



移动阅读

李强, 张继, 陈思宏, 等, 2023. 成都市浅层地热能资源调查与评价[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 271–282. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04004

LI Q, ZHANG J, CHEN S H, et al., 2023. Investigation and evaluation of shallow geothermal energy resources in key areas of Chengdu[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 271–282. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04004

成都市浅层地热能资源调查与评价

李强, 张继*, 陈思宏, 唐继张, 蒲文斌

(四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 611032)

摘要: 在“双碳”目标背景下, 浅层地热能作为节能环保能源, 其勘探开发及利用力度亟须加强。基于现场热响应测试、抽水及回灌试验以及岩土体热物性测试, 获取水文地质和热物性参数, 采用层次分析法开展成都市浅层地热能适宜性评价, 估算浅层地热能热容量、换热功率、资源潜力及环境效益。实测成都市研究区 200 m 以浅平均地层温度在 18.59~19.76℃, 地层平均导热率介于 1.89~3.12 W/m·℃。成都市浅层地热能适宜采用地下水和地埋管地源热泵方式开发, 地下水地源热泵方式适宜区面积占 16.36%, 较适宜区面积占 19.72%, 不适宜面积占 63.92%; 除原芒硝矿采空区域外, 研究区均适宜及较适宜地埋管地源热泵方式开发。浅层地热能夏季制冷换热功率总量为 1.19×10^7 kW, 可制冷面积达 1.98×10^8 m²; 冬季供暖换热功率总量为 1.48×10^7 kW, 可供暖面积达 1.57×10^8 m²。据估算, 成都市开发浅层地热能每年可节省标准煤 169 万吨, 减排各类废气污染约 425 万吨, 节能减排效果显著。

关键词: 浅层地热能; 现场试验; 适宜性分区; 资源评价; 成都

中图分类号: P314

文献标识码: A

Investigation and evaluation of shallow geothermal energy resources in key areas of Chengdu

LI Qiang, ZHANG Ji*, CHEN Sihong, TANG Jizhang, PU Wenbin

(Sichuan Research Institute of Geological Engineering Survey, Chengdu 611032, China)

Abstract: In order to achieve carbon peaking and carbon neutrality, shallow geothermal energy as an energy-saving and environmental-friendly energy, its exploration and utilization should be strengthened urgently. Based on the field thermal response test and the pumping and recharging tests, hydrogeological and thermal physical parameters were obtained, and the suitability evaluation of shallow geothermal energy in Chengdu was carried out by using the analytic hierarchy process. The estimated evaluation of shallow geothermal energy heat capacity, heat exchange power and resource potential were obtained. The measured average formation temperature above 200 m in the study area of Chengdu is 18.59–19.76℃, and the average thermal conductivity of the formation is between 1.89–3.12 W/m·℃. The shallow geothermal energy in Chengdu is suitable for the development of groundwater and ground source heat pump system. The area of suitable area accounts for 16.36%, the relatively suitable area accounts for 19.72%, and the unsuitable area accounts for 63.92. Except for the abandoned Mangniu Mine area, all areas are suitable and relatively suitable for the development of ground source heat pump system. The total cooling power of shallow geothermal

收稿日期: 2022-12-31; 改回日期: 2023-03-20; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 白永健

作者简介: 李强 (1987—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质与工程地质研究工作。E-mail: 517412465@qq.com

通讯作者: 张继 (1974—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质与工程地质研究工作。E-mail: 276582940@qq.com

资助项目: 2023 年四川省重点研发计划“中深层地热能高效取热关键技术研究”(23ZDYF2589); 中国地质调查局项目“成都多要素城市地质调查”(DD20189210)。

energy in summer is 1.19×10^7 kW, and the cooling area is 1.98×10^8 m². The total heating power in winter is 1.48×10^7 kW, and the heating area is 1.57×10^8 m². It is estimated that the development of shallow geothermal energy in Chengdu can save 1.69 million tons of standard coal per year, and reduce the emission of various types of waste gas pollution by about 4.25 million tons. The effect of energy saving and emission reduction is remarkable.

Key words: Shallow geothermal energy; field test; suitability zoning; resource evaluation; Chengdu

0 引言

浅层地热能具有可再生、清洁环保以及分布广泛等特点,主要存在于地表以下一定深度范围内的岩土体、地下水以及地表水中,可通过热泵技术用于建筑物供暖制冷(Galgaro et al., 2015; Song et al., 2021)。其利用方式主要有地埋管地源热泵、地下水地源热泵和地表水地源热泵等(王贵玲等, 2017)。随着时代需求及政策导向的推动,浅层地热能开发技术得到高效迅速的发展。

国外学者已经对浅层地热能的开发利用进行了大量的研究和应用(Hachnlein et al., 2010; Carlino et al., 2014; Shrestha et al., 2020),而我国则是在 20 世纪 90 年代引进地源热泵技术后才开始关注和重视浅层地热能的开发利用,并在实验装置、能耗评价以及系统材质等方面取得了长足进步(刘宪英等, 1999, 2000; 何雪冰等, 2004)。随着这些方法和技术的发展,浅层地热能开发利用在全国各领域迅速发展并取得了显著成果(许苗娟等, 2009; 张承斌等, 2021; 黄露玉等, 2022)。然而,由于浅层地热能地源热泵的盲目开发,部分地区的适宜性评价不合理,未能达到节能减排的效果,造成不必要的浪费损失(王贵玲等, 2020)。因此,在开发利用浅层地热能之前,结合区域地质背景条件、因地制宜划分适宜区具有重要意义(张甫仁等, 2013; 龙西亭等, 2016; 卢玮等, 2022)。目前国内已有大量的浅层地热能开发工程案例,但针对资源量评价和经济环境效益分析的研究成果尚不多见(蔺文静等, 2013),有必要进一步开展相关的评价工作。

截止 2022 年底,成都市建成浅层地热能工程项目约 28 处,制冷及供热建筑物面积约 200 万 m²。然而由于缺乏科学的适宜性分区评价,资源量多为匡算,导致浅层地热能开发利用成效不佳。为使成都市浅层地热能开发利用有序进行,优化市场环境和投资建设条件,本文通过现场热响应试验、抽水及回灌试验以及岩土体热物性测试,获取研究区岩

