

湖南永顺地区寒武系 SPICE 事件 及其地层对比意义

王传尚 李旭兵 白云山 刘 安 曾雄伟

(武汉地质调查中心,湖北 武汉 430223)

摘要:对采自斜坡相区寒武系湖南永顺王村剖面的 38 件碳氧稳定同位素样品测试分析和研究显示,在该剖面存在一个碳稳定同位素的异常事件——SPICE 事件。该事件碳稳定同位素具有明显的正漂移,其值从花桥组顶部的 0.69‰ 逐渐增加,至车夫组中部达到峰值 3.05‰,其后,其值逐渐减小,大致在比条组中部达到最低 0.67‰。该事件的成因不但和上升流、有机质快速埋藏等有关,还叠加了碳酸盐岩风化作用的因素;鉴于该事件具有广泛的可比性,在地层划分对比中,特别是在局限台地相地层划分对比中具有重要意义。

关键词:寒武系;SPICE 事件;碳酸盐岩风化作用;地层划分与对比

中图分类号:P539.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)06-1440-06

湖南永顺王村剖面是中国华南斜坡相寒武系的经典剖面(图 1),也是全球古丈阶底界界线层型剖面,同时,中国华南寒武系年代地层系统中的王村阶也命名于此^[1]。这条剖面经过中国古生物学家多年的研究,其三叶虫演化序列和三叶虫带的划分已经趋于完善。因此,在这条剖面开展有关碳氧稳定同位素的研究具有得天独厚的优势。

关于寒武系碳稳定同位素的研究,中国学者根据国内外研究成果,特别是中国华南碳稳定同位素资料,曾系统总结了寒武系碳稳定同位素异常事件序列^[2,3],在寒武系 12 个碳稳定同位素异常事件中,SPICE 事件无疑是一个引人注目的正异常事件,该事件是一个全球性的碳稳定同位素正异常事件,在劳伦大陆、哈萨克斯坦、华南和澳大利亚等地均有发现^[4],并且,在不同的沉积相区,其表现形式基本一致,在中国斜坡相区湘西桃源瓦尔岗剖面^[4]和台地相区贵州金沙岩孔剖面^[5]均记录了这次碳稳定同位素异常事件,因此,SPICE 事件是地层划分对比的一个十分有用的标志,特别是在中国华南局限台地相

区的娄山关组,沉积了一套巨厚的白云岩,生物化石十分稀少,零星发现的化石常常又是对环境忍耐力高、地质延限长的物种,难以进行地层的划分与对比。由于 SPICE 事件起始于三叶虫 *Glyptagnostus reticulatus* 带之底,而 *G. reticulatus* 是全球寒武系芙蓉统及排碧阶底界的界线生物标志,因此,该事件的起始面与寒武系武陵统和芙蓉统的界线一致。对于中国出露范围广阔的寒武系娄山关组(三游洞组)内部年代地层的划分具有重要意义。本文在斜坡相区寒武系湖南永顺王村剖面所开展的碳稳定同位素研究,进一步丰富了这一时期的碳稳定同位素资料,并再次证实了这一事件在地层划分对比中的重要作用。

1 样品采集、测试和可靠性分析

在永顺王村剖面共采集碳、氧同位素样品 38 件,样品测试由武汉地质调查中心(原宜昌地质矿产研究所)地球化学开放实验室通过 MAT-251 质谱仪完成,并由该实验室按 PDB 标准计算,给出最终测试结果(表 1),测试精度优于 0.1‰。

