与侵入岩有关金矿床的研究现状、存在问题及在中国的前景

胡朋, 聂凤军, 江思宏
中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037

内容提要: 与侵入岩有关的金矿床是近年来识别出来的一种新的金矿类型。这类金矿床常在远离汇聚板块边缘的克拉通边缘环境中产出, 与已知的W/Sn岩浆省叠加。它们具特征性的Au+Bi+W+Te+Sb+As等亲石元素金属组合, 在时空上和成因上与中等还原的分异I型侵入岩密切相关, 随就位深度的不同而显示不同的矿化特征。形成于地壳浅部环境(< 5km)中的金矿床常与岩株、岩墙或岩床有关, 金矿化大多数以浅成低温脉、网状脉或角砾岩筒产出; 形成于地壳深部环境(> 5km)中的金矿床常与深成侵入岩体有关, 金矿化以席状脉、云英岩或浸染状块体产出。流体包裹体研究表明成矿流体的类型随着成矿深度的不同而显示有规律的变化, 形成于较浅部环境中的金矿床一般包括高温(> 350℃)、不混溶的盐水(> 30% $NaCl_{eq}$)和低盐度(< 5% $NaCl_{eq}$)含CO_2液相包裹体; 而形成于较深部环境中的金矿床含有大量低盐度含CO_2液相(< 10% $NaCl_{eq}$)包裹体, 有些矿床晚阶段流体含有中高盐度(10%～40% $NaCl_{eq}$)的盐水。含CO_2流体无论在挥发份的出溶过程中还是在金属迁移过程中都起了重要的作用。与侵入岩有关的金矿床在中国有广阔的找矿前景, 而中国东部金矿省和钨/锡成矿省的叠加部位是寻找该类型矿床的有利地段。

关键词: 与侵入岩有关金矿床; 构造背景; 岩浆背景; 地质特征; 流体; 造山型

位于汇聚板块边缘的富金岩浆—热液矿床是金的重要来源, 在过去十几年中一直是经济地质学家们关注的焦点。一般说来, 传统的富金岩浆—热液矿床包括斑岩型Cu—Au矿床(Sillitoe, 1997, 2000; 侯增谦, 2004)、浅成低温热液型Au—Ag矿床(White et al, 1995; Hedenquist et al, 2000; 江思宏等, 2004)和含金的矽卡岩型矿床(Meinert, 1993; 陈衍景等, 1997), 它们在成因上均与汇聚板块边缘的岩浆—热液活动有密切联系, 从而区别于造山型金矿床(Groves et al, 1998; Goldfarb et al, 2001), 后者被认为与造山过程中的区域变形变质事件或区域花岗质岩浆活动有密切成因联系。近几年来, 主要基于对北美科迪勒拉造山带北部的廷蒂纳(Tintina)金属成矿带中金矿床的研究, 人们识别出一种新的富金岩浆—热液矿床类型——与侵入岩有关的金矿床(intrusion-related gold deposits), 并初步建立了其勘探模式(Mccoy et al, 1997; Sillitoe et al, 1998; Thompson et al, 1999; Lang et al, 2000, 2001)。迄今, 在全球范围内发现了许多与侵入岩有关的金矿床的实例(表1和图1)。本文通过对这些实例的综合分析, 总结与侵入岩有关的金矿床的研究现状, 包括构造与岩浆背景、矿化特征、流体的来源及演化、区域和矿床规模的构造控制, 并提出这类矿床未来研究中应注意的一些问题。最后, 提出在中国可能出现的与侵入岩有关的金矿床的实例, 以期抛砖引玉, 希望引起国内矿床学家对这种新的金矿类型的重视。

1 与侵入岩有关的金矿床——一个新的金矿类型

广义上讲, 斑岩型Cu—Au矿床、高硫化型Au—Ag矿床和富金的矽卡岩型矿床等在成因上都与邻近的斑状侵入岩有一定关系, 而此处所谓的"与侵入岩有关的金矿床"并不包含以上矿床, 而独指可以从岩浆—热液成矿系统中划分出来的与以上矿床类型并列的一类矿床。其实, 在这一名称演变之初, 这类矿床也被称为"斑岩金矿床(porphyry gold deposits)"或"与侵入体有关的脉金矿床(intrusion-related vein gold deposits)", 直至Thompson(1999)和Lang(2000)等人在其文献中使用"与侵入岩有关的金矿床/系统(intrusion-related gold deposits/systems)"这一名称以来, 这一术语才被广泛使用并

注: 本文为国家"973"项目(编号 2002CB412606)和国家自然科学基金资助项目(编号 40573025)的成果。
收稿日期: 2005-11-10; 改回日期: 2006-04-26; 责任编辑: 章雨旭。
作者简介: 胡朋, 男, 1980年生。博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。电话: 010-68999042; Email: hu2001peng@yahoo.com.cn。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

固定下来,笔者等在此介绍这一类型矿床时也使用这个术语。由于目前我们对与侵入岩有关金矿床的成矿机制和形成关键过程还不清楚,因此很难对其有一个精确的定义,但一般说来,它们具有以下特征:① 与偏铝质的亚碱性中酸性侵入体有关,其氧化状态位于磁铁矿系列和钛铁矿系列的界限附近;

表 1 世界范围内主要的与侵入岩有关金矿床的地质特征

Table 1 Characteristics of major intrusion-related gold deposits throughout the world

