

# 金矿成矿流体特点及深—浅部流体相互作用成矿机制

胡文宣 孙 睿 张文兰 孙国曦

(南京大学 地球科学系 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 江苏 南京 210093)

**摘 要:**以中国一些典型金矿研究资料为基础,结合前人关于深部流体研究成果,分析对比了金矿成矿流体和深部流体的特点,总结了深部流体参与金矿成矿作用的主要表现,然后计算了深部富气流体的能量传递效应和富水流体在不同深度上的密度变化规律。认为深部富气流体主要是向浅部输送大量热能和部分有利于成矿的物质,而浅部富水流体下渗提供足够的水体,二者在中地壳的“低速层”附近交汇,发生相互作用并作用于围岩,在有利条件下演化形成成矿流体,最终上升到地壳浅部沉淀成矿。

**关键词:**金矿流体 深部流体 浅部流体 相互作用 成矿机制

**中图分类号:** P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2001)04-0281-08

关于金矿成矿流体的研究,一直是人们关注的热点。在过去较长一段时间内,热对流循环机制(一般在地壳浅部几 km 范围内)被认为是金成矿流体形成的主要模式。近几年来,随着深部地质作用研究的深入,深源流体乃至幔源流体与金成矿作用的关系越来越受到重视,已经发表了数以百计的文献资料,从不同方面、以不同事实阐述或讨论了深部流体与金矿的关系问题。然而,许多细节并没有得到解决,无论在物源上,还是在机制上,甚至各种地球化学证据本身,都还存在一些不确定甚至相互矛盾的地方。笔者试图从一些基本资料和客观事实出发,结合最近流体热力学研究成果,对上述问题作一探讨,提出一些不成熟的认识。

## 1 金矿成矿流体的特点

为了探索金矿成矿流体的来源和形成机制,必须对金矿成矿流体本身的特点作深入的分析。笔者收集了近十年来我国学者对国内一些重要金矿的研究资料(主要是石英脉型金矿),以期对金矿成矿流体特点有全面的了解。从表 1 和图 1 可知,大多数金矿成矿流体以中—低盐度为特征,质量分数一般

小于 12%,少数可达 20%,而且盐度的变化范围都很大,表明了成矿流体体系的不稳定性。部分金矿进行了包裹体成分分析,笔者将其数据投在  $H_2O-NaCl-CO_2$  三角成分图中(图 2),发现各成分点都靠近  $H_2O$  端员分布,并含有不等量的  $CO_2$ ,质量分数一般在 5% 以上,个别高达 40%,说明  $CO_2$  是金矿成矿流体的重要组成。还需指出的是,  $NaCl$  和  $CO_2$  的含量具有负相关趋势,即高盐度的流体一般含  $CO_2$  较低。

测试分析表明,除了  $H_2O$ ,  $NaCl$  和  $CO_2$  等主成分外,金矿成矿流体还溶解有其他组分,主要有  $SiO_2$ ,  $KCl$ ,  $CaCl_2$  和  $Na(HCO_3)$  等,以及  $CH_4$ ,  $CO$  和  $N_2$  等气体组分,还含有  $He$ 、 $Ar$  等惰性气体,所以金矿成矿流体是一个以水为主,含有较多  $NaCl$  和  $CO_2$ ,以及不等量其他盐分和气体组分的复杂流体。然而就其主体而言,当属于  $H_2O-CO_2$  体系,或  $H_2O-NaCl-CO_2$  体系,其中  $NaCl$  和  $CO_2$  含量具有较大变化范围。Lu Huanzhang 等<sup>[1]</sup>曾总结了国外一些著名金矿成矿流体的基本特点,也发现多为  $H_2O-CO_2$  体系,盐度也很低,质量分数大多为 1%~5% ( $NaCl$ ),基本都小于 10% ( $NaCl$ )。与我国金矿成矿流体的特点相一致。

此外,流体包裹体研究还表明,金矿成矿流体的温压范围变化较大。如表 1 和图 3、图 4 所示,均一温度变化区间是 100~400℃,主峰位于 200~300℃ 之间。压力范围是 6~250 MPa,主要区间为 30~200 MPa。一般成矿流体  $CO_2$  含量越高,成矿压力也

收稿日期 2001-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49973001,49733120)

作者简介:胡文宣(1959—),男,博士,教授,岩石学、矿物学、矿床学专业,现从事流体作用与成矿研究。

越高(如小秦岭地区的金矿床比胶东地区的更富含  $\text{CO}_2$  包裹体, 前者的成矿压力达到 200 MPa, 后者的成矿压力一般小于 80 MPa)。

综合上述资料可以得知, 金矿成矿流体是富水  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$  体系, 其盐度、气体含量变化很大, 温度和压力也变化很大, 即便是在同一矿床中也是如此, 表明金矿成矿流体系统是一个复杂多变且极不稳定的系统。

