

响。因此,我们支持 Apel^[7], Ferris 等人^[9]的观点。另外,通过前人的研究和我们的观察结果还应该指出,在利用化石植物或考古植物材料的气孔密度来重构古代气候的特征,或利用现代植物的气孔密度变化来预测未来大气 CO₂ 浓度升高对植物的影响时,都必须选择那些对大气 CO₂ 浓度变化反应比较敏感的植物种类。

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 39393001)重大资助项目。

参 考 文 献

- 1 林金星, 胡玉熹. 大气 CO₂ 浓度对植物营养器官和生殖器官形态结构的影响. 植物学集刊, 1994, 7: 60~67
- 2 Beerling D J, Chaloner W G. Stomatal density as an indicator of atmospheric CO₂. The Holocene, 1992, 2: 71~78
- 3 Beerling D J, Chaloner W G. Stomatal density responses of Egyptian *Olea europaea* L. leaves to CO₂ change since 1327 BC. Ann Bot, 1993, 71: 431~435
- 4 Penuelas J, Matamala R. Changes in N and S leaf content, stomatal density and specific leaf area of 14 plant species during the last three centuries of CO₂ increase. J Exp Bot, 1990, 41: 1119~1124
- 5 Woodward F I. Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from preindustrial leaves. Nature, 1987, 327: 617~618
- 6 McElwain J C, Chaloner W G. Stomatal density and index of fossil plants track atmospheric carbon dioxide in the Palaeozoic. Ann Bot, 1995, 76: 389~395
- 7 Apel P. Influence of CO₂ on stomatal numbers. Biologia Plantarum, 1989, 31: 72~74
- 8 Körner C. Does global increase of CO₂ alter stomatal density? Flora, 1988, 181: 253~257
- 9 Ferris R, Taylor G. Stomatal characteristics of four native herbs following exposure to elevated CO₂. Ann Bot, 1994, 73: 447~453
- 10 Woodward F I, Kelly C K. The influence of CO₂ concentration on stomatal density. New Phytol, 1995, 131: 311~327

(1997-09-07 收稿, 1997-11-18 收修改稿)

辽东半岛的幔源 He 渗漏

任建国^{①②*} 王先彬^① 陈践发^① 李春园^①
杨辉^① 欧阳自远^②

①中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室, 兰州 730000; ②中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002. *联系地址: 厦门大学海洋系, 厦门 361005)

摘要 研究了辽东半岛温泉气体的 He 浓度和 He 同位素的组成特征。³He/⁴He 值分布于 0.14~0.72 R_a 之间 (R_a 为大气的 ³He/⁴He 比值 1.40×10⁻⁶), He 同位素组成与 He 浓度和 ⁴He/²⁰Ne 比值呈现线性相关, 表明有少量地幔 He (约 9%) 抵达地表。温泉气体的 ³He/⁴He 值与研究区的大地热流呈现相似的空间分布特征, 说明两者具有一定的成因关系。地幔局部熔融形成的岩浆很可能沿深大断裂侵入地壳。幔源 He、热流异常以及地震活动在空间上的耦合可能反映了地幔脱气与地震活动的内在联系。

关键词 辽东半岛 温泉气 ³He/⁴He 比值 大地热流

自然界中氦有两个稳定的同位素: ³He 和 ⁴He。³He 被认为是地球形成时捕获的原始组分, ⁴He 则是由放射性元素 U, Th 的 α 衰变产生的。由于地壳岩石富集放射性 U, Th 元素, 故而

壳源 He 具有较低的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(地壳放射性成因 He 的平均值为 $0.02 R_a$)^[1]。幔源 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值($8 \sim 30 R_a$)要比典型地壳放射性成因 He 高 3 个数量级^[2], 这种特征使得幔源 He 组分很容易从地壳放射性成因 He 中辨识出来。所以, He 同位素组成是地壳环境中幔源流体独特、灵敏的示踪剂。

