



## 地热系统的概念与传热机制综述

关 健<sup>1,2</sup>, 方 石<sup>1,2,3</sup>

1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 油页岩与共生能源矿产吉林省重点实验室, 吉林 长春 130061;
3. 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130026

**摘 要:** 地热能作为一种安全、稳定、成本低廉的清洁能源近年来备受推崇。地热系统是开展地热资源成因研究的基本单元, 国际上按地质环境和热量的传递方式可将其分为热传导和热对流两大类型, 据此进一步细分为沉积盆地型、地压型、干热岩型、岩浆侵入型、深循环型等 5 个亚类。本文回顾了地热系统的概念及发展史, 并讨论了地热系统主控因素以及两大类型地热系统的传热机制。

**关键词:** 地热系统; 能源; 热传导; 热对流; 传输机制

## CONCEPT AND HEAT TRANSFER MECHANISM OF GEOTHERMAL SYSTEM: A Review

GUAN Jian<sup>1,2</sup>, FANG Shi<sup>1,2,3</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Key Laboratory of Jilin Province for Oil Shale and Symbiotic Energy Minerals, Changchun 130061, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Education for Northeast Asia Biological Evolution and Environment, Changchun 130026, China

**Abstract:** Geothermal energy, as a safe, stable and low-cost clean power resource, has been highly recommended in recent years. Geothermal system, the basic unit for the study of geothermal genesis, can be divided into 2 types including heat conduction and heat convection, and further subdivided into 5 subtypes of sedimentary basin, geopressure, dry hot rock, magmatic intrusion and deep circulation in terms of geological environment and heat transfer mode. This paper reviews the concept and research history of geothermal system, and discusses the main controlling factors and heat transfer mechanism of the two types of geothermal system.

**Key words:** geothermal system; energy resource; heat transfer; heat convection; transfer mechanism

### 0 引言

地热能是蕴藏在地球内部的天然能源, 起源于地

球的熔融岩浆和放射性物质的衰变, 从地球内部巨大的蕴藏量来看可列为再生能源。据国际能源专家预

收稿日期: 2021-02-24; 修回日期: 2021-03-12. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“晚中生代漠河盆地充填-剥露过程对鄂霍次克海关闭的响应”(41472173); 国土资源部杰出青年科技人才培养计划项目(2013111111); 中国地质调查局公益基础项目(CDD1910-02, DD20189613).

作者简介: 关键(1995—), 男, 硕士研究生, 从事油气勘探方面的研究, 通信地址 吉林省长春市朝阳区清河街道西民主大街 938 号, E-mail//1842414533@qq.com

通信作者: 方石(1974—), 男, 博士, 副教授, 从事油气勘探、沉积学方面的研究, 通信地址 吉林省长春市朝阳区清河街道西民主大街 938 号, E-mail//fs812625@vip.sina.com

计,到2100年地热利用将在世界能源总量占到30%~80%<sup>[1]</sup>.当代世界经济对石油、煤炭、天然气等非再生资源的严重依赖不仅制约了社会的可持续发展,也造成了严重的环境污染和生态平衡的破坏.而地热是一种可替代传统化石燃料的清洁能源,应大力开展对地热的研究工作.在地下热源将热传输到地面再以温泉或间歇泉的形式出露地表的过程中,地热系统扮演了重要的角色.为了更好地研究地热,我们需要弄清地热系统的涵义以及热在地热系统中的传输机制.

## 1 地热系统的概念

国内外最早的关于地热系统的文献出现在1966年<sup>[2]</sup>,不过当时并未明确定义其涵义,其意义与地热田、地热区等相当.1986年,Rybach等<sup>[3]</sup>提出“地热的富集程度足以构成能量资源的系统才能叫作地热系统”.1990年,Hochstein<sup>[4]</sup>将热液状态下的地热系统定义为“在有限的空间内,地球上地壳的水通过流动将热量从热源传递到热沉的过程”.根据这个定义,可知地热系统主要由热源、渗透性地层和流体3个要素构成,其中流体作为传递热能的热载体存在.近些年,地热系统的概念越来越清晰,如国家标准<sup>[5]</sup>中将地热系统定义为构成相对独立的热能储存、运移、转换的系统.朱焕来<sup>[6]</sup>综合了前人的成果,从系统论的角度将地热系统重新定义为“能形成地热田各个地质要素的有机组合”.汪集旻<sup>[7]</sup>在给地热系统下定义时更是将其与地热田的概念区分开,他认为“地热系统是指地热能聚集到可利用的程度,在热量和流体循环上相对独立的地质单元,而地热田是地热系统的流体与热量的汇集区,因此地热田属于地热系统的一部分”.

