

河南省国土资源厅地质矿产科技攻关项目资助

河南省城市浅层地热能

赵云章 闫震鹏 刘新号 等 编著
田良河 崔亚莉 焦红军



地质出版社

河南省国土资源厅地质矿产科技攻关项目资助

河南省城市浅层地热能

赵云章 闫震鹏 刘新号 等编著
田良河 崔亚莉 焦红军

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书主要介绍了河南浅层地热能开发利用现状存在的主要问题,研究的任务、研究内容和方法;概述了河南省 18 个省辖市城市浅层地热能形成的区域地质背景;阐述了城市浅层地热能特征,包括浅层地热能概念模型的建立,浅层地温场特征,浅层地热能埋藏、分布与循环特征,浅层地热能生产能力和浅层地热流体化学特征,浅层地热能试验研究的主要方法和结果;对对井抽灌模式下地下水温度场的变化进行模拟研究。在此基础上对河南省 18 个省辖市浅层地热能适宜性进行综合评价与区划;系统计算和评价了城市浅层地热能资源。最后对河南省浅层地热能开发利用展望。

本书可供从事浅层地热能勘查、开发利用的科研和管理人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

河南省城市浅层地热能 / 赵云章等编著. —北京:
地质出版社, 2010. 7

ISBN 978 - 7 - 116 - 06745 - 5

I. ①河… II. ①赵… III. ①城市—地热能—资源利
用—研究—河南省 IV. ①TK529

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 128426 号

责任编辑: 宫月莹 祁向雷

责任校对: 杜 悦

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010) 82324537 (办公室); (010) 82324577 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京天成印务有限责任公司

开 本: 787mm × 1092mm¹/₁₆

印 张: 15.5

字 数: 360 千字

版 次: 2010 年 7 月北京第 1 版·第 1 次印刷

审图号: GS (2010) 738 号

定 价: 58.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 06745 - 5

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

河南省城市浅层地热能

主编人员 赵云章 闫震鹏 刘新号 田良河

崔亚莉 焦红军

参加人员 张 良 邵景力 赵 静 杨 坡

陈光宇 谭菊萍 王 利 王婉丽

仝长水 王 俊 于 超 张国建

尚 茹 龚晓洁 寇亚飞 刘玉忠

冯乃琦 王伟峰 王怀志 侯海燕

序 一

浅层地热能是一种清洁可再生的能源，是国家要求大力探索和发展的新型能源，与风能、太阳能等非人力控制的自然资源相比，浅层地热能是一种在开采利用时间上，可人为控制使用的可再生能源，是集热、矿、水为一体，具有洁净、廉价、用途广泛的新能源。开发利用浅层地热能可以降低常规能源消耗，减少碳排放和环境污染，改善人居环境。浅层地热能利用在发达国家和发展中国家引起了重视，特别是1973年世界能源危机以来，浅层地热能的勘查与开发利用正在迅速向深度和广度发展。上世纪九十年代以来，浅层地热能应用在我国得到了快速发展，在建筑领域应用面积达2000万平方米以上，遍及我国大部分省份和城市。

河南省地处中原，在盆地和东部平原广泛分布着厚层新生界松散堆积物，赋存着丰富的浅层地热能，加上河南省夏热冬冷的气候条件非常适宜浅层地热能的利用。为推进浅层地热能的城市规划和建设中的应用，河南省政府和地质工作者高度重视浅层地热能的研究和利用，开展了18个主要城市建成区和规划区浅层地热能调查评价与开发利用研究，并编著出版《河南省城市浅层地热能》一书。全面总结河南省城市浅层地热能开发利用现状及存在的主要问题；阐述河南省城市浅层地热能特征；通过试验及先进的模拟技术，研究浅层地热能运移特征和地温场变化；系统计算和评价了城市浅层地热能储存在量和可采资源量；对地下水源热泵系统应用和地埋管热泵系统应用适宜性作出了科学评价与区划。是河南省第一部关于城市浅层地热能的论著。

《河南省城市浅层地热能》的出版，必将在加快城镇化建设和实现中部崛起战略中发挥积极作用，对河南省的城市安全、城市规划及社会经济可持续发展的宏观决策提供重要依据，为促进和推动我国浅层地热能勘查开发工作的健康发展和推广起到一定的促进作用。

中国工程勘察大师
国务院参事



2010年4月8日

序 二

工业革命以来，人类文明的动力大都基于碳燃烧，因为受碳基能源资源的有限性限制，加上碳基能源燃烧产生大量二氧化碳，从根本上改变了地球的大气结构，这种方式目前即将走到尽头。在本轮经济复苏的过程中，各国不约而同地选择了以发展新能源作为帮助经济走出金融危机的“火车头”。对于我国而言，新能源产业的发展不仅是带动经济复苏的动力，也是改善能源结构，实现产业结构升级的契机。温家宝总理在今年的政府工作报告中强调指出：发展战略性新兴产业，抢占经济科技制高点，决定国家的未来，必须抓住机遇，明确重点，有所作为。要大力发展新能源、新材料、节能环保、生物医药、信息网络和高端制造产业。要积极参与应对气候变化国际合作，大力开发低碳技术，推广高效节能技术，积极发展新能源和可再生能源。毫无疑问，发展低碳经济推动能源革命，保护人类共同家园，已经成为我国立足当前，着眼未来的重大战略选择。

