



再论汶川大地震与深部气体的关系

张景廉¹, 杜乐天², 曹正林¹, 阎存凤¹, 王斌婷¹

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020; 2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要:根据汶川地震震中幸存者对地震事发现场的口述, 汶川地震应是深部气体突出、爆炸而引起的。卫星热红外异常观测以及众多地震的宏观异常的观察与分析均证实了上述观点是正确的。国内外一些学者对地震与气体的关系的论述值得引起关注与重视。

关键词: 地震; 成因; 宏观异常; 深部气体

中图分类号: P315.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)01-0096-06

More Discussion on the Relationship between Wenchuan Earthquake and Deep Gas

ZHAG Jing-lian¹, DU Le-tian², CAO Zheng-lin¹, YAN Chun-feng¹, WANG Bin-ting¹

(1. Northwest Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020, China;

2. Beijing Uranium Geology Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: The genesis and mechanism of Wenchuan great earthquake are discussed again. Based on the speech of some people who escaped by the earthquake in the epicentral area, Wenchuan earthquake was caused by deep gas protruding and explosion. The viewpoint mentioned above was proved by some other investigation and survey such as anomalies of satellite thermo-infrared surveying and some macroscopic anomalies before the earthquake. The viewpoint of the relationship between earthquake and gas by some scholars in abroad and in home should be deeply concerned.

Key words: Earthquake; Genesis and mechanism; Macroscopic anomaly; Deep gas

0 前言

汶川地震前的2007年11月, 笔者撰文指出: 四川松潘—甘孜褶皱带深部存在油气资源, 而这种油气与深部地壳的低速、高导层有关^[1]。2008年5月12日汶川地震后, 笔者在上文基础上综合陕西渭河盆地、宁夏六盘山盆地、银川盆地的地震及渤海湾盆地海城地震、唐山地震等实例, 进一步讨论了这些地震与中地壳低速、高导层的关系, 并指出: 地震区多为油气区, 汶川地震更是如此, 汶川地震与中地壳低速、高导层的天然气有关^[2]。

在汶川地震后2年的时间里, 国内地震学者及

相关学科的研究人员对汶川地震从不同角度讨论了地震的成因及机理, 发表了很多颇有见地的论文^[3-5]。文献[3]注意到龙门山块体下地壳的低速体, 但没有弄清它与地震的成因关系。

“气体致震”的机理是非主流观点, 目前还不被主流学派承认, 笔者认为有必要做进一步讨论。本文是笔者在文献[2]基础上, 根据新近收集到的一些证据和其它历史地震资料, 以及国际上的最新研究动向, 进一步阐述“气体致震”的观点。

1 汶川地震震中现场的调查

收稿日期: 2010-05-10

作者简介: 张景廉(1941—), 男(汉族), 江苏常熟人, 从事油气地球化学与成因研究。

2008年5月12日汶川地震后,有成千上万的科技工作者奔赴现场进行调查研究。这些调查研究多侧重于地质构造的研究,但也有一些注意到了某些特别的宏观震害现象。如贵州省地矿检测中心的曾明果等注意到 CCTV-1 的现场报道:幸存者指着满沟乱石说“这么多石头都是从地洞里像大炮一样打出来的,不是垮山垮的……”。曾明果等为了查证上述说法,曾数次去映秀镇蔡家杠村牛眠沟和莲花心沟,查询了“5·12”地震爆发时幸存的村民。村民“众口一词”地述说了当时场景(现全文录下):“5·12”上午大晴天,10点天空发昏,溪水带煤油味;中午天转昏暗,下午两点过天昏黑;2点28分沟北头三声震耳欲聋闷响,数秒钟内拖着黑烟闪着火光的石流铺天盖地从半空中抛射向东边1500m外的牛眠沟,瞬间2000万 m^3 石粉夹杂直径数米巨砾填满了两条共2.5km山谷,将30余户房屋及当时在家村民全数埋在数十米厚喷发石流下。面积数十平方公里的昏黑烟罩里,人们头顶白灰,能见度不足50m。映秀镇索桥下半断流岷江底部,喷涌出高1m黑水翻滚向上游倒流;至夜黑烟未净,空中仍存硫磺味;19时强烈余震,填平的沟壑中从未见过的花岗岩块仍带余温;零时近1小时瓢泼大雨,黑烟散净。5月13日下午强烈余震接连不止^[6]。