## 2 国内外研究现状

国内外学者对地热系统做了大量相关的研究.1967年White<sup>[8]</sup>在研究美国内达华州的间歇泉活动时

证明了其内部热对流的机制,并于1973年提出了一个对流地热系统的运作模型,阐述了对流系统的内部运作模式<sup>[9]</sup>,该模型已被广泛接受.

20世纪70年代初,美国能源部首次在墨西哥湾盆地开展针对地压型地热系统的重点研究,并通过计算得出该地区地压地热资源的总热能高达 $1.7 \times 10^{22}$  cal<sup>[10-11]</sup>.同一时期,人们在美国墨西哥湾一口深油井中首次发现了热干岩资源,不过当时并未引起关注<sup>[12]</sup>.

1974年,由美国政府资助的位于新墨西哥州芬顿山的干热岩项目是世界上第一次利用干热岩资源的项目<sup>[13]</sup>.而干热岩系统(增强型地热系统)最开始在1987年建立,并分别自1987年起于法国的Soultz-sous-Forêts,自2007年起在德国的Landau开始运行<sup>[14]</sup>.

1986年黄尚瑶<sup>[15]</sup>按地热区形成的储、盖、通、源4个特征,结合其所在的大地构造环境,将我国地热系统划分为岩浆活动型、隆起断裂型及沉积盆地型3种基本类型.

1996年陈墨香等<sup>[16]</sup>在黄尚瑶对我国热水型地热系统研究的基础上做了某些改善或补正,将我国地热系统细分为两类五型,两类是指构造隆起热对流类和构造沉陷热传导类,而五型则指火山型、非火山型、深循环型、断陷和拗陷盆地型.各类型所处地质构造背景如表1所示.

2004年Wisian等<sup>[18]</sup>通过建立二维模拟模型确定了美国西部盆地地热的构造、热输入和渗透率分布之间的基本定性关系,得出该区地热水主要是深部循环水而不是通过冷却的围岩供热,同时评价了渗透率和构造变化对美国西部的盆地地热系统的影响.

2013年Cherubini等<sup>[19]</sup>通过三维有限元模拟,研究了德国格罗伯-肖内贝克盆地深部热场的控制因素,并通过流体和热传导耦合模拟,评估了不同传热机制对研究区水文地质背景下温度分布的相对影响,且比

表1 中国地热系统的基本类型

Table 1 Basic types of geothermal system in China

地热系统 类型	构造隆起区热对流类			构造沉陷区热传导类	
	火山型	非火山型	深循环型	断陷盆地型	拗陷盆地型
地质构造 背景	板块边缘第四纪火山 区,构造活动异常强烈	板块碰撞边缘,构 造活动异常强烈	板内规模不一 的活动断裂	板内裂谷型盆地,不均 一的断裂活动明显	板内造山型盆地,盆地稳定下沉;板 内克拉通型盆地,无明显构造变动

据文献<sup>[17]</sup>.

宿主含水层更具渗透性的断层能在局部尺度上对热场和流体循环起到很强的控制作用。

### 3 地热系统的主控因素

根据对前人文献<sup>[6, 20-23]</sup>的总结,得知地热系统的控制因素主要有如下 3 点:

1) 热源, 主要包含有岩浆热源、放射性热源、摩擦生热等。充足的热源是形成大规模地热资源的首要控制因素。

2) 具有一定埋深的大规模孔渗性较好的优质储层。热储作为热水的聚集场所, 能储集地热流体并形成足够的地热流体产能。

3) 断裂和裂缝的发育。一方面, 断裂可作为热能传递的通道, 将深部热源通过对流的方式带到地表; 另一方面, 由于断裂自身的张扭性特征可允许热水在其中流动或者直接成为地热储层。

### 4 地热系统的类型和传热机制

1976 年, Muffler<sup>[24]</sup>在第二次联合国旧金山地热资源开发和利用专题讨论会上, 根据地热系统的地质环境和热量传递方式, 将其分成对流型地热系统和传导型地热系统两大类。在对流型地热系统中又分出以年轻浅成侵入岩浆体作为热源、可被钻孔挖掘的岩浆侵入型系统和沿断层或裂隙带具有足够的渗透率来进行水循环的深部循环系统; 在传导型系统中, 则分出区域热背景正常或略偏高地区沉积层中的地压地热带系统和干热岩系统。前者以流体为特征, 其赋存和携带的能量以流体形式从深部向浅部传递; 而后者主要通过传导的形式将热能从一种介质传递到另外一种介质。

#### 4.1 传导型地热的传热机制

从地球内部传递到其表面的大部分热量是通过传导产生的。传导涉及到分子之间的随机动能的传递, 而不需要物质的整体转移。移动分子撞击邻近分子, 使它们振动得更快, 从而传递热能。传导是固体中的主要传热方式。

