

试论幔柱构造对成矿的控制

Mineralizations Controlled by Mantle Plume Tectonics

高永丰¹ 李红阳¹ 侯增谦²

(1 石家庄经济学院资源与环境工程系, 河北 石家庄 050031; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

Gao Yongfeng¹, Li Hongyang¹, Hou Zengqian²

(1 Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

摘 要 幔柱构造对成矿的控制涉及到地球演化各个阶段的成矿作用和各种环境中的各种类型矿床,其自身多级演化的不同阶段相伴有不同类型的岩浆、变质、沉积等成矿地质作用和不同类型的矿床,控制了相关矿床的时空分布和物质来源。

关键词 地幔热柱 成矿控制

地幔热柱和幔柱构造是近几年在地震层析成像研究基础上提出的新概念 (Maruyama S, 1994; Hill, R. I., 1992; Stein M, et al., 1994; Nataf H C., 1993 赵国春等, 1994), 在地学界引起高度重视, 研究工作进展很快。幔柱构造概括了地幔上升流和下行流的对流形式和所引起的构造发育程度, 包括地幔物质柱状上涌形成的热幔柱和地幔柱状回流的冷幔柱。地幔热柱来自于核幔边界或深部地幔, 其热物质呈柱状体上涌, 形成巨大“头冠”和细窄“尾柱”, 导致岩石圈减薄和超大陆解体以及大陆岩石圈向大洋岩石圈构造体制转化, 相伴的构造、岩浆、变质、沉积等各种地质作用为产生成矿体系、形成各种类型矿床提供有利的环境。冷幔柱回流引起超大陆聚合、大陆裂谷天拆和洋壳俯冲消减碰撞造山以及大洋岩石圈向大陆岩石圈构造体制转变。幔柱构造对成矿的控制已涉及到地球演化各个阶段的成矿地质作用和张性与压性不同环境中的各种类型矿床, 其自身多级演化的不同阶段往往相伴有不同类型的成矿地质作用, 形成不同类型的矿床。

1 幔柱构造对地球演化各阶段成矿作用的控制

幔柱构造对成矿的控制涉及到前寒武纪—显生宙的地球演化各个阶段。早在 70 年代中期, Sawkins (1976) 即已明确指出前寒武纪和显生宙大陆内环境中形成的重要矿床均与地幔热点活动有时空联系, 并提出两个或三个分布广泛的伴随有超大陆解体和重要矿床产出的热点活动时期。在 90 年代初期, Barley 等 (1992) 进一步讨论了前寒武纪金属成矿巨旋回与超大陆旋回的内在成因联系, 提出成矿作用集中发生在超大陆的解体和聚合期。比如, 以奥林匹克坝型矿床为代表的内陆盆地非造山型岩浆矿床, 集中发生在超大陆解体的初期和超大陆聚合末期; 以斑岩铜矿、脉状金矿为代表的造山型矿床则主要在超大陆聚合期最发育。日本学者 Maruyama (1994) 则提出了幔柱构造导致了地球演化不同阶段超大陆的解体与聚合, 其中热幔柱导致超大陆的解体, 冷幔柱导致超大陆的聚合, 而地幔柱发生、发展与演化的旋回性, 又导致超大陆离合的旋回性。到 90 年代末, 侯增谦等 (1998) 和李红阳等 (1998) 先后提出了幔柱构造成矿系统, 强调了幔柱构造体系与地史上超大陆旋回与金属成矿巨旋回的内在统一性, 探讨了幔柱构造对地球演化不同阶段不同成矿作用的控制特点。

