中国科学: 地球科学 2011 年 第 41 卷 第 12 期: 1829 ~ 1839
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

寒武系碳同位素漂移事件的全球对比性分析

樊茹[①②③*], 邓胜徽[①②③], 张学磊[①]

① 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
② 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083;
③ 中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室, 北京 100083
* E-mail: fanru@petrochina.com.cn

收稿日期: 2010-12-07; 接受日期: 2011-07-13
国家科技重大专项课题(编号: 20082X05004-001)及中国石油天然气股份有限公司重大专项课题(编号: 2008E-0702)资助

摘要 通过分析目前寒武系已有的δ^{13}C 数据, 从中至少可筛选出 4 次具有跨板块对比潜力的碳同位素漂移事件. 由下至上标定为: (1) 寒武系底界幅度介于 4‰~10‰的负漂移, 相当于“BACE”; (2) 纽芬兰统幸运阶之顶至第 2 阶底, 幅度大于 5‰的正漂移, 相当于“ZHUCE”; (3) 第二统与第三统界线处δ^{13}C 最小值为–3‰~–5‰的负漂移, 对比为“ROECE”; (4) 芙蓉统排碧阶底部幅度约 4‰的正漂移——“SPICE”. 这 4 期碳同位素漂移与海洋环境重大变化及其引发的生物演化事件在时间上存在关联性, 表现为: “BACE”与同期的大洋缺氧事件以及艾迪卡拉纪生物灭绝事件对应; “ZHUCE”与扬子地台第 3 小壳化石组合带对应; “ROECE”与同期三叶虫绝灭及海进事件对应; “SPICE”则与同期三叶虫绝灭及海退事件对应. 另有一些源于区域剖面的漂移, 其是否具有大区之间的对比意义, 尚需对不同板块的同时代地层做更多的数据测试方可定论.

关键词
碳同位素
漂移事件
寒武系
全球对比意义

自 20 世纪 80 年代, 碳同位素地层学开始被用于划分寒武系地层界线. 早期数据出自摩洛哥[1]、西伯利亚板块[2]和华南板块[3], 至今数据已涵盖全球各板块的代表剖面[2, 4~13]. 这些分散于各地层区的数据多只是针对于某些特定层段而行之, 其跨区对比潜力尚有待于甄别; 对数据的年代地层归位也有两种, 即基于寒武系原有的 3 统划分抑或是近年采纳的 4 统划分方案. 鉴于此, 故而有必要将原有的数次漂移曲线纳入新的地层划分系统中. Zhu 等[14]对寒武系碳同位素地层学研究作了综述, 以寒武系 4 统划分方案为标准建立了 δ^{13}C 综合数据变化曲线, 并依此提出寒武纪存在 10 次主要的漂移事件, 且从年代地层和生物地层角度上就这 10 个事件作了简要的定义. 笔者针对相关资料作对比分析, 以期找到具有全球对比意义的δ^{13}C 漂移事件, 最终发现目前寒武系仅有 4 次漂移, 即 Saltzman 等[15]命名的 “SPICE”事件以及 Zhu 等[14]命名的“BACE”、“ROECE”、“ZHUCE”事件具有全球可对比性(图 1). 本文藉此展开δ^{13}C 漂移幅度、发生层位(包括岩石和生物地层)、绝对年龄以及成因等的论述.

1 寒武系底界的δ^{13}C 负漂移——“BACE”事件

源自中国[3,13,17]、伊朗[5]、蒙古[7]、加拿大[8]、美国[11]、西伯利亚[18~20]、纳米比亚[21]、阿曼[22]等地的

英文引用格式: Fan R, Deng S H, Zhang X L. Significant carbon isotope excursions in the Cambrian and their implications for global correlations. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 1686−1695, doi: 10.1007/s11430-011-4313-z

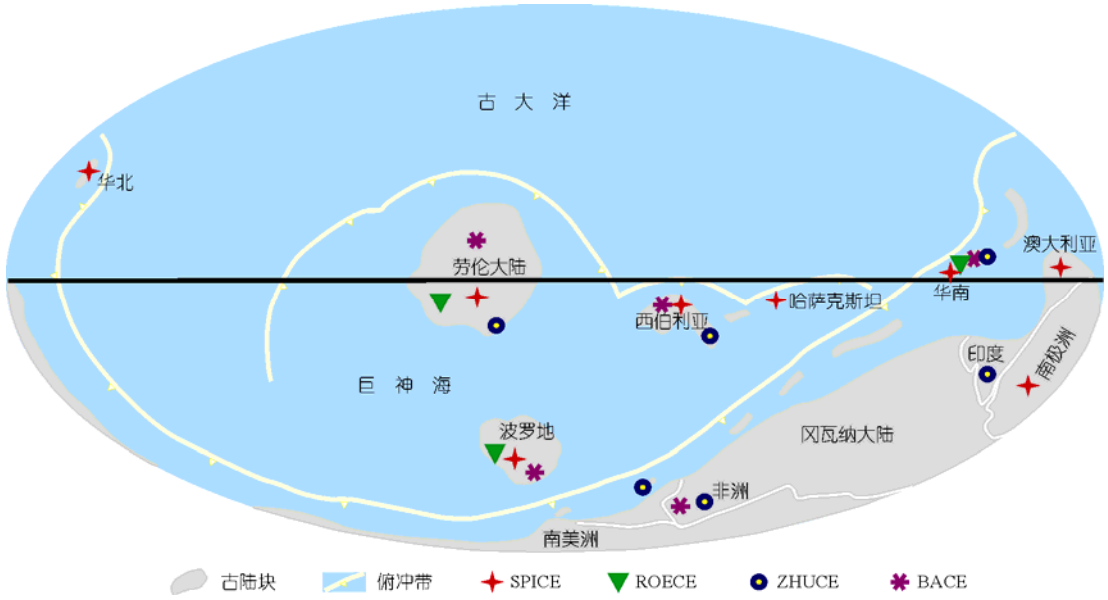

图 1　寒武纪全球性漂移事件证实地点

板块分布的古地理图引自文献[16]

数据表明, 在寒武系底界附近广泛存在一次显著的δ^{13}C 负漂移事件, 其漂移幅度一般为 5‰~10‰, 负峰值介于–3‰~–12‰之间(图 2). 数据采集点覆盖寒武纪的冈瓦纳大陆(如纳米比亚、阿曼)、环冈瓦纳陆块(如华南、英国)、劳伦古陆(美国和加拿大)以及西伯利亚台地(图 1)等主要大区, 但该负漂移未能在加拿大纽芬兰的寒武系底界层型剖面和中国云南梅树村剖面(曾是“金钉子”候选剖面之一)得以识别, 原因在于前者缺乏可用于碳同位素分析的碳酸盐岩序列[23], 后者则在寒武系底界附近存在受区域性构造控制的沉积间断[24].