##### 4.1.1 沉积盆地传导型地热系统

深沉积盆地型地热系统由深层(>6 km)沉积含水层组成。这些深层地下水由具有适度渗透性的砂岩或碳酸盐含水层组成, 通过下层传导加热, 并被具有低渗

透性和低导热率(良好绝缘体属性)的岩石(如页岩)覆盖。正常情况下, 深层地下水由当地自然温度梯度通过传导加热, 然而有时会遇到可渗透型地层倾斜的情况, 此时一些含水层可能会通过平流产生近水平的缓慢流动, 导致地下水升温速率略有下降(如图 1)。整体来看, 地下水温度与所在深度呈正相关的关系<sup>[25]</sup>。季汉成等<sup>[26]</sup>通过对南襄盆地研究区两口全测温井的温度-深度曲线图分析得知, 南襄盆地温度随深度呈近似直线增加趋势, 从而明确其热传输机制为热传导型。

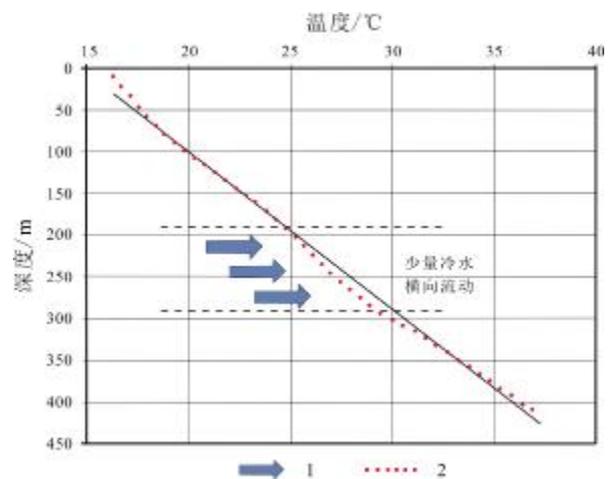


图 1 沉积盆地传导型地热系统中地下水温度与深度的关系  
Fig. 1 Groundwater temperature vs. depth in sedimentary basin  
conductive geothermal system

1—冷水(cold water); 2—深层地下水(deep groundwater)

##### 4.1.2 地压型地热系统

地压型储层传导系统是高度加压的沉积含水层, 在其中形成了地压型地热资源。这种地热资源是指热储层孔隙流体压力超过水柱所产生的静水压力, 与通常所称的正常水压地热资源的主要区别在于其具有异常高压(压力梯度为正常静水压力梯度的 1.2~2 倍), 同时热储流体中还溶解有较多的甲烷, 少量乙烷和丙烷等烃类气体<sup>[27]</sup>。

超压(异常高压)是指地层孔隙流体压力超过静水压力, 是流体滞留引起的一种不平衡状态, 控制其存在和分布的主要因素是渗透率以及沉积物的可压缩性<sup>[28]</sup>。而厚层泥岩序列快速埋藏引起的不均压实是产生超压的最主要因素<sup>[29]</sup>。图 2a 显示在静水和超压条件下压力随深度的变化情况<sup>①</sup>。通常情况下, 孔隙压力

① Hydraulic Fracturing. New South Wales: School of Geosciences, University of Sydney, 2016.

等于静水压力,流体被困在透水层中,并被不透水的岩层迅速掩埋和隔离. 随着时间的推移和进一步埋藏,当孔隙压力超过静水压力时,地压储层系统开始形成. 在完全被地压包裹的储层中,孔隙流体压力基本等于地层压力. 同时由于孔隙压力的不断升高,岩石在储层内经历了由压实到破碎再到重新压实的过程,其抗剪强度也在不断发生变化(如图 2b).

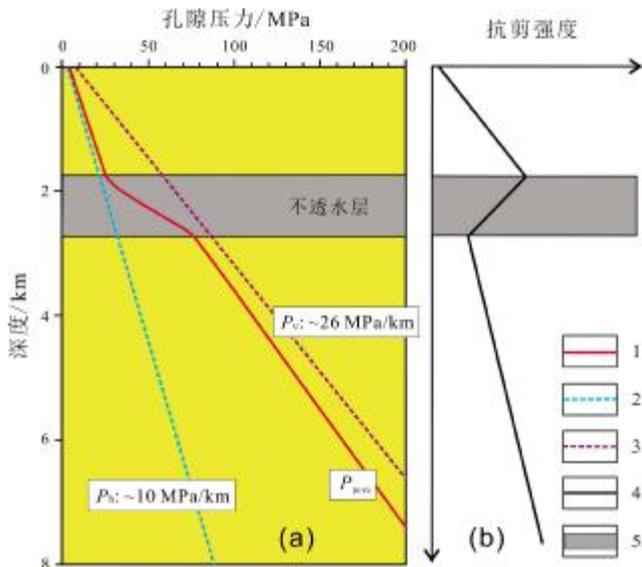


图 2 孔隙流体压力和岩石抗剪强度随深度变化图解  
(据文献[28])

