

造山带金矿研究现状与存在的问题

周 军¹, 祁世军²

(1. 长安大学 地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054; 新疆第二区域地质调查大队, 新疆 昌吉 831100)

[摘要] 造山带金矿是当前矿床学和大地构造学研究热点, Groves等(1998)、Goldfarb等(2001)基于太古“地壳连续模式”(Groves, 1993)的研究工作以涉及资料量大、应用成果新、考虑地质因素多而居于这一领域前沿。但是, 目前众多研究对前寒武地质与显生宙地质的宏观差异、世界金矿一些总体规律及若干具体大地构造背景等尚认识不足。显生宙缺乏太古代大规模火成活动, 已知金矿中很少同变质深成型(hypozonal), 以浅变质岩为围岩的金矿区中没有相当的中-深变质岩为围岩的金矿。“太古绿岩带”金矿区同样也缺乏浅变质岩为围岩的金矿。华北地块周边金矿主要形成在侏罗—白垩纪, 明显晚于大兴安岭造山带和秦岭-大别山造山带, 而与欧亚陆缘近南北向燕山期岩浆弧有关。距俯冲带较远、缺乏蛇绿混杂岩与大规模变质作用、发育大量中—新生代盆地及广泛地壳减薄等表明, 中国东部与北美科迪勒拉(Cordillera)造山带晚中生代地质存在宏观差异, 燕山期岩浆弧可能形成于一个以伸展为主导的环境, 大量以花岗岩为围岩或相对太古变质围岩后生成因金矿及其成矿的大地构造背景值得深入研究, 弄清各类显生宙金矿与造山带的关系是推进造山带金矿研究的关键。

[关键词] 造山带; 金矿; 太古代; 显生宙; 增生; 碰撞; 欧亚大陆; 燕山期

[中图分类号] P618.51; P548 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)02-0016-08

[作者简介] 周军(1957—), 男, 山东金乡人, 副教授, 博士, 现从事金矿地质、大地构造与区域成矿、GIS在地质中的应用等教学与科研工作。

1 概述

1906年, 美国著名矿床地质学家 W. Lindgren (1860~1939)在墨西哥城第10届国际地质大会上公布了“成矿与物理条件关系”的研究新成果^[1]。经过20余年进一步探索, 于1933年在其第4版矿床学中提出一个将作用方式、介质环境、成矿动力与温压条件相结合的矿床分类方案^[2], 并综合考虑深度、围岩、物质来源等诸多因素。这是迄今最具影响力的矿床分类方案之一, 其中的“低温”(epithermal, 50℃~200℃)、“中温”(mesothermal, 200℃~300℃)与“高温”(hypothermal, 300℃~500℃)热液矿床划分沿用至今。

在对当今一些代表性金矿及其成矿省研究与大量资料分析的基础上, 结合大地构造背景认识, Groves和Goldfarb等1998年补充前人类概念提出

造山带金矿(orogenic gold deposits)^[3], 建议用反映地壳深度的新术语“浅成带”(epizonal; 成矿深度≤6 km以内, 温度150℃~300℃)、“中成带”(mesozonal; 6~12 km, 300℃~475℃)、“深成带”(hypozonal; >12 km, 超过475℃)来描述过去被归类为“中温”热液的大量金矿。主要因为这些金矿的实际温度范围超出Lindgren(1933)所定义的区间(200℃~300℃), 在大地构造背景、矿床地球化学等方面却体现出较大的一致性, 并明显不同于与火山岩有关的低温热液矿床、以沉积岩为围岩的卡林型(Carlin)金矿以及斑岩型与矽卡岩型多金属矿床等。

上世纪60年代以来, 随着板块构造理论的广泛接受, 矿床分类中常考虑大地构造因素^[4], 从板块构造角度研究成矿或从矿床学角度诠释板块构造均不鲜见^[5]。与先前研究相比, Groves等(1998)^[3]的金矿分类综合了近20年来世界主要产金国金矿与大地构造研究新认识, 涉及较多因素(地质、地球化学、大地构造背景、地壳环境等)与大量金矿实例, 是现代金矿研究中的重要成果^[6]。我

国产于华北地块周边的众多金矿(例如东坪、小秦岭、胶东金矿等)均被归类为造山带金矿^[3, 7~10]。然而其中尚存在着许多问题, 就此展开讨论, 旨在将有关研究推向深入。

2 当代造山带金矿划分的理论基础——地壳连续模式

上述造山带金矿分类的理论基础是 Groves 等(1992; 1993)对澳大利亚西部 Yilgarn 地块太古代岩金(Archaeal lode)长期矿床学研究所提出的地壳连续模式(crustal continuum model)^[11, 12]。该模式显示, Yilgarn 地块的新太古代岩金在矿物组合(矿石与脉石)、蚀变类型、围岩种类、构造性质、地球化学特征等方面呈现出一定的连续变化趋势, 表明这些金矿形成在地壳数千米至大于 20 km 的深度范围内, 对应的温压区间分别为 180 °C~700 °C、($<1\ 000\sim5\ 000$) $\times 10^5$ Pa。产于加拿大等地“太古绿岩带”中的岩金亦有类似情况。例如, 金矿围岩的变质程度从次绿片岩相(sub-greenschist facies)经绿片岩相到角闪岩相和低麻粒岩相(但以绿片岩相为主), 含矿构造性质大体上由脆性经脆韧性过渡到韧性, 矿物组合、蚀变类型等其他特征也发生相应变化。

