

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2020021

引用格式: 刘博, 翟明国, 彭澎, 郭敬辉, 刘鹏. 2020. 大数据驱动下变质岩岩石学研究展望 [J]. 高校地质学报, 26 (4): 411-423

## 大数据驱动下变质岩岩石学研究展望

刘 博<sup>1,3</sup>, 翟明国<sup>1,2,3,4\*</sup>, 彭 澎<sup>1,3</sup>, 郭敬辉<sup>1,3</sup>, 刘 鹏<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院大学 地球科学学院 计算地球动力学重点实验室, 北京 100049;
3. 中国科学院 地球科学研究院, 北京 100029;
4. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027

**摘要:** 变质岩记录了地球特别是大陆形成以来的演化历史。变质作用是地球出现固态岩石后构造演化的物质记录, 是地球岩石圈的黑匣子、深部探针和指示剂, 是深时地质记录最典型的地质指纹。变质岩及变质作用承载了地球特别是大陆构造演化过程以及构造体制随时代演化的研究重任。随着变质相平衡研究的发展以及相关数据资料的积累, 因应大数据时代的到来, 如何完善变质岩岩石学知识体系, 对分散的数据进行整合, 形成新一代数据平台, 运用大数据方法解决前沿科学问题, 成为变质岩岩石学新的学科生长点。文章总结介绍了国内外与变质岩有关的数据库 (如MetPetDB、PetDB等), 并对近年的研究热点做了综述。笔者认为, 大数据驱动下, 可以针对一些相关科学问题先行开展研究, 如: (1) 早期大陆的物质、形成机制、生长过程和稳定化; (2) 造山带、克拉通结构以及洋陆相互作用的过程; (3) 壳—幔相互作用、接触带结构、能量、相转换与物质交换; (4) 地球的热体制演化及其与大陆结构与成分演变的时空联系。

**关键词:** 变质岩岩石学; 变质地质学; 数据库; 大数据; 科学前沿

中图分类号: P588.3; P628+4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2020) 04-411-13

## Prospects on Big Data-Driven Metamorphic Petrology

LIU Bo<sup>1,3</sup>, ZHAI Mingguo<sup>1,2,3,4\*</sup>, PENG Peng<sup>1,3</sup>, GUO Jinghui<sup>1,3</sup>, LIU Peng<sup>1,3</sup>

1. State Key Laboratory of Lithosphere Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Key Laboratory of Computational Earth Dynamics, College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
4. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract:** Metamorphic rock records the Earth evolutionary history since the generation of its continental crust. Metamorphism stores information of the tectonic evolution and other geological processes from the solid rocks formed. Metamorphic rock is the focal point for the tectonic evolution study, especially when it comes to the scope of continental tectonics and tectonic regime change through time. With the development of metamorphic phase equilibrium research and the accumulation of relevant data, how to improve the knowledge system of metamorphic petrology, integrate the scattered data, form a new comprehensive data platform, and employ the big data to solve

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-06-23

基金项目: 国家自然科学基金 (41890831; 41890833; 41890834) 联合资助

作者简介: 刘博, 女, 1990年生, 工程师, 主要从事变质地质学研究; E-mail: cugliubo@sina.com

\*通讯作者: 翟明国, 男, 1947年生, 研究员, 主要从事前寒武纪地质与变质地质学研究; E-mail: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn

the frontier scientific questions have attained plenty of interests in metamorphic petrology. This paper summarized the databases related to metamorphic rocks, such as MetPetDB, PetDB, etc., as well as the research hotspots in recent years. As a result, big data-driven research subjects in this field were proposed as: (1) the generation, growth and stabilization of the early continental crust; (2) the process of cratonization, orogenesis, and ocean–continental interaction; (3) crust–mantle interaction and the structure, energy, phase transition and material exchange within the contact belt; (4) evolution of the Earth thermal regime and its temporal and spatial connection with the continental structure and composition change.

