. 2014. 西藏尼洋河水生生物群落时空动态及与环境因子关系: 3. 大型底栖动物[J]. 湖泊科学, 26(1): 154-160. [Liu H P, Ye S W, Yang X F, et al. 2014. Spatio-temporal dynamics of aquatic organism community and their relationships to environment in Niyang River, Tibet: 3. Macrozoobenthos[J]. Journal of Lake Sciences, 26(1): 154-160.]
- 刘昊年, 黄思静, 胡作维, 等. 2007. 锶同位素在沉积学中的研究与进展[J]. 岩性油气藏, 19(3): 59-65. [Liu H N, Huang S J, Hu Z W, et al. 2007. Si tongweisu zai chenjixue zhong de yanjiu yu jinzhuan[J]. Lithologic Reservoirs, 19(3): 59-65.]
- 刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 1979. 中国经济动物志: 淡水软体动物[M]. 北京: 科学出版社: 49-57. [Liu Y Y, Zhang W Z, Wang Y X, et al. 1979. Economic animals of China: Freshwater mollusks[M]. Beijing, China: Science Press: 49-57.]
- 齐钟彦, 马绣同, 刘月英, 等. 1985. 中国动物图谱: 软体动物. 第四册[M]. 北京: 科学出版社. [Qi Z Y, Ma X T, Liu Y Y, et al. 1985. Chinese animal map: Mollusk. volume 4 [M]. Beijing, China: Science Press.]
- 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 2010. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社: 262-335. [Shen J, Xue B, Wu J L, et al. 2010. Lake sedimentation and environmental evolution [M]. Beijing, China: Science Press: 262-335.]
- 宋磊, 强明瑞, 金彦香, 等. 2013. 青藏高原东北部更尕海沉积软体动物壳体同位素初步研究[J]. 地球环境学报, 4(1): 1183-1190. [Song Lei, Qiang M R, Jin Y X, et al. 2013. A preliminary study on the isotopic of mollusks in the sediments of Gengnaihai, northeast of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of the Earth Environment, 4(1): 1183-1190.]
- 王瑞爱, 刘国华, 王春仁, 等. 2013. 我国耳萝卜螺 ITS 及 5.8 S rDNA 的克隆及序列分析[J]. 中国兽医科学, 43(8): 839-842. [Wang R A, Liu G H, Wang C R, et al. 2013. Cloning and sequence analysis of the ITS and 5.8 S rDNA of *Radix auricularia* isolates from China[J]. Veterinary Science in China, 43(8): 839-842.]
- 王泽长. 1963. 耳萝卜螺 *Radix auricularia* (L. 1758) 的形态结构[J]. 吉林大学学报: 医学版, 5(1): 130-134. [Wang Z C. 1963. The morphological structure of *Radix auricularia* (L. 1758)[J]. Journal of Jilin University: Medical Edition, 5(1): 130-134.]
- 吴敬禄, G H Schleser, 夏威夷, 等. 2001. 青藏高原东部兴措湖生物壳体元素及同位素记录的气候环境信息[J]. 湖泊科学, 13(2): 220-226. [Wu J L, Schleser G H, Xia W L, et al. 2001. Climatic signals recorded in stable isotope and trace elements of shells in Xincuo Lake, eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 13(2): 220-226.]
- 许翔, 孙继成, 魏国孝. 2009. 锶同位素在水文地质学研究中的应用进展[EB/OL]. 中国科技论文在线, 2009-10-09 [2018-02-01]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200910-70>. [Xu X, Sun J C, Wei G X. 2009. Development of strontium isotope in hydrogeology research[EB/OL]. Zhongguo keji lunwen zaixian, 2009-10-09[2018-02-01]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200910-70>.]
- 羊向东, 王苏民, 沈吉, 等. 2003. 藏南沉错钻孔硅藻组合与湖水古盐度定量恢复[J]. 中国科学: 地球科学, 33(2): 163-169. [Yang X D, Wang S M, Shen J, et al. 2003. Diatom assemblages and quantitative reconstruction for paleosalinity from a sediment core of Chencuo Lake, southern Tibet[J]. Science China: Earth Sciences, 33(2): 163-169.]
- 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 2018. 水文学研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(1): 36-45. [Yang D W, Xu Z X, Li Z, et al. 2018. Progress and prospect of hydrological sciences [J]. Progress in Geography, 37(1): 36-45.]
- 张灿, 周爱锋, 张晓楠, 等. 2015. 湖泊沉积记录的古洪水事件识别及与气候关系[J]. 地理科学进展, 34(7): 898-908. [Zhang C, Zhou A F, Zhang X N, et al. 2015. Identification of Paleoflood events by lacustrine archives and their links to climatic conditions[J]. Progress in Geography, 34(7): 898-908.]
- 张恩楼, Alan Bedford, Richard Jones, 等. 2006. 长江中下游地区典型湖泊摇蚊亚化石-湖水总磷定量模型研究[J]. 科学通报, 51(11): 1318-1325. [Zhang E L, Bedford A, Jones R, et al. 2006. A subfossil chironomid-total phosphorus inference model for lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 51(17): 2125-2132.]
- 朱大岗, 赵希涛, 孟宪刚, 等. 2003. 西藏纳木错扎弄淌剖面 10000 年以来的沉积间断和环境变化记录[J]. 地质力学学报, 9(4): 355-362. [Zhu D G, Zhao X T, Meng X G, et al. 2003. Records of depositional breaks and environmen-