纽芬兰前寒武系-寒武系界线层型剖面点位以遗迹化石 *Phycodes pedum* 首现为标准, 而在华南、西伯利亚、印度-巴基斯坦等以海相碳酸盐岩地层为主的序列中[25~29], 小壳化石带 *Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabarica* 则作为界定寒武系底界的替代标准[30]. 据中国[13]、西伯利亚大部[2,9,12,28]、伊朗[5,10]、加拿大[8]、美国[11]以及挪威[31]等地的δ^{13}C 曲线显示, 该负漂移事件略早于小壳化石带 *A. trisulcatus* 或 *P. anabarica* 或(和)遗迹化石带 *P. pedum* 首现面, 仅在蒙古西南部 Zavkhan 盆地[7]以及西伯利亚东北部 Olenek 隆起[18,19,32], 其位置比小壳化石 *A. trisulcatus* 首现略微偏上[7]. 生物地层界线与δ^{13}C 负漂移事件在某些剖面不完全对应的现象, 可能是源于生物界线的穿时性[7], 而负漂移则应是一次全球性生物地化事件的反映, 应具有等时性.

Bowring 等[33]厘定的西伯利亚东北部 Khorbusuonka River 剖面寒武系底界附近δ^{13}C 负漂移年龄值(锆石年龄)略大于(543.9±2) Ma; Grotzinger 等[21]则求证纳米比亚南部的年龄值介于(543.3±1)~(539.4±1) Ma; Amthor 等[22]对阿曼南部 Salt 盆地负漂移层段内火山灰年龄的测定结果为(542±0.3) Ma. 这些数据之间虽因样品的区域性和系统误差略显出入, 但都接近国际地层委员会最新公布的寒武系底界 542 Ma 的年龄值[34].

根据上述对漂移发生层位、绝对年龄值等的对比分析, 可认定该δ^{13}C 负漂移可与 Zhu 等[14]命名的“BACE”(Basal Cambrian Carbon Isotope Excursion)事件对比, 即δ^{13}C 值从前寒武系(埃迪卡拉系)顶到寒武系底部由正变负并与 *acritarchs* 等大多数艾迪卡拉纪生物绝灭事件对应.

目前较为普遍的观点认为浅海区出现缺氧环境而导致了寒武系底界的δ^{13}C 负漂移[35~37], 还极有可能造成了与δ^{13}C 负漂移对应的前寒武纪末期的生物灭绝事件. 最近 Maloof 等[38]提出这次δ^{13}C 负漂移事件很有可能是由 f_{org}(f_{org}=C_{org}/C_{total}, 指某一地质历史

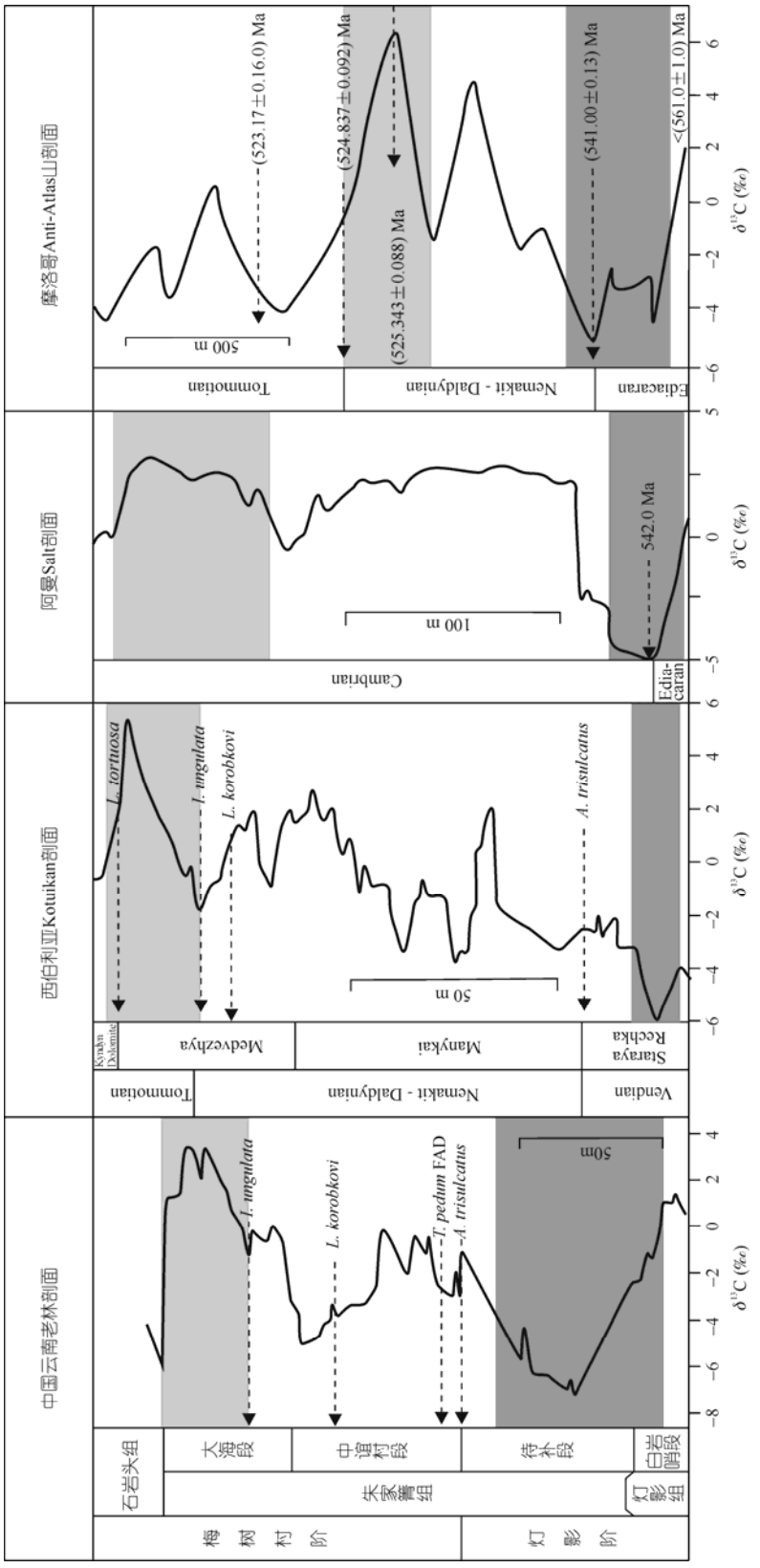

图 2　寒武系底界$\delta^{13}C$负漂移事件“BACE”(深灰色)和纽芬兰统第二阶底部$\delta^{13}C$正漂移事件“ZHUCE”(浅灰色)洲际对比[9,13,22,33]

时期有机碳埋藏量与沉积碳总量的比值[39])急剧下降引发, 而 f_{org} 的下降可能是同期火山或构造成因的 CO_2 流增加的结果[38]. 上述两种解释不相矛盾, 仅是考虑问题的角度不同而已, 而δ^{13}C 负漂移成因本身具有多解性. 前寒武纪晚期到寒武纪早期的浅海缺氧事件会直接影响古海水的化学组成以及古海洋生境, 从而可以间接致使f_{org}降低并表现为δ^{13}C负漂移.