笔者认为这段描述有如下几点值得重视:(1)溪水带煤油味(含烃);(2)三声震耳欲聋闷响(爆炸);(3)拖着黑烟闪着火光(燃烧);(4)岩石流从空中抛射向东边1500m外(冲击力之大);(5)2000万 m^3 石粉夹杂直径数米巨砾填满了两条共2.5km山谷(冲击力之大);(6)数十平方公里黑烟笼罩(燃烧);(7)岷江底部喷涌出高1m黑水翻滚向上游倒流(气体喷涌);(8)至夜黑烟未净,空中仍存硫磺味(含硫)。

这些活生生的证据明白无误地证实了汶川地震是气体爆炸所造成的。这些气体中含有烃类气体、含硫;这种爆炸犹如煤矿坑道中的“瓦斯突出”或“ CO_2 突出”,其爆炸力、冲击力是十分惊人的,也唯有高压气体才有如此的冲击力。地震过程中的喷火、闪光、火球及爆炸现象表明地震喷发的气体往往是易燃的,可能来自地球深部的甲烷等气体。

曾明果后来补充道,震中曾由于高压气体爆炸发生连续声响;震中的巨厚花岗岩被炸成细粉及砾石(含巨砾);天然气喷发的流体每秒达几百万立方米;并把2000万立方米的石块喷出千米之外,震中由于甲烷气燃烧,黑烟笼罩面积达数十平方公里,局

部喷涌黑水,并带油味^[7]。

无独有偶,此类现象还可在龙门山构造带的其它几次地震中看到。1976年5月29日发生的云南龙陵 $M=7.5$ 地震,震源深度20km,在临震和发震时沿构造带分布出现大量火球和闪光,由于裂缝中冒火、发光,将基岩烧红。1976年8月16日四川松潘 $M=7.2$ 地震,震源深度10~20km,震前出现大量火球,并烧毁一些农作物。地震时发生四处冒火,火球的分布与构造带相当,沿断层分布^[8]。笔者在2008年撰写“汶川大地震与中地壳低速高导层的成因关系初探”^[2]一文时曾引用了1933年8月25日茂县地震发生时的情景:“中午,天空中突然冒出一条火龙,发生霹雳一声巨响,大地开始强烈晃动,地震发出巨大响声……”^[2]。同处龙门山褶皱带的几次地震发生情景何其相似乃尔!请那些“构造运动致震论”的专家读一下曾明果等的这两篇文章。

李德威明确提出,板块构造学说不能解释汶川的板内地震,汶川地震与太平洋板块和印度洋板块的作用没有直接关系;他注意到大陆下地壳的低速异常带,并提出层流构造假说来解释大陆板内地震;并认为地壳分层作用及其断裂活动会产生释放 CO_2 、 CH_4 、 H_2 、 N_2 等,并产生热异常,从而可检测预报地震^[9]。他的观点与笔者是一致的,但对下地壳低速异常的成因及气体的来源等观点不尽相同。

罗文行、李德威等对青藏高原板内地震震源深度分布统计表明:地震集中分布于中地壳10~40km范围内,其中30~33km深度为峰值。并认为:“青藏高原地震震源显然不是沿着青藏高原某一早已消亡的板块碰撞带或俯冲带分布,而是沿着地壳内活动的壳层之间分布”^[10]。我们认为上述深度恰是青藏高原的中地壳。这与我们在文献^[2]中所列举的实例是一致的。

