

贵州新元古代陡山沱期碳酸盐岩帽 沉积地球化学特征

姜立君 张卫华 高 慧 杨瑞东

(贵州工业大学, 贵州 贵阳 550003)

摘 要 通过对贵州新元古代陡山沱期不同相区碳酸盐岩帽的岩石特征和地球化学特征的研究,发现不同相区具有不同的同位素和岩石组合。铜仁地区当时处于浅海,其“碳酸盐岩帽”下部相的薄层白云岩,变形构造发育, $\delta^{13}\text{C}$ 表现出高的负异常,可达 -12.48‰ ,而上部相的厚层白云岩, $\delta^{13}\text{C}$ 明显向正异常反向迁移,但还是处于 $-3.0\text{‰} \sim -1.0\text{‰}$ 之间;当时为次深海的台江五河地区, $\delta^{13}\text{C}$ 明显偏负,在碳酸盐岩下部相底部为 $-8.278\text{‰} \sim -6.651\text{‰}$;清镇地区当时为泻湖,其中陡山沱组底部碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-3.718\text{‰} \sim -0.209\text{‰}$,从下向上表现出Ca逐渐增加。可以看出,由于所处的环境不同导致其同位素数值有差异,但还是表现出全球都有分布的冰期后负异常的特点。岩石特征的研究发现虽然不同的沉积环境具有不同的岩石特征,但在3个地区均发现冰川沉积与碳酸盐岩沉积之间具有过渡特点的沉积特征,说明二者间并非是突变关系。由此对“雪球地球”假说提出新的认识。

关键词 陡山沱组 碳酸盐岩帽 地球化学 沉积环境

Sedimentary Geochemical Characteristics of the Cap Carbonate of the Doushantuo Formation in Guizhou Province

JIANG Lijun ZHANG Weihua GAO Hui YANG Ruidong

(Guizhou University of Technology, Guiyang, Guizhou, 550003)

Abstract As a mystery of Neoproterozoic, Cap Carbonates lying on the glacial diamictites with negative carbon isotopic anomalies have been found in many regions of the world. The authors studied the Cap Carbonate in three different depositional environments in Guizhou Province, where negative carbon isotopic anomalies were observed. The negative carbon isotopic anomalies are different in different depositional environments. The flat bedding at the lower part of the cap in Tongren and Qingzhen areas can not be explained by the “snow-ball” model. Furthermore, the crystal fans at the lower part of the cap in Tongren area exhibit soft sedimentary deformational structures that may be attributed to rebound-induced seismicity. The phenomena suggest the existence of a transitional stage after the Marinoan glacial period. Not conspicuous as it is, the transitional stage can also be found in the other two areas, which implies the rapid transition from the icehouse to the greenhouse in Snowball Earth. Calculation shows that the transition stage might have lasted for 280 000 years.

Key words Doushantuo Formation Cap Carbonate geochemistry depositional environment

碳酸盐岩帽的重要特征是指在地貌上像帽子一样盖在冰期杂砾岩上的碳酸盐岩层,具有碳同位素负异常(接近火山喷出值)。碳酸盐帽的形成时期属于新元古 III 系,其下是全球可对比的南沱冰期(相当于 Marinoan)和古城冰期(相当于 Sturtian)冰碛岩,其上为淮南植物群、庙河生物群及瓮安生物群等

多细胞生物繁盛。因此,对碳酸盐岩帽的研究已成为当前新元古代探索前沿课题之一。

目前,世界有很多关于“岩帽”的报道,如 Kaufman 等(1997)、Grotzinger 等(1995)和 Kennedy 等(1998)等。中国的塔里木、华北和华南 3 个板块由于发育广泛的前寒武系和震旦系冰碛岩而十分有利

本文由国家重大基础预研项目(编号 2002CCC02600)及贵州省优秀青年科技人才基金项目资助。
责任编辑:宫月萱。
第一作者 姜立君,1980 年生,硕士研究生,地层学与生物学专业, E-mail: jlyself365@163.com。