**Key words:** metamorphic petrology; metamorphic geology; database; big data; scientific frontier

**Corresponding author:** ZHAI Mingguo, Professor; E-mail: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn

## 1 引言

大数据、大平台,已经成为大国乃至全球的新型战略资源,正在引发科学研究范式和全球的经济结构产业的变革(赵鹏大, 2014; 郭华东等, 2014; 翟明国等, 2018)。“深时数字地球”(Deep-time Digital Earth, DDE)大科学计划是由中国科学家发起和主导,并由国际地质科学联合会(IUGS)批准的第一个国际大科学计划。针对过去45亿年的地球历史,整合与地球相关的各类数据,构建地球岩石圈、水圈、生物圈、大气圈等多圈层演化的深时大数据系统,重建精确的地球和生命演化历史,为人类了解地球的地理、环境和气候变化,为识别矿产、能源的分布规律和预测地球与人类的发展趋势提供重要支撑。

变质作用是由于地质环境的改变,使岩石所处的物理化学环境发生了改变,进而岩石的矿物组成、结构和化学成分出现相应改变的过程。研究者们一直都在探寻变质岩在变质作用发生之前的原岩是什么,以及发生了什么样的地质过程形成了现今所观察到的岩石。变质岩记录了地球特别是自大陆形成以来近45亿年的演化历史。因此,变质作用是地球出现固态岩石后构造演化的物质记录,是地球岩石圈的黑匣子、深部探针和指示剂;在岩石学和区域构造范畴,变质作用是深时地质记录最典型的地质指纹和记录器。对变质岩的研究包含了与早期陆壳的形成和稳定、克拉通化、板块运动、造山作用、洋陆相互作用和壳幔相互作用相关的一系列的重要基础科学问题。不同的构造背景具有不同的地热特征,这些地热特征随时间的变化代表了地球不可逆转的热演化历史,变质岩中则记录了岩石温度( $T$ )、压力( $P$ )随时

间( $t$ )变化的证据。变质岩 $P$ - $T$ - $t$ 轨迹理论的提出改变了人们对变质作用过程的认识(England et al., 1984, Thompson et al., 1984)。对于变质岩温压的研究,由早期的传统温压计到近四十多年来变质相平衡模拟的快速发展(Holland et al., 1990, 1998, 2011; Powell et al., 1990, 1998),大量的传统温压计在不断的更新和修正,利用内恰性热力学数据库、计算程序和矿物活度模型定量计算的各种与变质条件相关 $P$ - $T$ - $x$ 的数据也大量涌现。随着年代学技术的发展,使高空间分辨率下测量副矿物不同期次的生长环带年龄成为可能,并且可以用于定年的副矿物也不断增多。这使得近年来精确的变质时代数据呈指数数量级增长,为了解变质条件随时间的改变提供了详实的地质资料。在过去的十多年间,各国的科学家们建立了EarthChem、GeoRoc、NAVDAT、PetDB、MetpetDB等多个与岩石地化相关用于处理、分享和管理地球科学数据的数据库。这些数据库大多涉及变质岩,但是仅有少数的数据库能够满足变质岩岩石学学科需求;而且变质岩岩石学这一复杂知识体系中大量的数据依然分散于各类文献资料之中,很难实现大数据时代需求下的数据共享。

本文对已有的变质岩数据库和其他收录有变质岩相关数据的数据库的运行、检索方式以及各自的特点进行了梳理,并列举了数据驱动下对科学问题进行探索的实例,以期对DDE大科学计划任务下的数据库建设做些思考。

## 2 国内外变质岩数据库简介

### 2.1 MetPetDB

MetPetDB (<http://metpetdb.com/>)是由美国国家

科学基金会资助建立的变质岩岩石学数据库,旨在收集与变质岩相关的样品类型、地球化学数据等信息,为促进全球地质学家及科研团队的合作提供平台(Spear et al., 2009)。在该数据库中,所有的数据都划分为以下三种类型:已发表数据、公开数据和私人数据。注册用户可以免费检索和下载已发表数据和公开数据,而私人数据的浏览、编辑和下载等操作则需要数据归属者提供相应的权限后才可以进行。

针对变质岩岩石学的研究内容,该数据库在建设时提出了以下几点设计思路:将全岩成分与矿物学研究相结合;数据库中需要包含各种类型的图片信息;对同一薄片下的各类照片建立关联;将数据与测试点位的相关图片进行关联;建立检索、上传和下载数据的功能,同时还希望数据库对加强研究人员及团体之间的合作有所帮助;另外,数据库希望为原始数据的重新计算、分析和成图提供相应的工具(Spear et al., 2009)。

