

doi: 10.12029/gc20170602

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.

Wang Wanli, Wang Guiling, Zhu Xi, Liu 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).

# 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价

王婉丽<sup>1,2</sup> 王贵玲<sup>1</sup> 朱喜<sup>1</sup> 刘志明<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**浅层地热能资源以其高效和环保的特点,近年来在中国得到了广泛的应用。地质条件、浅层地温场特征、岩石热物性特征等参数,是影响浅层地热能开发利用的重要参数。笔者在阐述浅层地热能开发利用条件的基础上,结合全国省会城市浅层地热能调查评价成果,对浅层地热能开发利用适宜性和资源潜力进行了评价。结果表明,在我国陆区范围内,恒温带温度受太阳辐射影响最大,恒温带顶板埋深与气温变化趋势相反,岩土体导热系数受岩性影响明显。中国浅层地热能资源主要用于建筑物供暖和制冷。我国 31 个省会城市 80% 的土地面积适宜利用浅层地热能,浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤 2.8 亿 t,可为供暖和制冷提供丰富的能源储备。按利用方式、需求程度将我国浅层地热能开发分为全年集中利用区、全年分散利用区、分散式冬季供暖区和分散式夏季制冷区 4 类。浅层地热能开发利用对推动中国绿色、低碳、节能型城市化发展,解决京津冀地区冬季雾霾和南方城市冬季供暖问题具有重要意义。

**关键词:**浅层地热能;浅层地温场;导热系数;适宜性评价;资源评价

**中图分类号:** P314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2017)06–1062–12

## Characteristics and potential of shallow geothermal resources in provincial capital cities of China

WANG Wanli<sup>1,2</sup>, WANG Guiling<sup>1</sup>, ZHU Xi<sup>1</sup>, LIU Zhiming<sup>1</sup>

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China;*

*2. School of environment studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)*

**Abstract:** Due to the superiority of high energy efficiency and environmental friendliness, shallow geothermal resources have been widely applied in recent years in China. Geological conditions, characteristics of shallow geotemperature field and thermophysical parameters of rocks and soils are important parameters for shallow geothermal resources. Based on relevant research on nationwide investigation and evaluation of shallow geothermal energy resources in 31 provincial capital cities in China, the authors evaluated

收稿日期:2017–11–28;改回日期:2017–12–15

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41302189、41672249)、中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费专项经费(SK201501)和中国地质调查局国土资源大调查项目(12120113078100)联合资助。

作者简介:王婉丽,女,1985年生,博士生,助理研究员,水文地质学专业,主要从事水文地质及浅层地温能方面研究;wanliwang2010@163.com。

通讯作者:王贵玲,男,1964年生,博士,研究员,长期从事水文地质和地热地质研究工作;guilingw@163.com。

the characteristics, resources and regional development planning of shallow geothermal resources in China. The results show that, in constant temperature zone, feature temperature is mostly affected by solar radiation, and the trend of buried depth is opposite to temperature change. What's more, thermal conductivity of soils and rocks is obviously influenced by lithology. The most important application of shallow geothermal resources is for heating and cooling in buildings. Over 80% of the provincial capital cities are suitable for shallow geothermal utilization and annual exploitable shallow geothermal resources of 31 provincial capital cities are equivalent to 280 million tons of standard coal, which is abundant for heating and cooling. Considering the way of utilization and the level of demand, the authors divided whole China into four types of areas, i.e., centralized utilization area (both heating and cooling), distributed utilization area (both heating and cooling), distributed utilization area only for heating and distributed utilization area only for cooling. The development and utilization of shallow geothermal resources are of great significance for promoting the development of China's green, low-carbon and energy-saving urbanization and can also solve the problem of winter smog in the Beijing-Tianjin-Hebei region and satisfy the demand of heating in winter in cities of southern China..

**Key words:** shallow geothermal resources; shallow geotemperature filed; thermal conductivity; suitable assessment; resources evaluation

**About the first author:** WANG Wanli, female, born in 1985, doctor candidate, assistant researcher, majors in hydrogeology, engages in research on hydrogeology and shallow geothermal resources; E-mail: wanliwang2010@163.com.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41302189 and No. 41672249), Chinese Academy of Geological Sciences Hydrogeological Environment Geology Institute Foundation (No. SK201501) and China Geological Survey (No. 12120113078100).

## 1 引言

浅层地热能作为地热能重要的组成部分,一般赋存于地球表层至200 m埋深中土壤、岩石和地下水中(DZ/T 0225-2009)。截至2016年,全国利用浅层地热能的应用建筑面积已达4.78亿 $m^2$ <sup>①</sup>。2014年全国已完成包括北京、天津在内的31个省会级城市浅层地热能勘查评价工作(冉伟彦等,2014),并于2015年完成336个地级以上城市的调查评价工作。蔺文静等(2013)对287个地级以上城市浅层地热能资源量进行了第一轮评估,王贵玲等(2017)对中国地热资源(包括浅层地热能资源)的潜力进行新一轮评价,最新结果显示,336个地级以上城市浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤7亿t,资源丰富、潜力巨大。

第四系地质特征、浅层地温场特征、岩土热物性特征等参数,是影响地源热泵开发利用的重要参数,也是进行资源潜力评价的关键因子(赵云章等,2010; Luo et al., 2016; 秦祥熙等,2017)。前人的研究更关注资源量评价结果,对浅层地热能赋存条件的分析不够全面,本文利用资料收集、统计分析的方法,对全国省会城市规划区范围内的浅层地热能资源赋存的关键因素进行研究,结合地质调查成果<sup>②</sup>,对开发利用程度和

需求均相对较高的省会城市的浅层地热能资源潜力进行评价。在此基础上,结合利用方式、需求程度,开展了全国浅层地热能开发利用区划研究,为科学合理进行浅层地热能开发利用规划和布局提供依据。

## 2 自然地理及地质条件

### 2.1 气象条件

根据中国气候区划(张宝堃等,1959;郑景云等,2010),热量可用日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 稳定期的积温和最冷候气温或最冷月气温,或极端最低气温多年平均值来表示,以热量分带,我国大陆可分为五带一区,即热带、亚热带、暖温带、中温带、寒温带和青藏高原区。我国大陆省会城市主要分布于亚热带、暖温带和中温带(表1)。

### 2.2 地貌类型

中国大陆区域地形地貌复杂多样,省会城市主要分布在平原、盆地中,依山傍水而建,逐绿草而居,自然条件较好,水资源相对较丰富(中国地质调查局,2012),有利于浅层地热能的应用。其中,有19.35%的省会城市分布于滨海平原;有32.26%的省会城市分布于内陆平原;有16.13%的省会城市分布于内陆山间河谷盆地;仅有6.45%的省会城市分布于高原河谷盆地和岩溶河谷盆地;仅有9.68%的省