序号	矿床/地区	成矿(构造)省	吨位(Mt)/品位($\times10^{-6}$)	侵入体特征	矿化年龄(Ma)	矿化类型	金属组合	资料来源
1	弗特诺克斯(Fort Knox)/阿拉斯加,美国	廷蒂纳成矿带	158/0.83	斑状花岗岩体,I型,钛铁矿系列	92.4①	席状脉	Bi, Te, Mo, As, Sb, W	Mccoy et al (1997)
2	帕狗(Pogo)*/阿拉斯加,美国	廷蒂纳成矿带	9.98/15	花岗岩和花岗闪长岩体,I型,钛铁矿系列	104.2①	扁平板状脉,网状脉	Bi, Ag, Te, As, Sb, Cu, Pb, Mo	Smith et al (1999)
3	东林柯瑞克(Donlin Creek)*/阿拉斯加,美国	廷蒂纳成矿带	480/>1.5	流纹岩,流纹英安岩岩墙(床),I型,钛铁矿系列	73.6～67.8	细网脉群	Ag, As, Hg, Sb	Goldfarb et al (2004)
4	舒特港(Shotgun)/阿拉斯加,美国	廷蒂纳成矿带	60/0.93	花岗斑岩岩株,I型,钛铁矿系列	～70	网状脉,角砾岩	Bi, Te, Ag, Mo, Sb, Cu	Rombach et al (2001)
5	杜卜林圭旗(Dublin Gulch)/育空地区,加拿大	廷蒂纳成矿带	50.3/0.93	花岗闪长岩岩株,I型,钛铁矿系列	93.2②	席状脉	Bi, W, Te, As, Mo, Pb, Zn, Cu, Ag	Malroof et al (2001)
6	克里尔柯瑞克(Clear Creek)/育空地区,加拿大	廷蒂纳成矿带	40/>0.3	花岗闪长岩和石英二长岩岩株,I型,钛铁矿系列	93.6～92.4②	席状脉	As, Bi, W, Ag, Pb, Zn	Marsh et al (2003)
7	布鲁尔柯瑞克(Brewery Creek)/育空地区,加拿大	廷蒂纳成矿带	13.3/1.44	二长岩岩床,I型,弱磁铁矿系列	～92③	浸染状,细脉	As, Sb, Hg	Diment et al (1998)
8	科里科洛(Kori Kollo)/玻利维亚	玻利维亚多金属成矿带	64/2.26	英安岩和流纹英安岩岩株,I型,钛铁矿系列	15.7	席状脉,细脉群	Ag, As, Sb, Sn, W, Bi, Cu, Pb, Zn	Thompson et al (1999)
9	基兹顿(Kidston)/昆士兰州,澳大利亚	新英格兰褶皱带	94/1.48	流纹质斑岩岩株,I型,弱磁铁矿系列	332	角砾岩	Bi, Mo, W, As, Te, Zn, Cu, Pb, Sn	Baker et al (1991)
10	提巴拉(Timbarra)/新南威尔士州,澳大利亚	新英格兰褶皱带	16.8/>0.73	二长花岗岩岩体,I型,弱磁铁矿系列	242～238	浸染状	Bi, Ag, Te, As, Mo, Sb	Mustard (2001)
11	东坪*/河北省,中国	燕辽成矿省	16/6	正长岩岩体,I型,磁铁矿系列	153④	单脉,网状细脉	Te, Pb, Zn, Cu	Nie et al (2004)
12	瓦萨克维斯克(Vasilkovskoe)*/哈萨克斯坦	Kipchak 弧	80/3.7	花岗闪长岩岩体,I型,钛铁矿系列	443	席状脉	As, Sb, W, Pb, Cu, Bi, Te	Spiridinov (1996)
13	吉拉乌(Jilau)/塔吉克斯坦	南天山	54/1.1	花岗闪长岩岩体,I型,钛铁矿系列	石炭纪(?)	席状脉,网脉	Bi, Te, W, As, Cu	Cole et al (2000)
14	莫科尔斯克(Mokrsko)*/捷克	波西米亚地块	66/1.5	花岗闪长岩岩体,I型,钛铁矿系列	349	席状脉	As, Bi, Te, Mo, W, Sb, Cu	Thompsom et al (1999)
15	佩若克尔霍拉(Petrackora Hora)*/捷克	波西米亚地块	31/1.08	花岗闪长岩岩株,I型,钛铁矿系列	344.4	席状脉	W, Bi, As, Mo, Cu	Zacharias et al (2001)
16	萨拉乌(Salave)/西班牙	伊比利亚地块	35/2.47	花岗闪长岩岩体,I型,弱磁铁矿系列	285	浸染状,云英岩	As, Sb, Mo, W, Zn, Cu	Thompson et al (1999)
17	艾杜维希(Ad Duwayhi)/沙特阿拉伯	阿菲夫复合地体	31/2.2	花岗岩、方石英斑岩岩株,I型,弱磁铁矿系列	656.6～649.9	席状脉,网状脉,板状脉	Ag, Pb, Cu, Mo	Doebrich et al (2004)
18	马拉瑞克(Malatric)*/安大略省,加拿大	阿比提比绿岩带南部	37.3/4.3	二长岩、正长斑岩岩株,I型,磁铁矿系列	新太古代(?)	浸染状,网状细脉	Te, Cu, W	Robert et al (2001)

注:标注*者被某些研究者划分为造山型金矿床;①年龄引自Selby et al (2002);②年龄引自Selby et al (2003);③年龄引自Hart et al (2004);④年龄引自Hart et al (2002)。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

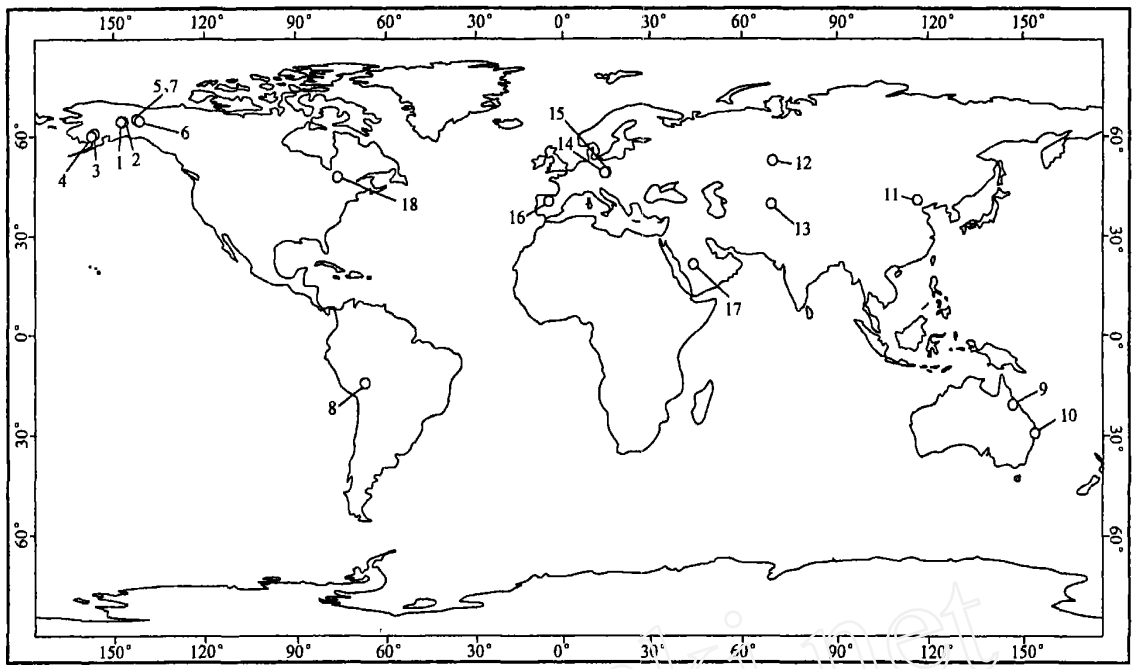

图 1　与侵入岩有关金矿床的全球分布图(图中矿床序号同表1)

Fig. 1　Location of major intrusion-related gold deposits (with the same serial number as Table 1)

② 成矿流体为含 CO_2 热液; ③ 金属元素组合为 Au + Bi + W + As + Mo + Te ± Sb 等亲石元素组合, 而 Cu、Pb、Zn 等贱金属含量很低; ④ 金属矿物中硫化物含量低, 多数< 5%, 且以具还原特征的毒砂、磁黄铁矿和黄铁矿为主, 缺乏磁铁矿和赤铁矿; ⑤ 相对微弱的热液蚀变带, 只有矿床在地表形成时蚀变晕才较为宽泛; ⑥ 构造背景多为已知或推测的汇聚大陆板块边缘内侧; ⑦ 常位于含有 W/Sn 矿床的岩浆省内(Lang et al, 2001)。

所谓的"造山型金矿床", 被用来总结那些形成于汇聚板块边缘增生或碰撞造山带内, 与区域峰期变质作用同步或滞后的, 由构造控制的(通常为韧性剪切带)一类脉状金矿床。它们在相当宽泛的上地壳垂直系统内产出(0～20km), 成因上或与区域峰期变质变形事件有关, 或与伴生的区域花岗质岩浆活动有关(Groves et al, 1998)。由于中浅成造山型金矿床(0～12km)和与侵入岩有关金矿床之间地质特征较为相似, 且往往在同一成矿省内叠加, 因此, 是否需要将"与侵入岩有关金矿床"作为一个独立的金矿床类型划分出来存在不同意见(Groves et al, 2003)。表2列出了与侵入岩有关的金矿床和造山型金矿床的主要特征加以比较, 从中可以看出两者在以下几个方面存在一些差异: ① 与侵入岩有关的金矿床常远离俯冲带靠近克拉通, 定位于含碳酸盐的浅海大陆架环境中, 而造山型金矿床则更加靠近大海一侧, 定位于以浊积岩为主的增生地体内, 且区域范围内不具成规模的 W/Sn 矿化; ② 与侵入岩有关的金矿床及相关岩体常常切穿围岩的穿透性构造(如剪切带、褶皱等), 表明其矿化年龄要晚于区域性变质事件, 而造山型金矿床矿化作用常与区域穿透性构造作用同步发生; ③ 与侵入岩有关的金矿床在区域规模上具有明显的矿床分带, 即距离侵入体由近到远分别为 Au-W/Sn-Ag/Pb/Zn; 但造山型金矿床似乎缺乏明显的侧向和垂向分带; ④ 与侵入岩有关的金矿的流体组成变化较大, 常为盐度变化较大的 H_2O—CO_2 体系, 含极少量的 $CH_4 \pm N_2$, 而造山型金矿床流体体系为较稳定的低盐度 $H_2O + CO_2 \pm CH_4 \pm N_2$ 体系; ⑤ 与侵入岩有关的金矿床通常以席状脉的方式产出, 且具有范围较窄的碱性长石蚀变, 而造山型金矿床常以剪切大脉的方式产出, 且延伸可达数千米以上, 具强烈的绢云母—铁白云石蚀变, 而缺乏碱性长石蚀变。基于上述差异, 将全球造山带内"与侵入岩有关的金矿床"作为一个独立的矿床类型划分出来很有必要。

