

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

地气测量方法在南方红壤区隐伏矿勘查的试验性研究

万卫¹, 汪明启², 程志中³

1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室 南昌 300013;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

随着全国工业化进程的推进和经济的快速发展, 人类对矿业资源的需求也在加速增长, 而地表矿产资源的开发前景不容乐观和已发现矿产资源量的开发接近枯竭, 寻找深部盲矿体和矿山外围找矿突破显得极为迫切, 矿区外围常被一些外来运积物覆盖, 对地质勘查工作造成较大的影响, 如何在覆盖区快速而有效地发现找矿信息, 一直困扰地质学家和勘查地球化学家, 传统的常规地质-地球化学勘查方法在覆盖区无法提供有效的找矿信息瑞典科学家 Kristiansson 和 Malmqvist 在 20 世纪 80 年代初提出的地气方法由于能够携带与矿体信息有关的物质穿过覆盖层到达近地表, 受到了勘查地球化学的重视, 是一种颇具潜力的覆盖区隐伏矿勘查技术。自地气法引入中国以来, 在中国地质学者的不懈努力下, 尤其是液体捕集剂和 ICP-MS(等离子质谱)的使用(刘应汉等, 2003), 使得地气物质的捕集效率、测试数据的精度以及野外观测的重现性得到了很大提高, 地气方法在不同覆盖区(黄土覆盖区、冲积平原区、草原覆盖区、森林覆盖区)的许多试验矿种(金矿、铅锌矿、铜钼矿、铜镍硫化物矿)上都取得了良好的效果(刘应汉等, 1995; Ren et al., 1995; 童纯菡等, 1999; Xie et al., 1999;

刘应汉, 2003; 汪明启等, 2006; 高玉岩等, 2010, 2011; 孙甲富等, 2012)。

然而, 由于地气异常物质形成机制尚不明确, 影响地气异常形成的因素众多, 限制了地气方法的进一步发展, 且我们覆盖区类型较多, 地气方法能否适用于其他景观条件的研究广度不够, 因此, 需要对更多其他景观条件进行地气试验性研究, 积累更多覆盖区的地气应用资料, 不断的完善地气方法, 使其早日走向工程化。

我国南方红壤覆盖区面积约为 57 万 km², 且很多地区处于成矿有利地带, 但由于覆盖层的影响, 常规的地球化学勘查方法无法发挥有效的作用, 这些地区仍多属于矿产勘查的空白区, 必须采用新的地球化学勘查方法才有望取得找矿突破。本次研究通过对南方红壤区广西德保铜锡矿床进行地气方法有效性试验, 了解地气方法在该地区的应用效果和影响因素, 结果表明, 在南方红壤区, 潮湿季节, 地气测量没有效果, 干旱季节, 虽然地气测量具有一定效果, 但地气中金属元素绝对含量较低, 可能受到了深部碳酸岩地层和土壤的粘土性质的影响, 需要进一步改进地气测量方法, 使其能有效应用于南方红壤区隐伏矿勘查工作中。

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

二氧化碳断层泄漏的过程表征

李琦^{1,2*}, 郑国东³, 徐丽风^{1,2}, 陈博文^{1,2}

1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃省油气资源研究重点实验室, 兰州 730000

切实把握断层内(断裂带)二氧化碳(CO₂)泄漏过程对 CO₂ 地质封存(CCS)和地质源温室气体释放的风险评估与安全监测都具有重要意义。为定量表征断层中的 CO₂ 泄漏过程,采用压力传感器、光纤光栅温度传感器和应变传感器进行多参量同时监测断层中 CO₂ 泄漏引起的物理量变化,共设计和开展 10 组实验:5 组初始压力为 1~5 MPa 的气态 CO₂ 泄漏试验和 5 组初始压力为 6~10 MPa 的液态 CO₂ 泄漏试验。结果表明,当初始压力为 7~10 MPa 的液态 CO₂ 时,CO₂ 压力和温度瞬时下降后,温压保持不变。我们将 CO₂ 在温压条件保持不变下继续泄漏的现象定义为“临时伪密封(Temporary pseudo-sealing, TPS)”行为,并发现 TPS 行为时长约占总泄漏时长的 1/3。然而,这种 TPS 行为在

气态 CO₂ 泄漏过程中没有发生。因此,如果仅使用压力和温度数据对是否发生 CO₂ 泄漏进行评估,将会误判 CO₂ 在 TPS 期间没有发生泄漏。通过泄漏实验和数值模拟进一步探索了 TPS 行为产生的原因和条件,主要包括:

(1) TPS 行为是由液态 CO₂ 泄漏时产生的相变能所引起的;

(2) TPS 行为产生的条件是小泄漏孔径(~0.2 mm)。泄漏率小才能使相变能和压力衰减达到动态平衡;

(3) 断层面上“凹凸体”和“障碍体”(Asperity and barrier)以及伯努利效应引起的压缩区可进一步降低 CO₂ 泄漏率,进而促进 TPS 行为的产生。

本研究为断层内(断裂带)CO₂ 泄漏过程的定量表征提供了基础理论和技术支持。

基金项目: CO₂ 封存储层岩石的破裂过程与渗透作用机制研究(41872210)

第一及通信作者简介: 李琦(1972-), 博士, 研究员, 博士生导师. 研究方向: 二氧化碳地质封存(CCS)和酸气回注(AGI)理论与技术. E-mail: qli@whrsm.ac.cn

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

中国地质源温室气体释放十年研究概述

郑国东^{1,2*}, 郭正府³, 王云鹏⁴, 李琦⁵, 徐胜⁶, 宋之光⁴, 赵文斌³,
陈志⁷, 马向贤¹, 胥旺^{1,8}, 梁明亮^{1,9}

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃省油气资源研究重点实验室, 兰州 730000;
2. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境院重点实验室, 北京 100029;
4. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验, 广州 510640;
5. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点试验室, 武汉 430071;
6. 天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072;
7. 中国地震局地震预测研究所, 北京; 100036;
8. 成都理工大学能源学院, 成都 610059;
9. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

地质源温室气体是指固体地球通过各种地质作用向大气圈释放的温室气体,是固体地球与大气圈之间物质交换(地气交换)的物质基础,主要包括火山喷发和地热活动、断裂带构造运动、油气渗漏、天然气水合物分解、煤自燃、碳酸盐岩风化等多种地质作用过程所释放的二氧化碳、甲烷等气体。实际上,地气交换是重要的地质作用,是地球各圈层物质循环和能量交换的基本载体和重要动力学机制。全球变化和温室效应是人类所面临的巨大挑战,地质源温室气体的类型与来源、释放机理与过程、释放通量与大气温室效应等的调查和研究成为当今地球系统科学的研究热点和发展方向之一,对于应对全球变化和温室效应具有重要的科学意义。

当今世界,面对全球气候异常、能源资源枯竭、人类生存环境遭受威胁的严峻形势,尤其是大气二氧化碳平衡与全球气候变化之间的关系被普遍重视的情况下,针对温室气体的专门调查和科学研究具有独

特的现实意义和实践价值。查明各类温室气体来源及其占比、理清大气碳收支平衡是应对全球气候变化的关键科学问题之一。近期研究表明,大气圈温室气体浓度的增加是自然释放和人为排放共同作用的结果,其中地质源温室气体的贡献不可忽视,需要进行分类甄别和系统研究。我国地质源温室气体的调查研究也取得了一些积极进展,特别是在国家自然科学基金、中国地震局专项基金、中科院国际合作基金等支持下,相关研究团队对我国大陆范围的部分火山和地热区(白山、腾冲、羊八井)、地震断裂带(首都圈地震断裂带、龙门山断裂、郯庐断裂带)、含油气盆地(塔里木盆地雅克拉凝析气田和大宛齐油田)和泥火山(准噶尔盆地南缘独山子、艾奇沟、白杨沟等)等释放的温室气体进行了专项调查研究,在地质源温室气体的地球化学组成、释放通量等方面取得了一系列的调查研究成果,这些工作为进一步的深入研究奠定了良好基础。