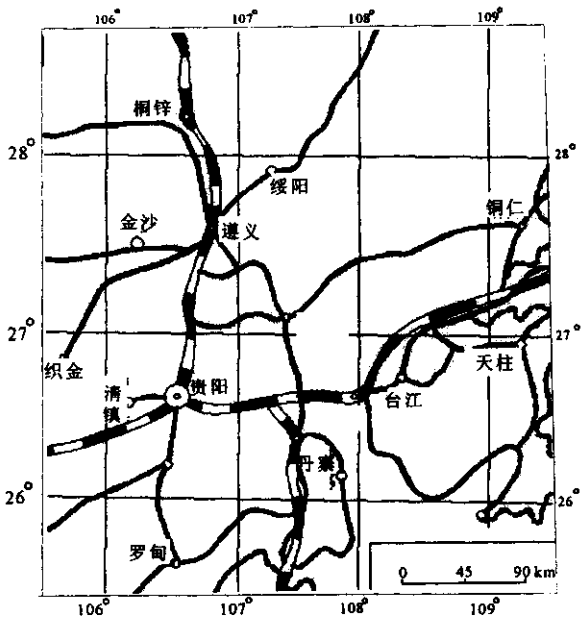


图 1 研究区交通位置图

Fig. 1 Map showing the location of the studying section

于此项研究。近年来国内不断有相关的文章发表，主要集中在贵州铜仁地区(杨瑞东等,2003a，

2003b) 湖北宜昌峡东地区(王自强等 2002 柳永清等 2003) 长江三峡地区(王伟等 2002 陈孝红等，2003) 以及塔里木板块(徐备等 2002) 等。

本文对贵州地区(图 1)不同沉积环境下发育的“岩帽”的沉积和地球化学特征进行了研究,并对“岩帽”的形成提出新的认识。

1 剖面沉积特征

贵州新元古代晚期古地理格局基本上是西高东低,西部为浅海环境,但黔中贵阳一带的黔中古陆仍然存在。其他地区为潮坪、浅海沉积环境,沉积磷块岩、含磷白云岩和灰岩。万山-台江-榕江一线以东为陆棚、次深海碎屑岩沉积(图 2)。

铜仁坝黄剖面位于铜仁市西北 10 km 的坝黄镇龙井村,剖面出露完好。陡山沱期该地区处于浅海相,碳酸盐岩发育,在微粒黄铁矿泥灰岩之上,沉积了 Hoffman 等(1998a)认为的“碳酸盐岩帽”。南沱组与陡山沱组界线清晰,从“碳酸盐岩帽”往下至冰碛岩可分为以下几层(图 3-a):E 为黄铁矿层(有 3 层);D 为深灰色致密碳酸盐岩,层理不发育,厚约 10~20cm;C 为深色具水平层理泥质白云岩,厚约

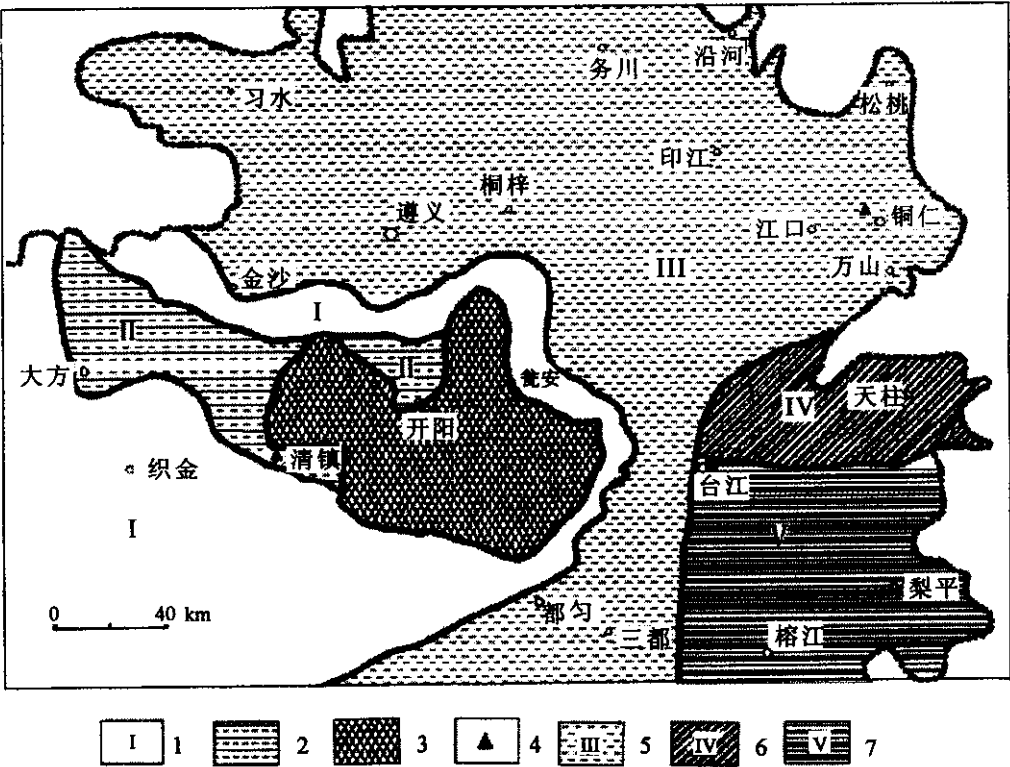


图 2 贵州新元古代陡山沱期岩相古地理图

Fig. 2 Sedimentary facies and paleogeographic sketch map of Guizhou province of the Doushantuo epoch in the Neoproterozoic

