

文章编号: 1009-3850(2007)01-0014-05

新元古代不同沉积环境的白云岩帽碳同位素特征及成因

熊国庆

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: 贵州印江永义剖面白云岩帽的碳同位素值, 与全球广布的新元古代碳酸盐岩帽的一样, 发生了一次强的负偏移, 可能为“雪球地球”冰释后大量的大陆风化产物流入海洋中形成。其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 均值和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值分别比处于碎屑潮坪环境的清镇阿坝寨剖面低 6‰ 和 6.5‰, 比处于台地斜坡环境的大庸田坪剖面高 2.3‰ 和 2.5‰, 而与同处于浅海陆棚环境的铜仁龙井剖面一致, 这反映了沿碎屑潮坪相-台地斜坡相-浅海陆棚相古环境剖面的一个碳同位素梯度。前人认为这种碳同位素分层可能由于冰后期海洋生物泵作用的结果, 作者则认为这些不同环境沉积的碳酸盐岩可能不是同时形成的, 其碳同位素梯度可能为大陆风化产物不断输入、CCD 界面变化及生物繁盛等共同作用的结果。

关键词: 白云岩帽; 负偏移; 碳同位素; 黔湘

中图分类号: P597 **文献标识码:** A

地质工作者发现全球各大陆上有一套碳酸盐岩直接覆盖在 Marinoan 期冰川杂砾岩之上, 其碳同位素值显示了一次强的负偏移, 并随着剖面向上增大。这一独特的现象成为近年来新元古代研究的热点之一; 其成因更是当前争论的焦点, 主要有两种假说(解释): “雪球地球假说”^[1,2] 和“甲烷渗流假说”^[3,4]。

蒲心纯等^[5] 研究了湖南大庸田坪剖面陡山沱组底部白云岩, 碳同位素值有随沉积深度增大而降低的深度效应。近年来, 也陆续报道了处于不同沉积环境下的碳酸盐岩帽碳同位素值具有不同的负偏移值, 总体上表现为随着沉积环境水深增加愈发偏负的趋势, 即从深海盆沉积环境到台地浅滩沉积环境, 其碳同位素值由低到高^[6~8]。而这种随沉积环境水深变化表现出一个碳同位素梯度的原因却很少有人解释。Shen 等^[7] 把这种碳同位素分层归因于冰期后海洋中生物泵作用的结果。

笔者于 2006 年对贵州印江永义剖面白云岩帽进行了研究。本文就该剖面白云岩帽碳、氧同位素成果, 与研究区其他剖面中进行对比, 初步探讨研究

区不同沉积环境下碳酸盐帽碳同位素梯度的原因。

1 地质背景及沉积特征

贵州印江永义剖面, 前人称之为张家坝剖面, 位于扬子准地台南东缘的梵净山穹窿(背斜)北西, 表现为陡山沱组下部的一套数米厚的白云岩帽直接覆盖在南沱组冰碛岩之上, 两者之间未发现明显的沉积间断。该白云岩帽主要由两套不同岩相的白云岩组成, 下部岩层强烈破碎, 席状裂隙和栉壳状构造十分发育, 等厚边缘胶结物充填裂隙中, 并见有碳质球粒分布其中; 上部岩层以中薄层状微晶白云岩为特征, 黄铁矿呈浸染状分布, 局部成层富集。同全球其他地区所见到盖在 Marinoan 期冰碛岩之上的碳酸盐岩帽一样, 它是在冰期后气候变暖条件下形成的。陡山沱组上部为一套厚度不大(约几米)的黑色中薄层状碳质泥岩, 逐步过渡为灯影组一套黑色中薄层状硅质岩, 内部见有滑塌变形构造, 顶部与寒武系黑色碳质泥岩整合接触。

研究区新元古代晚期古地理格局总体上表现为

西北高南东低,西部为潮坪(碎屑潮坪和碳酸盐潮坪)环境,中部为浅海陆棚环境,东北角为台地斜坡环境,东南角为次深海环境,但贵阳一带的黔中古陆仍然存在。分别沉积了长石石英砂岩相、颗粒磷块岩相及白云岩相、页岩相、角砾白云岩-白云岩相及板岩相。

笔者实测的这套白云岩帽陡山沱期处于浅海陆棚环境。为了便于对比研究,选取了前人研究过的3套不同沉积环境下的碳酸盐帽,分别为湖南大庸田坪碳酸盐帽^[3]、贵州清镇阿坝寨碳酸盐帽^[4](原作者认为是潟湖环境,本文认为是碎屑潮坪环境)及铜仁龙井碳酸盐帽^[6]。这些碳酸盐帽均为震旦纪第一