MetPetDB 的数据模型是以样品为核心进行构建的,这里的样本指的是一个物理实体,即一个岩石样品。通常在研究过程中,需要同一个岩石样品的岩相学观察结果、化学成分分析、年代学信息等,基于这些考虑,在数据模型建设时引入了子样品的概念。一个岩石样品可以拥有多个子样品,例如岩石薄片、粉末样品以及从中挑选的单矿物等。在 MetPetDB 的数据库中,一个样品包含有

多个样品属性(图1),用户若要向数据库中上传样品数据,则最少需要提供以下样品属性信息:样品编号、位置(经度、纬度)、岩石类型、归属者以及是否为公开样品,若其来源于公开出版物,则还需要提供样品的文献信息。MetPetDB 数据库与其他常用的岩石地球化学数据库相比有一个显著的区别是向该数据库中上传样品信息时,可以不提供地球化学分析数据,只要用户可以上传以上提到的几种样品属性信息,就可以完成数据上传。这一特点可以让用户在使用数据库时更容易得到岩石在变质区内的展布特征。对于一个样品的子样品,上传数据时则必须提供样品编号、子样品名称、子样品类型、子样品所属人以及是否公开样品这些信息。

工作组在发起和设计 MetPetDB 数据库时,针对变质岩岩石学的研究特点,着重考虑了一点内容,即提供矿物的结构、期次以及测试点的位置信息,这一点对于如何解释数据也是非常重要的。这些信息往往是以图片(显微镜下照片、BSE 图像等)的形式呈现的,因此如何对图片进行录入和开发可视化功能也是 MetPetDB 数据库在建设过程中非常注重的工作之一。可以向数据库上传的图像属性及图像类型在图2中,其中上传一个图像文件必须要提供的属性包括样品编号、图像文件名称、图像类型和文件归属人,所上传的图像既可以是样品的相关图片(例如样品露头照片或是地质图件),也可以是子样品的图件(例如薄片

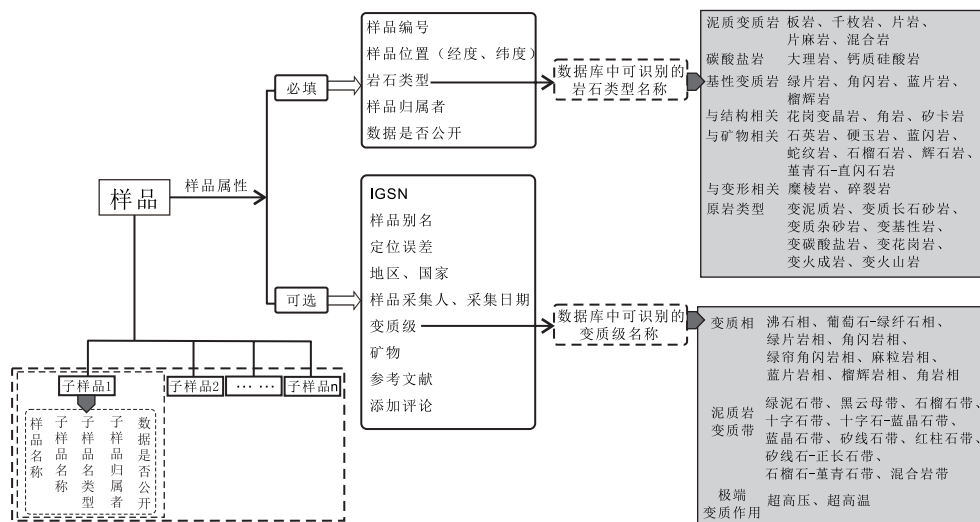


图1 MetPetDB数据库中的样品属性、变质岩岩石类型及变质级等信息的结构图

Fig. 1 Structure diagram of sample attributes, metamorphic rock types and metamorphic grades in the MetPetDB database

