

川东地区早三叠世碳、锶同位素演化及地质意义

刘超飞, 程 晨, 张得鲁, 李晋芳, 范玖琳

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘 要: 早三叠世作为地球发展史上一个高度的反常时期, 人们对其关注程度远不及二叠纪/三叠纪界线。海相碳酸盐的碳、锶同位素组成与演化是了解重大突变期的生态环境事件和地球过程的重要切入点。根据前人公布的川东地区早三叠世碳、锶同位素数据, 绘制同位素演化散点图, 根据曲线的演化特征以及不同地区的对比, 分析其控制因素和地质过程。研究表明, 川东地区早三叠世锶同位素演化曲线单调上升, 具有很高的全球一致性, 由河流注入到海水的高放射成因的锶含量增加是加剧 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值单调上升的主要原因。碳同位素演化曲线在短时间内发生的一系列高频率、大幅度波动, 大量的磷酸盐注入海洋使菌藻类大量繁殖, 海洋的初级生产力增强, 有机碳埋藏量增大, 使 $\delta^{13}\text{C}$ 偏高。甲烷水合物吸收与释放等暂时性效应不是引起曲线来回波动的主要因素, 海洋水体倒转等持续性效应可以很好地解释曲线异常, 但对其驱动机制有待进一步研究。此外 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的同步研究并参考早寒武世是下一步研究的重点。

关键词: 早三叠世; 碳同位素; 锶同位素; 川东地区

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)02-0219-08

The evolution of carbon and strontium isotopes in eastern Sichuan area during Early Triassic and its geological significance

LIU Chao-fei, CHENG Chen, ZHANG De-lu, LI Jin-fang and FAN Jiu-lin

(Institute of Earth Science and Mapping Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The Early Triassic is a highly anomalous period in earth history, but little attention was given to this period in comparison with the Permian-Triassic boundary. The evolution of carbon and strontium isotopes of marine carbonate can give the information about the ecosystem function and environment change of the transitional period. According to the data concerning carbon and strontium isotopes during Early Triassic obtained from eastern Sichuan area, the isotope scattergram can be drawn, with which we can analyze the geological processes as well as the controlling factors. As shown by the scattergram, strontium isotope evolution curve increases monotonously, which is in high consistency with features of other areas in the world, suggesting that the increased content of highly radiogenic strontium was the leading factor for this phenomenon. In the carbon isotope scattergram, there exists violent fluctuation, which can be attributed to the migration of a large quantity of phosphate into the ocean which caused the blooming of the algae and the enhancement of the ocean primary productivity. The absorption and release of methane hydrate were not the main factors causing the fluctuation, whereas the persistent effects, such as the sea water reversion, can well explain the anomalous curve. Nevertheless, the mechanism should be further investigated. In addition, it is necessary to combine the organic carbon with the inorganic carbon and to consider the Early Cambrian.

Key words: Early Triassic; carbon isotope; strontium isotope; eastern Sichuan area

收稿日期: 2014-03-10; 修订日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(41372164)

作者简介: 刘超飞(1988-), 男, 硕士研究生, 从事同位素地球化学研究, E-mail: feixiang2286@163.com。

早三叠世是地球发展史上的特殊时期,代表了古、中生代过渡时期的生态重建与复苏(黄可可等, 2013)。二叠纪末期发生了显生宙最大规模的一次生物集体灭绝事件,该事件持续时间不长,但是在很长的时间内影响着环境变化和生物进化事件(Jenkyns, 2003; Korte *et al.*, 2004)。近年来众多学者反复研究二叠纪/三叠纪界线,以期找出生物大灭绝和地质环境之间的相互关系,然而在紧接着二叠纪/三叠纪之交的早三叠世,作为地球发展史上一个高度反常的时间段,人们对早三叠世的关注程度和它的历史地位极不相称(童金南等, 2009; Song *et al.*, 2012)。早三叠世是二叠纪/三叠纪之交生物集体灭绝后地球系统的重要变革时期,由于当时的气候环境,地球上很多地方都以巨厚的碎屑岩沉积为主,碳酸盐岩沉积较少,古海水的信息获取困难(Baud *et al.*, 2007; 陈剑波, 2012),因此早三叠世是显生宙海水碳、锶同位素研究最为薄弱的时间段。海相碳酸盐岩 C、Sr 同位素分析是古气候、古海洋环境研究的一种常用手段(严兆彬等, 2005; 孙卫东等, 2012),近年来,耦合同位素的理论计算和分析技术得到迅速发展,在全球碳循环、气候环境变化等领域展示了良好的发展前景(孙卫东等, 2012),研究海相碳酸盐岩稳定同位素组成对了解海平面变化、构造运动、全球气候变化、生物灭绝及古海水的温度、盐度等具有重要意义(Faure *et al.*, 1995; Beauchamp and Baud, 2002)。