2010年4月14日青海玉树发生7.1级地震。目前尚无玉树地震成因分析。据共和—玉树地震剖面,玉树地区深14~21km有一低速层, V_p 为5.8km/s,14km以上的 V_p 为6.1km/s,而21km以下的 V_p 为6.1km/s^[11]。玉树地震的震源深度为14km(以前认定为33km),这个深度与我们上述的低速层的深度是一致的^[12]。

中科院地质与地球物理所白登海研究员等人在东喜马拉雅山构造结及周围地区实施了连续六年的大地电磁观测,获得了青藏高原东部岩石圈电性结构的初步认识。观测结果发现,青藏高原存在两条巨大的中下地壳低阻异常带,通过理论计算认为是

两条中下地壳的弱物质流:一条从拉萨地块沿雅鲁藏布江缝合带向东延伸,环绕东喜马拉雅构造结向南转折,最后通过腾冲火山;另一条从羌塘地体沿金沙江断裂带、鲜水河断裂带向东延伸,在四川盆地西缘转向南,最后通过小江断裂和红河断裂之间的川滇菱形地块。结合地面构造及GPS观测成果,他们提出了该区岩石圈“双地壳+边界剪切”变形的新模式。该模型认为青藏高原深部以两个中下地壳弱物质流的快速塑性变形为主,上地壳则以南北两个边界断层(异常体的边界,即雅鲁藏布缝合带和金沙江—鲜水河断裂带)的走滑变形为主^[13]。笔者认为,这种弱物质流也就是“塑性层”,是一种充满气体、液体的低速高导层(低阻层)。汶川地震与松潘—甘孜褶皱带的鲜水河断裂系有关。这种中下地壳的双低阻异常带,我们在渤海湾盆地也是见到过的。

中国科学院遥感应用研究所邵芸谈到“一些科学家到震区实地作了调查,认为这里的气体起了很重要的作用,地震中有一定气体爆炸,像气浪一样把物质喷发出来的”。并指出:“汶川大地震造成的滑坡之多,规模之大,危害之重,史所罕见。如此多的物质运移显然需要巨大的能量,而仅仅是地震所提供如此多能量吗?显然需要更为深入的研究,才能更合理地解释发生于地震灾区的这些巨型灾难的滑坡。”^[14]

《科学时报》首席评论员王中宇于2009年5月26日在《科学时报》撰文谈地震的预测方法,文中花了相当的篇幅引述了笔者在文献[1]、[2]中的主要内容。

据2009年2月12日新华网,中国地质大学王成善根据当地老乡的发现,认为四川青川县青竹河红光乡东河口村至前进乡黑家段的可燃气体为天然气(并有硫磺味),显然这是由于“5·12”地震使原有气藏构造破坏而逃逸到地表的气苗。笔者认为如果进行地球化学测量,可能还有更多的油气苗被发现。另据东方卫视2010年6月14日报道,北川陈家坝乡龙坪村一座大山地震时被崩塌,“飞”过河岸形成巨大堆积体。自地震发生至今2年多,这里一直在往外冒烟,岩石温度超过了200度。看来这是天然气在燃烧。

2 地震前的卫星热红外异常

强祖基等多次在地震发生前7~9天探测到大面积卫星热红外亮温增温现象,并将这一技术成功

地应用到地震短临预报中。他们认为临震前卫星热红外亮温增温异常现象是地球排气作用的结果^[15-19]。

魏乐军等利用我国FY-2C红外一波段(10.3~11.3 μm)的卫星遥感图像发现“5·12”汶川地震前出现了明显的孤立的卫星热红外异常现象^[20-21]。北京师范大学减灾与应急管理研究院985工程首席科学家吴立新对汶川地震前10天的卫星热红外图像研究也发现有异常(北京科技报,2008-06-18)。

这些实例表明,地球排气放热不仅仅是地震的结果,更是地震发生的原因。虞震东认为如果地壳低速层的波速降低(即高温区温度升高)相当程度,可引起大地震,但这个阈值到底是多少有待于今后观测资料的积累^[22]。