收稿日期:2011-03-28;改回日期:2011-06-01

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010782005,1212011121103)资助。

作者简介:王传尚,男,1969 年生,博士,研究员,主要从事早古生代地层学研究;E-mail:wangchuanshang@yahoo.com.cn。

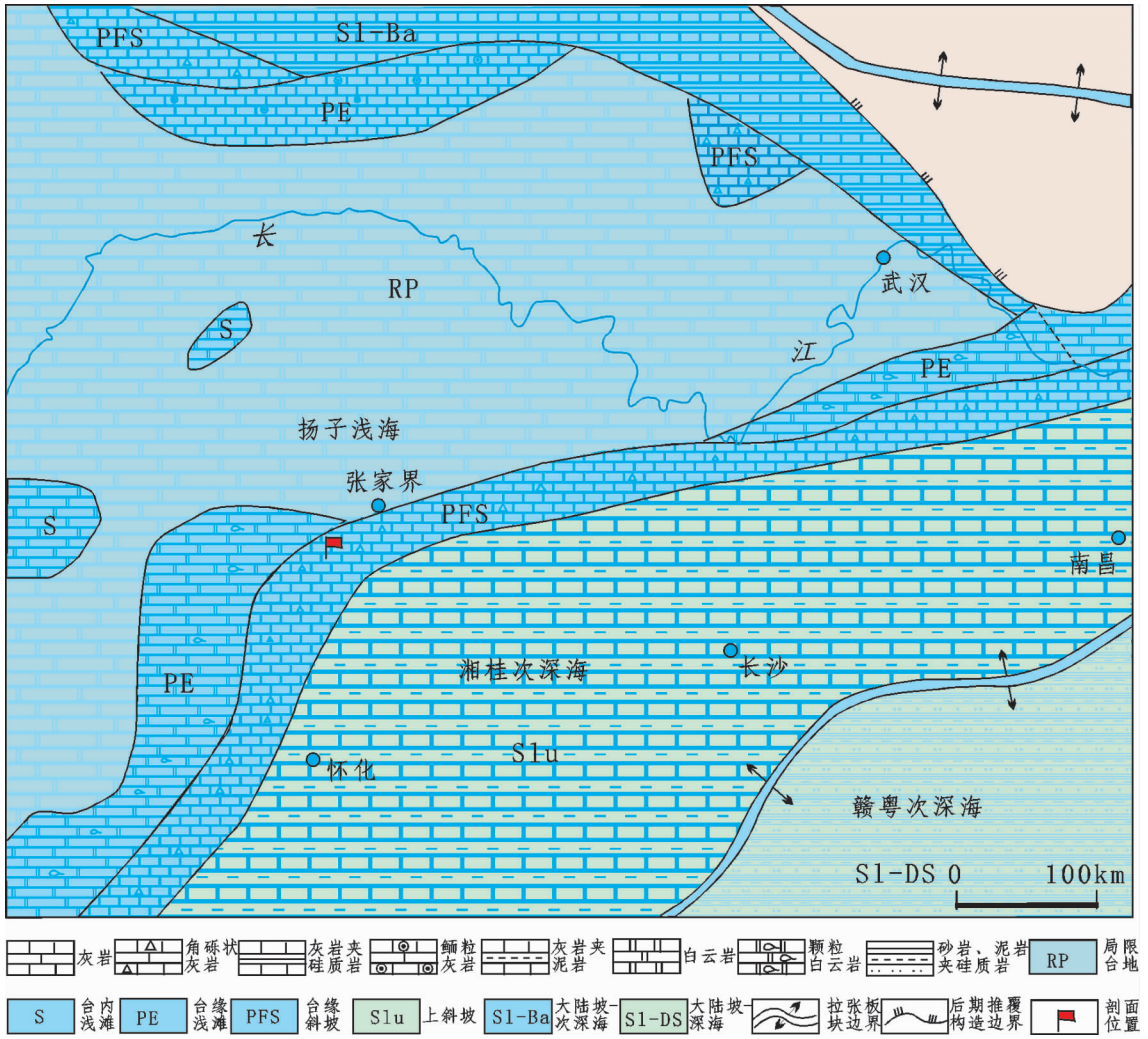


图 1 研究区寒武系武陵统—芙蓉统岩相古地理及王村剖面位置^[12]

Fig.1 Lithofacies paleogeography of Cambrian Wulingian-Furongian Series in the study area and location of the Wangcun section^[12]

为保证测试的可靠性，所采集的样品均为新鲜的岩石，并尽量避免生物碎屑的混入。对部分样品还进行了重复测试，共 7 件重复样，占全部样品数量的 18.4%，两次测试的结果均十分接近(表 1)。表明测试数据是可靠的。

