

文章编号:1009-2722(2018)08-0055-06

# 开采海洋区域干热岩的可行性探讨

肖鹏, 窦斌\*, 田红, 刘恒伟, 陈东灿

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

**摘要:**干热岩是清洁的可再生能源,目前国内外关于干热岩的研究主要在陆地区域,而海洋区域相关的研究还基本处于空白状态。为了解海洋区域的干热岩潜力,从地质学角度阐述了海底干热岩资源的形成机制,综述沿海区域干热岩的分布规律并选取典型靶区分析资源储量。从海洋资源勘查与钻井技术、抗震减灾以及其他方面探讨了在海底进行干热岩开采的可行性。指出在海底开采干热岩仍然存在勘查资料稀缺、设备技术不够先进和研发资金等方面的问题。建议加大沿海区域干热岩的资源勘查评价力度;在海洋石油勘查钻采技术及设备的基础上,研究开发适用于干热岩勘查钻采的技术与设备;加大海底干热岩研究项目的科研基金投入,企业和研究机构、高校产学研相结合,共同促进开发利用研究干热岩。

**关键词:**干热岩;海洋资源勘查;可行性

**中图分类号:**P737.2

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16028/j.1009-2722.2018.08007

随着我国社会经济的发展,我国的能源需求越来越大。根据《BP 世界能源统计年鉴 2017》,中国目前仍然是全球最大的能源消费国,我国在 2016 年能源消费总量占全球能源消费总量的 23%,能源消费增长占全球能源消费增长的 27%。2016 年中国的石油产量仅占世界石油产量的 4.6%,并且石油产量下降了 7.2%,而石油消费占世界消费总量的 13.1%,消费量增长了 2.7%,国内原油消费的 62%都是来源于进口,这对于国家的能源安全造成了很大的威胁。另外在 2016 年煤炭资源消费量占世界的 50.6%,在中国能源结构中的占比为 62%,虽然是历史最低占比,但这一比例仍然很大,对我国的环境造成了很大威胁,带来了一系列环境问题。同时中国二氧

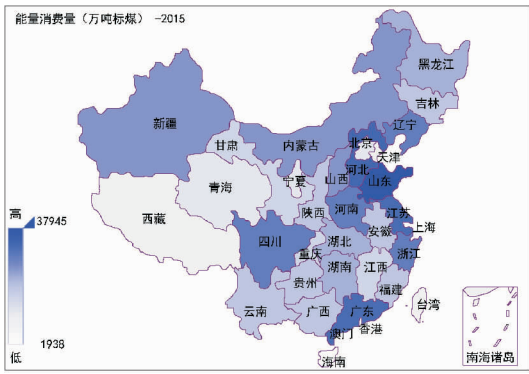
化碳排放量占世界总量的 27.3%,是目前世界上最大的二氧化碳排放国<sup>[1]</sup>。根据国家统计局的统计信息,在 2015 年中国的能源消费量如图 1 所示,从图中可以看出,我国能源消费量较高的地区主要分布在渤海湾地带、珠三角地带,均是我国主要的经济地区。工业发达,高新技术产业集中区域需要大量的能源来支撑经济的发展。但是,我国的能源生产地大多数都集中在大陆内部,水电资源、油气资源都主要分布在西部地区。因此,很有必要在沿海区域寻找新的清洁能源,以减轻我国西气东输,西电东送工程的压力,实现我国能源区域平衡。沿海最丰富的资源便是海洋资源,但是由于我国的海岸线存在争端,以及经济水平和科研水平等因素的限制,我国海洋资源开发和利用与西方发达国家相比,还处于初级阶段,我国目前对于海洋资源的开发水平还低于世界对海洋资源的开发水平,更低于海洋发达国家的开发水平<sup>[2]</sup>。人类现今开发的海洋资源仍然很少,仅深海区域还有 95%的区域人类还尚未开发利用,其中海洋干热岩资源就是一种优势特别明显的资源。

收稿日期:2018-03-20

基金项目:国家自然科学基金(4167040032,51541405)

作者简介:肖鹏(1994—),男,在读硕士,主要从事非常规能源研究工作。E-mail:1129677253@qq.com

\* 通讯作者:窦斌(1973—),男,教授,硕士生导师,主要从事非常规能源研究工作。E-mail:briandou@163.com



数据来源:国家统计局(由 EPS DATE 整理)