表 1 我国一些重要金矿成矿的温压条件和成矿流体的盐度资料<sup>[2~17]</sup>

Table 1 The temperature, pressure and composition of the ore-forming fluids of several gold deposits in China				
矿床	成矿温度 $t/^{\circ}\text{C}$	成矿压力 $p/\text{MPa}$	盐度 $w(\text{NaCl})/\%$	资料来源
万古金矿	102 ~ 322	6 ~ 21	3.1 ~ 3.8	李红艳等, 1998
齐山	260 ~ 390	44 ~ 170	12 ~ 22.3	杨荣勇等, 1998
东天山西滩	137 ~ 200	28.7 ~ 32.6		杨建国等, 1998
小秦岭	157 ~ 380	80 ~ 200	1.6 ~ 13.0	徐九华等, 1997
胶东	145 ~ 400	< 80	1.7 ~ 13.2	
新洲	151 ~ 330	15 ~ 20	平均 16.7	姚德贤等, 1997
夹皮沟	245 ~ 292	95.4 ~ 131.7	12.8 ~ 16.33	孙晓明等, 1996
镇沅	190 ~ 250	54.9	8.5	
袁牢山	200 ~ 300	60 ~ 70.2	4.9 ~ 11.0	毕献武等, 1997
大坪	230 ~ 300	64.8 ~ 72.8	8.2 ~ 13.1	
哈图	177 ~ 362	30 ~ 100	0.4 ~ 7.7	范宏瑞, 1998
东天山康古尔	100 ~ 320		11.4 ~ 17	张连昌等, 1999
香炉碗子	180 ~ 360	35 ~ 50.5		李长顺等, 1997
小秦岭东闯	180 ~ 340	104 ~ 196	6 ~ 15	徐启东等, 1997
华北地 石英脉型	135 ~ 350	108 ~ 163	1.2 ~ 17.2	邵世才, 1997
台南缘 蚀变角砾岩型	140 ~ 260	50 ~ 90	12 ~ 13	
马超营断裂带	150 ~ 260	70 ~ 100	< 10	燕建设等, 1998
赛都	200 ~ 320	18.5 ~ 31.7	6.0 ~ 9.34	程忠高等, 1997
琼西戈枕	240 ~ 250	27 ~ 50	2.0 ~ 9.2	夏勇, 1996
祁雨沟	174 ~ 433			
黄金洞	300 ~ 400	100	5.8 ~ 9.5	陈衍景等, 1992

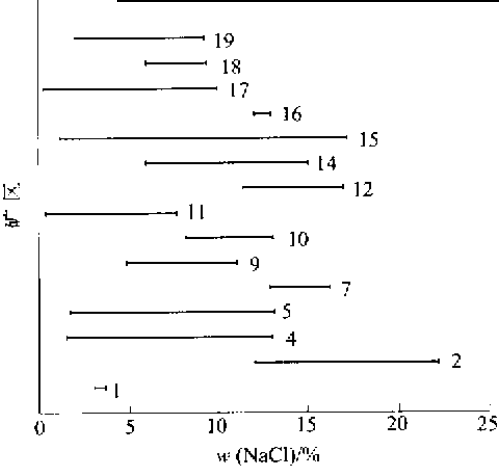


图 1 我国一些典型金矿成矿流体盐度

Fig.1 The salinities of the ore-forming fluids of several gold deposits in China

1—万古; 2—齐山; 3—东天山西滩; 4—小秦岭; 5—胶东; 6—新洲; 7—夹皮沟; 8—镇沅; 9—墨江; 10—大坪; 11—哈图; 12—东天山康古尔; 13—香炉碗子; 14—文峪-东闯; 15, 16—华北地台南缘; 17—马超营; 18—赛都; 19—琼西戈枕

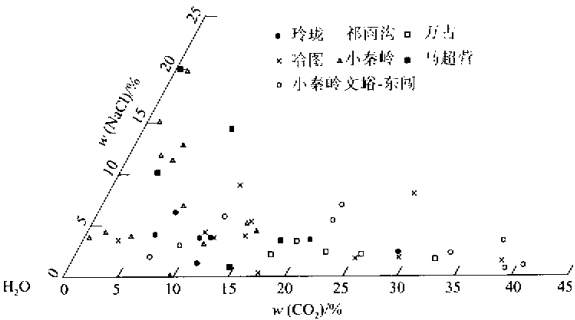


图 2 我国一些典型金矿成矿流体成分三角图

Fig.2 The compositions of the ore-forming fluids of several gold deposits in China

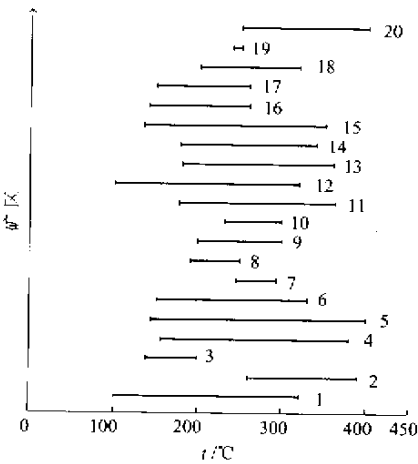


图3 我国一些典型金矿的成矿温度

Fig.3 The homogenization temperatures of fluid inclusions from several gold deposits in China  
图中数字 1~19 所代表矿区同图 1 20 为乳山金矿

