

地震地球化学研究进展

周晓成, 杜建国, 陈志, 崔月菊, 刘雷

中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036

摘要:本文总结了近十年地震地球化学研究的最新进展,并建议未来在该领域的研究应在同位素地球化学、深部流体地球化学和地球化学场与应力场耦合方面开展。

关键词:地震; 地球化学; 同位素; 流体

中图分类号:P594⁺.1 文献标识码:A 文章编号:1007-2802(2012)04-0340-07

Advance Review of Seismic Geochemistry

ZHOU Xiao-cheng, DU Jian-guo, CHENG Zhi, CUI Yue-ju, LIU Lei

Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China

Abstract: This paper reviews the research advances of seismic geochemistry in the last decade and proposals that the promising studies of this field may come from isotope geochemistry, deep fluid geochemistry and the coupling of geochemical and stress fields.

Key words: earthquake; geochemistry; isotope; fluid

本文在以往综述的基础上^[1~5],全面总结了近十年来地震地球化学取得的成果,特别是汶川地震以后取得的一些重要成果,目的是探寻目前地震地球化学的热点研究方向,提出未来地震地球化学发展可能的方向,为地震地球化学研究在减轻地震灾害中发挥更重要的作用。

1 实验模拟地球化学在地震形成机理方面的研究

1.1 实验地球化学

高温高压研究揭示,地幔中水以含水变质矿物、硅酸盐矿物(橄榄石、辉石等)及高压结构相(橄榄石、钙钛矿相、方镁铁矿等)、高密度含水镁硅酸盐和熔体等形式存在^[6],它们在地壳和地幔的脱水作用和熔融反应不仅能产生大量流体,而且在地震活动中起重要作用。当脱水和熔融反应产生的流体压力足够大时,就产生水压裂隙,进而影响岩石的孔隙度和渗透率;不同流体压力状态之间的压力隔挡层的

突然破裂会形成瞬间低压边界,压力降低又促进脱水和熔融反应^[7]。高温高压岩石实验发现含水矿物脱水及其部分熔融可能与地球内部低速高导层的形成和地震成因有内在联系^[8]。高温高压下蛇纹石脱水脆化的实验表明,脱水脆化是与深度无关的一种触发地震机制,俯冲板块顶部低速带是流体充填定向排列的裂隙所致^[9]。地球深部流体影响地球深部物质运动和岩石物理化学性质,与地震孕育也应该密切相关^[10]。

1.2 多尺度计算机模拟

多尺度计算机模拟是研究地震孕育过程的有效手段。地震孕育和发生过程中矿物脱水和熔融反应过程是一个复杂的物理、化学过程,并伴随复杂的物理结构相变和化学相变,因而必须在原子水平用量子力学方法进行研究。密度泛函理论的主流程序包,如基于平面波赝势法的 Vienna Ab Initio Simulation Package (VASP) 和 Car-Parrinello Molecular Dynamics (CPMD),以其在相变和流体体系计算方

收稿日期:2011-12-06 收到, 2012-01-06 改回

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项重点资助项目(0210240202);国家科技支撑计划资助项目(WFSD-10)

第一作者简介:周晓成(1978—),男,博士研究生,研究方向:构造地球化学、流体地球化学. E-mail: zhouxiaocheng188@163.com.

面的优势,近几年在水、液态硝基甲烷、液态甲醇的物理化学性质研究方面取得了很好的成果^[11]。第一性原理方法广泛应用于相对较大和较复杂地球矿物结构体系,极大促进了深部地球科学的研究,如利用第一性原理研究橄榄石的晶体结构高温高压特性和含水结构,同时还通过对弹性性质模拟定量研究了410 km 地震不连续带特征^[12, 13]。Liu 等^[14, 15]利用第一性原理 CASTEP 程序和准简谐 Debye 模型计算镁橄榄石的高温高压晶体结构特征、高压弹性、波速、电性和相变等性质,研究发现水的存在会使镁橄榄石的弹性及波速都降低,3.2% 的水在 0~14 GPa 的范围,使 V_p 和 V_s 速度分别降低了 3.1%~7.1% 和 3.6%~9.7%;而 1.6% 的水使 V_p 和 V_s 速度分别降低了 2.4%~4.1% 和 3.3%~6.6%。橄榄石是上地幔最主要的矿物组分,水使镁橄榄石波速降低可能是上地幔低速层的成因。利用热力学、分子动力学和量子化学计算方法研究天然矿物和地质流体,能够从微观角度了解地震成因机制和低速层的形成演化。

2 火山区流体地球化学与地震关系

2.1 火山区温泉和深井地球化学

火山区温泉主要是火山余热型温泉。Nishio 等^[16]测定得到了日本 Ontake 火山附近温泉和深井水样品中⁷Li/⁶Li 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值,很好的解释了水的两种来源:地表大气降水和非地表来源的水。基于 Cl/Li 和 Cl/Sr 比值,可以挑选出受大气降水污染较少的含 Li 和 Sr 同位素水样。通过日本 Ontake 火山水样的 Li 和 Sr 同位素研究表明研究区地震群与流体的联系主要在下地壳。

