

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*

杨瑞东^{①②} 朱立军^② 王世杰^① 袁金良^③ 赵元龙^②

(①中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; ②贵州工业大学, 贵阳 550003;

③中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008)

摘要 中、下寒武统界线研究是至今尚未圆满解决的全球性难题。这是早寒武世到中寒武世全球范围存在两个不同的生物地理分区的结果。尽管目前研究从古生物方面进行了大量的工作, 也取得了大量的成果, 但是它们同样由于存在大西洋生物区和印度-太平洋生物区生物组合不同的影响, 目前还没有一个能进行全球性对比的生物组合。因此, 寻找其他的中、下寒武统界线全球划分和对比方法是解决中、下寒武统界线难题的途径。对贵州台江中、下寒武统界线剖面的凯里组疑源类进行系统研究, 利用疑源类划分了中、下寒武统界线, 所划分的界线与三叶虫带划分的界线基本一致, 并可与西伯利亚、欧洲在地台上利用疑源类划分的中、下寒武统界线可进行对比。在此基础上, 利用全球性早寒武世到中寒武世过渡期间有一个明显的碳同位素负异常来划分中、下寒武统界线, 并与西伯利亚、北美中、下寒武统界线上的碳同位素负异常进行对比。这一新的碳同位素划分对比中、下寒武统界线的方法, 有助于解决中、下寒武统界线这一全球性难题, 也说明了早寒武世末三叶虫动物大绝灭与这次碳同位素负异常有密切的关系。

关键词 碳同位素负异常 生物绝灭 中、下寒武统界线 贵州

中、下寒武统界线研究是至今尚未圆满解决的全球性难题。这是由于在早寒武世地球上分为两个截然不同的古生物地理分区^[1]: 大西洋区和印度-太平洋区。在大西洋生物区, 传统的中、下寒武统界线定义是以 *Olenellids* 三叶虫的绝灭, 并伴随有 *Paradoxides* 的出现作为中、下寒武统的界线^[2]; 而印度-太平洋生物区则以 *Redlichia* 的绝灭, 并伴随有大量的褶颊虫类三叶虫 *Ptychopariids* 出现作为中、下寒武统的界线^[3]。虽然, 这些传统的划分经过后来更深入研究, 已经取得了很大的进展, 提出了新的各种划分方案^[4-8], 但前面提到的由于早寒武世全球存在两个生物地理区, 因此, 中、下寒武统界线划分问题一直是争论的问题。

由于上述原因, 一些地质工作者开始寻找另外的划分方法, 比如地球化学方法。在地球化学方法中以碳同位素迁移曲线进行对比是最为成功的例子。也是最近对中、下寒武统界线划分的一大进展, 这方面代表性的工作有西伯利亚和北美中、下寒武统界线附近碳、锶同位素的研究^[6, 9]。他们的研究表明, 中、下寒武统界线附近存在一个强烈的 $\delta^{13}\text{C}$ 负异常, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 正异常。目前

2001-10-01 收稿, 2002-02-01 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40062001)、贵州省省长专项基金和贵州工业大学博士启动基金资助

在西伯利亚和北美中、下寒武统界线附近碳、锶同位素波动曲线是完全一致的^[6, 10, 11]。作为目前世界上中、下寒武统发育比较完整的我国贵州台江, 中、下寒武统界线的研究已作了大量工作^[4, 12~17], 已被认为是典型的中、下寒武统界线剖面, 还得到国外学者的认可, 该剖面被列为 2001 年国际寒武系工作会议重点考察剖面。

虽然, 贵州台江八郎中、下寒武统界线从古生物研究方面已经取得了很大的进展, 但为了使该剖面的中、下寒武统界线与全球对比, 利用地球化学($\delta^{13}\text{C}$)对该剖面进行研究是很必要的。

