

国家自然科学基金项目

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 资助出版

四川省教育厅科技计划理科重点项目

成都理工大学“中青年骨干教师培养计划”项目

# 四川华蓥山 海相三叠系

## 锶同位素地层学

胡作维 黄思静 著

地质出版社

科 学 基 金 项 目

四川省教育厅科技计划理科重点项目

成都理工大学“中青年骨干教师培养计划”项目

资助出版

# 四川华蓥山海相三叠系 锶同位素地层学

胡作维 黄思静 著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书以四川华蓥山地区海相三叠系碳酸盐岩和膏岩为研究对象,以翔实的野外剖面实测、矿物岩石观察、地球化学分析为依据,并结合前人的研究成果,详细描述了实测剖面的岩石学和沉积相特征,系统研究了样品的成岩蚀变性,归纳分析了锶同位素组成与演化的主要控制因素,并初步尝试了关键地层界线的锶同位素地层学年龄标定。

本书可作为高等院校、科研单位地质类相关专业的教学科研参考用书,也可供从事油气和矿产地质勘探的地质工作者参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

四川华蓥山海相三叠系锶同位素地层学 / 胡作维, 黄思静著. — 北京: 地质出版社, 2018. 3

ISBN 978 - 7 - 116 - 10588 - 1

I. ①四… II. ①胡…②黄… III. ①海

相—三叠纪—锶同位素—同位素地质学—研究—四川

IV. ①P588. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 244158 号

SICHUAN HUAYINGSHAN HAIXIANG SANDIEXI SITONGWEISU DICENGXUE

责任编辑: 罗军燕 孙春迪

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 66554650 (邮购部); (010) 66554540 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

印 刷: 固安华明印业有限公司

开 本: 787 mm × 960 mm 1/16

印 张: 8

字 数: 160 千字

版 次: 2018 年 3 月北京第 1 版

印 次: 2018 年 3 月河北第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 10588 - 1

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

# 前 言

由于任一地质时期全球范围内海水 Sr 在同位素组成上是均一的 (McArthur et al., 1992), 从而导致地质历史中海水的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值是随着时间而变化的, 因而地质历史中未经成岩蚀变的、代表原始海水组成的海相沉积物的锶同位素组成及其演化是研究全球事件、进行全球对比的重要手段之一。随着人们对海相内源沉积物成岩蚀变理解的深入、样品溶解技术与仪器分析精度的提高以及不同时期海水锶同位素数据的积累, 目前国际上已公布大量不同地质时期 (几乎涵盖了显生宙和前寒武纪所有沉积地层) 的锶同位素组成数据及其演化曲线。然而, 与显生宙的其他时限, 尤其是白垩纪及其以后的地质时代相比, 国际上三叠纪海水的锶同位素研究程度相对较低, 已公布的锶同位素组成数据十分有限 (Martin et al., 1995; Veizer et al., 1999; McArthur et al., 2001; Korte et al., 2003)。中国南方地区三叠系十分发育, 很多地方的下、中三叠统均为海相地层, 因而是锶同位素地层学研究的理想地区和层位, 但除黄思静 (1997)、朱创业 (1998)、朱创业等 (1999) 公布了少量数据外, 目前我国三叠系海相地层锶同位素研究基本为空白领域, 这与我国三叠系海相地层的发育程度极不相称。

目前与中国南方地区海相三叠系有关的研究工作虽多, 但与锶同位素地层学有关的研究工作仍处于起步阶段, 尤其是关于四川华蓥山地区海相三叠系锶同位素组成与演化、关键地质界线年龄标定等方面更是鲜有涉及。本书选题来自国家自然科学基金项目、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目以及四川省教育厅科技计划理科重点项目, 以四川华蓥山地区海相三叠系碳酸盐岩和膏岩为研究对象, 以

翔实的野外剖面实测、矿物岩石观察、地球化学分析为依据，并结合前人的研究成果，系统研究了四川华蓥山地区海相三叠系铯同位素地层学。全书主要由七部分组成：第一章简述了当前地质历史中（尤其是三叠纪）海水铯同位素组成研究概况以及本书的选题依据、研究意义、研究内容与技术路线；第二章简述了四川华蓥山地区地质研究简况、构造与沉积演化、地层以及早—中三叠世古地理等区域地质背景；第三章详细描述了实测剖面的岩石学特征、沉积相特征；第四章系统研究了样品成岩蚀变性评估方法、结果及其讨论；第五章详细介绍了样品铯同位素组成实验分析的准备工作和操作流程；第六章归纳分析了铯同位素组成与演化的主要控制因素；第七章初步尝试了关键地层界线的铯同位素地层学年龄标定。