Fig. 2 Diagram of pore-fluid pressure and rock shear strength changing with depth  
(From Reference [28])

1—孔隙流体压力 (pore-fluid pressure); 2—静水压力 (hydrostatic pressure); 3—地层压力 (formation pressure); 4—抗剪强度 (shear strength); 5—不透水层 (impervious layer)

地压型地热系统的成因可分为 3 个阶段 (图 3).

首先是砂体在重力作用下接受沉积. 第二阶段, 当上覆粗粒沉积砂质量超过下伏泥质沉积层的承重能力时,砂体逐渐下沉,沉积砂体逐渐被周围的泥质沉积层所圈闭, 并承受来自上覆沉积层的部分压力. 虽然覆盖层的负荷总是趋于压出沉积砂体中的隙间水, 但由于在地层不断埋深过程中,孔隙体积趋向于快速减小,四周圈闭层的透水性能很差,而砂粒和隙间水的可压缩程度很低,导致砂岩中的水分无法突破泥岩层,孔隙流体排出受阻. 进入第三阶段, 上覆沉积层压力继续增加,致使地层流体承担一部分负荷压力,从而流体压力超过静水柱压力形成超压, 在孔隙水不断被热源加热的过程中, 泥页岩生成的烃类资源连同无机成因气体一起进入储层,最终形成具有高压烃类、非烃类气体的地热资源[27].

4.1.3 干热岩型地热系统

干热岩概念于 1970 年首次由美国的 Los Alamos 国家实验室提出[31],是指地下埋深数千米,具有高温(通常大于 200 °C)特点,但由于低孔隙度和低渗透率而缺少流体或存在少量流体的岩石(体). 储存于干热岩中的热量需通过人工压裂形成增强型地热系统(EGS),才能得以开采[32-33],赋存于干热岩中可以开采的地热能称为干热岩型地热资源[34]. 干热岩区别于水热型地热岩层的突出特点是储层致密, 不含或含有少量的流体, 需压裂造储取热. 由于缺乏天然储集层的渗透性和岩石中存在的水,热的流动来源于传导,而不是对流[35]. 汪集旸[7]根据地壳结构和成因机制将我国的干热岩资源分为高放射性产热型、强烈构造活动带型、沉积盆地型及近代火山型等 4 类.

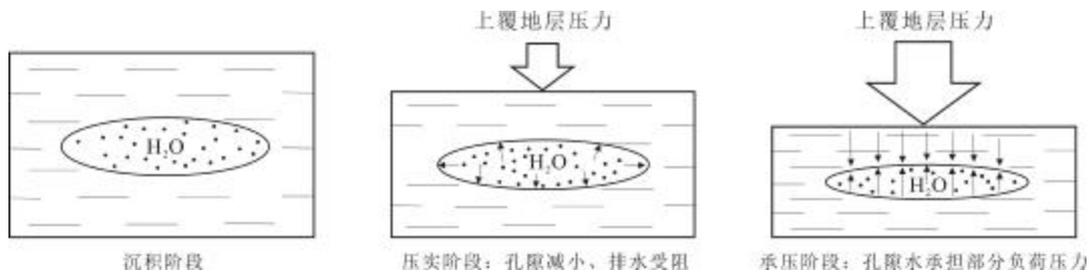


图 3 地压型地热系统模型  
(据文献[30])

Fig. 3 Model of geopressure geothermal system  
(From Reference [30])

### 4.2 对流型地热的传热机制

对流地热系统又称水热对流系统,特点是流体的自然循环.当物质具有一定的流动性时,它可以携带热能从高温地点移向低温地点,而且不需要很大的温度梯度.这种物质迁移现象在地球内部普遍存在,如热水活动、岩浆活动、地幔对流等.在对流为主的地热活动中,流体向上循环将热量从深部输送到较浅的储集层,或输送到地表,从而导致对流单元上部的温度升高,下部的温度降低<sup>[36]</sup>.

