

# 地球内部可能利用的天然氢气

杨文采

浙江大学地球科学学院, 杭州 310027

**摘要** 在21世纪,氢能源的应用和氢能产业的发展受到社会的广泛关注。从地球形成历史和地球物理数据来看,地球内部的地核就是一个氢能库。大陆科学钻探的数据表明,大地震产生环绕全球的地震波,使地壳和地幔中的裂隙带活动,地球内部的气体得以释放。地震后地球在放氢气、氦气和甲烷等气体,它们会通过地幔裂隙带上涌到上地壳。如果上地壳有渗透率很低的岩层把上涌气体覆盖起来,就可能成为深层结晶岩中的氢类能源储存库。在中国,青藏高原东部可能有这种深层氢类能源储存库,值得进一步研究。

**关键词** 氢能源;地核;氢能库;放气;地壳储存

19世纪,石油的发现和利用促进了第二次工业革命,改变了世界。21世纪,氢能源的应用和氢能产业的发展,受到社会的广泛关注。目前,作为二次能源的氢,主要应用煤、天然气和电解水来制造,不仅成本很高,制造过程也产生碳排放。其实,地球内部就有一个氢能库,人类有可能直接利用地球内部的氢资源来生产氢,天然氢气也有可能成为今后重要的新能源。

## 1 地球在放气

对于地球内部是否存在大量天然气,地质学家的意见几乎完全一致,答案是肯定的。地质学研究表明,46亿年以前,地球是由太阳中逸出的含氢气云团逐渐演变来的,因此,地球内部(尤其是地球外核)富含多种与生俱来的天然气,并通过岩石中的裂隙

向外放气。台湾南部有个叫“出火”的小村庄,村边的微地裂缝中冒甲烷气,点火之后长年燃烧不熄。在国际大陆科学钻探(ICDP)的深井中,深部大都检测到甲烷、氦气与二氧化碳等天然气异常,而且钻井越深异常越明显,证实了地球放气的学说<sup>[1-6]</sup>。

1998年,笔者随同国际大陆科学钻探专家组参观了德国大陆科学深钻(KTB)的现场,第一次看到从地下8000~9000 m取出的岩心(图1(a)和(b))。原认为这么深的结晶岩会非常致密,其实不然,它们可以有許多孔隙,出乎意料。在KTB的7500 m深度以上随钻测量了气体浓度,其中氢气和甲烷的浓度数据见图1(c)。由图1可见,在7000 m深度,氢气的浓度达到80 mg/L,甲烷的浓度达到800 mg/L。氢气和甲烷的浓度有随地壳深度增加而增加的趋势。

1997—2005年,笔者参加了在江苏省东海县南部开展的中国大陆科学深钻工程(CCSD-1)的运

收稿日期:2023-06-30;修回日期:2023-12-02

基金项目:中国科学院学部咨询评议项目(2022-ZW11-A-0024)

作者简介:杨文采,教授,中国科学院院士,研究方向为地球物理正反演、地球成像和大陆动力学,电子信箱:yangwencai@cashq.ac.cn

引用格式:杨文采. 地球内部可能利用的天然氢气[J]. 科技导报, 2024, 42(15): 7-14; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.06.00994

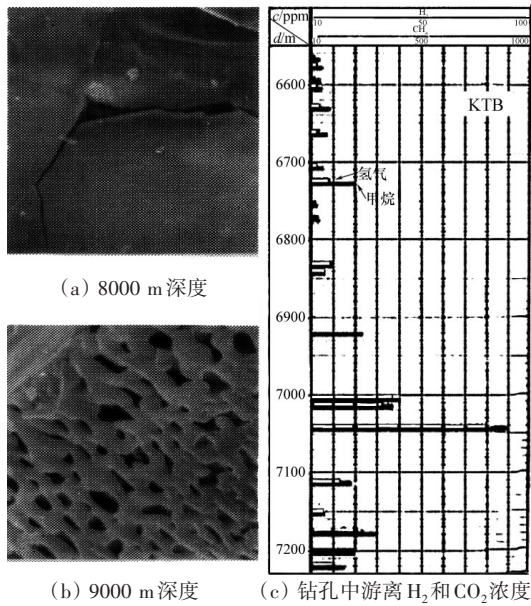
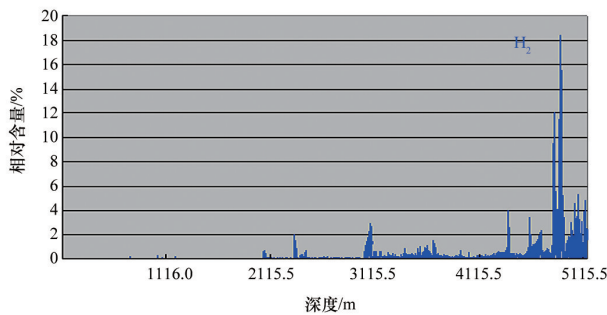


