https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.144



# 大数据时代的地热学研究思考及展望

旷健1,祁士华1\*,蒋恕2,姚宏3

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北武汉 430078

2. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

3. 中国地质大学计算机学院,湖北武汉 430078

 摘 要:大数据时代带来产业、思想和科学的革命,数据的融合、归纳、科学发现等对地热学的发展带来了机遇和挑战.
 地热学作为一门多学科交叉融合学科,涉及到地球科学的方方面面,其在大数据时代下的发展也面临着诸多挑战.本 文依据时间序列将地热学划分为当代地热学和历史地热学两部分,从中国乃至全球热流分布、水化学参数、地热潜力 评价体系3个方面对当代地热学涉及的地球热结构及相关能源灾害问题,以及从深时地球热体制变化、构造演化、气 候环境能源效应3个方面对历史地热学涉及的热时空变化、演变及资源形成分别阐述了大数据引入的前瞻性和可行 性.未来地热学的发展一方面应注重地热学框架和要素的搭建及相关科学联系解译和科学发现工作,另一方面则应注 重地热学知识图谱构建,多学科知识融合解译,继而重建深时地球热状态及其所反映的物理化学过程.
 关键词:大数据;地热学;科学前沿;深时地球;学科发展;地热勘查.
 中图分类号: P314;P547
 文章编号: 1000-2383(2023)09-3504-14
 收稿日期:2021-07-12

# Thinkings and Prospects for the Research on Geothermics in the Big Data Era

Kuang Jian<sup>1</sup>, Qi Shihua<sup>1\*</sup>, Jiang Shu<sup>2</sup>, Yao Hong<sup>3</sup>

 State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: The era of big data drives the revolution of industry, thoughts, and science. The integration, induction, and scientific discovery of data bring opportunities and challenges to the development of geothermics. As a multi-disciplinary or interdisciplinary subject, geothermics involves all aspects of earth science, which poses challenges to the extremely complex and difficult development of geothermics based on time. First, we analyze the geothermal structure and related energy/disasters from three aspects of heat flow distribution in China and the world, hydrochemical parameters, and geothermal potential evaluation system. Second, we discuss the temporal and spatial changes of heat, the tectonic evolution, and the effect of climate, environment, and energy from three aspects of temporal and spatial variation, evolution, and resource formation of heat in historical geothermics. All these efforts aim to expound the foresight and feasibility of big data introduction, respectively. In the future, the development of geothermics should focus on the construction of the framework and elements of geothermics, the interpretation of related scientific links,

引用格式;旷健,祁士华,蒋恕,姚宏,2023.大数据时代的地热学研究思考及展望.地球科学,48(9):3504-3517.

**Citation**: Kuang Jian, Qi Shihua, Jiang Shu, Yao Hong, 2023. Thinkings and Prospects for the Research on Geothermics in the Big Data Era. *Earth Science*, 48(9):3504-3517.

基金项目:中国地质大学(武汉)DDE专项经费(No. G1323520325).

作者简介:旷健(1995-),男,博士研究生,主要从事地热学研究.ORCID:0000-0002-3783-7790.E-mail:kuangjian@cug.edu.cn

<sup>\*</sup> 通讯作者:祁士华, E-mail: shihuaqi@cug. edu. cn

and discovery. Meanwhile, it should focus on the construction of the knowledge graph of geothermics, the integration, interpretation, and discovery of multi-disciplinary knowledge, and the reconstruction of the deep-time geothermal state and physical and the chemical processes reflected.

Key words: big data; geothermics; scientific frontier; deep-time earth; discipline development; geothermal prospecting.

## 0 引言

近十年来,随着互联网、物联网和云计算等 信息技术取得重大突破并实现飞跃式发展,新一 轮科技革命与产业变革带来了海量的交易数据、 交互数据与传感数据,并产生了以深度学习为基 础的第二代人工智能处理大数据方式或平台(孙 志军等,2012).大数据带来的信息风暴不仅正在 变革人类的生活、工作和思维方式,而且大数据 开启了一次重大的科学研究转型,科学研究范式 从实验归纳、模型推演、仿真模拟逐步进入到 大数据驱动下的科学发现(Hey *et al.*,2009).

地热学是关于地球科学基础理论研究的学科, 一方面探索地球内热的时空分布、形成演变、传输 聚散,另一方面研究地热资源的"生储盖"机制及相 关勘探开发方法和途径.可从时间(t)序列划分为当 代地热学(t=0)和历史地热学(0<t<4.55 Ga).对 于当代地热学,其研究内容包括活动构造及周缘的 火山地热学,局部乃至全球地热场特点、壳幔热状 态、岩石圈热结构,及其反映的地质地球物理过程 和以可再生能源开发利用为目标导向的地热能资 源的赋存机制、探勘方法研究(陈墨香和汪集旸, 1994; 陈墨香等, 1995; 汪新伟等, 2022). 当代地热 学研究,不仅有助于一些重大基础地质理论问题的 解决,还在能源结构转型、人居环境改善、全球碳中 和等多个方面有极大助益.对于历史地热学,地球 从形成初期到现在经历了一个相对短期的增温和 长期的冷却过程,地幔温度在3.0 Ga左右到达峰值 (>1 600 ℃)后持续降温至现今的1 300 ℃左右 (Herzberg et al., 2010),地球构造和热体制的变化 驱动板块启动、现代板块构造形成、地球圈层形成 演化等(Cawood, 2020).历史地热学研究,对于认 识地球化学物理过程,生命形成演化灭绝、圈层演 化及成矿成藏作用等具有重要意义.目前地热学研 究还处于数据生产并观测数据的内在联系或规律 阶段,是典型的数据驱动、数据密集型科学,其具有 数据量大却混杂的特点,并面临机理缺乏的时空统 计分析挑战.引入具有众多潜在优势的大数据,在 复杂、不确定性、非结构化的数据中进行科学发现 工作,这将极大推动地热学的发展,有助于取得新 认识、新理论和创新性应用成果.本文根据团队近 两年来在"深时数字地球"国际大科学计划的工作内 容,从当代地热学和历史地热学多个研究方向及 示例,并结合大数据方法,阐述和讨论面向地热学 大数据分析的作用、关键科学问题及前沿方向.