所谓低碳经济是指：以低能耗、低污染、低排放为基础的经济模式，是人类社会继农业文明、工业文明之后的又一次重大进步。低碳经济的实质是能源高效利用、清洁能源开发、追求绿色 GDP，核心是能源技术和减排技术创新、产业结构和制度创新以及人类生存发展观念的根本性转变，即摒弃 20 世纪的传统经济增长模式，直接应用新世纪的创新技术与创新机制，通过低碳经济模式与低碳生活方式，实现社会可持续发展。

浅层地热能是一种重要的可再生能源，与煤炭、石油、天然气等传统能源相比，具有清洁、环保、分布广，储量大、再生迅速、受外界条件影响小等优势，利用地源热泵系统，可以在冬季从大地吸收热量，夏季吸收冷量，再由热泵机组向建筑物供热供冷来实现节能，较常规供暖技术节能 50% 到 60%，运行费用降低约 30% ~ 40%。按现有技术水平，1 平方公里的地源热泵适宜区，采用浅层地热能供暖供冷，每年可获取 2.4 至 2.8 万吨标准煤能量，可减排二氧化碳约 245000 吨，减排二氧化硫约 2000 吨，减排氮氧化物 1000 吨，减排烟尘 18000 吨。

河南地处中原，横跨长江、淮河、黄河、海河四大流域，自然地理、地质地貌条件复杂多样，独特的自然地理条件和地质环境背景造成了巨厚层的新生界松散堆积物，为浅层地热能的赋存提供了优越的地质条件，经初步调查，河南的浅层地热能资源地热资源十分丰富。同时，河南又处在北亚热带向暖温带气候过渡区，四季分明，夏季制冷与冬季供暖日数基本相当，夏热冬冷的气候条件非常适宜浅层地热能的利用。据有关专家测算，全省 18 个城市建成区和规划区，通过地下水源热泵和地埋管形式每年可利用的浅层地热能资源量达 4085×10^{12} kJ/a，折合标煤 13834 万吨，应用后可减排二氧化碳 33990 万吨，对加快实现中原崛起，全面建设小康社会有着十分重要而深远的影响。

《河南省城市浅层地热能》一书是在河南省国土资源厅地质矿产科技攻关项目的基础上编写的，它围绕河南省重点城市地热能评价与开发利用，全面总结了全省浅层地热能开发利用现状及存在的主要问题，具体阐述了 18 个省辖市浅层地热能形成的区域地质背景，详细说明了城市浅层地热能特征与试验研究的主要方法和结果。全书从地下水渗流和热运移基础理论入手，对抽、回灌模式下地下水温度场的变化进行模拟研究；着重探讨了含水层水文地质条件、抽回灌井结构与布局、地下水抽灌量以及不同抽灌模式等因素对地下水温度场的影响，结合实际工程进行了模拟研究；重点研究了地下水源热泵系统应用适宜性评价与区划和地埋管热泵系统应用适宜性评价与区划，计算和评价了城市浅层地热能储存量和可采资源量。

该书的出版，是河南省地调院专家和科技人员多年辛勤工作的结晶。其研究成果系统而翔实，内容丰富，重点突出，层次分明，为我省加快浅层地热能的综合开发利用提供了地学支持，为政府相关部门提供了重要决策服务，对从事浅层地热能推广应用及规划管理的专家学者也具有较高的参考价值，对促进和推动我省发展新兴战略产业，加快地热能产业的发展壮大具有重要意义。

河南省国土资源厅副厅长
河南省地质矿产勘查开发局局长

唐全刚

二〇一〇年六月十八日

目 录

第一章 绪言	(1)
第一节 研究意义	(1)
第二节 浅层地热能基本概念	(2)
第三节 浅层地热能的国内外研究利用现状与发展	(4)
第四节 河南省浅层地热能开发利用现状及存在的主要问题	(11)
第五节 研究内容与研究方法	(17)
第六节 主要成果及本书编著情况	(20)
第二章 城市浅层地热能蕴藏的区域地质背景	(22)
第一节 气象水文	(22)
第二节 地形地貌	(25)
第三节 地层与构造	(27)
第四节 城市浅层地下水	(33)
第五节 区域地质背景对城市浅层地热能分布的控制因素	(39)
第三章 浅层地热能特征	(43)
第一节 浅层地热能概念模型	(43)
第二节 浅层地温场特征	(44)
第三节 浅层地热能埋藏、分布与循环特征	(52)
第四节 浅层地热能生产能力	(74)
第五节 浅层地热流体化学特征	(88)
第四章 浅层地热能实验研究	(93)
第一节 浅层地热能抽水回灌试验	(93)
第二节 室内试验	(107)
第三节 钻探施工方法试验	(108)
第五章 浅层地热能影响因素模拟研究	(112)
第一节 地下水热运移软件 HST3D 简介	(112)
第二节 地下水渗流和热运移理论简介	(113)
第三节 场景模拟热运移模型的建立	(116)
第四节 实际工程应用	(127)