体的导热系数、地层温度、回灌能力等评价参数,采用层次分析法开展成都市浅层地热能适宜性评价,计算浅层地热能热容量、换热功率以及资源潜力,估算经济与环境效益,以期成都市浅层地热能开发利用提供科学、准确的基础数据。

1 浅层地热能地质条件

浅层地热能的赋存、运移、传导以及开发利用受地层结构特征、水文地质特征、浅层地温场以及岩体热响应的制约,不同区域的资源量和开发利用方式存在较大差异(韩再生等, 2007)。

1.1 地质结构特征

研究区范围涵盖成都市中心城区、天府直管区部分区域、淮州新城、简州新城。浅层地热能赋存与本区的地层结构密切相关,第四系松散沉积层及热物性较好的基岩都可作为浅层地温能赋存的良好载体(郭镜等, 2022)。研究区前第四系地层有白垩系天马山组(K_{1t})、灌口组(K_{2g})、夹关组(K_j)以及蓬莱镇组(J_{3p}),地层岩性以砂泥岩为主,属软岩-较软岩,浅层地热能钻探可钻性较好。第四系地层主要为全新统冲积层(Q_{4^{al}})、全新统冲洪积层(Q_{4^{al-pl}})、上更新统冰水-流水堆积层(Q_{3^{gl-al}})、上更新统成都粘土(Q_{3^{col}})、中下更新统冰水-流水堆积层(Q_{1+2^{gl-al}})以及部分基岩残坡积层(表 1)。地层沉积厚度分布不均,从西向东由数百米变薄至数米,平原区厚度十至三百余米,温江附近局部达三百余米,台地区厚数米至二十余米,最厚在牧马山北端约四十米,地层结构东西向的差异对浅层地热能的开发产生重大影响(罗改等, 2021)。

1.2 水文地质特征

水文地质特征决定了浅层地热能资源开发利用的方式和规模。研究区地下水类型分为第四系砂砾卵石层孔隙潜水和白垩—侏罗系砂泥岩裂隙孔隙水两类(图 1)。

(1) 第四系砂砾卵石层孔隙潜水

该类水主要集中分布于研究区平原区,包括河道漫滩及一级阶地冲积层(Q_{4^{al-pl}})砂砾卵石层孔隙

表1 研究区第四系地层平面分布情况表
Table 1 The plane distribution of Quaternary strata in the study area

地层时代及代号	面积 (km ²)	研究区比例 (%)	分布位置
第四系全新统冲积层 (Q ₄ ^{al})	121.35	10.2	江安河以及府河沿河两侧
全新统冲洪积层 (Q ₄ ^{al-pl})	42.16	3.6	鹿溪河、西江河及其支流沿河两侧
上更新统冰水-流水堆积层 (Q ₃ ^{fgl-al})	522.18	44.0	平原区河间地块
上更新统成都粘土 (Q ₃ ^{col})	317.33	26.8	成都东部台地之上
中、下更新统冰水-流水堆积层 (Q ₁₊₂ ^{fgl-al})	38.32	3.2	南部台地及东部台地丘顶
基岩残坡积层	144.67	12.2	苏码头背斜附近大面铺、新兴镇一带