# 1 当代地热学

当代地热学作为地质构造背景、壳幔分 布、岩石放射性生热、岩石圈热结构、岩石圈地 质结构构造、流体迁移转化、地热资源赋存勘 探开发和相关地质地球物理地球化学过程等 研究的集合体,具有众多重要研究方向,本文 仅以大地热流值分布、热水分布和水化学数 据、地热潜力综合评价体系作为示例重点论述 大数据分析在当代地热学研究中的作用.

#### 1.1 全球大地热流和中国大地热流分布

大地热流作为单位面积、单位时间内由地 球内部传输至地表的热参数,是地球深部物理 化学过程和能量平衡的信息及热状态在地表的 综合量化表征,作为窥探地球内热的窗口,它 是指示壳幔结构、地球动力学、地球热收支的 关键约束参数(Furlong and Chapman, 2013).

自 Birch (1954)首次完成全球热流汇编以来, 全球热流测点数逐步提升,目前全球热流测点数接 近 70 000个,包含 39 901个大陆热流测点和 29 323 个海洋热流测点,揭示的全球大陆平均热流为 67 mW/m<sup>2</sup>,全球年轻海床平均热流为 92 mW/m<sup>2</sup>, 全球古老海床平均热流为 79 mW/m<sup>2</sup>(Lucazeau, 2019).尽管全球热流测点分布不均,同时在中非、中 东、南美、喜马拉雅山周缘、北冰洋、中南太平洋、南 极洲等地区数据量少,但全球热流分布基本反映了 热流值对板块构造、区域热事件和岩石圈热结构的 响应(图1).全球热流高值区主体分布在大洋中脊 区,并且远离大洋中脊地区,热流值逐渐降低,显示 出与洋壳年龄极强的负相关关系.其余高值分布在 年轻造山带和裂谷等构造活跃地区,如喜马拉雅造







Fig.2 Distribution of heat flow measuring points in China 图中数据来源 Jiang *et al.* (2019);底图改自中国标准地图GS(2019)1824号

山带,东非大裂谷地区和环太平洋俯冲带等.全球 热流低值区主体分布在前寒武克拉通等地质构造 稳定地区,如北美、印度南部、南非、南美、北欧、 西伯利亚等地区.然而,板内火山活动、热点或地 幔柱的活动导致稳定板内出现局部高热流值, 如夏威夷群岛和北美克拉通中的黄石公园.

中国自1979年正式公布我国陆区第一批大 地热流数据以来,先后共4次汇编并公开发表了 1230个陆区大地热流数据,揭示中国大陆平均 热流为61.5 mW/m<sup>2</sup>(姜光政等,2016;Jiang et al.,2019).尽管内蒙古、西南地区、青藏地区数 据较少,但中国热流分布同样反映了热流值对板 块构造、区域热事件和岩石圈热结构的响应(图1 和图2).受控于太平洋板块俯冲和印度-欧亚板 块碰撞,东北-东南沿海一线、雅鲁藏布江缝合 带、青藏地区南北展布裂谷带显示高热流特 征.低热流地区主要分布于塔里木克拉通、华 北克拉通核部及扬子克拉通等构造稳定地区.

全球或局部地质构造区的热流分布与该区 岩石圈热结构和圈层结构密不可分,较大数据 量的热流数据空间分布特征可以很好反映全球 或局部地区的构造岩浆作用、壳幔结构、岩石 圈热结构热状态等地球深部信息.未来需加强 热流数据实测工作,精细化地球热流特征,分 析热流数据影响因素/参数,通过这些参数建 立大数据从而进行热流分析.这不仅有助于认 识地球深部地质构造,还为近来大热的地热能 勘探开发利用提供基础研究信息和思路方法.