1 贵州台江八郎中、下寒武统界线

贵州台江八郎剖面凯里组中各类化石丰富, 在中、下寒武统界线范围内又产出台江和凯里生物群^[18], 其中三叶虫化石很丰富。袁金良等已利用三叶虫化石对中、下寒武统界线进行了划分研究, 提出以三叶虫 *Lancastria* 相 *Oryctocephalus* (或 *Oryctocephalina*) 的连续演化系列中, 以 *Oryctocephalus* (或 *Oryctocephalina*) 的首次出现作为中寒武世的开始。具体到台江八郎剖面, 中、下寒武统界线应划在第 9 层底部(图 1), 因为从第 9 层的第 2 分层(9-2 层)开始出现了真正 *Oryctocephalus*, 即 *Oryctocephalus indicus*(Reed); 另外, 在第 8 层中还产出早寒武世晚期标准三叶虫化石, 如: *Redlichia*, *Olenoides*, *Bonnia*, *Bathynotus*, *Ovatoryctocara*, *Oryctocephaleps*, *Protoryctocephalus*, *Olenoides abnormis*, *O. octaspinus*, *Nangaops*, *Paraantagmus* 等。Sundberg 等^[5]也提出以 *Oryctocephalus indicus* (Reed) 作为中寒武世开始的标准化石, 该化石在北美、西北利亚、印度、澳大利亚等国家都已发现, Sundberg 和 McCollum 来贵州台江八郎剖面进行实地考察研究^[5], 认为台江八郎剖面是研究中、下寒武统界线的良好剖面, 并可与北美中、下寒武统界线进行对比(图 1)。鉴于该剖面中、下寒武统界线及地层研究程度高, 对其疑源类化石分布及组合特征研究, 认识早、中寒武统界线附近疑源类组合的分布特征, 从而确定划分中、下寒武统界线的疑源类化石组合或标准化石, 无疑对缺少标准三叶虫化石的地区划分中、下寒武统界线具有一定的意义。据这条剖面上的疑源类化石分布特征, 结合欧洲和北美早、中

		中国贵州, 台江				北美										
中寒武统	凯里组	9-6	毛庄阶	中、下寒武统界线 II	<i>Olenoides jialaoensis</i>	<i>Oryctocephalus indicus</i>	<i>Pageitia prolata</i>	德拉玛拉阶								
		9-5														
9-4																
9-3																
9-2																
下寒武统	9-1	龙王庙阶	中、下寒武统界线 I	<i>Oryctocephalus sp.</i>	<i>Redlichia sp.</i>	德拉拉阶	<i>Oryctocephalus indicus</i>	<i>Pageitia prolata</i>								
	8								<i>Ovatoryctocara sp.</i>	<i>Paraantagmus subcylindricus</i>	<i>Parashuiyuella sinensis</i>	<i>Eokaotata gedongensis</i>	<i>Nangaops danzhatensis</i>	<i>Nangaops brevicus</i>	<i>Bathynotus kueichowensis</i>	<i>Olenoides octaspinus</i>
	7															
	6															

图 1 贵州与北美地区中、下寒武统界线附近主要三叶虫比较
据袁金良等, 1997, Sundberg 等, 1999 资料编制

寒武世疑源类的分布特征, 疑源类划分的早、中寒武世界线与根据三叶虫划分的早、中寒武世界线是一致的(图 2).