基金项目: 国家变革性技术项目(2019YFA0708501); 国家自然科学基金(41273122, 41572352, 41402298)

第一及通信作者简介: 郑国东(1961-), 博士, 研究员, 博士生导师. 研究方向: 铁元素化学种理论技术与地球科学应用、气体地球化学. E-mail: gdzhhbj@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 •

长白山火山温泉气体中甲烷来源和碳同位素研究

魏费翔^{1,2*}, 许建东^{1,2}, 孔庆军^{2,3}, 刘松军^{2,3}, 徐丹^{2,3}, 潘波^{1,2}

1. 中国地震局地质研究所, 吉林长白山火山国家野外科学观测研究站, 北京 100029;

2. 中国地震局地震与火山灾害重点实验室, 北京 100029;

3. 长白山火山监测站, 安图 137000

We report methane (CH₄) with variable carbon isotopes (between -60.9‰ and -26.8‰) from Changbaishan, the most dangerous volcano in NE China. Bubbling gas samples were collected periodically from 2014 to 2019 in three hot spring areas in the Changbaishan volcanic field: one on the shoreline of the Tianchi caldera lake and two on the north and southwest flanks. The helium isotopes of the bubbling gases from the three hot spring areas suggested a major magmatic source, up to 5.8 Ra (where Ra represents the atmospheric ³He/⁴He ratios). However, the CH₄ exhibited a biotic signature in carbon isotopes (δ¹³C) as low as -60.9‰, and the concentrations of CH₄ among the three hot spring areas exhibited remarkable variations from 0.02% to 17.04%. After evaluating the influence of air contamination, crustal and organic

contributions, and thermodynamic processes, we suggest that CH₄ from the three hot spring areas primarily originated from two sources: (1) a previously formed gas reservoir in the crust with significant contributions from the ancient subductions and (2) the MORB-like materials from the present upwelling asthenosphere. Based on these observations, we propose a model to explain the processes that formed these two sources, which demonstrates the existence of ancient subduction fluids in the subcontinental lithospheric mantle. In addition, our study of volcanic gases does not support the conspicuous material connections between the subducting west Pacific slab and Changbaishan volcano. Finally, based on our results, suggestions for volcanic gas monitoring at the Changbaishan volcano are provided.

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

金沙江-红河断裂带温泉气体地球化学特征

周晓成¹, 王万丽¹, 李立武², 侯建民^{3*}, 邢蓝田², 李中平²,
石宏宇¹, 颜玉聪¹

1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000;

3. 中国地震台网中心, 北京 100045

金沙江-红河断裂带是青藏高原东南缘地热活动强烈、地震活动水平高、各种矿产丰富的深大断裂带。为了探索该断裂带的温泉气体地球化学时空变化特征, 2015年3月—2019年7月, 经过5次野外考察, 采集了54个温泉逸出气体样品, 对其化学组分和氦、氡与碳的同位素变化的测试结果表明: (1) 金沙江-红河断裂带内温泉气体氦同位素比值($^3\text{He}/^4\text{He}$)变化范围是0.04到0.62 Ra (Ra=空气, $^3\text{He}/^4\text{He}=1.39\times 10^{-6}$), 计算获得的幔源氦最大比例达到7.5%, 揭示该断裂带内的地质流体主要来自于壳源, 幔源氦有从北向南呈现增加的趋势。以 CO_2 为

主要组分的温泉, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值变化范围是-23.6‰到-1.9‰ (vs. PDB)。结合区域地质条件分析, 这些 CO_2 主要来自三叠系灰岩, 所占比例范围是70.1~89.7%, 而幔源 CO_2 的比例最高可以达到4.7%。(2) 金沙江-红河断裂带温泉气体的氢气浓度和氦同位素在三处断裂交汇区都出现高峰值, 分别是金沙江断裂与巴塘断裂、中甸断裂与红河断裂、红河断裂与小江断裂和莫边府断裂的交汇处。与区域地震活动性的对比分析结果表明, 金沙江-红河断裂带内深部流体上涌相对强烈的区域, 深部流体对区域地震活动性具有重要的控制作用。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41673106), 国家重点研发计划(2017YFC1500501), 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费(2017IES010205, 2016IES010304, 2018IES010104, 2020IEF0604, 2020IEF0703)

第一作者简介: 周晓成(1978-), 博士, 研究员, 流体地球化学, E-mail: zhouxiaocheng188@163.com

*通信作者简介: 侯建民(1977-), E-mail: houjm@188.com

• 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 •

气体地球化学与地震 ——从泥火山地震宏观异常谈起

高小其, 蒋雨函

应急管理部国家自然灾害防治研究院, 地壳动力学重点实验室, 北京, 100085

泥火山是特定地质构造及水文地质环境下的一种构造流体地质现象, 泥火山形成必须具备断层通道、气体、水与泥岩四个特定条件, 其喷发活动是内部大量气体聚集引起异常高压的一种释放, 可以将大量地下信息携带到地表, 被称为“天赐钻井”。新疆乌苏艾其沟泥火山位于赛力克提牧场艾其沟山前阶地上, 地处准葛尔盆地南缘断裂与亚玛特断裂的交汇部位, 在构造上属于托斯台背斜轴部的艾其沟断裂带, 是亚洲最大的泥火山锥, 该泥火山由 2 座相距 10m、喷口直径分别为 2m (北侧喷口)、1m (南侧喷口)

左右的泥火山锥组成, 高约 9m, 北侧的泥火山底座大约 5m, 偶有银灰色泥浆溢出外流, 液面可见漂浮的油花, 南侧的泥火山喷口较小。新疆乌苏艾其沟泥火山实时动态观测始于 2011 年 8 月, 自观测以来, 在其周围 200m 范围内, 共发生了 4 次 6 级以上地震, 分别是 2011 年 11 月 1 日新疆尼勒克 $M_s6.0$ 、2012 年 6 月 30 日新疆新源 $M_s6.6$ 、2016 年 12 月 8 日新疆呼图壁县 $M_s6.2$ 及 2017 年 8 月 9 日精河 $M_s6.6$ 地震。在 4 次地震前后, 艾其沟泥火山喷发活动均出现了“背景值-上升-转折-下降-背景值”的宏观异常变化现象,