3 中国典型强震前宏观异常——气体喷出

震前宏观异常通常可分为动物、地下水、气象、地气味、地光和地声5种^[23]。但是这些宏观异常中起主导作用的是气体异常与喷出,是它影响了动物异常反应,并引起地下水的喷涌及含量异常,还会导致气象(暴雨等)异常;气体异常与喷出也导致了地气味、地光和地声的出现。以下介绍一些大地震前的气体异常现象。

3.1 1975年海城地震前的气体异常^[23]

观察表明地气味异常与断裂带有关。如在丹东附近异常沿鸭绿江断裂成串分布;在辽阳至本溪异常成带状沿太子河断裂分布;在断裂交错的下辽河平原异常呈大片状分布。出现地光较多的地区主要是营口、海城、以及下辽河平原一带。

1975年1月24日凤城县有一群小学生上午10时进山拾柴,在锅台沟看见有一股一股的白色气体往外冒,于是立即跑回家告诉大人,家长12时赶到现场时,冒气现象依然存在。1975年2月4日傍晚有的公路地段上冒出股股白气;有人亲眼看到地面到处冒气,骤起大雾,并且嗅到划火柴似的气味;也有一些人看见雾气象海潮涌来一样,一潮接一潮。海城镇一位张女士1975年2月4日晚地震时往外跑,在距县招待所10 m远处见一道白光,随继看见火球状红光由地面直冲天空,与此同时听到地裂声响,闻到怪气味。该镇另一位姓蒋的人在当晚地震时,在向外跑中踩到一条宽1 cm的裂缝,当时看见从裂缝里冒出高约10 cm的蓝白色火花。由于海城地震发生在冬天,所以地下气体上升到地表冷却即

形成白色浓雾。

3.2 1976年唐山大地震的大火燃烧

由于唐山大地震发生在深夜,目击者很少有报道。但唐山地震后,国家地震局、中国科学院等有关部门迅即赶到现场进行调查,发现现场黑乎乎一片,到处是大火燃烧的痕迹。显然地震发生过程中有(天然气)燃烧(周新华面告,2009)。2009年3月19日汤加大地震,震中的黑蘑菇状烟云(CCTV视频)也是这种气体爆炸的燃烧(不完全)的真实场景!

3.3 1966年邢台地震

1966年6月8日邢台6.8级地震前,河北省南部47个县市有地声,11个县市发现地光,天空出现火光,白光,蓝光,暗红光。3月22日7.2级地震前,38个县市有地声,9个县市有发光现象^[24]。

3.4 1920年海原大地震

1920年12月16日20时6分宁夏海原发生8.5级地震。有关海原大地震的传说保存下来的不多,但有一则很重要:“地震时,有一个农村妇女抱着婴儿坐在炕上,一阵地动山摇之后,她还不知道发生了什么事,一阵冷风吹来,她抬头一看,看见的是满天星斗,不知房顶掀到什么地方去了。”(据《古潜山》2009,(1):53-54)显然这是一阵巨气流把房顶刮走了。

3.5 清朝康熙年间的4次7级以上地震

我们再来回溯一下清朝康熙年间发生的4次7级以上大地震:1668年山东郯城8.5级地震、1679年京师8级地震、1695年山西临汾8级地震和1709年宁夏中卫7级地震。康熙在去世前一年(即1721年)曾专门写了一篇关于地震的文章,说:“大凡地震,皆有积气而所致”,“既震之后,积气已发,断无再大震之理”。(见马承钧,《重庆晚报》2009年2月12日)。尽管康熙不是地震学家,但他亲历了4次7级以上大地震,读了不少地方呈送上的奏折,他的这些话至今仍有重要的参考价值。

3.6 国外相关报道

全世界每年发生数以万计的大大小的地震,伴随着地震有大量气体释放与排出却不为人们所知道。夜间地震时有发生,发生时有巨响,这是气体爆炸;地震前动物往往有奇异行为,可能是气体渗漏溢出所致,一些动物对气体(如 H_2S 等)十分敏感。1960年智利大地震时沿岸450 km地带的观察者报告说大海沸腾,显然这是地震事发的天然气在作怪。一些海啸的巨大破坏力也可以这样来理解。1970年高加索山区发生6.6级地震时,气体采样发现大