火山区气体的释放与地下地质构造、物质成分等火山地质条件密切相关,因此,火山区温泉地下逸出气体是反应地下信息最好的载体,能反应地球深部信息,并与火山地区地震活动强度有直接联系^[17]。火山区岩浆来源气体的主要成分都是 CO₂,通常占 80% 以上,最高含量甚至达 99% 以上;其它气体组分有 N₂、Ar、O₂、CH₄、He、H₂、H₂S、SO₂、CO、Rn 气等。常规气体组分 CO₂、N₂、O₂ 和 Ar。岩浆来源 He、H₂、CH₄ 和 CO₂ 的含量,³He/⁴He、⁴He/²⁰Ne 比值、CH₄ 和 CO₂ 的¹³C 值、^δ³⁴S-H₂S 和^δ¹⁵N-N₂ 均为指示火山区深部岩浆活动的敏感参数,可作为现阶段判断区内火山喷发活动和地震活动危险的重要指标^[18~20]。

中国休眠火山区岩浆来源气体的主要成分是

CO₂,占 80%~99%;此外,还有 CH₄、He、H₂、N₂、Ar、O₂、H₂S、SO₂、CO 等气体,其中 CH₄ 和 He 是除 CO₂ 以外最值得重视的直接来自地幔岩浆体的气体组分。He 同位素组成(³He/⁴He)是休眠火山区最可靠的幔源物质的指示性参数。岩浆来源的 CO₂ 和 CH₄ 也具有区别于浅源气体的稳定同位素组成(^δ¹³C 值)。长白山火山区近期 CO₂ 和 CH₄ 的碳同位素分馏监测结果显示,2002 年汪清 7.2 级深震虽然可能引发了深部岩浆的局部扰动,但可能没有产生大量持续不断的上地幔岩浆物质流的上升迁移^[21]。长白山长白聚龙泉群逸出的 He 中³He/⁴He 比值 2003 年上升缓慢,但在 2004 年逸出的 He 中幔源 He 含量明显增加。2002~2004 年,天池火山区逸出气体及其 He 同位素异常变化与该区地震活动有一定对应关系,其中锦江泉群在 2004 年下半年地震活动趋势减弱后,He 同位素异常明显减弱;而长白聚龙泉群在地震活动减弱后,He 同位素异常反而明显增加,表明热储型泉群岩浆来源气体异常释放明显滞后于深大断裂型温泉点^[22]。腾冲热海地热田温泉中的 CO₂、CH₄、HCO₃⁻、CO₃²⁻ 和泉华的^δ¹³C 值范围分别是 -7.6‰~1.18‰、-56.9‰~-19.48‰、-6.7‰~-4.2‰、-6.4‰~-4.2‰ 和 -27.1‰~0.6‰,可以推断 CO₂ 主要来自幔源或岩浆,而 CH₄ 有多种来源,温泉水中的 HCO₃⁻、CO₃²⁻ 主要来自火山 CO₂。热储温度一般为 250~300℃^[23]。腾冲热海近期区内水热流体活动异常强烈,区内几乎所有 95℃ 以上的沸泉、喷沸泉以及 1993 年以来发生的 20 余次水热爆炸点均沿西南方向断裂分布,显示该断裂目前处于强烈活动之中^[24]。腾冲、长白山(不包括天池火山口内湖滨)火山区岩浆来源气体中甲烷^δ¹³C 值的变化范围与国际上地热区甲烷大致相同,平均值分别为 -19.0‰ 和 -32.6‰;五大连池火山区与天池火山口内湖滨强气体释放带逸出甲烷的^δ¹³C 值较低,平均分别为 -45.8‰ 和 -47.9‰,类似于东非裂谷带基伍湖(Kivu)的甲烷。这些低^δ¹³C 值甲烷可能直接来自上地幔;岩浆来源甲烷在火山喷发过程中的动力学分馏导致其^δ¹³C 值的降低,岩浆源区越深,其^δ¹³C 值越低^[25]。

2.2 火山区土壤气体地球化学

在过去的几十年,在火山地区一直用土壤气中 CO₂ 脱气来辨别火山地区的脱气构造,估计火山系统的排放量可能作为地震构造和火山活动的标志^[26],因为火山区土壤气中 CO₂ 通量增加与地震活

动增强有较好的关系^[27]。意大利 Stromboli 火山 2007 年爆发前不久,土壤气中 CO₂ 通量大幅度增加,在熔岩流出时达到最大值 90000 g/m² · d, δ¹³C 值也有明显增大,最高达 1.8‰,³He/⁴He 比值也大幅度增加,最高达 4.6 Ra^[28],同时岩浆的喷发速率与土壤气氡的脱气速率呈正相关,这意味着岩浆房体积和气体运移可能与触发地震的火山的动态反应有一定联系^[29]。菲律宾中部塔奥火山,从 1993 年 6 月至 1996 年 11 月对土壤气氡的连续监测表明,1994 年 11 月 15 日,离火山 48 km 的地方发生 M_S7.1 级地震,地震前 22 天土壤气氡有明显增加,增加幅度是背景值的 6 倍^[30]。