#### 1.2 地表热水分布和水化学数据

地表热水(包含温泉、热泉和沸泉)作为直接的 地热地表显示,它们的空间分布对于认识区域地质 构造、壳幔热状态和热结构、地热能勘探开发等具 有重要意义.以中国地表热水分布分析为例,中国 地表热水数据量>2200个,主要分布在东南和西南 地区(图3).而自新生代以来,我国分布着当今世界 最为活跃的板块边界中的两条(李春峰等,2021), 即东南地区受到了菲律宾海板块的碰撞并在台湾 岛形成碰撞边界,西南地区印度洋板块和欧亚板块 碰撞形成雅鲁藏布江缝合带,它们具有强烈的水热 活动并具备了高温水热系统必要的地质构造条件



Fig.3 Distribution of hot spring in China 图修改自陈墨香 (1992)、Jiang et al. (2019);底图改自中国标准地图 GS(2016)1603和GS(2016)1608



Fig.4 Hydrochemical data of typical magmatic high temperature geothermal systems in Costa Rica (a), Indonesia (b), New Zealand (c) and Yangbajing of China (d)

图 a 数据量 N=98,数据来源 Giggenbach and Soto (1992)、Gherardi *et al.* (2002)、Marini *et al.* (2003)、Molina and Martí (2016);图 b 数据量 N=8,数据来源 Hochstein and Sudarman (1993);图 c 数据量 N=69,数据来源 Giggenbach *et al.* (1994)、Glover and Mroczek (2009);图 d 数据 量 N=33,数据来源 Guo *et al.* (2008)、Zhang *et al.* (2015)

和热背景(陈墨香,1992).同时,中国热水活动强度 与板块边界距离大小呈反比,这种分布特征在青藏 高原地区尤为明显,热水活动强度自碰撞带向北或 向东逐渐减弱.此外,东南沿海地区分布有大面积 中生代高产热花岗岩和大量断裂带决定了该区地 热资源极为丰富(Kuang et al., 2020; 旷健等, 2020).在世界范围,全球热水大量集中分布于大洋 中脊环境的冰岛和圣安德列斯断层等地区、阿尔 卑斯造山带区域的意大利等地区、洋陆碰撞带的 印尼和日本等地区、大陆裂谷环境的肯尼亚等地 区、洋洋碰撞带的新西兰等地区、地幔柱(热点) 构造的美国黄石公园等地区(Barbier, 2002).以 上都说明热水的空间分布特征可用于指示局部 或区域壳幔热结构及地质构造情况,由此在大 区域乃至全球范围内精细化统计热水的分布 特征,可以极大助益认识地球热构造演化、 壳幔热状态,并推动地热能勘探开发利用.

同时,地热水的化学组分同样可作为特定地热 系统的指示物.笔者统计了全球4个典型的岩浆型 高温地热系统:哥斯达黎加、新西兰、印度尼西亚、 中国羊八井,共计198件水化学数据.数据显示岩浆 热源的高温地热系统深部同围岩达到水-岩相互作 用平衡的母地热流体通常为Cl-Na型水,氯含量高 达10 000 mg/L,钠含量高,钙相对较低,镁含量极 低,pH值接近中性或弱碱性(图4).当大量的火山 气体(主要为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>S)溶解于深部的Cl<sup>-</sup>型地热 水,如美国黄石公园,日本东北部火山区,哥斯达黎 加火山区,印度尼西亚爪哇火山区等178件水化学 统计数据显示,蒸发作用以及氧化作用使地热流体 含有大量的SO42-,地热水的pH呈强酸性,Cl-Na型 水转变为酸性硫酸盐酸型水,pH通常小于2(图5). 但如果大量火山气体成分为CO2时,气体溶解于深 部的Cl<sup>-</sup>型地热水形成的地热水总体为中性--弱碱 性,这些情况在喜马拉雅地热带和埃塞尔比亚裂谷 带尤为明显(Gizaw, 1996; Tian et al., 2018, 2019). 因此统计并归纳全球典型地热田的水化学数据特 征,可形成全球不同地热系统水化学大数据库.通过 采集未知的地热勘探区水化学数据并在全球水化学 大数据库中进行比对,结合目标区域的地质背景情 况,可以初步获得勘探区的地热潜力,这不仅可以 改变现有以热找热的地热探勘手段,同时大数 据的介入可以节省大量的人力物力和财力.



图5 美国黄石公园、日本东北部火山区、哥斯达黎加火山区、印度尼西亚爪哇火山区等178件水化学数据 Fig.5 178 hydrochemical data were collected from Yellowstone Park, northeastern Japan, Costa Rica and Java, Indonesia 数据来源 Kiyosu (1985)、Lewis et al. (1997, 1998)、Takahashi et al. (2000)、Delmelle et al. (2000)、Nanlohy et al. (2001)、Marini et al. (2003)、Nordstrom et al. (2009)、Deng et al. (2011); a. 地热水中氯离子浓度和硫酸根浓度分别与地热水pH关系,显示出氯离子和钠离子分 离子与pH具有明显地负相关关系,pH值和lg(SO4<sup>2-</sup>)呈线性关系; b. 地热水中主要阴阳离子浓度关系,显示出氯离子和钠离子分 别是地热水中阴阳离子的主要组成部分

#### 1.3 地热潜力综合评价体系

地热能来源于地球内部放射性元素生热和熔 岩热,其潜力决定因素包括局部或区域地质构造、 壳幔结构、岩浆侵位、流体循环、勘探深浅、储层盖 层性质等,通常来说,评价地热潜力需要综合重力、 断裂、火山、地下水、地球化学、岩石学、温度、电阻、 构造背景、断层活动性、渗透率等参数,如何建立这 些参数之间的联系并依据参数评价地热潜力一直 是地热勘探的热点和难题,而大数据的介入则可以 很好解决该问题,尽管目前全球范围内仅刚开始利 用大数据进行有利勘探区带预测,正如笔者前期工 作阐述的那样(详见蒋恕等,2020),美国多家机构 根据切实情况集成不同地热潜力评价参数建立了 多个基于大数据的地热勘探软件或评价方法并取 得突出成效.将积累的大量地质、地球物理、地球化 学、构造、岩石力学、岩石物理、水文资料、测温资 料、地质温度计等数据首先进行数据结构和格式 统一,随之可以被综合起来预测潜在的地热勘探 区,这在将来是一项极有潜力的发展方向。