1 国内外研究现状

早三叠世由于其独特的沉积特征,获取古海水信息相对困难,因此,早三叠世碳、锶同位素曲线的研究地区相对较少,演化曲线相对于显生宙其它时期分辨率较差。

Atudorei 等(1997)对冈瓦纳古路北部地区的多个剖面研究,揭示了早三叠世海相碳酸盐岩的碳同位素具有极具振荡的演化型式。Zakharov 等(2000)对俄罗斯远东 Primorye 地区早三叠世碳同位素的研究, Korte 等(2005)、Horacek 等(2007)对伊朗地区以及 Horacek 等(2007)对日本的 Kamrua 和 Kyushu 岛的研究,共同显示了早三叠世碳同位素演化发生了一系列高频率、大幅度的波动,尽管波动幅度有所差异,但是显示出相同的演化模式。

中国南方具有相对连续的碳酸盐岩沉积,是早

三叠世碳、锶同位素研究的核心地区(黄可可等, 2013),中国南方早三叠世碳同位素研究主要集中在下扬子地区和南盘江盆地的大贵州滩地区,左景勋等(2003)对安徽巢湖剖面三叠世海相碳酸盐碳同位素的研究, Payne 等(2004)对贵州关刀剖面三叠世海相碳酸盐碳同位素的研究,对比了两个剖面碳同位素演化曲线,早三叠世呈现了 3~4 次大幅度的波动,到中三叠世趋于平缓,由于古地理因素或者地方性事件的影响,不同剖面的波动幅度有所差异,但总体上具有相同的演化模式。

由于早三叠世海相碳酸盐沉积较少,能准确反映古海水信息的样品更少,已公布的早三叠世海水锶同位素数据十分有限,而且缺乏良好的一致性(黄思静等, 2008)。McArthur 等(2001)收集了 2001 年以前的 44 个晚二叠世到早三叠世海相碳酸盐锶同位素组成数据, Korte 等(2003)公布了早三叠世的 27 个牙形石的锶同位素数据。从已公布的早三叠世海水的锶同位素组成数据和相应的演化曲线来看,虽然数据密度相对较小,但是可以清楚地看出早三叠世锶同位素演化曲线是单调上升的。中国早三叠世碳酸盐岩的锶同位素数据相对更少。

2 研究背景

图 1 是 Corsetti 等(2005)综合国内外早三叠世碳、锶同位素数据绘制的同位素演化曲线,从图上可以看出碳同位素演化曲线在早三叠时期来回波动明显,而锶同位素演化曲线是单调上升,二叠纪/三叠纪界线附近的生物灭绝线可以看作是海水碳、锶同位素异常的开端,早三叠时期的研究更应该得到人们的重视和关注。

中国南方具有研究古、中生代之交海洋生物和环境突变事件的最佳条件,也是当前国际上相关研究中取得成果最多的地区之一(陈剑波, 2012; 黄可可等, 2013)。川东地区是研究二叠世-早三叠世古海洋学问题的核心地区,这里相对连续的碳酸盐岩沉积和相对丰富的生物地层记录,为早三叠世锶、碳同位素研究提供了有利条件。本文所用数据的样品主要采自重庆中梁山剖面和四川华蓥山剖面。

选择理想的样品对研究碳、锶同位素演化至关重要,然而在早三叠世时期由于生物灭绝事件的影响,获取古海洋学的优势样品(腕足类,牙形虫等)十分困难,本文所用数据的样品只有 Korte 等(2003)

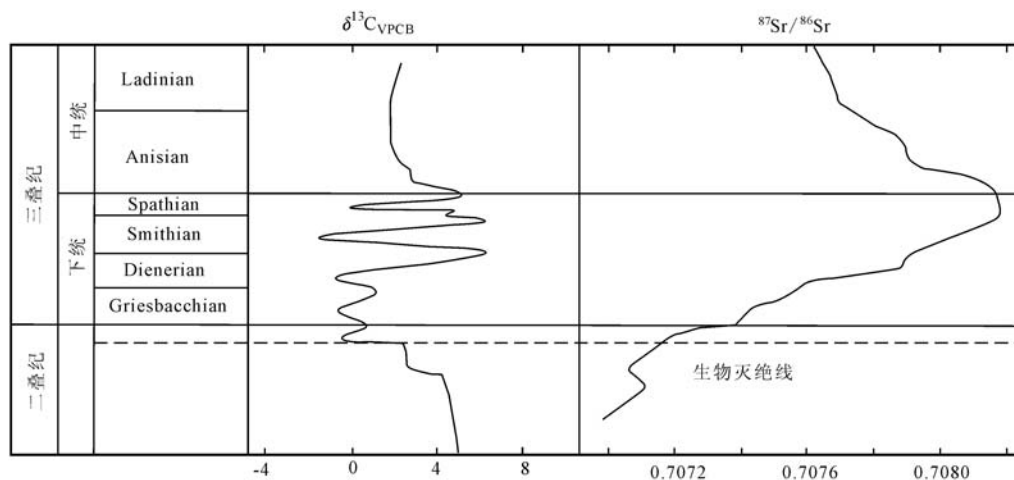


图1 早三叠世碳、锶同位素曲线(Corsetti 等, 2005)

