

DOI: 10.12401/j.nwg.2023078

西北省会城市地热中深层地埋管供热系统 发展潜力及环境效益分析

刘文辉, 董英, 张新社, 王涛

(中国地质调查局西安地质调查中心 / 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 笔者回顾并对比分析了西北省会城市供热现状及环境空气质量, 指出传统采暖方式是影响该区环境空气质量的主要因素之一, 而地热清洁能源的使用将有助于改善环境空气质量。传统热水井取热方式受地质条件制约较大, 近年来一种取热不取水的新型地热开发利用技术——中深层地埋管供热系统应运而生, 发展迅速。但是, 以往的研究多集中于地面供热系统及管井换热能力的研究, 对于地热资源储量及承载力的研究较少。在分析该技术适用范围的基础上, 总结西北五省省会城市的地热资源条件, 采用适当的方法结合城市建设范围估算地热可采资源量, 分析在城市中推广使用中深层地埋管供热系统的前景及环境效益, 并提出后续研究方向。

关键词: 地热资源; 中深层地埋管供热系统; 环境空气质量; 西北省会城市

中图分类号: P642; P314.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0186-10

Development Potential and Environmental Benefit Analysis of Geothermal Medium-Deep Buried Pipe Heating System in Capital Cities in Northwest China

LIU Wenhui, DONG Ying, ZHANG Xinshe, WANG Tao

(Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center on Geosciences Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, the current situation of heating and ambient air quality in the capital city of Northwest China has been reviewed and comparatively analyzed. The results suggest that the traditional heating method is one of the main factors affecting the ambient air quality in the region, while the use of geothermal clean energy will help improve the ambient air quality. In recent years, a new type of geothermal development and utilization technology "medium-deep buried pipe heating system" has emerged and is developing rapidly. But most of the previous studies have focused on the research of surface heating system and heat transfer capacity of pipe wells, and less on the research of geothermal resource storage and bearing capacity. In this paper, on the basis of analyzing the scope of application of this technology, the geothermal resource conditions in the capital cities of five northwestern provinces has been summarized, an appropriate method has been adopted to estimate the recoverable resources of geothermal resources in combination with the scope of urban construction, the prospects and environmental benefits of promoting the use of medium-deep buried pipe heating systems in cities has been analyzed, and the direction of subsequent research has been proposed.

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-04-25; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“西安市地质安全体检与风险评估示范”(DD20211317)资助。

作者简介: 刘文辉(1969-), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地热方面的研究。E-mail: 448224720@qq.com。

Keywords: geothermal resources; medium-deep buried pipe heating system; environmental air quality; capital cities in Northwest China

西北地区主要城市群与经济区多数位于盆-山过渡带,如西安位于秦岭造山带与鄂尔多斯盆地的盆-山过渡带,乌鲁木齐位于天山造山带与准噶尔盆地的盆-山过渡带,银川位于贺兰山与鄂尔多斯盆地过渡带,兰州、西宁位于祁连山山间盆地,新生代构造作用强烈(计文化等, 2022), 新生界沉积厚度大(穆根胥, 2016; 谢娜, 2020), 中深层地热资源丰富(杨俊仓, 2011; 赵振, 2015; 穆根胥, 2016)。西北地区人口密度小, 经济相对落后, 地热资源以传统利用方式为主(余秋生, 2015; 谢娜, 2020)。随着城市化发展, 人口逐渐向城市聚集, 尤其是省会城市更是人口集中区, 西安、兰州、西宁、银川、乌鲁木齐的人口已经分别占到其各自省(自治区)的33%、18%、42%、40%和18%。人口的集中随之也带来资源集中消耗, 污染物排放量不断增加等资源环境问题。“双碳”目标(2030年碳达峰, 2060年碳中和)的提出, 以及生态文明建设国家战略的实施, 对地热这一清洁能源的利用提出了更高的要求。

近年来, 地热开发利用新技术新方法层出不穷, 其中, 中深层埋管地源热泵技术发展较快。例如, 在陕西西咸新区沣西新城, 利用该技术进行冬季供暖的面积已达1500万 m^2 (王贵玲, 2021), 成为该区域主

要供暖热源, 取得良好的环境效益。

中深层地热一般指埋深200~3000 m的地热资源(王贵玲, 2021)。埋管供热技术是在钻孔后, 下入封闭套管, 通过管内换热介质循环, 以热传导方式吸收管外岩土体中储存的热能, 再经地面热泵机组换热供暖的技术。该技术具有取热不取水的特点, 因此也将其称为无干扰地热开发利用技术(冯兴军, 2017)。

以往对该技术的研究多集中于地面供热系统及管井换热能力的研究(He et al., 2021; Du et al., 2023), 对于地热资源储量及承载力的研究较少, 已有的也限于单一项目的资源评估(柯婷婷等, 2018)。笔者采取适用于该方法对西北省会城市的地热资源储量进行评价, 进而分析探讨该方法在西北省会城市推广利用的可行性及环境效益。

1 西北省会城市供热现状与大气环境质量相关分析

1.1 供热现状

西北省会城市供热现状统计表显示: 各市中心供热及分散供热热源以燃气锅炉为主, 采用燃煤锅炉的则依托热电联产企业(表1)。

表1 西北省会城市供热现状表

Tab. 1 Heating status of capital cities in Northwest China

城市	供暖期	供热现状
西安	4个月	城市中心区、城北、城东南、城东北、高陵建制区、草堂、泾渭工业园以及阎良航空产业基地为燃气锅炉集中供热, 面积约为1.07亿 m^2 ; 城西、高新开发区、沣东新城、大兴新区部分区域依托热电联产燃煤锅炉集中供热, 供热面积约为0.32亿 m^2 ; 西咸新区沣西区块主要以中深层埋管地源热泵供热系统分散供热, 全市中深层埋管供热系统供暖面积达0.15亿 m^2 , 其他为散烧燃气锅炉供暖
兰州	5个月	供热热源有煤及天然气, 总供暖面积为1.07亿 m^2
西宁	6个月	市区集中供热主要依靠热电联产燃煤锅炉, 规划供热建筑面积约为0.13亿 m^2 , 实际集中供热面积为0.08亿 m^2 , 分散供热热源以天然气为主
银川	6个月	主城区供热面积达1.2亿 m^2 , 热源以热电联产为主、分散燃气锅炉为辅, 其中热电联产集中供热面积约为0.7亿 m^2
乌鲁木齐	6个月	总供热面积为2.42亿 m^2 , 其中: 燃气锅炉供热面积为1.18亿 m^2 , 热电联产供热面积为0.8亿 m^2 , 壁挂炉供热面积为0.34亿 m^2 , 电供暖总面积为0.06亿 m^2 , 农村地区散煤燃烧供热面积为0.04亿 m^2