# 2 历史地热学

## 2.1 构造和热体制的变化

地质历史时期,拥有较高地幔温度的早期地球发育热管、滴状构造(Moore and Webb, 2013; Gunawardana et al., 2020)等,形成一系列太古宙特有的地质特征.而后地球经历长期冷却,生命出现,地 幔粘性降低和岩石圈刚性增加(Zhong et al., 2007; Rolf et al., 2012), 岩石类型逐渐由以镁铁质岩石为 主转变为以长英质岩石为主(Tang et al., 2016),并 伴随岩石地球化学组分及同位素的变化, 壳幔圈层 由非均匀的停滞盖构造向全球移动盖构造转变 (Cawood, 2020). 板块构造的出现及其随后的演化 对地球的冷却历史具有一级影响, 然而在大多数 构造情景中能量都得不到很好地限制, 而能量对 地球热演化中隐藏的合理机制有很强的约束性 (Korenaga, 2008, 2013). 尽管在所有的情况下, 地球的构造驱动力来自于内部热状态的不平衡, 但 板块构造的形式可能有所不同, 特别是在地球的不 同地区可能有所差异, 在深时(0≪t≪4.55 Ga)中 随着多个超大陆的拼合和裂解也会不尽相似.

在地质历史时期,长期冷却和大规模板块构造体制转换的主要制约因素来自岩石或矿物.如Weller and St-Onge(2017)通过统计215个变质岩的压力(P)-温度(T)-时间(t)结果,识别出了高压低温榴辉岩并以此认为现代型板块构造系统至少在1830 Ma已经存在(图6).同样的,Brown and John-son (2019)统计了564个地区变质岩T、P和T/P比值,时间从太古宙跨越至新生代(图7)并把T/P划分为高中低3类,并以此识别了地质历史时期多期碰撞造山、伸展构造、大陆岩石圈俯冲以及全球动力学机制的重大变化,如至少在古元古代出现了现代型板块构造系统.Holder et al. (2019)采用混合-高斯分布等统计学方法重新甄选了Brown and Johnson (2019)搜集的数据,发现"双峰式"变



0 ↓ 2 3 b b f l(Ga) 图 6 全球变质岩变质 T/P 随时间变化图(改自 Weller and St-Onge, 2017)

Fig. 6 Time-dependent change of T/P of global metamorphic rocks (modified by Weller and St-Onge, 2017)



图7 全球变质岩变质高中低 T/P 随时间变化(改自 Brown and Johnson, 2019) Fig.7 Time-dependent change of high, medium, low T/P of global metamorphic rocks (modified by Brown and Johnson, 2019)

质作用的趋势在约2500 Ma的新太古代开始初 现端倪,随后双峰距离变得更宽、更明显(图8), 并由此提出现代型板块构造系统始于新太古代.

尽管已有学者从大量收集的P-T-t数据入手对 地质历史时期地球热状态进行解译,但目前研究大 多数着眼于时间尺度,却忽略了空间尺度,即同一 时间尺度的P-T-t可能并不一定是同一构造事件的 产物,这会带来片面解读.同样,目前的数据库和 文献资料并没有囊括全球深时各个热事件的各类 数据,这一点同样制约了对地质历史时期地球热状 态的解读,这也为大数据的引入提供了极大机遇.

## 2.2 重建地质历史时期构造

在 1.1 章节中, 笔者阐述了热流分布可用

于反映全球或局部地区的构造岩浆作用、壳 幔结构、岩石圈热结构热状态等地球深部信息,此思路同样可用于重建地质历史时期构 造热事件,即可通过地质历史时期热流值反 演重建地质历史时期构造热事件.

岩石作为地质历史时期各类事件的记录者,不同岩石及岩石化学组分具有不同的形成条件(包括温度、压力、氧逸度、含水量、深度等),由此地质历史时期热流值的获取可以转为岩石形成过程中热参数(或称温压条件)的获取.在过去的半个世纪,获取地质历史时期岩石形成时的温压条件的方式不断得到发展改进,由此衍生出众多方法,大致可分为以下3种类型:一种类型是通过岩石地球化学

2 000

1 600

1 200

800

400

热梯度(°C/GPa)





组分反演原始岩浆成分指示形成时的温度和压力, 如基于热力学模拟岩浆相平衡的MELTS软件;一 种类型是通过实验室资料直接标定的矿物对或组 合温压计获取,如石榴石-单斜辉石温压计等传统 温压计;还有一种类型是通过内部一致性热力学数 据库求解共生矿物组合中相组分之间的独立变质 作用,从而得到岩石温压条件,如用于变质岩成岩 条件计算的Thermocal软件.各类方法的发展以及 相关地质构造解释的需求使得地质历史时期热参 数数据库得到了极大扩充.若在进行热参数数据库 结构化整理、数据可视化、数据发现等工作时引入具 有强大优势的大数据协作,这对重建地质历史时期 构造演化具有重要作用.笔者以一个示例作为重 建地质历史时期构造工作引入大数据的展望.