鉴于寒武系碳酸盐岩不可避免地受到后期成岩作用的影响，特别是在大气淡水的参与下，其同位素值可能受到较大影响，虽然在采样过程中，力求采集无重结晶、无生屑的泥灰岩，但对于寒武系碳酸盐岩而言，地质历史过程对碳氧稳定同位素测试值的影响仍然是难以避免的。测试结果显示，有 10 个样(含重复样)的氧同位素值小于-10‰，约为总样品数(含重复样)的 22.2%，其中追屯组下部的个别样品，

其氧同位素值甚至低于-12‰，显然是受到了后期成岩作用、大气淡水等的影响。从碳氧稳定同位素的分布图看(图 2)，二者之间的相关性较小，为 0.204，表明本次研究所测试的样品虽然有部分样品的数据可信度不高，但总体上看，所测试的数据受后期地质作用的影响较小。换言之，该测试数据较为可靠，基本上能够反映原始沉积期的碳氧稳定同位素的组成特点。

2 碳稳定同位素的演化特征

碳稳定同位素样品采集于王村剖面的花桥组的近顶部、车夫组、比条组和追屯组中，鉴于花桥组、车夫组和比条组在该剖面的岩性差别微小，分组主要

表 1 湖南永顺王村寒武系剖面碳氧稳定同位素测试结果

Table 1 Stable carbon and oxygen isotopic data of the Cambrian Wangcun section in Yongshun, Hunan Province

样品号	样品名称	层位	$\delta^{13}C/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$
∈ 2hq43-1	泥灰岩	花桥组	0.69	-8.69
∈ 2hq45-1	泥灰岩	花桥组	0.84	-9.26
∈ 2hq46-1	泥灰岩	花桥组	0.65	-8.96
∈ 2hq47-1	泥灰岩	花桥组	1.24	-9.05
∈ 2hq47-1*	泥灰岩	花桥组	1.14	-9.15
∈ 3cf48-1	泥灰岩	车夫组	1.09	-8.69
∈ 3cf49-1	泥灰岩	车夫组	0.80	-8.91
∈ 3cf50-1	泥灰岩	车夫组	0.94	-8.78
∈ 3cf51-1	泥灰岩	车夫组	2.31	-9.00
∈ 3cf51-1*	泥灰岩	车夫组	2.35	-9.10
∈ 3cf52-1	泥灰岩	车夫组	2.01	-8.73
∈ 3cf54-1	泥灰岩	车夫组	2.26	-9.51
∈ 3cf55-1	泥灰岩	车夫组	2.47	-8.68
∈ 3cf56-1	泥灰岩	车夫组	2.94	-9.23
∈ 3cf57-1	泥灰岩	车夫组	3.05	-9.35
∈ 3cf58-1	泥灰岩	车夫组	2.22	-8.96
∈ 3cf59-1	泥灰岩	车夫组	2.36	-10.25
∈ 3cf60-1*	泥灰岩	车夫组	2.42	-8.42
∈ 3cf60-1	泥灰岩	车夫组	2.40	-8.36
∈ 3bt61-1	泥灰岩	比条组	2.18	-9.22
∈ 3bt62-1	泥灰岩	比条组	1.98	-9.19
∈ 3bt63-1	泥灰岩	比条组	2.25	-9.77
∈ 3bt64-1*	泥灰岩	比条组	2.61	-9.44
∈ 3bt64-1	泥灰岩	比条组	2.55	-9.36
∈ 3bt65-1	泥灰岩	比条组	0.67	-9.98
∈ 3bt66-2	泥灰岩	比条组	1.93	-9.32
∈ 3bt67-1	泥灰岩	比条组	1.54	-9.71
∈ 3bt68-1*	泥灰岩	比条组	1.74	-9.38
∈ 3bt68-1	泥灰岩	比条组	1.79	-9.30
∈ 3bt69-1	泥灰岩	比条组	1.63	-9.10
∈ 3bt70-1	泥灰岩	比条组	1.49	-8.63
∈ 3bt71-1	泥灰岩	比条组	1.48	-8.77
∈ 3bt72-1	泥灰岩	比条组	1.53	-9.46
∈ 3zt73-1	泥灰岩	追屯组	1.52	-9.77
∈ 3zt74-1	泥灰岩	追屯组	1.33	-12.13
∈ 3zt75-1	泥灰岩	追屯组	-0.73	-13.41
∈ 3zt76-1	泥灰岩	追屯组	1.81	-10.68
∈ 3zt76-1*	泥灰岩	追屯组	1.56	-10.81
∈ 3zt77-1	泥灰岩	追屯组	1.22	-11.36
∈ 3zt78-1	泥灰岩	追屯组	1.41	-10.48
∈ 3zt79-1	泥灰岩	追屯组	1.36	-10.27
∈ 3zt80-1	泥灰岩	追屯组	1.19	-9.95
∈ 3zt81-1	泥质白云	追屯组	0.49	-9.14
O1n82-2*	泥灰岩	追屯组	0.47	-11.87
O1n82-2	泥灰岩	追屯组	0.51	-11.80

