

中国地质源温室气体释放近十年研究概述

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

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.中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029; 3.中国地震局地震预测研究所,北京 100036; 4.成都理工大学能源学院,成都 610059; 5.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室,广州 510640; 6.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; 7.天津大学表层地球系统科学研究院,天津 300072; 8.中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081

摘要: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,是固体地球与大气之间物质交换(地气交换)的重要形式,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。全球气候变化和温室效应是人类面临的巨大挑战,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已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。中国科学家积极参与和适时开展地质源温室气体调查研究,对中国大陆部分火山和地热区、地震断裂带、含油气区和泥火山等释放的温室气体进行了初步观测与调查,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些成果,这些工作为进一步的深入研究奠定了良好基础。

关键词:地质源温室气体; 释放特征; 研究现状; 发展前景

中图分类号: P593 文章编号: 1007-2802(2021)06-1250-22 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.085

A Brief Introduction of 10-year's Investigations and Studies on Geological Greenhouse Gas Emission in China

ZHENG Guo-dong¹, ZHAO Wen-bin², CHEN Zhi³, XU Wang^{1,4}, SONG Zhi-guang⁵, LI Qi⁶,
XU Sheng⁷, GUO Zheng-fu², MA Xiang-xian¹, LIANG Ming-liang^{1,8}, WANG Yun-peng⁵

1. Gansu Key Laboratory for Oil and Gas Resources, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China; 4. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 6. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 7. School of Earth System Sciences, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 8. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: The emission of greenhouse gas of geological origins from the solid Earth into the atmosphere is one of the most important mass (and also energy) exchange processes from the interior to surface of the Earth. The greenhouse gas of geological origin mainly includes carbon dioxide and methane released through various kinds of activities including volcanic eruptions and hydrothermal activity, tectonic movements of fractures and fault zones, natural and/or anthropogenic leak of

收稿编号: 2021-101 2021-06-21 收到, 2021-08-20 改回

基金项目: 国家变革性技术项目(2019YFA0708501); 国家自然科学基金资助项目(41273122, 41572352, 41402298); 中国科学院国际访问学者计划支持项目(2018TW2ZA0001, 2020VMA0011, 2020DM0002)

第一作者简介: 郑国东(1961-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 气体、环境地球化学和元素地球化学. E-mail: gdzhhbj@mail.iggcas.ac.cn.

crude oils and natural gases, dissociation of methane hydrates, natural fires of coal, and weathering of carbonate rocks. In fact, the exchange of geologically originated gases (basic carriers) is an important geological process and is an important dynamic mechanism for the mass circulation and energy exchange in all circles of the earth. Global climate change and greenhouse gas effect are daunting challenges for all human beings. The investigations and researches on the types and sources, the emission mechanisms and processes, the released fluxes to the surface and the greenhouse effect on the atmosphere of greenhouse gases of geological origins have become one of the research hotspots and key development directions of the modern earth system science, with great scientific significances to deal with global climate change and to correctly understand greenhouse effect on the atmosphere. Chinese scientific community took an active part on this challenge, performed a series of key primary investigations and researches on geologically originated greenhouse gases, including those released from some volcanic areas and geothermal regions, major seismic fault zones, oil- and gas-bearing basins, and mud volcanoes within the vast and geologically varied territories of China, and obtained some achievements on the geochemical compositions and released fluxes of geologically originated greenhouse gases. These above mentioned studies have laid a good foundation for further widely in-depth studies in a near future.

Key words: geologically originated greenhouse gas; release characteristics; current study status; developing prospect

0 引言

全球环境与气候变化,是人类生存与社会发展面临的重大问题。查明各类温室气体来源及其占比、厘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。近期的研究表明,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(Jenkinson et al., 1991; Etiope and Klusman, 2002; 郭正府等, 2017)。由于地理、地貌、气候等条件的巨大差异以及地质作用的极端复杂性和历史悠久性,目前对地质源温室气体释放的认识还比较局限,地质作用向大气圈释放温室气体的机理、过程及释放通量等还很不清楚,从而导致不能准确判断地质源温室气体在大气碳收支中的占比,也无法确定自然源和人为排放量的相对比例。在此背景下制定的温室气体减排政策必然遇到研究基础不足的困惑,也影响社会发展和经济建设的合理布局,并且阻碍“碳达峰”和“碳中和”战略的顺利实施,甚至波及国际谈判的话语主导权。

为了应对气候谈判,欧洲多国、美国、日本以及我国台湾都针对地质源温室气体开展了相应的碳排放专门调查,发表了大量的学术论文、研究专著和报告。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、地震断裂带、含油气盆地和泥火山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研究成果(Tang et al., 2007, 2008; Zheng et al., 2017; Chen et al., 2019a; 马向贤等, 2012; 郭正府等, 2014, 2015)。但与其他发达国家和地区相比,我国地质源温室气体的调查研究由于缺乏持续的课题和经费支持,已有的工作还比较零散,尚缺乏系统性和全面性的研究工作,全国甚至较大范围的区域性地质源温室气体释放数据几乎还是空白,亟需国家层面的有效组织和专项经费的重点支持。

1 地质源温室气体

温室气体是指大气中能够吸收地面反射的太阳辐射并重新发射辐射的一些气体,其存在和含量变化可以导致大气温度的升降,主要包括二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)等非烃气体,甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)等烃类气体,以及水蒸气等。目前,地质源温室气体的调查研究主要侧重于烃类气体(如 CH_4 、 C_2H_6 等)、 CO_2 和 CO 等非烃含碳气体。一方面,人类居住的蓝色地球拥有相对稳定的大气圈和水圈,为生命的产生和演化提供了最基本的必要条件;也正因为大气中存在温室气体,才可以保持近地表大气温度在一定范围内相对稳定,从而保证了宜居地球的生机盎然。另一方面,大气 CO_2 等温室气体浓度持续升高将导致全球气候变暖、气候灾害的频繁发生,自然灾害事件又威胁到人类的生存发展。很多研究表明,大气 CO_2 浓度的升高不仅是人类活动碳排放的结果,地球演化过程也一直在向大气圈释放 CO_2 气体(Foley and Fischer, 2017)。因此,研究地质作用过程向大气释放 CO_2 的规律和强度,准确评估自然过程对大气 CO_2 平衡的影响,

对制定科学合理的人为活动碳排放政策具有重要的指导意义。

就地球科学而言,地质源温室气体并不是什么新的研究发现,只是由于大气环境变化,尤其是含碳气体的温室效应问题凸显(Brune et al., 2017; Cox et al., 2000)因而引发对各种地质作用释放温室气体的关注和专门研究。实际上,地质源温室气体的调查研究就是从地质作用过程及其历史演变的角度来探讨地球脱气作用与机理,包括研究现今地球脱气和大气圈温室气体的含量、来源与大气质量及平衡关系,甚至某些极端气象事件与地球释放气体的相关性等基本问题,以便为预测大气环境演变趋势和制定对策方案提供参考依据。然而,由于地质作用过程极为复杂、影响因素众多,要弄清地质源温室气体释放的过程、强度、规模等关键问题,还需要协调和组织多领域多学科的科技力量,开展广泛深入的合作研究,为我国应对气候变化以及实现“碳达峰”和“碳中和”目标提供科学依据。

需要说明的是,地球物质的存在形态主要包括固体(态)、液体(态)、气体(态)。根据物质组成,自然界的气体可分为烃类气体、非烃类气体和稀有气体三大类。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,尤其是在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。因此,我们建议,在三大类气体划分的基础上,可以将“温室气体”单列为特殊类型,以期引起科学界的足够重视。

2 气体地球化学基本原理与研究内容

人类对空气的认识由来已久,空气与生命起源、物种进化、人类生存等都密切相关。然而,气体地球化学作为相对独立的分支学科出现的历史却比较短暂,但其发展令人鼓舞。气体地球化学,作为认识和研究地球内部地质作用机制与过程的基础学科,在研究地质作用释放气体的化学组成和同位素变化方面具有特殊的支撑作用。

2.1 气体地球化学及其研究领域

气体地球化学主要是以自然界中呈气态存在的元素及其化合物的地球化学特征、成因类型、迁移和聚集规律及其所参与的地球动力学过程、所表征的地球科学意义等为目标科学体系。地质作用过程释放气体的现象很早就受到科学家的注意,德国、意大利、希腊等欧洲国家的科学家对地球释

放气体的研究可以追溯到十八九世纪(Heinicke and Martinelli, 2005),但作为一门分支学科的名称则是1984年在美国夏威夷召开的“火山、地震、资源勘探和地球内部的气体地球化学”国际学术会议上才正式出现,1979年前“气体地球化学(gas geochemistry)”一词在学术论文或专著中出现不多,所研究的领域也多局限在烃类化合物的天然气和地热等资源利用方面(Heinicke and Martinelli, 2005)。现代气体地球化学的研究领域已涉及地球的各个层圈,构成了气体地球化学的完整学科体系,并在资源、能源、环境、灾害等众多领域得到广泛应用。

我国天然气地球化学基础理论与勘探实践成绩斐然,尤其是以甲烷等烃类气体形成机理、运移与油气资源评价为主要目标的天然气地球化学研究不仅在国际学术界占有重要地位,也为解决我国油气资源勘探和开发生产的实际问题做出了突出贡献。这个研究领域近十年来的发展更是全面、深入,创新成果不断涌现(刘文汇等, 2021)。地质灾害调查研究是气体地球化学的另一个重要应用领域,尤其是地震地质和地震预测研究中,以氦气和氡气为代表的稀有气体,以及二氧化碳、氡气等为主的现场检测和综合研究取得了很多令人振奋的研究成果(陶明信等, 2005; Zhou et al., 2010, 2016; Han et al., 2014; 周晓成等, 2017)。最近数年,相关研究经常与断裂带温室气体释放调查同步进行(崔月菊等, 2017; Chen et al., 2019a; Sun et al., 2020a),学科交叉和学术交流非常活跃,发展前景广阔。需要说明的是,以上两个领域的研究进展将有专文总结,在此不再赘述,本文主要集中于地质源温室气体释放的调查研究方面的进展。

地质源温室气体释放特征的调查研究离不开气体地球化学基础理论及其应用实践,根据地质作用释放温室气体的化学组成和相关元素的同位素特征,可以判识其来源、运移机理和释放等基础问题,进而指导地质源温室气体的类型划分和释放通量估算。通过地质源温室气体地球化学研究还可以加深对地球整体系统的了解,获得地球形成、演化的新认识,从而为解决资源、能源、环境、灾害等问题提供重要的科学依据(郑国东等, 2018)。

2.2 化学组成

气体的化学组成(或组分)及其相对含量(浓度)是气体地球化学研究的基本内容,也是确定气体来源的重要标志。气体组分是指在地球系统的物理-化学条件下可以存在的各种气体分子及其所

占的比例。随着科学技术的不断进步,现如今各类气体组分几乎都可以实现种类确定及其相对含量的精确测定,尤其是近年来不断创新和改进的气体组分检测技术和分析仪器也为地质源温室气体的化学组分鉴定提供了强有力的技术保障。

地球的大气系统是多种气体的混合物,根据其含量和变化可以分为三大类:恒定组分、可变组分和不定组分。恒定组分是指氮气(N_2)、氧气(O_2)和氩气(Ar)。现代大气的气体组成中, N_2 占空气体积的78.09%、 O_2 占20.95%、Ar占0.93%,三者总和占空气总体积的99.97%,其余组分是微量的氖(Ne)、氦(He)、氙(Xe)、氡(Rn)等稀有气体。可变组分是指空气中的 CO_2 和水蒸气,通常 CO_2 含量为0.02%~0.04%,水蒸气含量小于4%(唐孝炎等,2006)。可变组分在空气中的含量随季节、气象条件与人类活动的变化而变化。不定组分包括煤烟、尘埃、硫化物、氮氧化物和一氧化碳等,主要与人类活动直接相关,当这些组分达到一定浓度后就会给人类、生物造成严重的危害,因此,不定组分是大气环境科学研究的主要对象。

大气的可变组分及其相关气体正是主要的温室气体,也是地质源温室气体调查研究的直接对象。地质源温室气体主要是指含碳气体,既有烃类气体(如 CH_4 、 C_2H_6 等),又有非烃类气体(如 CO_2 、CO等)。火山喷发和地热活动释放的温室气体主要是 CO_2 ,也有 CH_4 等烃类气体;含油气盆地以及泥火山释放的温室气体主要以 CH_4 、 C_2H_6 等烃类气体为主(Etioppe and Cicciolelli, 2009),并伴有 CO_2 、CO等非烃气体。不同来源的地质源温室气体,其化学组分与现今大气平均化学组成存在明显差异,因此可以利用各种气体含量之间的比值,例如 O_2/N_2 、 $CH_4/(C_2H_6+C_4H_{10})$ 、 CO_2/Ar 等,来区分和确认气体的主要来源和可能成因(Zheng et al., 2010; Xu et al., 2012)。

2.3 同位素组成

同位素是指具有相同原子序数(即质子数相同)但质量数不同,亦即中子数不同的一组核素,是同一种元素,但不是同一种原子,在元素周期表中占据同一个位置。气体同位素就是指气体元素不同质量数的原子,它们之间的相对关系,即同位素比值。根据其来源,可划分为放射性同位素和稳定性同位素,这也是同位素地球化学研究的主要目标。放射性同位素,半衰期是恒定的,可用来确定年龄。而稳定同位素与母源相关,因此可以作为溯源标志,即稳定同位素的示踪作用。

不同来源温室气体构成元素的同位素组成差异很大,可以用来区分气体来源和成因,揭示各种地质作用过程中相关气体的分馏与混合等问题。地质源温室气体主要包括 CH_4 等烃类气体的碳氢同位素、CO和 CO_2 的碳同位素、稀有气体尤其是氦同位素等。当然,特定背景下的地球脱气研究,其他一些同位素的应用也经常遇到,例如硫同位素、氮同位素等。

地质源温室气体在其生成-运移-释放过程中必然会经历各种地质作用过程,尤其是特定元素可以发生固体-液体-气体的相互转换,很容易导致同位素组成特征的变化,即分馏效应。例如碳(C)元素,既是金刚石、石墨、白云石、方解石等固体矿物的组成部分,又是液态石油烃的主要元素,或者溶解在水中形成碳酸根离子,也可以成为天然气以及CO、 CO_2 等气体的主要组成,而作为生命物质构成的主要元素,其存在形式更是多种多样,C元素在各种转化过程中的同位素分馏也很明显。因此,相关元素同位素组成特征可以提供地球各圈层物质组成和循环以及能量交换的重要信息,并利用相关同位素组成特征(比值)追索气体的来源以及迁移机理和过程,进而解析相关地质作用。

2.4 源区判识

尽管不同地质单元和地质作用类型伴随的气体化学组成和同位素比值变化很大,但随着调查领域的持续扩展和研究程度的不断深入,众多研究结果揭示,各种地质背景条件下地球脱出气体的化学组分和同位素组成均具有一定的变化范围。不少科学家也提出了一些特定地质背景条件下的地质源温室气体的划分模式和判别指标。目前被普遍采用的方法主要包括:化学组成、各种气体成分的相互比例,同位素比值, CH_4 、 CO_2 等气体的碳氢氧同位素,以及近些年迅速发展的团簇同位素,等等。当然,这些化学组成和同位素比值的应用需要考虑具体的地质背景来选择,以准确判识其来源。