2 幔柱构造对不同构造环境成矿作用的控制

幔柱构造对成矿的控制涉及到地球演化各阶段张性与压性不同环境的成矿作用。在 70 年代初期, Burke (1973) 曾详

细叙述了与地幔热点有成因联系的裂谷张性环境有关的成矿规律；Sawkins (1976) 讨论了地球演化各阶段与大陆内部地幔热点和热点成因的裂谷张性环境及地幔热点活动导致的大陆解体有关的金属矿床。80 年代，地质学家们进一步注意到地幔柱-热点与大陆内部、板块边界等张性环境矿床的内在成因联系，并逐步探索幔柱构造与挤压造山压性环境成矿作用的关系。例如，Mitchell 等 (1983) 系统讨论了大陆热点和热点成因裂谷、坳拉谷等张性环境中产出的矿床，并从地幔热柱-热点—天折裂谷—裂谷—大洋扩张—俯冲—碰撞造山发展演化角度讨论了矿床与全球构造。Sawkins (1984) 从离散-会聚(碰撞)板块边界环境角度论述了金属矿床与板块构造，着重讨论了离散型板块边界环境(热点、非造山岩浆活动、大陆裂谷、洋脊)与地幔热点之张性环境的内在关系。进入 90 年代，人们逐步认识到幔柱构造对地球演化各阶段张性与压性不同环境成矿作用的控制。Maruyama (1994) 提出幔柱构造控制了热点—天折裂谷—裂谷—大洋扩张—俯冲—碰撞造山威尔逊旋回的发生与发展。侯增谦等 (1996, 1998) 和李红阳等 (1998, 1999) 先后以三江特提斯成矿域和新疆阿尔泰矿床富集区为例，从热幔柱-大洋开启和冷幔柱-大洋闭合的角度，探讨了地球演化不同阶段热幔柱和冷幔柱对张性与压性不同环境成矿作用的控制特点。

3 幔柱构造不同演化阶段对成矿的控制

幔柱构造中并存的热幔柱与冷幔柱的运动为地球演化各阶段地幔物质的主要运动形式，导致前寒武纪超大陆解体—聚合旋回，驱动显生宙板块运动。其中，热幔柱的发育与演化导致岩石圈减薄—超大陆解体—大陆岩石圈向大洋岩石圈体制转化，对应着地幔热点—大陆裂谷—大洋扩张等各演化阶段；冷幔柱回流导致超大陆聚合—大陆裂谷天折造山—洋壳俯冲消减碰撞造山—大洋岩石圈向大陆岩石圈构造体制转化，对应着俯冲—碰撞造山等各演化阶段。幔柱构造不同演化阶段对成矿的控制主要表现为其自身多级演化的不同阶段往往相伴有不同类型的成矿地质作用，形成不同类型的矿床。

3.1 地幔热柱不同演化阶段对成矿的控制

地幔热柱的演化可初步分为地幔热柱-热点、地幔热柱-裂谷、地幔热柱-大洋扩张三个阶段。三个阶段既可呈现为早、中、晚演化关系，又可各自独立，其对成矿的控制作用又各有其特点。

(1) 地幔热柱-热点活动对成矿的控制：地幔热柱-热点发育于地球演化各地质历史时期，是幔柱构造对成矿控制作用最易识别的最直接标志之一，主要涉及大陆内部地幔热点和大洋洋岛-岛链地幔热点成矿系统。比如，与非造山热点碱性花岗岩有关的锡、铀(钍-钽-钨)矿床，与非造山热点层状镁铁质杂岩有关的铬、铂族元素，钒、钛、铜、镍等矿床，与非造山热点碳酸岩、碱性岩、超基性岩有关的稀有、稀土、金刚石、磷灰石等矿床，与非造山热点碱性岩、碱性花岗岩有关的金、银、铅、锌多金属矿床，与非造山热点斜长岩有关的钛、铁、钒等矿床，与大陆内部热点轨迹有关的美国西南部斑岩铜矿床，与大陆内部热点尾部有关的澳大利亚西部伊尔岗地块绿岩带超镁铁质岩镍矿床。

