



# 寒区浅层地埋管地源热泵可持续利用途径

倪 龙 教授/博导

热能应用省级工程研究中心 主任

寒地建筑科学与工程研究中心 常务副主任

2022太阳能耦合地源热泵技术交流会

# 1 引言

## 2 浅层地埋管地源热泵的低位热源

## 3 浅层地埋管地源热泵可持续利用

## 4 浅层地埋管地源热泵+太阳能耦合供能系统

## 5 结束语

# 1 引言

## 2 浅层地埋管地源热泵的低位热源

## 3 浅层地埋管地源热泵可持续利用

## 4 浅层地埋管地源热泵+太阳能耦合供能系统

## 5 结束语

## 中国能源革命



2015年11月30日，国家主席习近平出席气候变化巴黎大会领导人活动开幕式并发表讲话。

- ◆目标：建立清洁、低碳、安全、高效的现代能源体系
- ◆路径：四个革命、一个合作  
能源消费革命、能源生产革命、能源技术革命、能源体制革命、能源国际合作
- ◆碳排放与大气污染排放同根同源
- ◆新时代能源发展矛盾由供需平衡矛盾转变为能源结构矛盾



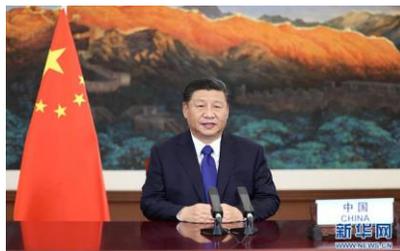
群众关心的这六件大事，习近平要求解决好！

## 引言：

2016年12月21日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席、中央财经领导小组组长习近平主持召开中央财经领导小组第十四次会议。习近平指出，保持经济持续增长，推动经济发展，根本还是靠不断解决好人民群众普遍关心的突出问题。他强调，推进北方地区冬季清洁取暖等6个问题，都是大事，关系广大人民群众生活，是重大的民生工程、民心工程，这一关正像中国传统二十四节气中的“冬至”，一旦天气寒冷，党中央关心民生的特殊举措即温暖人心，让我们一起来看看吧。

## 1 北方地区冬季清洁取暖

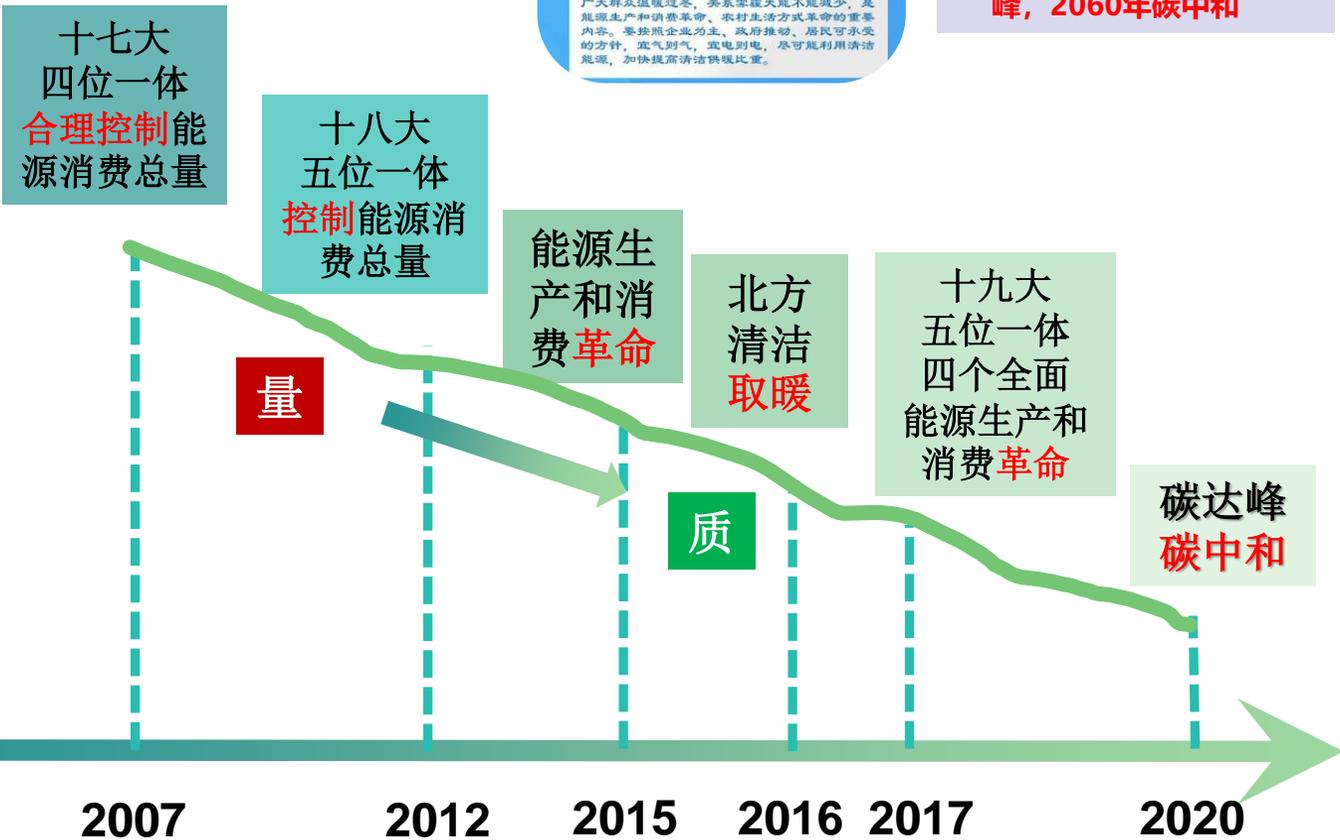
推进北方地区冬季清洁取暖，关系北方地区广大群众温暖过冬，关系雾霾天能不能减少，是能源生产和消费革命、农村生活方式革命的重要内容。要按照企业为主、政府推动、居民可承受的方针，宜气则气，宜电则电，尽可能利用清洁能源，加快提高清洁供暖比重。



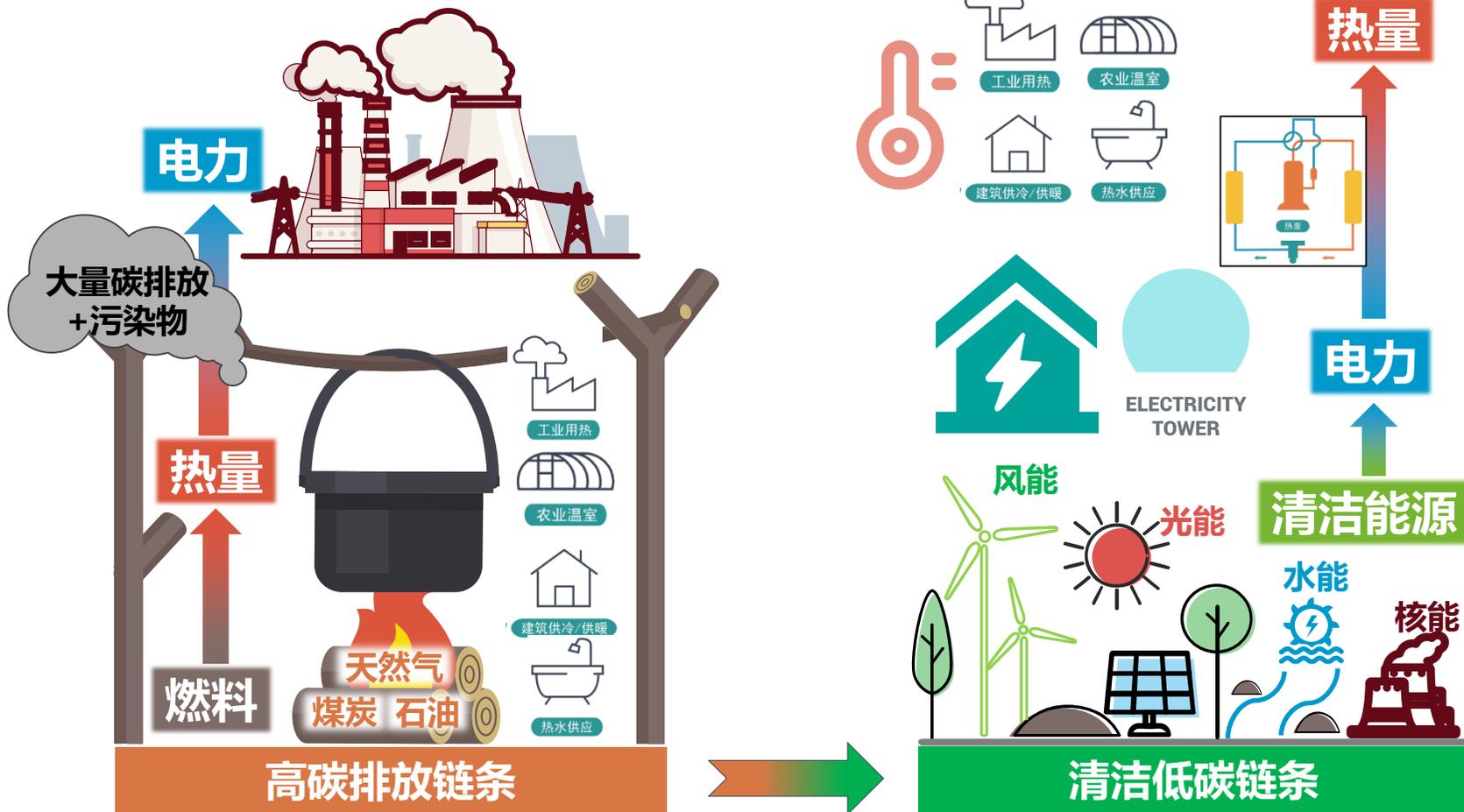
- 2020年9月22日的第七十五届联合国大会一般性辩论：承诺2030年碳达峰，2060年碳中和