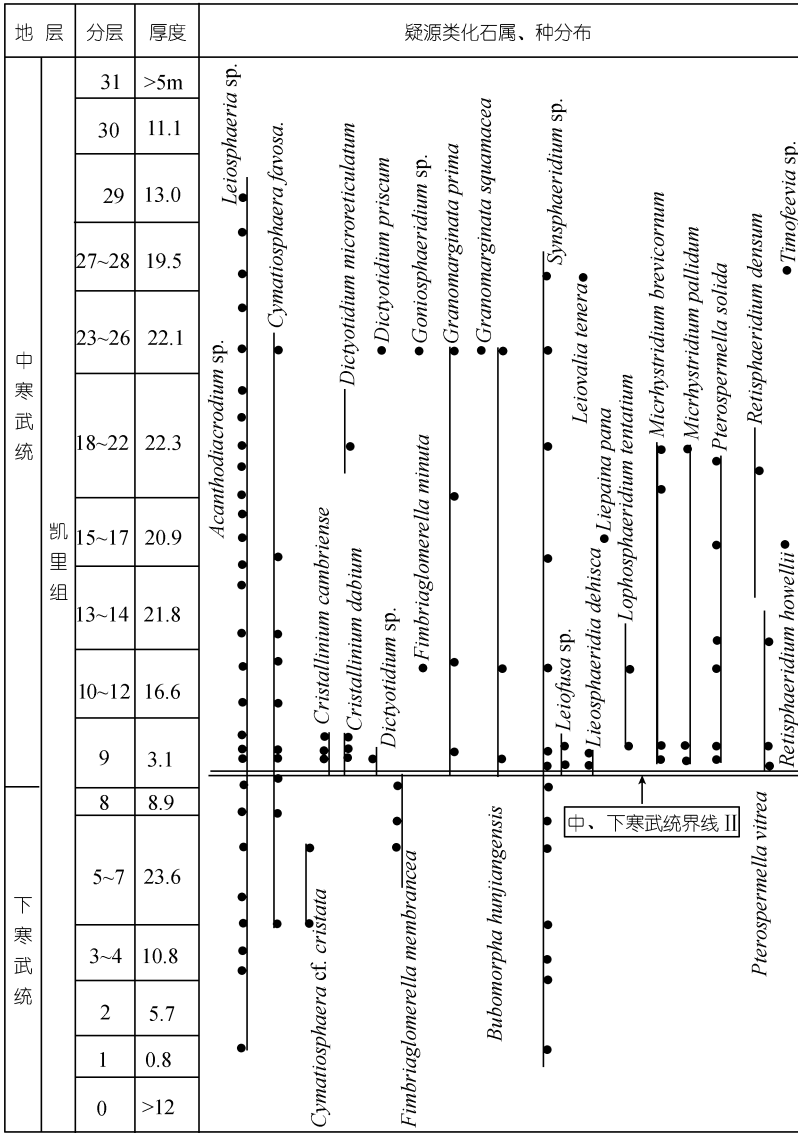


图 2 贵州台江八郎剖面疑源类分布和中、下寒武统界线划分

2 贵州台江八郎中、下寒武统界线附近碳同位素变化

台江八郎中、下寒武统凯里组为深灰色钙质泥岩, 含 CaCO₃ 在 15%~30%, 在底部和顶部为薄层状灰岩和白云岩, 在中、下寒武统界线附近为薄层状灰色钙质泥岩(图 3). 钙质泥岩通过岩石切片研究, 碳酸钙是以微晶方解石形式存在, 钙质泥岩受后来成岩作用影响很小, 这是泥岩具有封闭地下水的作用, 避免了泥岩中的钙质(方解石)被交代. 因此, 这次所测得的钙质