表1 省会城市所在的温度带、地貌类型及地质条件

Table1 Climatic regionalization, geomorphic types and geological conditions of provincial capital cities

| 城市   | 温度带   | 地貌类型          | 主要地质特征                      |
|------|-------|---------------|-----------------------------|
| 西宁   | 青藏高原区 | 高原河谷盆地        | 第四系较薄,以新、古近系泥岩、砂岩为主         |
| 拉萨   | 青藏高原区 | 高原河谷盆地        | 以第四系为主,少量的基岩地层              |
| 哈尔滨  | 中温带   | 内陆平原          | 第四系和风化泥岩、砂岩                 |
| 呼和浩特 | 中温带   | 内陆干旱半干旱季节冻土盆地 | 以第四系为主                      |
| 乌鲁木齐 | 中温带   | 内陆干旱半干旱季节冻土盆地 | 北部以第四系为主,南部基岩浅埋             |
| 长春   | 中温带   | 内陆平原          | 以白垩系砂页岩、安山岩、凝灰质砂砾岩为主        |
| 沈阳   | 中温带   | 内陆平原          | 以第四系为主,东部丘陵山区基岩出露           |
| 银川   | 中温带   | 内陆干旱半干旱季节冻土盆地 | 以第四系为主                      |
| 兰州   | 中温带   | 黄土高原盆地        | 河谷平原与山间盆地                   |
| 北京   | 暖温带   | 内陆平原          | 以第四系为主                      |
| 天津   | 暖温带   | 滨海平原          | 以第四系为主                      |
| 太原   | 暖温带   | 黄土高原盆地        | 以第四系为主                      |
| 西安   | 暖温带   | 黄土高原盆地        | 以第四系为主                      |
| 郑州   | 暖温带   | 内陆平原          | 以第四系和新近系为主                  |
| 济南   | 暖温带   | 内陆平原          | 古生界至新生界均有分布,北部有岩浆岩分布        |
| 石家庄  | 暖温带   | 内陆平原          | 以第四系为主                      |
| 昆明   | 亚热带   | 内陆山间河谷盆地      | 以第四系为主,外围有基岩分布              |
| 贵阳   | 亚热带   | 岩溶河谷盆地        | 以白云岩、灰岩等基岩为主                |
| 南京   | 亚热带   | 内陆平原          | 第四系一般不超过80m,基岩出露广泛          |
| 成都   | 亚热带   | 内陆山间河谷盆地      | 第四系厚数米至300余米,基岩以泥岩、砂岩为主     |
| 杭州   | 亚热带   | 滨海平原          | 第四系平均厚度约70m,基岩面埋深自西南往东北由浅变深 |
| 长沙   | 亚热带   | 内陆山间河谷盆地      | 第四系厚度多在50m以内,基岩广泛分布         |
| 武汉   | 亚热带   | 内陆平原          | 上部为第四系,下部基岩为古生界至新生界地层       |
| 合肥   | 亚热带   | 内陆平原          | 上部为厚0~50m不等的黏土,下部为红砂岩       |
| 南昌   | 亚热带   | 内陆山间河谷盆地      | 上部以第四系为主,下部以红砂岩和变质岩为主       |
| 上海   | 亚热带   | 滨海平原          | 以第四系为主                      |
| 重庆   | 亚热带   | 内陆山间河谷盆地      | 砂岩、泥岩为主,地下水贫乏               |
| 福州   | 亚热带   | 滨海平原          | 以第四系为主,局部分布侏罗纪、白垩纪火山岩       |
| 南宁   | 亚热带   | 岩溶河谷盆地        | 中部以第四系为主,其他地区基岩裸露,东南部碳酸盐岩分布 |
| 广州   | 亚热带   | 滨海平原          | 基岩埋深一般小于40m                 |
| 海口   | 热带    | 滨海平原          | 以第四系和新近系为主                  |

会城市分布于黄土高原盆地和内陆干旱半干旱季节冻土盆地(表1)。

### 2.3 地质条件

地表以下200m深度内,从古生界到新生界地层均有揭露<sup>①</sup>。以第四系地层为主的城市,多数分布在平原地区,如呼和浩特市、北京、石家庄、西安等;以基岩为主的城市,主要集中在河谷盆地,如重

庆市、南昌市、南宁市、贵阳市等。主要地质特征见表1。

## 3 浅层地温场特征

### 3.1 典型城市地温监测剖面

浅层地温场的垂向分布特征受当地气候、地层结构、水文地质条件、地质构造等多方面因素影响

(卫万顺等,2010;黄景锐,2013),通常可分为变温带、恒温带、增温带(张慧智等,2009)。恒温带温度及深度是土壤温度场的重要指标,地源热泵系统可以从恒温带稳定地获取或排放冷(热)量(王婉丽等,2016)。根据温度带选择典型城市的地温监测剖面进行分析,其中监测孔位置如表2所示,每个剖面的监测曲线见图1。其中哈尔滨市、石家庄市、广州市、海口市采用地温自动监测的方法,西宁市、长沙市采用钻孔中人工测温方法。由于人工测温容易受到测温时段气温的影响,西宁市和长沙市的地温曲线在恒温带和增温带表现出明显的季节性差异。

图1显示:西宁市恒温带顶板埋深20 m左右,厚约10 m;哈尔滨地区恒温带顶板埋深30 m左右,厚约10 m;石家庄市恒温带顶板埋深15 m左右,厚约15 m;长沙地区恒温带顶板埋深10 m左右,厚约15 m;广州市恒温带顶板埋深10 m左右,厚约10 m;海口市恒温带顶板埋深8 m左右,厚约5 m。结合其他25个省会城市地温监测结果和前人研究,中温带与青藏高寒区由于冻土层的存在,温度变动范围广,恒温带顶板埋深大,最高达30~35 m。暖温带地区由南向北逐渐增大,埋深范围为15~20 m。亚热带地区气候温暖,年温度变化较小,太阳辐射影响范围小,恒温带顶板埋深小,一般不超过20 m。

### 3.2 全国浅层地温场特征

根据恒温带温度范围、顶板埋深及地温梯度,绘制了我国浅层地温场特征图(图2)。由图2可见,恒温带温度与当地气温关系密切,总体表现出随纬度的升高而降低,同一纬度西部大于东部的特点,说明在我国陆区范围内,恒温带温度受太阳辐射影响最大。从中温带、暖温带、亚热带到热带,从平原区到丘陵山地,平均气温逐渐升高,恒温带顶板埋深与温度变化趋势相反(王贵玲等,2017)。同时,我国陆地浅层地温场(200 m深度内)地温梯度总体分布特征为北高南低,南方地温梯度值一般都小于 $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,平均 $2.45^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。北方大部分地区地温梯度由西向东逐渐升高,变化范围 $2\sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,平均 $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

## 4 岩土体导热系数特征

岩土体的导热系数对地源热泵系统的设计至关重要,是当温度垂直梯度为 $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,单位时间内通

过单位水平截面积所传递的热量。岩石矿物组分和含量不同,其导热系数各异(徐振章,1992;沈显杰等,1988)。不同类型的岩石或同类型岩石其矿物组分和含量不同,导热系数亦不同。本文收集到热物性测试成果9309件(其中松散沉积物5234件,基岩4075件),采用统计分析的方法,对沉积岩类、岩浆岩、变质岩类、松散岩类的导热系数进行分析。

因热物性参数的数据来自于不同省会城市室内测试结果,考虑取样、测试等环节产生的误差,避免异常值对统计结果的影响,首先对数据进行异常值检验。采用绘制箱线图的方法来查找异常值。根据箱线图统计分析结果,对异常值进行删除,保证统计的结果不受异常值的干扰。对同种岩性的数据来说,导热系数分布不符合正态分布,因此以中值作为该岩性的特征值;如果服从正态分布,中值等于均值。利用spss17.0软件对数据进行统计分析(张文彤等,2004)。