地表水热系统中的气体包括了 CO_2 、 N_2 、 O_2 、 SO_2 、 H_2O 等主要组分和 H_2 、He、Ne、Ar、CO等微量组分。 CO_2 的来源主要包括:大气成因、有机成因、碳酸盐岩溶解成因、变质成因及地幔来源等。其中,有机成因 CO_2 主要指地表土壤植物根系呼吸作用和土壤有机质分解形成的 CO_2 ;碳酸盐岩溶解成因 CO_2 主要指表层环境中土壤 CO_2 和区域碳酸盐岩溶解形成的 CO_2 ;变质成因 CO_2 主要包括伴随岩石变质过程的脱碳作用(decarbonation),也包括少量沉积变质岩中有机质分解和石墨的氧化等。所

以,对于地球(地幔)脱气的 CO_2 ,就需要区分和甄别包括地表浅层大气成因 CO_2 和碳酸盐岩溶解成因 CO_2 ,以及除此之外的深源 CO_2 ,即变质成因 CO_2 和幔源成因 CO_2 等各种主要组成部分。

相对于 CO_2 稀有气体具有相对简单的来源,以地球原始气体 ^3He 为代表的上地幔或岩石圈地幔组分、放射性元素U和Th等衰变而来的地壳组分,以及大气组分。稀有气体具有化学惰性(不活动性)和较低的元素丰度等地球化学特征,它们在地壳流体中的变化主要取决于其溶解度、吸附性、吸着性和解吸能力等物理性质,而不涉及复杂的化学过程。大量研究表明,稀有气体(特别是氦)在地球各圈层具有独特的同位素组成,因此,稀有气体同位素组成(如 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 等)是判识地幔和地壳来源气体最有效的同位素指标(Sano and Wakita, 1985)。

随着观测数据的不断增加,各种特定地质背景端元气体组分的地球化学特征已较为清楚,各种相关端元组分之间的混合作用也已得到基本梳理,并针对壳源、幔源,有机、无机等多种来源的气体混合比例的划分等提出了一些计算模型(Kerrick and Caldeira, 1998)。对于地质源温室气体,利用 CO_2 和 He 气分子组成比及其碳、氦同位素比值,可以进行来源判识和类型划分(Langmuir et al., 1978; Sano and Marty, 1995) 这一方法已得到普遍采纳(Sun et al., 2018; Xu et al., 2012, 2013, 2014; Zhang et al., 2015, 2017)。各种元素及其同位素比值(如 $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ 、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 、 ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) 在气体来源判识和成因探究等研究中也应注意准确运用(Sano et al., 2017),在具体的调查研究中,区域地质背景条件的控制作用应该是解释气体来源和形成机理最重要的因素之一,而多数地球化学指标也不可能无限制地简单照搬和使用。

3 地质源温室气体野外观测与样品采集

对地质源温室气体进行的野外观测和综合研究主要包括“定性”与“定量”两个方面。前者就是要确定温室气体释放的类型,或者某种地质作用释放温室气体的特征,主要涉及气体地球化学特征研究和区域地质背景调查。后者是指特定地质单元及其地质作用释放温室气体的规模或者强度,以及释放通量。另外,还可以根据相关的地球化学指标判识不同来源气体的混合作用,计算各种来源气体的混合比例。

3.1 野外观测与测量方法

根据释放强度,地质源温室气体释放类型大致可以分为宏渗漏、小渗漏、微渗漏等。在实际调查研究中,这些类型的划分并没有严格的标准或准确的定义。通常以肉眼所见的气体释放为宏渗漏,不易觉察的为小渗漏或微渗漏,微渗漏需要借用仪器进行检测。火山地热区、大型活动断裂带、含油气沉积盆地、海底沉积物等温室气体释放的形式主要有土壤微渗漏、温泉宏释放、泥火山宏释放、海水释放等多种类型,而且宏渗漏与微渗漏经常并存。针对不同的释放形式,需要在实地考察的基础之上有所选择地制定现场观察和测量方案,优选代表性地质源温室气体释放点、线(段)、面(区),以及可对比的参照区,分别采用相应的技术方法进行原位调查和测量计算,以获取各研究区段温室气体释放通量的定量数据。野外测量方法主要包括:密闭气室法、气体化学与水化学法、飞行器实地测量法、遥感技术和海洋底水原位探测技术等:

(1) 密闭气室法。该方法适用于土壤微渗漏释放通量的测量(图1),通过记录密闭气室内 CO_2/CH_4 浓度的累积上升与时间之间的关系,计算测量点的 CO_2/CH_4 释放通量,所用仪器为便携式 CO_2/CH_4 通量测量仪(GXH-3010E、华云 CO_2 仪、Laser One CH_4 仪、METREX 2 型等)。测量点位根据需要的面积进行网格化布点,实际测量过程在已测点位通量变化规律的基础上判断是否需要加密检测点位。根据公式(1)计算 CO_2/CH_4 释放通量:

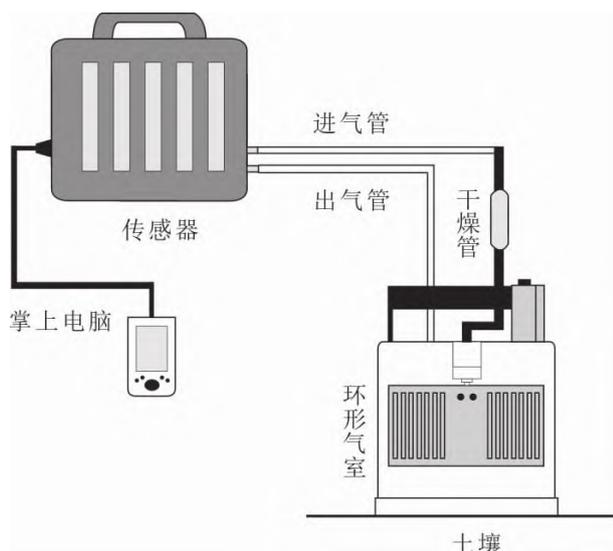
$$\sum_1^i F_{\text{microseep}} = \sum_1^i \frac{(V_C/A_C) \times (C_2 - C_1) / (t_2 - t_1) \times A_s}{1000 \times 22.4} \times M \times 60 \times 24 \times 365 \times 10^{-6} \text{ (ton/g)} \quad (1)$$

式中, F 为各测量点 CO_2/CH_4 微观渗漏通量; V_C 为箱体体积; A_C 为箱体底面积 (m^2); A_s 为观测面积; C_1 、 C_2 分别是时间 t_1 、 t_2 时箱体内的 CO_2/CH_4 浓度。

(2) 气体化学法。该方法主要用于泥火山和温泉气态 CO_2 和 CH_4 等温室气体通量观测,结合气体中 CO_2/CH_4 等气体含量和溢出气体总量等资料,计算温室气体释放通量。所用的仪器包括:GL-100B 型红外线数字皂膜流量计和安捷伦便携式气相色谱等(图2) 根据公式(2)计算 CO_2/CH_4 释放通量:

$$E = \frac{Q_v \cdot T \cdot c}{1000 \cdot 22.4} \cdot M \cdot N \quad (2)$$

式中 E 表示 CO_2/CH_4 的释放量; T 表示时间; Q_v 为气体释放总量; c 为气体 CO_2/CH_4 浓度; N 为释放点数量; 22.4 为标准状态下的气体摩尔体积; M 为 CO_2/CH_4 摩尔质量,计算时假定泥火山/温泉气体



引自郭正府等(2014)

图1 密闭气室法示意图

Fig.1 Sketch diagram of a closed gas chamber method

的释放通量处于恒定状态。

(3) 水化学法。该方法可用于观测地球深部过程产生的 CO₂ 溶于水形成的无机成因碳 (dissolved inorganic carbon, DIC), 主要为 HCO₃⁻ 离子。根据温泉水中逸出 CO₂ 的浓度及温泉水的流量即可估算温泉水中溢出 CO₂ 的通量。在计算时, 需排除近地表来源的 HCO₃⁻ 离子的贡献, 公式如下:

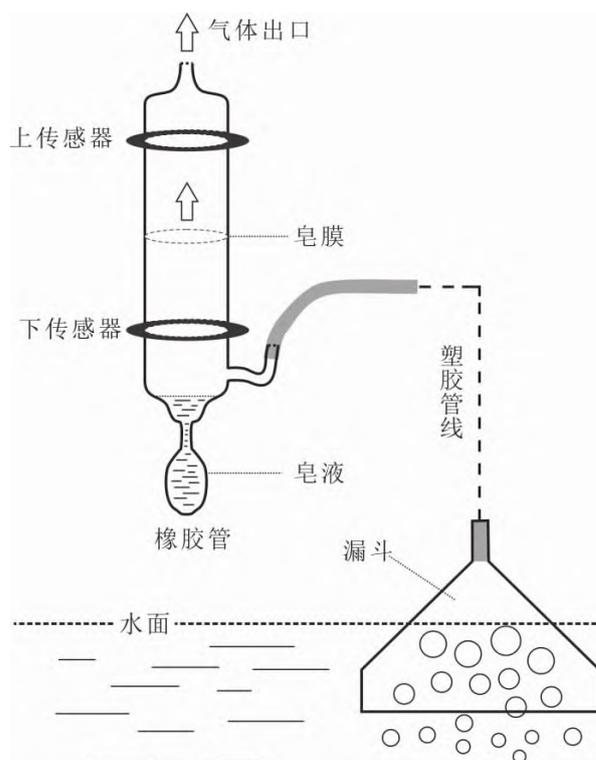
$$C_{ex} = DIC - (Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-}) \quad (3)$$

式中 C_{ex} 是温泉水中溢出的 CO₂ 浓度 (mol/L)。该方法假定深部来源的碳在上升过程中溶于温泉水, 以 DIC 形式存在, 扣除来自围岩碳酸盐 (方解石与白云石) 中的碳, 过量的碳以 CO₂ 方式进入大气圈中。

(4) 飞行器实地测量法。该方法用于火山喷气孔气体通量的测量, 所使用的仪器为 LI-COR 非分散 CO₂ 分析仪, CO₂ 浓度测量范围为 0~2000×10⁻⁶ (详见产品说明书)。

(5) 遥感技术。其核心是利用相关遥感数据生成的大气 CH₄ 与 CO₂ 柱浓度产品反演计算近地表大气 CH₄ 与 CO₂ 浓度, 通过历史数据对比, 探讨不同时期的相关地质作用对于大气碳收支的影响, 例如页岩气等油气资源开发前后对温室气体渗漏的影响, 地震前后近地表 CO 释放强度变化等 (Cui et al., 2013; Sun et al., 2020a)。

(6) 通量塔法。该方法又称涡度协方差测量法 (Eddy Covariance), 是利用气体涡度的协方差来计算垂直方向上气体交换量, 因野外测量设备形似塔状, 故称通量塔法。通量塔法可以实现实时、连续



引自张茂亮等(2011)

图2 红外线数字皂膜流量计化学方法示意图

Fig.2 Sketch diagram of chemical measurement using infrared digital soap film flowmeter

全自动测量, 在农田、森林、湿地生态系统的 CO₂ 释放通量测量中应用较为广泛。近年来, 随着传感器和计算机技术的发展, 已实现多传感器 (如 CO₂, CH₄, SO₂ 等) 同步在线监测, 并应用到地质源温室气体释放量的测量中, 如火山地热区 (Werner et al., 2000; Anderson and Farrar, 2001; Lewicki et al., 2017)。但需要注意该项技术对工作环境的要求比较苛刻, 需要测量区域下垫面尽量平坦, 局地空气的温度、湿度、风力等气象条件相对稳定, 因此用于地质源温室气体测量时存在较大的不确定性。

(7) 海洋底水原位探测技术。主要测量海水及海底沉积物孔隙水中 CH₄ 浓度。可采用 Franatech METS 灵敏性甲烷传感器与 SBE917plus CTD 联用, 通过 CET 系统对 METS 进行供电和数据采集, 对调查站位自近海海底到海表面海水溶解 CH₄ 含量进行探测。通过对海底沉积物-水界面垂直剖面上不同位置 CH₄ 进行原位测量, 获得微观尺度内海底边界层 CH₄ 的浓度梯度, 进而估算扩散界面 CH₄ 的释放通量。假定海底沉积物 CH₄ 释放扩散处于恒定状态, 根据 Fick 第一定律:

$$F = D \frac{dc}{dz} \quad (4)$$

式中 F 为 CH_4 通量 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); D 为一定盐度和温度下海水中 CH_4 的扩散系数; dc/dz 为 CH_4 的浓度梯度 [dc (mmol/m^3) dz (m)]。

3.2 样品采集和采样工具

由于气体的扩散性和挥发性,以及无定型性和各种气体容易相互混合等特点,地球系统的气体不仅分布极为广泛,可以说无处不在,而且能够在地球各圈层之间穿梭运移,实为无孔不入。因此,包括地质源温室气体的样品采集看似简单,实际操作却很不容易,各种技术问题经常出现。对于地质源温室气体来讲,如何保证所采集的气体样品不受其他气体的污染,即保真性取样至关重要,需要采用合适的采样工具和样品容器、严格的操作程序和采集步骤、针对测试仪器进样系统而选用特定的转换接口等等,每个步骤都需要预先规划、精细操作,才能确保样品真实、数据可靠。

样品采集(物质基础)中,需要针对性地采集相关各类地质体的岩石、沉积物、气体及水体样品,用于测试分析。在火山地热区应该采集岩样和气/水样,在断裂带采集气/水样,在蛇绿岩带采集岩样和气/水样,在沉积盆地采集岩石和气/水样,在海底采集沉积物样和气/水样等。需要特别注意的是,气样采集与测试过程,一方面必须注意样品丢失问题,同时还要杜绝空气混染的影响。现场在线检测时,需要注意切实收集到目标气体,以及输气管线和检测仪器回路的密闭连接。气体样品的采集需要根据气体释放强度和采样现场的实际情况而定,通常采用排水法和漏斗集气法两种方法收集气体。对于冒泡频率较高的喷口,直接采用排水法在喷口液面以下收集气体;而对于气体释放强度较低或是冒泡点不容易靠近的喷口,需要采用漏斗集气法收集气体。采样过程中应做好详细记录,准确注明样品编码、采样者、日期、时间及地点等信息。

常见的气体采集装置包括不锈钢瓶、气体采样袋(铝箔袋)、不同材质的玻璃瓶、铜管等(图3)。不锈钢瓶的优势在于耐高温高压、抗腐蚀和不易燃爆,在气体样品采集和运输过程中稳定性最好,但其体积较大携带不便,可以采用体积小、重量轻、便于携带的高压铝合金双阀采样容器。气体采样袋最大的优点就是方便快捷,便于携带,操作简单,并可重复多次使用。常见的气袋有铝箔复合膜气体采样袋、聚酯(polyester)气体采样袋、PVF气体采样袋、含氟气体采样袋等。含铅玻璃瓶密闭性好,可有效防止 He 交换,适合各种温度温泉的采样,但价