原始 ^3He 的测定表明^[2, 3], 地球形成时捕获的原始挥发份现今仍在从地球内部向大气逃逸。大部分的原始挥发份是通过年轻海洋地壳的增生过程迁移到地表的, 相对较少部分则通过大陆地壳逸出。一般认为稳定的大陆地壳对幔源挥发份起着盖层作用, 但在地壳进行拉张变薄和存在年轻火山岩浆活动的地区, 幔源挥发份可以穿透盖层而在地壳中大规模的迁移, 这些地区的地下水、温泉和天然气中均测量到了明显的幔源 He^[4]。

辽东半岛是一个古老的隆起区, 缺乏年轻的火山岩浆活动, 区内现代断裂活动十分强烈, 是我国著名的地震多发区和大地热流异常区^[5]。本区温泉多出露于花岗岩类岩石中, 以中、低温为主。相邻的下辽河盆地天然气井的 He 同位素研究表明^[6], 有相当份额的幔源 He ($> 50\%$)加入天然气藏。因此, 辽东半岛为探讨构造活动地区幔源-壳源 He 相互关系提供了理想的场所。本文测量了辽东半岛温泉气的 He 同位素组成, 希望对温泉气的来源及地幔脱气与地震、构造活动的关系提供一些旁证。

1 结果与讨论

1.1 He 同位素组成

图 1 展示了辽东半岛温泉样品点和 He 同位素组成的分布。所有样品均来自温泉的游离气, 取样方法和实验室测量参阅文献[7]。为了消除空气组分的影响, 使用 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 对测量的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值进行了空气污染的校正。图 1 所标出的样品点的 He 同位素组成均为校正后的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值。除辽阳汤河一个样品外, 空气污染的校正对测量的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值几乎没有影响。辽东半岛温泉气体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值分布于 $0.14 \sim 0.72 R_a$ 之间, 在海城西荒地测量到了最高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.72 R_a$, 本溪草河掌则显示最低值 $^3\text{He}/^4\text{He} = 0.14 R_a$, 这个最低值仅比地壳放射性成因 He 的平均值($0.02 R_a$)高出几倍。地壳放射性成因 He 的同位素组成由地壳岩石的 U, Th 和 Li 丰度控制, 因为 ^4He 由放射性 U, Th 系元素衰变产生, 而 ^3He 则主要来源于 $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反应。单独的一个岩体内由于不同岩相 U, Th, Li 的分布状态不同, 放射性成因 He 同位素组成可能是变化的, 但地壳积累的 He