图1 德国KTB深钻岩心照片及钻孔中游离H<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>浓度分析结果

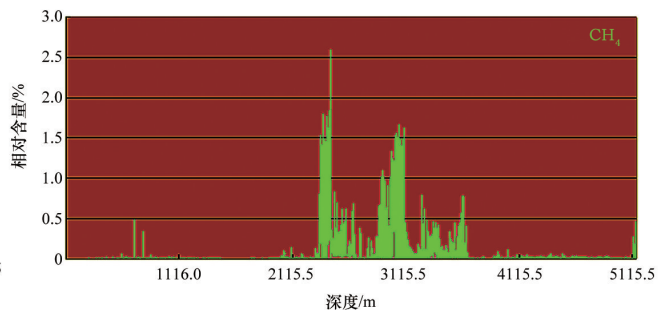
作。在许志琴院士和罗立强研究员领导下,利用这口深钻对地球放气进行了研究<sup>[7-9]</sup>,再次证明了地

球深部放气的认知(图2)。图2(a)为CCSD-1深钻100~5100 m深度岩石中游离氢气相对于地面基准站的含量分析结果。由于氢气的挥发极快,其观测数据从2100 m深度才开始出现异常,此后随深度增加而增加。甲烷是氢气衍生的可燃气,图2(b)为井中游离甲烷气相对于地面基准站的含量分析结果。由图可见,在地下2250~3600 m区段,氢气和甲烷含量都在局部出现高含量异常。

在实施科学钻探期间,笔者设计和实施了以三维反射地震为主导的地球物理调查和地球物理测井<sup>[10-17]</sup>。图2(c)为深钻气体异常区段的井壁照片;虽然岩石是结晶完好的片麻岩,孔裂隙度仅为1%左右,但空隙和裂缝随处可见。图2(d)为过井三维反射地震剖面,强反射带反映了地层中的裂隙发育带(在图中用II、III、IV标明)。由此可见,CCSD-1钻孔穿过的裂隙发育带II和III,对应地下2250~3600 m的氢气、氦气和甲烷高含量异常段,井底接近裂隙发育带IV。这些数据证明,在地下结晶岩