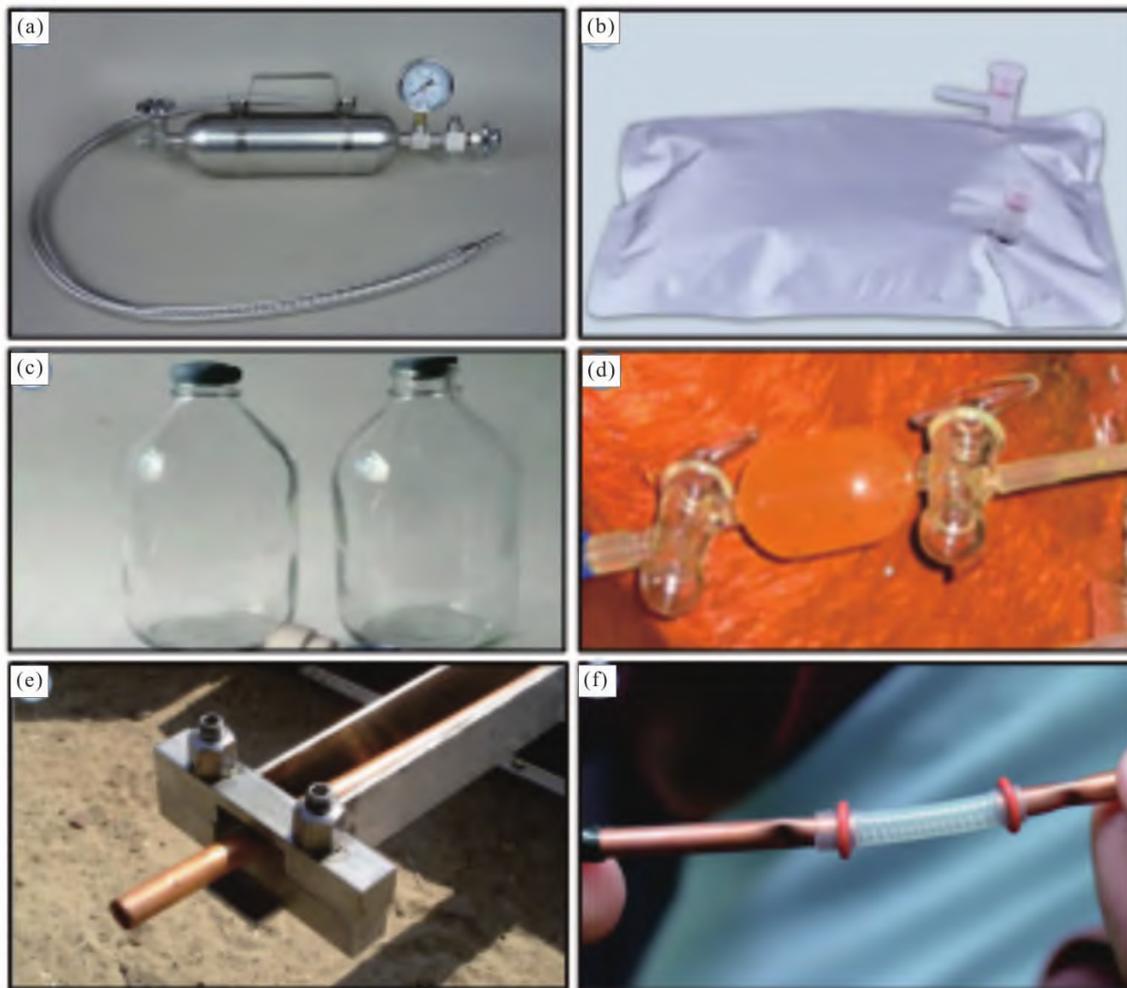
格比较昂贵,样品采集时,对排气时间需要严格的控制,排气时间足够长,确保导气管中的空气完全被排尽。无氧铜管适合于冷泉、常温温泉样品的采集,铜管在封口时两端要保留足够的空管长度,以便分析样品时与测试仪器进行连接。在样品采集过程中,要注意减压器、阀和导管都有一定的死体积,使用简单清洗操作无法有效清洗干净,从而残留气体和痕量湿气在死体积中停留并缓慢扩散进入被输送的气体中,对样品造成污染。可以采用反复增减压的清洗方法提升洗气效果。

样品的运输和保存,需要注意样品容器的安全性。对于不稳定组分,尤其是氧化还原敏感性气体的变化问题,例如 H_2S 、 CO 、 H_2 等,特别容易被氧化而转换成其他气体,尤其是在有氧和有水容器空间内,氧化分解速度很快。长距离样品运输和长时间存放,都需要严格的保存条件,尽可能避免样品丢失和被污染以及转化。在高原雪山冻土分布区采集流体样品需要注意样品容器的保温问题,尤其是有水存在的情况下,玻璃器皿很容易冻裂,另外,由高原低气压运送气体样品到低海拔地区的时候,由于外围气压增高会导致样品容器内出现负压,样品的保存和转移时需要特别注意,避免相对高压的空气混入。

国际海洋调查等使用的海水地球化学勘探技术目前已经向着原位快速测试的方式方法发展。海底沉积物表层样品、沉积柱样和水柱样的采集多数都采用密闭加压技术装备以确保所采集样品不会因压力降低而改变其原始特征。沉积物水样中气体的收集可以通过减压增温等方式进行,并使用高精度分析检测仪器进行微量气体化学组成和同位素组成、沉积物烃类化合物及生物标志物等多个项目的测试鉴定,相关技术方法已经在海底天然气水合物分布区的探测方面得到实际应用(Di et al., 2014; Mau et al., 2020)。

3.3 实验室测试方法

随着分析测试技术和测试仪器的不断涌现和创新改进,几乎所有种类气体的化学成分和同位素组成目前都可以进行相对准确的测试分析,基本上可以满足包括温室气体在内的地球脱气调查研究的样品测试需求。通过对各地质体采集的水/气样进行地球化学和同位素组成的测试,结合岩石样品或近海沉积物岩石学、元素及同位素地球化学测试结果与多元混合定量计算模型等方法,探讨不同地质体释放温室气体的成因、演化及规模已经得到很好的发展。所用仪器包括:电子探针(EMPA)、多接



(a) 双阀钢瓶: 适合于高压气体收集; (b) 铝箔袋: 适合于空气和低压气样品采集, 需要加压取样并及时进行测试分析; (c) 盐水瓶: 可用于排水法气体样品的采集, 但气体可溶性需要考虑; (d) 含铅双耳瓶: 适用于低压气体样品采集, 有利于氦气、氢气等小分子气体的保存; (e) 铜管: 适用高低压和高温样品采集, 但不适合硫化氢气体; (f) 铜管+硅橡胶管: 便于平行样品采集

图3 常见的气体采样容器和装置

Fig.3 Some typical sampling containers and instruments for collecting gas samples

收-电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)、3080E3型X射线荧光光谱仪(XRF)、MAT 271质谱仪、Delta Plus XP质谱仪、Agilent Macro 3000气相色谱仪、Dionex ICS-900型离子色谱仪以及 Noblesse 稀有气体质谱仪等。实际的仪器测试条件和操作过程需要认真记录,并在调查报告和研究论文中尽可能陈述清楚,以保证测试分析数据的可对比性。

在气体样品测试数据的分析方面,应该注意定量与定性的辩证关系,避免定量数据的无限扩大化。尤其是小量甚至微量气体,由于总量很小,气体含量很少,例如氢气,但其分布广泛,单位体积样品的气体含量可能很低,但其释放规模可以很大。这种情况下,测试数据的准确性和计算过程有效数字的选择需要倍加关注。地质源温室气体的类型与释放强度与沉积、构造等地质背景条件密切相

关,因此需要对区域地质背景进行全面了解和把握,进而对相关问题做出科学合理的解释。

4 中国地质源温室气体调查与研究现状

欧美日等国以及我国台湾的地质源温室气体释放研究起步早,已有连续多年的观测积累,获取了大量的高质量观测数据,在此基础上取得了很高水平的研究成果。相比之下,我国大陆地质源温室气体释放的调查研究工作基本上处于起步阶段,仅对个别类型的地质源温室气体进行过一些实地考察和初步研究,例如长白山、腾冲、羊八井等火山地热区CO₂释放通量的原位测量、塔里木盆地雅克拉凝析气田和大宛齐油田CH₄渗漏实地检测、准噶尔盆地南缘泥火山系统油气水岩相互作用及其甲烷气体释放、汶川地震断裂带和首都圈地震断裂带体

系等温室气体释放量的估算等。

4.1 火山-地热区

我国新生代火山-地热区分布广、面积大、火山成因类型丰富、所处的构造背景复杂多样,为开展火山地热区温室气体释放的观测研究提供了有利场所(Becker et al., 2008; 郭正府等, 2010, 2014)。初步的研究结果显示,目前我国新生代火山地热区向大气圈释放温室气体的规模是巨大而且不可以被忽视的;同时,处于不同构造域的火山地热区在水热活动特征、温室气体释放通量以及成因机制存在明显差异(表1)。

青藏高原南部和腾冲火山-地热带位于特提斯构造域,主要受印度与欧亚大陆板块碰撞、俯冲的控制,以高温地热为主,深源温室气体的释放类型主要包括温泉和土壤微渗漏(郭正府等, 2014, 2015)。腾冲火山区每年通过土壤微渗漏、温泉等形式向大气圈释放 CO_2 气体约为 4.5 Mt(成智慧等, 2012; Zhang et al., 2016)。腾冲地区湿季和干季温室气体平均释放通量存在差别,分别为 280 和 $875 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (成智慧等, 2014; Zhang et al., 2016),显示土壤渗透性及含水率对火山区深源温室气体释放有显著影响。青藏高原南部拉萨地块位于印度大陆俯冲的前缘,水热活动剧烈,其内部南北向谷露-亚东裂谷温室气体释放的系统研究表明,该裂谷内部地热区土壤气体释放通量为 $7 \sim 437 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,向大气圈释放 CO_2 的总通量为每年 15 Mt(Zhang et al., 2017; 张丽红等, 2017)。此外,拉萨地块内还存在多条南北向裂谷以及大量分布在其中的温泉地热区,这些地区迄今都未开展过系统的地质源温室气体释放的调查研究(Zhang et al., 2017)。

我国东北地区新生代火山活动主要受太平洋构造域的控制,为西太平洋板块向欧亚板块俯冲的产物,以中低温地热为主(郭正府等, 2014, 2015; 赵

文斌等, 2018; 2021), CO_2 气体释放通量相对较低(表1)。长白山火山区的温室气体释放类型主要为土壤微渗漏和温泉。其中,湖滨温泉、聚龙温泉、锦江温泉等每年通过逸出气形式释放 CO_2 气体约 6.9 万 t(张茂亮等, 2011); 天池火山锥体高海拔地区植被较稀疏, CO_2 释放通量较接近,约为 $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (Zhang et al., 2015),结合其土壤微渗漏面积(110 km^2),火山锥体每年释放 CO_2 气体约 78 万 t(郭正府等, 2014)。而长白山天池复合成因火山锥体外围的土壤 CO_2 平均释放通量为 $41.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,要显著高于周边熔岩台地单成因火山区的平均释放通量($9.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, Sun et al., 2018)。五大连池火山区距今最近的一次喷发在约 300 年前(公元 1719—1721 年),与长白山火山区的显著不同之处在于,该火山区内无明显的温泉水热活动,而分布有多处水温常年低于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷泉(Xu et al., 2013),区内老黑山火山东南坡土壤微渗漏 CO_2 气体释放通量约 $11.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,全区平均释放通量为 $18.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (Zhao et al., 2019),初步估算,五大连池火山区通过土壤微渗漏的方式向大气圈释放 CO_2 的总通量约为每年 1.2 Mt(表1)(赵文斌等, 2021)。

火山碳观测结果表明,目前中国大陆新生代典型火山-地热区向大气圈输送的 CO_2 气体总通量大约为 21.5 Mt/a(特提斯构造域的火山地热区贡献了其中的 90% 以上),释放总量相当于全球火山活动导致的温室气体(以 CO_2 为主)释放总量的 4% 左右(540 Mt/a , Burton et al., 2013)。上述部分研究结果被全球深部碳观测计划(deep carbon observatory, DCO)纳入“十年进展”专著(Orcutt et al., 2019),这是中国大陆火山地热区温室气体释放通量被国际相关组织采纳的唯一数据。

由上可知,特提斯构造域新生代火山-地热区

表 1 我国新生代火山-地热区温室气体(CO_2)释放规模

Table 1 Emission flux ranges of greenhouse gas (CO_2) from some Cenozoic volcanican and geothermal regions in China

编号	火山-地热区	土壤微渗漏/(t/a)	温泉/(t/a)	合计/(t/a)	构造背景
1	腾冲	4 430 000	53 000	4 480 000	特提斯构造域
2	谷露-亚东	15 000 000	—	15 000 000	
3	搭格架	—	268	268	
4	朗久	—	170	170	
5	长白山	780 000	69 000	849 000	太平洋构造域
6	五大连池	1 200 000	—	1 200 000	
合计		21 410 000	122 438	$\sim 2.15 \times 10^7$	

注: “—”表示无数据。数据来源: 张茂亮等(2011); 成智慧等(2012, 2014); 郭正府等(2014, 2015); Zhang等(2015, 2016, 2017); 赵文斌等(2018, 2021); Sun等(2018)。

温室气体释放通量明显高于太平洋构造域(郭正府等, 2014, 2015; 赵文斌等, 2018)。休眠期火山区温室气体释放通量、规模与区内岩浆房的活动性、温泉水热活动的规模、土壤微渗漏面积及断裂发育等多种因素相关(郭正府等, 2014, 2015), 此外, 俯冲带火山地热区温室气体释放还与俯冲板块及其上覆板块的岩石组合、俯冲带活动性等因素密切相关(Mason et al., 2017)。

气体地球化学对比研究显示, 处于太平洋构造域的长白山与五大连池火山区释放的气体以幔源为主, 即具有较高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra) 比值、与幔源岩浆气体一致的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值等(Xu et al., 2013; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2019); 位于特提斯构造域的腾冲火山区气体则具有较高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra) 比值和明显偏重的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (成智慧等, 2012, 2014; Zhang et al., 2016); 藏南火山-地热区温泉气体具有较低的地壳成因的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra) 比值, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值显示出陆壳碳酸盐的明显贡献(Zhang et al., 2017)。

已有研究表明, 上覆板块含有碳酸盐岩的大陆弧火山活动温室气体释放规模明显大于岛弧火山活动的温室气体释放规模(Marziano et al., 2008; Mason et al., 2017)。意大利中南部火山区(如 Vesuvio、Etna 等) 陆壳碳酸盐混染作用在深源 CO_2 气体释放过程中起到关键作用(Chiodini et al., 1995; Frondini et al., 2008; Iacono-Marziano et al., 2009)。印度大陆俯冲板片与上覆欧亚大陆地壳含有大量的地壳碳酸盐岩, 受俯冲再循环物质交代形成的地幔楔部分熔融产生“富碳”熔体(Zhang et al., 2017) 在上升穿过陆壳的过程中与碳酸盐围岩发生热和物质交换, 通过陆壳同化和矽卡岩化等方式向大气圈释放巨量 CO_2 气体。

长白山、五大连池火山区距西太平洋俯冲带超过 1000 km, 而且火山气体来源可能较深(如地幔过渡带)(Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2019; 赵文斌等, 2021) 地表水热活动强度明显弱于特提斯构造域的腾冲火山区与藏南地热区, 反映出不同构造背景下深部碳循环的成因差异(郭正府等, 2014, 2015; Zhang et al., 2016, 2017)。与岛弧火山释放气体相对比, 五大连池、辽东半岛等地区的稀有气体氦同位素比值与载气 CO_2 的碳同位素组成计算结果显示, CO_2 偏少, 很可能与地球深部气体向上运移和释放过程中, 由于水岩相互作用发生碳酸盐矿物沉淀有关, 同时还会产生相应的碳同位素分馏效应(Xu et al., 2013, 2014)。

