

文章编号:1004-7824(1999)06-0021-08

沉积地层中成矿作用的碳同位素特征 和含矿缺氧盆地成因新观点

杨振强, 陈开旭, 黄惠兰

(宜昌地质矿产研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要:沉积盆地内地层中碳的来源,根据其碳、氧同位素特征可归纳为:海洋沉积碳酸盐碳、生物碳、热解非生物成因碳、大气淡水方解石碳和热卤水系统中的无机碳。热水成因的金矿及喷气-沉积矿床中的碳都具有深源成因的无机碳。深部含无机碳的热流体喷溢到海洋底部可以解释为扩张盆地底部形成的缺氧环境和含矿黑色页岩的主导原因。

关键词:含矿缺氧盆地;碳同位素;沉积地层;成矿作用

中图分类号:P597

文献标识码:A

近年来的研究资料表明,应用碳同位素在解释沉积盆地中的各种成矿作用具有重要的作用^[1]。根据碳酸盐岩的碳、氧同位素值及其图解可以辨别出海洋碳酸盐岩、生物成因、有机质热解、大气降水和深部热卤水等不同成因的碳。特别令人感兴趣的是许多沉积盆地内与热水循环有关的贵金属、金属矿床和喷气喷流矿床中的碳酸盐岩的碳同位素都具深源的特点。进一步研究结果还表明,沉积盆地演化过程中的某些重要沉积作用(例如大洋缺氧和含矿黑色页岩沉积等)也都与来自沉积盆地底部的含碳还原热卤水的喷溢活动息息相关。因此,与热水沉积和热水循环有关的矿床中,存在有深部来源的无机碳成分的新认识将对矿床学和沉积学概念的飞跃产生深远影响。本文将叙述沉积地层中几种不同来源的碳同位素特征,对探讨深源无机碳的证据具重要的沉积学意义。

1 沉积盆地内碳的来源

1.1 成矿作用中的碳、氧同位素特征

沉积盆地中的成矿作用是一个十分复杂的过程,包括生物成矿、热水成矿、大气降水热液成矿、海洋沉积-成岩成矿等过程。在不同成矿作用中的成矿流体具不同的碳、氧同位素值变化特征,表明碳的来源各不相同。沉积盆地中与成矿作用有关碳的来源可以归纳为海洋沉积碳酸盐碳、成岩早期的有机碳/热解非生物成因碳、大气淡水方解石的碳和热卤水中的无机碳5种。运用 $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ 图解可以直观地显示出这些不同来源的碳同位素在图解上占有特定的分布范围和位置(图1)。

海洋沉积-成岩成矿的碳、氧同位素 现代和古代海相碳酸盐的碳、氧同位素值在 $\delta^{18}\text{O}$ -

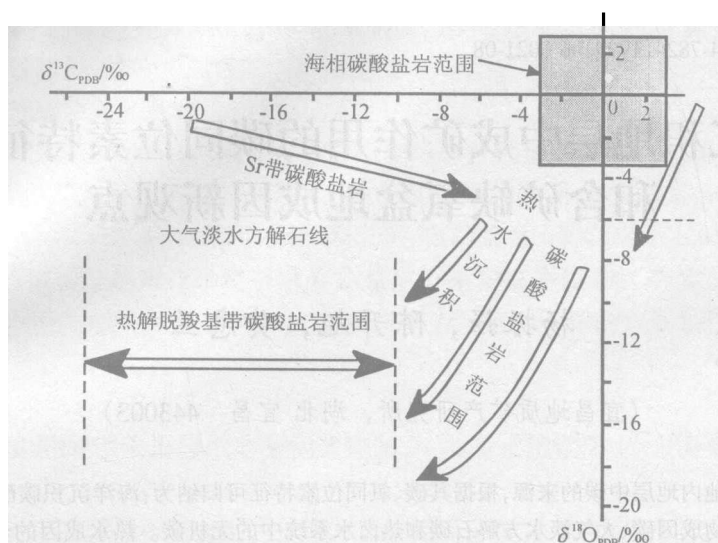


图1 沉积地层中碳酸盐岩的同位素组成图解

SR. 细菌硫酸盐还原带; Me. 细菌发酵带

Fig.1 Isotopic compositional diagram for carbonate rocks in sedimentary strata

SR = bacterial sulphate reduction zone; Me = bacterial fermentation zone

$\delta^{13}\text{C}$ 图解上集中在零附近的正方形范围内,一般 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为正值^[1~8]。古代的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值随着地质年代变老而偏向负值,例如,石炭纪海水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值平均为 -1.5‰ ^[5]。加拿大著名的 Pine Point 铅锌矿区中同生沉积的细晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为正值,最大的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值为 -1.58‰ ,恰好落在中泥盆世海水沉积的白云岩的范围内。因此,Pine Point 铅锌矿的白云岩提供了一个由海水沉积的含矿围岩的典型例子。

