



ISSN:2309845 7

2020年9月
第32期

季刊

中國地熱能

CHINA GEOTHERMAL ENERGY



**单井循环地下水热泵系统中
承压含水层非达西流的近似解析解**

P06

保供暖 度寒冬

——恒有源集团完成北京地区
300万平方米供暖运维项目巡检

P46

20

TH
周年

ANNIVERSARY

2000-2020

恒有源科技发展
集团有限公司

EVER SOURCE SCIENCE & TECHNOLOGY
DEVELOPMENT GROUP CO.,LTD

浅层地热能恒有

无燃烧供暖无扰



国家行政学院
CHINESE ACADEMY OF GOVERNMENT ADMINISTRATION



恒有源科技发展集团有限公司（简称恒有源集团），是中国节能环保集团公司旗下的中国地热能产业发展集团有限公司（香港上市号 8128.HK，简称中国地热能）在北京的科技实业发展总部。

Ever Source Science and Technology Development Group Co. Ltd. (HYY Group) is the Beijing Head Office for science and technology development owned by China Geothermal Industry Development Group Ltd. (HKEx: 08128, China Geothermal) which is subordinate to the China Energy Conservation and Environment Protection Group.

在京港两地一体化管理框架下，恒有源集团专注于开发利用浅层地能（热）作为建筑物供暖替代能源的科研与推广；致力于原创技术的产业化发展；实现传统燃烧供热行业全面升级换代成利用浅层地能为建筑物无燃烧供暖（冷）的地能热冷一体化的新兴产业；利用生态文明建设成果，促进传统产业升级换代；走出中国治理雾霾的新路子。

With integrated administrative framework of Beijing and Hong Kong offices, the HYY Group is fully engaged in the R&D and market promotion of using shallow ground source (heat) energy as the substitute energy source of heating for buildings; in industrialized development of its original technology; to the upgrading of traditional heating industry into a new industry of integrated combustion-free heating and cooling with ground source energy; and in pioneering ways to improve ecological construction and curb haze in China.

● 员工行为准则：

Code of Conduct :

安全第一，标准当家

With safety first, standard speaks

扎扎实实打基础，反反复复抓落实

To form a solid foundation, to make all strategies practicable

负责任做每件事，愉快工作每一天

All develop sense of responsibility, and achieve pleasure at work

● 我们的宗旨：求实、创新

Our Mission: Pragmatism and Innovation

● 我们的追求：人与自然的和谐共生

Our Pursue: Harmonious Coexistence of Human and Nature

● 我们的奉献：让百姓享受高品质的生活

Our Dedication: Improve comfort level of the people's livelihood

● 我们的愿景：原创地能采集技术实现产业化发展——让浅层地能作为建筑物供暖的替代能源；进一步完善能源按品位分级科学利用；在新时期，致力推广利用浅层地能无燃烧为建筑物智慧供暖（冷）；大力发展地能热冷一体化的新兴产业。

Our Vision: Work for greater industrialized development of the original technology for ground source energy collection, while promoting the use of shallow ground energy as the substitute energy of heating for buildings; furthering scientific utilization of energies by grades; propelling combustion-free intelligent heating (cooling) for buildings with ground source energy; and forcefully boosting the new industry of integrated heating and cooling with ground source energy.

中国地热能

CHINA GEOTHERMAL ENERGY

《中国地热能》编委会 China Geothermal Energy Editorial Committee

主任	Director
王秉忱	Wang Bingchen
第一副主任	First Deputy Director
武强	Wu Qiang
副主任	Deputy Director
柴晓钟 吴德绳 孙骥	Chai Xiaozhong, Wu Desheng, Sun Ji
特邀委员	Special Committee Member
许天福	Xu Tianfu
委员	Committee Member
程韧 李继江 庞忠和 郑克棧 徐伟	Cheng Ren, Li Jijiang, Pang Zhonghe, Zheng Keyan, Xu Wei
朱家玲 沈梦培 张军 黄学勤 李宁波	Zhu Jialing, Shen Mengpei, Zhang Jun, Huang Xueqin, Li Ningbo
许文发 马最良 彭涛 孙铁	Xu Wenfa, Ma Zuiliang, Peng Tao, Sun Tie

《中国地热能》杂志社 China Geothermal Energy Magazine

社长	President
徐生恒	Xu Shengheng
总编	Editor-in-Chief
孙伟	Sun Wei
出版顾问	Publish Consultant
王进友	Wang Jinyou
编辑	Editor
陈思	Jay Chen
特约记者	Special Correspondent
李晶 马晓芳	Li Jing Ma Xiaofang
设计制作	Art Editor
北科视觉设计中心	SCIENCE TECHNOLOGY LIFE

主办
中国地热能出版社有限公司
地址
香港中环干诺道中 62-63 号中兴商业大厦 8 楼

协办
北京节能环保促进会浅层地（热）能开发利用专业委员会

中国地热与温泉产业技术创新战略联盟

国际标准刊号 :23098457

承印人
泰业印刷有限公司
地址
香港新界大埔工业邨大贵街 11-13 号

发行部

黄礼玉

广告部

陈思

地址、联系电话

北京市海淀区杏石口路 102 号 +8610-62592988

Sponsor
China Geothermal Energy Press Limited
Address
8/F., Chung Hing Commercial Building, 62-63 Connaught Road Central, Central, Hong Kong

Co-Sponsor
Special Committee on Shallow Ground Source (Thermal) Energy Development and Utilization under Beijing Association to Promote Energy Conservation and Environmental
China's Geothermal and Hot-Spring Industry Union

ISSN:23098457

Printed by
Apex Print Limited
Address
11-13 Dai Kwai Street, Tai Po Industrial Estate, Tai Po, Hong Kong

Publishing Department

Coniah Wong

Advertising Department

Jay Chen

Address, Telephone

Address: No.102,Xingshikou Road, Haidian District, Beijing +8610-62592988

目录

CONTENTS



本期焦点

CURRENT FOCUS

单井循环地下水热泵系统中 承压含水层非达西流的近似 解析解

P06

本文提出了一种单井循环地下水热泵系统中承压含水层非达西流引起的瞬态降深的分析模型。利用 Izbash 方程和线性化方法分别描述了承压含水层水平方向的非达西流以及近似计算控制方程中的非线性项。此外，还进行了灵敏度分析，研究所选参数对降深的影响。

P23

An Approximate Analytical Solution for Non-Darcian Flow in a Confined Aquifer with a Single Well Circulation Groundwater Heat Pump System

P42

POLICY ADVICES

建言献策

地热供暖的相关实践经验与思考

P42

P44

DEVELOPMENT FORUM

发展论坛

全国地热、温泉与矿泉水产业
创新发展高峰论坛在济南成功召开

P44

保供暖 度寒冬—— 恒有源集团为 300 万平方米供暖运维项目保驾护航	P46
共创共享 协同发展—— 中节能建筑节能有限公司一行访问恒有源科技发展集团有限公司	P48
恒有源集团与中环寰慧集团在京签署战略合作协议	P50
恒有源集团参加第 23 届北京科博会	P51

P53

HOTSPOT INFO

热点资讯

国家能源局关于 “加快推进地热能产业发展的建议”的答复	P53
山西将开展地热能集中供热项目试点	P54
黑龙江省地热能供暖系统技术规程 10 月起实施	P55
河南省计划 2020 年年底完成 1400 万平 方米地热能供暖任务	P56
冰岛力推地热能利用 为 92% 的家庭采暖	P57

P60

PROJECT SHOWCASE

实用案例

恒有源科技发展集团贵州地区清洁供暖项目汇编：	P60
一、凯里市云谷田园生态农业观光公园无燃烧智慧供暖冷项目	P60
二、四季贵州山地旅游项目无燃烧智慧供暖冷项目	P62

封面 / 目录图片 摄影：陈思

中國地熱能
CHINA GEOTHERMAL ENERGY

2020 年 9 月
第 32 期
季刊

单井循环地下水热泵系统中承压含水层非达西流的近似解析解

AN APPROXIMATE ANALYTICAL SOLUTION FOR NON-DARCIAN FLOW IN A CONFINED AQUIFER WITH A SINGLE WELL CIRCULATION GROUNDWATER HEAT PUMP SYSTEM

作者：武强，徐生恒等

（中国矿业大学（北京），中国地热能产业发展集团有限公司等）

摘要：本文提出了一种单井循环地下水热泵系统中承压含水层非达西流引起的瞬态降深的分析模型。利用 Izbash 方程和线性化方法分别描述了承压含水层水平方向的非达西流以及近似计算控制方程中的非线性项。通过结合应用拉普拉斯余弦变换和傅立叶余弦变换，得到了拉普拉斯域的近似解析解，并通过 Stehfest 算法对解析解进行数值反演，得到了时域上的瞬态降深。在达西流（幂指数 $m=1$ ）的特殊情况下，导出的解析解与利用达西定律导出的定解十分吻合。应用傅里叶余弦变换得到了时域的稳态解析解。此外，还进行了灵敏度分析，研究所选参数对降深的影响，比如幂指数 m 、水力传导率 K 、含水层的比容量 S 、隔断区的长度为 d_2 。结果显示，每个影响因素对降深的影响周期不同，相比于其他影响因素，幂指数 m 对降深的影响更大。

关键词：Izbash 方程；线性化方法；非达西流；地热能；地下水热泵系统

1. 引言

众所周知，达西定律定义了流体通量与水力坡度之间的线性关系，在实际工程应用中经常被用

于解决地下水流动问题。但是,当流体通量小于或大于某一特定通量区间时,流体流动变为非达西流^[1-5],此时流体流量与水力坡度之间的关系不符合经典达西定律。研究人员指出达西定律不能准确描述这种情况下的地下水的流动^[3, 6-8]。为了描述非达西流的流体流量和水力坡度之间的关系,多种方程式已经被推导得出^[9-13]。通常,这些方程式可以分为幂函数和多项式函数两类^[14]。第一类假设流体流量是水力坡度的幂函数,第二类表明流体通量可以描述为水力坡度的二阶多项式函数。这两类方程中,非线性渗透方程(Forchheimer equation)和Izbash方程被广泛应用描述非达西流^[15-24]。到目前为止,对于各种完整井或非完整井的非达西流,已经推导出了各种近似解或者半解析解。比如,Sen^[15, 16]提出了一种将非线性渗透定律应用于无限小井或者大直径井的非达西流的解析解。Wu^[25]推导了一个由非线性渗透定律方程定义的,且考虑非达西流影响的近似解析解。Moutsopoulos^[26]提出了用非线性渗透定律方程描述的通过多孔介质的非线性流体的近似解析解。Mathias^[27]提出了另一种解决向抽水井流动的非线性流体的近似解。Sen^[28]应用Izbash方程提出了完整井承压含水层非达西流瞬态降深问题的解析解。后来,Wen^[29]在Izbash方程的基础上付出了巨大的努力,开发描述了完整井非达西流的解析解。综合考虑了在不同含水层系统中井筒水量和井筒半径的影响,他们提出了几种拉普拉斯域的近似解析解。而且,对非完整井的非达西流来说,Wen^[14]在忽略井筒半径影响的情况下,提出了拉普拉斯域的半解析解。他们还研究了大直径非完整井承压含水层中的非达西流^[30]。Feng等人^[31]考虑承压含水层有限厚度的影响,描述了非完整井中非达西流的解析解。

除了解析解外,流向井的非达西流的数值解也有了发展。Wu^[25]利用有限差分法,运用非线性渗透定律方程,描述了裂隙含水层的非达西流。基于非线性渗透定律方程可以描述非达西流渗流,Mathias^[27]基于有限差分法的数值模型,研究了承压含水层中流向完整井的流体。Wen^[32]提出了用有限差分法建立的相似的数值模型,并且假设Izbash方程可以被用来描述非达西流。最终,Mathias^[33]等人使用非线性渗透定律方程对越流含水层中的非达西流进行了数值模拟。

在实际工程应用中,通常采用一种特殊的井结构,即单井循环系统(图1)^[34]。在单井循环系统中,同一钻井被隔断区(如图1和图2所示)分成两个非完整井,通过隔断区阻止回水井中的水流入抽水井。埋深大的非完整井是抽水井,抽水速率是 Q ,埋深小的非完整井是回水井,注水速率同样是 Q 。因此,单井循环系统可以被看做是两个非完整井的组合。据我们所知,关于单井循环系统中地下水流动的研究工作还很少。Ni^[35]提出了描述单井循环地下水热泵系统运行引起的地下水水位瞬时降深的解析解。最后,Tu等人^[36, 37]提出了描述瞬态降深分布的解析解,并利用拉普拉斯变换得到了时域的稳态解析解。需要指出的是,这些关于单井循环系统中地下水流的研究全部都基于达西流假设。

然而,因为高水力坡度和因流线聚拢而增大的流速,许多研究人员认为,井附近粗颗粒和裂隙介质中的流体流动很可能变成非达西流^[21, 27]。非达西流动也可能是由于井附近的高流量造成的,特别是当抽水和回水速率相对较大时^[14, 30, 31, 38]。迄今为止,对单井循环系统地下水流动的研究都是基于达西定律有效的假设下,这可能不足以描述单井循环系统的地下水流动情况。

单井循环地下水热泵系统的实际工程实施需

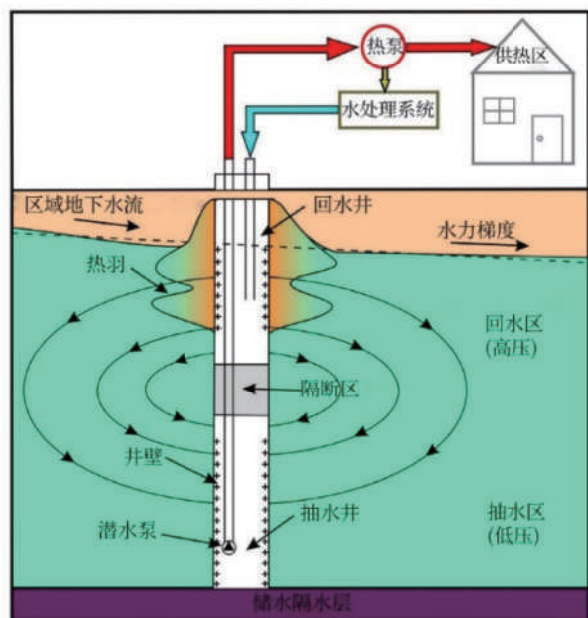


图1 单井循环地下水热泵系统示意图

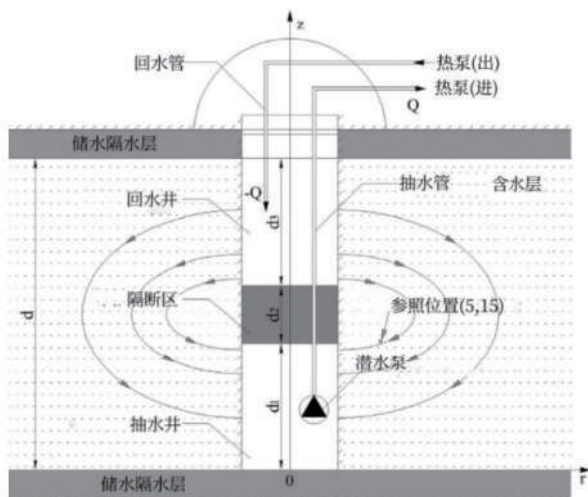


图2 单井循环系统数学模型示意图

要良好的含水层条件，允许水以相对较高的速度流动，以持续提供大量的水。这类含水层的水力传导系数应该大于 10^{-3} m/s ^[39, 40]。除此之外，设计相对较大的泵送速率（通常为 $50\text{--}100 \text{ m}^3/\text{h}$ ）是为了满足巨大的能源需求^[40]。因此，在设有单井循环系统的承压含水层中，由于高流速和水力坡度，近井壁处的水体流动特别容易变成非达西流。