Fig. 1 Carbon isotope and strontium isotope curve in Lower Triassic (after Corsetti *et al.*, 2005)

研究锶同位素的样品中包含一些腕足类,其余的都是全岩样品,川东地区的海相碳酸盐岩样品具有较高的锶含量、较低的锰含量和很低的锰/锶比,显示出对古海水信息具有很好的代表性。

3 川东地区早三叠世锶同位素演化

古海水的锶同位素组成可以作为地球演化的指纹,反映各个阶段的地质作用和地质过程(McArthur, 1994),同时也是了解地层间相互关系的工具(Veizer *et al.*, 1997)。海水的锶同位素组成的不断变化主要受控于两个因素:陆源锶,主要来源于大陆硅酸盐的风化,通过河流注入海洋,具有相对较高的锶同位素比值;幔源锶,主要来源于大洋中脊的地幔热液,锶同位素比值相对较低(Taylor and Lasaga, 1999)。此外,还有少量来源于地下水和碳酸盐岩的成岩作用(Veizer, 1989)。Burke等(1982)公布第一条显生宙锶同位素演化曲线以来,国外许多学者又对每个时代精确地划分(Koepnick *et al.*, 1990; Bruckschen *et al.*, 1995)。目前比较流行的是Veizer(1999)发布的比较完整的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 演化曲线。

根据获得数据绘制了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和采样厚度的散点图如图2b所示,图2a是根据Veizer等(1999)、McArthur等(2001)、Korte等(2003)报道的来源于全球的样品锶同位素数据绘制。

从图2可以看出,川东地区早三叠世锶同位素演化曲线与全球锶同位素演化曲线基本一致,都是

单调上升的,开始上升速率较慢,后来急剧上升,到早中三叠世分界处达到最大值0.7082附近。川东地区早三叠世锶同位素演化趋势与目前国际上已有的锶同位素演化曲线相似性较好,说明全球地质事件是早三叠世海水锶同位素演化的主控因素。

锶同位素是指示海平面升降变化的灵敏指示剂(黄思静等, 2005; Tripathiliu *et al.*, 2013),锶同位素演化与海平面的升降呈负相关。从锶同位素的来源分析,海平面不断上升,陆地面积减小,由风化作用带入海水的陆源锶减少,此外海平面的上升多伴随着剧烈的海底热液活动,进入海水的幔源锶增加,因此 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值应该降低(胡作维等, 2008; 黄思静等, 2011),然而,早三叠世在全球海平面上升的背景下反而出现了锶同位素比值的急剧上升,且上升速率是显生宙以来之最,说明二叠纪/三叠纪界线的生物灭绝事件及其引起的环境变化成为早三叠世海水锶同位素组成的主控因素。早三叠世全球古陆缺少植被保护,强烈的风化侵蚀作用造成陆源锶增加,即使在陆地面积不断减少的情况下注入海水的高放射成因的锶含量大大增加,使得海水的锶同位素快速上升。

早三叠世 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值上升幅度先慢后快,物理、化学风化作用起主导作用,气候环境如温度、湿度等因素有利于风化作用的进行(Galfetti *et al.*, 2007),然而早三叠后半段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值上升速率加快并具有全球一致性,可以推测,当时全球的气候是高温多雨的,陆地上的河流广泛并及时将风化产物输送到海洋,这种气候环境也为后期的生物的快速

