中国东南部火山岩型铀矿床碳同位素组成和 ΣCO_2 来源研究*

Carbon Isotopic Composition and Sources of ΣCO_2 of Volcanic Type Uranium Deposits from Southeaster China

赵军红[1,2] 胡瑞忠[1] 蒋国豪[1,2] 谢桂青[1,2]

（1 中国科学院地球化学研究所，贵州 贵阳 550002；2 中国科学院研究生院，北京 100039）

Zhao Junhong[1,2], Hu Ruizhong[1], Jiang Guohao[1,2] and Xie Guiqing[1,2]

(Graduate School, CAS, Beijing 100039, China)

摘 要 本文根据多种制约手段，探讨了中国东南部火山岩型铀矿床成矿热液的 ΣCO_2 来源。结果表明，形成产铀岩体的中酸性火山岩浆不可能为成矿热液提供 ΣCO_2；中国东南部三个铀主成矿期成矿热液中的 ΣCO_2 可能均来自地幔，并受地壳拉张作用的制约。研究结果显示，中国东南部火山岩型铀矿床碳同位素组成略高于花岗岩型铀矿床的碳同位素值，其机制可能是与近地表成矿热液的 ΣCO_2 丢失有关。

关键词 火山岩型铀矿床 ΣCO_2 来源 地幔 中国东南

火山岩型铀矿床是指产在火山岩中的，由火山热液作用或其他地质作用形成的铀矿床，是我国重要的工业铀矿床类型之一。它主要集中分布在华东南中生代酸性火山岩区，尤其产出于濒太平洋火山岩带的外带。过去人们在研究铀矿时对“水、热、源”进行深入的讨论，但正如胡瑞忠（1993）所指出的那样，如果不弄清楚热液中矿化剂的来源及控制因素，即使在确定了热液中水和铀源的前提下，仍然不能揭示含铀热液的形成机制及铀矿床的时空分布规律。有学者曾对花岗岩型铀矿床的 ΣCO_2 来源及碳同位素进行了深入的研究（胡瑞忠，1993；何明友，1996），但对火山岩型铀矿床的矿化剂来源缺乏说明。正是在这种情况下，笔者开展其热液中 ΣCO_2 来源研究，为了确定中国东南部火山岩型铀矿床成矿热液中 ΣCO_2 的来源，作者从碳同位素组成、沉积碳酸盐、有机碳及幔源基性岩浆提供 ΣCO_2 的能力、成矿与地壳拉张的关系进行了研究，结果表明，由地幔提供 ΣCO_2 的可能性是最大的。

1 碳同位素组成

选取不同地区、不同成矿时代、具一定代表性的火山岩型铀矿床，它们分别是福建 570 矿床，江西相山铀矿田，草桃背铀矿床和浙江大茶园铀矿床。通过对比研究，碳同位素组成具有如下 3 个特点：

（1）成矿热液的碳同位素组成与火山岩型铀矿床所处的大地构造单元和成矿时代无关；

（2）不同的矿床具有大致相同的碳同位素组成范围，为–2.287%～–8.55‰，变化范围较窄；

（3）与花岗岩型铀矿床相比，具有相同的碳同位素组成，但总体上是偏高的。

在一般情况下，成矿溶液中的碳来源有 3 个：岩浆或地幔、沉积碳酸盐和各类岩石中的有机碳，由于此类矿床中均不见石墨与方解石共生，因此可以将方解石的碳同位素组成作为成矿热液中的总碳组成

*本文得到国家杰出青年基金项目（49925309）及国家重点研究发展规划项目（G1999042310）的资助

第一作者简介 赵军红，男，1975 年生，博士，地球化学专业。

（Ohmoto，1972）。影响碳同位素变化的因素很多，可以通过它的组成来讨论它的形成机理。一般认为，当碳同位素组成变化范围较大，它可能包含有不同来源的碳组分，如地幔碳同位素的双峰分布可能反映板块俯冲（Pierre Cartigny et al.，1998）、拆沉作用、底侵作用等有关的壳源物质循环（Trull et al.，1993）或地幔的多阶段去气作用（郑永飞，1994）所造成；在流体向上运移过程中可能发生不同流体混合（Stuart et al.，2000）、水岩反应（彭建堂等，2001）、壳源物质混染或有机质的参与（Both，1994）；在热液成矿作用过程中，还涉及到 CO_2 去气作用（Zheng，1993）、矿物沉淀的储库效应（张生，1997）及次生热液蚀变（Zheng 等，1993；Masters，2000）等。所有这些都能改变碳同位素的组成，并可表征其 ΣCO_2 来源。中国东南部火山岩型铀矿床碳同位素组成分布比较集中，变化范围小，因此可能是由单一源区提供。

2 沉积碳酸盐、有机炭与 ΣCO_2 来源

结晶灰岩在动力变质过程中产生脱碳化反应，能改变新生矿物方解石的碳同位素组成，导致 $\delta^{13}C$ 上升，均值达+4.94‰。因此，如果含铀热液中的 ΣCO_2 是来自脱碳化反应，则方解石的 $\delta^{13}C$ 应趋向正值，这与已测得的方解石 $\delta^{13}C$ 是负值的特点相悖，所以在火山岩型铀矿床中，成矿热液中的 ΣCO_2 不可能是脱碳化反应的产物。