1.2 大气环境质量现状

据各市环境质量公报数据, 笔者统计了西北省会

城市近5年来环境空气质量中与采暖相关的部分污染因子的年均浓度值(表2)。

表2 各城市大气污染因子年均浓度值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)Tab. 2 Annual average concentration of air pollution factors in each city ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

城市	污染因子	2017	2018	2019	2020	2021	《环境空气质量标准》 (GB 3095-2012)标准值
西安	PM ₁₀	130	122	102	91	82	70
	PM _{2.5}	73	63	58	51	41	35
兰州	PM ₁₀	111	103	79	76	72	70
	PM _{2.5}	49	47	36	34	32	35
西宁	PM ₁₀	100	91	59	61	58	70
	PM _{2.5}	39	45	34	35	32	35
银川	PM ₁₀	/	101	74	72	63	70
	PM _{2.5}	/	38	33	36	27	35
乌鲁木齐	PM ₁₀	106	/	86	83	65	70
	PM _{2.5}	70	54	50	47	39	35

注：西安市2017、2019年数据来自《西安市大气污染特征及颗粒物来源分析》，其他数据均来自各市年度(月)环境质量报告。

近5年来,随着各市强化环境管理以及各种大气污染治理措施的落实,其大气环境污染因子年均浓度值逐年下降,大气环境质量逐步提高,但是目前仍有部分大气污染因子年均浓度超标(表2)。2021年西安市的PM₁₀与PM_{2.5}均超标0.17倍,兰州市的PM₁₀超标0.03倍,乌鲁木齐的PM_{2.5}超标0.11倍。

西北城市不同季节环境空气质量变化较大,如西安市2021年不同季度PM₁₀与PM_{2.5}的平均浓度变化显示,采暖季所在一、四季度的PM₁₀与PM_{2.5}浓度明显高于非采暖季的二、三季度(图1),说明冬季采暖排放污染物对环境空气质量有较大影响,目前仅靠煤改气措施还不能做到使环境空气质量达标,加强地热清洁能源的开发利用替代传统锅炉采暖迫在眉睫。

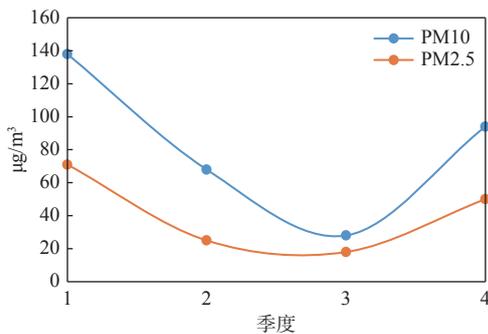


图1 西安市2021年度大气污染因子季度变化图

Fig. 1 Seasonal variation of 2021 air pollution factors in Xi'an

2 新型地热开采利用技术与成功案例

对于地热资源的利用,以往采用热水井开采方式,以热储层中天然存在的热热水为媒介取热,取热方式简单,单井供热面积大,在西安地区一般单井供热面积可达10~15万 m^2 ,但其限制因素也很明显。热储层中热水多来自于大气降水,在2000~3000m的循环深度,热水的流动性极小。同位素测年结果显示,西安凹陷区地热水的年龄大于2万a(秦大军,2005)。自然状态下,热水滞留于地层中,获得补给的速度极慢,因此采用热水井方式抽采地下水供暖,常因地下水补给不足而导致热水井水位下降迅速。目前,在西安地区已经形成大面积的降落漏斗,水头难以恢复,虽然目前在积极采取回灌措施以弥补抽水导致的水头损失,但是对于深部砂岩地层来说,因天然地层孔隙度小、渗透性差、压力大以及高矿化度回灌水在回灌过程中因温压变化发生的物理化学反应进一步堵塞热储层孔隙,导致回灌困难,地热资源利用率较低。

近年来,一种新型地热开采利用技术——中深层地埋管地热供暖系统异军突起,发展迅速。地埋管的形式有同轴套管、U型对接管等多种形式(图2)。地

埋管为封闭系统, 取热介质(一般为水)在封闭的井管内循环, 以热传导方式吸收井壁外一定范围内的热能, 增温后返回地面进入热泵系统, 通过热泵将其中的热能提取出来给地面建筑物供暖。该系统不受地热水赋存的影响, 只要地下有热能, 就可通过该系统提取地热能供暖, 可大幅提高地热资源利用率。

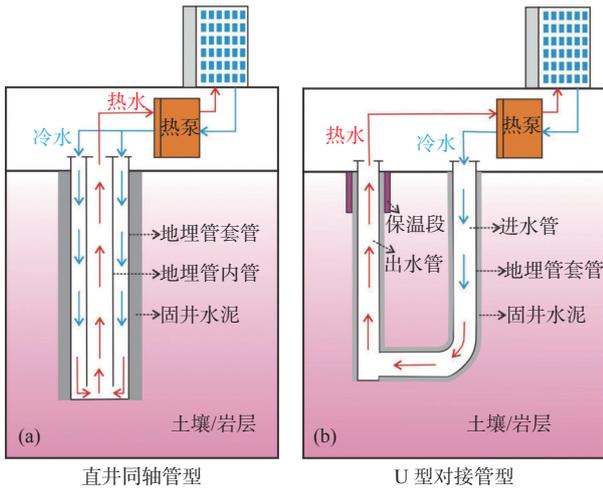


图 2 中深层地热埋管开采模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mining model of deep geothermal buried pipe

