

doi: 10.12029/gc20220512

李娟,郑佳,雷晓东,杜境然,李富,贾子龙,刘爱华. 2022.北京平原区第四系热物性参数特征及对浅层地热能开采的影响因素分析[J]. 中国地质, 49(5): 1543-1554.

Li Juan, Zheng Jia, Lei Xiaodong, Du Jingran, Li Fu, Jia Zilong, Liu Aihua. 2022. Analysis of quaternary thermal properties and influencing factors on shallow geothermal energy exploitation in Beijing plain[J]. Geology in China, 49(5): 1543-1554(in Chinese with English abstract).

北京平原区第四系热物性参数特征及对浅层地热能开采的影响因素分析

李娟^{1,2}, 郑佳^{1,2}, 雷晓东³, 杜境然^{1,2}, 李富^{2,4}, 贾子龙^{1,2}, 刘爱华^{1,2}

(1. 北京市地热调查研究所, 北京 102218; 2. 自然资源部浅层地热能重点实验室, 北京 102218; 3. 北京市生态地质研究所, 北京 100120; 4. 北京市华清地热开发集团有限公司, 北京 102218)

摘要:【研究目的】岩土热物性是影响浅层地热能资源评价及利用的重要参数。【研究方法】在北京平原区各冲洪积扇采集了 695 件第四系岩土样品进行热物性及土工参数测试, 分析了热物性参数特征及其对浅层地热能开采的影响。【研究结果】北京平原区第四系岩土热导率平均值为 1.465~2.022 W/(m·K), 热扩散率平均值为 $0.450 \times 10^{-6} \sim 0.841 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 比热容平均值为 2.323~3.080 MJ/(m³·K), 热导率(λ)与热扩散率(κ)值存在一定的线性关系, 相关方程为 $\lambda = 1.6973\kappa + 0.6127$ 。第四纪松散沉积物颗粒越细, 热导率值越低; 含水率 0~5% 范围内, 热导率随含水率增加迅速增大, 含水率 5%~20% 范围内, 热导率增加变缓并趋于稳定, 含水率 20%~40% 范围内, 热导率随含水量增大而降低; 在天然状态下, 热导率随着密度的增加而增大, 随着孔隙比的增加而降低; 样品温度在 0~40 °C 范围内, 热导率随温度升高呈先减小后增大的趋势, 20 °C 时热导率最低。【结论】第四系热物性参数随地质条件变化而变化, 热物性参数大小会影响浅层地热能储存、采集和扩散能力, 热导率、热扩散率及比热容越大, 岩土蓄热和导热能力越强。

关键词:热导率; 热扩散率; 比热容; 第四系; 浅层地热能; 地热调查工程; 北京平原区

创新点:获得了北京市平原区第四系热导率、热扩散率和比热容参数统计特征, 分析了热物性参数对浅层地热能开采的影响。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)05-1543-12

Analysis of quaternary thermal properties and influencing factors on shallow geothermal energy exploitation in Beijing plain

LI Juan^{1,2}, ZHENG Jia^{1,2}, LEI Xiaodong³, DU Jingran^{1,2}, LI Fu^{2,4}, JIA Zilong^{1,2}, LIU Aihua^{1,2}

(1. Beijing Geothermal research institute, Beijing 102218, China; 2. Key Laboratory of Shallow Geothermal Energy, MNR, Beijing 102218, China; 3. Beijing Institute of Ecological Geology, Beijing 100120, China; 4. Beijing Huaqing Geothermal Development Group Co. LTD, Beijing 102218, China)

Abstract: This paper is the result of the geothermal geological survey engineering.

收稿日期: 2021-02-06; 改回日期: 2021-06-01

基金项目: 北京市浅层地温能资源可持续利用研究及示范工程建设项目(PXM2018-158309-000002)资助。

作者简介: 李娟, 女, 1983 年生, 高级工程师, 主要从事浅层地热能资源开发利用方面研究; E-mail: lj1983205@163.com。

[Objective] Thermal properties are important parameters for the evaluation and utilization of shallow geothermal energy resources. **[Methods]** In this work, we collected 695 quaternary samples from alluvial and diluvial fans in Beijing plain. Then thermal properties and geotechnical parameters were tested, and the characteristics of thermal properties and their influence on shallow geothermal energy extraction were analyzed. **[Results]** The results show that the average range of quaternary samples in Beijing plain is 1.465–2.022 W/(m·K) for thermal conductivity, 0.450×10^{-6} – 0.841×10^{-6} m²/s for thermal diffusion, and 2.323–3.080 MJ/(m³·K) for specific heat, respectively. There is a linear relationship between the thermal conductivity (λ) and the thermal diffusivity (κ) with correlation equations $\lambda = 1.6973\kappa + 0.6127$. The finer the particles size of quaternary loose sediments, the lower the thermal conductivity. The thermal conductivity increases rapidly with the moisture content within the range of 0–5% and tends to stabilize within the range of 5%–20%. The thermal conductivity decreases with the increase of water content within the range of 20%–40%. Under natural state, the thermal conductivity increases with the increase of the density and decreases with the increase of the pore ratio. When the sample temperature is in the range of 0–40 °C, the thermal conductivity first decreases and then increases and keeps lowest at 20 °C. **[Conclusions]** Thermal properties of the quaternary vary with geological conditions. They are related to the storage, collection and diffusion capacity of shallow geothermal energy. The larger the thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity, the greater the soil heat storage and thermal conductivity.

Key words: thermal conductivity; thermal diffusion; specific heat; quaternary; shallow geothermal energy; geothermal survey engineering; Beijing plain

Highlights: The statistical characteristics of quaternary thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat in Beijing plain area are obtained, and the influence of thermal physical parameters on shallow geothermal energy exploitation is analyzed.

About the first author: LI Juan, female, born in 1983, senior engineer, mainly engaged in the research of shallow geothermal energy utilization; E-mail:lj1983205@163.com.

Fund support: Supported by sustainable utilization of shallow geothermal energy and construction of demonstration projects in Beijing (No.PXM2018-158309-000002).

1 引 言

浅层地热能是一种可再生能源,具有很大的节能和减少污染的潜力,可以为碳中和目标的实现发挥重要作用(马冰等,2021; Yao et al., 2021)。北京市浅层地热能的资源利用发展迅速,目前开发区域及深度主要集中在平原区第四系200 m以浅范围内(王贵玲和陆川,2022),在资源开发利用过程中,第四系岩土热物性是影响浅层地热能资源评价及利用的重要参数。岩土热物性参数包括热导率、热扩散率以及比热容等,这些参数反映了岩土的蓄热和导热能力,是浅层地热能资源赋存特征研究、资源潜力评价和热泵系统开发的基础数据(阮传侠等,2017; Wang et al., 2020)。浅层地热能资源利用系统设计中地下岩土热导率10%的偏差会造成埋管换热长度4.5%~5.8%的偏差,进而影响系统初投资和运行效果(Kavanaugh, 2000; 栾英波等, 2014)。因此为给浅层地热能资源评价和高效利用提供科学依据,国内外学者对热导率等热物性参数开展了深入研究,如Peters–Lidard等比较了不同类