气中甲烷、二氧化碳浓度呈1~3个数量级增加,而氢气则是4个数量级增加。1981年格鲁吉亚发生4.2级地震,巴库大气中甲烷的浓度比正常值高了1倍。另据报道,2004年12月21日苏门答腊发生8.7级地震,2005年3月28日东南亚发生8.5级地震,在震前均有大量放气现象。

Gold指出,由于大地震而释放的气体是地球排气作用的一部分,他估计每年由于地震而排出的甲烷气体约 $100\sim300\times10^8\text{ m}^3$ ^[25]。据汪成民^[26]等,我国唐山、海城、大同等地震前后井水中及大气中氢气浓度均急剧增加。

需要指出的是,以往的报道通常认为气体排放是地震发生时的伴生现象,而我们的研究表明,正是气体导致了地震的发生^[2],至少有相当一部分的地震与中地壳的气体有关。遗憾的是这一观点尚不被接受和重视,当然也不会有课题对这类气体进行采集与相关研究。

4 俄罗斯学者对地震与深部流体、气体相互关系的观点

2002年独联体的学者在莫斯科召开了《地球排气作用:地球动力学、地球流体,石油与天然气》的学术讨论会^[27]。其中有一些学者专门讨论了地震与深部流体(气体)的关系。俄罗斯莫斯科全俄矿物原料科学研究所的普罗宁等指出:深部流体的高能转变是地震和其他(脉冲)式地质灾害的主要成因之一,他们包括绝热膨胀沸腾,化学爆炸反应,高压下重烃分解;还会引发煤矿、金属矿区甲烷等天然气的爆炸及有毒物质向水圈、大气圈排放以及海啸、地下水动态急剧变化,滑坡等工程地质现^[27]。

俄罗斯科学院地球物理所帕夫连科娃认为地球流体可形成高热流岩浆、火山及喷气以及地震活动^[27]。

西伯利亚地质、地球物理和矿物原材料科学研究所叶皮法诺夫指出,1908年6月30日清晨在西伯利亚发生的通古斯事件(相当于50个百万吨级氢弹爆炸,冲击波遍及全球,爆炸中心大于15 km半径内的森林全部烧光……)与地震排烃有关。通古斯爆炸是震惊世界的重大灾变事件^[27]。

前苏联的别尔基切夫斯基等通过研究,贝加尔裂谷事件20 km深度的一次强震的余震分布证明,应力在15~20 km的深度沿着水平方向释放,和壳内高导低速层有相关关系(转引自毛桐恩等^[28])。

5 结束语

杜乐天从“烃碱地幔流体”,“地球5个气圈”,“气体地球动力学”到“从固体地球观要向流体(特别是气体)地球观进行概念更新”等一系列重大理论创新的基础上^[29-33],深刻指出:“很明显,如果忽视地球内部气体(哪怕只占地球的1%体积)及地球排气作用,就不可能找到大地构造运动及海陆形成的真正内因;就不可能发现中地壳和上地幔还存在尚待开发的巨大油气资源;不可能破译众多重大自然灾害,如地震、大旱、大水(来自突发的特大暴雨)、台风突然转向、森林草原区域性大火、沙漠化、热灾、沙尘暴、霾雾、臭氧洞、厄尔尼诺、赤潮、海啸以及许多海难、空难等等的原因”。“地震是在热动力作用下地球排气中的氢原子、氦原子及氢分子这自然界三大破裂能手在地下岩块的闭锁部位通过气胀气胀使岩块断裂造成的。这已被卫星热红外多年数万张监测图像所证明”。