2　成矿地质环境

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.1 构造背景

与侵入岩有关的金矿床产出的构造背景较为多样,它们分别在与俯冲有关的岩浆弧、弧后、碰撞增生及碰撞后环境中产出(Sillitoe et al., 1998; Thompson et al., 1999)。通过对廷蒂纳成矿带的构造重建研究表明,位于该成矿带东北和西南两端的与侵入岩有关金矿床分别与中白垩世(88~110Ma)和晚白垩世(70~65Ma)不同构造环境中的岩浆侵入作用有关。需要提到的是,中白垩世岩浆作用与法拉龙(Farallon)板块向北美大陆俯冲造山后的局部伸展事件有关,相当于弧后或前陆环境,而晚白垩世岩浆作用与库拉(Kula)板块的俯冲过程直接相关,相当于典型的岩浆弧环境(Flanigan et al., 2000a; Hart et al., 2004)。对古生代形成的与侵入岩有关金矿床的研究结果表明,它们位于距离活动大陆边缘几百公里的外来地体中,形成于增生或碰撞造山带内(Groves et al., 2003)。这样的例子包括位于中亚造山带(从欧洲东部的波西米亚地块穿过中亚直到华北克拉通北缘)和澳大利亚新英格兰褶皱带内的与侵入岩有关的金矿床(表1)。在澳大利亚著名的维多利亚金矿省的中部也发现有一些小规模的与侵入岩有关金矿床的实例(Bierlein et al., 2005),它们与拉克兰(Lachlan)造山带中、西两部分在400~380Ma期间的碰撞事件有关,碰撞末期加厚地壳熔融引发的大陆岩浆作用是与侵入岩有关金矿化的有力肇始。艾杜维希(Ad Duwayhi)金矿床是近来阿拉伯地盾内最重要的金矿发现之一,它位于地盾中央的阿菲夫(Afif)复合地体中,与新元古代造山后岩浆热液事件有关(Doebrich et al., 2004)。位于加拿大阿比提比(Abitibi)绿岩带南部的与正长岩有关的金矿床和显生宙与侵入岩有关的金矿床有许多相似之处,但它们可能形成于完全不同的构造环境中(Robert et al., 2001)。

尽管与侵入岩有关金矿床的形成环境如此多样,但它们绝大多数就位于远离显生宙汇聚板块边界的克拉通边缘的大陆地壳中,常叠加在已知的与W/Sn矿化有关的岩浆省之上(Lang et al., 2001)。相对于位于岛弧和弧后环境的斑岩型和浅成低温热液型富金岩浆—热液体系,与侵入岩有关的金矿床更加靠近克拉通一侧,位于造山期间增生的含碳酸盐岩石序列内,而不是形成于增生前的大陆克拉通岩石序列中,因此,它们仍然是变形的大陆边缘的组成部分,而不属于古老克拉通(Groves et al., 2003; 图2)。

表2 与侵入岩有关金矿床和造山型金矿床的主要特征比较(根据 Groves et al., 2003改编)

Table 2 Comparison of intrusion-related gold deposits and orogenic gold deposits in terms of their critical characteristics (modified from Groves et al., 2003)

主要特征	造山型金矿	与侵入岩有关的金矿
成矿时代	从中太古代到第三纪,成矿峰期集中于晚太古代、古元古代和显生宙	主要集中于显生宙,少量的新元古代和新太古代
构造背景	大陆边缘的外来地体,靠海一侧	大陆边缘地体的靠近克拉通一侧
区域构造控制	挤压和转换扩张晚阶段	挤压向拉张的过渡期
围岩	变化较大,铁镁质火山岩或侵入岩或浊积岩序列	主要是中酸性侵入岩,一些是含碳沉积岩
区域变质相	主要是绿片岩相,但从次绿片岩相到麻粒岩相都有出现	主要从次绿片岩相到绿片岩相
有关侵入体	从长英质到煌斑岩墙,或大陆边缘岩基	与长英质岩体、岩株、岩墙有关,常见煌斑岩脉
矿化方式	大脉、梯状脉、或交代富铁岩石	主要为席状脉,有时为角砾岩、网状脉、浸染状或交代含碳岩石
矿化时限	与峰期变质作用同步或略晚于区域变质事件	晚于峰期变质事件
金属组合	Au+Ag±As±B±Bi±Te±W	Au+Bi±Te±Sb±W±Sn±As
金属分带	缺乏明显的侧向和垂向分带	强烈的区域分带:Au——W+Sn——Pb+Zn
围岩蚀变	一般为云母-铁碳酸盐-铁硫化物蚀变	钾长石-碳酸盐-云母-绿泥石蚀变
P-*T*条件	范围为50~450MPa,220℃~600℃	范围从50~250MPa,200℃~600℃
成矿流体	低盐度$H_2O+CO_2±CH_4±N_2$体系	不同盐度的H_2O+CO_2体系,少量的$CH_4±N_2$
可能的热源	软流圈上涌到中地壳的花岗质岩浆作用	中上地壳的花岗质岩浆作用
可能的物源	俯冲/仰冲板片或上地壳岩石或深部花岗质岩浆	花岗质岩浆或上地壳岩石

2.2 侵入岩

与金矿床有关的侵入岩组成变化较大,但通常由中酸性的花岗闪长岩、石英二长岩和花岗岩构成,个别地区由正长岩类岩石组成。岩体内经常穿插岩浆分异作用形成的煌斑岩、伟晶岩和细晶岩等岩墙(脉)。尽管大多数侵入岩体的岩石化学特征显示偏铝质、钙碱性系列的特点,但碱性的铁镁质岩(墙)脉和强烈分异的过铝质岩体也常常出现(Lang et al., 2000, 2001)。如位于加拿大育空西部的汤泊斯通(Tombstone)岩套就是一个主要