图 1 2015 年中国各省能源消费量示意图

Fig. 1 Energy consumption in China's provinces in 2015

干热岩(HDR)是地下 3~10 km 处存在的致密无裂隙,不含或者含有少量流体或气体的高温热岩体。自从 20 世纪 70 年代美国 Los Alamos 实验室首先提出干热岩的开发利用概念后,40 多年来干热岩的研究越来越受到科学界的关注,世界上先后有多个国家开展了干热岩的钻探实验。但是中国目前干热岩的研发工作尚处于起步,与发达国家的研究水平还存在一定差距。目前研究工作主要分布在大陆内部,比如西藏的羊八井、青海的共和盆地、贵德盆地等,这些地区水电资源丰富;经济相对比较落后,高耗能产业不如东部地区发达;水资源匮乏。因此有必要在东部沿海地区开展干热岩研发工作。

## 1 沿海 HDR 资源的形成分布

### 1.1 资源形成机制

我国东南沿海区域在中生代时期曾经发生过酸性岩体侵位,其规模在世界范围内都是较大的。据相关学者研究,我国东南沿海地区的酸性岩体侵位具有很强的分布规律。整体而言,东南沿海地区的花岗岩类岩浆活动具有由西向东,岩体侵位时代由老变新的整体趋势(图 2)。岩浆侵入的时期会产生逆向地热梯度和地壳的热异常,这将需要几百万年的时间才能完成衰变<sup>[3]</sup>。据学者蔺文静等<sup>[3]</sup>的理论,形成可开发干热岩资源最重要的物质条件是含有丰富的放射性元素的大规模花岗岩基体,我国东南沿海地区的地质背景提供了

大规模的放射性花岗岩,放射性元素的衰变为地热异常区的形成提供了能量来源。因此我国东南沿海地区分布着大量的地热资源。

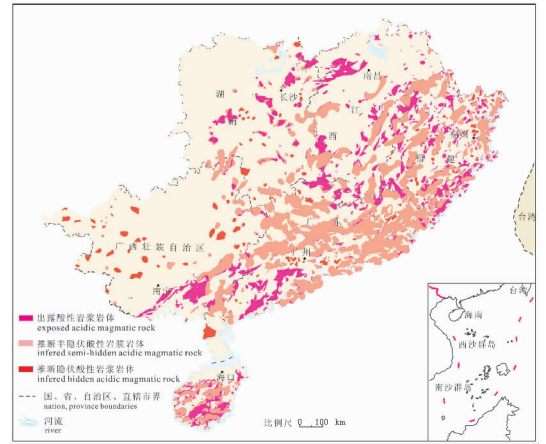


图 2 我国东南沿海酸性岩体分布示意图

Fig. 2 The distribution of acidic rocks along the southeast coast of China

洋壳的厚度比陆壳要薄,我国东部沿海地区临近海洋,地壳较薄。越往海洋方向,则地壳的厚度将会越薄<sup>[4]</sup>。由于干热岩的热能主要来源于地壳内部的放射性元素衰变和地球内部热能的向外扩散两个方面,海洋区域较薄的地壳则有利于岩浆向上的侵入和地球内部热量的散出,这就为干热岩资源的形成提供了条件。

根据相关资料,菲律宾板块和太平洋板块在地质构造力的作用下俯冲到欧亚板块东部的下方,欧亚板块东部地区的地壳由于板块俯冲而厚度变薄,形成断裂破碎带,为地下高温物质的上移提供了运移通道,同时板块俯冲也为深部高温岩浆的上涌提供了动力条件。在板块俯冲作用下,壳幔结构、断裂构造以及岩浆房位置的异常,必然对海底下热液流体的储存、运移和喷出产生影响,进而决定着热液活动<sup>[5,6]</sup>。因此我国东南沿海的海洋地区地壳较薄,便于地球内部的热量向外散出,同时并且由于地壳的破裂使得地壳深部的高温地幔物质上涌,形成地热异常区。