据我们所知，大多数关于非达西流的研究都聚焦于完整井系统或者非完整井系统^[14, 21, 25, 27, 29, 31, 33]。但是，至今还没有分析模型涉及过单井循环系统中的非达西流。因此，有必要建立一种新的分析模型来研究设有单井循环系统的承压含水层中非达西水流的影响。这有助于我们提高对单井循环系统影响下复杂地下水流动规律的理解，这对今后单井循环系统的对流换热研究有很大帮助。

本研究的目的是将基于达西定律的解析解扩展到非达西流条件，并研究单井循环系统承压含水层中非达西流的影响。这对单井循环地下水热泵系统的应用具有重要的理论意义。由于单井循环系统中相对高的抽水速率和较大的水力传导率，流体水平流动速度通常很快，非达西流通常在近井壁处出现。因此，假定水平方向的流动为非达西流。另一方面，垂直方向的流速相对于水平方向的流速较小，为了使解析模型易于处理，假定垂直方向的流体为达西流。在处理非达西流流动问题和考虑垂直方向的流动速度时，经常采用这种假设^[14, 30, 31]。

Izbash 方程被用来描述非达西流，Wen^[29]等人提出的线性化逼近方法被用来求解控制方程中的非线性项。后一种方法被证明能有效地解决这一非线性问题。利用拉普拉斯和傅里叶余弦变换得到了拉普拉斯域上的近似解析解，利用线性化逼近方法和傅里叶余弦变换得到了时域的稳态解，并对不同参数对压降的影响进行了灵敏度分析。

2 数学模型

2.1. 建立模型

图二为单井循环系统的承压含水层的地下水流动示意图。非达西流多发生在靠近井的高流速水平方向，特别是抽水速率相对较大时。这种情况下，井附近的非达西流需要加以考虑，由于井

结构的独特性,垂直方向上的流动被视作达西流,不能够被忽略。对模型做出以下其他假设:(1)把承压含水层视为均质各向异性含水层,厚度均匀,水平方向延伸无限远;(2)承压含水层的顶板和底板均不透水;(3)假设水平方向上的比流量 q_r 沿着流网方向恒定(与Wen^[14]所作假设相同);(4)抽水速率 Q 和回水速率恒定不变(正值表示抽水速率,负值表示回水速率);(5)井半径 r_w 无穷小可以被忽略。

基于以上描述和假设,该数学模型的控制方程写作如下:

$$\frac{\partial q_r}{\partial r} + \frac{q_r}{r} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = S \frac{\partial s(r, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

t 表示时间[T], r 和 z 分别表示径向和垂直坐标[L], S 指含水层的比容量[L⁻¹], q_r 和 q_z 表示水平和垂直水流量[LT⁻¹], s 表示地下水水位降深[L]。

在系统开始运行前,取地下水水位降深为0,系统初始条件可被描述为:

$$s(r, z, 0) = 0 \quad (2)$$

边界条件在水平方向上无穷远 $r = \infty$,在承压含水层底板处 $z=0$,在承压含水层顶板处 $z=d$,如下:

$$s(\infty, z, t) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial s(r, 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial s(r, d, t)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

d 是承压含水层的厚度[L]。

假设忽略井筒中的水量,则近井壁处边界条件可表示为:

$$\lim_{r \rightarrow 0} r q_r = \begin{cases} \frac{-Q}{2\pi d_1} & (0 \leq z \leq d_1) \\ 0 & (d_1 \leq z \leq d_1 + d_2) \\ \frac{Q}{2\pi d_3} & (d_1 + d_2 \leq z \leq d) \end{cases} \quad (6)$$

抽水速率 Q 和回水速率始终相等且恒定[L³T⁻¹](抽水为正值,回水为负值); d_1 , d_2 , d_3 分别表示用于抽水、密封、和回水的井壁长度[L]。

Izbash^[10]提出了水力坡度和水流量之间的幂律关系,可以用来描述非达西流。在这个模型中,由二维流动的Izbash方程描述的水平比流量,与Wen等人^[14]描述的不同,写成如下:

$$q_r |q_r|^{m-1} = K_r \frac{\partial s(r, z, t)}{\partial r} \quad (7)$$

其中 K_r 为(准)径向水力传导系数^[41],Izbash方程中的非达西流幂指数 m 是一个经验系数,其数值范围为1-2,表示其偏离线性的程度^[10, 42]。当 m 的值小于1时,流体被称作前线性流,当 m 的值介于1与2之间时,流体被称作后线性流^[10, 41]。需要指出的是,当 $m=1$ 时,(7)式可被简化为达西定律。

受多种因素的影响,比如孔隙的形态和排列方式、流体流动的复杂路径,非达西指数 m 在时间和空间上都有变化^[41, 42]。因此在实际工程应用中,确定并量化它的准确数值非常困难。尽管一些研究人员试图确定非达西流幂指数 m 的值,但这个问题尚未得到很好的解决^[43-45]。为了使提出的模型易于处理,在处理非达西流问题时,假定非达西流幂指数 m 为恒定的常数^[14, 28, 29, 41, 46-48]。但是,在Izbash方程中采用恒定的非达西流幂指数 m ,会在描述非达西流时存在局限性。如何克服这些局限性仍然是一个还未解决的问题,也是未来研究中一个值得关注的课题。

假定垂直方向上的水流为达西

流, 可被描述为如下:

$$q_z = K_z \frac{\partial s(r, z, t)}{\partial z} \quad (8)$$

K_z 表示垂向水力传导系数。

因为水平方向上的流动与 r 坐标相反, 所以比流量 q_r 恒为负值。因此方程式 (7) 可进一步简化为:

$$(-q_r)^m = K_r \frac{\partial s(r, z, t)}{\partial r} \quad (9)$$

2.2. 近似解析解

将方程 (8) 和方程 (9) 代入方程 (1), 得到数学模型的控制方程:

$$\frac{K_r}{m(-q_r)^{m-1}} \frac{\partial^2 s(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{K_r}{r(-q_r)^{m-1}} \frac{\partial s(r, z, t)}{\partial r} + K_z \frac{\partial^2 s(r, z, t)}{\partial z^2} = S \frac{\partial s(r, z, t)}{\partial t} \quad (10)$$

值得注意的是, 由于存在非线性项 $(-q_r)^{m-1}$, 方程 (10) 是一个非线性方程。用严格的数学方法求解这样一个非线性方程可能是难以处理的。但是, Wen^[28] 提出的线性化近似方法可以用来解决这个难题。这个方法已成功应用于求解其它非达西问题的解析解^[14, 28, 31]。利用线性化近似方法, 非线性项可以近似描述为如下:

$$(-q_r)^{m-1} \approx \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \quad (11)$$

将方程 (11) 代入方程 (10) 可以得到:

$$\frac{\partial^2 s(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{m}{r} \frac{\partial s(r, z, t)}{\partial r} + \frac{mK_z}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \frac{\partial^2 s(r, z, t)}{\partial z^2} \approx \frac{mS}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \frac{\partial s(r, z, t)}{\partial t} \quad (12)$$

方程 (12) 为线性偏微分方程, 可通过拉普拉斯和傅立叶余弦变换求解。这个偏微分方程解的详细推导见附录 A。非达西流在拉普拉斯域中水位降深的近似解析解如下:

$$\begin{aligned} \bar{s}(r, z, p) = & \frac{2 \left(\frac{\sqrt{\alpha}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m d_1 + \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m d_3 \right]}{pdK_r \sqrt{\alpha} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right)} r^{\frac{1-m}{2}} K_{\frac{1-m}{3-m}} \left(\frac{2\sqrt{\alpha}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \left(\frac{\sqrt{\varphi}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi d_1}{d} \right) + \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi (d_1 + d_3)}{d} \right) \right]}{n\pi pK_r \sqrt{\varphi} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right)} r^{\frac{1-m}{2}} \\ & \times K_{\frac{1-m}{3-m}} \left(\frac{2\sqrt{\varphi}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) \cos \left(\frac{n\pi z}{d} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

上式中, $\varphi = \frac{mK_z n^2 \pi^2 + mpSd^2}{K_r d^2} \left(\frac{Q}{2\pi d} \right)^{m-1}$, $\alpha = \frac{mpS}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi d} \right)^{m-1}$, \bar{s} 是拉普拉斯域水位降深的解; $\Gamma(\cdot)$ 表示伽玛函数; $K_\nu(\cdot)$ 表示第二类 ν 阶修正贝塞尔函数; n 和 p 分别是傅里叶变量和拉普拉斯变量。

由于贝塞尔函数项 $K_\nu(\cdot)$ 的存在, 可能无法在时域得到方程 (13) 的解析解。多种数值反演方法可以用于将拉普拉斯域中的解析解转换为时域^[49-52]。在反演过程中, 用 Stehfest 算法推导了一个拉普拉斯逆变换, 证明这些方法能有效而准确地解决这类逆变问题^[28]。

利用 MATLAB 中开发了一个程序, 用来计算基于 Stehfest 算法的时域水位降深问题的解。在执行反演之前, 需要指定反演中使用的项目 N 的数量。多次数值研究表明, 当 $N=18$ 时, 可以得到准确稳定的解。同理, 方程 (13) 的无穷级数在 $n \geq 20$ 时收敛。所以, 为了提高计算效率, 在接下来的计算中分别取用 $N=18$ 和 $n=20$ 。

2.3. 稳态下的解析解

当系统运行足够长时间后, 近井壁处水位降深逐渐稳定, 流量达到稳定状态。在 $\frac{\partial s(r, z, t)}{\partial t} = 0$ 时, 方程 (12) 变为如下:

$$\frac{\partial^2 s(r, z)}{\partial r^2} + \frac{m}{r} \frac{\partial s(r, z)}{\partial r} + \frac{mK_z}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \frac{\partial^2 s(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (14)$$

对该线性偏微分方程应用傅里叶余弦变换, 得到时域上的稳态的解析解 (见附录 B):

$$\begin{aligned} s(r, z) = & \frac{\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m d_1 - \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m d_3}{dK_r \Gamma\left(\frac{2}{3-m}\right) (3-m)} r^{1-m} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \left(\frac{\sqrt{\omega}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m \sin\left(\frac{n\pi d_1}{d}\right) + \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m \sin\left(\frac{n\pi (d_1 + d_2)}{d}\right) \right]}{n\pi K_r \sqrt{\omega} \Gamma\left(\frac{2}{3-m}\right)} \\ & \times r^{\frac{1-m}{2}} K_{\frac{1-m}{3-m}} \left(\frac{2\sqrt{\omega}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) \cos\left(\frac{n\pi z}{d}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

上式中, $\omega = \frac{mK_z}{K_r} \frac{n^2 \pi^2}{d^2} \left(\frac{Q}{2\pi d} \right)^{m-1}$, s 表示时域上的水位降深。

2.4. 解析解的简化

当 $m=1$ 时, 水体流动为达西流, 方程 (13) 的解析解如下:

$$\bar{s}(r, z, p) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Q}{npK_r \pi^2} \left[\frac{\sin\left(\frac{n\pi d_1}{d}\right)}{d_1} + \frac{\sin\left(\frac{n\pi(d_1+d_2)}{d}\right)}{d_3} \right] \times K_0(\sqrt{\beta}r) \cos\left(\frac{n\pi z}{d}\right) \quad (16)$$

上式中, $\beta = \frac{K_z}{K_r} \frac{n^2 \pi^2}{d^2} + \frac{pS}{K_r}$, $K_0(\cdot)$ 为第二类 0 阶修正贝塞尔函数, 方程 (16) 与 Tu 等人^[37] 推导的单井循环系统的承压含水层达西流的解析解相同。

3 结果与讨论

3.1. 水位降深与时间呈幂函数关系

当 $Q=60\text{m}^3/\text{h}$, $d=40\text{m}$, $d_1=15\text{m}$, $d_2=10\text{m}$, $d_3=15\text{m}$, $S=0.0001\text{m}^{-1}$, $K_r=0.1(\text{m}/\text{h})^m$, $K_z=0.01\text{m}/\text{h}$ 时, 首先分析了非达西流幂指数 m (数值范围从 1 到 2, 以下简称为幂指数) 在 $r=5\text{m}$, $z=15\text{m}$ 时对水位降深的影响。对于 $m=1$ (达西流) 的情况, 从图 3 可以看出, 采用新解析解计算所得水位降深与 Ni^[35] 解析解计算的结果比较吻合。图 3 结果表明, 幂指数影响了整个抽水阶段的水位降深。指数越大, 最开始的下降幅度越大, 之后的下降幅度越小, 在 Wen^[14] 的文章中也有同样的结论。在 Izbash 方程中, 幂指数越大, 表明与达西流的偏差越大, 从而导致更大的流动紊乱。在早期, 含水层弹性释水的过程可能会在较大的幂指数影响下加速, 这就会导致, 在更早的时间观察到较大的水位降深。随着抽水时间增加, 当 $t>10\text{h}$ 时, 不同幂指数的水位降深接近稳态, 表明含水层的弹性释水基本完成。同时, 抽取的水主要来自离井相对较远的地区。由较大的幂指数引起的较大的湍流可能导致更充分的地下水补给。由图可知, 在运行后期, 幂指数越大, 水位降深越小, 且水位降深将更快达到稳定状态。