2.3 泥火山地球化学变化与地震的关系

泥火山与地震都是区域构造应力集中的结果,因此,泥火山大多分布于地震活动带,且与地震活动关系密切^[31~34]。在地震孕育、发展和发生过程中,区域构造应力不断增强,封闭构造中的岩石孔隙压力逐渐增大,当压力达到泥火山喷发条件时,大量矿化水、泥、气体顺着断裂涌出,泥火山喷发;地震发生后,区域应力降低,泥火山恢复平静^[35]。印度尼西亚爪哇 LUSI 泥火山在地震前,喷出泥浆的体积由 120 km³/d 急剧上升至 180 km³/d,CO₂ 浓度也由 9.9% 上升至 74.3%^[36]。印度洋北部安达曼群岛泥火山气体主要组分是甲烷,浓度是 55.7%,其它气体有 N₂(32.2%)、O₂+Ar(9.9%)、CO₂(2.0%) 和 He(0.2%)。此外,²²²Rn 的浓度(7500 Bq/m³)也是较高的,在地震前后有明显的异常^[37]。在意大利平宁山脉北部接近皮耶韦-圣斯特凡诺的泥火山主要释放富集 CO₂ 的流体,2001 年 11 月 6 日地震活动前后,在泥火山的一些排气口震前由排气为主转变为震后喷出泥浆为主,延断裂横切面发生的地震主要是水压致裂引起^[38]。

3 高光谱地球化学地震监测研究

高光谱遥感作为一种新的遥感探测手段,其光谱通道数多且连续,光谱分辨率高,信息量大,综合了地面目标的空间维、时间维、光谱维等特征,具有“图谱合一”的特点,可实现遥感信息的定量化分析^[39]。而且,高光谱遥感数据包含了大气中的温度、湿度和气体(H₂O、O₃、CO、CH₄、CO₂ 等)变化等信息^[40],可以监测与地震有关的气体异常。利用高光谱遥感数据监测与地震有关的气体前兆异常与传统的定点取样检测法相比,具有取样简单、可实时远距离获得气体三维数据、组分分析快速等优点^[41]。

2001 年 1 月 26 日,印度 Gujarat M_S7.8 地震前,卫星遥感数据显示 CO 含量有异常,且该异常与热红外异常相吻合^[42]。此外,1985 年墨西哥 Michoacan 地震^[43]、2001 年 1 月 26 日印度 Gujarat M_S7.8 地震^[44]和 2008 年 5 月 12 日汶川地震^[45]前后均有水汽含量异常增高的现象,Gujarat 地震还引起 O₃ 浓度和大气气溶胶^[46]异常变化。

4 主要地震活动断裂带流体地球化学监测与地震关系

4.1 深钻流体地球化学的地震监测

深钻流体地球化学监测发现,气体中 He、Ar、N₂、Rn、Hg 的浓度有许多前兆和同震异常^[47]。汶川地震破裂带深钻气体测量表明,气体异常一般在余震前数天出现,并在震后持续多天,不同气体组分所呈现的异常规律不同,且异常数量随着震中距的增加而明显减少。其中,He、CH₄ 和 CO₂ 浓度变化的映震能力相对于 Ar、N₂、O₂ 组分浓度变化较明显,其 He/Ar 和 N₂/O₂ 比值多为正异常,Ar/N₂ 和 O₂/Ar 则表现出相反状态,表明地壳流体的活动与地震活动实际上是伴生关系^[48]。在圣安德烈斯断裂深钻 2117~3196 m 处,³He/⁴He 值为 0.35~0.46^[49],在 3194~3301 m 处,³He/⁴He 值变化比较大,范围在 0.22~0.88,³He/⁴He 值不断增大表明有来自地幔连续的流体供给^[50]。

4.2 温泉和深井流体地球化学

4.2.1 温泉和深井离子组分 活动构造对地震、地下热水和微量元素的高值区具有控制作用,在空间分布上具有较明显的一致性;高中温热水区(尤其是高中温热泉密集带)常常是地震活动的强烈区,但强震区不一定有高中温热泉密集^[51]。汶川地震前后,重庆北温泉水量及水化学均有较大变化,震后水温下降 1℃,K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 浓度减少,Mg²⁺ 浓度增大;Fe²⁺、Mn²⁺ 浓度于地震当日成倍增长,随后逐渐降低,7 月 4 日的浓度与 5 月 1 日相当;SO₄²⁻ 浓度增高后逐渐降低,F⁻ 浓度减小。这是因为汶川地震强烈影响导致冷水下渗作用,海拔相对较高而温度较低的温泉水改道,并有其它来自裂隙或者地表的低温水汇入温泉含水层,加快了水化学反应,并在海拔相对较低的泉点流出地面^[52]。

4.2.2 温泉和深井气体组分和同位素 活动断裂带地区的温泉、深井气体同位素比值(³He/⁴He、²¹Ne/²²Ne、⁴He/²⁰Ne、⁴⁰Ar/³⁶Ar)与组分浓度(He、H₂、CH₄、Ne、Ar 和 N₂)及其比值(He/Ar、N₂/Ar、