次大规模海侵产物(图1)。

2 测试结果

笔者对贵州印江永义剖面进行系统地采样,共采集样品18件,其中南沱冰碛岩样品3件,白云岩样品15件。室内进行了碳、氧同位素及微量元素测试分析(表1)。

表1中可以看出,印江永义剖面的 Mn/Sr 值除南沱冰碛岩样品外,其他值普遍小于10,有的甚至小于3;氧同位素值也大部分大于 -11×10^{-3} 的临界值;而且 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 数值具有弱正相关性(图2,3)。因此该剖面的碳、氧同位素组成基本反映了当时海

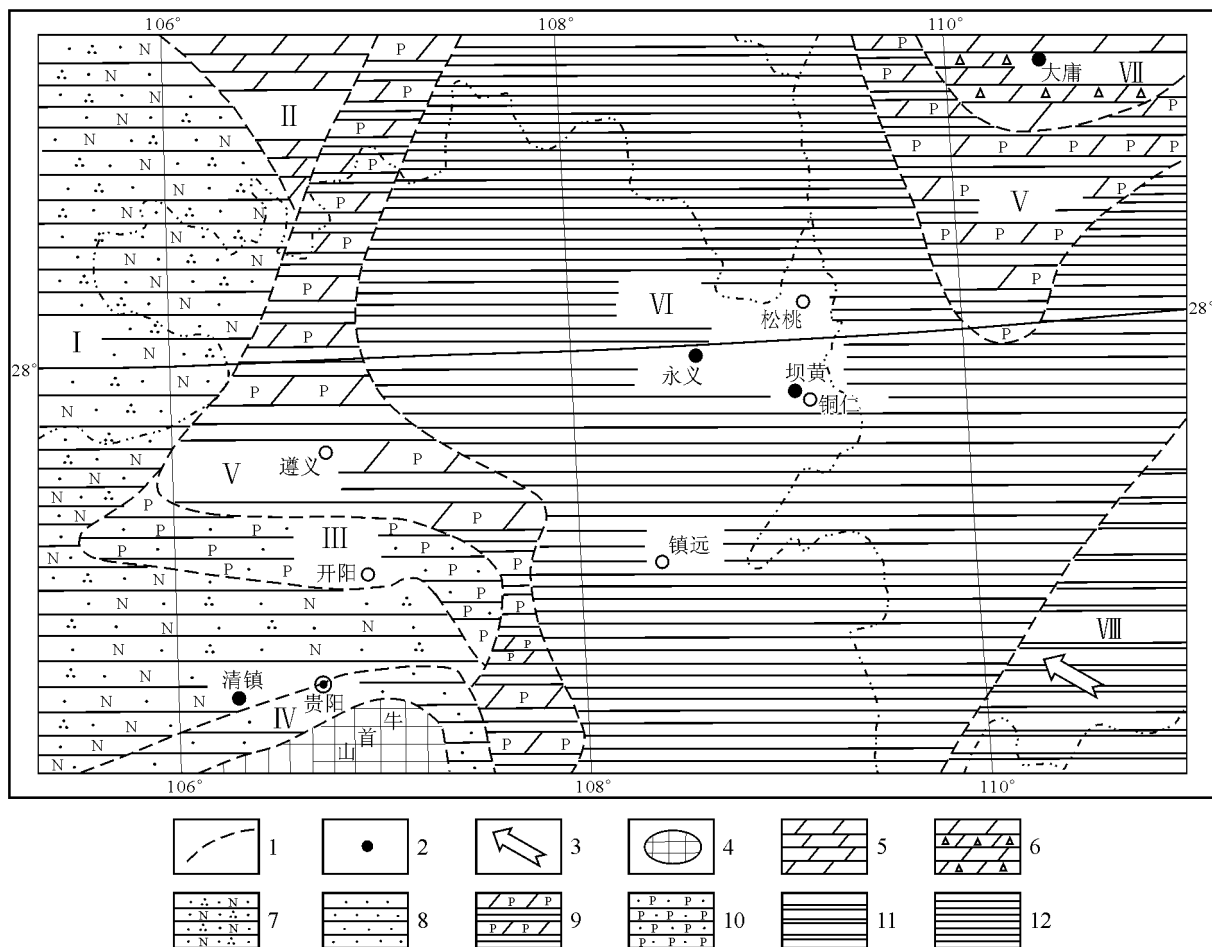


图1 研究区震旦纪陡山沱期沉积相展布图

I. 碎屑岩潮坪亚相; II. 碳酸盐潮坪亚相; III. 潮坪浅滩亚相; IV. 陆地边缘碎屑岩亚相; V. 陆棚内缘亚相; VI. 陆棚亚相; VII. 台前斜坡亚相; VIII. 陆棚边缘盆地亚相。1. 亚相界线; 2. 剖面位置; 3. 海侵方向; 4. 牛首山岛陆; 5. 白云岩相; 6. 角砾白云岩-白云岩相; 7. 长石石英砂岩相; 8. 砂岩相; 9. 页岩-含磷白云岩相; 10. 颗粒磷块岩相; 11. 板岩相; 12. 页岩相

Fig. 1 Distribution of sedimentary facies in the study area during the Doushantuoan of the Sinian

I = clastic tidal-flat subfacies; II = carbonate tidal-flat subfacies; III = tidal flat-shoal subfacies; IV = continental margin clastic rock subfacies; V = inner shelf subfacies; VI = shelf subfacies; VII = platform foreslope subfacies; VIII = shelf margin-basin subfacies. 1 = sub-facies boundary; 2 = studied section; 3 = transgression direction; 4 = Niushoushan Island; 5 = dolostone facies; 6 = breccia dolostone-dolostone facies; 7 = feldspathic quartz sandstone facies; 8 = sandstone facies; 9 = shale-phosphatic dolostone facies; 10 = grainy phosphonite facies; 11 = slate facies; 12 = shale facies

表1 贵州永义剖面陡山沱组底部白云岩帽地球化学数据

Table 1 Geochemical data of the cap dolostone at the bottom of the Doushantuo Formation in the Yongyi section, Guizhou