(2) 地幔热柱-裂谷作用对成矿的控制：地幔热柱-裂谷是地幔热柱-热点进一步发展的产物，是幔柱构造对成矿控制作用中发育最为广泛和最有利于成矿的发展演化阶段。它广泛发育于地球演化各地质历史时期，特别是元古代，与超大陆旋回的大陆解体成矿作用及产物相对应，形成全球矿产资源主体。地幔热柱-裂谷对成矿的控制包括地幔热柱-大陆裂谷(三联点、天折、坳拉堑等各种大陆裂谷)成矿系统和地幔热柱-亲弧裂谷成矿系统。比如，与大陆裂谷侵入岩有关的斑岩钼矿、铜钼矿床、基性-超基性岩铬、铂、铜、镍硫化物矿床、碳酸岩、碱性岩、金伯利岩稀有、稀土、金刚石、磷灰石和铜矿床，大陆裂谷沉积岩系中的层状铜矿床、银铅矿床、铅锌矿床、铀矿床、块状硫化物矿床、蒸发岩矿床和油气矿床等，深变质的裂谷型块状硫化物矿床，绿岩带块状硫化物矿床，与大陆裂谷内洋岛型蛇绿岩有关的矿床，亲弧裂谷斑岩钼矿床，黑矿型块状硫化物矿床及亲弧裂谷萤石、锡、铀、钍矿床等。

(3) 地幔热柱-大洋扩张对成矿的控制：地幔热柱-大洋扩张作用又是地幔热柱-裂谷构造的进一步发展，主要发育于显生宙。其对成矿的控制主要表现为洋脊和大洋盆地中的成矿作用及洋壳蛇绿岩中的矿床。

3.2 冷幔柱不同演化阶段对成矿的控制

冷幔柱构造对成矿的控制作用主要表现为超大陆聚合与成矿，与冷幔柱引起的全球大规模造山挤压构造体系及相关的矿床相对应，可初步划分为冷幔柱-前寒武纪硅铝壳造山作用对成矿的控制和冷幔柱-显生宙硅铝壳或洋壳造山作用对成矿的控制。比如，与冷幔柱-硅铝壳/洋壳碰撞造山作用有关的蛇绿岩容矿的矿床、碰撞带花岗岩伴生的铀钨矿床、海西造山带海西花岗岩锡钨矿床、东南亚中央锡矿带、碰撞花岗岩伴生的铀矿床、西欧海西花岗岩伴生的铀矿床，与冷幔柱-洋壳俯冲岛弧有关的斑岩铜矿床、智利型(平卧成层)矿床、金矿床、黑矿型块状硫化物矿床、脉状矿等，与冷幔柱-前寒武纪硅铝壳造山作用有关的脉状金矿、金铀砾岩、阿比蒂比型铜锌块状硫化物矿床及某些斑岩铜、钼矿床等。

4 幔柱构造的岩浆、变质和沉积作用及其对成矿的控制

幔柱构造演化不同阶段伴随有不同的构造、岩浆、变质和沉积等成矿地质作用,形成不同的成矿体系,产生不同类型的矿床组合或矿床成矿系列。

4.1 幔柱构造岩浆作用及其对成矿的控制

幔柱构造岩浆作用主要是指与幔柱构造活动有关的浅部岩石圈岩浆作用,概括了地幔柱热物质释压熔融、与周围地幔物质的混合以及地幔柱热物质和热流以三次柱形式进入岩石圈引发地壳超变质作用和重熔等幔源-幔壳混合岩浆的产生、活动及产物的全过程。广泛而强烈的岩浆活动,是幔柱构造作用的一大特点。在幔柱构造演化不同阶段伴随有不同的岩浆活动,产生不同类型的矿床。在幔柱构造岩浆作用区,从幔源到壳-幔混合至壳源为主的岩浆成分谱系完整,相伴的成矿物质具有明显的统一性与深源性,表现为以幔源成矿物质为主的壳-幔物质混合特征。