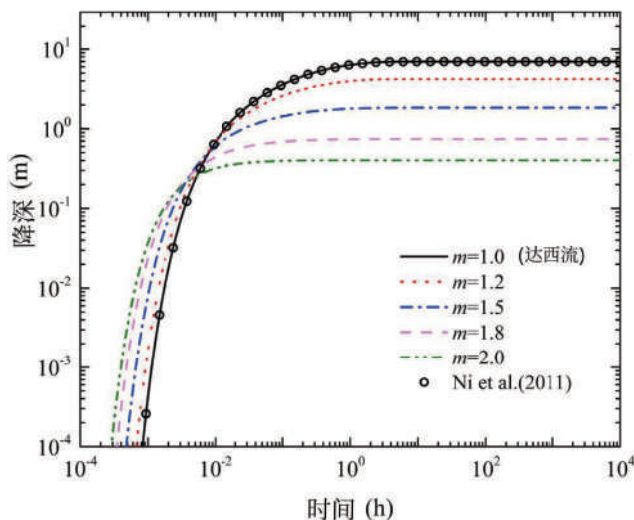


图 3 幂指数 (m) 影响水位降深 - 时间曲线

3.2. 降深与时间是径向水力传导系数的函数

图4为在径向水力传导系数从0.01到0.1, $r=5\text{m}$, $z=15\text{m}$ 时, 描绘的水位降深分布曲线图。其他水力学参数是: $Q=60\text{m}^3/\text{h}$, $m=1.5$, $d=40\text{m}$, $d_1=15\text{m}$, $d_2=10\text{m}$, $d_3=15\text{m}$, $S=0.0001\text{m}^{-1}$, $K_r=0.1\text{m}/\text{h}$ 。值得注意的是, 径向水力传导系数对水位降深的影响与幂指数相似。从图4中可以看出, 水位降深在初期随径向导水系数增大而增大, 后期随径向导水系数增大而减小。对这一现象作如下解释: 在早期, 较大的水力传导系数导致更快的地下水流动。由于降落漏斗中抽水区扩展速度最快, 地下水可以及时补充。结果, 当早期的水力传导系数较大时, 会出现较大的水位降深。在运行后期, 当流量达到相对稳定状态时, 将由远井处含水层进行水量补给。水力传导系数越小, 导致降落漏斗的区域更大, 水位降深更大。另外, 值得注意的是, 随着径向水力导水系数的增加, 水位降深更接近稳定状态。

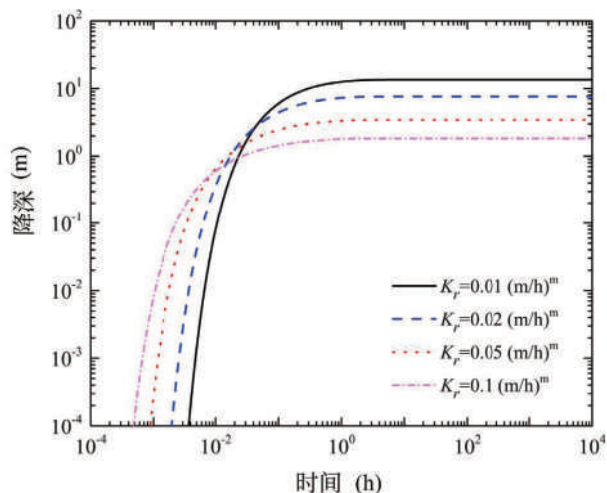


图4 径向水力传导系数 (K_r) 影响下水位降深 - 时间曲线

3.3. 降深与时间是含水层比容量的函数

图5为在含水层比容量 S 从0.0001到0.001 m^{-1} , $r=5\text{m}$, $z=15\text{m}$, 描绘的水位降深分布曲线图。其他水力学参数是: $Q=60\text{m}^3/\text{h}$, $d=4\text{m}$,

$d_1=15\text{m}$, $d_2=10\text{m}$, $d_3=15\text{m}$, $S=0.0001\text{m}^{-1}$, $K_r=0.1(\text{m}/\text{h})^m$, $K_z=0.01\text{m}/\text{h}$ 。从图5可以看出, 含水层比容量越大, 其水位降深幅度越小, 反之也成立。含水层比容量越大, 说明在其他条件不变的情况下, 含水层能够释放出更多的地下水。而且, 在运行后期 ($t>1\text{h}$), 含水层释水基本完成时, 不同比容量含水层的水位降深曲线重合(从图5可以看出)。水位降深在后期趋于稳定, 不同含水层比容量对水位降深的影响可以忽略不计。

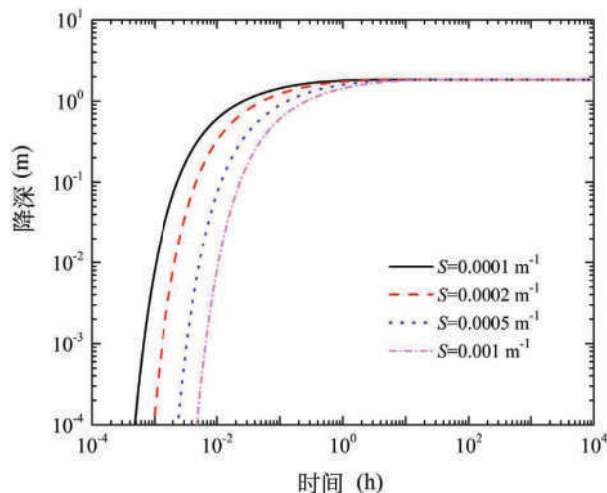


图5 含水层比容量 (S) 影响下水位降深 - 时间曲线

3.4. 降深与时间是隔断区尺度的函数

图6表明, $r=5\text{m}$, $z=15\text{m}$ 时, 隔断区长度从6m到14m, 水位降深随时间的变化。在这样的情况下, 含水层厚度保持不变, 随着隔断区长度的变化, 对抽水井和注水井的井段长度进行相应调整。本例中其他参数设置为: $Q=60\text{m}^3/\text{h}$, $m=1.5$, $S=0.0001\text{m}^{-1}$, $K_r=0.1(\text{m}/\text{h})$, $K_z=0.01\text{m}/\text{h}$ 。从图6中的曲线可以看出, 当隔断区长度从14m减少到8m时, 水位降深变化明显。隔断区长度越大, 水位降深越小。由于含水层的厚度和抽水速率保持恒定, 隔断区长度越长的钻井的抽水段越短, 单位长度的抽水井壁相应的抽水速率就越

大,因此,较短的隔断区可以导致较大的水位降深。但是,隔断区长度进一步减小(从8m到6m),对水位降深的影响是无法察觉的。同样,对于较小长度的隔断区(例如从6m到10m),水位降深的差异要小于较大长度的隔断区。而且,当 $t > 1\text{h}$ 时,水位降深接近稳定状态,曲线表现为水平平行。

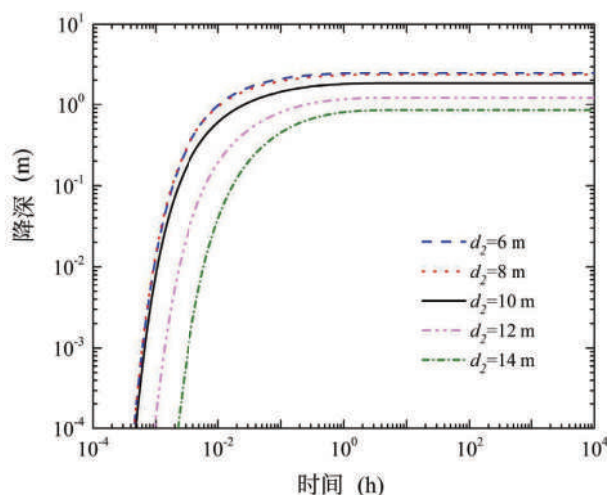


图6 隔断区长度 (d_2) 影响下水位降深 - 时间曲线

3.5. 降深与径向距离是抽水时间的函数

分析不同抽水时间 ($t=0.1, 1, 10\text{ h}$ 和稳态) 时水位降深与径向距离之间的关系。其他水力学参数设置为: $Q=60\text{m}^3/\text{h}$, $m=1.5$, $d=40\text{m}$, $d_1=15\text{m}$, $d_2=10\text{m}$, $d_3=15\text{m}$, $S=0.0001\text{m}^{-1}$, $K_r=0.1(\text{m}/\text{h})^m$, $K_z=0.01\text{m}/\text{h}$ 。在计算中采用稳态解析解方程(15)作为参考。从图7中可以看出,当径向距离小于1m时,不同抽水时间的水位降深曲线重合,这表明抽水井近区域的地下水流动将很快达到稳定状态。对于远井区域($r > 1\text{m}$),水位降深曲线开始互相偏离,这是由于该区域的地下水流动仍然是不稳定的,需要花费很长时间才能到达稳定状态。而且, $t=10\text{ h}$ 时的水位降深非常接近稳态下的水位降深,说明单井循环系统承压含水层的地下水流动相对更快的达到稳定状态。

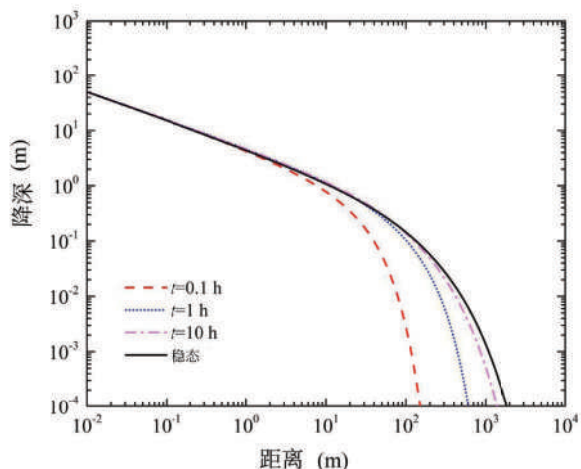


图7 抽水时间 (t) 影响下水位降深 - 径向距离曲线

3.6. 降深与径向距离是幂指数的函数

图8表示幂指数 m 从1到2的不同取值,随着不同径向距离的瞬时水位降深分布曲线。该计算中其他水力学参数与之前保持一致: $Q=60\text{m}^3/\text{h}$, $d=40\text{m}$, $d_1=15\text{m}$, $d_2=10\text{m}$, $d_3=15\text{m}$, $t=10\text{h}$, $S=0.0001\text{m}^{-1}$, $K_r=0.1(\text{m}/\text{h})^m$, $K_z=0.01\text{m}/\text{h}$ 。从图8中可以看出,当 $r < 100\text{ m}$ 时,幂指数值越小,水位降深越大。但是,在径向距离较大的情况下,低幂指数引起的水位降深小于高幂指数的影响。这与图3的结果一致,表明在抽水时间为10h时,抽水井附近的地下水流动达到了稳定状态,而在远离抽水井的区域则没有达到稳定状态。

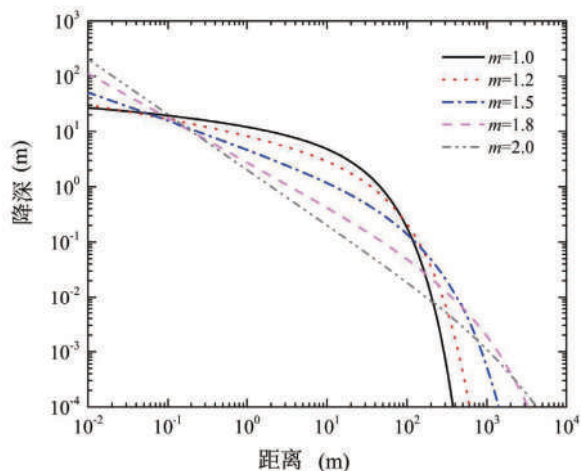


图8 幂指数 (m) 影响下水位降深 - 径向距离曲线

3.7. 稳态下的水位降深等值线

使用方程 (15) 的解析解得到了如图 9 所示的水位降深等值线。在这种情况下使用以下参数: $Q=60\text{m}^3/\text{h}$, $m=1.5$, $d=40\text{m}$, $d_1=15\text{m}$, $d_2=10\text{m}$, $d_3=15\text{m}$, $S=0.0001\text{m}^{-1}$, $K_r=0.1(\text{m}/\text{h})^m$, $K_z=0.01\text{m}/\text{h}$ 。如图 7 所示, 当 r 小于 0.5m 时, 水位降深幅度变化很大, 导致等值线过于密集, 无法在图 9 中显示。因此, 图 9 中水平轴上的起始点在 $r=0.5\text{m}$ 处。由于流动的对称性, 稳定状态水位降深的等值线在 $z=20\text{m}$ (承压含水层中面) 处沿水平线对称, 该处水位降深等于 0 (图 9), 并且沿着井轴变化剧烈。当单井循环系统正常工作时, 回水区 and 抽水区之间的压力差异在井附近产生相对较大的水力坡度。因此, 钻井附近的水位降深等值线远比远离抽水井和回水井区域的水位降深等值线密集。

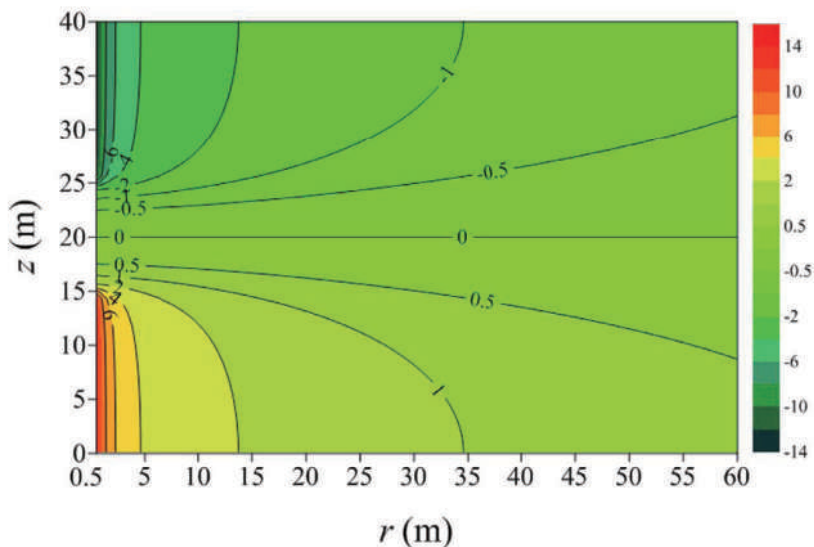


图 9 稳态水位降深等值线图

3.8. 灵敏度分析

全局灵敏度分析是一种有效的方法, 可用于分析模型输出对每个输入参数变化的灵敏度^[53]。需要注意的是, Sobol 指数已被广泛应用与水文^[54-57]和环境^[58, 59]模型的许多应用中作灵敏度测量。这是因为所采用的解释模型不需要线性或单调性假设^[60, 61]。这些指数可以提供与单个参数相关或与多个参数复杂交互相关的模型输出方差的准确信息。关于 Sobol 方法更详细的描述可以在相关文献中找到^[62]。

根据 Sobol 给出的定义^[60], Sobol 灵敏度指标可以被表达为部分模型偏方差与总模型方差之比:

$$S_i = \frac{V_i}{V} \quad (17)$$

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V} \quad (18)$$

以上两式中, V_i 表示第 i 个参数相关模型的偏方差, V_j 表示第 i 个参数与第 j 个参数交互作用下的模型的偏方差, V 是总方差。一阶或主灵敏度指数 S_i , 称为“主效应指数”, 通常被用于描述单个参数对模型输出总方差的贡献。两个输入参数的相互作用对模型输出方差的影响用二阶指标 S_{ij} 表示。总灵敏度指数 S_{Ti} ^[55], 表示给定参数 (第 i 个参数) 的主要影响及其与其他参数 (至第 k 阶, k 表示输入参数的数量) 的相互作用。可表示如下:

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{j \neq i} S_{ij} + \dots \quad (19)$$

对以下参数进行灵敏度指数评估: 幂指数 m , 径向水力传导系数 K_r , 含水层比容量 S , 隔断区长度 d_2 , 表 1 列出计算参数范围。在进行全局灵敏度分析时的其他条件如下: $Q=60\text{m}^3/\text{h}$, $d=40\text{m}$, $d_1=d_3=(40-d_2)^2$, $K_z=0.01\text{m}/\text{h}$ 。