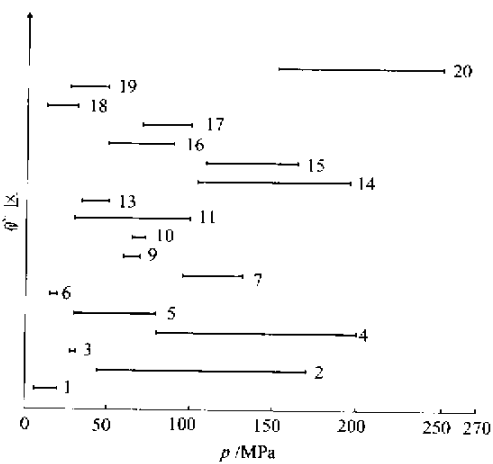


图4 我国一些主要金矿的成矿压力

Fig.4 The ore-forming pressures of several gold deposits in China  
图中数字 1~19 所代表矿区同图 1 20 为乳山金矿

2 深部流体的特点及其参与金成矿作用的依据

2.1 深部流体的特点

本文关于深部流体的概念是指主要来源于地幔的流体。其物质组成已有很多测试和讨论,一般认为其主要元素组成为碳、氢、氧、氮和硫(C-H-O-N-S)<sup>[18~24]</sup>。从理论上讲,这些元素可以合成许多种化合物(即通常意义上的组分),但在深部高温高压超临界状态下它们究竟以何种形式存在目前还不很清楚。也许在不同深度上具有不同的组合特点,是值得深入研究的问题。就现有对幔源岩石矿物中包裹体的实测结果来看,绝大多数气液包裹体的主要成分是CO和CO<sub>2</sub>,另含部分N<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>(表2)<sup>[19~24]</sup>,以及少量其他气体如惰性气体等。只有采自日本Ichinomegata的样品中H<sub>2</sub>O与CO<sub>2</sub>共存<sup>[19]</sup>,在一些中基性和中酸性火成岩挥发分及其包裹体中也可以测量到不等量的H<sub>2</sub>O,很可能是与岩石圈物质混合的结果,或者是地球浅层H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>和

CH<sub>4</sub>等通过板块俯冲进入地球内部再循环的产物<sup>[25~27]</sup>。现代火山气体观测也证实,与地幔相关的火山气体主要是CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和SO<sub>2</sub>等<sup>[27]</sup>。这都说明,深部流体是以CO<sub>2</sub>等气体组分为主的富气流体,与以H<sub>2</sub>O为主的金矿成矿流体有很大区别。

大量观测数据和理论分析表明,地球内部蕴涵着大量流体,并从未间断地向外释放着。有人估算,全球陆地火山每年放出的CO<sub>2</sub>约有800 Mt(即每天释放两百多万t),原始地球中CO<sub>2</sub>的72%(质量分数)、N<sub>2</sub>的12%(质量分数)仍存留在地幔中<sup>[28,29]</sup>,其中CO<sub>2</sub>的量高达(5.3~11.9)×10<sup>8</sup>亿t<sup>[27]</sup>。有人曾直接测定了美国圣·海伦斯火山1980年喷发期间的气体组分与含量,发现每天喷发出的CO<sub>2</sub>达500~15 000 t,H<sub>2</sub>S达150~34 000 t,SO<sub>2</sub>达500~3 400 t,数量是相当惊人的<sup>[27]</sup>。已有资料证实,深部流体活动还是地震等许多自然灾害的始作俑者<sup>[30,31]</sup>。这些资料都说明,地球内部流体的量是非常巨大的,这为其在地球浅部的成矿过程中发挥作用奠定了物质基础。此外,深部流体处于高温高压

表2 幔源包裹体气体化学组分<sup>[24]</sup>

Table 2 Chemical composition of inclusions in minerals in mantle rocks(%)

产地和岩性	测试矿物	含气量 ( $\mu\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$ )	还原性气体 $w_B\%$				$n(\text{N}_2)/\%$	氧化性气体 $w_B\%$	
			CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S <sup>[3]</sup>		O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
河北大麻	橄榄石	14	67.18	0.76	0.068	0.016	2.54	29.37	0.065
	斜方辉石	89	81.96	0.60	0.095	0.030	2.78	8.20	0.014
	单斜辉石	161	69.96	22.9	0.103	0.40	3.26	3.30	0.005
二辉橄榄岩)	黑色辉石岩	109	76.95	3.67	0.058	0.11	3.76	15.3	0.064
	橄榄岩	70	38.5	0.60	0.138	0.034	1.87	58.25	1.06
山东大方山 (二辉橄榄岩)	黑色辉石岩	389	8.08	0.412		0.045	2.25	41.39	46.49

超临界状态(大于  $\text{H}_2\text{O}$  的临界温度  $374^\circ\text{C}$ )温度几百至一千多摄氏度 压力几千至几万巴(1巴 =  $10^5\text{Pa}$ )因此蕴涵着巨大的能量 这也是它能够对浅部地质作用产生重要影响的主要因素 后文将作专门论述。