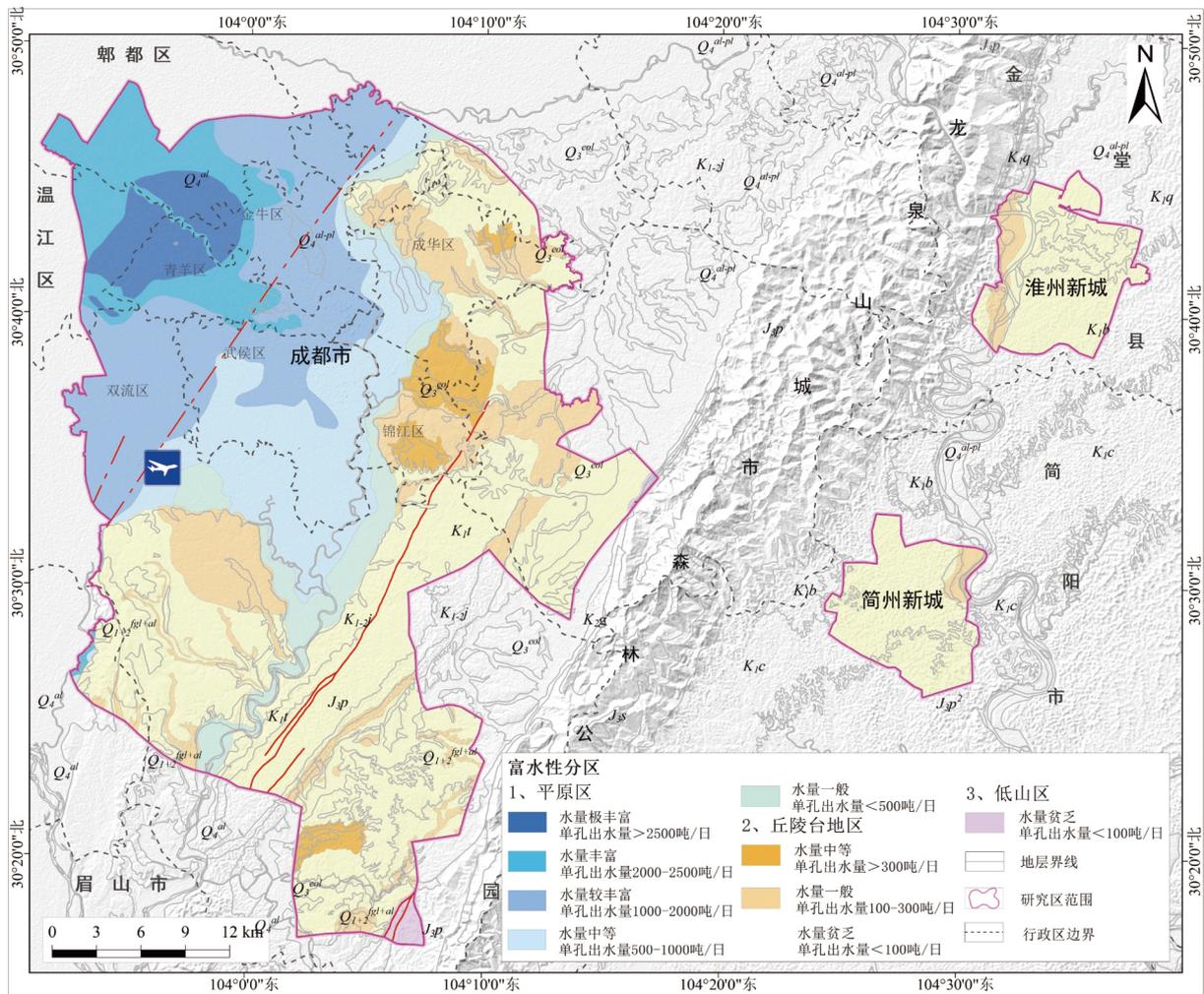


图1 研究区水文地质简图
Fig. 1 Hydrogeological Map of Study Area

潜水、平原河间二级阶地及冰水-流水堆积层(Q₃^{fgl-al})含泥砂砾卵石层孔隙潜水以及平原边缘近台地区(Q₃^{fgl-al})冲洪积泥砂砾卵石层孔隙微承压水,该三类含水层组结构松散,孔隙性好,单井涌水量一般500~2000 m³/d,是区内最佳含水层,也是浅层地热开发利用首选含水层。

(2)白垩—侏罗系砂泥岩裂隙孔隙水
分布于研究区东部苏码头背斜核部附近,岩性主要为白垩系、侏罗系砂泥岩。受地形地貌及地质构造作用条件影响划分为风化带裂隙水和层间裂隙水(韩丽莎,2006)。该类地下水富水性差,单井涌水量一般小于200 m³/d,一定程度制约了该区

采用地下水模式开发。

1.3 浅层地温场特征

地下恒温层温度及厚度是影响浅层地热能资源评价的基本参数。通过搜集成都市及其周边钻孔地温场监测资料,成都平原地下水水温较稳定,水温一般 16.8~19.4℃,图 2 显示了各孔内地下水温度随季节变化曲线关系。研究区恒温层顶板主要分布在 23~30 m,平均为 27.4 m;恒温层底板埋深为 58~70 m,平均埋深 60 m;恒温层厚度一般为 23~35 m,平均厚度为 32.6 m;恒温层温度一般在 18.3~18.8℃ 之间(图 3)。

2 试验

2.1 现场热响应测试

为获得岩土体热物性参数,在评价区开展 26

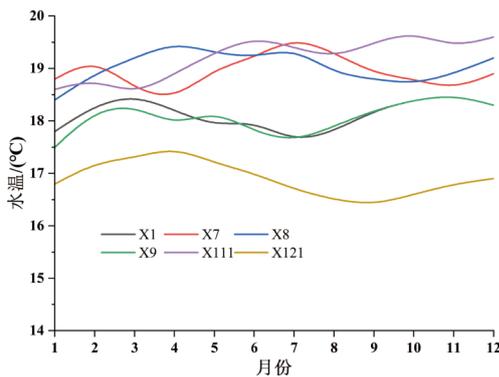


图 2 表层地下水温度随季节变化曲线

Fig. 2 Seasonal variation curve of surface groundwater temperature

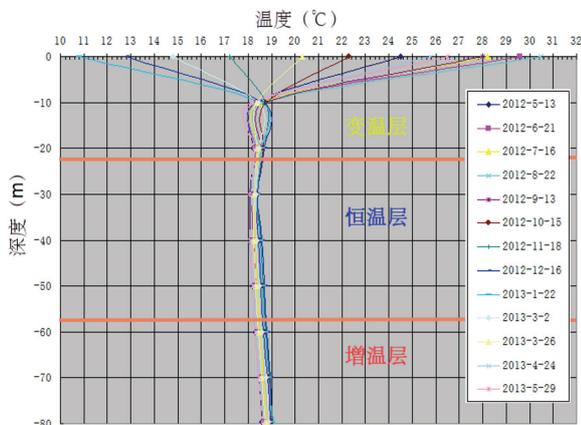


图 3 X121 热响应试验孔垂向温度变化曲线

Fig. 3 The vertical temperature change curve of X121 thermal response test hole

组热响应测试试验,搜集 6 组测试数据,试验采用岩土热响应测试仪,恒热流测试法,单个工况测试持续时间超 96 h。试验表明(表 2、图 4),成都市 200 m 以浅平均地层地温在 18.59~19.76℃。平原第四系砂卵石地层平均导热系数为 1.89~2.65 W/m·℃,X9 钻孔受地下水富水性和水流场影响,出现大于 3 的异常值;台地红层砂泥岩地层平均热导率为 2.04~2.95 W/m·℃,X7 钻孔受断层构造影响,导热系数高达 3.52 W/m·℃;东部简州新城以砂泥岩互层为主,且裂隙不发育,地下水水量贫乏,该区导热系数普遍偏低,一般为 2.07~2.76 W/m·℃,东部淮州新城厚层砂泥岩岩土体平均导热系数为 2.31~3.12 W/m·℃。

2.2 抽水及回灌试验

地下水水量和回灌能力是判定地下水地源热泵方式开发的决定性因素,采用灌采比用以初步确定地下水源地热泵方式的适宜性(王楠等,2012)。根据研究区 23 组抽回灌试验数据分析,平原区含水层回灌量集中在 30~50 m³/h,灌采比 0.328~0.992(表 3)。位于平原区西侧的 Q₄^{al-pl}、Q₃^{fgl-al} 上部含水层回灌能力较好,灌采比大于 0.7,可满足“一抽一回”或“两抽三回”的方式开采浅层地热能;平原中部和东部地带的 Q₃^{fgl-al} 含水层回灌能力一般,灌采比多保持在 0.4~0.7 区间,大部分仍可满足“一抽两回”的方式开发;东部及南部边缘地带 Q₁₊₂^{fgl-al}、Q₃^{ool} 含水层回灌能力较差,灌采比多小于 0.4,不利于以地下水的形式开发浅层地热能。