目前中国最大规模的中深层埋管地热供热系统项目于 2019 年在陕西西咸新区沣西新城的中国西部科技创新港投入使用。该项目通过 6 座中深层埋管地热供热系统综合能源供应站为 159 万 m^2 的建筑供热、供冷及供应生活热水。

中深层埋管地热供暖系统具有以下 3 个优点: ①受地质环境影响小。只要地下有热能, 在经济合理可行的情况下, 就可以采用此方式开采利用地热资源。②受地面环境影响小。埋管布置在供暖对象用地范围内, 布点灵活, 仅建设期占用少量临时用地, 施工结束即可恢复原用地类型, 运行期井口用井盖覆盖, 对地面使用几乎无影响; 取热管井与供暖对象在一起, 无需铺设长的输水管线, 地下管网敷设工程量小, 热损耗少, 受外环境影响小。③对环境友好。该系统在运行期间, 其换热介质在封闭的井管中循环, 与管外物质不发生直接接触, 只有能量交换, 没有物质交换, 对管外物质结构与成分均不产生影响, 系统运行不排放废气、废水, 无环境污染。

当然, 任何一种技术都不可能是完美的, 中深层埋管地热供热技术也有其局限性。①单孔供热能力较小。据西安市现有埋管地热供热系统运行情

况, 单口 2000~3000 m 深的管井换热量大约可供 1~1.5 万 m^2 的建筑物供暖, 因此前期钻孔及热泵机组投资较大。②供热孔热衰减较快。埋管取热影响半径受岩土体热力学性质、管井开采强度(换热强度)、开采时间的影响。一般情况下, 西安地区中深层埋管取热影响半径约为 10~30 m。在此范围内, 地热资源的垂向更新量随地温梯度变化(表 3)。在不同地温梯度条件下, 不同埋管取热影响范围内单纯依靠地球内部由内向外辐射的热量只有约 18~257 W, 而关中地区建筑物供热负荷一般为 74.5 W/m^2 , 即便考虑地源热泵的制热性能系数(不低于 4.0), 以地温梯度 3 $^{\circ}C/100 m$ 和影响范围 30 m 为例, 其供热面积也只有约 10 m^2 , 可见仅靠深部地热的更新量(可持续供热量)来供热远远不能满足供热的需求, 埋管换热主要是消耗热储层内储存的热能。因此, 采用埋管换热, 其周围岩土温度均会下降, 一般采暖末期井口的进出水温度与采暖初期相比, 均会有较大的降幅, 且第二个采暖期地温也不一定能恢复到第一个采暖期的温度。当地埋管系统所在区域地温较低时, 管井外地热资源不能及时快速补充管井取热的热能损失, 则管井取热量小且使用年限短, 经济上不合理。

表 3 不同埋管影响半径内可获得的地热资源更新量(W)

Tab. 3 Renewable amount of geothermal resources within the influence radius of different buried pipes

埋管影响半径(m)	地温梯度($^{\circ}C/100 m$)			
	2.5	3	3.5	4
10	17.84	21.41	24.98	28.55
20	71.37	85.65	99.92	114.20
30	160.59	192.70	224.82	256.94

笔者以地温梯度 2.5 $^{\circ}C/100 m$ 作为地热资源可利用下限估算各市地热可采资源量, 并据此分析中深层埋管供热系统在西北省会城市的推广利用前景。

3 西北省会城市地热资源条件及可采资源量

对于中深层埋管系统的地热可采资源量的评价, 考虑地温场变化和城市建设区域两方面的因素。

地温场变化的评价思路为: 由于埋管系统提取地下岩土体中的热能导致地温降低, 地温梯度发生变化, 当地温梯度降低至 2.5 $^{\circ}C/100 m$ 时可提取的总热

量作为可采资源量,按此思路采用体积法和地温降低差值计算不同地温梯度分区中单位面积的地热可采资源量。

可采资源量的计算公式为:

$$Q = AHC(T_p - T_c) \times 10^6 \quad (1)$$

式中: Q 为热量(kcal); A 为热储面积(km^2); C 为热储层体积比热容,文中对于砂泥岩热储层均参照西安地区参数 $931 \text{ kcal}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 进行估算; T_p 为按现有地温场地温梯度计算的平均地温; T_c 为地温梯度 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 时各计算深度的平均地温。

城市建设方面则考虑中深层埋管供热系统技术的应用条件为采用分布式取暖方式并主要用于城

市建设区,因此根据各市的现状或规划画出城市主要建设区的范围,将其与地温梯度分布图叠加,计算出地温梯度在 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 以上区域的各梯度分区面积,估算分区地热资源量,最后加和得到总可开采资源量。

3.1 西安市

西安市位于关中盆地西安凹陷地质单元内。关中盆地是一个叠在燕山期隆起之上,喜马拉雅期陷落的断陷盆地,盆地自古近系以来,沉积了巨厚的古近系、新近系、第四系地层(表4),最大厚度超过 7000 m (穆根胥, 2016),具有下降速度快,沉积物粒度粗、厚度大等特点。