注：* 样品为重复样。

是以生物地层为依据,因此,也有学者将上述各组统称花桥组^[6]。本文虽然保留了上述岩石地层单位的名称,但对于该剖面而言,上述分组带有明显的生物地层的印记。

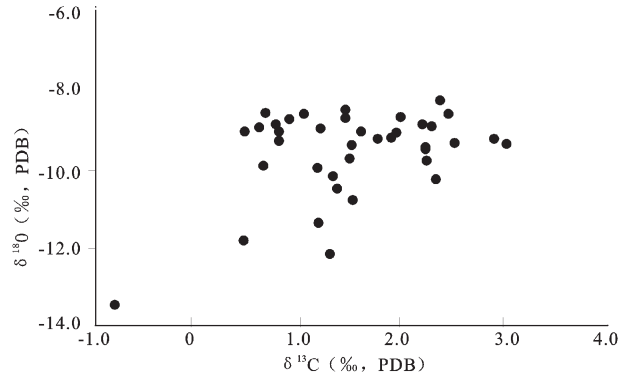


图 2 湖南永顺王村剖面寒武系碳酸盐岩碳氧稳定同位素分布图

Fig.2 Distribution of $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ from the Cambrian carbonate in the Wangcun section, Yongshun, Hunan Province

从测试结果看,碳稳定同位素的变化区间为-0.73‰~3.05‰,均值为 1.59‰,从花桥组顶部开始,碳稳定同位素具有明显的正漂移的趋势,其值从 0.69‰逐渐增加,至车夫组中部达到峰值(样品号 ∈ 3cf57-1)3.05‰,其后,其值逐渐减小,大致在比条组中部(样品号 ∈ 3bt65-1)达到最低 0.67‰。这一碳稳定同位素的正漂移事件被称为 SPICE 事件(图 3)。

SPICE 事件之后,在本剖面碳稳定同位素基本上在 1.0‰~2.0‰变化,且呈缓慢降低的趋势,其中在追屯组中部(样品号 ∈ 3zt75-1)发现一个负异常值 -0.73‰,其对应的氧同位素值为-13.41‰,是本次样品中氧稳定同位素的最小值,应该与后期成岩作用影响有关,但根据前人的研究^[2,3],这一层位的确存在一次碳稳定同位素的负漂移(TOCE 事件),因此,该数据有可能是 TOCE 事件与后期蚀变叠加的结果,至少,为该事件在本剖面的存在提供了一条有价值的线索。

3 SPICE 碳稳定同位素异常的原因及其地质意义

SPICE 事件的起因,目前还未完全查明, Saltzman et al. 对该事件的起因进行了深入的分析,在劳伦大陆,该事件对应于芙蓉世最大的海退期,并将其与奥陶系末的大海退及其与之相关的碳同位素正异常事件进行了对比分析^[4]。根据前人所建立的大洋环流模型,其中,模型 SA 为全球对称环流,由中纬度高盐度冷水所形成的下降流和赤道上升流所驱动;模型 PP 为全球非对称环流,由水体温差和盐