### 4.1 沉积岩

统计分析结果(图3)显示:沉积碎屑岩类中砾岩、角砾岩的导热系数最大,中值分别为 $2.49\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $2.36\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。其次是砂岩、砂砾岩、粉砂岩、细砂岩,介于 $1.58\sim 1.92\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。泥岩的导热系数最小,中值 $1.72\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。砾岩、砂岩中的碎屑成分主要是石英、长石和岩屑,且在大多数砂岩中,石英是最主要的碎屑。石英的导热系数比其他矿物大得多( $7.69\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )(刘建军等,2009),因此砾岩、砂岩的导热系数比较大。沉积碎屑岩类的导热系数与碎屑粒径分布密切相关,粒径连续性好,颗粒间接触好,导热系数相对也大(许模等,2011)。

泥岩和页岩同属黏土岩类,页岩导热系数( $2.33\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )大于泥岩( $1.72\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )。泥中含有大量的黏土矿物和少量的石英、长石、云母,且黏土矿物的导热系数较低,因此沉积岩中泥岩的导热系数比较低。页岩为黏土岩类中固结较强的岩石,常含石英、长石、白云母等细小碎屑,致密,不透水,但导热系数较高,说明导热系数除与矿物成分有关外,还与结构等其他因素相关。

凝灰岩和角砾凝灰岩属于沉积岩中的火山碎屑岩,其导热系数中值介于 $2.03\sim 2.1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

### 4.2 岩浆岩、变质岩类

岩浆岩中,花岗岩导热系数最大,中值为2.92



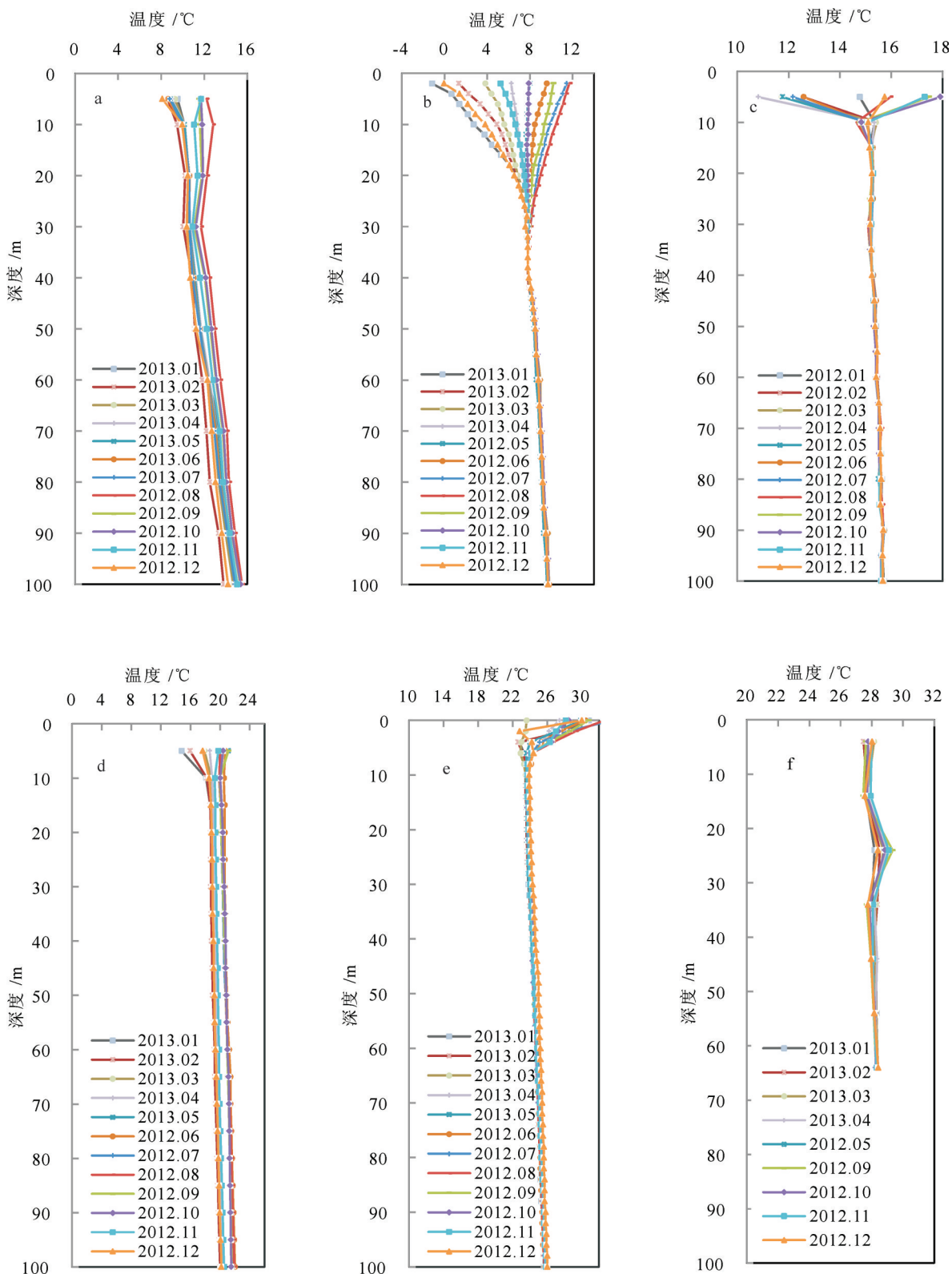


图1 典型地温监测孔地温随深度变化曲线

a—西宁市; b—哈尔滨市; c—石家庄市; d—长沙市; e—广州市; f—海口市

Fig. 1 The variation of geotemperature with depth in typical geotemperature monitoring holes

a—Xining; b—Harbin; c—Shijiazhuang; d—Changsha; e—Guangzhou f. Haikou

表2 地温监测孔位置及详细参数  
Table 2 Locations and parameters for different ground temperature monitoring sites

| 温度带   | 地理位置     | 经度        | 纬度       | 孔深 / m | 垂向上测温探头间距 / m       | 监测时间           |
|-------|----------|-----------|----------|--------|---------------------|----------------|
| 青藏高原带 | 青海省西宁市   | 101°45' E | 36°42' N | 150    | 5(<5)<br>10(5~150)  | 2012.8~2013.7  |
| 寒温带   | 黑龙江省哈尔滨市 | 126°33' E | 45°32' N | 100    | 2(<50)<br>5(50~100) | 2012.5~2013.4  |
| 暖温带   | 河北省石家庄市  | 114°22' E | 38°08' N | 100    | 5                   | 2012.1~2012.12 |
| 中温带   | 湖南省长沙市   | 112°51' E | 28°17' N | 100    | 5                   | 2012.6~2013.5  |
| 亚热带   | 广东省广州市   | 113°25' E | 22°45' N | 100    | 2                   | 2012.6~2013.5  |
| 热带    | 海南省海口市   | 110°12' E | 20°02' N | 64     | 10                  | 2012.5~2013.4  |

