深部流体携带金属进入地壳的地质调查和实验*

Investigations of Influx of Deep Fluids Carring Metal to Earth Cust and Its Experiments Study

张荣华 胡书敏 王 军 张雪彤

（地球化学动力学开放研究实验室，中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037）

Zhang Ronghua, Hu Shumin, Wang Jiun and Zhang Xuetong

(Open Research Lab. of Geochemical Kinetics, Chinese Academy of Geological Sciences, Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China)

摘 要 地球深部物质，尤其地幔物质能否被气体携带迁移到地壳？通过高温高压流体相分离实验研究含 Au 的 $NaHCO_3$-NaCl-H_2O 流体得到证明。实验发现 Au 可以在高温高压气体内迁移。我国一些地区的地质地球物理调查获得深部气体搬运金属不少事实，可从这一实验得到说明。

关键词 气体搬运金属 金 相分离实验 地球深部物质

华北地区的深部地球物理探测获得了岩石圈内高导层抬升范围。它的分布与岩石圈热流体探测所获得的高热流值抬升范围吻合。同时，在这个地区有大量石油和气藏。这个地区油气产于第三系断陷盆地。在盆地边缘多为 CO_2 气藏。CO_2 气藏区内大范围出现碱性橄榄玄武岩。在这类火山岩内含 Au 很高。在同一地区，地表 (土壤、表层气体) 化探发现大规模的金矿化异常区。并且，该区亦有大型金矿出现。

深部热流异常和高导层抬升地区与该地区的油田、CO_2 气藏、含 Au 火山岩分布区和地表 Au 化探异常区吻合。这一事实证明现代岩石圈深部热流活动，并继续有含 Au 的流体持续不断地进入上部地壳，甚至以气体形式把 Au 带到地表。气体化探工作认为：深部流体（Earth gas）可携带金属到地表。

1 大陆边缘内热异常

深部地球物理方法对中国华北地区、河北、山东等的调查发现：在华北平原和勃海湾地区的现代地幔的高导层低速层抬升在 70 km 深处。同时，对大陆热流的调查也发现这一地区的高热流值抬升。

2 石油与气田区的地球化学

这个深处存在的高导层位置，在地表面投影位置，正好与勃海及邻区的石油区、气田区、金矿区和金的异常区吻合。在油田与气区内分布了中新生代火山岩玄武岩，玄武岩是含油地层内一个单元，如济阳盆地。油田区的气田有 2 种：一种含 CH_4 为主；另一种以 CO_2 为主。第一类气田在凹陷盆地中心，第二类气田分布于盆地边缘。

* 本项目得到科技部 2001DEA30041；2001DEA20023；G 1999043212； 国土资源部项目 9501115，20010302；地调局项目 200010200172；自然科学基金项目（40043011）；地质行业基金（HY979827）资助

第一作者简介 张荣华，男，1938 年生，研究员，博导，地球化学动力学开放开放实验室主任，长期从事极端条件下物质实验研究工作。

富 CO_2 气藏区的火山岩：

济阳盆地是勃海湾盆地的一部分，是第三系断陷盆地。东侧为郯庐大断裂。盆地内有石英拉斑玄武岩、橄榄拉斑玄武岩、碱性橄榄玄武岩和苦橄玄武岩。分别为中生代早白垩纪、第三纪盆地凹陷之早期橄榄玄武岩和晚期内碱性橄榄玄武岩，晚第三纪为苦橄岩。火山岩内普遍含 Au：二氧化碳气藏区的玄武岩有 Au 0.35 g/t (9 个样品平均值)，非二氧化碳气藏区含 Au 平均 0.0025 g/t。产于盆地边缘 CO_2 气藏区的火山岩多为碱性橄榄玄武岩，与非 CO_2 气藏区火山岩相比含轻稀土和大半径离子元素更高。这种富集 CO_2 的流体，同时富含轻稀土元素和大离子半径元素是一种富集地幔流体。这类火山岩多为碱性橄榄玄武岩，该火山岩的辉石内流体包体成分为 $w(CO_2)$可达 60%，w (CH_4)为 5.5%～11.7%。辉石内流体包体的碳同位素 $\delta^{13}C$ 为 -5‰，而非二氧化碳气田多为橄榄拉斑玄武岩，火山岩内辉石的流体包体 $\delta^{13}C$ 为-10‰。事实证明现在油田和气藏区的 CO_2 来自地幔。因为气井内的 CO_2 的 $\delta^{13}C$（表 1）与火山岩内辉石的流体包体的 $\delta^{13}C$ 是一致的(赫英，2001)。