2.3 岩土体热物性测试

地层热物性参数决定了不同岩土体地层的换热能力,是适宜性划分的依据之一(张甫仁等,2013b)。本次在热响应试验钻孔中采取原状土样,每类岩土体 6 组以上,试验成果如表 4 所示。研究区地层热物性性质普遍较好,各类岩土体的热导率都相对集中于 0.69~1.79 W/(m·℃),平均值 1.28 W/(m·℃),变异系数 0.23,热导率的变异性较大,差异明显。主要是由于工作区位于成都平原岷江冲洪积扇及台地区,第四系地层经过长期的沉积和新构造运动,各岩土体内均夹有成分不尽相同,从而造成岩土体热导率具有差异性,也间接说明了成都平原区第四系沉积环境特征和地层结构的复杂性。岩石样品的热扩散系数一般在 0.3~0.92 m²/s,其变化幅度同导热系数基本一致。

表2 现场热响应试验岩土热物性参数表
Table 2 Geothermal physical parameters of field thermal response test

序号	试验编号	地质特征	平均原始地温 (°C)	导热系数 (W/m·°C)
1	ZK16		18.95	1.89
2	ZK18		19.62	2.27
3	ZK19		18.59	2.01
4	ZK20		19.5	2.7
5	ZK21	西部成都平原第四系砂卵石地层	20.2	2.15
6	ZK22		19.9	2.95
7	X8		18.86	2.14
8	X9		18.94	3.41
9	X111		18.9	2.13
10	ZK01		19.26	2.27
11	ZK02		18.65	2.53
12	ZK03		19.58	2.34
13	ZK15		19.18	2.04
14	ZK17		19.15	2.75
15	ZK23	东部台地区, 上部10~20 m粘土地区,	18.7	2.72
16	ZK24	下部为红层砂泥岩地层	19.22	2.72
17	ZK25		19.15	2.76
18	ZK26		19.35	3.06
19	X1		18.47	2.45
20	X7		18.82	3.52
21	X112		18.79	2.62
22	ZK10		19.73	2.23
23	ZK11		20.12	1.49
24	ZK12	简州新城丘陵区以砂泥岩互层为主地层	19.76	1.88
25	ZK13		19.68	1.3
26	ZK14		19.45	1.56
27	ZK04		18.8	3.35
28	ZK05		18.71	2.71
29	ZK06		18.82	2.37
30	ZK07	淮州新城丘陵区以厚层砂岩为主地层	19.25	3.14
31	ZK08		19.69	2.44
32	ZK09		19.71	3.3

3 浅层地热能开发利用适宜性分区

3.1 评价方法及模型

根据成都市特殊的地域特点和地质结构,采用层次分析法对浅层地热能适宜性进行分区(金婧等, 2012; 魏林森等, 2016),其评价模型结构如图5所示。

3.2 因子权重确定

依据评价体系的层次结构模型,采用专家打分方法,通过各因素之间的两两比较确定合适的标度,构造判断矩阵(唐永香, 2014; 宋帅良, 2018)。使

用CR值检验判断一致性,确定各因子权重(表5)。

3.3 综合评价结果

根据上述地下水和地埋管适宜性分区结果,划分为适宜区、较适宜区以及不适宜区三个级别综合评价,如图6所示。

地下水地源热泵适宜性分区:分布中心城区的西北部平原区的温江区、郫县等地,含水层出水量大于1500 m³/d,灌采比一般大于70%,适宜地下水地源热泵,适宜区面积占比16.36%;分布于西三环外及绕城间及双流县东北部,处于平原冲积扇前部,含水层出水量大于1000 m³/d,灌采比一般50%~