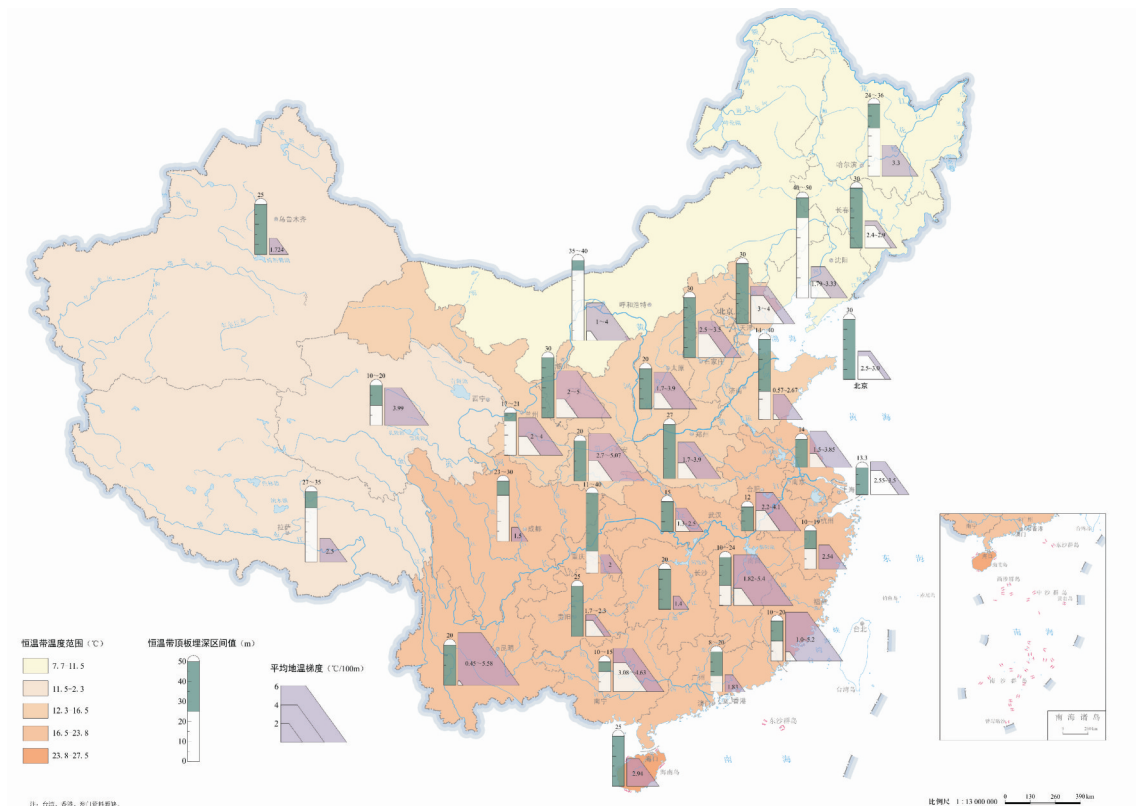


图2 中国省会城市浅层地温场特征  
Fig.2 Characteristics of shallow geothermal fields in provincial capital cities

W/(m·K),根据导热系数中值从大到小排序,分别为花岗岩-闪长岩-辉长岩-安山岩。

变质岩的导热系数跟母岩和变质程度有很大关系。千枚岩的导热系数最大,也是所有岩石中导热系数中最大的岩类,范围为2.33~4.48 W/(m·K),中值为3.86 W/(m·K)。根据导热系数从大到小排序,分别为千枚岩-花岗片麻岩-板岩-片麻岩。其

中片麻岩中值较小,为2.32 W/(m·K),但是变化幅度较大,从1.56 W/(m·K)到5.01 W/(m·K)均有分布,数据比较分散(图4)。

### 4.3 松散岩类

在第四系松散岩层中,从淤泥质黏土→淤泥质粉质黏土→黏土→粉质黏土→粉土→粉砂→细砂→中砂→粗砂→卵石,随着岩性粒径的增大,岩土

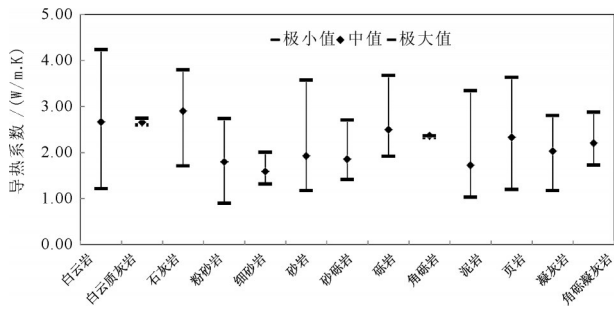


图3 不同岩类的导热系数(沉积岩)

Fig.3 Thermal conductivity of different rocks (sedimentary rock)

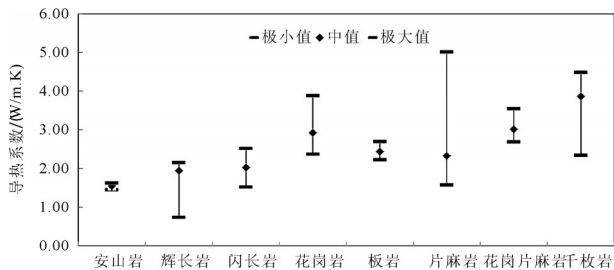


图4 不同岩类的导热系数(岩浆岩、变质岩)

Fig.4 Thermal conductivity of different rocks (magmatic rock and metamorphic rock)

体的导热系数呈现出总体增大的趋势,中值由 1.24 W/(m·K) 逐渐增加至 2.10 W/(m·K) (图5)。

对于第四系松散岩层的分布区,一般地,从山前至盆地中部(或滨海)地区,岩性由砂、卵、砾石逐渐变化为粉砂与黏土互层,岩性粒径逐渐减小,岩土体的导热性能也逐渐减弱,热能调蓄能力却逐渐增强。

## 5 资源潜力评价

### 5.1 开发利用适宜性评价

#### 5.1.1 评价方法

本研究以全国 31 个省会城市规划区为研究对象,通过野外调查、水文地质试验、热响应试验及室内测试试验获取相关参数,采用层次分析法或指标

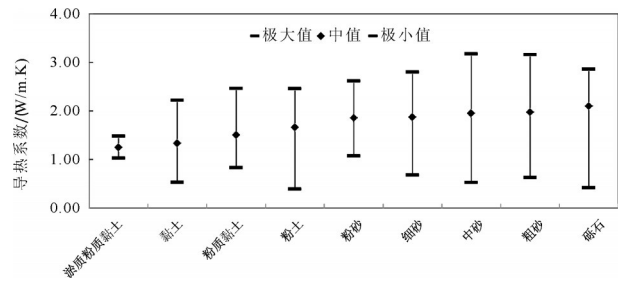


图5 不同岩类的导热系数(松散岩类)

Fig.5 Thermal conductivity of different rocks (unconsolidated material)

法开展适宜性分区评价。

对于地下水地源热泵系统,适宜性分区评价主要考虑地质、水文地质条件、地下水动力场、水化学场、地质环境的影响。对于地埋管地源热泵系统,适宜性分区评价主要考虑地质、水文地质条件、地层属性、岩土热物性、施工工艺及经济合理性。

#### 5.1.2 评价结果

通过采用层次分析法或指标法开展适宜性分区评价,获得每个省会城市的地下水地源热泵系统和地埋管地源热泵系统适宜性分区成果,分别划分为适宜区、较适宜区、不适宜区。31 个省会城市总评价面积约为 5.20 万 km<sup>2</sup>。超过 1/2 的面积(占评价区面积的 62%)不适宜地下水源热泵系统开发利用,而对于地埋管热泵系统只有 18% 的比例不适宜开发利用(表 3)。从开发利用方式来看,地埋管热泵系统的应用将会更广泛。

比较适合应用地下水地源热泵系统的地区主要分布在我国的东部,如东北地区的呼和浩特,华北平原的石家庄、济南、郑州等地,南方主要有南昌、昆明、成都等地相对适合地下水地源热泵系统的应用,这些地区大多处于平原盆地及富水性较好的地区。不适宜建立地下水地源热泵系统的地区主要位于我国西部的西宁、兰州,北部的哈尔滨、长春及南方的海口、广州、合肥、长沙等地,地下水资