值得注意的是，尽管目前我国铯同位素地层学研究在分析仪器、纯化处理、测试精度等方面已经取得了长足进步，并获得了国际同行的高度认可，但相对国际较为成熟的铯同位素地层学研究而言，国内相关研究仍显稚嫩，尤其是在样品类型挑选、样品质量控制、前处理技术、生物地层学精度、地层年龄设定、数据拟合处理等细节方面仍然落后于国际当前研究水平，直接导致目前已有的国际显生宙以来海水铯同位素数据库或演化曲线中很少有来自我国学者的数据。同时，由于本书获得的资料和数据有限，且对前人大量研究成果消化吸收不够，使得本书的一些观点和认识有可能存在主观性和片面性，但若本书能起到抛砖引玉的作用，激发大家进一步深入研究不同时期海水铯同位素组成与演化的热情，就已经达到了本书出版的初衷。

国家自然科学基金项目（41372113、41102063）、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目（20115122120004）、四川省教育厅科技计划理科重点项目（14ZA0071）、成都理工大学人事处“中青年骨干教师培养计划”项目（201532、201208）资助了出版经费；同时，本人多年来始终得到加拿大 University of Regina 地质学系 Hairuo Qing 教授、成都理工大学沉积地质研究院各位领导和老师的关心、帮

助和鼓励，尤其是恩师黄思静教授多年来对我的培养与指导，我向前迈进的每一小步都凝聚着恩师的心血；李云高级实验师在书稿校对过程中做了大量工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中恐存在错误和遗漏之处，敬请各位读者批评指正。

胡作维

于成都理工大学沉积地质研究院

2017年6月

# 目 录

## 前 言

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| 第1章 绪 言                      | ( 1 )  |
| 1.1 铈同位素地层学简述                | ( 1 )  |
| 1.2 三叠纪全球海水铈同位素组成与演化         | ( 5 )  |
| 1.2.1 三叠纪海水铈同位素组成与演化的总体特征    | ( 5 )  |
| 1.2.2 目前公布的铈同位素组成与演化曲线不同点的比较 | ( 6 )  |
| 1.2.3 三叠纪海水铈同位素组成与演化的主要控制因素  | ( 8 )  |
| 1.3 选题依据及研究意义                | ( 10 ) |
| 1.3.1 选题依据                   | ( 10 ) |
| 1.3.2 研究意义                   | ( 11 ) |
| 1.4 研究内容及技术路线                | ( 11 ) |
| 1.4.1 研究内容                   | ( 11 ) |
| 1.4.2 技术路线                   | ( 12 ) |
| 第2章 区域地质背景                   | ( 13 ) |
| 2.1 区域地质研究                   | ( 13 ) |
| 2.2 构造与沉积演化                  | ( 15 ) |
| 2.3 地层                       | ( 16 ) |
| 2.3.1 寒武系                    | ( 16 ) |
| 2.3.2 奥陶系                    | ( 16 ) |
| 2.3.3 志留系                    | ( 16 ) |
| 2.3.4 石炭系                    | ( 17 ) |
| 2.3.5 二叠系                    | ( 18 ) |
| 2.3.6 三叠系                    | ( 18 ) |
| 2.3.7 侏罗系                    | ( 19 ) |

|            |                   |             |
|------------|-------------------|-------------|
| 2.4        | 四川盆地早、中三叠世区域古地理概况 | (19)        |
| 2.4.1      | 早三叠世早期(印度期)       | (20)        |
| 2.4.2      | 早三叠世晚期(奥伦尼克期)     | (21)        |
| 2.4.3      | 中三叠世早期(安尼期)       | (21)        |
| <b>第3章</b> | <b>剖面特征</b>       | <b>(23)</b> |
| 3.1        | 剖面位置              | (23)        |
| 3.2        | 剖面描述              | (24)        |
| 3.2.1      | 飞仙关组              | (26)        |
| 3.2.2      | 嘉陵江组              | (26)        |
| 3.2.3      | 雷口坡组              | (26)        |
| 3.3        | 沉积学特征             | (27)        |
| 3.3.1      | 岩石学特征             | (27)        |
| 3.3.2      | 沉积相特征             | (32)        |
| 3.3.3      | 沉积环境演化            | (34)        |
| <b>第4章</b> | <b>成岩蚀变性评估</b>    | <b>(35)</b> |
| 4.1        | 评估方法              | (35)        |
| 4.2        | 实验方法              | (37)        |
| 4.3        | 评估结果              | (38)        |
| 4.3.1      | 阴极发光性             | (38)        |
| 4.3.2      | 微量元素含量            | (42)        |
| 4.3.3      | 微量元素比值            | (45)        |
| 4.3.4      | 综合评估结果            | (46)        |
| 4.4        | 讨论                | (47)        |
| 4.4.1      | Mn含量的主要控制因素       | (47)        |
| 4.4.2      | Sr含量的主要控制因素       | (48)        |
| 4.4.3      | Mn含量与Sr含量之间的关系    | (51)        |
| 4.4.4      | 不同类型岩石对成岩蚀变的抵抗能力  | (53)        |
| <b>第5章</b> | <b>铍同位素组成实验分析</b> | <b>(56)</b> |
| 5.1        | 准备工作              | (56)        |
| 5.1.1      | 样品粉碎              | (56)        |



