

2024



清华大学
Tsinghua University

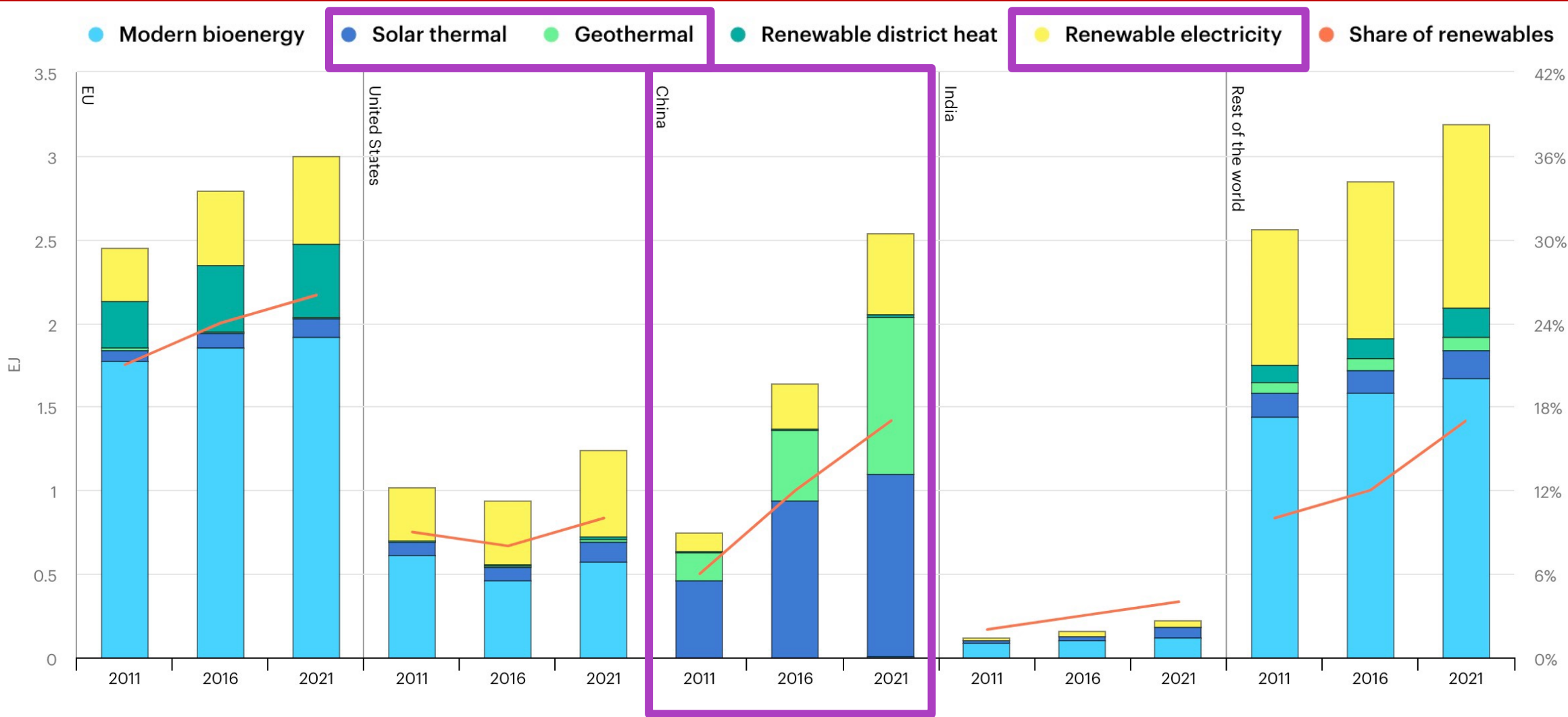
温差驱动的地热可持续利用关键技术研究 DT-driven (Temperature Difference) Geothermal Utilizations: Key Considerations

魏庆芃教授工作组

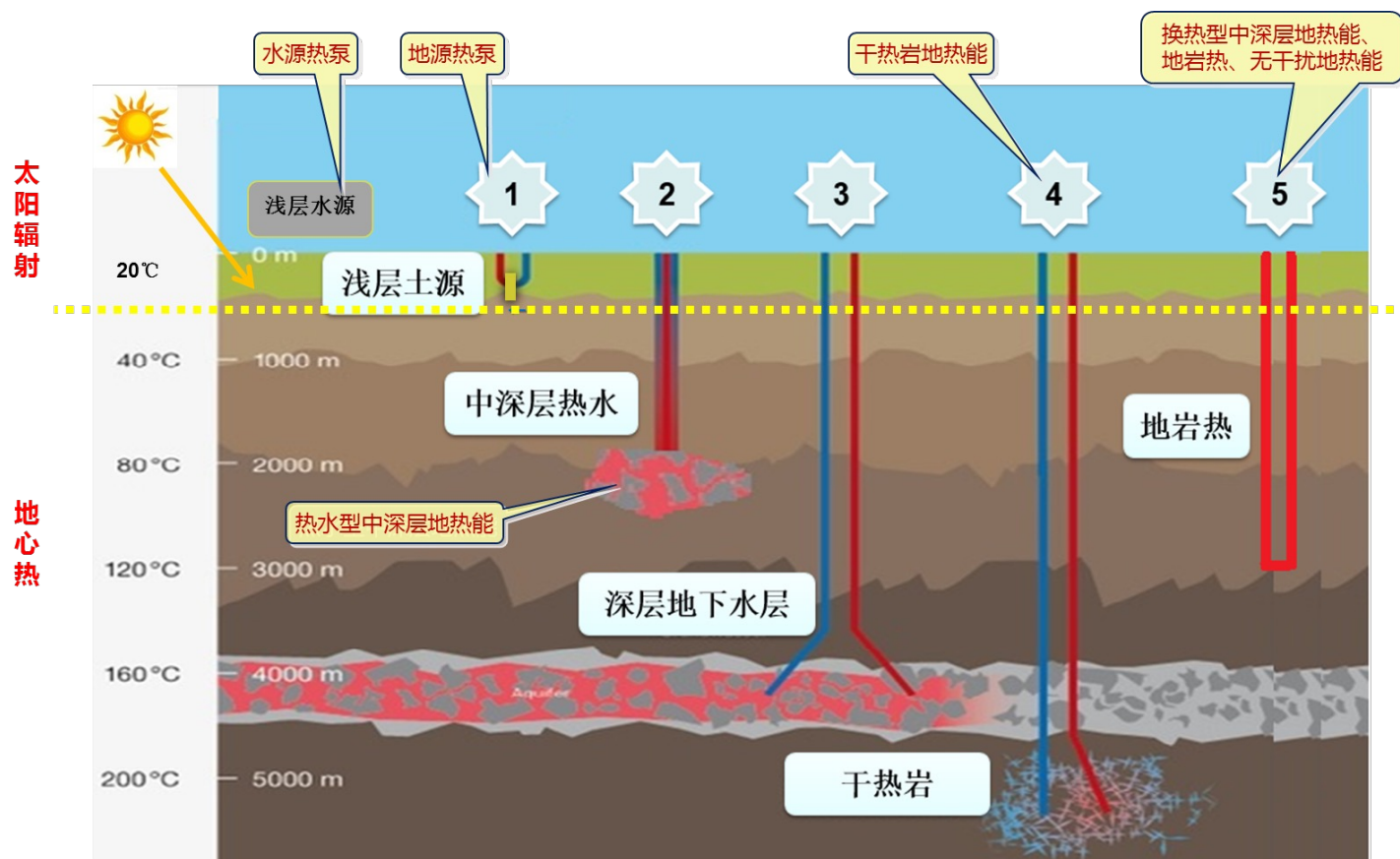
清华大学建筑节能研究中心

2024/04/9

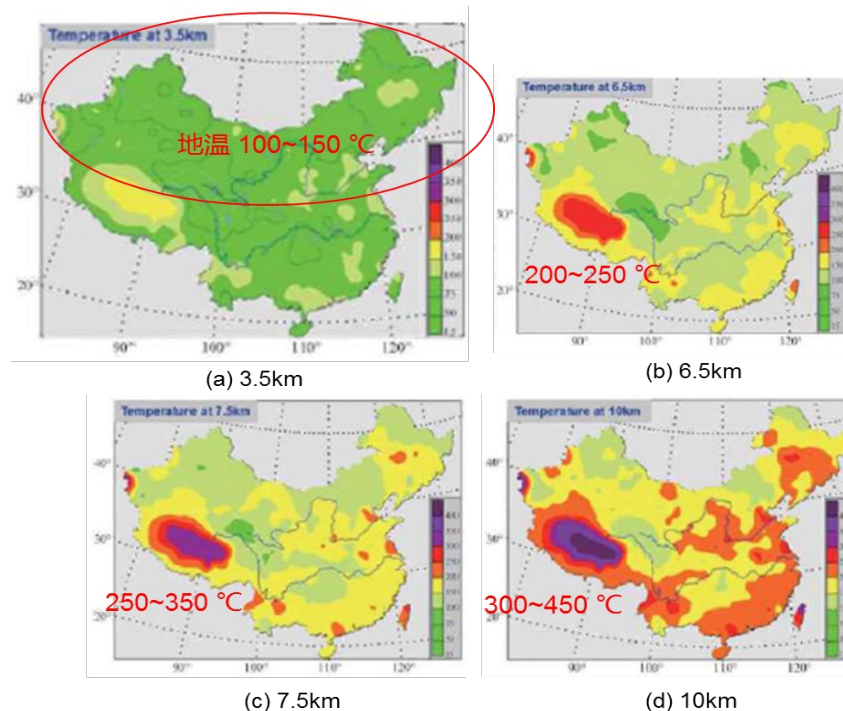
0.0 可再生热量利用：太阳能+地下热量，从中国贡献全球



0.1 地下热量Geothermal普遍存在：主要利用形式为取水或温差 3



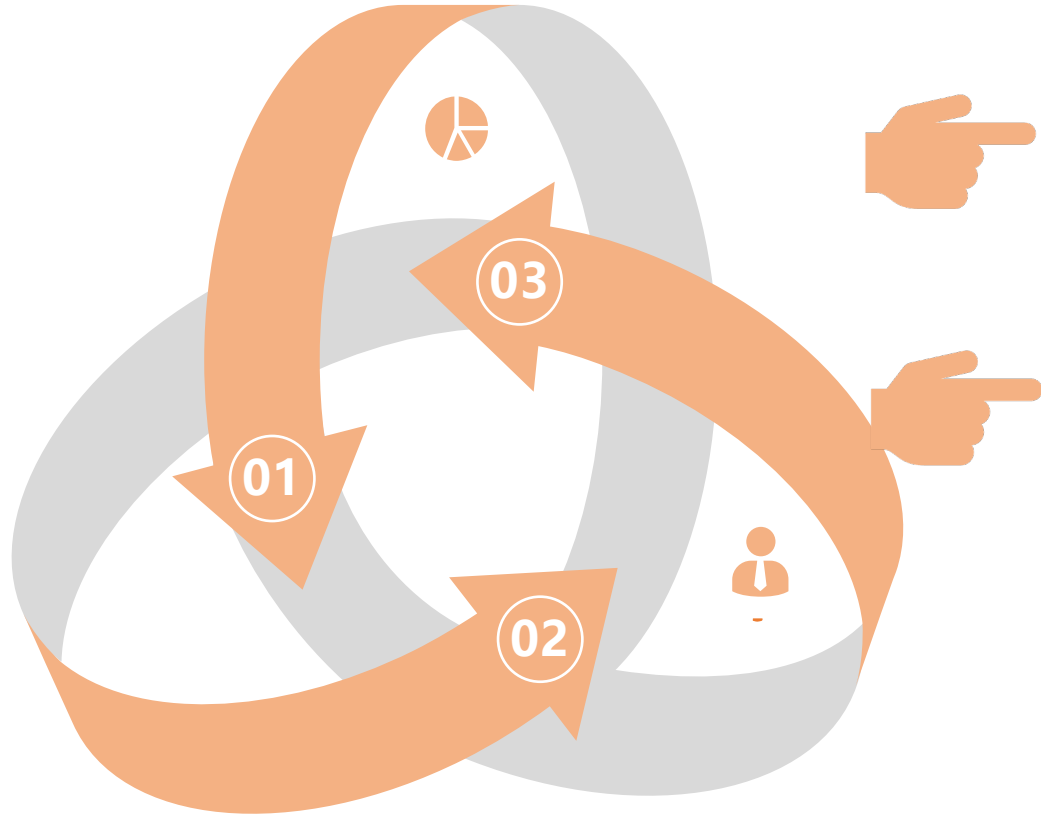
我国地下不同深度岩层温度分布情况



- 直接取水：浅层和地表水源热泵，中深层热水（80°C左右），高温高压热水或蒸汽（160°C - 180°C）
 - 必须珍惜，能不用，尽量不用；实在要取水，务必全过程实时监控回灌，否则必导致严重问题！
- 温差换热：**浅层地源**热泵（多为垂直管，单U/双U），**中深层地热换热**结合热泵（无干扰、井下换热等）

今日讨论的主要内容：围绕地下温差的传热问题

4



专题1：温差驱动的浅层地源热泵供热推广中务必要关注的局限性和风险

专题2：温差驱动的中深层地热结合热泵供热大面积推广中务必要关注的局限性和风险

建议：一定要用好地下温差+热泵+供热+蓄热

1.1 问题1：实测浅层地源热泵地埋管取热量，远低于设计值

2023年实测调研的浅层地源热泵供热系统实际取热量

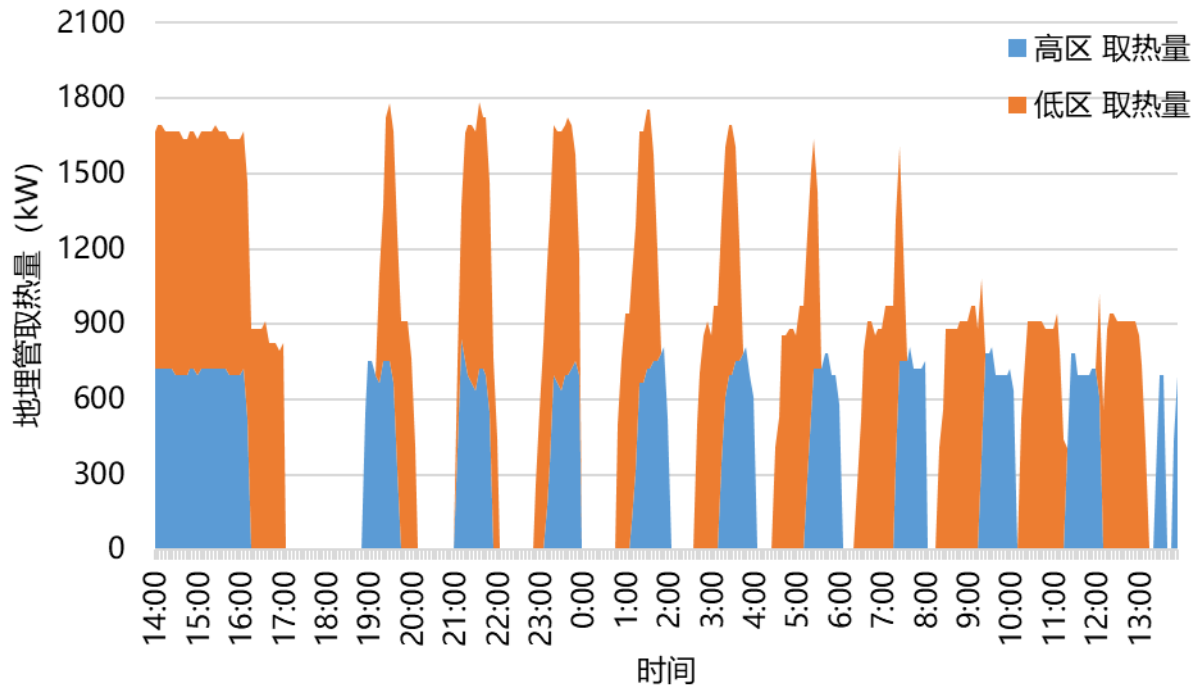
实测项目	地埋管深度(m)	地埋管出口水温(°C)	地埋管入口水温(°C)	单孔取热量(kW)	每延米取热量(W/m)
浅层-1	100	7.7	5.5	1.6	16.3
浅层-2	120	12.1	9.1	4.0	33.7
浅层-3	120	13.7	10.2	4.3	35.5
浅层-4	120	8.3	6.7	1.7	14.3
浅层-5	120	9.6	6.2	2.1	17.8
浅层-6	110	7.9	5.8	2.5	22.5
浅层-7	110	11.0	8.2	4.1	37.7
浅层-8	100	12.2	10.0	2.3	22.6
浅层-9	120	13.3	11.8	3.2	26.9
通常设计值	120 - 160	15	10	4.8 - 6.4	38 - 42

