底侵作用与红花沟金矿田金成矿的动力学关系探讨*

Discussion on Relationship Between Underplating and Metallogenetic Geodynamics of Honghuagou Gold Field

佘宏全 张德全 丰成友 徐文艺 闫升好 李大新 董英君

（中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037）

She Hongquan, Zhang Dequan, Feng Chengyou, Xu Wenyi, Yan Shenghao, Li Daxin, Dong Yingjun

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

摘 要 同位素、流体包裹体、微量元素及矿化特征表明内蒙古赤峰红花沟金矿田金成矿具有明显的深源特征，作者根据矿田内与成矿关系密切的早中生代中基性岩墙群、辉石闪长岩体及堆晶岩捕虏体发育特征，结合区域地质构造研究成果，提出金成矿与早中生代时期发生的底侵作用有关，从而较好地解释了矿田内金成矿特征及其动力学机制。

关键词 金矿床 底侵作用 成矿动力学

1 成矿地质背景

红花沟金矿田位于内蒙古赤峰市西部，矿田内分布有红花沟、柴胡栏子、莲花山 3 个金矿床和众多金矿点。在大地构造位置上，矿田位于华北板块北缘东段，赤峰－朝阳金矿化集中区的西段。矿集区北侧以 WE 向康保－赤峰－开源深断裂为界与兴蒙褶皱带相邻，南侧以赤城－平泉－北票断裂为界与燕山造山带相邻。矿集区内由于 NNE 向断裂构造对 WE 向基底构造的切割，形成一系列大小不一的 NNE 向构造-岩浆隆起带和断陷带相间的构造格局。红花沟金矿田即处于其西段的铭山隆起带的北东端。

2 金成矿特征

金矿床的容矿围岩均为晚太古界变质岩。柴胡栏子金矿为蚀变岩型矿床，蚀变类型主要有黄铁绢英岩化、矽卡岩化和石墨化，矿体产于辉石闪长岩岩株的外围蚀变带中。红花沟和莲花山金矿为少硫化物石英脉型金矿床，矿脉与闪长玢岩脉有密切的空间伴生关系。经过前人的多年工作，关于本区金矿的矿床地质特征、成矿控制因素、成矿作用特点及地球化学特征已有了比较全面了解（李延河等，1990；张忠生等，1993；王时麒等，1994）。但以往的研究侧重于成矿的地质条件及矿床成因分析，很少涉及金成矿的深部地球动力学背景。在该地区研究工作期间，我们认为本区成矿在以下方几个方面的特征值得注意，这为探索本区金成矿的动力学机制提供了线索。

（1）同位素测年结果表明本区存在有较为强烈的早中生代岩浆活动，同位素年龄集中在 206～237Ma，该期岩浆活动在岩石类型、活动强度、稀土与微量元素特征、锶同位素（$^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7072$、岩浆演化等方面均与燕山期的中酸性岩浆活动有显著差别，具有明显的壳幔混源特征。而金成矿主要与早中生代岩浆

* 本文为国家地质调查项目 200110000001 资助

第一作者简介 佘宏全，男，1965 年生，博士，副研究员，从事矿床地质，构造地质研究。

活动有关（杨忆等，1999；佘宏全等，2000）。

（2）莲花山和红花沟金矿区含金石英脉与闪长玢岩脉有密切的空间伴生关系，该闪长玢岩脉具有产状稳定、发育密度大、成群分布特点，应是与地壳伸展有关的中基性岩墙群，其岩浆来源于下地壳或上地幔（Halls, 1982），说明早中生代时期岩石圈处于伸展状态。莲花山变质岩中发现有厚近百米的韧性变形带，具有滑脱构造性质。根据其与围岩的关系、并与区域构造进行对比，暂将其活动时期定为海西晚期－早中生代。具滑脱性质的韧性变形带及中基性岩墙群发育，说明该地区在海西晚期～早中生代时期经历了一段相对较快的地壳抬升和岩石圈伸展过程。

（3）岩石学、岩石化学和微量元素特征表明红花沟矿田内与金矿脉密切伴生的早中生代辉石闪长岩、闪长玢岩脉属钙碱性系列岩石，稀土及微量元素具大陆弧火山岩特征（杨忆等，1999）。在柴胡栏子和莲花山矿区的辉石闪长岩中发现有辉长岩、辉石岩等堆晶岩捕虏体，这些捕虏体是岩浆在上升过程中从深部带上来的，反应了岩浆及与之有关的成矿流体来源于深部。