样品编号	采样位置 / m	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ / ‰	$\delta^{18}\text{O}$ / ‰	Mn/Sr
M0	1.0	冰川砂砾岩	-6.65	-11.34	11.19
M1	1.7	冰川砂砾岩	-6.08	-9.84	18.94
M2	1.8	冰川砂砾岩	-5.97	-9.72	19.91
M3	2.0	栉壳白云岩	-3.56	-8.86	2.99
M4	2.5	栉壳白云岩	-3.97	-9.69	4.07
M5	3.5	栉壳白云岩	-4.46	-9.44	4.22
M6	4.0	栉壳白云岩	-3.74	-9.38	4.26
M7	4.5	白云岩	-5.22	-10.56	4.74
M8	7.0	白云岩	-4.42	-8.35	11.05
M9	7.6	白云岩	-4.27	-7.95	7.20
M10	9.0	白云岩	-3.11	-5.44	0.86
M11	9.5	白云岩	-5.23	-9.36	2.25
M12	10.0	白云岩	-2.62	-6.61	2.44
M13	10.5	白云岩	-2.22	-5.9	2.00
M14	11.0	白云岩	-1.98	-6.93	3.57
M15	11.5	白云岩	-1.4	-6.17	2.81
M16	12.0	12.4 白云岩	-7.89	-10.03	9.08
M17	12.4	白云岩	-8.52	-10.66	6.16

注：由成都地质矿产研究所分析测试中心 MAT-252 质谱仪上完成。

相碳酸盐岩沉积时的海水初始值。

从图2中可以看出，与全球其他地区冰川混积岩(Marinoan 期)之上的碳酸盐岩帽中所见到 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值一样，永义发生了一次明显的负偏差，从-8.52‰变化到-1.4‰，平均值为-4.52‰； $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值从-11.34‰变化为-5.44‰，平均值为-8.68‰。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值更偏负一些，约-4‰。除了白云岩帽顶部的两个数据之外， $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值均大体表现为随剖面向上升高的趋势，而且两者显示了弱的正相关性(图3)。

3 同位素对比

贵州印江永义剖面这套白云岩帽独特的沉积构造及负的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值，与全球其他大陆盖在 Marinoan 期冰川混积岩之上的碳酸盐帽具有类似的特征，其成因，笔者倾向于“雪球地球假说”^[9]。

结合该地区前人研究的其他3套碳酸盐帽^{3,4}，贵州铜仁龙井剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值为-4.27‰，