Groves 等(1998)归类为造山带金矿的主要是以变质岩为围岩的矿床^[3], 包括北美科迪勒拉(Cordillera)和俄罗斯远东许多晚中生代金矿, 产于南非、加拿大、津巴布韦、澳大利亚等世界著名“太古绿岩带”的金矿, 以及加拿大新斯科舍(Nova Scotia)、澳大利亚维多利亚(Victoria)古生代浅变质围岩的金矿(通常称之为“浊积岩围岩”或“板岩带”型金矿^[13, 14])和乌兹别克斯坦的穆龙套金矿, 我国胶东半岛以晚中生代花岗岩为主要围岩的金矿也在其中^[15, 16]。

从上述金矿中所识别的一些共性及其温压条件所反映的成矿深度是归类的重要依据^[3], 例如, 形成于会聚板块边缘增生与碰撞造山带的挤压至走滑挤压(transpressional)变形作用中, 以变质岩中石英脉型为主, 成矿热液以低盐度 $w(\text{NaCl})=3\%\sim10\%$ 、富 $x(\text{CO}_2)\geq 5\%$ 为特征, 有用组分中贫 Cu, Pb, Zn 且高 Au/Ag 比(1~10), 成矿温度区间较大(200 °C~700 °C)等等。这些特征总体有别于形成于弧后拉张环境和地壳浅部(例如卡林型)、矿液高盐度、矿石富贱金属(例如斑岩与矽卡岩型)以及产于海底(例如火

山块状硫化物 VMS)的其他金矿。

3 宏观依据及主要意义

近年来, 同位素高精度测年(例如 SHRIMP)在大地构造中的应用及构造地层(tectonostratigraphic)、生物地理(biogeographic)、古地磁等方面的研究进展, 对罗丁(Rodinia)^[17, 18]、劳伦(Laurentia)^[19, 20]、泛大陆(Pangea)与冈瓦纳(Gondwana)^[21, 22]等古大陆的形成与裂解产生许多新认识。与此同时, 世界主要金矿省同位素年龄数据和造山带研究资料的大量积累进一步为再造全球大地构造演化、总结宏观成矿规律提供了可能。

Goldfarb 等(2001)^[7]就是基于这一事实将世界造山带金矿的形成确定为新太古代(2.8~2.55 Ga)、古元古代(2.1~1.8 Ga)、显生宙三个主要时期, 中一新元古代(1.6 Ga~570 Ma)为弱成矿期。前寒武以“幕式”(episodically)成矿为特征。显生宙则呈现连续矿化, 金产量加储量估计超过 10 亿盎司($>31\ 103\ \text{t}$), 约为前寒武岩金的 2 倍(不包括成因有争议的南非 Witwatersrand 金矿)。大地构造上, 用全球范围内以伸展为主导的背景(例罗丁古大陆的裂解)解释中一新元古代弱成矿的原因, 并从宏观上概略地将古生代成矿与泛大陆、劳伦和冈瓦纳的演化、中生代以来成矿与科迪勒拉式造山或现代板块机制等联系起来。

Groves(1998)^[3]、Goldfarb(2001)^[7]等人所提出的造山带金矿, 虽然尚缺乏具体机制研究, 用于揭示金矿垂向成因关系的地壳连续模式由平面上相距很远(数百千米)的一些金矿组合而成(实际中未发现连续变化剖面)^[12], 其意义仍然十分重要, 因为一些宏观证据显示出金矿成矿与造山带或板块构造的某些内在关系, 这是过去几十年中矿床地质学家与大地构造学家所共同致力研究的课题^[5, 23], 而 Groves、Goldfarb 等人的工作以其较为翔实的资料处于目前这一领域的前沿。

4 问题与讨论

4.1 模式本身的矛盾与不足

众所周知, 金矿根据成因可分为两大类, 即岩金与砂金, 考虑有用组分岩金又可分为单一金(Au-only)和伴生金(co- or by-product)^[24], 我国学者通

常将后者进一步细分为“伴生金”(associated)与“共生金”(paragenetic)^[25]。Groves 等(1998)^[3]所谈到的造山带金矿的一些特征(高 Au/Ag 比、矿液低盐度、富 CO₂ 等)实际为单一金的重要标志,被划为“非造山带金矿”的卡林型等其他一些金矿同样具备这些特征^[24]。

Groves(1993)^[12]主要以围岩变质相和矿脉矿物共生组合与围岩蚀变类型反映金矿的形成深度,所列举的典型造山带金矿也主要是变质岩为围岩的金矿^[3]。世界太古代岩金主要产于绿片岩相变质岩中,金矿的形成温度为 250 °C ~ 350 °C^[26];浅变质岩围岩的板岩带金矿(slate belt)主要分布在加拿大的新斯科舍和澳大利亚的维多利亚,是世界重要产金类型,其成矿温度为 (300 ± 50) °C^[14]。显然,这两类围岩变质程度不同的金矿形成在相同的温度条件下,依据围岩变质相与依据成矿温度所得出的二者之形成深度不尽一致。更为重要的是,在“太古绿岩带”中缺乏“板岩带”型浅变质岩为围岩的金矿^[26-28],在古生代浅变质岩的板岩带金矿分布区则缺乏“太古绿岩带”的中-深程度变质岩为围岩的金矿^[29,30]。不言而喻,Groves(1998)^[3]、Goldfarb(2001)^[7]等人所定义的深度有成因联系的“造山带金矿”实际上主要是一些在时间上(成矿年龄相差很大:太古-新生代)和空间上(地域上相距遥远:金矿分布在世界各地)不相关的金矿床,而模式本身缺乏应有的时空分析。