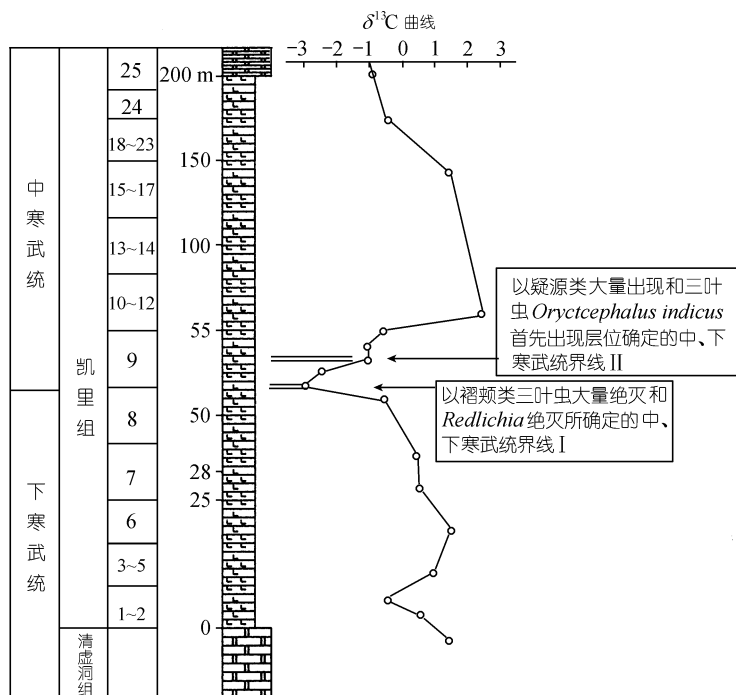


图 3 贵州台江下、中寒武统凯里组碳同位素变化与中、下寒武统界线之间的关系

泥岩中碳酸盐岩碳同位素基本上代表了沉积时古海洋水体的地球化学特征。样品的碳同位素在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室 MAT251 质谱仪上完成。先用磷酸盐法进行前处理，最后在 MAT251 质谱仪上进行分析测试，得到碳同位素值(PDB 标准)。测试结果表明，在中、下寒武统界线上，存在一个明显的碳同位素负异常， $\delta^{13}\text{C}$ 值在下寒武统顶部由正的碳同位素值逐渐下降，即从清虚洞组顶部白云岩 1.331‰ ~ 0.740‰ ，到凯里组第 7 层的 0.352‰ ，基本上是正的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。但到凯里组第 8 层开始， $\delta^{13}\text{C}$ 值开始出现明显的负异常，到褶颈类三叶虫大量绝灭和 *Redlichia* 绝灭所确定的中、下寒武统界线 I 上， $\delta^{13}\text{C}$ 值突然减少到 -3.028‰ ，到中寒武统最底部(相当于凯里组第 9 层第 2 分层，由 *Oryctocephalus indicus* 首现层位和大量的疑源类出现层位确定的中、下寒武统界线 II) $\delta^{13}\text{C}$ 值又快速上升到 -0.846‰ (图 3)，到凯里组第 9 层第 5 分层， $\delta^{13}\text{C}$ 值又强烈快速上升到 2.797‰ ；这种 $\delta^{13}\text{C}$ 值在中、下寒武统界线附近的强烈负迁移现象与西伯利亚、北美等地的中、下寒武统界线附近 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化是完全一致的(图 4)。这一 $\delta^{13}\text{C}$ 漂移规模大(约 4‰)，快速(约 100 ka)，而且在全球范围内可能普遍存在。因此，从生物地层、地球化学综合分析，台江八郎凯里组中、下寒武统界线很明显，而且也典型。它不仅在生物地层上表现明显，而且在古海洋碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 组成上也有很明显的变化，是很难得的中、下寒武统界线层型候选剖面。至于界线选在褶颈类三叶虫大量绝灭和 *Redlichia* 绝灭层位， $\delta^{13}\text{C}$ 值突然减少到 -3.028‰ 层位(中、下寒武统界线 I)，还是在 *Oryctocephalus indicus* 首现和大量的疑源类出现， $\delta^{13}\text{C}$ 值快速上升到 -0.846‰ 层位(中、下寒武统界线 II)，这需要进一步进行全球对比、研究来确定。