有机碳的碳同位素变化范围较大，海相有机碳的 $\delta^{13}C$ 在–10‰~–35‰之间，均值约为–22‰，陆相有机碳 $\delta^{13}C$ 为–26‰左右，比前者稍小（Ohmoto H，1972）。Schoell（1984）认为热解成因的 ΣCO_2 其 $\delta^{13}C$ 组成与母体具有相似的范围。笔者的研究表明，中国东南部火山岩型铀矿床成矿热液中碳同位素值（$\delta^{13}C$：–2.287‰~–8.55‰）远高于有机成因的 ΣCO_2 的 $\delta^{13}C$。周文斌（1995）对相山矿田的矿物包裹体研究表明，ΣCO_2 的含量很高，一般可能达 10~50 g/L，故不可能为生物成因。由此可认为由有机成因的 ΣCO_2 提供成矿矿化剂的可能性较小。

3 中酸性岩浆提供 CO_2 的能力

在硅酸盐熔体中，CO_2 的溶解度随岩浆基性程度的增强而增大，并随熔体中 K_2O/Na_2O 比值增大而增大（Brey，1976；Taylor，1986），中酸性岩浆在演化过程中，随着 K_2O/Na_2O 比值总体递增，CO_2 含量也是逐渐增大的（何明友等，1996）。

据此，中酸性岩浆可以为成矿热液提供ΣCO_2，但是成岩与成矿时差说明成矿流体中的 CO_2 不是由中酸性岩所提供的。笔者的证据如下：

（1）中国东南部火山岩型铀矿床成岩与成矿时差大。570 矿床的成岩年龄为 126.9±7 Ma，而成矿时代接近 89.3 Ma（卢武长等，1990）；草桃背矿床火山机构中心安粗岩 Rb-Sr 年龄为 107 Ma（章邦桐，2001），早期成矿年龄为 103 Ma，晚期成矿年龄为 52 Ma（徐礼中，1984）；相山杂岩体中第二阶段岩石的结晶年龄为 140.3 Ma，最晚阶段超浅成岩的结晶年龄为 135.4 Ma（陈小明等，1999），与之相对应的铀成矿年龄为 100~120 Ma（陈繁荣等，1990；赵永祥，1995）。成矿时差分别达 38 Ma，55 Ma，20~40 Ma。

（2）在铀成矿的中酸性火山岩区，存在大量的基性岩脉的侵入（如相山，草桃背，640），已证实这种基性岩脉（煌斑岩， 辉绿岩）是在成矿之前就已经发生，并且碳酸盐化随着远离基性岩脉而逐渐减弱，直至完全消失。

通过以上的分析，笔者有理由相信，成矿热液中的 ΣCO_2 不可能是由脉岩活动之前的中酸性火山岩提供。

4 岩浆或地幔来源 CO_2

在碳同位素地质学中，岩浆或地幔的碳同位素组成常被认为是一致的，一般认为 $\delta^{13}C$ 应在–3‰~–9‰

之间，Krrich (1990) 认为 $\delta^{13}C$ 值也可以在–0.6‰~–9‰之间，也有学者把洋中脊玄武岩的 $\delta^{13}C$ 值 (–4~–9‰) 作为地幔碳的标志。本区火山岩型铀矿床成矿热液中的 $\delta^{13}C$ 与上述值正好符合，因此认为 CO_2 来源与岩浆或地幔具有直接的关系。

5　地幔和幔源基性岩浆是提供 ΣCO_2 的源泉

杜乐天 (1984) 等的统计结果表明，不同类型的铀矿其 3 个主成矿期是相同的 (分别距今 87 Ma，67 Ma 和 48 Ma)。由此可以推理火山岩型铀矿与地壳拉张具有同步性（胡瑞忠，1993)，具体表现为：①铀成矿正是地壳的拉张期；②铀成矿的多期性与地壳拉张的多期性相对应，从而说明了中国东南火山岩型铀矿床含矿热液中的 ΣCO_2 是由地幔或其上侵基性岩浆提供的可能性，原因是地壳的拉张可能沟通上地幔而释放幔源 ΣCO_2 加入成矿溶液。

沿断裂分布的温泉也是人们探测幔源 CO_2 的一个重要的窗口，根据现代火山气体的研究发现，它们的组成除水蒸气外， CO_2 占了非常大的比重。表 1 是笔者选取的几个温泉点，同位素结果一致表明，溶解于水中的 CO_2 气体来源于地幔。这更进一步说明了由幔源 CO_2 提供矿化剂在量和质上的可靠性。

表 **1**　温泉水碳同位素与 MORB 碳同位素组成

	五大连池火山区	腾冲热海地区	马鞍坪温泉	马里亚纳海沟	大西洋中脊
$\delta^{13}C$/‰	–9.6~–4.2	–3.2~–4.8	–4.18~–4.55	–4~–9	–5.2±0.7
资料来源	杜建国等（1999）	上官志冠（2000）	周文斌（1995）	Fuji Sano（1998）	Bernard Marty et al.,（1999）

