

doi:10.3799/dqkx.2015.166

干热岩地热能研究与开发的若干重大问题

李德威¹, 王焰新²

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 在大陆动力学和地球系统动力学创新思想指导下, 干热岩地热能的开发将对未来的能源革命和工业革命起到关键的作用, 然而目前干热岩地质理论研究十分薄弱。从地质学和经济学的角度讨论干热岩的定义; 以大陆盆山热构造系统为基础, 提出地热能综合分类方案; 根据岩石流变学和构造物理学理论, 探讨在固态、半固态流变环境下干热岩的构造岩石系统; 在活动盆山构造系统地壳四维非均匀流变思想指导下, 探讨干热岩的分布规律和形成机理; 提出将地球系统动力学的思想贯穿到干热岩及其关联的资源、灾害、环境、工程地质的调查研究与应用的各个环节之中, 并建议在华北、青藏高原及其邻区、东南沿海、台湾 4 种不同类型的热构造活动区进行联合勘查、综合评价与系统开发。

关键词: 干热岩; 非均匀流变; 联合勘查; 综合开发; 地热; 地球系统动力学。

中图分类号: P51

文章编号: 1000-2383(2015)11-1858-12

收稿日期: 2015-02-11

Major Issues of Research and Development of Hot Dry Rock Geothermal Energy

Li Dewei¹, Wang Yanxin²

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Development of hot dry rock geothermal energy under the guidance of continental dynamics and earth system dynamics plays a key role in the ongoing energy revolution and industrial revolution. However, theoretical study on the hot dry rock geology is still very weak. In this paper, we discuss the definition of hot dry rock from the perspectives of geology and economics, propose a comprehensive classification of geothermal energy based on basin-orogen thermal tectonic system, and analyze the tectonic and petrological system of hot dry rocks in the solid and semi-solid rheological behavior according to rock rheology and tectonophysics. Under the guidance of four-dimensional non-uniform rheological property of active basin-orogen tectonic system, the spatial distribution and mechanism of hot dry rocks are discussed. It is suggested that the theories of earth system dynamics should be integrated in theoretical and applied studies of hot dry rock within the framework of related earth resources, geohazards, geoenvironments and engineering geology. In addition, an integrated exploration, assessment and development of hot dry rock geothermal energy should be carried out in the North China, the Tibetan plateau and its adjacent areas, the coast regions of Southeast China and Taiwan, which respectively belong to four different types of tectonically active geothermal units.

Key words: hot dry rock; non-uniform rheology; joint exploration; comprehensive assessment; geothermy; earth system dynamics.

能源问题已逐渐成为制约我国经济和社会发展的重要因素。能源生产和消费革命的根本出路在于可再生清洁能源。与煤、石油、天然气、页岩气和核能相比, 地热能是取之不尽的可再生清洁能源。与太阳

能、风能等可再生能源相比, 地热能具有稳定(不受季节和昼夜变化的影响)、利用率高(地热发电利用效率可超过 73%, 是太阳光伏发电的 5.2 倍、风力发电的 3.5 倍)、安全、运行成本低、可综合利用(发

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos. 1212011121246, 1212011220400); 国家自然科学基金项目(No. 41172188); 油气资源与探测国家重点实验室开放基金项目(No. KFKT2010-5)。

作者简介: 李德威(1962—), 男, 教授, 主要从事构造地质学、大地构造学及其在能源、灾害中的应用研究。E-mail: dewei89@sina.com

引用格式: 李德威, 王焰新, 2015. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题, 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1858-1869.

电、取暖、洗浴、养殖、融雪、城市热水供应)等优越性,极为重要的是地热开发本身还具有减灾减排功能,可打造树枝状多元产业链(李德威, 2012a, 2014a, 2014b). 干热岩地热能(又称为增强型地热系统)具有能量大、分布广、利用率极高、安全性好、无污染、不需尾水回灌、拥有优质资源的大陆边缘海盆、发电站效能高用地省、热能稳定持续、发电可控性强、减灾减排效果好等特点,是地热能开发的重要目标。

早在 20 世纪 70 年代初,美国 Los Alamos 国家实验室原子物理学家们就形成了干热岩地热能的构想,提出利用地下 5 000 m 以下广泛分布的无水热能进行发电(Smith, 1973; Tenzer, 2001). 至今美国、澳大利亚、英国、德国、法国、日本、瑞士、瑞典等国家开展了干热岩发电试验和商业运作(Bertani, 2012).

我国有关干热岩的工作起步较晚,近年来的进展主要集中在钻井、压裂、微地震监测、数值模拟、资源量评价、碳储存技术等方面(许天福等, 2012; Feng *et al.*, 2014). 可喜的是,最近,在笔者参与下,青海省水文地质工程地质环境地质调查院在共和盆地恰卜恰镇首次成功勘探到干热岩,到 2014 年 8 月底,DR3 井已钻进至 2 927 m,孔底温度为 176 °C.

目前,国内外还没有实现干热岩地热能大规模梯级发电,干热岩的成因、分布、勘探、评价、选区、开发、综合利用等方面的研究极为薄弱,很多领域仍是空白,特别是在干热岩地热能的孕育环境、热构造系统、分布规律、形成机理、热储性质、勘查思路、能量评估、大规模开发及其与矿产、油气、灾害、环境、水文、工程的关联性等方面急需加强研究. 本文基于大陆动力学和地球系统动力学新认识,初步分析和探讨干热岩地热能研究和应用一系列重大科学问题,为完善和发展地球系统动力学、理论地热学、实验地热学和应用地热的思想体系奠定基础,期望有助于促进我国干热岩地热能的开发和实现跨越式发展,为能源结构调整、生态环境优化和产业转型升级奠定地学理论基础.

1 干热岩定义

干热岩被提出后经过 40 年的研究与应用,已经取得较大的发展(Brown *et al.*, 2012). 目前比较认同的干热岩定义是一种不含水或蒸气、埋深为 3~10 km、温度为 150~650 °C 的致密热岩体.

对干热岩定义的理解和认识必然影响到干热岩从研究到开发的整个过程. 干热岩的基本含义应当

考虑其客观性、科学性、可行性和经济性,可分为广义干热岩和狭义干热岩. 广义干热岩主要考虑其客观性和科学性,不必强调干热岩地热能开发的经济性和可行性,可定义为:流体含量很少、温度为 150~400 °C 的储热岩石. 需要说明的是:(1)对于硅铝质地壳岩石,韧性变形温度一般为 300~400 °C,因此,在地下 150~400 °C 的区域不可能没有任何气体和液体,初步估计 350~400 °C 的地壳构造层次韧性变形岩石中流体含量可能达到 10% 左右,处于半固态韧性流变状态,仍然具有干热岩性质. 当温度超过 400 °C,地壳某些岩石将发生部分熔融,流体含量增加,将失去干热岩特性. 温度小于 150 °C,失去干热岩地热能的高温特性;(2)与热储深度、构造单元、活动性控热构造关系不大,大陆大部分地区都可能存在这类干热岩,只是线性热隆伸展区(如汾渭地堑和东非裂谷)干热岩出现在地壳较浅层次,而前寒武纪形成的、现在已经夷平的古造山带(如西澳大利亚地盾、加拿大地盾)经过长期的热耗散,软流圈的热活动性很弱,地温梯度一般小于 10 °C/km,干热岩出现在地壳中下部,而且上地幔顶部和上部也处于干热状态.