表4 西安凹陷地层特征表

Tab. 4 Stratigraphic characteristics of Xi'an depression

地层	特征	
第四系	全新统(Q_h)	现代河流冲积、洪积层和山前洪积坡积,岩性一般为砂、砂砾卵石、砂质黏土
	上更新统(Q_p^3)	秦岭山前洪积扇为洪积相沉积,岩性为砂质黏土及砾石、漂石等,分选极差,厚度为 $8 \sim 30 \text{ m}$;渭河及其较大支流的二级阶地下部为冲积相沉积,岩性为粘质砂土,砂质黏土及砂、砂砾卵石层,二级阶地以上各地貌单元上部覆盖有风积黄土
	中更新统(Q_p^2)	浅灰褐色较疏松无层理的黄土,夹多层红褐色古土壤
	下更新统(Q_p^1)	河湖相交替沉积,主要为黄色沉积泥质岩
新生界	张家坡组(N_2^f)	河湖相沉积,岩性为灰绿色泥岩、含砂泥岩夹疏松的砂泥岩,厚度为 $300 \sim 900 \text{ m}$
	蓝田瀛河组(N_2^{fb})	河流相沉积,上段为黄棕、浅灰绿色泥岩,中段为紫褐、黄棕色砂质泥岩与砂砾岩互层,下段为浅紫褐色泥岩、浅棕黄色砂岩,厚度为 $100 \sim 900 \text{ m}$
	寇家村组(N_1^f)	为湿热条件下的河湖相沉积,岩性以棕红、桔黄色泥岩、砂质泥岩为主,夹灰白色、棕黄色砂岩,底部发育砾岩或砂砾岩。厚度为 $0 \sim 142 \text{ m}$
古近系	冷水沟组(N_1^b)	为湿热条件下的河湖相沉积,棕红色砂质泥岩与灰黄、灰绿色砂岩互层及底部砾岩夹杂色泥岩,厚度为 1342 m
	白鹿塬组(E_3^b)	河流相沉积,以灰白色块状砂岩为主,夹(或互)紫红色泥岩,底部发育砂砾岩或含砾粗砂岩,厚度为 500 m
	红河组(E_2^b)	湖泊、河流相沉积,以大套紫红色泥岩为主,夹灰黄色和灰绿色砂岩、粉砂岩,厚度为 $2100 \sim 2800 \text{ m}$

西安凹陷南边界为余下-铁炉子断裂,走向近东西、倾向北,断距大于 4000 m ,先压后张;北边界为渭河断裂,走向近东西,南倾,倾角为 65° ,断层性质也是先压后张;凹陷内部由江伊-鲍坡断层等3条断裂组成的临潼-长安断裂带,走向北北东,倾向北西,倾角大于 60° ,具张扭性、铲形特征。

西安凹陷大地热流值相对较高,一般为 $65 \sim 75 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。大部分地区地温分布符合层状热储特征,地温随深度线性增加, 2000 m 处地温大致为 $80 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$, 3000 m 处地温多为 $110 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$,地温梯度多为 $3 \sim 3.5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,在断裂带附近因断裂带导通深部热源造成局部地温梯度升高。笔者以前人研究为基础,并收集

近年来关中盆地的部分地热井成井报告以及其他地温资料,调查了部分地热井现状,绘制了西安城区地温梯度图(图3)。

西安市主要城市建设区面积约 1333 km^2 ,该区域内地温梯度为 $2.5 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。热储厚度为 2800 m (埋深为 $200 \sim 3000 \text{ m}$),地热可采资源量估算结果为 $4.52 \times 10^{16} \text{ kcal}$ (表5),相当于标煤 64.56 亿 t 。

3.2 兰州市

兰州市位于中祁连构造隆起带内的山间盆地上,盆地基底为元古界,基底断裂构造发育,在市区分布北西西向兴隆山北缘断裂(F_{42})、兴隆山南缘断裂(F_{43}),这些断裂构成兰州断陷盆地边界。盆地周边

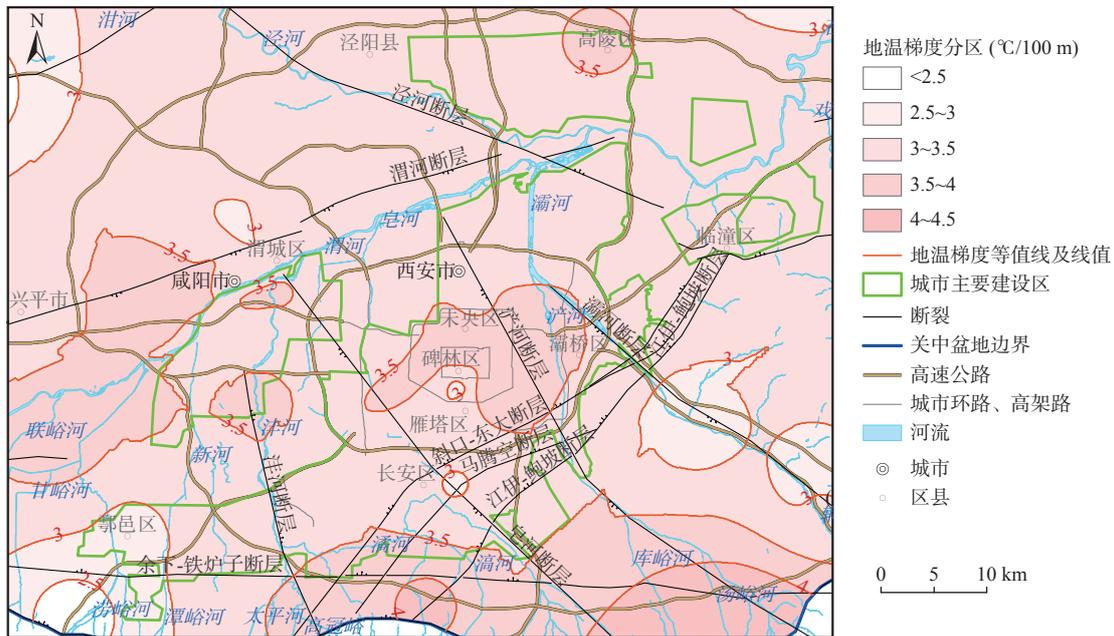


图 3 西安市地温梯度分布图

Fig. 3 Distribution of geothermal gradient in Xi'an

表 5 西安市地热可采资源量估算表

Tab. 5 Estimate of recoverable geothermal resources in Xi'an

地温梯度 分区 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)	单位面积 可采资源量 ($10^{13}\text{ kcal}/\text{km}^2$)	分区 面积 (km^2)	分区可采 资源量 (10^{16} kcal)	相当于 标煤 (10^8 t)
2.5~3	1.03	54	0.06	0.79
3~3.5	3.09	1 029	3.18	45.42
3.5-4	5.15	250	1.28	18.36
合计		1 333	4.52	64.56