至少20次提及碳中和

低碳化



## 能源转换链条的革命



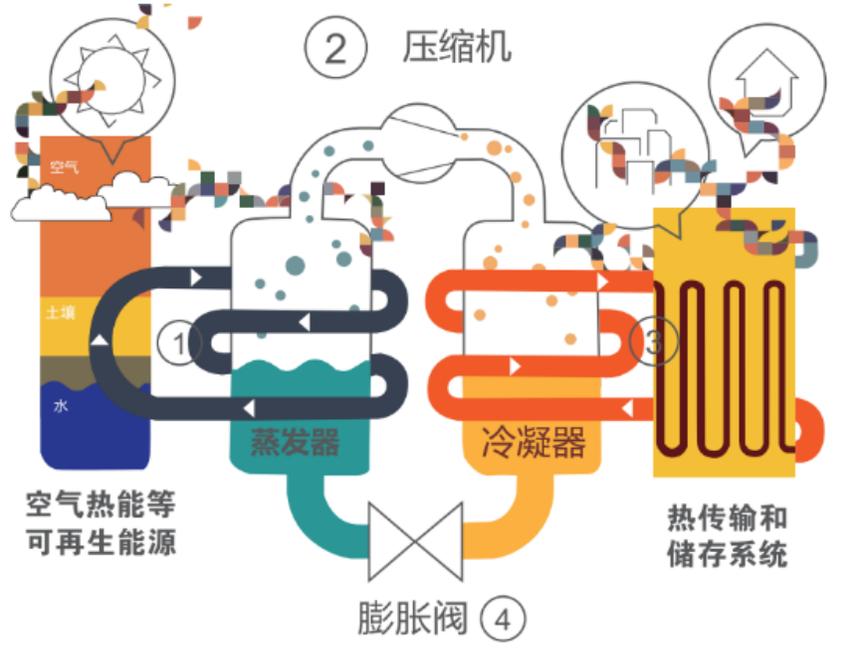
## 终端用能革命

国务院《2030年前碳达峰行动方案》（2021.10.24）

- ✓ 加快优化建筑用能结构。引导夏热冬冷地区科学取暖，因地制宜采用清洁高效取暖方式。**提高建筑终端电气化水平。**

《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（2021.9.22）

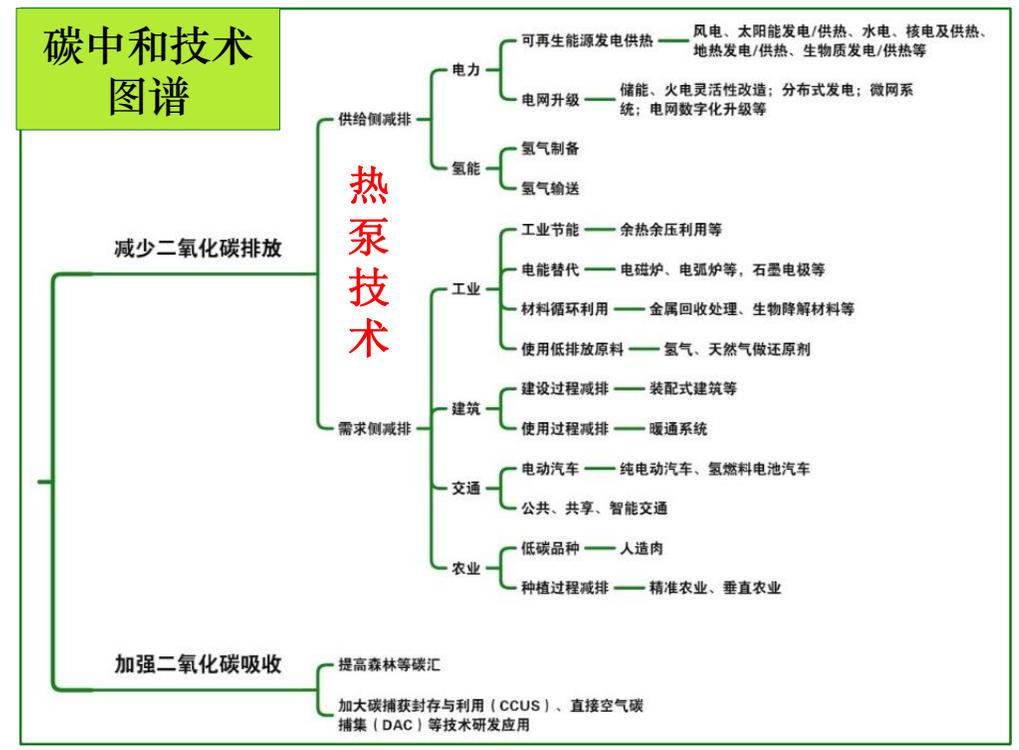
- ✓ 大力发展节能低碳建筑，加快推进超低能耗、近零能耗、低碳建筑规模化发展。深化可再生能源建筑应用，**因地制宜推进热泵**、燃气、生物质能、地热能等清洁低碳供暖。



- ▶ 热泵制热效率总**大于1**，一般可达**3-5**，是电制热的最有效方式
- ▶ 在仅考虑建筑和工业的终端用热的热能占比前提下，我国近**一半**的终端用能都以**热能**的形式消耗
- ▶ 热泵符合终端用能电气化发展的需求，某些场景下的热泵应用还能实现**柔性用电**，有助于电力调峰和风电光电消纳

在有合适的低位热源下，使用热泵来提供热能大大减少整个国家化石燃料的消耗，从而助力碳中和

从技术路线角度来看，热泵将充当重要角色

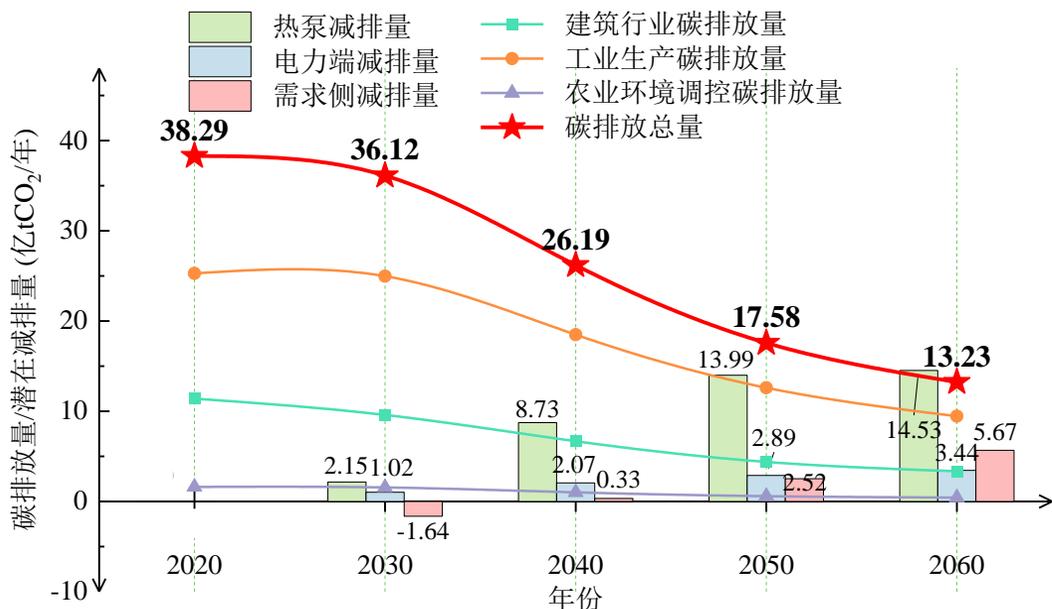
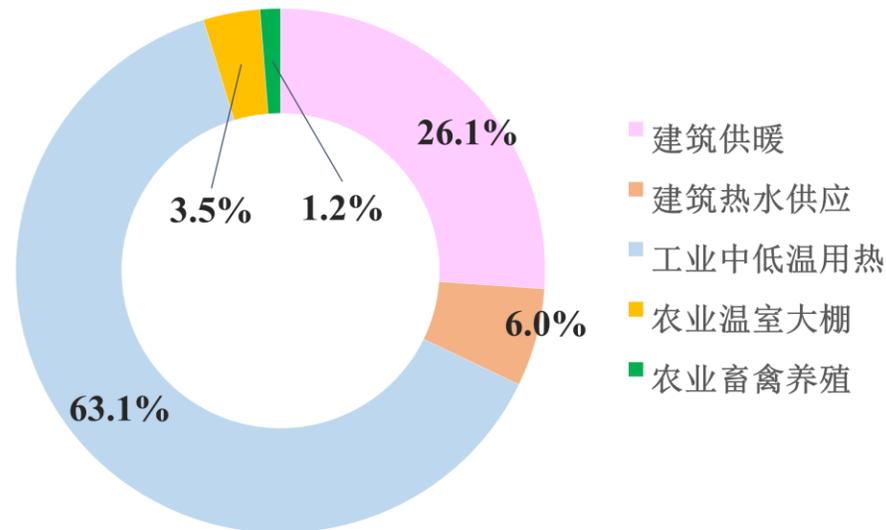


- ▶ 供给侧减排：地热供热、可再生能源供热
- ▶ 需求侧减排：建筑热泵、工业热泵、农业热泵、交通热泵

热泵能充分发挥自身特点，为碳中和技术路线的实现提供有效工具

各行业潜在减排量汇总

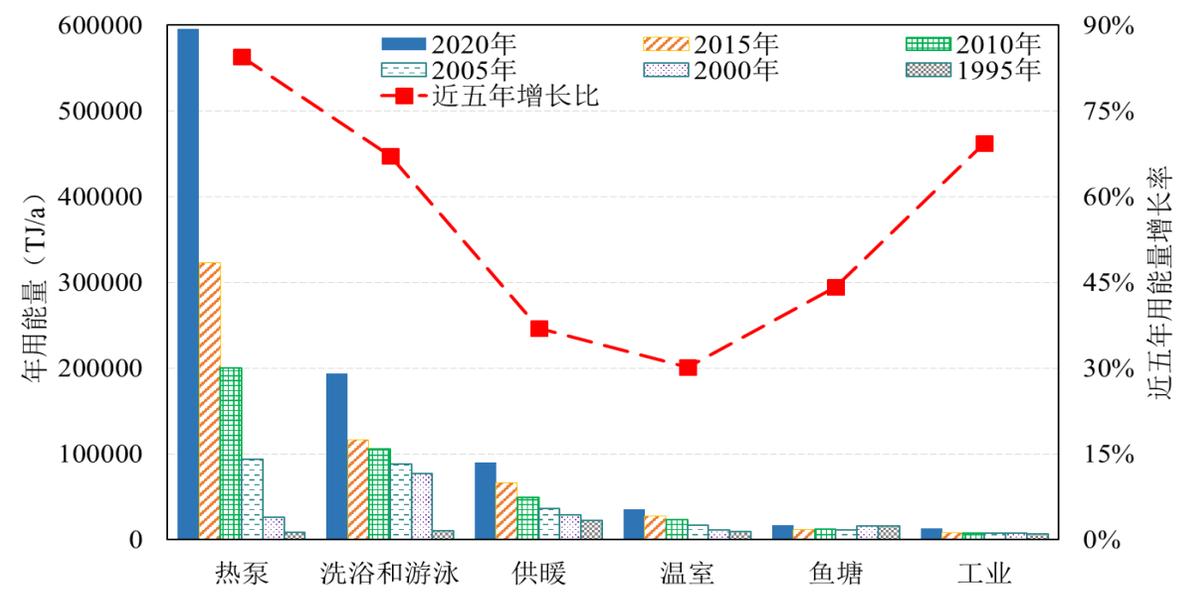
	显著增长 (亿tCO <sub>2</sub> /年)		自然增长 (亿tCO <sub>2</sub> /年)		当前情景 (亿tCO <sub>2</sub> /年)
	减排量	排放量	减排量	排放量	排放量
建筑供暖	6.54	2.29	4.19	4.64	8.83
建筑生活热水	1.51	1.06	0.76	1.81	2.57
工业中低温用热	15.83	9.45	9.74	15.54	25.28
农业温室大棚	0.87	0.38	-0.16	1.41	1.25
农业畜禽养殖	0.31	0.05	0.15	0.21	0.36
总量	25.06	13.23	14.68	23.61	38.29



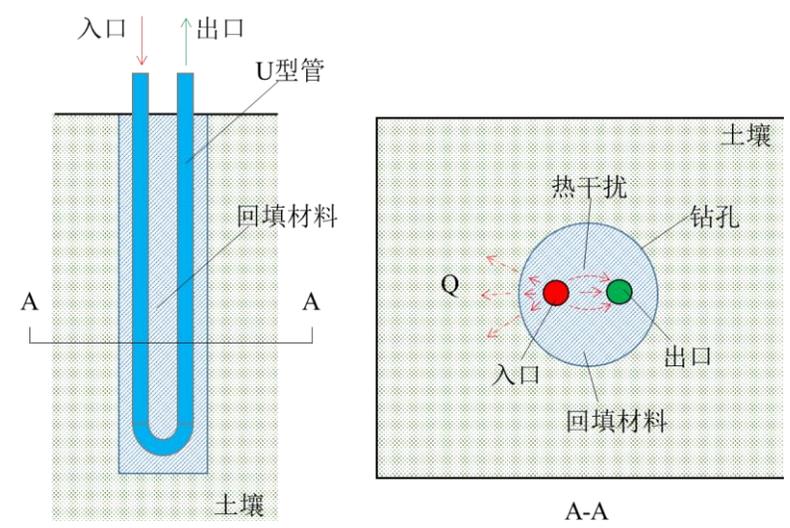
- ✓ 显著增长情景下，潜在减排量达**25.06亿t/年**，占当前前景的**65.4%**
- ✓ 潜在减排量占我国2019年碳排放量（99.18亿t）的**25.3%**，其中建筑部门32.1%，工业生产63.1%