Groves 等(1998)^[3]在造山带金矿成矿中提及岩浆作用,这可能是将胶东半岛以晚中生代花岗岩为主要围岩的金矿包括其中的原因。Groves(1993)^[12]在分析成矿热液来源中也肯定了深熔花岗岩因素(尽管尚未发现与成矿同期花岗岩),并且确定以角闪岩相与麻粒岩相变质岩为围岩的金矿基本与区域变质同期、而以绿片岩相变质岩为围岩的金矿成矿滞后。事实上,不肯定岩浆岩和成矿的可能关系,就无法将中国华北地块周边以太古代中-深程度变质岩为围岩的金矿(例如小秦岭金矿)归入其所定义的造山带金矿,因为这些金矿形成温度与上述“太古绿岩带”金矿和“板岩带”金矿接近^[31-33],而远低于围岩变质相的温度,否则会出现依据围岩温度属“深成带”、依据矿脉温度属“浅成带”或“中成带”的矛盾。然而,Groves 等(1998)^[3]并未对这种既包括与岩浆岩有关的金矿又包括与变质岩有关的金矿之成矿深度模式做必要的探讨。

对于与岩浆岩有成因联系的矿床而言,成矿温度的高低很大程度上取决于距火成岩的远近而不一定与深度成正比。形成于较浅部位的斑岩型与矽卡岩型矿床可有较高的成矿温度即为一很好例证,这实际上就是 Graton 于 1933 年在 Lindgren 的热液矿床分类中增加“远温”(telethermal)和“亚中温”(leptothermal)^[34]、Buddington 在 1935 年增加“浅成高温”(xenothermal)^[35]的原因。Sillitoe 和 Thompson(1998)^[36]也注意到类似问题,他们将胶东玲珑金矿和河北东坪金矿归类为与侵入岩有关的(intrusion-related)石英脉型金矿,并指出“造山带金矿”在很多特征上与侵入岩有关的金矿重叠。

Groves 等(1998)^[3]、Goldfarb 等(2001)^[7]在很大程度上忽视了前寒武地质与显生宙地质的可能差异。世界上保存着许多发育完好的显生宙造山带,例如澳大利亚的古生代塔斯曼(Tasman)造山带^[37](包括盛产“板岩带”金矿的 Lachlan 褶皱带)、北美的古生代阿巴拉契亚(Appalachian)造山带^[38](包括盛产“板岩带”金矿的新斯科舍)和中-新生代科迪勒拉造山带^[39,40]、中国的古生代大兴安岭-天山造山带^[41,42]和古-中生代秦岭-大别山造山带^[43,44],但均缺乏有关与中-深程度变质岩同生成因而能够归入“深成带”的金矿报道。至少可以说,在“太古绿岩带”中颇具经济规模的“深成带”金矿^[45]并非一个贯穿所有地质时期均较为重要的金矿类型,这自然就使得将太古代“地壳连续模式”应用于显生宙金矿的正确性受到质疑。

4.2 缺乏对大地构造演化复杂性的认识

造山带主要有两种形式^[46,47],即陆缘增生造山带(accretionary)与陆-陆碰撞造山带(collisional),前者和洋块向陆块俯冲有关,后者是两陆块间大洋最终消失的产物。Groves 等(1998)^[3]虽然论及这一区别,实际上却将造山带金矿主要归因于陆缘增生(accreted terranes)或洋块俯冲,并忽略了有关的具体大地构造背景(例如岛弧、弧前盆地)以及陆块和火山弧、仰冲片(obducted flake)、海山(seamount)、微陆块等碰撞所导致的变质、变形、岩浆活动^[48]对成矿的影响。陆-陆碰撞(或 A-subduction)也涉及大规模地壳缩短、逆冲推覆、走滑断裂、回返期伸展构造和有关的变质作用、岩浆活动等众多地质现象^[47,48],它们从属于造山带的不同发展阶段或程度不同地发育于造山带的不同部位,相关的成矿作用必然是一个复杂体系,简单地用“地壳