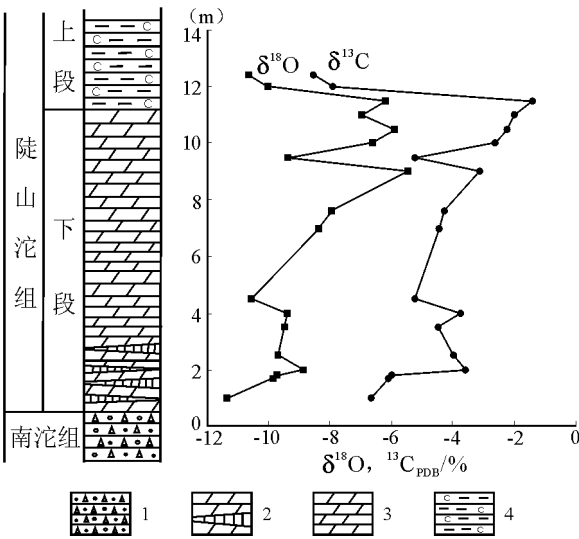


图2 贵州永义剖面及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值变化图
1. 南沱砂砾岩; 2. 栉壳状白云岩; 3. 微晶白云岩; 4. 碳质泥岩
Fig. 2 Stratigraphic section and variations in $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values for the Yongyi section, Guizhou
1 = Nantuoan sandstone and conglomerate; 2 = pectinate dolostone; 3 = micritic dolostone; 4 = carbonaceous mudstone

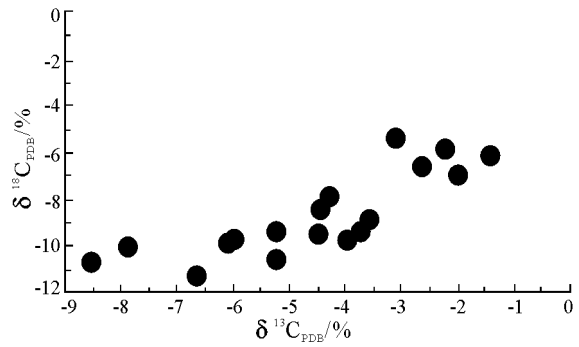


图3 贵州永义剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 同位素交会图
Fig. 3 Isotopic cross-plot of $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ values for the Yongyi section, Guizhou

$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 均为值-7.6‰; 贵州清镇阿坝寨剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值为1.42‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 均值为-1.9‰; 湖南大庸田坪剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值为-2.24‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 均值为-6.15‰。与处于浅海陆棚环境的永义剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值相比, 处于潮坪环境的清镇阿坝寨剖面分别要高6‰和6.7‰; 处于台缘斜坡环境的大庸田坪剖面分别要高2.3‰和2.5‰, 而同处于浅海陆棚环境的铜仁龙井剖面大致相同, 也反映了其 $\delta^{13}\text{C}$ 值具随沉积深度增大而降低这一深度效应, 即沿碎屑潮坪相-台地斜坡相-浅海陆棚相古环境剖面的一个碳同位素梯度(图4)。