2 纽芬兰统第 2 阶底部的δ^{13}C 正漂移——“ZHUCE”事件

分布于华南扬子区(包括云南老林[40]、云南肖滩[41]、云南梅树村[5]、四川麦地坪[5]、湖北三峡[42]等剖面)(图3)、印度[43]、伊朗[5]、蒙古[7]、西伯利亚[44,45]、加拿大[23]、英国[23]以及摩洛哥[38]等涵盖寒武纪主要板块(图 1)的多个剖面均可识别出一次显著的δ^{13}C 正漂移事件[1,5,7,12,13,44], 其位于 3 统划分方案的下寒武统下部——寒武系纽芬兰统幸运阶之顶到第 2 阶之底, 其漂移幅度大于 5‰, 峰值约 3‰~7‰(图 2).

在华南扬子区的这次漂移出现于传统的下寒武统梅树村阶梅树村组或朱家箐组中上部大海段的白云岩和(或)灰岩中, 即小壳动物化石 *Paragloborilus-Siphogonuchites* 带的顶部, 故对比于 Zhu 等[14]以滇东寒武系纽芬兰统朱家箐组命名的正漂移事件“ZHUCE”(ZHUjiaqing Carbon Isotope Excursion). 在西伯利亚台地大部[6,9,12,46]、伊朗 Valiabad 剖面[5]、印度喜马拉雅[42]、蒙古[7]、加拿大纽芬兰[23]、英国[23]以及摩洛哥南部 Anti-Atlas 寒武系 Nemakit-Daldynian 阶顶部至 Tommotian 阶底部, 亦广泛存在一次显著的δ^{13}C 正漂移[38,47], 生物地层学上吻合于华南小壳

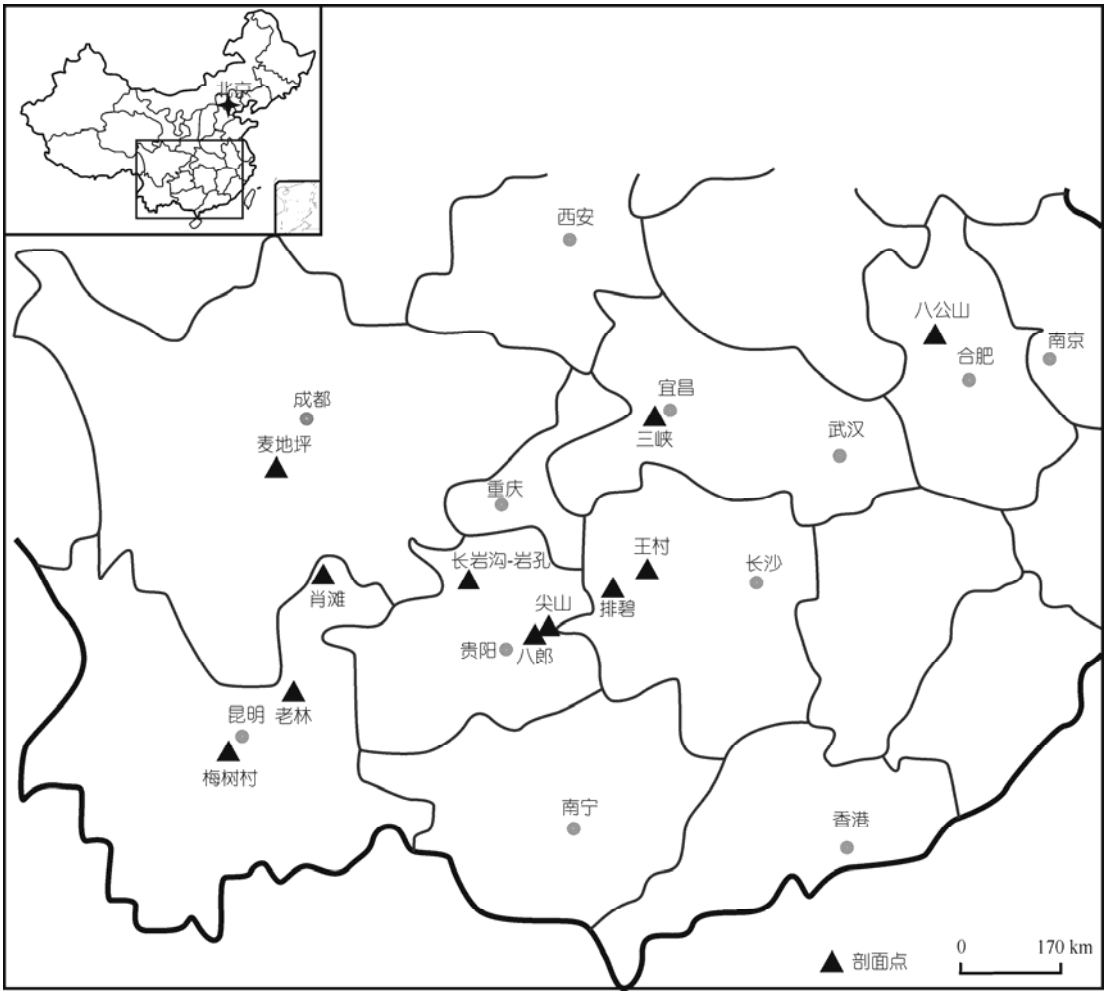

图 3　华南扬子区显示寒武系δ^{13}C 漂移事件的剖面位置

动物化石 *Paragloborilus-Siphogonuchites* 带. 据国际地层委员会 2010 年公布的寒武系年代表[34], 朱家箐组大海段, 即“ZHUCE”的年龄介于 528~521 Ma 之间, 这与摩洛哥 Anti-Atlas 正漂移层位的年龄测试结果(525.3±0.09) Ma 基本吻合.