### 1.2 沿海区域 HDR 资源的分布

根据板块构造理论,中国大陆地区处于欧亚板块东部,主要受到印度洋板块、菲律宾板块和太平洋板块的碰撞挤压作用,形成了大量的地热资

源,使我国成为世界上地热资源最为丰富的国家之一。受地质构造因素的影响,中国 HDR 资源的潜在区域主要分布在西藏南部、滇西、中国东南沿海、环渤海、松辽盆地、关中盆地<sup>[7]</sup>。其中东部地区受到太平洋板块的挤压形成东北及华北地热异常带,即环渤海和松辽盆地地热异常区;东南部主要受到菲律宾板块的碰撞挤压作用,在东南沿海的福建、台湾及海南等地区形成地热异常带,即东南沿海地热异常区;西南部主要是受到印度洋板块的碰撞挤压,形成了我国著名的青藏高原地热异常带,即西藏南部和滇西地热异常区。著名的羊八井地热电站和共和盆地均处于此地热带。这些热异常区形成了丰富的地热资源,是我国目前干热岩地热资源优先开发的靶区<sup>[8]</sup>。这些地热异常带西南部的地热活动呈南强北弱、西强东弱的趋势,东部的地热活动呈现出东强西弱的趋势<sup>[9]</sup>。蔺文静等<sup>[3]</sup>对东南沿海的干热岩的赋存背景进行了论述,并根据东南沿海地区大地热流等值线示意图(图3)选取了广东阳江新州、广东惠州黄沙洞、雷琼断陷盆地、海南陵水等几个地区作为我国东南沿海干热岩开发的重点潜力靶区。福建省干热岩资源特别丰富,初步估算在5000m深度内地热能储量相当5万亿t标准煤,若以万米深度测算,地热储量相当于50万亿t标准煤<sup>[10]</sup>。台湾地区地热资源与火山活动密切相关,地下存在明显的地温梯度,台湾的地热资源主要蕴藏在大屯火山群以及中央山脉地区。大屯火山

群地热区地下热水温度在150~300℃之间,地热发电潜在在8~20万kW之间;中央山脉地区地下热水温度也高达150~230℃,地热发电潜在在10万kW<sup>[11]</sup>。曾梅香<sup>[12]</sup>研究了天津地区的干热岩资源潜力,认为天津地区处于高热流构造带附近,根据他的勘探成果分析,沧县隆起上白塘口西断裂东侧大芦一带和团泊东南地层深处埋藏着范围较大的基性火成岩,预计钻探至深部中元古界长城系地表以下3000~4000m的岩体温度可达110~150℃,以厚度550~600m估算热岩体所储存的地热资源约为 $1.72 \times 10^{20}$ J,每方千米产热量可达 $7.15 \times 10^{16}$ J<sup>[12]</sup>。

## 2 可行性探讨

### 2.1 勘查与钻井技术分析

随着全球经济的迅速发展,经济社会发展低于能源的要求越来越高,而海洋油气资源随着陆地油气资源的枯竭越来越受到世界能源科学界的关注。在海洋油气资源的开采过程中,海洋资源勘查与钻井技术也随之不断取得突破性的进展。

海洋资源的开发首先需要对海洋进行资源勘查,对海洋进行地质调查。我国在海洋地质调查取得了一系列重大进步。近10年来,我国海洋地质工作者在我国的海洋区域开展了一系列的地质构造、矿产资源、环境灾害和探查技术及仪器设备等方面的调查研究和研发,取得一系列重要成果。如历时8年的“我国近海海洋综合调查与评价”专项(908专项),完成了1:100万管辖海域的16个图幅、1:25万13个图幅的综合调查和9个区块海砂资源评价等。这些勘查资料可以为海洋地热资源的开采提供基础研究数据<sup>[13]</sup>。

我国相关部门从20世纪70年代就开始了海洋资源勘探与钻采装备与技术的研发,到目前为止,我国已经研制成功了坐底式、自升式及导管架式3个系列的海上钻井平台。深水半潜式钻井平台设计方面在20世纪80年代已经有所突破,到了90年代,我国的海洋石油企业逐步具备了建造超深水半潜式钻井平台的能力。2015年,由中国海洋石油总公司投资,我国首座自主研发、建造的第六代深水半潜式钻井平台“海洋石油981”在南