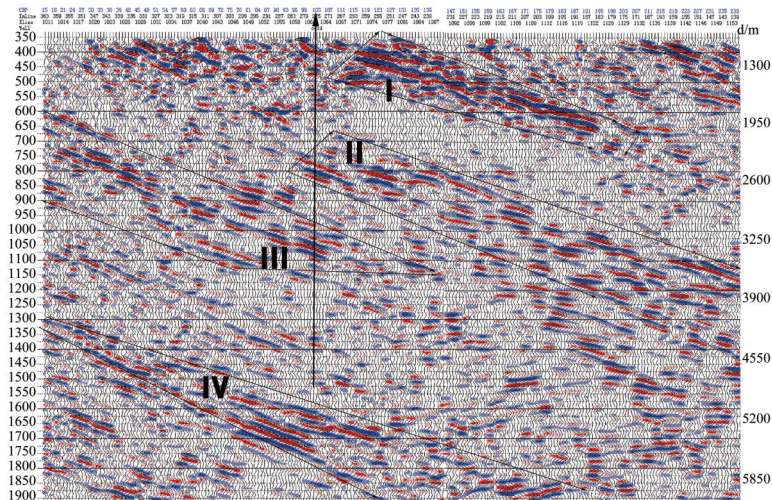
(a) 随钻不同深度游离氢气相对含量分析结果



(b) 随钻不同深度游离甲烷相对含量分析结果



(c) 中国CCSD-1深钻井壁照片



(d) 过CCSD-1深钻的三维反射地震剖面

图2 中国CCSD-1深钻资料

地层中,有因地球内部放气而遗留在孔隙、空隙中的含氢、甲烷等气体。

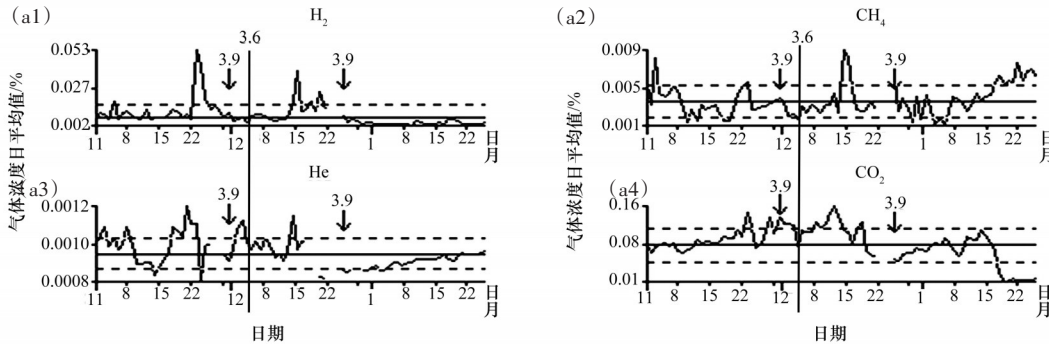
## 2 地球放气的规律

通过对中国大陆科学钻探资料的综合研究,发现在甲烷等气体异常存在的井段,结晶岩石中的微

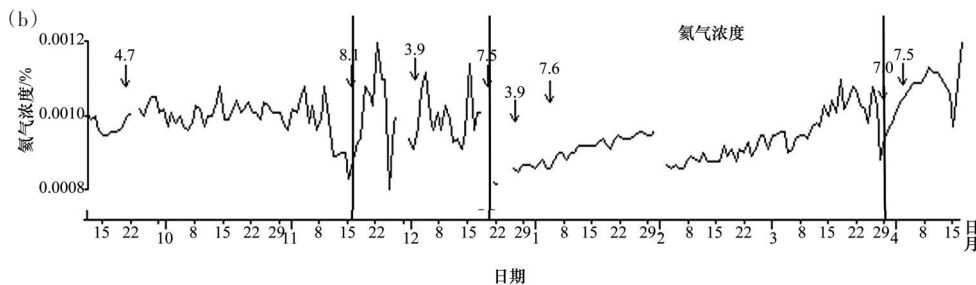
裂隙含气会引起地震波速明显降低,导致充气结晶岩石产生明显的地震反射。更重要的是,长期观测表明,地层中甲烷、氢气与氦气的浓度在地震发生期间有明显变化。

图3为中国大陆科学钻探期间地壳放气与地震关系资料。

图3(a)是2001年11月1日到2002年1月25



地震名称	发生时间	时分秒	纬度/(°)	经度/(°)	震级	距离/km
江苏南通	2001-12-25	07:33:51	N31.92	E120.95	3.9	340
江苏潢川	2001-12-04	07:22:16	N32.22	E115.42	3.6	380
安徽固镇	2001-11-30	08:22:21	N33.42	E117.15	3.9	170



(a) 2001年11月1日到2002年1月25日,观测气体浓度日平均值随时间的变化数据:(a1)氢气,(a2)甲烷,

(a3)氦气和(a4)二氧化碳;在观测期间附近发生了3次邻近的中小地震,日期与震级由箭头标明

(b) 2001年10月—2002年4月,氦气浓度随时间的变化与地震(图中箭头)的对比

地震名称	发生时间	时分秒	纬度/(°)	经度/(°)	震级	距离/km
黄海	2002-03-20	08:19:51	N34.45	E122.63	3.8	360
江苏南通	2001-12-25	07:33:51	N31.92	E120.95	3.9	340
江苏潢川	2001-12-04	07:02:16	N32.22	E115.42	3.6	380
安徽固镇	2001-11-30	08:22:21	N33.42	E117.15	3.9	170
江苏常熟	2001-11-03	17:02:15	N31.77	E120.75	3.7	350
黄海	2001-10-01	11:30:14	N38.00	E121.73	3.5	480
渤海	2001-09-19	16:07:20	N38.17	E119.50	4.7	420
黄海	2001-08-30	12:29:56	N36.57	E121.68	3.5	360