型土壤热导率与含水率的关系(Peters–Lidard et al., 1998; Ghuman and Lal, 1985; Tarnawski and Gori, 2002), Cho and Kwon (2010)提出了花岗岩热导率和比热容与孔隙率和含水率的相关性。雷晓东等(2018a)、栾英波等(2011)对北京地区基岩地层和黏土及细砂热导率开展过测试及数理统计分析,研究了热导率随含水率及孔隙率的变化规律,但已有成果侧重于基岩地层或第四系某单一岩性,针对北京平原区浅部第四系热物性特征尚未开展系统性研究。本文在北京平原区各冲洪积扇采集了695件第四系不同岩性的岩土样品进行热物性及土工参数测试,开展了北京平原区第四系热物性参数特征及对浅层地热能开采的影响因素分析,研究成果可为浅层地热能的资源评价、开发利用和系统建设提供基础依据。

2 研究区概况

北京平原区是典型的由永定河、潮白河、温榆河、蓟运河和拒马河等河流相互作用叠置塑造而成的山前缓倾斜冲洪积平原,总面积约6400 km²。这些冲洪积扇结构清晰,从扇顶到扇缘第四纪沉积物

为砂砾石、中粗砂、粉细砂到黏土,由粗到细趋势明显,含水层系统逐渐由单一含水层向多层含水层系统过渡。扇顶位于山前,水动力条件较强,沉积颗粒物粗大,为单一砂卵、砾石层或砂卵、砾石层顶部覆盖薄层黏性土,地下水可直接接受大气降水补给,含水层性质为潜水含水区,地层渗透性好,富水性强;扇中地层结构为黏性土层、砂层与砂砾石互层,含水层性质为潜水-弱承压水,地层渗透性较好,富水性较强;冲洪积扇下游地区地层结构为黏性土层、砂层互层,黏性土层数多且稳定,累积厚度增大,含水层性质为承压水,含水层渗透性一般,富水性一般(蔡向民等, 2009; 苗晋杰等, 2020)。第四纪沉积物厚度变化较大,总体上自山前不足 10 m 到东南部逐渐增厚,在沉积凹陷中心最厚达 1000 余米,如北京城区及石景山、丰台一带第四纪沉积物不足 100 m,昌平马池口、平谷和通州张家湾一带,厚度达 400 m 以上,顺义后沙

峪凹陷厚度可达 1000 m 以上。

北京市浅层地热能资源开发利用的主要方式为埋管地源热泵系统,根据已有研究成果,北京平原区埋管地源热泵地质条件适宜区划分为两个等级。一是埋管地源热泵系统地质条件适宜区,主要位于北京市平原区各冲洪积扇中下部,包括通州区、朝阳区大部分地区、海淀山后、昌平区东部、顺义区西南部、大兴区南部以及房山区和延庆区的少部分区域。二是埋管地源热泵系统地质条件较适宜区,主要分布在北京市平原区各冲洪积扇的上部,包括东城区、西城区、平谷区、密云区、怀柔区、丰台区、石景山区、房山区和延庆区的大部分地区、大兴区和顺义区北部以及海淀区和昌平区的部分区域(图 1)。

3 样品采集与测试

本文在北京平原区各冲洪积扇共采集 695 个岩

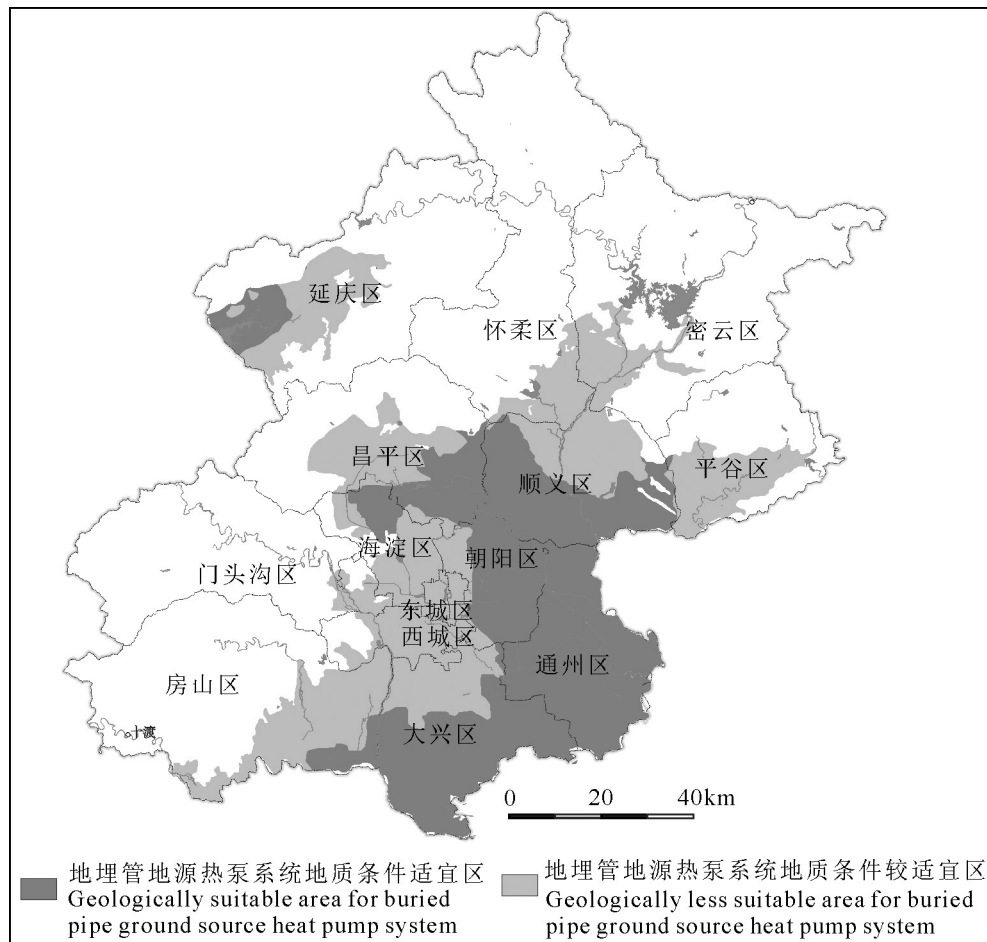


图 1 北京平原区埋管地源热泵系统适宜性区划图

Fig.1 Suitability zones of buried pipe ground source heat pump system in Beijing plain