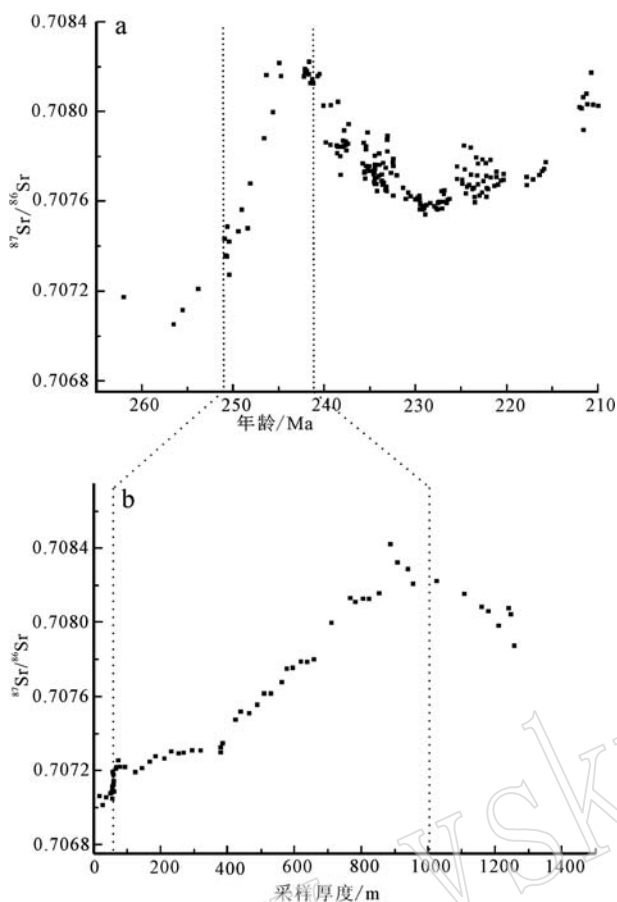


图2 川东地区及全球早三叠世锶同位素演化曲线

Fig. 2 Strontium isotope evolution curve in east Sichuan area and in Lower Triassic strata of the world

a—据 Veizer 等(1999), McArthur 等(2001), Korte 等(2003)等, 此图引用了 217 个数据, 地质年龄按照 Young 等(1996)等公布的地质年代表; b—据黄思静等(2012)等, 此图引用 77 个数据, 地质年龄按照 Mundil 等(2004)划分的界线

a—after Veizer (1999), McArthur *et al.* (2001), Korte *et al.* (2003), *et al.* the 217 data refer to the timescale provided by Young *et al.* (1996); b—after Huang Sijing *et al.* (2012), the 77 data refer to the timescale provided by Mundil *et al.* (2004)

复苏提供了有利条件。

总而言之, 川东地区早三叠世的锶同位素演化曲线具有很高的全球一致性, 生物灭绝事件之后全球缺乏植被、高温、多雨, 腐蚀性极强的酸雨加速对裸露大陆的侵蚀, 由河流注入到海水的高放射成因的锶含量增加是加剧 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值单调上升的主要原因。

4 川东地区早三叠世碳同位素演化

古海水的碳同位素存在于有机碳和无机碳两大碳库内, 对碳同位素不同储库端元值的研究, 可以知

道它们对物质组成所做的贡献, 根据不同地质条件对同位素组成的影响, 反演地质过程中的控制因素的变化(孙卫东等, 2012)。海水碳同位素组成随时间波动反映有机碳埋藏速率的变化, 影响有机碳埋藏速率的主要因素有: 全球气候变化, 生物数量突变以及全球海平面的变化(崔莹等, 2009)。

发生在二叠—三叠纪转折时期的生物集群灭绝事件及相应的碳同位素变化反映了全球的碳循环产生了巨大变化(Tong *et al.*, 2002; 黄思静等, 2012)。国内外学者关于早三叠世碳同位素的研究已取得一定进展, 例如 Korte 等(2005)对欧洲和西亚海相碳酸盐的碳同位素研究, Horacek 等(2007)对意大利北部海相碳酸盐碳同位素的研究, 以及我国地质工作者对中国下扬子地区包括安徽巢湖和浙江煤山等剖面的碳同位素研究, 基本特征是在二叠纪/三叠纪之交的无机碳同位素的显著负漂移之后, 早三叠世持续发生的一系列高频率、大幅度波动。

本文根据黄思静等(2012)公布的川东地区的早三叠世碳酸盐岩样品数据, 绘制了 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 和采样厚度图, 如图3所示。

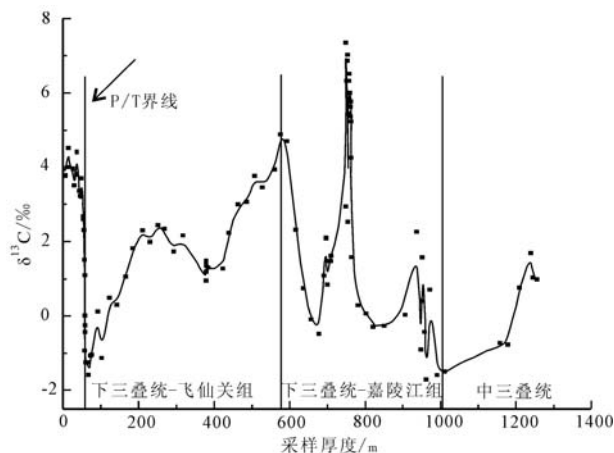


图3 川东地区碳同位素演化曲线[据黄思静等(2012), 此图引用 107 个数据, 地质年龄按照 Mundil 等(2004)划分的界线]