出露前白垩系, 盆地内新生界沉积物厚度为 2 000~3 000 m。兰州盆地的地层特征见表 6。

兰州盆地内热储层为白垩系、古近系下部的砂岩、砾岩及元古界的皋兰群上部的风化和构造破碎带, 新近系及古近系上部巨厚的泥岩、粉砂质泥岩为热储提供良好盖层。盆地内无近代火山作用和岩浆岩侵入(周斌, 2011)。

位于兰州七里河凹陷的运通大厦附近勘查孔, 孔深为 2 003.1 m, 井口出水温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 兰石厂勘查孔, 孔深为 1 903.57 m, 孔底准稳态井温为 $60.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 井口出水温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 说明该区域具有可开发利用的地热资源。兰州地区地温梯度为 $2.5\sim 4.2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 大地热流值最高达 $78\text{ mW}/\text{m}^2$, 盆地内的地热显示较为明显(图 4)。

兰州市中心城区规划面积约为 741 km^2 , 其中地温梯度在 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 以上的面积为 669 km^2 。热储

计算厚度为 2 800 m(埋深为 200~3 000 m)。估算地热可采资源量 $2.03\times 10^{16}\text{ kcal}$, 相当于 29.05 亿 t 标煤(表 7)。

3.3 西宁市

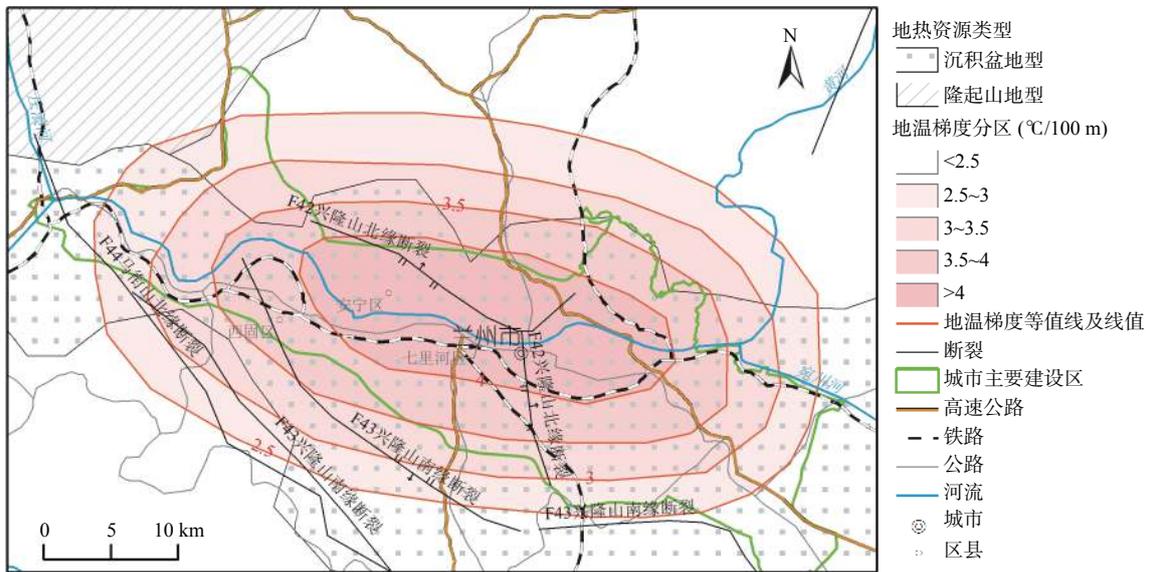
西宁盆地与兰州盆地同处于中祁连构造带, 具有类似的元古界基底、中新生界盖层结构以及地热异常显示, 地下水补给条件和径流条件与兰州盆地也相当(张丰雄等, 2006)。

西宁盆地在元古界和下古生界基底上沉积有侏罗系、白垩系、新近系碎屑岩地层, 受断裂构造影响, 西宁市区沿湟水河为呈东西带状的中央凸起带, 钻孔揭露该带侵入岩基底埋深约为 700~800 m; 市区南部总寨凹陷区碎屑岩厚度可达 3 200 m 以上; 市区北部大寨-后子河-泉湾凸起碎屑岩厚度约为 1 600 m; 再向北则为双树湾凹陷, 凹陷区碎屑岩厚度可达 3 600 m 以上(图 5)(盖层厚度等值线来自于张森琦, 2008)。以往钻探资料显示, 在盆地中心的有利部位, 1 600 m 以浅曾揭露多层地下热水, 其井口水温为 $23.5\sim 62\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属于低温热水。受膏岩地层影响, 地热水矿化度较高。市区中心所在湟水河谷区中央凸起带为地热流体溢出带, 1 000 m 以浅地温异常较明显, 地温梯度呈中间高、南北两侧低的条带状分布。体育中心 R2 地热井的井深为 1 203 m, 井口水温为 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地温梯度为 $3.96\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (李成英

表6 兰州盆地地层特征表(杨俊仓, 2011)