White<sup>[9]</sup>于 1973 年提出了一个对流地热系统的运作模型(如图 4b).地面和近地表冷却的地下水沿不渗透岩石中的裂缝向下渗透到地表深处 B 点(2~6 km),在那里冷却水被岩浆或异常热的岩石从下方加热.此时,受热的水可以沿低渗透岩石覆盖的可渗透岩石层横向流动.一段时间后部分冷却水由于冷却下降的流体和热上升的流体之间的浮力,被加热后沿上覆岩层中可能的裂缝上升到表面,导致的结果是流体会在渗透岩层(储集层)中循环,在中间温度较高的地方上升,在储集层两侧冷却的地方下沉,这便形成了对流系统.图 4a 显示了流体在不同深度的温度变化,这些变化与图 4b 的截面相对应.对流系统的一个特征是温度随

深度的等值分布(见图 4a、b 中的 C 和 D 点).而对于 C、F 和 G 点,由于固结岩浆传热主要靠热传导,温度随着深度的增加而稳趋上升.

#### 4.2.1 岩浆侵入型地热系统

世界上大多数具备商业价值的地热区都是从更深层的熔岩(岩浆)区域获得热能的,在板块构造运动比较活跃的地区,比如板块交接处及其附近,板块之间相互作用导致板块张裂、地壳岩石重熔或深部地幔热物质上涌,形成了熔融岩浆<sup>[37]</sup>.岩浆活动过程中,除部分喷出地表形成火山外,大部分会沿构造薄弱带侵入到浅部地层或断裂系统中.同样,这种浅部的岩浆囊为地热的形成提供了高温附加热源.板块碰撞带附近,由于板块间的挤压、摩擦生热而会在局部形成类似的高温附加热源(局部熔融体)<sup>[38]</sup>.由于下伏岩浆的存在,热流较高,岩浆侵入型地热系统具有典型的高焓特征.

#### 4.2.2 深循环型地热系统

对于无特殊热源的中低温对流型地热系统,其热源性质可分为两种情况<sup>[39]</sup>: 1)与深部无联系通道,以正常或偏高的大地热流作为其主要的热量来源,地下水经历长时间的深部循环,过程中不断被围岩加热,充分吸收围岩的热量,热水温度受循环深度控制<sup>[40]</sup>;

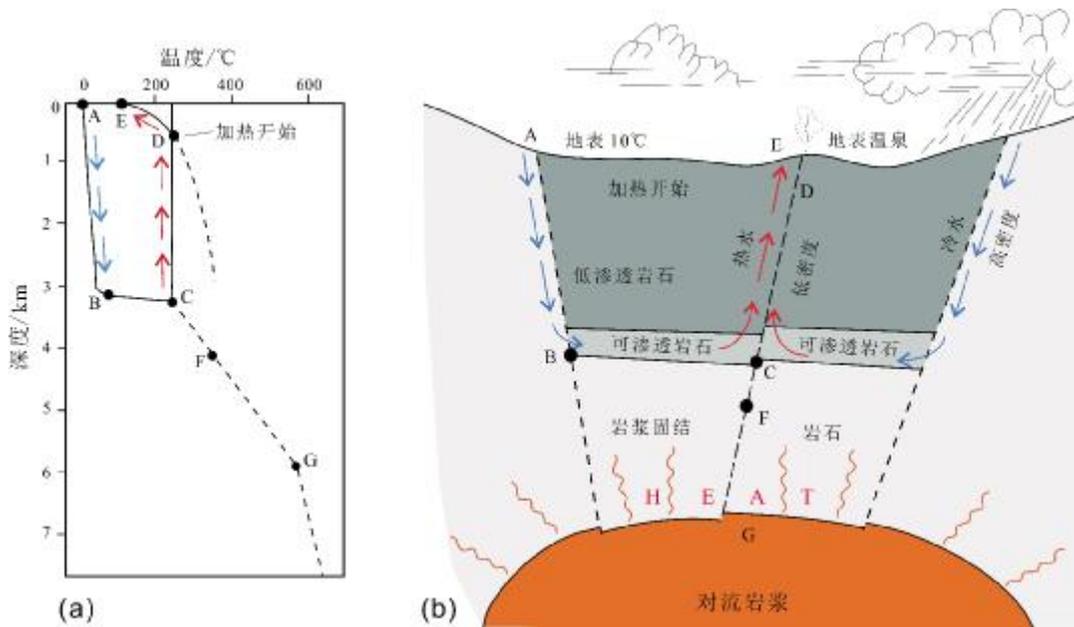


图 4 对流地热系统模型  
(据文献[38]改编)

Fig. 4 Model of convective geothermal system  
(Modified from Reference [38])

