

# 中国东部寒武系与奥陶系界线地层的碳氧同位素研究\*

沈渭洲 方一亭 倪琦生 刘燕 林雨萍

(南京大学地球科学系,南京 210093)

**提要** 对我国东部不同地层区一些代表性的寒武系—奥陶系界线层位开展了碳、氧同位素研究。结果表明,由于沉积环境差异和成岩蚀变影响,界线层位的  $\delta^{18}O$  值变化较大,规律性不明显,  $\delta^{13}C$  值变化虽小,但在界线处均发生不同程度漂移。漂移的层位与寒武纪—奥陶纪主要生物群面貌变化的界线相一致。综合各方面资料分析,笔者认为,碳同位素组成的漂移很可能由晚寒武世到早奥陶世时期内海平面的升降所引起。

**关键词** 寒武系—奥陶系界线 碳氧同位素 海平面升降 中国东部

**分类号** P 53

**第一作者简介:** 沈渭洲 男 56岁 教授 博士生导师 同位素地球化学

## 1 地层概况

我国江南地层区、扬子地层区和华北地层区东部寒武系与奥陶系发育,寒武系与奥陶系界线附近地层出露良好,沉积连续,交通方便,是研究寒武系与奥陶系界线地层的理想地区。近 20年来,我国对寒武系—奥陶系界线地层进行了详细的研究,对界线附近的岩性特征和生物分布作了大量工作<sup>[1-6]</sup>,地层层序和生物面目已清楚,并在此基础上对寒武系与奥陶系界线作了重要的修正。寒武系与奥陶系界线在皖南、浙西和赣北地区,不是在西阳山组灰岩与谭家桥组(印诸埠组)页岩之间,而是在西阳山组灰岩内部<sup>[1]</sup>;南京地区,不是在观音台组与仑山组之间,而在观音台组白云岩内部<sup>[6]</sup>;在宿县夹沟,不是在三山子组与贾汪组之间,而在三山子组白云岩内部<sup>[2]</sup>。也就是说,在我国东部地区,寒武系与奥陶系界线并非在岩性有明显差异之处,而在同一岩相,相似岩性之间,其间无沉积间断。

寒武系与奥陶系的生物群面貌有很明显的差异,其变化的重要时期之一是在 Tremadocian 初期。在皖南胡乐等地为代表的江南地层区,以营漂浮生活的笔石,如 *Rhabdinopora flabelliforme praeparabola* 或 *Staurograptus dichotomus* 的出现

作为奥陶系的底界;在以宿县夹沟和唐山赵各庄等地为代表的华北地层区,以索克虫类等常见于寒武系的三叶虫类的消失作为寒武系的顶界<sup>[3]</sup>,大体相当于牙形刺 *Cordylodus proavus* 带之底。这一界线相当于北欧地区 Tremadocian 之底。

我国寒武系与奥陶系界线地层研究,主要偏重于生物地层学,除吉林浑江县大阳岔作过碳、氧同位素测定外<sup>[5]</sup>,其余地区未见碳、氧同位素的研究报道。本文是在对我国东部不同地层区代表性的界线地层剖面:江南地层区的宁国胡乐剖面,扬子地层区的南京汤山剖面以及华北地层区的唐山赵各庄长山剖面 and 皖北宿县夹沟剖面等界线地层剖面系统采集样品,并开展碳、氧同位素研究,目的是了解这些代表性地区寒武系与奥陶系界线地层的碳、氧同位素特征,探讨其与生物群变革之间的联系和原始沉积成岩环境

## 2 样品和分析方法

本文研究的我国东部寒武系—奥陶系界线层位主要是皖南胡乐西阳山组,皖北夹沟三山子组,南京汤山观音台组和唐山赵各庄凤山组。野外采集的样品新鲜,无次生变化。在寒武系与奥陶系界线处,采样密度加大(30~50 cm)。在四个剖面上共采集 77