最近,张之一教授对“地幔流体”作了进一步诠释^[34],他认为:“幔汁一身三任焉,既具有重大的地球化学功能,又具有重大的地球物理和地球动力学功能。幔汁宛若病毒,只要有1%(体积)自下向上的渗入,就是可以使原本为固体的地幔和地壳发生几百万、几千万立方千米体积的腐烂、溃变、肿胀。这是地球内部不安定并将产生各种大地构造动乱的根本原因,是地球动力学中最关键的解谜切入点。幔汁在地球动力学中的奇特作用是‘四两拨千斤’。它的巧妙之处在于量小作用大。通过幔壳溃变以严重降低岩石强度、粘度、密度等,大大加快应变速率,打乱地球内部重力、圈层自转速度与天体作用力三大基本动力之间原来的平衡。在重力、地球自转颤动和天体作用力的联合控制下最终导致大陆漂移、海底扩张、岩浆构造活化、大规模多层球面滑脱、拆离、推覆、逆冲等。值得注意的是国外学者在地球排气作用方面的研究在大方向上与此不谋而合。得出几乎相近的结论。”

目前我们对幔汁的“四两拨千斤”的“特异功能”还知之甚少,对它的重大的地球化学功能、地球物理功能和地球动力学功能尚缺乏深入系统研究。实验地球化学家张荣华在超临界流体的地球化学行为曾做过详细的研究^[35]。胡宝群等对临界状态下的研究表明,水的相变可导致物理化学性质发生突变,并可发生热液成矿作用^[36]。正是在这个意义上,我们要认真践行杜乐天的“气体地球动力学”与“气体地

球观”的科学思路。这必将起到“四两拨千斤”的巨大功能。这里的“四两拨千斤”指的是对地质学各个领域(如岩浆作用、热液作用、变质作用、大地构造学,乃至重大自然灾害的成因等)的彻底革命,而地震学仅是其中的一个分支学科而已。

[参考文献]

- [1] 李碧宁,焦养泉,张景廉. 松潘—甘孜褶皱带的深部地壳构造特征及油气前景[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(6): 655-659.
- [2] 张景廉,杜乐天,张虎权,等. 四川汶川大地震与地层低速, 高导层的成因关系初探[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 405-412.
- [3] 徐锡伟,闻学泽,陈桂华,等. 巴颜克拉地块东部龙田坝断裂带的发现及其大地构造意义[J]. 中国科学, D辑: 地球科学, 2008, 38(5): 529-542.
- [4] 荣代路,李亚荣. 汶川8.0级地震前地震空间相关长度变化特征[J]. 西北地震学报, 2010, 32(1): 54-58.
- [5] 肖武军; 关华平. 汶川8.0级地震以及其它大震前的地电阻率异常特征[J]. 西北地震学报, 2009, 31(4): 349-354.
- [6] 曾明果,悦辉,符广,等. 汶川大地震震中喷发气后的“爆裂式泥火山”场景[J]. 四川地质学报, 2009, 29(2): 250-251.
- [7] 曾明果. 地震的超临界水流体退相爆成因——以汶川大地震震中“爆裂式泥火山”场景为例[J]. 四川地质学报, 2009, 29(3): 371-377.
- [8] 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 225-226.
- [9] 李德威. 大陆板内地震的发震机理与地震预报——以汶川地震为例[J]. 地质科技情报, 2008, 27(5): 1-6.
- [10] 罗文行,李德威,汪校锋. 青藏高原板内地震震源深度分布规律及其成因[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2009, 33(5): 618-626.
- [11] 王有学,钱辉. 青海东部地壳速度结构特征研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 568-579.
- [12] 张景廉,石兰亭,陈启林,等. 柴达木盆地地壳深部构造特征及油气勘探新领域[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 29-36.
- [13] Bai D H, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. Nature Geoscience, 2010, doi: 10. 1038/NGEO830.
- [14] 王卉. 遥感解释捕捉到异常地震信息,有关专家认为需要更深入研究以给出合理解释[N/OL]. 科学时报, 2009-05-19.
- [15] 强祖基,孔会昌,李玲芝,等. 地震与卫星热红外异常——气热说[A]//北京大学地质系编 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集[C]北京:地震出版社, 1998: 176-185.
- [16] 强祖基,徐秀登,贺常恭. 卫星热红外异常与临震前兆[J]. 科学通报, 1998, 35(17): 1324-1326.
- [17] 强祖基,贺常恭,李玲芝,等. 卫星热红外图像亮温异常——短临震兆[J]. 中国科学 D辑, 1998, 28(6): 564-573.
- [18] 强祖基,姚清林,魏乐军,等. 震前卫星红外环应力场特征[J]. 地球学报, 2008, 29(4): 486-494.
- [19] 张元生,沈文荣,徐辉. 青新8.1级地震前卫星热红外异常[J]. 西北地震学报, 2002, 24(1): 1-4.
- [20] 魏乐军,郭坚峰,蔡慧,等. 卫星热红外异常——四川汶川