1-泻湖 2-潮坪 3-古陆 4-研究剖面 5-浅海 6-陆棚 7-次深海

万方数据

1-lagoon 2-tide flat 3-land 4-studying section 5-shallow sea 6-continental shelf 7-hemipelagic

5~10 cm ;B 层为黑色炭质泥灰岩 ,呈透镜状 ,水平纹层发育 ,15~20 cm ;A 层为南沱期混积岩 ,砾石大小不等 ,成分复杂 ,磨圆度好。“碳酸盐岩帽”下部为薄层状(0.5~1 cm)微晶白云岩 ,构造变形强烈 ,具有栉壳状、玛瑙纹状构造(图 3-b) ,是碳酸盐快速沉积的产物。其中有 3~5 cm 的微肉红色致密微晶白云岩层 ,层间有平行层面的大量方解石纹层充填 ,并含大量的沥青体(图 3-c) 。该层变形强烈 ,白云岩呈扭曲、绕曲状 ,它不可能是后生构造变形的产物 ,因为该层上下岩层均具水平层理 ,纹层和层面都没有变形。“碳酸盐岩帽”上部为深灰色灰岩与泥灰岩互层 ,厚度为 5.8 m ,藻纹层发育(图 3-d) 。

Nogueira 等(2003)系统报道了亚马逊克拉通西南缘的“碳酸盐岩帽”中的沉积、岩石及同位素特征。指出该地区“碳酸盐岩帽”底部的晶体扇等变形构造为冰期反弹效应引发地震导致的同期软沉积(快速沉积) ,并指出这些沉积构造反映了该时期地球环境从“冰室效应”到“温室效应”的快速转变。铜仁地区“碳酸盐岩帽”底部的同生变形构造及其中的含沥青孔洞可与其对比 ,但成因是否相同还需要进一步研究。另外 ,该区“岩帽”下部纹理发育 ,且具分层特征。所有这些说明从大冰期结束到“碳酸盐岩帽”沉积之间有一个过渡时期 ,虽然这个时期可能很短。