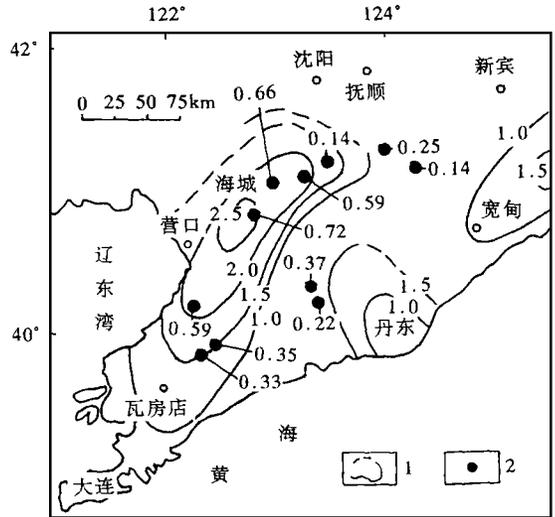


图 1 辽东半岛温泉样品点和 He 同位素组成的分布
1——引自文献[5]的热流(HFU)等值线, 2——样品点及 R/R_a 比值

单独的一个岩体内由于不同岩相 U, Th, Li 的分布状态不同, 放射性成因 He 同位素组成可能是变化的, 但地壳积累的 He

气体本身就可能为不同岩石释放点排出 He 气的混合物, 并且地下水流经不同岩石, 代表了更大系统 He 气的混合. 所以对正常 Li 含量的岩石而言, 地壳放射性成因 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 被认为 $0.04 R_a$ ^[4]. 与地壳原地产生的放射性成因 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 相比, 辽东半岛温泉气显示明显的 ^3He 过剩, 过剩的 ^3He 可能来源于地幔原始 ^3He 的加入. 如果假设上地幔 $^3\text{He}/^4\text{He}=8 R_a$, 地壳 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}=0.02 R_a$, 根据地幔-地壳 He 两端元混合模式, 可计算出辽东半岛温泉气的幔源 He 占 1.7%~9%. 人工 ^3He (来源于核爆炸产生 ^3H) 也可能影响年轻水体(1950 年后)的 He 同位素组成. 尽管我们缺乏温泉水的年龄数据, 但辽东半岛各样品均测量到了高的 He 浓度 $(536 \sim 3652) \times 10^{-6}$, 故而氡衰变生成 ^3He 的影响可忽略不计.

现代大气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}=0.318$, 典型幔源和地壳放射性成因气体的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} \geq 1000$ ^[1]. 由于 ^{20}Ne 主要存在于大气圈中, 所以 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值反映了温泉气体中深源气体(包括幔源和地壳来源)混入的量. 由图 2 可见, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值呈现线性相关性, 表明辽东半岛温泉的 He 气可能由原地积累的放射性成因 He 和具有较高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的深源 He 混合而成. 根据图 2 的线性表达式, 可以确定这两个可能端元的 He 同位素组成. 如果 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 为大气值(0.318), 则其所对应的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 约为 $0.02 R_a$, 这种端元可能代表了地壳浅部原地积累的放射性 He. 但当 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}=1000$ 时, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的外推值为 $1.5 R_a$, 远远低于典型的上地幔值 $8 R_a$, 这并不奇怪, 因为加入地下水系统的深源气体本身便可能是幔源和壳源 He 的混合物.

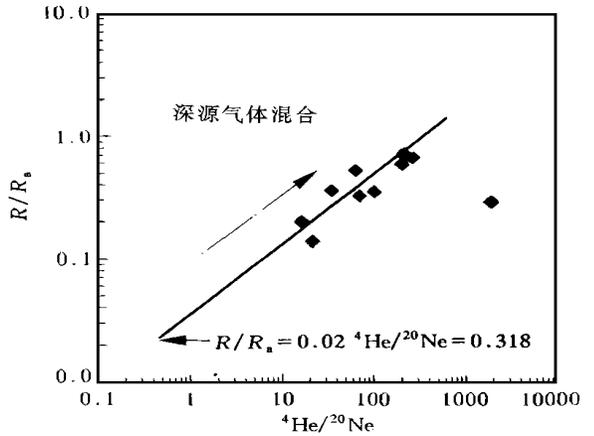


图 2 辽东半岛温泉气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系图

图 3 表明, 研究区温泉气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与 He 浓度也呈现粗略的正相关关系, 说明随着 He 浓度的增加, 幔源 He 的贡献逐渐增大(1.7%~9%). $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与 He 浓度的正相关所含有的意义与图 2 相似, 均表明地下具有高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的深源气体进入了浅地表水系统. 徐永昌等人^[6] 研究了我国东部天然气藏的 He 同位素组成特征, 发现下辽河盆地界 3 井(2009~2046 m) $^3\text{He}/^4\text{He}=3.8 R_a$, He 浓度达 1%. 依据现有数据还不能清楚地说明辽东半岛的深源气体是否与下辽河盆地天然气有相似的 He 同位素组成或者两者具有相同的来源, 但可以肯定的是伴随深源气体的上升, 少量的地幔 He(约 9%) 抵达地表.