寒武系纽芬兰统第二阶底部的这次δ^{13}C 正漂移尚未受到足够的关注, 故已有文献中尚无涉及其成因的讨论. 在华南扬子地区“ZHUCE”对应第 3 小壳化石组合带[14]. 据此, 笔者推测该正漂移事件可能与同期以小壳动物为代表的生物繁盛所导致的 f_{org} 升高有关. 生物的大量繁盛使富 ^{12}C 的有机碳以生命体的形式得以大量储存, 从而显著提升古海水中无机碳的 ^{13}C 含量且沉积为富 ^{13}C 的碳酸盐岩.

3　第二统与第三统界线附近的δ^{13}C 负漂移——“ROECE”事件

由于三叶虫存在显著的生物地理分区, 即大西洋区和印度-太平洋区, 传统的下、中寒武统, 即第二统与第三统界线难以定义和对比. 在印度-太平洋区以三叶虫 Redlichiid 绝灭为标志, 在大西洋区则以三叶虫 Oleneliid 绝灭并伴随有 *Paradoxides* 的出现为标志[48,49]. 从 20 世纪 90 年代起, 涵盖寒武纪劳伦板块、波罗的海板块、西伯利亚台地以及环冈瓦纳的部分板块(图 1)的数据显示, 寒武系第二统-第三统界线附近普遍存在一次较为显著的δ^{13}C 负漂移, 其可作为界定生物地层学全球标准的重要参照. 这一δ^{13}C 负漂移目前已在中国湘西北王村[50]、安徽八公山[50]、贵州八郎、尖山[48,51,52]及长岩沟-岩孔剖面[53](图 3)等地得到了很好的证实, 且δ^{13}C 峰值介于–2.38‰~–6.9‰, 负漂移位于 Redlichiid 绝灭层位附近[53](图 4). 瑞典南部[54]、加拿大 Rockies[55]和西北地区[56]、美国大盆地[55]以及西伯利亚台地东部[57]的数据显示, δ^{13}C 峰值介于–4‰~–7.9‰, 且北美地区负漂移发生于 Oleneliid 绝灭层位附近[56](图 4). 鉴于该负漂移在冈瓦纳和劳伦大陆分别对应 Redlichiid 和 Oleneliid 的绝灭层位, 确定其即为 Zhu 等[14]提及的位于第二统-第三统(第四阶-第五阶)界线附近的“ROECE” (Redlichiid-Oleneliid Extinction Carbon Isotope Excursion)事件.

“ROECE”在西伯利亚台地北部[58]和冈瓦纳西部[49]地区不能识别, 可能是由于这些地区普遍缺失中寒武世早期(即第三世第五期)地层而致. 如属于西冈瓦纳大陆的法国南部 Montagne Noire 地区传统的下-中寒武统(现行的第二统-第三统)之间为明显的不整合接触[49].

寒武系第二统-第三统界线附近的δ^{13}C 负漂移及其对应的三叶虫绝灭事件与一次海进事件及由此产生的古地理环境变化有关[51,55]. 在西冈瓦纳[49]、华南

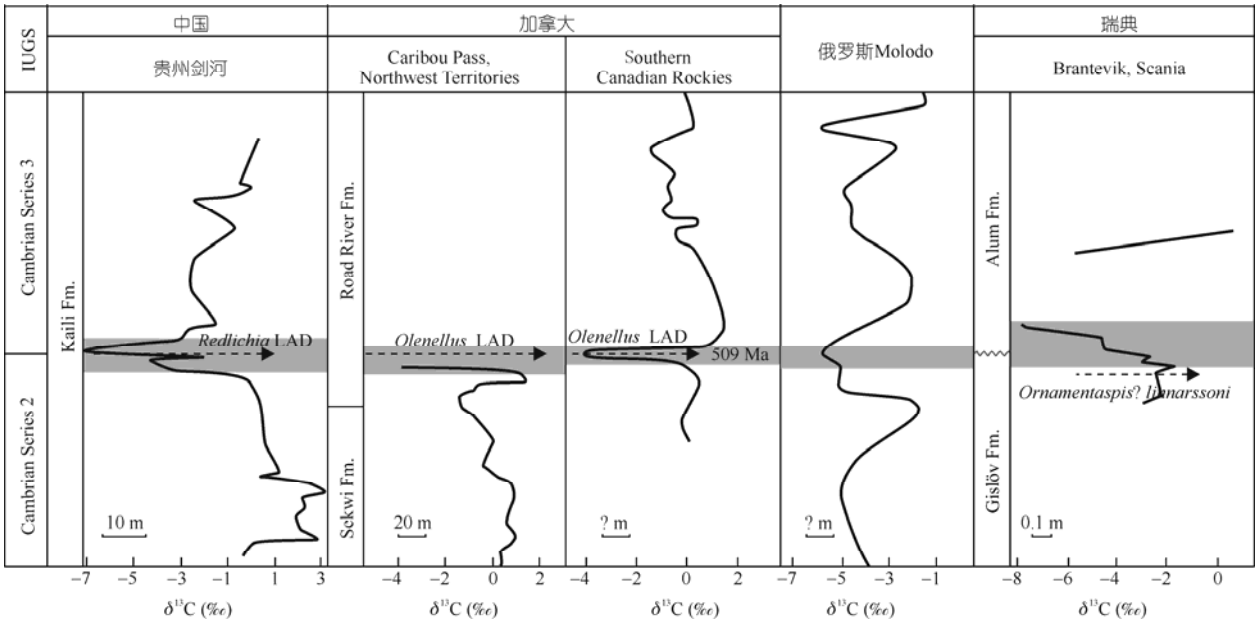

图 4　寒武系第二统-第三统界线附近δ^{13}C 负漂移事件“ROECE”洲际对比[51,54,55,56]

地区[50]、劳伦大陆[56]及西伯利亚[58]广泛显示为碳酸盐岩转变为页岩的进积层序(如华南凯里组), 这为“海平面上升说”提供了可靠的证据. Sr 同位素地层学的数据指示, 该时期大洋底部水体发生了一次可能由大规模火山活动引起的缺氧事件[55]. 缺氧水体导致东西方两大三叶虫动物群最特征分子的灭绝和生物量剧减, 从而使 f_{org} 下降, 进而导致缺氧水体碳同位素组成贫 ^{13}C[55]. 海平面上升期碳同位素较轻的缺氧水体形成上升流, 从而造成台地相碳酸盐岩的$\delta^{13}C$ 负漂移[51,55].

4 芙蓉统排碧阶底部的“SPICE”漂移

“SPICE” (the Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion)发生于芙蓉统排碧阶底部, 最早由 Brasier[59]发现于美国西部大盆地 Steptoean 阶, 现已在包括哈萨克斯坦[15]、中国[50,53,60]、西伯利亚[61]、北美[55,59,62]、澳大利亚[63,64]、南美[65]、欧洲[66]及南极洲[67]的各板块得以证实(图 1), 因而具有全球性(图 1, 5). 整体而言, 其$\delta^{13}C$起始值约 0±1‰, 峰值 3‰~5‰, 漂移幅度平均约 4‰[60,61,64]. 另据已有资料, 除湘西排碧剖面以外, 华南其余剖面$\delta^{13}C$ 值漂移幅度(3‰左右)均略小于澳大利亚、哈萨克斯坦以及北美大部分剖面(≥4‰). 这可能反映了碳同位素演化特征的区域性差异.