Tab. 6 Stratigraphic characteristics of Lanzhou Basin

地层	特征	
第四系	全新统(Q ₄)	近代冲洪积层, 主要分布在黄河河漫滩及一二级阶地
	上更新统(Q ₃)	马兰黄土及冲洪积砂砾卵石层
	中更新统(Q ₂)	离石黄土及冲洪积砂土夹砾卵石层, 在兰州分布较广
	下更新统(Q ₁)	出露于雷坛河、五泉山一带及南北两山地区的高阶地上, 为山前洪积相堆积
新生界	临夏组(N ₂ l)	河流相碎屑岩、泥岩互层, 厚度约为300 m
	咸水河组(N ₂ x)	河湖相、山麓相砂质泥岩、砂岩、泥岩、黏土岩, 厚度大于782 m
古近系	野狐城组(E ₃ y)	湖相泥岩夹石膏, 厚度为434 m
	西柳沟组(E ₁₋₂ x)	山麓相橘红色碎屑岩, 下部为厚层砾岩, 中上部为砂岩及砂砾岩, 厚度为953 m
中生界	白垩系 河口组(K ₁)	河湖相橘红色碎屑岩。该群的岩性和厚度变化较大, 厚度为600~1 600 m, 盆地边缘岩石粗厚度薄, 盆地中心岩石变细, 厚度增加, 岩性多为黏土岩、砂岩及砾岩
	侏罗系 享堂组(J ₃ x)	河湖相碎屑岩, 厚度为122 m
古生界	奥陶系 窑街群(J ₁₋₂ y)	河湖—沼泽相的含煤沉积, 厚度为166 m
	雾宿山群(O ₂₋₃ WX)	浅海相中—基性火山岩、碎屑岩和硅质岩, 岩石普遍遭受低级或轻度变质, 与中生界呈断层或不整合接触, 厚度大于1 090 m
元古界	泉兰群(Chgl)	海相泥、砂质沉积地层, 经受了多起区域变质和岩浆活动及构造复合作用, 岩石变质程度较深, 破碎严重, 总厚度大于7 713 m
	兴隆山群(Chx)	海相火山硅质岩, 岩层总厚度大于3 759 m, 与马衔山群呈断层接触
	马衔山群(Ptm)	浅海陆源沉积建造, 岩层总厚度大于2 416 m



地温梯度及地热资源类型图层数据来自谢娜(2020)

图4 兰州市地温梯度等值线图

Fig. 4 Isograms of geothermal gradient in Lanzhou

等, 2017); 北川河谷大寨—泉湾凸起一带也有地热异常显示。平面上, 地温梯度值高的井分布在湟水河中央凸起带构造带上, 离构造越远, 梯度值越小, 说明西宁地区地热资源分布与构造关系密切, 断裂构造是控热的主要因素。总体来说, 西宁地热田蕴藏着较为丰富的中低温地热资源, 具有以盆地传导

型面状热储为主, 兼有断裂对流型带状热储的特征。

西宁市城区规划面积约 230 km², 其中地温梯度在 2.5 °C/100 m 以上的面积约为 152 km²。市区基底埋深约为 800~1 200 m, 文中按热储厚度 800 m(埋深 200~1 000 m)估算, 地热可采资源量为 6.54×10¹⁴ kcal, 相当于 0.935 亿 t 标煤(表 8)。

表7 兰州市地热可采资源量估算表

Tab. 7 Estimation of recoverable geothermal resources in Lanzhou

Lanzhou				
地温梯度分区 (°C/100 m)	单位面积可采资源量 (10 ¹³ kcal/km ²)	面积 (km ²)	分区可采资源量 (10 ¹⁶ kcal)	相当于标煤 (10 ⁸ t)
2.5~3	1.03	108	0.11	1.59
3~3.5	3.09	128	0.40	5.66
3.5~4	5.15	206	1.06	15.11
>4	2.06	227	0.47	6.69
合计		669	2.03	29.05

3.4 银川市

银川市所在银川断陷盆地由其东、西两侧北北东向断裂右行走滑拉分形成, 盆地内一系列倾向相同的北北东向正断层, 使地层逐级由两侧向中心错落, 形成阶梯状地层结构。盆地内中心地带, 自古近纪渐新世以来沉积了厚达 9 000 m 的新生代沉积物, 第四系厚度最厚达 2 000 m 以上, 盆地南北两端新生界地层沉积较薄, 古近系地层为一套内陆河湖相红色碎屑岩-膏岩建造, 新近系为一套河湖相红色碎屑岩沉积, 第四系则以河湖相堆积、山麓地带的洪积、黄土堆积最为发育。