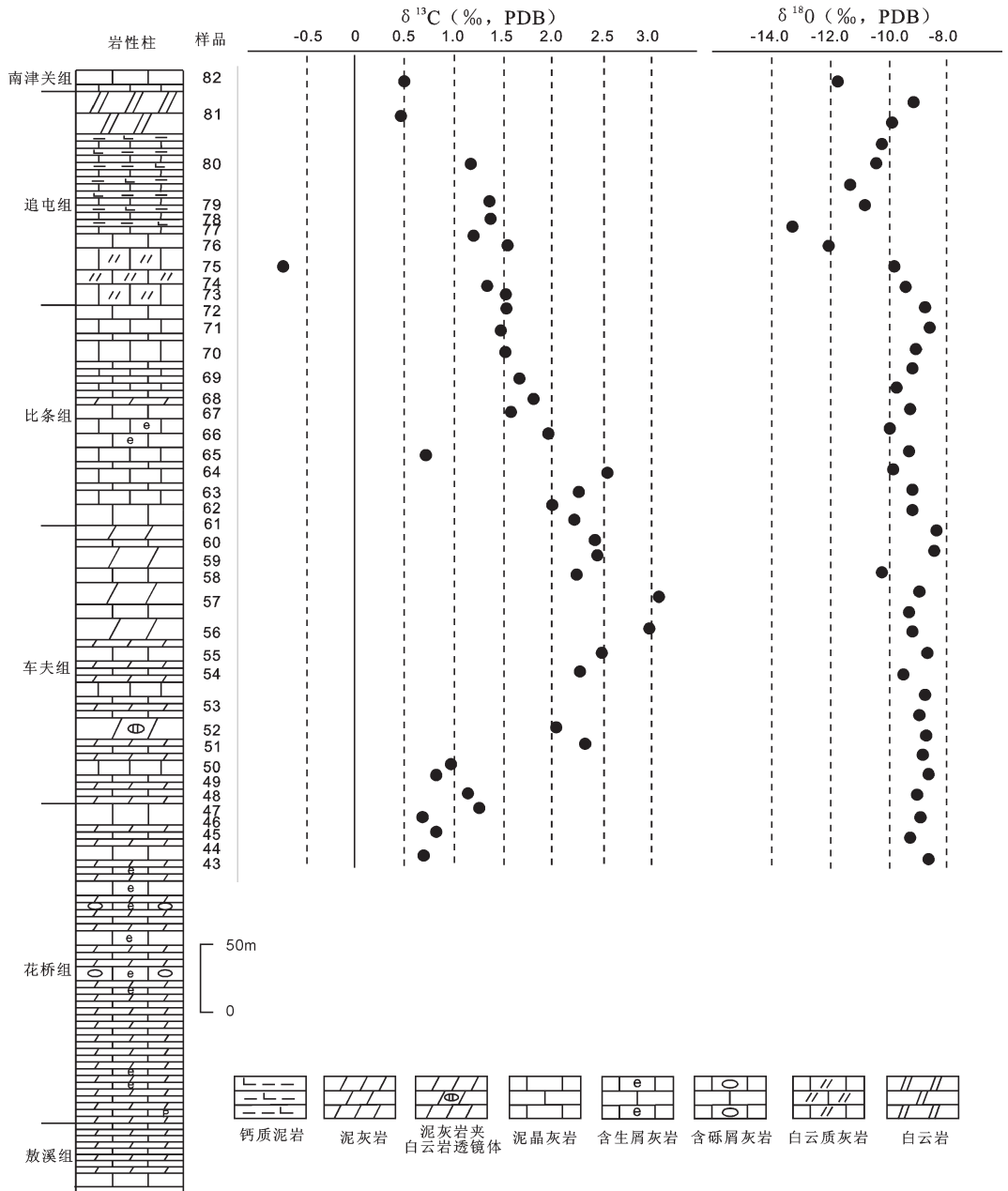


图 3 湖南永顺王村寒武系剖面碳氧稳定同位素演化趋势

Fig.3 The evolution of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the Cambrian Wangcun section, Yongshun, Hunan Province