- tal change at the Zhanongtang section of Nam Co, Tibet since 10 ka BP[J]. *Journal of Geomechanics*, 9(4): 355-362.]
- Benson L, Peterman Z. 1996. Carbonate deposition, Pyramid Lake subbasin, Nevada: 3. The use of  $^{87}\text{Sr}$  values in carbonate deposits (tufas) to determine the hydrologic state of paleolake systems[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 119(3): 201-213.
- Chen F H, Xu Q H, Chen J H, et al. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation [J]. *Scientific Reports*, 5: 11186.
- Chen F, Feng J L, Hu H P. 2016. Relationship between the shell geochemistry of the modern aquatic gastropod *Radix* and water chemistry of lakes of the Tibetan Plateau[J]. *Hydrobiologia*, 771(1): 239-254.
- Chen F, Feng J L, Hu H P, et al. 2017. Potential forcing mechanisms of Holocene lake-level changes at Nam Co, Tibetan Plateau: Inferred from the stable isotopic composition of shells of the gastropod *Radix*[J]. *Holocene*, 27(4): 594-604.
- Dia A N, Cohen A S, O'Nions R K, et al. 1992. Seawater Sr isotope variation over the past 300 kyr and influence of global climate cycles[J]. *Nature*, 356: 786-788.
- Dodd J R. 1965. Environmental control of strontium and magnesium in *Mytilus*[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 29(5): 385-398.
- Eisma D, Mook W, Das H. 1976. Shell characteristics, isotopic composition and trace-element contents of some euryhaline molluscs as indicators of salinity[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 19(1): 39-62.
- Flusche M A, Seltzer G, Rodbell D, et al. 2005. Constraining water sources and hydrologic processes from the isotopic analysis of water and dissolved strontium, Lake Junin, Peru [J]. *Journal of Hydrology*, 312(1): 1-13.
- Gaten E. 1986. Life cycle of *Lymnaea peregra* (Gastropoda: Pulmonata) in the Leicester canal, UK, with an estimate of annual production[J]. *Hydrobiologia*, 135(1-2): 45-54.
- Glöer P. 2002. Süßwassergastropoden Nord- und Mitteleuropas: Bestimmungsschlüssel, Lebensweise, Verbreitung[M]. Hackenheim, Germany: ConchBooks.
- Grove M J, Baker P A, Cross S L, et al. 2003. Application of strontium isotopes to understanding the hydrology and paleohydrology of the Altiplano, Bolivia-Peru[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1): 281-297.
- Hailemichael M, Aronson J L, Savin S, et al. 2002.  $\delta^{18}\text{O}$  in mollusk shells from Pliocene Lake Hadar and modern Ethiopian Lakes: Implications for history of the Ethiopian monsoon[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 186(1): 81-99.
- Hart W S, Quade J, Madsen D B, et al. 2004. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of lacustrine carbonates and lake-level history of the Bonneville paleolake system[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 116(9): 1107-1119.
- Hou J Z, Huang Y S, Zhao J T, et al. 2016. Large Holocene summer temperature oscillations and impact on the peopling of the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(3): 1323-1330.
- Hu H P, Feng J L, Chen F. 2017.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  in fossil shells of *Radix* sp. from the sediment succession of a dammed paleo-lake in the Yarlung Tsangpo Valley, Tibet, China[J]. *Boreas*, 46(3): 412-427.
- Hudson A M, Quade J, Huth T E, et al. 2015. Lake level reconstruction for 12.8-2.3 ka of the Ngangla Ring Tso closed-basin lake system, southwest Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 83(1): 66-79.
- Huntington K W, Saylor J, Quade J, et al. 2015. High late Miocene-Pliocene elevation of the Zhada Basin, southwestern Tibetan Plateau, from carbonate clumped isotope thermometry [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 127(1-2): 181-199.
- Huňová K, Kašný M, Hampl V, et al. 2012. *Radix* spp.: Identification of trematode intermediate hosts in the Czech Republic[J]. *Acta Parasitologica*, 57(3): 273-284.
- Jin Z D, Bickle M J, Chapman H J, et al. 2011. Ostracod Mg/Sr/Ca and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Sr geochemistry from Tibetan lake sediments: Implications for early to mid-Pleistocene Indian monsoon and catchment weathering[J]. *Boreas*, 40(2): 320-331.
- Jokinen E. 1992. The freshwater snails (mollusca: gastropoda) of New York State[D]. Albany, NY: The University of the State of New York.
- Jouet D, Skirnisson K, Kolářová L, et al. 2010. Molecular diversity of *Trichobilharzia franki* in two intermediate hosts (*Radix auricularia* and *Radix peregra*): A complex of species[J]. *Infection, Genetics and Evolution*, 10(8): 1218-1227.
- Korte C, Ullmann C V. 2018. Permian strontium isotope stratigraphy[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 450(1): 105-118.
- Leng M J, Marshall J D. 2004. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives[J]. *Quaternary Science Reviews*, 23(7): 811-831.
- Liu Z H, Henderson A C G, Huang Y S. 2006. Alkenone-based reconstruction of late-Holocene surface temperature and salinity changes in Lake Qinghai, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(13): 370-386.
- Lü H Y, Wu N Q, Liu K b, et al. 2011. Modern pollen distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the development of transfer functions for reconstructing Holocene environmental changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 30(7-8): 947-966.