- ✓ 2020~2030，碳排放量略有下降；在2030年以后**迅速下降**，2060年降到**13.23亿t/年**
- ✓ 2060年，热泵减排量**14.53亿t/年**，电力端减排量**3.44亿t/年**，需求侧减排量**5.67亿t/年**，城镇建筑集中供暖其他零碳热力**1.42亿tCO<sub>2</sub>/年**

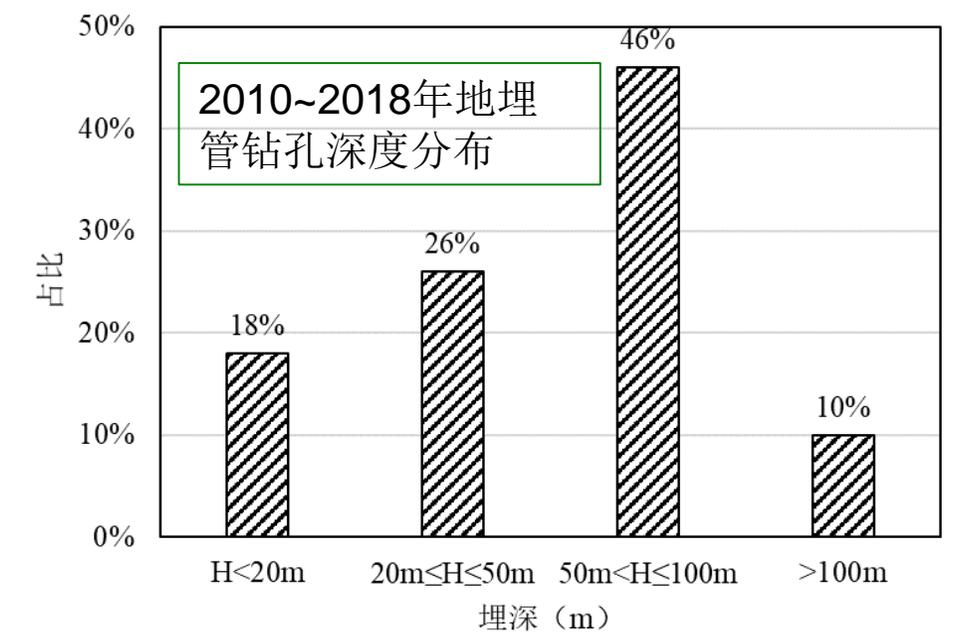
- ✓ 热泵还广泛应用于**干燥、交通**等场景，助力电力碳中和！



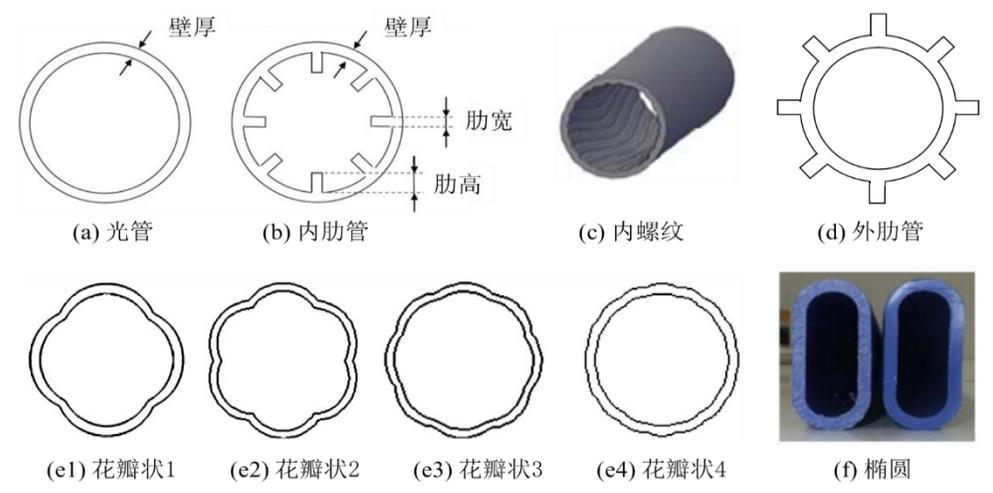
- 地源热泵近五年使用增加约**85%**
- 广泛服务于工业、农业、林业、渔业、牧业及医疗等众多领域，尤其在供暖供冷、蔬菜大棚、食品及污泥干燥等方面具有显著特征与优势，极具发展潜力
- 地埋管地源热泵兼具储能和供能能力
- 因地制宜地服务于近零能耗建筑及其他综合小微能源系统，为我国双碳计划实现及生态环境保护提供技术支撑