（4）从本区金矿床矿物成分比较单一、铅锌等贱金属含量低、硫、铅同位素组成稳定（$\delta^{34}S$ 大多数集中于 3.5‰～4.6‰，李延河等，1990）、单个矿脉向下延深大、但缺乏分带性、含矿石英中富 CO_2 包裹体发育、流体包裹体的低盐度（w（$NaCl_{eq}$）一般＜7%）、矿区广泛发育碳酸盐化、柴胡栏子矿区岩体外围的石墨化等特征分析（张忠生等，1993；杨忆等，1999），金的成矿物质和成矿流体应主要来源于深部（Sillitoe, 1974；Kerrich et al., 1990）。

以上论述充分说明本区金成矿与深部地质作用有密切联系，结合区域构造研究成果（邵济安，1994）早中生代时期华北北缘处于地幔上隆引起的岩石圈伸展减薄状态，在岩石圈伸展减薄条件下易于造成玄武质岩浆的底侵作用。含堆晶岩捕虏体的辉石闪长岩体侵入、中基性岩墙群侵入及金矿床的形成正是岩浆底侵作用的直接或间接产物。因此，我们认为本区金成矿的深部地质动力学背景为地幔隆起、岩石圈伸展减薄条件下发生的岩浆底侵作用。

3　底侵作用及其地质意义

所谓岩浆底侵作用是指幔源的玄武质岩浆添加到下地壳底部的一种地质过程或作用（Fyfe, 1973，1990）。Fyfe 认为幔源岩浆在上升至壳幔过渡带时，由于玄武质岩浆密度大于围岩密度，缺乏进一步上升所需的浮力，在壳幔耦合较差、有软弱地带存在时，岩浆易在壳幔过渡带停留下来，垫托在下地壳底部，从而造成岩浆底侵作用。而在壳幔耦合很好、作为一个连续的刚性体存在时，岩浆趋向于在构造和热力驱动下沿构造带进一步上升，甚至喷出地表。

岩浆底侵作用对于研究陆壳生长和壳幔相互作用有重要意义。现在认为底侵作用是除大陆板块作用引起的岛弧侧向增生以外的另外一种重要的陆壳生长方式（Rudnick, 1990），地壳可以从下部生长，引起陆壳的垂向增生，使地壳加厚（Furlong，1986)。岩浆添加到地壳底部后，经过结晶分异形成基性或超基性堆晶岩，最终形成波速较高的壳幔过渡带(Gans, 1987)；部分岩浆上升侵入中上地壳或喷出地表，形成基性岩和斜长岩侵入体（包括基性岩墙群）、基性喷出岩或双峰式火山岩（Lister, 1993），但大部分岩浆（90%）将停留在壳幔过渡带附近（O'Reilly, et al., 1996）。同时，底侵作用带来的大量流体和热量，会导致下地壳岩石发生麻粒岩相变质作用（Rudnick, 1990），并诱发陆壳岩石的部分熔融，形成中酸性岩浆（Bergantz, 1989），使中上地壳向长英质方向演化。最新的研究表明，岩浆底侵作用对于大规模花岗质岩浆的形成起了非常重要的作用（Petford, et al., 2000）。

底侵作用发生的条件主要为岩石圈减薄、下地壳物质被整体迁移或具备软流圈物质的上升通道。满足这些条件的构造环境主要有（Furlong, 1986 及相关文献）板块边界区、岩石圈快速伸展减薄区、下部岩石圈整体拆沉区和造山带内岩石圈的拆离滑脱区。而在裂谷和岩石圈伸展减薄区，底侵作用最为发育。

4　底侵作用与红花沟金成矿的动力学关系

毫无疑问，岩浆底侵作用带来的大量流体和热量必然要对成矿物质的来源、活化和迁移会发生重要影

响。底侵作用对成矿的控制主要有两个方面，一方面底侵的幔源岩浆可以直接为成矿提供部分物质、挥发份和流体来源，另一方面由岩浆底侵带来的大量异常热量及由此引发的麻粒岩相变质作用、部分熔融和同化混染作用，对成矿流体的产生、金属的溶解和运移发生重要影响。

近年来，对研究区所在的华北板块北缘燕辽地区早中生代的伸展作用得到进一步认识。岩石圈伸展减薄为岩浆底侵作用提供了良好的发育条件。矿田南部喀喇沁地区闪长岩体内发育麻粒岩捕虏体和基性超基性岩堆晶岩捕虏体（邵济安等，1999；韩庆军等，1999），说明区域上早中生代时期地壳下部有玄武质岩浆的底侵作用发生。综合现有资料，底侵作用对红花沟金矿田成矿的可能机制为：早中生代时期，在区域岩石圈伸展环境条件下，来自地幔的玄武质岩浆上升，添加到下地壳底部，发生底侵作用，诱发部分熔融、同化混染和广泛的混合作用。岩浆在该地带或全部结晶或经过结晶分异发生分离，以获得进一步上升所需的浮力，从这里上升的岩浆会具有壳幔混源和弧火成岩特征，其岩石成分可以从玄武岩至英安岩，从而形成了矿田区内见到的闪长质岩体及堆晶岩捕虏体。部分幔源岩浆直接上升，形成区域上见到的碱性或低钾拉斑玄武岩，显示幔源特征（牟保磊等，1992 ；Hildreth et al., 1988）。

