应用流体氦同位素组成研究成矿带区域热背景*

Using Helium Isotope Composition of Fluids to Study Regional Thermal Background of Metallogenetic Belt

汪 洋

(中国科学院广州地球化学研究所，广东 广州 510640; 中国地质大学岩石矿物教研室，北京 100083)

Wang Yang

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; Division of Petrology and Mineralogy, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

摘 要 根据大陆地区壳幔热流比值(q_c/q_m)与地下流体 $^3He/^4He$ 比值之间存在的反相关关系及其回归关系式，$q_c/q_m = 0.815–0.300\times\ln(^3He/^4He)$。本文提出可以根据成矿流体氦同位素比值资料估算成矿带在成矿期的壳幔热流比值。根据我国 3 个新生代内生金属矿床的成矿流体氦同位素组成资料，计算它们在成矿期的区域壳幔热流比值。结果显示，其成矿期的区域壳幔热流比值均小于 1.5。这表明它们形成于具有较高地幔热流值的区域热背景中，来自地幔的热量为成矿作用提供了深部能量。

关键词 成矿流体 氦同位素组成 壳幔热流比值 区域热背景 成矿带

流体在成矿过程中扮演了重要的角色，它是实现矿质萃取和搬运的重要介质；而热能是驱动流体运移的重要能量来源（Garven et al., 1993; 范宏瑞等, 1999; 费红彩等，2002）。因此，研究成矿带区域热背景，对深入理解成矿带的成矿作用及其地球动力学背景等均具有重要意义（邓晋福等, 1999）。

大地热流(q)是表征区域热状态的地球物理学参数，而大陆地区的大地热流由地幔热流(q_m)和地壳中放射性生热元素衰变释放的地壳热流(q_c)两部分组成，即 $q = q_c + q_m$（Morgan, 1984）。所以，壳幔热流比值（q_c/q_m）是指示大陆地壳中热能主要来自地幔还是地壳的指标；既壳幔热流比值大于 1 时，地壳热流值高于地幔热流值，反之地幔热流值高于地壳热流值（Morgan, 1984）。地壳中的放射性生热元素在衰变时不但释放热能，同时产生 ^4He；而地幔内部向外释放的氦具有地球原始氦同位素组成特征，其 $^3He/^4He$ 比值明显高于地壳成因的氦。所以地壳的生热量与其释放的 ^4He 通量之间存在相关关系，而 ^3He 通量与来自地幔的热流之间存在正相关关系。因此，地下流体的氦同位素组成（$^3He/^4He$ 比值）可以表征其来源特征（徐永昌等, 1998）。近年来对内生金属矿床的成矿流体的研究表明，流体包裹体的氦同位素组成是鉴别成矿流体端元组分的重要指标（孙晓明等, 2000; 薛春纪等, 1999）。

本文通过对大陆地区地下流体 $^3He/^4He$ 比值与壳幔热流比值的关系的研究，找出两者之间的相关关系，进而指出可以利用成矿流体氦同位素组成资料反映成矿期的区域热背景，为研究成矿带壳幔深部能量传递过程提供线索。

* 国家自然科学基金项目（40104003），国土资源部科技发展计划“华南地区岩石圈三维结构及其演化”（20001010206），“华北地区岩石圈三维结构及其演化”（20001010202），中国博士后科学基金，中国地质调查局基础地质综合研究课题“燕山造山带花岗岩与大陆地壳改造和生长”和地质调查项目（K1.4-1-2）联合资助