连续模式”进行概括存在明显不足。

现实中金矿与造山带的关系往往复杂的多。Mao 等(2002)^[49]认为西秦岭、松潘-甘孜地块东北角广泛分布的以碳质板岩为围岩的金矿与卡林型金矿可比并将其与造山带金矿相联系,这一研究结论值得商榷。其一,微细粒金(disseminated 或 impregnated)并非卡林型金矿独有,实际在与沉积岩有关的金矿中常见。卡林型金矿金的粒度范围 $<5\sim30\mu\text{m}$ ^[50],而澳大利亚维多利亚“板岩带”金矿中亦有大量 $<30\mu\text{m}$ 的微细粒金^[51]。其二,Hg,As,Sb 等伴生组分或辰砂、辉锑矿、雄黄、雌黄等矿物也不能做为鉴别卡林型金矿的主要标志,“板岩带”金矿中同样广泛存在着含 As 矿物并有大量伴生 Sb^[14]。其三,围岩条件、大地构造背景与上述两特征一起才是识别卡林型金矿的重要依据。卡林型金矿的围岩主要为含碳粉砂质白云岩或石灰岩、含碳酸盐岩的粉砂岩^[52,53]及钙质石英岩和页岩^[50],以产出于弧后拉张环境为特征^[3]。Mao 等(2002)^[49]认为与卡林型金矿可比的那些金矿主要以中三叠统碳质板岩为围岩(尽管与“板岩带”金矿类似矿区也存在着碳酸盐岩)^[54],属于和“板岩带”金矿围岩类似的复理石或浊积岩建造^[55],大地构造背景以挤压为主^[56],与我国黔西南卡林型金矿明显不同^[57,58],因而被 Zhou 等(2000)^[16]归类为“板岩带”金矿。然而,即使如此,这些金矿与造山带的关系也远不象一般理解的那样简单。从时间上讲,西秦岭缝合带闭合在晚三叠纪^[59],区内分布的中酸性侵入岩年龄为晚三叠—早侏罗纪^[56,60],区域成矿却可以从第三纪追溯到早古生代^[61]。从空间上看,类似金矿横跨西秦岭(例如李坝、拉尔玛或拉日玛金矿)与松潘-甘孜(例如东北寨、马脑壳、联合村金矿)两个大地构造单元,赋矿围岩年龄主要为寒武纪(拉尔玛、牙相等)^[61,62]、泥盆纪(双王、二台子、李坝、八卦庙、联合村等)^[63~66]和三叠纪(东北寨、马脑壳等)^[66,67],黑色岩系对成矿有一定控制^[54,61,65]。因此,区域成矿实际为一穿时复杂过程,从黑色岩系的形成(寒武、泥盆、三叠纪),经晚三叠—早侏罗纪与造山有关的大规模地壳缩短、推覆、变质、岩浆活动,到受印度-欧亚板块碰撞影响的强烈改造^[55,56,68],与大量同位素年代记录相对应($421\sim<47\text{Ma}$)^[61,62,65,69,70]。晚三叠纪造山之后的燕山期、喜马拉雅期成矿也在这一区域留下显著印记,例八卦庙($131.91\pm0.89\text{Ma}$,Ar-Ar 坪

年龄)^[65]、拉尔玛($421\sim<47\text{Ma}$,石英流体包裹体 Rb-Sr 等时,Ar-Ar,蚀变岩 K-Ar)^[61,62]、马脑壳(46Ma ,Rb-Sr)^[69]等金矿。

应用现代板块机制研究“太古绿岩带”成因业已存在许多有益尝试^[71],但这仍然是一个颇具争议的领域。一些学者注意到太古代地质与显生宙地质间存在着宏观差异^[72],例如,太古代岩层缺乏双变质带、蛇绿岩与蓝闪石片岩而显生宙岩层则缺乏大规模超镁铁-镁铁质岩(例如科马提岩)及广泛的基性-中酸性岩浆岩。事实上,前面提到的众多世界主要显生宙造山带(例如塔斯曼、秦岭-大别山)中均没有“太古绿岩带”那样壮观的火成活动。此外,纵然在现代板块机制下,不同板块体制中的岛弧、弧前或弧后盆地、火山弧、增生楔、洋块俯冲角和运动速率等发育情况也有很大差异^[48,71],西太平洋就远较东太平洋弧后盆地发育的多。因此,破解金矿与造山带关系的重大进展可能还有赖于对显生宙金矿及造山带的深入研究。

4.3 中国东部金矿主要成矿时代及大地构造背景

我国东部横亘着两条近东西走向的古缝合带,构成现今已成为欧亚大陆一部分的华北地块之南北界。北边的大兴安岭缝合带闭合于晚古生代^[41,81],南边的秦岭-大别山缝合带的缝合时间虽颇具争议,但三叠纪为其年龄上限^[44,82]。华北地块周边金矿主要形成在燕山期(表 1),明显晚于和上述两缝合带有关的造山运动,这实际也是整个中国东部大规模成矿的时间,一般与欧亚大陆边缘近南北走向的燕山期巨型岩浆弧(以酸性火山岩、侵入岩为主)相联系^[83~85]。

表 1 华北地块周边金矿主要成矿年龄

Table 1 Ages of the gold deposits in the margin of the North China Block			
华北地块中的位置	金矿区或省	成矿年龄/Ma	方法
南缘	小秦岭	182~77	脉岩、矿脉蚀变岩 K-Ar 法及矿脉与脉岩的切穿关系。
东缘	胶东半岛	126~120; 121.3 \pm 0.2	花岗岩及成矿后脉岩 SHRIMP 锆石 U-Pb; 矿脉绢云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar。
	辽南五龙金矿	195	与矿脉伴生、控制矿脉年龄下限的闪长岩脉 K-Ar。
北缘燕山带西—中—东	哈达门沟(西)、东坪(中)、安家营子(东)	132 \pm 2; 204.17~169.62; 132~(122 \pm 1)	蚀变岩 SHRIMP 锆石 U-Pb; 钾长石 K-Ar 围岩花岗岩黑云母 K-Ar、Rb-Sr 及切矿脉脉岩全岩 Rb-Sr 等时线。
	夹皮沟金矿区二道沟金矿	161	含金石英脉中钾长石 K-Ar 等时线。

