

长三角地区地热利用创新技术应用进展

姚远^{1,2,3}, 龚宇烈^{1,2,3*}, 叶灿滔^{1,2,3}, 邬小波⁴, 曲勇⁵, 杜建国⁶, 茅伟东⁷, 汪育超⁸

1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640
2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640
4. 中能建地热有限公司, 北京 102627
5. 烟台欧森纳地源空调股份有限公司, 烟台 264003
6. 江苏地质调查研究院, 南京 210018
7. 南京丰盛新能源科技有限公司, 南京 210000
8. 合肥热电集团有限公司, 合肥 230088

摘要 介绍了含水层储能技术、江水源热泵技术、冰源热泵技术、浅层渗滤海水源热泵技术、地源热泵综合能源技术和地热综合梯级利用技术等浅层地热和中深层地热利用创新技术的基本工作原理。通过调研这些技术在长三角地区的应用案例, 分析了其技术先进性、经济性以及需要解决的主要问题。结果表明, 含水层储能要优化成井技术以避免对地下环境的破坏; 江水源热泵技术难点在于水温、水质、水量以及运行管理上; 冰源热泵对于冰浆的制备与输运系统提出了更高要求; 浅层渗滤海水源热泵工程的实施必须要有适合的水文地质条件; 地源热泵综合能源技术强调了供能系统的多元化和互补性, 而地热综合梯级利用技术则是突出了用能系统的能量梯度化, 这两种技术推广的关键在于经济性。

关键词 地热利用; 含水层储能; 水源热泵; 过冷水; 渗滤; 综合能源; 梯级利用

长江三角洲地区位于中国长江的下游地区, 濒临黄海与东海, 区域内河川纵横, 湖荡棋布, 是中国河网密度最高的区域^[1]。长三角的亚热带气候特征使其既有夏天的制冷需求, 也有冬天的供暖需求,

但冬天供暖强度低于严寒和寒冷地区, 夏天的制冷强度又低于夏热冬暖地区。正是由于看似需求并不强烈, 中国长久以来并没有将集中供暖系统作为必要市政设施在长三角地区进行投资建设。相对

收稿日期: 2022-10-17; 修回日期: 2023-02-24

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-ST5-QYZD-2021-02-006); 天津市重点研发计划项目(20YFYSGX00020); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA21050500); 中国科学院学部咨询评议项目(2020-DX03-B-007)

作者简介: 姚远, 高级工程师, 研究方向为地热能发电与地热直接利用, 电子信箱: yaoyuan@ms.giec.ac.cn; 龚宇烈(通信作者), 研究员, 研究方向为低品位热能高效转化与利用, 电子信箱: gongyl@ms.giec.ac.cn

引用格式: 姚远, 龚宇烈, 叶灿滔, 等. 长三角地区地热利用创新技术应用进展[J]. 科技导报, 2023, 41(12): 33-45; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.005

于北方,长三角地区的湿度较大,在相同气温下,冬季体感温度较低,觉得“湿冷”,夏季体感温度较高,觉得“闷热”。所以,随着人民群众生活水平的不断提高,长三角地区对集中供暖和制冷的需求日益强烈。在中国追求尽快实现“碳达峰、碳中和”目标的背景下,长三角地区作为中国经济最发达、环保意识最强、创新水平最高的区域之一,扩大利用清洁的可再生能源为建筑供暖制冷是必然选择^[2]。

目前,可利用的可再生能源主要有风能、太阳能、水能、生物质能、海洋能、地热能等非化石能源。其中,风能、水能、生物质能、海洋能主要用于发电,而直接用于供暖或制冷的一般以太阳能、地热能为主。相对于太阳能天然的不稳定性,地热能依靠其庞大的地下热储可以实现在一定条件下的热能稳定输出,其稳定性使得地热利用设备工作效率和投资回报都可以得到保证。另外,地热空调设备一般只有热传递或冷热转换过程,其能量转化效率远大于新能源发电装置。中国的地热直接利用规模早已居世界首位,称得上世界地热利用大国^[3]。2020年,全国地热供暖面积大致在14亿 m^2 ,其中水热型中深层供暖面积为5.8亿 m^2 、浅层供暖面积为8.2亿 m^2 。按相关规划,到2035年,地热供暖(制冷)面积将达到42亿 m^2 ^[4]。虽然中国地热供暖规模庞大,但大多数集中于北方地区,处于东南部的长三角地区最近几年才开始加大地热利用的推广力度。尽管起步较晚,但在技术上长三角地区却有后发优势,目前中国在地热开发上的创新技术大多在该地区首先得到推广应用。

1 含水层储能技术

地下储能分为含水层储能(ATES)和钻孔式储能(BTES)。前者主要是利用地下水作为储热媒介,而后者主要是利用土壤作为储热媒介。因为水的热容量远大于土壤,所以ATES单位储热量的成本最低,最有经济性。与已广泛推广应用的BTES技术相比,中国的ATES技术刚刚才开始起步,目前全国只有不超过10个应用案例^[5]。长三角地区是中国地下水资源最为丰富的地域之一,具有实施

含水层储能技术的天然优势。

1.1 含水层储能原理

含水层常指土壤通气层以下的饱和层,其介质孔隙完全充满水分^[6]。根据距离地表深度不同,处于近地表含水层为潜水含水层,处于地下深处含水层为承压含水层。承压含水层的水温几乎不受外界因素的影响,是一个恒温带,具有较好的储能效果^[7]。因此,含水层储能主要是指承压含水层的蓄冷蓄热。含水层储能的原理如图1所示。在供暖季,从“热井”抽出高温地下水经过热泵蒸发器,被热泵工质吸取热量后温度降低,并回灌至“冷井”。在整个供暖季,“热井”周边的热水体由大变小,而“冷井”周边的冷水体由小变大。而到了空调季,从“冷井”抽出冷的地下水(供暖季回灌至“冷井”的冷水),经过换热器或制冷机组向建筑供冷,释放冷量(吸热)后的地下水升温并回灌至“热井”。在空调季,“冷井”周边的冷水体由大变小,而“热井”周边的热水体由小变大。全年来看,含水层的地下水放热、吸热过程周而复始,实现了“冬冷夏用”“夏热冬用”的跨季节储能。地下储能的冷热水体温度场变化情况如图2所示。