- Mischke S, Almogi-Labin A, Ortal R, et al. 2010. Quantitative reconstruction of lake conductivity in the Quaternary of the Near East (Israel) using ostracods[J]. *Journal of Paleolimnology*, 43(1): 667-688.
- Mischke S, Bößneck U, Diekmann B, et al. 2010. Quantitative relationship between water depth and sub-fossil ostracod assemblages in Lake Donggi Cona, Qinghai Province, China[J]. *Journal of Paleolimnology*, 43(3): 589-608.
- Mischke S, Fuchs D, Riedel F, et al. 2002. Mid to Late Holocene palaeoenvironment of Lake Eastern Juyan (north-western China) based on ostracods and stable isotopes[J]. *Geobios*, 35(1): 99-110.
- Mischke S, Weynell M, Zhang C J, et al. 2013. Spatial variability of  $^{14}\text{C}$  reservoir effects in Tibetan Plateau lakes[J]. *Quaternary International*, 313-314: 147-155.
- Mischke S, Zhang C J, Fan R. 2015. Early to mid-Holocene lake high-stand sediments at Lake Donggi Cona, northeastern Tibetan Plateau, China- comment to the paper published by Dietze et al., *Quaternary Research* 79(2013), 325-336[J]. *Quaternary Research*, 83: 256-258.
- Økland J. 1990. Lakes and snails: Environment and Gastropoda in 1500 Norwegian lakes, ponds and rivers[M]. Oegstgeest, Netherlands: Balogh Scientific Books.
- Placzek C J, Quade J, Patchett P J. 2011. Isotopic tracers of paleohydrologic change in large lakes of the Bolivian Altiplano[J]. *Quaternary Research*, 75(1): 231-244.
- Surge D, Walker K J. 2006. Geochemical variation in microstructural shell layers of the southern quahog (*Mercenaria campechiensis*): Implications for reconstructing seasonality[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237(2): 182-190.
- Szymanek M. 2016. Stable isotope composition of the Holsteinian (MIS 11) freshwater snail *Valvata piscinalis* (O. F. Müller, 1774) from eastern Poland and its palaeoenvironmental implications[J]. *Journal of Quaternary Science*, 31(4): 622-630.
- Taft L, Mischke S, Wiechert U, et al. 2014. Sclerochronological oxygen and carbon isotope ratios in *Radix* (Gastropoda) shells indicate changes of glacial meltwater flux and temperature since 4200 cal yr BP at Lake Karakul, eastern Pamirs (Tajikistan)[J]. *Journal of Paleolimnology*, 52(1-2): 27-41.
- Taft L, Wiechert U, Riedel F, et al. 2012. Sub-seasonal oxygen and carbon isotope variations in shells of modern *Radix* sp. (Gastropoda) from the Tibetan Plateau: Potential of a new archive for palaeoclimatic studies[J]. *Quaternary Science Reviews*, 34(1): 44-56.