地震名称	发生时间	时分秒	纬度/(°)	经度/(°)	震级	距离/km
台湾以东海中	2002-03-31	14:52:49	N24.40	E122.10	7.5	1150
琉球群岛西南	2002-03-26	11:45:41	N23.40	E124.30	7.0	1330
新赫布里底群岛	2002-01-03	01:22:51	S17.60	E168.00	7.6	7800
琉球群岛西南海中	2001-12-18	12:02:58	N23.90	E123.00	7.5	1250
昆仑山口西	2001-11-14	17:26:13	N36.20	E90.90	8.1	2500

图3 中国大陆科学钻探期间地壳放气与地震关系资料

日期间,观测气体浓度日平均值随时间的变化数据,其中(a1)为氢气,(a2)为甲烷,(a3)为氦气,(a4)为二氧化碳<sup>[7-9]</sup>。在观测期间附近发生了3次中小地震,日期与震级在图中由箭头标明。由此可见,在地震发生前后的20多天,氢气和甲烷的浓度日平均值明显升高,而氦气与二氧化碳在地震后则有先升高后下降的趋势。由此可知,在地震后的几天内,由于地震波传播的影响,使地层中被软沙土堵塞的裂隙松动,为地球放气疏通了气体通道,增加了地层中气体的浓度。当多次地震发生后,裂隙的扩大也会使氦气与二氧化碳等气体迅速逸散,造成气体浓度下降。不过,下一次地震的发生又会造

成气体浓度上升。图3(b)为氦气浓度随时间的变化与地震(图中箭头)的对比。由图3可见,在2001年10月—2002年4月初,地震发生期间,氦气的浓度有明显增高趋势,表明地球表面地震波的传播在促进地球放气。

中国大陆科学钻探在2005年完工后,在原场地建立了地壳运动长期观测站,笔者有幸负责观测站的规划和设计,在主孔旁边增加了700 m深度的浅孔地应力、地磁场、地下水位和氦气观测。图4为菲律宾一次5级地震期间浅孔的观测数据。由图4可见,在主应力方向,菲律宾地震前大陆科学钻探地下压力变化频率加快,地震后地下压力有所

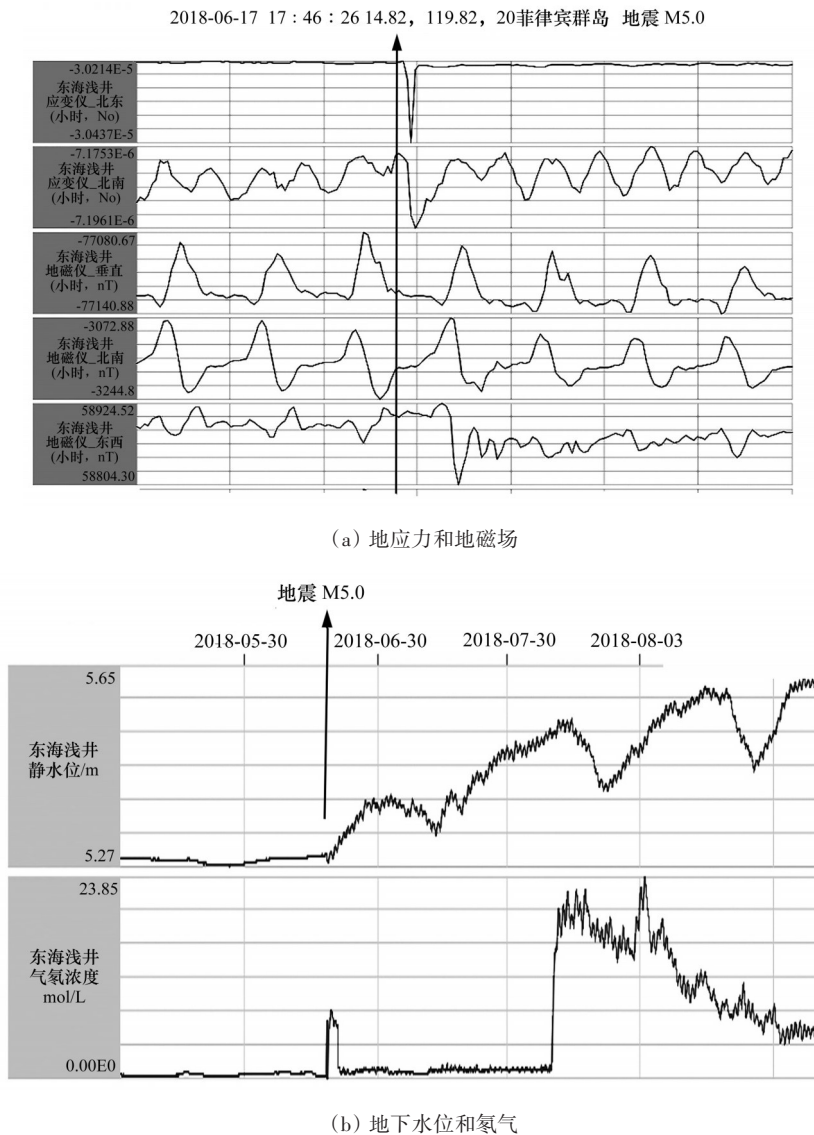
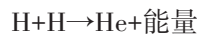