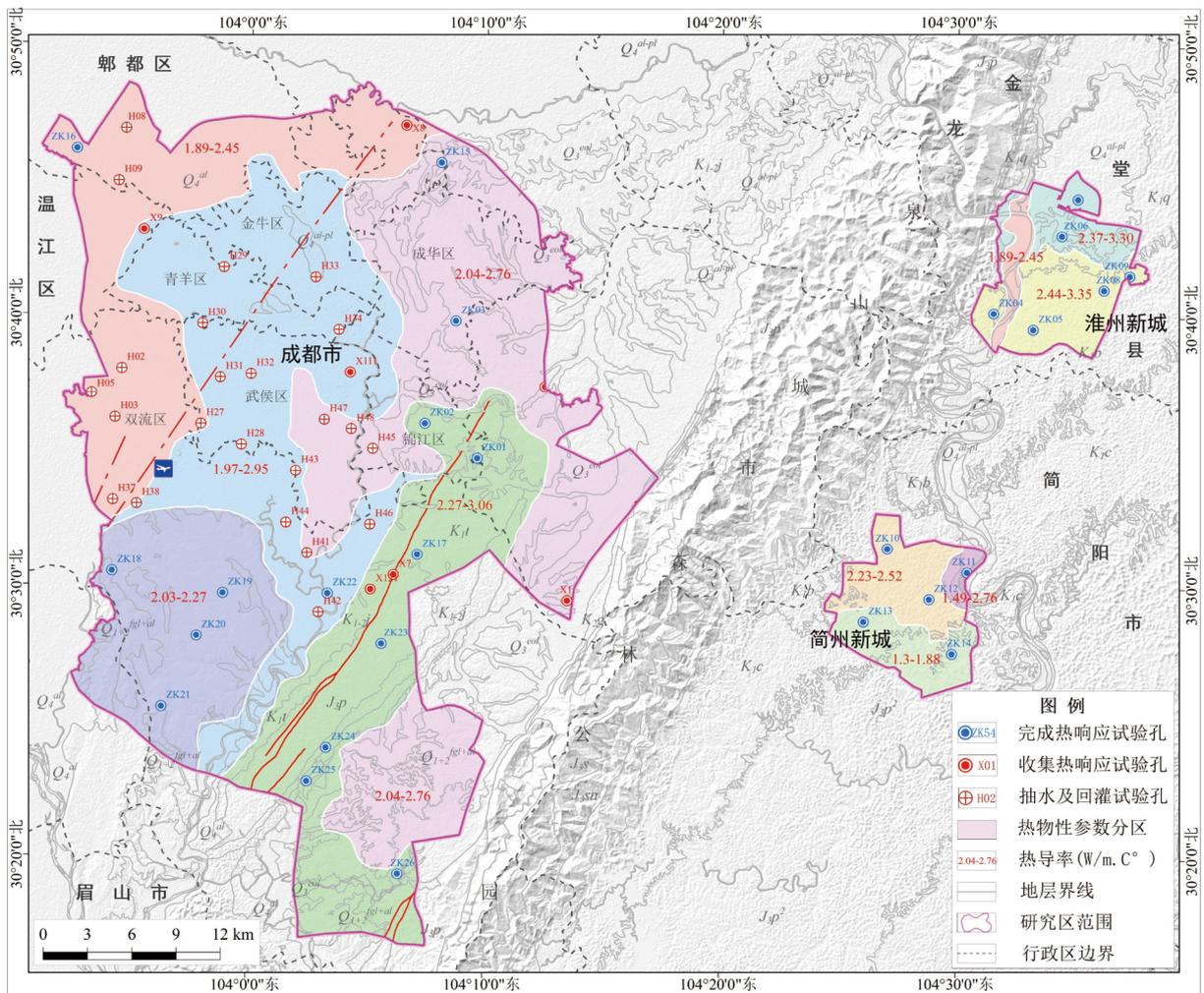


图4 现场热响应试验导热系数分区图

Fig. 4 Thermal conductivity partition diagram of field thermal response test

70%, 较适宜地下水地源热泵, 较适宜区面积占比 19.72%; 分布于研究区东部及南部的台地区和丘陵区, 含水层出水量多小于 $500 \text{ m}^3/\text{d}$, 灌采比一般低于 50%, 不适宜地下水地源热泵的方式, 占研究区面积的 63.92%。

地理管地源热泵适宜性分区: 分布于研究区东部及南部的红层砂泥岩地层及成都粘土地层, 第四系厚度薄, 导热系数大, 钻进条件相对较好, 适宜地理管地源热泵开发, 面积占比 50.46%; 在西部平原厚层砂卵石层地区, 不利于热源井成孔和下管, 且热物性差异性较大, 较适宜地理管地源热泵开发, 面积占比 45.21%; 不适宜区主要分布于普兴镇袁山村以及双流区三江坝一带, 该片区为原钙芒硝矿采空区, 岩体中已充填“老窖水”, SO_4^{2-} 高达 1.2×10^5 毫克/升, 对地理管具有极强的腐蚀性, 不适宜面积占比 4.33%。

4 浅层地热能资源评价

4.1 热容量

采用体积法计算研究区地表以下 200 m 深度浅层地热能热容量(中华人民共和国国土资源部, 2009)。先计算包气带和饱水带的热容量, 再合并计算地质体的总容量。

(1) 包气带中浅层地温容量按下式计算:

$$Q_R = Q_S + Q_W + Q_A \quad (1)$$

$$Q_S = \rho_S C_S (1 - \varphi) M d_1 \quad (2)$$

$$Q_W = \rho_W C_W \omega M d_1 \quad (3)$$

$$Q_A = \rho_A C_A (\varphi - \omega) M d_1 \quad (4)$$

(2) 饱水带中浅层地温容量按下式计算:

$$Q_R = Q_S + Q_W \quad (5)$$

$$Q_W = \rho_W C_W \varphi M d_2 \quad (6)$$

表3 抽水及回灌试验统计表

Table 3 Statistical table of pumping and recharge test

回灌试验编号	含水层厚度 (m)	平均影响半径 (m)	单位涌水量 (L/s·m)	回灌量 (L/s·m)	灌采比
H41	12.5	89.00	2.388	1.978	0.829
H42	12.5	99.68	2.360	2.000	0.847
H33	28	84.18	3.883	3.544	0.913
H34	28	87.68	4.067	3.752	0.923
H46	8.5	78.09	1.609	1.217	0.757
H37	14.1	109.49	2.643	2.093	0.792
H38	15.2	139.04	2.577	2.545	0.988
H05	19.97	149.45	2.158	1.004	0.465
H32	24.5	88.74	3.814	2.705	0.709
H31	24.5	83.82	3.444	2.537	0.737
H30	25.1	132.90	3.187	2.833	0.889
H09	28.06	235.83	5.720	5.362	0.937
H03	17.7	175.40	2.494	2.375	0.952
H08	28.06	237.24	6.525	6.244	0.957
H27	24.5	131.80	3.274	3.162	0.966
H28	24	134.90	3.169	3.105	0.980
H29	25.1	136.30	3.230	3.184	0.986
H02	18	122.60	2.530	2.509	0.992
H44	11.8	91.16	2.268	0.745	0.328
H43	11.4	99.93	1.976	0.696	0.352
H47	15	70.43	2.197	0.839	0.382
H48	15	76.10	2.217	0.848	0.383
H45	9.8	97.88	1.843	0.776	0.421

表4 岩土体热物性参数平均值表

Table 4 Average value of physical properties and thermophysical parameters of rock mass

地层时代	岩性	热物性参数		
		热导率 (W/m·°C)	热扩散系数 (m ² /s)	比热容 (J/kg·°C)
第四系	粘土	0.98	0.30×10 ⁻⁶	1 724.40
	粉质粘土	1.07	0.85×10 ⁻⁶	410.20
	粉土	1.19	0.83×10 ⁻⁶	724.37
	细砂	0.69	0.66×10 ⁻⁶	448.52
	砂砾卵石	1.23	0.79×10 ⁻⁶	231.59
基岩	泥岩	1.79	0.71×10 ⁻⁶	1 068.71
	粉砂质泥岩	1.35	0.64×10 ⁻⁶	878.88
	含钙芒硝粉砂质泥岩	1.53	0.67×10 ⁻⁶	839.57
	砂质泥岩	1.13	0.50×10 ⁻⁶	827.26
	砂岩	1.56	0.67×10 ⁻⁶	802.85
	细砂岩	1.60	0.92×10 ⁻⁶	758.99
	泥质砂岩	1.33	0.54×10 ⁻⁶	939.38
	泥质粉砂岩	1.25	0.57×10 ⁻⁶	823.88

式中： Q —浅层地温能热容量； Q_s 、 Q_w 、 Q_A —岩土体中固液气热容量； M 、 d_1 、 d_2 —计算面积、包气带厚度、潜水位至计算下限厚度； ρ_s 、 C_s 、 φ —岩土体密