1.1 浅层地埋管实际取热量分析：取热量不足原因很多

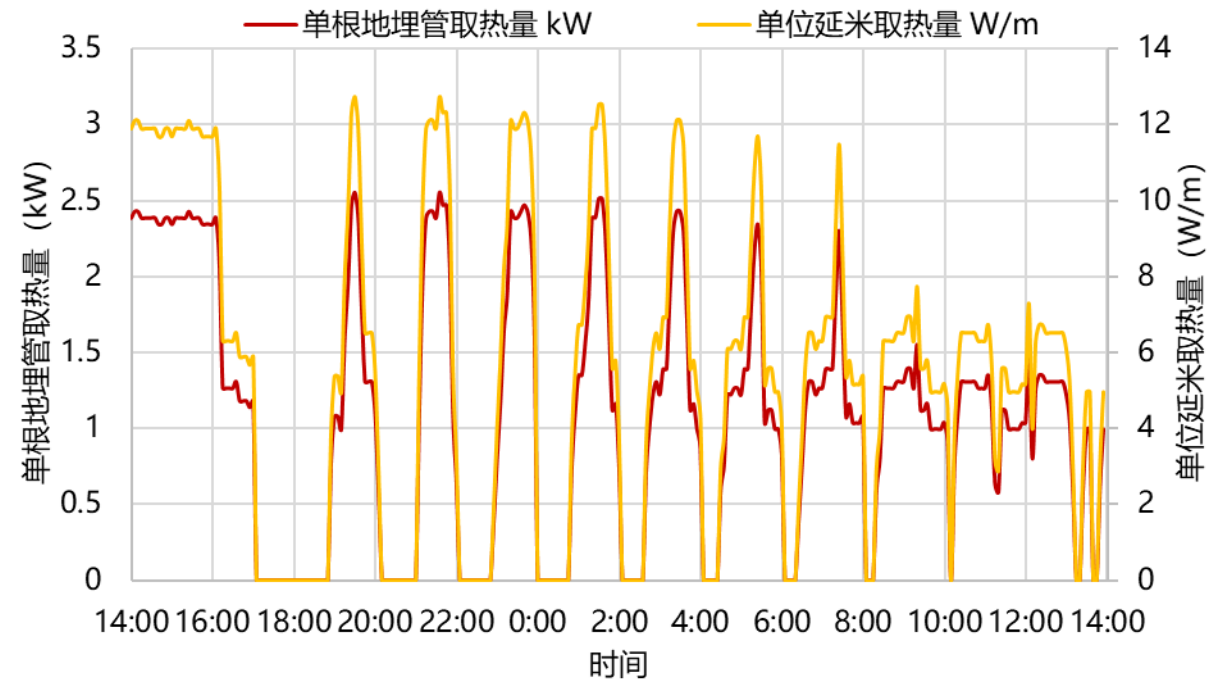
工程项目概况

- 取热孔：建成849根单U型浅层地埋管，投用699根，单孔200米深@10kW取热量；测试时间：2024年1月
- 运行实测：运行669根200米单U型浅层地埋管，地埋管进、出水温度约7.8/10.5℃，地埋管总流量508.0m³/h；
- 实测结果：折合单根地埋管取热量仅为2.32kW，单位延米取热量约为11.59W/m，远小于设计值；

典型日高低区地埋管取热量监测



浅层地埋管取热性能评估



1.1 浅层地埋管换热影响分析：流量，各子系统循环流量不平衡

- 本项目浅层地埋管共有4个地块：商业地块2#227根、商业地块3#272根、住宅地块27#00根、住宅地块10#150根（未启用）；
- 各地块地埋管实际流量分配很难达到平衡；同时地下岩层温度条件也不同，实际每延米取热量都很低（**设计值50.0W/m**）；缺少实际**地温监测值**，很难反算地埋管换热器的关键参数“**等效KF**”，实际**DT**也不知道

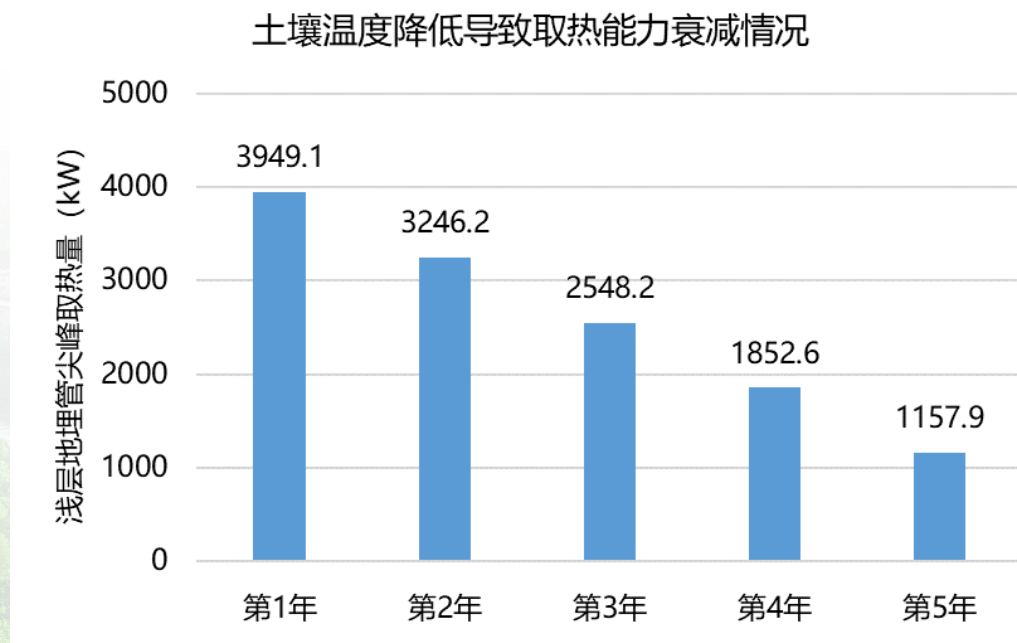
区域	商业地块2#	商业地块3#	住宅地块7#	总计/加权平均
出地埋管水温 °C	10.1	11.8	10.0	10.5
进地埋管水温 °C	7.8	7.8	7.8	7.8
进出水温差 °C	2.3	4.0	2.2	2.7
流量 m ³ /h	194.3	140.1	173.6	508.0
取热量 kW	521.3	653.6	445.7	1620.6
地埋管数量 根	227	272	200	699
每根地埋管取热量 kW	2.30	2.40	2.23	2.32
单位延米取热量 W/m	11.5	12.0	11.1	11.59



1.2 另一个关键问题：夏季补热量不足，取热能力迅速衰减（取热是关键）⁸

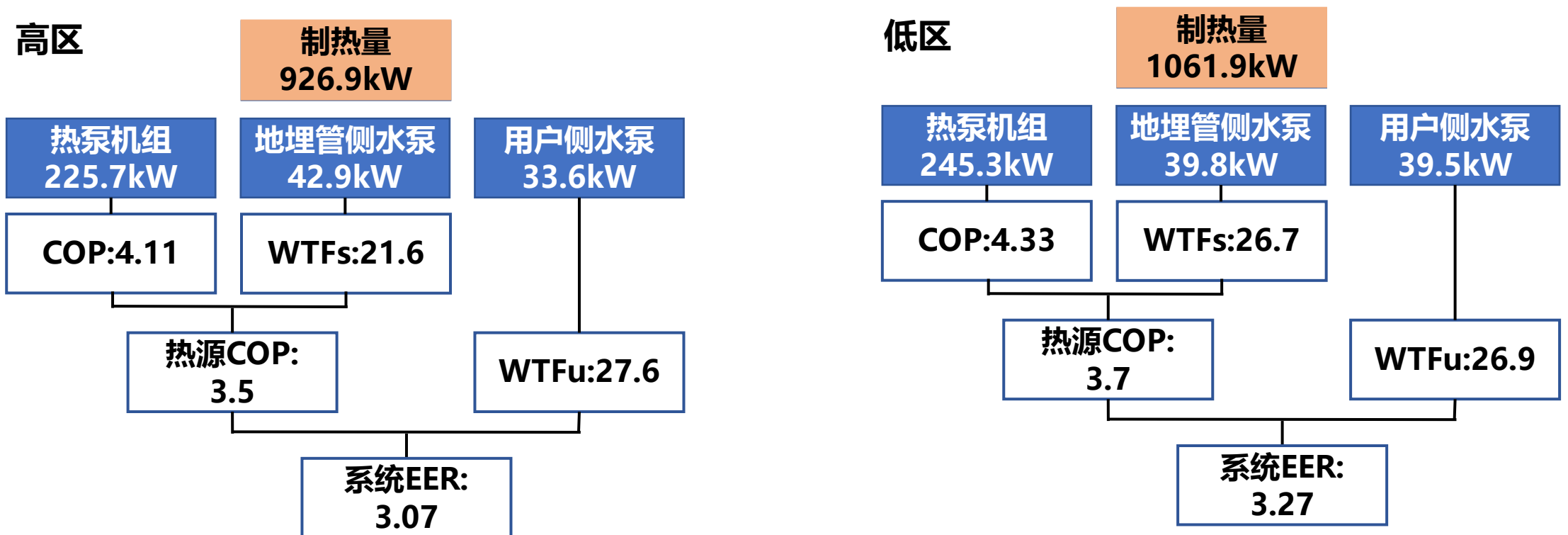
- 浅层地埋管必须需要满足冬季取热量与夏季排热量的平衡，才有可能确保土壤温度稳定，但**本项目仅冬季取热，夏季无排热/补热，地下土壤岩层温度很快衰减**；因为供热是“刚需”，供冷费用很难收取（实际供冷电耗很高）
- 以本项目近期稳定在70%入住率，供热面积为14.3万m²，供热季累计供热量4.28万GJ，从地下取热2.85万GJ计：
- 以849根200米地埋管为例，管间距为6米，则对应土壤体积为611.3万m³，取土壤密度2700kg/m³，热容850 J/(kg·°C)，则**地埋管群周围土壤每年温降达到2.03°C**；可见，**冬季的DT很关键**，是取热量的决定因素
- 如地埋管只负责供热：该项目浅层地埋管取热能力每年衰减17.7%，第5年供热能力仅为当前的30%；

	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5	情景6
入住率	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
供热面积 万m ²	10.18	12.22	14.25	16.29	18.32	20.36
供热指标 GJ/m ²	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
年供热量 万GJ	3.05	3.66	4.28	4.89	5.50	6.11
系统COP	3	3	3	3	3	3
年取热量 万GJ	2.04	2.44	2.85	3.26	3.66	4.07
地埋管数量 根	849	849	849	849	849	849
地埋管体积 万m ³	611.3	611.3	611.3	611.3	611.3	611.28
土壤密度 kg/m ³	2700	2700	2700	2700	2700	2700
土壤热容 J/(kg·°C)	850	850	850	850	850	850
年均温降 °C	1.45	1.74	2.03	2.32	2.61	2.90



1.3 问题3：浅层地埋管热泵设备和系统实测能效都很低

- 时段：2024年1月11日14:30；由于地埋管（热源侧）出水温度低，热泵COP很难达到5.0以上
- 热泵机组：高区热泵机组COP为4.11，低区热泵机组 COP为4.33，均低于额定值4.81；
- **水泵电耗：不可忽视，地埋管侧与供热用户侧水泵输配系数约为25左右，均低于50的设计值；**

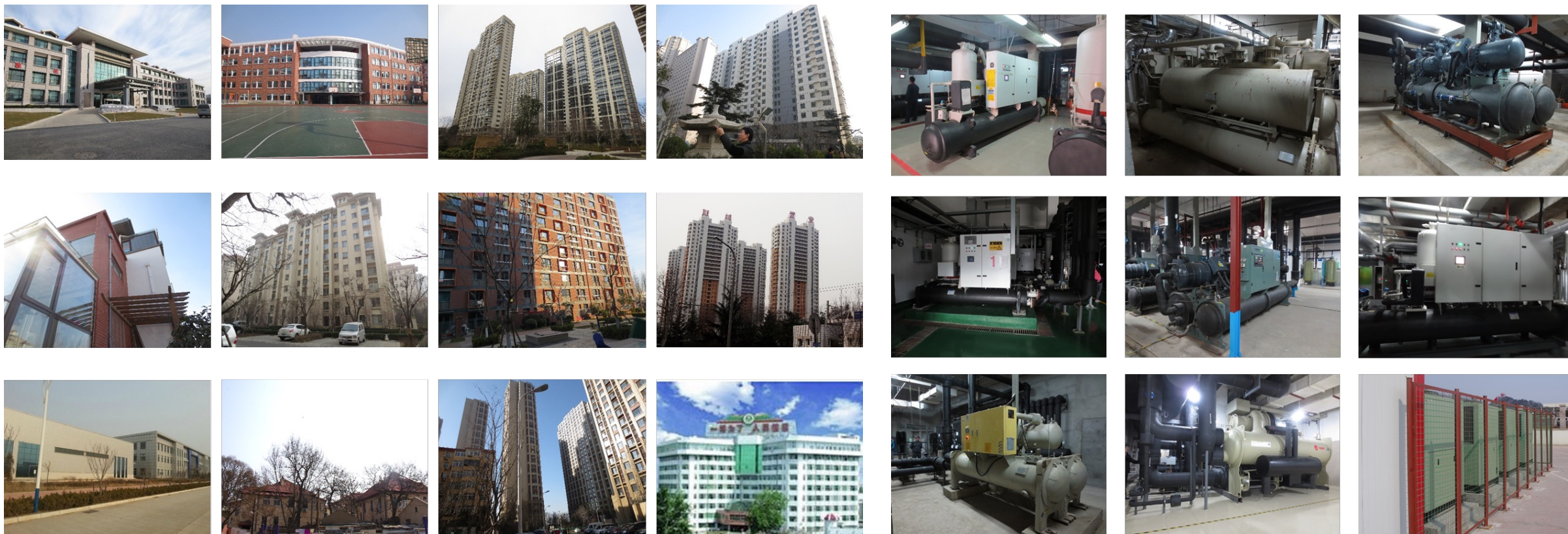


1.3 实测各种电驱动热泵供热的实际效果

编号	热源	建筑功能	建筑面积 (m ²)	末端形式	编号	热源	建筑功能	建筑面积 (m ²)	末端形式
A	中水	住宅	292,700	地暖	J	地埋管	住宅及辅助	141,289	风机盘管
B	空气	住宅	3,000	暖气片	K	地埋管	工厂	202,000	空调箱 风机盘管
C	地埋管	住宅	43,000	辐射天棚+新风	L	污水 (海水备用)	住宅、商业	742,000	暖气片
D	海水 (直连)	住宅+酒店	260,000	酒店: FCU 住宅: 地暖+部分暖气片	M	海水 (直连)	住宅、办公	58,800	-
E	地埋管	学校	18,500	风机盘管	N	地埋管	门诊楼、病房	67,688	大空间: 全空气 其他: 风机盘管+新风
F	地埋管	学校	32,769	教室: 风机盘管+新风 大空间: 全空气	O	地埋管	住宅及辅助	112,153	风机盘管
G	地埋管	办公 实验室	35,024	风机盘管	P	地埋管	商业	-	风机盘管
H	污水	住宅	40,000	暖气片+地暖	Q	污水	住宅、商业	1,360,000	风机盘管
I	地埋管	住宅	27,236	风机盘管	R	海水 (间连)	办公	8,138	风机盘管+新风 少量空调箱