有机成矿的碳、氧同位素 沉积-成岩早期阶段通过有机质的分解,在沉积界面以下的成岩阶段由氧化带和硫酸盐还原带(成岩 II 带或 SR 带)变为细菌发酵阶段(Me 带),碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为负值,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值一般大于 -6‰ (图 1)。根据这个特点,很容易地辨别出和确认是否存在有机成矿的证据。国内外许多大型、超大型的含铜泥灰岩、黑色页岩型的银矿、锰矿等都显示生物成矿的碳、氧同位素特征^[1,9,10]。

热解非生物成因的碳、氧同位素 当含有机质的沉积物的埋藏深度达到 1km 以上时,便发生有机质的热解作用。在图 1 上,由热解提供的碳酸盐仅限于一定的碳、氧同位素的分布范围,即大多数的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值小于 -10‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值小于 -8‰ 。例如,湘中地区中奥陶世的碳酸锰矿石绝大多数的碳是由有机质在热解脱羧基阶段释放出来的 CO_2 所提供^[9]。

大气降水热液成矿的碳、氧同位素 根据现代第四纪灰岩暴露地表后的淡水成岩作用的研究结果,受大气降水成岩作用的影响,灰岩的碳、氧同位素组成呈现一种特殊的模式。大气降水成岩总的同位素变化特点是 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值限于很窄的范围($-4\text{‰} \sim -6\text{‰}$),而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值则变化很大($1\text{‰} \sim -12\text{‰}$)^[11]。当大气淡水成岩事件保留下来时,碳酸盐沉积物就显示了 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值可变,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值呈几乎不变的趋势。这种趋势曾被称为大气淡水方解石线^[12,13]。在图 1 上,它是一条平行于 $\delta^{13}\text{C}$ 轴的直线,很容易辨别。大气降水的成矿作用在国内外普遍受到重视,但是很少有人应用上述碳、氧同位素变化趋势对大气降水成因的

矿床进行探讨和鉴别。鉴于目前对地壳内被加热的大气降水是否受大气降水方解石线规律的控制还不太清楚,我们对大多数被认为是大气降水热液矿床的成因解释持慎重态度。

热水成矿的碳、氧同位素 当我们应用 Scotchman^[14]图解时,发现热水沉积层状矿床与热水循环有关的金属矿床中的碳酸盐岩的碳、氧同位素组成十分相近,只限于一定的范围内。热水沉积矿床中碳酸盐岩的同位素成分的点一般落在远离海相碳酸盐、生物碳和热解非生物成因碳范围之外的热水沉积范围内,绝大多数的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-2\text{‰} \sim -8\text{‰}$ ^[15],与国内外一些著名的金矿围岩和金刚石的碳同位素组成十分吻合。因此,有理由认为热水沉积矿床的碳同位素与金矿和金刚石一样,绝大多数为深源无机成因。

1.2 热水成因金矿是探索深源无机碳的窗口

热水成因矿床可以分为两大类:一类是通过沉积盆地底部以喷流方式沉积的层状矿床,另一类是盆地以下热水沿裂隙通道上升对含矿围岩进行充填、交代的脉状、网脉状、角砾状和蚀变矿床。金矿,不论是绿岩型、角砾岩型、脉型,还是“卡林型”,都是热卤水成因。据国内外金矿包裹体的 CO_2 气体和含金碳酸盐脉石的碳、氧同位素测定结果表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值绝大多数大于 -8‰ ,为典型的无机成因,成矿流体中大量的含碳气体对金矿的成矿富集起促进作用^[16]。因此,研究金矿的碳同位素组成是研究深部无机碳的重要途径。以加拿大魁北克省西部 Abitibi 太古代的金矿带为例,其碳酸盐矿物的碳同位素组成为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值大部分在 $-7\text{‰} \sim -2\text{‰}$ 之间^[17],说明其成矿流体可能来自一个均一的流体库,暗示着深部无机碳来源。

