

海南地热能海水淡化可行性探讨

刘睿贤^{1,2}, 田红^{1,2}, 窦斌¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了解海南地区利用地热能进行海水淡化的可行性, 阐述了海南缺水情况以及地热资源分布, 并对使用地热能进行海水淡化作了技术和经济探讨, 结果表明海南缺水地区可以从当地可用的地热资源中获益。同时, 指出基于地热能的海水淡化仍面临一些问题, 需要提高重视程度和科研投入, 并试行推广积极的产业扶持政策, 从而促进海南地热能海水淡化的研究和利用。

关键词: 地热能; 海水淡化; 海南; 可行性

中图分类号: P747⁺.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)01-0046-06
DOI: 10.11759/hyxx20181128003

海南省位于我国南端, 是仅次于台湾岛的第二大岛屿, 全岛处于热带和亚热带地区, 年平均气温 22~27℃; 四面环海, 水资源丰富, 年降水量在 1 000~2 600 mm^[1]。2016 年, 海南全省人口 917 万人, 人均拥有水资源量 5 342 m³, 人均综合用水量 490 m³, 位于国内前列^[2]。但是, 表面上拥有丰厚水量的海南, 却面临着比较突出的缺水问题。

从长远考虑, 随着社会经济不断发展, 以及面临的缺水少水和干旱问题, 海南省需构建水资源可持续利用的多方式供水体系。作为水资源开源增量的有效途径, 海水淡化可有效缓解水资源短缺问题, 对改善海南用水情况发挥至关重要的作用。随着科技的不断进步, 当前海洋工程领域将使用可再生能源进行海水淡化作为研究的前沿方向。地热能作为一种海水淡化的新能源方式, 近年来已经引起国内关注, 海南可以考虑通过开发其地热资源来支持海水淡化过程并为省内工业和农业部门供应淡水, 以减轻水资源紧张的局面。本文基于海南水资源和地热资源分布情况, 对地热能海水淡化作经济和技术可行性探讨, 指出其中存在的问题, 并提出推进地热能海水淡化的相关建议。

1 海南水资源概况

海南降雨量空间分布不均(图 1), 岛中部及东北部雨量多, 西南部雨量少, 降水量年际变化大, 丰水年和枯水年相差可达数倍。此外, 海南岛地形中高周低, 河短坡少, 水系呈均匀放射状, 源短流急, 暴涨

暴落, 开发利用难度大, 时空分布极不均匀, 导致了冬春干旱时常发生(图 2), 严重影响了居民的生产和生活^[3]。再加上需水高峰与枯水期叠加、水资源浪费及台风等因素的影响, 使得海南用水问题更为突出。

2016 年, 海南全省总供水量 44.96 亿 m³, 其中地表水源供水量 41.88 亿 m³, 占总供水量的 93.1%^[4]。在海南各河流域和地区中, 南渡江流域、昌化江流域、万泉河流域、海南岛东北部、海南岛西北部以及海南岛南部河流开发利用率为 15.8%、12.8%、5.5%、14.7%、28.3%、14.9%。而国际上一般认为, 一条河流的合理开发限度为 40%, 越接近 40%, 表明该地区越缺乏水资源; 而当利用率超过 40%时, 表明严重缺水, 可能导致环境、经济和社会安全问题^[5]。

上述数据表明: 海南中部山区拥有较充沛的降水量, 但水资源开发利用率低; 而降水量较少的东北部、西北部和南部, 却有着较高的水资源开发利用率, 且面临一定的缺水情况。以北部的海口为例, 2018 年海口在用水高峰季节每天需水量短缺 6 万~8 万 t;

收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2019-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602374, 41674180); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CUGL170207); 工程地质与岩土防护学术创新基地岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放研究基金(201703) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41602374, No.41674180; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China University of Geosciences (Wuhan), No.CUGL170207; the Open Fund of Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, No.201703]