我国大陆火山地热区温室气体观测研究起步较晚, 直到 20 世纪 90 年代末才首次见有青藏高原羊八井地热区 CO_2 释放通量的报道(50000 t/a)(Chiodini et al., 1998)。而我国大陆新生代火山区目前大多处于休眠期, 这些火山-地热区由于深部上涌岩浆对围岩的持续加热烘烤, 容易形成高温干热岩系统, 在地表通过喷气孔、热泉、土壤微渗漏等形式向大气圈释放巨量温室气体(郭正府等, 2010, 2014) 在开发地热资源的同时也亟需开展针对温室气体释放特征的专门调查研究。

4.2 地震断裂带

深大活动断裂带是地球内部物质和能量交换的主要地带(Kennedy et al., 1997), 因其贯通了地球深部系统(岩石圈)和地表系统(土壤圈-生物圈-水圈-大气圈)(Chiodini et al., 2004, 2020; 陈志等, 2014; Chen et al., 2020; Zhou et al., 2016), 而成为地球强烈脱气的重要通道之一(Gold, 1979; 陶明信等, 2005; Zheng et al., 2013; Capaccioni et al., 2015; Chen et al., 2018), 释放规模巨大的温室气体, 对全球气候和环境带来重要影响(杜乐天, 2005; Zhou et al., 2016; 崔月菊等, 2016a, 2016b)。目前, 活动断裂带温室气体释放问题已得到国际同行的极大关注, 以美国为代表的活动断裂带温室气体释放的专门调查和科学研究成果已逐渐涌现(Gambardella et al., 2004; Allard, 2010; Lewicki et al., 2013; Capaccioni et al., 2015; Tamburello et al., 2018)。在美国圣安德烈斯断裂、日本 Yamasaki 断裂、意大利 Pernicana 断裂、中国福州断裂和呼和浩特新华广场断裂上方均观测到明显的土壤地球化学异常(CO_2 、Rn、Hg、He、 H_2 和 CH_4 等)(Wakita et al., 1980; Giammanco et al., 1998; 周晓成等, 2007; 郑国东等, 2018)。实地调查发现, 在美国圣安德列斯断裂带和犹他州 Paradox 盆地北部断裂带 CO_2 的释放通量分别为每年 6.6 亿 mol(2.9×10^4 t)(Kulongoski et al., 2013) 和 $36\,259 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (Jung et al., 2015)。北京西部盆岭地区断裂带 CO 从土壤向大气的扩散量至少为每年 0.76 万 t, CO_2 扩散量约为每年 1.2 万 t(Sun et al., 2017)。在美国爱达荷州东南部, Sevier 逆冲断裂带内的温泉群逸出 CO_2 的通量达每天 350t, 与一些休眠火山的释放量相当(Lewicki et al., 2013)。初步调查认为, 汶川 $M_s 8.0$ 地震后, 地震破裂带 CO_2 的年释放总量为 0.95 Mt(周晓成等, 2017), 其规模接近腾冲、谷露-亚东、搭格架、朗久、长白山和五大连池等中国 6 个

新生代火山-地热区 CO₂ 气体的年释放总量(20 Mt)的十分之一(Sun et al., 2018; 郭正府等, 2017; 赵文斌等, 2018)。活动断裂带的破坏作用还是导致含油气盆地油气藏中甲烷等温室气体向大气强烈释放的重要原因之一(Zheng et al., 2013; Chen et al., 2018) 而且活动断裂带也是导致火山区 CO₂ 强烈脱气的重要因素(Sun et al., 2018, 2020b)。

众多观测表明,活动断裂带的地震活动通常会造成长断裂带脱气及其地球化学特征的明显变化(King et al., 1996; Italiano et al., 2009; Chen et al., 2015)。2012年意大利艾米利亚-罗马涅地震群发生前后,意大利梅多拉地区活动断裂带土壤气 CO₂、CH₄ 和 H₂ 浓度出现大幅上升(Sciarra et al., 2017)。随区域地震活动强度的增大,唐山断裂带土壤气 CO₂、Rn 和 He 浓度明显上升(Han et al., 2014; Chen et al., 2019b)。2010年1月至2012年8月在全球发生的35次 $M_s \geq 7.0$ 的地震中的12次地震的震中地区出现震前 CO 或 O₃ 浓度异常升高的现象(Cui et al., 2013, 2017)。2010年4月4日墨西哥下加利福尼亚 $M_w 7.2$ 地震前约一个月,CO 升高总量高出前两年同期平均值 $2 \times 10^{17} \sim 4 \times 10^{17}$ mol/cm² 约为非地震时段的2倍(崔月菊等, 2016a)。2008年5月12日的汶川地震导致短时间内龙门山断裂带向大气中至少多排放了4740 t 的 CO、8549 t 的 CH₄ 和 8715 Mt 的 CO₂(崔月菊等, 2017),目前,汶川地表破裂带土壤气 CO 的释放通量(0.2~25.4 mg·m⁻²·d⁻¹) 仍明显高于背景值(5.2 mg·m⁻²·d⁻¹),表明汶川地震后破裂区带仍持续在向大气释放温室气体(Sun et al., 2020a) 某些断层泥对断层气也有一定的吸附作用(Ma et al., 2015)。

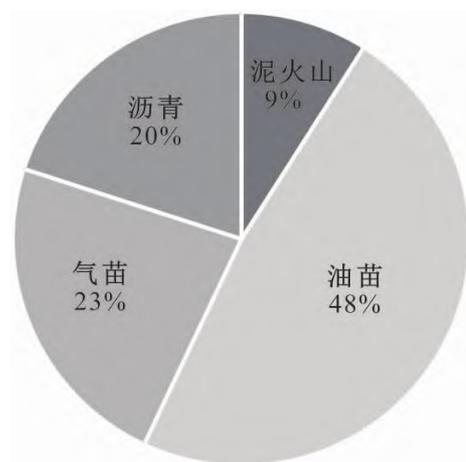
现有调查研究成果充分展示了活动断裂带温室气体释放的巨大规模,其对大气圈温室气体的贡献不可忽视。尤其是在陆地面积巨大、强震活跃的中国大陆(Zhou et al., 2017) 地球深部含碳气体通过数量庞大的深大断裂带向大气圈释放更需重点关注。

4.3 沉积盆地

石油和天然气生成后就在不断地运移,并在地下适当部位聚集形成油气藏,甚至运移至地表,逸散到大气中,构成复杂的油气逸散渗漏系统(Zheng et al., 2018)。世界上大多数含油气盆地都存在各种形式、不同规模的烃类逸散和渗漏现象,主要包括宏渗漏(油苗、气苗、泥火山、沥青等)和微渗漏(肉眼不可见的烃类释放)两大类。一方面,这些烃

类溢散和渗漏可以作为找油找气的直接标志(Milkov 2005),在油气勘探和资源评价中曾经发挥过重要作用。例如,我国玉门油田和克拉玛依油田就是根据自然存在的油苗而逐渐被发现的。另一方面,油气逸散和渗漏不仅导致能源资源的极大浪费,油气逸散向大气层释放的 CH₄、C₂H₆、CO₂ 等气体,都是重要的地质源温室气体,尤其是沉积盆地的 CH₄,成为湿地之外的第二大自然源(Ciais et al., 2013)。油气逸散系统释放的 C₂H₆、C₃H₈ 等还可以引发大气光化学污染和产生臭氧,如果释放气体中含有大量的 H₂S,甚至可以导致人畜死亡(朱光有等, 2004; 刘文汇等, 2010)。

中国陆地和近海沉积盆地广泛发育,迄今已在三百多个盆地内找到石油和天然气。相关调查研究发现,我国几乎所有的含油气盆地都存在不同程度的油气渗漏现象,尤其是各种各样的油气苗,分布广泛,为寻找地下油气藏提供了直接证据,在早期的石油地质研究和勘探实践中发挥了重要作用。Zheng 等(2018)综合相关资料提出了中国含油气盆地油气渗漏现状图(图4),并结合区域大地构造背景、盆地结构和发展演化,以及烃源岩类型、成熟度等资料,讨论了油气渗漏与活动构造以及盆地含油气系统之间的密切关系,结果显示:中国20个主要含油气盆地共发育932处油气渗漏点或渗漏带(710处陆上油气渗漏点和222处近海油气渗漏点位),包括81座泥火山、449处油苗、215处气苗、187处固体沥青露头。其分布也具有典型的区域性特点,我国西部地区的准噶尔盆地、柴达木盆地、民和盆地等油苗分布众多,而天然气苗则集中分布在伦坡



引自 Zheng 等(2018)

图4 中国油气苗类型划分及其相对比重图

Fig.4 Relative proportions of the several types of oil and gas seepages in China

拉盆地东部以及南方一些中小规模的含油气盆地中,与油气相关的泥火山主要在准噶尔盆地、柴达木盆地、羌塘盆地、台西南盆地等发育。这些盆地多数都经历了快速沉降,导致沉积物重力异常,为油气水等地质流体的上移扩散创造了有利条件。另外,各种油气渗漏点位的分布也明显地受到局部构造条件(Zheng et al., 2018; 王国建等, 2018),尤其是背斜构造和活断层的控制,渗漏油气类型则受盆地烃源岩类型、成熟度的明显影响。

针对沉积盆地 CH_4 等温室气体释放的调查研究始于独山子泥火山。在石油地质界,“独山子”的知名度很高,其地名来源于境内的独山,在维吾尔语和哈萨克语中,独山子为“玛依塔克”和“玛依套”意思是“油山”。所谓的“独山”是指位于北天山前缘以北、准噶尔盆地南缘突出地表而且存在油气苗的孤立山丘,南北长约 7 km,东西宽约 6 km,最高峰海拔 1283 m,孤立的突兀于倾斜平原之上,西隔奎屯河与乌苏县的海烈非山相望。早在清光绪二十三年(公元 1897 年)该地就开始了石油开采。民国二十五年(公元 1936 年),从苏联引进技术装备,钻探发现了独山子油田,并在独山子(山)北坡形成石油工人聚居的矿区,即独山子矿区,现在的行政区划为克拉玛依市独山子区,因为远离克拉玛依市主城区,实属“飞地”。独山子实际上是北天山前缘一系列挤压背斜构造成山的,该背斜被命名为“独山子背斜”,周边发育的油气宏渗漏被称作“独山子泥火山”,目前主要有两处规模较大、活动较强的泥火山喷口。在独山子山北坡废弃的第一口钻井及其周围有很多油气渗出地表,人工挖坑积水后可见明显的气泡和油花,周边植被稀少而且种类单调。

独山子泥火山和油气田的石油地质研究历史悠久(Chen et al., 2021),成果也很丰富,独山子泥火山常被作为石油地质的教学案例、青年石油地质学工作者开始新工作的参观场所,甚至是青年学生夏令营或革命传统教育的基地。但作为地质源温室气体释放地质体的调查研究历史短暂。针对新疆泥火山源温室气体释放规模,初始的调查(Dai et al., 2012; 高苑等, 2012)主要是通过对气泡大小和冒泡频率的观察,对独山子泥火山喷口气体的宏观通量做了粗略估算。近些年,采纳国际上通行的密闭箱法实验性地进行了相对精确的原位测量,初步结果显示,独山子泥火山通过微渗漏每年向大气排放约 16.6 t 的甲烷温室气体(马向贤等, 2014)。2014 年,采用皂膜流量计对独山子泥火山各喷口的

宏渗漏进行了原位测量,并扩大了泥火山周围微渗漏的测量面积,调查结果显示,这些泥火山宏渗漏释放通量远比通过数气泡估算获得的数值高,而且随着实测面积的扩展,微渗漏释放规模巨大,所占泥火山系统气体释放的比重也明显增加(Zheng et al., 2017)。然而,根据独山子泥火山发育区基(围)岩蚀变现象的分布范围,目前所测面积还十分局限,需要进一步扩大测量面积和提升检测频率,以获取更为准确的泥火山温室气体释放通量基础数据。

地球化学指标显示,这些逸出气体主要为热成因的煤型气(Dai et al., 2012; Chen et al., 2021)。微生物调查发现,这些泥火山环境的微生物菌群既典型特殊又丰富多彩(Huang et al., 2016; Ren et al., 2018; Ma et al., 2021; 马小龙等, 2009)。准噶尔盆地南缘地处内陆地区,干旱少雨,蒸发量高,而盆地之南为高耸的北天山,常年积雪为这些泥火山提供了丰富的水源,泥火山溢出的泥浆水主要为大气降水来源(Nakada et al., 2011; Li et al., 2014)。准噶尔盆地南缘中新世地层以陆相沉积的红层为主,其中发育的泥火山和油气微渗漏导致显著的岩石去红色漂白现象,尤其是独山子背斜核部出露到地表的红层蚀变现象非常典型(Schumacher, 1996; Zheng et al., 2010; Xu et al., 2018)。这种类型的油气蚀变现象可以作为遥感技术寻找油气资源的典型地物标志(Fu et al., 2007)。由于压力作用,甲烷等气体和水在运移和喷出过程中,将流体输导格架的细粒黏土,甚至围岩碎屑带出地表,成为泥浆的主要成分。独山子泥火山喷出泥浆的孢粉主要来自中新世晚期沉积的塔西河组和独山子组地层(Ji et al., 2018)。这些地质地理背景使得新疆泥火山系统的研究极具特色。

除了独山子泥火山外,准噶尔盆地南缘还分布有安集海、艾奇沟、白杨沟等泥火山群,以及第四纪曾经活动过的泥火山(称为古泥火山),具有典型的岩石蚀变现象。准噶尔盆地南部地区还存在与地下深部油气藏密切相关的油气微渗漏温室气体的释放。Chen 等(2019a)通过野外观测,给出了北天山前缘四排褶皱-断裂带泥火山群 CH_4 和 CO_2 的释放情况:北天山褶皱-断裂带泥火山群 CO_2 和 CH_4 的年释放总量分别为 147.83 t 和 611.26 t,与国际上其他大型泥火山群 CO_2 和 CH_4 的释放规模相近。北天山前缘四排褶皱-断裂带泥火山区 CH_4 释放特征与 CO_2 不同, CH_4 的高通量释放点呈线状分布,

其走向与北天山地区主要活动断裂带走向一致,而CO₂高通量释放点则呈面状分布。气体地球化学和同位素地球化学综合分析揭示,泥火山区释放的CH₄为深部油气藏热降解烃源气,而CO₂则为泥火山口喷发泥浆中有机质的微生物降解以及碳酸盐沉积物的分解所致。另外,四排褶皱-断裂带泥火山群CH₄和CO₂的释放强度随构造破坏程度由南向北减弱而降低。这些研究成果揭示,北天山四排褶皱-断裂带的活动断裂已经破坏深部地层,释放地层中赋存的有机质,是北天山泥火山形成及温室气体释放的主要控制因素。

采用静态箱法对新疆塔里木盆地不同类型的油气田(雅克拉凝析气田和大宛齐油田)进行微渗漏CH₄释放通量调查研究(唐俊红等,2006,2009; Tang et al., 2010, 2013)结果显示,不同类型油气藏由于地质构造、油气藏控制因素等不同,微渗漏CH₄通量具有明显的差异。大宛齐油田埋藏浅、断层发育、封盖条件较差,其CH₄渗漏因子处于较高的渗漏等级,夏季CH₄平均通量(13.87 mg·m⁻²·d⁻¹)远高于深层雅克拉凝析气田(1.96 mg·m⁻²·d⁻¹)。结合大宛齐油田油气勘探资料和剖面监测结果,对比地表CH₄通量和地下土壤气CH₄浓度发现,CH₄异常高值多分布在断层附近,并呈现沿构造带展开的趋势,由此推断断层为控制CH₄等烃类气体微渗漏的主要因素。新疆四大含油气盆地边缘区域和盆地内部相比较,构造背景更为复杂,气体释放特征也有明显区别,包括释放强度和稀有气体地球化学特征等方面(Xu et al., 2017)。