表 1 整体灵敏度分析中使用的参数范围表

不确定参数	范围
幂指数 (m)	1-2
含水层比容量 (S)	0.01-0.1
径向水力传导系数 (K_r)	0.00001-0.0001
隔断区长度 (d_2)	6-14

图 10 表示出了针对所选输入参数的总灵敏度指标的时间变化。可以看出, 主要有两个参数对模型输出方差有显著的影响。两因素分别为幂指数 m 和径向水力传导系数 K_r , 幂指数 m 的总灵敏度指数初期很小, 随着时间增加, 在 $t=20$ h 时达到最大值, 之后随时间保持不变。径向水力传导系数和幂指数有着相似变化趋势, 不同的是在其达到稳定状态时峰值较低。比容量 S 的初始总灵敏度数值水平很高, 直到 $t=10$ h 时发生急剧下降, 在 40 h 后逐渐下降到几乎为 0。这表明比容量对模型输出的影响可以忽略不计。最后, 隔断区长度 d_2 的总灵敏性指数的总体输出与比容量 S 极其相似。不同的是, 总灵敏度指数在较长时间后达到了一个恒定的最小值, 该最小值远大于比容量 S 在较长时间后得到的总灵敏度。

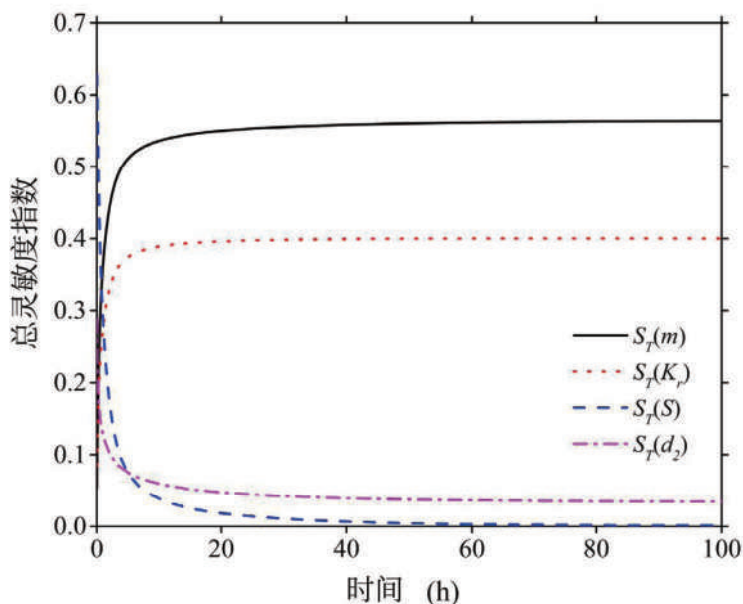


图 10 各参数 (幂指数 m , 含水层比容量 S , 径向水力传导系数 K_r , 隔断区长度 d_2) 的总灵敏度指数 - 时间关系曲线

4 结论

在这篇文章中, 我们建立了一个描述单井循环系统中承压含水层非达西流的分析模型。通常用 Izbash 方程来描述水平方向上的非达西流, Wen^[29] 提出了线性化方法来近似控制方程中的非线性项。然后, 利用拉普拉斯变换和傅里叶余弦变换, 得到了拉普拉斯域上的解析解, 并利用 Stehfest 算法将解析解在时域上进行数值反演。本工作的主要发现如下:

(1) 幂指数 m 和径向水力传导系数 K_r 的值越大, 运行早期的水位降深越大, 后期的水位降深越小, 同时地下水的流动更快趋近稳态。

(2) 含水层比容量 S 值越大, 水位降深越小, 但比容量 S 在后期对水位降深的影响可以忽略不计。

(3) 隔断区长度 d_2 越小, 水位降深越大。但是进一步减小隔断区的长度到临界长度以下时, 水位降深几乎不变化。

(4) 稳态条件下水位降深的等值线沿着井轴急剧变化, 并且在回水区和抽水区中间的水平线附近对称 (本文取 $z=20$ m), 该处水位降深为 0。

(5) 各个参数对水位降深的影响时期不同。水位降深在早期对隔断区长度 d_2 和含水层比容量 S 敏感, 在后期对径向水力传导系数 K_r 敏感, 对幂指数 m 尤其敏感。

附录 A : 近似解析解的推导

采用线性化方法后的控制方程为：

$$\frac{\partial^2 \bar{s}(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{m}{r} \frac{\partial \bar{s}(r, z, t)}{\partial r} + \frac{mK_z}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \frac{\partial^2 \bar{s}(r, z, t)}{\partial z^2} = \frac{m\bar{S}}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \frac{\partial \bar{s}(r, z, t)}{\partial t} \quad (A1)$$

对式 (A1) 进行时间 t 的拉普拉斯变换，得到：

$$\frac{\partial^2 \bar{s}(r, z, p)}{\partial r^2} + \frac{m}{r} \frac{\partial \bar{s}(r, z, p)}{\partial r} + \frac{mK_z}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \frac{\partial^2 \bar{s}(r, z, p)}{\partial z^2} = \frac{m\bar{S}}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \bar{p}\bar{s}(r, z, p) \quad (A2)$$

p 和 \bar{S} 分别是拉普拉斯域的变量和降深。

利用傅里叶余弦变换对式 (A2) 中 z 坐标的二阶偏导数求导，得到：

$$F_c \left[\frac{\partial^2 \bar{s}(r, z, p)}{\partial z^2} \right] = \int_0^d \frac{\partial^2 \bar{s}(r, z, p)}{\partial z^2} \cos \left(\frac{n\pi z}{d} \right) dz = -\frac{n^2 \pi^2}{d^2} \bar{s}(r, n, p) \quad (A3)$$

其中 $n(n=0, 1, 2, 3, \dots)$ 是傅里叶变量， $\bar{s}(r, n, p)$ 表示降深的傅里叶余弦变化，将式 (A3) 代入式 (A2) 得：

$$\frac{d^2 \bar{s}(r, n, p)}{dr^2} + \frac{m}{r} \frac{d\bar{s}(r, n, p)}{dr} = \frac{mK_z n^2 \pi^2 + m\bar{p}Sd^2}{K_r d^2} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1} \bar{s}(r, n, p) \quad (A4)$$

定义 $\varphi = \frac{mK_z n^2 \pi^2 + m\bar{p}Sd^2}{K_r d^2} \left(\frac{Q}{2\pi r d} \right)^{m-1}$ ，式 (A4) 可以简化为：

$$\frac{d^2 \bar{s}(r, n, p)}{dr^2} + \frac{m}{r} \frac{d\bar{s}(r, n, p)}{dr} - \varphi r^{1-m} \bar{s}(r, n, p) = 0 \quad (A5)$$

式 (A5) 为二阶线性微分方程，其通解可以描述为：

$$\bar{s}(r, n, p) = r^{\frac{1-m}{2}} \left[C_1 I_{\frac{1-m}{3-m}} \left(\frac{2\sqrt{\varphi}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) + C_2 K_{\frac{1-m}{3-m}} \left(\frac{2\sqrt{\varphi}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) \right] \quad (A6)$$

$I_{\frac{1-m}{3-m}}$ 和 $K_{\frac{1-m}{3-m}}$ 分别是情形下的第一类和第二类修正贝塞尔函数，积分常数 C_1 和 C_2 可以根据边界条件确定。

对式 (3) 进行拉普拉斯和傅里叶余弦变换，得到：

$$\bar{\hat{s}}(\infty, n, p) = 0 \quad (A7)$$

考虑第一类修正贝塞尔函数的性质，将式 (A7) 代入式 (A6) 得到：

$$C_1 = 0 \quad (A8)$$

则式 (A6) 可改写为：

$$\bar{\hat{s}}(r, n, p) = C_2 r^{\frac{1-m}{2}} K_{\frac{1-m}{3-m}} \left(\frac{2\sqrt{\varphi}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) \quad (A9)$$

将 Izbash 方程与线性化方法相结合，可给出式 (6) 的边界条件为：

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\partial \bar{s}(r, z, t)}{\partial r} = \begin{cases} -\frac{1}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d_1} \right)^m & (0 \leq z \leq d_1) \\ 0 & (d_1 \leq z \leq d_1 + d_2) \\ \frac{1}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi r d_3} \right)^m & (d_1 + d_2 \leq z \leq d) \end{cases} \quad (A10)$$

对式 (A10) 进行拉普拉斯和傅里叶余弦变换，可以得到：

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{d\bar{s}(r, n, p)}{dr} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{-d}{n\pi p K_r} \left[\left(\frac{Q}{2\pi r d_1} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi d_1}{d} \right) + \left(\frac{Q}{2\pi r d_3} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi(d_1 + d_2)}{d} \right) \right] \quad (A11)$$

修正后的贝塞尔函数具有以下性质^[63]：

$$\frac{xdK_\nu(x)}{dx} + \nu K_\nu(x) = -xK_{\nu-1}(x) \quad (A12)$$

$$K_\nu(x) = K_{-\nu}(x) \quad (A13)$$

$$K_\nu(x) \approx \frac{\Gamma(\nu)}{2} \left(\frac{x}{2} \right)^{-\nu}, x \rightarrow 0, \nu > 0 \quad (A14)$$

由式 (A9)、(A12)、(A13) 和 (A14) 知：

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{d\bar{s}(r, n, p)}{dr} = -\frac{1}{2} \lim_{r \rightarrow 0} C_2 \frac{1}{r^m} \sqrt{\rho} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right) \left(\frac{\sqrt{\rho}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \quad (A15)$$

然后积分常数 C_2 可以由 (A11) 和 (A15) 得出：

$$C_2 = \frac{2d \left(\frac{\sqrt{\rho}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi d_1}{d} \right) + \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi (d_1 + d_3)}{d} \right) \right]}{n\pi p K_r \sqrt{\rho} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right)} \quad (A16)$$

将式 (A16) 代入 (A9) 得：

$$\bar{s}(r, n, p) = \frac{2d \left(\frac{\sqrt{\rho}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi d_1}{d} \right) + \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi (d_1 + d_3)}{d} \right) \right]}{n\pi p K_r \sqrt{\rho} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right)} \quad (A17)$$

$$\times r^{\frac{1-m}{2}} K_{\frac{1-m}{2}} \left(\frac{2\sqrt{\rho}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right)$$

对式 (17) 进行傅里叶反余弦变化，可得到：

$$\bar{s}(r, z, p) = \frac{1}{d} \bar{s}(r, 0, p) + \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{s}(r, n, p) \cos \left(\frac{n\pi z}{d} \right) \quad (A18)$$

当 $n=0$ 时，采用类似的方法求解 (A5) 和边界条件，得到积分常数 C_2' ：

$$C_2' = \frac{2 \left(\frac{\sqrt{\alpha}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m d_1 - \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m d_3 \right]}{p K_r \sqrt{\alpha} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right)} \quad (A19)$$

令 $\alpha = \frac{mpS}{K_r} \left(\frac{Q}{2\pi d} \right)^{m-1}$ ，然后由式 (A19) 知：

$$\bar{s}(r, 0, p) = \frac{2 \left(\frac{\sqrt{\alpha}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m d_1 - \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m d_3 \right]}{p K_r \sqrt{\alpha} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right)} r^{\frac{1-m}{2}} K_{\frac{1-m}{2}} \left(\frac{2\sqrt{\alpha}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) \quad (A20)$$

最后，通过代入方程 (A17) 和 (A20) 到式 (A18)，得到拉普拉斯域上的解析解。

附录 B：稳态解析解的推导

同理，对式 (14) 中坐标 z 的二阶偏导数采用傅里叶余弦变换，得到：

$$F_c \left[\frac{\partial^2 s(r, z)}{\partial z^2} \right] = \int_0^d \frac{\partial^2 s(r, z)}{\partial z^2} \cos \left(\frac{n\pi z}{d} \right) dz = -\frac{n^2 \pi^2}{d^2} \hat{s}(r, n) \quad (B1)$$

\hat{s} 是傅里叶域的降深。

对式 (14) 进行傅里叶余弦变换，并结合式 (B1)

可将式 (14) 简化为：

$$\frac{d^2 \hat{s}(r, n)}{dr} + \frac{m}{r} \frac{d\hat{s}(r, n)}{dr} - \omega r^{1-m} \hat{s}(r, n) = 0 \quad (B2)$$

$\omega = \frac{mK_r}{K_r} \frac{n^2 \pi^2}{d^2} \left(\frac{Q}{2\pi d} \right)^{m-1}$ ，式 (B2) 的通解为：

$$\hat{s}(r, n) =$$

$$r^{\frac{1-m}{2}} \left[C_3 I_{\frac{1-m}{2}} \left(\frac{2\sqrt{\omega}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) + C_4 K_{\frac{1-m}{2}} \left(\frac{2\sqrt{\omega}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) \right] \quad (B3)$$

其中 C_3 和 C_4 是积分常数； $I_{\frac{1-m}{2}}$ 和 $K_{\frac{1-m}{2}}$ 分别

是情形下的第一类和第二类修正贝塞尔函数，利用边界条件式 (3)，应用傅里叶变换和修正贝塞尔函数可以得到 $C_3=0$ ，则式 (B3) 可进一步表示为：

$$\hat{s}(r, n) = C_4 r^{\frac{1-m}{2}} K_{\frac{1-m}{2}} \left(\frac{2\sqrt{\omega}}{3-m} r^{\frac{3-m}{2}} \right) \quad (B4)$$

对式 (6) 进行傅里叶余弦变换得到：

参考文献

- [1] Wilkinson, J.K., 1955. Flow of water through rock fill and its application to the design of dams. *N.Z. Eng.* 10 (11), 382 - 387.
- [2] Slepicka, F., 1961. The laws of filtration and limits of their validity. In: *IAHR Proceedings 9th Convention*, 38, pp. 383 - 394.
- [3] Bear, J., 1972. *Dynamics of Fluid in Porous Media*. Elsevier Science, New York.
- [4] Zoorabadi, M., Saydam, S., Timms, W., Hebblewhite, B., 2015. Nonlinear flow behavior of rough fractures having standard JRC profiles. *Int. J. Rock Mech. Min.* 76, 192 - 199.
- [5] Zhou, J.Q., Hu, S.H., Fang, S., Chen, Y.F., Zhou, C.B., 2015. Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 80, 202 - 218.
- [6] Miller, R.J., Low, P.F., 1963. Threshold gradient for water flow in clay systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 27 (6), 605 - 609.
- [7] Barker, J.A., Herbert, R., 1977. Non-Darcy flow and its implications to seepage problem. *J. Irrig. Drain. Eng.-ASCE* 459 - 473.
- [8] Sen, Z., 1985. Volumetric approach to type curves in leaky aquifers. *J. Hydraul. Eng.* 111(3), 467 - 484.
- [9] Forchheimer, P.H., 1901. *Wasserbewegung durch boden*. *Zeltschrft des Verelnes DeutscherIngenleure* 49, 1736 - 1749.
- [10] Izbash, S.V., 1931. *O filtracii v kropnozernstom materiale*. USSR, Leningrad in Russian.