图4 中国大陆科学钻探场地建立的地壳运动长期观测站的观测数据

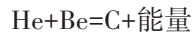
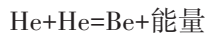
释放,地磁场的水平分量也明显降低。地震波抵达后,地下水位逐渐升高达2个月,氦气也有升高的突变。这些观测数据表明,强地震产生的地震面波在地壳的环绕震荡,对地壳中的流体运动有不可忽视的影响。地球的放气是有规律的<sup>[18]</sup>:大地震产生环绕全球的地震波,使地壳和地幔中的裂隙带活动,地球内部的气体释放。几个月后,地壳中的裂隙又逐渐堵塞,地球的放气又慢慢停止。

### 3 地球内部的氢和流体通道

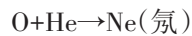
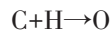
现今的天体物理学认为,宇宙是空间一个能量奇点大爆炸形成的。大爆炸使奇点中浓缩的物质飞向四面八方,并随之降温,而随着降温首先形成了最简单的原子:氢。接着2个氢原子又形成了氦原子:



于是,宇宙中首先有了氢和氦组成的云团,这些云团温度高达上千万度。降温和云团收缩又促使氦原子核碰撞产生了核聚变,这次氦聚变产生了大量铍和碳原子:



接下来的核聚变包括:



镍的衰变又形成钴和铁,这些元素又进一步反应形成各种化合物,如甲烷等。

在47亿年前,宇宙中飘出的一朵含氢和氦的云团在不停地收缩和旋转,太阳系开始形成。在太阳能量的作用下,原始行星中的轻元素物质蒸发并释放出来,又形成了金星、水星、地球和火星等原始行星。到46亿年前,太阳系物质运动开始进入平衡态,9个行星整齐排列在太阳系周围,围绕太阳旋转。现今太阳系行星轨道为同平面上的同心圆,行星轨道距离分布服从波得(Bode)定律:它们

的旋转轨道与太阳的距离是其与向内相邻行星距离的2倍。因此,可以推测在46亿年前太阳系形成后,原始地球含有大量氢、氦等气体和亲石元素硅、镁、磷、铁、铝、钴等。

在万有引力作用下,原始地球以吸积作用主导,以越来越快的速率吸收邻近的物质颗粒而加大自己的质量。在高温下早期地球表层为热熔的熔岩覆盖,高温使水分汽化,气体外逸,硅、钠、铝、钾之类的轻元素上浮,铁、镍等重元素下沉,物质逐渐径向分异。在40亿年前地球形成了大气圈、水圈、固体的地壳和地幔、地核之后,地壳以下保存气体的挥发就减少了。此时地球大气成分主要为氢气和二氧化碳,由于氢气很快挥发到太空,又不断与碳结合成为甲烷,大气中氢气的浓度很快减少。不过,由于固体地壳和地幔的包裹,相当部分的氢仍然保留在地球内部。

