

初论地幔热柱与成矿

——以冀西北金银多金属成矿区为例^①

李红阳 阎升好 王金锁 张建珍 王国富

(中国地质大学, 北京) (河北省地质勘查院) (河北地质学院, 石家庄)

提 要: 作者通过对冀西北金、银多金属矿化集中区成矿规律和物探航磁、重力及遥感信息的综合研究, 提出冀西北地区存在一个超越内蒙地轴与燕山褶皱带两个不同历史大地构造单元之上的中生代地幔热柱构造。文中例举了地幔热柱构造标志特征, 探讨了地幔热柱构造地质作用(超变质作用、岩浆作用、成矿作用)及其时空演化规律, 建立了地幔热柱构造的壳幔成矿模式。

主题词: 地幔热柱 中生代超变质作用 成矿模式 冀西北金银多金属成矿区

1 问题的提出

近十年来, 随着东坪、后沟等金矿床的相继发现和小营盘金矿床储量的不断扩大, 冀西北地区银、铅锌多金属矿床找矿工作取得重大进展, 先后发现了蔡家营、相广等银铅锌多金属矿床。地质工作者逐步认识到冀西北地区既非单一的金矿床, 亦非单一的银铅锌多金属矿床, 而是典型的金、银多金属矿化集中区。在成矿时间上, 冀西北金、银多金属矿化集中区具有明显的时控性, 中生代印支-燕山期为主要成矿期; 在分布空间上, 银多金属矿床明显环绕金矿化集中区分布, 形成典型的“内金外银”的金、银多金属矿床空间组合; 在区域大地构造成矿背景上, “内金外银”的矿化集中区明显跨越了内蒙地轴与燕山褶皱带两个不同的Ⅱ级历史大地构造单元。这些特点揭示了冀西北中生代金、银多金属成矿作用既非内蒙地轴大地构造单元控制, 亦非燕山褶皱带大地构造单元制约, 而是超越在内蒙地轴与燕山褶皱带两个Ⅱ级历史大构造单元之上的另外一种新的大地构造单元控制。根据地质、物探航磁、重力及遥感等信息的系统综合研究, 冀西北金、银多金属成矿区存在一个十分醒目的中生代第三构造单元——地幔热柱构造, 即张宣地幔亚热柱(图1, 图2, 表1)^②。在宏观区域上, 它表现为巨大的热穹隆构造(变质核杂岩构造), 其直径约200 km, 中心为十分特征的宣化片麻岩穹隆构造(或变质杂岩核)。区内各种地层、构造分布, 中生代岩浆活动、变质作用(混合岩化、花岗岩化、流变片麻岩化作用), 金银多金属内生成矿作用, 与该地幔热柱的地质作用密切相关。