第六章 浅层地热能适宜性评价与区划	(146)
第一节 地下水源热泵系统应用适宜性评价	(146)
第二节 地埋管热泵系统应用适宜性评价	(158)
第三节 浅层地热能开发利用区划	(160)
第七章 浅层地热能资源量评价	(197)
第一节 评价原则与方法	(197)
第二节 参数确定	(198)
第三节 浅层地热能储存资源量评价	(205)
第四节 地下水源热泵适宜区浅层地热能可利用资源量评价	(206)
第五节 地埋管热泵适宜区浅层地热能换热功率计算	(208)
第六节 浅层地热能综合评价	(210)
第八章 典型工程介绍及经济环境效益分析	(211)
第一节 典型工程	(211)
第二节 经济环境效益分析	(214)
第九章 河南省浅层地热能开发利用展望	(219)
第十章 结语	(224)
参考文献	(229)
参考资料	(235)

第一章 绪 言

第一节 研究意义

浅层地热能是指蕴藏在地表以下 200m 深度范围内,温度低于 25℃ 的岩土体和地下水中具有开发利用价值的热能。浅层地热能是地热资源的重要组成部分,属可再生的新型环保能源,也是一种特殊的新型矿产资源——各国都在大力探索和发展的新型能源。《中华人民共和国可再生能源法》于 2006 年 1 月 1 日起施行,该法明确指出:国家将可再生能源开发利用的科学研究和产业化发展列为科技发展与高技术发展的优先领域。国家财政支持可再生能源的资源调查、评价和相关信息系统建设。该法的实施为浅层地热能的调查、评价研究和开发提供了强有力的法律依据和保障。

浅层地热能作为一种能自然补给的绿色能源,逐渐受到世界各国的重视和广泛利用。我国正在逐步将地热能源列为优先开发利用的替代型能源。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》指出:要“大力发展可再生能源”。“实行优惠的财税、投资政策和强制性市场份额政策,鼓励生产与消费可再生能源,提高在一次能源消费中的比重。大力开发风能……,积极开发利用太阳能、地热能和海洋能。”“要把节约资源作为基本国策,发展循环经济,保护生态环境,加快建设资源节约型、环境友好型社会,促进经济发展与人口、资源、环境相协调。推进国民经济和社会信息化,切实走新型工业化道路,坚持节约发展、清洁发展、安全发展,实现可持续发展。”

河南省位于我国中部,地处中西部结合地带,对发展中西部经济具有承东启西的重要战略地位。河南省是农业大省,也是新兴的工业大省、矿业大省和煤炭资源大省。改革开放以来,经济迅速发展,城市化进程不断加快。随着城市规模的不断扩大及人居环境的不断改善,人们对能源的需求越来越大。能源不仅成为制约河南省城市化进程和经济可持续发展的瓶颈,而且在能源消费中,煤炭所占的比重过大(2008 年为 87.9%),环境污染未得到根本遏制,节能减排任务还非常繁重,发展低碳经济势在必行。所以,开发利用属于可再生的新型环保能源——浅层地热能是实现河南经济发展和人口、资源、环境协调,坚持走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路,保证经济社会的可持续发展的必由之路,是资源与环境并重的具体体现。开展河南省城市浅层地热能研究,为促进河南省丰富的浅层地热资源的勘查及合理开发利用,构建资源节约型社会,保证国家资源安全,促进国家节能减排战略目标的实现,具有非常重要的意义。同时对缓解河南省城市资源与环境压力,促进经济可持续发展具有十分重要的现实意义。

河南省具备开发浅层地热能的地质条件:该省处于暖温带和亚热带气候过渡地区,气候特征是冬季寒冷,夏季炎热。全省年平均气温 12.8~15.5℃。7 月份气温最高,月平均气温 27~28℃;1 月份最低,月平均气温为 -2~2℃。冬季供暖期和夏季制冷期均在 120