据 Saltzman 等[60]对华南、北美、哈萨克斯坦及澳大利亚的研究, 该正漂移始于三叶虫 *Glyptagnostus reticulates* 带之底, 吻合于 Walcott[68]在华北首次发现的一次全球性三叶虫灭绝事件, 在劳伦大陆相当于 Steptoean 阶和 Pterocephaliid 层底(即 Marjumiid 层和 Pterocephaliid 层界线), 在湘西排碧(寒武系第三统~芙蓉统的界线层型点位)以及华南其他剖面均可对比; 劳伦板块的峰值常对应一个由碳酸盐岩突变为硅质碎屑岩的特定层序界面, 称为 SauckⅡ-SauckⅢ界面. 该正漂移结束于三叶虫 *Irvingella* 带底, 整个时间跨度约 3. 5 Ma(499~495.5 Ma).

“SPICE”最本质的成因在于碳酸盐岩中 ^{12}C 含量相对 ^{13}C 减少, 目前认为造成这一结果的主控因素有两种:

(1) 沉积有机质埋藏量增加. “SPICE”漂移的一个典型特征为$\delta^{13}C$ 峰值与硅质碎屑流注入事件或 SauckⅡ~SauckⅢ层序界线对应, 而该层序界线被普遍界定为指示一次海退事件. 海平面下降时风化侵蚀速率增大, 大洋表面水体营养量增高, 生物大量繁盛, 初始产率增加, 富 ^{12}C 的有机碳相对无机碳(碳酸盐岩碳)大量埋藏造成碳酸盐岩$\delta^{13}C$ 值发生正漂移. 由于在全球范围内未发现有同期富含有机质的暗色泥页岩沉积, 埋藏有机质在该时期增加的观点受到质疑[50,62].

(2) 甲烷水合物大量生成. Dickens 等[69]认为相对于生物有机质而言, 甲烷水合物更富 ^{12}C($\delta^{13}C_{org} \geq 2\times\delta^{13}C_{methanehydrate}$), 且当全球变冷时, 大洋中甲烷水合物的储量会增加. “SPICE”及同期的海退或可指示当时为全球变冷期. Saltzman 等[15]曾提出有机碳埋藏量增加可能导致大气 CO_2 浓度降低, 进而使得全球变冷并海平面下降.

5 漂移事件与全球海洋环境突变的相关性

将上述已得到充分证实的 4 次寒武系重要碳同位素漂移事件进行跨板块对比(图 6), 显现出同一漂移事件在不同地区存在漂移幅度和峰值的差异. 这可能反映了碳同位素组成的区域特征, 其可通过叠加于全球特征之上呈现出来.

最近有文献[70]提出位于寒武系第三统鼓山阶底部的负漂移事件, “DICE”(DrumIan Carbon isotope Excursion)也可能具有全球对比的潜力, 然而, 目前的数据最多只能证明其为一次区域性漂移. Zhu 等[14]提出的包含“DICE”在内的寒武系其他 6 次$\delta^{13}C$ 事件因缺乏多剖面数据的支持, 其对比意义(区域性还是全球性)尚不能确定.

碳同位素漂移事件的成因, 也即引发碳酸盐岩中碳同位素(^{12}C 和 ^{3}C)相对含量波动的原因, 主要有以下几个方面: (1) 有机碳埋藏量或埋藏率(f_{org})的增减, 表现为 f_{org} 增加对应$\delta^{13}C$ 正漂移, 反之对应负漂移; (2) 生物演化事件, 生物的繁盛促使 f_{org} 增大, 从而引发$\delta^{13}C$ 正漂移, 反之则为负漂移; (3) 大洋缺氧事件, 多通过引发生物绝灭事件间接导致$\delta^{13}C$ 负漂移; (4) 天然气水合物的生成, 生成量越大$\delta^{13}C$ 负漂移将越显著; (5) 海平面变化、火山活动、构造活动等其他地质历史时期影响海洋环境的事件, 它们可以直接或间接地影响海水碳同位素组成, 从而导致$\delta^{13}C$ 漂移.

寒武纪数次可认定的碳同位素漂移与同期古生物演化事件存在时间和引发机制上的对应关系[37,71], 这说明碳同位素变化与其对应阶段的生物、海洋环境之间存在协同演化的关系.