作者简介: 刘睿贤(1993-), 男, 甘肃秦安人, 在读硕士, 主要从事非常规能源研究工作, E-mail: 291979564@qq.com; 田红(1982-), 通信作者, 女, 副教授, 硕士生导师, E-mail: htian@cug.edu.cn

且近 5 年来, 需水量年均保持约 3.5% 的增长速度, 使得海口面临十分严峻的供水保障形势。

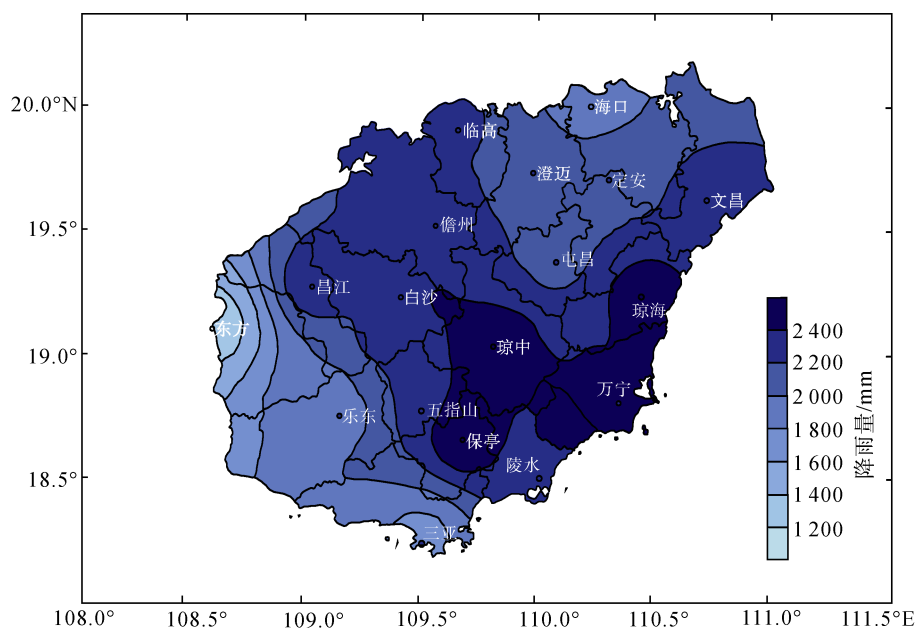


图 1 2016 年海南省年降水量(改自 2016 年海南风洪旱灾害公报, 图 2 同)

Fig. 1 Annual precipitation in Hainan Province in 2016 (Revised from Hainan Provincial Bulletin on Wind, Flood and Drought in 2016, Fig. 2 as well)