地球内外核的横波速度为0,证明它是流体层;地磁场的成因就归因于外核中磁流体的剧烈运动<sup>[19-21]</sup>。地球内核的横波速度很小,表明它不是典型的固体层,应该含有“超流体”。根据物理属性推测,外核可能为富铁熔液悬浮体,含有一定数量的氢、硫、钙的金属氧化物,硅酸盐和放射性物质。可见,地核是一个含氢物质的宝库,最轻的氢原子在地球内部具有浮力,可以通过地幔的流体通道渗入上地壳。

地壳地幔的岩石存在破裂带,它们是融流体的通道。地球海洋的水可从表面通过俯冲带一直渗透到整个上地幔,它们与地核热流体上涌的羽毛状裂隙带连通<sup>[22]</sup>,可构成贯通全部地球的融流体通道网络,使地球物质运动充满活力<sup>[5,20]</sup>。地球内部的融流体通道网存在,可以从地震层析成像的图像上看出来。融流体的存在降低了地震波速度,所以融流通道以低波速异常出现<sup>[23]</sup>。在软流圈物质黏度比较低,物质蠕动速度比较快。地幔羽毛状流体通道(plume)的存在也表明,在地核的氢原子可以进入上地壳为人类利用。但是,流体运动通道与地表水圈和大气圈是连通的,氢气、氦气和甲烷能不能储存在上地壳是一个关键问题。

## 4 上地壳的盖层

从图1~图4已经看到,地球内部的氢气、氦气和甲烷等气体可以进入上地壳;它们同样可能散发到大气圈与太空,不一定储存在上地壳。如果上地壳有渗透率很低的岩层把气体覆盖起来,它们就有可能成为氢类能源的储存区。什么地方的上地壳有渗透率很低的岩层把气体覆盖起来,会成为氢类能源可能的储存区?

根据笔者团队的地震层析成像研究<sup>[24-26]</sup>,青藏高原东部可能是一个发现此类深层气能源储存的远景区。根据岩石物理测定的资料可知<sup>[19]</sup>,地震波速的大幅度降低经常反映地层中流体的提高。图5为青藏高原地壳地震P波波速扰动平面图,深度分别为8、18、28和38 km。比较深度8和18 km的地震波速可见,在青藏高原东部,上地壳浅部与深部的地震波速发生了根本性的反转。上地壳(深度8 km)为大面积的高波速屏蔽盖层,下面的中地壳(深

度18 km)是大面积低波速的含流体层,波速异常从+6%变为-5%。在图5(b)中用黑框圈出地震波速最低的研究区范围,它位于青藏高原的东南部。由此可以猜测,如果研究区低速异常反映了含氢流体的存在,它主要来源于下方。含流体层的埋藏深度在10 km以下。与现今四川开发的天然气藏不同的是,这类能源储存在深度10 km以下的结晶岩裂隙带中,烃类高分子物质成分少,而氢气、氦气和甲烷等气体成分可能比较多。如果可以开发,地球内部还会通过大地震后地震波的作用不断地补充裂隙带中的气体成分,使它们的开发得以长期持续。

上述地球放气并在结晶岩裂隙带中储藏的观念,目前还只是一个初步的科学推测。现在我们还不能认知这些中地壳的流体是什么气体,氢气和甲烷能够占多大比例。钻探到10 km以下的高温高压地层对钻井技术也是一项重大考验。发现和利用深层氢能源的研究如果开始,一定会面临诸多挑战和考验。