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{d\hat{s}(r, n)}{dr} =$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{d}{n\pi K_r} \left[\left(\frac{Q}{2\pi r d_1} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi d_1}{d} \right) \right] + \left[\left(\frac{Q}{2\pi r d_3} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi (d_1 + d_2)}{d} \right) \right] \quad (B5)$$

利用式 (B4) 和式 (A12)、(A13) 和 (A14) 中所描述的修正贝塞尔函数的性质, 可得:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{d\hat{s}(r, n)}{dr} = -\frac{1}{2} \lim_{r \rightarrow 0} C_4 \frac{1}{r^m} \sqrt{\omega} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right) \left(\frac{\sqrt{\omega}}{3-m} \right)^{\frac{-2}{3-m}} \quad (B6)$$

结合式 (B5) 和 (B6), 常数 C_4 可以表示为:

$$C_4 = \frac{2d \left(\frac{\sqrt{\omega}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi d_1}{d} \right) + \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi (d_1 + d_2)}{d} \right) \right]}{n\pi K_r \sqrt{\omega} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right)} \quad (B7)$$

将式 (B7) 代入 (B4), 得:

$$\hat{s}(r, n) = \frac{2d \left(\frac{\sqrt{\omega}}{3-m} \right)^{\frac{2}{3-m}} \left[\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi d_1}{d} \right) + \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m \sin \left(\frac{n\pi (d_1 + d_2)}{d} \right) \right]}{n\pi K_r \sqrt{\omega} \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right)} \quad (B8)$$

$$\times r^{\frac{1-m}{2}} K_{\frac{1-m}{2}} \left(\frac{2\sqrt{\omega} r^{\frac{3-m}{2}}}{3-m} \right)$$

将傅里叶反余弦变换应用与式 (A8), 得:

$$s(r, z) = \frac{1}{d} \hat{s}(r, 0) + \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \hat{s}(r, n) \cos \left(\frac{n\pi z}{d} \right) \quad (B9)$$

当 $n=0$ 时, 具有相应边界条件的式 (B2) 可以用相似的方法求解。然后利用修正贝塞尔函数 (A12) -

(A14) 的性质, 可以得到: $\hat{s}(r, 0)$

$$\hat{s}(r, 0) = \frac{\left(\frac{Q}{2\pi d_1} \right)^m d_1 - \left(\frac{Q}{2\pi d_3} \right)^m d_3}{K_r \Gamma \left(\frac{2}{3-m} \right) (3-m)} r^{1-m} \quad (B10)$$

将式 (B8) 和式 (B10) 代入到式 (B9), 最终可以得到时域的稳态解析解。

(摘自 *Advances in Water Resources*)

参考文献

- [11] Muskat, M., 1938. The flow of homogeneous fluids through porous media. *Soil Sci.* 46 (2),169.
- [12] Rose, H.E., 1951. Fluid flow through beds of granular material. In: *Some Aspects of Fluid Flow*. Edward Arnold, London, pp. 136 - 163.
- [13] Escande, L., 1953. Experiments concerning the filtration of water through rock mass. Proceedings of Minnesota International Hydraulics Convention.
- [14] Wen, Z., Liu, K., Chen, X., 2013. Approximate analytical solution for non-Darcian flow toward a partially penetrating well in a confined aquifer. *J. Hydrol.* 498, 124 - 131.
- [15] Sen, Z., 1989. Nonlinear flow toward wells. *J. Hydraul. Eng.* 115 (2), 193 - 209.
- [16] Sen, Z., 1990. Nonlinear radial flow in confined aquifers toward large diameter wells. *Water Resour. Res.* 26 (5), 1103 - 1109.
- [17] Wen, Z., Huang, G., Zhan, H., Li, J., 2008a. Two-region non-Darcian flow toward a well in a confined aquifer. *Adv. Water Res.* 31 (5), 818 - 827.
- [18] Wen, Z., Huang, G., Zhan, H., 2008b. Non-Darcian flow to a well in an aquifer - aquitard system. *Adv. Water Res.* 31 (12), 1754 - 1763.
- [19] Moutsopoulos, K.N., Papaspyros, I.N., Tsihrintzis, V.A., 2009. Experimental investigation of inertial flow processes in porous media. *J. Hydrol.* 374, 242 - 254.
- [20] Mathias, S.A., Todman, L.C., 2010. Step-drawdown tests and the Forchheimer equation. *Water Resour. Res.* 46 (7).
- [21] Yeh, H.D., Chang, Y.C., 2013. Recent advances in modeling of well hydraulics. *Adv. Water Res.* 51, 27 - 51.
- [22] Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., Salehi, R., 2014. Non-Darcy flow of water through a packed column test. *Transp. Porous Media* 101 (2), 215 - 227.
- [23] Chen, Y.F., Hu, S.H., Hu, R., Zhou, C.B., 2015. Estimating hydraulic conductivity of fractured rocks from high-pressure packer tests with an Izbash's law-based empirical model. *Water Resour. Res.* 51 (4), 2096 - 2118.
- [24] Houben, G.J., 2015. Hydraulics of water wells-flow laws and influence of geometry. *Hydrogeol. J.* 23 (8), 1633 - 1657.
- [25] Wu, Y.S., 2002. An approximate analytical solution for non - Darcy flow toward a well in fractured media. *Water Resour. Res.* 38 (3) 5 - 1.
- [26] Moutsopoulos, K.N., Tsihrintzis, V.A., 2005. Approximate analytical solutions of the Forchheimer equation. *J. Hydrol.* 309 (1 - 4), 93 - 103.
- [27] Mathias, S.A., Butler, A.P., Zhan, H., 2008. Approximate solutions for Forchheimer flow to a well. *J. Hydraul. Eng.* 134 (9), 1318 - 1325.
- [28] Sen, Z., 2000. Non-Darcian groundwater flow in leaky aquifers. *Hydrol. Sci. J.* 45 (4),595 - 606.
- [29] Wen, Z., Huang, G., Zhan, H., 2008. An analytical solution for non-Darcian flow in a confined

参考文献

- aquifer using the power law function. *Adv. Water Res.* 31 (1), 44 – 55.
- [30] Wen, Z., Liu, K., Zhan, H., 2014. Non-Darcian flow toward a larger-diameter partially penetrating well in a confined aquifer. *Environ. Earth Sci.* 72 (11), 4617 – 4625.
- [31] Feng, Q., Wen, Z., 2016. Non-Darcian flow to a partially penetrating well in a confined aquifer with a finite-thickness skin. *Hydrogeol. J.* 24 (5), 1287 – 1296.
- [32] Wen, Z., Huang, G., Zhan, H., 2009. A numerical solution for non-Darcian flow to a well in a confined aquifer using the power law function. *J. Hydrol.* 364 (1 – 2), 99 – 106
- [33] Mathias, S.A., Wen, Z., 2015. Numerical simulation of Forchheimer flow to a partially penetrating well with a mixed-type boundary condition. *J. Hydrol.* 524, 53 – 61.
- [34] Wu, Q., Tu, K., Sun, H., Chen, C., 2019. Investigation on the sustainability and efficiency of single-well circulation (SWC) groundwater heat pump systems. *Renew. Energy* 130, 656 – 666.
- [35] Ni, L., Li, H., Jiang, Y., Yao, Y., Ma, Z., 2011. A model of groundwater seepage and heat transfer for single-well ground source heat pump systems. *Appl. Therm. Eng.* 31, 2622 – 2630.
- [36] Tu, K., Wu, Q., Sun, H., 2019. A mathematical model and thermal performance analysis of single-well circulation (SWC) coupled ground source heat pump (GSHP) systems. *Appl. Therm. Eng.* 147, 473 – 481.
- [37] Tu, K., Wu, Q., Simunek, J., Chen, C., Zhu, K., Zeng, Y., Xu, S., Wang, Y., 2020. An analytical solution of groundwater flow in a confined aquifer with a single well circulation system. *Water Resour. Res.* 56 e2020WR027529.
- [38] Wan, J.W., Huang, K., Chen, C.X., 2013. Reassessing Darcy' Law on water flow in porous media. *Earth Sci.-J. China Univ. Geosci.* 38 (6), 1327 – 1330 in Chinese.
- [39] Wu, Q., Xu, S.H., Zhou, W.F., LaMoreaux, J., 2015. Hydrogeology and design of groundwater heat pump systems. *Environ. Earth Sci.* 73 (7), 3683 – 3695.
- [40] Rybach, L., 2015. Innovative energy-related use of shallow and deep groundwaters—examples from China and Switzerland. *Cent. Eur. Geol.* 58 (1 – 2), 100 – 113.
- [41] Wen, Z., Huang, G., Zhan, H., 2006. Non-Darcian flow in a single confined vertical fracture toward a well. *J. Hydrol.* 330, 698 – 708.
- [42] Bordier, Zimmer, 2000. Drainage equations and non-Darcian modelling in coarse porous media or geosynthetic materials. *Journal of Hydrology.*
- [43] Soni, J.P., Islam, N., Basak, P., 1978. An experimental evaluation of non-Darcian flow in porous media. *J. Hydrol.* 38 (3 – 4), 231 – 241.
- [44] Watanabe, H., 1982. Comment on Izbash' s equation. *J. Hydrol.* 58 (3 – 4), 389 – 397.
- [45] Chen, Y.F., Liu, M.M., Hu, S.H., Zhou, C.B., 2015. Non-Darcy' s law-based analytical models for data interpretation of high-pressure packer tests in fractured rocks. *Eng. Geol.* 199, 91 – 106.
- [46] Quinn, P.M., Cherry, J.A., Parker, B.L., 2011. Quantification of non-Darcian flow observed during packer testing in fractured sedimentary rock. *Water Resour. Res.* 47 (9).

参考文献

- [47] Quinn, P.M., Parker, B.L., Cherry, J.A., 2013. Validation of non-Darcian flow effects in slug tests conducted in fractured rock boreholes. *J. Hydrol.* 486, 505 - 518.
- [48] Liu, M.M., Chen, Y.F., Hong, J.M., Zhou, C.B., 2016. A generalized non - Darcian radial flow model for constant rate test. *Water Resour. Res.* 52 (12), 9325 - 9343.
- [49] Stehfest, H., 1970a. Algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms [D5]. *Commun. ACM* 13 (1), 47 - 49.
- [50] Stehfest, H., 1970b. Remark on algorithm 368: numerical inversion of Laplace transforms[D5]. *Commun. ACM* 13 (10), 624 - 625.
- [51] Crump, K.S., 1976. Numerical inversion of Laplace transforms using a Fourier-series approximation. *J. ACM (JACM)* 23 (1), 89 - 96.
- [52] De Hoog, F.R., Knight, J.H., Stokes, A.N., 1982. An improved method for numerical in-version of Laplace transforms. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* 3 (3), 357 - 366.
- [53] Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M., 2000. *Sensitivity Analysis*. Wiley, New York, USA.
- [54] van Werkhoven, K., Wagener, T., Reed, P., Tang, Y., 2009. Sensitivity-guided reduction of parametric dimensionality for multi-objective calibration of watershed models. *Adv. Water Res.* 32 (8), 1154 - 1169.
- [55] Ciriello, V., Di Federico, V., 2012. Similarity solutions for flow of non-Newtonian fluids in porous media revisited under parameter uncertainty. *Adv. Water Res.* 43, 38 - 51.
- [56] Di Federico, V., Ciriello, V., 2012. Generalized solution for 1-D non-Newtonian flow in a porous domain due to an instantaneous mass injection. *Transp. Porous Media* 93 (1), 63 - 77.
- [57] Brunetti, G., Šimůnek, J., Piro, P., 2016. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *J. Hydrol.* 540, 1146 - 1161.
- [58] Nossent, J., Elsen, P., Bauwens, W., 2011. Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model. *Environ. Model. Softw.* 26 (12), 1515 - 1525.
- [59] Pianosi, F., Sarrazin, F., Wagener, T., 2015. A Matlab toolbox for global sensitivity analysis. *Environ. Model. Softw.* 70, 80 - 85.
- [60] Sobol, I.M., 1993. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Math. Model. Comput. Exp.* 1 (4), 407 - 414.
- [61] Archer, G.E.B., Saltelli, A., Sobol, I.M., 1997. Sensitivity measures, ANOVA-like techniques and the use of bootstrap. *J. Statist. Comput. Simulation* 58 (2), 99 - 120.
- [62] Sobol, I.M., 2001. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Math. Comput. Simul* 55 (1 - 3), 271 - 280.
- [63] Spanier, J., Oldham, K.B., 1987. *An Atlas of Functions*. Hemisphere, New York, USA.

地热供暖的相关实践经验与思考

RELEVANT PRACTICAL EXPERIENCE AND THINKING OF GEOTHERMAL HEATING

地热能是一种绿色低碳、能够持续利用的可再生能源，具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点，是一种现实可行且具有竞争力的清洁能源。地热能利用包括地热发电和地热直接利用（以热的形式利用）两大类。国内外地热能的利用方式十分丰富，地热可以用来进行农业反季节种植、水产养殖，工业上可以用来食品加工、木材烘干、发电，民生方面可以用做居民供暖（制冷），可以温泉健康理疗和休闲旅游，可以说是在一、二、三产业都能够应用。

近年来，地热能供暖（制冷）成为我国地热能利用的最主要方式（指通过换热系统提取储存在浅层地壳中的热能向用户供暖）。近日，围绕如何进一步推进地热能供暖，提高我国地热能利用水平，中国石化新星公司新能源首席专家兼新能源研究院院长国殿斌与读者分享相关实践经验和思考。

地热供暖成为最适合国情的地热能利用路径

从我国地热利用的历史看，上世纪70年代是中国地热勘查和开发利用的第一次高潮，七个中低温地热发电站建成，高温地热发电以西藏羊八井地热电站为代表。当时，我国借鉴国外经验，把很大的精力投入在地热发电方面。后来的实践发现，适合发电的高温地热资源主要集中在青藏高原及其边缘区域，开发和并网十分困难；而中低温发电的技术成本又比较高。因此，我国地热

发电后期的发展较慢。可以说，以地热发电为主的利用思路抑制了国内地热能快速高效利用。

本世纪初以来，地热能供暖（制冷）开发利用方式逐步加速。2013年1月，国家能源局以《关于促进地热能开发利用的指导意见》的形式明确了未来地热能发展目标，引导和规范地热能发展。2014年2月，国家能源局在河北雄县召开全国地热能开发利用现场会，时任国家发展改革委副主任、国家能源局局长吴新雄出席会议并讲话，总结了地热开发的“雄县模式”。2017年1月，国家能源局发布《地热能开发利用“十三五”规划》，这是我国首个地热开发利用专项规划。规划提出，到2020年，地热能供暖（制冷）面积累计达到16亿平方米等目标。经过长期实践，逐渐探索出了以地热供暖（制冷）为主的技术发展道路，带动我国在地热直接利用领域连续多年位居世界第一。地热供暖成为最适合国情的地热能利用路径。

地热能供暖的综合效益优良，具有广阔发展前景

从机遇方面看，一是从政策导向上，打赢污染防治攻坚战、因地制宜推进北方地区冬季清洁取暖等国家重要部署再次确认了地热的清洁能源地位，结合黄河流域生态保护和高质量发展国家战略，各地坚持宜电则电、宜气则气、宜煤则煤、宜热则热，地热供暖应用将越来越多。