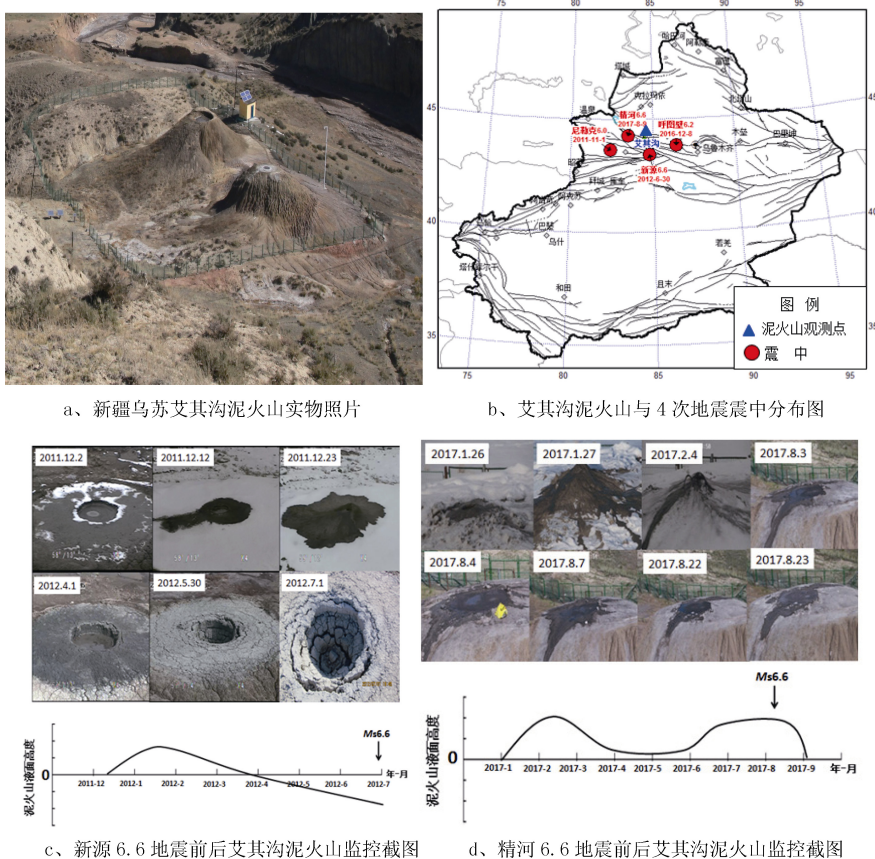


图 1 新疆乌苏艾其沟泥火山及震例图

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFC1509203) 项目、中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (ZDJ2017-27)、中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项 (J2018827)、应急管理部国家自然灾害防治研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (ZDJ2021-11) 共同资助。

地震则发生在泥火山喷发活动由强到弱的过程中。尤其是 2017 年精河 $M_s6.6$ 地震前, 乌苏艾其沟泥火山的显著喷发异常变化现象作为新疆地震局震情趋势判定依据之一, 起到了一定减灾实效的预测作用。

泥火山的显著喷发, 主要是由于区域地壳构造应力不断增强, 封闭构造中岩石的孔隙压力逐渐增大, 当压力达到泥火山喷发条件时, 大量气体便携带泥沙沿断层喷涌而出所致。泥火山喷涌气体主要是甲烷、氦气等气体。新疆乌苏艾其沟泥火山在震中距 200m 范围内每次 6 级以上地震前都出现的宏观异常现象再次印证了地震地球化学前兆异常的存在。

地震地球化学是在地震、水文地球化学、元素地球化学、同位素地球化学和水文地质学等学科基础上发展起来的一学门新兴学科, 是研究地震孕育、发展、发生过程中地下水岩石、土壤中气体组分、化学成分等的变化与地震关系的科学。

1966 年邢台地震之后, 地震地球化学已经历了 50 多年的发展历程, 观测网建设从无到有, 逐渐形成以水(气)氦、水(气)汞、氢气、水化学离子和水中溶解气体为主要观测项目的地球化学观测网, 逐步开展了断裂带气体地球化学和温泉点水化学与同位素分析为主的构造地球化学流动监测技术研究。通过获取地球化学连续观测与定期观测数据, 产出地球化学背景场图、区域构造深浅部元素、同位素变化图, 为地震大形势、年度、年中及短临地震分析提供依据。

我国地震地球化学监测工作虽然取得长足进步,

在地震预报中发挥了重要的作用, 但是, 当前我国地震地球化学监测技术与台网布局已不能适应与满足新形势下地震监测预报工作需要。为适应新形势下防灾减灾事业对地球化学监测预测领域的要求, 优化地球化学观测台网, 提高观测研究能力, 未来 5~10 年, 应尽快开展如下工作:

1、全面梳理现有气体地球化学观测技术、仪器和装置, 通过评估优化现有地球化学台网;

2、编制《未来 10 年地震地球化学观测技术战略研究报告》, 加强气体地球化学新仪器设备研发, 更新老旧仪器设备;

3、完善氦、汞仪器检测平台, 建设氢、二氧化碳和构造地球化学仪器检定平台, 实现对地球化学类专业仪器装备的质量控制和溯源。

4、继续完善地下流体学科中心实验室建设, 建设 30~50 个地球化学综合观测研究站; 结合技术培训与骨干培养, 实施中国大陆活动地块边界带地球化学背景场观测、应急观测和宏观异常核实观测等计划。

5、建设覆盖中国大陆主要构造区的气体地球化学与水文地质参数背景场数据库和数据共享平台, 能定期产出中国大陆主要构造区地球化学背景场(或异常)信息图表。

6、加强气体地球化学异常的机理研究, 为地震趋势判定、环境保护、地质灾害及矿山灾害预警提供观测产品, 服务于火山活动性监测、喷发预警和火山灾害预测。

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

呼图壁储气库断层气体地球化学特征

蒋雨函, 高小其*

应急管理部国家自然灾害防治研究院, 地壳动力学重点实验室, 北京, 100085

断层气体是经由断裂带释放的地壳深部气体, 地球内部的物理、化学场变化、板块间的相互作用等会改变地下应力状态, 同时导致地下深部的气体逸出, 如地震、断裂活动等构造运动。此外, 已有大量的研究证明断层气体对地壳应力状态与地震活动响应较为灵敏。在地下应力的作用下, 地下深部气体会沿着地壳产生的裂缝逸出, 且气体通道多位于断裂带、火山、洋中脊等地壳薄弱带位置。因此, 研究介质中压力变化与断层气间关系是研究断层气映震的主要方向之一。

新疆呼图壁地下储气库自 2013 年建成以来, 每年以周期性的“注入/采出”模式运行, 该定期加压存储与减压释放过程为研究应力变化导致的断层气体变化问题提供了天然试验场。在 2017 年—2021 年期间对呼图壁储气库区域开展了八期断层气体定期流动观测, 并于 2019 年开展定点连续观测, 获取储气库在反复加压卸载气体过程中储气库及其周边区域断层气体 R_n 、 CO_2 、 Hg 、 H_2 浓度变化特征。

(1) 在储气库区域内明显观测到断层气体 Hg 、

H_2 浓度高值现象, 两者最大值分别为 $190ng/m^3$ 、 $725.40ppm$, 其空间位置分布特征表现为储气库区域内气体浓度高于储气库区域外, 且储气库区域内高值位置位于注采井附近, 而另外两种气体测项 R_n 、 CO_2 无明显气体浓度分布特征。

(2) 在储气库区域进行的长期连续观测结果表明断层气 H_2 与储气库压力变化存在一定联系, 具体表现为储气库内部压力增大导致断层气 H_2 浓度显著升高, 当内部压力不再增加时, 断层气 H_2 浓度缓慢恢复至背景值。断层气 H_2 对储气库压力变化响应灵敏, 或许可用于地下应力应变状态判断以监测其动态变化。

(3) 储气库建成以来, 区域地震活动性增强, 几乎每年发生震级相对较高地震的时间段为 5 月—7 月间, 每年地震月频次较高的月份为 6 月—10 月间, 均处于储气库注气增压阶段。

对呼图壁储气库应力变化导致的断层气体变化特征的研究, 可以为指导地震台站勘选、建设、震情跟踪以及异常核实等提供地球化学依据。

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1509203)项目、中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2017-27)和中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项(J2218827)共同资助。

第一作者简介: 蒋雨函(1994-), 研究实习员(硕士), 研究方向: 地下流体和地球化学. E-mail: jiangyuhuan0313@163.com

*通信作者简介: 高小其(1966-), 研究员, 研究方向: 地震地下流体和地球化学. E-mail: gaoxq06@126.com

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

青藏高原东北缘弧形构造带 土壤气体地球化学特征对构造活动的指示

刘兆飞^{1,2}, 李莹^{1*}, 陈志¹

1. 中国地震局地震预测重点实验室, 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;
2. 中国地质大学(北京)地球与资源学院, 北京 100083