CH_4/Ar)均在地震前后或当时出现明显异常^[53~55]。氡气一般在地震前30天开始出现异常,并且离地震发生时间越接近异常数目越多;地震震级越大,异常开始越早,持续时间越长^[56]。汶川 $M_{\text{s}}8.0$ 地震后,许多学者研究了震前和震后水位、水温、水氡和温泉气体组份等大量温泉地球化学异常^[57~60],发现地震时,在川西鲜水河断裂带和岷江断裂带,含大量 He 和 CO_2 的幔源流体涌入地壳,与壳源流体混合,使温泉气体中³He/⁴He 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值大幅度上升。在康定地区 R/Ra (Ra 为大气的³He/⁴He) 最高达到 5.3 Ra, 慢源氦的贡献率最高达到 44.1%。随着时间推移,慢源流体供给逐渐减少,壳源流体中放射成因 He 和有机成因 CO_2 在温泉气体中相对含量增大,³He/⁴He (Ra) 值、 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐减小。两年后大部分温泉恢复到地震前地下流体的平衡状态^[61]。对意大利和日本一些地震区温泉气体的研究发现来自地幔储存在震源区的高压 CO_2 气体对地震的孕育和发生以及余震的发生起到重要作用^[62~66]。

4.3 土壤气体地球化学

4.3.1 气体组分浓度 土壤气 He、Rn 和 CO_2 浓度异常是寻找地震活动断裂带非常有效的方法^[67]。活动断裂带土壤气体(He、Rn、Hg、 CH_4 和 CO_2 等)对地震的响应性十分敏感^[68,69]。通过总结已有的土壤气地震前兆异常资料发现,地震震级越大土壤气地震前兆异常幅度越大,离震中距离越近异常数目也越多^[70]。台湾新城断裂土壤气 Rn 和 CO_2 监测到大量明显的地震前兆异常^[71]。土壤气中 He、 H_2 、 CO_2 、Rn 浓度和 N_2/O_2 值在汶川地震陡坎附近有明显高值异常。土壤气中 He 和 H_2 的浓度异常幅度随着余震强度的衰减而降低。在三次测量中,土壤气中的 He 和 H_2 的最大浓度(40 和 279.4 $\times 10^{-6}$, V/V)都出现在靠近震中地段。因此地震破裂带土壤气中 He、 H_2 、 CO_2 、Rn 和 Hg 的浓度异常可能与余震活动和区域应力场变化有关^[72]。

4.3.2 气体组分通量 地震活动断裂带土壤气体 CO_2 和 Rn 异常浓度和通量可以很好地反映地震活动断裂带的活动情况^[73,74]。它既可以产生大量的热动力变质成因 CO_2 , 又可以作为通道释放来自下地壳甚至上地幔的 CO_2 组分。在地球深部生成的众多流体组分中, CO_2 是最有可能大量迁移至地表, 并在地表某点集中释放的气体之一^[75]。在海原断裂东南段破裂带中部的蔡祥堡, 土壤气中 Rn 浓度最高达 38.3 kBq/m³, 其通量最高达到 828.6 mBq/m²s^[76]。意大利中部的 Fucino 山间盆地, 土

壤气中 Rn 的通量在非断层地区一般是 10 mBq/m²s, 在断层区一般在 45 mBq/m²s 以上, 最高可达到 120 mBq/m²s^[64]。尼泊尔中部喜马拉雅山前麓的逆冲断裂区, 土壤气体中 CO_2 和 Rn 通量有很好的正相关关系, CO_2 通量最高达到 19000 g/m²d, 这与活火山地区 CO_2 通量相当; Rn 通量最高达 2 Bq/m²s, 也是极高的^[77]。

5 结语

综上所述, 可得出如下几点认识和建议:

- (1) 在地震地球化学研究过程中, 同位素地球化学的作用越来越重要;
- (2) 深部流体对地震孕育和发生起到非常重要的作用, 在以后地震地球化学研究中应进一步采用新技术;
- (3) 地震活动断裂带气体地球化学场变化与地应力场反映非常敏感, 因此, 气体地球化学场和应力场的耦合问题将是重点研究的问题。

参考文献 (References):

- [1] 车用太, 刘成龙, 鱼金子, 官致君, 李军. 汶川 $M_{\text{s}}8.0$ 地震的地下流体与宏观异常及地震预测问题的思考[J]. 地震地质, 2008, 30(4): 828—838.
Che Yongtai, Liu Chenglong, Yu Jinzi, Guan Zhijun, Li Jun. Underground fluid anomaly and macro anomaly of $M_{\text{s}}8.0$ Wenchuan earthquake and opinions about earthquake prediction[J]. Seism. Geol., 2008, 30(4): 828—838. (in Chinese with English abstract)
- [2] Italiano F, D'Alessandro W, Martelli M. Gas geochemistry as a tool to investigate the Earth's degassing through volcanic and seismic areas: The soul of the 8th international conference on gas geochemistry[J]. Volcan. Geoth. Res., 2007, 165: 1—4.
- [3] Du J, Zhang Y, Li H. Advances in studies of thermal-fluid geochemistry and hydrothermal resource in China[C]. Ueckermann H I. Geothermal energy research trends [M]. New York: Nova Sci. Publish., Inc., 2007, 51—88.
- [4] Du J, Si X, Chen Y, Fu H, Jian C. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China[C]. Ó Stefánsson Geochemistry researcb adnances[M]. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2008.
- [5] Yang T F, Marty B, Hilton D R, Kurz M D. Geochemical applications of noble gases[J]. Chem. Geol., 2009, 266: 1—3.
- [6] 谢鸿森, 侯渭, 周文戈. 地幔中水的存在形式和含水量[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 055—060.
Xie Hongsen, Hou Wei, Zhou Wenge. Water content in the Earth's mantle[J]. Earth. Sci. Front., 2005, 12(1): 055—060. (in Chinese with English abstract)
- [7] Miller S A, Vander Zee W, Olgaard D L, Connolly J A D. A fluid-pressure feedback model of dehydration reactions: Experiments, modelling, and application to subduction zones[J]. Tectonophysics, 2003, 370: 241—251.