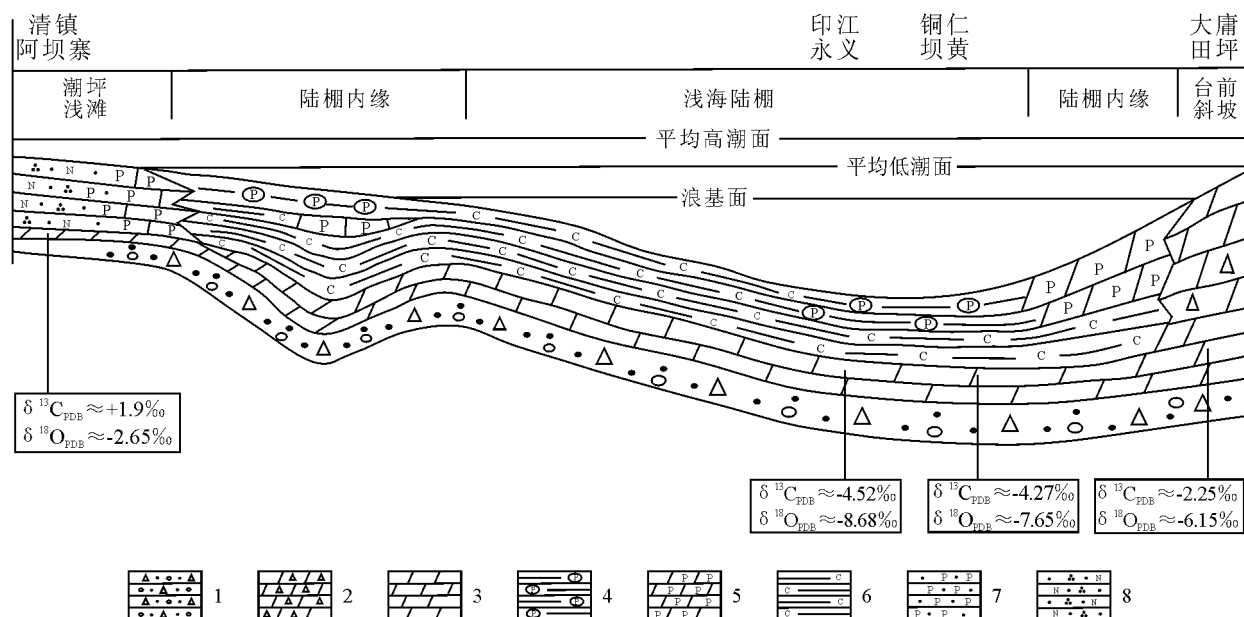


图4 研究区碎屑潮坪相-台地斜坡相-浅海陆棚相古环境剖面

1. 冰碛岩; 2. 角砾白云岩; 3. 白云岩; 4. 含磷质泥岩; 5. 磷质白云岩; 6. 碳质泥岩; 7. 颗粒磷块岩相; 8. 长石石英砂岩

Fig. 4 Palaeoenvironmental transect through the clastic tidal-flat facies to the platform foreslope facies and to the shallow-sea and shelf facies in the study area

1= tillite; 2= breccia dolomite; 3= dolomite; 4= phosphatic mudstone; 5= phosphatic dolomite; 6= carbonaceous mudstone; 7= grainy phosphorite; 8= feldspathic quartz sandstone

Shen 等^[7]发现碳同位素值沿着从陆棚沉积相到深海盆沉积相的古环境剖面显示了一个约3‰的碳同位素梯度。Zhou 等^[8]报道了南沱碳酸盐岩帽浅水相和深水相之间1‰~2‰碳同位素差异。Kroopnick^[10]发现现代海洋里2‰~3‰的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化。

Nabonne 等^[11]和 Myrow 等^[12]认为同期地层中, 沉积环境水体相对较深的地区, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较低。

4 讨论

是什么造成了冰后期海洋中沉积碳酸盐帽的这种碳同位素梯度呢? Shen 等^[7]认为这种碳同位素分层可能由于冰后期海洋生物泵吸作用的结果。

笔者认为在冰封的“雪球地球”(新元古代由于逃逸冰反射率的反馈形成了雪球地球, 而且当时全球海洋完全被海洋冰所覆盖^[1])时, 由于火山活动等释放大量的 CO_2 气体积累到一定程度后, 突然进入大气中, 引起强烈的温室效应, 温度骤然飙升, 导致冰川急剧融化, 海平面快速上升, 首先在有利于碳酸盐岩沉积的地区发生碳酸盐岩沉淀, 随着海平面的上升, 产生了新的有利于碳酸盐岩沉积的地区, 因此这些碳酸盐岩不是同时沉积的, 但时间间隔不大。

前人根据白云岩帽沉积和均衡反弹之间的密切联系, 认为白云岩帽沉积发生不超过几千年^[13]。与漫长的地史相比, 几乎近于同时沉积。

研究表明, 生物泵吸作用(表面有机颗粒的下沉)把表层水中的溶解无机碳(DIC) $\delta^{13}\text{C}$ 推向了一个高值。冰期初期, 适应新环境的属种还没有取代老属种, 生物泵吸作用较弱, 溶解无机碳(DIC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏低, 造成 $\delta^{13}\text{C}$ 值负偏移。当冰期结束时, 气候迅速转暖, 陡山沱期发生了震旦纪第一次大规模海侵作用, 此时新属种有机碳产量与衰老属种在数量上达到平衡, $\delta^{13}\text{C}$ 值负偏移达到极小值。随着海平面的进一步上升, 适应环境的新属种对有机质的生产量逐渐增加, 生物泵吸作用增强, 溶解无机碳(DIC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加; 再者, 海平面上升不断地把大量陆源碳酸盐碱质风化产物带入海洋中, 使同期海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐步向着正的方向移动, 较先前沉积的碳酸盐帽的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要偏正些。由于沉积环境水体变深, 可能超过了碳酸盐岩补偿深度(CCD)界面, 不仅不再接受碳酸盐岩沉积, 还可能使先前沉积碳酸盐岩发生溶解, 进一步增加了海洋中 ^{13}C 含量, 造成后期沉积碳酸盐帽 $\delta^{13}\text{C}$ 值继续向正方向移动。最后海平面达到最大, 适应环境的新属种在数量上超过老属种的生产量, 生物泵吸作用