青藏高原东北缘弧形构造带位于青藏高原东北缘、阿拉善块体和鄂尔多斯块体的交汇地带。受青藏高原 NE 向挤压的作用, 弧形构造带内发育一系列弧形走滑断裂、断陷盆地和褶皱山系。本次工作主要对青藏高原东北缘弧形构造带土壤气体的地球化学特征与区域构造活动的关系进行了研究, 研究发现:

(1) 弧形构造带内土壤气 Rn 和 CO₂ 浓度与气压、

大气温度、土壤温度、空气湿度以及海拔的相关性均较弱。

(2) 弧形构造带内土壤气 Rn 和 CO₂ 浓度的变化范围分别为 2460~68100 Bq/m³ 和 2%~65%。土壤气 Rn 和 CO₂ 浓度在六盘山西麓断裂、六盘山东麓断裂以及小关山断裂带附近较高, 这与弧形构造带内断裂在六盘山附近收敛的构造特征相一致。

• 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 •

中国东北地区地幔过渡带起源的火山碳释放

赵文斌^{1,3}, 郭正府^{1,2,3*}, 马琳^{1,3}, 李菊景^{1,3}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京 100044;

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

板片俯冲过程将地表圈层碳带入地球内部, 火山作用将深部碳释放到外部圈层, 两者构成了地球一级碳循环的主要过程, 并在长时间尺度上 (~Myr) 影响着地球的气候变化。中国东北地区新生代火山活动被认为与深俯冲并滞留在地幔过渡带 (MTZ) 中的太平洋板片有关, 巨量壳源碳酸盐岩的俯冲使得东亚上地幔成为一个巨大的碳库。定量研究火山区深部碳释放的规模及其演变特征, 对于有效地评估东北亚深部碳库的在全球变化研究中的地位和作用, 完善不同构造背景下深部碳循环过程与机制具有重要的意义。此外, 量化我国火山区深部碳释放清单, 评估地质源温室气体释放对大气 CO₂ 贡献的潜力对于我国实现碳中和、碳达峰长远目标同样意义重大。

研究表明, 东北新生代火山区的土壤碳释放通量介于 9.6~41.2 g·m⁻²·d⁻¹ 之间, 均值为 19.1 g·m⁻²·d⁻¹, 每年向当今大气圈释放 CO₂ 气体约为 2.1 Mt, 接近腾冲火山区的一半。气体组分、C-He 同位素特征显示长白山、五大连池火山区气体具有岛弧挥发分的特征, 暗示其源区存在俯冲板片再循环壳源物质的贡献。同位素拟合结果表明, 相较于长白山火山, 五大

连池火山气体具有更高比例壳源组分的贡献, 二者的火山气体反映深部碳库的特征。而阿尔山火山区温泉气体成分以 N₂ 为主 (>95%), 并且其 δ¹⁵N_{N₂} 值高于空气值 (1.3‰~1.9‰), 而 ³He/⁴He 比值较低 (0.14~0.18 R_A), δ¹³C_{CO₂} 较轻 (-6.2‰~-13.7‰), 表明壳源有机沉积物的贡献占较大比例。我们认为阿尔山火山区气体在上升的过程中在地下水中滞留了较长的时间, 在此过程中加入了大量的陆壳物质, 如有机质及中生代花岗岩中 U-Th 衰变产生的高 ⁴He 物质等。阿尔山火山区气体未受深俯冲板片的显著影响。

尽管如此, 中国东北新生代火山区 CO₂ 气体释放及其来源还有很多问题没有解决。例如, 现今西北太平洋俯冲带再循环进入地幔的沉积物约占全球俯冲带的 1/3 左右, 但对于该区“板块俯冲-火山作用”完整的深部碳过程及其对全球气候的影响研究处于空白; 由于俯冲再循环壳源物质持续地俯冲交代作用, 古老的克拉通大陆岩石圈可能是巨大的碳储库, 中国东部自中生代以来发生了广泛的克拉通岩石圈减薄并伴随大规模的火山作用, 在此过程中深部碳释放的研究是值得关注的问题。

第一作者简介: 赵文斌 (1993-), 博士研究生, 研究方向: 火山气体与深部碳过程. E-mail: zhaowenbin@mail.iggcas.ac.cn

*通信作者简介: 郭正府 (1963-), 研究员, 研究方向: 火山作用与环境. E-mail: zfguo@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 •

青藏高原东缘 Y-字型断裂体系的地幔与地壳脱气特征

刘伟¹, 张茂亮^{1,2}, 徐胜^{1*}

1. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072;

2. Atmospheric and Oceanic Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8564, Japan

自新生代以来, 由于印度板块向欧亚板块的持续俯冲碰撞, 导致青藏高原的隆升和地壳物质向东的逃逸, 在高原东缘一些构造活跃的地块(松潘-甘孜地块、川滇地块和华南地块)边界发育一系列活动断裂带, 如玉树-甘孜-鲜水河走滑断裂带(YGXFS), 安宁河走滑断裂带(AFZ)和龙门山逆冲断裂带(LFZ)。青藏高原东缘的这些断裂带构成了一个规模巨大的Y-字型断裂体系, 新构造运动强烈, 大地热流值高, 也是我国地震活动最强烈的地区之一。该地区位于地中海—喜马拉雅地热活动带的东缘, 沿断裂带水热活动强烈, 地表出露数百个温泉。本次研究对沿 YGXFS, AFZ 和 LFZ 分布的地热流体逸出气体(45 个样品)进行了地球化学研究, 探讨了挥发份组分的来源、过程及其与不同断裂体系的相互作用关系。结果表明, 沿 YGXFS 大部分温泉逸出气体以 CO₂ 为主, 空气校正的 ³He/⁴He 为 0.03~2.28 Ra, δ¹³C_{CO₂} 值为 -0.7~-8.8‰, CO₂/³He 的值为 0.18×10⁹~2281.83×10⁹。而 LFZ 和 AFZ 温泉逸出气体主要以 N₂ 为主, ³He/⁴He 值分别为 0.01~0.03 Ra 和 0.03~0.09 Ra, δ¹³C_{CO₂} 值为 -5.2~-17.3‰和 -7.2‰, CO₂/³He 的值为 0.27×10⁹~28.85×10⁹ 和 3.84×10⁵~5.63×10⁷。结合不同断裂体系的构造背景和气体地球化学数据, 进一步分析发现:

1. 最高的 ³He/⁴He (2.28 Ra) 值位于 YGXFS 断

裂带康定-磨西段的灌顶温泉, 幔源 He 贡献率最高可达 28%, 由于缺乏现代火山活动和岩浆活动, 富含 ³He 的幔源流体可能来自岩石圈地幔的部分熔融, YGXFS 提供了从地幔到地表的高渗透性通道; 相比 LFZ 和 AFZ 幔源组分贡献极少, 主要以壳源 He 贡献为主;

2. 在空间上幔源 He 异常区主要集中在 YGXFS 南端的康定-磨西段, 该段主要以强烈的挤压-走滑剪切变形为主, 暗示了强烈的地壳变形有助于幔源 He 快速通过地壳上升到地表并且断裂深度可能到达地幔或地幔附近; 另外活动断裂带走滑速率与 ³He/⁴He 值呈较好的正相关关系, 表明断裂带的活动性对幔源流体的释放强度起着重要的控制作用;

3. He-CO₂ 特征显示, YGXFS 中地热流体中挥发性组分主要来自于地幔和地壳(变质)流体, 特别是沿 LFZ 和 AFZ 分布的地热流体在上升过程明显受二次物理化学作用控制(如水热脱气和方解石沉淀);

4. 基于 He 同位素体系, 我们估算的最大流体上升速率为 3190mm/yr, YGXFS 断裂带的最大幔源 ³He 和 CO₂ 通量分别为 1.47 mol/yr 和 2.4×10⁹ mol/yr; 而富含挥发份组分的深部流体进入孕震带(层)可能形成高的静水压力, 导致断层发生破裂, 深部挥发性物质向上进入浅层地壳, 并伴随强烈的地震活动。