狭义干热岩是指作为地热能开发对象的干热岩,除客观性和科学性外,必须考虑地热能发电的经济性和可行性,定义为:流体含量少、埋深为 3~8 km、温度为 200~350 °C、与活动性半固态、固态流变构造相关的岩石. 进一步做如下说明:(1)考虑到目前的科技水平和发展势态,将作为地热能开采的干热岩埋深定为地下 8 km 之内;(2)干热岩温度太低,发电能量不足,因此,限定在 200 °C 以上;另一方面,对于 350~400 °C 的地壳韧性变形岩石,属于固态流变型干热岩,尽管热储能量十分充足,但是温度和深度双重因素导致钻探难度大,而且韧性热储内难以产生热交换介质(H₂O 和 CO₂)流经的人工破裂网络系统. 如果钻孔不易进入高温热储,高温热储中又没有良好的介质换热通道,那么,不易从优质热储中直接开采热能. 此外,温度过高导致换热介质与运行机械随着运行时间延长出现异常物理和化学变化,影响发电设备的寿命. 因此,目前的技术水平和经济成本不能够支撑 350~400 °C 的干热岩开发,只需开采从活动性韧性剪切带向上传导的地热能,未来随着科技水平的不断提高,有可能开发这个温度区间的干热岩地热能,甚至利用高达 400~500 °C 具有半固态流变性质的准干热岩地热能,取得更好的地热能发电及其减灾减排效果;(3)Brown *et al.* (2012)认为干热岩几乎遍布全球. 这种认识只适合

于广义干热岩,对于狭义干热岩,应当分布在地球热构造活动强烈、深部热源长期动态演变的地壳热异常区。大量地质事实表明,有生命力的地球是通过四维非均匀的热结构和热演化维系其动态平衡(李德威, 1995a, 1995b, 2005a, 2011, 2012a, 2013, 2014a, 2014b),活动的洋陆体系及其关联的盆山体系具有分层、分块和分时差异流变特征,在现今热活动强烈的构造区带必然存在正在进行的半固态和固态流变及其韧性变形,这种流体少、活性强、能量大、以水平运动为特征的活动韧性剪切带应当是干热岩地热能的构造背景,其上持续吸热的韧—脆性和脆—韧性构造岩石组合才是干热岩热储;(4) Tenzer(2001)强调干热岩地热能赋存于花岗岩类岩体中,但是与活动地壳非均匀半固态、固态流变有关的岩石不一定是地质历史上形成的花岗岩,可以是区域变质岩、动力变质岩和沉积岩,在活动韧—脆性变形带还可能出现新生的构造岩,但是厚度巨大、孔隙发育、渗水性好的沉积岩不宜作为热储岩石,而热导率小、颗粒细、孔隙度低、裂隙少的沉积层则是热储之上地热能良好的盖层;(5)热储及其人工破裂网络系统要有足够的规模,才能保证换热介质流量和发电量大。

2 地热分类

目前流行的地热划分方案主要有以下几种:(1)根据温度分为3类:温度小于90℃为低温地热能;

温度90~150℃为中温地热能;温度大于150℃为高温地热能。(2)根据地热的性质和热储赋存状态,分为5种类型:热水型、蒸汽型、地压型、干热岩型和岩浆型。地压型地热一般是处于地壳较深部高压环境的热能,常与甲烷、热卤水伴生,与其他类型的地热在划分标准和内涵属性上不协调。(3)根据地热的传递方式,分成两大类,再根据地质特征分出亚类。Moeck(2014)将地热分为以对流为主的地热活动系统和以传导为主的地热活动系统,前者再分为岩浆型(包括火山型和深成型)和非岩浆型;后者分为火成岩—基岩型和非岩浆型(包括克拉通盆地型和造山带型)。

上述3种划分方案各有侧重,从第1种至第3种分类,地热地质的因素不断加强。从地质角度划分地热类型是地热分类的发展方向。但是, Moeck(2014)分类法不够简明,略显混乱。对于大类划分,岩浆活动和非岩浆活动均存在不同程度的热流体运动,很难截然划分出热对流和热传导;对于亚类划分,对流和传导都包含岩浆(或火成)型和非岩浆型,热构造单元和地质属性不明确,实际应用难掌握。而且,这种划分方案没有体现出地质与地热密切相关的时空结构及其形成机理。

笔者综合考虑地热能形成的大地构造环境(活动盆山三维热结构及圈层耦合)、控热构造(从岩石熔融到脆性断裂)、温度(或深度)变化和热储性质(固态、液态、气态),提出一个全新的地热分类方案,将地热能分为浆热型、干热型、水热型、气热型和混合型(图1),其要点如下:陆内地热主要产于活动的

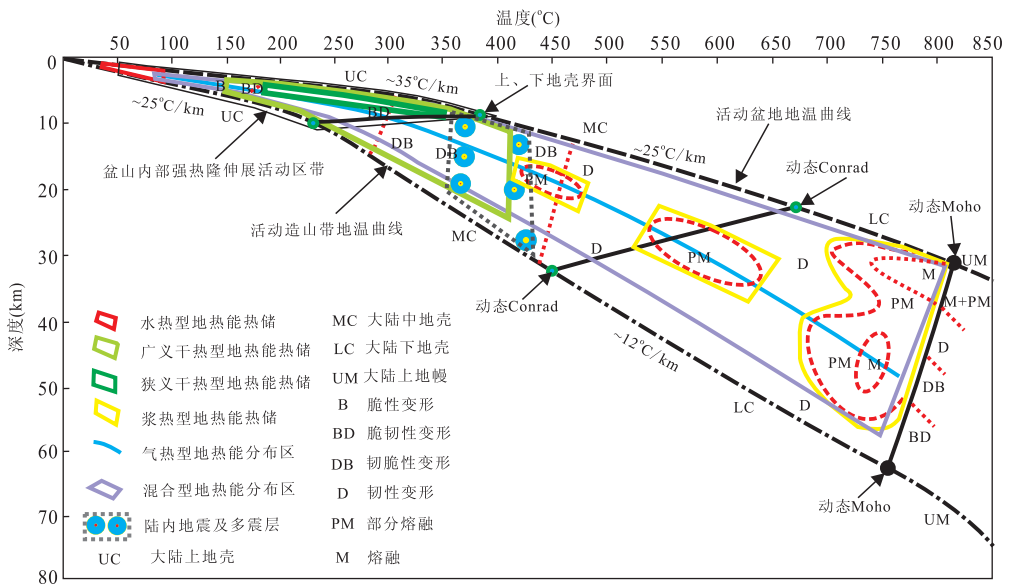


图1 大陆活动盆山系统地热能综合分类示意

Fig. 1 Schematic comprehensive classification of geothermal energy in active continental basin-orogen system

(以新生代为主)、高地温梯度的大陆盆山体系,以动态的莫霍面、康拉德面和上、中地壳界面划分出具有非均匀分层流变结构的上、中、下地壳,温度变化与岩石能干性耦合分解出熔融、部分熔融、固态流变(韧性变形)、韧—脆性转换、脆—韧性转换和脆性变形系列。这些热构造岩石组合制约不同类型的热储,形成浆热型、干热型、气热型、水热型和混合型地热能,构成热源、结构和机理密切关联的地热构造系统。大陆地壳热结构和地质结构极不均匀,在热构造异常活动区带,地壳深部局部存在浆热型地热能,干热型地热能热储埋深较浅,活性极高的气热型地热能较发育。受热气化形成的幔源和壳源 CO_2 、 H_2 、 CH_4 、 CO 、 H_2S 、 HCl 和浅层次水汽均可作为输热介质,与其他类型的地热能一起构成多种形式的混合型地热能组合。因此,气热型地热能不同于单纯由水蒸汽构成的蒸汽型地热能,而且与无机油气、二氧化碳气田金属矿床、热灾害链、温室效应、气候变化之间存在关联机理。