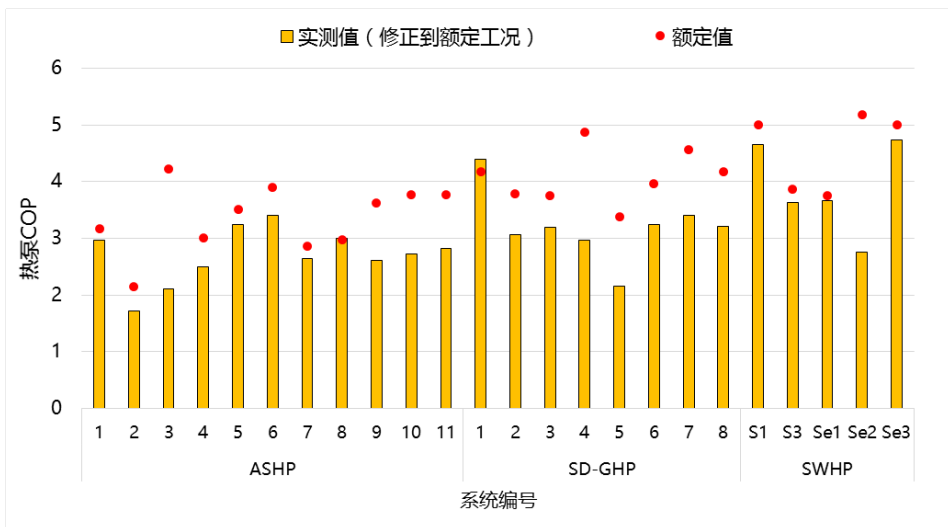
实测项目供热面积340万m²

1.3 对实际工程项目展开实测：运行工况，连续监测

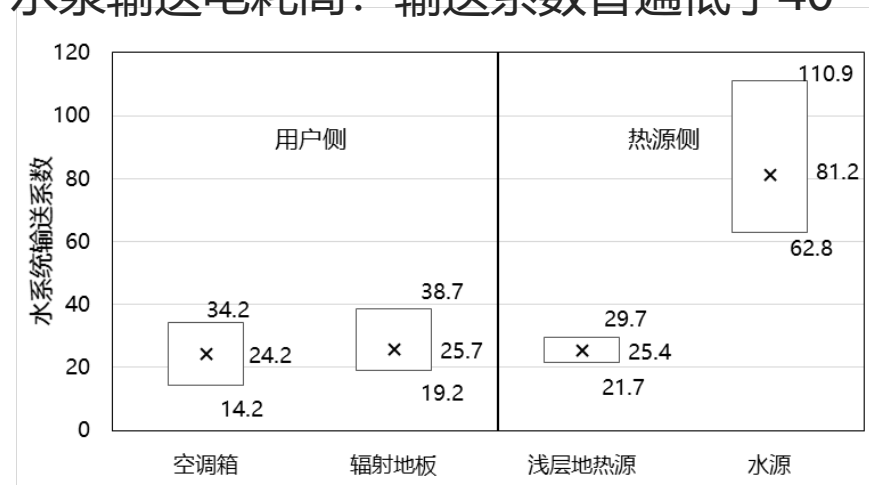


1.3 不是用了“热泵”就是“节能”：应用效果难言“高效”

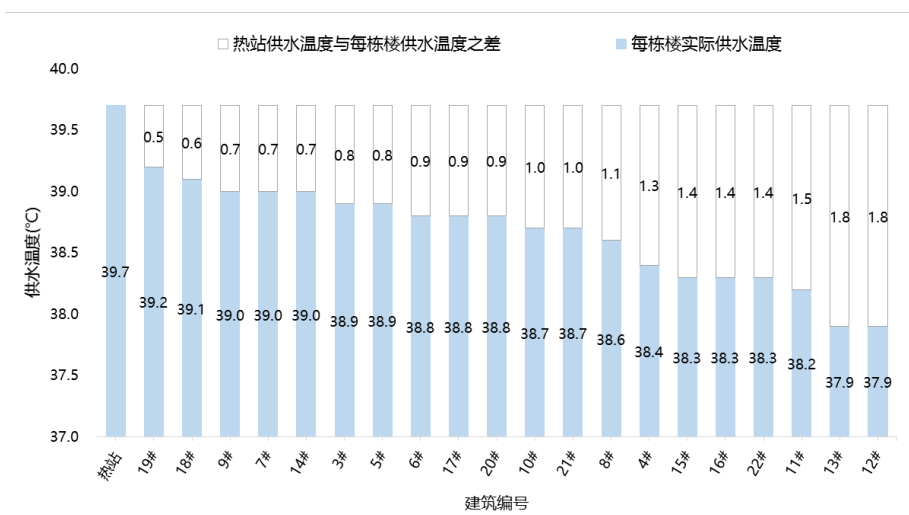
➤ 热泵机组运行性能偏低，大量系统能效不达标



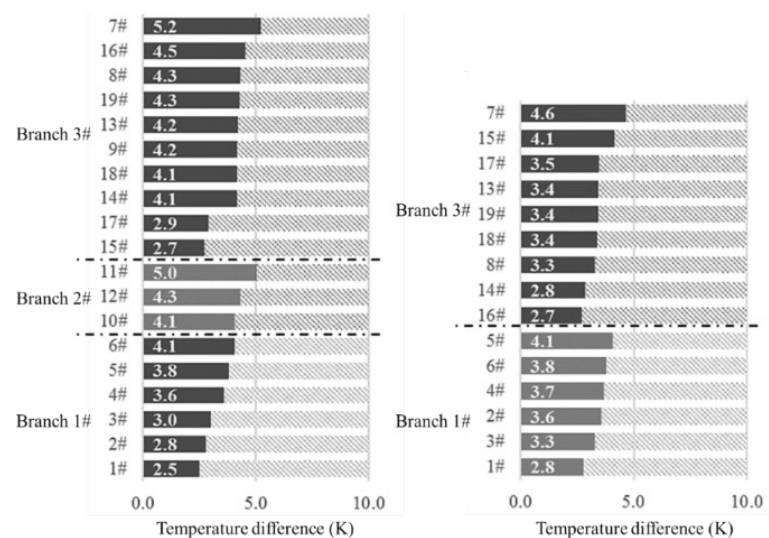
➤ 水泵输送电耗高：输送系数普遍低于40



➤ 热泵集中供热：庭院管网热损失较大



➤ 热泵集中供热：水力失调，热力不平衡，过热损失存在



1.4 浅层地埋管的结构风险：土壤热蠕变和热固结风险

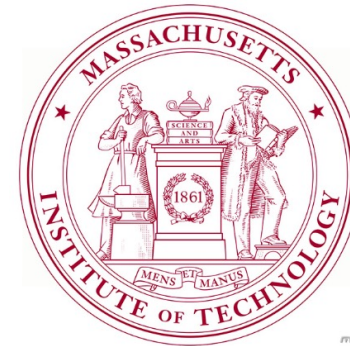
地埋管换热器设计中的岩土工程风险考虑

Canadian Geotechnical Journal, Volume 58, Number 9, September 2021 —MIT

Geotechnical considerations in the design of borehole heat exchangers

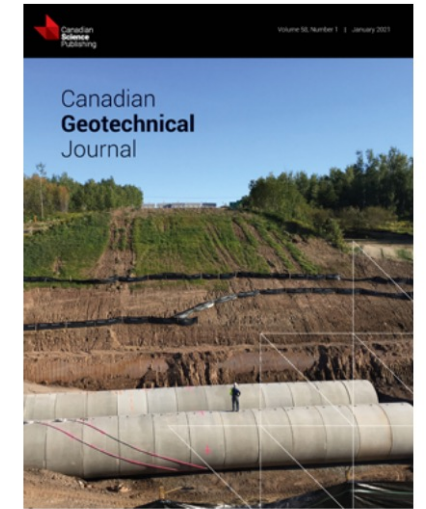
Authors: [Despina M. Zymnis](#) and [Andrew J. Whittle](#) | [AUTHORS INFO & AFFILIATIONS](#)

Publication: Canadian Geotechnical Journal • 1 October 2020 • <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0118>



MAIG

PUBLISHED IN



Canadian Geotechnical Journal

Volume 58 • Number 9 • September 2021

摘要：ABSTRACT

The use of ground source heat pumps to transfer heat to and from the ground via borehole heat exchangers (BHE) is among the most energy efficient techniques for space heating and cooling. Broader applications in urban environments require more careful evaluation of hydro-mechanical behavior of soil to ensure their reliable long-term performance and to minimize adverse effects on adjacent structures.

An advanced soil model has been integrated within a finite difference (FD) framework, to solve coupled thermo-hydro-mechanical (THM) problems in an axisymmetric space. The FD simulator is applied to a prototype project and the ground conditions represent typical stress history profiles found in Geneva, Switzerland. An extensive parametric study is undertaken to study the long-term THM response of clay for a broad range of heat exchanger design parameters.

The results show that significant settlements can be induced due to the long-term operation of BHEs (i.e., over periods from 10–50 years). The parametric study gives useful guidelines for heat exchanger design and identifies a design space of optimum solutions that meet pre-specified foundation settlement criteria. The study provides a qualitative investigation and a systematic framework for analyzing the long-term THM response of clay to seasonal heating and cooling.

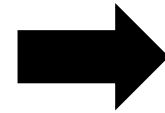
Our work has demonstrated that the long-term operation of borehole heat exchangers in clay for a realistic (but hypothetical) site in Geneva induces significant irreversible differential and total ground settlements. These are critically related to the

主要结论：地埋管换热器的长期运行，可能会带来土壤显著的不可逆的变化以及整体地面的沉降风险

1.4 浅层地埋管的结构风险：土壤热蠕变和热固结风险

文献调研：(1. Introduction)

BHEs are typically installed in surficial soils, in order to avoid high drilling costs. Laboratory measurements show that heating and cooling of clay causes irreversible movements (Baldi et al. 1991; Campanella and Mitchell 1968; Hueckel and Baldi 1990; Abuel-Naga et al. 2006; Cekerevak and Laloui 2004), while cyclic heating and cooling can generate significant long-term accumulation of thermal strains (Campanella and Mitchell 1968; Hueckel et al. 1998; Di Donna and Laloui 2015). Therefore the continuous operation of GSHP installations can result in significant long-term settlements, which could adversely affect the overlying structures or adjacent foundations.



实验表明：对土壤进行加热和冷却会造成不可逆的移动；循环加热和冷却会产生显著的长期热应变力的积累。因此地源热泵的安装以及持续运行可能会导致显著的长期沉降，这可能会对上层覆盖的结构或相邻的地基产生不利影响和风险

文中涉及文献：

1. Baldi, G., Hueckel, T., Peano, A., and Pellegrini, R. 1991. **Developments in modeling of thermo-hydro-geomechanical behaviour of Boom clay and clay-based buffer materials.** Report 13365/2 EN. Luxembourg: Publications of the European Communities.
2. Campanella, R.G., and Mitchell, J.K. 1968. **Influence of temperature variations on soil behavior.** ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 94(SM3): 709–734.
3. Hueckel, T., and Baldi, G. 1990. **Thermoplasticity of saturated clays: experimental constitutive study.** ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 116(12): 1768–1796.
4. Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Ramana, G.V., Grino, L., Rujvapat, P., and They, Y. 2006. **Experimental evaluation of engineering behavior of Bangkok clay under elevated temperature.** ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(7): 902-910.
5. Cekerevac, C., and Laloui, L. 2004. **Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay.** International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28(3): 209-228.
6. Hueckel, T., Pellegrini, R., and Del Olmo, C. 1998. **A constitutive study of thermoelastoplasticity of deep carbonatic clays.** International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 22(7), 549-574.
7. Di Donna, A., and Laloui, L. 2015. **Response of soil subjected to thermal cyclic loading: Experimental and constitutive study.** Engineering Geology, 190: 65-76 Page 17 of 46

1.4 浅层地埋管的结构风险：土壤热蠕变和热固结风险

- 密集型浅层地埋管换热器将直接导致周围土壤发生**热蠕变和热固结**效应，改变土壤原有物理性质，**造成不可逆的沉降**；
- 以取热量30W/m估算，运行10年，**至少导致所在地土壤沉降30厘米**，运行20年至50年，**再沉降10厘米**。并随半径方向逐步向周围影响

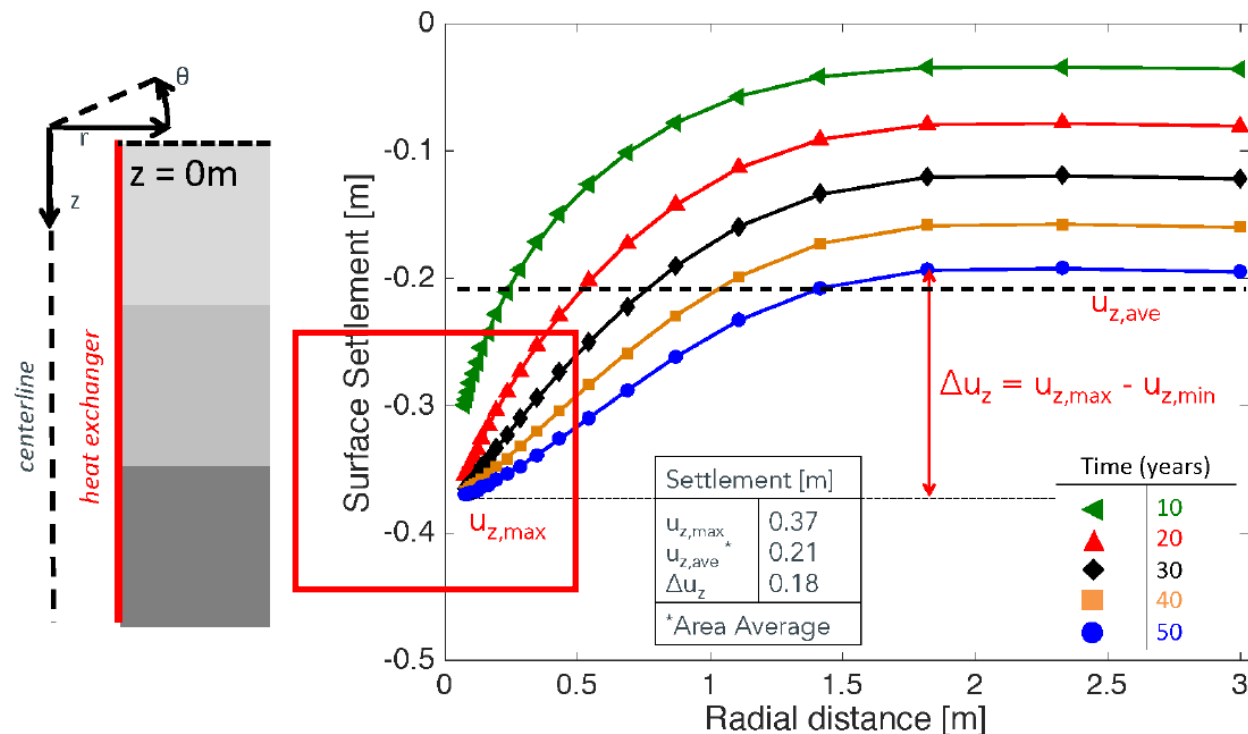
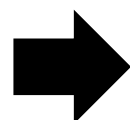
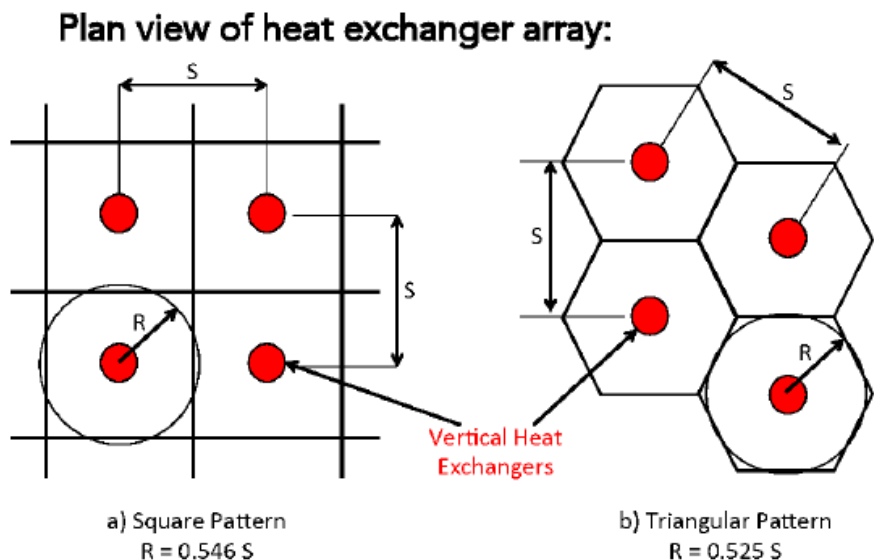
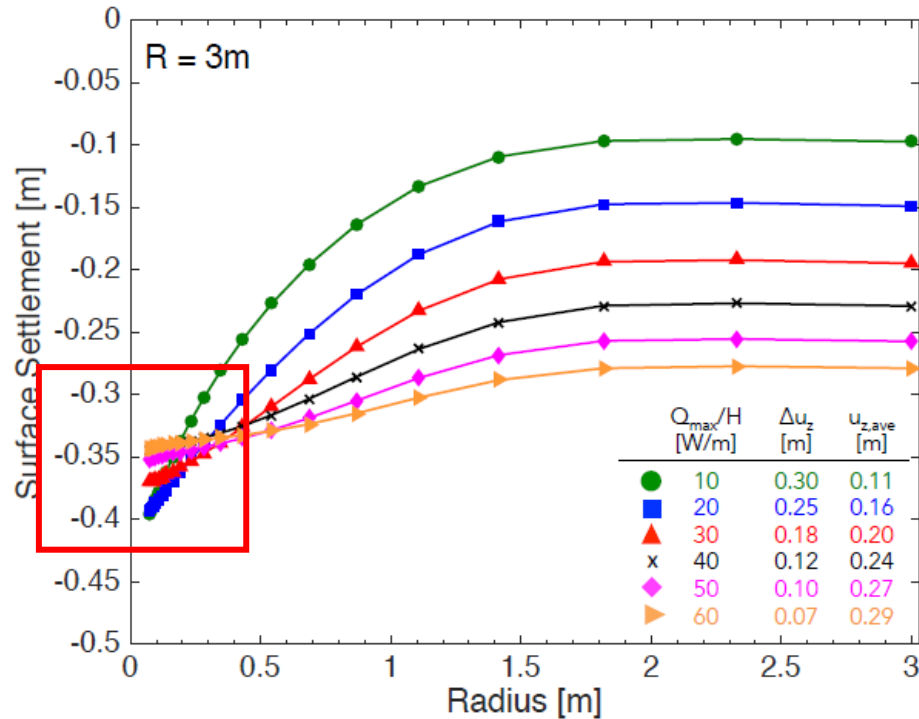