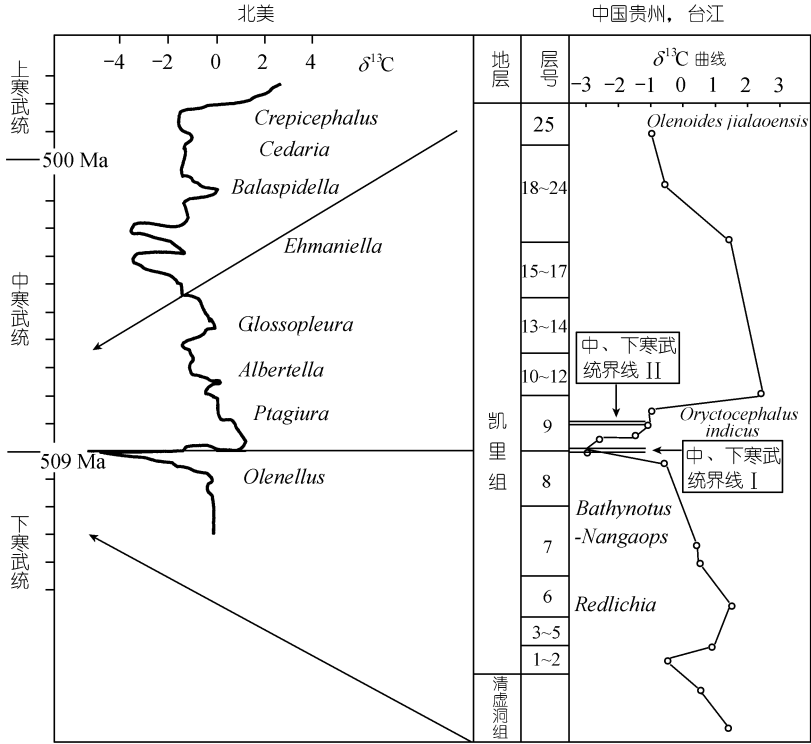


图 4 贵州台江凯里组中、下寒武统生物带和碳同位素曲线与北美同期生物带和碳同位素曲线对比
北美资料据 Montanez 等, 2000

3 中、下寒武统界线附近碳同位素变化的生物和地层意义

在早、中寒武世界线附近存在一个明显的碳同位素负异常, 这个异常而且是全球性的, 这说明是当时全球范围内古海洋事件. 这一负的碳同位素漂移正好处在已知的三叶虫和其他生物在中、下寒武统界线上大量绝灭层位^[19]. 不仅在中、下寒武统界线上有强烈的 $\delta^{13}C$ 负漂移, 而且还有 $^{87}Sr / ^{86}Sr$ 快速的上升^[6, 10, 11]. 尽管它是显生宙最大的碳同位素漂移事件, 但由于世界范围内中寒武世早期的海退引起的侵蚀使部分地层缺失, 这可以解释为什么以前的研究工作没有发现这个大规模的碳同位素负漂移. 北美大盆地中、下寒武统界线附近由页岩夹薄层碳酸盐岩层组成, 它们是快速的海平面上升的沉积记录, 以前在西伯利亚和 Laurentian 大陆剖面上也发现^[9, 20]. 在强烈的碳同位素漂移期间, 由于在页岩中缺少生物扰动以及三叶虫死亡组合的阶段记录形成的碳酸盐介壳层出现, 暗示着出现了深远的恶劣环境^[6].

负的碳同位素漂移暗示着有重大的古海洋地理的变化, 也可能是气候的变化, 这一变化进一步造成了早寒武世末期的三叶虫绝灭. 对于早寒武世末碳同位素负漂移被认为是以下原因引起: (1) 亏 $\delta^{13}C$ 水体的介入, 早寒武世末期的海侵使缺氧水体涌入浅水碳酸盐台地; (2) 由于主要生活群落衰退, 有机碳埋藏相对减少. 早寒武世海侵期间, 在含氧的表层水体之下存在缺氧水体, 导致古海洋缓慢的循环和强烈的海洋水体分层. 这样的海洋环流可能是早寒武世温室时期的特征^[21].