由此可见,干热岩地热能并非无处不在,只有在年轻活动的陆内和陆缘盆山系统中与活动性非均匀固态—半固态流变有关的强烈韧性变形—热隆伸展构造区带才发育狭义干热岩,与下地壳不均匀流动的活动韧性剪切带(“热河”)及其中地壳震源密切相关。因此,要圈定用于发电的优质干热岩,需要在地球内部系统动力学和地热地质学理论指导下合理部署勘查方案。

3 干热岩的构造与建造系统

目前国内外对于干热岩的生热、导热、控热、储热、释热构造及其规律性研究几乎是空白。对热储岩石研究也很薄弱,通常认为是岩体,主要是花岗岩类的岩体,也有人认为除花岗岩类外,还有变质岩。因此,研究干热岩构造—建造系统,对于认识干热岩的形成机理、开发干热岩地热能都具有十分重要的意义。

自从认识到大陆岩石圈失去刚性特征、并建立分层流变模型(Ranalli and Murphy, 1987; Molnar, 1988)以来,美国于 1990 年率先提出大陆动力学计划,又于 2003 年提出以超越板块构造为目标的构造地质学和大地构造学新航程,均聚焦到大陆岩石圈的分层流变。大量的地质、地球物理调查和研究表明,大陆盆山地壳热构造系统具有分层块、分阶段演变规律,地幔热动力作用导致盆山地壳热弱化物质

有规律地发生循环运动,制约了大陆各种地貌、地质、地球物理、地球化学现象和资源、灾害、环境效应(李德威,1993,1995a,1995b,2003,2008,李德威和纪云龙,2000;李德威等,2009;Li,2008,2010,2013)。

地球历史上多期次强烈的构造热活动形成了不同时代的洋陆结构和盆山结构。干热岩地热能与新世代仍然活动的大陆造山带(或高原)和沉积盆地的地壳分层块非均匀流变作用有关,这种活性结构主要体现在与固态、半固态流变和热隆伸展有关的构造地貌、活动构造、地球物理场、地下气体排放、同位素地球化学、GPS 速度场、温泉、地震及其相关灾害等方面。

除了上述地壳垂向非均匀分层差异流变外,活动的大陆盆山构造系统横向非均匀分块差异流变也十分显著。例如,青藏高原及邻区、华北的地震活动与一系列中下地壳固态—半固态流变物质侧向流动及其线性热隆伸展构造(“热河”)的异常热构造活动有关(李德威,2010,2011,2012a,2014a,2014b,2015;李德威等,2013a,2013b,2014;陈桂凡等,2013;Li,2010,2013)。干热岩与地震密切共生(图 1),是地壳非均匀固态、半固态流变的结果,也是地质、地热资源、自然灾害、环境变化、地壳(工程)稳定性评价必须一体化调查与研究的根本原因。

对于干热岩建造系统,前人注重花岗岩类岩石,强调花岗岩体结晶冷却的残余热和放射性生热。在开放地球系统中地质历史时期形成的花岗岩体经过长期的热耗散很难保存大量残余热能。至于高放射性固结花岗岩的放射性元素生热,其速率和量级很小,与现今地热异常分布不吻合。例如,喜马拉雅和冈底斯是大陆最年轻、最广泛的花岗岩分布区,喜马拉雅期花岗岩岩基常出露至地表,这些花岗岩体分布区表浅层次并没有出现地温异常、温泉和地震集中现象,大地热流值与花岗岩体的体积、厚度、放射性强度基本无关,而充填第四系沉积物的近南北向地堑热流值高,壳内低速层、低阻层十分发育,温泉、地震和金属矿床成带集中分布,很可能是无机油气、煤和铀、钍等能源矿床的富集带。

在地球分层块、分阶段非均匀流变构造系统中,干热岩与活动的地壳韧—脆性转换构造有关,是仍在进行的固态—半固态流变构造系统。因此,活动的地壳韧性变形带之上的韧—脆性至脆—韧性过渡带内,干热岩的寄主岩不一定是花岗岩,可以是地质历史时期形成的各种变质岩、岩浆岩和蛇绿混杂岩。如

果热储温度达到 350 ℃ 左右,原岩会出现动态恢复作用和动态重结晶作用,形成新生的动力变质岩,主要是糜棱岩化构造岩.由于热流物质非均匀流动源源不断地向上传导热能,因此按人类活动时间尺度在流动通道之上的干热岩热储中地热能取之不尽.总之,研究和搞清干热岩是原地静态生热(花岗岩残余热或放射性生热)还是异地动态生热(活动的韧性剪切带),对于干热岩地热能的顶层决策、勘查部署、潜力评价、资源量和储量估算、选区、定钻、地热电站运行时间、防灾减灾等均具有极其重要的意义.

4 干热岩的分布规律与形成机理

尽管 40 年前就提出了利用干热岩地热能的设想,但是很少有人从地质学角度研究干热岩的分布规律和形成机理,Cloetingh *et al.* (2010)从地壳或岩石圈的热力学性质以及应力、应变、温度与断层的关系等角度模拟并探讨与干热岩开发有关的板内应力场和盆地基底热流分布.

从大陆地壳四维非均匀分层流变结构来看,干热岩(特别是作为地热能发电的狭义干热岩)并非像许多人所认为的那样广泛分布.岩浆岩体残余热(Hinze *et al.*, 1986)对干热岩地热能贡献极小,花岗岩放射性元素生热不是干热岩的主要热源.对此做如下分析:

(1)在时间上,地质构造演化平静期与突变期交替及其相关的间冰期与冰期、生物复苏期与灭绝期动态演进,均与地下热能的长期积累和短期释放密切相关,从长周期到短周期的热积累与热释放分别产生巨型、大型、中型、小型和微型热灾害链(李德威, 2014a, 2014b).在新生代造山造盆作用和洋陆相互作用(活动大陆边缘)仍在进行的热构造活动地区,地壳不同程度地发生熔融、部分熔融、半固态和固态流变.当温度达到岩石熔点,热能产生低密度岩浆,在浮力作用下垂向流动,造成岩体侵位或火山喷发,多种气体巨量排放,这一地质过程制约了浆热型、气热型地热能,其特点是强度大,持续时间短;当温度达到岩石熔融温度的三分之一,吸热岩石出现固态相变,发生韧性变形,密度变化很小的(半)固态流变物质在重力和顺层剪切力作用下侧向不均匀运动,其上的韧—脆性过渡层将热能转换成应变能,当经过一定时间储存的能量达到临界状态,在外力(如天体引潮力)作用下或韧性流动通道中固流体流量、流速、流向突变,半固态流变物质撞击到强弱构造边

界释放应变能,在脆性上地壳产生机械能,发生地震(李德威, 1995a, 1995b, 2010, 2011, 2012a).干热岩与地震相伴而生(图 1),地震是地壳热构造活动的结果,因此,狭义干热岩发育在活动的盆山体系和大陆边缘,特别是活动的大陆边缘海盆地壳热降伸展构造控制优质干热岩地热能.