Figure 13: Predictions of settlement distribution at different snapshots in time for the illustrative case ($R=3m$, $Q_{max}/H = 30W/m$) and definition of surface settlement measurements

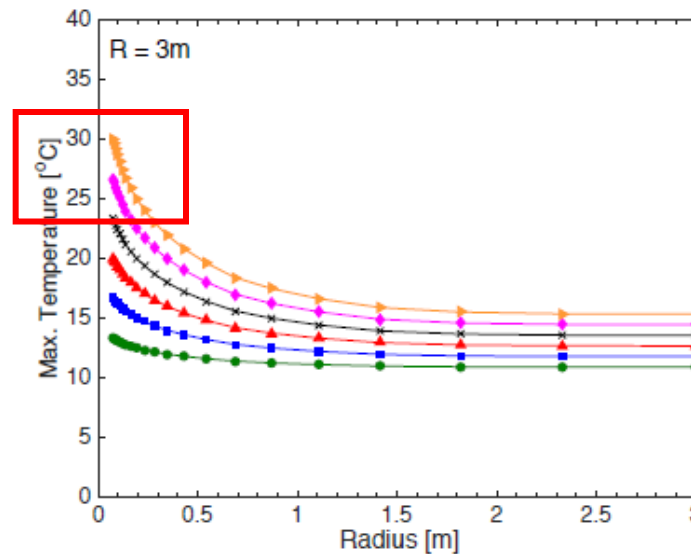
1.4 浅层地埋管的结构风险：土壤热蠕变和热固结风险

- 当孔间距半径不变 ($R=3m$) 时，最大延米热流量 $Q_{max}/H=10\sim60W/m$ 之间沉降影响情况分析
- 高热流量下，产生较大超孔隙水压力 P_w ，造成较大的平均沉降；延米取热量越大，可能的沉降越严重
- 随着热流量增加，地表沉降现象越显著、平均地表沉降 $U_{z,ave}$ 增加，差异沉降 ΔU_z 减小



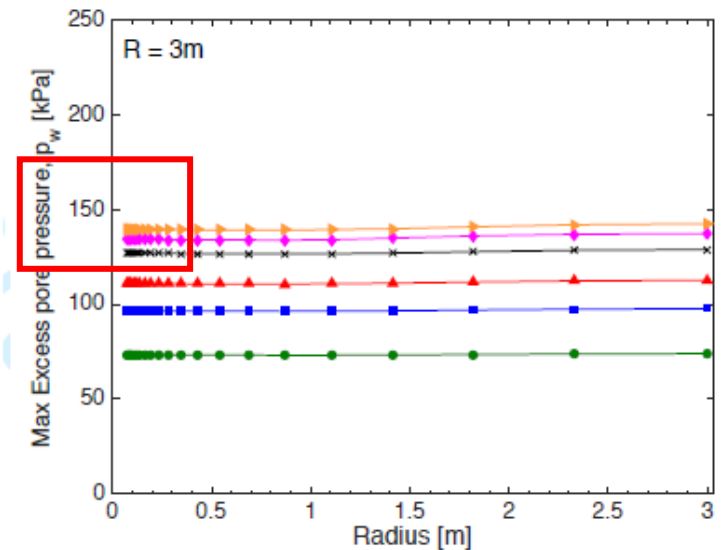
a) Surface Settlements

地表沉降



b) Maximum Temperature

最高温度

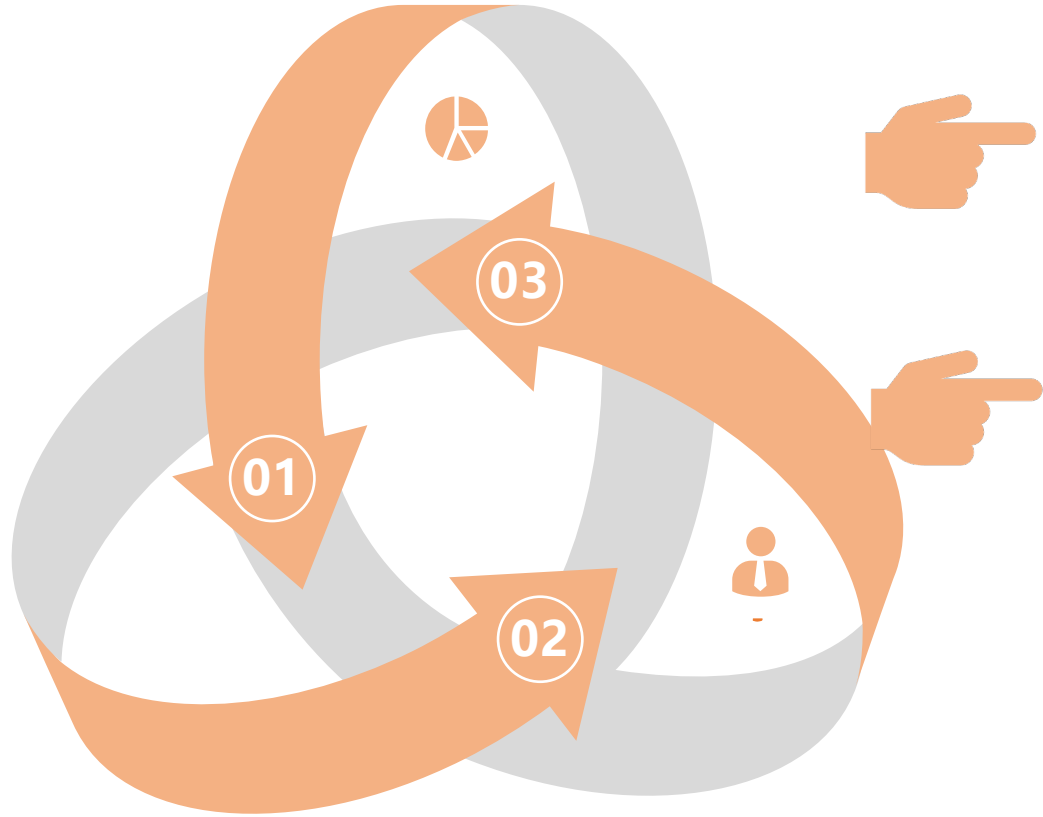


c) Maximum Excess pore pressure

最大超孔隙水压力

今日讨论的主要内容：围绕地下温差的传热问题

17



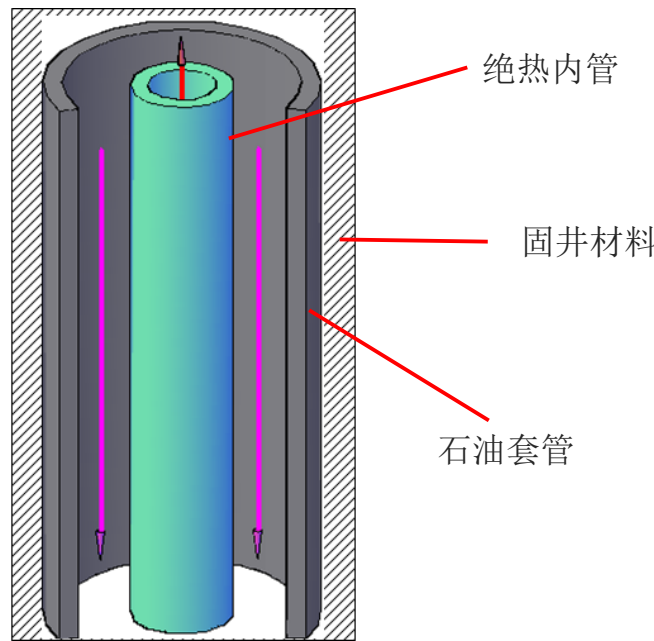
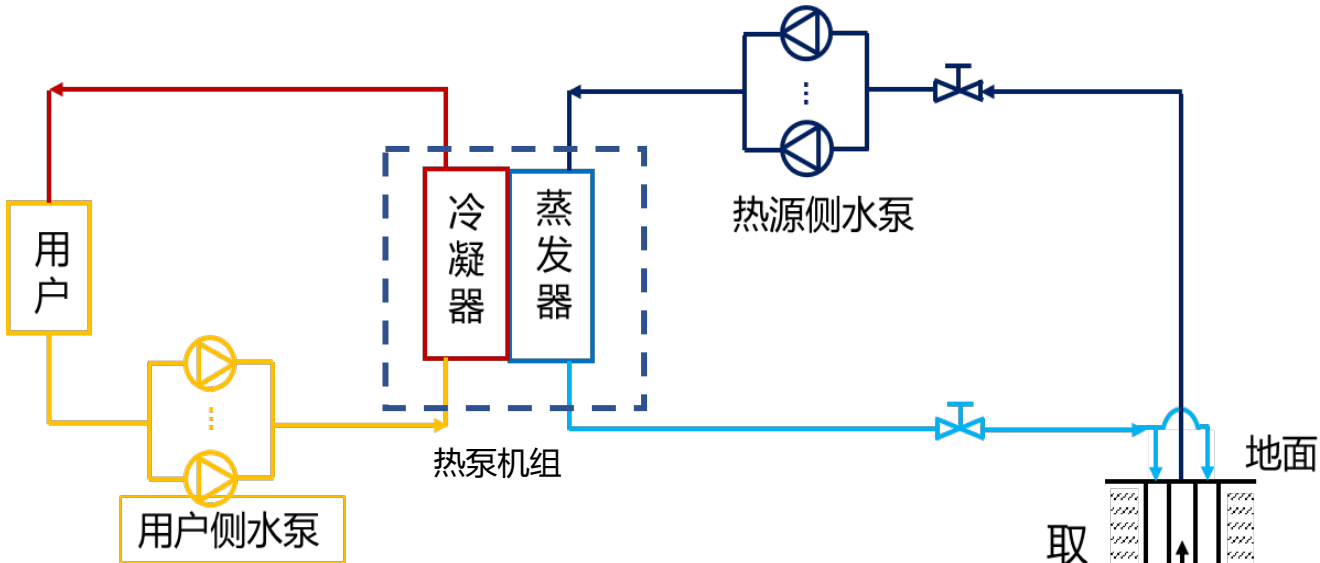
专题1：温差驱动的浅层地源热泵供热推广中务必要关注的局限性和风险 – 现象是取热量不足、换热不均匀、设备系统效率低，存在热蠕变和热固结导致可能的沉降风险，本质问题是什么？对DT驱动传热过程和科学机理的研究

专题2：温差驱动的中深层地热结合热泵供热大面积推广中务必要关注的局限性和风险

建议：一定要用好地下温差+热泵+供热+蓄热

2.1 中深层地热间壁式换热：利用“温差” + 高效小压缩比热泵

2013开始



地下金属换热器结构示意图

密闭换热器，与岩层“换热不碰水”，对环境无干扰

技术简介

- 通过钻机向地下2~3km深处岩层钻孔，固井；
- 在钻孔中安装封闭的**套管结构换热器**；
- 换热器外壁与岩层**间壁换热**，提取中深层地热能；
- 地面结合**热泵供热系统**：提升水温+拉低回水；

关键特点

- 不受资源禀赋、外界环境的限制和影响，具有普适性（成孔工艺、取热优劣还是和地热、地质条件有关）；
- 避免了地热水直接利用可能带来的环境问题；
- **极有可能：具有普适性、稳定性、可持续性、对环境影响最小中深层地热能利用方式；**

2.1 超长地下间壁换热器优点：占地小，单孔取热量大，出水温度较高

钻孔施工：



钻孔完成（检查井）：



钻孔完成 1（地面）：

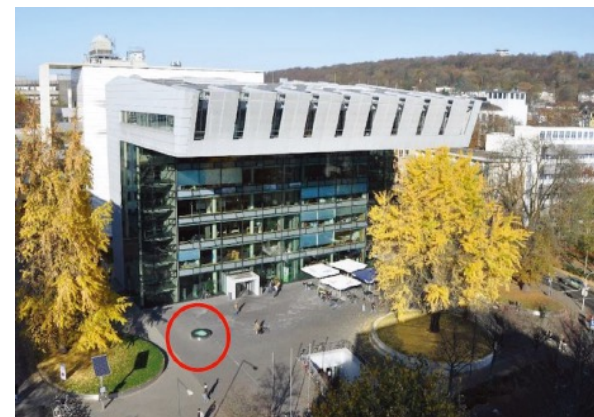


钻孔完成 2（地面）：



2.2 中深层间壁换热在国外率先提出：为何没有持续工程应用？

地区	井深 m	井底温度 °C	进水温度 °C	出水温度 °C	循环流量 m ³ /h	换热功率 kW	延米功率 W/m	应用方式
美国 Hawaii	1962	110	30	98	4.7	370	188.6	/
德国 Penzlau	2786	108	40	60	6.1	139	49.9	板换换热
德国 Aachen	2500	85	30	40	10.1	117	46.8	直接供热
瑞士 Weggis	2300	78	32	40	10.7	100	43.5	直接供热



位于德国亚琛工业大学的实验井 (2500m)

□首次于1995年由Rybach教授及Kohl教授在文献中报道，并于夏威夷搭建实验台，出水温度尖峰值达到98°C，可用于直接供热，证明了该取热方式的可行性；但夏威夷地质结构（海底火山岩隆起）太特殊，不具备普遍意义

□应用特点：1) 循环流量小（4~10m³/h）；2) 直接供热或通过板换换热，进水温度高（>30°C）；3) 取热量“看似”较低（40~70W/m），远小于水热型直接利用方式；

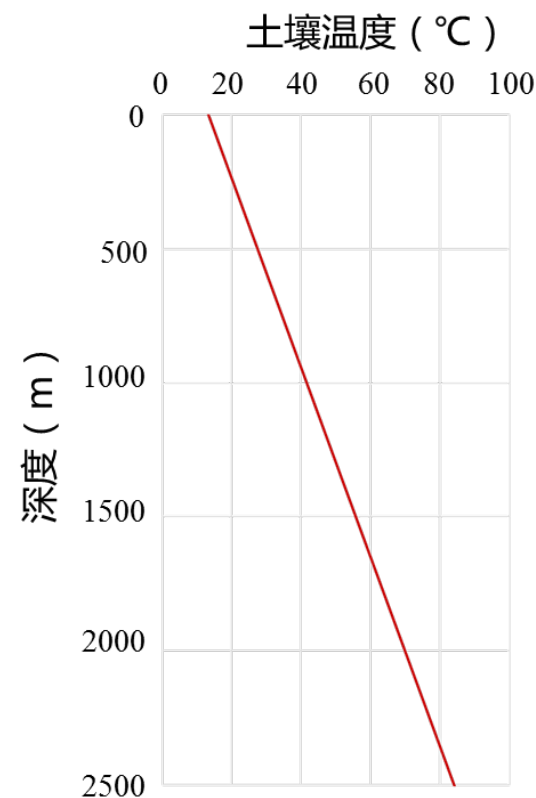
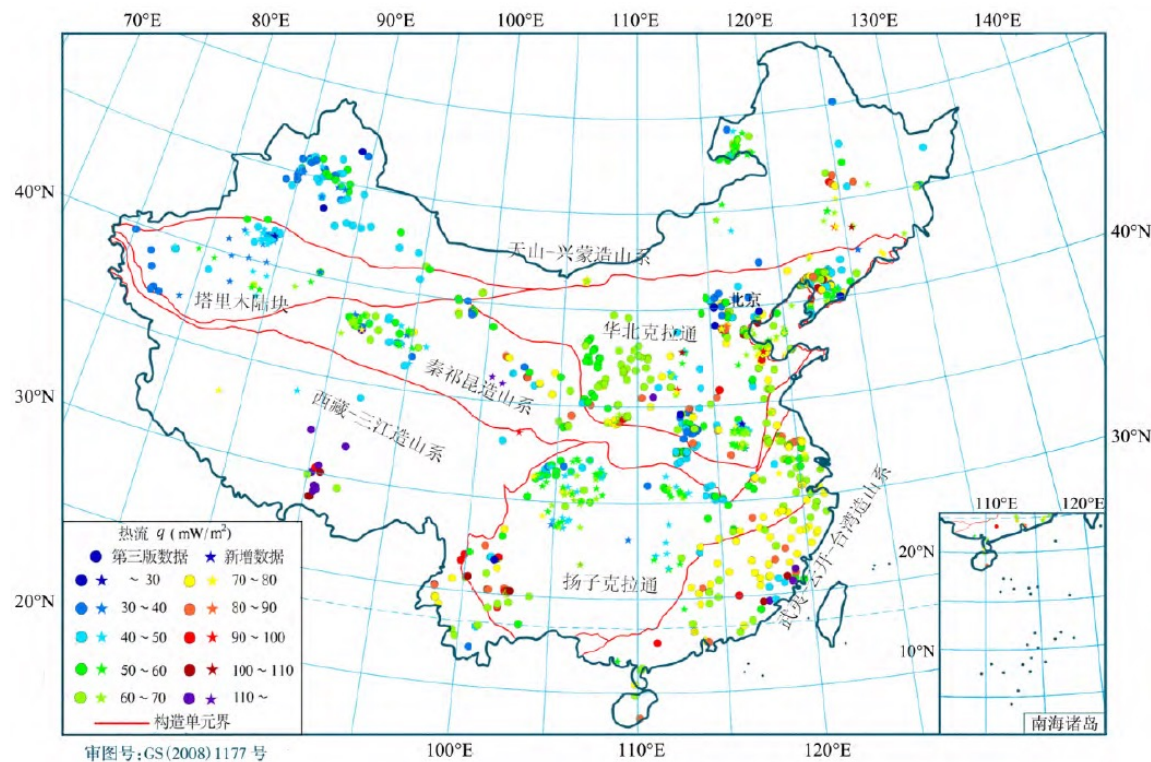
□国外建筑密度小、水热资源丰富，间壁换热概念在国外并没有得到重视，**仅有个别实验井进行工程尝试，缺少商业化应用案例；**