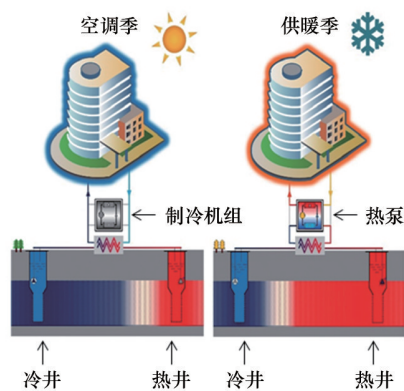


图1 含水层储能原理

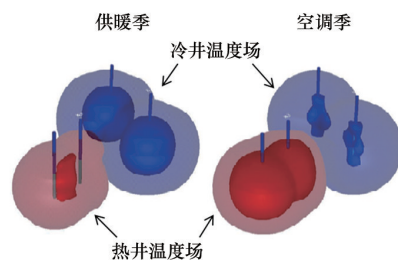


图2 含水层储能系统温度场

1.2 含水层储能技术的应用情况

含水层储能技术起步于中国。1966年,上海就已经通过回灌来进行地下水位下降的控制和改善,134口井同时回灌使地下水位升高 $10\text{ m}^{[8]}$ 。欧洲最先开始大规模应用实施含水层储能,其中荷兰是推广得最为成功的国家。近几十年来,该技术已经应用到荷兰的农业、房地产开发、公共建筑等诸多领域。最近几年,含水层储能技术在中国再次得到重视。据不完全统计,2013—2022年,该技术已成功应用于上海、襄阳、西安、涿州、南通等5个城市的12个工程项目中。2013年,在上海的国家设施农业工程技术研究中心崇明农业示范基地开展了含水层储能技术的实施。该项目是国内首个将含水层储能技术国产化的成功案例,并且在荷兰含水层储能实施经验基础上有了新的技术突破,为该技术在国内的推广提供了理论和实践依据^[9]。该项目整个系统包括含水层储能系统(热水井和冷水井配对使用)、地下水换热系统(高效板式换热器)、热泵机组、末端系统(温室加热管道和空气处理机组)和蓄能系统(蓄热罐和蓄冷罐配对使用)。蓄冷罐温度为热泵机组蒸发端运行温度,蓄热罐温度为热泵机组冷凝端运行温度。含水层储能热泵系统可连续满负荷运行,功率不因温室冷热负荷的变化而变化,能效系数(COP)可维持在4.5左右。上海第二含水层地下水初始温度为 20°C ,通过提取热水井的热量,将蓄冷罐中 5°C 的冷水加热到 16°C 。通过一个冬季的运行,冷水井温度可从 19°C 降为 10°C 。夏季则相反,在取用冷水的同时,热水被回灌到热水井中,使热水井温度达到 23°C 。夏季可直接取用 10°C 冷水进行温室降温,冬季因热水温度提高而提高了热泵效率,并通过变频技术节约运行电耗成本,系统实景如图3所示。



图3 国家设施农业中心崇明农业示范基地含水层储能系统

该系统在2014年上半年进行了运行测试。2014年1月23日至5月21日,热泵机组产热量 573218 kWh ,制冷量 442438 kWh ,加热工况COP平均为4.25,制冷工况COP平均为3.28。热水井抽水流量为 $80\text{ m}^3/\text{h}$,共抽水 24850.8 m^3 ,100%实现回灌。抽水温度在 20°C 左右,回灌温度在 7°C 左右。整个热泵系统(含各种泵)共用电 146055 kWh ,按综合电价 0.633 元/kWh 计算,电费总计 92453 元 。该储能系统的能源成本分别为燃煤、燃气、燃油的94%、38%和25%。

1.3 含水层储能技术实施的风险控制与最新进展

为了防止地面沉降和减少地下水资源浪费,地下水完全回灌是含水层储能技术应用的前提条件。这需要在工程地质方面有先进合理的技术保障。例如,同层抽灌可以防止浅层地下水的污染向深层扩散。对于采用多层含水层的同井抽灌系统,一定要进行严格的水文化学分析。在地下水全面回灌和系统密封情况下,地面污染物难以侵入地下,而且地下水处于厌氧状态,当地下水回灌温度低于 25°C 时,对地质环境的影响是轻微的。高温含水层储能对提高供热能效具有重要意义。

近年来,中国科学院地质与地球物理研究所庞忠和团队在深层含水层地下储热技术研究方面取得了重大进展,已从理论模型研究进入到技术研发阶段^[10-12]。目前,该团队利用雄安新区容城县领秀城供热站地热井,已完成不同储热、供暖运行模式的长、短周期现场试验。实验结果显示,该井的储热效率 $>80\%$,可为 28 万 m^2 民用建筑提供100%可再生能源供暖。

2 江水源热泵技术

2.1 江水源热泵技术原理

江水源热泵是一种利用江水为冷热源的地表水源热泵形式。与空气温度相比,江水温度一年四季的波动不大,相对稳定。夏季时,江水温度低于空气温度,而冬季时江水温度则高于空气温度。因此,利用江水作为冷热源的热泵可以在夏季制冷、冬季供暖时获得较高的能效比。江水源热泵工艺

流程如图4所示。取水口在上游放置,排水口在下游放置,两者间隔尽量长的距离,并有一定深度差。经过一定的水处理后,取水泵站将江水引入热泵机组。在夏天空调季时,江水与热泵冷凝器换热,带走热量后升温,并通过排水口排入江河。在冬天供