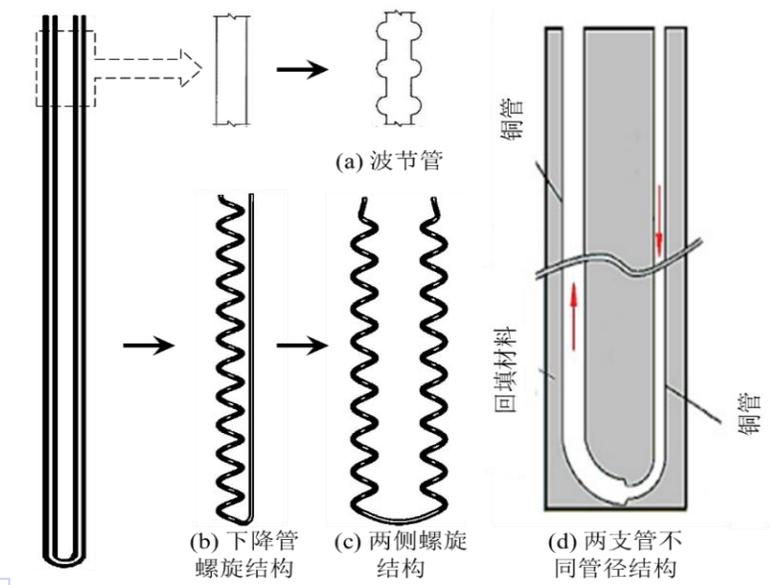
- 管径
- 支管间距
- 钻孔直径
- 钻孔深度



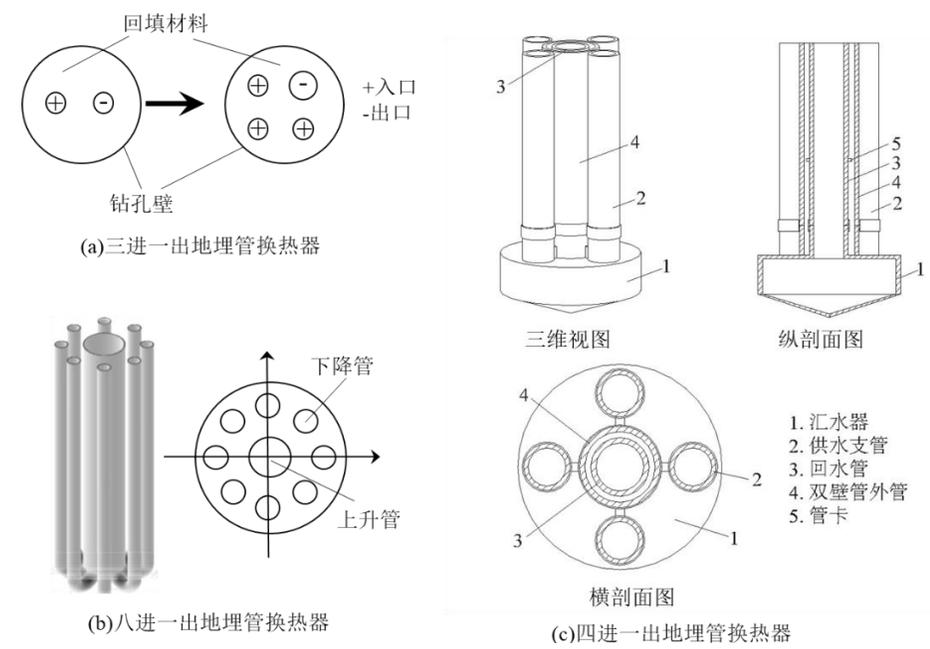
## 横截面结构



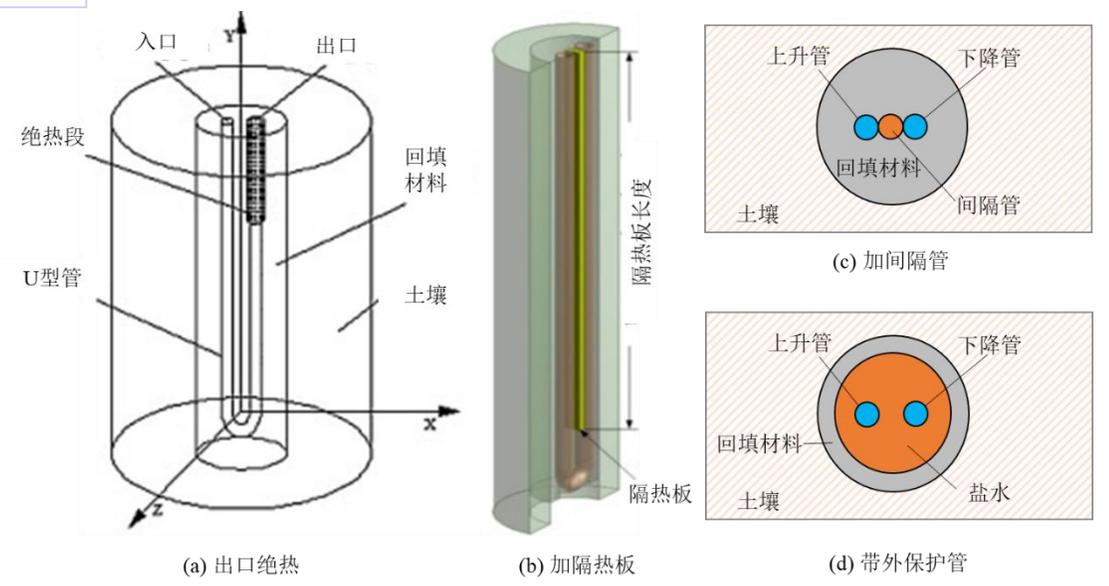
## 纵向结构

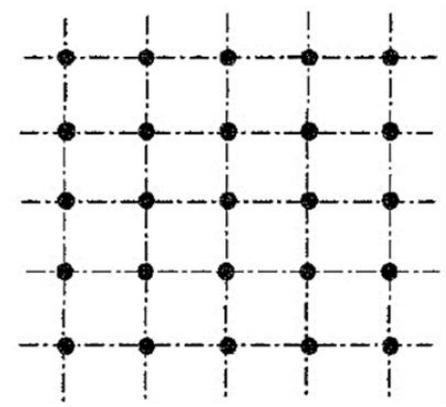


## 多支管结构

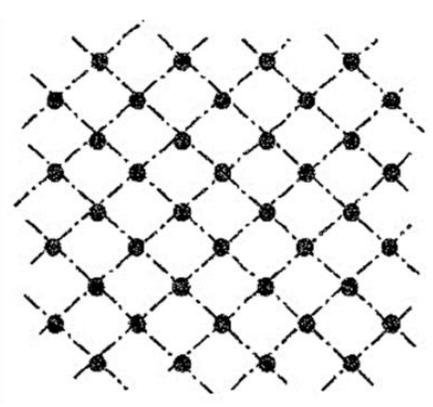


## 附属结构

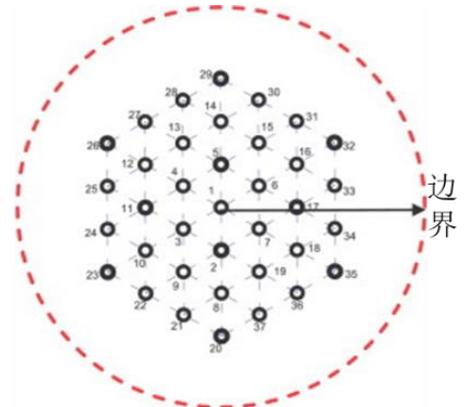




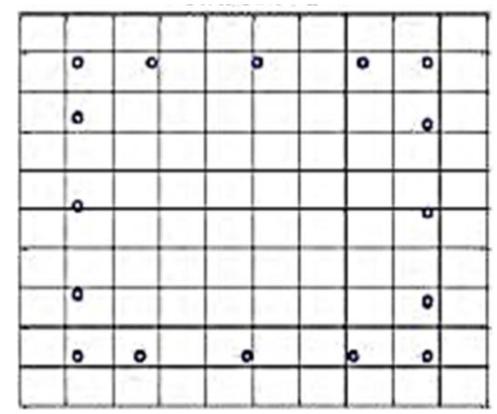
(a) 顺排布置



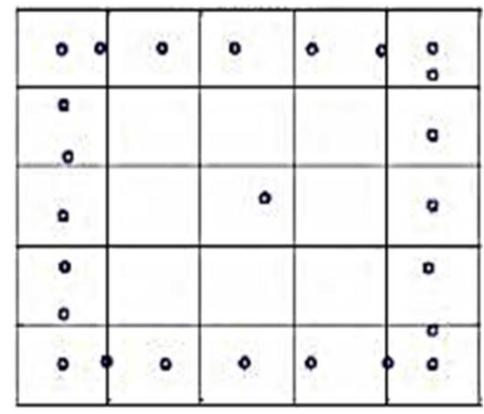
(b) 叉排布置



(c) 等边三角形布置

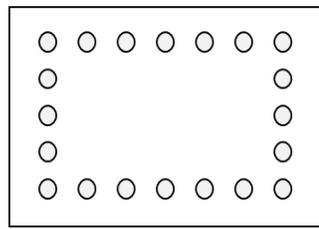


(a) 16钻孔位置最优布置形式

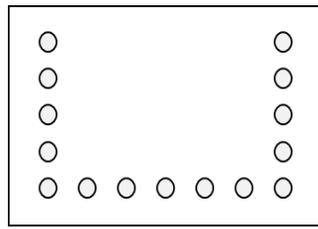


(b) 25钻孔位置最优布置形式

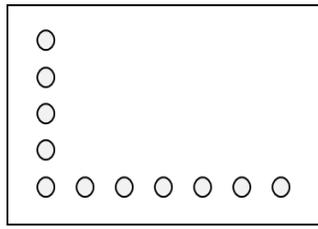
基于温度场均匀原则的管群优化布置



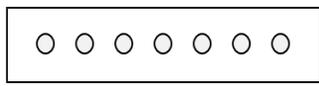
(a) 矩形布置



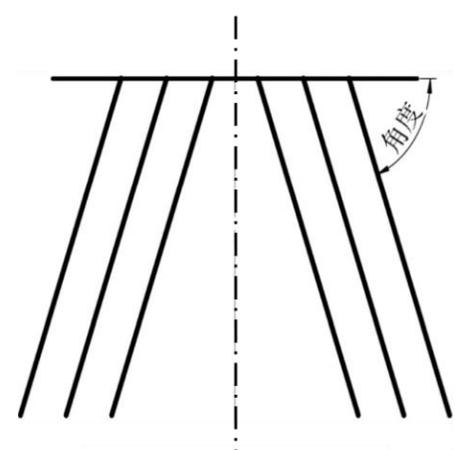
(b) U形布置



(c) L形布置



(d) “一”字形布置



(a) 倾斜地埋管管群



(b) 伞状埋管管群

**1** 引言

**2** 浅层地埋管地源热泵的低位热源

**3** 浅层地埋管地源热泵可持续利用

**4** 浅层地埋管地源热泵+太阳能耦合供能系统

**5** 结束语



## 1) GB 50366 《地源热泵系统工程技术规范》

2.0.4 浅层地热能资源 shallow geothermal resources

蕴藏在浅层岩土体、地下水或地表水中的热能资源。

2.0.4A 中深层地热能资源 middle and deep geothermal resources

蕴藏在中深层岩土体中的热能资源。

## 2) DZ/T 0225 《浅层地热能勘查评价规范》

浅层地热能 shallow geothermal energy

蕴藏在地表以下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。

注：是指通过地源热泵换热技术利用的蕴藏在地表以下 200 m 以内，温度低于 25 °C 的热能。

## 3) NB/T 10097-2018 《地热能术语》

浅层地热能 shallow geothermal energy

从地表至地下200m深度范围内，储存于水体、土体、岩石中的温度低于25℃，采用热泵技术可提取用于建筑物供热或制冷等的地热能。

干热岩 hot dry rock

不含或仅含少量流体，温度高于180℃，其热能在当前技术经济条件下可以利用的岩体。

## 4) CECS XXX 《中深层地热热泵系统技术规程》

2.0.1 → 中深层地热热泵供热系统 middle and deep geothermal heat pump heating system

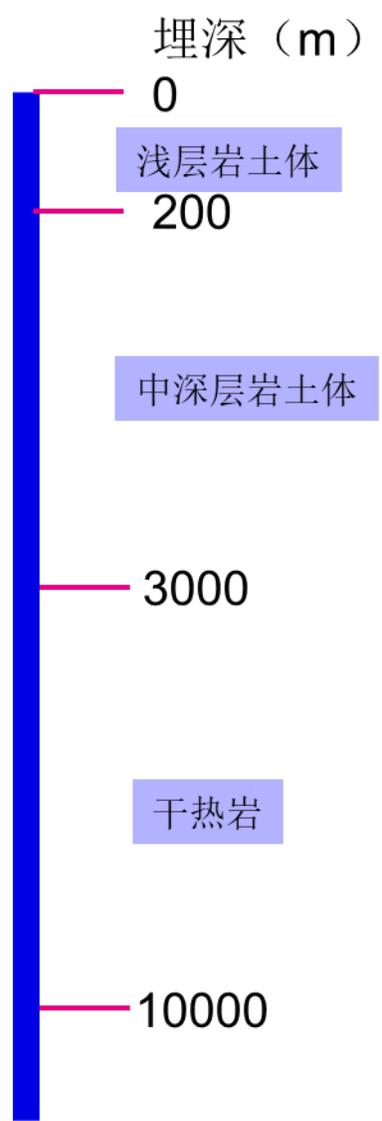
以深度在 1000m~3000m 的中深层岩土体为热源，由中深层地热换热系统提取热量并通过热泵机组温度提升后向建筑供热的系统，主要由中深层地热换热系统、热泵系统、建筑室内供热系统以及监测与控制系统组成。

2.0.6 → 中深层热储层 middle and deep geothermal reservoir

埋藏于地下的地层、岩土体或构造带，深度一般位于 1000m~3000m。

## 5) 窦斌，田红，郑君. 地热工程学. 中国地质大学出版社.2020

目前干热岩的评价深度限于地壳浅部10km以内。通常在一个独立的水文地质单元内，地形起伏的相对高差在3km左右，于是天然水热型地热系统中地下水的循环深度在3km左右，亦即地壳浅部水热型地热资源主要存在下3km以浅。此外，再以热传导为主的非火山活动区，3km以浅的地壳表层不可能具有较高温的干热岩。因此，通常将干热岩评价的深度范围限定在3-10km。





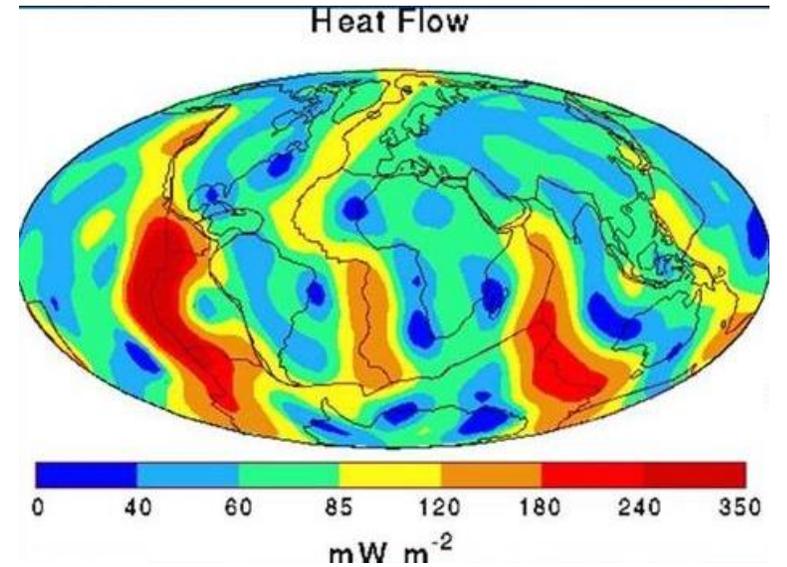
- ✓ 国内提出“浅层地热能”的概念化的术语，它是将土壤、地下水和地表水汇集在同一术语中，统称为“浅层地热能”
- ✓ “浅层地热能是地热资源的一部分”，“浅层地热能是赋存在地球的表面岩土体中的低温地热资源”，“分布普遍、埋藏浅、可持续利用，可以作为化石能源替代资源，减少温室气体的排放”等等

### 注意到对“浅层地热能”的不同看法

- ✓ 大地热流是“浅层地热能”能量的主要来源之一
- ✓ 浅层地热能主要来自太阳能
- ✓ 把空气、水、太阳能、浅层岩土等同视为热泵的低温热源

### (1) 按照L. Rybach教授的说法，浅层地热能主要来自大地热流的能量

- ✓ 地球的总散热量略大于地球内部的总生热量，基本处于热平衡状态
- ✓ 大地热流散逸至空间的能量一年全球可达 $1.4 \times 10^{18} \text{kJ}$ ，由这个数字看，浅层地热能的热量十分可观，但大陆热流加权平均值为 $56.5 \text{mW/m}^2$ 。若再考虑浅层岩土体每降 $1^\circ\text{C}$ ，其热量更大，由此，将它视为资源，似乎是正确的
- ✓ 但不能忽视，处于工程场区内的浅层地热能相对要少得多。粗略计算一下， $1 \text{m}^2$ 建筑面积，热负荷为 $30 \text{W/m}^2$ ，不考虑蓄热，也不考虑岩土体温度的变化，地源热泵的低温热源仅来自于大地热流，则需要 $500 \text{m}^2$ 左右的土地
- ✓  $100 \text{m}^3$ 岩土降低 $1^\circ\text{C}$ ，可供 $2 \text{m}^2$ 建筑面积1年的用热量(120天采暖，热负荷为 $30 \text{W/m}^2$ )。另外，还应考虑岩土体降 $1^\circ\text{C}$ 后，如何恢复，岩土温度恢复所需的热能又由何处来？