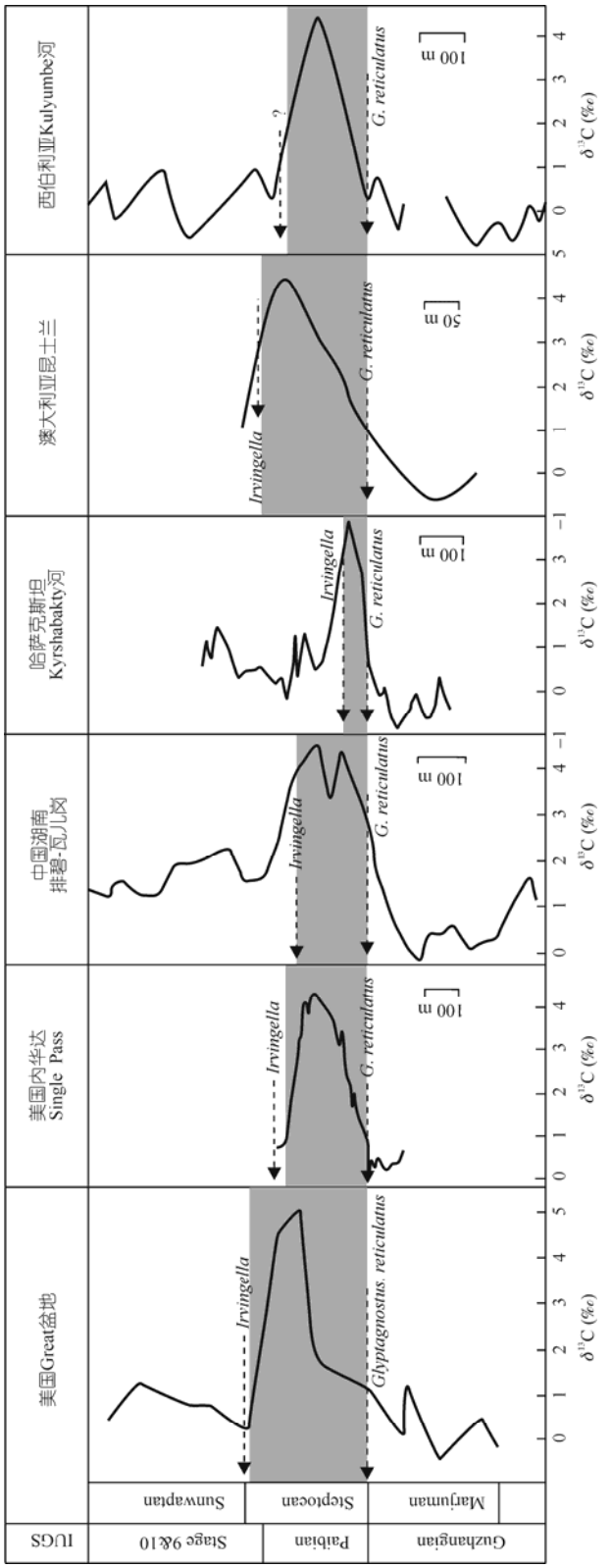

图 5　寒武系芙蓉统排碧阶底部$\delta^{13}C$正漂移“SPICE”洲际对比[15,59,60,61]

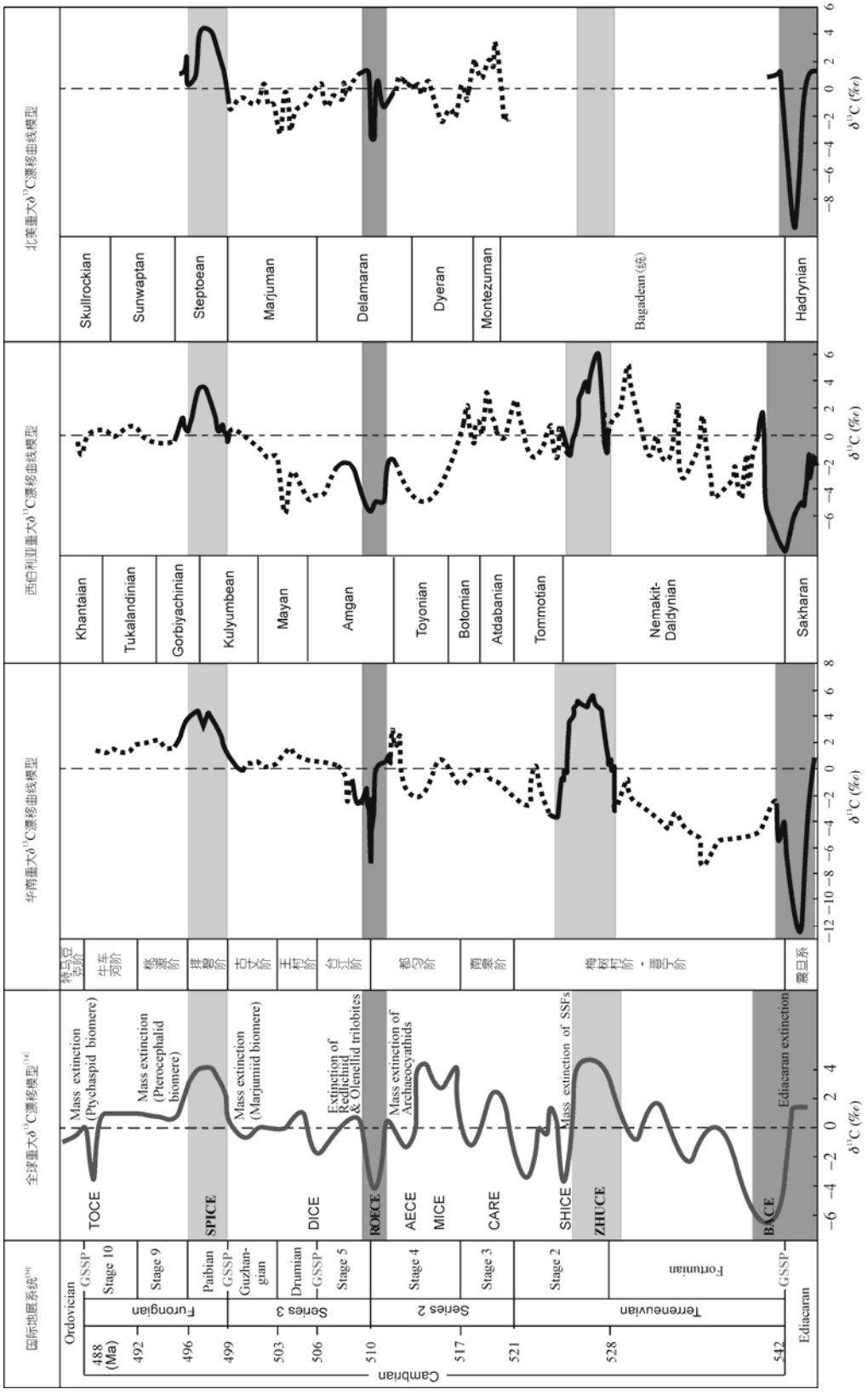

图 6　华南、西伯利亚、北美及全球寒武系重大 ^{13}C 漂移事件模式对比图

华南模型据文献[44, 51, 60]改编; 西伯利亚模型据文献[6, 12, 57, 61]改编; 北美模型据文献[8, 11, 15, 55, 56]改编

致谢 中国科学院南京地质古生物研究所李越教授及所有匿名的评审专家就文稿提出了许多建设性的修改意见和建议, 在此深表感谢.