暖季时,江水与热泵蒸发器换热,输出热量后降温并排出。中国长江中下游地区江水资源丰富,沿江城市经济发达,空调负荷大、增长速度快,推广江水源热泵潜力巨大。

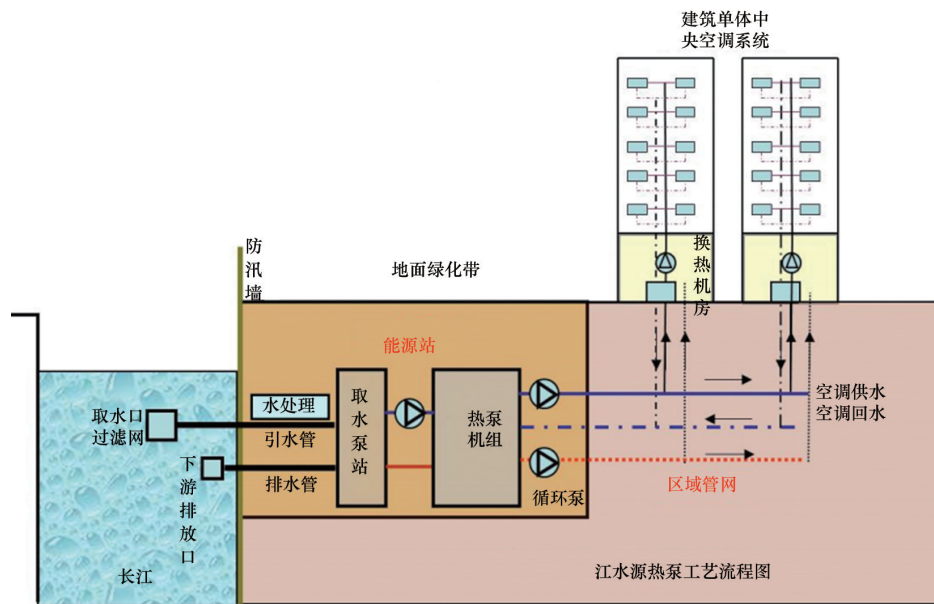


图4 江水源热泵工艺流程

2.2 江水源热泵的应用示范——南京鼓楼高新技术产业园区区域供冷供热项目

由于江水源热泵在长江流域越来越受重视,近年来,沿江城市建设了很多江水源热泵项目^[13-16],其中,比较有代表性的是南京鼓楼高新技术产业园区区域供冷供热项目。该项目规划服务南京鼓楼高新技术产业园区面积为8.75 km²,可为1500万m²建筑提供空调与供暖,计划共建设7座能源站和1座江水取水泵站。项目全部建成后,其经济社会效益显著。

目前,项目6号能源站和7号能源站一期工程已经投运,新区市民中心、服贸大厦2处已率先使用江水源热泵。6号能源站为地下结构,地下一层,局部夹层,占地面积约5830 m²,总建筑面积约7200 m²,最大供冷能力122 MW。数据统计显示,采用江水源热泵的新区市民中心,从2020年开始使用至2022年6月底,比常规空调节约用电量58.8

万 kWh,累计节约标煤455 t,减少二氧化碳排放1376 t,新区市民中心已经成为南京应用可再生能源的绿色建筑典范工程。

在环保方面,因为江水在该水域流量较大,空调排热量可以被大量江水迅速带走,对江水温度的影响很小。而且江水源热泵一般都深取浅排,鱼类的自由游动使其对温排水造成的羽状热流有很强的回避能力,因此江水源热泵导致的有限温升对水生生态环境的影响可以忽略。

与其他以水为冷热源的热泵相比,江水源热泵具有水源热泵的一般特征,其技术难点同样在于水温、水质、水量以及运行管理上。因此,建设江水源热泵工程首先要满足以下3个前提条件:(1)获得江(河)水务管理部门的用水、排水许可;(2)设计和建造专用的取水排水设施(实施江水源热泵一般使用开式系统);(3)水处理代价及环境影响在可接受范围内。

3 冰源热泵技术

3.1 冰源热泵原理

冰源热泵系统是以水的凝固热为主要低温热源的热泵系统。具体来说,它是利用过冷水技术使部分低温水源水在冰水混合制备蒸发器中结冰,提取过冷水结冰的相变潜热作为热泵热源^[7]。冰源热泵主要分为冰水侧循环、低温工质循环和供热水循环。主要设备及部件包括:过滤设备、冰水侧循环泵、换热器、水槽、冰水分离设备、冰源热泵机组、工质循环泵、热水侧循环泵、冷却塔、室内末端等。其基本工作原理是:由热泵机组蒸发器制出的-3℃

左右的低温工质(如乙二醇溶液)与0℃的水在换热器中换热,0℃的水失去热量成为-2℃的过冷水。非稳态的过冷水进入水槽释冷结冰,变成冰水混合物,也称为冰浆。冰浆在冰水分离器中完成冰水分离,水再次进入换热器循环,冰被排放。因此,水的相变潜热通过水槽和换热器传递给了热泵工质,完成了冰源热泵的吸热过程。冰源热泵系统组成如图5所示。长三角地区属于亚热带季风气候,夏热冬冷,冬天零度以下的气温非常常见,江河湖泊也会结冰,这样的气候特征就给实施冰源热泵创造了很好的天气条件。

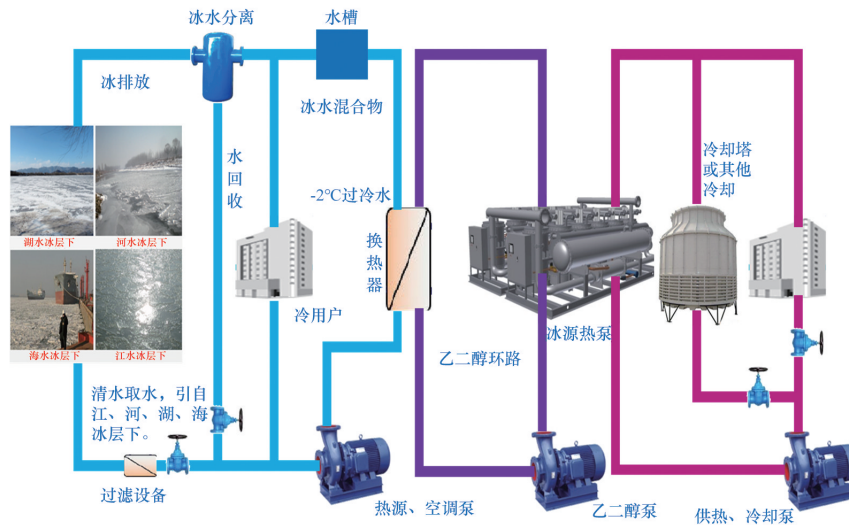


图5 冰源热泵系统组成

3.2 冰源热泵的应用示范

2016年,南京银杏山庄采用冰源热泵对原有地源热泵系统进行了改造。该改造项目增加了模块化动态制冰机组、滤冰槽、乙二醇循环泵、过冷水

循环泵等设备,利用-1℃的过冷水变成0℃冰释放的相变潜热,给热泵机组提供低品位热源进行制热。冰源热泵主机(原地源热泵主机)和模块化动态制冰机组的参数如表1所示。

表1 银杏山庄冰源热泵系统主要设备性能参数

设备名称	设备性能参数	
	额定制热工况	制冰工况
冰源热泵主机	制热量:505 kW 制热输入功率:111 kW 负荷侧供回水:40/45℃ 地源侧供回水:10/5℃	制热量:394 kW 制热输入功率:85 kW 负荷侧供回水:33/38℃ 乙二醇侧供回水:-3/-1℃
模块化动态制冰机组	换热量:527 kW	制冰量:5 t/h 最大输入功率:3 kW