地壳深部气体的碳同位素值的主要证据还来自太古代绿岩型金矿中碳酸盐岩的碳同位素的报道^[18]。Groves(1988)认为,由海底蚀变所产生的碳不是太古代绿岩带中与金有关的碳酸盐岩碳的主要来源,受断裂控制的区域蚀变的金矿化(平均 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -4.8\text{‰}$)具有与海底蚀变完全不同的碳同位素值。这意味着在绿岩带演化期间,含 CO_2 气体的含金热流体主要来自地幔流。

国内金矿也有类似的情况。据研究,陕西省双王及二台子矿区的碳同位素也是负值^[19]。两矿床的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 平均值,双王为 -5.8‰ ,二台子为 -3.8‰ ,两者十分接近,说明属于无机成因碳,大量来自于地幔。

位于黔西南的卡林型戈塘金矿的碳同位素组成也为负值,为 $-3.2\text{‰} \sim -0.55\text{‰}$,变化范围比较窄^[20],也来自于地壳深部,而不是来自大气水或由有机质分解而成。广东河台金矿的碳、氧同位素的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值介于 $-2.97\text{‰} \sim -3.51\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值为 $-20.05\text{‰} \sim -21.25\text{‰}$ ^[21],表明含矿介质中含无机碳,为一个稳定的碳储库所供给。

从以上几个简单的实例可以看出,由热卤水喷溢和循环所沉积的碳酸盐矿物毫不例外地落在 $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ 图解的热水沉积的范围内。这个范围意味着大多数碳为无机成因,且来源于地壳内部(包括地幔去气作用),少数为海底蚀变碳酸盐岩分解的产物。

2 地壳深部流体含碳气体的碳、氧同位素特征

2.1 深部气体碳同位素与热水成因矿床碳同位素对比

关于现代地壳深部气体的碳同位素值的数据,主要来自大洋底部热水喷溢口附近的直接测试结果。特别令人感兴趣的是热水中 CO_2 的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值稳定在 $-4.13\text{‰} \sim -5.55\text{‰}$ 之间,而 CO 和 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分别为 $-14.2\text{‰} \sim -31.6\text{‰}$ 和 $-16.6\text{‰} \sim$

-30‰^[22]。因此,可以确信热水喷口附近的 CO₂ 的同位素值应代表来自洋壳深部的碳的同位素成分,可能为地幔排气的结果,而 CO 和 CH₄ 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值则可代表有机质热解的无机成因碳。

根据对地幔岩流体包体和玄武岩玻璃中的碳及地幔橄榄岩中产出的石墨和金刚石的碳同位素组成的测试结果表明:它们的碳同位素组成的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围很窄(为 -4‰~-6‰),代表地幔原始碳的成分^[23]。对比之下,我们认为绝大多数热水成因矿床的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值不小于 -8‰,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值不大于 -7‰,也显示深部来源无机碳的碳、氧同位素组成特征。

地壳深部的高温热变质作用也可释放出大量水和 CO₂。这种由于变质过程中脱水和脱碳酸化反应(即脱 CO₂)而产生的流体被称变质流体。据 Kreulen(1980)对希腊爱琴海中 Naxos 岛上区域变质岩(片岩和大理岩)中富含 CO₂ 流体包裹体的碳同位素测试结果表明,即使是变质作用形成的 CO₂ 气中,也有约 1/3 的 CO₂ 气体来自上地幔的去气作用^[24]。

2.2 热卤水成因矿床中无机碳的深源意义

当我们在对比热水沉积的层状矿床和沉积地层中古热卤水成因矿床时,发现它们之间具有共同特点,即具有一定的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 负值和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 低负值的特点。这意味着成矿流体本身含有一定 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 负值的含碳气体。过去盛行的理论认为,沉积盆地内部的碳、氢、氧同位素负值归因于大气降水的水/岩交换的结果。然而,关于地幔流体运动对热水沉积作用的影响却知之甚少。