二是从市场空间上，一方面，随着煤改电、

煤改气的推进，双替代难度越来越大，然而由于实施条件不同，地热能供暖发展存在巨大的空间。而且地热资源分布与北方清洁能源供暖地区高度重合，尤其是在燃气管网覆盖不到、电网负荷难以承受的地区，地热供暖可以做为主要的清洁供暖方式加以推进。另一方面，在夏热冬冷的长江流域，随着人民生活水平的提高，居民对集中供暖（制冷）的需求越来越强烈，武汉、南京等一些地区已经率先开始集中供暖（制冷）探索和实践。微观层面上，新星公司的地热供暖项目建设已突破北方供暖范围，由单一供热利用逐步向长江、珠江、海南岛等区域供暖（制冷）扩展，“地热+”综合应用在探索。

三是从技术经济性上，地热具有本土能源的特点，能源稳定性、可靠性、可持续性较好；具有分布式能源的特点，规模可大可小，灵活易用，地面管网开挖少，对市容环境影响小；还具有建设投资大，运行成本低的特点。总体看，地热能供暖的经济和社会综合效益优良，具有十分广阔的发展前景。

从挑战方面看，一是由于在可再生能源当中，地热能发展晚、总量小，一些地方政府和社会对于地热能作为可再生能源的地位和推进清洁能源供暖的方式还没有足够深入的了解和认识。前一阶段，在推进清洁供暖工作中，国家和地方对推进煤改电、煤改气投入巨大财政补贴。与此同时，地热供暖还没有得到系统而明确的政策支持，对同属清洁能源的地热供暖产生了明显的挤出效应。

二是部分地热供暖企业社会责任感有待提高。规范的采水与回灌平衡的地热能开发利用是清洁、可持续的能源利用方式。但是，部分企业社会责任感不高，回灌技术和要求不达标，影响了社会各界和部分地方政府对于开发地热能的的态度。

三是地热资源底数不清。目前，缺乏最新的

全国性地热资源详细勘查数据和公开使用渠道，开发地热供暖项目缺乏清晰的经济回报预期，不利于社会资本大规模进入。

期待科学监管，营造良好的地热供暖发展环境

一、明确各地地热能供暖（制冷）工作主管部门及各部门职责分工，采取一站式管理，避免出现缺位管理、多头管理、重复管理的现象。建立国家地热数据信息统计系统，准确掌握全国地热能开发利用实际情况，便于更加精准地制定地热能发展政策。

二、在统一政策支持下，清洁能源之间充分竞争，营造公平的发展环境。建立地热企业回灌信用体系，保证地热能开发“取热不取水”、不污染水资源，有效保障地热能的清洁开发和永续利用，建立公平竞争的市场开发机制。同时，在清洁取暖的多条技术路线上，对具备回灌能力、开发企业信誉良好的地热能供暖项目给予补贴支持，明确地热能供暖可享受城镇供暖设施配套费，让地热供暖企业与煤改电、煤电气等开发企业同台公平竞争。

三、对于进行完全回灌的地热供暖企业免除资源税。《中华人民共和国资源税法》将于2020年9月1日施行，明确将地热纳入能源矿产类别税目，税率为从价计征1%~20%或者从量计征每立方1~30元。以河北雄县具有代表性的地热供暖项目为例，水资源税缴费标准2元/吨，暖费收取标准16元/平方米，经过测算，资源税将导致供暖成本增加4.3元/平方米。目前严格落实回灌工程投入的地热供暖企业多数处于微利或盈亏平衡状态，任何微小的成本变化都会影响地热供暖发展。“采灌均衡、间接换热”或“井下换热”技术供暖实际开发的是可再生的地热能源，而非不可再生的地热资源，建议对于回灌企业免除征收水资源税。（摘自：能源研究俱乐部）



全国地热、温泉与矿泉水 产业创新发展高峰论坛 在济南成功召开

**THE NATIONAL FORUM ON
INNOVATION AND DEVELOPMENT
OF GEOTHERMAL, HOT SPRING AND
MINERAL WATER INDUSTRY WAS
SUCCESSFULLY HELD IN JINAN**

日前，由中国地热与温泉产业技术创新战略联盟、中国矿泉水资源利用协同创新平台联合主办的全国地热、温泉与矿泉水产业创新发

展高峰论坛在泉城济南隆重召开。此次会议以“推进地热、温泉与矿泉水产业开发利用、探索产业可持续发展”为主题，邀请100余位国



内外地热、温泉与矿泉水行业专家学者等各界精英，共同研讨、分享、绘制产业新蓝图。中国产学研合作促进会常务副会长兼秘书长王建华、中国工程院院士曹耀峰、中国科学院院士刘嘉麒、中国工程院院士武强、北京公众健康饮用水研究所所长、水营养学专家、省自然资源厅一级巡视员王桂鹏等领导专家出席论坛，恒有源集

团董事长薛江云应邀参会，《中国地热能》杂志作为支持媒体参会。

会议伊始，国务院资深参事、中国工程勘察大师、住建部科技委顾问兼部建设环境工程技术中心主任王秉忱以视频的形式致开幕词。王秉忱参事表示，地热、温泉、矿泉水领域的院士、专家、企业家齐聚在泉城济南共商产业创新发展大计，特别介绍他们的宝贵研究成果，丰富的经验体会，交流探讨，互相启发。不少企业家不仅是生产厂商，还进行了多年的实验研究，取得了丰硕成果。王秉忱参事对本次论坛的成功举办寄予厚望，他强调，到会的院士、专家和企业的报告肯定是精彩纷呈！期望与会的各位代表能取得更多收获，获得新思路，找到新方向，结交新朋友，为进一步创新发展地热温泉与矿泉水产业奠定良好的基础，取得更加辉煌的成就！

中国产学研合作促进会常务副会长兼秘书长王建华、中国地热与温泉产业技术创新战略联盟理事长刘玉强、山东省自然资源厅副厅长李克强分别致开幕式，对推进地热、温泉和矿泉水综合利用的积极作用给予肯定，对未来的发展提出了建议和期许。随后，曹耀峰院士、刘嘉麒院士、武强院士、侯立安院士、沈梦培参事等领导专家分别发表了主题演讲，对我国地热能行业的发展提出了发展方向和指导意见。

会议期间，与会者结合会议内容及展示的新技术共同探讨地热、温泉及矿泉水行业现状及未来发展趋势，并对地热资源综合利用项目进行了实地考察。（陈思）



保供暖 度寒冬——

恒有源集团为 300 万平方米供暖运维项目 保驾护航

KEEP THE HEATING IN WINTER—— Ever Source Group escorts the 3 million square meters heating operation and maintenance project

根据北京市10月27日召开的2020-2021年冬季供热暨扫雪铲冰工作动员部署会，今冬供暖“时间表”基本确定：11月7日起，全市统一启动试供暖；11月15日供暖室温达标。

对于即将到来的冬季，供暖保障的重要性和紧迫性都不容忽视。恒有源集团作为浅层地热能开发利用的引领者和行业内的重点企业，形成了科研开发 - 地能采集 - 系统设计 - 装备制造 - 工程安

装 - 运维保障 - 公共服务的全产业链体系为客户服务，目前已在国内成熟应用项目面积2000万平方米。同时，恒有源集团也承担着300万平方米项目的供暖和运维任务。

入秋以来，常有大风降温天气出现。在冬季，作为民众“生命线”的保暖供热任务就显得尤为重要。面对新冠肺炎疫情影响的特殊形势和“十三五”收官、决胜全面建成小康社会的关键时期，恒有源的

全国工商联大楼采用恒有源集团地能热泵环境系统
为建筑物供暖



事业联系着企业的生产与民生的保障，因此，恒有源集团的供暖工作责任重大。

为了保证今冬明春的供暖工作，依照往年惯例，恒有源集团已于10月22-23日提前完成了300万平方米供暖运维项目的巡检工作。

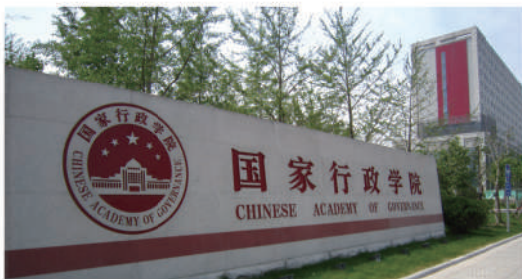
集团安排主要领导带队，协同运营、维修等部门，划片分组的对集团供暖运维项目进行巡查、检修，明确安全责任落实，全力排查安全隐患，全方位检查项目内的供热机组、设备健康状况，确保项目可随时开启运行。



恒有源集团机房值守员工对设备进行检修

同时，巡检队伍对集中供暖项目建筑内部管道进行检查，确保无漏水点。入户为“煤改电”等分户式清洁自采暖项目进行管道、滤网检修，并为用户科普供暖注意事项。

同时，集团已完成对国家行政学院港澳培训中心，全国工商联、“煤改电”项目等重点项目的专职维修值守员工的岗前培训，完善了管理制度，明确了管理职责。



恒有源集团国家行政学院项目机房值守员工正在为设备进行检修、调试

11月7日起，恒有源集团运维项目已逐步开启供暖试运行，11月15日，集团运维项目均已开机供暖。



北京市海淀区区委书记于军考察恒有源集团佟家坟清洁自采暖项目

恒有源集团在保证供暖的同时，结合集团“客户服务维修三步走”的供暖保障制度，以24小时值班的综合服务中心为服务核心，完成“五个保证”方案：保证客服、维修热线24小时畅通，保证维修人员第一时间到达项目现场，保证客服、维修人员体温正常，保证维修人员严格遵守各地方防疫制度、保证项目现场秩序。恒有源集团将不断提升业务能力，保证第一时间解决用户的用热问题，全力保障客户在舒适的温度环境中度过一个温暖的冬天，为供暖保驾护航。

(陈思)

共创共享 协同发展——

中节能建筑节能有限公司一行
访问恒有源科技发展集团有限公司

**CREATE TOGETHER AND DEVELOP
TOGETHER——**

**CECEP Building Energy Conservation
CO., Ltd. visited Ever Source Science and
Technology Development Group Co. Ltd.**



10月27日，中节能建筑节能有限公司（简称建筑节能公司）工程总监杨宝锐一行到访恒有源科技发展集团有限公司（简称恒有源集团），受到了中国地能董事局联席主席王彦、恒有源集团董事长薛江云、总裁王满全等领导的热情接待。双方就“共创共享、协同发展”的发展目标和供暖领域合作进行了深入交流。

薛江云董事长对杨宝锐总监一行到访恒有源集团表示热烈欢迎。在集团副总裁何天悦为各位来宾详细讲解了恒有源集团的发展历程、业务布局和核心技术后，薛江云董事长在座谈

会上表达了进一步结合恒有源集团发展战略、依托核心技术与中节能集团兄弟企业（建筑节能公司）形成业务综合体的意愿，并期待双方在浅层地能市场拓展和共同发展区域能源解决方案上的合作。

杨宝锐总监对恒有源集团的热情接待表示感谢，他表示，将在区域综合供能等业务上与恒有源集团精诚合作，共同发展。随后，双方就技术、项目等方面问题进行了深入的交流和探讨。

（陈思）



恒有源集团与中环寰慧集团 在京签署战略合作协议

EVER SOURCE GROUP AND ZHONG HUAN HUAN HUI GROUP SIGNED THE STRATEGIC COOPERATION AGREEMENT IN BEIJING

11月19日,恒有源科技发展集团有限公司(简称恒有源集团)与中环寰慧科技集团有限公司(简称中环寰慧集团)在北京举行了战略合作签约仪式。



在签约仪式之前,恒有源集团董事长薛江云与中环寰慧集团党委书记、董事长吴立群就供热市场开发、供热平台商业化建设、城市清洁能源应用及关联项目建设运营等领域的合作进行了深入交流,本着“互惠互利,合作共赢”的目标,双方建立了稳定合作伙伴关系。

中环寰慧集团是专注于利用余热及清洁能源进行城市集中供热的投资、运营服务商,是目前我国跨省份、跨区域进行集中供热投资运营的行业龙头企业。中环寰慧集团始终坚持清洁化、精细化、智能化的城市集中供热发展方向,目前已在河北、河南、陕西、甘肃、宁夏、山东、山西、安徽、西藏、江苏等省(市)获得近30个城市的供热特许经营权,集团总资产近100亿元,已覆盖供热面积近3亿平方米。

中国地热能产业发展集团有限公司董事局联席主席王彦,中环寰慧集团副总裁、西藏寰慧能源发展有限公司董事长张传恩,北京中环国投环保技术研究院院长刘景等领导出席了签约仪式。

(编辑部整理)

恒有源集团参加第23届北京科博会

EVER SOURCE GROUP PARTICIPATED IN THE 23RD BEIJING INTERNATIONAL HIGH-TECH EXPO



第23届科博会：“科技范”能源行业引围观

由科技部、国家知识产权局、中国贸促会和北京市人民政府共同主办、北京市贸促会承办的第23届中国北京国际科技产业博览会（以下简称“科博会”）于9月17日至20日首次与中关村论坛融合举办。本届科博会以建设具有全球影响力的科技创新中心为引领，结合中关

村论坛高端热点议题与全球抗击新冠肺炎疫情需求，推动抗疫科技协同创新，并聚焦关键核心技术和原始创新，对优质资源进行整合，打造科技领域的国际交流合作平台。作为新能源行业企业，恒有源科技发展集团有限公司也在科博会精彩亮相。

作为2020中关村论坛的展览板块，本届科博会与中关村论坛共同聚焦“合作创新 共迎挑战”主题，紧贴国家战略和经济社会发展的紧迫需求，集结高精尖技术成果和产业集群，推介一批优质项目加速成果转化，探讨新时代新经济发展的大机遇，助力全国科技创新中心建设。

恒有源集团科博会引人瞩目

产学研结合、跨界协同、科技与产业深度融合带来经济发展新突破，正在形成科技新生态。科技与冬奥、文化、金融等相关产业融合、创新成果，助力新经济、新业态、新模式成长的，在本届科博会上得以集中展示。科博会开幕式当天，中央政治局委员、北京市委书记蔡奇视察首科院——工发组织联合展区，市委副书记、市长陈吉宁，市人大常

委会主任李伟，市政协主席吉林等领导陪同。首都科技发展战略研究院院长、联合国工业发展组织绿色产业平台中国办公室主任关成华教授介绍了联合展区在人工智能、物联网、智慧城市、节能环保等前沿科技领域的创新成果。

首都科技发展战略研究院携联合国工业发展组织共同亮相第23届科博会，联合展区展示了众多人工智能、物联网、智慧城市、节能环保等前沿科技领域“高精尖”企业、产业园区和前沿科技创新成果，恒有源科技发展集团就是代表展商之一。此次科博会，恒有源集团精心布置展台，通过浅层地热能供暖设备实地技术演示及集团“煤改电”宣传纪录片展示了集团最新的技术、产品和应用。集团主要领导参加展会，在现场对集团产品进行讲解，并对客户提出的问题进行详细的解答。