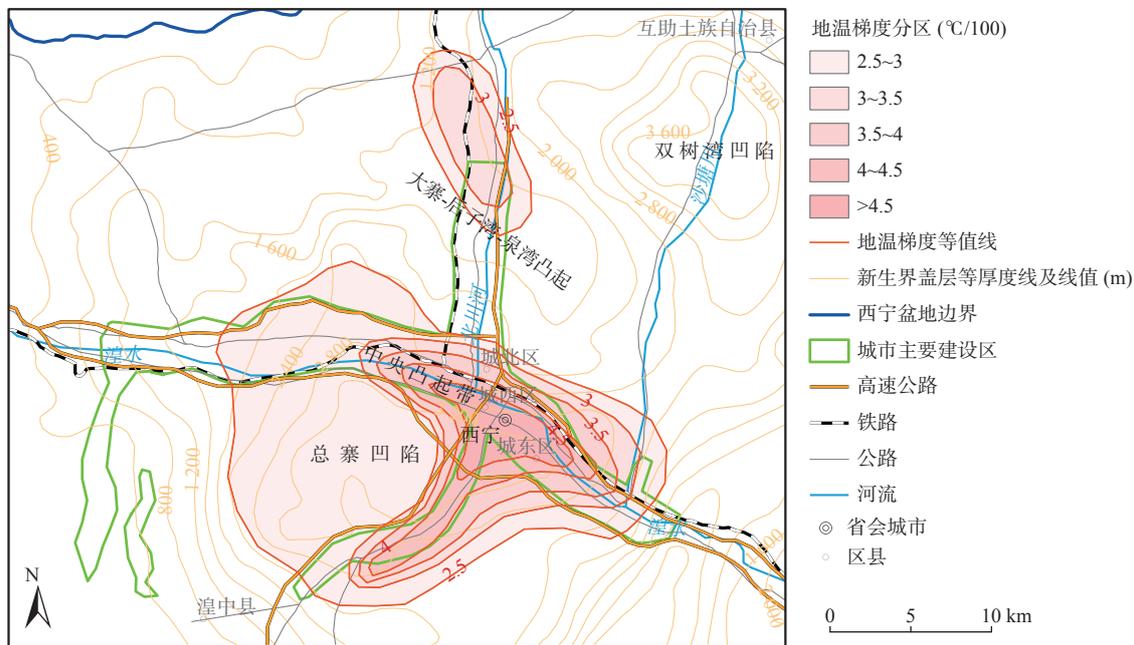


图5 西宁市地温梯度分布图

Fig. 5 Distribution of geothermal gradient in Xining

盆地内有 3 口地热勘探井, 井深为 3 000~3 271 m, 各井的平均地温梯度为 1.92~2.25 °C/100 m, 大地

表8 西宁市地热可采资源量估算表

Tab. 8 Estimate of recoverable geothermal resources in Xining

地温梯度分区 (°C/100 m)	单位面积可采资源量 (10 ¹² kcal/km ²)	面积 (km ²)	分区可采资源量 (10 ¹⁴ kcal)	相当于标煤 (10 ⁷ t)
2.5~3	1.08	62	0.67	0.96
3~3.5	3.24	22	0.71	1.02
3.5~4	5.40	21	1.13	1.62
4~4.5	7.56	25	1.89	2.70
>4.5	9.72	22	2.14	3.05
合计		152	6.54	9.35

热流值为 56.10~57.78 mW/m², 总体地热异常不明显。

3.5 乌鲁木齐市

乌鲁木齐市位于天山北麓, 准噶尔盆地南缘。据区域研究资料, 准噶尔盆地平均地温梯度为 2.26 °C / 100 m(袁丽发等, 2021), 大地热流值平均值为 30~50 mW/m², 属于冷盆。乌鲁木齐市内东部水磨沟出露有 25 °C 的低温温泉, 泉流量仅 1.3 L/s, 属于隆起断裂型脉状地热资源(祖浙江, 2007), 在该泉水附近开凿的孔深 300.15 m 勘探孔, 水温只有 32.5 °C, 因此城区基本不具备可供大规模开发的地热资源。

综合以上分析可见, 单从地热资源条件来说, 西安市地热资源丰富, 也是目前开发利用的较好的城市; 兰州、西宁具有采用中深层埋管地热系统开发利用

地热资源的潜力;银川、乌鲁木齐市的地热资源条件较差,暂时不具备采用中深层埋管地热系统开发利用地热资源的条件。

4 地热供暖的环境效益

统计数据显示,2020年全国城镇居民人均住房建筑面积为 37.6 m^2 ,按此估算西北省会城市的建筑供暖面积(表9)。与西北主要城市集中供热面积(表1)相比,目前各市仍有不少建筑为分散供热。

从各市供热现状看,现有供热热源以天然气和煤为主,其中集中供热来源有集中燃气锅炉供热站和热电联产供热站,分散供热则主要是燃气锅炉。鉴于中深层埋管分散供暖的特点,可优先用于替代分散式燃气锅炉供暖以及新建建筑物供暖,条件具备时逐步替代集中供暖的燃煤、燃气锅炉供暖。

从各市地热资源储量看,如果全部用地热供暖,西安市地热资源可以使用约为487 a,兰州市地热资源可以使用约为310 a,西宁市地热资源可以使用约为36 a。参照《地热资源地质勘查规范》,对盆地型地热田,单井允许开采量按开采100a计,则西安、兰州可做到地热全替代供暖,而西宁市地热资源只能替代36%

的供暖需求。用中深层埋管供热系统替代燃气锅炉,根据每个采暖期、每 10万 m^2 供暖可减排的污染物量(表10)分别计算地热供热在不同替代率上每个采暖季的减碳降污总量(表11)。结果显示,采用中深层埋管供暖减碳及减污效果显著。

表9 城市建筑供暖形式分析表

Tab. 9 Analysis table of urban building heating

城市	城市人口 (万人)	估算建筑面积 (10^8 m^2)	集中供热面积 (10^8 m^2)	估算分散供热面积 (10^8 m^2)	年供热总耗相当 于耗标煤 (10^4 t)
西安	928	3.49	1.52	1.97	1326
兰州	438.43	1.65	1.07	0.58	937
西宁	119.83	0.45	0.13	0.32	256

表10 每 10万 m^2 供暖面积采暖期减排污染物量

Tab. 10 Emission reduction during heating period per 100 000 m^2 heating area

城市	替代热源	减排污染物(t)			
		粉尘	SO ₂	NO ₂	CO ₂
西安	燃气锅炉	1.2	3	12	4482
兰州	燃气锅炉	1.8	4.5	18.1	6776
西宁	燃气锅炉	2.4	6.1	24.4	9109

表11 地热供暖不同替代率下减碳降污总量表

Tab. 11 Total table of carbon reduction and pollution reduction under different substitution rates of geothermal heating

城市	15%替代率		35%替代率		75%替代率		100%替代率	
	粉尘(t)	CO ₂ (10^4 t)	粉尘(t)	CO ₂ (10^4 t)	粉尘(t)	CO ₂ (10^4 t)	粉尘(t)	CO ₂ (10^4 t)
西安	628	235	1465	547	3140	1173	4187	1564
兰州	445	168	1039	391	2225	838	2967	1117
西宁	162	62	378	144	/	/	/	/

5 结论

(1)西北五省省会城市中西安、兰州、西宁市地热资源赋存情况较好,但以往受地热水资源不足的制约,地热资源开发利用程度不高,中深层埋管地热供热系统的取热不取水新技术为开发这些城市的地热资源提供了新的有效途径。按照该技术方法的特征对这3个城市的地热可采资源量进行估算,结合城市人口,西安、兰州两市地热资源量可全部替代城市供暖热源,西宁市可替代约36%的城市供暖热源。

(2)北方城市冬季采暖锅炉排放的废气是大气污染的重要来源之一,近年来,各市虽然采取一系列措

施,如煤改气、锅炉废气污染物治理等措施,环境空气质量仍不能完全达到相关质量标准要求,因此使用地热等清洁能源逐步替代现有供暖热源迫在眉睫,是提高城市区环境质量的有力措施,也是达到双碳目标的重要途径之一。