通过上述碳同位素值的分析对比结果,笔者已经觉察到一个重要事实:深部无机成因碳对热卤水成矿作用具有很重要的作用。因此,我们在考虑喷气-沉积矿床和热卤水成因矿床时,不但要考虑地壳中的大气降水、封存海水、地层压实水、地下水和变质水等流体运动作用,还更要充分考虑地幔流体 HACONS^[25]对地壳中成矿作用的巨大影响。地幔流体运动是地壳热流的总的根源,是深部流体的重要发源地。针对金矿成因,过去国内外最流行的大气降水热液(水/岩交换)成矿论将为一种新观点“地幔流体成矿说”所代替。一些大型和超大型矿床的成因将归因于地幔流体运动和交代作用。近期研究资料揭示,美国内华达州著名的“卡林型”金矿的成矿机理有了新的理论解释:该类型的金矿是由 43~34Ma 前的地幔柱(即古黄石公园热点)引起的盆地扩张和热流上升活动的结果。金矿化、拉伸构造和岩浆活动均由地幔热点所引起^[26]。目前,更多的人对金矿的深部成因有更深入的了解,并从不同的角度发现了金矿,特别是“卡林型”金矿的稳定同位素、稀土元素配分曲线和元素的地球化学特点都具深源流体成因的特点^[27~29]。因此,热卤水矿床成矿流体(包括其中气体)的深源成因将是今后经久不衰的研究课题。

3 地幔排气与缺氧环境

3.1 拉张盆地的地幔软流层活动

沉积盆地演化的研究表明张裂盆地(包括陆内断陷和裂谷、夭折裂谷和被动大陆边缘裂陷槽等)都是热卤水发育的地区。许多板块内的拉张盆地都是古生代多金属矿床良好的沉积场所。世界上许多大型的热卤水成因矿产均与扩张盆地(裂陷槽)的沉积环境有关。

被动大陆边缘和大陆板块内的拉张盆地的发育,完全依赖于地幔软流层大规模的主动上升隆起而引起地壳拉伸减薄的重要构造适应调整。在这个伸展过程中,折离(滑脱)断裂

系统起着关键性作用。折离断层是沟通大型扩张盆地和上地幔之间的通道^[30,31]。为扩张盆地内深部的热水来源创造了良好的构造条件。地幔软流层的大规模上隆与折离断层系统的发育、沉积盆地拉张、深部热卤水系统活动与地幔排气之间存在着因果关系。因此,地幔柱活动导致拉张盆地的形成,并伴随大量含碳流体的释放而引起缺氧环境,是黑色页岩型金属矿床沉积的根本原因。

3.2 含矿黑色页岩成因和缺氧事件的新认识

海洋缺氧环境是含矿黑色页岩形成的必要条件。关于缺氧事件的原因具有许多不同的观点,传统观点认为是古地理、古气候因素所决定的(例如古海洋面上升和全球气候变暖所致),或者归因于地外陨石撞击事件。

白垩纪末的全球性大洋缺氧事件(OAE)和华南板块晚震旦世/寒武纪界线上的黑色页岩系是众所周知的含矿缺氧地质事件。前者杜乐天(1996)解释为深部成因,是地幔流体强烈活动的结果^[25],因而修改了由海侵或最高海平面变迁所致的旧理论观点。

最新的观点认为,国外许多大型和超大型黑色页岩型的层状铜矿、层状铅锌银矿(例如欧洲晚古生代的曼斯菲尔德黑色页岩型铜矿,澳大利亚昆士兰新元古代芒特艾萨铅锌矿、麦克阿瑟河铅锌矿,加拿大不列颠哥伦比亚新元古代沙利文层状铅锌矿)都是与热点/地幔柱有着密切的时空联系^[32]。事实上,许多大型、超大型热水成因矿床的包裹体气体成分测试结果都显示富含 CO₂ 流体的特征,足见无机 CO₂ 对成矿富集作用的重要性。可以毫不夸张地说,地幔隆起和地幔柱/热点的活动才是地史上全球性含矿黑色页岩的沉积及无机油气藏形成的根本原因。

我国扬子地台上的震旦纪/寒武纪界线上沉积了一套含 Mo-Ni-V 和铂族元素(PGE)的黑色页岩系,这套以镍钼多金属异常黑色岩系被认为是与地外因素有关的地质事件^[33~35]。然而,有证据表明,这套含 PGE 的黑色页岩为海底喷气的产物。深部地壳或地幔通过深大断裂提供了大量的多金属元素和亲铁元素(As、Sb、Te、Se),而且成矿流体中可能包含着有毒的还原气体和深部来源的 CO₂,并以海底喷泉方式将地壳深部的许多罕见元素喷发到海盆地中沉积下来^[36]。