- Taft L, Wiechert U, Zhang H C, et al. 2013. Oxygen and carbon isotope patterns archived in shells of the aquatic gastropod *Radix*: Hydrologic and climatic signals across the Tibetan Plateau in sub-monthly resolution[J]. *Quaternary International*, 290-291: 282-298.
- Tian L D, Masson-Delmotte V, Stievenard M, et al. 2001. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D22): 28081-28088.
- Tyler J J, Leng M J, Sloane H J, et al. 2008. Oxygen isotope ratios of sedimentary biogenic silica reflect the European transcontinental climate gradient[J]. *Journal of Quaternary Science*, 23(4): 341-350.
- von Oheimb P V, Albrecht C, Riedel F, et al. 2011. Freshwater biogeography and limnological evolution of the Tibetan Plateau-Insights from a plateau-wide distributed gastropod taxon (*Radix* spp.)[J]. *PLoS ONE*, 6(10): e26307.
- Wang Y, Wang X M, Xu Y F, et al. 2008. Stable isotopes in fossil mammals, fish and shells from Kunlun Pass Basin, Tibetan Plateau: Paleo-climatic and paleo-elevation implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1-2): 73-85.
- Weynell M, Wiechert U, Zhang C J. 2016. Chemical and isotopic (O, H, C) composition of surface waters in the catchment of Lake Donggi Cona (NW China) and implications for paleoenvironmental reconstructions[J]. *Chemical Geology*, 435: 92-107.
- White D, Preece R C, Shchetnikov A A, et al. 2008. A Holocene molluscan succession from floodplain sediments of the upper Lena River (Lake Baikal region), Siberia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 27(9-10): 962-987.
- Wolf K, Chilingar G, Beales F. 1967. Elemental composition of carbonate skeletons, minerals, and sediments[J]. *Developments in Sedimentology*, 9: 23-149.
- Wünnemann B, Yan D D, Ci R. 2015. Morphodynamics and lake level variations at Paiku Co, southern Tibetan Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 246: 489-501.
- Yang X D, Kamenik C, Schmidt R, et al. 2003. Diatom-based conductivity and water-level inference models from eastern Tibetan (Qinghai-Xizang) Plateau lakes[J]. *Journal of Paleolimnology*, 30(1): 1-19.
- Young M R. 1975. The life cycles of six species of freshwater molluscs in the Worcester-Birmingham Canal[J]. *Journal of Molluscan Studies*, 41(6): 533-548.
- Yue Y J, Ritts B D, Graham S A, et al. 2004. Slowing extrusion tectonics: Lowered estimate of post-Early Miocene slip rate for the Altyn Tagh fault[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1): 111-122.
- Zhang E L, Jones R, Bedford A, et al. 2007. A chironomid-based salinity inference model from lakes on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Paleolimnology*, 38(4): 477-491.
- Zhao W, Zheng M P, Xu X Z, et al. 2005. Biological and eco-