表3 全国 31 个省会城市地源热泵系统适宜性分区

Table3 Result of suitability assessment of GSHP system in provincial capital cities of China

| 类别                 | 地下水地源热泵系统 |       |       | 地埋管地源热泵系统 |       |      |
|--------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|------|
|                    | 适宜区       | 较适宜区  | 不适宜区  | 适宜区       | 较适宜区  | 不适宜区 |
| 面积/km <sup>2</sup> | 5954      | 13867 | 32163 | 14951     | 27667 | 9366 |
| 比例/%               | 11        | 27    | 62    | 29        | 53    | 18   |

源相对匮乏。其中上海市因为地面沉降问题限制地下水地源热泵开发,目前评价的地下水地源热泵适宜区、较适宜区均为潜在适宜区、较适宜区。

相比较地下水地源热泵系统,地埋管地源热泵系统在大多数省会城市中具有较好的适宜性。除西宁市、拉萨市全区基本都不适宜开发利用地埋管地源热泵外,其他城市地埋管的适宜区较适宜区面积都超过40%,其中银川、天津、太原、西安、石家庄、成都、长沙、武汉、合肥、南昌、上海、重庆、南宁、

海口基本全区都是地埋管地源热泵系统的适宜区和较适宜区。地埋管地源热泵系统的不适宜区,主要是从地埋管的施工难度和建设成本上考虑,属于经济上意义的不适宜区。

## 5.2 资源量评价

### 5.2.1 评价方法

评价内容包括浅层地热能热容量、换热功率及供暖制冷面积。评价方法参照浅层地热能勘查评价规范(DZ/T 0225—2009)和中国地质调查局相关

表4 全国31个省会城市浅层地热能热容量、换热功率计算汇总

Table 4 Summary of the calculation of heat capacity and heat transfer rate of shallow geothermal resources of provincial capital cities in China

| 城市   | 200 m以浅热容量/(kJ/°C)    | 地下水源热泵系统换热功率/kW    |                    | 地埋管热泵系统总换热功率/kW    |                    | 地源热泵系统换热功率/kW      |                    |
|------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|      |                       | 夏季制冷               | 冬季供暖               | 夏季制冷               | 冬季供暖               | 夏季制冷               | 冬季供暖               |
| 西宁   | $2.81 \times 10^{13}$ | $1.47 \times 10^5$ | $4.42 \times 10^4$ | $4.50 \times 10^5$ | $3.42 \times 10^5$ | $5.97 \times 10^5$ | $3.87 \times 10^5$ |
| 拉萨   | $8.35 \times 10^{13}$ | /                  | $4.27 \times 10^5$ | /                  | $5.20 \times 10^3$ | /                  | $4.33 \times 10^5$ |
| 哈尔滨  | $4.57 \times 10^{14}$ | $1.38 \times 10^6$ | $4.20 \times 10^5$ | $9.35 \times 10^6$ | $3.81 \times 10^6$ | $8.16 \times 10^6$ | $3.30 \times 10^6$ |
| 呼和浩特 | $1.72 \times 10^{14}$ | $8.67 \times 10^5$ | $4.34 \times 10^5$ | $5.63 \times 10^6$ | $1.66 \times 10^6$ | $4.77 \times 10^6$ | $1.41 \times 10^6$ |
| 乌鲁木齐 | $5.51 \times 10^{14}$ | $1.11 \times 10^7$ | $7.21 \times 10^6$ | $1.34 \times 10^7$ | $6.38 \times 10^6$ | $1.77 \times 10^7$ | $9.64 \times 10^6$ |
| 长春   | $5.92 \times 10^{14}$ | 0                  | 0                  | $1.01 \times 10^7$ | $5.73 \times 10^6$ | $1.01 \times 10^7$ | $5.73 \times 10^6$ |
| 沈阳   | $1.83 \times 10^{15}$ | $1.04 \times 10^7$ | $5.21 \times 10^6$ | $3.06 \times 10^7$ | $1.74 \times 10^7$ | $3.18 \times 10^7$ | $1.85 \times 10^7$ |
| 银川   | $2.46 \times 10^{14}$ | $1.02 \times 10^6$ | $5.15 \times 10^5$ | $9.80 \times 10^6$ | $2.85 \times 10^6$ | $9.03 \times 10^6$ | $2.67 \times 10^6$ |
| 兰州   | $1.32 \times 10^{14}$ | $2.23 \times 10^6$ | $1.12 \times 10^6$ | $2.61 \times 10^7$ | $7.67 \times 10^6$ | $2.52 \times 10^7$ | $7.43 \times 10^6$ |
| 北京   | $1.94 \times 10^{15}$ | $1.47 \times 10^7$ | $7.35 \times 10^6$ | $7.17 \times 10^7$ | $3.59 \times 10^7$ | $8.64 \times 10^7$ | $4.33 \times 10^7$ |
| 天津   | $5.59 \times 10^{15}$ | $8.03 \times 10^5$ | $4.02 \times 10^5$ | $1.01 \times 10^8$ | $6.70 \times 10^7$ | $1.01 \times 10^8$ | $6.70 \times 10^7$ |
| 太原   | $3.58 \times 10^{14}$ | $3.90 \times 10^5$ | $1.95 \times 10^5$ | $8.80 \times 10^6$ | $3.86 \times 10^6$ | $8.41 \times 10^6$ | $3.70 \times 10^6$ |
| 西安   | $5.52 \times 10^{14}$ | $6.33 \times 10^6$ | $3.16 \times 10^6$ | $1.91 \times 10^7$ | $1.37 \times 10^7$ | $2.14 \times 10^7$ | $1.19 \times 10^7$ |
| 郑州   | $4.94 \times 10^{14}$ | $5.30 \times 10^6$ | $2.65 \times 10^6$ | $9.09 \times 10^6$ | $1.03 \times 10^7$ | $8.26 \times 10^6$ | $1.22 \times 10^7$ |
| 济南   | $2.78 \times 10^{14}$ | $1.44 \times 10^6$ | $7.22 \times 10^5$ | $1.34 \times 10^7$ | $5.81 \times 10^6$ | $1.04 \times 10^7$ | $4.52 \times 10^6$ |
| 石家庄  | $4.60 \times 10^{14}$ | $6.41 \times 10^5$ | $3.21 \times 10^5$ | $1.92 \times 10^7$ | $1.10 \times 10^7$ | $1.31 \times 10^7$ | $7.47 \times 10^6$ |
| 昆明   | $3.60 \times 10^{14}$ | $4.67 \times 10^5$ | $2.34 \times 10^5$ | $6.38 \times 10^6$ | $5.90 \times 10^6$ | $6.04 \times 10^6$ | $5.50 \times 10^6$ |
| 贵阳   | $1.66 \times 10^{14}$ | $3.57 \times 10^5$ | $1.78 \times 10^5$ | $8.19 \times 10^6$ | $5.85 \times 10^6$ | $6.70 \times 10^6$ | $4.76 \times 10^6$ |
| 南京   | $1.49 \times 10^{15}$ | $1.24 \times 10^5$ | $6.18 \times 10^4$ | $2.95 \times 10^7$ | $2.45 \times 10^7$ | $2.81 \times 10^7$ | $2.33 \times 10^7$ |
| 成都   | $4.67 \times 10^{14}$ | $3.04 \times 10^6$ | $1.52 \times 10^6$ | $1.28 \times 10^7$ | $1.06 \times 10^7$ | $1.19 \times 10^7$ | $9.54 \times 10^6$ |
| 杭州   | $7.79 \times 10^{14}$ | $8.55 \times 10^5$ | $4.28 \times 10^5$ | $1.44 \times 10^7$ | $1.23 \times 10^7$ | $1.43 \times 10^7$ | $1.21 \times 10^7$ |
| 长沙   | $3.34 \times 10^{14}$ | $1.98 \times 10^5$ | $9.91 \times 10^4$ | $1.71 \times 10^7$ | $1.29 \times 10^7$ | $1.61 \times 10^7$ | $1.21 \times 10^7$ |
| 武汉   | $1.52 \times 10^{15}$ | $3.44 \times 10^5$ | $1.72 \times 10^5$ | $4.81 \times 10^7$ | $4.12 \times 10^7$ | $4.43 \times 10^7$ | $3.79 \times 10^7$ |
| 合肥   | $3.92 \times 10^{14}$ | 0                  | 0                  | $2.67 \times 10^7$ | $2.51 \times 10^7$ | $2.67 \times 10^7$ | $2.51 \times 10^7$ |
| 南昌   | $2.50 \times 10^{14}$ | $6.69 \times 10^5$ | $3.35 \times 10^5$ | $9.36 \times 10^6$ | $1.01 \times 10^7$ | $7.07 \times 10^6$ | $7.53 \times 10^6$ |
| 上海   | $9.94 \times 10^{14}$ | /                  | /                  | $6.89 \times 10^7$ | $6.99 \times 10^7$ | $6.89 \times 10^7$ | $6.99 \times 10^7$ |
| 重庆   | $1.50 \times 10^{14}$ | 0                  | 0                  | $2.10 \times 10^7$ | $2.27 \times 10^7$ | $2.10 \times 10^7$ | $2.27 \times 10^7$ |
| 福州   | $1.63 \times 10^{14}$ | $2.71 \times 10^5$ | $5.42 \times 10^5$ | $2.46 \times 10^6$ | $3.25 \times 10^6$ | $1.82 \times 10^6$ | $2.49 \times 10^6$ |
| 南宁   | $2.63 \times 10^{14}$ | $3.81 \times 10^6$ | /                  | $1.97 \times 10^7$ | /                  | $1.80 \times 10^7$ | /                  |
| 广州   | $8.08 \times 10^{14}$ | $1.35 \times 10^5$ | $3.37 \times 10^5$ | $1.13 \times 10^7$ | $2.46 \times 10^7$ | $1.14 \times 10^7$ | $2.50 \times 10^7$ |
| 海口   | $1.80 \times 10^{14}$ | 0                  | 0                  | $1.78 \times 10^6$ | /                  | $1.78 \times 10^6$ | /                  |
| 合计   | $2.21 \times 10^{16}$ | $6.71 \times 10^7$ | $3.41 \times 10^7$ | $6.45 \times 10^8$ | $4.62 \times 10^8$ | $6.40 \times 10^8$ | $4.57 \times 10^8$ |