湖北三峡剖面晚震旦世/寒武纪界线的黑色页岩与上述含矿黑色页岩属于同一层位。黑色页岩系以下白云岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-0.6\text{‰} \sim -4.3\text{‰}$, 其平均值为 -1.8‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值的变化范围为 $-3.1\text{‰} \sim -5.8\text{‰}$, 其平均值为 -4.6‰ 。黑色页岩中白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-1.4\text{‰} \sim -9.6\text{‰}$, 其平均值为 -3.2‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值的变化范围为 $-3.9\text{‰} \sim -15.9\text{‰}$, 其平均值为 -10.8‰ 。显然在黑色页岩层底部界线附近出现较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 负值(-9.6‰),这种现象到底是由大陆淡水和陆源物的输入有关呢^[35]? 还是在缺氧事件初期由于海盆地底部积聚了大量有毒的来自地球深部还原气体所引起海洋生物大量死亡和厌氧细菌大量繁殖所致,值得深入探讨。当笔者采用上述 Scotchman 图解来处理这 42 个样品的碳、氧同位素数据时,发现这些点落在 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 图解上明显地集中在两个区域内(图 2):①部分白云岩样品的点落在成岩早期的 Me 带至热解带(Th-D)的一条直线附近,表明以生物分解作用为主的第Ⅲ阶段(即细菌发酵阶段)和热解阶段(Ⅳ,脱羧基阶段)提供绝大多数的碳同位素成分;②部分黑色页岩中的样品落在热水沉积的范围内(图 2 上用虚线圆圈表示为“H-th”), $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值具有较低的负值(小于 -9‰)。从图 2 上分布的两个区域可以断定三峡剖面前寒武纪/寒武纪的碳的来源决不仅限于浮游生物突然大量灭绝所引起的负

异常,还有生物灭绝与深部卤水提供的无机碳所引起的负异常共同作用的结果。由此可见,湖北三峡地区黑色页岩中的碳、氧同位素负异常和界线 C 粘土层的铍异常不应归因于地外撞击事件,而应该充分考虑地内成因,即当沉积黑色页岩时,沉积盆地底部上涌的热卤水改变了海水的正常循环,来自深部的 CO_2 气体在水体中达到过饱和的程度,在海底沉积介面附近造成一个缺氧和富含金属元素水层。由于海底缺氧,造成金属层沉积的良好场所,大量生物面临灭绝之灾。因此寒武纪黑色页岩中的缺氧环境,主要是由含碳气体的深部流体喷溢到海底而引起的。这种对造成震旦纪/寒武纪界线的黑色页岩沉积作用的缺氧事件原因的新解释,也许具有普遍意义。显然,海洋缺氧事件,特别是地史上碳酸盐台地上某些与金属硫化物矿床有成因联系的缺氧环境,与海底热水活动之间存在有某种因果关系。应该强调海底喷气(特别是含碳还原气体)对海底缺氧环境形成过程的影响。

承蒙何龙清博士审阅,特此致谢。

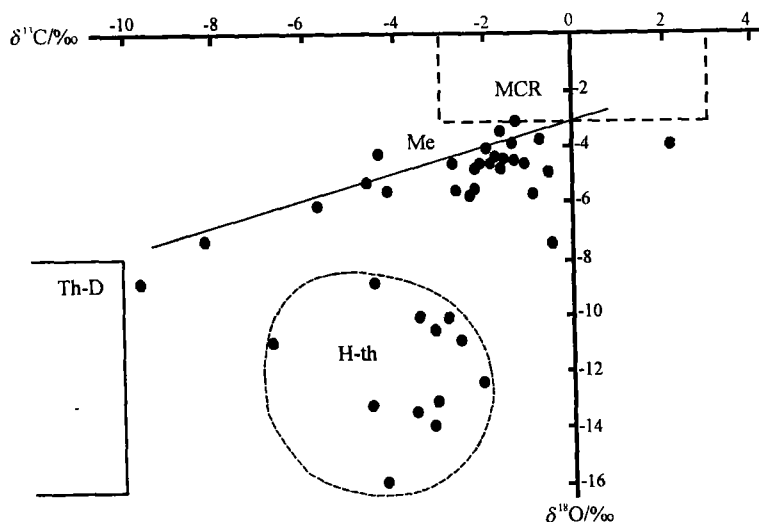


图2 湖北三峡剖面碳、氧同位素图解

MCR. 海相碳酸盐岩; Th-D. 热解脱羧基阶段; Me. 细菌发酵带; H-th. 热水沉积

Fig.2 Carbon and oxygen isotopic compositional diagram for the Yangtze Gorges section, Hubei