度、比热容、孔隙率； ρ_w 、 C_w —水密度、比热容； ρ_A 、 C_A —空气密度、比热容。

地下水地源热泵适宜区和较适宜区总热容量

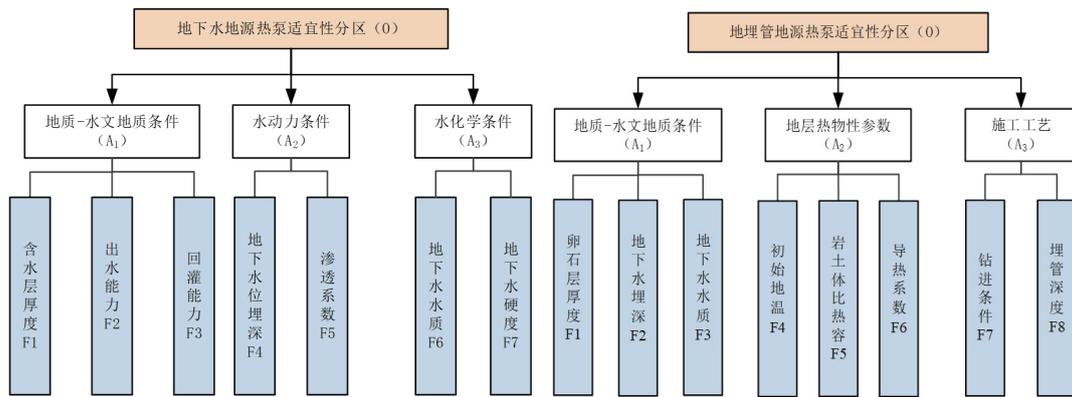


图5 适宜性分区评价模型结构图

Fig. 5 Suitability zoning evaluation model structure diagram

表5 各因素综合权重表

Table 5 Comprehensive weight table of each factor

地下水地源热泵系统		地理管地源热泵系统	
因素	综合权重	因素	综合权重
含水层厚度	0.059 9	卵石层厚度	0.173 5
含水层出水能力	0.276 4	地下水位埋深	0.054 6
含水层回灌能力	0.288 7	地下水水质	0.068 8
地下水位埋深	0.079 5	导热系数	0.215 8
含水层渗透系数	0.159 0	岩土体比热容	0.215 8
地下水水质	0.068 3	初始地温	0.107 9
地下水硬度	0.068 2	埋管深度	0.054 5
		钻进条件	0.108 9

为 6.65×10^{14} kJ/°C; 地理管地源热泵适宜区和较适宜区总热容量为 6.43×10^{14} kJ/°C (表6)。

4.2 换热功率

采用水量折算法计算地下水地源热泵系统适宜区换热功率, 采用热传导法计算地理管地源热泵系统适宜区换热功率 (宋小庆等, 2018)。

(1) 地下水地源热泵适宜区换热功率按下式计算:

$$Q_q = Q_h \times n \times \tau \quad (7)$$

$$Q_h = q_w \times \Delta T \times \rho_w \times C_w \times 1.16 \times 10^{-5} \quad (8)$$

式中: Q_q 、 Q_h —评价区、单井浅层地温能换热功率; n —可钻抽水井数; τ —土地利用系数; q_w 、 ΔT —地下水循环利用量与温差; ρ_w 、 C_w —水的密度与比热容。

(2) U形地理管地源热泵适宜区换热功率按下式计算:

$$D = \frac{2\pi L |t_1 - t_4|}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}} \quad (9)$$

$$Q_h = D \times n \times 10^{-3} \quad (10)$$

式中: Q_h 、 D —评价区、单孔浅层地温能换热功率; n —换热孔数; L —地理管换热器长度; λ 、 r 、 t —材料热导率、等效半径、温度。

按土地利用系数 100% 所算值为理论参考值, 考虑土地利用系数所计算值为本次评价值。计算结果表明 (图7), 成都市地理管地源热泵系统的冬季制冷和夏季制热功率远远大于地下水地源热泵系统, 主要原因是工作区大面积适宜地理管地源热泵系统的开发。在考虑土地利用系数的情况下, 成都市浅层地热能夏季制冷换热功率总量为 1.19×10^7 kW, 冬季供暖换热功率总量为 1.48×10^7 kW。

4.3 资源潜力

采用单位面积可供暖面积或制冷面积评价地理管地源热泵和地下水地源热泵两种开发方式下的资源潜力, 计算公式如下:

$$S_{qt} = Q \div M \div q \quad (11)$$

式中: S_{qt} —地理管或地下水热泵系统的资源潜力;

表 7 成都市浅层地温能资源利用节能减排量分析表

Table 7 Analysis of energy conservation and emission reduction of shallow geothermal energy resource utilization in Chengdu

项目	CO ₂	SO ₂	NO _x	粉尘	灰渣
系数	2.386	1.7%	0.6%	0.8%	0.1%
总量/(kg/a)	1.69×10 ⁹	4.03×10 ⁹	2.87×10 ⁷	1.01×10 ⁷	1.35×10 ⁷

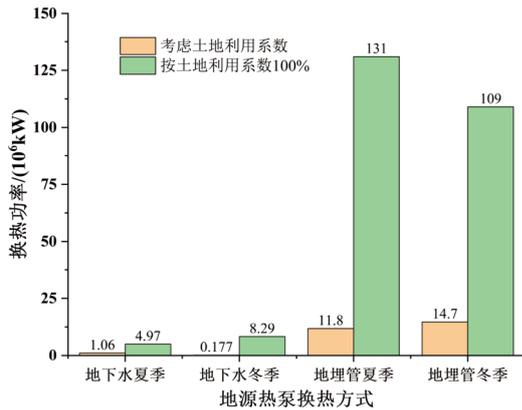


图 7 成都市地下水和地埋管地源热泵换热功率总量对比图

Fig. 7 Comparison of total heat transfer power of groundwater and ground source heat pump system in Chengdu

8.47×10⁷ GJ, 类比常规能源(燃煤)的方法进行折算, 其年经济价值约为 60 794.03 万元, 折合标煤量 482 万吨, 节煤量 169 万吨(表 7)。依据相关规范(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010), 估算浅层地热能开发利用带来的环境效益。成都市若开发利用浅层地热能资源每年减排各类废气污染约 425 万吨, 有利于“双碳”目标的实现。

为了有效地开发和利用浅层地温能资源, 必须采取循序渐进的步骤, 避免盲目的大规模开发利用。因此, 建议先加强浅层地温能的监测, 确定准确的环境影响数据, 核实可开采资源总量, 然后再对开发利用区划和规划进行研究, 以实现合理、可持续的浅层地温能资源开发利用, 从而达到与环境和谐发展的目的。