## 2.2 深部流体参与金成矿作用的依据

虽然深部流体与金成矿流体在物质组成上有所不同,但构造背景分析和地球化学(特别是同位素示踪)等方面的研究工作都表明,许多金矿的形成是在深部流体参与下完成的。前人已作了大量工作,笔者仅引述部分典型实例加以说明。(1)同位素地球化学证据:主要是应用稀有气体同位素示踪技术,揭示了一些金矿中深部流体活动和参与的痕迹。如毛景文等<sup>[32,33]</sup>根据氦-氩同位素测定等结果,分别论证了湖南万古金矿及河北东坪金矿成矿流体有地幔物质的参与;胡瑞忠等<sup>[34]</sup>根据矿物流体包裹体 He 和 Ar 同位素组成,认为哀牢山金矿带中部分金矿床成矿流体是浅部雨水与幔源流体两端员混合的结果,邵军<sup>[35]</sup>通过稳定同位素研究,认为吉林东南部一些金矿成矿物质、成矿热液主要来源于地幔,等等。(2)地质构造背景分析:主要根据金矿与深部构造之间的关系,间接分析深部流体对金矿成矿作用的影响。如边千韬<sup>[36]</sup>从壳幔结构尺度上讨论了云南老王寨金矿成矿背景,指出深部物质的参与非常重要;冯本智等<sup>[37]</sup>从深大断裂与金矿分布关系出发,认为深部流体是金矿成矿流体的重要来源。更多的学者从构造、流体、岩浆作用、成矿系统和动力学机制等多方面综合讨论了金矿形成与深部流体作用之间的关系<sup>[38~42]</sup>。(3)岩石学等方面的证据:在越来越多的金矿中发现有幔源超基性脉岩伴生,间接表明了金矿与幔源物质的内在联系。如胶东许多金矿中发育多期煌斑岩脉<sup>[43,44]</sup>,云南老王寨金矿中也发育煌斑岩<sup>[45]</sup>。胡受奚等<sup>[44]</sup>曾对金矿与超基性脉岩的关系进行了总结和讨论。

此外,国外也有一些金矿被认为与深部流体有关,如澳大利亚 Yilgarn 地块太古宙金矿、奥林匹克坝 Au-U-REE 矿床<sup>[46]</sup>、加拿大 Central Superior 省金矿<sup>[47]</sup>等等。因此,深部流体参与金矿成矿作用已经成为被广泛接受的客观事实。

## 3 深部流体与浅部流体作用机制

### 3.1 深部流体对浅部的能量效应

前人关于深部流体对浅部成矿流体的影响的研

究主要集中在物质传输方面。但深部流体的作用不仅仅体现在物质效应上,实际上它所携带上来的巨大能量往往比物质影响更为重要,因为在很多情况下,深部流体并不能直接带来成矿物质,而是通过向浅部输入强大的热能,使浅部流体具有很强的溶解和携带金属元素的能力而逐渐演化为成矿流体。

为了确定深部流体的能量效应,笔者应用 Duan 等<sup>[48~50]</sup>建立的超临界流体( $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{N}_2$ 体系)状态方程,求解计算了一元和多元流体的热焓随深度的变化规律,关于理论求解方法笔者和其他学者等都曾著文介绍<sup>[51~53]</sup>。结果表明, $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和  $\text{N}_2$ 的摩尔热焓都随着深度的增加而增加,地表附近的相对摩尔热焓在零附近,深部高达几十至上百 kJ。以  $\text{CO}_2$  体系为例(图 5),在浅部几 km 以

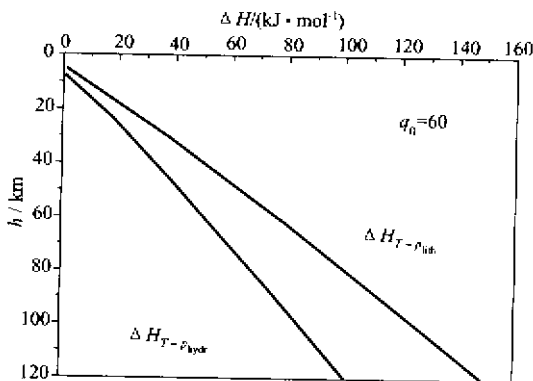


图 5  $\text{CO}_2$  摩尔热焓与深度的关系

Fig. 5 Mole enthalpy vs. depth for the system  $\text{CO}_2$   
中等地温场背景中

内, $\text{CO}_2$ 相对摩尔热焓( $\Delta H$ )很低,为负值,但随着深度加深,其相对摩尔热焓迅速增加,20 km 深度上, $\Delta H$ 为 15~20 kJ/mol,50 km 时为 40~60 kJ/mol,在 120 km 深度上  $\Delta H$  约达 150 kJ/mol(静岩压力条件下)。也就是说,当 1mol  $\text{CO}_2$  从 120 km 深度上升到地壳浅部时,就要释放出约 150 kJ 的热量,约相当于 35 kcal(1cal = 4.1868 J)。1mol  $\text{CO}_2$  的质量为 44 g,则每克  $\text{CO}_2$  释放的热量约为 0.8 kcal。设其释放出的热量全部传给了浅部温度较低的水体,根据水的比热 1cal/( $^\circ\text{C}\cdot\text{g}$ ) 每 g 水升高  $1^\circ\text{C}$  需要吸收 1 cal 热量),那么 1 g  $\text{CO}_2$  携带的 800 cal 的热量将使 1 g 水升高  $800^\circ\text{C}$  或者使 800 g 水升高  $1^\circ\text{C}$ 。若以圣·海伦斯火山每天平均喷发出 10 000 t 气体估算(包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{SO}_2$ ),各种气体综合释放的热量可将约 1 万 t 水升高  $1^\circ\text{C}$  或者使 100 t 水升高  $100^\circ\text{C}$ 。显然,对于成矿流体的形成来讲,深部流体参与所产生