Fig. 3 Carbon isotope curve of Lower Triassic strata in eastern Sichuan area (after Huang Sijing *et al.*, 2012, the 107 data refer to the timescale provided by Mundil *et al.*, 2004)

从图3可以看出, 川东地区碳同位素演化曲线在飞仙关组和嘉陵江组连续4次出现快速升降变化, 在很短的时间跨度内, $\delta^{13}\text{C}$ 从 -2‰ 变化到 8‰ , 然而从前人公布数据来看, 在与早三叠世相邻二叠纪和中三叠世海水的碳同位素变化十分稳定, 几乎

都处于2‰到4‰之间。如何解释无机碳同位素多次出现峰值以及 $\delta^{13}\text{C}$ 值极高问题,对于恢复早三叠世的海洋环境以及了解当时的地质过程具有重大意义。

碳循环受到碳在大气圈、水圈、岩石圈、生物圈各储库之间碳通量变化的影响(Rahama *et al.*, 2011)。对于早三叠世 $\delta^{13}\text{C}$ 值极高问题,认为是由于当时海洋初级生产力增大以及有机碳埋藏量增大导致的,早三叠世在生物、沉积、地球化学方面与其他时代明显不同。陆地上几乎没有煤的沉积,浅海缺乏生物礁,深海缺少黑硅石沉积(Jonathan *et al.*, 2004; Retallack, 2011),陆生生物积累的有机碳微乎其微,早三叠世海洋生物菌藻类在生物灭绝后优先复苏并成为海洋中有机碳的主要贡献者(Song *et al.*, 2012),不同地区的海洋生产力由于海洋环境以及古地理环境的差异而略有不同,由此可以解释早三叠世各剖面具有类似的碳同位素演化模式,但不同剖面的变化幅度不一致的问题。对于早三叠世海洋菌藻类大量繁殖的驱动机制目前尚未查明,笔者认为,由早三叠锶同位素演化得出,早三叠世大部分时期内的气候环境是高温多雨,温室气体浓度较大,风化作用十分强烈,导致磷酸盐循环的加强,大量的磷酸盐注入海洋使菌藻类大量繁殖。

那么如何解释无机碳同位素在短时间内连续多次的升降变化?对于二叠纪/三叠纪界线处的碳同位素异常,很多学者提出不同的观点,笔者将其分为两类,一类称之为“暂时性效应”,另一类称为“持续性效应”。第一类包括①天然气水合物的不稳定造成的大量的甲烷气体释放;②火山喷发出的 CO_2 ;③外来星体的撞击;第二类主要包括①海洋水体倒转;②海洋碳循环重组。然而从川东地区早三叠世碳同位素演化曲线可以看出碳异常波动持续时间较长,因此所谓的暂时性效应可能不是引起异常的主要因素。此外,有学者指出碳同位素的来回波动可能是由于甲烷水合物吸收与释放,然而资料显示,海洋中的甲烷水合物一次大规模的释放之后,要重新形成大约需要10 Ma,显然与事实不符,另外,早三叠时期全球海平面的上升会抑制甲烷水合物的大量释放。海洋水体倒转事件可以解释早三叠碳同位素来回波动异常,海洋水体倒转事件来源于Knoll等(1996)提出的一种古海洋生物地球化学演化模型,在晚二叠世、早三叠世时期,大陆聚合时,大陆冰川逐渐消失,洋流循环减慢,深水环境处于缺氧状态。

持续的光合作用不断把大气中 CO_2 转变为有机质,随着有机质的积累埋藏,大气 CO_2 浓度降低,浅层海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 升高。有机质在缺氧的深水环境中,被还原细菌分解,产生大量的 CO_2 、 HCO_3^- 、 H_2S ,深水中 $\delta^{13}\text{C}$ 降低。然而,大气中 CO_2 浓度降低,温室效应的能力减弱使得大陆冰川和海冰的形成,深层碳酸盐过饱和的缺氧海水上翻,使得浅层海水恢复成为原来的状态。中国南方地区的错时沉积相,如扁平砾石砾岩、蠕虫状灰岩的广泛分布,为这一假说提供有力证据,但是对于海水交换的驱动机制还有待进一步探究。

目前还有些学者认为碳同位素的正漂移是由于生物有限复苏的结果,那么碳同位素的来回波动是否与生物复苏的期次和强度相对应,很多问题都难以答复。关于碳循环的记录不仅在无机碳酸盐中体现,也会记录在有机质中(黄可可等,2013), $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 是否具有同步的演化趋势对于判断碳同位素的漂移是成岩过程的影响还是受控于外生碳循环系统的异常具有重要意义,因此,川东地区有机碳同位素需要进一步的研究。