大宛齐油田微渗漏CH₄存在明显的季节性变化,夏季76.8%采样点表现为正通量,冬季由于积雪和冻土(>60 cm)产生了屏蔽效应,阻碍了CH₄微渗漏,81.4%采样点表现为负通量,CH₄平均通量为-0.24 mg·m⁻²·d⁻¹。根据CH₄渗漏因子方法建立浅层油气藏CH₄释放通量预测方程和评估模型,由此估算大宛齐油田微渗漏CH₄通量为112.2 t/a,雅克拉凝析气田微渗漏CH₄通量在10² t/a数量级范围(Tang et al., 2017, 2019)。

与国际上已经公开发表的全球陆上油气渗漏数据相比,中国可能是全世界拥有油气苗最多的国家(Zheng et al., 2018)。如此众多的油气渗漏也预示着,我国广泛发育的含油气盆地很有可能向大气释放数量可观的CH₄、C₂H₆、CO₂等温室气体,面对全球变化和大气碳收支问题,急需对我国含油气盆地的油气苗开展专门的系统调查和科学研究,特别

是油气渗漏的现场实地测量工作。

基于油气苗及其分布特征的地表地球化学找油找气的基本原理,就是地下石油天然气可以通过流体输导格架释放到地表,一方面天然的油气苗是地下油气藏存在的直接证据,也即常见的油气苗,另一方面,由于复杂的有机-无机相互作用可以形成特殊的地表土壤或岩石的矿物蚀变,甚至可以形成与基岩矿物组成有明显区别的蚀变矿物(Zheng et al., 2010),并且可以导致地物波谱的明显变化(Fu et al., 2007)等,成为寻找地下油气藏的直接或间接的地球化学标志。准噶尔盆地南缘的多个泥火山群都分布在一系列的背斜构造之上,尤其是独山子泥火山,直接反映了一个被第四纪新构造运动和后期风化作用破坏了的背斜油气藏。该泥火山出现在独山子背斜的核部,并被多组断层和裂隙所切割。横穿背斜的地震剖面显示,独山子背斜核部的多条断层向下穿透新近系和白垩系地层,复杂的断层裂隙系统不仅成为油气运移的通道,而且在适宜部位成为油气聚集成藏的有利场所(可形成油气藏)。伴随后来的新构造运动,部分油气藏被破坏,导致“油-气-水”地质流体沿断裂带继续向上运移,甚至逸散到地面,形成泥火山,并对流体输导格架的固体岩石产生蚀变作用。由于独山子背斜的隆起和地表剥蚀,现今地表出露的蚀变岩石可以与未受蚀变的同层岩石进行追索和对比,因此成为探讨地下油气储层地质学和地球化学特征,特别是储层物性特征及其变化的良好天然试验场。泥火山及其微渗漏系统的油-气-水-岩相互作用对甲烷等烃类物质进行改造,使得部分甲烷等烃类化合物被氧化成为CO₂,在水中转化为HCO₃²⁻,遇到铁锰钙等金属阳离子后容易形成次生碳酸盐矿物沉淀,从而产生一定的“固碳作用”,并对运移的烃类物质产生改造,甚至导致油气储层的物性发生变化(Xu et al., 2018, 2020)。

4.4 近海海域温室气体释放

近海海域是海洋温室气体释放的主要场所,CH₄、CO、NO、CO₂等气体主要来自海底沉积有机质的生物降解和海底深部沉积有机质以及油气的热裂解(Etiope et al., 2013)。中国南海北部和莺歌海海域存在显著的海底沉积物甲烷微渗漏和海底油气区甲烷宏渗漏现象。中国南海北部广泛分布的红树林、海草床、盐沼等是海洋温室气体的重要来源。通过解剖近海沉积物沉积-成岩过程中各种温室气体的生成、产出和扩散作用及其伴随的生物地球化学作用特征,估算近海沉积物以及伴生的生态

系统释放温室气体的组成、通量,判断其成因来源,探讨近海海洋环境条件下各种沉积体系温室气体的产出机制、扩散模型和释放规模。

现有研究结果显示,海洋释放的地质来源甲烷气大体为 $1\sim 100\text{ mg/m}^2$,所释放的甲烷通量占全球大气甲烷通量的 $2\%\sim 4\%$,但其时空变化巨大。而针对沿海植物生态系统 CH_4 通量的调查研究存在区域性差异,如 75% 以上的红树林 CH_4 通量数据点位于东半球,集中在东南亚和中国,海草床数据点集中在非洲和欧洲,几乎所有的 CH_4 通量研究都来自北半球。一般认为, CH_4 释放通量与海洋沉积有机质含量有关,沉积物中丰富的有机质可以为 CH_4 的形成提供更多的竞争性基质和/或非竞争性基质,从而减少硫酸盐还原剂和产甲烷菌之间的竞争。红树林海草床生态通常有更高的沉积物 OM 浓度。一般而言,当植物进行光合作用时会将不稳定的有机质(OM)沉积到其根部或者根际的沉积物中,从而提供了刺激 CH_4 产生的基质。在盐沼和红树林沉积物中, CH_4 产生速率与活性 OM 浓度之间正线性关系。但 OM 对 CH_4 排放的积极影响并不普遍,一些研究报告显示两者没有明显的关联性。

在开阔远洋区域,表层海水中的甲烷主要来源于海洋浮游生物和细菌新陈代谢活动,其浓度一般在 $1.81\sim 3.1\text{ nmol/L}$;在大陆架区域,海水中甲烷的浓度可达 $3.1\sim 5.0\text{ nmol/L}$;而河口和近海海域的表层海水甲烷浓度大多高于 5.0 nM/L 。近海虽然占海洋面积的比例较小,但其释放的甲烷气体占海洋释放量的比例却高达 75% 以上。因此,近海沉积物是研究海洋地质源温室气体释放的重要区域。我国近海地质源温室气体释放研究还比较零散,目前尚处于起步阶段。

4.5 可燃冰与煤自燃

甲烷天然气水合物(可燃冰)不仅是潜力巨大的清洁能源,水合物分解释放的 CH_4 、 CO_2 等也是不可忽视的温室气体,尤其是海底天然气水合物的突然释放有可能引发海洋环境,甚至全球环境的巨大变化。天然气水合物对温度和压力非常敏感,长期的气候变化可能会触发其分解,分解释放出的大量甲烷等温室气体又会导致大气温室效应的增强,而增温加剧又会促使更多的天然气水合物分解释放出更多的甲烷。这个递进循环一旦启动,就很难停下来的正反馈过程,被称为可燃冰喷射假说(clathrate gun hypothesis)(Kennett et al., 2003)。这一假说被用来解释晚第四纪(约 40 万年前至今)时期大气甲烷含量迅速增温的现象(Brook et al.,

1996)。我国南中国海北部神狐探区发现了丰富的海底天然气水合物(陈多福等, 2005),并且已经进行成功试采,海洋地球物理调查在多个区域发现似海底反射层(王家豪等, 2006),深海探测也观察到烃类气体释放的海底泥火山和麻坑(Di et al., 2014; 2020),该海域的海水柱状甲烷含量的变化也与其相关(Mau et al., 2020),但其释放强度和释放通量还没有进行有效的检测和系统调查,目前的主要工作仍处于确认是否存在天然气水合物及其能否进行开采与开发利用的调查研究阶段。

煤自燃,顾名思义,就是煤不经点燃而自行着火的自然现象。煤自燃的原因,主要是煤与空气接触发生氧化反应,一方面使煤的温度升高,同时又使煤的燃点降低,因而易于引起煤的自燃。此外,煤层由于地质构造变动或因采掘而破碎,以及通风不良等,也是引起自燃的因素。煤的自燃不但浪费宝贵的煤炭资源,严重影响煤矿生产和安全,而且还向大气释放二氧化碳等温室气体。煤的化学成分包括有机质和无机质,其有机质的构成元素主要有碳、氢、氧、氮和硫等,此外,还有极少量的磷、氟、氯和砷等元素。碳、氢、氧是煤炭有机质的主体,占 95% 以上。煤中的无机物质含量很少,主要有水分和矿物质,它们的存在降低了煤的质量和利用价值。矿物质是煤炭的主要杂质,如硫化物(硫化铁和黄铁矿)、硫酸盐、碳酸盐等,其中大部分属于有害成分。煤一旦燃烧就会释放 CO_2 、 NO_2 、 SO_2 等气体,这些气体都是温室气体;如果是不完全燃烧,就会产生 CO 等有害气体。我国新疆、内蒙古自治区、甘肃、青海、陕西、辽宁等省区都存在煤自燃现象。许多地区的煤系地层发生自燃后,不仅导致优质煤层自身燃烧而消耗殆尽,煤层围岩以及煤矸石也被烧烤变质,被称为烧变岩,例如天山北麓和准噶尔盆地西北地区广泛分布的煤自燃烧变岩(图 5),主要是侏罗系煤系地层自燃后形成的砖红色或者赭红色的烧变岩。煤层围岩,尤其是煤层上覆的粉砂岩和泥岩等原有的沉积有机质也会被烘烤烧掉,形成 CO_2 等温室气体而释放。煤田地质学和煤矿开采工程都注意到对煤自燃的基础研究,但是,这个过程释放温室气体的调查研究还不多见。

另外,碳卫星监测到北天山和准噶尔盆地空气柱碳浓度不仅出现高值,而且四季变化不明显,推测与这些地区广泛分布的泥火山系统释放甲烷和煤系地层煤自燃释放 CO_2 等地质过程密切相关,因为这些地区经济欠发达,人烟相对较稀少,人类活动碳排放规模和强度都不大,大气碳源应该以地质



(a) 新疆北天山硫磺沟烧变岩; (b) 烧变岩手标本; (c) 准噶尔盆地火烧山烧变岩

图5 煤自燃和烧变岩照片

Fig.5 Photos of coal-bearing rocks burned by the natural fire of coal

自然源为主, 与我国东南沿海地区的状况大不一样。

4.6 地球深部碳循环与温室气体

地质源温室气体调查研究主要侧重于以 CH_4 为主的烃类气体(也包括 C_2H_6 等)、 CO_2 和 CO 等。这些气体都是地球系统碳循环的重要组成部分, 并与地球系统碳循环研究密切相关, 地质源温室气体的调查研究离不开对于地球系统整体碳循环问题的全面认识, 也正因为如此, 由美国卡内基科学理事会发起的深部地球碳观察(DCO)得到众多专家学者的热烈响应、多方支持和积极参与(Marziano et al., 2008)。我国科学家自2009年开始, 就组织过多次的国际或国内以深部碳循环为主题的学术研讨会, 以实际行动积极响应和参与并支持相关的国际合作项目的组织和实施, 并在许多方面获得显著成绩(Mao et al., 2006; Li et al., 2018)。

由地表碳俯冲和火山脱气构成的深部碳循环对于理解地质源温室气体形成机理和类型以及释放通量的长期演化具有重要意义。高精度地震层析成像显示亚洲东部的地壳-地幔结构是由滞留在地幔过渡带(深达410~660 km)的西太平洋俯冲板片和顶部东亚大陆岩石圈, 以及夹于其间的楔状上地幔构成, 被称为“大地幔楔”。该大地幔楔的岩石圈华北部分曾是古老的巨厚岩石圈(200公里), 被称为“华北克拉通”。其东部自130 Ma以来被减薄, 最薄处仅有约70 km厚(李曙光和汪洋, 2018)。该大地幔楔结构是何时形成和华北克拉通东部岩石圈是如何减薄是科学家们长期关注的两个重要地球科学问题。但以往研究忽视了大地幔楔(主要由硅酸盐组成)被俯冲板片携带的碳酸盐改造对岩石圈减薄机制的影响。近年来, 我国科学家基于地表碳酸盐岩具有显著偏离地幔物质的Mg-Zn同位素组成特征以及中国东部中生代-新生代大陆玄武岩和环太平洋岛弧玄武岩的镁同位素研究, 揭示了

中国东部上地幔是一个巨大的再循环碳库(Yang et al., 2012; Liu et al., 2016, 2017; Li et al., 2017)。俯冲洋壳及其携带的沉积碳酸盐在大地幔楔底部发生熔融, 所产生的熔体向上渗滤交代对流上地幔, 形成了碳酸盐化的橄榄岩。碳酸化橄榄岩部分熔融产生的贫硅富碳酸盐熔体自下而上作用于华北东部岩石圈地幔, 可导致岩石圈底部橄榄岩碳酸盐化和部分熔融, 从而使其物理性质与岩石圈下面的软流圈类似并很容易被对流软流圈地幔所置换(Li and Wang, 2018)。因此, 华北克拉通岩石圈被减薄并使熔体自身由贫硅强碱性熔体向富硅弱碱性熔体转化(李曙光和汪洋, 2018)。后续的铁元素同位素研究结果进一步表明, 这些俯冲碳酸盐在深部地幔的还原封存及伴随的氧化性岩浆活动, 可驱动氧循环, 有利于促进现今地表氧化状态的形成和维持(He et al., 2019)。华北克拉通岩石圈地幔碳酸盐化交代所导致的岩石圈减薄过程很有可能为中国东部郯庐断裂带及其周边富二氧化碳气体的形成提供了物质基础和动力来源, 该地区一些温泉气体的稀有气体同位素组成也显示出复杂的以壳源为主, 也包含幔源物质加入的特征(Xu et al., 2012, 2013, 2014; 赵文斌等, 2021)。

毛光院士率领的研究团队利用静态超高温超高压模拟实验和在线检测技术, 确定了MgO-FeO-SiO₂系统在下地幔的温度压力条件下矿物的相关性, 观察到二价铁在高温下的歧化反应, 以及铁、镁的强烈分异现象, 首先提出了地核存在碳化三铁, 进而提出地球核幔过渡带铁-水体系释放氢和氧的概念模型(Mao et al., 2006)。相关研究还揭示, 固体地球是一个巨大的碳库, 地球系统超过98%的碳是在地球深部以多种形式存在, 例如碳化三铁、金刚石、石墨、碳酸盐岩等。另外, 多种化学组成的地球深部地质流体携带的大量 CO_2 、 CH_4 等气体为地表和海洋提供了丰富的碳源, 深部流体中的碳主要

来源于深部碳循环过程中俯冲带和深部地幔的释放(刘全有等 2019)。深部碳循环包括俯冲带沉积碳酸盐随洋壳俯冲进入地球内部的捕获过程和以 CO₂、碳氢化合物、碳酸盐熔体等形式随洋中脊、岛弧、地幔柱等构造带岩浆活动喷发至地表及大气的释放过程。深部碳循环与地表碳循环共同构成了地球的碳循环系统。深部流体携带的大量碳,一方面为海洋、陆地生物提供了生命活动所需的碳源,促进了海洋、陆地生物的繁盛和初级生产力的提高;另一方面,为无机成因 CO₂ 气藏的形成提供了重要的物质基础,成为地质源温室气体的重要来源。

4.7 CO₂ 地质封存与应用

面对大气 CO₂ 含量逐渐升高以及减少生产活动排放 CO₂ 的迫切需求,一些科学家和工程师提出通过多种途径封存 CO₂ 的概念(Holloway, 2005),并逐步得以付诸实施(Li and Liu, 2016; Li et al., 2013)。CO₂ 捕集、利用和封存(CCUS)是指将 CO₂ 从工业、能源利用过程或大气中分离出来,直接加以利用或者注入地层以实现 CO₂ 减排的工业过程。CCUS 是在 CO₂ 捕集与封存(CCS)的基础上增加了“利用(utilization)”,这一理念是随着 CCS 技术的发展,对 CCS 技术不断深化,在中美两国的大力倡导下形成的,目前已经获得了国际上的普遍认同。CCUS 按技术流程分为捕获、输送、利用与封存等环节(蔡博峰等,2021)。中国已经投运或建设中的 CCUS 示范项目约为 40 个,捕获能力每年 300 万 t,累计封存 CO₂ 超过 200 万 t。