天左右。18个省辖市均坐落在平原、盆地和丘陵区。河南省位于黄淮海平原的中部，第四系松散层厚度大，浅层地下水丰富。以上地质环境条件非常适宜浅层地热能的开发利用。

通过本次系统研究，达到基本查清河南省18个省辖市城市区浅层地热能的埋藏、分布规律及循环特征，评价浅层地热能开发利用潜力，研究浅层地热能抽水、回灌技术，总结研究河南省浅层地热能勘查方法与技术，可持续开发、利用模式，为河南省浅层地热能进一步勘查、科学规划与开发，提高可再生能源利用能力与水平，保护生态环境，促进社会经济可持续发展，提供技术支撑。

第二节 浅层地热能基本概念

一、地热能（资源）与浅层地热能

人们对地热能的认识是逐步形成和完善的，原来人们把自然出露的温泉称之为地热，后来随着钻探技术水平的提高，将地热异常区及深部主要热储层（带）中储存的、可以开发利用的地热流体作为地热资源。

近年来，随着热泵技术在供暖、空调方面的推广应用，使广泛分布的浅层地热能有了利用的可能，并且比开发深部地热资源更具有广泛性。2006年，中国矿业联合会地热资源委员会宾德智教授提出：地热能（资源）主要包括变温层中的地温能、浅层地热能 and 地热异常区及深部地热资源。

（1）变温层中的地温能

该层地热能位于地面表层，深度一般小于30m，地热来自地球深部的热传导和太阳光的辐射，温度受年气温变化的影响，低于当地平均气温，可通过水热交换方式利用其部分地热（温）资源于供暖或空调——适宜地源热泵技术。

（2）浅层地热能

该层地热能位于恒温层以下至200m深度范围内，温度低于25℃，是在当前技术经济条件下具备开发利用价值的地热能。地热主要来源于地球深部的热传导，储存于地下岩石裂隙和土层孔隙的水体中，可通过水-热交换方式利用其部分地热资源于供暖或空调——适宜水源热泵技术。

（3）地热异常区及深部地热资源

这种地热资源即分布于地热异常区的天然温泉及隐伏于地下深部（>300m）热储中具有开采经济价值的地热资源。地热来自地球深部的热传导和热对流，储存于岩石裂隙和土层孔隙的水体中，温度随深度或靠近地热异常区增加，且大于25℃。可利用的地热资源目前主要限于深度小于4000m，通过钻井直接开采地下热水予以直接利用。

从宾德智教授关于地热能的划分可以看出，变温层中的地温能和浅层地热能具有埋藏浅、储量大、开采技术条件简单、可再生和环保等特点，具有很好的开发前景。但是，变温层中的地温能和浅层地热能概念与应用会产生不协调，例如，在实践中，人们更多的是利用变温层以下的地温能，而宾德智教授在定义中恰恰忽略了这一点。

2008 年,北京市地质勘查开发局编著的《北京市浅层地温能资源》一书中认为:浅层地温能是蕴藏在地壳浅部变温层以下一定深度范围内(一般小于 200m)岩土体和地下水中、受太阳辐射的程度较小、温度相对稳定(一般恒定在 10~25℃之间)、在当前技术条件下具备开发利用价值的低温地热资源。这种观点基本上代表了近年来我国关于浅层地热能的研究水平。

2009 年,国土资源部在我国研究浅层地热能现状的基础上,编制了我国地质行业标准《浅层地热能勘查评价规范(DZ/T0225—2009)》,该规范对浅层地热能进行定义:浅层地热能是指蕴藏在地表一定深度范围内岩土体、地下水和地表水中具有开发利用价值的热能。笔者认为,地表水中确实具有开发利用价值的热能,并且目前已有应用,但是,作为地质行业标准,与浅层地热能的内涵不符,并且在该规范的具体内容中并未涉及,因此,地表水作为浅层地热能有待进一步探讨。

考虑到目前我国应用现状和工作实际,笔者认为:浅层地热能是指通过地源热泵换热技术利用的蕴藏在地表以下 200m 深度范围内,温度低于 25℃的岩土体和地下水中具有开发利用价值的热能。这也是本书研究的主要对象。

二、浅层地热能开发利用的主要特点及优势

1. 资源的循环再生与可持续利用

浅层地热能能量来源于地球内部的热能和太阳辐射能,这两种能源均为可再生资源。地球是一个巨大的太阳能收集点,它大约将 47% 的太阳能储存在地球浅表层,比人类每年利用能量的 500 倍还多,浅层地热能不受地域、资源等限制,真正是量大面广、无处不在。这种储存于地表浅层并类似于一种无限的可再生能源,使得浅层地热能成为清洁的可再生能源的一种形式。

地温(水源)热泵是利用了地球表面浅层地热资源(深度通常小于 200m)作为冷热源,进行能量转换的供暖空调系统。冬季从地层中取出热量给建筑物供暖,夏季吸收建筑物的热量释放到地层中储存,达到夏季传导热量和储存热量的动态平衡,从而实现浅层地热能的循环再生和可持续利用。地温(水源)热泵的推广将为城市浅层水资源的利用找到一个新途径。推广水源热泵中央空调,不仅符合国家的能源产业政策用水政策,而且也符合城市环保和节约用水政策。