中国地质学家命名并深入研究的燕山运动 (Yanshanian Orogeny) 是晚侏罗—早白垩纪北部 Mongol-Okhotsk 缝合带^[86] 闭合与东部太平洋板块向欧亚板块俯冲的反应^[87, 88], 但狭义的燕山造山带或褶皱带仅限于华北地块东北缘^[89] 或北缘^[88]。一般将燕山运动广泛影响的中国东部地区与北美科迪勒拉活动大陆边缘相比^[84], 但确切的大地构造背景尚缺乏细致研究。一些学者认为小秦岭金矿与“变质核杂岩”(metamorphic core complexes) 有一定成因联系^[90, 91], 这一伸展构造的产物在其研究发祥地北美科迪勒拉形成于第三纪 (55 ~ 15 Ma)^[39], 从 Groves 等 (1998)^[3] 的统计看, 仅一例金矿 (阿拉斯加的 Chugach, 成矿 57 ~ 49 Ma, 变质作用 66 ~ 50 Ma) 可能与之有关。北美科迪勒拉的众多金矿形成于侏罗—白垩纪^[3], 与中国东部的成矿时代接近。然而从宏观上看, 中国东部至少在下述 4 个方面与北美科迪勒拉造山带晚中生代地质存在着显著差异:

(1) 总体距俯冲带较远。约 400 ~ 600 km 宽的燕山期岩浆弧之东缘到台湾东侧俯冲带的最小距离目前为 350 km, 虽然一些学者认为中国东南沿海沿丽水—海丰断裂存在一缝合带^[86, 92], 但更新的研究表明晚中生代太平洋板块的俯冲带应位于台湾东侧^[48, 93]。该岩浆弧东缘至日本俯冲带的当前最近距离约 1 200 km。

(2) 缺乏科迪勒拉蛇绿混杂岩、大规模的逆冲推覆与广泛的变质作用^[40, 48]。中国东部有限的晚中生代变质作用主要发育于东南沿海一带^[94], 缺少大范围中基性火山岩^[83, 84] 亦排除了处于岛弧环境的可能。

(3) 发育有大量中—新生代盆地^[95, 96]。

(4) 相对中西部中—新生代出现广泛地壳减薄^[92, 97]。

上述特征表明, 中国东部地区晚中生代即大致处在一个与弧后盆地类似的以伸展为主导的环境, 相关的造山作用很可能与 Collins (2002)^[98] 所提出的“拉张增生造山带”相似, 无论金矿成因还是大地构造背景都可能与“太古绿岩带”乃至其他显生宙活动大陆边缘存在差异, 这的确是一个值得注意并应该深入研究的问题。

[参 考 文 献]

- [1] Graton L C. Lindgren's ore classification after fifty years [A]. In: Ridge, J D (ed.) Ore Deposits of the United States, 1933 ~ 1967, Volume II [C]. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York, 1968. 1703 ~ 1712.
- [2] Lindgren W. Mineral Deposits [M]. McGraw-Hill Book Company, INC., New York and London, 1933. 547 ~ 551.
- [3] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposits types [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 7 ~ 27.
- [4] Guilbert J M and Park C F Jr. The Geology of Ore Deposits [M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1986. 985.
- [5] Sawkins F J. Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics [M]. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984. 281.
- [6] 陈柏林. 金矿床和金成矿作用研究进展 [J]. 地质论评, 2001, 47(1): 111 ~ 112.
- [7] Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis [J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18: 1 ~ 75.
- [8] Jiang N and Zhu Y F. Geology and genesis of orogenic gold deposits Xiaolinling District, Southeastern China [J]. International Geological Review, 1999, 41: 816 ~ 826.
- [9] Qiu Y, Groves D I, McNaughton N J, et al. Nature, age, and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China [J]. Mineral. Deposita, 2002, 37: 283 ~ 305.
- [10] Mao J W, Goldfarb R J, Zhang Z W, et al. Gold deposits in the Xiaolinling-Xiongershan region, Qinling Mountains, central China [J]. Mineral. Deposita, 2002, 37: 306 ~ 325.
- [11] Groves D I, Barley M E, Bamicoat A C, et al. Sub-greenschist to granulite-hosted Archaean lode-gold deposits of the Yilgarn Craton: a depositional continuum from deep-sourced hydrothermal fluids in crustal-scale plumbing systems [J]. Geology Department (Key Centre) and University Extension, The University of Western Australia Publication, 1992, 22: 325 ~ 337.
- [12] Groves D I. The crustal continuum model for late-Archaean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia [J]. Mineral. Deposita, 1993, 28: 366 ~ 374.
- [13] Boyle R W. Gold deposits in turbidite sequences: their geology, geochemistry, and history of the theories of their origin [A]. In: Keppie J D, Boyle R W and Haynes S J (eds.) Turbidite-hosted Gold Deposits [C]. Geological Association of Canada, Newfoundland, 1986. 1 ~ 13.
- [14] Phillips G N and Hughes M J. The geology and gold deposits of the Victorian gold province [J]. Ore Geology Reviews, 1996, 11: 255 ~ 302.
- [15] 周军, 刘建朝, 王瑞腾, 等. 胶东金矿省成矿作用初析 [J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(3): 1 ~ 9.
- [16] Zhou J, Flood P G and Li W. Gold grade and tonnage models of the gold deposits, China [J]. Resource Geology, 2000, 50: 53 ~ 64.