进一步增强,溶解无机碳(DIC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值继续增加,使得同期海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏移到正值。

因此笔者认为由于海平面变化导致大陆风化产物不断输入、CCD界面变化及生物繁盛等因素的共同作用可能是引起冰后期海洋中沉积碳酸盐帽碳同位素梯度的原因。

在野外工作期间得到王剑、孙志明、陈文西及张惠、胡仁发等人的帮助,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] KIRSCHVINK J L. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball earth [A]. J. W. Schopf and C. Klein. *Biosphere* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 51—52.
- [2] HOFFMAN P F, KAUFMAN A J, HALVERSON G P, SCHRAG D P. A Neoproterozoic snowball earth [J]. *Science*, 1998b, 281 (5381): 1342—1346.
- [3] KENNEDY M J, CHRISTIE-BLICK N, SOHL L E. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals [J]? *Geology*, 2001a, 29 (5): 443—446.
- [4] GANQING JIANG, KENNEDY M J, NICHOLAS C B. Stable isotopic

evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates [J]. *Nature*, 426(6968): 822—826.

- [5] 蒲心纯, 张继庆, 罗安屏, 等. 上扬子区晚震旦世沉积岩沉积相及矿产[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987.
- [6] 姜立君, 张卫华, 高慧, 等. 贵州新元古代陡山沱期碳酸盐岩帽沉积地球化学特征[J]. *地球学报*, 2004, 25(2): 170—176.
- [7] YANAN SHEN, TONGGANG ZHANG, XUELEI CHU. C-isotopic stratification in a Neoproterozoic postglacial ocean [J]. *Precambrian Research*, 2005, 137(3—4): 243—251.
- [8] ZHOU C, TUCKER R, XIAO S, PENG Z, YUAN X, CHEN Z. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in South China [J]. *Geology*, 2004, 32(5): 437—440.
- [9] 熊国庆. 贵州梵净山西北陡山沱组底部白云岩帽地球化学特征及成因探讨[J]. *沉积与特提斯地质*, 2006, 26(2): 7—11.
- [10] KROOPNICK P M. The distribution of ^{13}C and $P\text{CO}_2$ in the world oceans [J]. *Deep-Sea Res.*, 1985, 32(1): 57—84.
- [11] NARBONNE G M. New Ediacaran fossils from the Mackenzie Mountains, northwestern Canada [J]. *J. Paleont.*, 68(3): 411—416.
- [12] MYROW P M, KAUFMAN A J. A newly discovered cap carbonate above Varanger-age glacial deposits in Newfoundland [J]. *Can. J. Sed. Res.*, 1999, 69(3): 784—793.
- [13] SHEIDS G A. Neoproterozoic cap carbonates: a critical appraisal of existing models and the plume world hypothesis [J]. *Terra Nova*, 2005, 17(4): 299—310.

Carbon isotopes and origin of the Neoproterozoic cap dolostone in different sedimentary environments

XIONG Guo-qing

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: A remarkably negative excursion is recognized for the carbon isotopic values of the cap dolostone from the Yongyi section in Yinjiang, Guizhou just like those of the Neoproterozoic cap carbonates on a global scale. The cap dolostone may be originated from abundant continental weathering products entering into oceans after the deglaciation of the “snowball earth”. The mean isotopic values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ for the Yongyi section are lower at 6‰ and 6.5‰ respectively than those for the Abazhai section in Qingzhen, Guizhou in the clastic tidal-flat environment; higher at 2.3‰ and 2.5‰ respectively than those for the Tianping section in Dayong, Hunan in the platform foreslope environment, and consistent with those for the Longjing section in Tongren, Guizhou in the same shallow-sea and shelf environments. All these values indicate carbon isotopic gradients along the palaeoenvironmental transection through the clastic tidal-flat facies to the platform foreslope facies and to the shallow-sea and shelf facies. The previous authors contended that the C isotopic stratification may be attributed to the effect of biological pumping in a postglacial ocean. The author in this paper, however, argues that the precipitation of the carbonate rocks cited above may not be synchronous in different environments. Instead the carbon isotopic gradients may result from the combination of the constant input of the continental weathering products, variations in CCD interface and bloom of biotas.

Key words: cap dolostone; negative excursion; C isotope; Guizhou; Hunan