五河剖面位于贵州东部的台江县革东镇北4

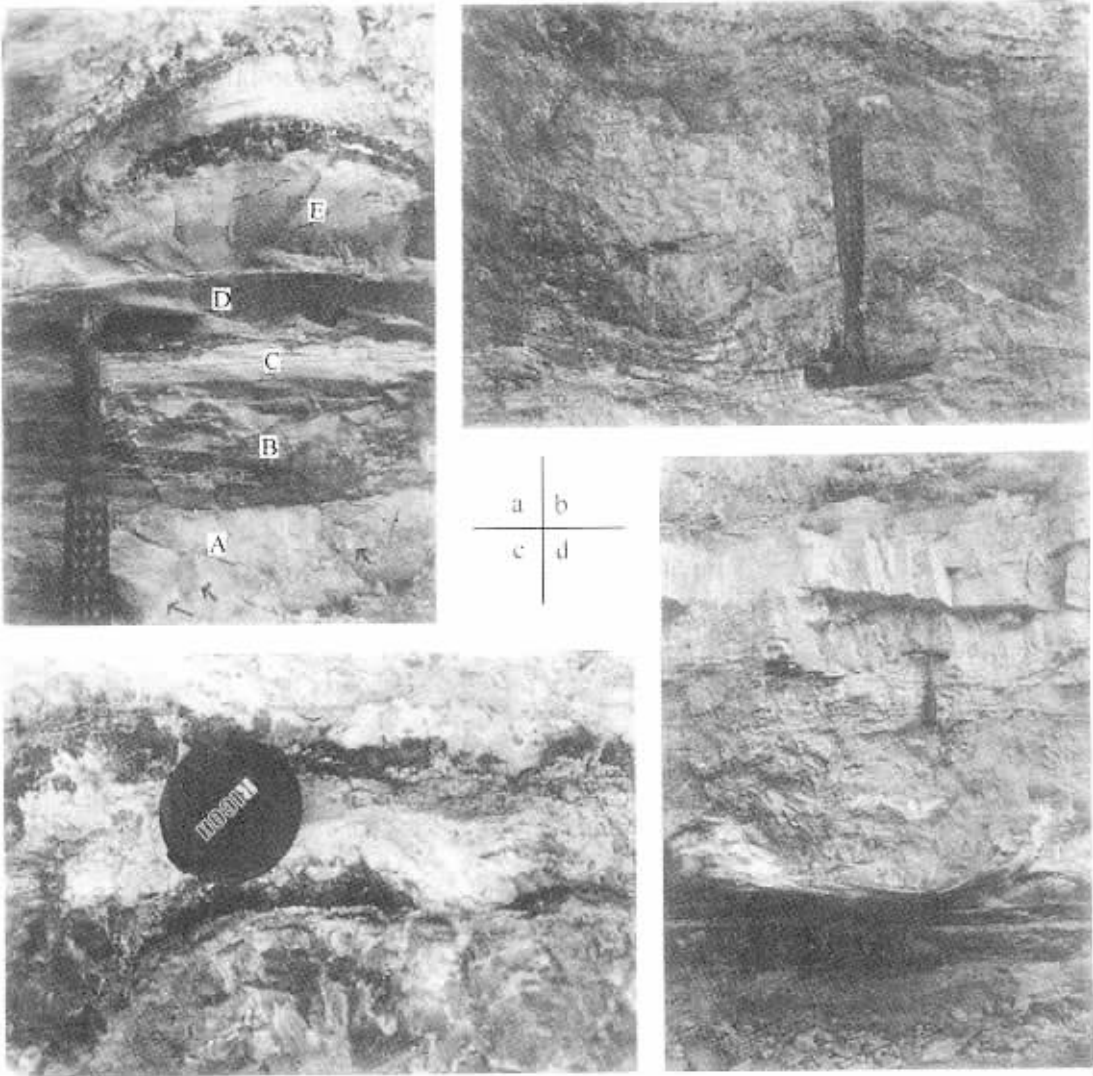


图 3 铜仁坝黄地区“碳酸盐岩帽”沉积构造

Fig. 3 The sediment structure in the “Cap Carbonate” at Bahuang ,Tongren city

a- “碳酸盐岩帽”及下部杂砾岩分层 ,b- “岩帽”中的变形构造 ,c- “岩帽”中的沥青孔洞 ,d- “碳酸盐岩帽”上部和下部

a-the substratification in the Lower facies of the “Cap Carbonate” ,b-the deformation in the “Cap Carbonate” ;

c-the cavern of bitumen in the “Cap Carbonate” ,d-the upper facies and the lower facies of the “Cap Carbonate”

km。陡山沱期,该地区处于次深海环境,以粘土沉积为主。受沉积条件限制,其中的“碳酸盐岩帽”不发育,只见 2.5 m 厚的黑色含锰泥灰岩。剖面最底部为南沱组紫红色、灰绿色块状冰碛砾岩,砾石大小不等,一般为 5~10 cm,砾石成分复杂,为泥砂质胶结。其上为陡山沱组下部黑色薄层泥灰岩,夹 5 层白云岩,底部 1.5 m 为含锰白云岩。向上为浅灰白色硅化白云岩,其中上部为浅蓝灰色薄层含泥质白云岩。可以看出,从陡山沱组底部的黑色泥灰岩向上表现出一定的过渡特征。

清镇地区陡山沱期处于水体比较浅的泻湖环境,南沱组不发育。陡山沱组下部为深灰色泥岩,水平层理发育;其下部为水平纹理发育的粉砂岩、泥质粉砂岩,上部为深灰色细砂岩;向上为薄层状泥灰岩,再向上为薄层灰岩、白云岩;最上部为厚层状致密白云岩。不难看出剖面自下向上表现出钙镁质呈逐渐增加的趋势,并且其下部也发育水平层理,亦说

明了过渡时期的存在。

2 “碳酸盐岩帽”地球化学特征

碳、氧同位素在海洋中具有的稳定含量,在同期海相沉积物中大体保存了当时海洋中的同位素组成。因此,新元古代海相未受成岩改造的白云岩通常是保存这些同位素的最佳对象。许多研究均表明在南沱冰期(相当于 Marinoan)上沉积了一套以 $\delta^{13}\text{C}$ 负异常(全球平均值约为 -6‰)为特征的“碳酸盐岩帽”。

对坝黄陡山沱组下部“碳酸盐岩帽”进行系统的微量稀土元素、碳同位素测试,得到各层的一些地球化学参数(表 1),从这些参数中可以了解冰期后古海洋环境的恢复过程。其中的 Mn/Sr 比值介于 0.5~2.3 之间,平均为 1.2; $\delta^{18}\text{O}$ 值变化介于 $-15.0\text{‰}\sim-1.0\text{‰}$ 之间,平均为 -7.6‰ ,因此, $\delta^{13}\text{C}$ 值数据代表了原始海洋的碳同位素组成。

表 1 贵州铜仁龙井剖面陡山沱组微量稀土及同位素元素分析
Table 1 Some trace elements, rare earth elements and isotopic data for the Doushantuo Formation in the Longjing Section of Tongren County, Guizhou Province