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

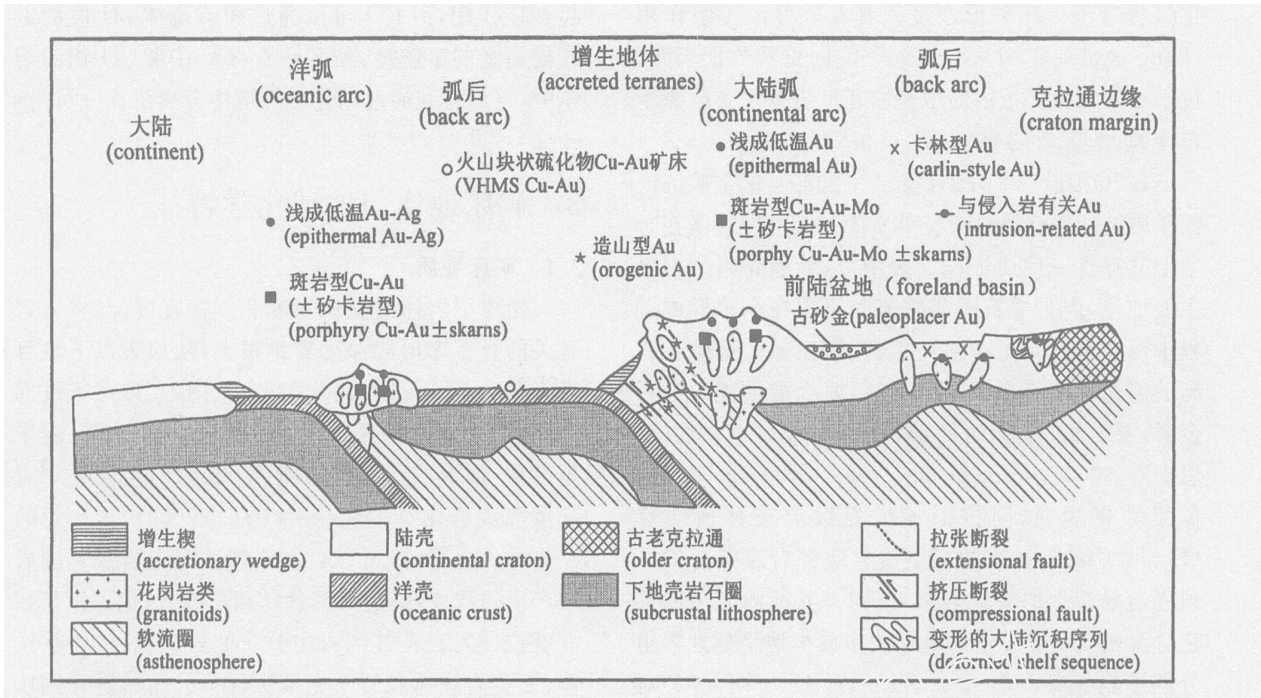

图2 不同类型的富金矿床的构造背景示意图(改自 Groves et al , 2005)

Fig. 2　Schematic sections showing the formation environment of different gold-bearing deposit types (after Groves, 2005)

由中酸性花岗岩类组成的偏铝质亚碱性侵入岩套, 但局部地段为过铝质的碱性侵入体(Lang et al , 2000); 而华北克拉通北缘的东坪金矿就是产于一个碱性的、由正长岩为主的杂岩体内(Nie, 1998; Nie et al , 2004)。与金矿有关的侵入岩有时构成岩基和岩体, 有时构成小岩株、岩墙和岩床。岩石地球化学研究结果表明与金矿床有关的侵入岩都是分异程度较高的 I 型花岗岩, 分异指数一般大于80。对北美科迪勒拉地区的侵入岩套的研究表明, 与金矿床相关的侵入岩体为具还原性质的钛铁矿系列, 岩体内常含钛铁矿和榍石, 而不含或含微量磁铁矿, 磁化系数不超过0.5, Fe_2O_3/FeO 比值小于0.5(Hart et al , 2004)。与此相反, 华北克拉通北缘和新英格兰褶皱带中的该类金矿床却与氧化的磁铁矿系列侵入岩有关。同样, Robert 等(2001)发现, 与白垩世北美大陆边缘的与侵入岩有关的金矿床不同的是, 加拿大阿比提比绿岩带内与正长岩有关的金矿床含有丰富的磁铁矿。相关侵入体的宽泛的 fO_2 范围表明, 氧化还原状态可能并不是决定金是否在花岗质熔体演化而来的成矿流体中富集的关键因素(Groves et al , 2003)。总的说来, 绝大多数侵入体属于分异的 I 型花岗质岩石, 岩浆的氧化状态位于磁铁矿系列和钛铁矿系列的界限附近(Thompson et al , 1999; 图 3)。

对与侵入岩有关金矿床来讲, 岩浆的起源和演

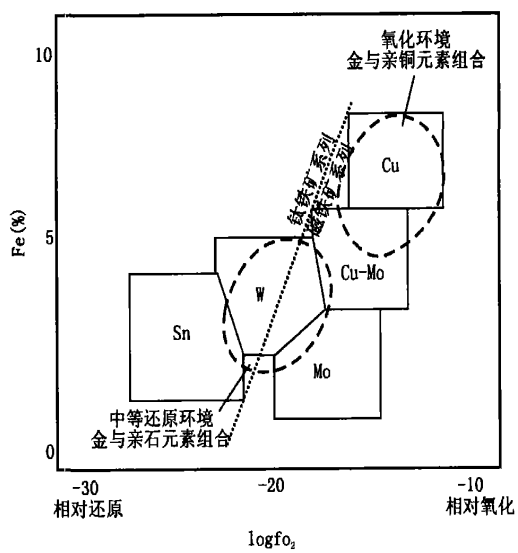

图3 含不同金属组合的岩浆分异程度与氧化还原状态关系图(改自 Thompson et al , 1999)

Fig. 3　A schematic representation of the relationship between degree of fractionation and oxidation state for magmas associated with different dominant metal assemblages (after Thompson et al , 1999)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

化过程对于矿床的形成过程具有重要的控制作用(Lang et al , 2001)。Sr—Nd—O 同位素数据表明,位于廷蒂纳金矿带内的中晚白垩世岩浆主要起源于古老陆壳组分的重熔(I_{Sr}> 0. 71, $\varepsilon_{Nd}(t)$= - 8～- 15, $\delta^{18}O$接近15‰,Hart et al , 2000),但金矿区内铁镁质碱性岩墙总是与长英质的亚碱性侵入体在时空上共存这一地质证据又表明,尽管地壳组分占据主要地位,但是岩石圈或软流圈组分在金矿形成过程中可能也起到了重要作用。铁镁质碱性熔体具有高的氧逸度和富含挥发分,它们要么提供挥发分和金属,要么作为挥发分流动和运移金属的催化剂(江思宏等, 2004; Lang et al , 2001)。Nd—Sr—Pb 同位素数据表明,阿拉斯加世界级的东林柯瑞克(Donlin Creek)矿区的长英质岩墙源自成熟的加厚地壳熔融产生的演化岩浆,但同一盆地内产出的其它含金长英质岩墙或岩株却或多或少地受到地幔组分的影响(Goldfarb et al , 2004)。Hart 等(2005)对育空地区中白垩世岩浆岩带的研究发现,与 Au+ Cu+ Bi 以及 U + Th+ REE 矿化有关的碱性汤泊斯通岩套源自富集的岩石圈地幔的熔融;而与 Au+ As+ Te+ Bi+ W 矿化有关的马约(Mayo)岩套源自大陆地壳,但明显受到富集地幔来源的铁镁质组分的混染。与金矿有关的岩浆来源及混染过程还需要更多同位素证据来加以限制。

尽管岩浆源区的性质在决定何种金属富集时起重要作用,但岩浆演化过程如结晶分异、挥发分出溶富集以及相分离对金属元素的最后富集同样具有根本性的影响。与侵入岩有关的金矿床总是与高度分异的花岗岩类侵入体有关,矿化位于或接近杂岩体内最为分异的岩相内,如在澳大利亚新英格兰褶皱带的提巴拉(Timbarra)金矿区,金矿化主要呈浸染状产于晚阶段分异岩株的细晶质结壳内(Mustard et al , 2001)。晚阶段岩浆分异过程以及同时发生的向热液阶段的转变过程在加拿大育空(Yukon)地区的金矿化中同样重要(Baker and Lang, 2001)。流体包裹体研究发现,与斑岩型 Cu—Au 矿床相比,侵入岩有关金矿床的长英质岩浆中含有丰富的 CO_2,而大量 CO_2 在挥发分流体的出溶以及随后的演化过程中可能起了关键性的作用(Lowenstern, 2001; Baker, 2002)。深部地壳长英质岩浆中 CO_2 的溶解度小于水10倍左右(Lowenstern, 2001),因此含 CO_2 流体相的出溶早于含水相,且 CO_2 流体相在熔体的上升过程中长期以独立的蒸气相存在。虽然由于 CO_2 相与金离子间具微弱的化学键能,CO_2 在金的运移中并不起直接作用,但 CO_2 可以通过调节流体 pH 值的方式提高金的溶解度,使其一直保留在含 CO_2 相的熔体中,直到有利的地球化学环境中分离沉淀(Phillips et al , 2004)。