\* 本文获国家自然科学基金项目(49373189)资助

收稿日期:1996-07-30

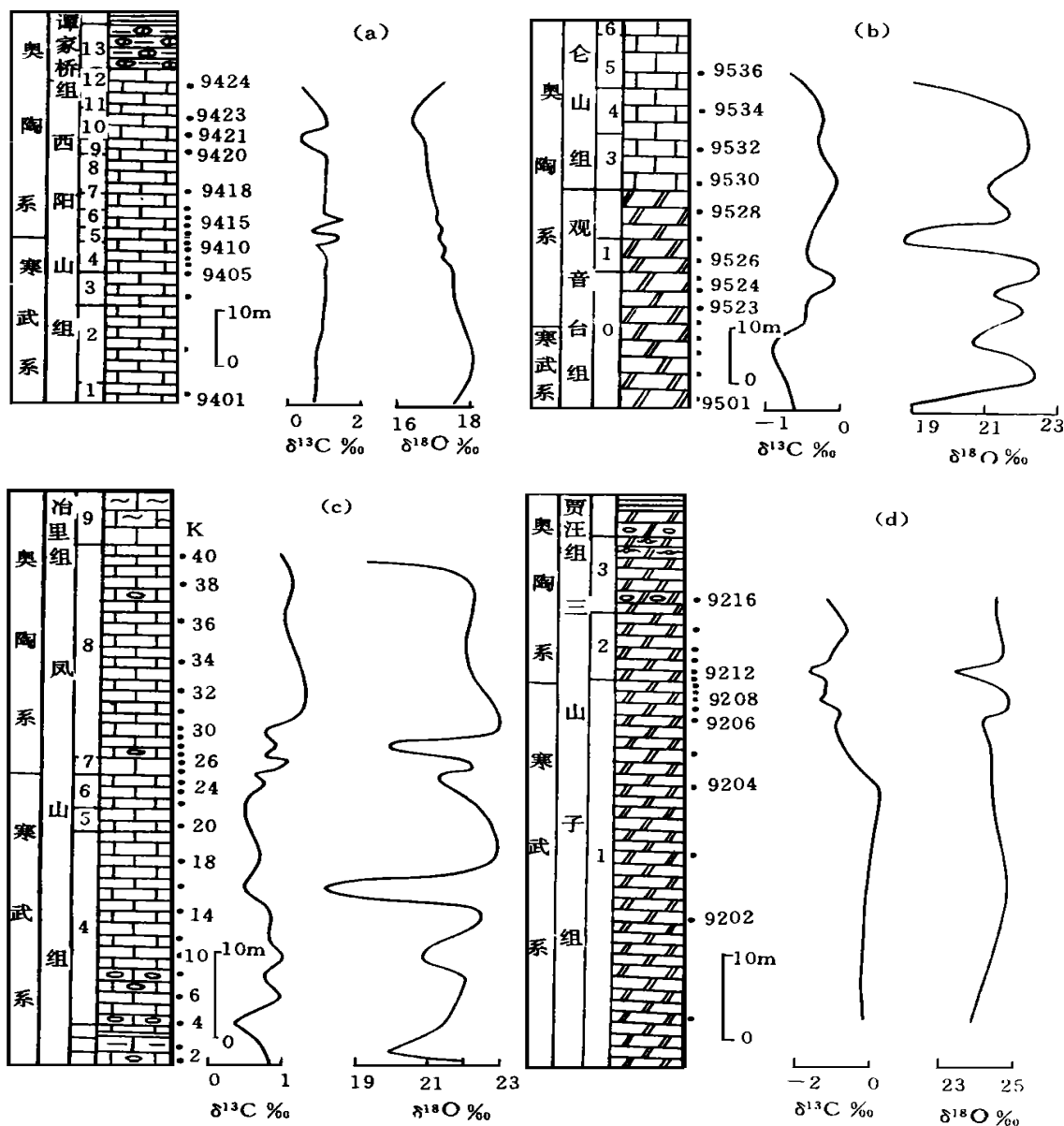
个样品。碳、氧同位素分析采用磷酸法,质谱测定采用 MAT-252质谱计,样品制备和质谱测定均由南京大学成矿作用重点实验室完成。对碳酸盐同位素标准“北大 7901”测定的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为  $2.62\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值为  $-5.47\text{‰}$ 。样品分析精度优于  $0.1\text{‰}$ , 分析结果结果示于图 1