显生宙另外一次碳同位素发生大规模波动的时间段是在寒武纪早期,大约来回波动8次,持续时间长达20 Ma,这两个时段具有大致相似的情况,波动特征十分相似,生态群落等级低,海底生物堆叠深度低,遗迹组构指数较低等(Knoll and Carroll, 1999)。因此参照早寒武世的碳同位素研究过程,对于研究早三叠世碳同位素异常的驱动机制具有重要意义。

总而言之,川东地区早三叠世无机碳同位素与其它剖面具有类似的演化模式,即短时间内高频率、大幅度的波动。具体表现为连续4次快速波动并出现峰值, $\delta^{13}\text{C}$ 值极高,最高达到8‰。早三叠世大部分时期内的温度高、湿度大,温室气体浓度大,风化作用异常显著(Jenkyns, 2003),磷酸盐循环加强,大量的注入海洋使菌、藻类大量繁殖,海洋的初级生产力增强,有机碳埋藏量增大(Galfetti *et al.*, 2007),暂时性效应如甲烷的吸收与释放可能不是引起异常的主要因素,海洋水体倒转以及海洋碳循环重组可能是碳同位素来回波动的影响因素,对于其驱动机制有待进一步研究。此外,参照早寒武世的碳同位素研究过程,可能对于了解早三叠世碳同位素异常的驱动机制具有重要意义。

5 结论

(1) 早三叠世,作为地球发展史上一个高度反常的时间段,人们对其关注程度和它的历史地位极不相称,中国川东地区相对连续的碳酸盐岩沉积,为早三叠世碳、锶同位素研究提供有利条件。

(2) 川东地区早三叠世锶同位素演化曲线与全球锶同位素演化曲线基本一致,都是单调上升的,开始上升速率较慢,后来急剧上升,到早中三叠世分界处达到最大值。可以推测早三叠世全球海水锶同位素演化具有一致性,说明全球地质事件是海水锶同位素演化的主控因素。生物灭绝事件之后全球缺乏植被、高温、高浓度温室气体形成腐蚀性极强的酸雨加速对裸露大陆的侵蚀,由河流注入到海水的高放射成因的锶含量增加是加剧 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值单调上升的主要原因。

(3) 川东地区碳同位素演化曲线在飞仙关组和嘉陵江组连续4次出现快速升降变化,在很短的时间跨度内, $\delta^{13}\text{C}$ 从 -2‰ 变化到 8‰ ,波动幅度大且 $\delta^{13}\text{C}$ 值极高。早三叠世时期内的气候环境是温暖湿润,温室气体浓度较大,风化作用十分强烈,磷酸盐循环加强,大量的磷酸盐注入海洋使菌藻类大量繁殖,海洋的初级生产力增强,有机碳埋藏量增大,使 $\delta^{13}\text{C}$ 偏高。

(4) 甲烷水合物吸收与释放等暂时性效应不是引起曲线来回波动的主要因素,海洋水体倒转等持续性效应可以很好解释曲线异常,蠕虫状灰岩等错时相的广泛分布也说明当时海水翻转导致海底胶结作用增强,但对其驱动机制有待进一步研究。此外 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 同步研究并参考早寒武世是下一步研究的重点。

References

- Atudorei V and Baud A. 1997. Carbon isotope events during the Triassic [J]. *Albertiana*, 20: 45~49.
- Baud A, Richoz S and Pruss S. 2007. The lower Triassic anachronistic carbonate faces in space and time[J]. *Global and Planetary Change*, 55: 81~89.
- Beauchamp B and Baud A. 2002. Growth and demise of Permian biogenic chert along northwest Pangea: Evidence for end-Permian collapse of the thermohaline circulation[J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoclimatology*, 184: 37~63.
- Bruckschen P, Bruhn F, Veizer J, *et al.* 1995. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic evolution of the Lower Carboniferous seawater: Dinantian of western Europe[J]. *Geology*, 100: 63~81.
- Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, *et al.* 1982. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time[J]. *Geology*, 10: 516~519.
- Chen Jianbo. 2012. Study on Lower Triassic stratigraphy of high resolution geochemistry for Chao hu Section, Anhui Province: implication for paleo-environment[D]. China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Corsetti Frank A, Baud Aymon, Marenco Pedro J, *et al.* 2005. Summary of Early Triassic carbon isotope records [J]. *General Paleontology*, 4: 473~486.
- Cui Ying, Jian Bo and Jiangqi Yangyi. 2009. Fluctuations of stable carbon isotopes around the Permian-Triassic Boundary in Huaying of Sichuan, South China: its characteristics and biogeochemical origin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(3): 461~471(in Chinese with English abstract).
- Faure K, de Wit M J and Willis J P. 1995. Late Permian global coal hiatus linked to $\delta^{13}\text{C}$ depleted CO_2 flux into the atmosphere during final consolidation of Pangea[J]. *Geology*, 23: 507~510.
- Galfetti Thomas, Bucher Hugo, Brayard Arnaud, *et al.* 2007. Late Early Triassic climate change: Insights from carbonate carbon isotopes, sedimentary evolution and ammonoid paleobiogeography[J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoclimatology*, 243: 394~411.
- Horacek M, Richoz S, Brandner R, *et al.* 2007. Evidence for recurrent changes in Lower Triassic oceanic circulation of the Tethys: The $\delta^{13}\text{C}$ record from marine sections in Iran[J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoclimatology*, 252: 355~369.
- Hu Zuowei, Huang Sijing, Qing Hairuo, *et al.* 2008. Strontium isotope composition and evolution of marine Triassic and compared with the global in Huaying Mountain, Eastern Sichuan[J]. *Science in China Earth Science*, 38(2): 157~166(in Chinese).
- Huang Keke, Huang Sijing, Lan Yefang, *et al.* 2013. Review of the carbon isotope of early triassic carbonates[J]. *Advances in Earth Science*, 28(3): 357~365(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Huang Keke, Lü Jie, *et al.* 2012. The carbon isotope composition and evolution of the seawater in Early Triassic—the research of eastern Sichuan[J]. *Science in China Earth Science*, 42(10): 1508~1522(in Chinese).
- Hung Sijing, Huang Yu, Lan Yefang, *et al.* 2011. A comparative study on strontium isotope composition of dolomites and their coeval seawater in the Late Permian-Early Triassic, NE Sichuan basin[J].