的热效应是相当重要的。

### 3.2 浅部流体向深部的渗透循环

前文已提到, 金矿成矿流体是以  $H_2O$  为主的流体, 而深部流体则是以  $CO_2$  等气体组分为为主的流体, 那么金矿成矿流体中的水是从何处来的呢? 前人提供了一个与板块俯冲有关的机制, 即俯冲板块到达深部后“脱水”, 富水流体上升而形成成矿流体。但是这种机制不能解释所有矿床, 特别是与板块俯冲作用关系不明显的金矿, 如一些深大断裂控制的矿床。笔者认为, 在很多情况下, 成矿热液中的水大都是地壳浅部水体, 或者说是地下水渗透到地壳深部去的。这里不准备列举前人的大量同位素资料进行佐证, 将试图从动力学机制上加以讨论。

在地下岩层或岩石中, 只要有孔隙存在, 特别是断裂带附近的相互连通的裂隙, 就必然被流体所充填, 不管流体来自于深部还是浅部, 因此, 整个地壳乃至整个岩石圈中, 到处都有流体活动的场所。问题的关键是, 浅部以水为主的流体能够下渗到地壳深部吗? 为了从理论上回答这一问题, 笔者应用前述流体状态方程, 计算了以水为主的流体在地下不同深度上的密度, 得出了它在地下较大尺度纵向剖面上的密度变化曲线(图6)。

从图6A中可以看出, 纯  $H_2O$  体系的密度具有上大下小的特点: 在地表附近最大, 然后随深度增加而急剧降低, 在 15 ~ 25 km 附近密度变化减缓。在静岩压力条件下, 15 km 以下深度范围内流体的密度基本保持不变, 到达 70 km 附近, 随着压力的增加, 流体密度又有变大趋势。流体的运动(对流、循环)在很多情况下是受其密度控制的(温压条件的具

体表现是导致流体密度发生变化) 纯水流体密度这种上大下小的变化特点, 必然导致富水流体由浅部向深部渗透循环, 至于渗透的速度和规模, 则取决于岩石渗透率等边界条件。单从密度变化规律来看, 对流最为显著的部位应发生在 0 ~ 15 ~ 25 km 范围内(即密度变化最大的区段)。而在更深深度上, 由于密度差变小, 渗透对流受到限制, 甚至在更深部位完全不能对流。

对于溶解有部分  $CO_2$  等气体的流体, 与纯水最大的差别在于其最大密度不是出现在地表附近, 而是在地下 5 ~ 10 km 附近(图6B), 自上而下形成由小变大, 再由大变小的密度变化规律。其密度变化最大的区段与纯水体系基本相同, 也大致在 15 ~ 25 km 区间。这种情况下较浅部的含  $CO_2$  地下水同样可以下渗对流。还需指出得是, 在相对开放的断裂输导体系中, 压力变化趋向于静水压力, 这时对流可以达到较深部位, 至少可达二三十 km 或更深。而在相对封闭的条件下, 对流深度则相对较小。

从以上理论计算分析可知, 地壳浅部以水为主的流体是完全可以渗透到地壳十几至几十 km 深处的, 特别是在长期活动的深大断裂带附近。这就为在地壳深处形成富水的热流体提供的足够的水源。

### 3.3 深-浅部流体相互作用与金矿成矿流体的形成

根据前面的讨论, 可以得出这样的认识: 即在地壳和岩石圈这个尺度上, 浅部富水流体向下渗透, 深部富气流体向上释放, 两者将会在地表十几至几十 km 的部位交汇, 发生能量交换和物质混合, 并引发各种化学反应, 最终使这一深度范围成为富含流体区, 甚至形成所谓的“流体库”。绝大多数矿床成矿

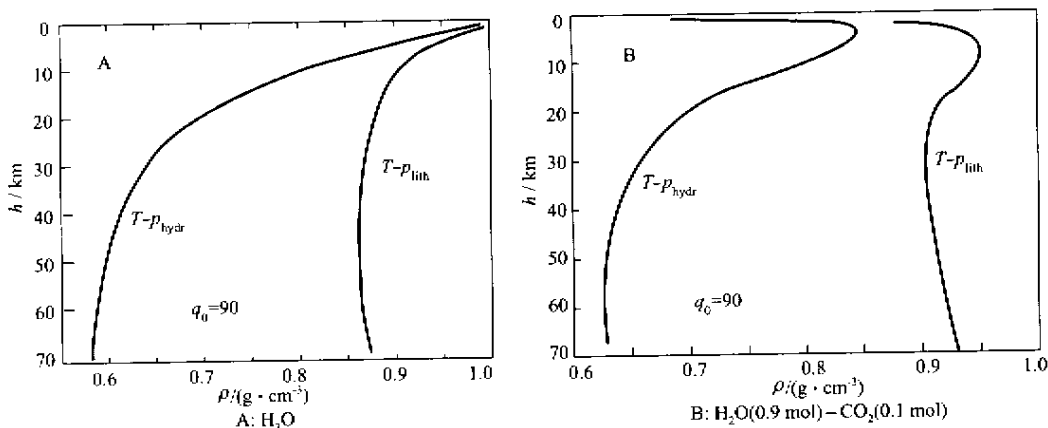


图6  $H_2O$  和含  $CO_2$  的  $H_2O$  体系的密度随深度的变化  
Fig.6 Density vs depth for the systems  $H_2O$  and  $H_2O(0.9)-CO_2(0.1)$   
条件是中等地温梯度 ( $q_0 = 90$ )  $p_{hydr}$  为静水压力,  $p_{lith}$  为静岩压力