(1) 与大陆内部非造山地幔热柱-热点活动有关的岩浆岩与成矿:该阶段岩浆岩主要为碱性花岗岩、层状镁铁质杂岩、碳酸岩、碱性岩、超基性岩、斜长岩、大陆溢流玄武岩、流纹岩和花岗岩等。其中,碱性岩和碳酸岩等主要为地幔热柱-热点头部岩浆活动产物,伴随有稀土、稀有等矿床;超基性岩或层状镁铁质-超镁铁质杂岩主要为地幔热柱-热点尾部岩浆活动产物,相关的矿床主要为铂、钯、镍、铜和钒钛磁铁矿矿床;大陆溢流玄武岩往往是地幔热柱-热点岩浆活动直接喷出地表的产物,相关的矿床主要为铜矿床;碱性花岗岩、花岗岩和流纹岩为地幔热柱-热点构造作用引发花岗岩化形成花岗质岩浆上侵的产物,相关的矿床以锡矿为代表,可包括与非造山花岗岩有关的所有矿床。在成矿物质来源上,与地幔热柱-热点头部、尾部岩浆产物及直接喷出地表的碱性玄武岩有关的矿床,往往具有典型的幔源特征,或以幔源为主,混有少量壳源物质;与花岗岩有关的矿床多表现为典型的壳-幔混合成矿特点。

应当指出,由于幔柱构造作用强度和活动方式(脉冲式)的不同,上述岩浆活动并非在所有地幔热柱-热点活动区均同等发育,而且花岗岩化也并非是地幔热柱-热点活动的早期阶段产物,在晚期阶段和活动间歇期仍可有大规模花岗岩化作用导致花岗岩的广泛分布。在地幔热柱-热点活动持续时期长而活动强度较弱的地区,可能主要表现为广泛的花岗岩化作用及其所导致的花岗岩浆活动和相关的成矿作用;反之,则可能主要为基性-超基性岩浆活动及其相关的成矿作用,而花岗岩化不明显。

(2) 与大洋内部地幔热柱-洋岛-岛链热点活动有关的岩浆岩与成矿:岩浆岩主要为洋岛玄武岩,相关矿床主要为铁、镍、铜、金、铂等。在地幔热柱-热点的尾柱区高热物质熔融,产生苦橄质或苦橄玄武质熔浆及其相关的矿产;其冠形头部与周围地幔“混杂”而具化学分带、物质熔融,产生富钠和富钾质的洋岛玄武岩及其相关的矿床。成矿物质具有明显的深源性,为较典型的幔源成矿。

(3) 与地幔热柱-裂谷有关的岩浆活动与成矿:裂谷又称“浆谷”和“矿谷”,地幔热柱成因的裂谷岩浆活动与成矿作用可初步划分为早期裂谷化-花岗岩化阶段、中期裂谷-洋盆-洋岛阶段和晚期裂谷闭合-引张阶段。在成矿物质来源上,总体表现为以幔源为主的壳-幔混合特征。

早期裂谷化-花岗岩化阶段:地幔热柱上升往往导致岩石圈以花岗岩化的方式(幔汁混合交代重熔)被大规模的“吞食”减薄,转变成以花岗岩为主的岩浆活动及相关成矿作用,即裂谷化或地台的构造岩浆活化。该阶段花岗岩及少量基性-超基性岩和碱性岩主要产于张性环境,浅部地表可发育裂谷式陆相断陷盆地。该阶段成矿物质主要表现为壳-幔混合来源。

中期裂谷-洋盆-洋岛阶段:地幔热柱持续上升,导致岩石圈进一步的大规模急剧减薄而逐步发育成硅铝层陆壳裂谷-硅镁层洋壳裂谷,双峰式火山岩和以火山岩型块状硫化物矿床为代表的一系列铜多金属矿床广泛分布。在成矿物质来源上,以幔源为主,混有一定比例的壳源物质。