密集登场的前沿技术和产品，向观众全景展示了首都全国科创中心建设成果。恒有源集团科博会展台负责人介绍，在京港两地一体化管理模式下，恒有源集团始终专注于利用浅层地热能作

为建筑物供暖替代能源的科研与应用推广，实现了原创浅层地热能采集换热技术的产业化发展，其与热泵技术产品相结合，让低品位的浅层地热能（低于25度）成为建筑物供暖的替代能源，在北方供暖地区原来传统燃烧、单一供暖行业的基础上，供暖和制冷两个行业融合而成新时期地热能热冷一体化新兴产业，在五个产业板块（规划与设计、可再生浅层地热能供给、智能制造、工程与建设、运行与维护）支撑下走出了一条无燃烧、零排放的为北方建筑物清洁、智慧供暖，治理雾霾的新路子。

他表示，可再生浅层地热能供暖的第三次能源革命，指出了减少燃烧与排放，是提高百姓生活品质，是有效解决一次能源燃烧供暖造成的雾霾的正确途径，希望浅层地热能供暖制冷能够被越来越多的利用，更期待这项技术能够为国家出力，有机会服务京津冀协同发展、长江大保护、黄河大保护、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展等国家战略，携手各界共同保护碧水蓝天。

(马晓芳)



国家能源局关于 “加快推进地热能产业发展的建议”的答复

REPLY FROM THE NATIONAL ENERGY ADMINISTRATION TO THE PROPOSAL ON ACCELERATING THE DEVELOPMENT OF THE GEOTHERMAL ENERGY INDUSTRY

目录项的基本信息

公开事项名称：对十三届全国人大三次会议第5046号建议的答复

索引号：000019705/2020-00083

主办单位：国家能源局

制发日期：2020-09-09

您提出的关于加快推进地热能产业发展的建议收悉，现答复如下：

地热能是一种绿色低碳、可循环利用的可再生能源，具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点。我国地热资源丰富，市场潜力巨大，发展前景广阔。开发利用地热能不仅对调整能源结构、节能减排、改善环境具有重要意义，而且对培育新兴产业、促进新型城镇化建设、增加就业均具有显著的拉动效应，是促进生态文明建设的重要举措。

关于从国家层面重视地热能开发利用的建议。国家一直高度重视地热能开发利用，尤其是地热能供暖。近年来我局配合国家发展改革委、住房和城乡建设部等有关单位印发了《关于印发北方地区冬季清洁取暖规划（2017-2021年）的通知》（发改能源〔2017〕2100号）、《关于

推进北方采暖地区城镇清洁供暖的指导意见》（建城〔2017〕196号）、《关于加快浅层地热能开发利用促进北方采暖地区燃煤减量替代的通知》（发改环资〔2017〕2278号）等文件，从国家政策层面对地热能供暖进行规划，提出因地制宜将地热作为集中或分散供暖热源，推进北方采暖地区居民供热等领域燃煤减量替代，提高区域供热能源利用效率和清洁化水平。近期我局正在研究起草《关于因地制宜做好可再生能源供暖工作的通知》，拟进一步指导地方根据当地资源禀赋和用能需求，科学统筹规划，推广地热能供暖等各类可再生能源供暖技术。

关于研究制定支持地热能产业发展相关政策的建议。财政方面，目前国家正在开展北方地区冬季清洁取暖试点工作，地方可根据实际情况，在开展北方地区冬季清洁取暖工作中统筹利

用中央支持渠道，对地热能资源开发利用项目予以支持。税收方面，企业从事《公共基础设施项目企业所得税优惠目录》（其中包括地热能供暖新建项目）规定的国家重点扶持的电力公共基础设施项目，自项目取得第一笔生产经营收入所属纳税年度起，其投资经营所得第一年至第三年免征企业所得税，第四年至第六年减半征收企业所得税，符合条件的地热能项目可按规定享受上述税收政策。金融方面，国家积极引导金融机构支持地热能等清洁能源产业发展，并鼓励地热能等清洁能源企业发行绿色债券融资，近期中国人民银行会同相关部委起草了《关于印发〈绿色债券支持项目目录（2020年版）〉的通知》（征求意见

稿），地热能开发利用装备制造、地热能利用设施建设和运营、地热能供暖制冷等分布式能源工程建设和运营地热能等可再生资源及其他绿色资源勘查服务等均在目录中。下一步，我们将会同或配合有关部委继续落实好现行政策，不断完善地热能产业发展支持政策体系，指导地方在财政贴息、税费减免、融资优先及建设用地等方面研究出台可操作性强的可再生能源供暖支持政策。

感谢您对国家能源工作的关心和理解，希望今后能得到您更多的支持和指导。

国家能源局

2020年9月9日

（摘自：国家能源局）

山西将开展地热能集中供热项目试点

SHANXI PROVINCE WILL DEVELOP THE PILOT PROJECT OF GEOTHERMAL ENERGY CENTRAL HEATING

山西省住建厅近日发布消息，山西省将以山西综改示范区潇河产业园区和科技创新城为核心，率先开展地热能集中供热项目试点，应用自主研发具有国际国内领先水平的地热综合利用专利技术，实现清洁地热集中供热。

地热能供热是一种绿色低碳、清洁高效的供热方式，与传统热电联供、燃煤、燃气锅炉供热相比，运行费用低、维护简单、无排放，对改善大气环境质量，持续优化能源结构，引领能源转型具有重要意义，是山西省能源革命综合改革试点工作的一项重要内容。

省住建厅要求，各市应将地热能供热项目建设

列为发展可再生能源的重要任务和城镇基础设施建设的有机组成部分，结合本行政区域地热资源、清洁取暖规划和地热能供热发展规划，科学合理布局地热能供热项目。同时，优先在热电联产覆盖不到的区域或具备条件的公共建筑、绿色建筑中，推广地热能供热技术应用，有序推进新建建筑地热能分布式供热，逐步提升地热能建筑供热中的应用比例，加快推动地热能供热系统与城市热网融合。积极发展再生水源热泵（含污水、工业废水等）、地源（土壤源）热泵集中供热项目的开发建设，在城市污水厂或污水管道周边，优先实施污水源热泵供热。

（摘自：山西省住建厅）

黑龙江省地热能供暖系统技术规程 10月起实施

THE TECHNICAL SPECIFICATION FOR GEOTHERMAL HEATING SYSTEM IN HEILONGJIANG PROVINCE HAS BEEN IMPLEMENTED SINCE OCTOBER

近日，黑龙江省住建厅出台地方标准《黑龙江省地热能供暖系统技术规程》，该标准是我国首部涵盖水热型地热能、岩土体地热能供暖系统的技术规程，并于2020年10月1日起实施。

黑龙江省在“十二五”期间积极开展地热能供暖试点项目建设，取得了显著成效，但也发现一些地下水源热泵项目尾水不能有效回灌、部分浅层土壤源热泵项目地下水温度持续下降等问题。为促进地热能供暖系统“取热不取水”，确保地热资源保护性开发利用，省住建厅组织相关单位编制了该标准。

该标准由哈尔滨工业大学牵头编制制定，编制组借鉴国内外相关技术标准、工程案例，吸纳了大量国内外有关地热能供暖技术的最新研究成果，并针对黑龙江省气候、地质条件实

际编制。

该标准规定了以中深层和浅层埋管地热能供暖系统为主的适宜形式，对既有地热水供暖系统的改造给出相关要求和技術。为方便各阶段的工程设计，该标准提供了多样的设计计算方法和概算指标。在资源保护和合理开发利用方面，强化了地热能采集系统、运行监测与管理的具体要求。

该标准的发布将作为黑龙江省地热能供暖系统工程勘察、设计、施工、验收及运行管理的依据。促进地热能供暖系统在降低供暖能耗的同时，形成良好的社会效益，同时也将促进可再生能源生产、设备制造、合同能源管理等相关行业的良性发展。

（摘自：哈尔滨日报）

河南省计划 2020 年年底完成 1400 万平方米地热能供暖任务

HENAN PROVINCE PLANS TO COMPLETE 14 MILLION SQUARE METERS OF GEOTHERMAL ENERGY HEATING BY THE END OF 2020

近日，河南省印发《河南省 2020-2021 年秋冬季大气污染防治攻坚行动方案》，要求推进清洁取暖散煤替代，加快“双替代”改造。

方案指出，根据能源供应实际和群众承受能力，坚持“以气定改、以供定需，先立后破”的原则，宜电则电、宜气则气，合理选择煤改气、煤改电、地热等适宜的供暖方式，2020 年 11 月 15 日前，全省完成“双替代”供暖 100 万户，2020 年年底完成 1400 万平方米地热能供暖任务。全省基本完成平原地区生活和冬季取暖散煤替代，基本建成无散煤区。

采暖季前，河南省发展改革委牵头组织开展“双

替代”供暖“回头看”，对各地“双替代”推进落实情况进行了排查摸底，重点掌握设备是否安装到位、财政补贴是否落实、电力热力是否得到保障等，查漏补缺，固强补弱，确保按时保质完成任务。做好气源电源供应保障，加快配套电网和天然气管网建设，确保按时通电通气。严格落实采暖季独立采暖气价、阶梯电价、居民峰谷电价、电能替代“打包交易”等政策，督促电网、燃气企业优惠收费信息管理，引导群众积极使用“双替代”设备。健全完善兜底政策措施，减轻建档立卡贫困户、特困人员等困难群体负担，确保让群众用得上、用得起、用得好。

(摘自：中国清洁供热平台)



ICELAND PROMOTES THE USE OF GEOTHERMAL ENERGY FOR HEATING IN 92% OF HOUSEHOLDS

在欧洲最西北角的大洋深处，有一个建立在海岛之上的国家——冰岛。这个四面环海的北欧岛国，总人口仅为 34 万人，极高的纬度使国土面积的 1/8 都被巨大的冰川覆盖。

虽然以冰为特色，但在冰岛依然到处可感受到火般的“温暖”：全岛分布着大大小小的火山与温泉，地下也蕴藏着丰富的地热，是名副其实的“冰火之岛”。

2016 年，冰岛约 85% 的一次能源使用来自本地可再生能源。其中，地热能约占一次能源的 65%，水电占 20%，地热利用率为全球最高。

在 20 世纪的发展进程中，冰岛从欧洲最贫穷的国家之一转变为高生活水平的国家。在这几

十年中，冰岛从最初依靠泥炭和进口煤炭获取能源，到逐渐取“热”于地下，将地热能变成了驱动国家不断前行的动力，成为欧洲使用清洁能源占比最高的国家。

地热为 90% 家庭提供采暖并贡献 27% 电力

冰岛是世界上最具活力的火山地区之一。这里横跨大西洋中脊，分散的构造板块活动使热量和岩浆更接近地球表面，因此岛内地热资源丰富，温泉广布。

虽地处北极圈附近，但冰岛冬季却并非想象中那么冷，在冰岛首都雷克雅未克，全国近 2/3 人口居住于此，平均冬季温度约在 2℃ 左右，夏

季气温也在 7℃—12℃ 之间。然而由于以前传统化石能源资源均需依赖进口，如果没有地热，当地人也许根本无法度过寒冷、黑暗、潮湿的冬季。

在冰岛，地热能的主要用途是供热，热量通过分布广泛的区域供热管网进行输配。和很多欧洲国家类似，冰岛的区域供热系统并没有固定的供暖期限，如果有需要，一年四季都可有“暖”可供，也可随时提供生活热水。冰岛国家能源局的数据显示，采暖约占冰岛地热直接利用的 77%，冰岛有约 90% 的家庭在使用地热能供暖。根据规划，未来将实现 100% 地热供暖。

据了解，仅地热供暖每年就可为冰岛节省约 1000 亿冰岛克朗（约合 50 亿元人民币）的能源进口费用。

发电是地热能利用的另外一种主要方式。有数据显示，2015 年，冰岛的总用电量为 18798GWh，其中约 27% 来自地热能发电，73% 来自水力发电，即可再生能源提供了近 100% 的电力生产。冰岛是世界上人均最大的电力生产国，人均每年电力产量约 5.5 万 kWh。相比之下，欧盟平均水平不到 6000kWh。

由于丰富的地热和水力资源，冰岛的发电成本相对低，较低的电价带动了铝冶炼等能源密集型产业的扩张，也吸引了国外公司将数据中心落户冰岛，推动了当地经济的发展。

此外，地热资源还用于温泉和游泳池，温室种植、渔业养殖、街道融雪等。

政府力推地热 升级成能源转型主力

冰岛对当地可再生能源利用的探索，从化石能源到可再生能源的过渡也经历了漫长过程。

最早利用地热能作为房屋供暖的历史可以追溯到 1908 年，当时雷克雅未克的一个农民率先将温泉水通过管道引入自家进行房屋供暖。之后市政府在此基础上，对地热资源进行了更系统的勘

探。通过借鉴石油工业的钻探技术使钻探更深，从而获得更多的热水，为更多房屋供暖。1930 年，雷克雅未克修建了一条 3 公里长的供暖管道；1943 年，一条 18 公里的供热管道投入使用；到 1945 年底，供热管网已连接 2850 所房屋。

1973 年和 1979 年的石油危机致使冰岛改变了能源政策，减少了进口能源的依赖，转向发展国内能源，尤其是地热和水力发电。这种能源转型，使化石能源消费比重迅速下降，并逐步退出电力和供热领域。

从地热田到城镇，传输管道往往长达数十公里，大量供暖基础设施建设成本较高。为筹措更多的资金发展地热供暖，冰岛政府集中力量组织私人 and 公共机构，最终发展成为如今的雷克雅未克能源公司。如今，首都雷克雅未克拥有世界上最大、最复杂的地热集中供热系统。

比建设供热管网花费更大、更具风险的，是地热井的开采。为了鼓励企业进行地热开发，1960 年代后期，冰岛政府将前电力基金和地热基金合并，成立了能源基金，以进一步促进该国地热资源的开发。在过去的几十年中，该基金已向地热勘探和钻探公司提供了大量贷款。如果钻探未能产生预期成效，贷款则可转换为赠款。

这种“政府买单”式举措一定程度上降低了企业顾虑，从而加快了地热开发过程。政府“力挺”之下，冰岛地热开采规模不断扩大，相应的地热供暖价格也逐步在降低。

规范管理与科学研究 确保可持续发展

冰岛的地热开发路线以水热型地热井为主，即将深层地下水抽取上来以利用其中的热量。对地热的利用，其中一个重要的技术要求是地热水的同层回灌。

不同于浅表水体，其水位下降可通过降雨等形式补给，但深层地下水在抽取之后，很难完成自

然补给。为了维持地热水的可持续使用，需要保证地热井水位维持在相对稳定的水平，因此抽取出的水和补进来的水量要一致。这样不仅能保证地热井使用的高效性和经济性，也防止地下水水位下降可能造成的岩层水体空缺、对地质的破坏，以及海水侵入地下水岩层，造成地下水污染等。