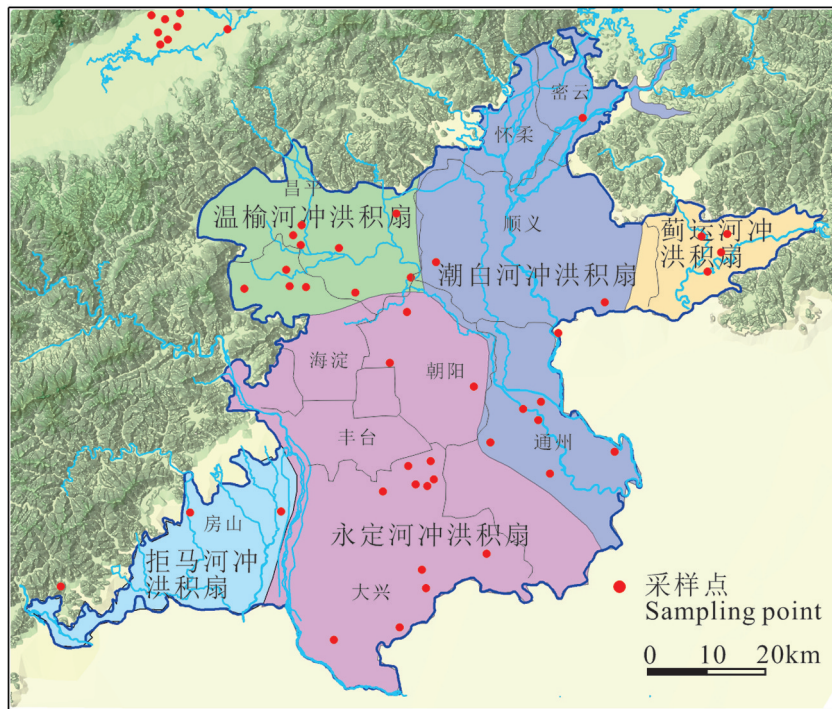


图2 采样点位置图

Fig.2 Map of sampling locations

土样品,覆盖通州区、昌平区、朝阳区等11个行政区,共涉及108个勘查孔(孔位见图2),孔深30~150 m,其中30 m深度内勘查孔52个,30~100 m深度内勘查孔24个,100~150 m深度内勘查孔32个,每个勘查孔钻探深度内采样间隔一般为10 m,个别孔根据地层埋深进行适当调整,采样点情况见表1。采集样品岩性分圆砾、砾砂、粗砂等共11类(表2),与黏性土相比较,砂层、砂砾石层颗粒结构不稳定,很小的振动、剪切就可能对其产生较大的扰动,采取真实、可靠的原状样较为困难,因此本次采集到的粗砂、砾砂、圆砾样品数量较少。

本文测试热物性参数包括热导率、热扩散率与比热容,测试仪器为基于瞬变平面热源法的瑞典 Hot Disk 热常数分析仪。测试仪器通过可同时作为加热源和温度传感器的探头给样品提供恒定功率,利用热传导过程中产生的温度数据,拟合函数曲线,计算得出样品的热导率与热扩散率,并推算比热容。该仪器热导率测试范围0.005~500 W/(m·K),精度为 $\pm 3\%$,热扩散率测试范围0.1~100 mm²/s,精度为 $\pm 5\%$,比热容测试范围0.01~5 MJ/(m³·K),精度为 $\pm 7\%$ 。

表1 北京平原区第四纪沉积物采样点信息表

Table 1 Sampling points of Quaternary sediments in the Beijing Plain

序号	取样区域	钻孔数	采样数量/件	钻孔进尺/m
1	通州区	37	240	1982.5
2	昌平区	12	66	750
3	朝阳区	6	30	240
4	大兴区	18	95	1040
5	房山区	4	11	112
6	海淀区	4	21	280
7	密云区	1	1	60
8	平谷区	8	36	505
9	顺义区	6	126	600
10	延庆区	11	59	780
11	东城区	1	10	120
12	总计	108	695	6469.5

4 热物性参数特征

根据《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》(DBJ11-501-2009),本次采集样品按颗粒级配或塑性指数可分为碎石土、砂土、粉土和黏性土。为避免异常值对统计结果造成影响,将测试结果在2倍标准

表2 北京平原区第四系热导率

Table 2 Thermal conductivities of Quaternary in Beijing plain

分类	岩性	样品个数	范围/(W/(m·K))	均值±标准偏差
碎石土	圆砾	3	1.912~2.213	2.022±0.165
	砾砂	3	1.285~2.249	1.624±0.541
	粗砂	5	1.080~2.259	1.580±0.516
砂土	中砂	36	1.087~2.121	1.611±0.318
	细砂	39	1.162~2.045	1.601±0.223
	粉砂	13	1.078~1.939	1.579±0.248
粉土	砂质粉土	13	1.122~1.846	1.627±0.210
	黏质粉土	64	1.169~2.177	1.695±0.235
	粉质黏土	273	0.851~2.083	1.465±0.307
黏性土	重粉质黏土	92	1.021~2.083	1.559±0.286
	黏土	78	1.010~2.352	1.683±0.370

表3 北京平原区第四系热扩散率

Table 3 Thermal diffusivity of Quaternary in Beijing plain

分类	岩性	样品个数	范围/(mm ² /s)	均值±标准偏差
碎石土	圆砾	3	0.792~0.872	0.841±0.043
	砾砂	3	0.421~0.927	0.677±0.253
	粗砂	5	0.525~0.956	0.709±0.170
砂土	中砂	34	0.516~0.980	0.717±0.131
	细砂	35	0.557~0.900	0.719±0.098
	粉砂	7	0.558~0.869	0.682±0.124
粉土	砂质粉土	16	0.365~0.860	0.581±0.145
	黏质粉土	34	0.474~0.745	0.616±0.074
	粉质黏土	129	0.363~0.653	0.508±0.074
黏性土	重粉质黏土	38	0.353~0.594	0.466±0.064
	黏土	28	0.351~0.543	0.450±0.051

表4 北京平原区第四系比热容

Table 4 Specific heat capacity of Quaternary in Beijing plain

分类	岩性	样品个数	范围/(MJ/(m ³ ·K))	均值±标准偏差
碎石土	圆砾	3	2.278~2.549	2.414±0.135
	砾砂	3	1.980~3.065	2.493±0.545
	粗砂	5	1.382~3.818	2.421±0.971
砂土	中砂	32	1.713~3.095	2.389±0.370
	细砂	33	1.799~2.888	2.323±0.304
	粉砂	8	1.379~2.868	2.344±0.496
粉土	砂质粉土	13	1.709~3.342	2.707±0.478
	黏质粉土	27	2.552~3.100	2.846±0.148
	粉质黏土	109	2.666~3.328	3.000±0.156
黏性土	重粉质黏土	33	2.772~3.314	3.064±0.146
	黏土	25	2.608~3.514	3.080±0.241

偏差范围外的数据剔除,得到北京平原区第四系岩土热导率、热扩散率以及比热容的范围值见表2~4。

热导率(λ)指沿热传递的方向单位长度上温度降低1℃时单位时间内通过单位面积的热量,岩土热导率反映出其导热能力的大小,是地层热物理性质重要参数之一。本次测试结果显示北京平原区第四系岩土热导率平均值为1.465~2.022 W/(m·K),热导率均值从大到小依次是圆砾2.022、黏质粉土1.695、黏土1.683、砂质粉土1.627、砾砂1.624、中砂1.611、细砂1.601、粗砂1.580、粉砂1.579、重粉质黏土1.559和粉质黏土1.465(单位W/(m·K)),数据分布特征见图3a。

热扩散率(κ)表示岩土在加热或冷却中,温度趋于均匀一致的能力,岩土热扩散率高时,热量扩散快,且传递距离较远,而在热扩散率低的岩土中热量扩散较慢。北京平原区第四系岩土热扩散率平均值范围为 $0.450 \times 10^{-6} \sim 0.841 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (表3),数据分布特征见图3b。热扩散率和热导率物理意义相似,均是表征岩土传递热流能力的,因此热扩散率和热导率的影响因素及其变化方向是一样的(雷晓东等,2018b),图3d显示北京平原区第四系岩土样品热导率与热扩散率值存在一定的线性关系,相关方程为 $\lambda=1.6973\kappa+0.6127, R=0.8723$ 。

岩土比热容(C)为一定质量的某种岩土温度升高(或降低)1℃时所吸收(或放出)的热量,是浅层地热能资源评价中计算热能储存量的必要参数。本文中测试的岩土比热容为体积比热容,单位MJ/(m³·K)。从表4中可知北京平原区第四系岩土比热容平均值范围在2.323~3.080 MJ/(m³·K)。比热容平均值从大到小依次是黏土3.080、重粉质黏土3.064、粉质黏土3.000、黏质粉土2.846、砂质粉土2.707、砾砂2.493、粗砂2.421、圆砾2.414、中砂2.389、粉砂2.344和细砂2.323(单位: MJ/(m³·K)),整体上碎石土和砂土的比热容相对较低,粉土和黏性土的比热容较高,数据分布特征见图3c。