参考文献

1 Tucker M E. Carbon isotope excursions in Precambrian/Cambrian boundary beds, Morocco. Nature, 1986, 319: 48–50
2 Magaritz M M, Holser, W T, Kirschvink J L. Carbon-isotope events across the Precambrian boundary on the Siberian Platform. Nature, 1986, 320: 258–259
3 Lambert I B, Walter M R, Zang W L, et al. Palaeoenvironment and carbon isotope stratigraphy of Upper Proterozoic carbonates of the Yangtze Platform. Nature, 1987, 325: 140–142
4 Magaritz M M, Kirschvink J L, Latham A J, et al. Precambrian/Cambrian boundary problem: Carbon isotope correlations for Vendian and Tommotian time between Siberia and Morocco. Geology, 1991, 19: 847–850
5 Brasier M D, Magaritz M, Corfield R, et al. The carbon- and oxygen-isotope record of the Precambrian-Cambrian boundary interval in China and Iran and their correlation. Geol Mag, 1990, 127: 319–332
6 Brasier M D, Corfield R M, Derry L A, et al. Multiple δ^{13}C excursions spanning the Cambrian exploration to the Botomian crisis in Siberia. Geology, 1994, 22: 455–458
7 Brasier M D, Shields G, Kuleshov V N, et al. Integrated chemo- and biostratigraphic calibration of early animal evolution: Neoproterozoic-Early Cambrian of southwest Mongolia. Geol Mag, 1996, 133: 445–485
8 Narbonne G M, Kaufman A J, Knoll A H. Integrated chemostratigraphy and biostratigraphy of the Windermere Supergroup, Northwestern Canada: Implications for Neoproterozoic correlations and the early evolution of animals. Geol Soc Am Bull, 1994, 106: 1281–1291
9 Kaufman A J, Knoll A H, Semikhatov M A, et al. Integrated chronostratigraphy of Proterozoic-Cambrian boundary beds in the western Anabar region, northern Siberia. Geol Mag, 1996, 133: 509–533
10 Kimura H, Matsumoto R, Kakuwa Y, et al. The Vendian-Cambrian δ^{13}C record, North Iran: Evidence for overturning of the ocean before the Cambrian Explosion. Earth Planet Sci Lett, 1997, 147: 1–7
11 Corsetti F A, Hagadorn J W. Precambrian-Cambrian transition: Death Valley, United States. Geology, 2000, 28: 299–302
12 Kouchinsky A, Bengtson S, Pavlov V, et al. Carbon isotope stratigraphy of the Precambrian-Cambrian Sukharikha River section, northwestern Siberian Platform. Geol Mag, 2007, 144: 609–618
13 Li D, Ling H F, Jiang S Y, et al. New carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran-Cambrian boundary interval from SW China: Implications for global correlation. Geol Mag, 2009, 146: 465–484
14 Zhu M Y, Babcock L E, Peng S C. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction. Palaeoworld, 2006, 15: 217–222
15 Saltzman M R, Runnegar B, Lohnman K C. Carbon isotope stratigraphy of Upper Cambrian (Steptoean Stage) sequences of the eastern Great Basin: Record of a global oceanographic event. Geol Soc Am Bull, 1998, 110: 285–297
16 Scotese C R. Cambrian. http://www.scotese.com, (PALEOMAP website). 2002
17 杨瑞东, 朱立军, 王世杰, 等. 贵州寒武统底部碳同位素负异常的生物学和地层学意义. 地质学报, 2005, 79: 157–164
18 Khomentovsky V V, Karlova G A. Biostratigraphy of the Vendian-Cambrian beds and the Lower Cambrian boundary in Siberia. Geol Mag, 1993, 130: 29–45
19 Pelechaty S M, Grotzinger J P, Kashirtsev V A, et al. Chemostratigraphic and sequence stratigraphic constraints on Vendian-Cambrian basin dynamics, Northeast Siberian Craton. J Geol, 1996, 104: 543–563
20 Pelechaty S M, Kaufman A J, Grotzinger J P. Evaluation of δ^{13}C chemostratigraphy for intrabasinal correlation: Vendian strata of northeast Siberia. Geol Soc Am Bull, 1996, 108: 992–1003
21 Grotzinger J P, Bowring S A, Saylor B Z, et al. Biostratigraphic and geochronologic constraints on early animal evolution. Science, 1995, 270: 598–604
22 Amthor J E, Grotzinger J P, Schröder S, et al. Extinction of Cloudina and Namacalathus at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman. Geology, 2003, 31: 431–434
23 Brasier M D, Anderson M M, Corfield R M. Oxygen and carbon isotope stratigraphy of Early Cambrian carbonates in southeastern Newfoundland and England. Geol Mag, 1992, 129: 265–279
24 钱逸, 何廷贵. 再论滇东地区前寒武系与寒武系界线剖面. 微体古生物学报, 1996, 13: 225–240
25 Zhu M Y, Li G X, Zhang J M. New C isotope stratigraphy from southwest China: Implications for the placement of the

Precambrian-Cambrian boundary on theYangtze Platformand global correlations: Comment. Geology, 2001, 29: 871
26 Qian Y, Li G X, Zhu M Y. The Meishucunian Stage and its small shelly fossil sequences in China. Acta Palaeontol Sin, 2001, 40(Suppl): 54–62
27 Steiner M, Li G X, Qian Y, et al. Neoproterozoic to Early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2007, 254: 67–99
28 Bartley J K, Pope M, Knoll A H, et al. A Vendian-Cambrian boundary succession from the northwestern margin of the Siberian Platform: Stratigraphy, palaeontology, chemostratigraphy and correlation. Geol Mag, 1998, 135: 473–494
29 Brasier M D. China and Palaeotethyan belt (India, Pakistan, Iran, Kazakhstan, and Mongolia). In: Cowie J W, Brasier M D, eds. The Precambrian-Cambrian Boundary. Oxford: Clarendon Press, 1989. 117–165
30 蒋志文, Brasier M D, Hamdi B. 南亚梅树村阶的对比. 地质学报, 1988, 3: 191–199
31 Knoll A H, Hayes J M, Kaufman A J, et al. Secular variation in carbon isotope ratios from Upper Proterozoic successions of Svalbard and East Greenland. Nature, 1986, 321: 832–838
32 Knoll A H, Grotzinger J P, Kaufman A J, et al. Integrated approaches to terminal Proterozoic stratigraphy: An example from the Olenek Uplift, northeastern Siberia. Precambrian Res, 1995, 73: 251–270
33 Bowring S A, Grotzinger J P, Isachsen C E, et al. Calibrating rates of Early Cambrian evolution. Science, 1993, 261: 1293–1298
34 International Commission of Stratigraphy. International Stratigraphic Chart. http://www.stratigraphy.org, 2010
35 Brasier M D. On mass extinctions and faunal turnover near the end of the Precambrian. In: Donovan S K, ed. Mass Extinctions: Process and Evidence. London: Belhaven Press, 1989. 73–88
36 Brasier M D. The basal Cambrian transition and Cambrian bio-events (from terminal proterozoic extinctions of Cambrian biomeres). In: Walliser O H, ed. Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 113–138
37 Kimura H, Watanabe Y. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary. Geology, 2001, 29: 995–998
38 Maloof A C, Ramezani J, Bowring S A, et al. An expanded record of Early Cambrian carbon cycling from the Anti-Atlas Margin, Morocco. Canadian J Earth Sci, 2010, 42: 2195–2196
39 Kump L R. Interpreting carbon-isotope excursions: Strangelove oceans. Geology, 1991, 19: 299–302
40 Shen Y A, Schidlowski M. New C isotope stratigraphy from southwest China: Implications for the placement of Precambrian-Cambrian boundary on the Yangtze Platform and global correlations. Geology, 2000, 28: 623–626
41 周传明, 张俊明, 李国祥, 等. 云南永善肖滩早寒武世早期碳氧同位素记录. 地质科学, 1997, 32: 201–211
42 高记元, 孙枢, 许靖华, 等. 碳氧同位素与前寒武纪和寒武纪边界事件. 地球化学, 1988, 3: 257–266
43 Aharon P, Schidlowski M, Singh I B. Chronostratigraphic markers in the end-Precambrian isotope record of the Lesser Himalaya. Nature, 1987, 327: 699–702
44 Kouchinsky A, Bengtson S, Missarzhevsky V V, et al. Carbon isotope stratigraphy and the problem of a pre-Tommotian Stage in Siberia. Geol Mag, 2001, 138: 387–396
45 Knoll A H, Kaufman A J, Semikhatov M A, et al. Sizing up the sub-Tommotian unconformity in Siberia. Geology, 1995, 23: 1139–1143
46 Kouchinsky A, Bengtson S, Pavlov V, et al. Pre-Tommotian age of the lower Pestrotsvet Formation in the Selinde section on the Siberian platform: carbon isotopic evidence. Geol Mag, 2005, 142: 319–325
47 Maloof A C, Schrag D P, Crowley J L, et al. An expanded record of Early Cambrian carbon cycling from the Anti-Atlas Margin, Morocco. Canadian J Earth Sci, 2005, 42: 2195–2216
48 杨瑞东, 朱立军, 王世杰, 等. 贵州台江中、下寒武统界线附近碳同位素负异常的生物和地层意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 500–506
49 Wotte T, Álvaro J J, Shields G A, et al. C-, O- and Sr-isotope stratigraphy across the Lower-Middle Cambrian transition of the Cantabrian Zone (Spain) and the Montagne Noire (France), West Gondwana. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2007, 256: 47–70
50 Zhu M Y, Zhang J M, Li G X, et al. Evolution of C isotopes in the Cambrian of China: Implications for Cambrian subdivision and trilobite mass extinctions. Geobios, 2004, 37: 287–301
51 Guo Q J, Strauss H, Liu C Q, et al. A negative carbon isotope excursion defines the boundary from Cambrian Series 2 to Cambrian Series 3 on the Yangtze Platform, South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2010, 285: 143–151
52 Guo Q J, Strauss H, Liu C Q, et al. Carbon and oxygen isotopic composition of Lower to Middle Cambrian sediments at Taijiang, Guizhou Province, China. Geol Mag, 2005, 142: 723–733
53 左景勋, 彭善池, 朱学剑. 扬子地台寒武系碳酸盐岩的碳同位素组成及地质意义. 地球化学, 2008, 37: 118–128
54 Álvaro J J, Ahlberg P, Axheimer N. Skeletal carbonate productivity and phosphogenesis at the Lower-Middle Cambrian transition of Scania,