MCR = marine carbonate rock; Th-D = thermal decarboxylation (Scotchman, 1988)^[14];

Me = bacterial fermentation zone; H-th = hydrothermal deposits

参考文献:

- [1] 杨振强, 陈开旭, 翟丽娜. 生物成矿和热水成矿中碳来源的同位素示踪[J]. 华南地质与矿产, 1994, 2: 59-65.
- [2] FRANK T R and LOHMANN K C. Diagenesis of fibrous magnesium calcite marine cement: implications for the interpretation of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of ancient equivalents[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1996, 60(13): 2427-2436.
- [3] JAMES N P and GINSBURG R N. Extracts from the Sarward margin of Belize barrier and atoll reefs[A]. TUCHER M E and BATHURST R C. Carbonate Diagenesis[C]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990, 55-80.
- [4] MILLIMAN J D. Submarine lithification of carbonate sediments[J]. Science, 1966, 153: 994-997.
- [5] BRAND U. The oxygen and carbon isotope compositions of Carboniferous fossil components: sea-water effects[J]. Sedi-

- mentology, 1982, 29(1): 139-147.
- [6] SANDBERG P A and HUDSON J D. Aragonite relic preservation in Jurassic calcite-replaced bivalve[J]. Sedimentology, 1983, 30(6): 879-892.
- [7] MARSHALL J D and ASHTON M. Zoned calcites in Jurassic ammonite chambers: trace elements, isotopes and neomorphic origin[J]. Sedimentology, 1981, 28(6): 867-887.
- [8] QING H R. Petrography and geochemistry of early-stage, fine- and medium-crystalline dolomites in the Middle Devonian Presqu'ile Barrier at Pine Point, Canada[J]. Sedimentology, 1998, 45(2): 433-446.
- [9] 杨振强, 陈开旭等. 地球灾变事件、热水沉积和有机质富集成矿: 湖北白果园震旦纪银钒矿床的沉积学[A]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊[C]. 北京: 地质出版社, 1995, 20: 93-104.
- [10] 杨振强, 蒋德和, 赵时久. 湘中地区奥陶系和震旦系含锰矿中稳定同位素组成的沉积学新解释[J]. 岩相古地理, 1993, 13(3): 23-36.
- [11] ALLAN J R and MATTHEWS R K. Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis[J]. Sedimentology, 1982, 29(6): 797-817.
- [12] SALLER A H and MOORE Jr C H. Geochemistry of meteoric calcite cements in some Pleistocene limestones[J]. Sedimentology, 1991, 38(4): 601-621.
- [13] 成都地质学院沉积地质研究所, 长庆石油勘探局勘探开发研究院译编. 古岩溶与油气储层[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.
- [14] SCOTCHMAN I C. Diagenesis and primary migration in Upper Jurassic claystone source rocks in North Sea: Discussion[J]. Am. Asso. Petro. Geol. Bulletin, 1988, 72(11): 1423-1425.
- [15] 杨振强, 陈开旭等. 粤北晚古生代裂陷盆地热水沉积成矿作用的地质地球化学研究[R]. 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室年报, 1994, 59-62.
- [16] 戴金星, 宋岩等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京: 北京科学出版社, 1995.
- [17] 卢焕章等. 典型金属矿床的成因及其构造环境[M]. 北京: 地质出版社, 1995, 107-118.
- [18] GROVES D I. 太古代碳储库及与金矿床流体来源的关系[J]. 地质地球化学(金矿专辑), 1988, 9: 55-58.
- [19] 石准立等. 陕西双王-二台子含金角砾岩型金矿地质特征及成矿机制研究[R]. 1990.
- [20] 王砚耕等. 黔西南构造与卡林型金矿[M]. 北京: 地质出版社, 1994, 76-80.
- [21] 符力奋. 河台金矿床成因探讨[J]. 广东地质, 1989, 4(4): 35-43.
- [22] MERLIVAT L 等. 东太平洋隆起 130°N 热液喷口的同位素组成和气体浓度[J]. 地质地球化学, 1988, 7: 46-52.
- [23] 曹荣龙. 地幔流体的前缘研究[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 161-171.
- [24] KREULEN R. CO₂-rich fluids during regional metamorphism on Naxos (Greece): carbon isotopes and fluid inclusions[J]. Amer. Jour. Sci., 1980, 280(7): 745-771.
- [25] 杜乐天. 地壳流体与地幔流体间的关系[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 172-180.
- [26] OPPLIGER G L, MURPHY J B and BRIMHALL Jr G H. Is the ancestral Yellowstone hotspot responsible for the Tertiary "Carlin" mineralization in the Great Basin of Nevada? [J]. Geology, 1997, 25(7): 627-630.
- [27] 刘显凡, 金景福, 倪师军. 滇黔桂微细浸染型金矿深部物源的稀土元素证据[J]. 成都理工学院学报, 1999, 23(4): 25-30.
- [28] 朱赖民, 金景福, 何明友. 黔西南微细浸染型金矿床的一种成因新模式——深源流体改造交代地壳岩石成矿[J]. 冶金地质动态, 1996, 8: 21-24.
- [29] 何明友, 胡瑞忠. 深源流体——老王寨金矿床含矿流体来源的可能性[J]. 地质地球化学, 1996, 2: 27-31.
- [30] LISTER G S et al. Detachment faulting and the evolution of passive continental margins[J]. Geology, 1986, 14(3): 246-250.
- [31] LATIN D and WHITE N. Generating melt during lithospheric extension: pure shear vs. simple shear[J]. Geology, 1990, 18(4): 327-331.
- [32] 王登红. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京: 地震出版社, 1998, 1-16.
- [33] 范德廉等. 扬子地台前寒武—寒武纪界线附近的地质事件与成矿作用[J]. 地球化学, 1987, 5(3): 81-95.
- [34] 许靖华等. 寒武纪生物爆发前的死劫难海洋[J]. 地质科学, 1986, 1: 1-5.