5 热导率影响因素分析

在传热分析中,热扩散率(κ)是热导率(λ)与比热容(C)和密度(ρ)的乘积之比:

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho \times C} \quad (1)$$

考虑到岩土热导率是浅层地热能可采资源量的

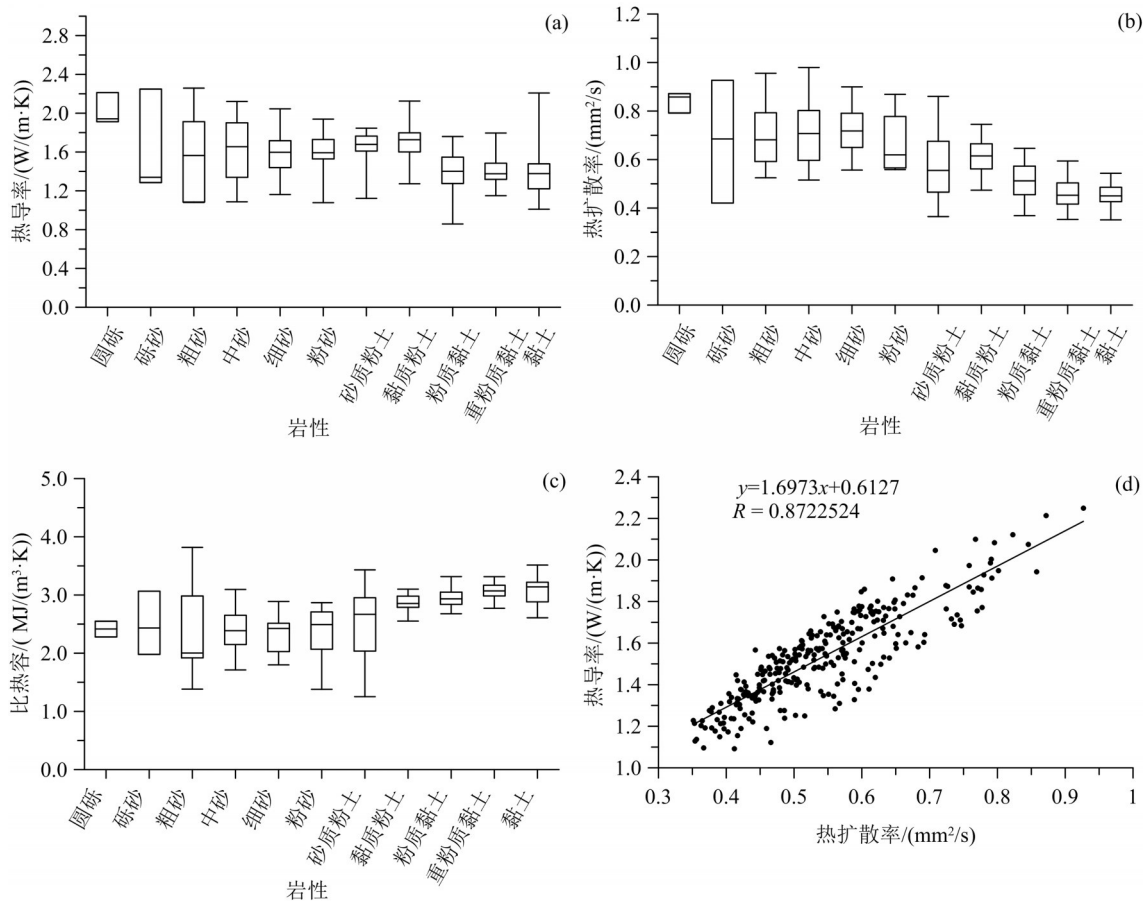


图3 不同岩性热物性参数箱线图

a—热导率;b—热扩散率;c—比热容;分位符代表:最大值、75%分位数、中位数、25%分位数、最小值及热导率与热扩散率关系曲线图(d)

Fig.3 The boxplot of thermal conductivity of different lithology samples

a—Thermal conductivity; b—Thermal diffusion; c—Specific heat; Division character means: Maximum, 75% quantile, the median, 25% quantile, and the minimum value and coefficient curve of thermal conductivity and thermal diffusion (d)

主要控制参数,本文重点分析岩土热导率的影响因素。第四纪松散沉积物中能量传递的机理要比固相岩石复杂得多,热导率主要影响因素有矿物成分、颗粒大小、含水率、孔隙比、密度以及温度等。

5.1 矿物组分和粒径

北京平原区第四纪松散沉积物中黏性土、粉土及砂土热导率在 1.465~1.695 W/(m·K)范围内,碎石土热导率数值大于2 W/(m·K),不同岩土体其矿物组分和比例不同,对岩土热导率起到了控制作用,通常岩土中热导率高的矿物含量越高,热导率就越高,例如石英的热导率高达 7.70 W/(m·K),白云石 5.44W/(m·K),方解石 3.60W/(m·K),长石 2.24W/(m·K),萤石 8.63 W/(m·K)(徐振章,1992;邱楠生,2002;宋小庆等,2019)。北京平原区第四纪沉积物研究程度相对

较低,沉积类型多,沉积物组成复杂,砂砾石矿物成分以石英为主,其中永定河冲洪积扇细砂中石英、斜长石较多,云母次之,底部砾石的主要成分有安山岩、砂岩、凝灰岩,其次为闪长岩、细晶岩、石英岩、石髓等。后沙峪凹陷下更新统砾石成分以石英质为主,其次为中基性火成岩。平谷凹陷下更新统砾石成分主要为砂岩、片麻岩,少量白云岩、火山岩(蔡向民等,2016),岩土成土母岩矿物成分和比例不同会使热导率产生差异。

塑性指数(IP)在土力学中是评价细粒土的主要指标,在一定程度上综合反映了细粒土特征,塑性指数越大,表明土的颗粒越细,比表面积越大。本文测试结果显示黏性土和粉土热导率值与塑性指数呈现一定的负相关关系(图 4a),相关方程为

$\ln(\lambda) = -0.0203 IP + 0.6413$, $R=0.5775$, 表明岩土体颗粒越细, 热导率值越低。李毅等(2003)、王铄等(2012)在测定不同质地岩土热导率的试验中也发现, 岩土中砂粒含量越高, 热导率越大, 究其原因, 当岩土颗粒粒径越大时, 每单位热流路径的接触热阻越小, 从而导致了热导率的增大(陈驰等, 2020)。北京平原区冲洪积扇由扇顶到扇缘岩性由砂、卵砾石变为砂与黏土互层, 沉积物粒径逐渐减小, 岩土导热性能也逐渐减弱(王婉丽等, 2017)。本次采集的样品中粉土和黏性土的比热容较高于碎石土和砂土, 说明北京平原区冲洪积扇沿扇顶到扇缘导热性能减弱的同时, 岩土自身热能调蓄能力逐渐增强, 开发利用浅层地热能向地层排取热量对地温场产生的影响逐渐降低。