#### 全球典型地区地表热流的平均值

Region	Mean Surface Heat Flow ( $\text{mW m}^{-2}$ )
Africa 非洲	49.8
South America 南美	52.7
North America 北美	54.4
Australia 澳大利亚	63.6
Europe 欧洲	60.2
mean continental 平均大陆	56.5
North Pacific 北太平洋	95.4
South Pacific 南太平洋	77.4
North Atlantic 北大西洋	67.4
mean oceanic 平均大洋	78.2

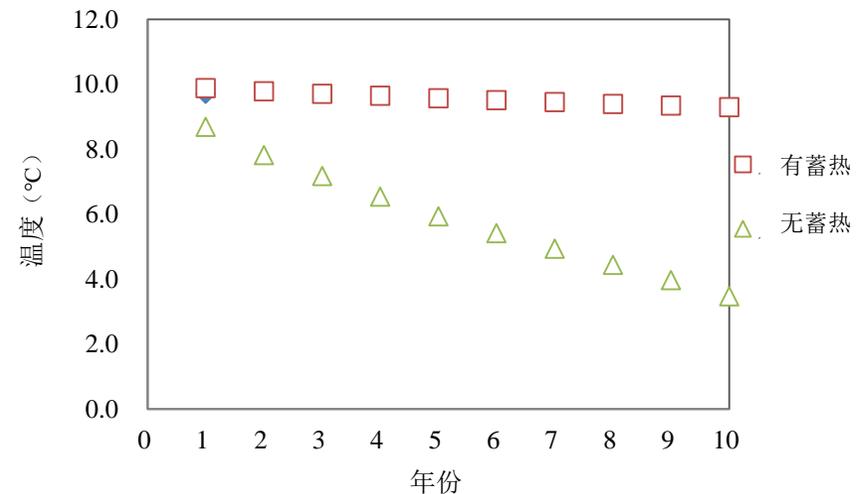
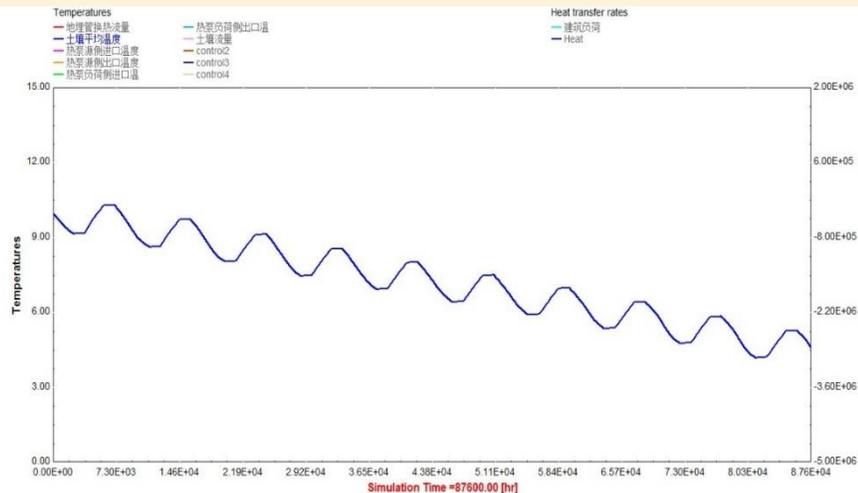
(2) U形管位于恒温带，其热能的来源主要为浅层地热能（大地热流+岩土温度降低）；地埋管地源热泵的水平埋管位于变温带，其热能的来源为太阳能与地热能