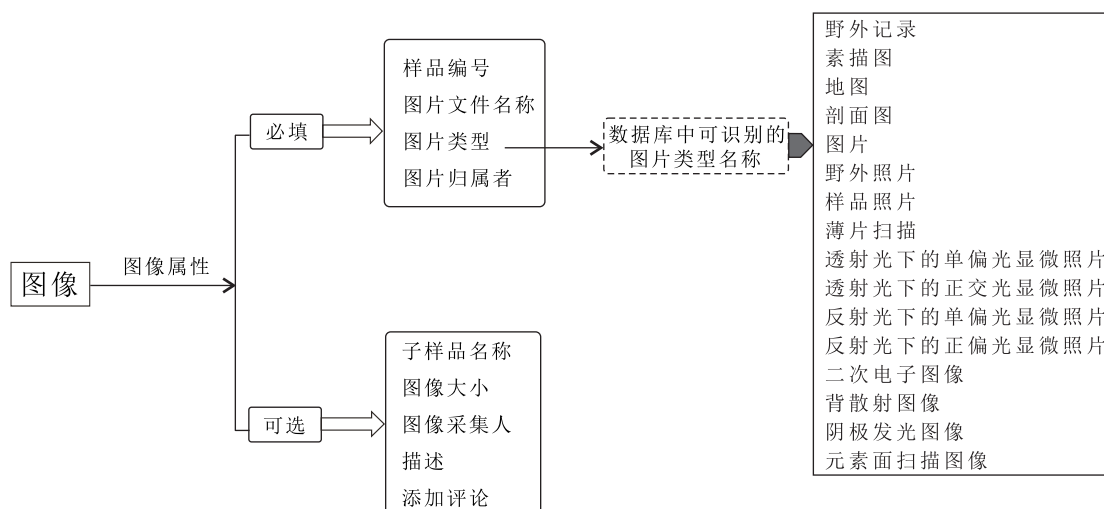


图2 MetPetDB数据库中的图片属性及图片类型等信息的结构图  
Fig. 2 Structure diagram of image attributes and image types in the MetPetDB database

的显微照片)。同时,数据库为样品地球化学分析数据的上传也提供了相应的接口,图3中列出了数据库中所提供的上传地球化学数据需要的属性,其中样品编号、子样品编号、矿物名称(“Bulk”代表全岩分析)、分析方法、分析内容、数值、单位、数据归属人是用户必须提供的信息。如果用户上传地球化学数据时有对应的图片需要上传,则需选择添加对应的“参考图片名称”(图3)将上传的地球化学数据和标注测试点位置的图像文件相对应,可以为使用者对数据的解释提供更详实的依据。

在用户使用 MetPetDB 搜索数据时,网站中的检索界面几乎涵盖所有以上介绍的各类属性信息。这些信息显示在检索界面的注释栏中,用户可根据自己的需求进行一个或是多个条目的同时检索。检索的数据以列表的形式在网页中输出,用户既可以对数据进行批量的导出,也可以进入到单个条目中进一步查询样品包含的详细图像和数据信息。

MetPetDB 数据库的开发除了希望对现有数据整合、存储和共享外,还有一项重要的任务是希望为加强全球地质学家和研究组织之间的合作提供帮助。为此该数据库为研究者和科研团队提供了一个可以在指定用户之间共享数据的平台,尤其当涉及到未公开的新数据和暂时无法发表的数据。研究人员可以在数据库中创建一个“项目”

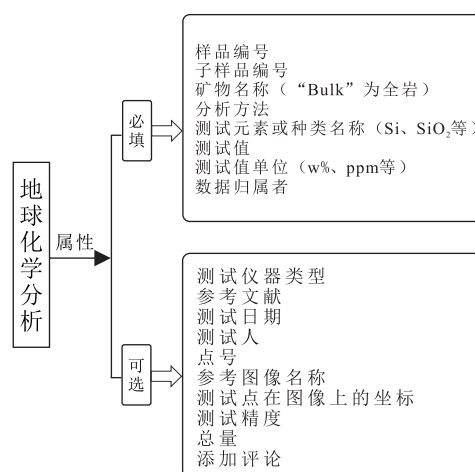


图3 MetPetDB数据库中的化学属性及图片类型等信息的结构图

Fig. 3 Structure diagram of geochemical analysis attributes in the MetPetDB database

(“project”),通过在项目中添加参与者来实现指定人员之间的数据共享。一个“项目”中有一个项目负责人和多个项目参与者,其中项目负责人有添加和移除项目参与者的权限。项目中可以包含公开数据和私人数据,但是数据读取等权限需要数据的归属人来提供相应的权限操作。研究人员可以同时加入不同的项目中,也可以将相同的数据上传到不同的项目中供不同的合作团体来使用。