### 3 结果与讨论

#### 3.1 氧同位素

虽然总的来看,我国东部寒武系-奥陶系界线

层位碳酸盐岩石的氧同位素组成变化较明显,  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $16.2\text{‰} \sim 24.8\text{‰}$ , 但就每个剖面来说, 变化幅度一般小于  $3\text{‰}$ , 如皖北夹沟三山子组为  $23.4\text{‰} \sim 24.8\text{‰}$ , 皖南胡乐西阳山组为  $16.2\text{‰} \sim 18.2\text{‰}$ , 南京汤山观音台组为  $18.7\text{‰} \sim 22.5\text{‰}$ , 唐山赵各庄凤山组为  $19.4\text{‰} \sim 22.9\text{‰}$  (有一个样品为  $18.1\text{‰}$ )。其中以夹沟三山子组白云岩的  $\delta^{18}\text{O}$  值最高, 接近于寒武纪-奥陶纪时期正常海相碳酸盐岩石值<sup>[7]</sup>。皖南胡乐西阳山组灰岩的  $\delta^{18}\text{O}$  值最低, 这是因为该界线层位含大量营漂移生物的反称笔石和网格笔石类,



a. 皖南宁国胡村 b. 南京汤山建新村 c. 唐山赵各庄长山 d. 皖北宿县夹沟

图 1 我国东部寒武系-奥陶系界线层位的碳、氧同位素组成

Fig. 1 Carbon and oxygen isotopic compositions of the Cambrian-Ordovician boundary strata in East China

少见底栖生活的三叶虫类,并见有星散状黄铁矿分布,反映它们是在水体较深和相对缺氧的还原环境中形成。赵各庄凤山组灰岩和汤山观音台组白云岩尽管岩性不同,但它们的  $\delta^{18}\text{O}$  值较为相似,而且均显示出较明显的波动变化(图 1),表明这些碳酸盐在埋藏成岩过程中或成岩以后与贫  $^{18}\text{O}$  的孔隙流体之间发生了程度不同的氧同位素交换。

在所研究的界线层位中,南京汤山观音台组和皖北夹沟三山子组为白云岩。有关白云岩的成因历来存在“同生成因”和“交代成因”两种观点。同生成因和交代成因白云岩中共生白云石与方解石的氧同位素组成具有明显的区别,因而开展氧同位素研究有助于查明白云岩的成因。在白云岩属同生成因的情况下,其中的白云石和方解石是在同位素平衡的条件下,从同一种溶液中沉淀形成的。根据高温条件下分馏系数的实验结果外推,由这种方式形成的白云石,其  $\delta^{18}\text{O}$  值应比共生的方解石的  $\delta^{18}\text{O}$  值要高  $5 \sim 7\text{‰}$ 。如果白云岩是在成岩作用初期通过交代的方式形成,那么,由于当时孔隙水的同位素组成与沉淀方解石时溶液的组成相似,因而白云石与方解石具有相似的同位素组成。如果交代作用发生在成岩作用晚期,则由于孔隙水与沉积物之间长期的同位素交换,其同位素组成,尤其是氧同位素组成与最初沉淀方解石时的组成区别明显,因而此时形成的白云石的氧同位素组成变化明显<sup>[8]</sup>。

表 1 观音台组和三山子组白云岩中方解石和白云石的氧同位素组成

Table 1 Oxygen isotopic compositions of calcite and dolomite in dolomite rocks from Guanyintai and Sanshanzi Formations

层位	样品	$\delta^{18}\text{O}_{\text{方}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{白}}(\text{‰})$
观音台组	9518	20.60	20.53
	9521	21.35	20.96
	9523	22.14	21.40
	9524	21.26	20.65
	9525	22.26	20.75
三山子组	9201	22.21	21.92
	9205	22.76	22.05