① 地质矿产部“八五”科技攻关项目资助

李红阳, 男, 1959年生, 博士(副教授), 从事金矿床地质和成矿规律研究。邮政编码: 100083
1995-11-7 收稿; 1996-4-10 修改回

② 李红阳等, 1994, 冀西北银金多金属矿化集中区控矿因素矿床类型与成矿预测

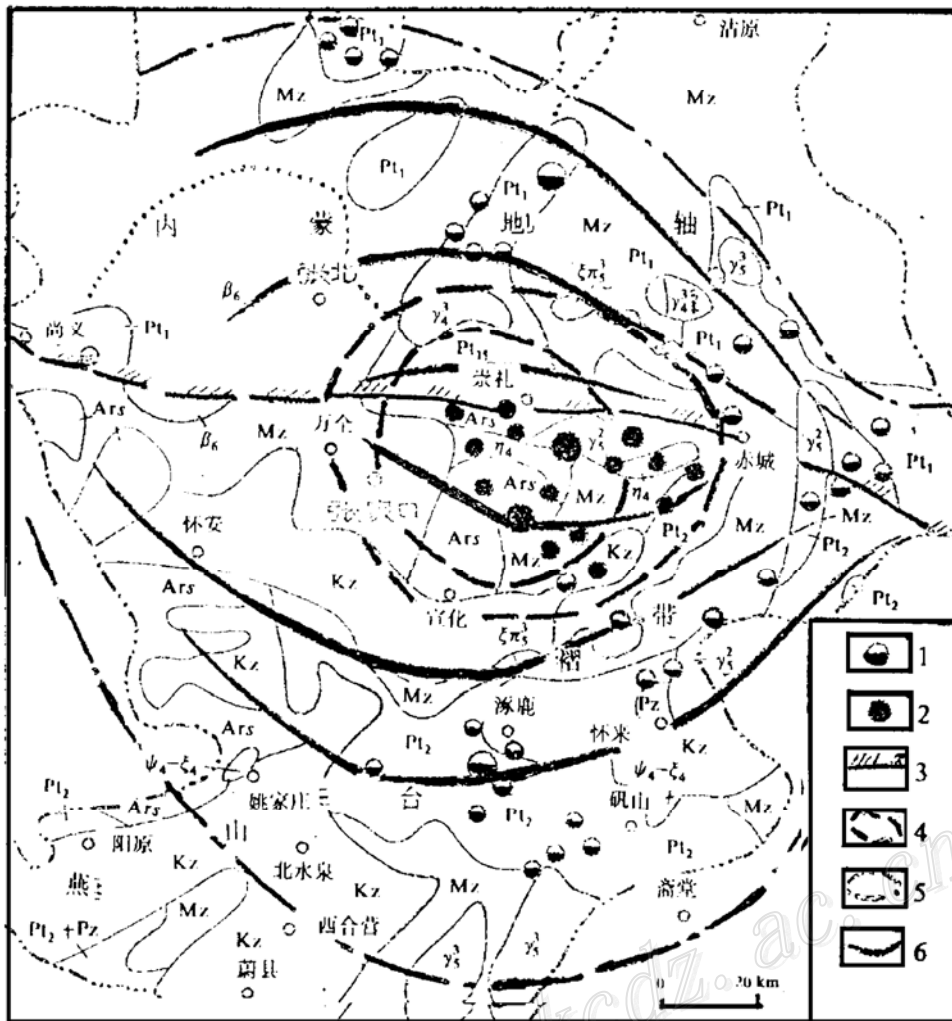


图1 冀西北地区地幔热柱与金、银矿床(点)分布图

1—银多金属矿床; 2—金矿床; 3—构造单元分区; 4—地幔热柱中心(环形构造); 5—地幔热柱周边; 6—褶皱轴; Kz—新生界; Mz—中生界; Pz—古生界; Pt₂—中、上元古界; Pt₁—下元古界; Ars—太古界; β₆—喜马拉雅玄武岩; γ₅³—燕山晚期花岗岩; ζπ₅³—燕山晚期正长斑岩; γ₄³—海西晚期花岗岩; η₄—海西期(?)二长岩

Fig. 1. Mantle plume and distribution of gold and silver deposits (occurrences) in northwest Hebei.

1—Silver-polymetallic deposit; 2—Gold deposit; 3—Boundary of tectonic units; 4—Center of mantle plume (ring structure); 5—Periphery of mantle plume; 6—Fold axis; Kz—Cenozoic; Mz—Mesozoic; Pz—Palaeozoic; Pt₂—Middle and Upper Proterozoic; Pt₁—Lower Proterozoic; Ars—Archean; β₆—Himalayan basalt; γ₅³—Late Yanshanian granite; ζπ₅³—Late Yanshanian syenite porphyry; γ₄³—Late Hercynian granite; η₄—Hercynian (?) monzonite.

依据各种标志特征和国内外研究成果对比,冀西北地区直径达200 km的地幔热柱隆起区是地球上一规模较小的热点地区——地幔亚热柱顶冠所影响的地区^[1~4,15]。根据中生代超基性岩、碱性岩、煌斑岩等地幔岩石和大陆裂谷型火山岩(包括玄武岩)以及中生代韧性剪切带的空间组合分布,初步推测张宣地幔亚热柱开始强烈上隆活动时间为中生代地台活化初期,与中国东部中生代大陆地壳急剧减薄时间相对应。