喜马拉雅造山带作为新生代以来最为活跃地

区之一,它是由新生代印度板块与欧亚大陆碰撞形 成(图9).该造山带热流总体沿造山带呈带状分布 (Lucazeau, 2019),这种特征同样表现在具有不同 温压比的新生代变质岩的分布上.图9a中,高*T/P* (>775℃/GPa)、中*T/P*(介于775~375℃/GPa)、 低*T/P*(<375℃/GPa)都呈现出与造山带耦合的分 布特征.虽然目前这些变质岩数据是在已知地区采 集,但假设喜马拉雅造山带的存在是未知的,继而 根据变质岩温压分布特征推测地质历史时期喜马 拉雅地区为构造活跃地区,同时带状分布的岩石温 压特征揭示该区可能为裂谷或造山带,随之结合地 质地球化学等手段可以重建该区地质历史时期构 造演化.拓展到深时地球,当数据量足以支撑 刻画出地质历史时期不同板片的温压亦或是 热流分布图,地质历史时期热的分布特征将





a. 新生代变质岩岩石变质温压比,数据源于Brown and Johnson (2019);黑色实线为全球板块边界,数据源于Bird (2003);b. 70 Ma印度大陆 北漂示意,改自 van Hinsbergen *et al.*(2021)

成为继古生物化石、沉积物、地层资料,古气候、古地理、古地磁等手段重建古大陆及相关构造(如 Merdith *et al.*, 2021)的又一利器.

#### 2.3 气候、岩浆活动、环境和能源资源效应

地球的多圈层结构及物质循环,在漫长地质历 史中存在不同的演化过程,其核心驱动力为地球内 热,而地球中热如何与构造、沉积、地化、生物、气 候等协同演化,至今是热点问题也是难点问题.

地球的每一次大型热事件都伴随着相关圈层 变化,如二叠纪末期全球范围内的大面积火山喷 发,随之大气圈和生物圈受其影响,这可能是地球 已知最大灭绝事件的诱因(Ganino and Arndt, 2009);中生代俯冲作用导致的大面积岩浆侵位,造 成地壳抬升剥蚀释放出大量CO<sub>2</sub>,导致全球平均气 温较现今升高至少10℃(Johnston et al.,2011).对 于金属矿床,其基本是构造岩浆热事件的产物,如 中生代岩浆侵位热事件塑造了中国中南部密集的 金属成矿带(毛景文等,2008),全球斑岩型铜矿 主要为俯冲/造山带岩浆活动中的岩浆结晶与流 体析出和沉淀所形成,并主要分布于构造活动强 烈的环太平洋、特提斯和中亚俯冲/造山带(图 10),作为全球重要铁矿石来源的条带状铁建造的 形成可能与太古代-元古代全球大规模的陆壳增 生事件相关(张连昌等,2012).同样,区域热事件 提供的热促进沉积岩中有机质向烃类等物质转 换,继而形成油气藏(任战利等,2020).

理解并解译深时地热与气候、环境、能源 资源效应关系及相关协同演化问题,需要从



Fig.10 Distribution of porphyry copper deposits in the world

红点为斑岩型铜矿,数据源于 Mutschler et al. (2000);黑色实线为全球板块边界,数据源于 Bird (2003);大部分斑岩矿床分布在3个成矿域内,即环太平洋、特提斯和中亚成矿域



图 11 大数据下地热学领域研究框架结构 Fig.11 The framework structure of research in the geothermic with big data

地球系统科学方面来考虑.而对于系统科学, 通过综合多学科密集数据,建立起结构化数 据库,借助人工智能、机器学习、模式识别、统 计学、数据库、可视化技术等,大数据可以完 美发挥其优点,并作出归纳性的推理,从中挖 掘出潜在的模式和联系或进行科学发现.

## 3 展望

一方面大数据是一种思维和认知革命,开启了 科学研究的一次重大时代转型,因果关系不再是研 究的重要前提.通过系统梳理地热学领域内的多学 科数据组合可以获得地热学的框架和要素(图11), 同时对框架和要素之间的联系进行大数据挖 掘和科学发现工作(如地热潜力综合评价系



统)是未来的热点方向(图12).

另一方面,以地热领域内海量的文本、图片、表 格等非结构化资料本身作为数据.通过现有人工 智能和机器学习等技术方法,基于关键词或文本属 性进行标注,继而在有监督/无监督/人工干预等手 段下进行实体对象抽取建立与实体之间的联系;对 同一来源数据属性进行标注,建立文本或段落数据 的关联;对于含有地图组分的文献等资料,需要深 入分析并理解地图符号的地学意义,识别各类空间 关系,并与地学知识体系中的地学对象建立联系; 对于多数据源引起的歧义和冲突,领域专家可在回 路中进行指正修改,同时训练机器通过阅读上下文 来减小或消除歧义或冲突.总体目标是分离出地 热学各个实体,并建立实体与实体之间的联系,即 建立地热学知识图谱,继而重建深时地球热状态及 其所反映的物理化学过程(图12).当然,目前的地 热学研究还在起步阶段,并以单一数据源为主,对 于涉及到地热学领域及相关学科数据交叉融合 而形成的大数据的应用,还有很大的发展空间.