## 2.2 PetDB

PetDB(<http://www.earthchem.org/petdb>)是一个包含有岩石、矿物、熔体包裹体的化学分析数据、





使用质谱仪和同位素稀释法测定的同位素比值和 Rb、Sr 值发表在文献 3 中。

### 2.3 中国典型变质区变质岩区基础数据共享服务系统

中国典型变质区变质岩区基础数据共享服务系统 (<http://geodata.geoscience.cn/bzy/list/yhdata.action>) 是中国地质科学院地质科学数据共享网下的一个服务系统, 地质科学数据共享网由中国地质科学院主办, 数字化整合中国地质科学院建院 50 多年来积累的海量地质科学数据资源, 为国家和社会公众提供地质基础数据服务。其中, 中国典型变质区变质岩区基础数据共享服务系统是该网站地质分支下的系统之一, 旨在便于广大专业人员研究使用已有的科学数据成果, 提高综合对比研究水平, 更好地探讨地体的形成背景、演化历史以及成矿环境等。

该数据库目前仅收录中国的变质岩数据信息, 可以从岩石地球化学、矿物组成和地层基础地质三个方面进行检索。检索时均可输入地层群组名称和产地来进一步限制检索结果, 在矿物组成数据信息检索时, 可以通过选择矿物和多种矿物的组合来进行检索。注册用户可以免费上传和下载数据, 上传和下载都可以使用电子表格进行批量上传。在每个条目的检索结果中, 除了包含数据信息以外, 还包含岩石所在研究区的基本信息, 其中可以查看岩石所在地层单位的命名时间和沿革历史。

### 2.4 其他可查询变质岩信息的常用数据库

GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc>) 的所属机构系统为马克斯·普朗克学会 (MPG), 是一个大陆和海洋岩石的地球化学数据库 (Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents), 它由德国马克斯·普朗 (Max Planck) 化学研究所的 Bärbel Sarbas 博士研究小组负责建设和维护。GEOROC 可支持按作者文献、地理坐标、地球化学元素含量、岩石类型、分析方法等多种查询方式。数据库预先按各种不同专题对数据进行了整编, 形成 csv 文件直接批量下载使用。该数据库以收集岩浆岩数据为主, 虽然没有留出单独的变质岩的检索选项, 但是可以收到输入岩石名称查询部分类型的变质岩, 其中收录的麻粒岩、榴辉岩等数据常为岩石捕虏体。

DARWIN (Data and Sample Research System for Whole Cruise Information in JAMSTEC, <http://www.godac.jamstec.go.jp/darwin/e>) 为日本海洋研究开发机构为展示其深海样品所建立的数据平台, 其中可检索到一些变质岩条目, 数据平台提供了详细的位置和航道信息, 但是大多数的变质岩数据仅具有简单的命名和描述。

NAVDAT (North American Volcanic and Intrusive Rock Database, [www.navdat.org](http://www.navdat.org)) 为北美火山岩和侵入岩数据库, 数据库中开发了多种可视化功能。在该数据库中也可以检索到少量变质岩的信息, 但是这些信息仅包含年代学数据和岩石主量、微量和同位素等地球化学信息。该数据库目前已经停止更新, 但是所有的功能和数据都可以进行正常的访问。

PANGAEA (<https://www.pangaea.de>) 是涉及地球科学与环境科学的数据出版平台, 为 ICSU (国际科学理事会) 所属, 由德国阿尔弗雷德-魏格纳极地与海洋研究所、布莱梅大学海洋环境科学中心共建。该网站为数据的存储、出版和在利用提供平台, 除了收藏有岩石、矿物数据之外, 还有更多环境科学数据, 如水、冰、大气和沉积物等数据。网站中可以检索到一定的变质岩相关信息, 该数据库涉及的范围较为广泛, 检索出的变质岩常被打散在多个中主题词中。

另外, 一些国家的地质调查机构提供的数据平台也包含了一些变质岩数据信息, 例如美国地质调查局 (<https://www.usgs.gov>) 涉及各类地质、环境、资源、灾害相关的数据信息, 其中可以查询到收录有 800 余条与关变质岩相关的出版物信息。