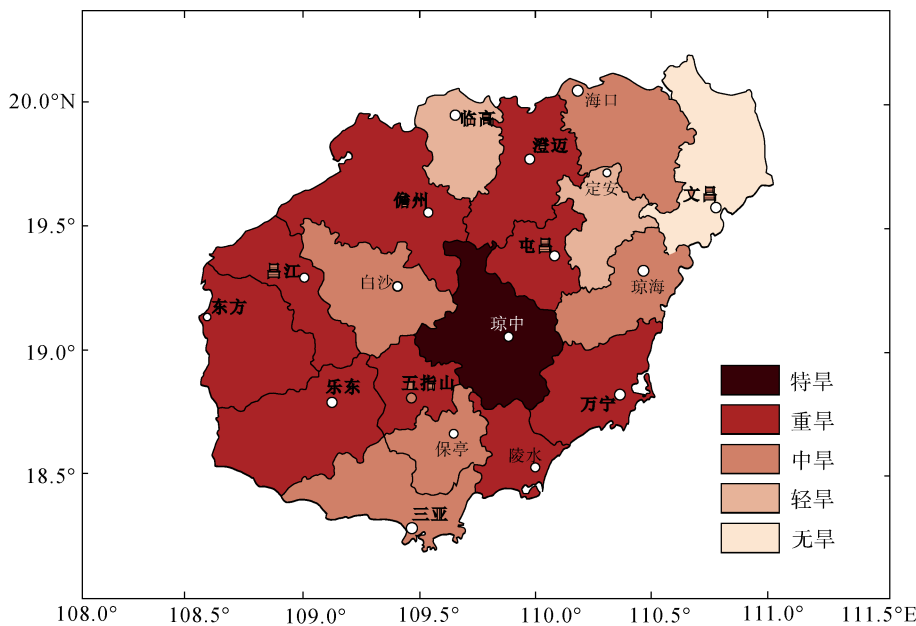


图 2 2016 年海南省各市县气象干旱最重时所达级别分布

Fig. 2 Grade distribution of meteorological drought in all cities and counties of Hainan Province in 2016

2 海南地热能资源分布

地热能是一种绿色环保、持续稳定、利用率高的可再生能源, 是取之不尽, 用之不竭的, 具有极大的开发潜力。

海南地热能资源以水热型为主, 全岛水热资源受地质构造、岩石地层及地貌的控制, 总体可分为两类, 分别为基岩构造裂隙带状热水型和孔隙层状热水型^[6]。已发现的构造裂隙带状型热矿泉(温泉)32 处, 总体呈环岛分布格局, 估算储量约为 10 万 m³/d。孔隙层

状热水型，主要分布在琼北及西南部自流盆地中，其中琼北断陷盆地内埋藏较深，西南部自流盆地内埋藏相对较浅，水温相对低，呈现不连续的薄层状。

此外，海南省北部深层地热地质条件良好，琼州裂谷南侧的琼北拥有优质的干热岩热能资源。2018年3月23日，中国第一口具有独立知识产权的干热岩开发实验井在海南北部完钻，该井在4387 m深度处获得超过185℃的干热岩(非稳态测温)，成为我国第一口进入开发阶段的干热岩钻井^[7]，表明海南北部存在可用于商业化的优质干热岩。

依据海南地热资源分布及勘查与开发规划^[8]，可将海南岛划分为限制开采区、允许开采区以及鼓励开采区3类，在大多数情况下，海南地热开发区与缺水少水地区以及用水量巨大、主要集中于西北和北部的工业地区相匹配。这表明，这些地区存在从当地地热资源中获益的可能。

3 地热能海水淡化可行性分析

3.1 地热能海水淡化方法

海水淡化是指将海水里面的溶解性矿物质盐分、有机物、细菌和病毒等分离出来从而获得淡水的过程。目前国际上使用的传统海水淡化的主要方法包括膜法、结晶法和蒸馏法等，而我国海水淡化工程多采用低温多效蒸馏(LT-MED)和反渗透(RO)技术。

由于低温多效蒸馏海水淡化技术具有操作温度低、动力消耗小等优点，使得其成为我国第二代海水淡化厂的主流技术之一^[9]。采用低温多效蒸馏法进行海水淡化时，海水的最高温度只需70℃，而海南地下热水温度一般在32~97℃。当采用与地热能相结合的低温多效蒸馏海水淡化方法时，地热水可通过换热器将海水加热到淡化时所需要的温度。因此，通过地热能解决低温多效蒸馏法进行海水淡化时所需的热源问题，在技术上具有可行性。

反渗透海水淡化方法，是以压差推动的海水淡化过程。截至2015年底，我国已建成海水淡化工厂121座，其中应用反渗透技术的为107座，占88.43%，处于主流位置^[10]。采用反渗透技术时，膜通量对海水温度有较高的敏感性，尤其是当冬季水温低时，会导致膜通量大幅下降。这是因为低温进水具有较高的黏度和较高的通过膜的阻力，而高温进水具有较低的黏度而产生较高的产量。依据相关研究^[11]，当进料海水温度从25℃增加到35℃时，渗透通量增

加了34%；而当进料海水温度从20℃升高到40℃时，渗透通量增加了60%，即每2℃的温差大约增加6%的渗透流量。因此，当采用与地热能相结合的反渗透海水淡化方法时，利用地热水加热海水，可以提升膜通量，进而提升产量；此外，反渗透的膜过程需要更高的机械能来在冬季泵送冷海水，以满足日常生产率，而依靠干热岩发电技术所建立的发电厂可以满足反渗透装置的电力需求，从而实现热-电-水联产。