(3)目前在一些文章中经常提到，在一些工程中，设计与应用地源热泵系统时忽视了冷热负荷的平衡问题

✓ 我国的地源热泵经常是一机两用，甚至一机三用，客观上起到蓄能作用

✓ 但带有一定的盲目性，没有按科学的蓄能理论与技术去实施，仅在在取热排热数量上考虑平衡

(4)在地源热泵实践过程中已发现浅层地热能的热量来源不足的问题，尤其是对严寒地区



**1** 引言

**2** 浅层地埋管地源热泵的低位热源

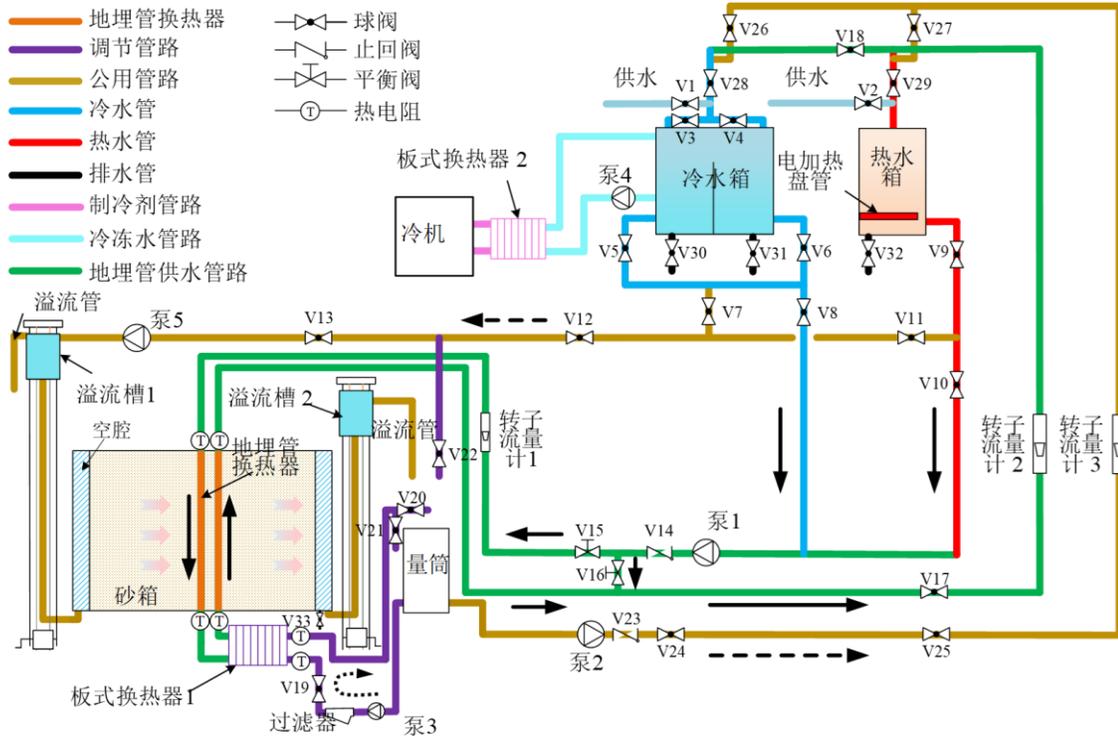
**3** 浅层地埋管地源热泵可持续利用

**4** 浅层地埋管地源热泵+太阳能耦合供能系统

**5** 结束语

# 可持续利用 浅层岩土体蓄能+浅层地热能

- ✓ 浅层岩土蓄能+浅层地热能才是地源热泵可持续利用的低温热源
- ✓ 作为热泵的低位热源，浅层岩土体与空气、水、太阳能不同（含能体、固定性）



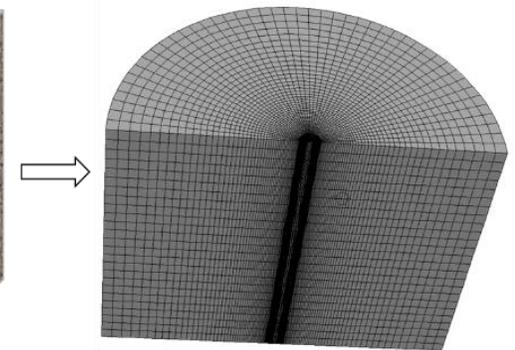
(a)电加热棒模拟地埋管换热器砂箱实验装置



(b)地埋管换热器砂箱实验装置

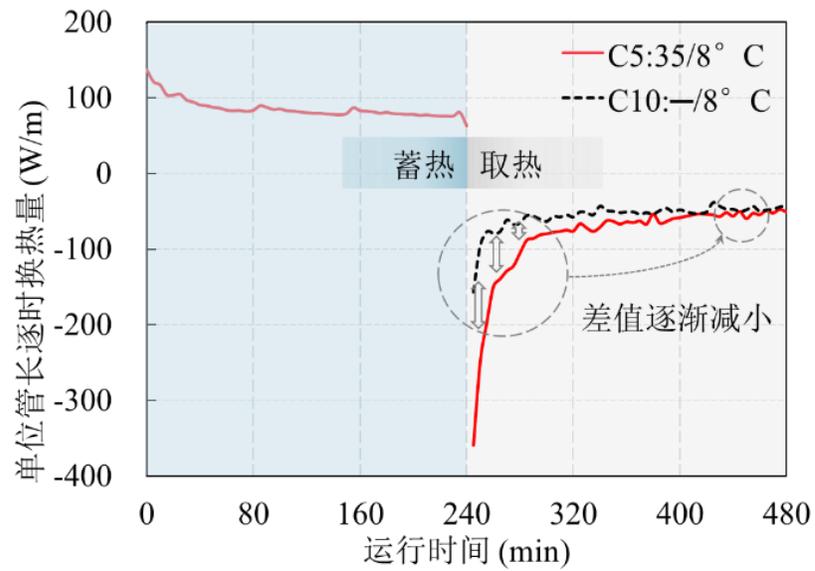


(a) 物理模型

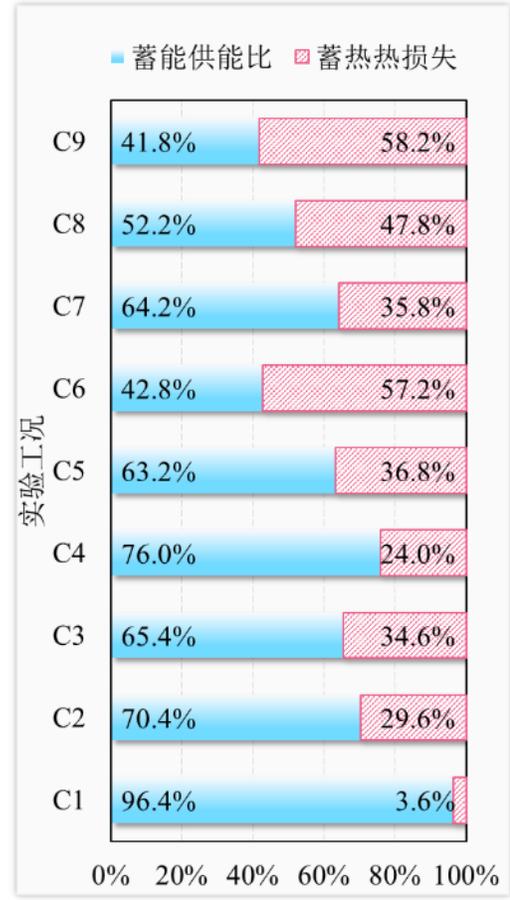
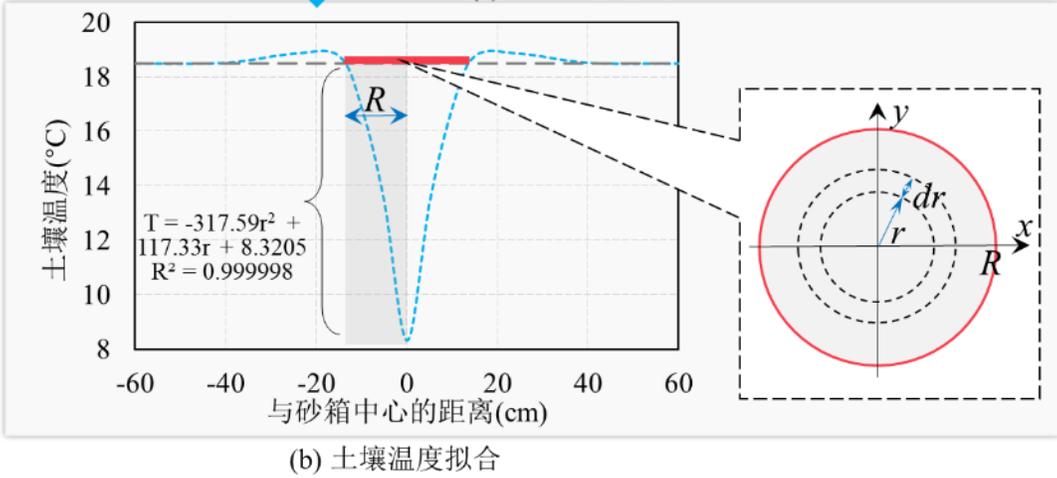
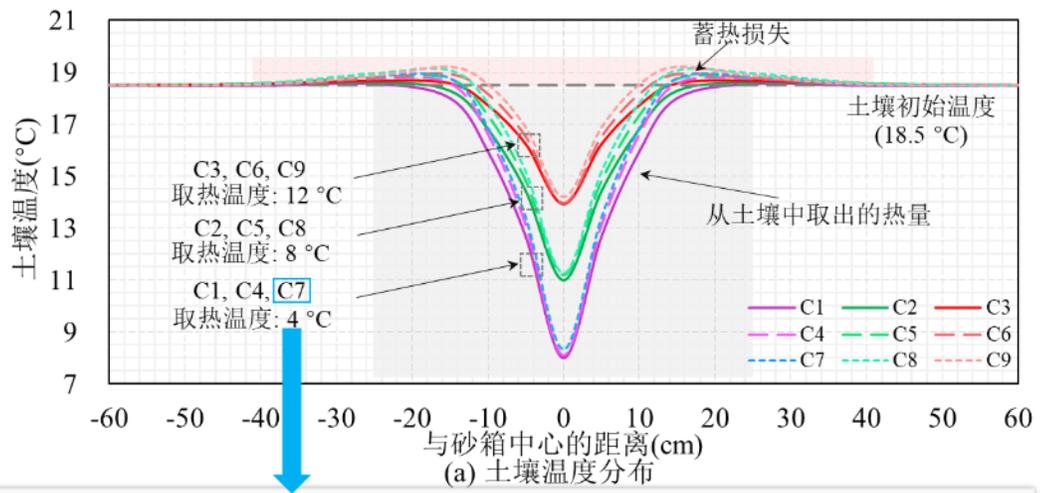


(b) 区域离散

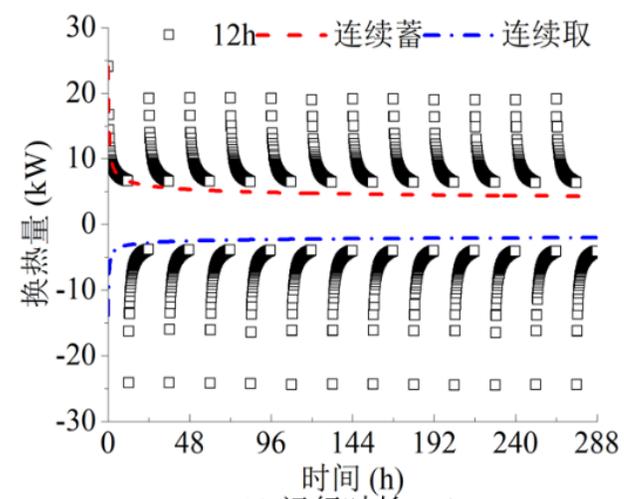
Rong Wang, Long Ni\*, Chenlei Yang, Yang Yao. Laboratory study on the thermal performance of vertical U-tube ground heat exchanger during short-term borehole thermal energy storage (BTES) and heat extraction process. International Journal of Energy Research. 2021, 45: 2043–2057



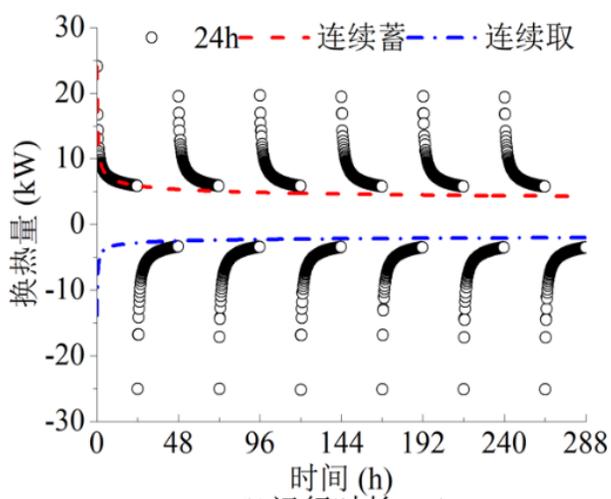
蓄热-取热工况C5中单位管长取热量平均值增加了47.8%



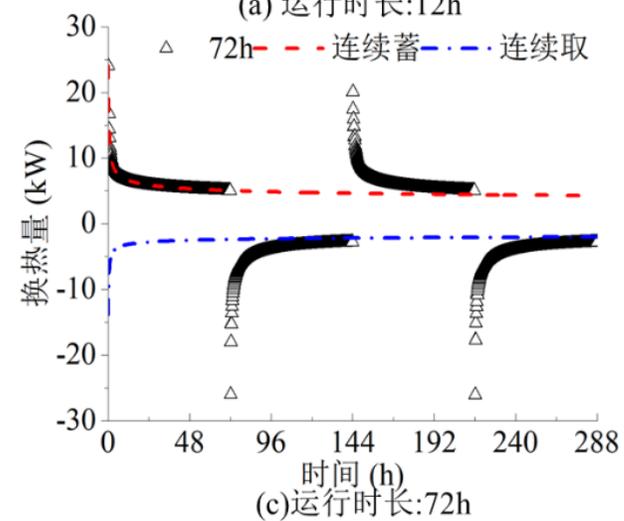
- 在热平衡工况C3、C5和C7中，蓄能供能比分别为65.4%、63.2%和64.2%
- 在一定蓄热温度下，蓄热损失的比例随着取热温度的降低而降低
- 在一定取热温度下，蓄热损失的比例随着的蓄热温度的降低而降低



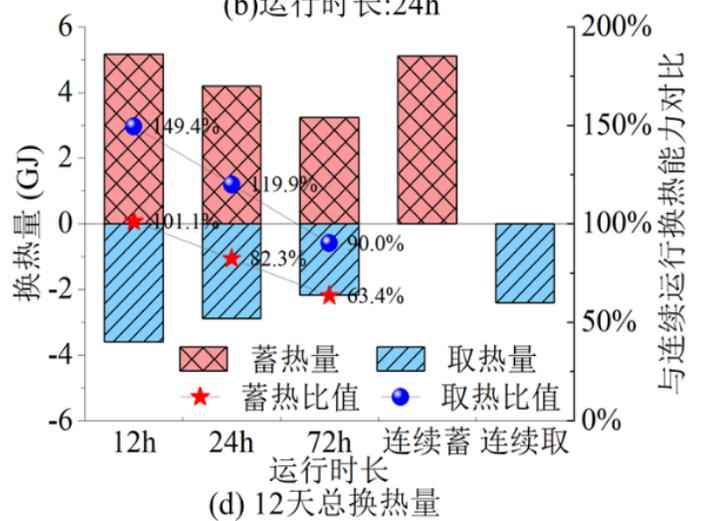
(a) 运行时长:12h



(b) 运行时长:24h



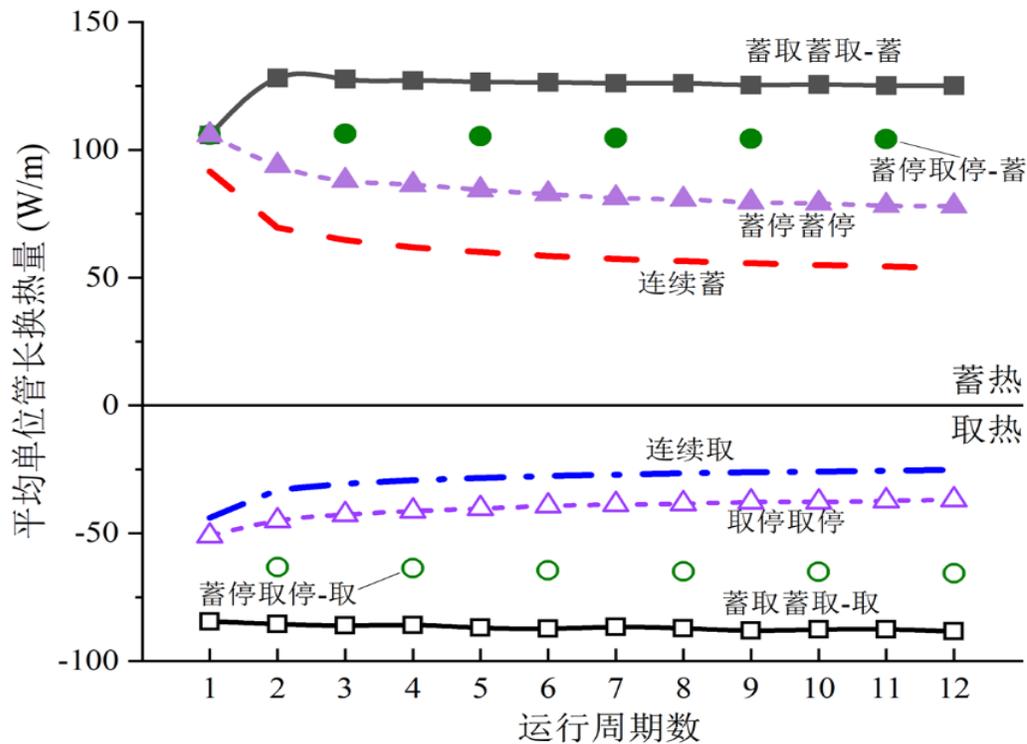
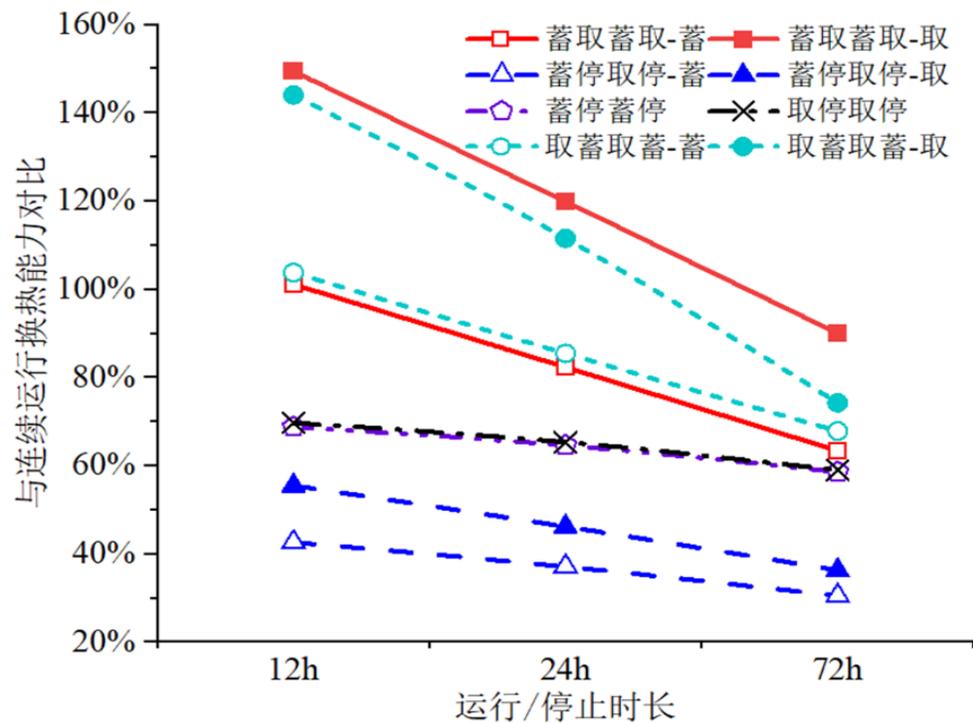
(c) 运行时长:72h