经过一段时间的试运行后,冰源热泵系统运行的实际情况有以下特点:(1)当冰源热泵系统和地源热泵系统联合供热时,冰源热泵主机为基载主机,地源热泵主机进行调峰;(2)过冷水入口温度受系统补水、室外气温等因素共同作用,有 0.3°C 温度波动,约15 min为一个周期;(3)冰源热泵系统小时耗水量为2 t/h,小于制冰机组理论值,主要为室外气温偏高蓄冰槽吸热融冰;(4)冰源热泵系统24 h重启次数为1~2次(主要为过量冰屑进入系统),系统恢复重启时间约10 min,不过这对系统供水温度影响很小。

3.3 冰源热泵推广的利用方式

1) 冰源热泵+低温地表水。在中国的夏热冬冷地区,如长江三角洲地区,水系分布纵横交错,流域内湖泊众多,是中国水资源分布最集中、水量最丰富的地区,冬季最低水温一般在 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。此温度接近冰点,易于生成过冷水,为冰源热泵的实施创造了很好的温度条件。冰源热泵通过水资源显热和潜热同时利用,在获得热量的同时也大幅减少了水资源的需求总量^[18-19]。

2) 冰源热泵+埋管。适用于某些地源热泵系统有问题的项目改造,例如项目埋管数量偏少或经过多年运行土壤换热器出现冷堆积。可以提高土壤取热温差,加大取热量,同时还可解决土壤换热器添加乙二醇降低冰点造成的污染问题^[20]。

3) 生鲜冷藏冷冻。禽畜宰杀后,需要热水进行清洗,然后预冷排酸,急冻,继而在 -18°C 以下储存。冰源热泵机组可以同时提供清洗热水和 0°C 的保鲜冰水,实现了低品位可再生资源减量、高效、循环利用^[21]。

4) 制冰(雪)供暖。冰源热泵制冰系统能在制热工况运行制出冰,经过干燥处理从而代替人工造雪,同时可以给冰雪运动场馆室内提供采暖需求,实现系统安全、节能运行^[22]。

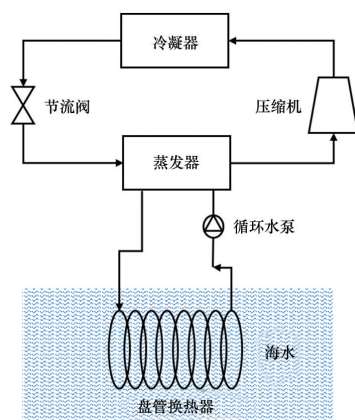
冰源热泵系统对热源品位要求更低,扩大了地热能可利用的区域和总量,热源可包括所有近冰点的低温地表水资源(直接水源)和地热能资源(间接水源)。另外,冰源热泵同时利用水的显热和固化潜热,大幅减少了地表水用量,用水量仅为常规水

源热泵的1/20。冬季制热时进行冷回收,跨季节蓄冷还可提高全年综合能效。

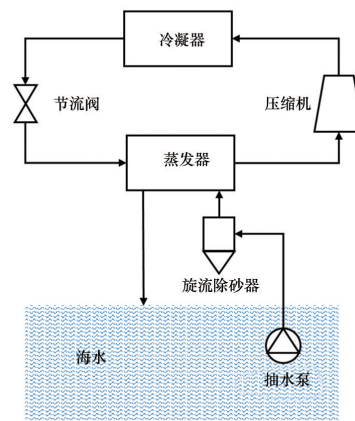
4 浅层渗滤海水源热泵技术

4.1 海水源热泵原理

海水源热泵也是热泵的一种,基本原理也是遵循逆卡诺循环。它将海水中存在的大量低位能收集起来,借助压缩机系统,通过消耗少量电能,在冬季把存于海水中的低品位能量“取”出来,给建筑物供热;夏季则把建筑物内的热量“取”出来释放到海水中^[23]。海水源热泵虽然以海水为“源体”,但不消耗海水,也不对海水造成污染,而且具有较高的热效率。按与海水的换热方式进行分类,主要有“取热不取水”和“取水取热”2种海水源热泵类型^[24](图6)。前者是将净水作为换热媒介,净水在循环



(a) “取热不取水”式



(b) “取水取热”式

图6 不同取热方式的海水源热泵

水泵的驱动下,在蒸发器和海水内的盘管换热器中循环流动,将海水热量带到蒸发器中;后者是直接抽取海水进入机组换热。

4.2 海水源热泵的新形式——浅层渗滤海水源热泵

因为海水本身有腐蚀性,而且存在各种海生物和泥沙,所以海水源热泵一个主要的技术难点是海水水质对于换热器不太“友好”。虽然防腐蚀、防海生物附着和除砂过滤等技术已经相对成熟,但其建设成本和维护成本都较高。针对这种问题,目前发展出一种新的海水源热泵形式——浅层渗滤海水源热泵^[25]。

浅层渗滤海水源热泵技术是利用海水通过透水层过滤后到海岸井中为热泵机组提供冷热源,既利用海水热能,又利用浅层地热能^[26]。由于渗滤取水技术要受到水文地质条件的限制,不同的工程地

点渗滤取水得到的渗流海水流量和温度是不一样的,但是有个共同点就是经过土壤过滤后水质得到改善,无需进行防海生物附着处理,且在供冷(供暖)季的一段时间内,海岸井供水水温低于(高于)地表海水温度。海水通过与土壤换热后作为热泵系统的冷热源,不仅优于直接采用地表海水作为冷热源的海水源热泵空调系统方案,还优于传统的冷水机组+城市热网系统方案。所以,如果工程地点地质条件允许,将渗滤取水技术用于海水源热泵系统,系统经济性将会显著提高^[27-28]。

渗滤取水是地表水取水技术中的一种,在国内外均有应用实例。海水在渗滤过程中经过岩土体过滤,水质提高;海岸井设计时要离海尽量近,保证海水为井水的唯一直接补给水源。采用渗滤取水技术的浅层渗滤海水源热泵系统冬季供暖原理如图7所示。