由于幔源岩浆富含 CO_2 等挥发组分（Wells et al., 1979），岩浆开始固结时，CO_2 在硅酸盐中的溶解度低，会从岩浆中逸出，形成 CO_2 流。CO_2 的析出会同时带出大量岩浆中的水，形成 CO_2+H_2O 水汽或流体，由于其密度小于熔体，会从岩浆中分离出来，进一步上升。H_2O 的带出，促进了上覆下地壳岩石发生麻粒岩相变质（Newton et al., 1980），麻粒岩矿物常含有大量富 CO_2 包裹体即与此有关（Lamp et al., 1987）。成矿流体中水的来源一方面可以来自岩浆，另一个重要来源是底侵作用导致的麻粒岩相变质或下地壳岩石部分熔融过程中角闪石（和云母）的脱水作用。大量 CO_2 的存在加速了岩石或岩浆中硫化物的分解（Cameron, 1988），而金有强烈的亲硫化物倾向，硫化物被分解，利于金的析出，并加入到流体中，形成含金流体。含矿流体沿剪切带或支状裂隙进一步上升至地壳中上部，在适宜的构造部位、或物理化学环境或脆韧性转换部位沉淀富集成矿。在氧逸度较高时，会出现磁铁矿和赤铁矿等矿物（红花沟金矿 $4^{\#}$、$51^{\#}$矿脉即含有磁铁矿）；而氧逸度较低时，则发育石墨，柴胡栏子金矿外围蚀变岩广泛发育石墨化即与此有关。由于含矿流体中 CO_2 含量很高，使得 CO_2-H_2O 在源区即能从 H_2O-CO_2-NaCl 不相容体系中分离出来，形成 CO_2-H_2O 体系（Bowers，1983），造成本区金矿床矿物包裹体具有低盐度特征。而 Cu、Pb、Zn 等贱金属元素一般以 Cl 的络合物形式搬运，岩石中 Cu、Pb、Zn 含量一般等于或大于 Cl 的含量，Cl 的低含量限制了贱金属元素的活化迁移，引起流体中相应元素含量低。这可以解释红花沟地区金矿脉及围岩中广泛发育碳酸盐化、含金矿物一般富含 CO_2 包裹体及包裹体的低盐度、矿脉中的贱金属元素含量低等现象。

此外，由于含金流体在形成过程中经历了深部的同化、混染改造，显示相对的均一性和深源特征，造成矿石在同位素、微量元素及地球化学特征方面显示壳幔混源特征，使得矿床具有相对稳定的硫、铅同位素及稀土元素组成，变化范围不大。另一方面，流体在上升过程中，会与岩浆、沿途的围岩及各种它源流体发生广泛的化学反应和混合作用，使流体显示多来源特征，单一依靠氢氧同位素特征判断 H_2O 来源方法，难以全面反映本区金矿床的流体来源与成因。

近地表浅部位置，底侵作用引起地壳抬升，造成地壳伸展，从而形成深达数千米的可渗透带，伴随底侵作用造成的高地温梯度，有利于热液对流体系的形成及相关成矿作用发生（Zoback et al., 1993）。造成矿床的垂向延深远大于水平延长，如红花沟 $51^{\#}$、$15^{\#}$矿脉垂向延深达 500m 以上。

从上述分析可以看出，岩浆底侵作用可以较好地解释该地区金矿床地质特征和形成过程。

国外有关底侵作用对成矿的控制作用也屡见报道。如 Oliver 等（1998）认为澳大利亚 Yilgan Mt Isa 地区的金矿床与克拉通内活动带发育时期的底侵作用有关，与早期底侵作用有关的脱挥发份作用，可以形成大量弥漫型的渗透流体，溶解大量金属物质，为后期成矿提供了物质和流体准备。Zweng 等（1993）认为加拿大东部的 Abitibi 晚太古代金矿带中的 Camflo 金矿床是在玄武质岩浆底侵作用期间，麻粒岩相变质高峰期之后，富 CO_2 流体在玄武岩浆固结时释放出来，与源区的其它流体、岩石或岩浆发生相互作用，沿剪切带上升至地壳上部而成矿。