(2)在垂向上,具有不同熔点的岩石在不同地温梯度的构造单元发生不同程度的分层流变.对于晚新生代具有地幔软流圈底辟作用的陆内和陆缘热构造活动区带,上地幔橄榄岩因熔点高而具有韧—脆性特征,而下地壳普遍发育韧性变形,局部出现熔融和部分熔融,生成浆热型地热能,并成为干热型地热能的源区.热传导作用通过下地壳非均匀分布的半固态—固态流变(韧性变形)物质将异常热能传递到中上地壳,中地壳优先吸热储能,发生韧—脆性转换,向上通过脆—韧性变形过渡到脆性变形,广义干热岩出现在韧—脆性变形层次和脆—韧性变形层次,狭义干热岩产于脆—韧性变形层次,震源层主要在韧—脆性变形层次(图 1).这种热构造活动还与矿床、油气之间存在关联成因,大洋软流圈和大陆下地壳因部分熔融和固态流变生成的热流体不仅横向运动,而且垂向迁移,在不同的成矿温度和天然气窗口(120~220 ℃)、石油窗口(60~120 ℃)形成不同类型的金属矿床和能源矿床,在优质盖层条件下易于形成大型、超大型干热岩地热田、无机与有机结合油气田和二氧化碳气田.

(3)在横向上,狭义干热岩分布在热构造活动较强烈的新生代盆山体系和大陆边缘,优质狭义干热岩与盆山系统和洋陆系统不均匀热结构和热构造有关,分布在半固态流变物质线性流动通道(活动的韧性剪切带俗称“热河”)之上,表现为地震、温泉和低速—低阻异常的带状分布,常与中下地壳热弱化物质三维非均匀侧向韧性流动及其线性热隆伸展构造(如地堑和裂谷)一致.因此,要圈定干热岩地热能有利区段,首先要确定“热河”的分布状态.

(4)在温度—应力—岩石能干性关系上,大陆地壳变形过程中温度与应力是一对互补的构造动力,地壳浅层次以应力作用为主,断层是主导变形方式;地壳深部层次以热力作用为主,熔融和流变是主导变形方式,其间为热—应力转换区,也是震源层.遵照热力学第二定律,地壳深部的高能热构造(岩浆构造和流变构造)控制地壳浅部的低能应力构造(破裂构造),构造变形类型由下往上依次为岩浆流动、半固态—固态流变及其韧性变形带、韧—脆性变形

带、脆—韧性变形带和脆性断裂带,构造变形强度依次递减。损失的能量除了形成岩浆岩、构造形迹、矿床和无机油气藏外,还产生不同级别的热灾害链。由于岩石能干性存在很大的差异,地壳和地幔的岩石分布存在非均匀性,在同期地温场中出现构造变形分解现象(图 1)。壳幔边界显现最大的变形差异,在盆山耦合盆控山阶段,盆地之下存在温度达 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 地幔岩浆底辟作用,不仅上地幔出现岩石熔融,盆地地下地壳也发生熔融和部分熔融,常见双峰式火山活动和底侵作用;造山带熔点较高的地幔橄榄岩只发生脆—韧性或韧—脆性变形,而之上加厚的下地壳中麻粒岩、榴辉岩却出现韧性变形、部分熔融甚至熔融(李德威,1995b)。因此,广义干热岩不仅出现在活动地壳的中上部,而且在造山带动态莫霍面之下的上地幔顶部也存在高温干热岩。

(5)在干热岩地热能构造与建造上,优质干热岩地热能与活动的热隆伸展构造及其动态(半)固态流变构造有关,与地质历史时期形成的岩浆岩体的类型、时代、规模、分布和生热率关系不大。以青藏高原南部为例,包括干热型地热能在内的多种地热能主要沿着中新世以来形成的 7 条近南北向地堑分布,地堑内部发育晚新生代沉积,局部出现碱性钾质火山岩,基底为变质岩、蛇绿混杂岩和岩浆岩,地堑之间广泛分布喜马拉雅期花岗岩巨型岩基。然而,与干热岩地热能密切相关的活动性热流通道(类似于人体的“血管”)沿着活动地堑分布,而新生代花岗岩岩基却成为围裹“血管”的“肌肉”。

(6)在形成机理上,干热岩地热能最关键的问题是热源来自何处?从地球系统动力学角度来看,产于活动固态—半固态流变热构造系统的干热岩主要是异地外来热。热能总是从高能区传递到低能区,地核是最大的热动力源区,主导了开放地球系统的物质运动规律和能量传递过程,多级垂平转换相结合的热流物质循环运动形成了洋陆体系及其相关联的盆山体系(李德威,2005a,2011,2012a,2013,2014a,2014b)。对于大陆盆山构造系统而言,形成盆地的能量主要是地幔软流圈底辟作用携带的外来热能,地幔热隆伸展注入盆地的部分热能通过下地壳热流物质顺层流动传递到相邻的造山带,同时造山带地壳加厚,其核部显著加厚区下地壳生成新的热源区,下地壳岩石部分熔融形成埃达克质岩浆岩。盆山系统不同类型的低密度岩浆垂向流动为其上的岩石固态流变、侧向层流提供动力来源,并构成动态的盆山地壳物质循环系统,大陆地壳半固态—固态流变物

质的侧向层流正是干热岩形成的直接因素。岩石受热释放出来的多种巨量气体仅有极小部分通过构造通道和岩石孔隙释放出来,并作为传输深部热能的介质。因此,地球内部非均匀分布着巨大的“热库”和“气库”,它们是形成热灾害链的“基地”,也是金属成矿和无机油气成藏的宝库。

(7)在关联效应上,地热能是把双刃剑,局部富集形成资源,但是动态演变达到或超过临界值,就会变成灾害,并具有多种灾害连发、群发、突发特征,构成热灾害链(李德威,2010,2011,2012a,2012b,2012c,2013,2014a,2014b;李德威等,2013b;陈桂凡等,2013)。因此,主动开发剩余地热能变宝,被动释放剩余地热能成灾。

5 干热岩的综合勘查

干热岩是我国资源勘查的新领域,与矿床、油气、灾害、环境和工程建设密切相关,应当在大陆动力学和地球系统动力学理论指导下科学开展综合勘查(图 2)。在资源开发之前一般要按预查、普查、详查、勘探等程序有序开展。为了快速高效开展干热岩地热能的开发,提出几点建议:

(1)组织多学科专家深入研讨干热岩的形成环境、控热构造、热储建造、形成与保存条件、分布规律、关联效应、形成机理、潜力评价、靶区优选、勘查与开发的关键技术及其关联效应,形成综合性、前瞻性报告,为制订我国干热岩及多种相关资源勘查与开发、灾害及环境监测、工程(地壳)稳定性评价的一体化顶层设计方案服务。

(2)充分利用和科学评估已有的地质、地热、地球物理、水文、矿产、油气、自然灾害、环境地质、工程地质调查和研究成果,特别是 $1:5\ \text{万}\sim 1:25\ \text{万}$ 区调填图、 $1:5\ \text{万}\sim 1:25\ \text{万}$ 区域重力、磁测、遥感地质调查和二维至四维地球物理测量以及自然灾害(特别是地震和火山)调查和研究成果,在地球内部系统动力学和干热岩地质学创新思想指导下,进行资料二次开发和综合分析,确定干热岩分布远景区;在关键热构造部位开展适量的地质、地球物理、地热、地下水、矿产、油气、工程地质、地震及其关联灾害的综合调查,进行全国范围的干热岩地热能潜力评价和综合分析,在地热活动性较强的青藏高原及其邻区、华北、东南沿海和台湾等地区,确定干热岩地热能开发的有利区带。加强作为大陆异常热流系统热源区的海洋热结构、热构造的调查和研究,实现