- Acta Petrologica Sinica, 27(12): 3 831~3 842(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Qing Hairuo, Huang Peipei, *et al.* 2008. Seawater strontium isotope composition and evolution from Late Permian to Early Triassic[J]. Science in China: Earth Science, 38(3): 273~283(in Chinese).
- Huang Sijing, Wu Sujuan, Sun Zhilei, *et al.* 2005. Seawater strontium isotopes and paleo-oceanic events over the past 260 Ma[J]. Earth Science Frontiers, 12(2): 133~141(in Chinese with English abstract).
- Jenkyns H C. 2003. Evidence for rapid climate change in the Mesozoic-Palaeogene greenhouse world[J]. The Royal Society, 361: 1 885~1 916.
- Jonathan L, Payne Daniel J, *et al.* 2004. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the End-Permian extinction[J]. Science, 305: 506~509.
- Knoll A H, Bambach R K, Canfield D E, *et al.* 1996. Comparative earth history and late Permian mass extinction[J]. Science, 273: 452~457.
- Knoll A H and Carroll S B. 1999. Early animal evolution: Emerging views from comparative biology and geology[J]. Science, 284: 2 129~2 137.
- Koepnick R B, Denison R E, Burke W H, *et al.* 1990. Construction of the Triassic and Jurassic portion of the Phanerozoic curve of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. Chemical Geology, 80: 327~349.
- Korte C and Kozur H. 2005. Carbon isotope stratigraphy across the Permian/Triassic boundary at Jolfa (NW-Iran), Peitlerkofel (Sas de Putia, Sass de Putia), Pufels(Bula, Bulla), Tesero(all three-Southern Alps, Italy) and Gerennavár(Bukk Mts, Hungary)[J]. Journal of Alpine Geology, 47: 119~135.
- Korte C, Kozur H W, Bruckschen P, *et al.* 2003. Strontium isotope evolution of Late Permian and Triassic seawater[J]. Geochim Cosmochim Acta, 67: 47~62.
- Korte C, Kozur H W, Joachimski M M, *et al.* 2004. Carbon, sulfur, oxygen and strontium isotope records, organic geochemistry and biostratigraphy across the Permian/Triassic boundary in Abadeh, Iran[J]. Int. J. Earth Sci. 93: 565~581.
- McArthur J M. 1994. Recent trends in strontium isotope stratigraphy [J]. Terra Nova, 6: 331~358.
- McArthur J M, Howarth R J and Bailey T R. 2001. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: best fit to the marine Sr-isotope curve for 0-509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age[J]. J. Geol., 109: 155~170.
- Mundil R, Ludwig K R, Metcalfe L, *et al.* 2004. Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed system Zircons [J]. Science, 305: 1 760~1 763.
- Payne J L, Lehmann D J, Wei J Y, *et al.* 2004. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction [J]. Science, 305: 506~509.
- Rahaman Waliur, Singh Sunil K, Sinha Rajiv, *et al.* 2011. Sr, C and O isotopes in carbonate nodules from the Ganga Plain: Evidence for recent abrupt rise in dissolved $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of the Ganga [J]. Chemical Geology, 285: 184~193.
- Retallack G J, Sheldon N D, Carr P F, *et al.* 2011. Multiple Early Triassic greenhouse crises impeded recovery from Late Permian mass extinction [J]. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology, 308: 233~251.
- Song H J, Tong J N, Xiong Y L, *et al.* 2012. The large increase of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ -depth gradient and the end-Permian mass extinction[J]. China Earth, 55: 1 101~1 109.
- Sun Weidong, Wei Jiangang, Zhang Zhao Feng, *et al.* 2012. Research status advance in isotope geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 31(6): 560~564(in Chinese with English abstract).
- Taylor A S and Lasaga A C. 1999. The role of basalt weathering in the Sr isotope budget of the oceans[J]. Chem. Geol., 161: 199~214.
- Tong Jinnan, Qiu Haiou, Zhao Laishi, *et al.* 2002. Lower Triassic inorganic carbon isotope excursion in Chaohu, Anhui Province, China [J]. Journal of China University of Geosciences, 13(2): 98~106.
- Tong Jinnan and Yin Hongfu. 2009. Review of the living things and environment of early Triassic[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 48(3): 497~508(in Chinese).
- Tripathi Jayant K, Bock Barbara and Rajamani V. 2013. Nd and Sr isotope characteristics of Quaternary Indo-Gangetic plain sediments: Source distinctiveness in different geographic regions and its geological significance[J]. Chemical Geology, 344: 12~22.
- Veizer J. 1989. Strontium isotopes in seawater through time[J]. Earth Plane, 17: 141~167.
- Veizer J, Azmy K, Bruckschen P, *et al.* 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chem. Geol., 161: 59~88.
- Veizer J, Buhl D, Diener A, *et al.* 1997. Strontium isotope stratigraphy: Potential resolution and event correlation[J]. Palaeogeogr. Palaeocl., 132: 65~77.
- Yan Zhaobin, Guo Fusheng, Pan Jiayong, *et al.* 2005. Application of C, O and Sr isotope composition of carbonates in the research of paleoclimate and paleoceanic environment[J]. Geology and Mineral Resources Magazine, 20(1): 53~56(in Chinese).