样品	岩性	δCe $/\times 10^{-1}$	δEu $\times 10^{-1}$	稀土 总量	Mn/Sr	$\delta^{13}\text{C}$ $/\text{‰}$, PDB	$\delta^{18}\text{O}$ $/\text{‰}$, PDB	V/ (V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	U/Th
TL-0	冰碛砾岩	-0.9	-2.5	498.0	1.2	-12.5	-15.0	0.8	1.5	1.6	0.2
TL-1	含黄铁矿泥灰岩	-0.4	-3.4	480.1	0.5	-7.1	-12.6	0.3	1.4	6.2	0.2
TL-2	含黄铁矿泥灰岩	0.4	-3.2	606.6	2.3	-4.8	-9.0	0.3	3.5	1.7	1.1
TL-3	含黄铁矿泥灰岩	0.5	-3.4	557.5	1.8	-3.8	1.0	0.4	2.7	3.4	0.6
TL-5	薄层白云岩	0.7	-3.2	712.8	1.0	-7.4	-10.8	0.3	2.0	11.1	0.4
TL-7	中厚层纹层白云岩	-1.1	1.4	56.4	0.9	-5.5	-7.4	0.1	23.9	11.0	1.2
TL-8	中厚层纹层白云岩	-1.3	-1.8	54.4	0.5	-3.3	-8.7	0.2	11.1	8.8	0.6
TL-9	中厚层纹层白云岩	-1.3	-2.6	62.0	1.1	-3.1	-8.1	0.5	28.7	3.1	0.5
TL-10	厚层白云岩	-2.2	-1.5	87.1	0.9	-3.0	-7.9	0.5	18.7	3.5	0.9
TL-11	钙质泥岩	0.0	-3.7	306.8	0.7	-2.7	-8.0	0.9	3.0	3.1	0.3
TL-12	厚层白云岩	-1.5	-1.9	128.2	1.8	-2.4	-6.1	0.3	3.4	2.4	0.8
TL-13	钙质泥岩	2.2	-3.1	138.7	1.9	-3.6	-7.2	0.7	50.1	1.1	0.5
TL-14	厚层白云岩	-4.2	11.5	141.0	1.1	-3.2	-7.3	0.9	2.5	3.3	1.5
TL-15	钙质泥岩	-1.7	2.6	143.4	0.5	—	—	1.0	5.5	1.1	0.5
TL-16	厚层白云岩	-1.6	0.8	80.6	2.2	-2.9	-7.0	0.9	5.2	1.7	1.9
TL-17	钙质泥岩	-0.4	2.1	132.5	0.8	—	—	1.0	5.8	3.2	0.8
TL-18	厚层白云岩	1.4	-0.2	391.9	1.1	-1.9	-7.2	0.9	8.5	2.6	13.7
TL-19	薄层泥质白云岩	-1.3	-0.5	85.7	1.6	-1.1	-1.1	0.8	6.8	2.0	0.4

铜仁地区“碳酸盐岩帽”中; $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-12.5\sim-1.1\text{‰}$ 之间,从下向上表现出增加的趋势,这与全球 Marinoan 冰期后碳酸盐岩帽 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化是一致的。

研究表明, V/Cr 、 Ni/Co 、 U/Th 对沉积环境的判别效果较好(胡修锦等,2001)。 V/Cr 、 Ni/Co 和 U/Th 在缺氧环境下分别大于4.25、7和1.25,在氧化环境下分别小于2.5和0.75,而在贫氧环境下分别居于 $2\sim4.25$ 、 $5\sim7$ 和 $0.75\sim1.25$ 之间。“碳酸盐岩帽”下部含黄铁矿黑色泥灰岩和薄层白云岩,其 V/Cr 为 $2\sim3.5$,表明其为弱氧环境。而上部相厚层白云岩 V/Cr 为 $11.1\sim28.7$,属于还原环境。 Ni/Co 表明,下部相为弱氧环境,上部相为还原-氧化环

境。 U/Th 也反映下部相为弱氧化环境,而上部相为氧化-还原环境。 δCe 变化于 $-0.42\sim0.22$ 之间,也表明当时为还原-氧化环境。 V/(V+Ni) 能反映古海洋水体的分层性, V/(V+Ni) 小于0.6表示古海洋水体呈弱分层,大于0.84则为高分层。坝黄陡山沱组“碳酸盐岩帽”白云岩的 V/(V+Ni) 大多数小于0.6,表示古海洋分层弱,可能和洋流上涌底部海水与上层海水混合有关。但在“碳酸盐岩帽”之上的灰岩,则 V/(V+Ni) 都大于0.84,表示古海洋水体处于强烈分层状态。