2)与深部有联系通道,深部流体混入对地下水起加热作用。

深循环型地热系统下部不存在附加高温热源,主要是由地表冷水沿深大断裂入渗,经循环加热后上涌(热对流),并在上升和出露的地方形成中地温对流型地热资源。其中热储为沿断裂带展布的裂隙型带状储层。White<sup>[41]</sup>曾提出深循环型地热系统的形成模式:在正常或较高的区域热背景下,周边隆起区的大气降水经裂隙网络或断裂破碎带下渗,在水头差驱动下向深部径流,基底热流值逐渐增大,地下水不断从围岩中汲取热量形成地热水,后因密度差上升至地表,在适当的构造部位(一般为两组断裂交汇处)出露形成温泉或间歇泉。

## 5 结论与认识

通过对地热系统概念、分类、特征及主控因素等方面进行研究,获得了如下的认识和结论。

1) 地热系统是能形成地热田各个要素的有机结合,在概念上区别于地热田,是相对独立的单元,主要组成要素为热源、渗透性地层和流体。

2) 地热系统形成的主控因素包括热源、断裂和裂隙的发育以及一定埋深的大规模优质储层,其中充足的热源是形成大规模地热资源的首要控制因素。

3) 地热系统可分为传导型和对流型两大类型,可进一步细分为沉积盆地型、地压型、干热岩型、岩浆侵入型和深循环型5个亚类。

## 参考文献(References):

- [1]苏逊卿.渭河盆地地热资源概况及应用研究[J].石化技术,2017,24(9):297.  
Su X Q. Survey and application of geothermal resources in Weihe Basin[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(9): 297. (in Chinese)
- [2]Miller A R, Densmore C D, Degens E T, et al. Hot brines and recent iron deposits in deeps of the Red Sea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1966, 30(3): 341-350, IN1, 351-359.
- [3]里巴克,米夫尔.地热系统:原理和典型地热系统分析[M].北京大学地质学系地热研究室,译.北京:地质出版社,1981:1-6.  
Rybach L, Miffler L J P. Geothermal systems principles and case histories[M]. Geothermal Research Office, Department of Geology, Peking University, trans. Beijing: Geological Publishing House, 1981: 1-6.
- [4]Hochstein M P. Classification and assessment of geothermal resources [C]//Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization. New York: UNITAR, 1990: 31-57.
- [5]宾德智.《地热资源地质勘查规范》GB/T 11615—2010 实施中应关注的一些问题[J].地热能,2011(3):29-32.  
Bin D Z. Some issues that should be paid attention to in the implementation of "Geothermal Resources Geological Prospecting Specification" GB/T11615-2010[J]. *Geothermal Energy*, 2011(3): 29-32. (in Chinese)
- [6]朱焕来.松辽盆地北部沉积盆地型地热资源研究[D].大庆:东北石油大学,2011.  
Zhu H L. Research on the sedimentary geothermal resources in North Songliao Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [7]汪集咏.地热学及其应用[M].北京:科学出版社,2015:1-6.  
Wang J Y. Geothermics and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-6.
- [8]White D E. Some principles of geyser activity, mainly from Steamboat Springs, Nevada[J]. *American Journal of Science*, 1967, 265(8): 641-684.
- [9]White D E. Characteristics of geothermal resources[C]//Kruger P, Otte C. *Geothermal Energy: Resources, Production, Stimulation*. Stanford, CA: Stanford University Press, 1973: 69-94.
- [10]Jones P H. Hydrology of Neogene deposits in the northern Gulf of Mexico basin[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 1968.
- [11]Wallace Jr R H, Kraemer T F, Taylor R E, et al. Assessment of onshore geopressured-geothermal resources in the northern Gulf of Mexico basin[J]. *Geological Survey Circular (United States)*, 1979, 726(790): 132-155.
- [12]Dickson M H, Fanelli M. What is geothermal energy? [R]. Pisa: Istituto di Geoscienze e Georisorse, 2004.
- [13]Potter R M, Robinson E S, Smith M C. Method of extracting heat from dry geothermal reservoirs: US, 3786858[P]. 1974-01-22.
- [14]EurOBserv'ER. Geothermal energy barometer[J]. *Systemes Solaires*, 2007, 39(23): 49-66.
- [15]黄尚瑶,胡素敏,马兰,等.火山·温泉·地热能[M].北京:地质出版社,1986:95-105.  
Huang S Y, Hu S M, Ma L, et al. Volcano, hot spring and geothermal energy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 95-105. (in Chinese)
- [16]陈墨香,汪集咏,邓孝.中国地热系统类型图及其简要说明[J].地质科学,1996,31(2):114-121.  
Chen M X, Wang J Y, Deng X. The map of geothermal system types in China and its brief explanation[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1996, 31(2): 114-121.
- [17]陈墨香,汪集咏,邓孝.中国地热资源——形成特点和潜力评估[M].北京:科学出版社,1994:1-39.  
Chen M X, Wang J Y, Deng X. Geothermal resources in China:

- Formation characteristics and potential evaluation [M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-39. (in Chinese)
- [18] Wisian K W, Blackwell D D. Numerical modeling of Basin and Range geothermal systems[J]. *Geothermics*, 2004, 33(6): 713-741.
- [19] Cherubini Y, Cacace M, Scheck-Wenderoth M, et al. Controls on the deep thermal field: implications from 3-D numerical simulations for the geothermal research site GroßSchönebeck [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(8): 3619-3642.
- [20] 陈鹏. 长白山松江河地区地热资源形成条件及主控因素[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- Chen P. The formation conditions and main controlling factors of geothermal resources in Songjianghe area of Changbai Mountain[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [21] 张英, 冯建赞, 何治亮, 等. 地热系统类型划分与主控因素分析[J]. *地学前缘*, 2017, 24(3): 190-198.
- Zhang Y, Feng J Y, He Z L, et al. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 190-198.
- [22] 林正良, 肖鹏飞, 李弘, 等. 甘孜地区雅拉河段地热系统特征及控制因素[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(4): 764-771.
- Lin Z L, Xiao P F, Li H, et al. Characteristics of the geothermal system and control factors in the Yalaha Reach, Ganzi Area [J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(4): 764-771.
- [23] 甘军, 吴迪, 张迎朝, 等. 琼东南盆地现今地层温度分布特征及油气地质意义[J]. *高校地质学报*, 2019, 25(6): 952-960.
- Gan J, Wu D, Zhang Y C, et al. Distribution Pattern of present-day formation temperature in the Qiongdongnan Basin: implications for hydrocarbon generation and preservation [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019, 25(6): 952-960.
- [24] Muffler L J P. Tectonic and hydrologic control on the nature and distribution of geothermal resources [C]//Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. San Franico, 1976: 499-507.
- [25] Zarrouk S J, Moore T. Preliminary assessment of the geothermal signature and ECBM potential of the Huntly Coalbed methane field, New Zealand [C]//Proceedings of the 29th NZ Geothermal Workshop. Auckland, New Zealand, 2007.
- [26] 季汉成, 李海泉, 陈亮, 等. 南襄盆地地热系统构成及资源量预测: 以泌阳-南阳凹陷为例[J]. *地学前缘*, 2017, 24(3): 199-209.
- Ji H C, Li H Q, Chen L, et al. Composition and resource prediction of the Nanxiang Basin geothermal system: a case study, from the Biyang and Nanyang Sags[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 199-209.
- [27] 彭大钧. 地压地热资源[J]. *成都地质学院学报*, 1981(1): 86-97.
- Peng D J. Geopressure geothermal resources [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 1981(1): 86-97. (in Chinese)
- [28] Bitzer K. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation: discussion[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(5): 798-799.
- [29] 王连进, 叶加仁. 沉积盆地超压形成机制述评[J]. *石油与天然气地质*, 2001, 22(1): 17-20.
- Wang L J, Ye J R. A comment on forming mechanism of overpressure in sedimentary basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22(1): 17-20.
- [30] 李正, 贾海平, 张阳, 等. 渭河盆地地热资源类型[J]. *承德石油高等专科学校学报*, 2017, 19(4): 1-5.
- Li Z, Jia H P, Zhang Y, et al. Types of geothermal resources in Weihe Basin [J]. *Journal of Chengde Petroleum College*, 2017, 19(4): 1-5.
- [31] Tester J W, Anderson B J, Batchelor A S, et al. The future of geothermal energy [D]. Stanford, CA: Stanford University, 2013.
- [32] 汪集咏. 中低温对流型地热系统 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-240.
- Wang J Y. Low-Medium temperature geothermal system of convective type [M]. Beijing: Science Press, 1993: 1-240.
- [33] 张金华, 魏伟, 杜东, 等. 地热资源的开发利用及可持续发展[J]. *中外能源*, 2013, 18(1): 30-35.
- Zhang J H, Wei W, Du D, et al. The development, utilization and sustainable development of geothermal resources [J]. *Sino-Global Energy*, 2013, 18(1): 30-35.
- [34] 汪集咏, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 25-31.
- Wang J Y, Hu S B, Pang Z H, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 25-31.
- [35] Zarrouk S J, McLean K. Geothermal systems [M]//Zarrouk S J, McLean K. Geothermal Well Test Analysis: Fundamentals, Applications and Advanced Techniques. New York: Academic Press, 2019: 13-38.
- [36] White D E. Characteristics of geothermal resources [J]. *EOS, Trans Am Geophys Union*, 1973, 54: 4(4): 223-224.
- [37] 伍小雄. 松辽盆地北部干热岩地热资源研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
- Wu X X. Research of geothermal resources on dry hot rocks in North Songliao Basin [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [38] 李朋威, 何治亮, 张英, 等. 我国水热型地热系统类型与形成机理浅析 [C]//2014 年博士后学术论坛——油气成藏理论与勘探开发技术论文集. 北京: 中国石化石油勘探开发研究院, 中国石化石油工程技术研究院, 2014: 193-203.