3 矿床地质与地球化学特征

3.1 矿床地质

受控于岩体的就位深度和剥蚀程度,与侵入岩有关的金矿床形成深度变化很大,从地表以下数百米直至7～ 8km 范围内均可产出(图4)。形成于浅部环境(< 5km)的侵入岩型金矿化与岩株、岩墙、岩床等有关,而形成于深部环境(> 5km)的金矿化与岩基或深成岩体有关(Baker et al , 2002)。金矿化的产出方式多样,既可以是在浅就位侵入岩及其围岩中产出的浅成低温脉、网状脉和角砾岩,也可以是在深就位侵入岩及其围岩中分布的席状脉、浸染状块体、云英岩块体和裂隙充填脉(图4)。席状脉和网状脉在走向上最大可延伸1千米左右,而独立的裂隙充填脉沿走向延长有时达几千米。根据矿化与相关侵入岩之间由近到远的空间关系,Hart 等(2000)将与侵入岩有关的金矿化系统划分为:① 侵入体为直接围岩的矿化,主要由含金的席状脉或网状脉组成,特征金属组合为 Au+ Bi±Te±W ±As;② 在接近侵入体的热变质晕内产出的矿化,主要由浸染状、云英岩型块体或裂隙充填脉在变质沉积岩内产出,特征金属组合为 Au±Cu±Bi±W;③ 远离侵入体的矿化,范围已超出热变质晕,主要以含金的沿断裂发育的剪切脉或热液角砾岩筒的形式在变质沉积岩内产出,特征金属组合为 Au+ As+ Sb+ Hg±Pb±Zn。

与侵入岩有关的金矿床以非常有限的围岩蚀变晕为特征,通常在矿脉的两边以狭窄的蚀变晕边出现,暗示了较低的流体量(Lang et al , 2001)。蚀变矿物一般由钠长石、钾长石、黑云母、绢云母、碳酸盐(白云石)、粘土矿物和少量的黄铁矿组成。一般说来,在浅部环境中产出的矿床以粘土和石英- 碳酸盐- 云母蚀变为特征,而在深部环境中产出的矿床以钠长石化和钾长石化更为常见(Baker et al , 2002; Hart et al , 2000)。高级泥化蚀变仅在玻利维亚多金属成矿带内的次火山岩矿床中发现(Thompson et al , 1999)。

在与侵入岩有关的金矿体系中,侵入体内部产出的金矿化金属矿物的含量一般小于3%,相比之下,在围岩中产出的矿化中金属矿物的含量明显增高,特别是在矿化晚期的碱金属脉和钙质围岩的交

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

代型矿体内(Lang et al, 2001)。金属矿物一般由自然金、黄铁矿、毒砂、斜方砷铁矿、磁黄铁矿、白钨矿、黑钨矿和少量的辉钼矿、辉铋矿、自然铋、黑铋金矿、铋华、碲铋矿、黄碲矿、辉锑铋矿、方铅矿、黄铜矿组成。在蚀变晕内的金属矿物以富毒砂、黄铁矿为特征, 缺乏铋, 碲和钨矿物。脉石矿物主要由石英和少量的绢云母、碱性长石、黑云母、方解石、电气石组成。金属元素组合随着矿化深度和距离侵入体远近的不同而有所差异。锑、砷、银和汞在浅部环境中常见; 钨、钼、铋和碲在深部环境中大量出现; 铜、铅和锌含量一般很低, 且铜在浅部环境中相对更高, 而铅和锌在远离侵入体的环境中更为富集(Baker et al, 2002)。Flanigan 等(2000b)对廷蒂纳成矿带内金矿床元素组合的系统研究表明, 金、铋和砷之间的关系最为紧密, 且铋、金之间的相关系数和Bi/Au 比值随着矿化深度由深到浅有规律的变小[r(Bi vs Au)从0.89变为0.12; Bi/Au 从31/1变为0.36/1], 而砷、金之间的相关性随着矿化深度由深到浅逐渐变大[r(As vs Au)从0.23到0.86]。

3.2　流体来源与演化过程

流体包裹体证据表明, 在与侵入岩有关的金矿床中, 金的沉淀温度和压力范围分别为< 200～> 600℃和< 50～> 300MPa(Lang et al, 2001)。进一步的研究结果表明(Baker et al, 2002), 与侵入岩有关金矿床的热液流体的类型随深度而呈现有规律的变化。浅部体系流体一般由高温(> 350℃)、不混溶的盐水(> 30% $NaCl_{eq}$)和低盐度(< 5% $NaCl_{eq}$)含CO_2包裹体组成, 与斑岩型铜—金体系的流体组成类似, 已为普遍接受的岩浆—热液演化模式所解释(Cline et al, 1991), 即富氯液相流体从长英质熔体中出溶后分解为不混溶的共存含盐晶液相包裹体和含CO_2气相包裹体。在一些接近地表的与侵入岩有关金矿体系中, 晚阶段常出现大量的低盐度液相包裹体, 表明在成矿晚期有大气降水的加入(Thompson et al, 1999)。深部体系流体大量出现低盐度(< 10% $NaCl_{eq}$)含CO_2流体包裹体, 与造山型金矿床的流体特征相似(Groves et al, 1998, 2003), 似乎表明了成矿流体的非岩浆成因。但最近大量实验表明(Baker et al, 2002), 在地壳深部的高压环境中, 长英质岩浆中首先出溶以CO_2为主的蒸气相, 而后的挥发分将更加富集H_2O, 当岩浆上升到一定的深度, 氯才从熔体中出溶进入液相中。因此, 含CO_2的长英质岩浆早期出溶低盐度的富含CO_2流体, 随后是更富氯的液相流体, 这与上述与侵入岩有关金矿体系中从深部到浅部的流体包裹体演化特征是一致的, 表明深部流体并不能排除岩浆来源的可能性。

不混溶现象在与侵入岩有关金矿流体体系中经常发生。但从图4可见, 与浅部流体体系不同的是, 深部流体体系不混溶形成低盐度的CO_2—H_2O 混合物, 而缺乏高盐度盐水。这可能归因于两种可能: ① 正与上文提到的那样, 深部长英质岩浆中出溶相主要为CO_2气相和H_2O 气相, 而氯只有到浅部环境中才能出溶; ② 与金矿有关的长英质岩浆一般含有大量的混染地壳组分, 这种岩浆具有很低的Cl/H_2O 比值(< 0.035), 从而限制了氯的含量供应, 不利于生成高盐度盐水(Baker et al, 2002)。从深部向浅部过渡的流体体系中, 晚阶段常出现不含CO_2的中高盐度包裹体, 可能与流体混合作用有关(图4; Lang et al, 2001)。

金在如此变化多端的流体体系中是如何富集和搬运的呢? 一般认为, 金主要与HS^-、Cl^- 或OH^- 结合形成稳定的络合物迁移(Stefansson et al, 2003)。不同深度产出的与侵入岩有关金矿床的金属元素搬运方式可能有所差异, 在深部体系中, 由于相对酸性、还原的环境和低盐度的流体, 金主要以对硫络合物的形式搬运; 而在浅部环境中, 由于高盐度卤水的出现(Cl^- 的增加引起), 氯的络合物对金属元素的搬运可能更为重要(Baker et al, 2002)。