技术要求<sup>④</sup>。

浅层地热能热容量采用体积法进行估算,分别估算包气带和饱水带中的单位温差储藏的热量,然后合并评价范围内地质体的储热性能。浅层地热能资源在适宜性分区的基础上分别进行浅层地热能容量和浅层地热能换热功率计算。地源热泵系统总换热功率的计算是在浅层地热资源开发利用适宜性评价的基础上,综合地下水和埋管地源热泵系统换热功率计算的成果得出的。其中,对于埋管地源热泵系统适宜或较适宜而地下水源热泵系统不适宜的区域,按埋管地源热泵系统换热功率计算总换热功率;对于埋管地源热泵系统不适宜而地下水源热泵系统适宜或较适宜的区域,按照地下水源热泵系统换热功率计算总换热功率;而对于埋管地源热泵系统和地下水源热泵系统均适

宜或较适宜的区域,则按照埋管地源热泵换热功率的2/3和地下水源热泵换热功率的1/3进行折算。根据计算的浅层地热能换热功率,结合当地的土地利用规划以及供暖、制冷负荷,计算当地的可供供暖和制冷面积,进行浅层地热资源潜力评价(王贵玲等,2017;多吉等,2017)。

### 5.2.2 资源潜力

根据31个省会城市浅层地热能资源调查评价结果(表4)<sup>⑤⑥</sup>(卫万顺等,2010),我国31个省会城市200 m以浅热容量为 $2.21 \times 10^{16} \text{ kJ/}^\circ\text{C}$ 。地下水源热泵系统夏季换热功率为 $6.71 \times 10^7 \text{ kW}$ ,冬季换热功率为 $3.41 \times 10^7 \text{ kW}$ ;埋管地源热泵系统夏季换热功率为 $6.45 \times 10^8 \text{ kW}$ ,冬季换热功率为 $4.62 \times 10^8 \text{ kW}$ 。地源热泵系统总的换热功率夏季为 $6.40 \times 10^8 \text{ kW}$ ,冬季为 $4.57 \times 10^8 \text{ kW}$ 。

表5 全国31个省会城市浅层地热能制冷/供暖面积计算结果汇总

Table 5 Summary of the calculation of potentials evaluation results of shallow geothermal resources of provincial capital cities in China