(3)中深层埋管地热供热作为一种新技术,在快速发展的同时,也遭遇一些技术瓶颈,如其对于热储的开采必然会引起热储层地温场局部乃至区域的变化,这些变化反过来又会影响埋管的取热效率,但目前这些变化及影响因素、后果尚不清楚,因此后期要加强地层中热储的可利用率以及埋管采热强度的研究,以便确定合理的热储开采量,合理规划埋管布置,并尽可能延长其使用寿命。

参考文献(References):

- 冯兴军. 西安地热能开发利用的几点思考[J]. 陕西煤炭, 2017, (4): 8-12.
- FENG Xingjun. Some thoughts on the development and utilization of geothermal energy in Xi'an[J]. Shaanxi Coal, 2017, (4): 8-12.
- 计文化, 王永和, 杨博, 等. 西北地区地质、资源、环境与社会经济概貌[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 15-27.
- JI Wenhua, WANG Yonghe, YANG Bo, et al. Overview of Geology, Resources, Environment and Economy in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 15-27.
- 柯婷婷, 余如洋, 许威, 等. 西安交通大学西咸校区中深层地热资源潜力评估[A]. 中国地球物理学会, 中国地震学会, 全国岩石学与地球动力学研讨会组委会, 中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会, 中国地质学会区域地质与成矿专业委员会. 2018年中国地球科学联合学术年会论文集(二十九)——专题59: 计算地球物理方法和应用、专题60: 地热资源成因新理论与综合探测新技术[C]. 中国和平音像电子出版社, 2018: 44-46.
- 李成英, 韩积斌, 黄鑫, 等. 西宁市海湖新区地下热水形成的机理[J]. 盐湖研究, 2017, 25(2): 13-20.
- LI Chengying, HAN Jibing, HUANG Xin, et al. Formation Mechanism of Groundwater Hot Water in Haihu New District of Xining City[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2017, 25(2): 13-20.
- 穆根胥, 李锋, 闫文中, 等. 关中盆地地热资源赋存规律及开发利用关键技术[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- MU Genxu, LI Feng, YAN Wenzhong, et al. The Geothermal Resource Occurrence Rules and Key Technologies for Development and Utilization in the Guanzhong Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- 秦大军, 庞忠和, Turner J V, 等. 西安地区地热水和渭北岩溶水同位素特征及相互关系[J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1489-1500.
- QIN Dajun, PANG Zhonghe, Turner J V, et al. Isotopes of geothermal water in Xi'an area and implications on its relation to karstic groundwater in North Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(5): 1489-1500.
- 王贵玲, 杨轩, 马凌, 等. 地热能供热技术的应用现状及发展趋势[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 15-24.
- WANG Guiling, YANG Xuan, MA Ling, et al. Status quo and prospects of geothermal energy in heat supply[J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(11): 15-24.
- 谢娜, 喻生波, 丁宏伟. 甘肃省地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1804-1812.
- XIE Na, YU Shengbo, DING Hongwei, et al. Occurrence Features of Geothermal Potential Assessment in Gansu Province[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1804-1812.
- 杨俊仓, 贾贵义, 魏洁. 兰州盆地地热资源及其潜力分析[J]. 甘肃科技, 2011, 27(24): 49-51.
- YANG Juncang, JIA Guiyi, WEI Jie. Geothermal resources and their potential analysis in Lanzhou Basin[J]. *Gansu Science and Technology*, 2011, 27(24): 49-51.
- 余秋生, 周文生. 宁夏地热资源现状评价与区划成果报告[R]. 宁夏回族自治区地质调查院, 2015.
- 袁丽发, 谢宁, 徐海龙. 乌鲁木齐市甘泉堡-古海温泉区地热地质特征分析[J]. 地下水, 2021, 43(2): 59-66.
- YUAN Lifa, XIE Ning, XU Hailong. Ganquanbao-Guhai Hot Spring Zone in Urumqi Analysis of geothermal geological characteristics[J]. *Groundwater*, 2021, 43(2): 59-66.
- 张丰雄, 杨家凯, 刘淑英, 等. 西宁地区地热资源分布规律探讨[J]. 科技资讯, 2006, 21: 138-139.
- ZHANG Fengxiong, YANG Jiakai, LIU Shuying, et al. Discussion on distribution law of geothermal resources in Xining area[J]. *Science & Technology Information*, 2006, 21: 138-139.
- 张森琦, 李长辉, 孙王勇, 等. 西宁盆地热储构造概念模型的建立[J]. 地质通报, 2008, 27(1): 126-136.
- ZHANG Senqi, LI Changhui, SUN Wangyong, et al. Construction of the conceptual model of thermal reservoir structure of the Xining basin, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(1): 126-136.
- 赵振, 于漂罗, 陈惠娟, 等. 青海省西宁地热田成因分析及资源评价[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 803-810.
- ZHAO Zhen, YU Piaolu, CHEN Huijuan, et al. Genetic analysis and resource evaluation of the Xining geothermal field in Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 803-810.
- 周斌. 甘肃省主要城市地热资源特征及开发保护建议[J]. 地下水, 2011, 33(1): 54-57.
- ZHOU Bin. Characteristics of geothermal resources in major cities of Gansu Province and suggestions for development and protection[J]. *Groundwater*, 2011, 33(1): 54-57.
- 祖浙江. 乌鲁木齐水磨沟地热资源类型及勘查方法[J]. 新疆地质, 2007, 25(3): 320-322.
- ZU Zhejiang. Types and exploration methods of geothermal resources in Shuimogou, Urumqi[J]. *Xinjiang Geology*, 2007, 25(3): 320-322.
- Du Dingshan, Li Yongqiang, Wang Kaipeng, et al. Experimental and numerical simulation research on heat transfer performance of coaxial casing heat exchanger in 3500m-deep geothermal well in Weihe Basin[J]. *Geothermics*, 2023, 109: 102658.
- He Yuting, Jia Min, Li Xiaogang, et al. Performance analysis of coaxial heat exchanger and heat-carrier fluid in medium-deep geothermal energy development[J]. *Renewable Energy*, 2021, 168: 938-959.