|              |                           |               |
|--------------|---------------------------|---------------|
| 5.1.2        | 试剂纯化                      | ( 58 )        |
| 5.2          | 样品溶解                      | ( 58 )        |
| 5.3          | 锶的分离与纯化                   | ( 58 )        |
| 5.4          | 锶同位素的质谱分析                 | ( 60 )        |
| <b>第 6 章</b> | <b>锶同位素组成与演化的主要控制因素</b>   | <b>( 63 )</b> |
| 6.1          | 锶同位素组成与演化特征               | ( 63 )        |
| 6.1.1        | 锶同位素组成特征                  | ( 63 )        |
| 6.1.2        | 锶同位素演化曲线特征                | ( 66 )        |
| 6.2          | 主要控制因素                    | ( 70 )        |
| 6.2.1        | 下三叠统 ( 飞仙关组和嘉陵江组 )        | ( 70 )        |
| 6.2.2        | 中三叠统 ( 雷口坡组 )             | ( 71 )        |
| <b>第 7 章</b> | <b>关键地层界线的锶同位素地层学年龄标定</b> | <b>( 73 )</b> |
| 7.1          | 二叠系/三叠系界线年龄标定             | ( 73 )        |
| 7.1.1        | 采样位置                      | ( 74 )        |
| 7.1.2        | 分析结果                      | ( 74 )        |
| 7.1.3        | 成岩蚀变性评估                   | ( 75 )        |
| 7.1.4        | 锶同位素组成特征                  | ( 76 )        |
| 7.1.5        | 锶同位素年龄标定                  | ( 79 )        |
| 7.2          | 飞仙关组/嘉陵江组界线年龄标定           | ( 81 )        |
| 7.2.1        | 采样位置                      | ( 81 )        |
| 7.2.2        | 分析结果                      | ( 82 )        |
| 7.2.3        | 成岩蚀变性评估                   | ( 82 )        |
| 7.2.4        | 锶同位素组成特征                  | ( 83 )        |
| 7.2.5        | 锶同位素年龄标定                  | ( 84 )        |
| 7.3          | 嘉陵江组/雷口坡组界线年龄标定           | ( 87 )        |
| 7.3.1        | 采样位置                      | ( 88 )        |
| 7.3.2        | 分析结果                      | ( 88 )        |
| 7.3.3        | 成岩蚀变性评估                   | ( 90 )        |
| 7.3.4        | 锶同位素组成特征                  | ( 93 )        |
| 7.3.5        | 锶同位素年龄标定                  | ( 94 )        |

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| 7.4 三叠系海相/陆相地层界线年龄标定 ..... | ( 97 )  |
| 7.5 小结 .....               | ( 97 )  |
| 主要认识 .....                 | ( 100 ) |
| 英文摘要 ( ABSTRACT ) .....    | ( 102 ) |
| 参考文献 .....                 | ( 104 ) |
| 图版说明及图版 .....              | ( 115 ) |

# 第 1 章 绪 言

地层学是研究地球表层成层岩石（包括沉积岩、火山岩和由沉积岩及火山岩变质而成的变质岩）的学科，是地质科学奠基性的重要学科，其对于区域地质调查、矿产资源勘查、地质环境评价以及国土灾害监测都是必不可少的基础工作。早在 17 世纪后期，为了建立地层之间的时间关系，逐渐形成了一些关于地层的基本概念，其中地层层序律说明地层沉积的原始位置近于水平，老者在下，新者在上；生物层序律认为不同的地层含有不同的化石，可利用不同化石特征鉴别地层。在 19 世纪，地层学的主要工作是利用化石逐步建立了统一的地层系统，这就是年代地层学（夏邦栋，1995）。到 19 世纪末，人们发现同时期形成的地层具有不同的岩性，这种横向变化引出了岩相横变的概念；德国学者 Walther 把岩相横变同海侵作用联系起来，解释了时间界面与岩相界面的关系，被称为瓦尔特定律（Walther, 1894），其后逐步建立了岩石地层学。20 世纪 30 年代以来，详细的地层和古生物群的对比研究建立了生物地层学。20 世纪 50 年代以后，由于研究范围的扩大和研究手段的发展，出现了不少新的地层学分支学科，如化学地层学、磁性地层学、地震地层学、事件地层学、层序地层学、生态地层学、定量地层学等。