1.2 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与大地热流

辽东半岛的 He 同位素空间分布特征展示于图 1 中, 为探讨 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与大地热流的关系, 在图 1 中同时也标出了研究区大地热流值(HFU)的分布^[3]. 由图可清楚地看到该区的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 在空间上呈现规律性的分布, 即以海城西荒地为中心向四周 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 减小, 这与大地热流的等值分布是一致的. 地球表面所观察到的热流实际上由两部分组成: 放射性生热和地壳深部及上地幔的深部热流. He 同位素也可看作是由相应的两部分组成: 壳源 He 和幔源 He. 放射性同位素 ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th 既是地球内部放射性的主要生热元素同时又是放射性成

因⁴He 的母元素, 而³He 主要来源于地幔, 与地幔热相联系. 所以, 辽东半岛幔源³He 与热流异常在空间上的耦合表明幔源 He 与热流异常具有相同的成因和来源.

人工地震的探测结果表明^[8], 在沈阳、鞍山和营口地区有一条北东向的地幔隆起带, 地壳的厚度仅有 30 km. 地幔软流圈上拱以及局部熔融的地幔物质沿深大断裂侵入地壳, 可将深部热源直接带到地壳浅部而造成地表的热量异常^[9]. 目前, 对于幔源挥发份逸出地幔和它们在地壳中迁移的机制还不清楚, 但世界各地与火山岩浆活动有关的喷气、温泉、地下水等的 He 同位素都显示出明显的幔源 He 特征, 因而岩浆活动可能是提取地幔³He 并携带其上升的最主要的过程^[4]. 尽管辽东半岛并没有出现所期望的高³He/⁴He 值, 然而相邻的下辽河盆地天然气藏中测量到了较高³He/⁴He 值(约 4 R_a)^[6]. 因此, 辽东半岛的地幔 He 渗透可能说明上地幔局部熔融产生的岩浆侵入地壳, 新生代以来区域应力场的变化可能限制了岩浆继续上升, 从而也制约了地幔 He 在地壳中的大规模迁移.

2 结论

辽东半岛温泉气的 He 同位素研究表明有少量地幔 He(约 9%)抵达地表. 温泉的 He 气体可以解释为原地积累的放射性成因 He(0.02 R_a)和深源 He 气体(> 1.5 R_a)混合而成. 研究区³He/⁴He 值与大地热流呈现相似的分布特征, 说明两者具有一定的成因关系. 地幔局部熔融形成的岩浆很可能沿深大断裂侵入地壳. 幔源 He、热流异常以及地震活动在空间上的耦合可能反映了地幔脱气与地震活动的内在联系, 这还需进一步的研究.

致谢 中国科学院兰州地质研究所孙明良研究员测量了样品, 中国科学院地球化学研究所刘朝辉、宋茂双协助处理数据, 厦门大学黄奕普教授审阅全文. 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49133009)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Mamyrin B A, Tolkhin I N. Helium isotopes in the nature. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 1984. 273~288
- 2 Lupton J E. Terrestrial inter gases: isotope tracer studies and clues to primordial components in the mantle. Ann Rev Earth Planet Sci. 1983, 11: 371~414
- 3 Craig H, Lupton J E. Primordial neon, helium and hydrogen in oceanic basalts. Earth Planet Sci Lett, 1976, 31: 369~385
- 4 Oxburgh E R, O' Nions R K. Helium loss, tectonics and the terrestrial heat budget. Science, 1987, 237: 1583~1588
- 5 钟以章, 肖秀清. 辽东半岛温泉与地震活动空间分布关系讨论. 地震地质, 1990, 12(4): 344~350
- 6 徐永昌, 沈平, 孙明良, 等. 我国东部天然气非烃及烯有气体地球化学. 中国科学, B辑, 1990(6): 645~651
- 7 王先彬, 陈践发, 徐胜, 等. 地震区温泉气体的地球化学特征. 中国科学, B辑, 1992(8): 849~854