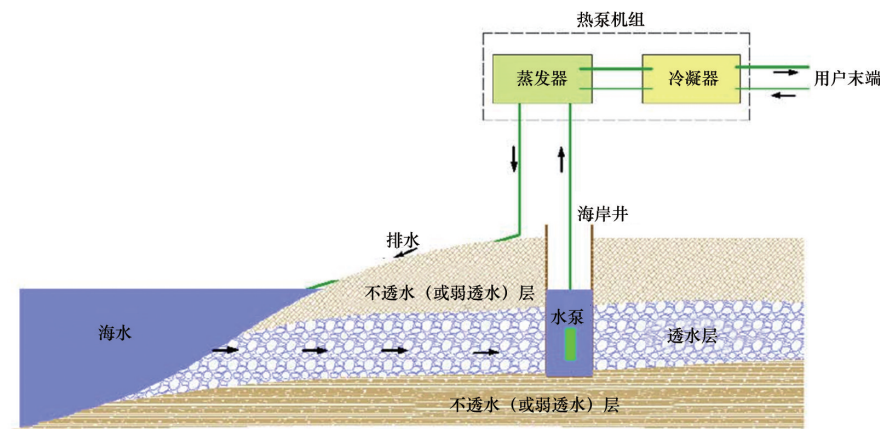


图7 浅层渗滤海水源热泵系统原理

4.3 浅层渗滤海水源热泵应用

目前在中国青岛即墨蓝色硅谷核心区规划建设一个浅层渗滤海水源热泵系统,已完成现场渗流抽水测试。

场地临近大海,地势平坦,属于海滩回填区域。勘察场区原为滨海滩涂,地面标高一般为3.34~4.27 m。本场区地下渗透海水主要赋存于沙层中,即第1层填土、第5层粉细砂,属于潜水。渗透海水水位比较稳定,低潮时水位较低,高潮时水位较高,水位随海水的涨落潮而波动。勘察井共有2个,分别

是1号井和2号井。钻孔直径80 mm,成井直径250 mm,含水层深29 m。在每口井测试水量过程中通过出水端温度计直接测试渗流水温,环境温度和海水水温利用温度计现场实测,测试结果如表2所示。对1、2号井井水以及就近海水取样,通过专业检测机构对水质进行测试化验,1、2号井所出水均为海水,和就近海水水质比较如表3所示。勘察与水质分析结果显示,测试井抽水动水位稳定在海平面以下15 m左右,抽水扬程不高;渗透海水水温不受环境温度变化影响,水温常年稳定在16~

17℃,和青岛岩土原始温度基本一致,利用浅层渗透海水作为制冷、供热系统的冷热源具有很好的水文条件;通过对水质进行化验,相比原生海水,井水氯离子含量大幅减少;通过沙土层过滤,基本不存在藻类等微生物对设备以及管道的腐蚀,但相对于原生海水,含沙量比较大,因此浅层渗透海水源热

泵系统宜采用板式换热器进行换热。

表2 渗流试验地下水温测试结果

取样处	测试时间	环境温度/℃	海水水温/℃	渗流水水温/℃
1号井	2017-12-12	1~4	8.5	17
2号井	2017-12-14	-2~5	8.3	16

表3 渗流水质检测结果

取样处	测试时间	氯离子质量浓度/mg·L ⁻¹	铁离子质量浓度/mg·L ⁻¹	钙离子质量浓度/mg·L ⁻¹	悬浮物质量含量/mg·L ⁻¹
1号井	2017-12-21	5440	1.54	131	40
2号井	2017-12-21	5580	1.52	161	50
海水	2017-12-21	15400	0.42	352	240

长三角地区的江苏、上海和浙江都是沿海省市,海水资源丰富,有长达上千公里的海岸线。沿海有很多度假酒店和居民小区可以通过海水源热泵集中制冷供热,这样不仅充分利用了就近的清洁能源,还可以降低能源消费成本,社会和经济效益显著。

5 地源热泵综合能源技术

综合能源系统是在一定空间范围内将先进的管理模式与迭代更新的信息技术高度融合,基于单一或多目标整合区域内各类可用能源(包括常规石化能源和可再生新能源),达到多能系统之间布局合理、优势互补,管理高效以及节能减排的目的。综合能源系统不仅要满足系统内多元化用能需求,

而且要有效地提升能源利用效率,最大程度减少能源利用对周围环境的负面影响。总体来说,它是一种满足可持续发展要求的新型一体化能源系统^[29]。显然,地源热泵综合能源系统就是以浅层地热能为主,辅以电能、化石能源或其他可再生能源,通过高效能源技术而建立的能源供应系统。以合肥滨湖科学城区区域能源项目为例。该项目是安徽首例、全国首批“地热+”多能互补区域能源项目,规划供能建筑面积500万 m²,目前签约面积已达200万 m²。项目采用地源热泵、污水源热泵、水蓄能、冰蓄冷、天然气三联供等多种互补的能源供应形式,规划建设3个供冷供热能源站,互为补充、互为保障,增强能源供应的稳定性;3个能源站通过室外区域环网互相连通,合理高效地为用户提供能源。各能源站的能源组成与性能参数见表4。

表4 各能源站的能源组成与性能参数

系统形式	模块数量/个	制冷装机容量/MW	制热装机容量/MW	最大供冷能力/MW	最大供热能力/MW	
1号能源站	地源热泵水蓄能	—	11.6	12.1	16	24
	污水源热泵水蓄能	1	4.2	4.9	6.0	9.4
	冰蓄冷	5	28.7	0	48.7	0
	三联供	2	13.8	13.5	13.8	13.5
2号能源站	地源热泵水蓄能	—	8.4	9.1	11.4	18.1
	冰蓄冷	3	17.2	0	29.2	0
	三联供	2	13.8	13.5	13.8	13.5
3号能源站	地源热泵水蓄能	—	22.4	24.1	31.3	48
	冰蓄冷	2	6.1	0	12.1	0
	三联供	2	4.5	2.9	4.5	2.9
总计	17	130.7	80.1	186.8	129.4	

2019年滨湖科学城区域能源站建成投运,统计结果显示,2020—2021年度能源站全年用电量达到891.5万kWh,其中高峰用电量、平段用电量、低谷用电量分别占9.79%、19.33%、70.88%,项目运行时绝大部分用电量产生在低谷阶段,有效控制了用电成本。项目运行前期受到各类不利因素影响出现了较大损耗,运行策略虽然无法切实降低系统损耗,但却显著减少了用电成本,提升了经济效益。随着项目用户的增加,用能负荷增大,且项目能源站与功能模块建设完工,此时多能互补模式优势逐渐显现,并可借助3个能源站就近响应用户用能需求,缩减输送距离,减少系统损耗,能效比提升^[30]。