□绝大多数实验井在短期运行后最终关闭，包括德国亚琛工业大学的实验井，2009年试运行，2011年关闭；

2.3 局限性1：地温梯度、自热资源是否有利于换热（温差）

21

□ 中国大陆地区大地热流测点地理分布图（第四版）

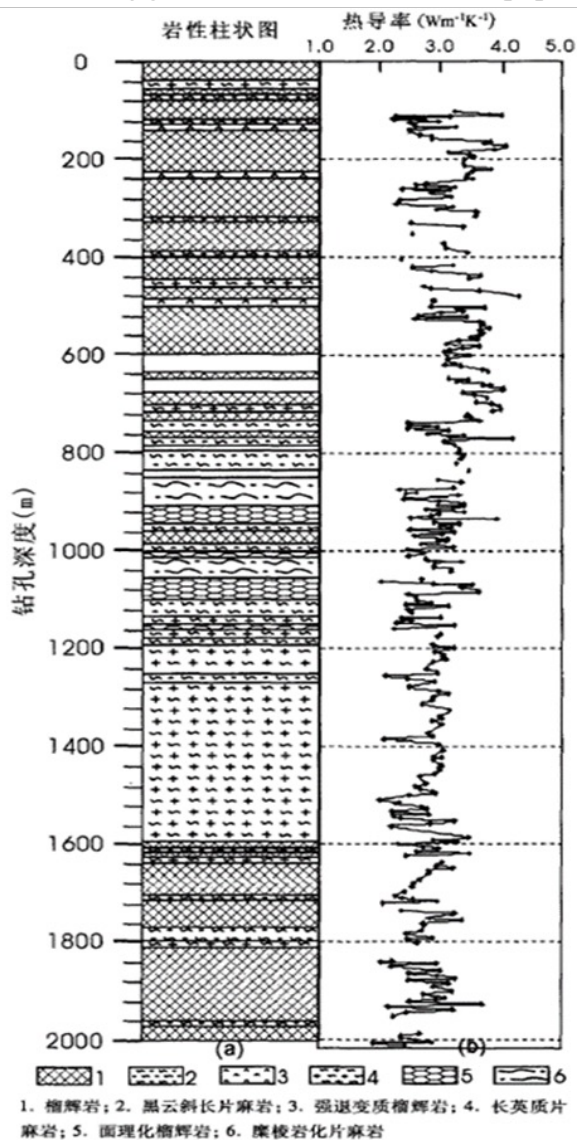


□ 全球地热平均热流值为 $60\text{mW}/\text{m}^2$ ，我国北方地区平均热流密度处于 $50\sim 80\text{mW}/\text{m}^2$ ，陕西省平均热流密度处于 $70\sim 80\text{mW}/\text{m}^2$ ；

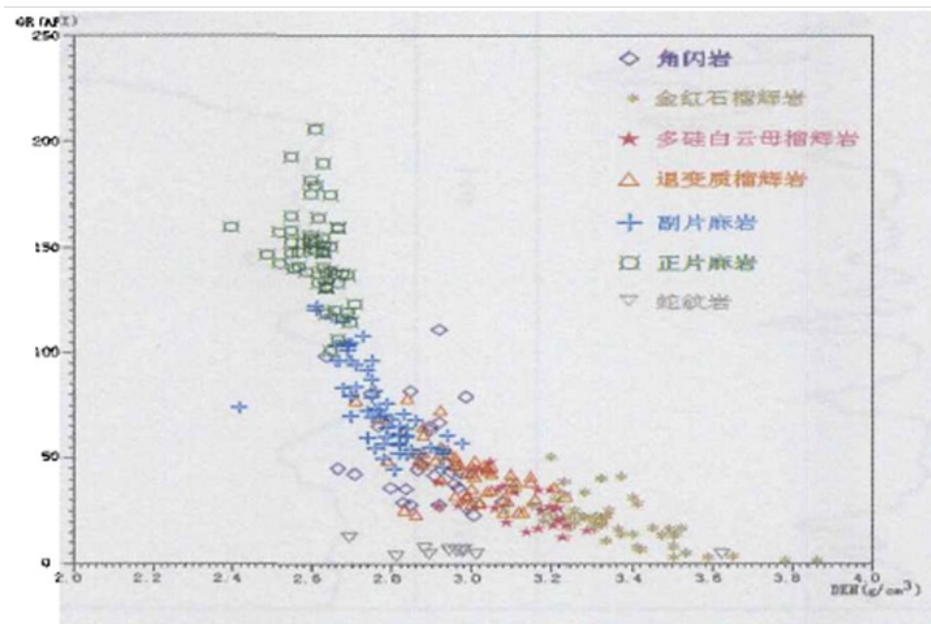
□ 土壤表面温度为 13.3°C ，土壤温升梯度 $2.8\text{-}3.2^\circ\text{C}/\text{百米}$ ， 2000米 深岩层温度达到 70°C ， 2500米 可达 85°C ；

2.3 局限性2: 地质条件是否有利于钻井, 岩层密度和导热性能

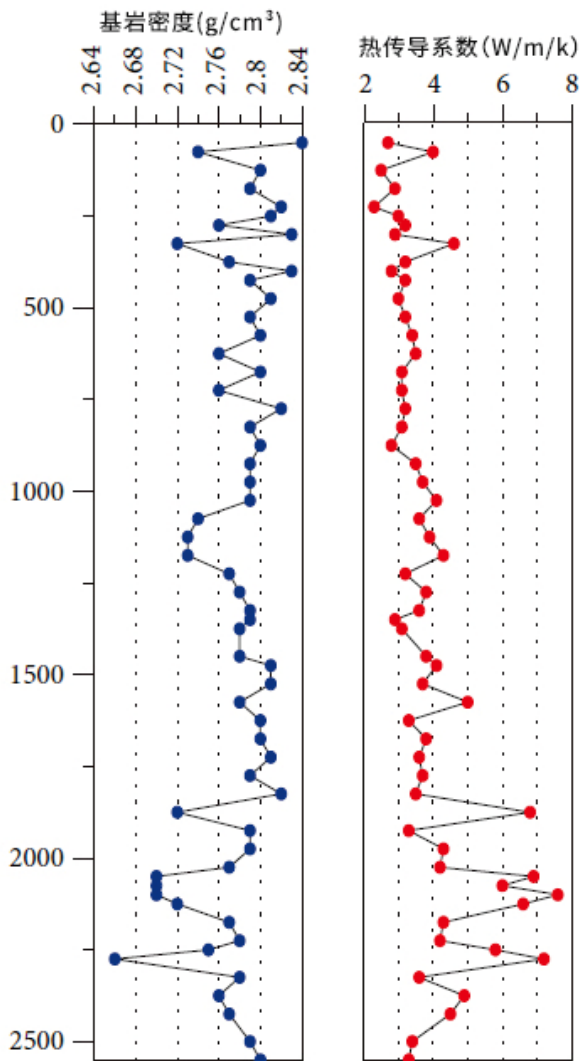
岩石种类与热导率对应图 [1]



岩石种类与密度对应图 [2]

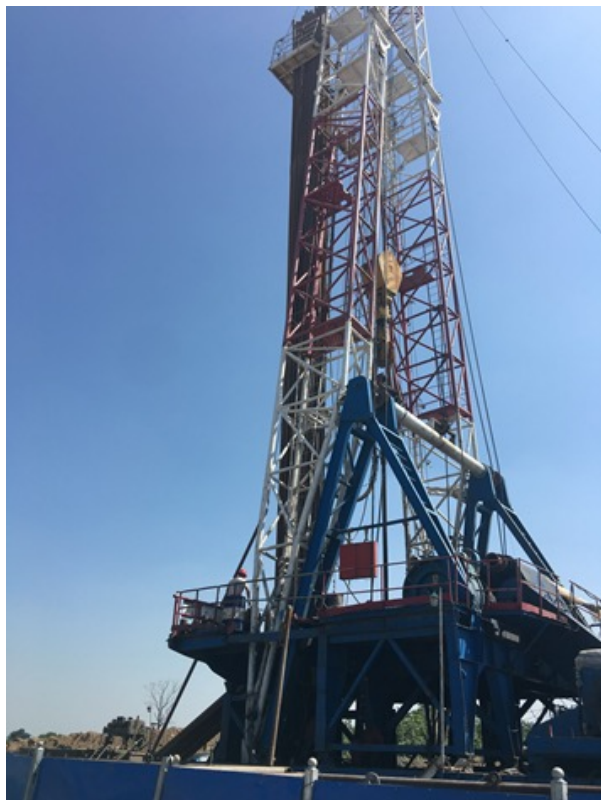


深度m	热导系数 W/(m·K)	密度 kg/m ³	比热容 J/ (kg·K)
0~700	3.265	3400	794
700~1200	2.923	2800	800
1200~1600	2.755	2600	920
1600~2000	2.757	2900	1010
2000~2500	4.031	2740	972



[1] 欧新功等. 中国大陆科学钻探主孔岩石热导率及其各向异性: 对研究俯冲带热结构的启示[J], 2004, 20(1), 0109-18
 [2] 牛一熊, 潘和平等. 中国大陆科学钻探主孔地球物理测井[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 0165-78.

2.3 局限性3： 钻孔工艺复杂， 施工成本偏高， 难度大， 差别大



界	系	统	地方名称(群、组、段)	代号	厚度(米)	岩性描述	
中	白垩系	永川组	壳山组	K ₁ k	>180	浅紫灰色流纹岩、流纹斑岩夹玻屑熔结凝灰岩	
			三段	K ₁ c ³	>210	紫红色沉凝灰角砾岩、凝灰质砂砾岩、凝灰质粉、细砂岩	
			二段	K ₁ c ²	>350	下部紫红色凝灰质砂砾岩、含砾砂岩与凝灰质中细砂岩互层；上部紫红色凝灰质细砂岩、粉砂岩与泥质粉砂岩互层	
			一段	K ₁ c ¹	>145	浅灰白色凝灰角砾岩，局部夹凝灰质含砾砂岩、粉砂质泥岩	
			馆头组	K ₁ g	>80	凝灰质含砾砂岩与凝灰质中粗粒砂岩、粉砂岩互层	
		侏罗系	寿昌组	四段	J ₃ s ⁴	>123	灰紫色斜长流纹斑岩、流纹岩，局部夹英安质角砾凝灰岩
				e亚段	J ₃ s ^{2-e}	266-467	灰色英安质含角砾晶屑玻屑熔结凝灰岩夹流纹质玻屑凝灰岩
				d亚段	J ₃ s ^{2-d}	474-849	浅灰色含集块角砾岩屑玻屑凝灰岩夹凝灰质砂岩、粉砂岩
				c亚段	J ₃ s ^{2-c}	82-357	浅紫灰色流纹英安质晶屑玻屑熔结凝灰岩
				b亚段	J ₃ s ^{2-b}	175-1044	浅灰色流纹质含集块角砾岩屑玻屑凝灰岩夹凝灰质粉砂岩
	a亚段		J ₃ s ^{2-a}	94-417	浅紫灰色流纹英安质含角砾岩屑玻屑熔结凝灰岩		
	罗村组		二段	J ₃ h ^b	250-1551	深灰色英安质晶屑玻屑熔结凝灰岩，含少量角砾，具块状构造	
			一段	J ₃ h ^a	>778	下部为灰色含角砾晶屑玻屑熔结凝灰岩，底部夹含砾砂岩；上部为浅灰色含角砾玻屑凝灰岩，顶部见凝灰质粉砂岩	
			二段	J ₃ l ²	>50	层状安山岩	
			一段	J ₃ l ¹	>200	角砾玻屑凝灰岩，玻屑凝灰岩夹少量砾石、凝灰质细砂岩	
		中生代	渔山尖组	二段	J ₂ y ²	>165	上部为细砂岩，含砾泥质粉砂岩和粉砂质泥岩互层；下部以杂色砂砾岩为主夹灰黑色角砾状灰岩
	一段			J ₂ y ¹	279	青灰、黄绿色泥质粉砂岩、粉砂钙质泥岩间夹岩屑砂岩	
	马洞组		四段	J ₂ m ⁴	>142	浅灰白色中薄层状岩屑石英砂岩，含少量砾石	
			三段	J ₂ m ³	232	灰紫、深灰色中薄层状岩屑中细粒砂岩夹粉砂岩，下部含砾石	
			二段	J ₂ m ²	66	白色厚层状一块状石英砂砾岩，向上砾石趋少，向石英砂岩过渡	
一段	J ₂ m ¹	>30	灰黄绿色中薄层状泥岩、粉砂质泥岩				

- 技术的核心与难点在于2~3千米地下密闭套管式换热器的成孔，也是技术应用成本主要部分；
- 针对不同深度、不同地质条件，施工工艺、周期及成本存在较大差别；
- 项目规划设计阶段，明确当地地热地质条件很关键；对于既有项目，需要明确地下已有设施+管廊，并且避开；

2.4 已开展的实际调研：中深层地源热泵供热系统实测

24

2023年实测和调研中深层地源热泵供热系统实测项目基本信息：均在陕西关中地区（西安，咸阳等地）

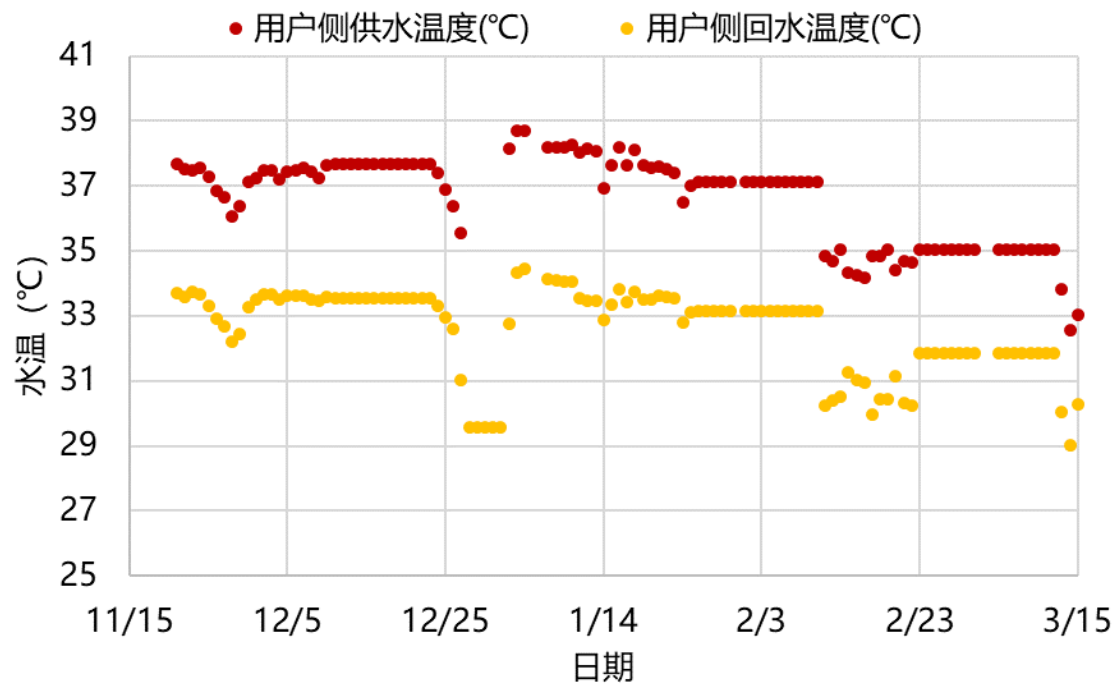
项目编号	MG1	MG2	MG3	MG4	MG5	MG6	MG7	MG8
建筑功能	住宅	住宅	住宅	住宅	住宅	住宅	住宅	办公
设计供热面积m ²	20600	43500	56000	37800	133400	185100	15000	33160
实际供热面积m ²	6000	18700	53000	7560	57000	59500	15000	15000
末端形式	辐射地板							风系统
装机功率 kW	1040	1986	2600	2160	5680	7560	500	2410
地埋管深度m	2000	2000	2000	2000	2500	2500	2500	2800
地埋管数量	2	3	5	3	8	10	2	2
布置方式	直线	直线	直线	直线	L型	L型	直线	直线
平均管间距m	16.0	15.0	18.8	12.0	15.0	15.0	20.0	14.0
监测时长	2周	2周	3个供热季	2周	2个供热季	1个供热季	2月	2个供热季