致谢:感谢两位审稿人的建设性意见.本研究 受益于深时数字地球国际大科学计划和中国地质 大学(武汉)DDE大团队.部分图件通过GMT 6.1.1 绘制(Wessel *et al.*, 2019)!

#### References

- Barbier, E., 2002. Geothermal Energy Technology and Current Status: An Overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6(1-2): 3-65. https://doi.org/ 10.1016/S1364-0321(02)00002-3
- Birch, F., 1954. The Present State of Geothermal Investigations. SEPM Journal of Sedimentary Research, 19(4): 645-659. https://doi.org/10.1306/d42696c5 - 2b26 -11d7-8648000102c1865d
- Bird, P., 2003. An Updated Digital Model of Plate Boundaries. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 4(3): 1027 - 1029. https://doi.org/10.1029/2001GC000252
- Brown, M., Johnson, T., 2019. Metamorphism and the Evolution of Subduction on Earth. American Mineralogist, 104(8): 1065-1082. https://doi. org/10.2138/am 2019-6956
- Cawood, P. A., 2020. Earth Matters: A Tempo to our Planet's Evolution. *Geology*, 48(5): 525-526. https://doi. org/10.1130/focus052020.1
- Chen, M. X., 1992. A New Map of Hot Springs in China and Its Explanation. *Chinese Journal of Geology*, 27(S1): 322-332 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. X., Wang, J. Y., 1994. Review and Prospect on Geothermal Studies in China. *Chinese Jour*nal of Geophysics, 37(S1): 320-338 (in Chinese

with English abstract).

- Chen, M. X., Wang, J. Y., Deng, X., 1995. Advance in Geothermics in China. *Earth Science*, 20(4): 367-372 (in Chinese with English abstract).
- Delmelle, P., Bernard, A., Kusakabe, M., et al., 2000. Geochemistry of the Magmatic-Hydrothermal System of Kawah Ijen Volcano, East Java, Indonesia. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 97(1-4): 31-53. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00158-4
- Deng, Y. M., Nordstrom, D. K., Blaine McCleskey, R., 2011. Fluoride Geochemistry of Thermal Waters in Yellowstone National Park: I. Aqueous Fluoride Speciation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(16): 4476– 4489. https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.05.028
- Furlong, K. P., Chapman, D. S., 2013. Heat Flow, Heat Generation, and the Thermal State of the Lithosphere. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 41: 385-410. https://doi.org/10.1146/annurev. earth.031208.100051
- Ganino, C., Arndt, N. T., 2009. Climate Changes Caused by Degassing of Sediments during the Emplacement of Large Igneous Provinces. *Geology*, 37(4): 323-326. https://doi.org/10.1130/g25325a.1
- Gherardi, F., Panichi, C., Yock, A., et al., 2002. Geochemistry of the Surface and Deep Fluids of the Miravalles Volcano Geothermal System (Costa Rica). *Geothermics*, 31(1): 91–128. https://doi. org/10.1016/ S0375-6505(01)00030-X
- Giggenbach, W., Sheppard, D., Robinson, B., et al., 1994.
  Geochemical Structure and Position of the Waiotapu Geothermal Field, New Zealand. *Geothermics*, 23(5–6): 599-644. https://doi.org/10.1016/0375-6505(94) 90022-1
- Giggenbach, W. F., Soto, R. C., 1992. Isotopic and Chemical Composition of Water and Steam Discharges from Volcanic-Magmatic-Hydrothermal Systems of the Guanacaste Geothermal Province, Costa Rica. *Applied Geochemistry*, 7(4): 309-332. https://doi. org/10.1016/ 0883-2927(92)90022-U
- Gizaw, B., 1996. The Origin of High Bicarbonate and Fluoride Concentrations in Waters of the Main Ethiopian Rift Valley, East African Rift System. *Journal of African Earth Sciences*, 22(4): 391-402. https://doi. org/ 10.1016/0899-5362(96)00029-2
- Glover, R. B., Mroczek, E. K., 2009. Chemical Changes in Natural Features and Well Discharges in Response to Production at Wairakei, New Zealand. *Geothermics*, 38 (1): 117-133. https://doi. org/10.1016/j. geother-