基金项目: 中国地震科学实验场(2019CSES0104)和国家自然科学基金委员会(41930642)

第一作者简介: 刘伟(1989-), 博士研究生, 研究方向: 气体地球化学. E-mail: weiliu_2019@tju.edu.cn

*通信作者简介: 徐胜(1963-), 教授, 研究方向: 气体地球化学. E-mail: sheng.xu@tju.edu.cn

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

青藏高原东南缘断裂带深源气体释放

徐胜^{1*}, 张茂亮^{1,2}, 钟君¹, 刘伟¹, 谢显刚¹, 管芦峰¹, Yuji Sano^{1,2}

1. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072;

2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Chiba 277-8564, Japan

新生代以来青藏高原隆升导致高原东南缘大规模走滑断裂带的形成, 沿这些深大断裂带发育一系列中-高温地热区, 水-岩相互作用显著, 深源流体释放强烈, 是研究大陆碰撞造山带巨型走滑断裂系统深源 CO₂ 释放的重要地区。基于鲜水河-安宁河-则木河-小江断裂带内温泉水和逸出气体的化学和同位素组成的系统分析和定量计算模型, 本文探讨了流体的来源和释放过程、深源 CO₂ 的释放通量、以及流体组分的地质和构造指示意义。

根据主要离子浓度, 温泉水可分为三种主要类型: Na⁺-HCO₃⁻、Ca²⁺-HCO₃⁻-Cl⁻和 Na⁺-Cl⁻型。温泉水氢氧同位素组成 (δD_{H_2O} 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$) 的变化范围分别为 -127‰~-78‰和 -16.5‰~-10.7‰; 溶解无机碳浓度变化范围为 2~42 mM, 其稳定碳同位素组成 ($\delta^{13}C_{DIC}$) 为 -4.0‰~+1.3‰, 放射性碳同位素组成 ($\Delta^{14}C_{DIC}$) 为 -997‰~-909‰。温泉气体中氦同位素组成 ($^3He/^4He$) 为大气值的 0.02~2.7 倍, CO₂ 碳同位素组成 ($\delta^{13}C_{CO_2}$) 为 -7.2‰~-3.6‰。综合地质构造背景和流体地球化学结果, 取得如下认识:

(1) 温泉水主要来源于区域不同补给高度的大气降水循环。在水-岩相互作用过程中, 区域蒸发盐、碳酸盐和硅酸盐矿物的溶解导致温泉水中显著富集 Na⁺和 HCO₃⁻等离子。

(2) 大气校正 $^3He/^4He$ 比值呈现明显的空间分布特征: 鲜水河断裂带具有强烈幔源 He (9%~33%), 而安宁河-则木河-小江断裂带则呈现典型的地壳放射性氦特征。区域上最高比例的幔源氦出现在鲜水河、玉农希和龙门山断裂带交汇的康定地区, 并以此为中心向断裂带延伸方向和垂直方向递减。这一空间分布特征表明区域转换挤压作用导致断裂带破碎化程度和渗透性的增加, 有利于幔源物质快速运移至地表, 也充分反映了断裂活动是非火山岩地区幔源物质向地表迁移的主要控制因素。

(3) CO₂ 来源包括深部上地幔和变质碳酸盐岩, 以及近地表海相碳酸盐岩和有机质。总体而言, 平均 $11 \pm 6\%$ 的溶解碳源自浅层碳酸盐岩的溶解作用, $9 \pm 8\%$ 为沉积有机质热解成因, $80\% \pm 9\%$ 来自深部变质成因和幔源 CO₂。其中, 安宁河-则木河-小江断裂带深源 CO₂ 主要为单一变质成因碳; 而鲜水河断裂带深源 CO₂ 中, 约 12% 和 88% 分别源自地幔和变质成因碳。

(4) 康定地热田平均深源 CO₂ 通量为 160 t a^{-1} , 如果简单推算至青藏高原东南缘各类断裂带内所有温泉, 区域深源 CO₂ 通量在 10^5 t a^{-1} 量级。这一初步结果显示, 非火山区深源 CO₂ 释放量在全球范围深源碳排放总量中占有相当份额, 需要开展进一步研究。

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

高光谱遥感气体在长白山火山监测中的应用

顾国辉^{1,2}, 盘晓东^{1,2*}, 韩迪^{1,2}, 关升^{1,2}, 孙立影^{1,2}, 宋雨佳^{1,2}, 姜佳彤³

1. 吉林省地震局, 长春 130117;

2. 中国地震局火山研究所, 长春 130117;

3. 中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司, 松原 138000

鉴于 2018 年以来长白山火山地震活动有增强的趋势, 本文利用 Sentinel-5P 卫星搭载 TROPOMI 传感器, 获取 2018 年以来长白山火山区对流层 CO、SO₂ 高光谱气体数据, 主要观测对流层 CO、SO₂ 气体组分。对提取的遥感气体信息, 采用小波变换方法进行处理分析, 结合地表气体地球化学观测数据分析, 总结 2018 年以来长白山火山区高光谱气体特征, 为研判长白山火山活动状态提供参考。地震、形变以及温泉水化学等监测结果显示, 2002 年 7 月开始, 长白山火山区火山活动明显增强, 流动 GPS 和水准观测结果出现明显异常, 综合认为 2002—2005 年期间, 长白山火山经历了一次火山“扰动”事件。2006 年之后火山恢复平静, 但 2018 年以来, 尤其是 2020 年 12 月后长白山火山地震活动又再次增强, 火山地震数量明显增加, 由原来年均十余次增加到 182 次, 尤其是 2021 年 3 月 5 日在火山区还发生了 M_L 3.1 构造型火山地震, 地震活动频度和能量在半年时间内远超过正常地震活动水平, 并持续到 2021 年 6 月, 分析认为, 这一期间经历了一次低水平扰动。因此, 本文在现有监测手段分析的基础上, 对这一期间的高光谱气体数据进行处理, 探讨低水平扰动期间高光谱气

体观测异常特征。

研究表明: (1) 从时间序列看, 综合年变残差、平滑滤波、小波变换手段, CO 气体年变规律较好, CO 柱总量浓度范围为 0.0338~0.0719 mol/m², 年平均值为 0.037 mol/m², 在阈值范围内; SO₂ 柱总量浓度范围为 0.00282~0.0345 mol/m², 年平均值为 0.00268 mol/m², SO₂ 在 2019 年 12 月—2020 年 2 月、2020 年 12 月—2021 年 1 月分别出现了较高值, 并且超过了异常阈值。结合地表气体地球化学监测数据分析, 除 2002—2005 年火山扰动期间出现异常, 2017 年以来地表聚龙温泉气体组分、水温监测未出现异常, 因此上述高光谱气体观测出现的异常受环境干扰因素影响较大, 异常信度较小。(2) 从空间分布特征上, 2018—2022 年无论是冬季还是夏季, 天池上方的气体浓度相对较低, 但是在火山口 20km 外的西北缘安图县与抚松县交界部位, 总体 CO 浓度都较高, 达到 0.32mol/m²; 整个长白山火山区 SO₂ 在空间上并无明显区别。结合区域地质构造, 长白山火山区发育有北西向白山—金策断裂以及北东向六道沟-甑峰山断裂带, 此次观测到的异常变化可能与断裂带气体释放有关, 非火山活动异常信号。

基金项目: 吉林长白山火山国家野外科学研究中心基金 (NORSCBS21-07、NORSCBS21-04)、地震科技星火计划项目 (XH23013B)