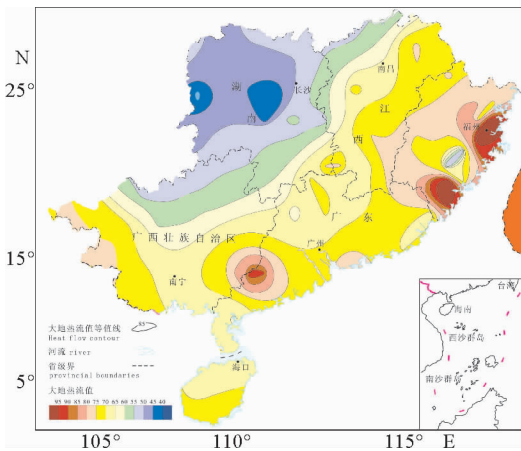


图3 我国东南沿海地区大地热流等值线示意图

Fig. 3 Isoline map of terrestrial heat flow along the coast of southeast China

海正式投入使用,其集全球一流设计理念及装备,最大作业水深达3 000 m,钻井深度可达12 000 m,使我国在海洋区域的资源勘查开采能力和装备跨入世界先进行列<sup>[14]</sup>(图4)。

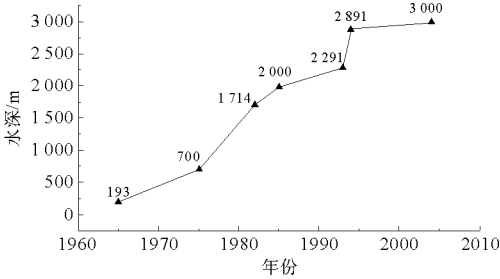


图4 海上钻井可及水深变化趋势

Fig. 4 Water depth of offshore drilling

随着海上钻探设备的不断升级更新,我国在海洋地区的资源开采能力不断提高加强,对于深水作业的限制和可开采水深及钻探深度不断增加<sup>[15]</sup>。

另外,在50多年的海洋油气勘探与开发过程中,在海洋油气工程技术方面也积累了丰富的经验。

## 2.2 抗震减灾分析

李德威等<sup>[16]</sup>认为在关联效应上,地热能的利害是一个辩证问题。地热在局部区域富集便会形成可供人类开发利用的地热资源,但是当其富集程度如果超过某一个临界值,地热能便会突然释放形成地震地质灾害。而且这种灾害具有连发、群发、突发的特征。因此,人类可以主动开发剩余地热能,主动释放剩余地热能,避免其超过临界值而成灾。

庄庆祥<sup>[17]</sup>认为中国地壳内部的能量释放方式主要通过地热能 and 地震两种方式释放,其认为地震与地热同源自于地心与地幔岩浆向上传导的能量,以上两种类型的能量可以互相转化。根据能量守恒定律,地壳内部的总能量是一定的,若地壳内部的能量以地热能释放为主,则地壳内部可提供于地震发生的能量就会大量减少,因此会降低次区域的地震发生频率;反之若地壳内部能量不能通过地热能释放出来,能量就会不断在地壳内部积累,当积累到一定程度时,这些能量便会以地震的形式释放出来。

东部沿海区域是欧亚大陆板块和太平洋板块及菲律宾板块的碰撞挤压区域,这些区域是我国的地震多发区域,地震活动频繁。根据庄庆祥的研究,如果在我国的东南地震多发地区进行干热岩开采的话,就可以减少我国沿海区域的地震发生频率,从而降低由于地震灾害所带来的经济损失以及人员伤亡。

## 2.3 需求分析

(1)丰富的水资源 目前在干热岩的开采中主要介质为水,干热岩在由钻井到发电的整个开采过程中,水是必须考虑的一个工程要素。钻井过程中钻井液的制备,成井后水作为开采介质且在开采过程中水会产生损失效应,这些都需要大量的水资源。内陆地区降水量较低,蒸发量大,水资源较为稀缺,但是在沿海地区,特别是海洋区域有着丰富的水资源。这就很好地解决了干热岩在开采过程中的水资源供应问题。

(2)更多的利用范围 由于沿海地区比较潮湿,给一些生产部门和人们的日常带来了许多不便;另外在海洋地区有一些干燥加工的生产过程。在这些方面就可以利用干热岩的能量来进行除湿或者产品干燥。由于东部地区人口众多,生活用水需求大,而海水又不能直接作为淡水资源当作生活用水,因此可以利用干热岩进行海水淡化,解决人们的生活用水问题。另外,我国的东部沿海地区可以利用干热岩的热能来养殖一些更加有经济效益的热带海洋产品,增加我国东部的经济收入和就业岗位。