mics.2008.12.008

- Gunawardana, P. M., Morra, G., Chowdhury, P., et al., 2020. Calibrating the Yield Strength of Archean Lithosphere Based on the Volume of Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite Crust. *Frontiers in Earth Science*, 8: 548724. https://doi.org/10.3389/feart.2020.548724
- Guo, Q. H., Wang, Y. X., Liu, W., 2008. B, As, and F Contamination of River Water Due to Wastewater Discharge of the Yangbajing Geothermal Power Plant, Tibet, China. *Environmental Geology*, 56(1): 197-205. https://doi.org/10.1007/s00254-007-1155-2
- Herzberg, C., Condie, K., Korenaga, J., 2010. Thermal History of the Earth and Its Petrological Expression. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1-2): 79-88. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.01.022
- Hey, T., Tansley, S., Tolle, K., 2009. The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery. Microsoft Research, Redmond.
- van Hinsbergen, D. J. J., Steinberger, B., Guilmette, C., et al., 2021. A Record of Plume-Induced Plate Rotation Triggering Subduction Initiation. *Nature Geosci*ence, 14(8): 626-630. https://doi. org/10.1038/ s41561-021-00780-7
- Hochstein, M. P., Sudarman, S., 1993. Geothermal Resources of Sumatra. *Geothermics*, 22(3): 181-200. https://doi.org/10.1016/0375-6505(93)90042-L
- Holder, R. M., Viete, D. R., Brown, M., et al., 2019. Metamorphism and the Evolution of Plate Tectonics. *Nature*, 572(7769): 378-381. https://doi.org/10.1038/ s41586-019-1462-2
- Jiang, G. Z., Gao, P., Rao, S., et al., 2016. Compilation of Heat Flow Data in the Continental Area of China (4<sup>th</sup> Edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892-2910 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, G. Z., Hu, S. B., Shi, Y. Z., et al., 2019. Terrestrial Heat Flow of Continental China: Updated Dataset and Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 753: 36-48. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.01.006
- Jiang, S., Wang, S., Qi, S. H., et al., 2020. Recent Advances in the Data-Driven Play Fairway Analysis for Geothermal Exploration. *Geological Journal of China Universities*, 26(1): 111-120 (in Chinese with English abstract).
- Johnston, F. K. B., Turchyn, A. V., Edmonds, M., 2011. Decarbonation Efficiency in Subduction Zones: Implications for Warm Cretaceous Climates. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(1-2): 143-152. https://doi. org/10.1016/j.epsl.2010.12.049

- Kiyosu, Y., 1985. Isotopic Composition of Acid Sulfate -Chloride Waters and Volcanic Steam from some Volcanoes in Northeastern Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 26(1-2): 25-36. https://doi. org/10.1016/0377-0273(85)90045-9
- Korenaga, J., 2008. Urey Ratio and the Structure and Evolution of Earth's Mantle. *Reviews of Geophysics*, 46(2): RG2007. https://doi.org/10.1029/2007RG000241
- Korenaga, J., 2013. Initiation and Evolution of Plate Tectonics on Earth: Theories and Observations. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 41: 117-151. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124208
- Kuang, J., Qi, S. H., Wang, S., et al., 2020. Granite Intrusion in Huizhou, Guangdong Province and Its Geothermal Implications. *Earth Science*, 45(4): 1466-1480 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, J., Wang, S., Qi, S. H., et al., 2020. Cenozoic Tectonic Evolution of South China: A Brief Review, and New Insights from the Huangshadong - Shiba Area, South-East China. *Geological Journal*, 55(12): 7716-7737. https://doi.org/10.1002/gj.3870
- Lewis, A. J., Palmer, M. R., Sturchio, N. C., et al., 1997. The Rare Earth Element Geochemistry of Acid-Sulphate and Acid-Sulphate-Chloride Geothermal Systems from Yellowstone National Park, Wyoming, USA. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(4): 695-706. https://doi. org/10.1016/S0016-7037(96)00384-5
- Lewis, A. J., Komninou, A., Yardley, B. W. D., et al., 1998. Rare Earth Element Speciation in Geothermal Fluids from Yellowstone National Park, Wyoming, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4): 657-663. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00367-0
- Li, C. F., Zhou, D., Li, G., et al., 2021. Geodynamic Problems in the Western Pacific and Future Scientific Drill Targets. *Earth Science*, 46(3): 759-769 (in Chinese with English abstract).
- Lucazeau, F., 2019. Analysis and Mapping of an Updated Terrestrial Heat Flow Data Set. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20(8): 4001-4024. https://doi. org/10.1029/2019GC008389
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geologi*cal Journal of China Universities, 14(4): 510-526 (in Chinese with English abstract).
- Marini, L., Fung, A. Y., Sanchez, E., 2003. Use of Reaction Path Modeling to Identify the Processes Governing the Generation of Neutral Na-Cl and Acidic Na-Cl-SO<sub>4</sub>

Deep Geothermal Liquids at Miravalles Geothermal System, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 128(4): 363–387. https://doi. org/ 10.1016/S0377-0273(03)00226-9