5.2 天然含水率

含水率(w)是影响岩土热导率的重要参数, 肖琳等(2009)在保持孔隙比、干密度、土样成分等各影响因素不变的情况下, 系统研究了某种黄色粉土的热导率与含水率之间的变化规律。栾英波等(2013)在北京市平原区采集8件粉质黏土样品, 对其热导率与含水率之间的关系进行统计分析。研究结果显示粉土和粉质黏土含水率在0~20%时, 热导率值随着含水量的增加而增大, 含水率0~5%范围内时, 热导率急剧增长, 含水率大于10%时, 随含水率的增加热导率的增长缓慢并趋于稳定。这是由于岩土体由固体颗粒、水和空气组成, 空气在常压下热导率为0.023 W/(m·K), 水的平均热导率为0.599 W/(m·K), 土样中加入水分后, 颗粒表面会形成一层水膜, 增加岩土颗粒之间的连接, 促进颗粒间的热传导, 改善热量传输的条件(肖琳等, 2008; 杜宜臻等, 2015)。

本文采集了第四系原状样品, 测试了黏土、重粉质黏土、粉质黏土、黏质粉土、砂质粉土、粉砂、细砂及中砂的天然含水率和热导率, 结果显示测试样品的天然含水率基本集中在20%~40%, 热导率随着天然含水率的增加呈现下降趋势(图4b), 将样品热导率与含水率分别进行线性、对数、指数和乘幂拟合, 结果显示两者之间线性规律明显, 相关方程为 $\lambda = -0.0240w + 2.1328$, $R=0.7115$ 。同样苏天明等(2006)也指出南京地区饱和状态下20件黏性土样品天然含水率在25%~50%, 其热导率随着含水量的增加而降低, 呈下降曲线。

综合分析, 岩土体干燥状态下颗粒间热传导主要途径为接触传导, 少量的水加入增大了颗粒的有效接触面积, 因此热导率随含水率迅速增加(含水率0~5%)。随着含水率逐渐增多, 颗粒有效面积增加不明显, 而孔隙水逐渐增加, 水的热导率比空气热导率大, 所以热导率增加变缓并趋于稳定(含水率5%~20%)。当含水量达到一定临界数值后, 颗粒有效接触面积不再增加, 随着含水量增大, 岩土体中固体颗粒所占的比例相应降低, 而水的热导率比固体矿物的热导率低导致岩土体的热导率降低(含水率20%~40%)。

5.3 密度和孔隙比

密度(ρ)、孔隙比(e)也是影响岩土热导率的主要因素之一, 将本次采集样品热导率与天然密度、孔隙比进行拟合, 得到了北京平原区第四系岩土热导率与天然密度、孔隙比拟合曲线。由图4c可知, 在天然状态下, 第四系岩土热导率随着密度的增加而增大, 相关方程为 $\lambda = 1.4980\rho - 1.4399$, $R=0.7010$ 。由图4d可知, 第四系岩土热导率随着孔隙比的增加而降低, 相关方程为 $\lambda = -0.8752e + 2.1620$, $R=0.7579$ 。通常情况下, 岩土越紧实, 土体孔隙度越小, 孔隙比也越小, 其密度就越大(彭涛等, 2014; 徐胜平等, 2014), 热导率会随之增加, 反之, 热导率降低。将本次测试的第四系样品热导率与雷晓东等(2018b)测试的基岩样品值对比, 发现第四系样品比砂岩和页岩基岩样品热导率值(小于1.4 W/(m·K))还要高, 其中砂岩低值样品出现在白垩系, 其来源为陆源碎屑或火山碎屑沉积, 长期遭受剥蚀, 热导率低应与其孔隙比较大有关; 而页岩低值样品分布在石炭系、蓟县系和长城系, 此类样品一般层理十分发育, 样品破碎, 因此出现低值也与孔隙比较大有关。

5.4 温度

温度对岩土热导率也具有一定的影响, 前人研究总结出大多数岩石随着温度从0℃升高至几百℃, 热导率整体呈现降低的趋势(徐振章, 1992; 程超等, 2017)。浅层地温场对浅层地热能资源的形成起着决定性作用(卫万顺等, 2010), 自上而下依次分为变温带、恒温带和增温带, 北京平原区第四系变温带地温主要受地球外部太阳辐射热源影响, 恒温带顶板埋深15 m左右, 厚度30 m, 温度为14℃(卫万顺等, 2020), 增温带内受地球内部热能的影响, 温度随着深度增加而增高, 地温梯度按每百米3℃考虑, 北京市平原区

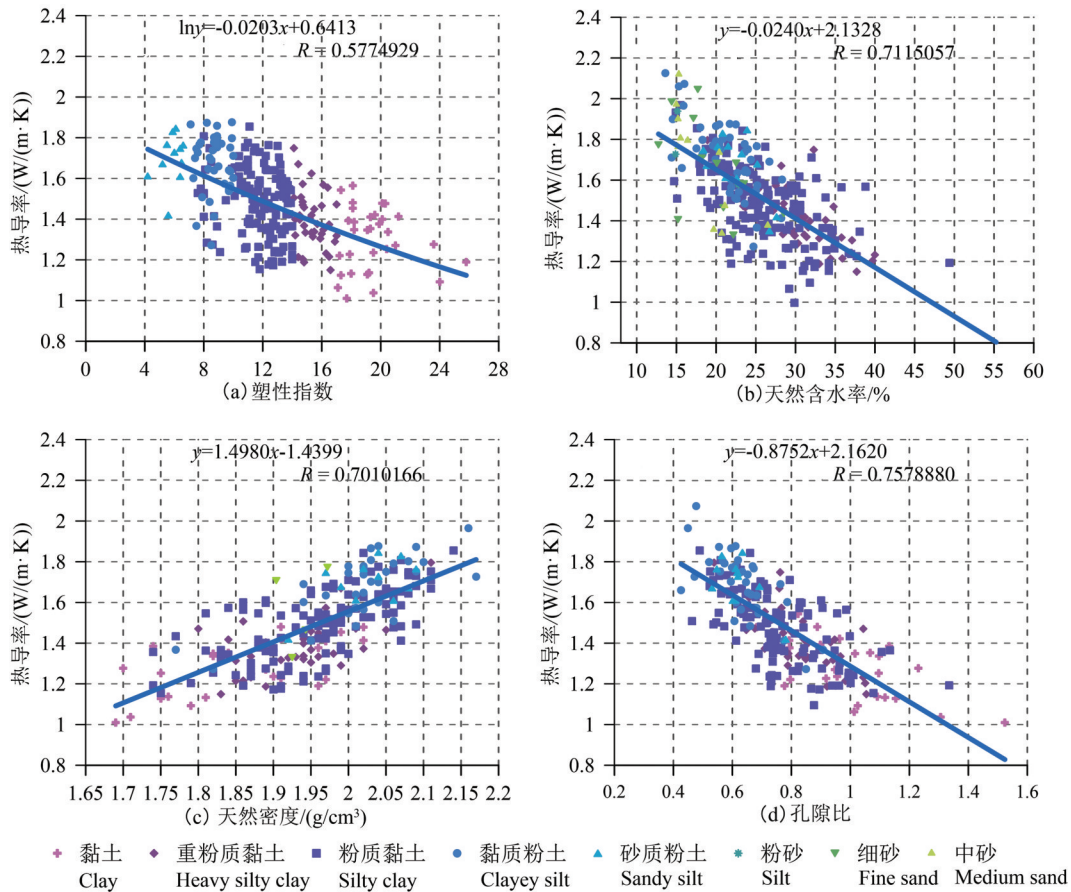


图4 热导率影响因素关系图

a—塑性指数; b—含水率; c—密度; d—孔隙比

Fig.4 Diagram of influencing factors of thermal conductivity

a—Plastic index; b—Moisture content; c—Density; d—Void ratio

第四系厚度 1000 m 时, 岩土温度可到 40℃。

本文选取细砂、砂质粉土、黏质粉土、粉质黏土 4 种岩性样品, 利用 Hot Disk 热常数分析仪恒温控制器将样品温度分别控制在 0℃、5℃、10℃、15℃、20℃、25℃、30℃、35℃、40℃ 的条件下进行热导率测试, 研究岩土温度在 0~40℃ 小范围内变化时对热导率的影响。图 5 中可以看出细砂、砂质粉土、黏质粉土、粉质黏土 4 种岩性样品热导率随温度升高均呈现先减小后增大的变化趋势。0~20℃ 范围内, 热导率随温度升高而降低了 1%~3%, 20℃ 时降至最低, 之后热导率值上升。北京平原区除几个地热异常区外, 浅层地热能 200 m 开发利用深度内, 地层温度基本在 20℃ 以内, 假设在岩性及各项物性参数都相同的条件下, 随着深度增加, 地层温度升高, 导热能力略有减小。