- Young G C and Laurie J R. 1996. An Australian Phanerozoic Timescale [M]. Oxford University Press, 136~148.
- Zakharov Y D, Ukhaneva N G, Lgnatyev A V, *et al.* 2000. Latest Permian and Triassic carbonates of Russia: New paleontological findings stable isotopes, Ca-Mg ratio, and correlation[J]. *Development in Palaeontology and Stratigraphy*, 18: 141~171.
- Zuo Jingxun, Tong Jinnan, Qiu Haiou, *et al.* 2003. Carbon and oxygen isotopic stratigraphic correlation and its paleoenvironment significance during the Lower Triassic, Chaohu, Anhui Province, China [J]. *Geology Geochemistry*, 31(3): 26~33(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈剑波. 2012. 安徽巢湖下三叠统高分辨率地球化学地层研究及其古环境意义[D]. 中国地质大学.
- 崔莹, 建波, 江崎洋一. 2009. 四川华蓥二叠—三叠系界线剖面稳定碳同位素变化特征及其生物地球化学循环成因[J]. *北京大学学报*, 45(3): 461~471.
- 胡作维, 黄思静, Qing Hairuo, 等. 2008. 四川东部华蓥山海相三叠系锶同位素组成演化及其与全球对比[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(2): 157~166.
- 黄可可, 黄思静, 兰叶芳, 等. 2013. 早三叠世海相碳酸盐碳同位素研究进展[J]. *地球科学进展*, 28(3): 357~365.
- 黄思静, 黄可可, 吕杰, 等. 2012. 早三叠世海水的碳同位素组成与演化—来自四川盆地东部的研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(10): 1508~1522.
- 黄思静, 黄喻, 兰叶芳, 等. 2011. 四川盆地东北部晚二叠世—早三叠世白云岩与同期海水锶同位素组成的对比研究[J]. *岩石学报*, 27(12): 3831~3842.
- 黄思静, Qing Hairuo, 黄培培, 等. 2008. 晚二叠世—早三叠世海水的锶同位素组成与演化[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(3): 273~283.
- 黄思静, 吴素娟, 孙治雷, 等. 2005. 中新生代海水锶同位素演化和古海洋事件[J]. *地学前缘*, 12(5): 133~141.
- 孙卫东, 韦刚健, 张兆峰, 等. 2012. 同位素地球化学发展趋势[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 31(6): 560~564.
- 童金南, 殷鸿福. 2009. 早三叠世生物与环境研究进展[J]. *古生物学报*, 48(3): 497~508.
- 严兆彬, 郭福生, 潘家永, 等. 2005. 碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 20(1): 53~56.
- 左景勋, 童金南, 邱海鸥, 等. 2003. 巢湖地区早三叠世碳氧同位素地层对比及其古生态环境意义[J]. *地质地球化学*, 31(3): 26~33.