2 地幔热柱构造地质作用及其时空演化

2.1 地幔热柱构造的岩浆作用及其时空演化

如表2所示,在地幔热柱上升初期的印支期,由于岩石圈厚度大(150~200 km)^[2],岩

浆活动主要表现为规模相对较小的深成—中深成超基性—碱性正长岩杂岩的侵位。根据牟保磊等人的研究^[6]，涿鹿矾山、阳原姚家沟、阳原响水沟等超基性—碱性正长杂岩主要源自被交代蚀变的上地幔。因此，可以认为，冀西北张宣地幔亚热柱早期的岩浆作用主要为地幔交代-重熔。在中生代燕山期，随着地幔热柱的急剧上升，浅部圈层（下地壳与上地壳）发生了大规模交代-重熔作用，或者混合岩化、花岗岩化等超变质作用，形成混合交代重熔-同熔岩浆，诱发本区多期次大规模中酸性岩浆活动以及部分基性玄武岩喷发，导致岩石圈厚度大规模的急剧减薄（减薄约 100 km）^[2]。因此，冀西北地区地壳在中生代燕山期以幔汁混合交代重熔的方式被大规模的“吞食”变薄，转变成大规模的中生代岩浆活动。

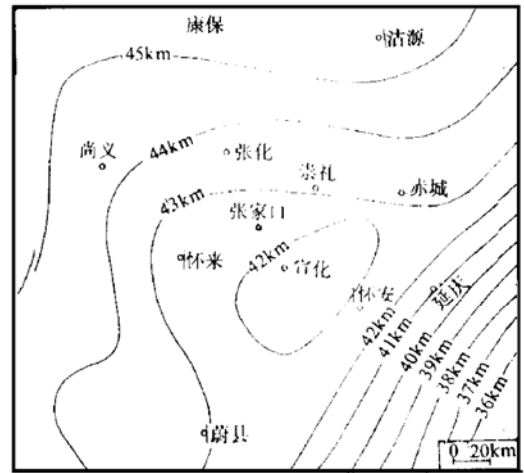


图 2 冀西北地区莫霍面等深线图
Fig. 2. Isobath map of Moho in Northwest Hebei.

表 1 地幔热柱构造（热穹隆构造）的某些标志特征

Table 1. Some markers and features of the mantle plume

标志	主要特征
巨大穹隆构造	太古代—元古代及中生代地层、韧性—脆性剪切带、拆离—滑脱带、推覆（变质核杂岩）构造带、弧形褶皱带、基性超基性—碱性—中酸性侵入岩体、中生代混合岩化、花岗岩化、超糜棱岩化带以及金-银多金属矿床等总体以崇礼为中心，以赤城一带为收敛点，呈环形分布，构成巨大的似眼球状穹隆构造体系。褶皱构造多与韧性剪切带、推覆构造组成复杂的褶皱-断裂构造体系
中生代幔源岩石	中生代幔源岩石分布较为广泛，印支期为中深成超基性岩、碱性—过碱性岩等侵入岩。比如，涿鹿县矾山超基性—碱性杂岩，崇礼水泉沟碱性杂岩，阳原姚家庄超基性—碱性杂岩，阳原响水沟霞石正长杂岩等 ^[8] 。燕山期以南大岭组玄武岩和基性、碱性煌斑岩脉为主；其中前者集中分布在张宣地幔亚热柱东南部涿鹿一带和北京西北部山区 ^[7,8] ，后者集中在宣化小营盘一带金矿区。在蔚县北水泉一带，燕山中期髻髻山组顶部分布有厚度为 103 m 的橄榄玄武岩层 ^[8]
中生代大陆裂谷	为我国中生代火山岩最典型的地区之一，大面积粗面岩、流纹岩等中、酸性火山岩和基性橄榄玄武岩，以及类复理石沉积建造，具有经历了大陆裂谷初期发展阶段的小型裂谷带特征 ^[9]
环形构造	陆地卫星影象上，对应中部隆起区（片麻岩穹隆构造）为双层环形构造
地幔隆起（凸起）	莫霍面等深线向北西方向呈鼻状弯曲，并在宣化一带形成圈闭（图 2）
环状重力异常	在上延 20 km 的剩余重力异常图，存在一个巨大环状或半环状异常带
环状航磁异常	在航磁异常图上，存在双层环状磁异常带，与环状重力异常基本吻合