(3)环保的迫切需求 随着沿海地区人们生活水平的提高和环境问题越来越突出,环境问题越来越突出,人与自然的矛盾越来越尖锐。而沿海区域是我国重要的经济区域,这些地区经济发达,耗能产业众多,在消耗能源的过程中排放了大量的废水、废气、废料。干热岩在开采过程中基本上不排放任何废物,基本上实现零排放,是一种环境友好型清洁能源。因此在海洋区域进行干热岩的开采可以很好的解决人与自然的矛盾,使沿海地区的环境得到很好的改善,从而提升沿海地区人民的生活质量。

(4)土地资源需求 沿海地区人口密度大,土地资源十分宝贵。但是如果在沿海陆地区开采

干热岩以及修建其他能源供应基底就需要占用大量的土地资源,海洋区域人类无法居住,在海底开采干热岩就会节省大量的土地资源,使海洋土地资源得到更好的利用,解决沿海地区土地资源稀缺问题。

### 3 存在问题及解决措施

虽然在海洋区域开采干热岩有很多优势,但是目前在资源勘查评估、开发技术、理论研究及其资金等方面仍然存在很多问题。

(1)认识不足 目前由于干热岩的开发研究仍然处于初级阶段,在陆地上的开发技术还不够成熟,尚未进入商业化的开发利用阶段。在海洋区域由于地质条件等开采条件更为复杂,干热岩开采难度更大。人们目前还没有意识到海洋地热资源的储量优势、开发优势等,对海洋干热岩资源的研究还没有足够的重视。

(2)资源勘查程度低 由于在深水区域地质及海洋的特殊性,在海洋区域进行资源勘查评价具有一定的难度,所以目前我国关于海洋区域干热岩资源的勘查评价的数据资料很少,甚至处于空白状态。

为了摸清家底,了解我国海洋区域的干热岩资源分布情况,为后期干热岩的开采提供理论数据,必须加大海洋区域干热岩资源的勘查力度,查清我国海洋区域干热岩的分布规律及其储量,并建立我国的干热岩资源数据库。

(3)海洋勘查及其钻井技术及装备尚需进一步发展 虽然我国的海洋资源勘查和钻进技术取得了一系列的成就,但是与发达国家相比仍然有很大的差距,目前一些设备的核心部件仍然依赖于国外进口,自己无法独立生产出来;作业水深和可钻深度与发达国家相比仍然相差很远。

大力发展我国海洋勘查钻进技术,在我国海洋油气资源勘查开发的基础上对相关的设备以及技术进行改造升级,创造出适合于我国海洋区域的一系列干热岩勘查及其钻进技术。同时也可以学习借鉴国外发达国家的先进技术,引进国外先进设备。

(4)缺乏研究资金 在海洋区域进行作业由于作业环境的特殊性和复杂性,对作业人员的水

平和设备的要求更加高,因此便需要投入更多的资金来支撑海洋干热岩项目的顺利进行。

有关部门应该加大对海洋干热岩研发方面的资金、技术、人才投入,对这方面的研究设立专项研究基金,鼓励学者进行相关的研究;另外企业可以将干热岩的产学研相结合,和相关的科研机构、院校进行合作。

### 4 结语

干热岩是一种具有很多优势的可再生清洁能源,具有很高的开发价值。但是目前国内干热岩的研究基本上都是在陆地上进行,忽略了海洋区域干热岩的研究开发。我国沿海地区是欧亚大陆太平洋板块、印度洋板块以及菲律宾板块的碰撞挤压地带,这些地带的地质结构为干热岩资源的形成提供了有利的条件。我国沿海区域一般都是经济高度发达地区,对能源的要求一般比内陆地球要高得多,而沿海区域的煤炭,电力资源都不如内陆地区丰富。因此十分有必要关注海洋区域的干热岩资源,对其进行研究开发,为东部沿海区域提供充足的能源,推动我国经济的快速发展。我国沿海区域地震灾害多发,根据庄庆祥提出的理论,在沿海区域进行干热岩的开发工作有利于减少沿海地震发生的频率,保护沿海人民生命财产的安全。

海洋区域干热岩的研究开发有很多优势,但是海洋环境恶劣,地质环境复杂,勘查钻进工作难度大,勘查成本大约是陆地的3~10倍,而且我国海洋资源的勘查与开发的技术设备与西方发达国家的水平仍然有差距。