5 结论

(1)通过现场热响应试验, 研究区 200 m 以浅平均地层温度在 18.59~19.76℃, 平原第四系砂卵石地层平均导热系数为 1.89~2.65 W/m·℃, 台地红层砂泥岩地层平均热导率为 2.04~2.95 W/m·℃, 东

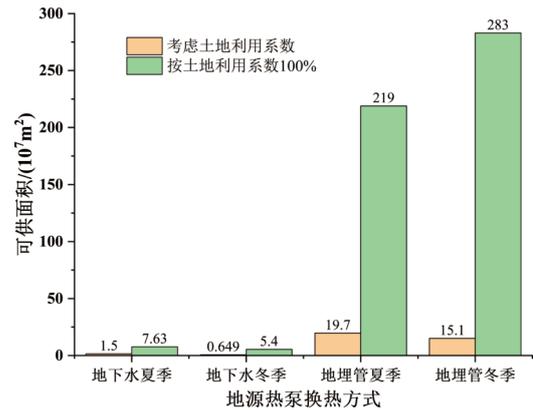


图 8 成都市地下水和地埋管地源热泵系统换热功率总量对比图

Fig. 8 Comparison of total heat transfer power of groundwater and ground source heat pump system in Chengdu

部简州新城砂泥岩平均导热系数为 2.07~2.76 W/m·℃, 东部淮州新城砂泥岩地层岩土体平均导热系数为 2.31~3.12 W/m·℃。

(2)抽水及回灌试验表明位于平原区西侧的上部含水层回灌能力较好, 可满足“一抽一回”或“两抽三回”; 平原中部和东部地带的含水层回灌能力一般, 大部分仍可满足“一抽两回”的方式开发; 东部边缘地带含水层回灌能力较差, 不利于地下水地源热泵的开发利用。

(3)地下水地源热泵方式适宜区面积占 16.36%, 较适宜区面积占 19.72%, 不适宜面积占 63.92%。地下水地源热泵系统不适宜区全部为地埋管地源热泵的适宜区。研究区除原芒硝矿采空区域外, 均适宜及较适宜地埋管地源热泵方式开发。

(4)成都市采用地下水地源热泵方式可利用的浅层地热能总量达 6.65×10¹⁴ kJ/℃, 地埋管地源热泵方式可利用的浅层地热能总量为 6.43×10¹⁴ kJ/℃。研究区夏季制冷换热功率总量为 1.19×10⁷ kW, 可制冷面积达 1.98×10⁸ m²; 冬季供暖换热功率总量为 1.48×10⁷ kW, 可供暖面积达 1.57×10⁸ m²。

(5)浅层地热能开发可有效减少碳排放, 提高

能源利用效率。据估算,成都市开发浅层地热能每年可节省标准煤 169 万吨,减排各类废气污染约 425 万吨,节能减排效果显著。

References

- Carlino S, Somma R, Troiano A, et al., 2014. The geothermal system of Ischia Island (southern Italy) : Critical review and sustainability analysis of geothermal resource for electricity generation[J]. *Renewable Energy*, 62: 177 – 196 .
- Galgaro A, Di Sipio E, Teza G, et al., 2015. Empirical modeling of maps of geo-exchange potential for shallow geothermal energy at regional scale[J]. *Geothermics*, 57: 173 – 184 .
- Haehnlein S, Bayer P, Blum P, 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9) : 2611 – 2625 .
- Song C, Li Y, Rajeh T, et al., 2021. Application and development of ground source heat pump technology in China[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6 (1) : 17 .
- Shrestha G, Yoshioka M, Fujii H, et al., 2020. Evaluation of suitable areas to introduce a closed-loop ground source heat pump system in the case of a standard Japanese detached residence[J]. *Energies*, 13 (17) : 1 – 15 .
- Guo J, Xia S B, 2022. Spatial carrier of geothermal system in eastern Sichuan fold zone——interconnected fault system: A case study of geothermal well in Moujia Town, Guang'an, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (4) : 642 – 652 (in Chinese with English abstract).
- Han Z S, Ran W Y, Tong H B, et al., 2007. Shallow geothermal energy exploration and evaluation[J]. *Geology in China*, 34 (6) : 1115 – 1121 (in Chinese with English abstract).
- Han L S, 2006. Study on the genetic mechanism of environmental geochemical anomalies in Jinma area, Wenjiang, Chengdu [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese) .
- He X B, Ding Y, Liu X Y, 2004. Heat transfer model of ground source heat pump buried tube heat exchanger and its application[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, (2) : 76 – 80 (in Chinese with English abstract).
- Huang L Y, Liang J L, Liu B, et al., 2022. Suitability zoning of ground source heat pump in Guang'an City based on combination weighting method [J]. *Science Technology and Engineering*, 22 (13) : 5116 – 5124 (in Chinese with English abstract).
- Jin J, Xi W J, Chen Y F, et al., 2012. Evaluation of shallow geothermal energy suitability zoning based on AHP[J]. *Journal of Water Resources and Hydraulic Engineering*, 23 (3) : 91 – 93 (in Chinese with English abstract).
- Lin W J, Liu Z M, Wang W L, et al., 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 40 (1) : 312 – 321 (in Chinese with English abstract).
- Liu X Y, Wang Y, Hu M M, et al., 1999. Experimental study on underground vertical ground heat exchanger of ground source heat pump[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, (5) : 21 – 26 (in Chinese with English abstract).
- Liu X Y, Zhang S Y, Hu M M, et al., 2000. Geothermal source heat pump combined winter and summer heating and cooling[J]. *Water conservancy and power construction machinery*, (1) : 14 – 22 (in Chinese with English abstract).
- Long X T, Yuan R Q, Pi J G et al., 2016. Survey and Evaluation of Shallow Geothermal Energy in Changsha[J]. *Journal of Natural Resources*, 31 (1) : 163 – 176 (in Chinese with English abstract).
- Lu W, Shang Y S, Shen Y F, 2022. Suitability evaluation and optimization design of the shallow geothermal energy underground heat exchange system ——Taking Zhengzhou shallow geothermal energy demonstration project as an example [J]. *Drilling Engineering*, 49 (3) : 146 – 153(in Chinese with English abstract).
- Luo G, Wang Q W, Chen Y L, et al., 2021. Division and basic characteristics of tectonic units in Sichuan Province[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (4) : 633 – 647 (in Chinese with English abstract).
- Song S L, 2018. Study on the suitability of shallow geothermal energy development and utilization in Heze City [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).
- Song X Q, 2018. Evaluation on utilization potential of shallow geothermal energy in major cities of Guizhou[J]. *Karst in China*, 37 (1) : 9 – 16 (in Chinese with English abstract).
- Tang Y X, 2014. Study on the occurrence law and development and utilization countermeasures of shallow geothermal energy in Binhai New Area [D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese).
- Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al., 2020. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 27 (1) : 1 – 9.
- Wang G L, Zhang W, Liang J Y, et al., 2017. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China[J]. *Earth Journal*, 38 (4) : 449 – 450+134+451 – 459 (in Chinese with English abstract).
- Wang N, Cao J F, Zhao J C, et al., 2012. Suitability zoning evaluation of shallow geothermal energy development and utilization in Changchun City[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 42 (4) : 6 (in Chinese with English abstract).
- Wei L S, Ding H W, Wang T, et al., 2016. Analysis of suitability evaluation of shallow geothermal energy based on analytic hierarchy process—a case study of the central urban area of Lanzhou[J]. *Frontiers of Earth Science*, 6 (5) : 412 – 421 (in Chinese with English abstract).
- Xu M J, Jiang Y, Xie Z H, et al., 2009. Study on suitability zoning of water source heat pump in Beijing plain area based on analytic hierarchy process[J]. *Urban geology*, 4 (1) : 18 – 22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C B, 2022. Suitability evaluation of shallow geothermal energy based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation: A case study of Changle County in Shandong