晚期裂谷闭合-引张阶段:地幔热柱活动停止或间歇或冷幔柱作用,导致裂谷闭合挤压造山及其随后的局部引张。其中,裂谷的闭合与造山往往伴有挤压环境下的花岗岩化作用,产生同造山花岗岩及相关的矿床,成矿物质具有壳-幔混合特点。

应当强调指出,在裂谷闭合造山之后往往伴随引张拉伸作用或地幔热柱-热点岩浆活动与成矿作用的复合与叠加。比如,在裂谷闭合造山带中常常分布有与地幔热柱尾部岩浆活动有关的超基性岩或层状镁铁质-超镁铁质杂岩和相关的铂、钯、镍、铜和钒钛磁铁矿矿床,与地幔热柱头部岩浆活动有关的非造山碱性岩和碳酸岩和相关的稀土、稀有等矿床,地幔热柱岩浆直接喷出地表的大陆溢流玄武岩及相关的铜矿床等,以及地幔热柱构造作用引发花岗岩化而形成的非造山碱性花岗岩及锡矿床等。成矿物质主要来源于幔源。

此外,与地幔热柱-大洋扩张有关的岩浆活动与成矿,主要包括洋脊玄武岩及相关的贵金属矿床、基性-超基性岩及其相关的镍、铁、钛、金、铂和石棉、滑石及菱镁矿床等。

4.2 幔柱构造变质作用及其对成矿的控制

幔柱构造的变质作用是指地下深处岩石圈固态岩石在地幔热柱上涌高温高压和化学活动性流体作用下,引起岩石的结构、构造或化学成分发生变化,形成新岩石的一种深部地质作用。幔柱构造的变质作用主要表现为地幔热柱的超变质作用,是指在地下深处地幔热柱上涌温度压力过高及岩浆作用的影响,岩石圈固态岩石部分熔融产生一些类似岩浆的熔融物质,与固态岩石发生混合、交代等复杂变质过程,也叫花岗岩化作用或再熔作用。超变质作用属于地幔热柱的岩浆作用与变质作用之间的过渡形式,是地幔柱交代地壳,对地壳产生影响的重要表现形式之一,也是地幔柱在大陆地质中所起重要作用的一种表现,比如对大陆地壳进行热改造(花岗岩化)和构造改造作用(流变片麻岩化)。它包括与地幔热柱上升过程中深部地幔射气(气体)-喷流(流体)作用等有关的热变质作用(地幔热柱交代地壳)和与地幔热柱上升-岩石圈隆起-伸展-拆离构造作用有关的动力变质作用。其表现为广泛而强烈的混合岩化、花岗岩化、流变“片麻岩”等超变质作用,直接涉及到交代-重熔、同熔等深熔岩浆的产生和演化,与岩浆活动和构造运动有关,涉及到与区域变质作用、花岗岩化作用、韧性剪切带、变质核杂岩构造作用等有关的一系列成矿作用。在成矿物质来源上,具有明显的壳-幔混合特征,且随变质作用的差异其成矿物质壳幔混合比例各异。超变质作用地区多以地幔隆起、地幔物质大规模上涌、热流值较高、地壳普遍较薄为特点。

(温度型)热变质作用的地质应力主要为热能、化学能(富碱、富钠、富含气体与挥发份),以广泛而强烈的混合岩化、花岗岩化等超变质作用为标志,以形成混合岩、混合交代-重熔花岗岩(杂)岩、碱性(杂)岩等岩石组合与演化系列为特征。成矿作用以与花岗岩(化)有关的金、银、铜、铅、锌、锡、钨等矿床主。

动力变质作用主要表现为伴随不同构造层次的幔型-壳幔型-壳型韧性剪切带、拆离带、滑脱带构造作用使原岩发生固态塑性流变作用而产生各种流变片麻岩类。比如,纹层状-条带状-眼球状糜棱片麻岩等。成矿作用以韧性剪切带型金矿床为特征。