2.4 对照浅层地源热泵：开展中深层井下换热地源热泵实测

项目	深度(m)	进水温度(°C)	出水温度(°C)	单孔取热量(kW)	单位延米取热量(W/m)
中深层-1	2000	26.9	18.9	257.6	128.8
中深层-2	2000	29.8	19.3	151.9	76.0
中深层-3	2000	20.0	9.7	294.4	147.2
中深层-4	2000	23.3	19.3	122.7	61.4
中深层-5	2500	29.1	18.4	247.2	98.9
中深层-6	2500	28.9	20.0	195.2	78.1
中深层-7	2500	34.0	20.2	302.7	121.1
中深层-8	2800	41.0	23.0	672.0	240.0

2.4 已开展的实际调研：2000米深换热孔，MG3

□ 2000米深换热孔：MG3 项目（2021-2022年供热季运行分析）

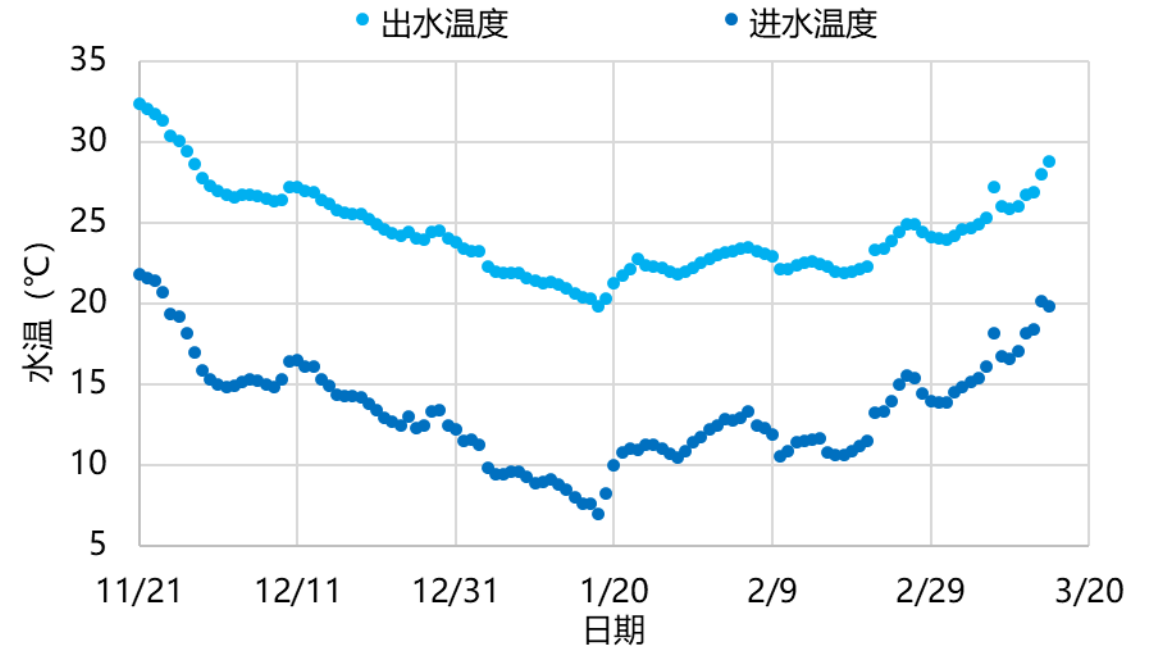
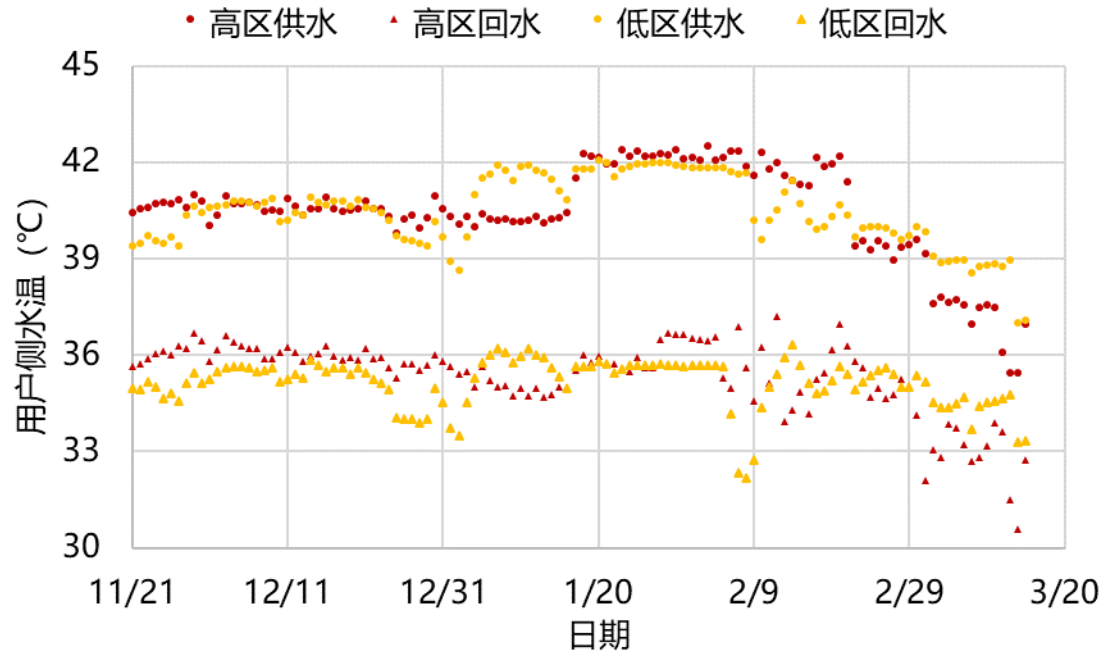


- 用户侧供水温度根据供热需求进行了相应的调节，在初寒气和末寒期，供水温度维持在35-37°C左右，而到了严寒期为了保障供热效果，供水温度提升至39°C左右。整个供暖季用户侧平均供回水温度分别为37/33°C
- 对于热源侧，由于该项目中深层地埋管建设深度仅为2000米，平均每根中深层地埋管承担供热面积达到1.1万m²。
- 供暖初期出水温度能达到25°C以上，随着系统运行，严寒期出水温度降低至20°C左右。整个供暖季热源侧平均进出水温度分别为16/23°C。

2.4 已开展的实际调研： 2500米深换热孔， MG5+6

27

□ 2500米深换热孔： MG5+6 项目（2021-2022年供热季运行分析）



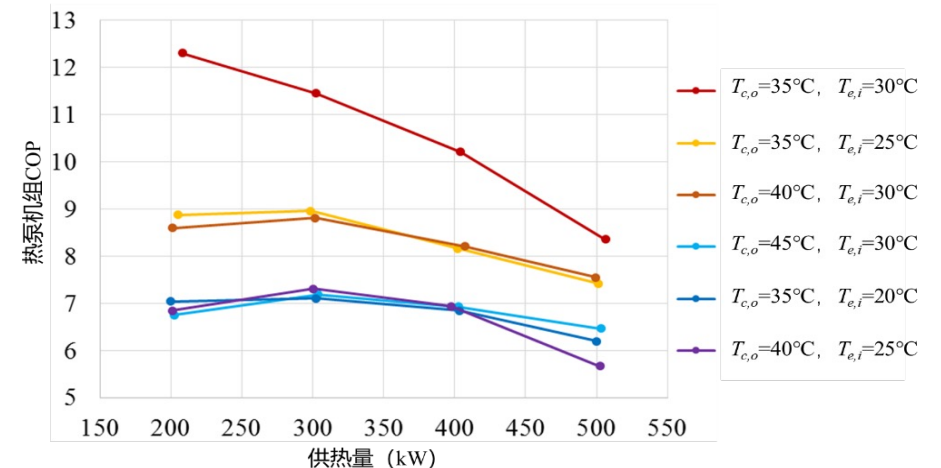
- 用户侧供水温度根据供热需求进行了相应的调节，在初寒气和末寒期，供水温度维持在40°C以下，而到了严寒期为了保障供热效果，供水温度提升至42°C，整个供暖季用户侧平均供回水温度分别为40/35°C
- 对于热源侧，平均每根中深层地埋管承担供热面积达到1.8万m²，取热需求较大。供暖初期出水温度能达到25°C以上，随着系统运行，严寒期出水温度降低至22°C左右。

2.4 实测中深层地埋管热泵供热系统：运行能效有提升

	MG5	MG6	MG3
供热季	21-22	21-22	21-22
实际供暖面积 m ²	123,124.0	102,246	53,000
供热量 万kWh热	1287.4	1160.2	381.2
供热量 GJ	46346.4	41767.2	13723.2
热泵机组 万kWh电	186.2	213.8	81.5
热源侧水泵 万kWh电	26.4	39.6	11.3
用户侧水泵 万kWh电	40.7	54.5	11.7
热源电耗 万kWh电	212.6	253.4	92.8
系统电耗 万kWh电	253.3	307.9	104.5
电费 万元	179.8	218.6	74.2
系统能效比	5.08	3.77	3.65
供热季设备利用率	59.1%	70.9%	50.9%

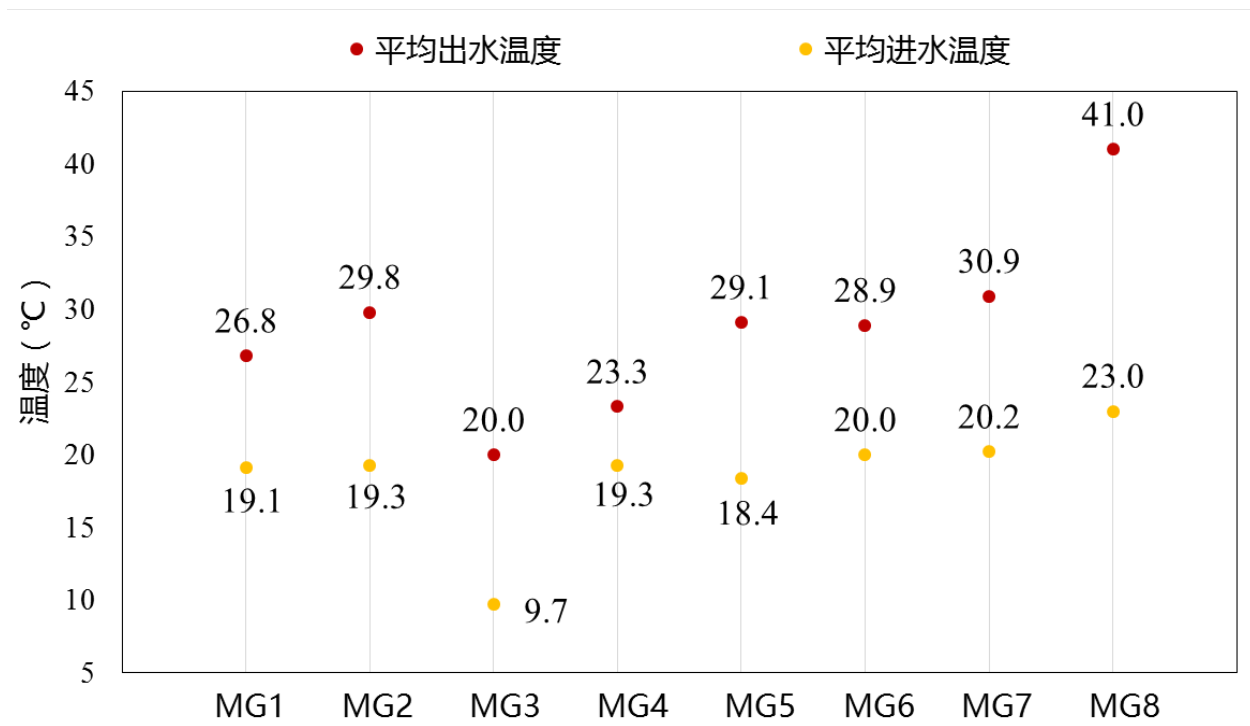
□ MG5采用了永磁同步变频离心式热泵，**其运行性能得到大幅度提升；**

□ 永磁同步变频离心式压缩机由高速电机通过同轴传动直驱，取消了常规压缩机里的增速齿轮，在实现变转速调节时大幅度降低了离心压缩机的机械损耗，因而保证压缩机在大范围转速调节过程中都能实现较高的电机效率，进而提升热泵机组整体运行性能。

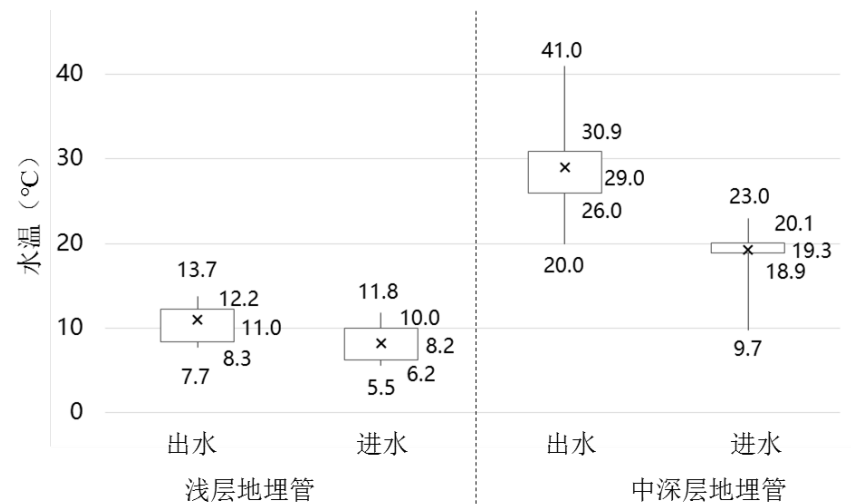


2.4 中深层与浅层地埋管对比：给热泵提供高品位低温热源

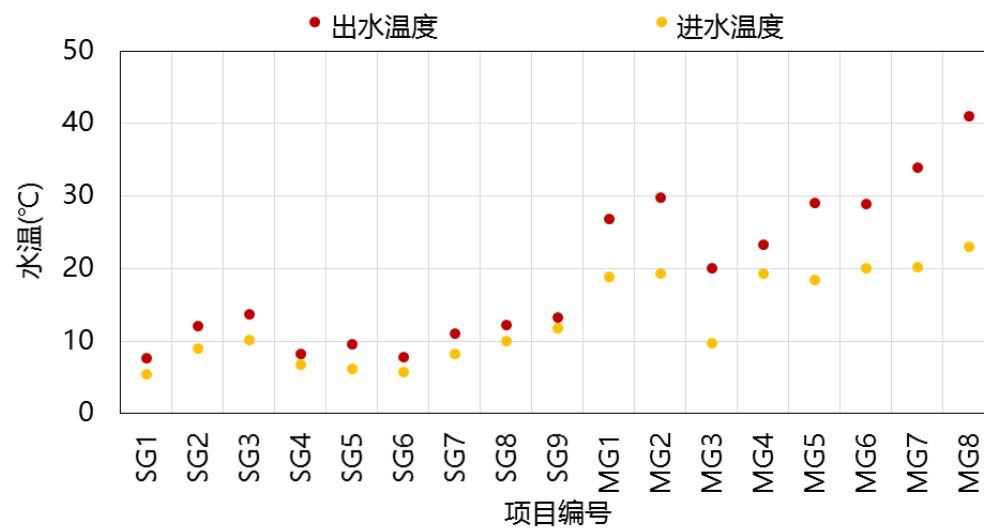
- 中深层地热地埋管在严寒期，也能提供**高品位的低温热源**
- 中深层地热地埋管运行水温以及进出水温差均远高于浅层地埋管，进而为热泵供热系统提供了良好的运行环境，有助于**系统运行性能的提升**