流体的氢氧同位素具有深源与浅部地下水混合特点 就是这一作用的良好注解。此外 近年来地球物理工作所发现的大量“ 低速带 ”也正是出现在这一深度范围( 表 3 ),可能也是深—浅部流体在这一深度上相互交汇和作用的结果。

表 3 中国东部一些地区地壳内低速带的分布深度及其地球物理参数<sup>[54~56]</sup>

Table 3 Distribution of the low velocity zones in the Earth crust, East China, with some geophysical data

地 区	分布深度 <i>h</i> /km	低速层厚度 <i>h</i> /km	地震波速 <i>v<sub>p</sub></i> /(km·s <sup>-1</sup> )	资料来源
东南沿海	10~20	3~8	5.13~6.03	转引自裴荣富等,1999;冯开义等,1999
华南地区	扬子板块	15~25	1~7	
	华夏板块	12~20	3~10	
东北地区	10~30	3~10	6.1~6.6	转引自彭聪,1999

综前所述 笔者认为深—浅部流体相互作用是金矿成矿流体形成的重要机制。如果仅有浅部富水流体的下渗对流而无深部流体的加入 则不可能达到较高的温度 也缺乏 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>S 等有利于成矿元素溶解和富集的酸性组分。另一方面 如果只有深部富气流体的释放而无较多浅部流体的下渗交汇 则缺乏 H<sub>2</sub>O 这一容纳和运载成矿物质的载体。正是在特定的地质条件下 深部流体与浅部流体的相互配合与相互作用 才于地下较深部位( 10~30 km )形成了金矿成矿流体 然后在构造运动等条件的相互配合下上升到浅部沉淀成矿。因此 这种深部流体和浅部流体在地壳深处交汇 混合并相互作用的机制 应是金矿成矿流体形成的一种重要模式。

参考文献：

[ 1 ] LU Huan-zhang, CHI Guo-xiang. Geochemical characteristics of ore forming fluids in shear zone hosted archaean gold deposit[ J]. 地学前缘, 1996, 3( 3-4 ): 19-38.

[ 2 ] 李红艳, 毛景文. 湖南万古金矿成矿流体地球化学[ J]. 矿床地质, 1998, 17( 增刊 ): 773-778.

[ 3 ] 杨荣勇, 李兆麟, 毛艳华, 等. 新疆乔尔山金矿成矿流体地质作用特征[ J]. 矿床地质, 1998, 17( 增刊 ): 1023-1026.

[ 4 ] 杨建国, 姬金生, 卢登蓉. 东天山西滩金矿床地质特征与成矿条件[ J]. 矿床地质, 1998, 17( 增刊 ): 349-352.

[ 5 ] 徐九华, 谢玉玲, 申世亮. 小秦岭与胶东金矿床的成矿流体特征对比[ J]. 矿床地质, 1997, 16( 2 ): 151-162.

[ 6 ] 姚德贤, 曹建劲. 广东新洲金矿床地质特征和成矿流体类型[ J]. 矿床地质, 1997, 16( 3 ): 254-259.

[ 7 ] 孙晓明, 徐克勤, 任启江, 等. 夹皮沟金矿带韧性剪切变形中的水岩反应及物质组分变化规律[ J]. 矿床地质, 1996, 15

( 4 ) 308-316.

[ 8 ] 毕献武, 胡瑞忠, 何明友. 袁牢山金矿带主要金矿成矿流体特征[ J]. 矿物学报, 1997, 17( 4 ): 435-441.

[ 9 ] 范宏瑞. 新疆哈图金矿成矿流体地球化学[ J]. 矿床地质, 1998, 17( 2 ): 151-162.

[ 10 ] 张连昌, 姬金生, 曾章仁. 东天山康古尔金矿床成矿流体地球化学特征及其来源[ J]. 地球化学, 1999, 28( 1 ): 18-25.

[ 11 ] 李长顺, 姚汝江. 吉林省香炉碗子金矿床矿化特征及成因机理探讨[ J]. 吉林地质, 1997, 16( 1 ): 24-32.

[ 12 ] 徐启东, 钟增球, 周汉文, 等. 小秦岭东沟金矿区花岗岩浆活动的性质[ J]. 黄金地质, 1997, 3: 21-28.

[ 13 ] 邵世才. 华北地台南缘金矿床的成因和成矿模式[ J]. 华北地质矿产杂志, 1997, 12( 4 ): 358-363.

[ 14 ] 燕建设, 王铭生, 星玉才, 等. 马超营断裂带金矿包体及氢氧同位素研究[ J]. 河南地质, 1998, 16( 1 ): 15-20.

[ 15 ] 程忠高, 芮行健. 赛都金矿成矿地球化学环境[ J]. 火山地质与矿产, 1997, 18: 27-36.