资料来源：李红阳等．冀西北银金多金属矿化集中区控矿因素矿床类型与成矿预测，1994

表2 地幔热柱构造地质作用及其时空演化

Table 2. Geologic-tectonic processes of mantle plume and their time-space evolution

地幔热柱上升:	中生代印支期—→中生代燕山期	
地幔隆起:	地幔(深部)—→地壳(浅部)	
	中心—→边部	
幔隆结构:	地幔尾柱→幔隆脊部(NW倾伏)→顶冠(热点)	
幔隆机构:	地幔隆起与上涌→地壳拉张-裂谷系	
穹隆构造:	深层次韧性剪切带→中深层次韧性脆性推覆构造带→浅层次脆性断裂构造	
岩浆来源	来源:	幔源岩浆→壳幔混合岩浆(以幔源为主→以壳源为主)
	产生方式:	超变质作用地幔交代-重熔为主→混合岩化-(下)地壳交代-重熔为主
	表现形式:	小规模超基性—碱性岩侵位→大规模中酸性岩浆活动(部分基性玄武岩)
岩体定位:	深成→中深成→浅成-超浅成	
温度型变质作用:	混合→重熔花岗岩类→混合岩类→混合岩化岩石	
应力型变质作用:	深层次流变片麻岩类(纹层状—眼球状糜棱片麻岩类)→千枚状糜棱岩	
铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:	17.721→16.713	
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:	15.734→15.197	
氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$:	5.5‰→12.3‰	
(含矿)交代流体来源:	幔源→壳幔混合	
交代系列:	碱交代(钾钠交代)→酸交代(硅交代)	
温度与压力:	中高温、中深环境(500~250℃)→浅成低温环境(<200℃)	
Ag: Au 比值:	200:1→400:1	
Ag的浓集系数:	8→135→200→8600	
成矿元素对:	Au-Cu→Au-Ag→Ag-Pb	
“内金外银”成矿系列:	金矿→银金矿→银矿→银铅锌矿	
实例:	东坪、小营盘金矿→金家庄银金矿→彭家沟、相广银矿→蔡家营银铅锌矿	

总体上,在地幔热柱深部和中部,以幔源和以幔源为主的壳幔混合岩浆活动为主;在其浅部和边部,则主要表现为壳幔混合岩浆活动。

2.2 地幔热柱构造的超变质作用及其时空演化

如表2所示,冀西北张宣地幔亚热柱构造的变质作用主要包括两种类型:一种是与地幔热柱构造作用过程中地幔射气(气体)-喷流(流体)作用等有关的温度型变质作用;另一种是与地幔热柱构造隆起-伸展-拆离构造作用有关的应力型变质作用。它们是地幔热柱构造地质作用中重要的一种深部地质作用,主要表现为混合岩化、花岗岩化、碱性岩化、流变“片麻岩”化等超变质作用。比如,60~70年代,冀西北金矿化集中区水泉沟含金碱性杂岩体定为太古代混合岩,80~90年代逐步确定为中生代混合岩化、碱性岩化和糜棱片麻岩化作用的产物,即超变质作用产物^①[10,11]。该杂岩体随混合交代-重熔程度的不断增高,同位素年龄逐渐变新(表3)。而且,伴随该杂岩体的形成,在其外围,特别是南部至小营盘一带“太古代”变质岩区,形成了广泛的中生代混合岩化、碱性岩化带,构成“太古代”高级变质地体中的部分中生代混合岩。它也表现在杂岩体外围“太古代”变质岩中经常测试到显生宙同位

① 宋瑞先,1991,张家口地区水泉沟—大南山二长杂岩体特征、金矿成矿作用及找矿方向

素年龄。超变质作用又直接涉及到中生代交代-重熔、同熔等深熔岩浆的产生与演化。比如，水泉沟含金碱性杂岩体北部的红花梁花岗岩体，80 年代定为太古代侵入岩体，90 年代随着岩体内中生代韧性剪切变形变质带——流变“片麻岩”的确定，以及与中生代水泉沟含金碱性杂岩体的侵入接触关系，逐步确定为中生代混合交代-重熔型花岗岩^①。