作者简介 汪 洋，男，1969 年生，博士后，主要从事岩石地球化学、区域成矿规律和地球动力学的研究工作。

1 大陆地区地下流体 $^3He/^4He$ 比值与壳幔热流比值的关系

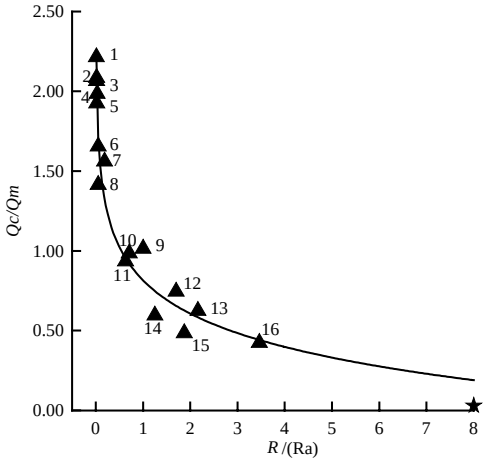


图 1 大陆地区地下流体氦同位素比值($^3He/^4He = R$)与壳幔热流比值(q_c/q_m)的回归关系

1—加拿大地盾；2—东欧地台；3—科拉半岛(SG3 超深钻)，；4—西伯利亚地台；5—Pechora 台向斜,6—Alpine Molasse 盆地；7—德国 KTB 超深钻所在地区；8—Dnieper-Donetz 坳拉谷；9—黄骅凹陷；10—Pannonian 盆地；11—冀中凹陷,；12—济阳凹陷；13—苏北盆地；14—辽河盆地；15—贝加尔裂谷；16—法国 Massif Central 地区；星号—海洋岩石圈(MORB)

本文作者根据地幔释放的氦同位素 ^3He 通量和地幔热流的正相关关系（O'Nions et al., 1983），地壳释放的氦同位素 ^4He 通量与最主要的放射性生热元素铀、钍丰度的正相关关系（Oxburgh et al., 1987），指出大陆地区地下流体的氦同位素组成($^3He/^4He$ 比值)与大陆地区的地幔热流和地壳热流的比值(q_m/q_c)呈正相关关系（汪洋, 1999; Wang, 2000）；即大陆地区地下流体的 $^3He/^4He$ 比值同当地壳幔热流比值(q_c/q_m)呈反相关关系。在收集全球大陆同时具备高精度 $^3He/^4He$ 测试结果和可靠的壳幔热流比值研究成果的 15 个地区资料的基础上(图 1)，本文作者提出了大陆地区地下流体氦同位素比值与壳幔热流比值的统计关系式:

$$q_c/q_m = 0.815 - 0.300 \ln (^3He/^4He)$$

此处 $^3He/^4He$ 的单位是 Ra (大气的 $^3He/^4He$ 比值，等于 1.39×10^{-6})。该公式的回归相关系数高达 0.98。其适用范围是 $^3He/^4He$ 比值在 0.01 ~ 3.46 Ra 之间（汪洋, 1999; Wang, 2000）。根据该公式，可以利用地下流体氦同位素比值资料计算壳幔热流比值，进而反映区域热状态背景。

2 应用流体氦同位素组成研究成矿作用的区域热背景

近年来我国矿床学界相继开展了对内生金属矿床的成矿流体包裹体氦同位素组成的研究，以鉴别成矿热液中地幔流体组分（孙晓明等, 2000; 薛春纪等, 1999）。我们认为可以利用流体氦同位素比值与壳幔热流比值的统计关系式和成矿流体氦同位素比值资料，估算成矿期的壳幔热流比值，从而得到关于成矿作用的区域深部热背景的信息。

根据前人发表的中国西南地区新生代金顶铅锌矿、白秧坪多金属矿和东部的广东富湾新生代银矿的成矿流体包裹体氦同位素组成资料（孙晓明等, 2000; 薛春纪等, 1999），我们估算出金顶铅锌矿成矿时期的壳幔热流比值约 1.05，而白秧坪矿床为 0.71，富湾银矿为 0.93 (表 1)。这些数值均小于全球典型的稳定克拉

表 1 中国 3 个金属矿床成矿流体氦同位素组成

矿床	氦同位素组成变化范围(Ra)	平均氦同位素组成(Ra)	壳/幔热流比值
金顶铅锌矿	0.19 ~ 0.82 (4)	0.455	1.05
白秧坪多金属矿	0.71 ~ 1.97 (4)	1.405	0.71
富湾银矿	0.5930 ~ 0.8357 (3)	0.6786	0.93

注：氦同位素组成数据据孙晓明等, 2000; 薛春纪等, 1999; 括号内为样品数.