2. 浅层地热能储量巨大

据专家估算,我国岩土厚度按 100m 计算,其每年可采集的低温能量是我国目前发电装机容量 $4 \times 10^8 \text{ kW}$ 的 3750 倍。而百米内地下水每年可采集的低温能量达 $4 \times 10^8 \text{ kW}$ 。这为推广利用地源热泵系统或地埋管换热系统提供了能源保障。

3. 与热泵技术结合紧密,节能效益显著

利用浅层地热能主要是利用和运用地源热泵系统或地埋管换热系统,通过输入少量的高品位电能,将岩土体和地下水中低位能变为高品位能量供末端用户使用,从而达到夏季制冷和冬季制热的目的。水源热泵的制冷制热系数可达到 4.0 以上,与传统的空气源热泵相比,高出 40% 左右,其运行费用仅为普通中央空调的 50%~60%,与电热锅炉和地热

膜供热相比,节约70%左右的电能,节能效益显著。据美国环境保护署 EPA 估计,设计安装良好的地温热泵中央空调与传统中央空调相比,平均要节能和节省运行费用30%~40%。

4. 一机多用,应用范围广

地温(水源)热泵系统可用于供暖、空调,还可供生活热水,一机多用,一套系统可以替换原来的锅炉加空调的2套装置或系统,可节省一次性投资,并且安装容易。可广泛应用于宾馆、商场、办公楼、学校等建筑,更适合于别墅区、住宅小区的集中供热制冷,以及其他商业和工业建筑空调,并可用于游泳池、冷库及室内种植和恒温养殖等行业上。

5. 运行稳定可靠,使用寿命长

正是由于地层温度一年四季相对稳定,其温度的范围远远小于空气的波动,因而是很好的冷热源;同时由于温度的恒定性,使得系统运行更加可靠、稳定,也保证了系统的高效性和经济性。同时,由于地温(水源)热泵系统的供冷、供热的平稳性,降低了停机、开机的频率和空气过热和过冷的峰值。这种系统更容易适应供冷、供热负荷的分区,提高环境舒适度。

地温(水源)热泵机组由于工作情况稳定,所以可以设计简单系统,部件较省,机组运行简单可靠,使用寿命长,维护费用低;由于自动控制程度高,可降低管理费用。一套系统解决冷暖问题,可节省运行费用30%以上,技术可靠、维护方便。

6. 减少污染,环境效益显著

地温(水源)热泵中央空调取消了锅炉,没有燃烧,减少了排烟以及燃料存放的污染,也没有废弃物,不需要堆放燃料废物的场地,且不用远距离输送热量,可以极大地降低CO₂的排放。

地温(水源)热泵中央空调系统所利用的地下水是密封循环的,避免了冷却塔的噪音和水污染现象,并基本实现了水的零消耗。此外,地温(水源)热泵机组结构特殊,使制冷剂泄漏几率大为减少,不会像分体空调那样安装时易产生泄漏,是目前减少CO₂排放量最大的单项技术之一,环境效益非常显著。

利用浅层地热能具有可就近利用、无污染、运行成本低、便于物业管理和系统使用寿命长等特点,是理想的绿色环保能源,备受世界能源、环保组织和发达国家推崇,并被市场广泛接受,自20世纪80年代以来,年增长率一直保持在20%以上。

第三节 浅层地热能的国内外 研究利用现状与发展

一、国外研究利用现状与发展趋势

1. 早期发展阶段

浅层地热能的研究与开发利用是随着热泵技术的研究与开发而兴起的。早在186年前

(1824 年) 法国物理学家卡诺奠定了热泵理论基础。之后英国的物理学家焦耳论证了改变气体的压力引起温度变化的原理。英国勋爵汤姆逊教授首先提出了“热量倍增器”可以供暖的设想。1912 年, 瑞士苏黎世已成功安装了一套以河水作为低品位热源的热泵设备用于供暖, 并以此申报专利, 这就是早期的水源热泵系统, 也是世界上第一个水源热泵系统。

在此之后的几十年, 地源热泵基本处于实验研究阶段, 并先后有地表水源热泵、地下水源热泵及土壤源热泵系统的问世与发展。20 世纪 30 年代地表水源热泵系统问世, 是地源热泵中最早使用的热泵系统形式之一。欧洲第一台较大的热泵装置是 1938 ~ 1939 年间在瑞士苏黎世市政大厅投入运行的, 它以河水作为热源, 供热能力 175kW; 20 世纪 40 ~ 50 年代, 瑞士、英国早期使用的地表水源热泵地下水源热泵系统除了用于建筑物采暖外, 还用于游泳池加热和人造丝厂工艺加热和鞋厂空调等。随后欧洲其他一些国家也开始安装地表水源热泵系统, 热泵系统的供热量不断增大, 性能系数也有很大提高。