5　关于矿源层问题讨论

研究区内的晚太古界基底的变质基性火山岩一般含金较高（晚太古界中基性变质岩含 Au 平均 8.34×10^{-9} ～ 10.94×10^{-9}，王时麒等，1994），对其是否能够作为金成矿的矿源层一直存在分歧，依靠氢、氧、碳同位素方法对矿流体的来源与性质解释也常具有多解性，从而产生了以岩浆水为主或以变质水为主的不同成因观点（王时麒等，1994；张忠生等，1993）。若考虑到底侵作用的影响，底侵岩浆促使下地壳的基性岩石发生麻粒岩相变质，可以将原岩中的成矿物质活化、萃取出来，加入到成矿热液中，而热液上升过程中，会受到其它流体的混染，使流体特征进一步复杂化，则可以很好地解释上述现象。但由于这一过程发生在地壳深部，因此，不能将现在所见到的矿床围岩直接作为矿源岩（或矿源层），围岩的蚀变作用不能代表其对成矿作用的贡献。而金可能来自成分相当于本区新太古代中基性岩石的古老下地壳岩石。

参　考　文　献

韩庆军，邵济安. 1999. 内蒙古喀喇沁早中生代闪长岩的岩石学、地球化学及其成因. 岩石学报，16（3）：385～391.

李延河，丁悌平. 1990. 内蒙赤峰红花沟金矿稳定同位素研究. 矿床地质，9（3）：257～269.

牟保磊，阎国翰. 1992. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义. 地质学报，66：108～121

邵济安, 韩庆军, 张履桥，等. 1999. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现. 科学通报，44（5）：478～485.

邵济安，藏绍先，牟保磊，等. 1994. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例. 科学通报，39（6）：533～537.

佘宏全，徐贵忠，周瑞，等. 2000. 内蒙古红花沟地区早中生代构造-岩浆活动及金成矿作用. 现代地质， 14(4): 408～416.

王时麒，孙承志，崔文元，等. 1994, 内蒙古赤峰地区金矿地质. 呼和浩特：内蒙古人民出版社.

杨忆，佘宏全，徐贵忠，等. 1999. 内蒙赤峰柴胡栏子金矿田燕山期岩浆岩与金矿床. 岩石学报，15（3）：475～483.

张忠生，周乃武，王建国，等. 1993. 赤峰红花沟金矿田成矿规律与成矿预测. 沈阳：东北大学出版社.

Bergantz G W. 1989. Underplating and partial melting: implications for melt generation and extraction. Science, 245：1093～1095.

Cameron E M. 1988. Archean gold: Relation to granulite formation and redox zoning in the crust. Geology, 16：109～112.

Furlong K P, Fountain D M. 1986. Continental crustal underplating：thermal considerations and seismic-petrologic consequences. J. Geophys. Res., 91：8285～8294.

Fyfe W S, Leonardos O H. 1973. Ancient metamorphic-migmatite belts of the Brazilian African coasts. Nature, 224：501～502.

Fyfe W S. 1990. Magma underplating of continental crust. J. Volcano & Geotherm. Res., 50：30～40.

Gans P. 1987. An open-system, two-layer crustal stretching model in the eastern Great Basin. Tectonics, 3：1～12.

Halls H C. 1982. The importance and potential of mafic dykes swarms in studies of geodynamic processes. Geoscience Canada, 9 (3)：145～154.

Hildreth W. and Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. Contrib. Mineral. Petrol., 98：455～489.

Kerrich R, Wyman D. 1990, Geodynamic setting of mesothermal gold deposits, an association with accretionary tectonic regimes. Geology, 18, 882～885.

Lamp W, Valley J W, Brown, P E. 1987. Post-metamorphic CO_2-rich fluid inclusions in granulites: Contr. Mineral. Petrol., 96：485～495.

Lister G S. 1993. Plutonism and the origin of metamorphic core complexes. Geology, 21：607～610.

Newton R C, Smith J V, Windley B F. 1980. Carbonic metamorphism, granulites and crustal growth. Nature, 288：45～50.

O'Reilly S Y and Griffin W L. 1996. 4-D lithosphere mapping: Methodology and examples. Tectonophysics, 262：270～280.

Oliver N H S, Rubenach M J, Valenta R K. 1998. Precambrian metamorphism, fluid flow, and metallogeny of Australia. AGSO Journal of Australia Geol. & Geophys., 17：31～53.

Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al., 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. Nature, 408： 669～673.

Rudnick R. 1990. Continental crust growing from below. Nature, 347：711～712.

Sillitoe R H. 1974. Tin mineralization above mantle hot spots. Nature, 248：497～499.

Wells P R A. 1979. Chemical and thermal evolution of Archaean sialic crust, southern West Greenland. J. Petrol., 20：187～226.

Zoback M D and Emmerman R. 1993. Scientific rational for establishment of an international program of continental scientific drilling. Geoforschungs Zentrum, Postsdam, GFZ. 194.

Zweng P L, Motensen J K, Brent G, et al. 1993. Thermochronolgy of the Camflo gold deposit, Malartic, Quebec：Implications for magmatic underplating and the formation of gold bearing quartz vein. Economic Geology, 18：1700～1721.