度差所驱动,在地球的一极形成下降流,在另一极形成上升流^[7,8]。Saltzman et al.认为由于大洋环流的改变,由模型 SA 向模型 PP 转换,导致沿海上升流的加强和底栖生物的灭绝^[4]。左星勋等认为是该异常与生物的繁盛及有机质快速埋藏所致^[9]。

但对碳稳定同位素正异常的解释,Kump et al.提出了碳酸盐岩的风化作用驱动的模式^[9,10],认为相对于有机碳和硅酸盐岩的风化作用,碳酸盐岩的风

化量的增加,能够驱动大洋水中同位素组分大幅度的正异常。其针对于奥陶系末期碳稳定同位素异常的研究表明,这一模式是合理的。在奥陶系末期,海平面大幅下降,该时期全球低纬度地区所发育的十分广阔的台地相碳酸盐岩沉积露出水面,并接受风化剥蚀,从而改变了大气和海水中的碳循环,使碳稳定同位素出现了大幅度的正偏。

在寒武纪武陵统和芙蓉统之交,其构造古地理

背景、古气候等和奥陶纪末期均有较大的差异,寒武纪这一时期的全球海平面变化并非由冈瓦纳大陆冰川的凝聚和消融所驱动,其海平面变化的机制目前还缺乏深入的研究。但奥陶系末期碳稳定同位素的正异常事件所产生的机制,对 SPICE 事件是否也有借鉴意义呢?循着这一思路,笔者等发现,SPICE 事件的峰值在劳伦大陆(美国内华达 Shingle Pass 剖面)对应于最大海退面^[4],在冈瓦纳大陆的澳大利亚昆士兰,所识别出的 SPICE 事件是在深水沉积中,因此,其对海平面的变化并不敏感。但在冈瓦纳周缘的地体——哈萨克斯坦,SPICE 事件记录于向上变浅的碳酸盐岩沉积序列中^[4]。在华南,湖南桃源瓦儿岗剖面和本文所研究的湖南永顺王村剖面,所处的古地理位置均为斜坡相带,从沉积序列上看,自武陵统早期大规模的海侵后,海平面处于长期持续下降的阶段^[6,11]。而在局限台地相区,由于海水非常浅,海平面的变化在该相区造成经常性暴露面(潮上带),在局限台地相区贵州岩孔剖面同样观察到了 SPICE 事件的记录^[9]。因此,笔者等认为,SPICE 事件应该是与一次全球性的海退事件相吻合,尽管这一海退事件在深水沉积中表现不明显,在浅水中表现出多次海退事件的叠加。

海平面的下降,必然导致大面积的碳酸盐岩台地露出水面,接受风化剥蚀。在美国的内华达,这一时期发育了从犹他州东北部至加利福尼亚州东南部绵延数百千米的广阔的碳酸盐岩台地,Shingle Pass 剖面位于该台地的外部边缘^[4]。在华南同样发育了一个十分广阔的碳酸盐岩台地,西至四川盆地西缘,东抵江南斜坡带^[12],跨度达 450 km 以上,本文所研究的剖面即处于江南斜坡带上(图 1)。在全球海退的大背景下,碳酸盐岩台地出现大面积的裸露,并被风化剥蚀,因此,笔者认为 SPICE 事件的成因不仅如前人所推测的那样,还应叠加了碳酸盐岩的风化作用。

4 结 论

SPICE 事件是一次全球性的碳稳定同位素正异常事件,该事件可作为寒武系芙蓉统和武陵统之间的辅助界线标志,为中国寒武系化石稀少的碳酸盐岩沉积的娄山关组及相当地层的划分与对比提供了依据。其成因目前虽然尚有争议,但碳酸盐岩的风化作用应是导致该正异常事件的重要因素之一。

参考文献(References):