CO₂ 捕集主要分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和直接空气捕集等。CO₂ 捕集技术成熟度差异较大,目前燃烧前物理吸收法已经处于商业应用阶段(李小春,2013),燃烧后化学吸附法尚处于中试阶段,其他大部分捕获技术已处于工业示范阶段。燃烧后捕集技术是目前最成熟的捕获技术,可用于大部分火电厂的脱碳改造,中国和国内已建有 10 万吨级的燃煤电厂 CO₂ 捕获示范装置。国华锦界电厂开展的 15 万 t 碳捕集与封存示范项目已经建成,是中国规模最大的燃煤电厂燃烧后碳捕集与封存全流程示范项目。燃烧前捕集系统相对复杂,整体煤气化联合循环(IGCC)技术是典型的可进行燃烧前碳捕集的系统。国内的 IGCC 项目有华能天津 IGCC 项目以及连云港清洁能源动力系统研究设施。富氧燃烧技术是最具潜力的燃煤电厂大规模碳捕集技术之一,产生的 CO₂ 浓度较高(约 90%~95%),更易于捕获。富氧燃烧技术发展迅速,可用于新建燃煤电厂和部分改造后的火电厂。当前第

一代碳捕集技术(燃烧后捕集技术、燃烧前捕集技术、富氧燃烧技术)发展渐趋成熟,主要瓶颈为成本能耗偏高、缺乏广泛大规模示范工程经验;而第二代技术(如新型膜分离技术、新型吸收技术、新型吸附技术、增压富氧燃烧技术等)仍处于实验室研发或小试阶段,技术成熟后能耗和成本会比成熟的第一代技术降低 30%以上,2035 年前后有望大规模推广应用(蔡博峰等,2021)。

CO₂ 输送的主要方式有陆地或海底管道、船舶、铁路和公路车载等。车载运输技术比较成熟,当前我国 CCUS 示范项目均采用车载运输,至今还没有真正意义上的 CO₂ 管输项目,技术成熟度较低,缺乏管输网络,但下游的油气管道规模和经验有助于我国 CO₂ 管输的快速发展(陆诗建等,2019)。

CO₂ 地质利用与封存是将 CO₂ 注入深部地层以实现 CO₂ 与大气长期隔离并/或强化资源开采的过程(Li et al., 2018),主要技术包括强化采油、驱煤层气、强化采气、增采页岩气、溶浸采铀、封存驱水(Li et al., 2015)、增强地热系统等。我国有多种地质利用与封存选择(Liu et al., 2017),理论封存总量约 2.5 万亿 t,其中封存驱水占 96%。除了溶浸采铀外,其他技术均具有较大封存容量。目前,强化采油和封存驱水在现有技术水平下可以进行大规模示范。根据国家能源产业革命路线图、中国 CCUS 科技发展路线图愿景,预计在合适的激励情景下,即 CO₂ 利用补贴 250 元/t CO₂,地质封存补贴 350 元/t CO₂,2030 年我国地质利用与封存综合减排潜力可达到每年 2.4 亿 t(中值),2060 年将为每年 14 亿 t(峰值)(中国 21 世纪议程管理中心,2014)。

CO₂ 化工与生物利用是指基于化学或生物技术,将 CO₂ 转化为其他产品,并在此过程中具有一定减排效应的技术手段,主要包括 CO₂ 化学转化制备化学品技术、CO₂ 矿化利用技术、CO₂ 生物利用技术三个方面。其中,CO₂ 化学转化制备化学品技术主要包括制备能源化学品、精细化工品和聚合物材料技术。CO₂ 矿化利用主要是通过天然矿物、工业材料和工业固废中钙、镁等碱性金属将 CO₂ 进行碳酸化固定为化学性质极其稳定的碳酸盐;CO₂ 生物利用技术是指以生物转化为主要特征,通过植物光合作用等,将 CO₂ 用于生物质的合成,并在下游技术的辅助下实现 CO₂ 资源化利用,包括微藻生物利用、CO₂ 气肥利用、微生物固定 CO₂ 合成苹果酸等。设施农业种植过程,通过提供二氧化碳(气肥)促进大棚蔬菜水果的优质丰产,可以获取良好的经济效

益和环境效益,值得大力支持和广泛推广(中国21世纪议程管理中心,2014)。

整体来讲,CO₂利用和封存都面临着长期稳定性问题。地质源温室气体的基础理论研究结果和技术方法,无疑可以提供多方面的理论借鉴和技术支撑,尤其是泥火山系统复杂的油-气-水-岩-微生物相互作用研究结果可以作为CO₂气体注入地层后的赋存状态及其长期稳定性、盖层密闭性、储层内CO₂气体的反应方向等判识和研究提供科学依据(李琦等,2019)。

5 亟需解决的相关问题和发展前景

我国地处欧亚大陆东南隅,地质背景非常复杂,第四纪构造运动异常活跃,导致我国地质源温室气体释放具有点多、线长、面广、类型复杂的特点。尽管我国地质源温室气体调查研究几乎与世界同步,但调查区域非常有限、研究工作缺乏系统性、已有观测数据比较零散,还没有形成整体数据库,急需通过多领域多单位多学科多技术的交流与合作,更新科学理念,集成和创新技术方法,尽快大规模地开展我国地质源温室气体释放的系统调查和综合研究。

5.1 加强研究队伍建设

国内从事地质源温室气体调查研究的专门队伍少而分散,目前仅有少数几个团队在进行实际的专门调查研究工作,科研人员总数20人左右,无力进行较大规模的调查研究,只能优选典型地质背景条件下的代表性地区进行有限类型的地质源温室气体现场测量,各种类型地质源温室气体释放的基础数据资料很不完善,甚至还非常欠缺。因此,需要鼓励和调动更多研究者和科研团队的参与,吸引和培养中青年专门科技人才,积极组织中国科学院、中国地震局、中国地质调查局等相关科研院所和高等院校,以及油气煤等能源产业部门的支持与合作,尽快确认和提出我国地质源温室气体主要类型、地质构造背景与区域划分;针对不同构造单元、不同构造背景实施全面调查和现场测量,创建有一定空间尺度的地质源温室气体排放清单;规范碳循环模型,预测与估算地质源温室气体释放规模,建立我国地质源温室气体释放通量数据库,综合研究地质源温室气体的碳排放与环境效应,形成地质源温室气体计量标准。

5.2 优化野外检测与样品采集

我国幅员辽阔,地质地理条件千差万别,要将高山峻岭、盆地平原、地表植被、沼泽水体等区域的

监测数据进行有效对比,挑战性很大;地质源温室气体释放的定性和定量调查研究,涉及许多技术问题需要解决,如现场测试仪器精密度、检测程序和调查人员工作精细程度,样品采集运输和保存,不同实验室之间测试数据的可对比性等。目前,国际气体地球化学研究普遍面临采集样品的保真性问题,既要防止采集样品的丢失又要防止外来气体的污染,主要是空气污染,对样品容器的要求非常严格,导致甄别测试需要特殊技术和设备。因此,需要集成创新具有国际先进水平的地质源温室气体释放监测技术,进行点(释放点)-线(断裂带)-面(火山-地热区、沉积盆地)一体化的系统监测,建立时间-空间多尺度的地质源温室气体释放连续观测系统,积极发展原位测量、海底探查、空中探测、卫星遥感等检测技术。

5.3 提升综合科学研究水平

我国地质源温室气体调查研究的科研实力、人才培养等方面与国外相比差距还非常大,高水平研究成果相对较少,调查范围和研究程度远落后于欧美日等国,甚至我国台湾。所以,时不我待,需要奋起直追,在充分发挥国内优势力量的同时加强国际合作,优化和提升我国气体地球化学测试分析水平,系统研究我国主要类型地质源温室气体的地球化学特征、成因机理与判别模式,服务于气候变化国际谈判。目前,国内外科学家已经基本达成共识,现今大气圈温室气体的浓度,尤其是CO₂浓度应是长期历史演变的结果,因而需要从历史视角,动态与静态相结合,系统而全面地评价各类温室气体的来源、演化、平衡等问题。基于我国地质源温室气体的主要类型、地质构造背景及其区域划分,综合分析各类地质源温室气体的地球化学特征、成因机制与判识方法迫在眉睫;在此基础上,创新和发展符合国际标准的监测方法和分析技术,建立我国地质源温室气体的释放通量数据库与估算模型,并对我国地质源温室气体的碳排放及其环境效应进行以我为特色但也符合国际通用准则的深入调查与综合研究,提升研究水平和国际影响力,并为国家经济建设、社会发展提供必要的科学依据,甚至为我国在国际气候谈判中争取主动权,确保中华民族伟大复兴事业的顺利进展提供科学支撑。

5.4 加强地质源甲烷调查研究

甲烷分子是由碳原子和氢原子构成的,热值高,燃烧时仅形成二氧化碳和水,不产生粉尘废渣等固体废弃物,因而被称作清洁能源。但是,如果

甲烷释放到大气中,则会产生强烈的温室效应,等摩尔数甲烷的温室效应是 CO_2 的 21 ~ 22 倍 (Houghton et al., 2001),如果考虑其光化学作用,其温室效应则更高。甲烷来源广泛,类型众多,包括沉积盆地等各种地质作用释放的甲烷在整个大气甲烷估算中占有重要份额,它既是不含放射性碳 (^{14}C) 甲烷源(死碳源)缺失部分的重要代表 (Crutzen, 1991, 1995),也是甲烷重碳源的贡献者 (唐俊红等, 2006, 2019),因此,成为大气温室气体来源探索和气候变化与应对策略制定所必须考虑的重要因素。Etiope 和 Milkov (2004) 估计,全球陆地和浅海泥火山向大气释放的甲烷量大约为每年 6 ~ 9 Mt,成为湿地之后第二大最重要的大气甲烷自然源;他们还估计了世界主要泥火山周围地区的微渗漏释放甲烷的规模,大约每年 1.1 ~ 5.6 Mt。当然,这些估算都是根据有限数据计算出来的,需要开展广泛的泥火山调查研究,深入了解和全面把握泥火山系统释放甲烷的过程和规模。我国数百个含油气盆地都存在油气泄露现象,油气苗分布广泛 (Zheng et al., 2018),其中准噶尔盆地、柴达木盆地、羌塘盆地等还发育一些泥火山,甲烷等烃类气体泄露特征和释放规模亟需开展系统调查和专门研究。

致谢: 中国地质源温室气体调查研究长期得到刘嘉麒、李曙光、吴国雄等院士的支持,资料收集得到李营、何勇胜、陈多福、张水昌、陈践发、唐俊红、冯东、张立飞、Giovanni Martinelli、Daniele Pinti 等的热情帮助,在此一并致以衷心感谢。

参考文献 (References):

- Allard P. 2010. A CO_2 -rich gas trigger of explosive paroxysms at Stromboli basaltic volcano, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(3-4): 363-374
- Anderson D E, Farrar C D. 2001. Eddy covariance measurement of CO_2 flux to the atmosphere from an area of high volcanogenic emissions, Mammoth Mountain, California. *Chemical Geology*, 177(1-2): 31-42
- Becker J A, Bickle M J, Galy A, Holland T J B. 2008. Himalayan metamorphic CO_2 fluxes: Quantitative constraints from hydrothermal springs. *Earth and Planetary Science Letters*, 265(3-4): 616-629
- Brook E J, Sowers T, Orchardo J. 1996. Rapid variations in atmospheric methane concentration during the past 110 000 years. *Science*, 273(5278): 1087-1091
- Brune S, Williams S E, Müller R D. 2017. Potential links between continental rifting, CO_2 degassing and climate change through time. *Nature Geoscience*, 10(12): 941-946
- Burton M R, Sawyer G M, Granieri D. 2013. Deep carbon emissions from volcanoes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75(1): 323-354
- Capaccioni B, Tassi F, Cremonini S, Sciarra A, Vaselli O. 2015. Ground heating and methane oxidation processes at shallow depth in Terre Calde di Medolla (Italy): Observations and conceptual model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5): 3048-3064
- Chen J P, Wang X L, Sun Y G, Ni H Y, Xiang B L, Liao J D. 2021. The accumulation of natural gas and potential exploration regions in the southern margin, Junggar Basin. *Frontiers in Earth Science*, 9: 635230
- Chen Z, Zhou X, Du J, Xie C, Liu L, Li Y, Yi L, Liu H, Cui Y. 2015. Hydrochemical characteristics of hot spring waters in the Kangding district related to the Lushan M_s 7.0 earthquake in Sichuan, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6): 1149-1156
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, Wang J, Zhou X C, Du J G. 2018. Radon emission from soil gases in the active fault zones in the capital of China and its environmental effects. *Scientific Reports*, 8(1): 16772
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, Zheng G D, Xu W, Yan W, Yi L. 2019a. CH_4 and CO_2 emissions from mud volcanoes on the southern margin of the Junggar Basin, NW China: Origin, output, and relation to regional tectonics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5): 5030-5044
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, Lu C, Zhao Y X, Wang J. 2019b. Evidence of multiple sources of soil gas in the Tangshan fault zone, North China. *Geofluids*, 2019: 1945450
- Chen Z, Li Y, Martinelli G, Liu Z F, Lu C, Zhao Y X. 2020. Spatial and temporal variations of CO_2 emissions from the active fault zones in the capital area of China. *Applied Geochemistry*, 112: 104489
- Chiodini G, Frondini F, Ponziani F. 1995. Deep structures and carbon dioxide degassing in central Italy. *Geothermics*, 24(1): 81-94
- Chiodini G, Cioni R, Guidi M, Raco B, Marini L. 1998. Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13(5): 543-552
- Chiodini G, Cardellini C, Amato A, Boschi E, Caliro S, Frondini F, Ventura G. 2004. Carbon dioxide Earth degassing and seismogenesis in central and southern Italy. *Geophysical Research Letters*, 31(7): L07615
- Chiodini G, Cardellini C, Di Luccio F, Selva J, Frondini F, Caliro S, Rosiello A, Beddini G, Ventura G. 2020. Correlation between tectonic CO_2 Earth degassing and seismicity is revealed by a 10-year record in the Apennines, Italy. *Science Advances*, 6(35): eabc2938
- Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni R B, Piao S L, Thornton P. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. *Climatic change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press
- Cox P M, Betts R A, Jones C D, Spall S A, Totterdell I J. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408(6809): 184-187
- Crutzen P J. 1991. Methane's sinks and sources. *Nature*, 350: 380-381
- Crutzen P J. 1995. On the role of CH_4 in atmospheric chemistry, sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources. *Royal*