- [8] Liu W, Du J, Ba L, Zhou W, Guo J. Ultrasonic P wave velocity and attenuation in pyroxenite under 3.0GPa and up to 1170°C[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, 20(1): 164—166.
- [9] Jung H, Green H W. Experimental faulting of serpentinite during dehydration: Implications for earthquakes, seismic low-velocity zones, and anomalous hypocenter distributions in subduction zones[J]. *Int. Geol. Rev.*, 2004, 46: 1089—1102.
- [10] Benson P M, Vinciguerra S, Meredith P G, Paul Young R. Spatio-temporal evolution of volcano seismicity: A laboratory study[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, 297(1-2): 315—323.
- [11] Kress J D, Mazevert S, Collins L A. Simulations of molecular fluids under extreme conditions[J]. *Chem. Phys.*, 2004, 121(20): 10111—10119.
- [12] Gillan M J, Alfe D, Brodholt J, Vocablo L, Price G D. First-principles modelling of Earth and planetary materials at high pressures and temperatures[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2006, 69: 2365—2441.
- [13] Frost D J, Dolejš D. Experimental determination of the effect of H₂O on the 410km seismic discontinuity[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2007, 256: 182—195.
- [14] Liu L, Du J G, Zhao J J, Liu H, Wu D, Zhao F L. Study of high-pressure and high-temperature behaviors and α -to- β phase transition of forsterite by first-principles and quasi-harmonic Debye model[J]. *Comput. Phys. Commun.*, 2008, 179: 417—423.
- [15] Liu L, Du J, Liu W, Zhao J J, Liu H, Gao H, Chen Y. Elastic properties of hydrous forsterites under high pressure: First-principle calculations[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2009, 176: 89—97.
- [16] Nishio Y, Okamura K, Tanimizu M, Ishikawa T, Sano Y. Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan: Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms[J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2010, 297(3-4): 567—576.
- [17] De Leeuw G A M, Hilton D R, Güleç N, Mutlu H. Regional and temporal variations in CO₂/³He, ³He/⁴He and $\delta^{13}\text{C}$ along the North anatolian faultzone Turkey[J]. *Appl. Geochim.*, 2010, 25: 524—539.
- [18] 高玲, 上官志冠, 魏海泉, 武成智. 长白山天池火山近期气体地球化学的异常变化[J]. 地震地质, 2007, 21(2): 179—188. Gao Ling, Shangguan Zhiguan, Wei Haiquan, Wu Chengzhi. Recent geochemical changes of hot spring gases from Tianschi volcano area, Changbai mountains, northeast China [J]. Seism. Geol., 2007, 21 (2): 179—188. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵慈平, 冉华, 陈坤华. 腾冲火山区壳内岩浆囊现今温度: 来自温泉逸出气体 CO₂、CH₄ 间碳同位素分馏的估计[J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 2883—2897. Zhao Ciping, Ran Hua, Chen Kunhua. Present-day temperatures of magma chambers in the crust beneath Tengchong volcanic field, southwestern China: Estimation from carbon isotopic fractionation between CO₂ and CH₄ of free gases escaped from thermal springs[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 2011, 27 (10): 2883—2897. (in Chinese with English abstract)
- [20] Janik C J, McLaren M K. Seismicity and fluid geochemistry at Lassen volcanic national park, California: Evidence for two circulation cells in the hydrothermal system[J]. *J. Volcan. Geoth. Res.*, 2010, 189(3-4): 257—277.
- [21] 上官志冠, 武成智. 中国休眠火山区岩浆来源气体地球化学特征[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2638—2646. Shangguan Zhiguan, Wu Chengzhi. Geochemical features of magmatic gases in the regions of dormant volcanoes in China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (11): 2638—2646. (in Chinese with English abstract)
- [22] 高玲, 上官志冠, 魏海泉, 武成智. 长白山天池火山近期气体地球化学的异常变化[J]. 地震地质, 2006, 28(3): 358—366. Gao Lin, Shangguan Zhiguan, Wei Haiquan, Wu Chengzhi. Recent geochemical changes of hot-spring gases from Tianschi volcano area, Changbai mountains, northeast China [J]. Seism. Geol., 2006, 28(3): 358—366. (in Chinese with English abstract)
- [23] Du J, Liu C, Fu B, Ninomiya Y, Zhang Y, Wang C, Wang H, Sun Z. Variations of geothermometry and chemical-isotopic compositions of hot spring fluids in the Rehai geothermal field, southwestern China[J]. *J. Volcan. Geoth. Res.*, 2005, 142: 243—261.
- [24] 上官志冠, 高清平, 赵慈平. 腾冲热海地区 NW 向断裂活动性的地球化学证据[J]. 地震地质, 2004, 26(1): 46—51. Shangguan Zhiguan, Gao Qinwu, Zhao Ciping. Geochemical evidence of the activity of the NW trending fault at Rehai area, Tengchong, Yunnan Province, China[J]. Seism. Geol., 2004, 26(1): 46—51. (in Chinese with English abstract)
- [25] 上官志冠, 赵慈平, 高玲. 中国活动火山区甲烷的碳同位素研究[J]. 岩石学报, 2006, (22): 1456—1464. Shangguan Zhiguan, Zhao Ciping, Gao Lin. Carbon isotopic compositions of the methane derived from magma at the active volcanic regions in China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, (22): 1456—1464. (in Chinese with English abstract)
- [26] Giammanco S, Bellotti F, Groppelli G, Pinton A. Statistical analysis reveals spatial and temporal anomalies of soil CO₂ efflux on Mount Etna volcano (Italy) [J]. *J. Volcan. Geoth. Res.*, 2010, 194(1-3): 1—14.
- [27] Baubron J C, Rigo A, Toutain J P. Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees France) [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 196: 69—81.
- [28] Rizzo A, Grassi F, Inguaggiato S, Liotta M, Longo M, Mandona P, Brusca L, Capasso G, Morici S, Rouwet D, Vita F. Geochemical evaluation of observed changes in volcanic activity during the 2007 eruption at Stromboli (Italy) [J]. *J. Volcan. Geoth. Res.*, 2009, 182 (3-4): 246—254.
- [29] Cigolini C, Laiolo M, Coppola D. Earthquake-volcano interactions detected from radon degassing at Stromboli (Italy) [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 257(3-4): 511—525.
- [30] Richon P, Sabroux J C, Halbwachs M, Vandemeulebrouck J, Poussielgue N, Tabbagh J, Punongbayan R. Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30 (9): 1481, doi: 10.1029/2003GL016902, 2003.
- [31] Giammanco S, Parella F, Gambardella B, Schifano R, Pizzu S, Galante G. Focused and diffuse effluxes of CO₂ from mud volcanoes and mofettes south of Mt. Etna (Italy)[J]. *J. Vol-*