通和相对稳定构造区的壳幔热流比值（一般大于 1.5，参见图 1），而与造山带等活动构造区的壳幔热流比值相接近。根据中国大陆新生代造山带和伸展构造发育区的区域大地热流平均值为 70～80 mW/m^2 的数值（Wang, 2001），可以估算出金顶铅锌矿在成矿时期的地幔热流值约为 34～39 mW/m^2，白秧坪矿床为 41～47 mW/m^2，富湾银矿则为 36 ～41 mW/m^2。这些数值远高于中国大陆稳定区的地幔热流值(小于 25 mW/m^2)（汪洋, 1999; Wang, 2001）。这表明这几个内生金属矿床形成于地幔热流值相对较高的区域热-构造背景中，

来自地幔的热量为这些矿床的形成提供了区域规模的深部能量来源。

3　结　论

大陆地区地下流体氦同位素比值($^3He/^4He$)与壳幔热流比值(q_c/q_m)之间存在反相关关系，可以根据地下流体氦同位素比值资料推算区域壳幔热流比值，进而反映区域热状态背景。因此，可以根据成矿流体氦同位素比值资料估算成矿带在成矿期的壳幔热流比值，揭示成矿作用的区域热背景。中国西南地区新生代金顶铅锌矿、白秧坪多金属矿和东部的广东富湾新生代银矿在成矿时期的壳幔热流比值均小于 1.5，表明这几个矿床形成时具有较高的区域地幔热流值，来自地幔的热量为其形成提供了深部能量来源。

参　考　文　献

邓晋福, 罗照华, 赵海玲, 等. 1999. 岩浆作用、深部壳幔过程与资源-环境效应[J]. 地质论评, 45(增刊): 21-25.

范宏瑞, 谢奕汉, 王英兰, 等. 1999. 与火山-潜火山作用有关的潜成热液金(铜银)矿床流体成矿系统[J]. 地质论评, 45(增刊): 154～159.

费红彩, 肖荣阁. 2002. 成矿流体演化与成矿物理化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 21(2): 139～144.

孙晓明, Norman D I, 孙凯, 等. 2000. 一种新的成矿流体示踪法－流体包裹体 N_2-Ar-He 示踪体系[J]. 地质论评, 46(1): 99～104.

汪洋. 1999. 利用地下流体 He 同位素比值研究中国大陆地幔热流[J]. 地球学报——中国地质科学院院报, 20 (增刊): 48～50.

徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 1998. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京: 科学出版社.

薛春纪, 王登红, 杨建民, 等. 1999. 兰坪金顶-白秧坪成矿流体中发现地幔 He－壳幔流体成矿证据[J]. 地球学报——中国地质科学院院报, 20(增刊): 385～389.

Garven G, Person M A, Sverjensky D A. 1993. Genesis of stratabound ore deposits in the mid-continent basins of north America, 1. The role of regional groundwater flow [J]. American Journal of Science, 293: 497～568.

Morgan P. 1984. The thermal structure and thermal evolution of the continental lithosphere [A]. In: Pollack H N, Murphy V R eds. Structure and Evolution of the Continental Lithosphere, Phys. Chem. Earth. New York: Pergamon, 15: 107～193.

O'Nions R K, Oxburgh E R. 1983. Heat and helium in the Earth [J]. Nature, 306: 429～431.

Oxburgh E R, O'Nions R K. 1987. Helium loss, tectonics and the terrestrial heat budget [J]. Science, 237: 1583～1588.

Wang Y. 2000. Using helium isotope composition in underground fluid to estimate the ratio of crust/mantle component of continental heat flow [J]. Chinese Journal of Geophysics (English Edition), 43(6): 805～815.

Wang Y. 2001. Heat flow pattern and lateral variations of lithosphere strength in China mainland: constraints on active deformation [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 126(3-4), 121～146.