尽管早在 1948 年瑞典地球化学家 Wickman 就已经提出锶同位素在古海洋学和沉积地质学等领域中有着重要的应用价值（Wickman, 1948），但由于存在对海相碳酸盐矿物成岩蚀变的认识、分析方法与测定精度以及数据积累程度等方面的问题（黄思静等，2005a），致使海水碳酸盐锶同位素研究并没有获得长足的进步。直到 34 年后，Burke et al. (1982) 的研究成果才使人们开始对用于锶同位素地球化学研究的沉积岩样品范围及其成岩蚀变对锶同位素分析的影响有了进一步的理解（黄思静等，2001a），促使其在沉积地质学和地层学研究中进入了实用阶段，经过深入研究，进而形成了一门新的学科分支——锶同位素地层学（Strontium Isotope Stratigraphy, 简称为 SIS）。目前，锶同位素地层学已经成为化学地层学重要的分支之一。

## 1.1 锶同位素地层学简述

由于 Sr 在海水中的残留时间 ( $\approx 10^6$  a) 大大长于海水的混合时间 ( $\approx 10^3$  a)，

因而任一地质时期全球范围内海水 Sr 在同位素组成上是均一的 (McArthur et al., 1992), 从而导致地质历史中海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值是时间的函数, 即海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值是随着时间而变化的。目前按  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值所能测定的精度 ( $\pm 0.00002$ ), 现代全球范围内海水和海洋贝壳的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值是一致的 (Dia et al., 1992; Paytan et al., 1993)。

海水的铯同位素组成主要受壳源和幔源两个来源铯的控制: 壳源铯主要由大陆古老岩石风化提供, 其  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的全球平均值为 0.7119 (Palmer et al., 1989); 幔源铯主要由洋中脊热液系统提供, 其  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的全球平均值为 0.7035 (Palmer et al., 1985)。各种全球事件, 如全球构造运动、风化速率、洋壳增生速率、洋中脊热液系统变化、造山事件、冰川活动、古气候、全球海平面变化以及全球灾变性事件等, 都会以不同方式改变海水中壳源铯和幔源铯的相对比值, 因而它们是海水铯同位素组成与演化最为重要的控制因素。地质历史中未经成岩蚀变的、代表原始海水组成的海相碳酸盐 (也包括硫酸盐、磷酸盐及其他一些可进行铯同位素分析的内源沉积物) 的铯同位素组成及其演化是研究全球事件, 进行全球对比的重要手段 (Cortecci et al., 1994; Ingram et al., 1994; Allegre et al., 1996; Ebneith et al., 1997; Kato et al., 1997; Veizer et al., 1997; Denison et al., 1998a)。

尽管铯同位素地球化学早在 20 世纪 50 年代已奠定了基础, 其后得到了快速发展, 被广泛用于测定复杂物质的年龄、探索火成岩和变质岩的成因及其对应的矿床成因、地壳及上地幔演化等问题的科学研究中 (Faure and Powell, 1972), 得到了国内外众多专家学者的密切关注和深入研究, 并取得了许多重要的成果。同时, 虽然早在 1948 年著名的瑞典地球化学家 Wickman 就已经认识到铯同位素在沉积地质学研究中有着重要价值 (Wickman, 1948; Faure and Powell, 1972), 但是铯同位素地球化学在沉积地质学和油气地质学中一直未能得到广泛应用。

在 20 世纪 80 年代以前, 海相碳酸盐铯同位素以及铯同位素地层学研究没有获得长足的发展, 这与人们对海相碳酸盐矿物成岩蚀变的认识、仪器的分析精度以及数据的积累程度等因素有关。Burke et al. (1982)、Koepnick et al. (1985) 在设备改善和较多数据积累的基础上, 证明了显生宙以来海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值是随时间而变化的, 用海相沉积物的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值来确定其年龄和进行对比是完全可行的; 同时, Burke et al. (1982) 也使人们对样品的成岩蚀变问题有了进一步的理解, 从而使海相碳酸盐铯同位素以及铯同位素地层学研究进入实用阶段。从此以后, 这一学科在世界范围内获得了迅速发展, 人们纷纷研究各时代海相沉积物的铯同位素组成, 进行全球对比, 并将其作为研究全球地质事件的有效工具之一。已有的研究如第四纪 (Allegre et al., 1996)、晚始新世-现代 (Mead et al., 1994)、中新世 (Miller et al., 1991; Martin et al.,