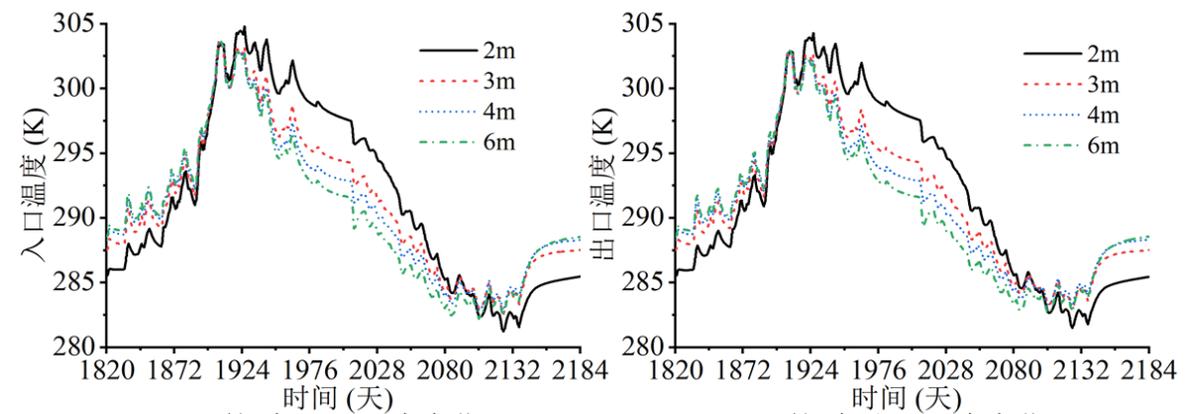
(d) 12天总换热量

**“蓄取蓄取”模式**

- 蓄热和取热交替运行，使得地埋管换热器蓄热/取热能力都有了大幅提升
- 运行时长越短，地埋管换热器总换热能力越大
- 运行时长12小时蓄取蓄取工况取热量是连续取热运行取热量的149.4%

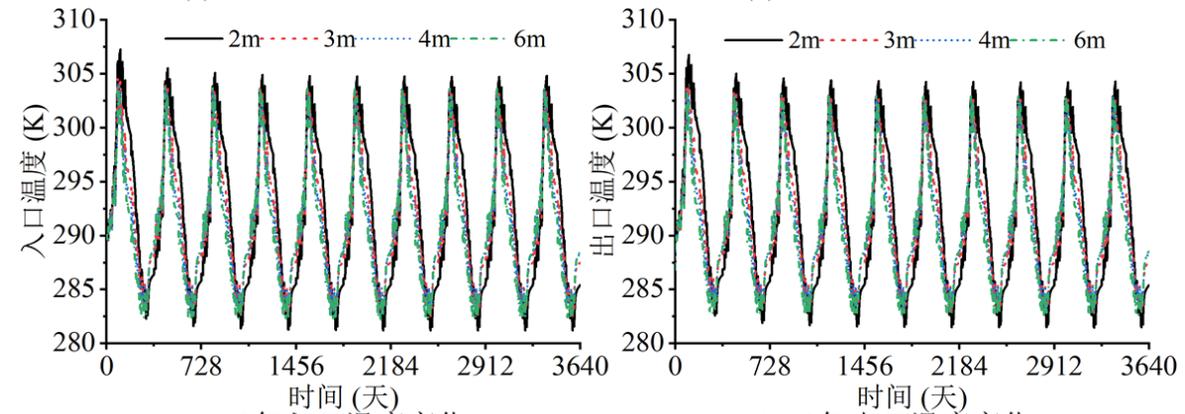


- ❑ 地埋管换热器的最佳运行模式是蓄取交替连续运行。带有间歇的蓄取交替运行可提高地埋管换热器逐时换热能力。实际中，优先推荐“蓄取蓄取”模式，其次是“蓄停取停”模式，最后一个运行周期中，单位管长平均取热量分别为基础值的3.5倍和2.6倍
- ❑ 蓄取交替运行时长越短，地埋管换热器换热能力越强
- ❑ 与太阳能结合时，利用负荷峰谷差，白天蓄、晚上取



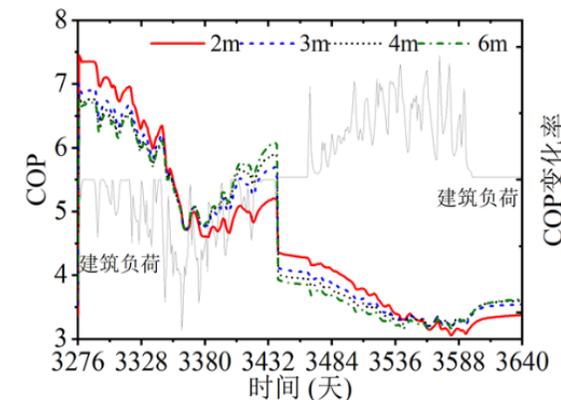
(a) 第6年入口温度变化

(b) 第6年出口温度变化

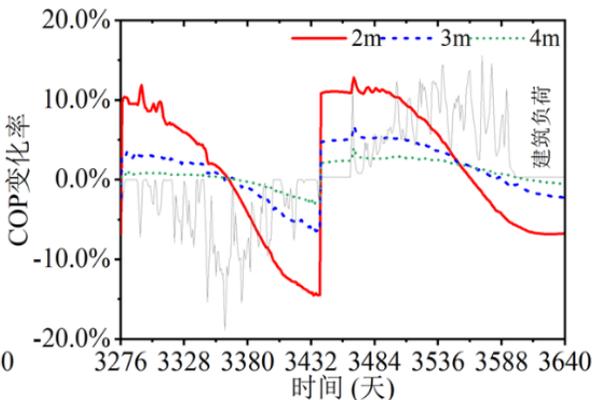


(c) 10年入口温度变化

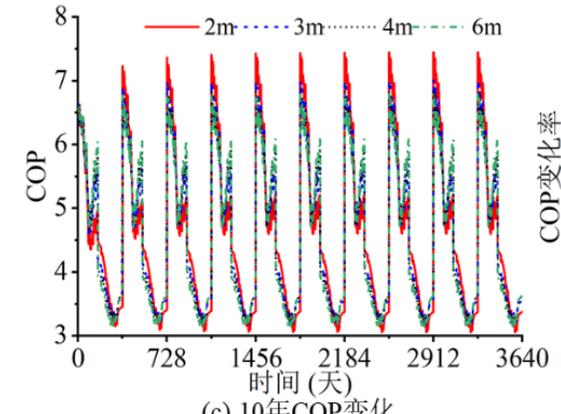
(d) 10年出口温度变化



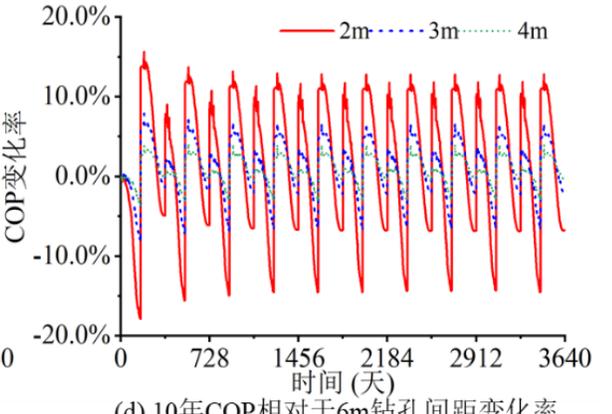
(a) 第10年COP变化



(b) 第10年COP相对于6m钻孔间距变化率



(c) 10年COP变化



(d) 10年COP相对于6m钻孔间距变化率

在季节“蓄取蓄取”模式下，钻孔间距越小，管群排热和取热运行前期热泵性能系数COP越高，管群排热和取热运行后期热泵性能系数COP越低。随着钻孔间距的增大，埋管区域温度波动减小