表 1 火山岩辉石流体包体和同区气井 CO_2 的 $\delta^{13}C_{CO2}$ 对比表

	火山岩辉石流体包体 $\delta^{13}C_{CO2}$ / ‰	同区气井 $\delta^{13}C_{CO2}$ / ‰
AO (碱性橄榄玄武岩)	-4.8～5.5	-4.36～4.41
QT (石英拉斑玄武岩)	-10.2～14.6	-10～13

注：据赫英

玄武岩源的深度估计为 70～100 km。总之，油田盆地边缘以 CO_2 气田为主。油田盆地边缘的玄武岩含 Au 高，并且石油里也含 Au。必须指出深源碱性玄武岩、富 CO_2 气田与 Au 的出现三者一致性，这是一个科学问题？

3 金矿区与气体的地球化学调查

许多地质工作者认为金矿是深部物质来源 (吕古贤，1999)。

在这个地区的大面积地表土壤-气体取样分析，发现大面积金异常分布区。探查地气的工作方法是在土壤 2 m 深处，抽气，收集气体样品，密封进行气体化学分析。探查结果发现气体含 Au，同时，也含有 He 气体等。第四纪土壤内气体为什么会含有 Au？

地气概念是 1984 年由瑞典人 K. Kristiansson 和 L. Malmgivst 首先提出的。我国科学家又有了很大发展(谢学锦等，1999)。他们认为地球气可以迁移金属。

还有一种是元素活动态 (MOMEO) 或活动金属离子方法 (MMI)。用这些方法可探测在矿床上方的、成矿之后的土层或岩石盖层。调查发现有不少的成矿元素由深处向上运动渗入 (扩散，毛细作用，还有气体搬运) 到成矿后的地层或土壤中去 (可用一种特殊的试剂浸取它们)。实际调查表明：在勃海湾盆地范围的 Au 异常 (MOMEG) 和油田 CO_2 气藏，与深部的地球物理探测揭示的高导层抬升和热流抬升区几乎是对应吻合的。

4 超临界流体与岩石反应实验

地球深部气体 (高温高压气体) 能否携带金属从地球的深部迁移进入地壳？微小细粒的金 (纳米级金属物质) 是否可由气体携带从地球的深部迁移进入地壳？卡林型金矿是如何形成的？锡钨锌等重金属能否进入气相？这里，提出一个关于气体迁移金属的重要科学问题。深穿透的地球化学勘察提出了地球气携带金属的看法。这些都需要用实验方法去证明。近来，国际地学界在研究超临界流体和它的减压相分离，已发现有些金属可以出现在水的蒸气相内。

作者所在的地球化学动力学开放实验室，几年来，一直研究超临界流体与地球深部岩石的反应，超临界流体减压时相分离变化。作者曾用地球化学动力学开放实验室的专利技术，使用多道超临界流体反应器实验研究超临界态水与变质岩反应。考察在 400℃、101.325×300 kPa 条件下的水岩反应，然后研究在 150℃下发生气/液相分离。这一反应器具有相分离装置。对蒸气相和液体相的反应产物分别收集，进行分析。结果发现：反应后，在水的气相内含有许多金属元素。其中，硅、镁、钠、砷在水的蒸气相含量比在液体内的含量还要高 (Zhang & Hu, 2000； Zhang et al., 2000)。