1999)、渐新世和上新世 (Dingle et al., 1997)、渐新世 - 中新世 (Oslick et al., 1994)、新近纪 (Hodell, 1991; Gleason et al., 2002)、早新生代 (Zachos et al., 1999)、晚白垩世 (McArthur et al., 1992、1993、1994a、2000a; McLaughlin et al., 1995; Steuber, 2001、2003)、早白垩世 (Jenkyns et al., 1995)、白垩纪 (Ingram et al., 1994; Bralower et al., 1997)、中侏罗世 - 早白垩世 (Price et al., 2002)、侏罗纪 (Weedon et al., 1999; McArthur et al., 2000b、2000c)、三叠纪 - 侏罗纪 (Koepnick et al., 1990)、二叠纪 - 三叠纪 (Martin et al., 1995; Korte et al., 2003)、石炭纪 - 二叠纪 (Popp et al., 1986a; Denison et al., 1994)、早石炭世 (Cummins et al., 1994)、晚泥盆世 (Carpenter et al., 1991)、中泥盆世 (Diener et al., 1996; Ebner et al., 1997)、志留纪 - 泥盆纪 (Denison et al., 1997)、志留纪 (Bertram et al., 1992; Ruppel et al., 1996; Azmy et al., 1999)、奥陶纪 - 志留纪 (Qing et al., 1998)、寒武纪 - 奥陶纪 (Gao et al., 1991; Denison et al., 1998a; Ebner et al., 2001)、中 - 晚寒武世 (Montañez et al., 1996)、早寒武世 (Derry et al., 1994)、寒武纪 (Montañez et al., 2000)、元古宙 - 寒武纪 (Kaufman et al., 1996)、元古宙 (Derry et al., 1989、1992; Kaufman et al., 1991、1992、1993、1996; Jacobsen et al., 1999; Walter et al., 2000; Melezhik et al., 2001; Ray et al., 2003)。随着用于海相碳酸盐锶同位素测试样品溶解技术和成岩蚀变评估方法的逐渐完善和深入 (McArthur, 1994b; Bailey et al., 2000; Reinhardt et al., 2000), 以及地质历史中海水锶同位素数据的不断积累, Howarth 和 McArthur 等从 1996 年开始着手建立地质历史中海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值数据库, 自 1997 年完成了 206Ma 以来的版本 8/96 (Howarth et al., 1997) 以后, 2001 年已发展到了 509Ma 以来的版本 3 (McArthur et al., 2001), 目前这个数据库已经更新到版本 4b (08/2004)。在这些数据库中, 所有的锶同位素数据都有相应的地质年龄与之对应。从国际上近年来锶同位素地层学的发展趋势和完善程度来看, 其成为海相沉积物有效的定年工具之一是完全有可能的。

在国内, 对海相内源沉积物的碳、氧、硫同位素组成及其年代效应研究远比锶同位素成熟, 积累的碳、氧、硫同位素数据量远远大于锶同位素。但事实上, 海相碳酸盐锶同位素的年代效应、地层学意义和全球可比性远远大于碳、氧、硫同位素, 国际上对代表原始海水的海相内源沉积物锶同位素数据的关注程度也远远大于碳、氧、硫同位素, 这是近年来海相碳酸盐锶同位素研究迅猛发展的重要原因之一。有关海相沉积物锶同位素的研究成果从 20 世纪 70 年代开始被大量介绍到中国, 尽管和国外的锶同位素地层学研究有一定距离, 但中国学者也开始了海相沉积物 (及一些用于对比的非海相沉积物) 的锶同位素组成研究。杨杰东 (1988)、李华芹等 (1994) 较早地介绍使用了“锶同位素地



层学”这一术语。目前, 尽管国内还没有系统开展铍同位素地层学的研究, 但不乏有关学者的有益尝试:

在元古宙时期, 张自超 (1995)、李华芹等 (1994) 研究了我国元古宙典型剖面的铍同位素组成, 获得的数据相对较多, 共提供了约 120 个海相碳酸盐的铍同位素数据, 并讨论了海相碳酸盐的铍同位素组成与海平面变化等地质事件的关系, 李华芹等 (1994) 的研究还建立了相应的演化曲线。