第一作者简介: 顾国辉 (1993-), 助理工程师, 研究方向: 火山气体监测. E-mail: 15943085753@163.com

*通信作者简介: 盘晓东 (1970-), 高级工程师, 研究方向: 火山学与流体地球化学. E-mail: 249136918@qq.com

• 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 •

威远页岩气区浅层地下水溶解甲烷时空分布及其主控因素

高金亮*

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

页岩气开发的环境风险在全球范围备受关注, 其中以浅层地下水的甲烷污染最具争议。研究表明: 美国部分页岩气开采区内浅层地下水存在甲烷污染现象, 但由于缺乏页岩气开发前的地下水水质基线数据, 目前对于地下水甲烷污染的来源及其与页岩气开采活动的关系尚存在较大争议。我国正处于页岩气规模化开发初期, 具备建立地下水水质基线并进行地下水水质追踪对比的条件, 是研究地下水甲烷污染与页岩气开采关系的有利地区。本研究通过对四川威远页岩气区浅层地下水中溶解甲烷时空分布及成因的研究, 明确页岩气开采区浅层地下水溶解甲烷含量主控因素, 揭示不同阶段页岩气开采活动对地下水溶解甲烷特征的影响, 判断地下水甲烷污染对地下水溶解甲烷特征的影响, 判断地下水甲烷污染与页岩气开采活动的关系。

研究发现, 页岩气开采区浅层地下水溶解甲烷(图 1)浓度范围主要介于 0.001~10mg/L, 主要呈生物成因甲烷特征, 甲烷含量与距页岩气井距离、距常规天然气井距离、地下水水化学类型无显著相关关系, 但受地下水埋深影响较为显著, 地下水埋深越大, 溶解甲烷含量越高; 同时, 甲烷浓度小于 1mg/L 的样品溶解甲烷含量与距断层距离无显著相关性, 但浓度大于 5mg/L 的样品主要分布于断裂发育区。上述结果表明: 研究区页岩气及常规气井钻探、地下水水化学类型对地下水溶解甲烷含量未产生显著影响, 溶解甲烷含量升高主要受断层控制。同位素特征显示: 断层附近所出现的甲烷浓度大于 5mg/L 的地下水样品中, 甲烷具有较重的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C} > -40\text{‰}$), 具有热成因特征, 因此我们认为, 地下水中的高浓度甲烷主要来源于地下热成因天然气沿断层的向上迁移。

为进一步探究页岩气钻采活动对于地下水溶解甲烷的影响, 选取四个典型平台, 对钻井-完井-压裂-生产过程中的平台处地下水的甲烷含量及同位素特征进行监测, 监测结果显示: 1 号监测点页岩气压裂完成后的 6 个月内, 浅层地下水溶解甲烷浓度发生了

显著升高, 同时甲烷碳同位素显著降低。页岩气生产阶段地下水中的高浓度溶解甲烷具有极轻的碳、氢同位素组成, 显示典型的生物成因特征。由于页岩气开采过程中逸散泄露气体主要为热成因甲烷, 因此我们认为 1 号监测点地下水甲烷浓度的升高并非由页岩气的逸散渗漏所引起。现场考察过程中发现, 页岩气钻井平台处存在工人粪便及生活垃圾的遗留与填埋现象, 因此推断该处地下水溶解甲烷浓度的升高可能来源于粪便及生活垃圾的分解。2 号、3 号、4 号监测点在页岩气钻井-完井-压裂-生产过程中, 浅层地下水甲烷含量及碳同位素特征未发生系统性显著变化, 仅在个别监测时间出现含量或同位素的突变, 表明页岩气开采活动未对平台周边地下水产生显著影响。

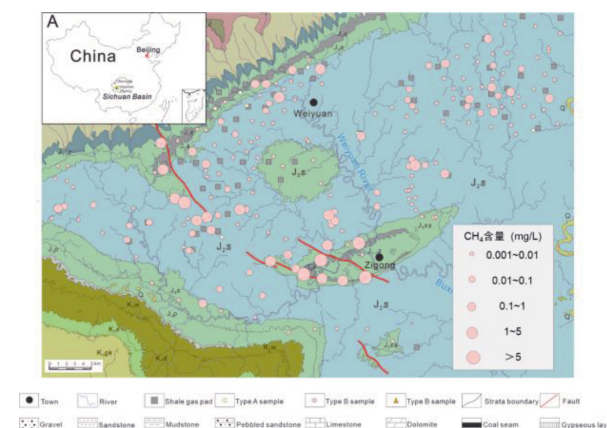


图 1 威远页岩气区浅层地下水溶解甲烷含量分布图

综合上述研究结果, 我们认为威远页岩气区浅层地下水溶解甲烷主要来源于生物成因气, 含量主要受地下水埋深控制, 断层发育处深部热成因天然气向上运移可造成地下水溶解甲烷含量升高。页岩气钻探-完井-压裂-生产过程均未造成页岩气的逸散渗漏及浅层地下水的甲烷污染。同时, 我们建立起川南页岩气拟开采区浅层地下水水质基线, 为后续页岩气开发水环境效应研究提供对比依据。

基金项目: 国家自然科学基金 (41472120)

第一及通信作者简介: 高金亮 (1989-), 高级工程师, 研究方向: 页岩油气开发地质, 油气田环境地球化学. E-mail: jinliang0205@126.com

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

全南-寻乌断裂带温泉水文地球化学特征

鲍志诚, 欧晓斌

江西省地震局, 南昌 330026

通过对全南-寻乌断裂带内 5 个温泉点进行野外调查和取样分析, 对采集的水样进行常量组分、微量元素和氢氧同位素的测试, 以查明该区温泉的水文地球化学特征及其成因。分析结果表明: 全南-寻乌断裂带温泉水温范围为 42~72℃, 属中高温温泉; 温泉分为 HCO₃-Na 型水和 HCO₃-Na-Ca 型水, 以 HCO₃-Na 型水为主; 温泉富集 Na、Li、Sr 等主微量组分, 主要是由于地下热水在循环过程中与周边的燕山期中酸性侵入岩发生了水-岩相互作用导致; $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 测值范围分别为 -40.38‰ ~ -44.50‰ 和 -6.42‰ ~

-6.95‰, 分布在大气降水线左侧附近, 指示热水主要源自大气降水, 并且部分温泉与其中的 CO₂ 气体发生了水-气相互作用。

全南-寻乌断裂带上的温泉主要是由大气降水沿全南-寻乌断裂带深入地壳深部, 经过深循环加热后, 在有利的断裂通道上涌至地表而形成, 温泉的空间分布和水文特征与该区的地震活动有着较好的对应关系。因此, 全南-寻乌断裂带温泉的水文地球化学研究对于赣南地区的地震流体异常核实和地震监测预报具有重要的实践意义。

• 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 •

应力作用下页岩变形破裂行为及气体渗透率耦合演化

梁明亮^{1,2,3}, 李小诗^{1,2,3}, 李春麟^{1,2,3}, 王宗秀^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100083;
2. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100083;
3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100083

与北美相比, 中国海相优质页岩具有较好的物质基础和页岩品质, 但近年来的勘探显示不同构造区的页岩含气性和勘探效果差异巨大。以四川盆地及其周围为代表的中上扬子地区经历了多期构造改造, 优质海相页岩普遍发育构造变形作用, 这是中国南方海相页岩与北美页岩层在地质构造特征上的主要差异, 也是中国南方海相页岩气资源调查、评价和勘探开发的主要挑战。渗透率是页岩储层调查评价的关键参数之一, 页岩储层的渗透率不仅影响页岩气的赋存状态, 更通过影响页岩气的运移和富集, 直接决定了页岩储层突破压力的大小, 从而对页岩气储层的储集能力和页岩气的开采效益均具有控制作用。

大量构造变形页岩样品的渗透率研究表明, 自然构造应力影响下页岩发育不同性质的变形结构, 裂缝发育, 渗透率提高, 明确了构造应力对页岩储层渗透率影响的现实问题和研究意义。但这些认识主要来自自然构造变形样品构造解剖和渗透率测试, 不能解答在构造应力与渗透率演化之间的力学机制问题。基于此认识, 利用三轴压缩气渗耦合实验装置, 开展人工应力作用下龙马溪组页岩变形行为、应力-应变、渗透率变化测试和定量分析, 探讨