| 城市   | 地下水源热泵供暖和制冷面积/m <sup>2</sup> |                    | 埋管热泵供暖和制冷面积/m <sup>2</sup> |                    | 地源热泵供暖和制冷面积/m <sup>2</sup> |                    |
|------|------------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
|      | 夏季制冷                         | 冬季供暖               | 夏季制冷                       | 冬季供暖               | 夏季制冷                       | 冬季供暖               |
| 西宁   | $3.50 \times 10^6$           | $7.14 \times 10^5$ | $1.12 \times 10^7$         | $5.52 \times 10^6$ | $1.47 \times 10^7$         | $6.24 \times 10^6$ |
| 拉萨   | /                            | $7.20 \times 10^6$ | /                          | $8.76 \times 10^4$ | /                          | $7.28 \times 10^6$ |
| 哈尔滨  | $2.30 \times 10^7$           | $5.25 \times 10^6$ | $1.56 \times 10^8$         | $4.76 \times 10^7$ | $1.36 \times 10^8$         | $4.13 \times 10^7$ |
| 呼和浩特 | $1.34 \times 10^7$           | $9.63 \times 10^6$ | $8.66 \times 10^7$         | $3.78 \times 10^7$ | $7.33 \times 10^7$         | $3.13 \times 10^7$ |
| 乌鲁木齐 | $1.72 \times 10^8$           | $1.11 \times 10^8$ | $2.06 \times 10^8$         | $9.81 \times 10^7$ | $2.72 \times 10^8$         | $1.48 \times 10^8$ |
| 长春   | 0                            | 0                  | $1.26 \times 10^8$         | $9.54 \times 10^7$ | $1.26 \times 10^8$         | $9.54 \times 10^7$ |
| 沈阳   | $1.21 \times 10^8$           | $8.22 \times 10^7$ | $3.55 \times 10^8$         | $2.74 \times 10^8$ | $3.69 \times 10^8$         | $2.92 \times 10^8$ |
| 银川   | $1.47 \times 10^7$           | $7.44 \times 10^6$ | $2.73 \times 10^8$         | $1.23 \times 10^8$ | $1.31 \times 10^8$         | $5.67 \times 10^7$ |
| 兰州   | $3.52 \times 10^7$           | $1.63 \times 10^7$ | $4.11 \times 10^8$         | $1.12 \times 10^8$ | $3.96 \times 10^8$         | $1.09 \times 10^8$ |
| 北京   | $2.72 \times 10^8$           | $1.63 \times 10^8$ | $1.33 \times 10^9$         | $7.96 \times 10^8$ | $1.60 \times 10^9$         | $9.59 \times 10^8$ |
| 天津   | $1.01 \times 10^7$           | $8.04 \times 10^6$ | $1.26 \times 10^9$         | $1.34 \times 10^9$ | $1.26 \times 10^9$         | $1.34 \times 10^9$ |
| 太原   | $6.49 \times 10^6$           | $3.90 \times 10^6$ | $1.47 \times 10^8$         | $7.73 \times 10^7$ | $1.40 \times 10^8$         | $7.40 \times 10^7$ |
| 西安   | $8.67 \times 10^7$           | $6.08 \times 10^7$ | $2.62 \times 10^8$         | $2.64 \times 10^8$ | $2.93 \times 10^8$         | $2.29 \times 10^8$ |
| 郑州   | $8.18 \times 10^7$           | $6.13 \times 10^7$ | $1.21 \times 10^8$         | $2.06 \times 10^8$ | $1.14 \times 10^8$         | $1.66 \times 10^8$ |
| 济南   | $2.06 \times 10^7$           | $1.31 \times 10^7$ | $1.91 \times 10^8$         | $1.06 \times 10^8$ | $1.48 \times 10^8$         | $8.21 \times 10^7$ |
| 石家庄  | $7.13 \times 10^6$           | $5.35 \times 10^6$ | $2.14 \times 10^8$         | $1.83 \times 10^8$ | $1.45 \times 10^8$         | $1.25 \times 10^8$ |
| 昆明   | $9.34 \times 10^6$           | $5.84 \times 10^6$ | $1.28 \times 10^8$         | $1.47 \times 10^8$ | $7.48 \times 10^7$         | $1.09 \times 10^8$ |
| 贵阳   | $5.10 \times 10^6$           | $3.57 \times 10^6$ | $1.17 \times 10^8$         | $1.17 \times 10^8$ | $9.57 \times 10^7$         | $9.52 \times 10^7$ |
| 南京   | $1.04 \times 10^6$           | $9.57 \times 10^5$ | $2.49 \times 10^8$         | $3.79 \times 10^8$ | $2.36 \times 10^8$         | $3.61 \times 10^8$ |
| 成都   | $3.80 \times 10^7$           | $1.93 \times 10^7$ | $1.60 \times 10^8$         | $1.77 \times 10^8$ | $1.48 \times 10^8$         | $1.57 \times 10^8$ |
| 杭州   | $8.55 \times 10^6$           | $6.11 \times 10^6$ | $1.44 \times 10^8$         | $1.76 \times 10^8$ | $1.43 \times 10^8$         | $1.73 \times 10^8$ |
| 长沙   | $2.12 \times 10^6$           | $2.80 \times 10^6$ | $1.83 \times 10^8$         | $3.68 \times 10^8$ | $1.86 \times 10^8$         | $3.71 \times 10^8$ |
| 武汉   | $4.31 \times 10^6$           | $2.95 \times 10^6$ | $6.01 \times 10^8$         | $7.06 \times 10^8$ | $5.54 \times 10^8$         | $6.50 \times 10^8$ |
| 合肥   | 0                            | 0                  | $2.59 \times 10^8$         | $5.49 \times 10^8$ | $2.59 \times 10^8$         | $5.49 \times 10^8$ |
| 南昌   | $8.37 \times 10^6$           | $5.58 \times 10^6$ | $1.17 \times 10^8$         | $1.69 \times 10^8$ | $8.84 \times 10^7$         | $1.26 \times 10^8$ |
| 上海   | /                            | /                  | $4.64 \times 10^8$         | $1.45 \times 10^9$ | $4.64 \times 10^8$         | $1.45 \times 10^9$ |
| 重庆   | 0                            | 0                  | $2.10 \times 10^8$         | $3.79 \times 10^8$ | $2.10 \times 10^8$         | $3.79 \times 10^8$ |
| 福州   | $3.39 \times 10^6$           | $1.08 \times 10^7$ | $3.08 \times 10^7$         | $6.50 \times 10^7$ | $2.28 \times 10^7$         | $4.98 \times 10^7$ |
| 南宁   | $5.29 \times 10^7$           | /                  | $2.73 \times 10^8$         | /                  | $3.26 \times 10^8$         | /                  |
| 广州   | $1.92 \times 10^6$           | $8.42 \times 10^6$ | $1.62 \times 10^8$         | $6.16 \times 10^8$ | $1.63 \times 10^8$         | $6.24 \times 10^8$ |
| 海口   | 0                            | 0                  | $1.97 \times 10^7$         | /                  | $1.97 \times 10^7$         | /                  |
| 合计   | $1.00 \times 10^9$           | $6.22 \times 10^8$ | $8.26 \times 10^9$         | $9.07 \times 10^9$ | $8.21 \times 10^9$         | $8.86 \times 10^9$ |

目前,浅层地热能资源主要用于建筑物供暖和制冷。我国31个省会城市地下水热泵系统夏季可制冷面积为 $1.00 \times 10^9 \text{ m}^2$ ,冬季可供暖面积为 $6.22 \times 10^8 \text{ m}^2$ ;地理管地源热泵系统夏季可制冷面积为 $8.26 \times 10^9 \text{ m}^2$ ,冬季可供暖面积为 $9.07 \times 10^9 \text{ m}^2$ 。地源热泵系统夏季可制冷面积为 $8.21 \times 10^9 \text{ m}^2$ ,冬季可供暖面积为 $8.86 \times 10^9 \text{ m}^2$ (表5)。

考虑热泵夏季制冷、冬季供暖天数,热泵运行时间及热泵运行能效比系数,根据《综合能耗计算通则》(GB/T2589-2008)中原煤的折算系数,以及考虑燃煤与换热效率等因素,全国31个省会城市浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤2.8亿t,可替代标准煤4.67亿t。可为供暖和制冷提供丰富的能源储备。

## 6 讨论

在适宜性评价的基础上,按利用方式、需求程度等将全国分为全年集中利用区、全年分散利用区、分散式冬季供暖区和分散式夏季制冷区4类(图

6)。全年集中利用区主要分布在京津冀、山东、江苏、安徽、河南、陕西和东北部分地区,全年分散利用区主要分布在华北、东北、长江中下游等除全年集中利用区以外的地区。这两类地区全年可进行冬季供暖和夏季制冷循环利用,集中利用地区位于地下水条件较好、经济条件发达的区域,对浅层地热能需求量大,宜集中规模化利用;分散利用区因环境、经济条件限制适宜小规模分散式开发利用。分散式冬季供暖区分布于东北北部、西北大部分地区及青藏高原区,该地区夏季需求量小,人口相对稀少,宜进行分散式冬季供暖;分散式夏季制冷区分布于南部沿海和西南部分地区,该地区冬季需求量小,宜进行分散式夏季制冷(朱喜等,2016)。

## 7 结论

(1)浅层地热能开发利用条件受气候条件、地质条件以及热泵运行等因素的影响。地表以下200m深度内,以第四系地层为主的城市,多数分布在平原地区,以基岩为主的城市,主要集中在河谷盆



图6 中国浅层地热能开发利用区划图

Fig.6 Regional planning for utilization and development of shallow geothermal resources in China