海南还存在一种地热海水淡化热源，即废弃的油气井。废弃的油气井可以用作热源，由于不需要钻井，运行成本低于地热热源。使用废弃油气井的两个前提包括：首先，它们对环境友好且不产生任何排放；其次，这些油井已经无法再开采油气。因此，使用废弃的油气井是化石燃料的良好替代品，可以促进可持续发展。油气井热源通常被称为“低温地热热源”，具有宝贵的能源潜力。利用废弃的油气井进行海水淡化，需要利用经过设计的井下换热器以提取可用的热量。过程如下^[12]：将水泵入废弃的油气井中，在井中，水的温度达到接近100℃并返回到地表，进行多效淡化或反渗透的加热过程。此后，将冷水再次泵送到井中以恢复热量，从而实现循环过程。在海南北部，如福山凹陷地区，有很多被遗弃的油气井，可以作为海水淡化的热源重新使用。

3.2 地热能海水淡化经济性分析

依据相关统计^[13]，2016年我国海水淡化水年成本在5~8元/m³，主要包括电力消耗成本、药剂消耗成本、蒸汽消耗成本以及维护成本等。其中，日产水能力在万吨级和千吨级的淡化工厂，产水成本分别为7.2元/t和6.22元/t。

赵建康等^[14]对地热能海水淡化中采用低温多效蒸馏法进行了成本分析。指出与采用工业余热相比，利用低温多效蒸馏方法，百吨级和千吨级的淡化装置的综合成本分别下降81.3%和99.3%，具有相当显著的经济效益。Loutatidou等^[15]研究了海湾地区的两个基于低温多效蒸馏和反渗透方式的地热能海水淡化厂，指出虽然低温多效蒸馏方法直接利用地热，但却相当耗能，低温多效蒸馏需要的地热能量比反渗透大约多34%，由此也使得地热田使用成本高出58%。然而，由于规模经济，使得采用低温多效蒸馏的地热田成本比反渗透少3%，因而具有成本优势。另一方面，使用反渗透方式的主要能耗贡献者是高压泵，几乎占总能耗的74%，如果使用地热能，则可

以显著降低成本。例如，位于加利福尼亚州南部的海水反渗透工厂的给水温度的提高导致了饮用水成本的大幅降低。其中每 1℃ 进料温度增加，膜生产率增加约 2%~3%，从而提高淡水产量，减少成本。

4 地热能海水淡化优势

地热能是一种有前途的可再生能源，由于其拥有可靠且极其稳定的能量供应，非常适合海水淡化。对于海南各种家庭和工农业用水而言，使用地热源海水淡化有如下好处：

地热能可提供稳定可靠的供热，确保热脱盐和反渗透过程的稳定性。地热能可提供覆盖恒定的电力需求，如负荷海水淡化厂。

地热生产技术(从地下含水层中提取热水)已经成熟。它不受季节变化和天气波动的影响。

海南大多数地区的典型地热源温度在 70~90℃ 范围内，这对于低温多效淡化是理想的；而高于 100℃ 的地热源可用于发电并为反渗过程提供电力。

地热海水淡化具有成本效益，可以同时进行电力和水的生产。其热能供应的自给自足和电能供应的潜在自给自足相较其他淡化方式是一大优势。

地热海水淡化是环保的，因为它是该过程中使用的唯一可再生能源，不会排放与化石燃料有关的空气污染物和温室气体。地热海水淡化减少了进口化石燃料的使用，改善了当地的能源安全和环境可持续性。

5 地热能海水淡化面临的问题

当前海南利用地热能进行海水淡化时，还面临如下问题：

认识问题。利用地热能进行海水淡化，首先需要摸清地热资源分布。而当前海南地热资源开发利用中存在的首要问题便是资源摸底不清，对全岛地热资源储量缺乏准确的统计数据，从而导致无法量化用于海水淡化的具体前景。