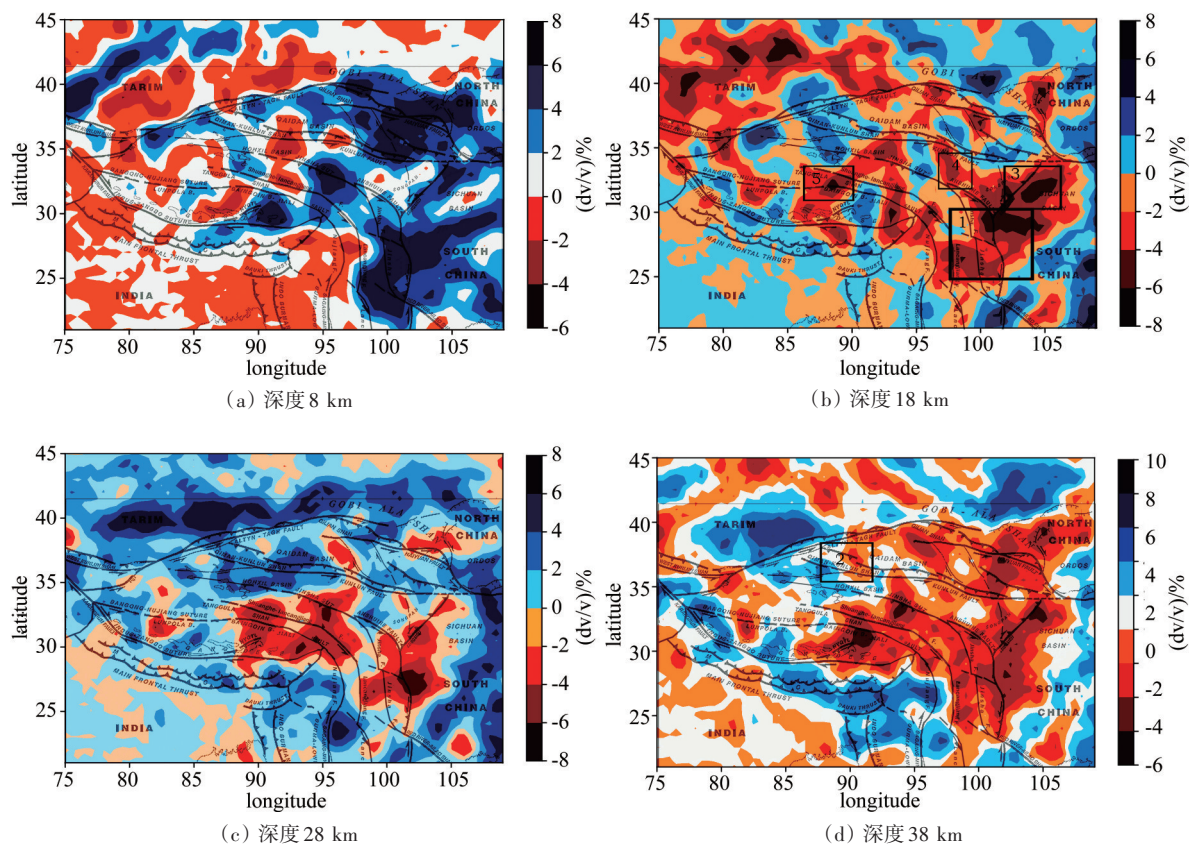


图5 青藏高原地震P波波速扰动三维成像结果

## 5 结论

从地球形成历史和地球物理数据来看,地球内部的地核就是一个氢能库,含氢气体会通过地壳地幔裂隙带上涌到地壳。大陆科学钻探的数据表明,地震后地球在放氢气、氦气和甲烷等气体。大地震产生环绕全球的地震波,使地壳和地幔中的裂隙带活动,地球内部的气体得以释放。如果上地壳有渗透率很低的岩层把上涌气体覆盖起来,就可能成为深层结晶岩中的氢类能源(包括氦和甲烷)储存库。在中国,青藏高原东部有可能属于这种有希望的深层能源储存库。当前,开始开展利用深层氢能源的研究有一定意义。