地。在我国陆区范围内,恒温带温度受太阳辐射影响最大,恒温带顶板埋深与气温变化趋势相反。导热系数受岩性影响明显,不同类型的岩石或同类型岩石其矿物组分和含量不同,导热系数亦不同。

(2)我国浅层地热能资源主要用于建筑物供暖和制冷。31个省会城超过1/2的面积(占评价区面积的62%)不适宜地下水源热泵系统开发利用,而对于埋管热泵系统只有18%的比例不适宜开发利用。全国31个省会城市浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤2.8亿t,可替代标准煤4.67亿t,可为供暖和制冷提供丰富的能源储备。在适宜性评价的基础上,按利用方式、需求程度等将全国分为全年集中利用区、全年分散利用区、分散式冬季供暖区和分散式夏季制冷区4类。

(3)浅层地热能适宜性广泛,其开发利用对推动中国绿色、低碳、节能型城市化发展,解决京津冀地区冬季雾霾和南方城市冬季供暖问题具有重要意义。

**致谢:**感谢全国地热资源调查评价计划项目各省相关地勘单位及科研院所数据资料方面提供的帮助。并感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所蔺文静副研究员、张薇高级工程师等其他同事在资料收集、文章润色及图件方面的帮助。

## 注释

① [http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201707/t20170731\\_232796.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201707/t20170731_232796.html)

② 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. 全国省会城市浅层地温能调查评价综合研究报告, 2015.

③ 中国地热资源第一届学术年会论文集, 2012, 昆明.

④ 中国地质调查局. 全国重点城市浅层地温能调查评价及编图技术要求, 2012

⑤ 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. 全国省会城市浅层地温能调查评价综合研究报告, 2015.

⑥ 天津地热勘查开发设计院. 天津市浅层地热能资源调查潜力报告, 2012.

## References

China Geological Survey. Handbook of Hydrogeology(Second Edition). Beijing: Geological Publishing House, 2012(in Chinese).  
Duo Ji, Wang Guiling, Zheng Keyan. Research on the Development and Utilization of Geothermal Resources in China [M]. Beijing: Science Press, 2017(in Chinese).  
Huang Jingrui. Analysis of Distribution and Change Characteristics of

Shallow Groundwater Temperature Field in Xi'an City[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013 (in Chinese with English abstract).  
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1):312-321(in Chinese with English abstract).  
Luo Jin, Rohn Joachim, Xiang Wei, Bertermann David, Blum Philipp. A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems[J]. Energy and Buildings, 117, 2016: 160-175.  
Liu Jianjun, Liu Hailei. Testing and analysis of thermal physical properties of rocks[J]. West China Exploration Engineering, 2009 (4): 144-148 (in Chinese).  
Qin Xiangxi, Lin Qinglong, Lishaohua. Characteristics of geotemperature filed for shallow geothermal energy assessment and utilization in Hangzhou[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38 (3):833-837(in Chinese with English abstract).  
Ran Weiyang, Li Ningbo, Yang Junwei, Yu Yuan. Some enlightenment gained from city shallow geothermal energy investigation and evaluation[J]. Urban Geology, 2014, 9(Z1):1-3(in Chinese with English abstract).  
Standards of the Geological Mining Industry of the People's Republic of China. Specification for Shallow Geothermal Energy Investigation and Evaluation (DZ/T 0225- 2009) [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2009(in Chinese).  
Shen Xianjie, Yang Shuzhen, Zhang Wenren. Thermal Properties and Test of Rock[M]. Beijing: Science Press, 1988 (in Chinese).  
Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4):449- 459(in Chinese with English abstract).  
Wang Wanli, Zhu Xi, Wang Guiling. Method of forecasting the temperature in constant temperature zone under warm temperate climates[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(8): 1112-1116 (in Chinese with English abstract).  
Wei Wanshun, Zheng Jiasen, Li Wenwei, et al. Shallow Geothermal Energy Resources Evaluation[M]. Beijing: China Earth Publishing House, 2010 (in Chinese).  
Wei Wanshun, Zheng Jiasen, Luan Yingbo. Characteristics and influencing factors of the shallow geothermal field in beijing plain area [J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1733-1737 (in Chinese with English abstract).  
Xu Zhenzhang. A discussion of factors influencing thermophysical characteristics of rocks and their mechanisms[J].Pet Expolevelop, 1992, 19(6): 84-89 (in Chinese with English abstract).  
Xu Mo, Wang Di, Jiang Liangwen, Qi Jihong. Review on thermal conductivity coefficient of rock and soil mass[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4):421-433 (in Chinese with English abstract).  
Zhang Wentong, Dong Wei. Advanced Tutorial on Statistical

- Analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004 (in Chinese).
- Zhang Baokun, Zhu Gangkun. Climatic Regionalization of China (Draft)[M]. Beijing: Science Press, 1959(in Chinese).
- Zhang Huizhi, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, Wang Hongjie, Zhao Yongcun, Sun Weixia, Huang Baorong. Spatial prediction of soil temperature in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 49(1):1-8 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jingyun, Yin Yunhe, Li Bingyuan. A New scheme for climate regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 3-13(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yunzhang, Yan Zhenpeng, Liuxinhao, et al. Shallow Geothermal Energy in Henan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010(in Chinese).
- Zhu Xi, Wang Wanli. Nationwide investigation and evaluation of shallow geothermal energy resources in cities above prefecture level fully completed[R]. News Letters of China Geological Survey, 2016, 2 (10): 8-11(in Chinese).
- 点启示[J]. 城市地质, 2014, 9(Z1): 1-3.
- 沈显杰, 杨淑贞, 张文仁. 岩石热物理性质及其测试[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-459.
- 王婉丽, 朱喜, 王贵玲. 暖温带地区恒温层温度的预测方法[J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1112-1116.
- 卫万顺, 郑佳森, 栾英波. 北京市平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1733-1737.
- 卫万顺, 郑佳森, 李文伟, 等. 浅层地温能资源评价[M]. 北京: 中国大地出版社, 2010.
- 许模, 王迪, 蒋良文, 漆继红. 岩土体导热系数研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 421-433.
- 徐振章. 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, 1992, 19(6): 84-89.
- 张宝堃, 朱岗昆. 中国气候区划(初稿). 北京: 科学出版社, 1959.
- 张慧智, 史学正, 于东升, 王洪杰, 赵永存, 孙维侠, 黄宝荣. 中国土壤温度的空间预测研究. 土壤学报. 2009, 49(1):1-8.
- 张文彤, 董伟. Spss统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- 赵云章, 闫震鹏, 刘新号, 等. 河南省城市浅层地热能[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 3-13.
- 中国地质调查局. 水文地质手册(第二版). 北京: 地质出版社, 2012.
- 中华人民共和国地质矿产行业标准. 浅层地热能勘查评价规范(DZ/T 0225-2009)[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2009.
- 朱喜, 王婉丽. 全国地级以上城市浅层地温能调查评价全面完成[R]. 中国地质调查成果快讯, 2016, 2 (10): 8-11.

### 附中文参考文献

- 多吉, 王贵玲, 郑克桢. 中国地热资源开发利用战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- 黄景锐. 西安市浅层地温场分布特征及其变化分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
- 刘建军, 刘海蕾. 岩石热物理性质测试与分析[J]. 西部探矿工程, 2009(4): 144-148.
- 秦祥熙, 林清龙, 李少华. 杭州市浅层地温资源温度场特征[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3):833-837.
- 冉伟彦, 李宁波, 杨俊伟, 于媛. 城市浅层地温能勘查评价工作的几