地下水源热泵也诞生于 20 世纪 30 年代, 到 1940 年美国已安装了 15 台大型商用热泵, 其中大部分是以井水为热源。1937 年, 日本在大型办公楼内安装了 2 台 194kW 压缩机带有蓄热箱的地下水热泵系统, 其性能系数达 4.4。至 20 世纪 40 ~ 50 年代, 美国应用的主要是地下水地源热泵。

1941 年, 第二次世界大战爆发后, 影响和中断了空调供暖用热泵技术的研究和发展。二战结束后, 热泵技术研究及应用逐步恢复, 至 1950 年美国已有 20 个厂商和 10 余所大学研究单位从事热泵开发研究, 在当时拥有的 600 台热泵中, 50% 用于房屋供暖。地埋管式地源热泵技术初始于美国 and 英国。1950 年前后, 两国开始使用地埋管吸收地热作为热源为家用房屋供暖的小型土壤热泵。1952 年, 美国约出厂 1000 套热泵, 1954 年出厂约 2000 套热泵。由于地源热泵的日趋成熟, 有力地促进了浅层地热能的广泛应用。

1957 年, 美国军用基地住房大量采用热泵供暖代替燃气供热方案, 热泵产量达 2 万套, 1963 年年产量增加到 7.6 万套。至 20 世纪 60 年代初, 美国安装的热泵机组已达近 8 万台。但当时压缩机质量尚不过关, 设备费用高而影响了热泵供暖技术的推广, 开始处于停顿状态。

到 1964 年, 热泵可靠性的问题已成为一个十分严峻的问题。60 年代电价持续下降, 使得电加热器的应用不断增加, 限制了热泵的发展。

2. 迅速发展阶段

20 世纪 70 年代, 世界石油危机的出现, 又引起人们对地下水源热泵的关注与兴趣, 又开始大量安装与使用地下水源热泵, 热泵工业进入了黄金时期。这一时期, 世界各国对热泵的研究工作都十分重视, 诸如国际能源机构和欧洲共同体都制定了大型热泵发展计划, 热泵新技术层出不穷, 热泵的用途也在不断地开拓, 并广泛应用于空调和工业领域, 在能源的节约和环境保护方面起着重大的作用。

热泵真正意义的商业应用也只有近 20 年的历史。20 世纪 90 年代后, 随着环保要求的进一步提高, 美国地下水源热泵系统的应用一直呈上升趋势。美国能源信息部的调查表明: 美国地下水源热泵的生产量从 1994 年的 5924 台上升到 1997 年的 9724 台。再如美国, 截止到 1985 年全国共有 1.4 万台地源热泵, 而 1997 年就安装了 4.5 万台, 到目前为止已安装了 40 万台, 而且每年以 10% 的速度稳步增长。1998 年美国商业建筑中地源热泵

系统已占空调总保有量的 19%，其中在新建筑中占 30%。目前，每年大约有 5 万套地源热泵在安装，其中开式系统占 5%。美国热泵工业已经成立了由美国能源部、环保署、爱迪逊电力研究所及众多地源热泵厂家组成的美国地源热泵协会，该协会在近年中将投入 1 亿美元从事开发、研究和推广工作。

欧洲一些国家由于采取积极的促进政策（包括财政补贴、减税、优惠电价和广告宣传等），热泵市场得到快速发展。1997 年，欧洲发展基金会重新提出热泵发展计划。到 2000 年，欧洲用于供热、热水供应的热泵总数约为 46.7 万台，其中地下水源热泵约占 11.75%。与美国的热泵发展有所不同，中、北欧如瑞典、瑞士、奥地利、德国等国家主要利用浅部地热资源，地下土壤埋盘管的地源热泵，用于室内地板辐射供暖及提供生活热水。据 1999 年的统计，在家用的供热装置中地源热泵所占比例，瑞士为 96%，奥地利为 38%，丹麦为 27%。

3. 发展趋势

近年来，各国浅层地热能的开发利用规模和发展速度都在快速增长。美国和加拿大一些大学和研究机构，对于土壤源热泵进行了较深入的试验研究，取得了一些重要数据。美国能源部（DOE）、美国环保局（EPA）及爱迪生电器学会（EEI）、国家农业电力合作公司等财团组成一家政府参与的工业设施国际集团，推广热泵供暖系统。目前从国外发展趋势看，开发利用浅层地热能，将是地热资源开发利用的主流和方向。