- can. Geoth. Res., 2007, 165: 46—63.
- [32] Mellors R, Kilb D, Aliyev A, Gasanov A, Yetirmishli G. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions[J]. J. Geophy. Res., 2007, 112: B04304.
- [33] Davies R J, Brumm M, Manga M, Rubiandini R, Swarbrick R, Tingay M. The east java mud volcano (2006 to present): An earthquake or drilling trigger[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2008, 272(3-4): 627—638.
- [34] Manga M, Rowland J. Response of alum rock springs to the October 30, 2007 earthquake and implications for the origin of increased discharge after earthquakes [J]. Geofluids, 2009, 9: 237—250.
- [35] Tanikawa W, Sakaguchi M, Wibowo H T, Shimamoto T, Tadai O. Fluid transport properties and estimation of overpressure at the Lusi mud volcano, East Java Basin[J]. Eng. Geol., 2010, 116(1-2): 73—85.
- [36] Mazzini A, Svensen H, Akhmanov G, Aloisi G, Planke S, SØrensen A, Istadi B. Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia[J]. Earth. Planet. Sci. Lett., 2007, 261: 375—388.
- [37] Chaudhuri H, Ghose D, Bhandari R K, Sen P, Sinha B. A geochemical approach to earthquake reconnaissance at the Baratang mud volcano, Andaman and Nicobar Islands[J]. J. Asian. Earth. Sci., 2011. doi:10.1016/j.jseas.2011.10.007.
- [38] Bonini M. Structural controls on a carbon dioxide—driven mud volcano field in the Northern Apennines (Pieve Santo Stefano, Italy): Relations with pre-existing steep discontinuities and seismicity[J]. J. Struct. Geol., 2009, 31(1): 44—54.
- [39] 余旭初, 冯伍法, 林丽霞. 高光谱-遥感测绘的新机遇[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(2): 102—105.
Yu Xuchu, Feng Wufa, Lin Lixia. Hyperspectral remote sensing—A new opportunity for surveying and mapping[J]. J. Zhengzhou Inst. Surveying and Mapping, 2006, 23 (2): 102—105. (in Chinese with English abstract)
- [40] Tronin A A. Remote sensing and earthquakes: A review[J]. Phys. Chem. Earth, 2006, 31(4-9): 138—142.
- [41] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 邱红, 李晓静, 张艳. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象, 2007, (7): 3—14.
Zhang Xingying, Zhang Peng, Fang Zongyi, Qiu Hong, Li Xiaojing, Zhang Yan. The progress in trace gas remote sensing study based on the satellite monitoring[J]. Meteorol. Month., 2007, 33(7): 3—14. (in Chinese with English abstract)
- [42] Singh R P, Mehdi W, Gautam R, Kumar J, Zlotnicki J, Kafatos M. Precursory signals using satellite and ground data associated with the Wenchuan earthquake of 12 May 2008[J]. Int. J. Remote. Sens., 2010, 31(13): 3341—3354.
- [43] Pulinets S A, Dunajecka M A. Specific variations of air temperature and relative humidity around the time of Michoacan earthquake M 8.1 Sept. 19, 1985 as a possible indicator of interaction between tectonic plates[J]. Tectonophysics, 2007, 431(1-4): 221—230.
- [44] Dey S, Sarkar S, Singh R P. Anomalous changes in column water vapor after Gujarat earthquake[J]. Adv. Space Res., 2004, 33(3): 274—278.
- [45] 崔丽华. 汶川地震前的遥感信息异常及其机理研究[D]. 河北理工大学, 2009.