该项目的成功运行说明,多种互补的能源供应形式优化了能源配置,提升了能源结构,最大化地利用了可再生能源或清洁能源。经估算,项目全部建成之后,每年可以节约标煤6.5万t,减少二氧化碳排放16.9万t,减少二氧化硫排放4800t,减少氮氧化物排放2400t,是实现碳达峰、碳中和双碳目标的坚实助力。

6 地热综合梯级利用技术

6.1 地热综合梯级利用的概念

所谓的地热资源综合梯级利用就是分批次,按照各种用途的水温要求,由高到低、依次利用,以求最大程度地提高地下热水的有效利用温差,从而达到地热能的高效利用^[31]。地热梯级利用没有标准的模式,必须依据当地的客观需求而确定。一般来说,中高温地热能($\geq 90^{\circ}\text{C}$)可以直接用来发电,中低温地热能($70\sim 90^{\circ}\text{C}$)可以通过吸收式制冷机组进行制冷或供暖、干燥,较低的低温地热能($\leq 70^{\circ}\text{C}$)可以用于生活用水、洗浴医疗、水产养殖、农业温室等。具体采用何种梯级利用模式,要考虑当地的实际需求,环境条件、投资规模、政策法规等客观条件进行论证后确定。

6.2 地热综合梯级利用的应用示范

中国对地热梯级利用的认识较早,漳州于20世纪90年代初建立了一个地热梯级利用工程。由于当时的技术条件不具备,只进行了低温段的两级

梯级利用^[32]。广东省丰顺县于2014年建成了一套地热综合梯级利用系统。该系统进行了地热发电、地热制冷、地热烘干、温泉洗浴与热泵供热等五级梯级利用,地热资源利用率达到了80%以上^[33],具体流程和各级利用温差见图8。

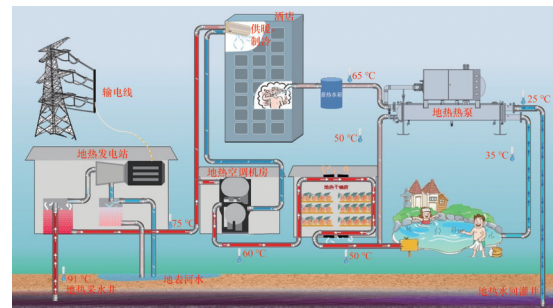


图8 丰顺地热综合梯级利用系统

江苏如东小洋口地区大地热流强,地温梯度高,是江苏省中低温地热资源最有潜力的地区之一,初步推测异常区面积超过16 km²,有望形成大型中低温地热田;预测地热资源量达 3.62×10^{14} kJ,地热流体储量 5.08×10^8 m³,可采地热水 1.55×10^4 m³/d,可开采热量 3.95×10^9 kJ/d。目前,江苏小洋口温泉旅游度假区已经建设完成1套四级地热综合梯级利用系统,并且正在规划建设1套五级地热综合梯级利用系统。

6.2.1 小洋口温泉展示中心四级地热梯级利用系统

小洋口温泉展示中心地热井出水温度74°C,地热水日可采量2544 m³/d。根据地热水的温度和稳定流量,该地热井设计了地热干燥+地热供暖+地热温室+地热洗浴的四级地热梯级利用系统。第一级利用为地热干燥,利用温差为74°C~65°C。第二级利用为地热供暖,利用温差为65°C~61°C。第三级利用为地热温室,利用温差为61°C~40°C。第四级利用为休闲洗浴,利用温差为40°C~30°C。该系统最大地热水利用温差为44°C,达到了地热能最大化利用与多元化利用的目的。该地热梯级利用系统外部实景见图9,数据监控系统见图10。

地热干燥装置的最大供热量为100 kW,采用整体拼装式全金属结构干燥室,金属结构的壳体内



图9 小洋口温泉展示中心地热综合利用系统外部实景

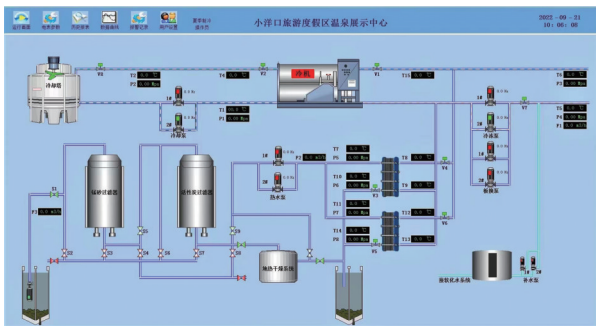


图10 地热综合梯级利用工程数据监控系统

外板为不锈钢板面,边框为铝合金,中间为保温层,整体厚度为75 mm。干燥室换热器安装于干燥室前后两端的顶部,前后两端的底部为气流通道。干燥室的其中一侧面安装中空保温玻璃,以便展示功能的实现。顶置式强制循环通风系统采用大风量、耐高温高湿、双向效率相等的轴流通风机。导风天花将干燥室内分隔成上下2部分,导风天花中间安装可调节气流分布的导流板。气流通过干燥室内两侧的加热器进行加热,加热器内流体流量的大小由控制主机自动调节,以使温度稳定于设定值附近。轴流风机由控制主机自动换向控制,风机可双向循环,干燥均匀。控制系统配置变频调速器,可根据干燥的不同阶段人工调节不同的风速。干燥室的进排湿口位于顶部,进气口和排气口受室内风机换向而功能互换。地热干燥房的结构尺寸如图11所示。

地热供暖系统主要包括地热水过滤装置、爆氧装置、换热装置、水循环系统和控制系统。地热水

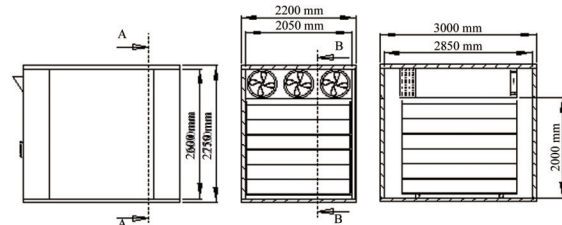


图11 地热干燥房的结构尺寸

从地热井泵出后依次通过旋流除砂器(最大处理量为 $40 \text{ m}^3/\text{h}$,尺寸为 $\Phi 800 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm}$)、爆氧装置(最大处理量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$,尺寸为 $\text{DN } 80 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$)、铁锰砂过滤器、活性炭过滤器(最大处理量均为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$,尺寸均为 $\Phi 2000 \text{ mm} \times 2600 \text{ mm}$)、板式换热器(换热量 56 kW ,尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$)等水处理和换热设备。水循环系统主要由热水泵(2.2 kW ,变频)、阀(调节阀、截止阀、排气阀、平衡阀等)和管道($\text{DN}125$)组成。控制系统由电磁流量计、铂电阻温度传感器、压力传感器和显示屏等组成。