$\delta^{13}\text{C}$ 峰值(-4.0‰)被认为海洋碳同位素组成非常接近海洋中的陆源风化物质的碳同位素组成^[22]. 这意味着河流水体的注入对海洋同位素组成有影响, 并很大程度上使原始生产力减少和有机碳埋藏速率降低, 与此对应应在集群绝灭之后环境条件发生了重建. 随后在中寒武世初期发生 $\delta^{13}\text{C}$ 正迁移可能是由于中寒武世早期海平面下降和海洋循环引起海洋的含氧量增加的结果. 另外, 也是海洋环境条件得到了充分的改善后, 海洋表层水体生产力得到恢复的结果. 从图 2 可以看到, 在 9-2 层开始, 疑源类(代表原始生产力)开始大量出现, 说明海洋表层生产力得到了恢复. 在图 1 中, 可以看到第 8 层顶三叶虫(褶颊虫类)大量绝灭, 这就是早寒武世末期的三叶虫大绝灭, 正是这个绝灭事件, 使碳同位素值达到了 -3.028‰ 的负异常. 在台江八郎剖面上, 这次早寒武世最末期三叶虫的大绝灭到中寒武世最早期疑源类的大量出现, 两者之间地层厚度仅只有 0.8 m, 根据 Hesselbo 等人的研究, 每年沉积一个纹层, 而每个纹层厚约为 50 μm , 1 mm 厚的页岩大约需要 100 ka^[23], 那么 0.6 m 厚的地层大约需要 800 ka, 这个结果与 Kirchner 等对地史时期化石记录的大、小生物集群绝灭后生物复苏需要大约 1000 ka 的时间是基本一致的^[24], 也与华南地区奥陶纪末和晚泥盆世绝灭事件相似^[25, 26]. 台江八郎剖面早寒武世三叶虫大绝灭到疑源类大量出现这一过程大约需要 800 ka 与 Kirchner 等估计的要小, 这可能是我们还没有很精细地确定三叶虫大量绝灭和疑源类大量出现的精确层位. 另外, 页岩中有的纹层可能被侵蚀掉了, 造成估算的误差. 因此, 贵州台江八郎中、下寒武统界线上的三叶虫大绝灭和随后的疑源类大量繁盛遵循了生物集群绝灭后生物复苏所需要的时间. 这也说明研究的剖面是完整的, 它能反映生物正常演化规律, 并不是由于区域性环境变化引起了生物的局部绝灭. 因此, 该剖面上划分的生物带能代表全球范围内生物的演替, 具有广泛的地层划分和对比意义.

对应于 $\delta^{13}\text{C}$ 快速减少, 海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 出现了短暂的增加, 它反映了陆源物质的大量注入到海洋中, 这一现象在北美科罗拉多大陆边缘最明显^[6]. 另外, $\delta^{13}\text{C}$ 短时期的快速增加, 反映海洋营养水平、原始生产力、有机碳埋藏速率的提高. 相反, $\delta^{13}\text{C}$ 短时期的快速降低, 反映进入海洋的地表水体减少, 全球海洋的沉积速率降低, 导致海水 $\delta^{13}\text{C}$ 值减少. 这些短暂的海水 $\delta^{13}\text{C}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值波动可能与寒武纪短暂的海平面波动和短暂的构造事件等对古海洋地理条件和有机碳埋藏的影响有关^[27].

高分辨率碳同位素波动曲线一方面可以了解寒武纪海洋水体的同位素演变, 另一方面中、下寒武统界线附近的碳同位素负异常以前都没有被发现, 最近在北美和西伯利亚被发现后, 这次又在中国贵州台江中、下寒武统界线上被发现. 因此, 我们认为中、下寒武统界线附近的碳同位素负异常与早寒武世末三叶虫大绝灭有很大的关系. 另外, 这一碳同位素异常可为中、下寒武统界线划分和进行全球对比提供了新的途径.

但是, 中、下寒武统界线上的这一强烈碳同位素负异常与构造事件、海洋演变、古气候条件有何关系等问题, 是我们将来值得深入研究的问题.

致谢 研究过程中得到中国科学院地球化学研究所欧阳自远院士、南京地质古生物研究所尹磊明研究员、黄凤宝老师等给予指导和帮助, 贵州省知识分子工作办公室也给予资助, 在此致以衷心的感谢.