3.3　区域和矿床规模的构造控制

与区域或局部应力框架有关的构造作用无疑对岩体和相关矿床的就位都至关重要, 但这方面的研究相对较为薄弱(Lang et al, 2001)。在廷蒂纳成矿带, 位于加拿大育空境内的一些金矿床位于地壳规模的NW 向廷蒂纳断裂北侧10km 范围内, 而同一成矿带沿廷蒂纳断裂的平行走滑部分金矿床及其岩体却受高角度的NE 向二级断裂控制(Flanigan et al, 2000a)。Robert 等(2001)报道了阿比提比绿岩带内与正长岩有关的金矿体系与地壳规模的变形带之间的密切关系, 这一变形带同时控制了后期造山型金矿床的展布。一般说来, 造山型金矿床形成于区域主挤压和转换扩张阶段的峰期变形变质事件中, 而大多数情况下与侵入岩有关的金矿化发生在区域规模的主挤压或转换阶段之后几到几十个百万年, 因此常晚于同一地区产出的造山型金矿床(Groves et al, 2003; Bierlein et al, 2005)。但有时候, 与侵入岩有关的金矿化也被证实早于区域主变形事件之前, 从而在形成时代上早于同一成矿省内的造山型

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

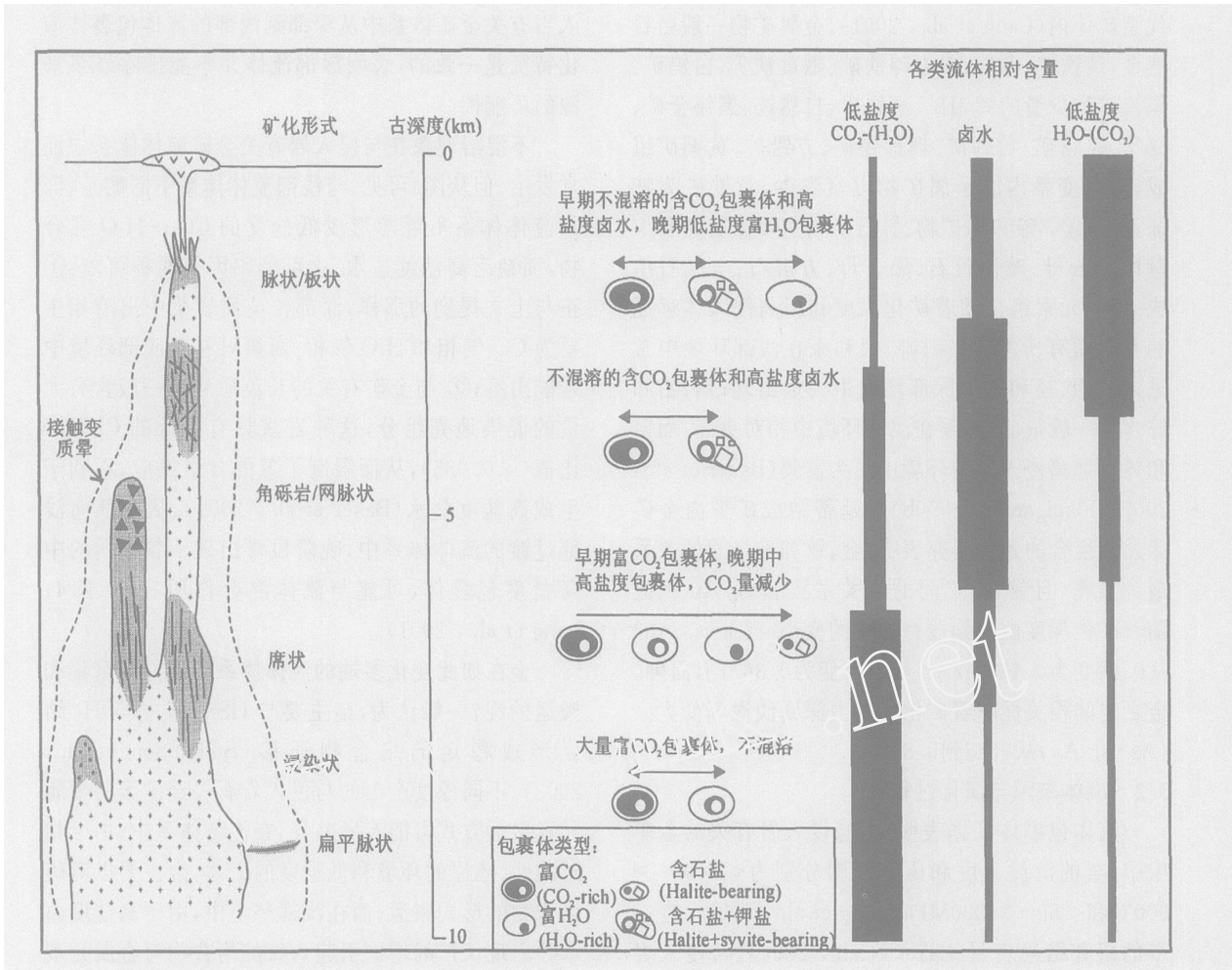

图4 与侵入岩有关金矿床的矿化方式、就位深度和热液流体类型之间的关系示意图(改自 Baker et al , 2002)

Fig. 4 Schematic map showing the relationship between intrusion-related gold styles, paleodepth, and hydrothermal fluid styles (after Baker et al , 2002)

金矿床(Robert et al , 2001)。

在矿床规模, 正与矿化方式的多样性所表现的那样, 与侵入岩有关的金矿化受多种构造样式控制。与造山型金矿化常以断裂带内剪切脉的方式产出不同的是, 与侵入岩有关的金矿化多以拉张的席状脉方式产出, 偶尔以网脉状或浸染状产出(Groves et al , 2003)。对育空地区汤泊斯通岩带内产出的几个与侵入岩有关金矿床的详细野外地质填图表明, 在侵入体内矿化常以东西向陡倾的扩张脉方式产出, 而在周围的变质沉积岩内金除了以东西向扩展脉产出以外, 还以细脉或角砾岩的方式在近乎直立的 NW —NWW 向左旋断裂内产出(Stephens et al , 2004)。另外, 尽管大多数与侵入岩有关金矿床形成时的温压条件达到韧性变形域, 但大多数矿体却主要在脆性变形的岩石内产出(Lang et al , 2001)。

4 未来研究中的主要问题

与侵入岩有关金矿床作为一个独立的金矿类型被加以研究, 还是近5年左右的事情, 因此有许多问题需要解决, 主要有: ① 正与 Groves 等(2003)指出的, 大多数造山型金矿床在时空上也总是与花岗质岩浆活动相伴, 因此并不能把金矿床与大规模的花岗质岩浆时空伴生作为辨别与侵入岩有关金矿床的标准。对于与侵入岩有关的金矿床来说, 强调成矿流体和金属在成因上都与特定的长英质岩浆活动密切相关, 这需要更多确定无疑的典例研究。② 有关的长英质岩浆的分异过程尚不明朗, 而这些分异过程影响着岩浆挥发分的行为、热液流体出溶以及金属运移机制等重大问题(Lang et al , 2001), 从而影响了与侵入岩有关金矿床的成因机制的解释。③ 对成矿流体的来源与演化过程的理解也制约了与侵入岩

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有关的金矿床成因的认识。毫无疑问, 含碳的成矿流体在金矿形成过程中发挥了重要的作用, 但迄今为止对其如何从地壳上部长英质岩浆中出溶的机制却很不清晰。④ 与侵入岩有关的金矿中金属元素的运移和沉淀机制需要更多实验岩石学方面的研究。