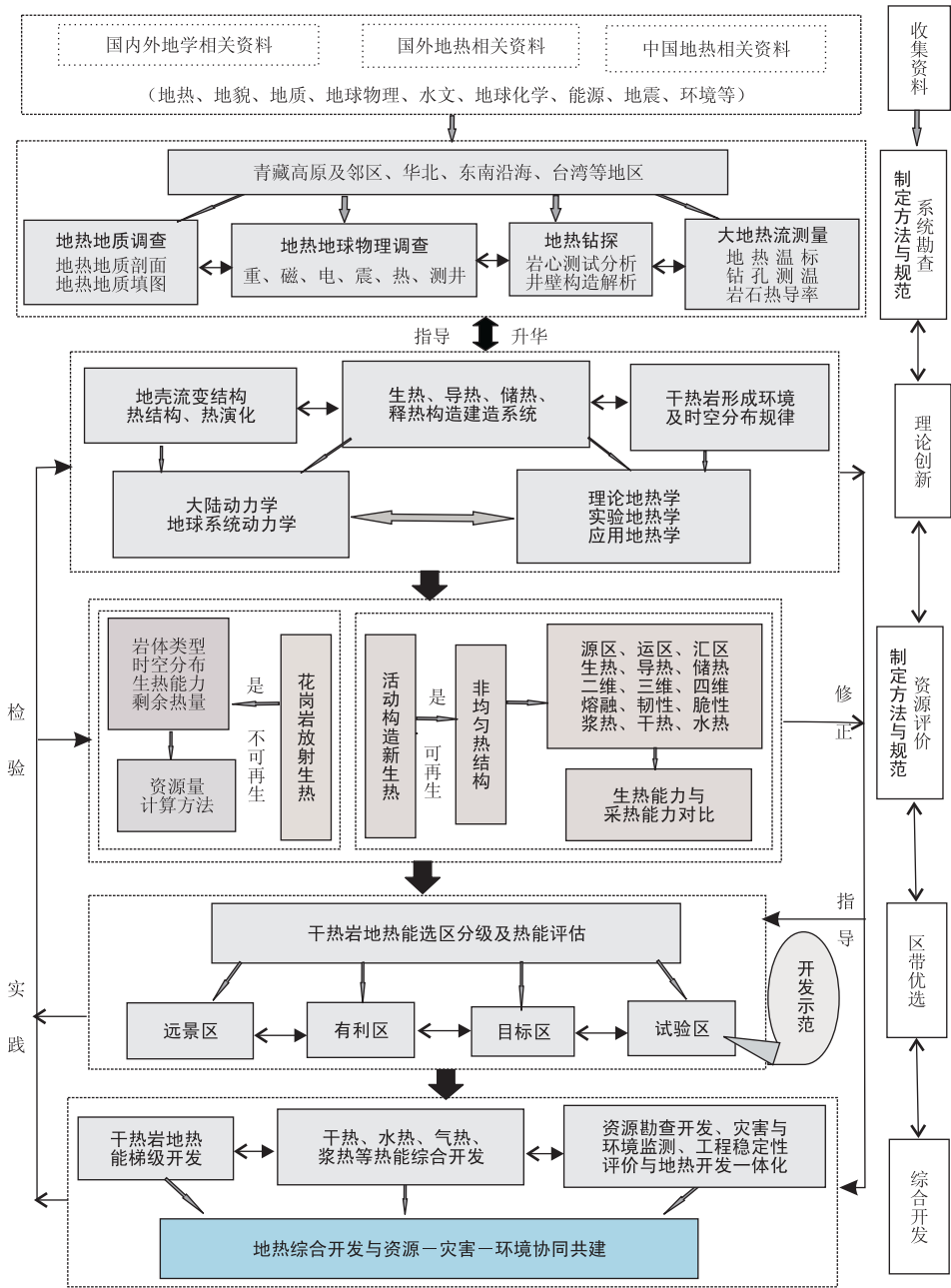


图 2 我国发展干热岩地热能理论与应用技术路线

Fig. 2 Technical road sketch for theoretical and applied studies of hot dry rock geothermal energy in China

地热地质条件十分优越的海洋干热岩地热能 and 油气藏的联勘共采。

(3) 在干热岩地热能有利区块有序开展普查、详查和勘探, 重视研发与干热岩勘查有关的新技术和新手段, 运用对热灵敏的探测手段, 对潜在的中下地壳“热河”加密布置一系列的地质地球物理联合剖面, 充分利用数字地震台网、流动式宽频数字地震台阵和大地电磁法, 注重提取 S 波异常信息, 加强泊松比、Q 值、各向异性的研究, 结合物理模拟和数字模拟, 搞清有利区地壳三维非均匀热结构、流变结构及

其热演化, 确定洋陆一盆山系统热流物质的运动方向、热源结构、热传输路径和热能富集场所, 查明“热河”的精细结构, 进一步确定干热岩地热能目标区, 筛选有利靶区, 进行地热能资源量评估和综合评价。

(4) 干热岩、金属矿床、油气、工程区域地壳稳定性、地震及其关联灾害(包括全球变化)都与热构造作用密切相关, 动态的矿化异常、地源气体异常、热灾害链能够为干热岩勘查提供十分重要的信息。由于构造热活动的继承性和多期性, 在干热岩勘查过程中, 要加强金属矿床、能源矿床、古地震、古环境、

水资源、工程(地壳)稳定性的连带勘查和综合勘查。例如,中新世形成至今仍在活动的亚东—尼木—谷露地堑是源于恒河盆地向青藏高原的 7 条中下地壳“热河”之中的一条线性热隆伸展构造带(Li, 2013;李德威,2010,2015;李德威等,2013a, 2013b, 2014),整个“热河”宏观的热构造活动性南强北弱,但是在地壳强烈加厚的区段热动力作用局部增加,因此,在尼木—谷露一带,地热、地震和矿床关联分布十分显著,羊易—羊八井一带地表热流值创中国大陆之最;地震强度和密度极其显著,如 1411 年 9 月 29 日羊八井北 M_s 8.0 地震,1951 年 11 月 18 日崩错 M_s 8.0 地震,1952 年 8 月 18 日当雄北 M_s 7.5 地震;中新世多金属矿集区,仅尼木至南木林一带就发现冲江、厅宫、白容、岗讲、吉如等大型斑岩铜矿床和纳如松多大型 Ag-Pb-Zn 矿床,与下地壳层流及其陆内热隆伸展构造成矿理论指导的成矿预测结果吻合(李德威,1994,2005b)。

(5)将大陆动力学、地球系统动力学、地热地质学的理论与干热岩勘查的技术、方法、步骤有机结合,不断探索和改进干热岩理论与应用体系,贯穿整个过程和各个环节,并制定相应的标准,编写有关技术指南,有效指导大规模的生产实践。

6 干热岩评价与开发利用技术

干热岩地热能的潜力评价和资源量计算取决于对于干热岩形成机理的认识。如果干热岩地热是早期形成的岩浆岩体残余热和放射性元素生热,那么上地壳的隐伏岩体应当具有比较固定的、随着时间略有减少的资源量;如果干热岩地热是源于地球深部的传导热,那么在广大地区一定深度处具有基本固定的资源量。对于数十至数百年发电期的干热岩热储而言,若按上述 2 种认识,干热岩地热更倾向于被归为不可再生资源,热储的生热能力远远小于采热能力。