- Cui Lihua. Study on anomaly of remote sensing information and mechanism before the Wenchuan earthquake[D]. Hebei Polytech. Univ., 2009. (in Chinese with English abstract)
- [46] Okada Y, Mukai S, Singh R P. Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26[J]. Adv. Space. Res., 2001, 33(3): 254—258.
- [47] Matsuda T, Omura K, Ikeda R, Arai T, Kobayashi K, Shimada K, Tanaka H, Tomita T, Hirano S. Fracture-zone conditions on a recently active fault: Insights from mineralogical and geochemical analyses of the Hirabayashi NIED drill core on the Nojima fault, southwest Japan, which ruptured in the 1995 Kobe earthquake[J]. Tectonophysics, 2004, 378 (3-4): 143—163.
- [48] 温静. 汶川地震断裂带科学钻探地下流体气体组分异常与余震的关系研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- Wen Jing. The relationship between earthquakes and the gas geochemical anomalies in the mud of Wenchuan earthquake faults scientific drilling hole[D]. Beijing: China Univ Geosci. 2010. (in Chinese with English abstract)
- [49] Wiersberg T, Erzinger J. A helium isotope cross-section study through the San Andreas Fault at seismogenic depths [J]. Geochem. Geophys. Geosyst., 2007, 8: Q01002, doi: 10.1029/2006GC001388.
- [50] Wiersberg T, Erzinger J. Chemical and isotope compositions of drilling mud gas from the San Andreas fault observatory at depth (SAFOD) boreholes: Implications on gas migration and the permeability structure of the San Andreas fault [J]. Chem. Geol., 2011, 284(1-2): 148—159.
- [51] Rigo A. Precursors and fluid flows in the case of the 1996, ML = 5. 2 Saint-Paul-de-Fenouillet earthquake (Pyrenees, France): A complete pre-, co- and post-seismic scenario[J]. Tectonophysics, 2010, 480(1-4): 109—118.
- [52] 肖琼, 沈立成, 袁道先, 贺秋芳, 王翫宇. 重庆北温泉水化学特征对汶川 8.0 级地震的响应[J]. 中国岩溶, 2009, 28(4): 385—391.
Xiao Qiong, Shen Licheng, Yuan Daoxian, He Qiufang, Wang Aoyu. Response of the Beiwenshan hot spring's hydrochemical features in Chongqing to the Wenchuan earthquake of magnitude 8.0 in Sichuan[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28 (4): 385—391. (in Chinese with English abstract)
- [53] Evans W C, Bergfeld D, Van Soest M C, Huebner M A, Fitzpatrick J, Revesz K M. Geochemistry of low-temperature springs northwest of Yellowstone caldera: Seeking the link between seismicity, deformation, and fluid flow[J]. J. Volcan. Geoth. Res., 2006, 154: 169—180.
- [54] Bräuer K, H Kämpf, S Niedermann, G Strauch, J Tesař. Natural laboratory NW Bohemia: Comprehensive fluid studies between 1992 and 2005 used to trace geodynamic processes[J]. Geochem. Geophys. Geosyst., 2008, 9: Q04018.
- [55] Italiano F, Bonfanti P, Pizzino L, Quattrocchi F. Geochemistry of fluids discharged over the seismic area of the Southern Apennines (Calabria region, Southern Italy): Implications for fluid-fault relationships[J]. Appl. Geochem., 2010, 25 (4): 540—554.
- [56] Cicerone R D, Ebel J E, Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors[J]. Tectonophysics, 2009, 476 (3-