在古生代时期, 由于中国古生代的海相地层十分发育, 国内有关学者先后进行了一些海相地层的铍同位素研究, 但样品数量很少, 且十分分散, 缺乏系统性, 样品零星分布在新疆、河北、四川、广西、安徽、贵州、湖北、陕西等十几个采样点 (杨杰东等, 1994; 陈小明等, 1992; 王忠诚等, 1993; 张自超, 1995; 张廷山等, 1998; 江茂生等, 2002), 其中一些样品还是以研究矿床成因为目的, 没有考虑样品是否代表了原始海水的铍同位素组成。该时期最为系统的铍同位素地层学研究, 主要是成都理工大学 (包括其前身成都地质学院和成都理工学院) 在国家自然科学基金资助下, 针对上扬子地区古生代海相碳酸盐沉积同位素演化与主要地质事件之间关系的研究, 并获得了大量未经成岩蚀变的晚古生代海相碳酸盐样品的铍同位素数据, 同时建立了演化曲线 (卢武长等, 1992a、1992b、1994; 崔秉荃等, 1993; 黄思静, 1993a、1997; 黄思静等, 1999、2001b、2002a、2002b; 田景春, 1993; 田景春等, 1995; 石和等, 2002、2003a、2003b、2003c)。

在中新生代时期, 孙志国等 (1996) 通过西沙珊瑚礁铍同位素研究古环境并反演青藏高原的隆升; 孙志国 (2003) 又研究了黄河三角洲贝壳堤的铍同位素特征, 从铍同位素记录获得 4 次陆源物质对渤海湾的强输入事件和两次海退事件; 潘家华等 (2002) 根据太平洋海山磷酸盐的铍同位素组成确定了其形成年代; 苏晓云等 (2003) 根据黄土铍同位素组成探讨了海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值变化的原因; 陈骏等 (1997) 利用海相和陆源碳酸盐铍同位素组成的显著差异成功解决了我国西部黄土碳酸盐的原生和次生问题; 刘丛强等 (1999) 利用黄土中  $\text{CaCO}_3$  含量及其铍同位素组成反映古气候波动; 刘传联等 (1996)、王世杰等 (1995) 利用海相碳酸盐和非海相碳酸盐铍同位素组成的差别成功解决了我国东部一些中新生代盆地的海相、陆相问题。这些研究大都利用了相应时代 (或其他需要对照时代) 已有的海相碳酸盐 (或其他内源沉积物) 铍同位素数据或演化曲线, 从而解决了一些多年悬而未决的问题, 因而也具有较高的研究水平。另外, 谢渊等 (2000) 报道了青藏高原北部羌塘盆地中侏罗世碳酸盐铍同位素组成, 公布了 15 个样品的铍同位素数据; Huang et al. (2005)、黄思静等 (2004, 2005b)、石和等 (2005, 2006) 对西藏晚白垩世海相碳酸盐铍同位素及其演化曲线进行了研究, 并进行了全球对比。到目前为止, 国内已公布的中

新生代（不含三叠纪）海相地层的锶同位素数据已接近 100 个，但就三叠系而论，在该方面国内的有关研究几乎是空白。

## 1.2 三叠纪全球海水锶同位素组成与演化

总的说来，三叠纪海水的锶同位素研究程度相对较低，与中生代的其他时限，尤其是与白垩纪及其以后的地质时代相比（McArthur et al., 2000a; Steuber, 2001; Palmer et al., 2004; Sari et al., 2004; Huang et al., 2005; 黄思静等, 2004），已公布的三叠纪海水锶同位素数据十分有限。目前，只有少数学者系统公布了二叠纪末 - 三叠纪海水的锶同位素数据及相应的演化曲线（Martin et al., 1995; Veizer et al., 1999; McArthur et al., 2001; Korte et al., 2003）。

### 1.2.1 三叠纪海水锶同位素组成与演化的总体特征

虽然不同学者所公布的二叠纪末 - 三叠纪海水的锶同位素数据及相应的演化趋势存在差别，但全球不同地区的锶同位素演化曲线仍有很多的相似之处，显示全球地质事件仍然是海水锶同位素组成最为重要的控制因素。二叠纪末 - 三叠纪海水的锶同位素演化具有以下总体特征：

1) 早三叠世或二叠纪末 - 早三叠世  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值急剧上升（图 1.1、图 1.2）。由于不能确定二叠纪末 - 三叠纪初  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值最小值是出现在 250Ma 左右的二叠纪/三叠纪界线附近，还是出现在晚二叠世末（见后边的有关讨论），因而该  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的上升可能发生在早三叠世，也可能在晚二叠世就已经开始。