[ 16 ] 夏勇. 琼西戈枕剪切带中成矿流体演化与金成矿[ J]. 大地构造与成矿学, 1996, 20( 3 ): 220-228.

[ 17 ] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[ M]. 北京: 地震出版社, 1992.

[ 18 ] 杜乐天. 地壳流体与地幔流体间的关系[ J]. 地学前缘, 1996, 3( 3-4 ): 172-180.

[ 19 ] 曹荣龙. 地幔流体的前缘研究[ J]. 地学前缘, 1996, 3( 3-4 ): 161-171.

[ 20 ] 路凤香. 深部地幔与深部流体[ J]. 地学前缘, 1996, 3( 3-4 ): 181-186.

[ 21 ] 路凤香. 大陆地幔研究现状[ J]. 地学前缘, 1994, 1( 1-2 ): 70-78.

[ 22 ] 夏林圻. 我国六合、张家口碱性玄武岩内橄榄岩包体中的高密度二氧化碳流体包裹体[ J]. 矿物学报, 1984, 2: 133-141.

[ 23 ] 夏林圻, 曹荣龙. 上地幔流体( 及熔体 ) 性质的确定[ J]. 科学通报, 1990, 35( 11 ): 848-850.

[ 24 ] 王先彬, 刘刚, 陈践发, 等. 地球内部流体研究的若干关键问题[ J]. 地学前缘, 1996, 3( 3-4 ): 105-118.

[ 25 ] FIFE W S, PRICE N T, THOMPSON A B. *Fluids in the Earth's Crust*[ A ]. Amsterdam: Elsevier, 1978.

[ 26 ] 孙丰月, 石准立, 冯本智. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成矿[ M ]. 长春: 吉林出版社, 1995.

[ 27 ] 郑乐平. 非烃类气体( CO<sub>2</sub>, He ) 生成运移聚集的综合模型——以济阳坳陷 CO<sub>2</sub> 气藏为例[ D ]. 南京: 南京大学, 1996.

[ 28 ] GERLACH T M. Present-day CO<sub>2</sub> emissions from volcanoes[ J ]. *EOS*, 1991, 72( 23 ): 249-255.

[ 29 ] ZHANG Y, ZINDLER A. Distribution and evolution of carbon and nitrogen in earth[ J ]. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 117: 331-345.

[ 30 ] 强祖基, 杜乐天. 地球排气与森林火灾和地震活动[ J ]. 地学前缘, 2001, 8( 2 ): 235-245.

[ 31 ] 杜乐天, 强祖基. 地球排气作用与自然灾害. 流体地球科学进展[ M ]. 北京: 地震出版社, 1999.

[ 32 ] 毛景文, 李红艳, 徐钰, 等. 湖南万古地区金矿地质与成因[ M ]. 北京: 原子能出版社, 1997. 49-101.

- [ 33 ] 毛景文, 李荫清. 河北省东坪碛化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系[ J ]. 矿床地质, 2000, 20( 1 ): 23-36.
- [ 34 ] 胡瑞忠, 毕献武, TURNER G. 等. 袁牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[ J ]. 中国科学( D 辑 ), 1999, 29( 4 ): 321-330.
- [ 35 ] 邵军. 地幔流体及其金的成矿作用——兼论夹皮沟金矿田的地幔流体与成矿[ J ]. 贵金属地质, 1999, 8( 2 ): 115-118.
- [ 36 ] 边千韬. 地球壳幔结构构造与老王寨超大型金矿形成关系探索[ J ]. 中国科学( D 辑 ), 1998, 28( 4 ): 303-309.
- [ 37 ] 冯本智, 曾庆栋. 吉林海沟幔源流体金矿床的成矿条件[ J ]. 矿床地质, 1998, 17( 增刊 ): 969-972.
- [ 38 ] 孙忠实, 邓军, 翟裕生. 等. 幔源含金流体主动就位与容矿断裂形成机制[ J ]. 地质地球化学, 1999, 27( 4 ): 17-22.
- [ 39 ] 孙忠实, 邓军, 翟裕生. 等. 大型金矿构造-成矿系统及幔源多层循环体成因模式——以吉林夹皮沟金矿为例[ J ]. 地质科学, 2000, 35( 3 ): 267-276.
- [ 40 ] 邓军, 翟裕生, 杨立强. 等. 构造演化与成矿系统动力学——以胶东金矿集中区为例[ J ]. 地学前缘, 1999, 6( 2 ): 315-323.
- [ 41 ] 邓军, 杨立强, 翟裕生. 等. 构造-流体-成矿系统及其动力学的理论格架与方法体系[ J ]. 地球科学, 2000, 25( 1 ): 71-78.
- [ 42 ] 丁振举, 姚书振, 方金云. 地幔流体及其成矿作用[ J ]. 地质科技情报, 1997, 16( 1 ): 72-76.
- [ 43 ] 季海章, 赵懿英, 卢冰. 等. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探[ J ]. 地质与勘探, 1992( 2 ): 15-16.
- [ 44 ] 胡受奚, 王鹤年, 王德滋. 等. 中国东部金矿地质学及地球化学[ M ]. 北京: 科学出版社, 1998. 89-104.
- [ 45 ] 黄智龙, 肖化云. 云南老王寨金矿煌斑岩中 CO<sub>2</sub> 的来源[ J ]. 矿床地质, 1998, 17( 增刊 ): 1075-1078.
- [ 46 ] GROVES D I. The crustal continuum model for late-Archaean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia[ J ]. *Mineralium Deposita*, 1993, 28: 366-37.
- [ 47 ] LECLAIR A D. Crustal-scale auriferous shear zones in the central Superior province[ J ]. *Canada Geology*, 1993, 21: 399-402.
- [ 48 ] DUAN, Z H, MOLLER N, WEARE J H. An equation of state for the CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system: pure systems from 0 to 1 000°C and 0 to 8 000 bar[ J ]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992a, 56: 2605-2617.
- [ 49 ] DUAN Z H, MOLLER N, WEARE J H. An equation of state for the CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system: mixtures from 50 to 1 000°C and 0 to 1 000 bar[ J ]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992b, 56: 2619-2631.
- [ 50 ] DUAN Z H, MOLLER N, WEARE J H. A general equation of state for supercritical fluid mixtures and molecular dynamics simulation of mixture pVTx properties[ J ]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 1209-1216.
- [ 51 ] HU Wenxuan, DUAN Zhenhao, REN Qijiang. Computer modeling and simulation of geofluids: a general review and sample description[ J ]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1997, 16( 3 ): 240-247.
- [ 52 ] 孙睿, 胡文宣, 段振豪. 超临界流体热力学函数的理论计算评[ J ]. 地质论评, 2000, 16( 2 ): 167-177.
- [ 53 ] 张哲儒. 流体的热力学前缘研究[ J ]. 地学前缘, 1996, 3( 3-4 ): 80-88.
- [ 54 ] 裴荣富, 彭聪, 熊群尧. 华南金属成矿省深部构造过程与超巨量金属堆积[ A ]. 裴荣富等. 深部构造作用与成矿[ M ]. 北京: 地质出版社, 1999. 1-13.
- [ 55 ] 马开义, 姜枚, 薛光琦. 等. 华南深部构造与内生成矿分带[ A ]. 裴荣富等. 深部构造作用与成矿[ M ]. 北京: 地质出版社, 1999. 28-35.
- [ 56 ] 彭聪, 高锐. 中国大陆及临近海域岩石圈根部不均匀性结构横向变化[ A ]. 裴荣富等. 深部构造作用与成矿[ M ]. 北京: 地质出版社, 1999. 19-27.