多位学者用不同的方法估算了我国干热岩的资源总量。殷秀兰(2008)初步估算我国干热岩在 2 000~4 000 m 范围内的产热量大于 8×10^{16} J/km²,我国主要高热流区的热储资源相当丰富,相当于标准煤 51.6 亿吨。汪集旻等(2012)认为中国大陆 3~10 km 深处干热岩地热资源总量为 20.9×10^{24} J,合 714.9×10^{12} t 标准煤,若按 2% 的可开采资源量计算,是传统水热型地热资源量的 168 倍。藺文静等(2012)提出我国大陆 3~10 km 深

处干热岩资源总计为 2.5×10^{25} J,相当于 860 万吨标准煤,按 2% 的可开采资源量计算,相当于我国目前能源消耗总量的 5 200 倍。Wang *et al.* (2013)指出中国大陆 3~10 km 深处干热岩资源总计为 2.52×10^{25} J,若按 2% 的可开采资源量计算,相当于我国 2010 年能源消耗总量的 5 300 倍。

笔者初步认为,干热岩地热是开放地球系统动态演变过程中洋陆和盆山正在发生四维非均匀活动的半固态—固态流变构造的热驱动力,因此,可以通过特定的活动性热隆伸展—韧性变形构造系统在一定时空结构中周期性以热灾害链释放出来的能量来评估生热能力和剩余热能量级,沿着“热河”梯级开发出等量级的剩余地热,力争在小型和微型热灾害链时间段维系地球局部的动态热平衡,在利用取之不尽的地热能的同时减灾减排。

研究活动洋陆和盆山典型热构造系统(特别是“热河”)的时空结构、流变状态、热能聚散规律及其成矿致灾规律,估算“热河”现今的剩余热能(灾能),有助于科学制定以干热岩为核心的地热综合开发方案。例如,中新世以来带动川滇地块向东南方向运动与两条中下地壳“热河”有关,东南侧为错那—桑日—墨竹工卡—嘉黎—波密—察隅—腾冲—耿马线性热构造活动带,另一侧是亚东—尼木—羊八井—错那—雁石坪—沱沱河—玉树—鲜水河—安宁河—小江线性热构造活动带,近 60 余年以来,两条“热河”中下游交替发生异常热活动,灾害群发连发,强震群分段集中,如 1941 年 5 月 16 日云南耿马 M_s 7.0 级地震至 1950 年 8 月 15 日西藏墨脱 M_s 8.6 级地震及其关联灾害构成的热灾害链和 1988 年 11 月 6 日澜沧 7.4 级和耿马 M_s 7.2 级地震至 1996 年 2 月 3 日丽江 M_s 7.0 级地震及其关联灾害构成的热灾害链出现在川滇活动块体东南“热河”系统;由 1970 年 1 月 5 日通海 M_s 7.8 级地震、1973 年 2 月 6 日四川炉霍 M_s 7.6 地震、1974 年 5 月 10 日云南大关 M_s 7.1 地震和 1981 年 1 月 24 日四川道孚 M_s 6.9 地震及其关联灾害构成的热灾害链和由 2008 年 5 月 12 日汶川 M_s 8.0 级地震、2010 年 4 月 14 日青海玉树 M_s 7.1 地震、2013 年 4 月 20 日四川省芦山 M_s 7.0 地震、2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 M_s 6.5 级地震、2014 年 10 月 7 日云南景谷 M_s 6.6 级地震、2014 年 11 月 22 日四川康定 M_s 6.3 级地震及其关联灾害构成的热灾害链出现在川滇活动块体东北“热河”系统。这些微型热灾害链发生期通过跨年度干旱、排气、森林大火、天然矿难、地震、抛射

式滑坡等方式释放剩余热能. 要研究小型和微型热灾害链热能积累与释放时空规律和剩余热能定量计算方法, 作为干热岩资源评价和综合开发规划的理论依据.

对于造成生物灭绝和生物锐减的巨型和大型热灾害链, 人类目前无能为力(李德威, 2014b), 幸好那是遥远的灾变事件. 人类面临的战略目标是不断加大地热能的开发力度, 努力消除微型热灾害链, 弱化小型热灾害链, 抑制中型热灾害链.

评价干热岩地热能的另一项重要内容是合理规划干热岩地热能的远景区、有利区、目标区和开采区, 要在综合开发利用已有资料和深入研究干热岩孕育环境、形成机理和分布规律的基础上, 分析孕热、导热、储热、释热构造—生储盖建造系统的热能因子, 分类选择评价指标并确定权重系数, 开展综合预测和定量预测, 将地热优越性、经济可行性、地域重要性相结合, 提出科学的、系统的顶层设计和实施方案. 在分类选择干热岩地热能资源评价指标中, 热构造系统、“热河”规模、热储性质、大地热流值、热能生运储盖保组合、热灾害链等是必不可少的因素. 尽量避免在由活动断层已导出大量水热型地热能的地点开发干热岩地热能, 而低速低阻层发育、地震活动性强、浅层脆性断层少、隔热盖层好的区带是干热岩地热能的有利选区. 因此, 应当大力加强南海、渤海、黄海、东海及其边缘地区干热岩地热能的调查、研究和系统开发.

尽管欧美发达国家十分重视干热岩发电, 建立了多个干热岩发电站(Bertani, 2012), 然而, 目前干热岩地热能开发还处于技术发展阶段, 从深部地热资源中取热发电的成本仍不确定(Moeck, 2014). 造成这种局面可能主要有两方面的原因: 一是没有认识到干热岩的形成机理及其分布规律; 二是没能攻克大规模开发干热岩地热能的关键技术.

正确的理论指导实践, 能够在战略决策、行动指南、行进方向、工作部署、勘查思路、开发方案等方面起到决定性作用. 然而, 目前国内外关于干热岩形成机理的研究几乎空白. 根据笔者初步的研究, 干热岩是开放地球系统非均匀热活动在活动的固态流变构造系统(动态韧性变形带)之上的韧—脆性变形带和脆—韧性变形带中形成的固态储热岩石, 狭义的干热岩主要产于具有活性的脆—韧性变形带, 易于勘探和开发, 岩石仍然存在可裂性, 能够创造大型人工热储, 而且保持动态热能供给, 如果不及时开发, 热能积累过量, 会出现热灾害链, 产生强震. 而国外专

家普遍担心人工致裂和深层水循环会诱发地震(Majer *et al.*, 2007), 但由此诱发的地震一般是无害微震, 可能有利于热储裂隙扩展. 开发干热岩取出的热能正是产生地震及其相关自然灾害的剩余热能, 持续梯级综合开发地热, 有利于从根本上减灾, 并双重(减少化石能源人工碳排放和地热成因自然碳、水汽排放)减排. 因此, 只要我国及时启动并大力开展干热岩地热能综合开发工程, 必将从如今的高碳能源时代跨越低碳能源时代, 率先进入无碳能源时代, 圆梦消碳少灾的绿色美丽地球.

根据大陆动力学层流构造和地球系统动力学多级物质循环假说, 已经成功预测了青藏高原南部多个多金属成矿带及其大型、超大型铜铁金等多金属矿床(李德威, 1994, 2005b)和2013年4月20日四川芦山 M_s 7.0 级地震、2014年8月3日云南鲁甸 M_s 6.5 级地震、2014年10月7日云南景谷 M_s 6.6 级地震、2014年11月22日四川康定 M_s 6.3 级地震(李德威等, 2013a; 李德威, 2015). 这些假说还有待在干热岩地热能勘查和开发实践中经受检验和发展.