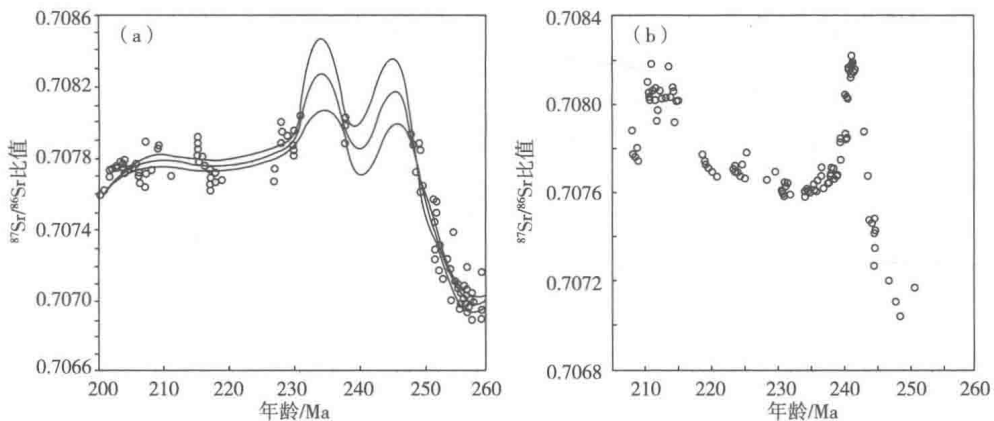


图 1.1 (a) 经 LOWESS 拟合的二叠纪末 - 三叠纪海水的锶同位素演化曲线（据 McArthur et al., 2001）；(b) 二叠纪末 - 三叠纪海水的锶同位素组成（据 Korte et al., 2003）

2) 早三叠世/中三叠世界线附近 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的下降(但 McArthur et al. (2001) 的铯同位素演化曲线中没有该下降值(图 1.1a))。该时间间隔中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值下降开始的时间在 240Ma 附近的早三叠世/中三叠世界线附近(图 1.1b, 图 1.2), 而且下降速度很快, 单位时间内 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的下降速率可能是显生宙之首 (Veizer et al., 1999), 从 Veizer et al. (1999) 的数据计算, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化率超过了  $0.0001/\text{Ma}$ 。

3) 中三叠世中期 - 晚三叠世早期是一个海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相对稳定的时期, 时间大致在 235 ~ 220Ma, 该时间间隔海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化不到 0.0001, 变化率小于  $6.67 \times 10^{-6}/\text{Ma}$ , 这在 McArthur et al. (2001) 公布的演化曲线(图 1.1a)、Korte et al. (2003) 公布的铯同位素数据(图 1.1b) 以及 Veizer et al. (1999) 提供的 2540 个铯同位素数据的三叠纪部分(图 1.2) 都是基本一致的。