应力作用下页岩的变形行为及渗透率耦合演化的力学机制及意义。

根据样品应力-应变曲线(图 1)及模拟实验后宏观破裂特征(图 2)综合判断页岩变形性质, 认为相同温压及应力加载背景下, 龙马溪组页岩变形行为受层理角度的影响, 水平层理和垂直层理页岩在应力作用下显示典型的脆性变形样式, 而斜角度层理页岩显示了一定的半脆性变形特征。变形前后原位渗透率耦合测试结果显示, 所有页岩样品在破坏变形后的气体渗透率(K_D)比原始渗透率(K_0)都获得提高(图 3)。然而, 表现出脆性变形的垂直和水平层理角度下的样品的渗透率显著增加, 高至数百倍。而表现为半脆性变形的层理角为 30° 和 60° 的试样, 在应力破坏后渗透率仅提高数倍。这些结果表明, 先存结构不仅影响页岩的力学行为和变形特征, 也会影响页岩在应力破坏后的气体渗透率演化特征。在前人关于岩石构造变形-渗透耦合的研究基础上, 结合本次研究数据资料(阴影部分), 提出了页岩变形行为与渗透率耦合的改进模型(图 4)。本研究的认识对我国南方构造复杂区先存层理结构变形发育的页岩层系的勘探开发均具有一定的启示意义。

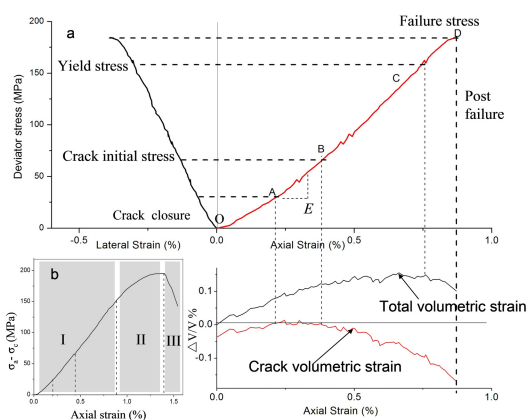


图 1 龙马溪页岩应力-应变曲线图

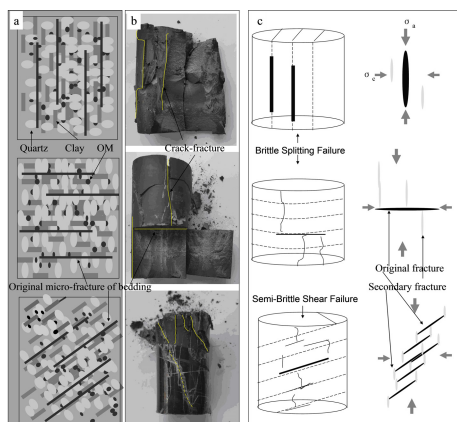


图 2 不同层理角度下页岩破裂模式

基金项目: 国家自然科学基金(41802158); 基本科研业务费专项经费资助(DZLXJK202208)

第一作者简介: 梁明亮(1985-), 副研究员, 研究方向: 气体地球化学, 构造物理化学. E-mail: liangmingl09@mails.ucas.ac.cn

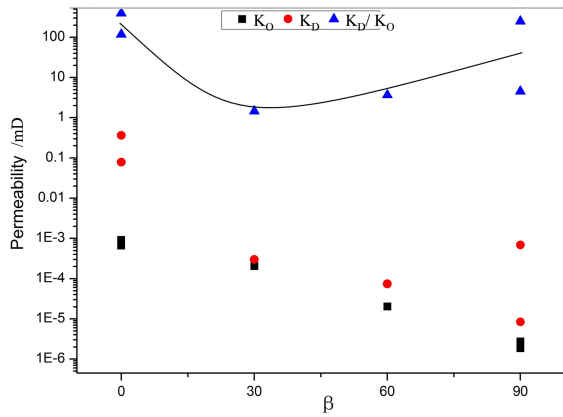


图 3 模拟变形页岩 (K_D) 渗透率演化特征

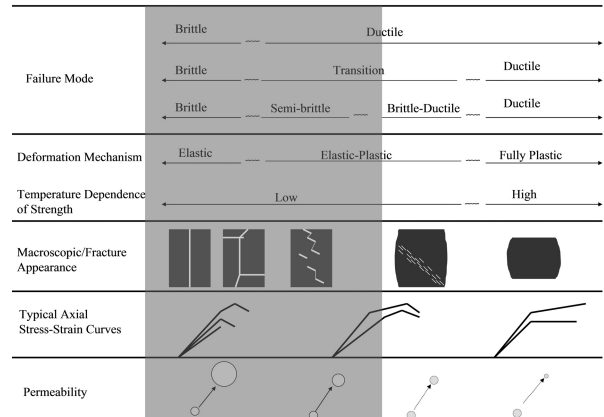


图 4 页岩变形行为与渗透率耦合的改进模型

主要参考文献:

- [1] Liang Mingliang, Wang Zongxiu, Zhang Yu, et al., 2021. Experimental investigation on gas permeability in bedding shale with brittle and semi-brittle deformations under triaxial compression. Journal of Petroleum Science and Engineering, 196, 108049. doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108049.
- [2] 梁明亮, 王宗秀, 李春麟, 等. 2020. 构造变形对海相页岩储层渗透率演化的影响. 地质力学学报, 26(6): 840-851. doi:10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.066.

· 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 ·

华北克拉通周缘流体地球化学特征及构造活动性分析

李莹, 陈志*, 刘兆飞, 路畅, 胡乐, 何鸿毅, 张文亮, 孙凤霞

中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

活动断裂带流体地球化学对构造活动相应敏感。华北克拉通 (NCC) 因其复杂而强烈的构造活动备受关注。对 NCC 主要活动断裂带的流体地球化学特征其构造活动性进行了研究。在青藏高原东北部 (NETP) 和张渤地震带 (ZBSZ) 观察到比其他地震带更强的土壤和泉水的脱气作用。土壤气体组分之间相关性和温泉气体同位素比值的综合研究发现, 存在地质源气体释放的土壤气体观测点和深部来源气体 (壳幔源气) 的温泉点均明显集中分布于青藏高原东北缘和张渤地震带。同时, 这两个区域还是华北克拉通地区同时具备较强剪切应变率和显著的 GPS 水平速度场梯度的构造区域。这些现象综合揭露了华北克拉通现今的构造格局, 即主要构造活动可能为青藏高原东北缘的构造挤压和张渤地震带两侧块体的差异运动。张渤地震带地下 20~40 公里处的低速带可能与深部岩浆侵入有关, 而青藏高原东北缘地下 20~40 公里处的低速带则为壳内成因地壳流, 其前缘可能已抵达六盘山断裂带附近。

青藏高原东北缘与鄂尔多斯地块构造带地球化

学、地球物理特征空间分布由西北向东南有明显差异。对区域尺度上气体地球化学异常空间分布和地震层析成像分析, 确定了鄂尔多斯块体与青藏高原的辐合边界域, 并通过可在两个主要地质单元之间流通的流体追踪了两者之间的构造不连续性。其东北部 (A 区) 以逆冲断层和走滑断层为主, 底部速度边界明显, 中下地壳低裂缝密度 (ϵ)、饱和度 (ξ) 和泊松比 (σ) 与低热流和低 CO_2 排放值相吻合, 构造挤压和区域闭锁断裂是诱导因素。东南区 (C 区) 以东西向伸展构造为主, 速度方向大致为东西向 p 波方位各向异性, 高渗透率和高孔隙度可以从地壳的高 ϵ 、 ξ 和相对高 σ 异常中推导出来, 导致地表的高热流、高 CO_2 浓度和高通量, 以及主要来自地壳的气体。中间区 (B 区) 同样以逆冲和走滑断裂为主, 是一个异常带, 强烈的闭锁断裂明显显现, 中地壳各向异性变化明显, 浅层气体组分贡献较大, 上地壳 CO_2 通量、热流和区域 ϵ 、 ξ 、 σ 均高于 A 区, 表明 B 区下方存在区域性破碎破碎。多学科综合研究表明, B 区是青藏高原与鄂尔多斯地块的收敛边界。