- 4):371—396.
- [57] 刘耀炜,任宏微.汶川8.0级地震氡观测值震后效应特征初步分析[J].地震,2009,29(1):121—131.
Liu Yaowei, Ren Hongwei. Preliminary analysis of the characteristics of post-seismic effect of radon after the Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Earthquake, 2009, 29(1): 121—131. (in Chinese with English abstract)
- [58] 范雪芳,王吉易,陆明勇.汶川8.0级地震前典型流体中期前兆异常的初步研究[J].地震,2009, 29(1):132—140.
Fan Xuefang, Wang Jiyi, Lu Mingyong. Preliminary study on some typical medium-term subsurface fluid anomalies before the Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Earthquake, 2009, 29 (1):132—140. (in Chinese with English abstract)
- [59] 陆明勇,房宗绯,赵丽葵.汶川8.0级地震前地下流体长趋势变化特征讨论[J].地震,2010,30(1):61—72.
Lu Mingyong, Fang Zongfei, Zhao Likui. Discussion on the long-time trend change characteristics of subsurface fluid before the Wenchuan Ms8.0 earthquake [J]. Earthquake, 2010, 30(1):61—72. (in Chinese with English abstract)
- [60] 曹玲玲,高安泰.汶川Ms8.0地震引起的甘肃数字化水位、水温同震响应特征分析[J].地震学报,2010, 32(3): 290—299.
Cao Lingling, Gao Antai. Coseismic response characteristics of digital records of water level and water temperature in Gansu caused by Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Acta Seism. Sinica, 2010, 32(3): 290—299. (in Chinese with English abstract)
- [61] 周晓成.汶川Ms8.0地震后川西地区的气体地球化学[D].合肥:中国科技大学,2011.
Zhou Xiaocheng. Gas geochemistry in Western Sichuan related to 12 May 2008 Wenchuan Ms 8.0 earthquake[D]. Hefei: Univ. Sci. Techn. China, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [62] Agosta F, Mulch A, Chamberlain P, Aydin A. Geochemical traces of CO₂-rich fluid flow along normal faults in central Italy[J]. Geophys. J. Int. 2008, 174: 758—770.
- [63] Chiarabba C, Amato A, Anselmi M, Baccheschi P, Bianchi I, Cattaneo M, Cecere G, Chiaracluce L, Ciaccio M G, De Gori P, De Luca G, Di Bona M, Di Stefano R, Faenza L, Govoni A, Impronta L, Lucente F P, Marchetti A, Margheriti L, Mele F, Michelini A, Monachesi G, Moretti M, Pastorini M, Agostinetti N P, Piccinini D, Roselli P, Seccia D, Valeroso L. The 2009 L'Aquila (central Italy) M(w) 6.3 earthquake: Main shock and aftershocks [J]. Geophys. Res. Lett., 2009, 36:L18308. doi:10.1029/2009GL039627.
- [64] Cappa F, Rutqvist J, Yamamoto K. Modeling crustal deformation and rupture processes related to upwelling of deep CO₂-rich fluids during the 1965—1967 Matsushiro earthquake swarm in Japan[J]. J. Geophys. Res., 2009, 114. doi:10.1029/2009JB006398.
- [65] Di Luccio F, Ventura G, Di Giovambattista R, Piscini A, Cinti F R. Normal faults and thrusts reactivated by deep fluids; The 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, central Italy[J]. J. Geophys. Res., 2010, 115:B06315.
- [66] Chiodini G, Caliro S, Cardellini C, Frondini F, Inguaggiato S, Matteucci F. Geochemical evidence for and characteriza-
- tion of CO₂ rich gas sources in the epicentral area of the Abruzzo 2009 earthquakes[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2011, 304(3-4):389—398.
- [67] Lombardi S, Voltattorni N. Rn, He and CO₂ soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults[J]. Appl. Geochem., 2010, 25:1206—1220.
- [68] Weinlich F H, Faber E, Boušková A, Horálek J, Teschner M, Poggenburg J. Seismically induced variations in Mariánské Lázně fault gas composition in the NW Bohemian swarm quake region Czech Republic-A continuous gas monitoring[J]. Tectonophysics, 2006, 421(1-2): 89—110.
- [69] Ciotoli G, Lombardi S, Annunziatellis A. Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy[J]. J. Geophys. Res., 2007, 112: B05407.1—B05407.23.
- [70] Ghosh D, Deb A, Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake[J]. J. App. Geophys., 2009, 69 (2): 67—81.
- [71] Walia V, Yang T F, Hong W L, Lin S J, Fu C C, Wen K L, Chen C H. Geochemical variation of soil-gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsin-cheng fault in NW Taiwan[J]. Appl. Radiat. Isot., 2009, 67:1855—1863.
- [72] Zhou X, Du J, Chen Z, Cheng J, Tang Y, Yang L, Xie C, Cui Y, Liu L, Yi L, Yang P, Li Y. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, southwestern China[J]. Geochemical Transactions, 2010, 11, doi: 10.1186/1467-4866-11-5.
- [73] Carapezza M L, Ricci T, Ranaldi M, Tarchini L. Active degassing structures of stromboli and variations in diffuse CO₂ output related to the volcanic activity[J]. J. Volcan. Geotherm. Res., 2009, 182:231—245.
- [74] Italiano F, Bonfanti P, Ditta M, Petrini R, Slejko F. Helium and carbon isotopes in the dissolved gases of Friuli Region (NE Italy): Geochemical evidence of CO₂ production and degassing over a seismically active area[J]. Chem. Geol., 2009, 266: 76—85.
- [75] Italiano F, Martinelli G, Plescia P. CO₂ degassing over seismic areas: The role of mechanochemical production at the study case of central Apennines[J]. Pure. Appl. Geophys., 2008, 165: 75—94.
- [76] 周晓成,王传远,柴炽章,司学芸,雷启云,李营,谢超,刘胜昌.海原断裂带东南段土壤气体地球化学特征研究[J].地震地质,2011,33(1): 123—132.
Zhou Xiaocheng, Wang Chuanyuan, Chai Zhizhang, Si Xueyun, Lei Qiyun, Li Ying, Xie Chao, Liu Shengchang. The geochemical characteristics of soil gas in the southeastern part of Haiyuan fault[J]. Seism. Geol., 2011, 33(1):123—132. (in Chinese with English abstract)
- [77] Perrier F, Richon P, Byrdina S, France-Lanord F, Rajaure S, Koirala B P, Shrestha P L, Gautam U P, Tiwari D R, Revil A, Bollinger L, Contraires S, Bureau S, Sapkota S N. A direct evidence for high carbon dioxide and radon-222 discharge in central Nepal[J]. Earth. Planet. Sci. Lett., 2009, 278:198—207.