- [17] Powell C M, Preiss W V, Gatehouse C G, et al. South Australian record of a Rodinian epicontinental basin and its mid-Neoproterozoic breakup (~ 700 Ma) to form the Palaeo-Pacific Ocean[J]. *Tectonics* 1994, 237: 113~140.
- [18] Li Z X, Zhang L and Powell C M. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences* 1996, 43: 593~604.
- [19] Dalziel I W D, Mosher S and Gahagan L M. Laurentia-Kalahari collision and the Assembly of Rodinia[J]. *Journal of Geology*, 2000, 108: 499~513.
- [20] Burrett C and Berry R. Proterozoic Australia-Western United States (AUSWUS) fit between Laurentia and Australia[J]. *Geology*, 2000, 28: 103~106.
- [21] Burrett C, Long J and Stait B. Early-Middle Palaeozoic biogeography of Asian terranes derived from Gondwana[A]. In: McKerrow W S and Scotese C R (eds.) *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography* [C]. Geological Society Memoirs 1990, 12: 163~174.
- [22] Metcalfe I. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys[J]. *Australian Journal of Earth Sciences* 1996, 43: 605~623.
- [23] Guild P W. Metallogeny: A key to exploration [J]. *Mining Eng.*, 1971, 23: 69~72.
- [24] Phillips G N and Powell R. Link between gold provinces [J]. *Econ. Geol.*, 1993, 88: 1084~1098.
- [25] 丁俊华, 许文渊, 吴厚泽. 中国伴生金矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1~8.
- [26] Groves D I, Ho S E, McNaughton N J, et al. Genetic models for Archaean lode-gold deposits in Western Australia[A]. In: Ho S E and Groves D I (eds) *Advances in Understanding Precambrian Gold Deposits*, vol. II, Publ. 12[C]. Geol. Dept. and Univ. Extension, Univ. West. Aust., Perth, 1988. 1~22.
- [27] Colvine A C, Fyon J A, Heather K B, et al. Archaean Lode Gold Deposits in Ontario[M]. Ontario Geological Survey, Ontario, 1988. 139.
- [28] Groves D I and Foster R P. Archaean lode gold deposits[A]. In: Foster R P (ed.) *Gold Metallogeny and Exploration* [C]. Blackie, Glasgow London, 1991. 63~96.
- [29] Kontak D J, Smith P K, Reynolds P and Taylor K. Geological and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronological constraints on the timing of quartz vein formation in Meguma Group lode-gold deposits Nova Scotia[J]. *Atlantic Geology*, 1990, 26: 201~227.
- [30] Ramsay W R H and VandenBerg A H M. Lachlan fold belt in Victoria: regional geology and mineralisation[A]. In: Hughes F E (ed.) *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea Volume I* [C]. Australian Institute of Mining and Metallurgy, Parkville, 1990. 1269~1273.
- [31] 黎世美, 瞿伦全, 苏振邦, 等. 小秦岭金矿地质和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 93~110; 162~181.
- [32] 银剑钊, 史红云. 张家口—宣化地区金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1995. 81~88; 100~101.
- [33] 胡受奚, 赵麟英, 徐金方, 等. 华北地台金矿成矿地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 142~145.
- [34] Graton L C. The depth-zones in ore deposition[J]. *Econ. Geol.*, 1933, 28: 513~555.
- [35] Buddington A F. High-temperature mineral associations at shallow to moderate depths[J]. *Econ. Geol.*, 1935, 30: 205~222.
- [36] Sillitoe R H and Thompson J F H. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits[J]. *Resource Geology*, 1998, 48: 237~250.
- [37] Veevers J J. Phanerozoic earth history of Australia[M]. Clarendon Press, Oxford, 1984. 270~350.
- [38] Ritcey D H, Wilson M R and Dunning G R. Gold mineralization in the Paleozoic Appalachian Orogen: constraints from geologic U/Pb, and stable isotope studies of the Hammer Down Prospect, Newfoundland[J]. *Econ. Geol.*, 1995, 90: 1955~1965.
- [39] Coney P J. Cordilleran metamorphic core complexes: an overview [A]. In: Crittenden M D, Coney P J and Davis G H (eds) *Cordilleran Metamorphic Core Complexes* [C]. Geological Society of America, INC., Boulder, 1980. 7~31.
- [40] Rubin C M, Saleeby J B, Cowan D S, et al. Regionally extensive mid-Cretaceous west-vergent thrust system in the north-western Cordillera: implications for continent-margin tectonism [J]. *Geology*, 1990, 18: 276~280.
- [41] Tang K D and Yan Z Y. Regional metamorphism and tectonic evolution of the Inner Mongolian suture zone[J]. *J. metamorphic Geol.*, 1993, 11: 511~522.
- [42] Allen M B, Windley B F and Zhang C. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia [J]. *Tectonophysics* 1992, 220: 89~115.
- [43] Mattauer M, Matte Ph, Malavielle J, et al. Tectonics of the Qinling Belt: build-up and evolution of eastern Asia[J]. *Nature*, 1985, 317: 496~500.
- [44] Ames L, Tilton G R and Zhou G. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 1993, 21: 339~342.
- [45] Mueller A G and Groves D I. The classification of Western Australia greenstone-hosted gold deposits according to wall-rock-alteration mineral assemblages[J]. *Ore Geology Reviews*, 1991, 6: 291~331.
- [46] Windley B F. Proterozoic collision and accretionary orogens [A]. In: Condie K C (ed) *Proterozoic Crustal Evolution* [C]. Elsevier, Amsterdam, 1992. 419~446.
- [47] Condie K C. *Plate Tectonics and Crustal Evolution*, Fourth Edition [M]. Butterworth-Heinemann, Oxford Boston Johannesburg Melbourne New Delhi Singapore, 1997. 92~96.
- [48] Howell D G. Tectonics of Suspect Terranes Mountain Building and Continental Growth[M]. Chapman & Hall, London New York, 1989. 22~51; 80~120; 157~199.
- [49] Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, et al. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the western Qinling belt, central China[J]. *Mineral. Deposita* 2002, 37: 352~377.