值得关注的是，冰岛的土地分为私人土地和公共土地，如何保证私人土地的地热开发规范有序？

为此，冰岛制定了完整而严格的法律体系，最为重要的两部法律是《土地资源勘察和利用法》和《电力法》。基于这两项法律，尽管土地所有权决定了资源所有权，但地热资源的开发利用依然需要工业能源和旅游部的许可。

此外，冰岛还先后出台了一系列相关法律，包括《自然保护法》《环境影响评估法》及《能源法》等。重要的项目工程需按照《环境影响评估法》接受评估。如规定地热开采量超过 25MW 的项目必须提交详细的环境影响评估报告。

特别在同层回灌监管等方面，冰岛国家能源局专门负责监测矿产勘探或开采区经营公司的合规性。如果许可证持有者有违规行为，冰岛国家能源

局将发出书面警告并提供纠正期限，甚至将给予吊销许可证的惩罚。

除了遵守严格的政策框架，为了保证地热开采可持续，冰岛公司探索深层地热能的开发技术时，还往往在前期花费大量时间进行详细勘探和分析研究。

2000 年，冰岛三家能源公司和冰岛国家能源局共同发起“冰岛深度钻孔计划（IDDP）”，旨在探索利用超临界地热流体是否可以改善地热田发电的经济性。包括在 Hengill 地区钻探 35 口高温生产井、15 口回灌井。钻井深度超过 5000 米，是常规中深层地热井的两倍左右。

该计划与 2001 年成立国际咨询小组进行工程规划，2003 年完成了地球科学研究选址、评估。在长达两年的谨慎研究之后，项目才开始实施，并最终取得了成功，即建设的地热发电厂，单井发电规模可达 5 万千瓦，是目前普通地热井发电能力的约 10 倍。

总结经验来看，一是政府给予了资金方面的大力支持；二是科技研发在地热开采过程中起到了十分重要的作用。

（摘自：中国能源报）



恒有源科技发展集团 贵州地区清洁供暖项目汇编：

COMPILATION OF CLEAN HEATING PROJECTS OF EVER SOURCE SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP CO., LTD. IN GUIZHOU PROVINCE

一、凯里市云谷田园生态农业观光 公园无燃烧智慧供暖冷项目

云谷田园项目是凯里市首家国家 4A 级旅游景区。位于贵州省黔东南州素有“歌舞之乡”的凯里市舟溪镇。项目是集生产、科研、科普、展示、休闲、观光为一体的全农业旅游综合体，共包含汤泉会馆、滨河商业街、水上乐园三部分，总建筑面积约为 45333.62 m²。其中汤泉会馆建筑面积 12433.62 m²，滨河商业街 6300 m²，水上乐园建筑面积约 26600 m²。

先进供热技术为云谷田园项目供暖保驾护航

云谷田园是贵州省人民政府确定的“2012 年农业产业园区建设项目”，也是贵州省黔东南州“台

湾农业科技示范园”。项目地处的黔东南州山区，能源供应比较受限，如何在利用当地温泉资源的同时，满足项目供暖需求成为了项目建设时的难





题。恒有源科技发展集团有限公司独创的单井循环换热地能采集技术无燃烧、零排放的清洁、智慧供暖引起了项目方的关注，并最终应用于这个象征着绿色、健康的生态农业观光公园。

项目采用恒有源集团的单井循环换热地热能热泵环境系统，优先对深层高温地热废水余热进行回收利用；其次利用恒有源集团独创的单井循环换热地能采集技术提取浅层地热能作为供暖的有力补充，打造综合无燃烧智慧能源系统，满足项目冬季供暖、夏季制冷、全年洗浴热水及水体加热维温的全部冷热量需求，实现项目无燃烧、无排放供暖冷运行。目前，项目一号机房已经完工，满足汤泉会馆冬季供暖、夏季制冷、温泉加热水箱热源和生活热水的需求，已稳定运行两年。项目二号机房满足水上乐园冬季供暖、夏季制冷、洗浴热水及水体加热的需求，将在日后完全投入使用。

“节能”又“省钱”，运行费用最低

高温废水具有很大的再利用价值，结合热泵系统对高温地热废水余热进行热量回收利用，充分挖

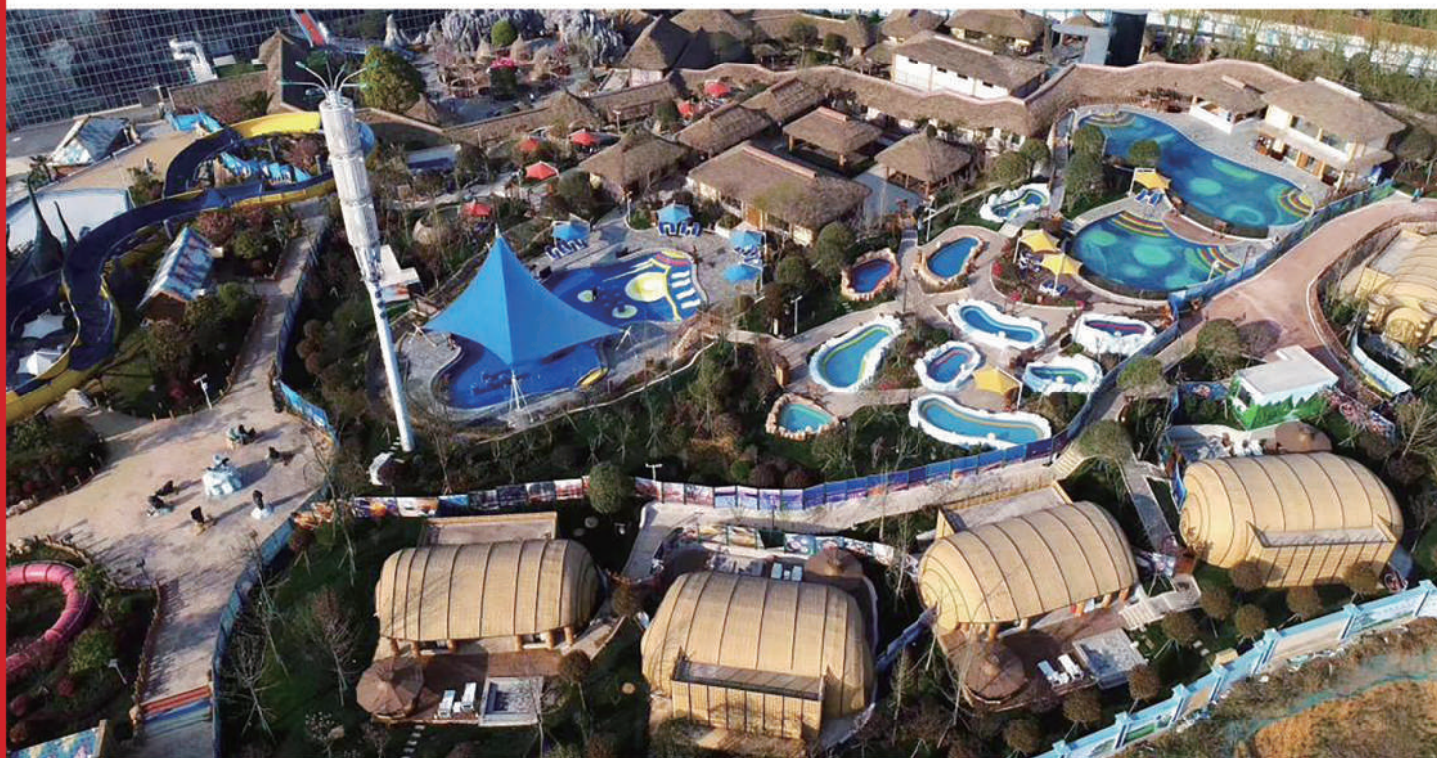
掘了废水中的低品位能量，相当于减少3口地能采集井，降低了地源热泵系统地能采集部分的初始投资，具有非常好的经济效益和环境效益。

基于地能热泵的无燃烧智慧能源系统，应用单井循环换热地能采集技术利用浅层地热能作为建筑物供暖，浅层地热能成为建筑物供暖的替代能源。系统浅层地热能占建筑物供暖总能耗的60%以上。与电锅炉和电制冷系统相比，无燃烧智慧能源系统真正做到了节能、省钱。电价按照0.5元/kWh计算，无燃烧智慧能源系统冬季供暖、夏季制冷、全年温泉泡池加热及生活热水供应总成本较电锅炉和电制冷的常规能源方式每年节省运行费用312.82万元。

项目如采用电锅炉和电制冷的常规能源方式，初投资费用约为220.5万元，每年的能源费用约为414.67万元；采用无燃烧智慧能源系统后，初投资约为460.8万元，全年的总运行费用为101.85万元，每年节约运行费用312.82万元，大大缩短了项目的投资回收期。

经过数据统计，与直热式电供暖设备相比，无燃烧智慧能源系统冬季供暖、夏季制冷、热水供应每年可节省电量625.6万度，直接替代电厂电煤2091吨，减少排放二氧化碳4861吨、二氧化硫2.6吨、氮氧化物2.4吨、烟尘536千克。





二、四季贵州山地旅游项目无燃烧智慧供暖冷项目

四季贵州山地旅游项目是贵州省的省级重点项目。项目位于贵州省贵阳市。项目建筑总面积39373.63m²，包含温泉接待中心12834.44 m²，酒店10039.19 m²，欢乐世界16500 m²。

因地制宜采用独创技术为项目供暖保驾护航

为了响应国家节能减排的号召，加强生态文明建设，首选浅层地热能作为建筑物供暖（冷）替代能源，并结合项目温泉尾水余热利用，项目建设采用恒有源集团独创的单井循环换热地能采

集技术，以地能热泵环境系统为主，辅助常规能源系统调峰的复合能源系统，满足整个项目的冷热需求。根据项目建筑物的整体分布情况及冷热需求，方案设置一个集中冷热源机房满足建筑冬季供暖、夏季制冷、全年洗浴热水及水体加热、洗衣房等用蒸汽的需求。同时，根据项目特殊要求，设计不同的能量释放系统应用于不同季节。尤其是根据欢乐世界高大空间的特点设计采用热回收式全空气系统，局部地面辅助采用地板采暖系统为项目供暖保驾护航。

合理利用资源，节能又省钱

高温废水具有很大的再利用价值，项目将高温温泉尾水作为低温热源，不足部分采用浅层地热能补充，充分挖掘了尾水中的低品位能量，降低了项目系统的初始投资，节省了电能等能源的消耗，具有非常好的经济效益和环境效益。

与室内循环空调系统相比，恒有源地能热泵环境系统增设新风系统和热回收功能，在改善了室内的空气质量的同时降低了系统的能耗，达到了一箭双雕的目的。恒有源地能热泵环境系统的



冷热源机房结合室内空调系统运行时，在夏季还可以制备免费的热水满足室内水系统的加热和人员洗浴，进一步降低整个项目的运行费用。

经过数据统计，与燃气锅炉+电制冷系统相比，恒有源集团地能热泵环境系统冬季供暖、夏季制冷、热水供应每年可节省电量 613 万度，直接替代电厂电煤 2049 吨，减少排放二氧化碳 4763 吨、二氧化硫 2.6 吨、氮氧化物 2.4 吨、烟尘 525 千克。



敬告读者

TO INFORM THE READER

《中国地热能》是由中国地热能出版社主办，北京节能环保促进会浅层地（热）能开发利用专业委员会协办的科技期刊，于香港公开发刊，双语季刊。我们的办刊宗旨是为政府制定能源政策提供参考建议；为地能开发企业提供宣传平台；为设计者、大众提供交流空间；推广浅层地热能利用经验，展示应用实例。

我们始终不忘读者的期待，用心用力办好期刊。毫无疑问，优化空气、节能减排、治理雾霾是当前摆在全体中国人民面前一个重大课题，我们期望《中国地热能》这本小小的期刊能够为攻克这一难题贡献微薄之力。

立足长远，着眼当前，在继承中创新，在变革中发展。自创刊以来，期刊一直得到了业内专家学者和广大读者的热情支持，在此致以我们的衷心感谢。大家的关注是我们的追求，大家的支持是我们的动力。让我们携手共进，共同打造《中国地热能》的美好明天。

《中国地热能》编辑部

投稿及广告联系人：陈思

电话：010-62599774

邮箱：journal@cgsenergy.com.hk

中國地熱能
CHINA GEOTHERMAL ENERGY

中國地熱能

CHINA GEOTHERMAL

六年风雨兼程 六载始终如一
勇于开拓奋进 促地热能腾飞

中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第2期 总第11期



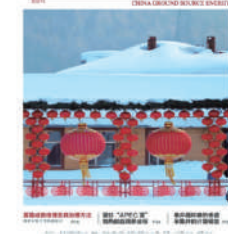
中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第3期 总第12期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第4期 总第13期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第5.6期 总第14.15期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第7期 总第16期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第8期 总第17期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第9期 总第18期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第10期 总第19期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第11/12期 总第20.21期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第13期 总第22期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第14期 总第23期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第15期 总第24期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第16/17期 总第25.26期



ISSN 2309-943-7
2020年3月 第30期 季刊
中國地熱能
CHINA GEOTHERMAL ENERGY



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第18期 总第28期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第19期 总第29期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第20期 总第30期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第21期 总第31期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第22期 总第32期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第23期 总第33期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第24期 总第34期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第25期 总第35期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第26期 总第36期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第27期 总第37期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第28期 总第38期



中國地熱能 CHINA GEOTHERMAL ENERGY 2014年4月 第29期 总第39期



为推广地能热冷一体化新兴产业的发展，恒有源科技发展集团有限公司与四川长虹空调有限公司合资成立了宏源地能热宝技术有限公司。公司以智慧供热市场为导向，专注于地能热冷机各类产品的开发和各种形式的地能热宝系统的产品集成，推广地能无燃烧方式为建筑物智慧供热，满足人们舒适稳定的生活环境需求。



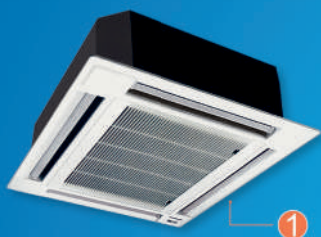
可靠性技术：航空领域先进的数字控制系统，拥有能与战机媲美的可靠性



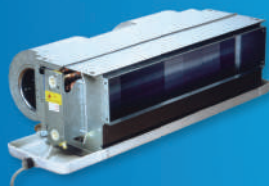
防腐技术：新工艺军工防腐技术 抗氧化腐蚀，经久耐用



军用雷达防电磁干扰技术



1



2



4



3



5



6



7



9



8

- 1. 地能热（冷）吸顶机
- 2. 地能热（冷）风管机
- 3. 地能热（冷）柜机 A
- 4. 地能热（冷）柜机 B
- 5. 地能热（冷）卧机
- 6. 地能热（冷）壁挂机
- 7. 地能热泵热水器（生活热水）
- 8. 地能热泵锅炉
- 9. 地能热泵多联机

**航天飞机燃料箱
真空氦检技术**



**航天飞机防腐防锈
处理技术**



宏源地能热宝技术有限公司

地址：四川省绵阳市涪城区金家林下街 29 号
 联系电话：010-62592341 400-666-6168
 传真：010-62593653
 电邮：dnrb@hyy.com.cn



扫描二维码
获取更多地能知识