### 参考文献(References)

- [1] Mitrofanov F P, Yakovlev Y N, Ikorsky S V, et al. A change in composition of rocks, mineral phases and trapped gases in the kola super-deep borehole(SD-3) section of the Archean complex with depth[M]//Fuchs K, Kozlovsky Y A, Kriktsov A I, et al. Super-deep continental drilling and deep geophysical sounding. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990: 353-363.
- [2] Faber E, Gerling P, Dumke I. Gaseous hydrocarbons of unknown origin found while drilling[J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 13(4/5/6): 875-879.
- [3] Faber E. Origin of hydrocarbon gases in the pump-test of the KTB pilot well[J]. *Scientific Drilling*, 1995, 5: 123-128.
- [4] Möller P, Weise S M, Althaus E, et al. Paleofluids and Recent fluids in the upper continental crust: Results from the German Continental Deep Drilling Program (KTB)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8): 18233-18254.
- [5] 杨文采. 全球流体通道网[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(5): 621-633.
- [6] 杨文采, 许志琴. 中国大陆科学钻探孔区深源气通道的地震解释[M]//陈运泰, 滕吉文, 阚荣举, 等. 中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展. 北京: 地震出版社, 2004: 64-73.
- [7] 罗立强, 孙青, 詹秀春. 中国大陆科学钻探主孔0-2000米流体剖面及流体地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1): 185-191.
- [8] 罗立强, 王健, 李松, 等. 中国大陆科学钻探现场分析与地下流体异常识别[J]. *岩矿测试*, 2004, 23(2): 81-86.
- [9] 孙青, 罗立强, 李圣强. 中国大陆科学钻探主孔0-2000米N、Ar和He流体地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1): 179-184.
- [10] 杨文采, 张春贺, 朱光明. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(3): 370-384.
- [11] 杨文采. 大陆科学钻探与中国大陆科学钻探工程[J]. *岩石学报*, 2002, 54(2): 22-25.
- [12] 杨文采, 杨午阳, 金振民, 等. 苏鲁超高压变质带岩石圈的地震组构[J]. *中国科学: D辑*, 2004, 34(4): 307-319.
- [13] 杨文采, 张春贺, 黄秋平, 等. 线形区域的主辅线反射地震调查方法[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(6): 1325-1335.
- [14] 杨文采, 刘光林, 杨锴, 等. 中国大陆科学钻探孔区全观式三维地震采集[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 735-744.
- [15] 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区地震反射的标定[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1682-1692.
- [16] 杨文采, 许志琴, 于常青. 上地壳副片麻岩的反射属性[J]. *中国科学: D辑*, 2007, 37(11): 1425-1432.
- [17] 杨文采, 金振民, 于常青. 结晶岩中天然气异常的地震响应[J]. *中国科学: D辑*, 2008(9): 1057-1067.
- [18] Zeng X Z, Yang W C. Impact of post-earthquake seismic waves on the terrestrial environment[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(14): 6606.
- [19] Condie K C. Mantle plumes and their record in earth history[M]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [20] Mégnin C, Romanowicz B. The three-dimensional shear velocity structure of the mantle from the inversion of body, surface and higher-mode waveforms[J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 143(3): 709-728.
- [21] 杨文采, 于常青. 从亚洲S波波速结构看地幔流体运动特征[J]. *地质学报*, 2011, 85(9): 1399-1408.
- [22] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. The rock physics handbook[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [23] 杨文采, 张学民, 于常青. 华北东部上地幔破裂带[J].

- 地质学报, 2007, 81(10): 1305-1313.
- [24] 杨文采, 瞿辰, 任浩然, 等. 青藏高原地壳地震纵波速度的层析成像[J]. 地质论评, 2019, 65(1): 2-14.
- [25] 杨文采, 曾祥芝. 认知地球物质运动的大陆动力学方法[J]. 地质论评, 2020, 66(1): 1-12.
- [26] 杨文采, 刘晓宇, 陈召曦, 等. 从高分辨率地震层析成像看青藏高原软流圈的物质运动[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3491-3500.

## The natural hydrogen inside the Earth

YANG Wencai

School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract** In the 21st century, the application of hydrogen energy and development of hydrogen energy industry have received extensive attention from the society. From the history of the Earth formation and geophysical data, the Earth's interior is a hydrogen energy reservoir. Data from Continental Science drilling suggest that large earthquakes may generate seismic waves that surround the globe and move fracture zones in the Earth's crust and mantle to release gas from the Earth's interior. After earthquakes, the Earth can release gases such as hydrogen, helium and methane, which will rush up through the mantle fracture zones to the upper crust. If there are rock layers with low permeability in the upper crust covering the upwelling gas, they may become a hydrogen energy reservoir in the deep crystalline rock. In China, there may be such deep hydrogen energy storage in the eastern Qinghai-Tibet Plateau, which deserves further study.

**Keywords** hydrogen energy; core; hydrogen energy storage; crustal degassing; reserve ●



(责任编辑 王丽娜)