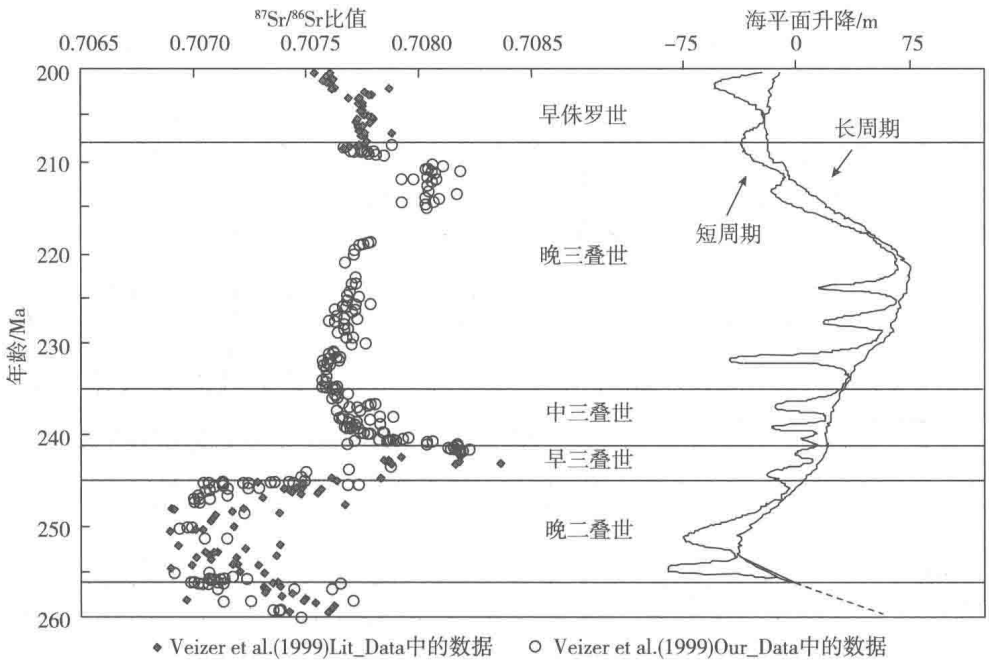


图 1.2 二叠纪末 - 三叠纪海水的铯同位素组成和演化趋势以及相应的海平面变化曲线  
 图中数据点据 Veizer et al. (1999); 海平面变化曲线据 Haq et al. (1987), 虚线段是本书添加;  
 地质年代界线据 Halland et al. (1990)

### 1.2.2 目前公布的铯同位素组成与演化曲线不同点的比较

McArthur et al. (2001) 以最佳拟合方式建立了 509Ma 以来海水的铯同位素曲线, 但其中的三叠纪部分没有给出一个完整的统一曲线(图 1.1a), 尤其是



230 ~ 245 Ma 时间段的 LOWESS 拟合的可信度很低, 其原因是所使用的数据量太少。到目前为止, 不同学者所公布的二叠纪末 - 三叠纪海水的锶同位素数据及其相应的演化趋势存在的差别主要体现在以下三个方面:

1) McArthur et al. (2001) 的曲线中, 240 Ma 附近具有锶同位素演化的低值 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值小于 0.70755), 而 Korte et al. (2003) 公布的锶同位素数据中, 240 Ma 附近具有锶同位素组成高值 (241.36 Ma 时达到了 0.708219 的三叠纪海水锶同位素组成的最大值) (图 1.1b); 在 Veizer et al. (1999) 提供的 2540 个锶同位素数据中, 三叠纪锶同位素组成的最大值也在 240 Ma 附近 (图 1.2), 数值与 Korte et al. (2003) 接近 (三个 241.4 Ma 样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的平均值为 0.708188)。

2) 在已公布的锶同位素数据和演化曲线中, 二叠纪/三叠纪界线附近的锶同位素最小值具有不同的年龄值: ① McArthur et al. (2001) 的海水锶同位素演化曲线中, 该最小值的年龄在 260 Ma 附近 (图 1.1a), 如果按 245 Ma 作为二叠纪/三叠纪界线 (Halland et al., 1990), 该最小值出现在晚二叠世末; ② Korte et al. (2003) 公布的锶同位素数据 (图 1.1b)、Veizer et al. (1999) 提供的 2540 个锶同位素数据的三叠纪部分 (图 1.2) 以及 Denison et al. (1994) 公布的北美晚古生代 (含三叠纪初) 海相碳酸盐的锶同位素数据 (图 1.3a) 中, 该最小值都在 250 Ma 左右的二叠纪/三叠纪界线附近; ③ 中国上扬子地区石炭系 - 三叠系底部海相碳酸盐的锶同位素组成和相应的演化曲线 (图 1.3b) (黄思静等, 2001b) 中, 该最小值出现在二叠系/三叠系界线黏土层之下。已有报道中国南方地区二叠系/三叠系界线黏土岩 (白黏土层) 的锆石年龄为  $(251.2 \pm 3.4)$  Ma (Claoue - Long et al., 1991), 并认为二叠纪/三叠纪界线年龄值以 250 Ma 为好 (殷鸿福, 1994), 因而中国南方地区的海水锶同位素最小值也出现在晚二叠世的时间段, 这与 McArthur et al. (2001) 的锶同位素演化曲线 (图 1.1a) 类似, 但仍与已报道的众多曲线不符 (图 1.1b, 图 1.2, 图 1.3a), 中国南方地区锶同位素演化曲线的这种情况是否与地方性的事件 (如晚二叠世上扬子地区玄武岩喷发事件发生带来深源锶的影响) 有关, 这应是中国学者在以后的工作中应解决的问题。

3) 210 ~ 220 Ma 附近 (晚三叠世中期以后) 海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值再次升高。Korte et al. (2003) 公布的锶同位素数据 (图 1.1b) 和 Veizer et al. (1999) 提供的 2540 个锶同位素数据的三叠纪部分 (图 1.2) 都显示了该时间间隔中海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的上升,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值最大值所对应的时间都大致为 211 ~ 213 Ma, 但 McArthur et al. (2001) 的锶同位素演化曲线在 210 ~ 220 Ma 附近的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值则几乎没有变化 (图 1.1a)。