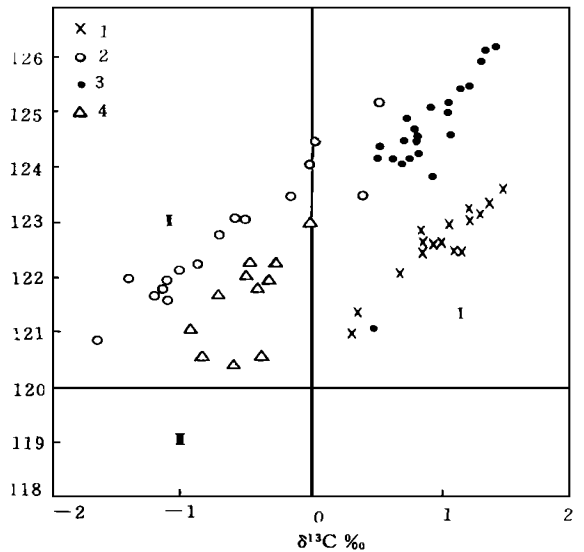
表 1 列出了汤山观音台组顶部和三山子组白云岩中方解石和白云石的氧同位素组成。由表 1 所列

数据可知,白云石的  $\delta^{18}\text{O}$  值不仅与方解石的值十分相似,而且均稍低于方解石的值,从而证实所研究的白云岩是由成岩作用初期发生的交代作用形成的,属准同生交代成因白云岩。

### 3.2 碳同位素

如表 1 和图 1 所示,在所研究的寒武系-奥陶系界线层位上,碳酸盐岩石碳同位素组成的变化有两个明显的特点:

(1)  $\delta^{13}\text{C}$  值变化小 ( $-1.6\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ ),其中赵各庄凤山组 ( $0.4\text{‰} \sim 1.4\text{‰}$ ) 和胡乐西阳山组 ( $0.4\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ ) 均为正值,汤山观音台组 ( $-0.1\text{‰} \sim -0.9\text{‰}$ ) 和夹沟三山子组 ( $0.5\text{‰} \sim -1.4\text{‰}$ ) 基本为负值。在  $\delta^{13}\text{C}-Z$  图解上,凤山组和西阳山组位于海底成岩环境区域内,而观音台组和三山子组则位于埋藏成岩环境区域内(图 2)。由于成岩过程中碳酸盐岩石的碳同位素组成一般不发生变化,因而碳同位素组成能较好地反映原始沉积成岩环境



1. 皖南宁国胡乐 2. 皖北宿县夹沟 3. 唐山赵各庄 4. 南京汤山  
I. 海底成岩环境 II. 埋藏成岩环境 III. 大气淡水成岩环境

图 2 中国东部寒武-奥陶系碳酸盐岩石的  $\delta^{13}\text{C}$  图

$$[Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)]$$

Fig. 2  $\delta^{13}\text{C}-Z$  diagram of the Cambrian-Ordovician carbonate rocks in East China

(2) 在所有寒武系-奥陶系界线处,  $\delta^{13}\text{C}$  值均发生一定程度漂移。这种漂移是渐进的,幅度较小,除夹沟剖面接近于  $1\text{‰}$  外,其余三个剖面均为  $0.5\text{‰}$  左右。值得注意的是  $\delta^{13}\text{C}$  的漂移层位与生物群变化的界线相一致。在皖南胡乐  $\delta^{13}\text{C}$  的漂移与营飘浮生

活的笔石的出现相一致,在皖北夹沟和唐山赵各庄与索克虫类等为代表的寒武纪三叶虫的消失相一致,牙形刺动物群的变化也在这一界线附近较为显著。关于碳酸盐岩石  $\delta^{13}\text{C}$  值的漂移,目前主要存在两种假设:

(1)地外事件假设<sup>[9,10]</sup> 这种假设认为,由于地外星球撞击地球产生的冲击波和大量尘埃使地球表面的气候条件发生急剧变化,导致生物突然绝灭。这些大规模死亡的生物不可能及时被埋藏,它们在氧化、分解过程中释放出富<sup>12</sup>C和<sup>16</sup>O的CO<sub>2</sub>气体,后者与海水中溶解碳产生同位素交换,从而使沉积的碳酸盐岩石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显下降。由于这种事件是突发性的,而且能使生物在瞬间大量死亡,因而在剖面上表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 值陡降。如目前公认由地外事件引起的白垩系-第三系界线层位碳酸盐岩石 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化幅度为2‰~4‰<sup>[11]</sup>,最大可达8‰<sup>[12]</sup>。

(2)海平面变化说<sup>[13,14]</sup> 这种假设认为,在海平面下降时期,海洋生物因生存空间缩小而减少,有机质产率下降,大量富<sup>12</sup>C的CO<sub>2</sub>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>未被利用,同时有机质氧化速度因海平面下降而增加,产生更多的富<sup>12</sup>C的碳酸盐组分,从而导致这一时期沉积的碳酸盐岩石具有较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。在海平面上升时期,情况刚好相反,生物繁盛,生物因新陈代谢作用而不断从海水中提取<sup>12</sup>C,并以有机质形式保存在海底沉积物中,造成有机质产率增加。同时,由于海水加深,有机碳受氧化作用影响减少,从而导致在海平面上升时期,形成的碳酸盐具有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。由于海平面的变化是逐渐进行的,而且可多次发生,因而碳酸盐岩石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般变化幅度不大(<2‰)。如美国俄克拉何马州,寒武系-奥陶系Arbuckle群碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化幅度为2‰<sup>[5]</sup>,吉林大阳岔寒武系-奥陶系界线层位碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化幅度小于1.5‰<sup>[5]</sup>。

如图1所示,在我国东部的几个寒武系-奥陶系界线层位上,不仅 $\delta^{13}\text{C}$ 值漂移小(<1‰),而且除发生负漂移(如夹沟三山子组和汤山观音台组)外,亦可出现正漂移(如赵各庄凤山组和胡乐西阳山组),这和由地外事件引起的白垩系-第三系界线层位 $\delta^{13}\text{C}$ 的显著负漂移明显不同。同时,迄今还未见有寒武纪末-奥陶纪初期外星体撞击地球的报道,相反却在这一时期,在全球范围内发生过几次海平面升降事件<sup>[1,15,16]</sup>。因而我们认为,我国东部寒武系-奥陶系界线层位碳同位素组成的变化不是由地外

事件引起,而很可能归因于海平面变化,这一时期海平面变化造成的寒武系-奥陶系界线层位碳同位素组成的变化已在对美国俄克拉何马州Arbuckle群<sup>[15]</sup>和我国吉林大阳岔<sup>[5]</sup>界线层位碳酸盐岩石的研究中得到证实

## 4 主要结论

(1)我国东部寒武系与奥陶系界线层位处,普遍存在 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同程度的漂移。这一界线与三叶虫、笔石动物群等生物面貌变化的界线相一致,与牙形刺动物群的变化也大体一致。这表明碳同位素组成可以指示地史上的生物事件。

(2)依据碳同位素研究,皖南胡乐和唐山赵各庄寒武系-奥陶系界线附近的碳酸盐岩石形成于海底成岩环境,而南京汤山和皖北夹沟相应层位的碳酸盐岩石则形成于埋藏成岩环境

(3)由于与孔隙流体之间的氧同位素交换,碳酸盐岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较大,规律性不明显。