- logical features of saline lakes in northern Tibet, China[J]. *Hydrobiologia*, 541(1): 189-203.
- Zhu L P, Peng P, Xie M P, Wang J B, et al. 2010. Ostracod-based environmental reconstruction over the last 8400 years of Nam Co Lake on the Tibetan Plateau[J]. *Hydrobiologia*, 648(1): 157-174.
- Gittenberger E, Janssen A W, Vereniging K N N. 1998. De Nederlandse zoetwatermollusken: Recente en fossiele weekdieren uit zoet en brak water[M]. Leiden, Netherlands: Nationaal Natuurhistorisch Museum Naturalis.
- Knecht V A, Walter J E. 1977. Vergleichende Untersuchung der Diäten von *Lymnaea auricularia* und *L. peregra* (Gastropoda: Basommatophora) im Zürichsee[J]. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 39(2): 299-305.

## Progress and prospects of research on shells of *Radix* sp. in lakes on the Tibetan Plateau

CHEN Feng<sup>1,2</sup>, FENG Jinliang<sup>3</sup>

(1. Department of Environmental Economics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China;

2. Institute of Surface Processes and Ecological Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan

030006, China; 3. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Palaeohydrology and palaeohydrochemical reconstruction have always been one of the most challenging issues in lake research, and one of the main reasons for this is the lack of suitable archives. *Radix* sp. fossil shells are widely distributed in lakes, alluvial-lacustrine successions, and high level lake sediments on the Tibetan Plateau. These biogenic carbonate shells are a kind of promising high-resolution carrier of the environmental information. For example, the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$  values of the *Radix* shells are controlled by the  $\delta^{13}\text{C}$  of lake water dissolved inorganic carbon; the  $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$  values provide useful information about the isotopic composition of the ambient waters; and the Sr/Ca ratio of the *Radix* shells is significantly positively correlated with both the Sr/Ca ratio and the conductivity of the lake water. Therefore, the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$  and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$  values and element of the *Radix* sp. shells have been gradually used to provide the palaeohydrological and palaeoclimatic information on the Tibetan Plateau and other regions in existing studies. In addition, the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{shell}}$  of *Radix* sp. reflects significantly the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of the water in which the shells were formed. However, there are still many scientific issues to be explored: it is unclear how the shells of *Radix* sp. record the hydrological, hydrochemical, and other information of its ambient water, and how we reconstruct palaeoenvironment information based on the fossil shells of *Radix* sp. As a new environmental information archive, *Radix* sp. and their following aspects in existing research on lakes of the Tibetan Plateau were reviewed in this study, including: the classification systems of *Radix* sp., habitat studies of *Radix* sp. and applications, proxies of *Radix* sp. shell ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , Sr/Ca and Mg/Ca), and palaeohydrochemical reconstruction in lakes, in order to explore the prospects for future study on *Radix* sp. This review found that significant unanswered questions still remain. For example, the influence of lake water chemistry and water depth on the distribution and survival of *Radix* sp. is unclear; it is not clear whether inter-species differences have an impact on the results of lake sediment and palaeoenvironmental studies; species level classification of *Radix* sp., oxygen isotope balance, and trace element need further study; and more environmental records of *Radix* sp. shells are needed, among others.

**Key words:** plateau lakes; *Radix* sp.; stable carbon and oxygen isotopes; strontium isotope; shell element ratio; palaeohydrochemical reconstruction