$M_s8.0$ 大地震短临震兆[J]. 地球学报, 2008, 29(8): 583-591.

[21] 马晓静, 邓志辉, 陈梅花, 等. 从卫星红外亮温与大地热流的关系看地震前的热红外异常[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 246-275.

[22] 虞震东. 汶川 8.0 级地震的根源和成因[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(增刊): 66-71.

[23] 聂永安, 姚兰予, 赵国敏. 大震前宏观异常的机理研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 196-200.

[24] 林乐志. 邢台地震对策及其社会学研究[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 1-484.

[25] Gold T. Terrestrial sources of carbon and earthquake outgasing[J]. Journal of Petroleum Geology, 1979, 1(3): 1-10.

[26] 汪成民. 断层气测量在地震科学中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1991.

[27] 黄学, 牛彦良, 陈树耀, 编译. 地球排气作用, 地球动力学, 地球流体, 石油与天然气[M]. 上海: 上海远东出版社, 2008: 34-35.

[28] 毛桐恩, 刘新美, 姚家榴, 等. 震源层与地震流体[A]// 杨玉荣, 杜乐天等编, 流体地球科学进展[G]. 北京: 地震出版社, 1999: 27-35.

[29] 杜乐天. 地球排气作用——重大自然灾害孕因和地下巨大天然气来源[J]. 中国人口, 资源与环境, 2008, 18(专刊): 584-594.

[30] 杜乐天, 强祖基. 气体致震——一个可能的地震成因[A]// 杨玉荣, 杜乐天等编, 流体地球科学进展[G]. 北京: 地震出版社, 1999: 67-75.

[31] 杜乐天. 地球排气作用——巨大天然气能源和重大自然灾害孕因[J]. 北京: 气象出版社, 2010.

[32] 杜乐天. 从新世纪独联体有关地球排气如油气成因理论进展可得到的启示[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 1-9.

[33] 杜乐天. 对西方当代地球科学理论的怀疑与新见[J]. 地学哲学通讯, 2006(1): 11-18.

[34] 张之一. 石油深部起源研究进展[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(1): 134-138.

[35] 张荣华, 张雪彤, 胡书敏, 等. 中地壳的水—岩作用对相关的地球物理性质影响[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2943-2954.

[36] 胡宝群, 吕古贤, 王方正, 等. 水临界奇异性及其对热流铀成矿作用的意义[J]. 铀矿地质, 2008, 24(3): 129-136.

(上接 75 页)

【参考文献】

[1] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double 2 difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 2000, 90: 1353-1368.

[2] 白玲, 张天中. 多重相对定位法和波形相关校正及其应用[J]. 地震学报, 2003, 25(6): 591-599.

[3] 张碧秀, 汤永安. 沂沭断裂带地壳结构特征[J]. 中国地震, 1988, 4(3): 16-22.

[4] 林能成. 群地震を伴うダイク成長程[D]. 日本东京大学, 2000: 1-147.

[5] 荣代璐, 李亚荣. 基于“双差法”地震精确定位研究 2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级地震的发震断层和发震机制[J]. 西北地震学报, 2004, 26(3): 223-227.

[6] 冯建刚. 利用双差地震定位法对民乐—山丹地震序列重新定位[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 62-65.