表 3 水泉沟碱性杂岩主要岩石 K-Ar 同位素年龄

Table 3. K-Ar ages of major rocks of Shuiquangou alkali complex

序号	岩石名称	采样地点	年龄 (10 ⁶ a)
1	正长岩	桃沟	166.00
2	石英二长岩	葵花村	199.74
3	霓辉角闪二长岩	后中山	203.42
4	角闪二长岩	六道沟	206.91
5	辉石角闪二长岩	场地	226.00
6	辉石二长岩	大南山	242.17
7	角闪正长岩	桃沟	257.14

测试单位及资料来源：1、7 由宜昌所测试，引自中国地质大学与冶金 516 队；2~4、6 由地科院地质所测试，引自河北地质三队；5 号由地质力学所测试，引自北京大学邵济安

这种同一地质体随着研究程度的不断提高，由太古代混合岩、侵入岩到中生代混合交代重熔碱性杂岩、花岗岩认识上的截然不同，从一个侧面揭示了中生代超变质作用的存在，以及“太古代”高级变质地体变质程度深与中生代超变质作用的内在成因联系。它可能更好地解释了强烈混合岩化作用区和眼球状糜棱片麻岩等深层次韧性剪切带作用区“太古代”高级变质地体中时常测试到显生宙同位素年龄的原因，以及金矿床多产于“太古代”高级变质地体分布区，与中生代花岗岩有关，成矿时代多集中在中生代的原因。

在空间演化上，从地幔热柱构造中部到边部，从岩石圈层深部到浅部，超变质作用总体上逐渐减弱，表现为地幔热柱中部发育典型的变质杂岩核。在时间演化上，大约在中生代印支中—晚期到燕山早期，超变质作用主要表现为岩石圈深部地幔交代与重熔；在中生代燕山中期及晚期，则以岩石圈浅部地壳混合交代重熔为特征。

2.3 地幔热柱构造的成矿作用及其时空演化

如表 2 所示，地幔热柱构造的成矿作用及其时空演化主要表现为深源成矿物质的壳幔混合作用、碱交代成矿作用和矿床成矿系列三个方面。

在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上(图 3)，冀西北地区金银多金属各类矿床的 Pb 同位素主要落在造山带与下地壳之间、地幔演化曲线两侧，揭示成矿物质来源具有壳幔混合特征。其中地幔热柱中部的金矿床表现为以幔源成矿物质为主的壳-幔混合特征，地幔热柱边部的银多

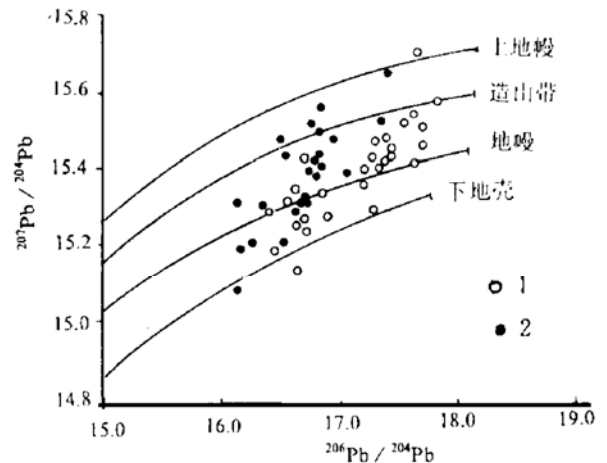


图 3 冀西北地区主要金、银多金属矿床

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解

1—金矿；2—银矿

Fig. 3. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of major Au-Ag-polymetallic deposits in north-west

Hebei.

1—Gold deposit; 2—Silver deposit.