6 浅层地热能资源开采影响因素分析

岩土体的热导率、热扩散率和比热容是影响浅层地热能资源储量评价及利用的重要参数。浅层地热能储量评价通常采用体积法, 需要确定岩土体的比热容以及孔隙率(裂隙率)、天然含水率、密度等参数, 地层比热容越大, 热能调蓄能力越强, 储量越大。北京市浅层地热能资源丰富, 平原区浅层地热能储量为 1.95×10^{15} kJ, 折合标准煤 6670 万吨, 开发利用潜力大。目前北京市浅层地热能开发利用的主要方式是地埋管地源热泵系统, 热导率是计算地埋管换热系统从浅层岩土体中单位时间内通过热交换方式所获取(排放)热量值的重要参数, 直接影响地埋管地源热泵系统换热孔的布置数量。《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T0225-2009)中给

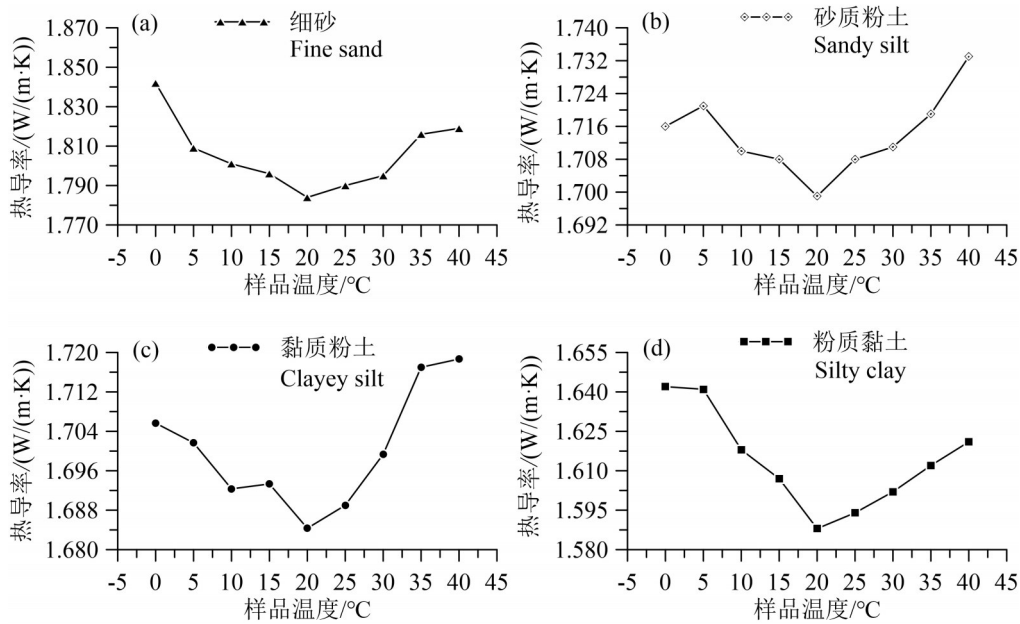


图5 不同岩性样品热导率随温度变化曲线图

Fig.5 Variation curve of thermal conductivity with temperature of different lithology samples

出了热导率与单孔换热功率之间的计算公式。

$$D = \frac{2\pi L|t_1 - t_2|}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{\gamma_3}{\gamma_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{\gamma_4}{\gamma_3}} \quad (2)$$

式中: D —单孔换热功率,单位W; λ_1 —埋管材料热导率,一般为PE管,取值0.42 W/(m·K); λ_2 —换热孔中回填料热导率,单位W/(m·K); λ_3 —换热孔周围岩土体的平均热导率,单位W/(m·K); L —埋管换热器长度,单位m; γ_1 —埋管束的等效半径,单位m,单U为管内径的 $\sqrt{2}$ 倍,双U为管内径的2倍; γ_2 —埋管束的等效外径,单位m,等效半径 γ_1 加管材壁厚; γ_3 —换热孔平均半径,单位m; γ_4 —换热孔温度影响半径,单位m; t_1 —埋管流体内的平均温度,单位°C; t_2 —温度影响半径之外岩土体的温度,单位°C。

本文探讨的热导率相当于上述公式的 λ_3 ,其值大小会受矿物成分、颗粒大小、天然含水率、孔隙比、密度以及温度等因素的影响,不同地质条件下 λ_3 不同,在公式其他参数不变时, λ_3 越大,埋管单孔换热功率 D 越高。北京市埋管地源热泵系统中,换热孔埋管方式多采用传统双U型PE管,埋管外径32 mm,内径26 mm,换热孔径 γ_3 一般152 mm,换热深度 L 不大于150 m,回填料的热导率 λ_2 不宜低于换热孔周

围岩土体的热导率 λ_3 。因此岩土体平均热导率(λ_3)是浅层地热能可采资源量的主要控制参数,利用上式可得到单孔换热功率 D ,然后乘以区域内可钻孔数,即得评价区浅层地热能可采资源量(韩再生等,2007)。岩土体热导率和热扩散率的变化方向一致,其大小与埋管单位长度的换热量呈正相关关系(周阳等,2018)。笔者在北京不同水文地质单元开展过大量的岩土热响应试验,其中平谷区和大兴区2个换热孔的埋管方式、换热深度及地层初始平均温度 t_2 均相同,岩土平均热导率分别为2.2 W/(m·K)和1.8 W/(m·K),埋管单位长度冬季取热量为41 W/m和35 W/m,可见热导率大的地层换热能力也强。综合以上分析,地层结构、水文地质条件以及地温场特征会影响岩土体热导率、热扩散率和比热容,导致浅层地热能储存、采集和扩散能力产生差异,进而影响浅层地热能资源储量和可开采量。

7 结论

岩土热物性是影响浅层地热能资源评价及利用的重要参数,本文在北京平原区各冲洪积扇采集了695件第四系岩土样品,系统测试了热物性及土工参数,分析了北京平原区第四系热物性参数特征及其对浅层地热能开采的影响,得到如下结论:

(1)北京平原区第四系岩土热导率平均值为1.465~2.022 W/(m·K),热扩散率平均值为 $0.450 \times 10^{-6} \sim 0.841 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,热导率与热扩散率值存在一定的线性关系,相关方程为 $\lambda=1.6973\kappa+0.6127$ 。比热容平均值为2.323~3.080 (MJ/m³·K),整体上碎石土和砂土的比热容比粉土和黏性土的比热容低。