技术问题。由于我国海水淡化技术与世界先进水平相比存在一定的差距，导致海水淡化设备的国产化率不高，海水淡化装置中 70% 的核心设备需要进口。此外，海水淡化过程中存在的技术问题，例如，降低淡化水中硼含量的问题，仍需进行大量科研攻关。

价格问题。我国长期实行一个水价补贴政策使得多地方有较便宜的水价。而对于从一开始就完全按照市场化方式运作海水淡化工程，其资金来源大多依赖银行贷款和自筹，使得海水淡化不仅需要考

虑建设和运行成本，还要考虑投资效益，这便加大了淡化水推广的难度。

研发资金投入问题。我国海水淡化技术是在国家和各级政府支持下发展起来的，与拥有先进技术的国家相比，不仅缺乏足够的研发资金，也缺少创新和技术研发平台。

社会问题。要成功实施地热能海水淡化，还需要考虑其它一些重要因素。主要涉及土地利用，地质灾害，废热，大气排放，水足迹，噪声和社会经济问题，这需要综合考虑，制定可行方案。

6 结语

海水淡化是水资源的开源增量技术，由于其不受气候条件影响，因而具有供水稳定、水质优良等特性。处于我国南端的海南虽然有充沛的降雨量和水资源，但由于地理和气候等因素的影响，仍面临区域性、工程性和季节性缺水问题。而解决海南存在的缺水问题，海水淡化是一条重要途径。当前海南需要大力发展海水淡化，提高供水保障率。在各种能源驱动的海水淡化方式中，常规化石燃料消耗大量能量并且对环境具有高度破坏性的影响，而地热能是为现代海水淡化过程提供动力的有前景的替代选择。

虽然基于地热能的海水淡化过程仍存在影响其发展的技术和社会因素，但依托国内目前主要采用的两种海水淡化方式，即低温多效蒸馏和反渗透方式，利用水热资源、干热岩地热资源和废弃的油气井，来提供淡化过程所需的热源和电力，可有效减少传统能源所带来的环境和社会问题，并提高淡水产量，降低生产成本。

在推动地热能海水淡化利用进程中，除了应加大扶持力度，解决关键技术外，还应借鉴国外先进经验，选取若干缺水和用水量较大的市县进行试点，逐步推进检验合格的海水淡化水进入供水管网，并在高耗水企业积极推广海水淡化水，从而有效缓解海南存在的缺水问题。

参考文献：

- [1] 海南省地方志办公室. 海南省志·自然地理志[M]. 海口：海南出版社，2010.
Hainan Provincial Local Records Office. Hainan Province Records·Natural Geography[M]. Hainan: Hainan Publishing House, 2010.
- [2] 海南省水利局. 2000 年海南省水资源公报[EB/OL]. [2001-02-16]. <http://swt.hainan.gov.cn/sswt/1801/200102/>