- Province[J]. *Geological Survey of China*, 9 (2) : 91 - 99 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F R, Zhu F Y, Peng Q Y, et al., 2013a. Evaluation of suitability zoning of shallow geothermal energy in the main urban area of Chongqing[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 32 (4) : 647 - 651 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F R, Peng Q Y, Zhu F Y, et al., 2013b. Evaluation of shallow geothermal energy resources in the main urban area of Chongqing[J]. *China Geology*, 40 (3) : 974 - 980 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2009. DZ/T0225-2009 [S]. Beijing: China Standard Press.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2010. Geothermal Resources Geological Exploration Specification GB/T11615-2010 [S]. Beijing: China Standard Press.
- ### 附中文参考文献
- 郭镜, 夏时斌, 2022. 川东褶皱带地热系统的空间载体——相互连通的断裂系统: 以四川广安牟家镇地热井为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 42 (4) : 642 - 652.
- 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 等, 2007. 浅层地热能勘查评价[J]. *中国地质*, 34 (6) : 1115 - 1121.
- 韩丽莎, 2006. 成都温江金马地区环境地球化学异常成因机理研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 何雪冰, 丁勇, 刘宪英, 2004. 地源热泵埋管换热器传热模型及其应用[J]. *重庆建筑大学学报*, (2) : 76 - 80.
- 黄露玉, 梁金龙, 刘斌, 等, 2022. 基于组合赋权法的广安市地源热泵适宜性分区[J]. *科学技术与工程*, (013) : 022.
- 金婧, 席文娟, 陈宇飞, 等, 2012. 基于AHP的浅层地热能适宜性分区评价[J]. *水资源与水工程学报*, 23 (3) : 91 - 93.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等, 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 40 (1) : 312 - 321.
- 刘宪英, 王勇, 胡鸣明, 等, 1999. 地源热泵地下垂直埋管换热器的试验研究[J]. *重庆建筑大学学报*, (5) : 21 - 26.
- 刘宪英, 张素云, 胡鸣明, 等, 2000. 地源热泵冬夏暖冷联供试验研究[J]. *水利电力施工机械*, (1) : 14 - 22.
- 龙西亭, 袁瑞强, 皮建高, 等, 2016. 长沙浅层地热能资源调查与评价[J]. *自然资源学报*, 31 (1) : 163 - 176.
- 卢玮, 尚永升, 申云飞, 2022. 浅层地热能地下换热系统适宜性评价与优化设计——以郑州市浅层地热能示范工程为例[J]. *探矿工程-岩土钻掘工程*, 49 (3) : 146 - 153.
- 罗改, 王全伟, 陈宇龙, 等, 2021. 四川省大地构造单元划分及其基本特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (4) : 633 - 647.
- 宋帅良, 2018. 菏泽市浅层地热能开发利用适宜性研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 宋小庆, 2018. 贵州主要城市浅层地热能利用潜力评价[J]. *中国岩溶*, 37 (1) : 9 - 16.
- 唐永香, 2014. 滨海新区浅层地热能赋存规律及其开发利用对策研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等, 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. *地学前缘*, 27 (1) : 1 - 9.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等, 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 38 (4) : 449 - 450+134+451 - 459.
- 王楠, 曹剑峰, 赵继昌, 等, 2012. 长春市区浅层地热能开发利用方式适宜性分区评价[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 42 (4) : 6.
- 魏林森, 丁宏伟, 王婷, 等, 2016. 基于层次分析法的浅层地热能适宜性评价分析——以兰州市中心城区为例[J]. *地球科学前沿*, 6 (5) : 412 - 421.
- 许苗娟, 姜媛, 谢振华, 等, 2009. 基于层次分析法的北京市平原区水源热泵适宜性分区研究[J]. *城市地质*, 4 (1) : 18 - 22.
- 张承斌, 2022. 基于层次分析法-模糊综合评价模型的浅层地热能适宜性评价——以山东省昌乐县为例[J]. *中国地质调查*, 9 (2) : 91 - 99.
- 张甫仁, 朱方圆, 彭清元, 等, 2013a. 重庆主城区浅层地热能适宜性分区评价[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 32 (4) : 647 - 651.
- 张甫仁, 彭清元, 朱方圆, 等, 2013b. 重庆主城区浅层地热能资源量评价研究[J]. *中国地质*, 40 (3) : 974 - 980.
- 中华人民共和国国土资源部, 2009. 浅层地热能勘察评价规范 DZ/T0225—2009[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010. 地热资源地质勘查规范 GB/T11615—2010[S]. 北京: 中国标准出版社.