参 考 文 献

- 1 卢衍豪, 朱兆玲, 钱义元, 等. 中国寒武纪地层对比表及说明书. 北京: 科学出版社, 1982. 28~54
- 2 Brogger W C. On the age of *Olenellus* Zone in North America. *Geologiska Foreningens I Stockholm Forhandlingar*, 1886, 101(3): 182~213
- 3 张文堂. 中国下、中寒武统的界线并讨论一些褶颊虫类三叶虫. 中国科学院南京古生物研究所编, 1964. 1~38
- 4 袁金良, 赵元龙, 朱立军, 等. 贵州台江八郎下、中寒武统界线及三叶虫动物群. *古生物学报*, 1997, 36(4): 494~524
- 5 Sundberg F A, McCollum L B. *Oryctocephalids* (Corynexochida: trilobite) of the Lower-Middle Cambrian boundary interval from Valifornia and Nevada. *J Palaeont.* 1997, 71(6): 1065~1090
- 6 Montanez 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(5): 1~7
- 7 Moczydlowska M. The Lower-Middle Cambrian boundary recognized by acritarchs in Baltica and at the margin of Gondwana. *Boll Soc Paleont Ital*, 1999, 38(2-3): 207~225
- 8 Geyer G, Shergold J. The quest for internationally recognized divisions of Cambrian time. *Episode*, 2000, 23: 188~195
- 9 Brasier M D, Sukhov S S. The falling amplitude of carbon isotope oscillations through the Lower to Middle Cambrian: Northern Siberia data. *Canadian Journal of Earth Science*, 1998, 35: 353~373
- 10 Derry L A, Brasier M D, Corfield R M. Sr and C isotope in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton, a palaeoenvironmental record during the "Cambrian explosion". *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 128: 671~681
- 11 Densson R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ curve: *Chemical Geology*, 1998, 152: 325~340
- 12 赵元龙, 袁金良, 张正华, 等. 华南过渡区凯里组及同期地层的初步研究. *地层学杂志*, 1993, 17: 171~178
- 13 朱立军, 赵元龙. 贵州台江中、下寒武统界线剖面微量元素地球化学特征. *古生物学报*, 1996, 35: 623~630
- 14 Sundberg F A, 袁金良, McCollum L B, 等. Correlation of the Lower-Middle Cambrian boundary of South China and Western United of America. *古生物学报*, 1999, 38(增刊): 102~107
- 15 尹磊明, 杨瑞东. 贵州台江早、中寒武世凯里组的疑源类. *古生物学报*, 1999, 38(增刊): 66~78
- 16 杨瑞东, 尹磊明. 黔东早-中寒武世凯里组疑源类组合及其界线意义. *微体古生物学报*, 2001, (1): 55~69
- 17 Yang Ruidong, Zhao Yuanlong. Discovery of *Corallina* fossil from the Middle Cambrian of Taijiang country, Guizhou province, China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 544~547
- 18 赵元龙, 袁金良, 黄友庄, 等. 贵州台江中寒武世凯里动物群. *古生物学报*, 1994, 33(3): 263~271
- 19 Palmer A R. A proposed nomenclature for stages and series for Cambrian of Laurentian. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1998, 35: 323~328
- 20 Landing E, Bartowski K E. Oldest shelly fossils from the Taconic allochthon and late Early Cambrian sea-levels in eastern Laurentian. *Journal of Palaeontology*, 1996, 70: 741~761
- 21 Railsback L B, Ackerly S C, Anderson T F, et al. Palaeontological and isotope evidence for warm saline deep waters in Ordovician oceans. *Nature*, 1990, 343: 156~159
- 22 Kump L R. Interpreting carbon-isotope excursions: Strangelove oceans. *Geology*, 1991, 19: 299~302
- 23 Hesselbo S P, Groche D R, Jenkyns C J, et al. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event. *Nature*, 2000, 406: 392~395
- 24 Kirchner J, Weil A. Delayed biological recovery from extinction throughout the fossil record. *Nature*, 2000, 404: 177~180
- 25 戎嘉余, 詹仁斌. 奥陶纪末集群灭绝后腕足动物复苏的主要源泉——论先驱型生物的分类. *中国科学, D 辑*, 1999, 29(2): 232~239
- 26 廖卫华. 中国晚泥盆世 F/F 生物集群绝灭事件及其后的生物复苏的研究. *中国科学, D 辑*, 2001, 31: 663~667
- 27 Montanez I P, Banner J L, Osleger D A, et al. Integrated Sr isotope stratigraphy and relative sea-level history in Middle Cambrian platform carbonates. *Geology*, 1996, 24: 917~920