制约干热岩地热能开发的瓶颈是优选优质热储并人工制造导热介质(如 H_2O 、 CO_2)有效通过的大规模破裂网络. 我国具有集中力量办大事的优势, 只要理论结合实际, 开展基础理论、科学技术与工程体系的一体化创新, 关键技术难题必定破解, 最终通过超级热储率先迈进“地热能时代”. 其关键技术是: “热河”精细结构及其流量、流向、流速测定系统; 地下热流体关联异常流动监测技术; 高效热钻及热储定向钻探技术; 热储人工冷脆易裂及高效多层定向破裂技术; 井壁(特别是热储部分)高分辨构造定向观测、精细构造解析和致裂应力定位及其物理模拟和数字模拟; 多层次破裂网络及其长效畅通、水岩反应及热传导系统; “热河”系统输入井与生产井最优配置技术; 防腐防垢技术; 热电高效转换和电能长效储存技术.

我国干热岩地热能研究与开发具有地域优势, 青藏高原及邻区、渤海和华北、东南沿海及其海域、台湾是地热异常区, 也是自然灾害多发、连发和群发区, 将这些不同类型(分别为热活动复合造山带、热活动盆地、热活动海盆及陆缘、热活动岛弧)的热构造单元作为天然实验室, 开展多学科的交叉研究和联合攻关, 能够取得地热理论与应用技术全方位的巨大突破, 驶入可持续绿色发展的快车道.

7 结论与讨论

地球是我们共同的家園,正面临能源需求不断增加、化石能源日益减少、环境污染日趋严重、自然灾害频繁发生的困境,必须在地学创新思想指导下探寻一种能够一体化根本解决上述问题且强力推进社会经济可持续发展的优质可再生清洁能源,实现能源结构调整和产业升级. 新能源革命的方向应当优先瞄准地热能. 与风能、太阳能等相比,地热能不受季节、气候、昼夜变化等因素干扰,可高效综合利用,除替代“碳能”减排外,还具有从本质上减灾减排的功能. 因此,开发干热岩地热能有助于实现中国经济绿色转型,成为第 3 次工业革命的支柱(李德威, 2014b). 只是与太阳能、风能相比,地热能研究与开发的科技含量较高,需要从新地学革命和新产业革命的高度才能深刻地、系统地描绘从“碳能时代”迈进“地热能时代”的宏伟蓝图.

笔者的初步研究表明,地球内部的热能是维系地球活性的本质因素,也是地球内部物质有序运动的动力源. 非均匀热动力作用于非均匀四维地球系统,在固流耦合的地球系统中不同类型的岩石发生熔融、部分熔融、韧性流变、韧—脆性变形、脆—韧性变形和脆性破裂,由此产生的各种热构造—建造在全球洋陆体系和大陆盆山体系中有规律地组合和相互作用,不仅造成(含)流体圈层与固体圈层、洋陆系统与盆山系统、水平运动与垂直运动紧密相关,而且与地球矿产和非矿产资源、化石和非化石能源、自然灾害、环境变化、地壳(工程)稳定性之间存在关联性,特别是干热岩与震源层紧密共生. 因此,从地质规律出发,合理划分地热类型,明确干热岩定义,认识干热岩成因,对于搞清干热岩分布规律、开展干热岩综合勘查、优选干热岩开发区、把握并攻克干热岩地热能开发的关键技术难题、建设清洁地热能开发利用示范基地具有指导意义. 多种资源机理关联,统筹规划,联勘共采,减灾减排,对于发展地学基础理论和应用基础理论及其工程建设有巨大的辐射作用.

健康的经济增长离不开产业升级,最大的产业升级是产业革命,人类历史上前 2 次产业革命都是由科技革命带动的,由能源革命决定的. 只要以大陆动力学和地球系统动力学及其取热减灾减排创新思想为指导,高瞻远瞩、科学论证和战略部署我国的地热能发展规划,充分发挥干热岩地热能发电的综合优越性,以干热岩开发为核心的地热能就有望在国

家能源结构中从目前的无足轻重上升到重要地位,我国就有望率先启动地学革命—科技革命—能源革命—产业革命的链式反应. 只要高度重视与干热岩地热能密切相关的地质、资源、灾害、环境、工程(地壳)稳定性理论与应用体系的系统性原始创新,顶层设计并统筹规划其科学研究、综合勘查、潜力评价和系统开发,就有望一体化解决人类面临的能源短缺、环境污染、灾害频发、发展减速等系列问题. 干热岩地热能理论与应用的自主创新一定能够实现中国能源独立梦,引领第 3 次产业革命!

致谢:感谢匿名评审专家提出宝贵的修改意见.

References

- Bertani, R., 2012. Geothermal Power Generation in the World 2005 — 2010 Update Report. *Geothermics*, 41: 1—29.
- Brown, D. W., Duchane, D. V., Heiken, G., et al., 2012. Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, Berlin.
- Chen, G. F., Hao, H. J., Feng, M. X., et al., 2013. Temporal-Spatial Structure of Thermal Disaster Chain in Southwest China and Its Relation with the Lushan Earthquake. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 141—148 (in Chinese with English abstract).
- Cloetingh, S., van Wees, J. D., Ziegler, P. A., et al., 2010. Lithosphere Tectonics and Thermal-Mechanical Properties: An Integrated Modelling Approach for Enhanced Geothermal Systems Exploration in Europe. *Earth-Science Reviews*, 102: 159—206.
- Feng, Y., Chen, X., Xu, X. F., 2014. Current Status and Potentials of Enhanced Geothermal System in China: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33: 214—223.
- Hinze, W. J., Braile, L. W., von Frese, R. R. B., et al., 1986. Exploration for Hot Dry Rock Geothermal Resources in the Midcontinent USA. U. S. Department of Energy, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 1—138.
- Li, D. W., 1993. The Style of Continental Structure and Model of Continental Dynamics. *Advance in Earth Sciences*, 8(5): 88—93 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 1994. Metallogenic Conditions and Prospect Analysis in Southern Tibet. *Journal Guilin College of Geology*, 14(2): 131—138 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 1995a. Speculations on Continental Tectonics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(1): 10—18 (in Chinese with English ab-