① 下两间房—镇宁堡幅 1/5 万区域地质调查报告，1989

金属矿床则明显混入了较多的壳源物质,二者呈现出明显的演化关系,指示了张宣地幔亚热柱构造的不同部位壳幔混合作用的不同,或者壳幔混合比例的不同与差异。

碱交代成矿作用,主要是指碱性化作用和酸性化作用,包括了以钾钠交代为特征的碱交代作用,和以硅质交代为特征的酸交代作用。它即体现在金银多金属矿床最终定位过程中伴随强烈而广泛的钾化、硅化等蚀变作用,又表现在金银多金属成矿物质聚集过程中重要的碱交代成岩-成矿作用^[12,13]。冀西北金矿化集中区——水泉沟含金碱性杂岩体,是典型的碱交代成岩-成矿作用演化产物。它包括钾交代正长岩类、钠交代二长岩类、酸交代石英脉等碱交代岩石组合。从杂岩体到外围小营盘一带,碱交代作用逐渐减弱,酸交代逐渐增强,金矿化类型也由钾质蚀变岩型(东坪式)逐渐演化为石英脉型(小营盘式)。这种碱交代成矿作用,主要发生中生代印支晚期到燕山早期,而且集中分布在张宣地幔亚热柱中部。在中生代燕山中—晚期,碱交代成矿作用主要发育于张宣地幔亚热柱构造边部银多金属矿化集中区,多表现为成矿作用过程中的各种蚀变作用。

冀西北张宣地幔亚热柱成矿作用具有十分明显的时空演化规律。在地幔热柱构造中部崇礼—赤城眼球状韧性剪切带分布区,为东坪、小营盘等大中型金矿床集中分布区(“内金”);而在地幔热柱构造边部康保—赤城等韧性-脆性剪切-推覆构造带分布区,为环带状蔡家营→彭家沟→火石沟→相广等大中型银多金属矿床成矿带(“外银”);构成该区独特的“内金外银”矿床空间组合规律(图1)。在成矿时间演化上,金矿床明显相对集中在印支末—燕山早期,银多金属矿床则形成于燕山中—晚期。而且,这些金、银多金属矿床在物质来源、矿床类型、成矿作用等方面也存在着密切的内在联系,构成典型的金、银多金属矿床成矿系列^[14,5]。

3 地幔热柱构造成矿模式

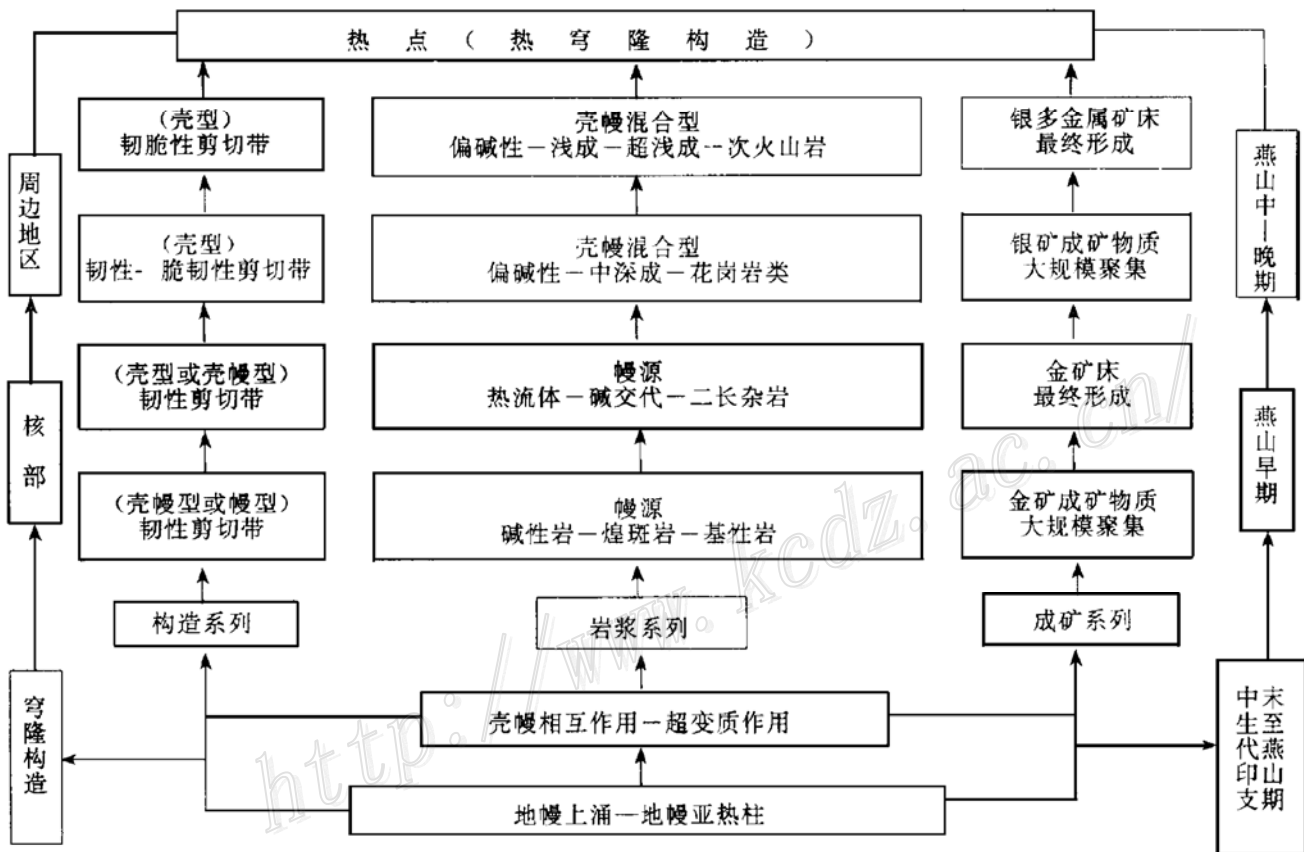
地幔热柱构造表现为典型的壳幔成矿模式(表4),可概括为成矿物质大规模聚集、矿质运移-传输、矿床(矿体)定位三大系统,即成矿物质的聚集、运移和定位三个阶段。其中伴随中生代地幔热柱构造作用出现的地幔隆起、深源物质大规模上涌和壳幔相互作用,构成了成矿物质的大规模聚集系统;它是冀西北地区金、银多金属矿床广泛分布,形成金、银多金属矿化集中区的根本原因所在。而伴随中生代地幔隆起出现的巨大热穹隆构造或变质核杂岩构造,则构成了深源成矿物质的运移与传输系统;它是冀西北中生代金、银多金属矿化集中区金、银多金属矿床“内金外银”空间组合分布的主导性控制因素。进而,伴随地幔隆起—壳幔相互作用发展演化出现的局部浅层次构造、岩浆、变质、热流体成矿等地质作用,构成了成矿物质的最终富集成矿或矿床(矿体)定位系统;它是冀西北地区中生代金、银多金属矿床(矿体)最终形成与定位的关键。