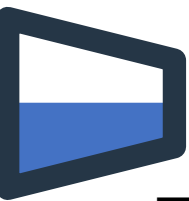
中深层地热地埋管严寒期运行水温



中深层地热地埋管与浅层地埋管运行水温统计分析

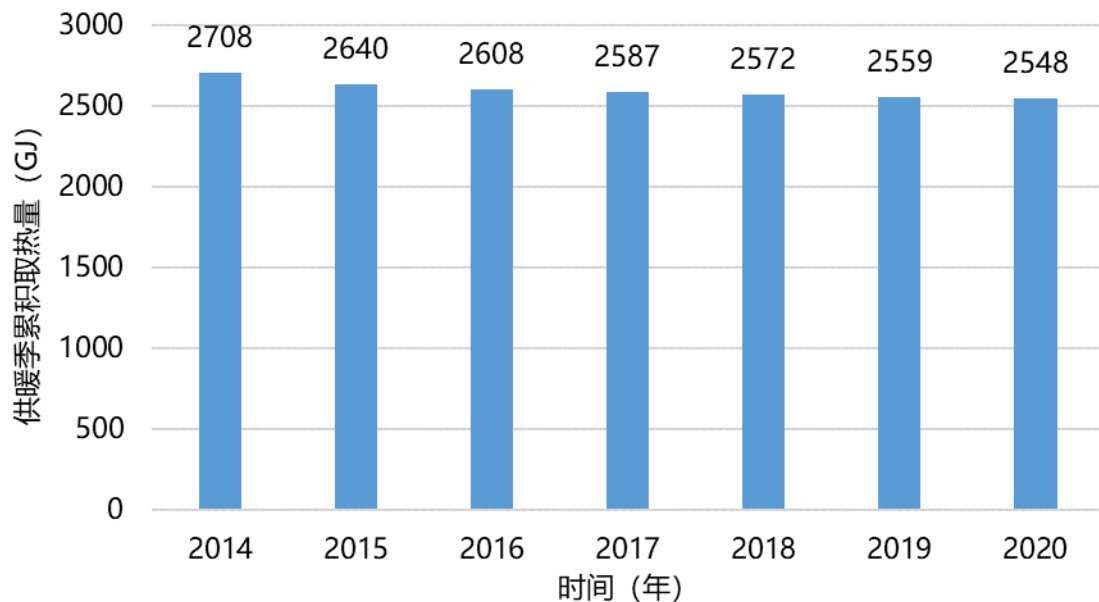


中深层地热地埋管与浅层地埋管运行水温对比

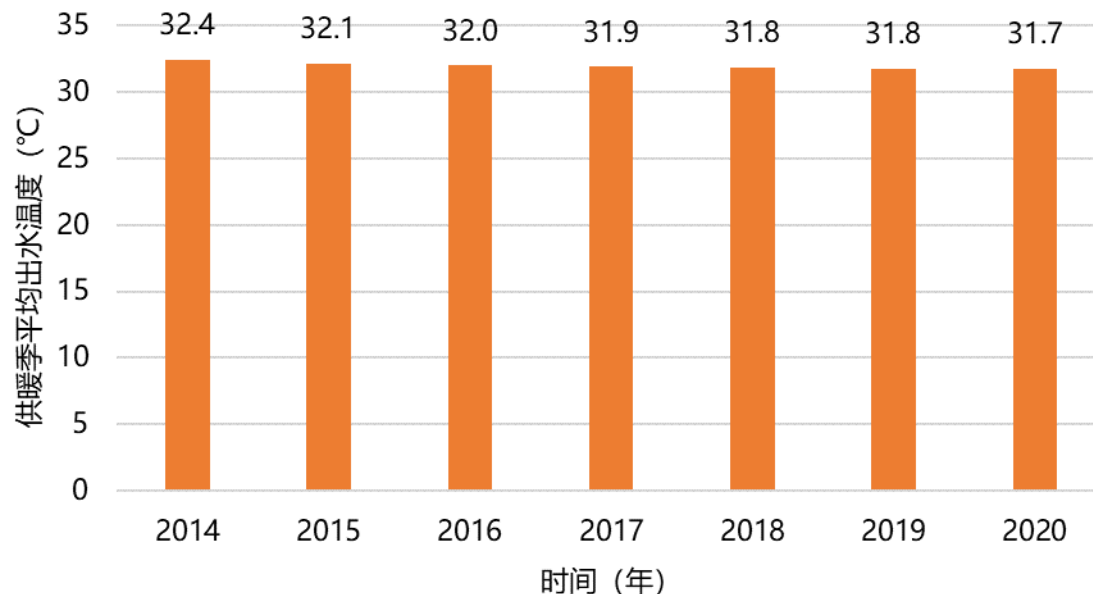


2.5 关于中深层地埋管取热量衰减：必须控制取热量，否则会衰减

□ 项目C连续运行取热量衰减小



□ 项目C连续运行出水温度衰减小

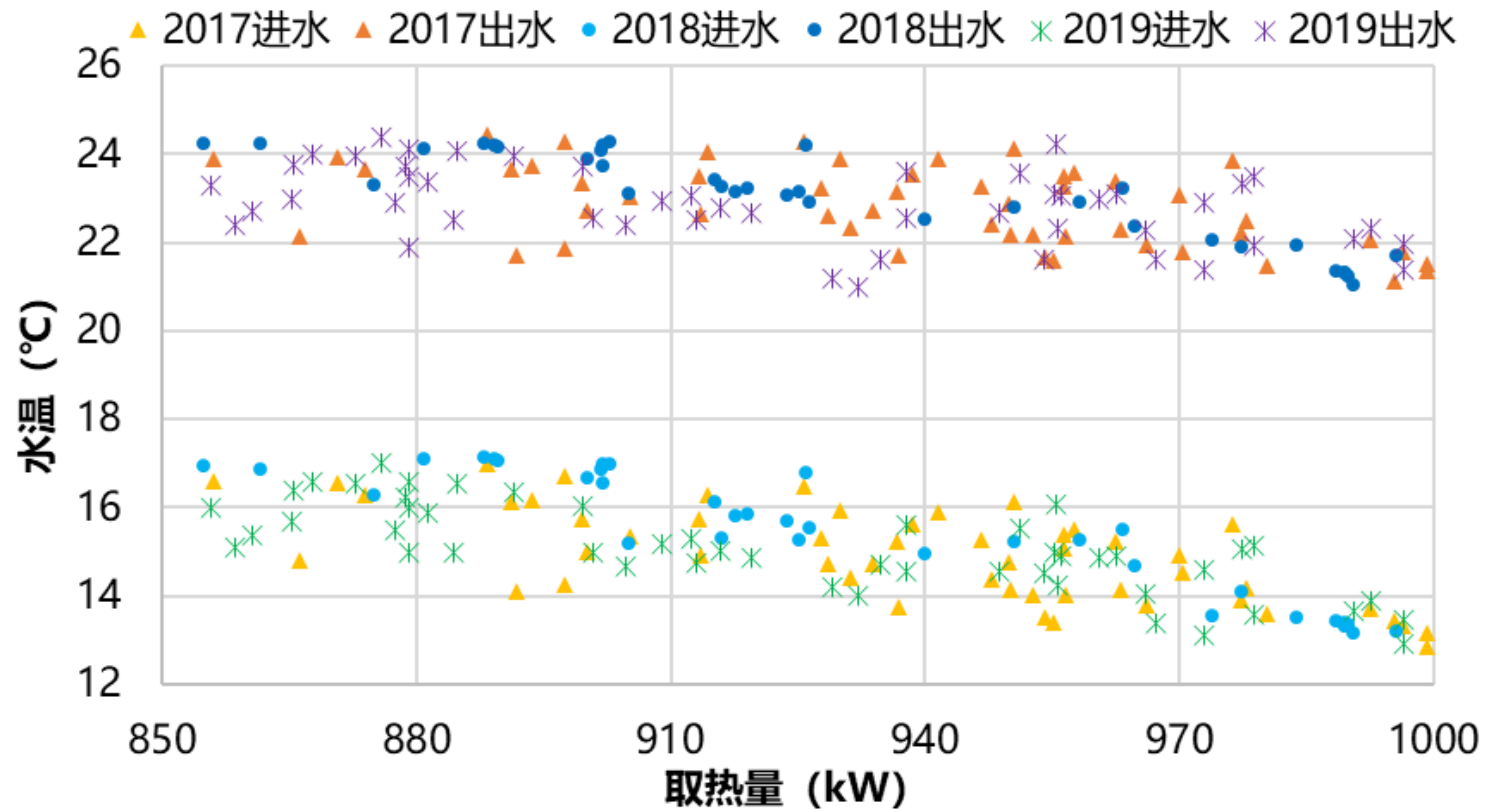


- 项目C：2013-2014年运行至今已有，连续监测热源侧运行情况，共3个孔（并排，间距15米）；
- 在7个供暖季**单孔累积取热量相对稳定**：从2708GJ降低至2548GJ，下降%；
- 取热量稳定的同时，**热源水温也基本稳定**，出水温度降低 0.7°C；目前仍稳定运行
- 实测数据表明：**中深层地埋管如有效控制每个冬季的取热量，可以长期稳定的获取中深层地热能**

2.5 关于取热量衰减：如果只在供热季取热，取热量可比较稳定

31

- 以MG3为例：实测2017~2020年连续3个供热季热源侧累积取热量分别为10107GJ、9978GJ、9820GJ；共有5个2000米深换热孔；
- 单口中深层地热地埋管供热季累积取热量分别为2022GJ、1996GJ、1964GJ。
- 由此可见，在3个供热季供热需求基本相同的情况下，**单口地埋管累积取热量比较稳定**

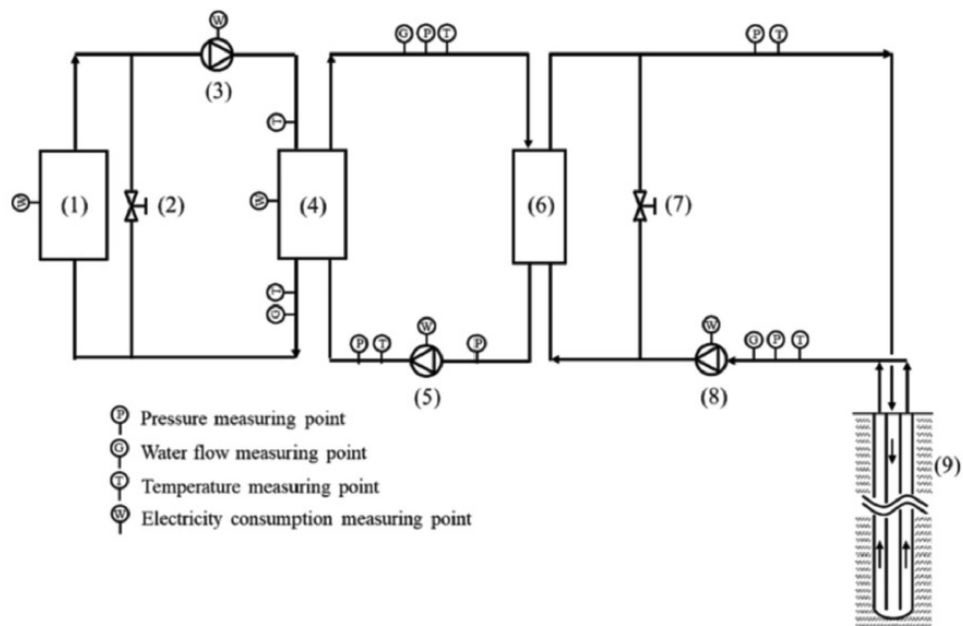
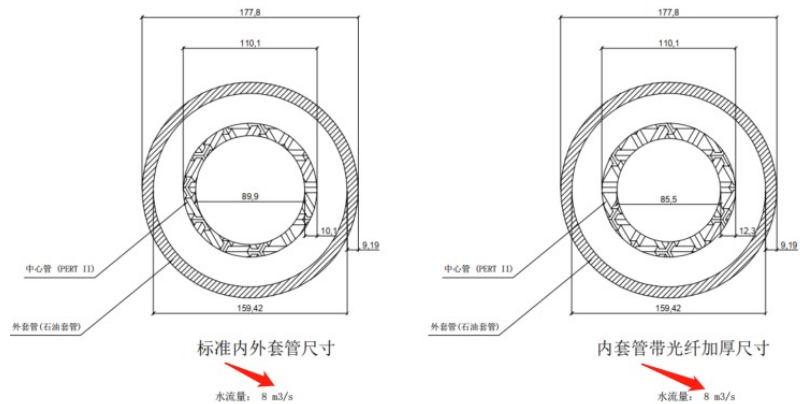


项目MG3中深层地热地埋管（2000m深）2017~2020年供热季运行性能

2.5 关于取热量衰减：一定要控制每个采暖季的取热量

- 中深层地热（2000~3000米深）温差取热的实质：巨大蓄热体中导热
 - 从地壳深处来的热量：很小，不到 $0.08\text{W}/\text{m}^2$ ，全年热量不到 $0.003\text{GJ}/\text{m}^2$ ，
 - 取热半径50米计，每个孔对应1万平米投影面积：地壳深处导出热量不到 $30\text{GJ}/\text{孔}$
 - 如果每个孔提供1万平米建筑的供热，热负荷 $0.3\text{GJ}/\text{m}^2\text{年}$ ， $3000\text{GJ}/\text{年}$ ，地壳深处导出热量仅占1%，其余热量均是来自于周边土壤岩石蓄热体的降温（显热）
 - 计算得到：如果每个孔占投影面积1万平米，3000米深，则释放 $3000\text{GJ}/\text{年}$ 热量需要降温 $0.03\sim 0.07\text{K}$ ；
 - 十年连续取热：地下2000~3000米岩层温度平均下降 0.5K ；孔间距越小，温降越严重
- 在适宜的建筑密度下可就近开发利用：以岩层年均温降不大于 0.1K 计算，每万平米年提供热量约为 $5000\text{GJ}\sim 10000\text{GJ}$ ，可为2-3万平米建筑供暖，即容积率不超过3时，建筑供热可由中深层地热结合热泵承担；否则不能全部负担

2.6 实验研究：中深层地埋管及其周边岩层温度进行测量



中深层热泵系统传感器点位示意图

Concave space to install the distributed fiber optic temperature sensor

Inner tube



The black wire is the distributed fiber optic temperature sensor

中深层地埋管光纤测温示意图

2.6 理论研究：中深层地埋管动态传热模型与模拟

- 系统运行时，换热介质在循环泵的驱动下从外套管向下流动与周边土壤和岩石换热，到达管底部后，再由内管向上流出换热装置。
- 换热介质在外套管向下流动过程中，一方面通过外管管壁与土壤岩石等进行换热，另一方面也会通过内管管壁与向上流动的换热介质进行换热。而从内管向上流动返回的已被加热的换热介质在流动中又会被向下流动的换热介质冷却，使其温度降低。

基于能量守恒采用有限体积法对换热过程进行了建模

内管流体

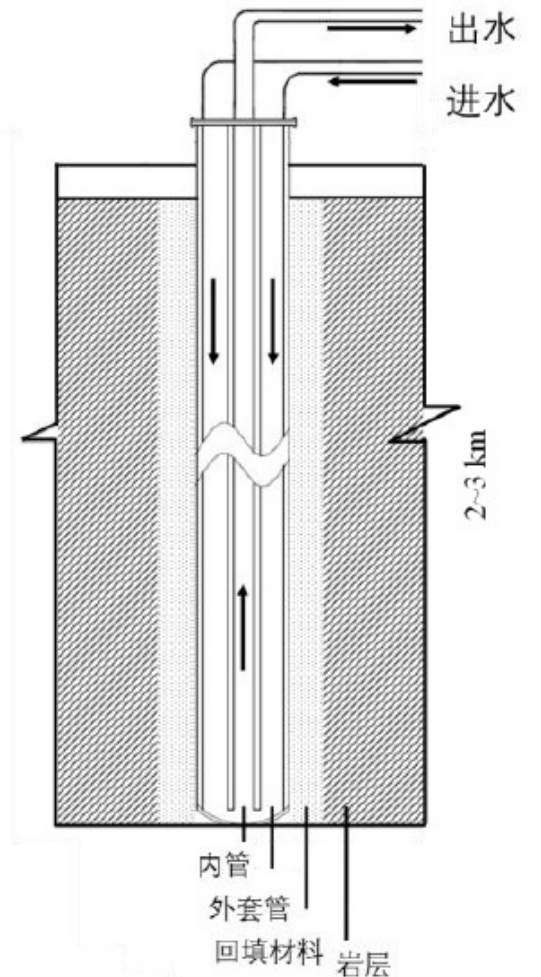
$$\frac{\partial t_{f,in}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_{in} \cdot t_{f,in})}{\partial z} = \frac{K_i \cdot (t_{f,o} - t_{f,in})}{\rho_f \cdot C_f \cdot F_{in}}$$