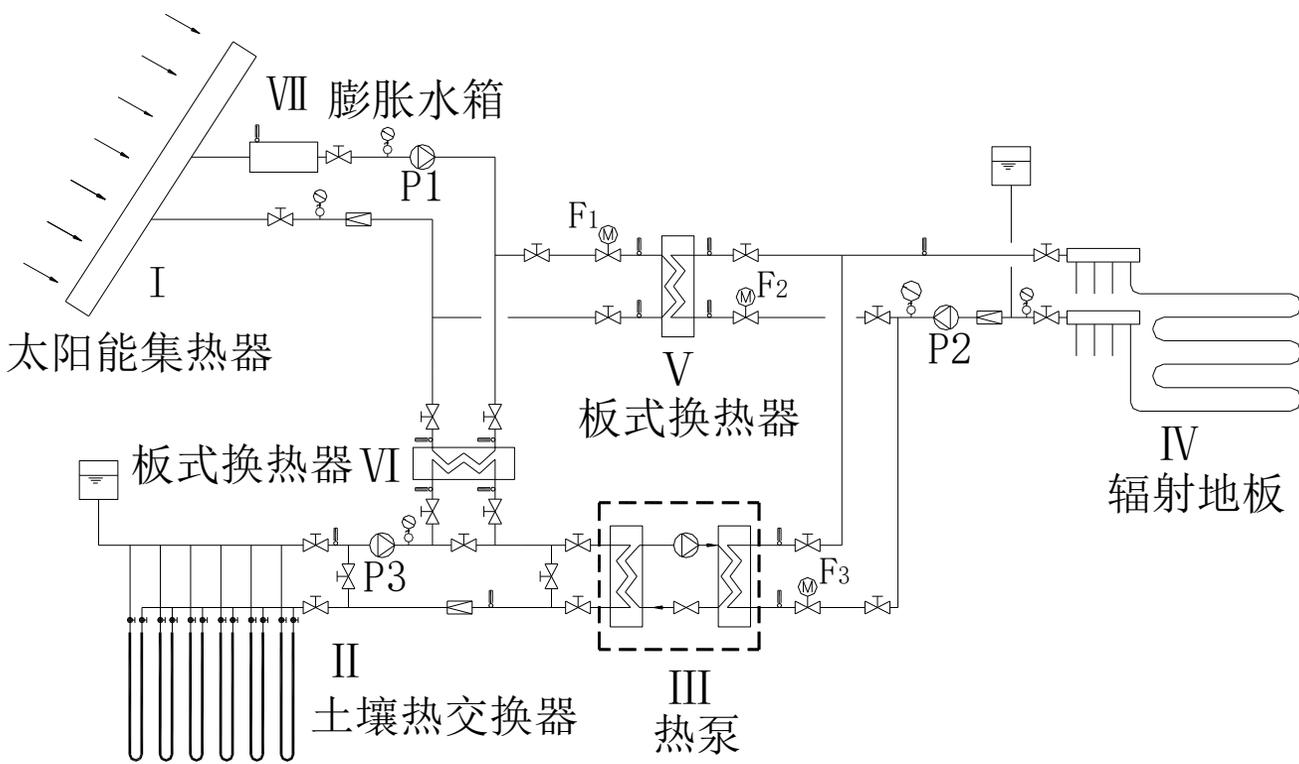
**1** 引言

**2** 浅层地埋管地源热泵的低位热源

**3** 浅层地埋管地源热泵可持续利用

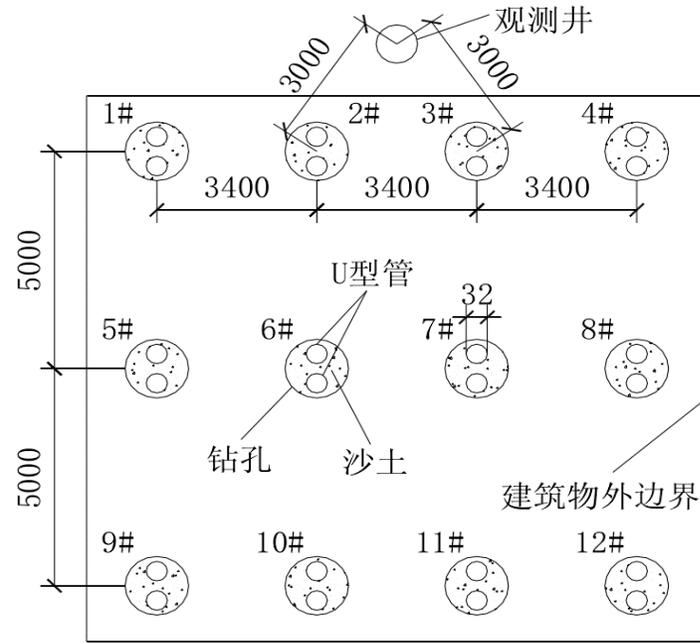
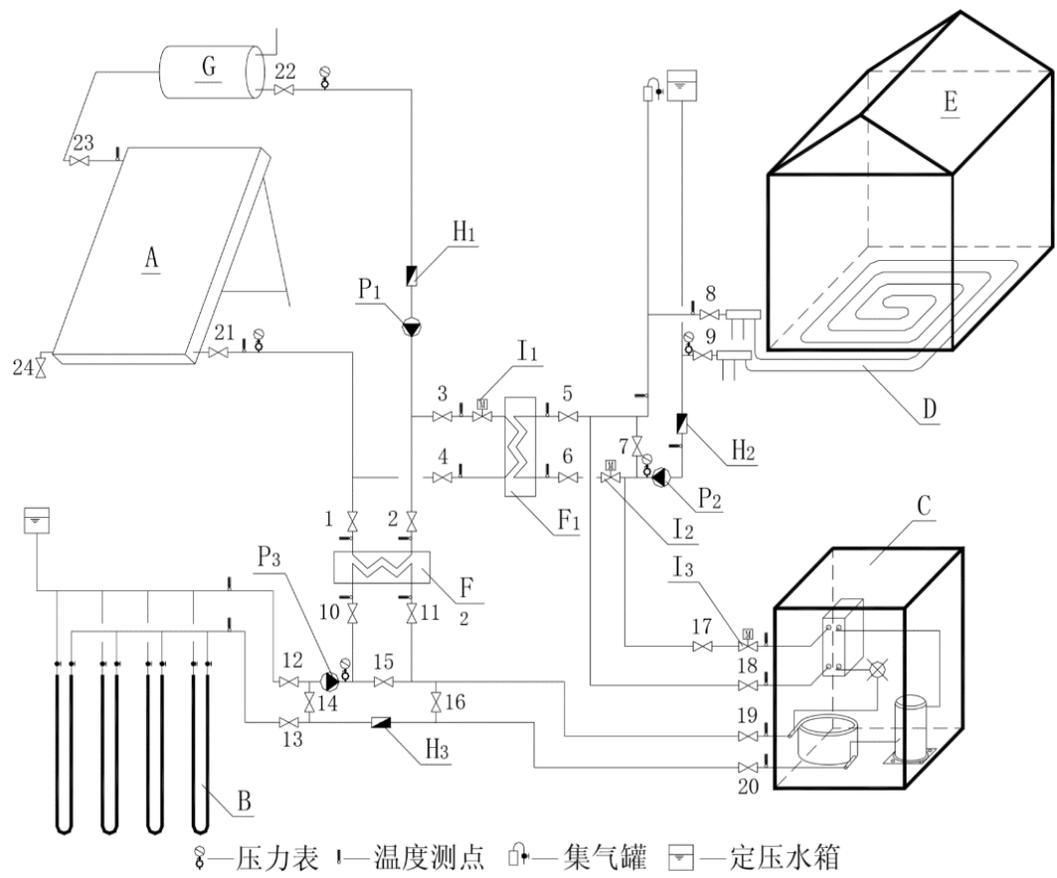
**4** 浅层地埋管地源热泵+太阳能耦合供能系统

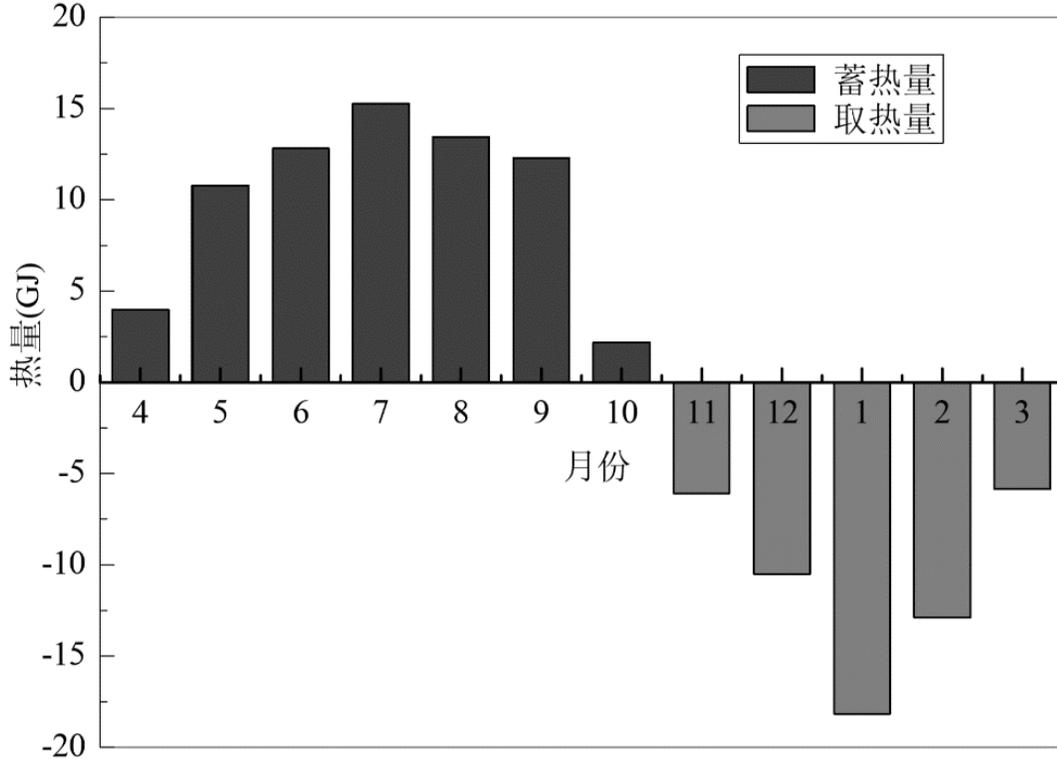
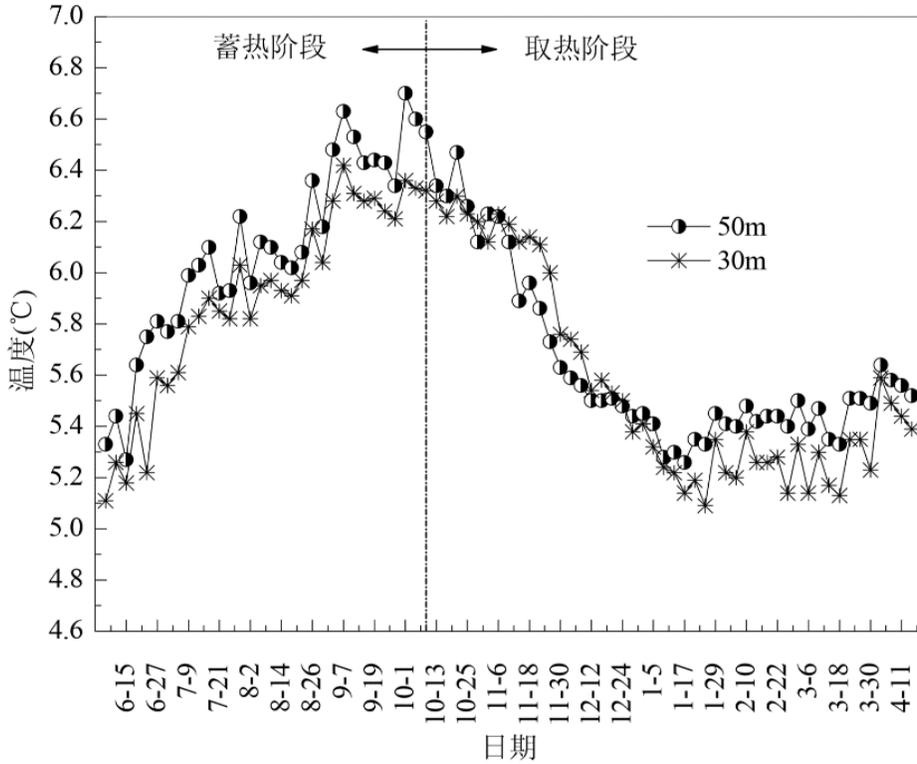
**5** 结束语



- 冬季通过板式换热器与供暖系统换热供暖
- 非供暖期通过板式换热器与土壤换热系统换热向地下土壤蓄热
- 长周期：太阳能移季利用
- 短周期：日蓄夜取
- 太阳能与浅层地热能互补（供、蓄）

太阳能土壤蓄热-土壤源热泵联合供暖系统





- 供暖COP=7.6, 节能效果十分显著
- 夏季利用自然冷源, 供冷COP可达到20以上

**1** 引言

**2** 浅层地埋管地源热泵的低位热源

**3** 浅层地埋管地源热泵可持续利用

**4** 浅层地埋管地源热泵+太阳能耦合供能系统

**5** 结束语



浅层地埋管地源热泵能充分发挥自身特点，为碳中和技术路线的实现提供有效工具

作为热泵的低位热源，浅层岩土体与空气、水、太阳能有比较大的差异

浅层岩土蓄能+浅层地热能才是地源热泵可持续利用的低温热源

蓄热强化了取热。与取热工况（没有蓄热）相比，蓄热-取热工况（有蓄热）单位管长取热量平均值增加了**47.8%**

地埋管换热器的最佳运行模式是具备冷热交替需求的连续运行模式；优先推荐蓄取蓄取模式，其次是蓄停取停模式

寒区浅层地埋管地源热泵+太阳能耦合供能系统能充分利用岩土体的蓄能，是值得推广的系统形式



Email: nilonggn@hit.edu.cn

请提出您的宝贵意见！

哈 尔 滨 工 业 大 学  
Harbin Institute of Technology