发展远洋深海,提高海洋资源开发能力,是缓解资源短缺危机和提高资源配置效率的重要举措,也是我国“海洋强国”战略和全面建成小康社会的必然要求。现在我国海洋区域的权益问题十分严重,和我国周边的日本、菲律宾等国家在海洋问题上存在很多分歧。我们只有掌握先进的技术才能在海洋争端问题上有更多的话语权,维护国家的利益,实现海洋强国的战略目标。

#### 参考文献:

- [1] BP世界能源统计年鉴第66版[OB].[2017-6]

- [2] 杨旭. 关于深海资源可持续发展的几点思考[A]. 辽宁省法学会海洋法学研究会. 辽宁省法学会海洋法学研究会2016年学术年会论文集[C]//辽宁省法学会海洋法学研究会, 2017: 5.
- [3] 蔺文静, 甘浩男, 王贵玲, 等. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究[J]. 地质学报, 2016, 90(8): 2043-2058.
- [4] 王晴. 亚洲东部边缘海地区背景噪声层析成像[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [5] Wang K L, 戴佩君. 西南日本俯冲带的热状态: 俯冲板块年龄史的影响[J]. 海洋地质译丛, 1996(2): 47-58.
- [6] 尚鲁宁. 冲绳海槽构造地质特征及形成演化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [7] Wang G L, Lin W J, Zhang W, et al. Research on formation mechanisms of hot dry rock resources in China[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2016(4): 1418-1433.
- [8] 杨方, 李静, 任雪姣. 中国干热岩勘查开发现状[J]. 资源环境与工程, 2012(4): 339-341.
- [9] 窦斌, 高辉, 周刚, 等. 我国发展增强型地热开采技术所面临的机遇与挑战[J]. 地质科技情报, 2014(5): 208-210.
- [10] 庄庆祥. 福建省干热岩研究第I期工程项目中地热发电内容的探讨[J]. 能源与环境, 2012(2): 53-54.
- [11] 龚士良. 台湾地热资源及其温泉开发[J]. 地下水, 2003(4): 235-236.
- [12] 曾梅香. 天津地区干热岩地热资源开发利用前景浅析[C]//中国地热资源开发与保护——全国地热资源开发与保护考察研讨会论文集. 中国能源研究会地热专业委员会, 2007.
- [13] 莫杰, 王文海, 彭娜娜, 等. 我国海洋地质调查研究新进展[J]. 中国地质调查, 2017(4): 1-8.
- [14] 祝沛楨, 李政航, 程龙. 深海石油钻采机械发展现状及展望[J]. 科技经济导刊, 2016(30): 58.
- [15] 窦玉玲, 管志川, 徐云龙. 海上钻井发展综述与展望[J]. 海洋石油, 2006(2): 64-67.
- [16] 李德威, 王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015(11): 1858-1869.
- [17] 庄庆祥. 增强型地热系统与防震减灾的研究与探索[J]. 能源与环境, 2012(1): 4-5+7.

## FEASIBILITY OF EXPLOITATION OF SUBMARINE HOT DRY ROCK IN OFFSHORE AREA

XIAO Peng, DOU Bin, TIAN Hong, LIU Hengwei, CHEN Dongcan

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The dry hot rock is a kind of clean and renewable energy sources newly discovered. Current researches either domestic or abroad are mainly concentrated in inland areas and the research in the ocean area remains blank. In order to evaluate its development potential in the offshore region, the formation mechanism of the sea bottom dry hot rock is discussed in this paper from the geological perspective. And the distribution of dry hot rocks in coastal areas is also reviewed taking the resources in some typical target areas as examples. The feasibility of dry hot rock mining in offshore area is analyzed from three aspects: exploration and drilling technology of submarine mineral resources, the status of domestic energy consumption and demand, and the relation between geothermal energy and earthquake. In fact, the activities of hot dry rock mining is rare in the world and exploration data remains scarce, equipment and technology are not available so far and there need more funds for research. After a thorough review, we suggest starting resource exploration and evaluation in coastal areas; specific technology and equipment suitable for the exploration and exploitation of dry hot rocks be developed, and financial support be enhanced for research projects on marine dry hot rocks. The corporation among enterprises, research institutions and university colleges are encouraged.

**Key words:** hot dry rock; ocean resources prospecting; feasibility