台江五河剖面由于其中的“碳酸盐岩帽”不发育,所以测得的地球化学数据不多(表2)。

五河剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 变化介于 $-11.0\text{‰}\sim-9.7\text{‰}$ 之

表 2 贵州台江五河剖面陡山沱组微量稀土及同位素元素分析
Table 2 Some trace elements, rare earth elements and isotopic data for the Doushantuo Formation in the Wuhe section of Taijiang county, Guizhou province

样品	岩性	δCe $/\times 10^{-1}$	δEu $/\times 10^{-1}$	Mn/Sr	$\delta^{13}\text{C}$ $/\text{‰}$, PDB	$\delta^{18}\text{O}$ $/\text{‰}$, PDB	V/ $(\text{V}+\text{Ni})$	V/Cr	Ni/Co	U/Th
WH-1	黑色含砾泥岩	-0.9	-2.5	0.9	-5.5	-10.9	0.8	1.7	2.1	0.2
WH-15	透镜状含炭质白云岩	-3.3	-2.89	0.1	-8.3	-11.0	0.8	1.7	5.3	0.7
WH-16	透镜状含炭质白云岩	-1.5	-2.2	0.8	-6.7	-9.7	0.9	4.4	3.8	0.3

间,平均为 -10.5‰ ,因此,碳同位素数据只能作为参考, $\delta^{13}\text{C}$ 明显偏负,为 $-8.3\text{‰}\sim-6.7\text{‰}$,二者的变化趋势也基本一致。碳同位素表现出强烈的负异常的特征,与全球冰后期碳酸盐岩沉积特征是一致的。

V/Cr 介于 $1.7\sim4.4$ 之间。台江五河南沱冰碛岩具有较高的Ce负异常,较低的Eu负异常,说明冰碛岩沉积时为氧化-还原环境。陡山沱组底部的黑色泥灰岩,属于“碳酸盐岩帽”下部相,Ce具有明显的负异常,Eu具有正异常,表明海洋属于还原-氧化性。五河地区 Mn/Sr 比值介于 $0.1\sim0.9$ 之间,平均为0.6。

清镇剖面只测了其中的碳、氧同位素(表3),从表中可以看出,清镇地区也具有全球分布的“碳酸盐岩帽”的地球化学特征:碳同位素负异常,下部为 -3.7‰ ,向上逐渐升高。一般来说,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(Nabonne等,1994;Myrow等,1999)。与其他地区相比,清镇地区碳同位素表现为较高的负异常和快速的向正值转变的特征。

表 3 贵州清镇阿坝寨剖面陡山沱期同位素测定结果

Table 3 Some isotopic data for the Doushantuo Formation in the Abazhai section of Qingzhen country, Guizhou province

样品	岩性	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$, PDB	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$, PDB
QZ-1	深色灰泥岩	-3.7	-4.7
QZ-3	深灰色细砂岩	-1.1	-1.7
QZ-5	薄层状泥灰岩	-0.2	-3.0
QZ-6	薄层灰岩	1.2	-0.8
QZ-7	薄层白云岩	1.8	0.01
QZ-8	厚层状白云岩	2.6	0.4
QZ-10	厚层致密白云岩	3.9	-1.2
QZ-11	厚层致密白云岩	4.4	-2.3
QZ-12	厚层致密白云岩	3.9	-4.3

3 结论

对“碳酸盐岩帽”的研究引起了中外学者的广泛关注,但对其中诱发突变的控制因素和形成机理未达成共识。一种为“雪球地球”模型,其代表者是

Hoffman 等(1998b)。他们提出“雪球地球”的假设,认为在 580~750 Ma 前之间,至少有一次地球上千万年中海洋被海冰封住,快速变成缺氧和富溶解二价铁。在冰期,由于洋中脊热水活动和玄武岩低温交换,海洋的 Ca/Mg 比增加,由于没有河流的碱性水体输入,大量碳酸钙溶解于海水中。同时,陆地上大量的玄武岩喷发,厚厚的冰层把大气 CO_2 和海洋水体隔离,避免 CO_2 和海水中的 Ca^{2+} 发生反应,造成大气圈中 CO_2 浓度是现在的 350 倍左右,结果引起温室效应使冰雪地球变暖,冰川消融,大气圈中的 CO_2 转移到海洋水体中,导致温暖表层水体中 CaCO_3 快速沉淀,形成全球都有分布的碳酸盐岩帽。另一种为非“雪球”模型,主要代表者为 Kennedy 等。他们认为目前没有足够的证据来说明赤道地区的大洋曾经被冰层覆盖,认为全球性分布的碎屑冰碛岩层之上突然出现碳酸盐岩沉积体是由于海底储存的大量固态甲烷被“触发器”(如海侵或火山喷发)触发,固态甲烷发生脱气作用,海水中大量的 CH_4 与 Ca^{2+} 发生反应形成的。属于此种模型的另一种观点认为,即使新元古代末期有冰川活动,也并不是那么强烈。认为 Marinoan 期(相当于中国南沱期)的杂砾岩并不是冰碛岩,而主要是由于重力流(如泥石流)快速堆积形成的(Arnaud 等 2003)。