基金项目: 自然科学基金 (42073063) 国际地球科学计划 (IGCP724)

第一作者简介: 李莹 (1978-), 研究员, 研究方向: 岩石物理与流体地球化学. E-mail: Email:liyong@ief.ac.cn

*通信作者简介: 陈志 (1983-), 研究员, 研究方向: 地震流体地球化学. E-mail: dugu_830822@163.com

• 专题 25: 地球脱气理论研究与应用实践 •

藏东南深源气体地球化学特征与成因

李菊景^{1,3}, 郭正府^{1,2,3*}, 张茂亮⁴, 赵文斌¹, 孙玉涛⁵, 成智慧⁶

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京 100044;
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
4. 天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072;
5. 河北地质大学资源学院, 河北 石家庄 050031;
6. 岭南师范学院地理科学学院, 广东 湛江 524048

俯冲带脱气系统, 能够将来自俯冲板块、地幔楔和上覆板块的挥发分脱气, 并在调节地球大气中 CO₂ 等组分含量方面发挥着重要作用 (Zhang et al., 2017b), 这被证实在地质历史时期对地球的气候变化产生了深刻影响 (Dasgupta, 2013; Kelemen and Manning, 2015; Plank and Manning, 2019; Stewart and Ague, 2020)。新生代以来, 印度向欧亚板块的长期挤压和俯冲碰撞, 造成青藏高原大规模抬升和南北缩短变形, 形成了世界最高的喜马拉雅造山带、广泛分布的火山活动 (Ding et al., 2003; Chung et al., 2005; Guo and Wilson, 2019)、许多活动断裂带 (如 Klemperer et al., 2013; Xu et al., 2022) 和以热液爆炸、喷气孔、温泉和土壤微渗漏的形式向大气释放温室气体的 1700 多个地热区 (佟伟, 2000)。Guo 等 2021 重建了青藏高原 65 Ma 以来岩浆-变质作用深部碳释放通量的演化曲线, 与新生代大气 CO₂ 浓度变化显示出良好的相关性, 均证明青藏高原及其邻区是研究大陆俯冲带挥发分循环和碳收支的理想场所。虽然对青藏高原挥发分的相关研究已大量涌现 (Yokoyama et al., 1999; Hoke et al., 2000; Zhao et al., 2002; Newell et al., 2008; Klemperer et al., 2013, 2022; Zhang et al., 2017a, 2017b, 2021; Zhao et al., 2022), 但仍局限在 92°E 以西的青藏高原腹地, 这限制了对大陆俯冲带脱气系统碳循环及其气候和环境影响的全面认识。

藏东南地区位于印度-欧大陆碰撞/俯冲较前缘, 成为构造地质、变质岩石学等方向上的研究热点。高原岩石圈整体厚度不均一, 藏东南明显较厚, 可能与印度大陆板片碰撞/俯冲所导致的藏南岩石圈整体增厚有关, 这为俯冲再循环物质提供了富集交代的场所。藏东南区域大地热流值 (Jiang et al., 2019) 明

显较高, 这为深部碳释放提供了热源。本研究针对喜马拉雅东构造结 (EHS) 和腾冲火山区 (TVF) 的温泉气体样品进行了组分含量与 He-C-N 同位素比值测试和地球化学成因解析, 其中 EHS 地区根据温泉出露的构造位置进一步划分为嘉黎断裂带组 (JLF) 和错那裂谷组 (CR)。结果显示, 藏东南地区的温泉气体与青藏高原南部及其邻区火山-地热区在成分上呈现出较为一致的特征, 均包含富 CO₂ 型、富 N₂ 型和富含两者型。其中富 CO₂ 型气体具有较低的 He 含量的特征, 表明花岗质围岩 U、Th 衰变对 He 同位素的影响不大, 可以反映源区性质。具体来看, JLF 组以 CO₂ 为主, CR 组以 N₂ 为主, TVF 样品明显分为两组, 暗示有两组不同的成因。He-N₂-Ar 三角图显示出样品整体具有深部 (地幔/地壳) 与大气成分混合作用的特征, 表明深源气体上升运移至地表的过程中受到了大气或饱和地下水混染的影响。校正后的 He 同位素用 R_C/R_A 表示, TVF 最高, 明显分为两组: 0.19~0.50 R_A, 2.15~4.90 R_A, JLF 组为 0.06~0.41 R_A, CR 组为 0.04~0.14 R_A。JLF 组为 δ¹³C 值较重 (-8.67‰~-1.05‰), CR 组 δ¹³C 值较轻 (-11.79‰~-6.17‰), TVF 组 δ¹³C 值分布范围较广 (-13.76‰~-2.16‰), 样品整体显示出地幔-地壳混合特征, 其中壳源物质以无机碳酸盐为主, 分布在地幔、无机碳酸盐和有机质三端元之外的样品, 明显其 CO₂ 含量更低, 推测可能发生方解石沉淀而产生了元素分馏, 在探讨源区时排除。空间分布上, 研究区的气体 He-C-N 同位素随着距离全新世火山 (对 TVF 样品而言) 和嘉黎断裂带 (对 EHS 样品而言) 远近呈现出一定的相关性, 指示 TVF 和 EHS 温泉气体分别受到全新世火山活动和嘉黎断裂带的影响。为进一步解析 EHS 地区气体的深源组成, 本研究结合大量前人在藏南的气体地球化学数据, 发现在

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB26000000)

第一作者简介: 李菊景 (1995-), 女, 博士生, 第四纪地质学专业. E-mail: lijijing@mail.iggcas.ac.cn

*通信作者简介: 郭正府, 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 火山岩岩石学及其地球化学. E-mail: zfguo@mail.iggcas.ac.cn

81°E~97°E 的范围内 He 同位素等值线图分布趋势整体呈现 NW-SE 走向且由南向北增高, 在 EHS 核心部位具有较高的 He-C 同位素, 利用 He-C 同位素耦合模型计算了 EHS 地区气体的源区与演化过程: (1) 部分熔融程度为 5%~20% 的富集地幔楔 (EMW); (2) EMW 与碳酸盐组成不同富集程度 (9:1~5:5) 的新 EMW; (3) 新 EMW 与浅部的地壳变质有机质 (CMS) 进一步混合, 其中, EHS 核部具有最低的 CMS 含量 (50%), 可能与该位置较破碎的深部结构有关, 导致印度板片地壳变质有机质的贡献减少, 而 CR 组较高的 CMS 含量显示其具有更多壳源物质的贡献。

藏东南温泉气体的地球化学特征表明, 气体来源和演化过程与其在空间上所处的深部结构和浅部构造密切相关。在深部, EHS 地区脱气系统可能受到印度板块由西向东从“缓俯冲”向“陡俯冲”转换的差异俯冲样式和破碎结构 (彭森等, 2017) 的影响, 气体样品的 He-C 同位素比值从 EHS 地区由核部到两侧均降低; 在浅部, EHS 地区深源气体进一步的上升运移受到嘉黎断裂带的构造背景控制。本研究认为, 气体地球化学能够为理解印度-亚洲大陆碰撞俯冲带关键枢纽位置的物质循环机制、揭示深部结构及其在空间上的差异特征提供新视角。