值得指出的是相山附近的马鞍坪温泉，其溶解于水中的 CO_2（750 ml/L）与相山矿田的古热水溶液中的 CO_2 十分吻合（周文斌，1995)。华南地壳拉张期间的地幔或此间上侵的幔源基性岩浆完全有能力为铀成矿提供 ΣCO_2。

通过以上的探讨，证实中国东南火山岩型铀矿 ΣCO_2 的主要来源是地幔，并受地壳拉张作用的制约。

6　结　语

笔者根据多种制约因素揭示了中国东南部火山岩型铀矿床的 ΣCO_2 来源。但是在整个过程中，主要还存在以下几点问题：

（1）碳酸盐（$\delta^{13}C$=0）与有机沉积物（$\delta^{13}C$=–30‰）混合，也能产生与大洋中脊玄武岩相同的 $\delta^{13}C$ 值（–4~–9‰)。对于中国东南部火山岩型铀矿床，由于矿区缺少碳酸盐沉积物，因此由这种机制加入的 ΣCO_2 可能性小。

（2）前以叙及，火山岩型铀矿床的碳同位素明显高于花岗岩型铀矿碳同位素组成，这种偏高可能与两次岩浆去气作用有关：即深部的地幔去气作用（郑永飞，1994）和浅部的沉矿流体去气作用（Zheng，1990)。

（3）原始幔源岩浆（煌斑岩、辉绿岩）在上升过程中有围岩的加入。中酸性火山岩对原始幔源岩浆的混染是否可能使 $\delta^{13}C$ 发生改变。

参　考　文　献

何明友，金景福. 1996. 若尔盖铀矿床碳同位素组成与 ΣCO_2 来源. 矿物学报, 16(2): 158~164.

胡瑞忠，等. 1990. 上升热液浸取成矿过程中铀的迁移沉淀机制探讨—以希望铀矿床为例. 地质论评, 36(4): 317~325.

胡瑞忠. 1993. 华南花岗岩型铀矿床成矿热液中 ΣCO_2 来源研究. 中国科学, 23(2): 189~196.

卢武长, 等. 1990. 福建 570 铀矿床的同位素地质特征. 成都地质学院学报, 17(1): 85~93.

彭建堂, 胡瑞忠. 2001. 湘中锡矿山超大型锑矿床的碳、氧同位素体系. 地质论评, 47(1): 34~41.

郑永飞. 1994. 地幔去气作用的碳氧同位素模式. 南京大学学报(地球科学), 16(3).

郑永飞. 2001. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用. 矿床地质, 20(1): 57~70.

周文斌. 1995. 相山成矿古水热系统的水文地球化学研究. 矿物岩石, 15(4): 85~92.

Both R B A and Arribas B. 1994. De Saint-anrer. The Origin of breccia-hosted uranium deposits in carbonaceous metasediments of the Iberian peninsula: U-Pb geochronolohy and stable isotope studies of the Fe deposit, Salamanca Province, Spain. Econ. Geol., 89: 584~601.

Brey G. 1976. Solubility and solubility mechanisms in silicate melts at high pressure. Contri. Min. Petrol., 57: 215~222.

Kerrich R. 1990. Carbon-isotope systematics of Archean Au-Ag vein deposits in the superior province. Can. J. Earth. Sci., 27: 40~55.

Marty B.and Jambon A. 1987. $C/^3He$ in volatile fluxes from the solid Earth: implications for carbon geodynamics. Earth Planet Sci. Lett., 83: 16~26.

Masters R L, Ague J J and Rye D M. 2000. An oxygen and carbon isotopic study of multiple episodes of fluid flow in the Dalradian and Highland Border Complex, Stonehaven, Scotland. J. Geol. Soci., London, 157: 367~379.

Ohmoto H. 1972. Systematic of sulfur and carbon in hydrothermal ore deposit. Econ. Geol., 67: 551~578.

Stuart F, Simmons, Greg Arehart, et al. 2000. Origin of massive calcite veins in the gold cross low-sulfidation, Epithermal Au-Ag deposit, New Zealand. Econ. Geol., 95: 99~112.

Taylor B.E. 1986. Magmatic volatiles: isotopic variation of C, H, and S in: stable isotopes in high temperature geological processes. Rev. in Mineral., 16: 185~226.

Trull T, Nadeau S and Pineau F. 1993. C-He systematics hot spot xenoliths: implications for mantle carbon contents and carbon recycling. Earth Planet Sci. Lett., 118: 43~64.

Zheng Y F and Hoefs J. 1993. Carbon and Oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcites. Mineral Deposita, 28: 79~89.

Zheng Y F. 1990. Carbon-Oxygen isotopic covariation in hydrothermal calcite during degassing of CO_2: A quantitative evaluation and application to the Kushikino gold mining area in Japan. Mineral Deposita, 25: 246~250.