浅层地热能是宝贵的新型能源。与风能、太阳能等非人力控制的自然资源相比，浅层地热能是一种在开采利用时间上，可人为控制使用的可再生能源，是集热、矿、水为一体，具有洁净、廉价、用途广泛的新能源。开发利用浅层地热能可以降低常规能源消耗，减少环境污染，尤其是大气污染，又可以在发展某些相关产业经济与提高人们生活质量方面发挥作用，具有显著的商业价值。因此，引起了各国对其开发利用的重视。特别是 1973 年世界能源危机以来，浅层地热能的勘查与开发利用正在迅速向深度和广度发展。

4. 地下水热运移数值模拟研究进展

地下水源热泵运行后，回灌井注入含水层的冷热能会在对流和热传导的作用下向抽水井运移，从而对地下水温度场产生影响，因此有必要对地下水热运移过程进行深入研究。数值模拟方法以其高效性、便捷性和灵活性等众多优势，逐渐成为研究这一问题的有效工具。鉴于此，本节对国内外地下水热运移数值模拟研究进展进行回顾，为本专题的后续研究提供基础和参考。

从 20 世纪 70 年代末开始，国外提出了许多描述含水层中热量运移的数学模型，Mercer 等（1985）、Crawford 等（1982）以及 Mirza 等对含水层储能的一些模拟技术进行了讨论。1985 年，P. Heijde 和 Y. Bachmat 等统计了当时已有的 21 个热运移数学模型，所有这些模型均只考虑对流和热传导作用，忽略了自然对流对热运移的影响，除了两个是三维水流耦合模型外，其余均为一维和二维的。Tsang 等（1981）和 Sykes 等（1982）曾先后利用有限差数值模拟方法，对 Auburn 大学第二期地下含水层储能野外试验中水和热量运移规律进行了模拟研究，模拟结果与试验观测结果基本吻合。Buscheck 等（1983）利用 Auburn 大学储能试验前两个周期的资料进行了二维数值模拟，并在模拟过程中考虑了自然对流的影响。Rouve 等（1988）应用有限元模拟方法对德国 Stuttgart 大学的人工含水层季节性储能试验进行了二维数值模拟，并对含水层中各填充亚层的渗透性空间组合进行了优

化。Molson 等（1992）利用加拿大 Ontario 武装基地潜水含水层储能试验数据，对该试验过程进行了三维有限元模拟，其中考虑了自然对流影响和密度随温度的变化，该模型相对比较完整，但是试验条件比较简单，且连续性方程不尽完善。Forkeli 等（1995）利用二维轴对称模型和三维有限元模型对人工含水层储能系统的储能效果进行了模拟研究，并通过对比模拟确定了效果最佳的人工储能系统。Travi 等（1996）建立了二维非稳定流模型，通过数值计算给出了一个含水层剖面上温度的变化。Chevalier 等（1999）应用随机游离法对多孔介质含水层储能进行了模拟研究，发现区域地下水的流动能够加速所储热能向下游含水层中扩散，从而降低所储热能的回采率。Nagano（2002）通过实验室试验和有限差分数值模拟研究得出，如果储热过程中回灌水的温度较高（ $>50^{\circ}\text{C}$ ），含水层中将很可能发生自然对流现象，从而使得利用含水层储能的热回收率将受到较大影响。Chounet 等（1999）利用混合有限元法对土壤中水流和热量运移进行模拟，提高了模拟精度，但所用模型是一个剖面的二维模型。

国内对地热数值模拟研究始于 20 世纪 80 年代后期，张菊明等（1982）用有限元法模拟了二维地热运移问题，并给出了有限元程序。李竞生等^①对平顶山地温场分别建立了二维和三维温度场数学模型，并采用有限元法求解，但是此模型仅是一个稳定的模型，并没有对水流场的变化规律进行研究。薛禹群等（1987）对上海储能试验建立了三维数学模型，且考虑了热机械弥散，但水流模型是一个稳定模型，用简单的解析表达式代替水流模型，没有考虑水密度随温度的变化和水动力黏滞系数随温度的变化。张菊明（1994）建立了三维地温场数学模型并提出了有限元解法，但没有考虑水流方程。胡柏耿^②采用二维双孔隙介质模型模拟了地热田中传热和传质过程，并分别模拟了西藏那曲地热田和羊八井地热田的热质运移规律。任理等（1998）用交替方向有限差分法研究了土壤二维水热运移规律。何满潮等（2002）首先研究了地下热水回灌过程中渗透系数变化规律，然后针对单井、对井回灌过程中渗流场的动态变化建立了地热回灌渗流场数学模型，推导了渗透系数恒定与变化不同条件下的单井、对井回灌的理论公式。