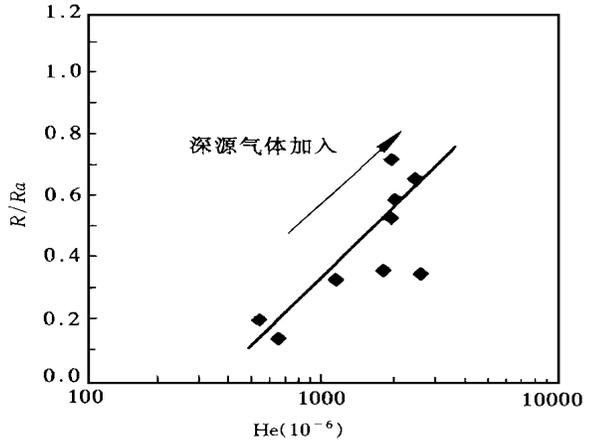


图3 辽东半岛温泉气的 He 同位素组成与 He 浓度的关系图

- 8 卢造勋, 方昌流, 石作亭, 等. 重力变化与海城地震. 地球物理学报, 1978, 21(9): 1~8
9 中国科学院地质研究所地热组. 华北大地热流. 见: 地热研究论文集, 北京: 科学出版社, 1978. 12~31

(1997-05-29 收稿, 1997-09-09 收修改稿)

一个修正的海气通量距平耦合方案

俞永强 张学洪

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100080)

摘要 通过分析海气耦合模式“气候漂移”的原因, 提出了一个修正的海气通量距平耦合方案, 它可以保证通过海气界面的热通量长期平均值接近于零. 应用这个耦合方案, 可以成功地把一个20层海洋环流模式和9层大气环流模式耦合起来, 并完成了 一个40 a 的长期积分. 积分结果表明, 模式没有出现明显的气候漂移.

关键词 海气耦合 气候漂移 通量修正 通量距平

全球海洋和大气相互耦合的环流模式 (CGCM) 是研究年际、年代际气候变动以及人类活动引起的世纪尺度的气候变化的重要工具. 但是, 迄今为止大部分直接耦合的大气-海洋模式都有不同程度的“气候漂移”^[1], 这主要是海气界面上各种通量的误差在耦合过程中不稳定增长的结果. Sausen 等人^[2]最早提出了一种“通量修正”的技术, 并被广泛地用于许多海气耦合模式. 使用的结果表明: “通量修正”的实际效果是因模式而异的, 气候漂移并不总是能够被有效地控制住.

张学洪等在发展中国科学院大气物理研究所全球海气耦合模式的过程中, 提出了一种“预估-校正”的月平均通量距平耦合方案^[3] (简称 MFA). MFA 先后被用于 3 个具有不同垂直分辨率和参数化物理过程的海气耦合模式, 虽然所有这些模式都能稳定积分数十年乃至上百年, 并能在不同程度上模拟出某种类 ENSO 型的年际气候变动, 但在控制模式的气候漂移方面效果则不尽相同: 其中之一基本上没有气候漂移^[3], 另外两个则有不同程度的变冷或变暖的长期趋势^{4, 5}. 这就是说, MFA 的实际效果也是因模式而异的.

俞永强等人^[6]在对文献[5]的结果进一步分析的基础上提出一个修正的 MFA 耦合方案 (简称 MMFA), 并在控制耦合系统的气候漂移方面取得了显著的改进. 本文将扼要报道海气耦合方案 MMFA 及其试验结果.

1 耦合方案 MMFA

海洋和大气通过它们之间的界面交换动量、热量和水分, 因此一个完整的耦合方案也应当包括这 3 个方面. 为简洁起见, 此处仅以海表热通量为例来叙述修正的耦合方案 MFA 和 MMFA. 令 Φ 和 Ψ 分别表示大气和海洋的状态, 通过海气界面由大气进入海洋的热通量 F 可以写成 Φ 和 Ψ 的函数, 即 $F = F(\Phi, \Psi)$. 引进上标 “C”, “U” 和 “O” 来区分耦合、未耦合和观测的状态, 于是可以分别定义

$$F^C = F(\Phi^C, \Psi^C), F^U = F(\Phi^U, \Psi^U), F_0^R = F(\Phi^U, \Psi^U),$$

其中 F^C 就是当海洋模式和大气模式直接耦合时海洋得到的热通量, 称为“耦合通量”; F^U 是