(2)不同岩土体热导率之间的差异与其成土母岩矿物成分和比例有密切关系;在天然状态下,岩土体热导率随着密度和颗粒粒径的增加而增大,随着孔隙比的增加而降低。

(3)含水率0~5%范围内,岩土热导率随含水率迅速增加,含水率5%~20%,热导率增加变缓并趋于稳定,含水率20%~40%,热导率随含水量增大而降低;细砂、砂质粉土、黏质粉土、粉质黏土4种岩性样品热导率随温度升高均呈现先减小后增大的变化趋势,在20℃时热导率最低。

(4)岩土体是浅层地热能资源的储存介质,其热物性参数反映了岩土的蓄热和导热能力。北京平原区第四系岩土的热物性参数与矿物成分、颗粒大小、天然含水率、孔隙比、密度以及温度等有关,地层结构、水文地质条件以及地温场特征不同,热物性参数也不同,会导致浅层地热能储存、采集和扩散能力产生差异,热导率、热扩散率及比热容越大,岩土自身热能调蓄能力和导热能力越强。

References

- Cai Xiangmin, Luan Yingbo, Guo Gaoxuan, Liang Yanan. 2009. 3D Quaternary geological structure of Beijing plain[J]. *Geology in China*, 36(5): 1021–1029(in Chinese with English abstract).
- Cai Xiangmin, Zhang Lei, Guo Gaoxuan, You Shina, Fang Tongming, LÜ Jinbo, Liang Yanan. 2016. New progress in the study of Quaternary geology in Beijing plain[J]. *Geology in China*, 43(3): 1055–1066 (in Chinese with English abstract).
- Chen Chi, Zhu Chuanqing, Tang Boning, Chen Tiange. 2020. Progress in the study of the influencing factors of rock thermal conductivity[J]. *Progress in Geophysics*, 35(6): 2047–2057 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Chao, Yu Wengang, Jia Wanting, Lin Haiyu, Li Lianqing. 2017. Research progress and development tendency about thermal physical properties of rocks[J]. *Advances in Earth Science*, 32(10): 1072–1083(in Chinese with English abstract).
- Cho W J, Kwon S. 2010. Estimation of the thermal properties for partially saturated granite[J]. *Engineering Geology*, 115: 132–138.
- Du Yizhen, Li Ren, Wu Tonghua, Xie Changwei, Xiao Yao, Hu Guojie, Wang Tianye. 2015. Study of soil thermal conductivity: research status and advances[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 37(4): 1067–1074(in Chinese with English abstract).
- Ghuman B S, Lal R. 1985. Thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal capacity of some Nigerian soils[J]. *Soil Science*, 139(1): 74–80.
- Han Zaisheng, Ran Weiyan, Tong Hongbing, Liu Zhiming. 2007. Exploration and evaluation of shallow geothermal energy[J]. *Geology in China*, 34(6): 1115–1121 (in Chinese with English abstract).
- Kavanaugh S P. 2000. Field tests for ground thermal properties—methods and impact on ground—source heat pumps design[J]. *American Society of Heating Refrigerating and Air—Conditioning Engineers Trans*, 104(2): 347–355.
- Lei Xiaodong, Hu Shengbiao, Li Juan, Jiang Guangzheng, Yang Quanhe, Li Qiaoling. 2018a. Characteristics of heat flow and geothermal distribution in the northwest Beijing plain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(9): 3735–3748(in Chinese with English abstract).
- Lei Xiaodong, Hu Shengbiao, Li Juan, Yang Quanhe, Han Yuda, Jiang Guangzheng, Zheng Jia. 2018b. Thermal properties analysis of bedrock in Beijing[J]. *Progress in Geophysics*, 33(5): 1814–1823 (in Chinese with English abstract).
- Li Yi, Shao Mingan, Wang Wenyan, Wang Quanjiu, Zhang Jianfeng, Lai Jianbin. 2003. Influence of soil textures on the thermal properties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 19(4): 62–65 (in Chinese with English abstract).
- Luan Yingbo, Wei Wanshun, Yu Yuan, Yang Junwei. 2014. Research on heat exchange ability of ground—source heat pump by field test of Beijing plain[J]. *Geoscience*, 28(5): 1046–1052(in Chinese with English abstract).
- Luan Yingbo, Wei Wanshun, Zheng Guisen, Ji Xinnan. 2011. Statistical analysis of factors affecting the thermal conductivity of silty clay and fine sand in Beijing area[J]. *Geoscience*, 25(6): 1187–1194 (in Chinese with English abstract).
- Luan Yingbo, Zheng Guisen, Wei Wanshun. 2013. The experimental study of the factors affecting the rate of thermal conductivity of silty clay in Beijing plain[J]. *Geology in China*, 40(3): 981–988(in Chinese with English abstract).
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan. 2021. The development and utilization of geothermal energy in the world[J]. *Geology in China*, 48(6): 1734–1747 (in Chinese with English abstract).
- Miao Jinjie, Jin Jihong, Du Dong, Liu Hongwei, Bai Yaonan, Zhang Jing, Guo Xu. 2020. Valuation of groundwater environmental quality and causes of problems in the capital sub—center and key regions[J]. *Geological Survey and Research*, 43(3): 224–229,286 (in Chinese with English abstract).
- Peng Tao, Zhang Haichao, Ren Ziqiang, Shen Shuhao, Xu Shengping. 2014. Characteristics of rock thermal conductivity of coal measure