- Swedish Academy of Sciences , 24(1) : 52–55
- Cui Y , Du J , Zhang D , Sun Y. 2013. Anomalies of total column CO and O₃ associated with great earthquakes in recent years. *Natural Hazards and Earth System Science* , 13(10) : 2513–2519
- Cui Y , Ouzounov D , Hatzopoulos N , Sun K , Zou Z , Du J. 2017. Satellite observation of CH₄ and CO anomalies associated with the Wenchuan M_s 8.0 and Lushan M_s 7.0 earthquakes in China. *Chemical Geology* , 469: 185–191
- Dai J X , Wu X Q , Ni Y Y , Wang Z C , Zhao C Y , Wang Z Y , Liu G X. 2012. Geochemical characteristics of natural gas from mud volcanoes in the southern Junggar Basin. *Earth Sciences* , 55(3) : 355–367
- Di P F , Feng D , Chen D F. 2014. In-situ and on-line measurement of gas flux at a hydrocarbon seep from the northern South China Sea. *Continental Shelf Research* , 81: 80–87
- Di P F , Feng D , Tao J , Chen D F. 2020. Using time-series videos to quantify methane bubbles flux from natural cold seeps in the South China Sea. *Minerals* , 10(3) : 216
- Etioppe G , Klusman R W. 2002. Geologic emissions of methane to the atmosphere. *Chemosphere* , 49: 777–789
- Etioppe G , Milkov A V. 2004. A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere. *Environmental Geology* , 46(8) : 997–1002
- Etioppe G , Ciccio P. 2009. Earth's degassing: A missing ethane and propane source. *Science* , 323(5913) : 478
- Etioppe G , Christodoulou D , Kordella S , Marinaro G , Papatheodorou G. 2013. Offshore and onshore seepage of thermogenic gas at Katakolo Bay (Western Greece) . *Chemical Geology* , 339: 115–126
- Foley S F , Fischer T P. 2017. An essential role for continental rifts and lithosphere in the deep carbon cycle. *Nature Geoscience* , 10(12) : 897–902
- Fronchini F , Caliro S , Cardellini C , Chiodini G , Morgantini N , Parello F. 2008. Carbon dioxide degassing from Tuscany and Northern Latium (Italy) . *Global and Planetary Change* , 61(1–2) : 89–102
- Fu B H , Zheng G D , Ninomiya Y , Wang C Y , Sun G Q. 2007. Mapping hydrocarbon-induced mineralogical alteration in the northern Tian Shan using ASTER multispectral data. *Terra Nova* , 19(4) : 225–231
- Gambardella B , Cardellini C , Chiodini G , Fronchini F , Marini L , Ottotonello G , Zuccolini M V. 2004. Fluxes of deep CO₂ in the volcanic areas of central-southern Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 136(1–2) : 31–52
- Giammanco S , Gurrieri S , Valenza M. 1998. Anomalous soil CO₂ degassing in relation to faults and eruptive fissures on Mount Etna (Sicily , Italy) . *Bulletin of Volcanology* , 60(4) : 252–259
- Gold T. 1979. Terrestrial sources of carbon and earthquake outgassing. *Journal of Petroleum Geology* , 1(3) : 3–19
- Han X , Li Y , Du J , Zhou X , Xie C , Zhang W. 2014. Rn and CO₂ geochemistry of soil gas across the active fault zones in the capital area of China. *Natural Hazards and Earth System Sciences* , 14(10) : 2803–2815
- He Y S , Meng X N , Ke S , Wu H J , Zhu C W , Teng F Z , Hoefs J , Huang J , Yang W , Xu L J , Hou Z H , Ren Z Y , Li S G. 2019. A nephelinitic component with unusual δ⁵⁶Fe in Cenozoic basalts from eastern China and its implications for deep oxygen cycle. *Earth and Planetary Science Letters* , 512: 175–183
- Heinicke J , Martinelli G. 2005. Preface: An historical overview. *Annals of Geophysics* , 48(1) : V–VIII
- Holloway S. 2005. Underground sequestration of carbon dioxide—a viable greenhouse gas mitigation option. *Energy* , 30(11–12) : 2318–2333
- Houghton J T , Ding Y , Griggs D J , Noguer M , Winden P J , Dai X. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press , 1–881
- Huang Z L , Xu X , Han Y F , Gao Y , Wang Y L , Song C H. 2016. Comparative study of Dushanzi and Baiyanggou mud volcano microbial communities in Junggar Basin in Xinjiang , China. *International Research Journal of Public and Environmental Health* , 3(11) : 244–256
- Iacono-Marziano G , Gaillard F , Scaillet B , Pichavant M , Chiodini G. 2009. Role of non-mantle CO₂ in the dynamics of volcano degassing: the Mount Vesuvius example. *Geology* , 37: 319–322
- Italiano F , Bonfanti P , Ditta M , Petrini R , Slejko F. 2009. 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. *Chemical Geology* , 266(1–2) : 76–85
- Jenkinson D S , Adams D E , Wild A. 1991. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature* , 351(6324) : 304–306
- Ji L M , Zhang M Z , Ma X X , Xu W , Zheng G D. 2018. Characteristics of mixed sporopollen assemblage from sediments of Dushanzi mud volcano in southern Junggar Basin and indication to the source of mud and debris ejecta. *Marine and Petroleum Geology* , 89: 194–201
- Jung N H , Han W S , Han K , Park E. 2015. Regional-scale advective , diffusive , and eruptive dynamics of CO₂ and brine leakage through faults and wellbores. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* , 120(5) : 3003–3025
- Kennedy B M , Kharaka Y K , Evans W C , Ellwood A , DePaolo D J , Thordsen J , Ambats G , Mariner R H. 1997. Mantle fluids in the San Andreas fault system , California. *Science* , 278(5341) : 1278–1281
- Kennett J P , Cannariato K G , Hendy I L , Behl R J. 2003. *Methane hydrates in quaternary climate change: The clathrate gun hypothesis*. Washington: American Geophysical Union , 216
- Kerrick D M , Caldeira K. 1998. Metamorphic CO₂ degassing from orogenic belts. *Chemical Geology* , 145(3/4) : 213–232
- King C Y , King B S , Evans W C , Zhang W. 1996. Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry* , 11(4) : 497–510
- Kulogoski J T , Hilton D R , Barry P H , Esser B K , Hillegonds D , Belitz K. 2013. Volatile fluxes through the Big Bend section of the San Andreas Fault , California: Helium and carbon-dioxide systematics. *Chemical Geology* , 339: 92–102
- Langmuir C H , Vocke R D , Hanson J G N. 1978. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts. *Earth and Planetary Science Letters* , 37: 308–392
- Lewicki J L , Hilley G E , Dobeck L , McLing T L , Kennedy B M , Bill M , Marino B D V. 2013. Geologic CO₂ input into groundwater and the atmosphere , Soda Springs , ID , USA. *Chemical Geology* , 339:

61–70

- Lewicki J L , Kelly P J , Bergfeld D , Vaughan R G , Lowenstern J B. 2017. Monitoring gas and heat emissions at Norris Geysir Basin , Yellowstone National Park , USA based on a combined eddy covariance and Multi-GAS approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 347: 312–326
- Li N , Huang H G , Chen D F. 2014. Fluid sources and chemical processes inferred from geochemistry of pore fluids and sediments of mud volcanoes in the southern margin of the Junggar Basin , Xinjiang , northwestern China. *Applied Geochemistry* , 46(1) : 1–9
- Li Q , Liu G Z , Liu X H , Li X C. 2013. Application of a health , safety , and environmental screening and ranking framework to the Shenhua CCS project. *International Journal of Greenhouse Gas Control* , 17: 504–514
- Li Q , Wei Y N , Liu G Z , Shi H. 2015. CO₂-EWR: A cleaner solution for coal chemical industry in China. *Journal of Cleaner Production* , 103: 330–337
- Li Q , Liu G Z. 2016. Risk assessment of the geological storage of CO₂: A review. In: Vishal V , Singh T N , eds. *Geologic Carbon Sequestration*. New York: Springer , 249–284
- Li Q , Song R R , Shi H , Ma J L , Liu X H , Li X C. 2018. U-tube based near-surface environmental monitoring in the Shenhua carbon dioxide capture and storage (CCS) project. *Environmental Science and Pollution Research* , 25(12) : 12034–12052
- Li S G , Yang W , Ke S , Meng X N , Tian H C , Xu L J , He Y S , Huang J , Wang X C , Xia Q K , Sun W D , Yang X Y , Ren Z Y , Wei H Q , Liu Y S , Meng F C , Yan J. 2017. Deep carbon cycles constrained by a large-scale mantle Mg isotope anomaly in eastern China. *National Science Review* , 4(1) : 111–120
- Li S G , Wang Y. 2018. Formation time of the big mantle wedge beneath eastern China and a new lithospheric thinning mechanism of the North China craton—Geodynamic effects of deep recycled carbon. *Science China Earth Sciences* , 61(7) : 853–868
- Liu H J , Were P , Li Q , Gou Y , Hou Z. 2017. Worldwide status of CCUS technologies and their development and challenges in China. *Geofluids* , 2017: 6126505
- Liu S A , Wang Z Z , Li S G , Huang J , Yang W. 2016. Zinc isotope evidence for a large-scale carbonated mantle beneath eastern China. *Earth and Planetary Science Letters* , 444: 169–178
- Ma K , Ma A Z , Zheng G D , Ren G , Xie F , Zhou H C , Yin J , Liang Y , Zhuang X L , Zhuang G Q. 2021. Mineralosphere microbiome leading to changed geochemical properties of sedimentary rocks from Aiqigou mud volcano , northwest China. *Microorganisms* , 9(3) : 560
- Ma X X , Zheng G D , Liang S Y , Xu W. 2015. Geochemical characteristics of absorbed gases in fault gouge from the Daliushu dam area , NW China. *Geochemical Journal* , 49(4) : 413–419
- Mao W L , Mao H K , Meng Y , Eng P J , Hu M Y , Chow P , Cai Y Q , Shu J F , Hemley R J. 2006. X-ray-induced dissociation of H₂O and formation of an O₂-H₂ alloy at high pressure. *Science* , 314(5799) : 636–638
- Marziano G I , Gaillard F , Pichavant M. 2008. Limestone assimilation by basaltic magmas: An experimental re-assessment and application to Italian volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 155 (6) : 719–738
- Mason E , Edmonds M , Turchyn A V. 2017. Remobilization of crustal carbon may dominate volcanic arc emissions. *Science* , 357(6348) : 290–294
- Mau S , Tu T H , Becker M , Dos Santos Ferreira C , Chen J N , Lin L H , Wang P L , Lin S , Bohrmann G. 2020. Methane seeps and independent methane plumes in the South China Sea Offshore Taiwan. *Frontiers in Marine Sciences* , 7: 543
- Milkov A V. 2005. Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere and as a geohazard. In: *Mud Volcanoes , Geodynamics and Seismicity* (Martinelli , G. and Panahi , B. , eds) , Springer. 29–34
- Nakada R , Takahashi Y , Tsunogai U , Zheng G D , Shimizu H , Hattori K H. 2011. A geochemical study on mud volcanoes in the Junggar Basin , China. *Applied Geochemistry* , 26(7) : 1065–1076
- Orcutt B N , Daniel I , Dasgupta R. 2019. *Deep carbon: Past to present*. London: Cambridge University Press , 1–684
- Ren G , Ma A Z , Zhang Y F , Deng Y , Zheng G D , Zhuang X L , Zhuang G Q , Fortin D. 2018. Electron acceptors for anaerobic oxidation of methane drive microbial community structure and diversity in mud volcanoes. *Environmental Microbiology* , 20(7) : 2370–2385
- Sano Y , Wakita H. 1985. Geographical distribution of ³He/⁴He ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* , 90(B10) : 8729–8741
- Sano Y , Kinoshita N , Kagoshima T , Takahata N , Sakata S , Toki T , Kawagucci S , Waseda A , Lan L F , Wen H , Chen A T , Lee H , Yang T F , Zheng G D , Tomonaga Y , Roulleau E , Pinti D L. 2017. Origin of methane-rich natural gas at the West Pacific convergent plate boundary. *Scientific Reports* , 7(1) : 15646
- Sano Y , Marty B. 1995. Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology* , 119(1–4) : 265–274
- Schumacher D. 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. In: *Hydrocarbon Migration and Its Near-surface Expression*. AAPG Memoir , 66: 71–89
- Sciarrà A , Cantucci B , Coltorti M. 2017. Learning from soil gas change and isotopic signatures during 2012 Emilia seismic sequence. *Scientific Reports* , 7(1) : 14187
- Sun Y T , Zhou X C , Zheng G D , Li J , Shi H Y , Guo Z F , Du J G. 2017. Carbon monoxide degassing from seismic fault zones in the Basin and Range province , west of Beijing , China. *Journal of Asian Earth Sciences* , 149: 41–48
- Sun Y T , Guo Z F , Liu J Q , Du J G. 2018. CO₂ diffuse emission from maar lake: An example in Changbai volcanic field , NE China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 349: 146–162
- Sun Y T , Zhou X C , Du J G , Guo Z F. 2020a. CO diffusive emission in the co-seismic rupture zone of the Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Geochemical Journal* , 54(3) : 91–104
- Sun Y T , Guo Z F , Fortin D. 2020b. Carbon dioxide emission from monogenetic volcanoes in the Mt. Changbai volcanic field , NE China. *International Geology Review* , doi: 10.1080/00206814.2020.1802782
- Tamburello G , Pondrelli S , Chiodini G , Rouwet D. 2018. Global-scale control of extensional tectonics on CO₂ earth degassing. *Nature Communications* , 9(1) : 4608
- Tang J H , Bao Z Y , Xiang W , Gou Q H. 2007. Daily variation of natural