- [35] 高计元,孙枢,许靖华等. 碳氧同位素与前寒武纪和寒武纪边界事件[J]. 地球化学,1988,6(3):257—266.
- [36] COVENEY M Jr and NANSHENG C. Ni-Mo-PGE-Au-rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States[J]. Mineralium Deposita, 1991,26(1):83—88.

Carbon isotope in sedimentary strata and new explanation for the origin of ore-bearing anoxic basins

YANG Zhen-qiang, CHEN Kai-xu, HUANG Hui-lan

(Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003, China)

Abstract: The carbon in sedimentary basins may be derived from: (1) marine carbonates; (2) organic carbon; (3) abiogenetic carbon from thermal degradation; (4) carbon from meteoric calcite, and (5) inorganic carbon in the thermal brine systems. The carbon both in the hydrothermal gold deposits and hydrothermally exhalative-sedimentary deposits has a deep-seated origin. The processes of deep-seated inorganic carbon-bearing hydrothermal fluids spouting onto the sea floor may be interpreted to be the leading factors for the formation of anoxic environments and ore-bearing black shales at the bottom of extensional basins.

Key words: ore-bearing anoxic basin; carbon isotope; sedimentary strata; mineralization

本刊在四川省第二次期刊质量考评中被评为 自然科学期刊学术类质量一级期刊

1999年4月~1999年7月,在四川省委宣传部、四川省新闻出版局及四川省科委组成的“四川省期刊质量考评领导小组”领导下,由有关专家组成的“社会科学期刊质量考评委员会”和“科学技术期刊质量考评委员会”,按照“中国社会科学期刊质量标准”和《五大类科技期刊质量要求及评估标准》的规定和要求,对四川省1998年度出版的正式期刊进行了第二次质量考评。

在这次质量考评中,对不同类型的期刊采取均衡抽样,由评委按照质量标准交叉考评打分,领导小组最后审定。整个考评工作始终坚持“客观、公正、准确”的原则。经过评定,本刊在这次期刊质量考评中被评为自然科学期刊学术类质量一级期刊。

本刊得到有关领导部门的充分肯定。这是对我们的鼓励和鞭策,为进一步提高本刊的质量增添了信心和力量。