地热温室大棚在地热供暖机房的上面,面积约为 140 m^2 ,具体尺寸为 $15.7 \text{ m} \times 9 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,基本结构为铝合金框架+真空隔热玻璃。为防积雪,屋顶设计为尖顶。屋顶之上再设置电动遮阳布帘,可避免太阳暴晒导致温室内气温过高,不利于温室内植被生长。

6.2.2 小洋口地热2号井五级地热梯级利用系统设计

小洋口地热2号井出水温度高达 92°C ,可开采量 $1870 \text{ m}^3/\text{d}$ 。高温大流量的水热型地热资源非常适合进行综合梯级利用。为了最大程度地提高地下热水的有效利用率,并考虑到地热利用方式对温度的要求,可以将该井的地热梯级利用流程设计为:地热发电—地热制冷(地热供暖)—地热干燥—地热供热(洗浴休闲、地热温室、地热养鱼)—地热热泵。地热水温度从采出时的 92°C 降到回灌时的 30°C ,利用温差达到 62°C ,地热资源利用率可达85%以上。系统流程见图12。该流程根据季节的不同以及客观需要的变化,可以进行不同的排列组合,从而实现资源效益和经济效益的最优化。

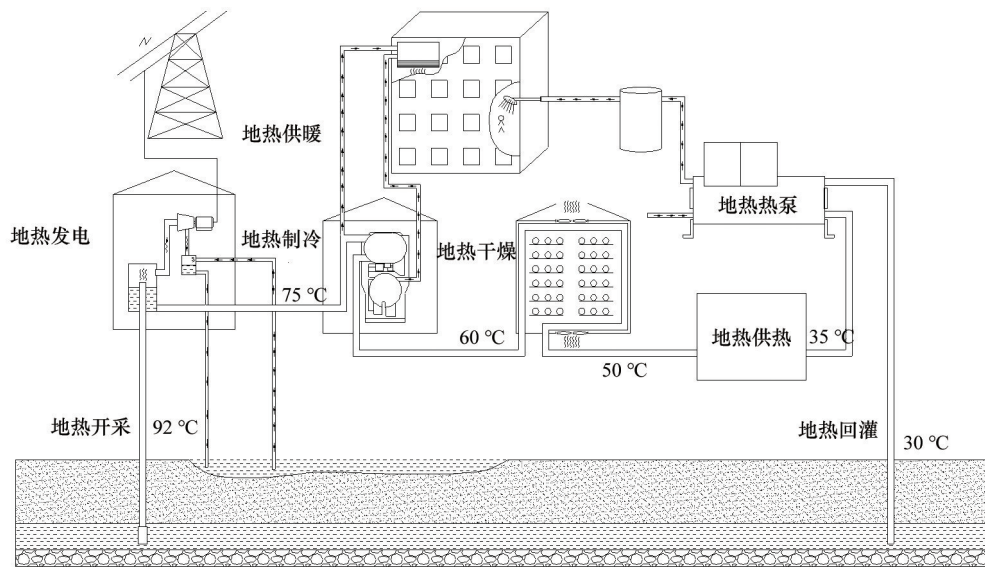


图12 小洋口地热2号井地热综合梯级利用流程

7 结论

长三角地区江、河、湖、海等地表水资源丰富,且四季分明,每年冷热负荷大致平衡。对于这种资源条件和气候特征,非常有利于地热资源的开发利用。通过上述对相关地热创新技术的介绍和案例分析,可以总结出以下几点结论或建议。

1) 在浅层地热利用技术中,江水源热泵技术的经济效益最大,技术成熟度最好。目前,该技术已在长江中下游地区的大中城市得到了广泛应用。但是利用好江水源热泵必须处理好冷热负荷平衡的问题,不能对江河的水温水质造成负面影响。

2) 以地热能为主要能源,并结合其他清洁能源的地源热泵综合能源技术可以在区域供能系统中优化统筹各类能源,取长补短,从而获得更大的环境效益和经济效益。但是综合能源系统在供能侧投资较大,必须考虑项目经济性。

3) 含水层储能可以解决能源和需求在时空上的错置问题,因此也是极具发展前景的技术。但含水层储能可能会造成地面沉降和地下水污染的问题,因此,含水层储能技术对密封循环和回灌的要求较高,成功实施需要有先进合理的成井技术加以保障。

4) 浅层渗滤海水源热泵在应用的客观环境上有较多约束。它必须有适合的水文地质条件,海岸井接近海边,井水全部为海水且渗滤后水质良好。目前大范围推广难度较大。

5) 冰源热泵的技术难点是冰浆制备与换热,目前过冷水法和刮剥法是最主要的2种冰浆制备技术,已经实现了工程化应用。通过大量实验获得的冰浆流动换热经验公式可为末端换热器设计和选型提供计算依据,基本可以满足工程设计的精度要求。

6) 地热综合梯级利用是中深层地热开发利用的发展方向,但中高温地热资源与当地热需求必须相匹配,而且多级地热利用设施肯定会增加初始投资,因此,该技术的应用推广也要充分进行经济可行性论证。

综合考虑,江水源热泵、地源热泵综合能源和地热综合梯级利用是目前最有推广价值的较为成熟的地热创新技术,含水层储能、浅层渗滤海水源热泵与冰源热泵都还存在一些技术可靠性或适用条件苛刻等问题有待解决。

总之,包括长三角在内的中国地热资源丰富地区的开发利用总体原则是因地制宜,将地热禀赋、当地需求、适用技术和市场模式紧密结合。在技术

层面,要集约、高效地利用宝贵的地热能。在政策层面,要鼓励不同市场主体积极参与建设环境不受污染、经济效益明显、人民群众受益的地热利用工程。

参考文献(References)