southern Sweden. Geol Mag, 2010, 147: 59–76
55 Montañez I P, Osleger D A, Banner J L, et al. Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans. GSA Today, 2000, 10: 1–7
56 Dilliard K A. Stable isotope geochemistry of the lower Cambrian Sekwi Formation, Northwest Territories, Canada: Implications for ocean chemistry and secular curve generation. Palaeogeogr Palaeoclimato Palaeoecol, 2007, 256: 174–194
57 Shabanov Y Y, Korovnikov I V, Pereladov V S, et al. The section of the Kuonamka Formation of the Molodo River—A candidate for a global stratigraphy of the lower boundary of the Middle Cambrian (East Siberian Platform). In: The 13th International Field Conference of the Cambrian Subdivision Working Group, eds. Cambrian Sections of the Siberian Platform-Stratotype Candidates for An International Stratigraphic Scaling (Stratigraphy and Palaeontology). Yakutia, 2008. 60–70
58 Brasier M D, Sukhov S S. The falling amplitude of carbon isotopic oscillations through the Lower to Middle Cambrian: Northern Siberia data. Canadian J Earth Sci, 1998, 35: 353–373
59 Brasier M D. Towards a carbon isotope stratigraphy of the Cambrian System: Potential of the Great Basin succession. Geol Soc London Spec Publ, 1993, 70: 341–350
60 Saltzman M R, Ripperdan R L, Brasier M D, et al. A global carbon isotope excursion (SPICE) during the Late Cambrian: Relation to trilobite extinctions, organic-matter burial and sea level. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2000, 162: 211–223
61 Kouchinsky A, Bengtson S, Gallef Y, et al. The SPICE carbon isotope excursion in Siberia: A combined study of the upper Middle Cambrian-lowermost Ordovician Kulyumbe River section, northwestern Siberian Platform. Geol Mag, 2008, 145: 609–622
62 Glumac B, Walker K R. A late Cambrian positive carbon-isotope excursion in the southern Appalachians: Relation to biostratigraphy, sequence stratigraphy, environments of deposition, and diagenesis. J Sediment Res, 1998, 68: 1212–1222
63 Ripperdann R L, Magaritz M, Nicoll R S, et al. Simultaneous changes in carbon isotopes, sea-level and conodont biozones within the Cambrian-Ordovician boundary interval at Black Mountain, Australia. Geology, 1992, 20: 1039–1042
64 Lindsay J F, Kruse P D, Green O R, et al. The Neoproterozoic-Cambrian record in Australia: A stable isotope study. Precambrian Res, 2005, 143: 113–133
65 Buggisch W, Keller M, Lehnert O. Carbon isotope record of Late Cambrian to Early Ordovician carbonates of the Argentine Precordillera. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2003, 195: 357–373
66 Ahlberg P, Axheimer N, Eriksson M E, et al. High-resolution trilobite biostratigraphy and carbon isotope stratigraphy of the middle Cambrian-lower Furongian of Baltica. In: Jago J B, ed. Material of the 11th International conference of the Cambrian Stage Subdivision Working Group, South Australia: Abstracts 84. Geol Soc Australia, 2006. 5
67 Buggisch W. Stable carbon isotopes of the Late Cambrian Minaret Formation, Ellsworth Mountains, West Antarctica. In: Scientific Committee on Antarctic Research Open Science Conference, Hobart, Australia, 2006. 210
68 Walcott C D. The Cambrian faunas of China, Research in China 3. Washington D.C.: Carnegie Ins Washington Publ, 1913, 54: 375
69 Dickens G R, O'Neil J R, Rea D K, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocen. Paleoceanography, 1995, 10: 965–971
70 Howley R A, Jiang G Q. The Cambrian Drumian carbon isotope excursion (DICE) in the Great Basin, western United States. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2010, 296: 138–150
71 Zhu M Y, Strauss H, Shields G A. From snowball earth to the Cambrian bioradiation: Calibration of Ediacaran-Cambrian earth history in South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2007, 254: 1–6