## 参考文献

- [1] 俞剑华,方一亭,刘怀宝.安徽省宁国县胡乐地区奥陶纪新厂期笔石动物新材料.南京大学学报(自然科学版),1983,(3): 497~510.
- [2] 方一亭,沈渭洲.安徽宿县夹沟寒武-奥陶系界线附近生物群演变及地球化学特征.古生物学报,1993,32(6): 780~787.
- [3] 周志毅,张进林.唐山地区寒武系与奥陶系的分界及有关三叶虫的记述.古生物学报,1978,17(1): 1~2.
- [4] 周志毅,陈均远,林尧坤等.唐山地区奥陶系的新观察.地层学杂志~1983,7(1): 19~32.
- [5] 张俊明,王宗哲.吉林大阳岔寒武-奥陶纪界线地层碳同位素漂移与全球海平面升降.见:欧阳自远主编《中国矿物学岩石学地球化学研究新进展》.兰州:兰州大学出版社,405~406.
- [6] 俞剑华,陈敏娟,黄志诚等.江苏南部的奥陶系.地层学杂志~1979,3(3): 157~174.
- [7] Lohmann, K C, Walker, J C G. The  $\delta^{18}\text{O}$  record Phanerozoic abiotic marine calcite cements. Geophys. Res. Lett. 1989, 16: 319~322.
- [8] Bausch, W., Hoefs, J. Die Isotopenzusammensetzung von Dolomiten und Kalken aus dem süddeutschen Malm. Contrib. Mineral. Petrol. 1972, 37: 121~130.
- [9] Alvarez, L W, Alvarez, W, Asaro, F, Mineral, H V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. Science, 1980, 208: 1095~1108.
- [10] Alvarez, W, Alvarez, L W, Asaro, F and Michel, H V. Current status of the impact theory for terminal Cretaceous extinction. Geol. Soc. Spec. Pap, 1982, 190: 305~315.
- [11] 陈锦石.稳定同位素地层学.见吴瑞棠等编著“现代地层学”。

武汉: 中国地质大学出版社, 1989, 70~ 92

- [12] 钟筱春, 唐文松, 赵秀兰等. 新疆吐鲁番坳陷连木沁剖面陆相白垩-第三系界线灾变事件初步研究. 科学通报, 1993, 341~ 344.
- [13] Magaritz M, Stemmenik, L. Oscillation of carbon and oxygen isotope compositions of carbonate rocks between evaporative and open marine environments, Upper Permian of East Greenland, Earth Planet. Sci. Lett, 1989, 93 233~ 240.
- [14] Compton, J S, Snyder, S W, Hodel, D A. Phosphogenesis and

weathering of shell sediments from the southeastern United States Implications for Miocene  $\delta^{13}\text{C}$  excursions and global cooling, Geology, 1990, 18 1227~ 1230.

- [15] Guoqi Gao, Land, L S. Geochemistry of Cambro-Ordovician Arbuckle limestone, Oklahoma Implications for diagenetic  $\delta^{18}\text{O}$  alteration and secular  $\delta^{18}\text{C}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variation. Geochim. Cosmochim. Acta, 1991, 55 2911~ 2920.
- [16] 孟祥化, 葛铭, M E Tucker. 中国晚寒武世长山期最大海泛事件及其全球对比意义. 地质学报, 1996, 70(2): 108~ 120.

## Carbon and Oxygen Isotopic Study across the Cambrian-Ordovician Boundary Strata in East China

*Shen Weizhou Fang Yiting Ni Qisheng Liu Yan and Lin Yuping*

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

### Abstract

Carbon and Oxygen isotopic study of some representative Cambrian-Ordovician boundary strata of various stratigraphic areas in East China has done. It was indicated that the variation of  $\delta^{18}\text{O}$  values in boundary strata is larger and the regularity of variation is not conspicuous because of the difference of sedimentary environment and the effect of diagenetic alteration. But the variation of  $\delta^{13}\text{C}$  values is small and the various degree of excursion in the boundary strata occurs. The excursive stratohorizon is consistent with the variation boundary of major biotic population. According to the study of various data, it was believed that the excursion of carbon isotopic compositions is likely attributed to the elevation and subsidence of sea level from the Late Cambrian to Early Ordovician.

**Key Words** Cambrian-Ordovician boundary carbon and oxygen isotopes elevation and subsidence of sea level East China