5　中国可能的与侵入岩有关的金矿床实例及前景

中国绝大多数金矿床都集中在华北、扬子和塔里木三个克拉通边缘及其附近的俯冲和碰撞造山带内, 金的成矿作用与海西、印支和燕山造山事件相吻合, 形成时代集中于450～270Ma, 270～208Ma 和208～90Ma 期间, 只有新疆北部的一些金矿床在此之前就已形成(Zhou et al , 2002)。中生代以来, 中国东部受大规模的岩石圈减薄作用引发的构造热事件的影响, 华北克拉通边缘大规模的燕山期花岗岩类侵入前寒武纪变质沉积岩地层中, 与此同时, 在克拉通边缘形成一条金镶边, 包括华北克拉通北缘金矿省、华北克拉通东南缘胶东金矿省、华北克拉通南缘东段小秦岭- 熊耳山金矿省。这些金矿床的容矿围岩差别较大, 在胶东金矿床以含金石英脉产于花岗岩、花岗闪长岩体内(玲珑式)或以构造破碎蚀变岩产于接触带内(焦家式); 在小秦岭金矿床以含金石英脉产于岩体之外的太古宙和元古宙变质沉积岩内; 而华北北缘的金矿床或直接产于花岗质岩体内外接触带中或产于前寒武纪变质岩中。虽然很多金矿床的成因还存在争论, 但鉴于金矿床与花岗质岩体之间密切的时空分布关系, 它们常被看作与侵入岩有关的金矿床(Thompson et al , 1999; Lang et al , 2001; Nie et al , 2004); 同时部分学者强调它们与造山期变质热液事件的密切关系, 而将其大部分划分为造山型金矿床(Zhou et al , 2002; Mao et al , 2002a; Mao et al , 2002b)。另外, 毛景文等(2005)在总结中国造山带内金属矿床类型及其特点时, 指出哀牢山金矿带内的一些金矿床, 如老王寨、金厂和大平等金矿床在成因上与长英质岩浆活动有关, 可能属于位于剪切带内与侵入岩有关的金矿床。陈毓川等(2001)在总结中国金矿床的成矿系列类型时, 划分出陆内断陷边缘与花岗岩有关的钨、锑、金成矿系列类型, 包括湘中- 湘西陆内断陷边缘与燕山期花岗岩有关的金、钨、锑、铅、锌矿床成矿系列和西秦岭川陕甘三角区陆内断陷边缘与印支- 燕山期岩浆作用有关的钨、锑、金、汞、砷矿床成矿系列, 典型矿床包括沃溪、漠滨、李坝、金山、马泉、双王等金矿床, 由于它们特征性的金属矿床组合以及与钙碱性侵入体密切的时空联系, 似乎表明它们应是与侵入岩有关的金矿床, 尽管其中很多金矿床的成因存在很大的争论(Mao et al , 2002b)。

由于与侵入岩有关的金矿床的一种重要特征就是与已知的W /Sn 成矿省重叠, 而中国境内W /Sn 矿床分布十分广泛。中生代以来, 受太平洋板块俯冲的影响, 在中国东部形成了很多具有特色的钨矿省, 它们有些与大规模的金矿省重叠, 暗示了中国具有寻找与侵入岩有关金矿床的广阔前景。这些Au/W /Sn 成矿省叠加区域往往伴随有大规模的燕山期钙碱性花岗质岩浆侵入活动, 是形成与侵入岩有关金矿床的有利地段, 如华南造山带的武夷- 云开构造带、三江造山带的哀牢山构造带、华北克拉通南缘的东秦岭构造带等。

参 考 文 献 / References

陈衍景, 秦善, 李欣. 1997. 中国夕卡岩型金矿的成矿时间、空间、地球动力学背景和成矿模式. 北京大学学报(自然科学版), 33(4): 456～466.

陈毓川, 李兆鼐, 毋瑞身, 等著. 2001. 中国金矿床及其成矿规律. 北京: 地质出版社.

侯增谦. 2004. 斑岩Cu—Mo—Au 矿床: 新认识与新进展. 地学前缘, 11(1): 131～144.

江思宏, 聂凤军, 张义, 胡朋. 2004. 浅成低温热液型金矿床研究最新进展. 地学前缘, 11(2): 401～411.

毛景文, 李晓峰, 李厚民, 曲晓明, 张长青, 薛春纪, 王志良, 余金杰, 张作衡, 丰成友, 王瑞廷. 2005. 中国造山带内生金属矿床类型、特点和成矿过程探讨. 地质学报, 79(3): 342～372.

Baker E M, Andrew A S. 1991. Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies of the gold-bearing breccia pipe at Kidston, Queensland, Australia. Economic Geology, 86: 810～830.

Baker T, Lang J R. 2001. Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada. Mineralium Deposita, 36: 563～582.

Baker T. 2002. Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits. Economic Geology, 97: 1111～1117.

Bierlein F P, McKnight S. 2005. Possible intrusion-related gold systems in the western Lachlan orogen, southeast Australia. Economic Geology, 100: 385～398.

Cline J S, Bodnar R J. 1991. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? . Journal of Geophysical Research, 96: 8113～8126.

Diment R, Craig S. 1998. Brewery Creek gold deposit, central Yukon. Yukon Exploration and Geology 1998, Exploration and Geological Services Division, Yukon Region, Indian and North Affairs Canada, pp: 225～230.

Doebrich J L, Zahony S G, Leavitt J D. 2004. Ad Duwayhi, Saudi Arabia: geology and geochronology of a Neoproterozoic intrusion-related gold system in the Arabian Shield. Economic Geology, 99: 713～741.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Flanigan B, Freeman C, McCoy D, Newberry R, Hart C. 2000a. Paleo-reconstructions of the Tintina gold belt- implications for mineral exploration. In: Tucher T L, Smith M T, eds. The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. British Columbia and Yukon Chamber of Mines Special Volume 2, 35～48.

Flanigan B, Freeman C, Newberry R, McCoy D, Hart C. 2000b. Exploration models for mid and Late Cretaceous intrusion-related gold deposits in Alaska and the Yukon Territory, Canada. In: Cluer J K, Price J G, Struhsacker E M, et al. (eds), Geology and Ore Deposits 2000: The Great Basin and Beyond: Geological Society of Nevada Symposium Proceedings, pp: 591～614.

Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geological time: a globle synthesis. Ore geology reviews, 18: 1～75.

Goldfarb R J, Ayuso R, Miller M L, Ebert S W, Marsh E E, Petsel S A, Miller L D, Bradley D, Johnson C, McClelland W. 2004. The late Cretaceous Donlin Creek gold deposit, Southwestern Alaska: Controls on epizonal ore formation. Economic Geology, 99(4): 643～671.

Cole A, Wilkinson J J, Halls C, Serenko T J. 2000. Geological characteristics, tectonic setting and preliminary interpretations of the Jilau gold—quartz vein deposit, Tajikistan. Mineralium Deposita, 35: 600～618.

Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore geology reviews, 13: 7～27.

Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, Hart C J R. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. Economic Geology, 98: 1～29.

Groves D I, Condie K C, Goldfarb R J, Hronsky J M A, Vielreicher R M. 2005. 100th anniversary special paper: secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits. Economic Geology, 100: 203～224.

Hart C J R, Baker T, Burke M. 2000. New exploration concepts for country-rock hosted intrusion-related Gold Systems: Tintina Gold Belt. In: Yukon British Columbia and Yukon Chamber of Mines Cordilleran Round Up, Special Volume 2, pp: 145～172.

Hart C J R, Goldfarb R J, Qiu Y M, Snee L, Miller L D, Miller M L. 2002. Gold deposits of the northern margin of the North China Craton: multiple late Plaeozoic—Mesozoic mineralizing events. Mineralium Deposita, 37: 326～351.