国内外专家对于专门针对水源热泵的地下水热运移也进行了一定的模拟研究。Gringarten 等（1975）对地下水均匀流动条件下的含水层热能采集进行了理论研究。通过对边界条件的简化和进行适当的条件假设，建立了对井系统的热传递数学模型，并利用该模型对不同给定条件下的热突破事件进行了定量评价，为法国的对井采能系统的合理布局设计提供了有效的指导。为了定量评价目标含水层系统中热量的运移特征，从而指导采能系统的设计，Wiberg 应用有限单元法，对单纯的热传导和传导 - 对流并存两种不同假设条件下，理想含水层系统中地温场的分布特征进行了对比模拟研究。根据美国威斯康星州的供暖和制冷负荷要求，Andrews（1978）应用二维有限元模型，定量评价预测了水源热泵利用对地下温度场的影响。模拟结果表明，与区域地下水处于静止状态的情况相比，当区域地下水以一定的速度流动时，冬灌井周围的温度降幅相对较小，而影响半径有所增加，并且温度扰动带沿水流方向发生一定的偏移。Rahman（1984）通过对含水层条件进行假设，建立了对井回灌系统的模拟模型，并对不同的回灌量、含水层厚度、初始储层温

① 李竞生，王广才. 1989. 平顶山八矿热水补给来源及条件方式. 煤炭科学研究总院西安分院科研报告.

② 胡柏耿. 1995. 地热田中的传热传质研究. 北京：清华大学博士学位论文.

度和井距影响条件分别进行了定量模拟研究。研究结果表明,除回灌量和井对之间的距离外,含水层厚度对热突破的时间影响比较显著;而含水层的储水率和渗透系数对热突破事件的影响并不显著。为了确定开采井群和回灌井群之间的合理布局, Paksoy (2000) 应用 CONFLOW 程序,对含水层采能过程中热锋面的运移特征进行了定量模拟研究。通过限定开采井和回灌井的水位变幅,同时确保不出现热突破,最终确定上述约束条件下开采井群和回灌井群之间的最小距离。Tenma 建立了一个理想的对井模型,利用 FEHM 软件对不同的开采与回灌量、水井滤管长度与位置和运行周期情况进行定量对比模拟。研究结果表明,前两个因素是控制模型温度变化幅度的主要影响因素。在国内,辛长征等(2002)利用美国地质调查局编写的 HST3D 程序,对一典型双井承压含水层的速度场和温度场进行了全年运行模拟,由于程序的限制,模拟时采用全年固定流量和固定温度的办法。周建伟等(2008)利用基于 HST3D 的 Flowheat 程序对武汉市某地下水热源热泵系统进行了模拟,并对布井方式和抽灌组合的合理性进行了分析。张昆峰等(1998)模拟了大口径井水源热泵的冬季运行工作情况,结果表明,大口径井中的井水流动为均匀下降。

二、国内研究现状及发展趋势

1. 早期热泵的应用与起步阶段(1949~1966年)

相对于世界热泵的发展,我国热泵的研究工作起步约晚 20~30 年左右。20 世纪 50 年代天津大学热能研究所吕灿仁教授就开展了我国热泵的最早研究,1956 年吕教授的《热泵及其在我国应用的前途》一文是我国热泵研究现存的最早文献。20 世纪 60 年代,我国开始在暖通空调中应用发展热泵,并取得了一大批成果。1960 年同济大学吴沈钊教授发表了《简介热泵供暖并建议济南市试用热泵供暖》;1963 年原华东建筑设计院与上海冷气机厂开始研制热泵式空调器;1965 年上海冰箱厂研制成功了我国第一台制热量为 3720W 的 CKT-3A 热泵型窗式空调器;1965 年天津大学与天津冷气机厂研制成功国内第一台地下水热泵空调机组;1966 年天津大学又与铁道部四方车辆研究所共同合作,进行干线客车的空气/空气热泵试验;1965 年,由原哈尔滨建筑工程学院徐邦裕教授、吴元炜教授领导的科研小组,根据热泵理论首次提出应用辅助冷凝器作为恒温湿空调机组的二次加热器的新流程,这是世界首创的新流程;重庆建筑大学、天津商学院等单位对地下埋盘管的地源热泵也进行了多年的研究。中国科学院广州能源研究所等单位还多次召开全国性的有关热泵技术发展与应用专题研讨会。清华大学、天津大学分别与有关企业结成产学研联合体,开发出中国品牌的地源热泵系统,已建成多个示范工程,越来越多的中国用户开始熟悉热泵,并对其应用产生了浓厚的兴趣。

我国早期热泵经历了 17 年的发展历程,度过一段漫长的起步发展阶段。其特点可归纳为:①对新中国而言,起步较早,起点高,某些研究具有世界先进水平;②由于受当时工业基础薄弱,能源结构与价格的特殊性等因素的影响,热泵空调在我国的应用与发展始终很缓慢;③在学习外国基础上走创新之路,为我国今后热泵研究工作的开展指明了方向。

2. 热泵应用与发展的停滞期(1966~1977年)

这一时期正处于“十年动乱”期间,在此期间热泵的应用与发展基本处于停滞状态。