- strata in Huainan– Huaibei[J]. Coalfield Geological Journal of China Universities, 20(3): 470– 475 (in Chinese with English abstract).
- Peters–Lidard C D, Blackburn E, Liang X, Wood E F. 1998. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 55(7): 1209–1224.
- Qiu Nansheng. 2002. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of Northwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 37(2): 196– 206(in Chinese with English abstract).
- Ruan Chuanxia, Feng Shuyou, Mou Shuangxi, Cheng Wanqing, Zhao Sumin. 2017. An analysis of the characteristics of thermal physical properties and their influencing factors in the Tianjin area[J]. Hydrogeology & Engineer Geology, 44(5): 158– 163(in Chinese with English abstract).
- Song Xiaoqing, Jiang Ming, Peng Qin, Xiong Peiwen. 2019. Thermal property parameter and influencing factor analysis of main rock strata in Guizhou province[J]. Acta Geologica Sinica, 93(8): 2092– 2103 (in Chinese with English abstract).
- Su Tianming, Liu Tong, Li Xiaozhao, Yu Jin, Xiao Lin. 2006. Test and analysis of thermal properties of soil in Nanjing district[J]. Journal of Mechanics and Engineering, 25(16): 1278– 1283(in Chinese with English abstract).
- Tarnawski V R, Gori F. 2002. Enhancement of the cubic cell soil thermal conductivity model[J]. International Journal of Energy Research, 26(2): 143–157.
- Wang Guiling, Lu Chuan. 2022. Progress of geothermal resources exploitation and utilization technology driven by carbon neutralization target[J]. Geology and Resources, 31(3): 412–415(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Wang Wanli, Zhang Wei, Ma Feng, Liu Feng. 2020. The status quo and prospect of geothermal resources exploration and development in Beijing– Tianjin– Hebei region in China[J]. China Geology, 3(1): 173–181.
- Wang Shuo, Wang Quanjiu, Fan Jun, Wang Weihua. 2012. Soil thermal properties determination and prediction model comparison[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 28(5): 78–84 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wanli, Wang Guiling, Zhu Xi, Lui Zhiming. 2017. Characteristics and potential of shallow geothermal resources in provincial capital cities of China[J]. Geology in China, 44(6): 1062–1073 (in Chinese with English abstract).
- Wei Wanshun, Li Ningbo, Zheng Guisen, Luan Yingbo, Yang Junwei, Yu Yuan, Li Xiang, Wang Lizhi. 2020. Study on genetic mechanism and control conditions of shallow geothermal energy in China [J]. Urban Geology, 15(1): 1– 8(in Chinese with English abstract).
- Wei Wanshun, Zheng Guisen, Luan Yingbo. 2010. Characteristics and influencing factors of the shallow geothermal field in Beijing plain area[J]. Geology in China, 37(6): 1733– 1739 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Lin, Li Xiaozhao, Zhao Xiaobao, Hu Zenghui, Wu Wei, Jiang Xinliang. 2009. Laboratory tests for precise relationship between thermal conductivity and moisture content of silt soil [J]. Journal of Engineering Geology, 17(2): 377– 382 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Lin, Li Xiaozhao, Zhao Xiaobao, Yu Jin, Hu Zenghui, Ji Chengliang. 2008. Laboratory on influences of moisture content and porosity on thermal conductivity of soils[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 9(3): 241–246(in Chinese with English abstract).
- Xu Shengping, Peng Tao, Wu Jiwen, Zhang Haichao, Ren Ziqiang. 2014. The characteristics of rock thermal conductivity of coal measure strata and their influence on geothermal field in Huainan– Huaibei coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 42(6): 76–81(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhenzhang. 1992. A discussion of factors influencing thermophysical characteristics of rocks and their mechanisms[J]. Petroleum Exploration and Development, 19(6): 84– 89 (in Chinese with English abstract).
- Yao Wang, Guo Chihui, Zhuang Shurong, Chen Xijie, Jia Liqiong, Chen Zeyu, Xia Zilong, Wu Zhen. 2021. Major contribution to carbon neutrality by China's geosciences and geological technologies[J]. China Geology, 4(2): 329–352.
- Zhou Yang, Mu Genxu, Liu Jianqiang, Zhang Hui, Zhang Le, Jin Guang. 2008. Shallow geothermal energy resources occurrence regularity of typical geomorphological units[J]. Geological Science and Technology Information, 37(4): 232– 238(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡向民, 栾英波, 郭高轩, 梁亚南. 2009. 北京平原第四系的三维结构[J]. 中国地质, 36(5): 1021–1029.
- 蔡向民, 张磊, 郭高轩, 尤世娜, 方同明, 吕金波, 梁亚楠. 2016. 北京平原地区第四纪地质研究新进展[J]. 中国地质, 43(3): 1055–1066.
- 陈驰, 朱传庆, 唐博宁, 陈天戈. 2020. 岩石热导率影响因素研究进展[J]. 地球物理学进展, 35(6): 2047–2057.
- 程超, 于文刚, 贾婉婷, 林海宇, 李莲庆. 2017. 岩石热物理性质的研究进展及发展趋势[J]. 地球科学进展, 32(10): 1072–1083.
- 杜宜臻, 李初, 吴通华, 谢昌卫, 肖瑶, 胡国杰, 王田野. 2015. 土壤热导率的研究现状及其进展[J]. 冰川冻土, 37(4): 1067–1074.
- 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 刘志明. 2007. 浅层地热能勘查评价[J]. 中国地质, 34(6): 1115–1121.
- 雷晓东, 胡圣标, 李娟, 姜光政, 杨全合, 李巧灵. 2018a. 北京平原区西北部大地热流与深部地温分布特征[J]. 地球物理学报, 61(9):

- 3735-3748.
- 雷晓东, 胡圣标, 李娟, 杨全合, 韩宇达, 姜光政, 郑佳. 2018b. 北京地区基岩地层热物性参数特征[J]. 地球物理学进展, 33(5): 1814-1823.
- 李毅, 邵明安, 王文焰, 王全九, 张建丰, 来剑斌. 2003. 质地对土壤热性质的影响研究[J]. 农业工程学报, 19(4): 62-65.
- 栾英波, 卫万顺, 郑桂森, 季鑫楠. 2011. 影响北京地区粉质黏土和细砂的热导率因素统计分析[J]. 现代地质, 25(6): 1187-1194.
- 栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 2013. 北京平原区粉质黏土热导率影响因素实验研究[J]. 中国地质, 40(3): 981-988.
- 栾英波, 卫万顺, 于媛, 杨俊伟. 2014. 北京平原区地源热泵换热能力现场测试研究[J]. 现代地质, 28(5): 1046-1052.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢. 2021. 世界地热能开发利用现状与展望[J]. 中国地质, 48(6): 1734-1747.
- 苗晋杰, 靳继红, 杜东, 刘宏伟, 白耀楠, 张亮, 郭旭. 2020. 首都副中心及重点区域地下水环境质量评价与问题成因[J]. 地质调查与研究, 43(3): 224-229, 286.
- 彭涛, 张海潮, 任自强, 沈书豪, 徐胜平. 2014. 两淮煤田煤系地层岩石热导率特征[J]. 高校地质学报, 20(3): 470-475.
- 邱楠生. 2002. 中国西北部盆地地岩石热导率和生热率特征[J]. 地质科学, 37(2): 196-206.
- 阮传侠, 冯树友, 牟双喜, 程万庆, 赵苏民. 2017. 天津地区地层热物性特征及影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 44(5): 158-163.
- 宋小庆, 江明, 彭钦, 熊沛文. 2019. 贵州主要岩石地层热物性参数特征及影响因素分析[J]. 地质学报, 93(8): 2092-2103.
- 苏天明, 刘彤, 李晓昭, 俞缙, 肖琳. 2006. 南京地区土体热物理性质测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 25(6): 1278-1283.
- 王贵玲, 陆川. 2022. 碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展[J]. 地质与资源, 31(3): 412-425.
- 王烁, 王全九, 樊军, 王卫华. 2012. 土壤导热率测定及其计算模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 28(5): 78-84.
- 王婉丽, 王贵玲, 朱喜, 刘志明. 2017. 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价[J]. 中国地质, 44(6): 1062-1073.
- 卫万顺, 李宁波, 郑桂森, 栾英波, 杨俊伟, 李翔, 于媛, 王立志. 2020. 中国浅层地热能成因机理及其控制条件研究[J]. 城市地质, 15(1): 1-8.
- 卫万顺, 郑桂森, 栾英波. 2010. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质, 37(6): 1733-1739.
- 肖琳, 李晓昭, 赵晓豹, 胡增辉, 武伟, 蒋新亮. 2009. 粉土热导率与含水量关系的实验研究[J]. 工程地质学报, 17(2): 377-382.
- 肖琳, 李晓昭, 赵晓豹, 俞缙, 胡增辉, 纪成亮. 2008. 含水量与孔隙率对土体热导率影响的室内实验[J]. 解放军理工大学学报, 9(3): 241-247.
- 徐胜平, 彭涛, 吴基文, 张海潮, 任自强. 2014. 两淮煤田煤系岩石热导率特征及其对地温场的影响[J]. 煤田地质与勘探, 42(6): 76-81.
- 徐振章. 1992. 试论影响岩石热物理性质的因素及机制[J]. 石油勘探与开发, 19(6): 84-89.
- 周阳, 穆根胥, 刘建强, 张卉, 张乐, 金光. 2018. 典型地貌单元浅层地热能资源量赋存规律[J]. 地质科技情报, 37(4): 232-238.