- emission of methane to the atmosphere and source identification in the Luntai Fault Region of the Yakela Condensed Oil/Gas Field in the Tarim Basin, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 771–778
- Tang J H, Bao Z Y, Xiang W, Gou Q H. 2008. Geological emission of methane from the Yakela condensed oil/gas field in Talimu Basin, Xinjiang, China. *Journal of Environmental Sciences*, 20(9): 1055–1062
- Tang J H, Yin H Y, Wang G J, Chen Y Y. 2010. Methane microseepage from different sectors of the Yakela condensed gas field in Tarim Basin, Xinjiang, China. *Applied Geochemistry*, 25(8): 1257–1264
- Tang J H, Wang G J, Yin H Y, Li H J. 2013. Methane in soil gas and its transfer to the atmosphere in the Yakela condensed gas field in the Tarim Basin, Northwest China. *Petroleum Science*, 10(2): 183–189
- Tang J H, Xu Y, Wang G J, Etiopie G, Han W, Yao Z T, Huang J G. 2017. Microseepage of methane to the atmosphere from the Dawanqi oil-gas field, Tarim Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(8): 4353–4363
- Tang J H, Xu Y, Wang G J, Huang J G, Han W, Yao Z T, Zhu Z Z. 2019. Methane in soil gas and its migration to the atmosphere in the Dawanqi Oilfield, Tarim Basin, China. *Geofluids*, 2019: 1693746
- Wakita H, Nakamura Y, Kita I, Fujii N, Notsu K. 1980. Hydrogen release: New Indicator of fault activity. *Science*, 210(4466): 188–190
- Werner C, Wyngaard J C, Brantley S L. 2000. Eddy-correlation measurement of hydrothermal gases. *Geophysical Research Letters*, 27(18): 2925–2928
- Xu S, Zheng G D, Xu Y C. 2012. Helium, argon and carbon isotopic compositions of spring gases in the Hainan Island, China. *Acta Geologica Sinica*, 86(6): 1515–1523
- Xu S, Zheng G D, Nakai S, Wakita S, Wang X B, Guo Z F. 2013. Hydrothermal He and CO₂ at Wudalianchi intra-plate volcano, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 526–530
- Xu S, Zheng G D, Wang X B, Wang H L, Nakai S, Wakita H. 2014. Helium and carbon isotope variations in Liaodong Peninsula, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 149–156
- Xu S, Zheng G D, Zheng J J, Zhou S X, Shi P L. 2017. Mantle-derived helium in foreland basins in Xinjiang, Northwest China. *Tectonophysics*, 694: 319–331
- Xu W, Zheng G D, Ma X X, Fortin D, Hilton D R, Liang S Y, Chen Z, Hu G Y. 2018. Iron speciation of mud breccia from the Dushanzi mud volcano in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, NW China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(6): 2201–2213
- Xu W, Zheng G D, Martinelli G, Ma X X, Fortin D, Fan Q H, Chen Z. 2020. Mineralogical and geochemical characteristics of hydrocarbon-bleached rocks in Baiyanggou mud volcanoes, Xinjiang, NW China. *Applied Geochemistry*, 116: 104572
- Yang D X, Li Q, Zhang L Z. 2019. Characteristics of carbon dioxide emissions from a seismically active fault. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(8): 1911–1919
- Yang W, Teng F Z, Zhang H F, Li S G. 2012. Magnesium isotopic systematics of continental basalts from the North China Craton: Implications for tracing subducted carbonate in the mantle. *Chemical Geology*, 328: 185–194
- Zhang M L, Guo Z F, Sano Y, Cheng Z H, Zhang L H. 2015. Stagnant subducted Pacific slab-derived CO₂ emissions: Insights into magma degassing at Changbaishan volcano, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 106: 49–63
- Zhang M L, Guo Z F, Sano Y, Zhang L H, Sun Y T, Cheng Z H, Yang T F. 2016. Magma-derived CO₂ emissions in the Tengchong volcanic field, SE Tibet: Implications for deep carbon cycle at intra-continent subduction zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 127: 76–90
- Zhang M L, Guo Z F, Zhang L H, Sun Y T, Cheng Z H. 2017. Geochemical constraints on origin of hydrothermal volatiles from southern Tibet and the Himalayas: Understanding the degassing systems in the India-Asia continental subduction zone. *Chemical Geology*, 469: 19–33
- Zhao W B, Guo Z F, Lei M, Zhang M L, Ma L, Fortin D, Zheng G D. 2019. Volcanogenic CO₂ degassing in the Songliao continental rift system, NE China. *Geofluids*, 2019: 8053579
- Zheng G D, Fu B H, Takahashi Y, Kuno A, Matsuo M, Zhang J D. 2010. Chemical speciation of redox sensitive elements during hydrocarbon leaching in the Junggar Basin, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6): 713–723
- Zheng G D, Xu S, Liang S Y, Shi P L, Zhao J. 2013. Gas emission from the Qingzhu River after the 2008 Wenchuan Earthquake, Southwest China. *Chemical Geology*, 339: 187–193
- Zheng G D, Ma X X, Guo Z F, Hilton D R, Xu W, Liang S Y, Fan Q H, Chen W X. 2017. Gas geochemistry and methane emission from Dushanzi mud volcanoes in the southern Junggar Basin, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 149: 184–190
- Zheng G D, Xu W, Etiopie G, Ma X X, Liang S Y, Fan Q H, Sajjad W, Li Y. 2018. Hydrocarbon seeps in petroliferous basins in China: A first inventory. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151: 269–284
- Zhou X C, Du J G, Chen Z, Cheng J W, Tang Y, Yang L M, Xie C, Cui Y J, Liu L, Yi L, Yang P X, Li Y. 2010. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan M_s 8.0 Earthquake, southwestern China. *Geochemical Transactions*, 11(1): 5
- Zhou X C, Chen Z, Cui Y. 2016. Environmental impact of CO₂, Rn, Hg degassing from the rupture zones produced by Wenchuan M_s 8.0 earthquake in western Sichuan, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(5): 1067–1082
- Zhou X C, Liu L, Chen Z, Cui Y J, Du J G. 2017. Gas geochemistry of the hot spring in the Litang fault zone, Southeast Tibetan Plateau. *Applied Geochemistry*, 79: 17–26
- 陈多福, 冯东, 陈光谦, 陈先沛, Cathles L M. 2005. 海底天然气渗漏系统演化特征及对形成水合物的影响. *沉积学报*, 23(2): 323–328
- 陈志, 杜建国, 周晓成, 崔月菊, 刘雷, 李营, 张文来, 高小其, 许秋龙. 2014. 2012年6月30日新源 M_s6.6地震前后北天山泥火山及温泉的水化学变化. *地震*, 34(3): 97–107
- 成智慧, 郭正府, 张茂亮, 张丽红. 2012. 腾冲新生代火山区温泉 CO₂ 气体排放通量研究. *岩石学报*, 28(4): 1217–1224
- 成智慧, 郭正府, 张茂亮, 张丽红. 2014. 腾冲新生代火山区 CO₂ 气体释放通量及其成因. *岩石学报*, 30(12): 3657–3670
- 崔月菊, 杜建国, 陈杨, 刘雷, 刘红, 易丽, 孙凤霞. 2016a. 汶川 M_s8.0地震前后龙门山断裂带 CO 和 CH₄ 排气增强. *地震研究*, 39(2): 239–245

- 崔月菊, 杜建国, 荆凤, 李新艳. 2016b. 2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震前后川西含碳气体卫星高光谱特征. 地震学报, 38(3): 448-457
- 崔月菊, 杜建国, 李新艳, 孙凤霞, 邹镇宇. 2017. 汶川地震相关的断裂带含碳气体排放量估算. 矿物岩石地球化学通报, 36(2): 222-227
- 杜乐天. 2005. 地球排气作用的重大意义及研究进展. 地质论评, 51(2): 174-180
- 高苑, 王永莉, 郑国东, 孟培, 吴应琴, 杨辉, 张虹, 王有孝. 2012. 新疆准噶尔盆地独山子泥火山天然气地球化学特征. 地球学报, 33(6): 989-994
- 郭正府, 李晓惠, 张茂亮. 2010. 火山活动与深部碳循环的关系. 第四纪研究, 30(3): 497-505
- 郭正府, 张茂亮, 成智慧, 张丽红, 刘嘉麒. 2014. 中国大陆新生代典型火山区温室气体释放的规模及其成因. 岩石学报, 30(11): 3467-3480
- 郭正府, 张茂亮, 孙玉涛, 成智慧, 张丽红, 刘嘉麒. 2015. 火山温室气体释放通量与观测的研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 690-700
- 郭正府, 郑国东, 孙玉涛, 张茂亮, 张丽红, 成智慧. 2017. 中国大陆地质源温室气体释放. 矿物岩石地球化学通报, 36(2): 204-212
- 李琦, 蔡博峰, 陈帆, 刘桂臻, 刘兰翠. 二氧化碳地质封存的环境风险评价方法研究综述. 环境工程, 2019, 37(2): 13-21
- 李曙光, 汪洋. 2018. 中国东部大地幔楔形成时代和华北克拉通岩石圈减薄新机制——深部再循环碳的地球动力学效应. 中国科学: 地球科学, 48(7): 809-824
- 李小春主编. 2013. 二氧化碳捕集利用与封存词典. 北京: 中国出版集团, 世界图书出版社. 258
- 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 刘佳宜, 吴小奇, 周冰, Fu Q, 金之钧. 2019. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵. 中国科学: 地球科学, 49(3): 499-520
- 刘文汇, 腾格尔, 高波, 张中宁, 张建勇, 张殿伟, 范明, 付小东, 郑伦举, 刘全有. 2010. 四川盆地大中型天然气田(藏)中 H_2S 形成及富集机制. 石油勘探与开发, 37(5): 513-522
- 刘文汇, 王星, 田辉, 郑国东, 王晓锋, 陶成, 刘鹏. 2021. 近十年来中国天然气地球化学研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 40(3): 540-555
- 陆诗建, 赵东亚, 刘建武, 喻健良, 李琦. 50万 t/aCO_2 输送管道泄漏仿真模拟研究. 山东化工, 2019, 48(8): 229-235
- 马向贤, 郑国东, 梁收运, 樊成意, 王自翔, 梁明亮. 2012. 地质甲烷对大气甲烷源与汇的贡献. 矿物岩石地球化学通报, 31(2): 139-145, 183
- 马向贤, 郑国东, 郭正府, Etiopie G, Fortin D, 佐野有司. 2014. 准噶尔盆地南缘独山子泥火山温室气体排放通量. 科学通报, 59(32): 3190-3196
- 马小龙, 王芸, 杨红梅, 王纯利, 毛培宏, 金湘, 常玮, 房世杰, 张评许, 娄恺. 2009. 新疆泥火山细菌遗传多样性. 生态学报, 29(7): 3722-3728
- 生态环境部环境规划院. 2021. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCCUS)报告(2021)——中国CCUS路径. 北京: 生态环境部环境规划院
- 唐俊红, 鲍征宇, 向武, 乔胜英, 李兵. 2006. 大气甲烷碳同位素测试方法及其在雅克拉凝析气田上方大气中的应用. 环境科学, 27(1): 14-18
- 唐俊红, 鲍征宇, 向武. 2009. 雅克拉凝析油气田油水界面甲烷天然气释放及其源示踪. 地球科学——中国地质大学学报, 34(5): 769-777
- 唐孝炎, 张远航, 邵敏主编. 2006. 大气环境化学. 高等教育出版社? 高等教育出版社. p28
- 陶明信, 徐永昌, 史宝光, 蒋忠惕, 沈平, 李晓斌, 孙明良. 2005. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征. 中国科学: 地球科学, 35(5): 441-451
- 王国建, 汤玉平, 唐俊红, 李吉鹏, 杨俊, 李兴强. 2018. 断层对烃类微渗漏主控作用及异常分布影响的实验模拟研究. 物探与化探, 42(1): 21-27
- 王家豪, 庞雄, 王存武, 何敏, 连世勇. 2006. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别. 地球科学——中国地质大学学报, 31(2): 209-213
- 张丽红, 郭正府, 郑国东, 张茂亮, 孙玉涛, 成智慧, 马向贤. 2017. 藏南新生代火山-地热区温室气体的释放通量与成因——以谷露-亚东裂谷为例. 岩石学报, 33(1): 250-266
- 张茂亮, 郭正府, 成智慧, 张丽红, 郭文峰, 杨灿尧, 付庆州, 温心怡. 2011. 长白山火山区温泉温室气体排放通量研究. 岩石学报, 27(10): 2898-2904
- 赵文斌, 郭正府, 刘嘉麒, 张茂亮, 孙玉涛, 雷鸣, 马琳, 李菊景. 2021. 中国东北新生代火山区 CO_2 释放规模与成因. 岩石学报, 37(4): 1255-1269
- 赵文斌, 郭正府, 孙玉涛, 张茂亮, 张丽红, 雷鸣, 马琳. 2018. 火山区 CO_2 气体释放研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 37(4): 601-620
- 郑国东, 郭正府, 王云鹏, 陈践发. 2018. 气体地球化学新进展——纪念著名气体地球化学专家 David R. Hilton 教授. 矿物岩石地球化学通报, 37(4): IV-VII
- 中国 21 世纪议程管理中心. 2014. 《第三次气候变化国家评估报告》特别报告: 中国二氧化碳利用技术评估报告. 北京: 科学出版社
- 周晓成, 孙凤霞, 陈志, 吕超甲, 李静, 仵柯田, 杜建国. 2017. 汶川 $M_s 8.0$ 地震破裂带 CO_2 、 CH_4 、 Rn 和 Hg 脱气强度. 岩石学报, 33(1): 291-303
- 朱光有, 戴金星, 张水昌, 李剑, 金强, 陈践发. 2004. 中国含硫化氢天然气的研究及勘探前景. 天然气工业, 24(9): 1-4

(本文责任编辑: 刘莹, 龚超颖; 英文审校: 张兴春)

III

地貌对沉积体系域和岩性地层圈闭发育的普遍控制作用,创新了我国陆相盆地层序地层学理论;(2)揭示了叠合盆地复杂层序结构和形成机制,提出了“不整合三角带”“叠合盆地变革期构造古地理”等概念,为发展叠合盆地构造-古地理学奠定基础;(3)建立了南海大陆斜坡边缘的沉积演化模式和响应机制,为推动我国边缘海盆地沉积动力学研究做出了贡献。其研究紧密结合国家需求,为我国岩性地层和深层油气藏勘探取得突破提供了重要理论依据。AAPG Bulletin、沉积学报、现代地质等刊物副主编,美国石油地质学会荣誉会员,中国沉积地质专业委员会副主任委员兼秘书长。先后培养博士、硕士生 160 多名。



张贵宾,1979 年生,北京大学副教授,博士生导师。澳大利亚国立大学博士后和访问学者。主要从事变质岩石学和岩石地球化学等方面的研究,《地学前缘》助理编委, *Frontier in Earth Sciences* 编委。主持国家自然科学基金优秀青年基金和面上项目,作为骨干参加基金委重大项目、科技部“973”项目及国家自然科学基金委重点基金等。入选教育部新世纪人才计划,获得北京大学王选青年学者等奖励,教育部自然科学奖一等奖(第 4 完成人)。主要成果包括:(1)确定中喜马拉雅退变榴辉岩的原岩属性及变质演化历史;(2)建立了柴北缘超高压变质带从大洋到大陆俯冲碰撞的演化历史;(3)确立了柴北缘超高压变质岩石的差异折返过程。



郑国东,1961 年生,兰州大学理学学士(1983 年),东京大学学术博士(2001)。先后在中国科学院兰州地质研究所(1983-1996)、克马萨里克大学(1992-1994)、东京大学(1997-2001)、京都大学(2002)、广岛大学(2003-2004)、卡迪夫大学(2003)、史蒂文斯理工学院(2004-2005)等求学或工作。2006 年入选中国科学院“百人计划”并就职于中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心,现为西北生态环境资源研究院油气资源研究中心研究员。主要从事元素化学种地学应用和气体地球化学研究,涉及油气储层、环境污染、湖海沉积、滑坡面黏土和断层泥,以及地质源温室气体释放等领域。兼任中国矿物岩石地球化学学会终身会员及气体地球化学专业委员会主任委员,中国核物理学会穆斯堡尔谱学专业委员会委员,中国灾害防御协会火山专业委员会委员,多家国际学术期刊的评审员。



缪秉魁,1966 年生,桂林理工大学教授、博士生导师。现任国际陨石协会陨石命名专家委员会委员、中国南极陨石专家委员会委员、中国矿物岩石地球化学学会理事及陨石与天体化学专委会主任、中国空间科学学会理事等职务。一直从事天体化学与地球科学领域的科研,主要开展南极考察、陨石分类以及各类陨石成因等方面科研项目,主持国家自然科学基金面上项目 4 项,发表论文 100 余篇,曾获得广西科技进步二等奖。主要学术成果包括:(1)曾三次参加南极陨石考察,发现我国第一个南极陨石富集区-格罗夫山,为我国成为陨石大国做出重大贡献;(2)在南极发现了我国第一块火星陨石;(3)开展了橄辉无球粒陨石研究,找到了其中金刚石的撞击成因的直接证据;(4)开展了火星月球陨石中后成合金的研究,证明后成合金是行星表面冲击变质作用的重要标志。



刘耘,1968 年生,中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室研究员,成都理工大学行星科学国际研究中心主任,中科院“比较行星学”卓越创新中心特聘研究员。刘耘主要从事同位素理论与计算,以及行星科学研究,已在 GCA、EPSL 等权威期刊发表文章 50 余篇。现任中国矿物岩石地球化学学会同位素地球化学专业委员会副主任、实验地球化学专业委员会副主任; *Acta Geochimica* 常务副主编, *Geochemical Journal* 副主编。曾获国家杰出青年科学基金、“百千万人才工程”“万人计划”领军人才等荣誉和计划。