通过对贵州地区“碳酸盐岩帽”的沉积特征及地球化学研究发现:

(1)研究区内存在新元古代末期(约 600 Ma)全球 Marinoan 冰期后的“碳酸盐岩帽”。

其主要表现为碳同位素负异常。虽然在该时期所处的沉积环境不同,但是其中的“碳酸盐岩帽”中的碳同位素均表现出不同程度的负异常,具体表现在:当时为滨浅海环境的清镇地区,其中陡山沱组底部碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-3.718\text{‰} \sim -0.209\text{‰}$;处于陆棚环境的铜仁地区,其“碳酸盐岩帽”下部相 $\delta^{13}\text{C}$ 表现出高的负异常可达 -12.48‰ ,而到上部厚层白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 明显向正异常反向迁移,但还是处于 $-3.0\text{‰} \sim -1.0\text{‰}$ 之间;次深海环境的台江五河地区的“碳酸盐岩帽” $\delta^{13}\text{C}$ 明显偏负,在碳酸盐岩下部相底部为 $-8.278\text{‰} \sim -6.651\text{‰}$ 。

从以上的数据也可以看出,沉积环境水体深的地区其 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较低。五河地区由于沉积条件的限制其中的碳酸盐岩不发育, $\delta^{13}\text{C}$ 也比清镇地区低。

(2)岩石及沉积特征分析表明,3 个地区的冰期后“碳酸盐岩帽”沉积应该是一个缓慢的过程,虽然

这个时期可能很短或者由于沉积环境的原因而不太明显。最明显的是铜仁地区“碳酸盐岩帽”的底部,其中薄层碳酸盐岩中发育的水平纹层不能用“雪球”模型来解释,因为如果当时的冰盖是突然打开,碳酸盐岩快速沉积的话,沉积的应该是厚层纹理不发育的岩石特征。原生的变形构造说明当时环境存在构造运动或者泥石流等不稳定因素。另外清镇地区“碳酸盐岩帽”下部也发育水平层理,并且其中的岩石表现出向上 Ca 、 Mg 含量逐渐增加的特点,这也说明冰期后环境的转变不是突然的。清镇阿坝寨剖面缺失南沱组(相当于 Marinoan 期)沉积,该地区在当时是处于滨岸泻湖环境,如果按“雪球地球”模型解释,则滨海和浅海地区碳酸盐沉积更快,应该出现更典型的“碳酸盐岩帽”,但是,清镇剖面表现出的沉积特征是“碳酸盐岩帽”下部是由粉砂岩、细砂岩→含白云质粉砂岩、细砂岩→粉细砂质白云岩→薄层白云岩,上部为厚层块状白云岩。也就是说,“碳酸盐岩帽”沉积是钙质逐渐增加的过程,而非 Hoffman 等认为的快速沉积的过程。

(3)从贵州铜仁坝黄剖面分析,冰碛层顶到变形构造发育的“碳酸盐岩帽”下部相薄层白云岩开始出现,二者之间夹 40 cm 厚的黑色白云岩质页岩,同样说明冰后碳酸盐岩沉积不是“雪球地球”消融后马上开始,而是经过大约几万至几十万年后才开始沉积的“碳酸盐岩帽”。

Marinoan 冰期结束时间大约为 595 Ma,可作为陡山沱组底部的年龄,寒武系底部的年龄为 544 Ma。铜仁坝黄陡山沱组和留茶坡组下部(相当于灯影组)厚度为 72 m,平均沉积速率为 1.41 m/Ma (杨瑞东等 2003)。那么即使不算沉积速率的差异,沉积“碳酸盐岩帽”下部的薄层碳酸盐岩大约需要 0.28 Ma。而不像 Hoffman 等人认为的“厚度可达 400 m,但所代表的时间却只有数千年”(张启锐等, 2002)。事实上一般薄层水平纹层发育的岩石其沉积速率是相对较慢的。

通过以上分析可以看出,贵州地区的“碳酸盐岩帽”也很难用“雪球”模型来解释,Marinoan 冰期后环境并不是突变的,而是逐渐过渡的。

至于为什么 Marinoan 冰期后全球都沉积特征典型的“碳酸盐岩帽”,尚需进一步深入研究。

参 考 文 献

陈孝红,李华芹,陈立德等. 2003. 三峡地区震旦系碳酸盐岩碳氧同位素特征. 地质论评, 49(1): 66~73.