Hart C J R, Goldfarb R J, Lewis L L, Mair J L. 2004. The North Cordilleran Mid-Cretaceous plutonic provinces: ilmenite/magnetite-series granitoids and intrusion-related mineralisation. Resource Geology, 54(3): 253～280.

Hart C J R, Mair J L, Goldfarb R J, Groves D I. 2005. Source and redox controls on metallogenic variations in intrusion-related ore systems, Tombstone- Tungsten Belt, Yukon Territory, Canada. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 95(1～2): 339～356.

Hedenquist J W, Arribas R A, Gonzalez U E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits. Reviews in Economic Geology, 13: 245～277.

Lang J R, Baker T, Hart C J R, Mortensen J K. 2000. An exploration model for intrusion-related gold system. Society of Economic Geologist Newsletter, 40(1): 7～15.

Lang J R, Baker T. 2001. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. Mineralium Deposita, 36: 477～489.

Lowenstern J B. 2001. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems. Mineralium Deposita, 36: 490～502.

Malroof T L, Baker T, Thompson J F H. 2001. The Dublin Gulch intrusion-hosted gold deposits, Tombstone plutonic suite, Yukon Territory, Canada. Mineralium Deposita, 36: 583～593.

Mao J W, Goldfarb R J, Zhang Z W, Xu W Y, Qiu Y M, Deng J. 2002a. Gold deposits in the Xiaoqinling—Xiong'ershan region, Qinling Mountains, central China. Mineralium Deposita, 37: 306～325.

Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, Zhang Z C, Garwin S, Ren F S. 2002b. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the west Qinling belt, central China. Mineralium Deposita, 37: 352～377.

Marsh E E, Goldfarb R J, Hart C J R, Johnson C A. 2003. Geology and geochemistry of the Cleer Creek intrusion-related gold occurrences, Tintina Gold Provinces, Yukon, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 40(5): 681～699.

McCoy D T, Newberry R J, Layer P W, DiMarchi J J, Bakke A, Masterman J S, Minehane D L. 1997. Plutonic related gold deposits of interior Alaska. In: Goldfarb R J, Miller L D (eds) Ore deposits of Alaska. Society of Economic geologist Monograph, 9: 151～190.

Meinert L D. 1993. Igneous petrogenesis and skarn deposits. Geological Association of Canada, Special Paper, 40: 569～583.

Mustard R. 2001. Granite-hosted gold mineralization at Timbarra, northern New South Wales, Australia. Mineralium Deposita, 36: 542～562.

Nie F J. 1998. Geology and origin of the Dongping alkalic-type gold deposit, northern Hebei province, People's Republic of China. Resource Geology, 48: 139～158.

Nie F J, Jiang S H, Liu Y. 2004. Intrusion-related gold deposits of North China Craton, People's Republic of China. Resource Geology, 54(3): 299～324.

Phillips G N, Evans K A. 2004. Role of CO_2 in the formation of gold deposits. Nature, 429: 860～863.

Robert F. 2001. Syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt, Canada. Mineralium Deposita, 36: 503～516.

Rombach C S, Newberry R J. 2001. Shotgun deposit: granite porphyry-hosted gold—arsenic mineralization in southwestern Alaska, USA. Mineralium Deposita, 36: 607～621.

Selby D, Creaser R A, Hart C J R, Rombach C S, Thompson J F H, Smith M T, Bakke A A, Goldfarb R J. 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralization: a comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods from the Tintina Gold Belt, Alaska. Geology, 30(9): 791～794.

Selby D, Creaser R A, Heaman L M, Hart C J R. 2003. Re-Os and U-Pb geochronology of the Clear Creek, Dublin Gulch, and Mactung deposits, Tombstone Gold Belt, Yukon, Canada: absolute timing relationships between plutonism and mineralization. Canadian Journal of Earth Sciences, 40(12): 1839～1852.

Sillitoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper—gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

region. Australian Journal of Earth Science, 44: 373～388.

Sillitoe R H, Thompson J F H. 1998. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits. Resources Geology, 48 (4): 237～250.

Sillitoe R H. 2000. Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. Reviews in Economic Geology, 13: 315～345.

Smith M, Thompson J F H, Bressler J, Layer P, Mortensen J K, Abe I, Takaoka H. 1999. Geology of the Liese zone, Pogo property, east-central Alaska. Society of Economic Geologists Newsletter, 38: 1, 12～21.

Spiridinov E M. 1996. Granitic rocks and gold mineralization of North Kazakhstan. In: Shatov V, Seltmann R, Kremenetsky A, Lehmann B, Popov V, Ermolov P (eds), Granite-related ore deposits of central Kazakhstan and adjacent areas. Glagol Publishing House, St Petersburg, PP: 197～217.

Stefansson A, Seward T M. 2003. Stability of chloridogold (Ⅰ) complexes in aqueous solutions from 300 to 600℃ and from 500 to 1800bar. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67 (23): 4559～4576.

Stephens J R, Mair J L, Oliver N H S, Hart C J R, Baker T. 2004. Structural and mechanical controls on intrusion-related deposits of the Tombstone Gold Belt, Yukon, Canada, with comparison to other vein-hosted ore-deposit types. Journal of Structural Geology, 26: 1025～1041.

Thompson J F H, Sillitoe R H, Baker T, Lang J R, Mortensen J K. 1999. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten—tin provinces. Mineralium Deposita, 34: 323～334.

White N C, Leake M J, McCaughey S N, Parris B W. 1995. Epithermal gold deposits of the southwest Pacific. Journal of Geochemical Exploration, 54: 87～136.

Zacharias J, Pertold Z, Marta P K Z, Zak K, Pertoldova J, Stein H, Markey R. 2001. Geology and genesis of Variscan porphyry-style gold mineralization, Petrackova Hora deposit, Bohemian Massif, Czech Republic. Mineralium Deposita, 36: 517～541.

Zhou T H, Goldfarb R J, Phillips G N. 2002. Tectonics and distribution of gold deposits in China—— an overview. Mineralium Deposita, 37: 249～282.

Intrusion-related gold deposits: current understanding, outstanding problems, and perspectives in China

HU Peng, NIE Fengjun, JIANG Sihong

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

A new intrusion-related gold deposit type has been recognized recently throughout the world. The deposits usually situated in magmatic provinces near craton margins that are distal to active convergent plate margins, overlapping with known W/Sn provinces. The intrusion-related gold deposits have many consistent characteristics such as a diagnostic metal assemblages that combines Au with anomalous Bi, W, As, Te and Sb and typically low concentrations of base metals, and a spatial, temporal and genetic association with moderately reduced differentiated I-type intrusions. The deposits exhibit a range of characteristics that vary over a wide range of emplacement depths. Deposits in shallow crustal settings (< 5km) are associated with stocks, dikes and sills and include systems with epithermal-style veins to stockwork and breccia. Deposits in deeper settings (> 5km) are hosted by plutons containing sheeted veins, greissen and disseminated gold. Fluid characteristics also vary with depth. Deposits in shallow environments contain high-temperature (> 350℃), immiscible brine (> 30% $NaCl_{eq}$) and low-salinity (< 5% $NaCl_{eq}$) vapor that commonly contains carbon dioxide. Deposits in deeper environments contain abundant low-salinity, carbon dioxide-rich aqueous fluids (< 10% $NaCl_{eq}$) that, in some deposits, are postdated by moderate- to high-salinity brines (10%～40% $NaCl_{eq}$). Carbon dioxide plays an important role not only during exsolution of volatiles from felsic magmas but during the transportation of gold. The perspectives of intrusion-related gold deposits in China is tremendous, especially in favorable districts where gold provinces overlapped with W/Sn provinces in eastern China.

Key words: intrusion-related gold deposits; tectonic settings; magmatic settings; geological features; fluid; orogenic

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net