- 2d27c4d1a6ec4d1ebe2d5a0c4bf3c76c.shtml.
Hainan Provincial Water Resources Bureau. Hainan Provincial Water Resources Bulletin in 2000 [EB/OL]. [2001-02-16]. <http://swt.hainan.gov.cn/sswt/1801/200102/2d27c4d1a6ec4d1ebe2d5a0c4bf3c76c.shtml>.
- [3] 周祖光. 海南省水资源现状与开发利用[J]. 水利经济, 2004, 22(4): 35-38.
Zhou Zuguang. The current situation, development and utilization of water resources in Hainan Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2004, 22(4): 35-38.
- [4] 海南省水务厅. 2016 年海南省水资源公报[EB/OL]. [2017-11-27]. <http://swt.hainan.gov.cn/sswt/1801/201711/774dd40172494335a44c593ac57b5f81.shtml>.
Hainan Provincial Water Affairs Department. Hainan Water Resources Bulletin in 2016 [EB/OL]. [2017-11-27]. <http://swt.hainan.gov.cn/sswt/1801/201711/774dd40172494335a44c593ac57b5f81.shtml>.
- [5] 徐磊磊, 刘海清, 金琰, 等. 海南省水资源开发利用特点及主要水资源问题[J]. 热带农业科学, 2017(9): 123-130.
Xu Leilei, Liu Haiqing, Jin Yan, et al. Characteristics and problems from development and utilization of water resources in Hainan Province[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2017(9): 123-130.
- [6] 陈颖民. 海南岛地热资源现状及勘查开发利用建议[J]. 国土资源科技管理, 2008, 25(6): 61-65.
Chen Yingmin. Present Situation of geothermal resource in hainan island and suggestions for development and exploitation[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2008, 25(6): 61-65.
- [7] 柳冰冰. 海南: 我国第一口干热岩开发井高温完钻 [EB/OL]. [2018-03-19]. <http://www.zhongxuntv.com/news/134303.html>.
Liu Bingbing. China's first HDR development well is drilled at high temperature[EB/OL]. [2018-03-19]. <http://www.zhongxuntv.com/news/134303.html>.
- [8] 海南省国土环境资源厅. 海南省地热资源勘查开发利用规划[EB/OL]. [2009-10-17]. <http://www.doc88.com/p-191574478181.html>.
Hainan Provincial Department of Land and Resources. Geothermal resources exploration and development planning of Hainan Province [EB/OL]. [2009-10-17]. <http://www.doc88.com/p-191574478181.html>.
- [9] 李长海, 张雅潇. 海水淡化技术及其应用[J]. 电力科技与环保, 2011, 27(1): 48-51.
Li Changhai, Zhang Yaxiao. Discussion on seawater desalination technology and its application[J]. Electric Power Environmental Protection, 2011, 27(1): 48-51.
- [10] 杜鹏, 李琳, 王金成. 海水淡化处理技术的方法及成本分析[J]. 工程造价管理, 2018(2): 64-69.
Du Peng, Li Lin, Wang Jincheng. Analysis on method and cost of seawater desalination technology[J]. Engineering Cost Management, 2018(2): 64-69.
- [11] Gude V G. Geothermal source potential for water desalination: Current status and future perspective[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 1038-1065.
- [12] Noorollahi Y, Taghipoor S, Sajadi B. Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells[J]. Geothermics, 2017, 67: 66-75.
- [13] 邱明英. 浅析我国海水淡化技术[J]. 中国环保产业, 2018(3): 58-60.
Qiu Mingying. Analysis on desalting technology of sea water in china[J]. China Environmental Protection Industry, 2018(3): 58-60.
- [14] 赵建康, 张勇. 地热能海水淡化技术可行性分析及前景展望[EB/OL]. [2013-05-16]. <http://www.doc88.com/p-78640380104.html>.
Zhao Jiankang, Zhang Yong. Feasibility analysis and prospects of geothermal energy desalination technology [EB/OL]. [2013-05-16]. <http://www.doc88.com/p-78640380104.html>.
- [15] Loutatidou S, Arafat H A. Techno-economic analysis of MED and RO desalination powered by low-enthalpy geothermal energy[J]. Desalination, 2015, 365: 277-292.

Feasibility of seawater desalination powered by geothermal energy in Hainan

LIU Rui-xian^{1, 2}, TIAN Hong^{1, 2}, DOU Bin¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Received: Nov. 28, 2018

Key words: geothermal energy; seawater desalination; Hainan Province; feasibility

Abstract: This article expounds on the water shortage and water resources in Hainan Province and the distribution of geothermal resources to determine the feasibility of utilizing geothermal energy in Hainan Province for performing seawater desalination. The article also discusses the technical and economic feasibility of using geothermal energy for seawater desalination. Results show that water-deficient locations can benefit from locally available geothermal resources. However, seawater desalination based on geothermal energy still faces several problems. Increasing the degree of emphasis and investment in scientific research is necessary to promote active industrial support policies and to jointly encourage the research on and utilization of geothermal energy desalination.

(本文编辑: 刘珊珊)