- [50] Boyle R W. Gold deposits in turbidite sequences: their geology, geochemistry, and history of the theories of their origin [A]. In: Keppie J D, Boyle R W and Hayness S J (eds) Turbidite-hosted Gold Deposits [C]. Geological Association of Canada Newfoundland, 1986. 1~13.
- [51] Hughes F E (ed.) Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea Volume I [M]. Australian Institute of Mining and Metallurgy, Parkville, 1990. 1269~1318.
- [52] Bengier B R and Bagby W C. The geology and origin of Carlin-type gold deposits [A]. In: Foster R P (ed.) Gold Metallogeny and Exploration [C]. Blackie, Glasgow London, 1991. 210~244.
- [53] Hofstra A H, Daly W E, Birak D J and Doe T C. Geological framework and genesis of Carlin-type gold deposits in the Jerritt Canyon district, Nevada, USA [A]. In: Ladeira E A (ed.) Brazil Gold '91 [C]. A. A. Balkema Publishers, Rotterdam Brookfield, 1991. 77~87.
- [54] 李小壮. 四川省东北寨金矿床 [A]. 寸玉圭 陈纪明. 中国典型金矿床 [C]. 北京: 地质出版社, 1995. 431~439.
- [55] Chang E Z. Geology and tectonics of the Songpan-Ganzi Fold Belt, southwestern China [J]. International Geology Review, 2000, 42: 813~831.
- [56] Mattauer M, Malavieille J, Calassou S, et al. The Songpan-Garze Triassic belt of west Sichuan and eastern Tibet: a decollement fold belt on passive margin [J]. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 314, Série II, 1992. 619~626.
- [57] 李文亢, 姜信顺, 具然弘, 等. 黔西南微细金矿床地质特征及成矿作用 [A]. 沈阳地质矿产研究所. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1989. 1~85.
- [58] Ashley R P, Cunningham C G, Bostick N H, et al. Geology and geochemistry of three sedimentary rock-hosted disseminated gold deposits in Guizhou Province, People's Republic of China [J]. Ore Geology Reviews, 1991, 6: 133~151.
- [59] Meng Q R and Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China [J]. Tectonophysics, 2000, 323: 183~196.
- [60] 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 秦岭—大别山花岗岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1993. 11~36.
- [61] 陈好寿, 周肃, 魏琳, 等. 成矿作用年代学及同位素地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994. 107~131.
- [62] 刘家军, 刘建明, 周德安, 等. 西秦岭隆起地区金、铀矿床年代学对比研究 [J]. 地质科学, 1998 33(3): 300~309.
- [63] 李文亢, 方永安, 石准立, 等. 秦岭东部微细金矿成矿条件 [M]. 北京: 地质出版社, 1993. 94~111.
- [64] 陈纪明. 甘肃李坝金矿床地质特征 [A]. 寸玉圭 陈纪明. 中国典型金矿床 [C]. 北京: 地质出版社, 1995. 228~235.
- [65] 邵世才, 汪东波. 南秦岭三个典型金矿床的 Ar-Ar 年代及其地质意义 [J]. 地质学报, 2001, 75(1): 106~110.
- [66] Wang X C and Zhang Z R. Geology of sedimentary rock-hosted disseminated gold deposits in northwestern Sichuan, China [J]. International Geology Review, 2001, 43: 69~90.
- [67] 郑明华. 四川东北寨微细浸染状金矿的物质来源 [A]. 秦巴项目办. 秦巴地区金矿研究论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1993. 229~244.
- [68] Chen S F and Wilson C J L. Emplacement of the Longmen Shan thrust-nappe belt along the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18: 413~430.
- [69] Wang X C and Zhang Z R. Types and distribution of endogenic gold deposits in western Sichuan, China [J]. International Geology Review, 1999, 41: 1099~1113.
- [70] 石准立, 刘瑾璇, 范硕诚, 等. 陕西双王金矿床地质特征及其成因 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989. 67~73.
- [71] Taira A, Pickering K T, Windley B F and Soh W. Accretion of Japanese island arcs and implications for the origin of Archaean greenstone belts [J]. Tectonics, 1992, 11: 1224~1244.
- [72] Taylor S R and McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Blackwell Scientific Publications, Oxford London Edinburgh Boston Palo Alto Melbourne, 1985. 143~186; 209~230.
- [73] 晁掇, 卫旭辰. 陕西小秦岭金矿控矿条件及脉体评价标志 [A]. 沈阳地质矿产研究所. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1989. 87~141.
- [74] 罗铭玖, 王亨治. 河南金矿概论 [M]. 郑州: 河南省地质矿产厅, 1991. 167~168.
- [75] Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 275~291.
- [76] Zhang X, Cawood P A, Wilde S A, et al. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula, China [J]. Mineral. Deposita, 2002, 38: 141~153.
- [77] 姚凤良, 邹祖荣, 刘允良, 等. 辽南中生代花岗岩演化及其与金矿成因关系 [A]. 沈阳地质矿产研究所. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1988. 45~85.
- [78] 苗天成, Yumin Qiu, 关康, 等. 哈达门沟金矿床成岩成矿时代的定点定年研究 [J]. 矿床地质, 2000, 19(2): 182~190.
- [79] Trumbull R B, Liu H, Lehrberger G, Satir M, et al. Granite-hosted gold deposits in the Anjiayingzi District of Inner Mongolia, People's Republic of China [J]. Econ. Geol., 1996. 875~895.
- [80] 孙晓明, 徐克勤, 任启江, 等. 吉南太古宙高级变质地体及金矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. 74~102.
- [81] Mueller J F, Rogers J J W, Jin Y, et al. Late Carboniferous to Permian sedimentation in Inner Mongolia, China, and tectonic relationships between North China and Siberia [J]. Journal of Geology, 1991, 99: 251~263.
- [82] Li S, Jagoutz E, Lo C H, Chen Y, et al. Sm/Nd, Rb/Sr, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu belt, central China: a retrospective view [J]. International Geology Review, 1999, 41: 1114~1124.
- [83] 张德全, 孙桂英. 中国东部花岗岩 [M]. 武汉: 中国地质大学

出版社, 1988. 311.