应当指出,成矿物质的大规模聚集与超变质作用过程中岩浆的产生,均是壳幔物质相互作用过程中的演化产物,二者是深部壳幔相互作用过程的两个既相互联系又相对独立的演化系统——“孪生兄弟”。可以认为,成矿物质大规模聚集系统主要表现为伴随壳幔物质与能量的交换,幔源成矿物质上升,深部壳源有用成矿物质活化迁移,构成以幔源为主壳幔混合的含矿流体循环体系。而伴随地幔隆起形成的巨大穹隆构造体系,发育着不同构造层次的伸展构造,制约了地幔物质与下地壳物质的相互作用方式、强度与空间范围。构造的层次性又导致变质作用、岩浆作用、成矿作用呈现出明显的层次性。另一方面,地幔热柱构造活动的多

期次脉冲性和不断的隆起上升，也导致不同构造层次的韧性剪切带、拆离-滑脱带的多期性和叠加性。因此，“太古代”高级变质地体中的中生代金矿床多与韧性剪切变形变质带之中的脆脆性断裂构造密切相关。它揭示了不同构造层次的演化对成矿物质的聚集→运移→定位的制约关系。穹隆构造体系的浅部构造层次，多制约着浅部变质作用、岩浆作用和成矿作用，表现为典型的矿床（矿体）定位系统。比如，韧性、脆韧性构造带的产生，浅成中酸性岩体的侵位，中—低温金、银多金属矿床的形成，构成“三位一体”。

表 4 冀西北金银多金属成矿区地幔热柱构造矿模式

Table 4. Metallogenic model of mantle plume in Northwest Hebei gold—silver—polymetallic area