外管流体

$$\frac{\partial T_{f,o}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_o \cdot t_{f,o})}{\partial z} = \frac{K_i \cdot (t_{f,in} - t_{f,o})}{\rho_f \cdot C_f \cdot F_o} + \frac{K_o \cdot (t_{grout} - t_{f,o})}{\rho_f \cdot C_f \cdot F_o}$$

回填材料、土壤

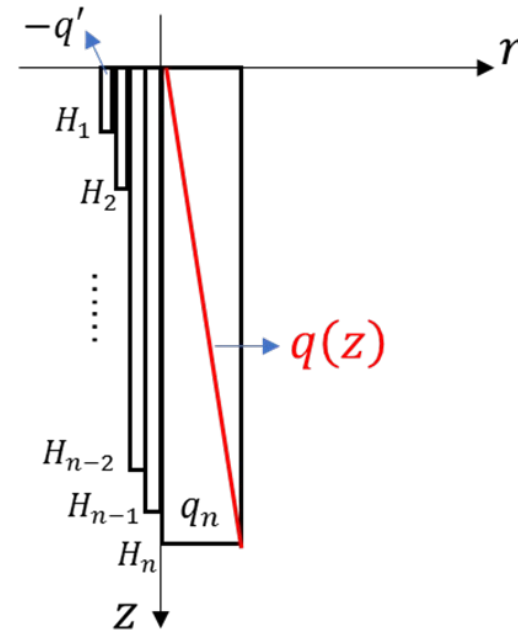
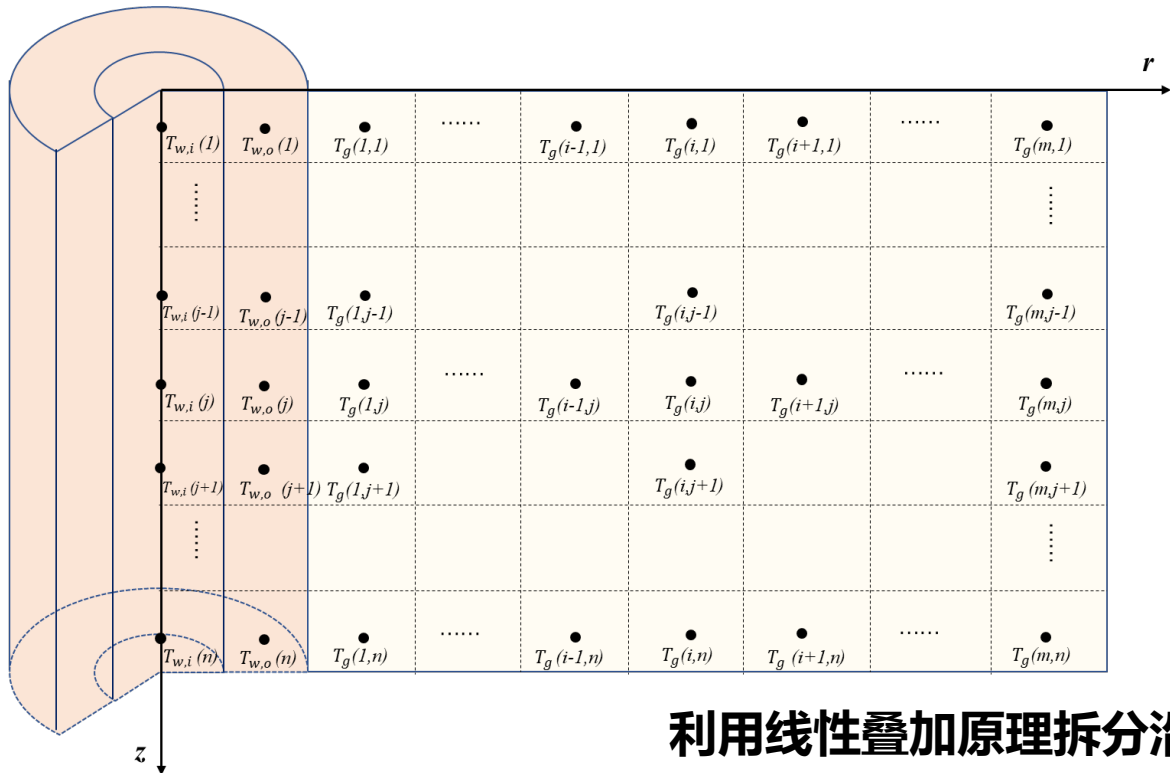
$$\rho_g \cdot C_g \cdot \frac{\partial t_g}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_g \cdot \frac{\partial t_g}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_g \cdot \frac{\partial t_g}{\partial z} \right)$$



中深层地埋管结构示意图

2.7 最近的研究：根据成孔过程预测地温变化的模型

- 基于钻井过程，钻孔及钻井机构建对应物理模型及地下传热数值解模型
- 由于钻井泥浆与岩层换热，属于瞬态过程，地温场快速变化，远没达到稳态的情况。因次不能忽略时间项的偏导，无法使用解析解进行求解，选择采用数值解计算，建立相应模型。根据工程实际返浆温度反算低温梯度。



```
编辑器 - C:\Users\ThinkPadX1\Desktop\西安大志理项目\chengkongpinggu.m
+1
Untitled3.m  guanjiejixie230516.m  Untitled4.m  Untitled  chengkongpinggu.m  zhihuichengkong.m
142- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * lambda1 / dz;
143- B(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * rousi * cpi * dz / 2 / dt;
144-
145- i=3;
146- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * rousi * cpi * dz / 2 / dt + dz / 2 * lambda1 * (r(i) + r(i-1)) / (r(i) - r(i-1)) * dz / 2 * lambda1 * (r(i) + r(i-1)) * R - 1) - dz / 2 * lambda1 * (r(i) + r(i-1)) / (r(i) - r(i-1));
147- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R + 1) = dz / 2 * lambda1 * (r(i) + r(i-1)) / (r(i) - r(i-1));
148- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R - 1) = dz / 2 * lambda1 * (r(i) + r(i+1)) / (r(i+1) - r(i));
149- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * lambda1 / dz;
150- B(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * rousi * cpi * dz / 2 / dt;
151-
152- i=4;
153- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * rousi * cpi * dz / 2 / dt + dz / 2 * lambda1 * (r(i) + r(i-1)) / (r(i) - r(i-1)) * dz * 2 * r(i) * dz * F(i);
154- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R - 1) = dz / 2 * lambda1 * (r(i) + r(i-1)) / (r(i) - r(i-1));
155- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R + 1) = dz * 2 * r(i) * dz;
156- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * lambda1 / dz;
157- B(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * rousi * cpi * dz / 2 / dt;
158-
159- i=5;
160- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * rousi * cpi * dz / 2 / dt + 2 * r(i-1) * dz * 2 * r(i-1) * dz * 2 * r(i) * dz * F(i) * rousi * cpi * dz;
161- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R - 1) = 2 * r(i-1) * dz * 2 * dz;
162- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R + 1) = 2 * r(i+1) * dz * 3 * dz;
163- A(i+(j-1)*R, i+(j-1)*R) = F(i) * rousi * cpi * dz / 2 / dt;
```

利用线性叠加原理拆分沿深度变化的热流密度

MATLAB模型

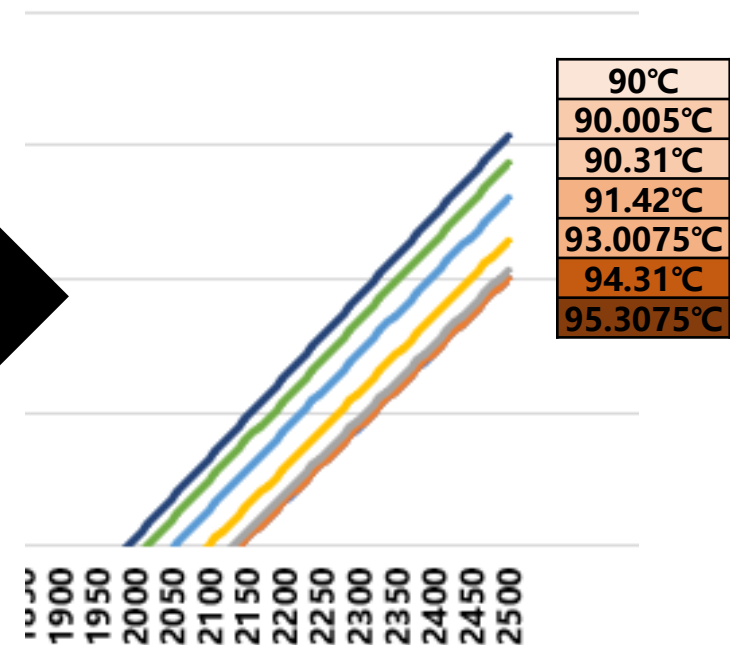
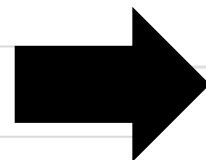
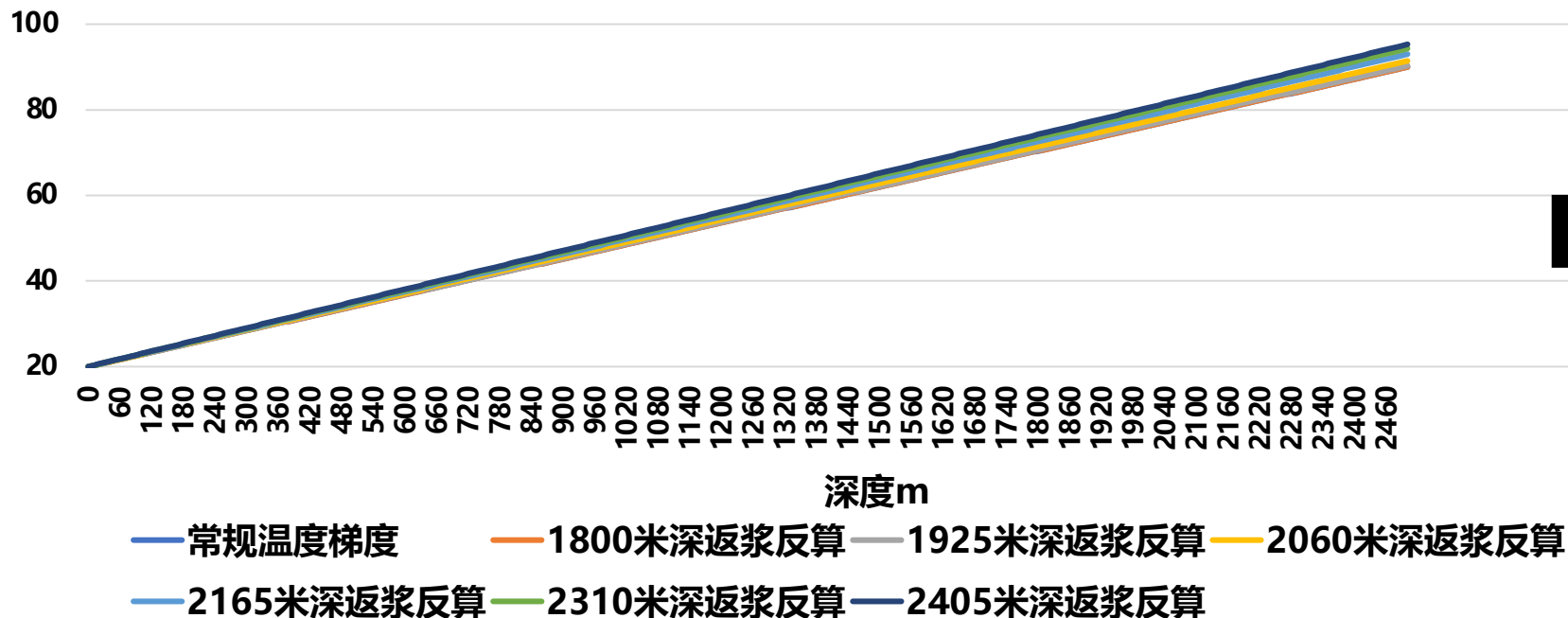
2.7 实验验证：比较吻合，正在安放2500米光纤测温装置进行实测

钻井过程实测数据

	2024.3.13	2024.3.14	2024.3.14	2024.3.15	2024.3.17	2024.3.18
深度m	1800	1925	2060	2165	2310	2405
泥浆入口温度°C	31	29	35	34	36	39
泥浆出口温度°C	39	40	43	43	45	47
泥浆粘度S	42	42	40	40	40	40
室外气温°C	12	9	14	11	12	11

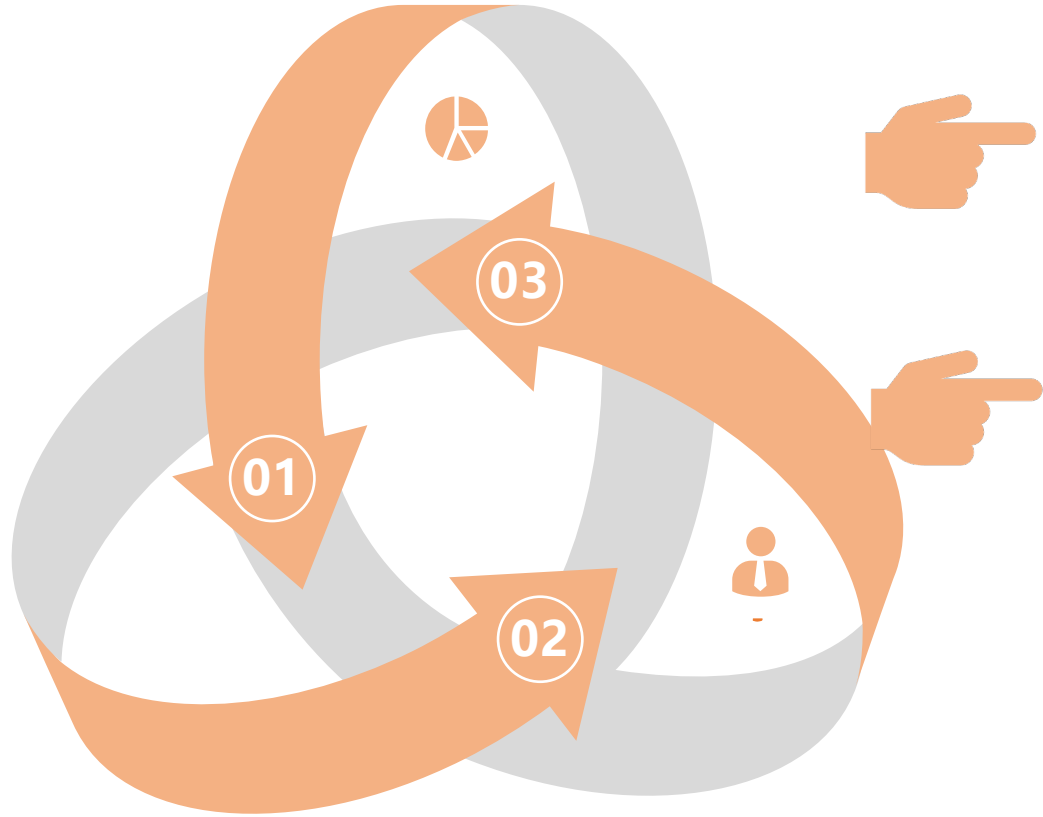
	单位长度地温梯度	预测2500米深温度
常规温度梯度	2.8	90°C
1800米深返浆反算	2.8002	90.01°C
1925米深返浆反算	2.8124	90.31°C
2060米深返浆反算	2.8568	91.42°C
2165米深返浆反算	2.9203	93.01°C
2310米深返浆反算	2.9724	94.31°C
2405米深返浆反算	3.0123	95.31°C

成孔过程中预测地温梯度 (°C)



今日讨论的主要内容：围绕地下温差的传热问题

37



专题1：温差驱动的浅层地源热泵供热推广中务必要关注的局限性和风险 - 现象是取热量不足、换热不均匀、设备系统效率低，存在热蠕变和热固结导致可能的沉降风险，本质问题是什么？对DT驱动传热过程和科学机理的研究

专题2：温差驱动的中深层地热结合热泵供热大面积推广中务必要关注的局限性和风险 - 地温梯度，岩层物性，地质构造是否稳定等，长期取热的衰减和供热建筑容积率和孔间距等；也需要对DT驱动传热过程和科学机理的研究

建议：一定要用好地下温差，结合热泵+蓄热+供热；产生价值的同时，深入研究，尊重DT，用好DT，保住DT

2024



清华大学
Tsinghua University

温差驱动的地热可持续利用关键技术研究 DT-driven (Temperature Difference) Geothermal Utilizations: Key Considerations

魏庆芃教授工作组

清华大学建筑节能研究中心

2024/04/9