- stract).
- Li, D. W., 1995b. On Continental Tectonics and Its Dynamics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(1): 19–26 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2003. A New Model for Uplifting Mechanism of Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6): 593–600 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2005a. Outline of the Earth System Dynamics. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 285–294 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2005b. Theoretical Prediction and Scientific Exploration; The Gangdese Porphyry Copper Deposits in Tibet as an Example. *Geological Science and Technology Information*, 24(3): 48–54 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2008. Continental Lower-Crustal Flow; Channel Flow and Laminar Flow. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 130–139.
- Li, D. W., 2008. Three-Stage Tectonic Evolution and Metallogenic Evolution in the Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 723–742 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2010. The Regularity and Mechanism of East Kunlun, Wenchuan, and Yushu Earthquakes and Discussion on Genesis and Prediction of Continental Earthquakes. *Earth Science Frontiers*, 17(5): 179–192 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2010. Temporal-Spatial Structure of Intraplate Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 105–134.
- Li, D. W., 2011. Earth System Dynamics and Earthquake Genesis and Its Four-Dimensional Prediction. In: Xiangshan Science Conferences, ed., *Frontiers and Future of Science (2009–2011)*. Science Press, Beijing, 184–195 (in Chinese).
- Li, D. W., 2012. Preliminary Discussion on Earth's Natural Hazard System. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 69–75 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2012a. Thoughts and Suggestions on Reducing Disaster and Emission by Development of Geothermal Energy. *China Science Daily*, 2012–03–10(4) (in Chinese). <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2012/3/255374.shtm>
- Li, D. W., 2012b. New Ideas for Prevention and Mitigation of Natural Disaster in New Era. *China Science Daily*, 2012–06–14(2) (in Chinese). <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2012/6/259347.shtm>
- Li, D. W., 2013. Building a Beautiful Earth via Reducing Disaster and Emission by Development of Geothermal Energy. *China Science Daily*, 2013–03–11(6) (in Chinese). <http://paper.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2013/3/270421.shtm> shtmlmid=270421
- Li, D. W., 2013. Lower Crustal Flow from Ganges Basin into the Tibetan Plateau since the Miocene; Effects and Mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 87 (Suppl.): 362–363.
- Li, D. W., 2014a. Multistage Cycle of the Earth and Its Resource, Energy, Disaster and Environmental Effect. *Geological Science and Technology Information*, 33(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2014b. Earth System Dynamics and Reducing Disaster and Emission by Development of Geothermal Energy. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 243–253 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2015. Principles, Methods and Its Implication of Luddian Earthquake Prediction. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Chen, G. F., Chen, J. L., et al., 2013a. Earthquake Prediction; From Lushan Earthquake to Continental Earthquakes. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Chen, J. L., Chen, G. F., et al., 2014. Continental Seismotectonic System; Example from Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Areas. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(12): 1763–1775 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Hao, H. J., Liu, J., et al., 2013b. The Structure and Mechanism of Thermal Disaster Chains and the Trend Analysis of Strong Earthquakes in North China. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 102–108 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Ji, Y. L., 2000. Laminar Flow in the Lower Continental Crust and Its Significance for Continental Dynamics. *Seismology and Geology*, 22(1): 89–96 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Xia, Y. P., Xu, L. G., 2009. Coupling and Formation Mechanism of Continental Intraplate Basin and Orogen—Examples from the Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Basins. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 110–119 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W. J., Liu, Z. M., Ma, F., et al., 2012. An Estimation of HDR Resources in China's Mainland. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(5): 807–811 (in Chinese with English abstract).

- Majer, E. L., Baria, R., Stark, M., et al., 2007. Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics*, 36: 185–222.
- Moeck, I. S., 2014. Catalog of Geothermal Play Types Based on Geologic Controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37: 867–882.
- Molnar, P., 1988. Continental Tectonics in the Aftermath of Plate Tectonics. *Nature*, 335: 131–137.
- Ranalli, G., Murphy, D. C., 1987. Rheological Stratification of the Lithosphere. *Tectonophysics*, 132: 281–295.
- Smith, M. C., 1973. Geothermal Energy. Geothermal Engineering Ltd., London, 1–31.
- Tenzer, H., 2001. Development of Hot Dry Rock Technology. *GBC Bulletin*, 14–22.
- Wang, G. L., Li, K. W., Wen, D. G., et al., 2013. Assessment of Geothermal Resources in China. Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne.
- Wang, J. Y., Hu, S. B., Pang, Z. H., et al., 2012. Estimate of Geothermal Resources Potential for Hot Dry Rock in the Continental Area of China. *Science & Technology Review*, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Xu, T. F., Zhang, Y. J., Zeng, Z. F., et al., 2012. Technology Progress in an Enhanced Geothermal System (Hot Dry Rock). *Science & Technology Review*, 30(32): 42–45 (in Chinese with English abstract).
- Yin, X. L., 2008. Unlimited Prospect for Utilization of Hot Dry Rock Geothermal Resources. *China Mining Report*, 2008–10–14(B4) (in Chinese). <http://paper.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2008/10/259333>
- ### 附中文参考文献
- 陈桂凡, 郝海健, 冯旻譞, 等, 2013. 西南地区热灾害链的时空结构及其与芦山地震的关系. *地学前缘*, 20(6): 141–148.
- 李德威, 1993. 大陆构造样式及大陆动力学模式初探. *地球科学进展*, 8(5): 88–93.
- 李德威, 1994. 藏南成矿条件及找矿远景分析. *桂林冶金地质学院报*, 14(2): 131–138.
- 李德威, 1995a. 关于大陆构造的思考. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(1): 10–18.
- 李德威, 1995b. 再论大陆构造与动力学. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(1): 19–26.
- 李德威, 2003. 青藏高原隆升机制新模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(6): 593–600.
- 李德威, 2005a. 地球系统动力学纲要. *大地构造与成矿学*, 29(3): 285–294.
- 李德威, 2005b. 理论预测与科学找矿——以西藏冈底斯斑岩铜矿为例. *地质科技情报*, 24(3): 48–54.
- 李德威, 2008. 青藏高原及邻区三阶段构造演化与成矿演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(6): 723–742.
- 李德威, 2010. 东昆仑、玉树、汶川地震的发生规律和形成机理: 兼论大陆地震成因与预测. *地学前缘*, 17(5): 179–192.
- 李德威, 2011. 地球系统动力学与地震成因及其四维预测. 见: 香山科学会议编, *科学前沿与未来(2009–2011)*, 北京: 科学出版社, 184–195.
- 李德威, 2012a. 初论地球自然灾害系统. *地质科技情报*, 31(5): 69–75.
- 李德威, 2012b. 关于取热减灾减排的思考和议. *中国科学报*, 2012–03–10(B4). <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2012/3/255374.shtm>
- 李德威, 2012c. 新时期防灾减灾的新思想. *中国科学报*, 2012–06–14(B2). <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2012/6/259347.shtm>
- 李德威, 2013. 取热减灾减排, 圆梦美丽地球. *中国科学报*, 2013–03–11(6). <http://paper.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2013/3/270421.shtm> mid=270421
- 李德威, 2014a. 地球多级循环及其资源、能源、灾害、环境效应. *地质科技情报*, 33(1): 1–8.
- 李德威, 2014b. 地球系统动力学与取热减灾减排. *地学前缘*, 21(6): 243–253.
- 李德威, 2015. 鲁甸、景谷、康定地震预测的原理、方法及其意义. *大地构造与成矿学*, 39(1): 1–14.
- 李德威, 陈桂凡, 陈继乐, 等, 2013a. 地震预测——从芦山地震到大陆地震. *地学前缘*, 20(3): 1–10.
- 李德威, 陈继乐, 陈桂凡, 等, 2014. 大陆地震构造系统: 以青藏高原及邻区为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(12): 1763–1775.
- 李德威, 郝海健, 刘娇, 等, 2013b. 华北热灾害链的结构、成因及强震趋势分析. *地学前缘*, 20(6): 102–108.
- 李德威, 纪云龙, 2000. 大陆下地壳层流作用及其大陆动力学意义. *地震地质*, 22(1): 89–96.
- 李德威, 夏义平, 徐礼贵, 2009. 大陆板内盆山耦合及盆山成因——以青藏高原及周边盆地为例. *地学前缘*, 16(3): 110–119.
- 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等, 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算. *地球学报*, 33(5): 807–811.
- 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等, 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. *科技导报*, 30(32): 25–31.
- 许天福, 张延军, 曾昭发, 等, 2012. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展. *科技导报*, 30(32): 42–45.
- 殷秀兰, 2008. 干热岩地热资源利用前景无限. *中国矿业报*, 2008–10–14(B4). <http://paper.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2008/10/259333>