- [1] 彭善池. 华南新的寒武纪生物地层序列和年代地层系统 [J]. 科学通报, 2009, 54(18):2691-2698.
Peng Shanchi. The newly-developed Cambrian biostratigraphic succession and chronostratigraphic scheme for South China [J]. Chinese Sci. Bull., 2009, 54(18):2691-2698(in Chinese).
- [2] Peng Shanchi, Babcock L E. Cambrian Period [C]//Ogg J, Ogg G, Gradstein F (eds.). The Concise Geologic Time Scale. Cambridge: Cambridge University Press, 2008:37-46.
- [3] Zhu Maoyan, Babcock L E, Peng Shanchi. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction [J]. Palaeoworld, 2006, 15:217-222.
- [4] 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 [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 162: 211-223.
- [5] 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 [J]. 地球化学, 2008, 37(2): 118-128.
Zuo Jingxun, Peng Shanchi, Zhu Xuejian. Carbon isotope composition of Cambrian carbonate rocks in Yangtze Platform, South China and its geological implications [J]. Geochimica, 2008, 37(2):118-128(in Chinese with English abstract).
- [6] Peng Shanchi, Babcock L E, Zuo Jingxun, et al. Cambrian - Ordovician stratigraphy at Luoyixi and Wangcun, Hunan Province, China: Stratotypes for bases of the Wangcunian and Youshuan Stages, and candidate stratotype for the base of an unnamed global stage defined by the FAD of *Lejopyge laevigata* [C]//Peng S C, Babcock L E, Zhu M Y (eds.). Cambrian System of China and Korea——Guide to Field Excursions. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005:117-135.
- [7] Thual O, McWilliams J C. The catastrophe structure of thermohaline convection in a two-dimensional fluid model and a comparison with low-order box models [J]. Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 1992, 64:67-95.
- [8] Saravanan R, McWilliams J C. Multiple equilibria, natural variability, and climate transitions in an idealized ocean-atmosphere model [J]. Journal of Climate, 1995, 8:2296 - 2323.
- [9] Kump L R, Arthur M A, Patzkowsky M E, et al. A weathering hypothesis for glaciation at high atmospheric $p\text{CO}_2$ during the Late Ordovician [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 152:173-187.
- [10] Kump L R, Arthur M A. Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter [J]. Chemical Geology, 1999, 111: 299-302.
- [11] Peng Shanchi, Babcock L E, Lin Huanling, et al. Cambrian stratigraphy at Paibi, Hunan Province, China: GSSP and reference section for the base of the Furongian Series and the Paibi Stage [C]

//Peng S C, Babcock L E, Zhu M Y (eds.). Cambrian System of China and Korea—Guide to Field Excursions. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005:136–146.

[12] 刘宝珺, 许效松主编. 中国南方岩相古地理图集 (震旦纪—三叠

纪)[M]. 北京:科学出版社, 1994:54–59.

Liu Baojun, Xu Xiaosong. Atlas of Sedimentary Facies and Palaeogeography in South China[M]. Beijing: Science Press, 1994: 54–59 (in Chinese).

The Cambrian SPICE event in Yongshun area, Hunan Province, and its significance for stratigraphic correlation

WANG Chuan-shang, LI Xu-bing, BAI Yun-shan, LIU An, ZENG Xiong-wei

(Wuhan Center for Geological Survey, Wuhan 430223, Hubei, China)

Abstract: An analysis of thirty-eight C/O stable isotopic samples collected from the Wangcun section in the Cambrian slope facies of Yongshun area within Hunan Province shows that there is a carbon isotope abnormal event, i.e., the SPICE event. The event shows remarkable positive shift of stable carbon isotopes, whose value increases from 0.69‰ at the top of Huaqiao Formation to the peak of 3.05‰ in the middle of Chefu Formation, and then decreases gradually to 0.67‰ in the middle of Bitiao Formation. The event was genetically not only related to the upwelling and the fast burial of organic materials but also to the weathering of carbonate rocks. Due to its extensive correlativity, this event is of great significance for stratigraphic correlation, especially for the correlation of strata in the restricted platform.

Key words: Cambrian; SPICE event; carbonate weathering; stratigraphic correlation

About the first author: WANG Chuan-shang, male, born in 1969, doctor, professor, engages in the study of Paleozoic stratigraphy; E-mail: wangchuanshang@yahoo.com.cn.