气体迁移金属的实验：最近，为了研究金在气相内存在的可能性，作者自己设计和组装了新型超临界流体相分离器，这也是一多道流动反应装置。在超过水的临界温度 374℃和临界压力 101.325×220 kPa 的条件下，在主反应釜进行反应。然后，相分离器可以实现高温高压的气相与液相分离，可以在相同温度压力下让气相与液相以近似相同流速分别地流出，经过冷却器。然后，收集两种流体样品（Zhang and Hu, 2002）（图 1）。

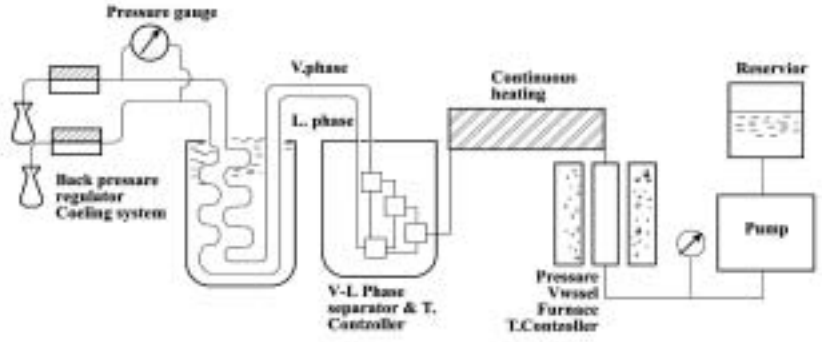


图 1　超临界流体相分离装置

实验步骤：为了模拟一种自然界的低盐度含 CO_2 的含金流体，实验室制备了含 Au 2×10^{-6} 的 0.1 mol $NaHCO_3$ 的 HCl-H_2O 溶液，pH 近似为 3。在 350 ℃和 101.325×220 kPa 下，这一溶液输入有锆衬的反应釜 (含钛接口)，通过不锈钢管道。在恒压下调节这一含 Au 溶液的温度，在 220～300℃范围内的几个温度下进行相分离实验，研究不同温度下的相分离产物。

实验结果：预计含 Au 的 $NaHCO_3$-HCl-H_2O 溶液在上述 220～300℃温度下要出现液与气（L-V）两相，一个富 CO_2 的蒸气相 V 和贫 CO_2 的液相 L。一系列实验样品分析表明：气相样品的 HCO_3 含量高于它在液相内的含量。实验确实出现一个富 CO_2 的蒸气相和贫 CO_2 的液相。

由于酸性溶液对部分管道的腐蚀，输出溶液含铁。铁的含量为 0.5×10^{-6}～1×10^{-6}，铁在液相内的含量远大于其在气相内的含量。两者的含量比为 4～8。表明铁主要溶在液相内。

相反，金在气相内的含量与它在液相内的含量之比为 0.8～1.5。实验表明；在 220～290 ℃相分离时，金可以同时出现在气相与液相内。在 250～270 ℃相分离时，有时金在气相样品内含量还高于它在液相内的含量 (图 2)。

对管道的腐蚀虽不是好事，但是，证明铁与金在气相与液相分离时的性质不同。

高温高压流体相分离为液相和气相时，金属在 L-V 内分布的初步实验证明：金是可以出现在高温高压的含 CO_2 的气体内（或 HCO_3^- 的气体内）。证明气相可以携带金是一重要进展 (Zhang, Hu, 2002)，对于认识地球深部物质进入地壳的形式都有科学意义。

5　讨　论

上地幔的热异常，可能是代表深部热流，它对华北地区的中新生代的大规模石油、汽田和金属矿化分

布有重大影响。深部热流抬升是第三纪以来长期活动的、现代仍在活动的热柱引起的。这个热流活动 (热柱)，从第三纪以来一直影响着这一地区地壳和地表资源、环境变化，还会影响地球深部气体持续地向上渗出活动。为此，造成现代土壤内气体含 Au 和发现巨大的金的异常区。