- discrete element method[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(12): 8153–8168.
- [9]刘春, 范宣梅, 朱晨光, 等. 三维大规模滑坡离散元建模与模拟研究——以茂县新磨村滑坡为例[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1362–1370.
- Liu C, Fan X M, Zhu C G, et al. Discrete element modeling and simulation of 3-dimensional large-scale landslide-taking Xinmocu landslide as an example[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1362–1370.
- [10]杨海龙, 樊晓一, 裴向军. 基于离散元法的偏转型滑坡运动堆积特征分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(2): 106–111, 118.
- Yang H L, Fan X Y, Pei X J. DEM-based analysis of movement and accumulation characteristics of turning-type landslide[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(2): 106–111, 118.
- [11]李凯. 陕西山阳县中村钒矿区滑坡形成机理及早期识别研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- Li K. Study on formation mechanism and early identification of landslide in Zhongcun vanadium mine of Shanyang County, Shaanxi Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [12]苏艳军. 山阳-高南钒矿带矿区斜坡破坏机理分析及地质灾害危险性评价[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- Su Y J. Geological disaster hazard assessments and analysis of slope failure mechanism on Shanyang-Shangnan vanadium mine belt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [13]Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47–65.
- [14]谢莉, 李渝生, 曹建军, 等. 澜沧江某水电站右坝肩岩体倾倒变形的数值模拟[J]. *中国地质*, 2009, 36(4): 907–914.
- Xie L, Li Y S, Cao J J, et al. Numerical simulation of toppling rock mass deformation in the right dam abutment of a hydropower station on the Lancang River[J]. *Geology in China*, 2009, 36(4): 907–914.
- [15]Goldenberg C, Goldhirsch I. Friction enhances elasticity in granular solids[J]. *Nature*, 2005, 435(7039): 188–191.
- [16]李祥龙, 唐辉明, 熊承仁, 等. 岩石碎屑流运移堆积过程数值模拟[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(2): 168–175.
- Li X L, Tang H M, Xiong C R, et al. Numerical simulation of flow and deposition process of rock avalanche[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(2): 168–175.
- [17]施凤根. 基于 PFC3D 的文家沟滑坡高速远程运动学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- Shi F G. The study of rapid and long-runout characteristics of Wenjiagou landslide based on PFC3D[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [18]刘春. 地质与岩土工程矩阵离散元分析[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 5–7.
- Liu C. Matrix discrete element analysis of geology and geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2019: 5–7.
- [19]Liu C, Xu Q, Shi B, et al. Mechanical properties and energy conversion of 3D close-packed lattice model for brittle rocks[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 103: 12–20.
- [20]周喻, 王莉, 丁剑锋, 等. 多尺度节理岩体力学特性的颗粒流分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(7): 2085–2095, 2127.
- Zhou Y, Wang L, Ding J F, et al. Particle flow code analysis of multi-scale jointed rock mass based upon equivalent rock mass technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(7): 2085–2095, 2127.
- [21]胡晓波, 樊晓一, 唐俊杰. 基于离散元的高速远程滑坡运动堆积特征及能量转化研究——以三溪村滑坡为例[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(4): 527–535.
- Hu X B, Fan X Y, Tang J J. Accumulation characteristics and energy conversion of high-speed and long-distance landslide on the basis of Dem: a case study of Sanxicun landslide[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(4): 527–535.

(上接第 213 页/Continued from Page 213)

- Li P W, He Z L, Zhang Y, et al. Types and distribution of the hydro-geothermal systems in China[C]//2014 Postdoctoral Academic Forum: Oil and Gas Reservoir Formation Theory and Exploration-Development Technology. Beijing: Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, 2014: 193–203. (in Chinese)
- [39]汪啸. 广东沿海典型深大断裂带地热水系统形成条件及水文地球化学特征[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- Wang X. Formation conditions and hydrogeochemical characteristics of the geothermal water in Typical Coastal Geothermal field with Deep faults, Guangdong Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [40]廖志杰. 促进中低温对流型地热资源的开发利用[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 80.
- Liao Z J. Promote the development and utilization of medium and low temperature convective geothermal resources[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 80. (in Chinese)
- [41]White D E. Hydrology, activity, and heat flow of the Steamboat Springs thermal system, Washoe County, Nevada[R]. Washington, D.C.: United States Government Printing Office, 1968: 1–116.