## CHARACTERISTICS OF GOLD ORE-FORMING FLUIDS AND METALLOGENIC PROCESS BY MUTUAL MIXING AND ACTING OF DEEP-DERIVED FLUIDS AND SHALLOW-SEEPED ONES

HU Wen-xuan, SUN Rui, ZHANG Wen-lan, SUN Guo-xi

( Department of Earth Sciences, State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China )

**Abstract:** Based on the data taken from the typical gold deposits in China and literatures about deeply-derived fluids, analysis and comparison are carried out on the characteristics of and relationship between the gold ore-forming fluids and deeply-derived ones. By using the equation of state for geofluids, the enthalpy and densities of the systems of H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> are calculated. The enthalpy results show that the deeply-derived fluids contain substantial energy, which could largely provide heat to the shallowly-seated fluids, as well as some useful materials for metal enrichment.

And the density profiles illustrate that the densities of  $H_2O$ -rich fluids at shallow depth are relatively heavier than that at deeper depths, which could make the  $H_2O$ -rich fluids seep down to relatively deep depths of about 15 ~ 30 km. Therefore, the water-rich fluids seeped down from shallow and the gas-rich fluids derived from deep could meet and get mixed each other at that depths, resulting in various physico-chemical and geochemical processes, and even leading to ore-forming fluids under favorable conditions, which is believed to be a very important metallogenic mechanism for the gold deposits.

**Key words:** gold ore-forming fluids; deeply-derived fluids; shallowly-seated fluids; mutual mixing and acting; metallogenic mechanism

## 《地学前缘》投稿期预告

本刊为主题期刊, 10 个主题 5 年一轮回, 每个主题内容具有基础性、交叉渗透性和大跨度性。此外, 每期设“非主题来稿选登”栏目, 欢迎投稿。现预告近年投稿内容:

- (1) 全球变化主题”投稿截止期为 2001 年 10 月底 2002 年 3 月、4 月连出两期。
- (2) 地球历史的演化主题”投稿截止期为 2002 年 4 月底 2002 年 9 月、10 月连出两期。
- (3) 地质技术与方法主题”投稿截止期为 2002 年 10 月底 2003 年 3 月、4 月连出两期。
- (4) 岩石学主题”投稿截止期为 2003 年 4 月底 2003 年 9 月、10 月连出两期。

## Announcement of *Earth Science Frontiers*

Contributions to *Earth Science Frontiers* are welcome:

- (1) The deadline for submitting manuscript to the special issue on “Global changes”: The end of October 2001.
- (2) The deadline for submitting manuscript to the special issue on “Evolution in Earth's history”: The end of April 2002.
- (3) The deadline for submitting manuscript to the special issue on “Techniques and methods of geology”: The end of October 2002.
- (4) The deadline for submitting manuscript to the special issue on “Petrology”: The end of April 2003.