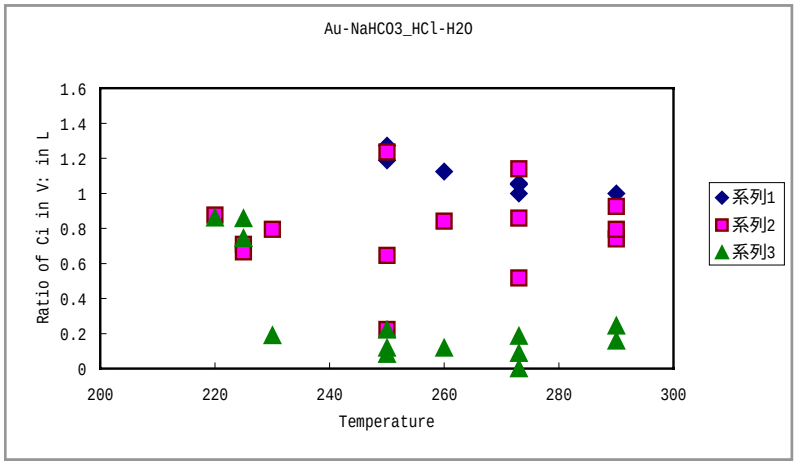


图 2 HCO_3^- Au 和 Fe 在气与液两相内比值。在 Au- $NaHCO_3^-$-NaC-HCl-H_2O 流体的气与液两相分离后，在气与液两相内分布

◆—$HCO3_3^-$在气相内与液相内的比值；■—金；▲—铁

合理的解释是：①元油气田内和玄武岩内的 Au 和第四纪土壤内气体含 Au 都是一个根源，都与深部的热流活动有关。② 油气田含 Au，不一定是含 CO_2 流体与地壳的含 Au 岩石相互作用的产物。可能是深部 CO_2 气体携带 Au 到地壳。因为，火山岩矿物包体的 CO_2 的碳同位素 $\delta^{13}C$ 与气田的井中气体的 $\delta^{13}C$ 一致。

实验研究工作已经证实了金在含 CO_2 气体或者含 HCO_3 气体内存在。超临界流体在减压时出现气相与液相的分离过程。气体内可能存在有金属，气可以迁移金属。超临界流体与变质岩的反应实验证明：超临界流体的反应的水蒸气相分离物内有许多金属。

含矿流体高含 CO_2 是许多金属矿体的一种重要特征，如卡林型 Au 矿。地球深处的高压下的含 CO_2 溶液多是一超临界流体。深部的超临界流体和它的气相分离物都可能溶解、可携带金属迁移到地表。

小结：气田、油田含金和地球气含 Au (化探方法) 都是深部物质可能进入地表的事实。可以得出结论：可能有一种新的深部物质迁移进入地表的方式。除了① 岩浆侵入、火山喷发；② 热流直接喷出到地表的热水活动；③ 冷侵入 (深部岩石圈物质由于构造运动、折返、被推到地表) 之外，这应当是一种更普遍的形式，即第四种形式，地球深部物质以流体或者气体形式释放、进入地表，而且，气体可以直接携带金属进入地表。

参 考 文 献

赫 英, 廖永胜. 2001. 胜利油田高 CO_2 含金流体及有关成因问题[J]. 地质论评, 47(5)：500～507.

吕古贤等. 1999. 构造物理化学与金矿成矿预测[M]. 北京：地质出版社. 470 页.

谢学锦等主编.1999. 走上 21 世纪矿产勘查地球化学[M]. 北京：地质出版社. 256 页.

Malmquist L., and Kristianson K.1984. Experiment evidence for an ascending micro-flow of geogas in the ground[J]. Earth and Planetary Science letters, .70:407～416.

Zhang R H and Hu S M. 2000. Reaction process of ore-forming materials from deep earth entering into earth crust. In "95" important research results of national geological sciences and technology, ed. by Chinese Geology society, Geology press, 416～420 (Chinese).

Zhang R H, Hu S M and Zhang X T. 2000. Kinetics of hydrothermal reaction in near critical and supercritical water[J].Acta Geologica Sinica, 74(2):400～405.Paper to 31st IGC.