4.3 幔柱构造沉积作用及其对成矿的控制

幔柱构造沉积作用主要是指与地幔热柱成因裂谷或裂谷式断陷盆地相伴的沉积作用,其对成矿的控制主要表现为地幔热柱成因裂谷式裂陷盆地陆相沉积成矿作用和大洋裂谷海底喷流沉积成矿作用等,代表性矿床为裂谷沉积岩系中的层状铜矿床、银铅锌矿床、铅锌矿床、铀矿床、沉积物容矿的块状硫化物矿床、油气矿床等。在成矿物质来源上,与地幔热柱-裂谷沉积作用有关的矿床总体上为壳-幔混合来源,或以壳源为主的壳-幔混合来源。

参 考 文 献

- 边千韬. 1998. 扬子克拉通西南缘低速柱与超大型矿床[J]. 中国科学(D辑), 28: 93~96.
- 邓晋福,赵海玲,吴宗絮,等. 1992. 中国北方大陆下的地幔热柱与岩石圈运动[J]. 现代地质, 6: 267~274.
- 侯增谦,李红阳. 1998. 试论幔柱构造与成矿系统——以三江特提斯成矿域为例[J]. 矿床地质, 17: 97~113.
- 侯增谦,莫宣学,朱勤文,等. 1996. “三江”古特提斯地幔热柱-洋岛玄武岩证据[J]. 地球学报, 17: 343~361.
- 李红阳,侯增谦,王国富. 1996. 试论华北地台中生代超变质作用与地幔热柱作用[J]. 地球学报, 17: 376~392.
- 李红阳,侯增谦. 1998. 初论幔柱构造成矿体系[J]. 矿床地质, 17: 247~255.
- 李红阳,杨竹森,丁振举,等. 1999. 阿尔泰大型-超大型矿床富集区地壳演化[J]. 地球学报, 20(4): 409~419.
- 刘方杰,方维萱,郭键. 2000. 地幔柱热点成矿作用与秦岭造山带金属成矿[J]. 矿物岩石地球化学通报, 19: 431~432.
- 卢记仁. 1996. 峨眉地幔热柱的动力学特征[J]. 地球学报, 17: 424~438.
- 牛树银,李红阳,孙爱群,等. 1996. 地幔热柱的多级演化及其成矿作用——以冀北地区为例[J]. 矿床地质, 15: 298~307.
- 王登红. 1995. 热点研究述评[J]. 地质科技情报, 4: 9~16.
- 赵国春,吴福元. 1994. 热幔柱构造——一种新的大地构造理论[J]. 世界地质, 13(1): 25~34.
- Burke K., Dewey J F. 1973. Plume-generated triple junctions: Key indicators in applying plate tectonics to old rocks. J. Geol., 81: 406~433.
- Barley M E, Groves D I. 1992. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time. J. Geology, 20: 291~294.
- Hill R I. 1992. Mantle plume and continental tectonics[J]. Science, 256: 186~193.
- Maruyama S. 1994. Plume tectonics. Jour. Soc. Japan, 100: 24~49.
- Mitchell A H G, Garson M S. 1981. Mineral deposits and global tectonic settings [M]. Academic press, 1~108.
- Nataf H C, Van Decar J C. 1993. Seismological detection of a mantle plume[J]. Nature, 364: 115~120.
- Stein M, and Hofmann A W. 1994. Mantle plumes and episodic crustal growth[J]. Nature, 372: 63~68.
- Richards M A. 1989. Flood basalts and hot spot tracks: plume heads and tails[J]. Science, 246: 103~107.
- Sawkins F J. 1976. Metal deposits related to intracontinental hotspot and rifting environments[J]. Journal of Geology, 84(6): 653~671.
- Sawkins F J. 1984. Metal deposits in relation to plate tectonics. Springer-Verlag, 1~25.
- Sillitoe R H. 1974. 2. Tin mineralization above mantle hot spots[J]. Nature, 248: 497~499.