[84] Zhu J. Mesozoic granitoid types and metallogeny of the East China circum-Pacific continental margin[J] . Resource Geology, 1998, 48: 265 ~ 272.

[85] 毛景文, 王志良. 中国东部大规模成矿时限 及其动力学背景的初步探讨[J] . 矿床地质, 2000, 19 (4): 289 ~ 296.

[86] Klimetz M P. The Mesozoic tectonostratigraphic terranes and accretionary heritage of south-eastern mainland Asia[A] . In: Leitch E C and Scheibner E (eds) Terrane Accretion and Orogenic Belt[C] . American Geophysical Union, Washington, D. C., 1987. 221 ~ 234.

[87] Davis G A, Wang C, Zheng Y, et al. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: New views on its intraplate contractional styles[J] . Geology, 1998, 26: 43 ~ 46.

[88] 郑亚东, Davis G A, 王琮, 等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J] . 地质学报, 2000, 74(4): 289 ~ 302.

[89] Ren J S, Jiang C F, Zhang Z and Qin D. Geotectonic Evolution of China [M] . Science Press, Beijing, 1987. 200.

[90] 胡正国, 钱壮志, 阎广民. 小秦岭拆离 变质核杂岩 构造与金矿[M] . 西安: 陕西科技出版社, 1994. 238.

[91] 张进江, 郑亚东, 刘树文. 小秦岭 金矿田 中生代 构造演化与矿床形成[J] . 地质科学, 2003, 38(1): 74 ~ 84.

[92] Zhang Z M, Liou J G and Coleman R G. An outline of the tectonics of China. Geological Society of America Bulletin[J] , 1984, 95: 295 ~ 312.

[93] Lo C H and Yui T F. 40Ar/39Ar Dating of high-pressure rocks in the Tananao basement complex, Taiwan[J] . J. Geol. Soc. China, 1996, 39: 13 ~ 30.

[94] 程裕淇. 中国区域地质概论[M] . 北京: 地质出版社, 1994. 367 ~ 369.

[95] Xu M, Middleton M F, Xue L F and Wang D P. Structure of the lithosphere and Mesozoic sedimentary Basins in western Liaoning, northern Liaoning and Songliao, Northeast China [J] . International Geology Review, 2000, 42: 269 ~ 278.

[96] 韩树葵. 安徽北部中生代沉积盆地分析[M] . 北京: 地质出版社, 1996. 141.

[97] 范承钊, 杨明桂. 中国基本构造格局及其演化[A] . 程裕淇. 中国区域地质概论[C] . 北京: 地质出版社, 1994. 448 ~ 474.

[98] Collins W J. Nature of extensional accretionary orogens[J] . Tectonics, 2002, 21: 112.

Orogenic gold deposits: Studies, advances and debates

ZHOU Jun¹, QI Shi-jun²

(1. School of Earth Sciences and Resources Management, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. The Second Brigade of Regional Geology Reconnaissance, Changji Xinjiang 831100, China)

Abstract Orogenic gold deposits are the focus of attention of many tectonic and mineral geologists. Groves et al. (1998) and Goldfarb et al's (2001) studies, based on the crustal continuum model for late Archaean lode-gold deposits (Groves, 1993), are marked by involvement of large amount of new data and consideration for many factors. However, many current studies failed to notice certain macroscopic disparities between Archaean and Phanerozoic geological entities rationally and understand global gold occurrences and some tectonic settings properly. The Phanerozoic identified by far too limited igneous activity, lacks the "hypozonal" type of and any other higher-grade metamorphic rock-hosted gold deposits in a low-grade metamorphic rock-hosted gold camp, whereas the Archaean is likewise devoid of low-grade metamorphic rock-hosted gold deposits in a greenstone belt. The gold deposits in the margin of the North China Block (NCB) are primarily of Jurassic-Cretaceous age, notably younger than the Late Palaeozoic Greater Hinggan (on the north of NCB) and Triassic Qinling-Dabieshan (on the south of NCB) orogens. Those gold deposits, mostly hosted by Archaean intermediate-high grade metamorphic rocks and Late Mesozoic granitoids, are basically ascribed to the giant magmatic arc along the Eurasian Margin, which is Yanshanian in age (Jurassic-Cretaceous) and nearly N-S orientated. Eastern China appears to differ from the North America Cordillera in the Late Mesozoic interval as to being further from the subduction zone, lacking ophiolitic complexes and large-scale metamorphism, having numerous basins and thinning in the crust, suggesting that the magmatic arc was probably formed in a back arc basin-like extensional setting. Further clarifying the connection of Phanerozoic gold deposits to relevant orogens may be the key to understanding orogenic gold deposits throughout the geological age.

Key words orogen; gold deposits; Archaean; Phanerozoic; accretionary; collisional; Eurasia; Yanshanian

[英文审定: 杨家喜]