- [1] 尹上岗, 杨山, 李在军. 长三角地区生态城镇化空间格局及影响因素[J]. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1494-1506.
- [2] 汪集旻. 地热理应在雾霾治理和南方供暖/制冷中发挥更大的作用[J]. 科技导报, 2015, 33(24): 1.
- [3] 中国地热能发展报告[R]. 北京: 中国石化出版社, 2018.
- [4] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
- [5] 姜鑫. 含水层储能技术研究[J]. 新型工业化, 2021, 11(4): 31-32.
- [6] 河海大学《水利大辞典》编辑修订委员会. 水利大辞典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 2015.
- [7] 张媛媛, 叶灿滔, 龚宇烈, 等. 地下储能技术研究现状及发展[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 49-57.
- [8] 上海市水文地质大队编写小组. 地下水人工回灌[M]. 北京: 地质出版社, 1977: 3-4.
- [9] 郭小波, 孟超. 地下含水层储能技术探讨[J]. 暖通空调, 2021, 51(6): 93-96.
- [10] 黄永辉, 庞忠和, 程远志, 等. 深层含水层地下储热技术的发展现状与展望[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 17-24.
- [11] 孔彦龙, 庞忠和, 邵亥冰, 等. 面向成本的中深层地热储群井采灌优化[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 17-24.
- [12] Huang Y H, Pang Z H, Kong Y L, et al. Assessment of the high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) potential in naturally fractured geothermal reservoirs with a stochastic discrete fracture network model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127188.
- [13] 顾铭, 马宏权, 王勇. 江水源热泵的技术关键与工程案例[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(4): 38-42.
- [14] 曹晓庆, 郑洁, 李菊. 江水源热泵在上海地区应用的可行性分析[J]. 制冷与空调, 2009, 9(1): 32-35.
- [15] 梁增勇. 南宁博物馆江水源热泵空调系统设计[J]. 制冷与空调, 2018, 32(4): 411-415.
- [16] 张志恒. 刘子亮. 上海世博浦西能源中心江水源热泵系统综合性能提升运营研究[J]. 区域供热, 2018(3): 37-42.
- [17] 张雁秋, 尚德敏. 冰水源热泵核心技术研究[J]. 科技创新与应用, 2020(8): 155-159.
- [18] 胡志高, 吴涛, 朱娜, 等. 含冰率对冰源热泵系统性能的影响[J]. 建筑节能, 2022(50): 41-47.
- [19] 王瑛滢, 宋文吉, 陈明彪, 等. 基于流态冰的冰源热泵能效及经济性研究[J]. 新能源进展, 2021, 9(1): 48-54.
- [20] 马宏权, 徐连, 胡志高, 等. 冰源热泵与埋管地源热泵联合供暖系统仿真[J]. 煤气与热力, 2022, 42(3): 6-10.
- [21] 傅德坤, 宋文吉, 陈明彪, 等. 冰源热泵系统在设施水产养殖中的技术经济性研究[J]. 新能源进展, 2021, 9(2): 151-157.
- [22] 王瑛滢, 傅德坤, 陈明彪, 等. 冬冷地区冰源热泵系统清洁供暖的经济性[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(4): 1380-1387.
- [23] 安爱明. 两种海水源热泵系统的性能测试及经济性分析[J]. 制冷与空调, 2022, 22(1): 80-83.
- [24] 吴昊. 海水源热泵系统海水取水取热技术及应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [25] 吴君华, 由世俊, 余知, 等. 渗滤取水技术在海水源热泵系统中的应用[J]. 暖通空调, 2010, 40(3): 89-92.
- [26] 吴君华, 由世俊, 李海山. 海水源热泵系统取水技术试验[J]. 天津大学学报, 2009, 42(1): 78-82.
- [27] 陈高峰. 用于海水源热泵的海岸井渗滤取水系统渗滤换热性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [28] 王扬. 海水源热泵渗滤取水热源换热性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [29] 王永真, 康利改, 张靖, 等. 综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 84-95.
- [30] 尹文亮. 浅析夏热冬冷地区区域能源模式——以合肥滨湖科学城区域能源项目为例[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(7): 79-81.
- [31] 骆超, 龚宇烈, 马伟斌. 地热发电及综合梯级利用系统[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 55-59.
- [32] 薛宁, 陈智杰. 福建省地热资源分布及利用现状调研综述[J]. 福建能源开发与节约, 2003(2): 15-18.
- [33] 姚远, 龚宇烈, 陆振能, 等. 中深层地热制冷技术在我国南方地区的应用与展望[J]. 科技促进发展, 2020(3): 352-358.

New progress in application of innovative geothermal utilization technology in the Yangtze River Delta

YAO Yuan^{1,2,3}, GONG Yulie^{1,2,3*}, YE Cantao^{1,2,3}, WU Xiaobo⁴, QU Yong⁵, DU Jianguo⁶, MAO Weidong⁷, WANG Yuchao⁸

1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China
4. China Energy Construction geothermal Co., Ltd., Beijing 102627, China
5. Yantai Oceanair Refrigeration & Air-Conditioning Co., Ltd., Yantai 264003, China
6. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China
7. Nanjing Fengsheng New Energy Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China
8. Hefei Thermal Power Group Co., Ltd., Hefei 230088, China

Abstract This paper introduces the working principle of some new technologies of shallow geothermal and mid-deep geothermal utilization innovative technologies such as aquifer thermal energy storage (ATES), river water source heat pump, ice source heat pump, shallow infiltration seawater source heat pump, comprehensive energy of ground source heat pump and geothermal gradient utilization. By investigating the application cases of these technologies in the Yangtze River Delta region, this paper focuses on the analysis of their advanced technologies, excellent economy and the main problems to be solved. According to their respective characteristics, the prospects for the promotion and application of these innovative geothermal utilization technologies in regions rich in geothermal resources in China, including the Yangtze River Delta, are forecasted. For aquifer energy storage, well completion technology should be optimized to avoid damage to the underground environment. The difficulties in the promotion of river water source heat pump lie in operation management. Ice source heat pump puts forward higher requirements for the preparation and transportation system of ice slurry. The implementation of shallow infiltration seawater source heat pump project must have suitable hydrogeological conditions. The ground-source heat pump integrated energy technology emphasizes the diversification and complementarity of the energy supply system, while the geothermal integrated cascade utilization technology highlights the energy gradient of the energy consumption system. The key to the promotion of these two technologies is economy.

Keywords geothermal utilization; aquifer thermal energy storage; water source heat pump; supercooled water; infiltration; comprehensive energy; cascade utilization ●



(责任编辑 祝叶华)