参 考 文 献

- 1 邓晋福, 赵海玲, 吴宗絮等. 中国北方大陆下的地幔热柱与岩石圈运动. 现代地质, 1992, 6 (3): 267~273
- 2 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”. 现代地质, 1994, 8 (3): 349~356
- 3 赵国春, 吴福元, 热幔柱构造——一种新的大地构造理论. 世界地质, 1994, 13 (1): 25~34
- 4 丸山茂德. 地幔羽构造论. 世界地质, 1994, 13 (1): 35~42
- 5 毛景文, 宋叔和, 陈毓川. 桂北地区火成岩系列和锡多金属矿床成矿系列. 北京科学技术出版社, 1988
- 6 牟保磊, 阎国翰. 燕辽三叠纪碱性杂岩体地球化学特征及意义. 地质学报, 1993, 66 (2): 108~121
- 7 马文璞, 刘昂昂. 北京西山——一个早中生代拗拉谷的一部分. 地质科学, 1986, (1): 54~61
- 8 河北省, 天津市区域地层表编写组. 华北地区区域地层表. 河北省、天津市分册, 1979
- 9 郭正府. 张家口火山喷发的大地构造环境探讨. 河北地质学院学报, 1993, 16 (3): 222~230
- 10 李红阳, 张建珍. 冀西北地区壳幔碱交代作用—水泉沟碱性杂岩. 中国矿物学岩石学地球化学新进展, 兰州: 兰州大学出版社, 1994

- 11 李红阳, 张建珍. 水泉沟含金碱性杂岩体的剪切变形与碱交代成矿特征. 黄金, 1994, 15 (9): 1~6
- 12 杜乐天. 碱交代成矿作用的地球化学共性和归类. 矿床地质, 1983, 2 (2): 33~34
- 13 杜乐天. 碱交代作用地球化学原理. 中国科学, 1986, (1): 81~90
- 14 陈毓川, 裴荣富, 张宏良等. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1989
- 15 Mitchell A. H. G. Mineral Deposits and Global Tectonic Settings. 1981

A PRELIMINARY DISCUSSION ON MANTLE PLUME AND METALLOGENESIS OF Au-Ag-MULTIMETAL MINERALIZATION AREA IN NORTHWEST HEBEI

Li Hongyang, Yan Shenghao

Wang Jinsuo

(Chian University of Geosciences, Beijing 100083)

(Hebei Academy of Geoexploration, Shijiazhuang 050000)

Zhang Jianzhen and Wang Guofu

(Hebei College of Geology, Shijiazhuang 050031)

Key words: mantle plume, Mesozoic ultrametamorphism, metallogenic model, gold-silver-polymetallic mineralized area in northwest Hebei

Abstract

Comprehensive studies have revealed that there is an obvious and enormous thermal dome structure — mantle plume in the gold-silver-polymetallic mineralized area of northwest Hebei. The mantle plume is about 200 km in diameter, with the center located in Xuanhua and various strata and structures around the center distributed in the form of concentric rings. This special tectonic unit oversteps two different tectonic units — Inner Mongolian axis and Yanshanian platform fold belt. From its center to periphery, fractures vary from ductile shear zone to brittle-ductile shear nappe structure zone and to ductile-brittle fracture zone. In the circular area, there exists a suite of Mesozoic mantle source rock association including alkali basalts and ultraalkaline-alkaline rocks. Besides, Mesozoic continental rift type volcanic rocks are extensively distributed over the area. Mantle source magmatic activity mainly took place at the center, whereas crust-mantle mixed source magmatic activity occurred along the periphery.

The known large and superlarge gold deposits concentratedly exist in the center, forming Chongli-Chicheng auriferous shear zone. Silver polymetallic ore deposits are present at peripheral semicircular ductile-brittle shear nappe structures. Therefore, the authors have formulated a regular spatial distribution pattern of gold-silver-polymetallic deposits characterized by “gold inner and silver outer”, namely the gold-silver-polymetallogenic series which were the ultimate evolution products of the hotspot in Mesozoic. In the whole evolutionary process, massively upwelling of mantle source substances and crust-mantle interaction acted as a large enrichment system for gold-silver-polymetals, the enormous dome structure is the transferring system for ore materials, and hypabyssal structures, magmatism and thermal fluid action make up the locating system of ore deposits.

This paper has discussed ultrametamorphism, magmatism and metallization of the Mesozoic mantle plume, and established a metallogenic model.