- Merdith, A. S., Williams, S. E., Collins, A. S., et al., 2021. Extending Full-Plate Tectonic Models into Deep Time: Linking the Neoproterozoic and the Phanerozoic. *Earth-Science Reviews*, 214: 103477. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2020.103477
- Molina, F., Martí, J., 2016. The Borinquen Geothermal System (Cañas Dulces Caldera, Costa Rica). Geothermics, 64: 410-425. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.07.001
- Moore, W. B., Webb, A. A. G., 2013. Heat-Pipe Earth. *Nature*, 501(7468): 501-505. https://doi.org/10.1038/ nature12473
- Mutschler, F. E., Ludington, S., Bookstrom, A. A., 2000. Giant Porphyry-Related Metal Camps of the World-A Database. U. S. Geological Survey Open-File Report 99-556, U.S. Geological Survey, Reston.
- Nanlohy, F., Kusnadi, D., Sulaeman, B., 2001. Geology and Geochemistry of Mataloko Geothermal Field, Central Flores, East Nusa Tenggara. Proceeding of the 5th Inaga Annual Scientific Conference & Exhibitions, Yogyakarta.
- Nordstrom, D. K., McCleskey, R. B., Ball, J. W., 2009. Sulfur Geochemistry of Hydrothermal Waters in Yellowstone National Park: IV Acid-Sulfate Waters. *Applied Geochemistry*, 24(2): 191–207. https://doi. org/ 10.1016/j.apgeochem.2008.11.019
- Ren, Z. L., Qi, K., Liu, R. C., et al., 2020. Dynamic Background of Early Cretaceous Tectonic Thermal Events and Its Control on Various Mineral Accumulations such as Oil and Gas in the Ordos Basin. Acta Petrologica Sinica, 36(4): 1213-1234 (in Chinese with English abstract).
- Rolf, T., Coltice, N., Tackley, P. J., 2012. Linking Continental Drift, Plate Tectonics and the Thermal State of the Earth's Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 351-352: 134-146. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.07.011
- Sun, Z. J., Xue, L., Xu, Y. M., et al., 2012. Overview of Deep Learning. *Application Research of Computers*, 29 (8): 2806-2810 (in Chinese with English abstract).
- Takahashi, M., Urai, M., Yasukawa, K., et al., 2000. Geochemistry of Hot Spring Waters at Bajawa Area, Central Flores, Nusa Tenggara Timur, Indonesia. Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku.

- Tang, M., Chen, K., Rudnick, R. L., 2016. Archean Upper Crust Transition from Mafic to Felsic Marks the Onset of Plate Tectonics. *Science*, 351(6271): 372-375. https://doi.org/10.1126/science.aad5513
- Tian, J., Pang, Z. H., Guo, Q., et al., 2018. Geochemistry of Geothermal Fluids with Implications on the Sources of Water and Heat Recharge to the Rekeng High-Temperature Geothermal System in the Eastern Himalayan Syntax. *Geothermics*, 74: 92–105. https://doi.org/ 10.1016/j.geothermics.2018.02.006
- Tian, J., Pang, Z. H., Wang, Y. C., et al., 2019. Fluid Geochemistry of the Cuopu High Temperature Geothermal System in the Eastern Himalayan Syntaxis with Implication on Its Genesis. *Applied Geochemis*try, 110: 104422. https://doi.org/10.1016/j. apgeochem.2019.104422
- Wang, X. W., Wang, T. H., Gao, N. A., et al., 2022. Formation Mechanism and Development Potential of Geothermal Resources along the Sichuan - Tibet Railway. *Earth Science*, 47(3): 995-1011 (in Chinese with English abstract).
- Weller, O. M., St-Onge, M. R., 2017. Record of Modern-Style Plate Tectonics in the Palaeoproterozoic Trans-Hudson Orogen. *Nature Geoscience*, 10(4): 305-311. https://doi.org/10.1038/ngeo2904
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., et al., 2019. The Generic Mapping Tools Version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20(11): 5556-5564. https://doi.org/ 10.1029/2019GC008515
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Wan, Y. S., et al., 2012. Study of the Precambrian BIF - Iron Deposits in the North China Craton: Progresses and Questions. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3431-3445 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. J., Tan, H. B., Zhang, Y. F., et al., 2015. Boron Geochemistry from Some Typical Tibetan Hydrothermal Systems: Origin and Isotopic Fractionation. Ap-

*plied Geochemistry*, 63: 436-445. https://doi.org/ 10.1016/j.apgeochem.2015.10.006

Zhong, S. J., Zhang, N., Li, Z. X., et al., 2007. Supercontinent Cycles, True Polar Wander, and very Long-Wavelength Mantle Convection. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3–4): 551–564. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.049

## 附中文参考文献

- 陈墨香,1992.新编中国温泉图及其说明.地质科学,27 (S1):322-332.
- 陈墨香, 汪集旸, 1994. 中国地热研究的回顾和展望. 地球 物理学报, 37(S1)320-338.
- 陈墨香, 汪集旸, 邓孝, 1995. 中国地热学研究之进展. 地球 科学, 20(4): 367-372.
- 姜光政,高堋,饶松,等,2016.中国大陆地区大地热流数据 汇编(第四版).地球物理学报,59(8):2892-2910.
- 蒋恕, 王帅, 祁士华, 等, 2020. 基于大数据分析的地热勘探 潜力区预测方法的新进展. 高校地质学报, 26(1): 111-120.
- 旷健, 祁士华, 王帅, 等, 2020. 广东惠州花岗岩体及其地热 意义. 地球科学, 45(4): 1466-1480.
- 李春峰,周多,李刚,等,2021.西太平洋地球动力学问题与 未来大洋钻探目标.地球科学,46(3):759-769.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2008.华南地区中生代主要金 属矿床时空分布规律和成矿环境.高校地质学报,14 (4):510-526.
- 任战利, 祁凯, 刘润川, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地早白垩世构 造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏 (矿)期的控制作用. 岩石学报, 36(4): 1213-1234.
- 孙志军,薛磊,许阳明,等,2012.深度学习研究综述.计算 机应用研究,29(8):2806-2810.
- 汪新伟,王婷灏,高楠安,等.2022.川藏铁路沿线地热资源 形成机理与开发潜力.地球科学,47(3):995-1011.
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等, 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究:进展与问题. 岩石学报, 28(11): 3431-3445.