- 柳永清,尹崇玉,高林志等. 2003. 峡东震旦系层型剖面沉积相研究. 地质论评, 49(2):187~194.
- 王伟,松本良,王海峰等. 2002. 长江三峡地区上震旦统稳定同位素异常及地层意义. 微体古生物学报, 19(4):382~388.
- 王自强,尹崇玉,高林志等. 2002. 湖北宜昌峡东地区震旦系层型剖面化学地层特征及其国际对比. 地质论评, 48(4):408~415.
- 徐备,郑海飞,姚海涛等. 2002. 塔里木板块震旦系碳同位素组成及其意义. 科学通报, 47(22):1740~1744.
- 杨瑞东,王世杰,董丽敏等. 2003a. 上扬子区震旦纪南沱冰期后碳酸盐岩帽沉积地球化学特征. 高校地质学报, 9(1):72~80.
- 杨瑞东,王世杰,欧阳自远等. 2003b. 贵州新元古代冰期(Varanger)后环境演变与藻类的复苏. 地质地球化学, 31(1):62~69.
- 张启锐,储雪蕾,张同钢等. 2002. 从“全球冰川”到“雪球假说”——关于新元古代冰川事件的最新研究. 高校地质学报, 8(4):437~481.

References

- Arnaud E, Eyles C. 2002. Glacial influence on Neoproterozoic sedimentation: the Smalfjord Formation, northern Norway. Sedimentology, 49:765~788.
- Chen Xiaohong, Li Huaqin, Chen Lide et al. 2003. Carbon and oxygen isotope features of the sinian carbonate strata in the three gorges region. Geological Review, 49(1):66~73 (in Chinese with English abstract).
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P et al. 1998. A neoproterozoic snowball Earth. Science, 281:1342~1346.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P. 1998. Comings and goings of global glaciations on a neoproterozoic tropical platform in namibia. Gsa Today, 8:1~9.
- Hu Xiujin, Wang Chenshan. 2001. Summarization on the studying methods of the palaeo-ocean dissolved oxygen. Advance in Earth Sciences, 16:65~71 (in Chinese with English abstract).
- Kaufman A J, Hayes J M, Knoll A H et al. 1991. Isotopic compositions of carbonates and organic carbonates and organic carbon from upper Proterozoic successions in Namibia: stratigraphic variation and the effects of diagenesis and metamorphism. Precambrian Research, 49:301~327.
- Kimura H, Matsumoto R, Kakuwa Y et al. 1997. The vendian-cambrian ^{13}C record, North Iran: evidence for overturning of the ocean before the Cambrian explosion. Earth and Planetary Science Letters, E1-E7.
- Liu Yongqing, Yin Chongyu, Gao Linzhi et al. 2003. Advances in the study of sedimentary facies of the Sinian candidate stratotype in the eastern areas of the three gorges, Hubei. Geological Review, 49(2):187~194 (in Chinese with English abstract).
- Nogueira A C R, Riccomini C, Sial A N et al. 2003. Soft-sediment deformation at the base of the Neoproterozoic Puga Cap Carbonate (southwestern Amazon craton, Brazil): Confirmation of rapid ice-house to greenhouse transition in snowball Earth. Geology, 31:613~615.
- Strauss H. 1997. The isotopic composition of sedimentary sulfur through time. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 132:97~118.
- Wang Wei, Matsumoto Ryo, Wang Haifeng et al. 2002. Isotopic chemostratigraphy of the upper sinian in three gorges area. Acta Micropalaeontologica Sinica, 19(4):382~388 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ziqiang, Yin Chongyu, Gao Linzhi et al. 2002. Chemo-stratigraphic characteristics and correlation of the sinian stratotype in the eastern Yangze gorges area, Yichang, Hubei province. Geological Review, 48(4):408~415 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Zheng Haifei, Yao Haitao et al. 2002. Isotopic chemostratigraphic of the Sinian in the Talimu plate. Science Aviso, 47(22):1740~1744 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Wang Shijie, Ouyang Ziyuan et al. 2003a. Environmental reconstruction and algal recovery after Neoproterozoic glaciation(Varanger), Guizhou. Geology-Geochemistry, 31(1):62~69 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Wang Shijie, Dong Limin et al. 2003b. Sedimentational geochemical characteristics of the Sinian cap carbonate from the upper Yangtze region. Geological Journal of China Universities, 9(1):72~80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qirui, Chu Xuelei, Zhang Tonggang et al. 2002. From global glaciation to snowball earth-recent researches on the Neoproterozoic glaciation events. Geological Journal of China Universities, 8(4):473~481 (in Chinese with English abstract).