### 2.5 小结

上文对涉及到变质岩的常见数据库进行了梳理, 其中 MetPetDB、中国典型变质区变质岩区基础数据共享服务系统为专门的变质岩数据库, 其余数据库多为涉及到多学科的综合型数据库或是以岩浆岩为主的数据库。在 MetPetDB 数据库的开发和建设中突出了图像信息的重要性, 尤其是很多数据收录了元素扫描的图片和标有电子探针测试点位置的显微照片, 这一点无疑对注重变质作用过程研究的用户来讲具有巨大的吸引力, 也为数据的后期解释提供了详实的依据。与其他以

地球化学数据为主的数据库相比,该数据库弱化了地球化学分析属性,用户只要提供样品的编号、位置和岩石类型就可以上传数据,这一点可以使数据库更易于展示各个变质区的岩石类型的分布,尤其是针对一些早期相对缺乏地球化学数据的研究资料时,也后续的研究者继续展开后续研究。另外,在该数据库中用户可以自主创建项目,在项目中同一个项目组的人员可以共享项目中的数据,方便了不同研究者及科研团队之间的交流。中国典型变质区变质岩区基础数据共享服务系统虽然只针对中国变质岩数据,且数据量也较少,但是其提供了详细的地质背景资料,并且所提供的矿物化学信息和矿物组合的检索方式也更方便变质岩研究使用。PetDB 中也提供了较多数量的变质岩数据,并且该数据库相当活跃,可以提供详细的岩石和矿物化学信息,并且提供预编译数据集,方便用户快速批量处理数据。但是该数据库中的样品以洋底岩石和深源捕虏体为主,所以其中包含了很多浅变质的岩石类型,而且数据库中的检索方式没有注重变质级和变质带的划分。GEOROC、NAVDAT 是岩浆岩数据库,虽然其中仅包含了少量变质岩的信息,但是提供的数据可能不是变质岩学者最关注的数据类型,这两个数据库目前为止累积的数据量均较大,例如,GEOROC 目前已经具有 544190 件样品和 22951050 个数据值。

### 3 大数据驱动下的科学问题

#### 3.1 地球构造及热体制的变化

自 England 和 Richardson (1977) 首次提出变质  $P$ - $T$ - $t$  轨迹的概念后,变质地质学的研究产生了重大突破 (England and Thompson, 1984; Sandiford and Powell, 1986)。变质岩中可以保留岩石从埋藏加热到抬升冷却的多个阶段的地质过程,因而  $P$ - $T$ - $t$  轨迹的研究对揭示构造演化具有重要作用 (Miyashiro, 1961; England and Thompson, 1984; Spear et al., 1984; Harley, 1985, 1989; Ernst, 1988; Brown, 2007, 2014; Brown and Johnson, 2018)。传统地质温压计和热力学视剖面模拟是目前定量估算变质条件最常用的两种方法 (吴春明等, 2007; Powell and Holland, 2008; 魏春景,

2011; 吴春明, 2013)。近年来,除了地质温压计的不断更新和修正以外 (Wu and Chen, 2015; Wu, 2017),热力学数据库和成分-活度模型也在不断地发展和完善 (Guiraud et al., 2001; White and Powell, 2002; Powell and Holland, 2008; Holland and Powell, 2011; Kelsey and Powell, 2011; 魏春景, 2013; Taylor et al., 2014; Palin et al., 2014),这些都为变质地质学的发展和变质作用精细过程的研究带来了新的契机。同时,随着年代学的快速发展,更多的矿物定年方法不断被开发和完善,对同一矿物中不同期次的变质年龄的确定也更为精确。随着各种理论和技术的不断发展,数据资料在近近年来快速的累积,如何根据变质岩中得到的信息来推测岩石经历的地质过程一直以来都是变质岩石学家们关注的重点问题。Brown (2014) 综述了近三十年来变质岩石学对揭示岩石圈演化,尤其是对前寒武纪地球动力学的重要意义。文章汇集了不同变质带中的大量数据,并认为地质历史中不同时代的变质岩具有不同的热梯度分别代表了不同的构造体制 (图 5)。另外 Brown (2006, 2010) 还利用大量数据的统计结果解析了地球热体制、变质作用、板块构造和双变质带之间的相互关联。Weller (2017) 统计了 215 个变质岩的  $P$ - $T$ - $t$  结果,认为新元古代至显生宙的构造体制与元古宙其他时期的构造体制不同 (图 6);并且在研究

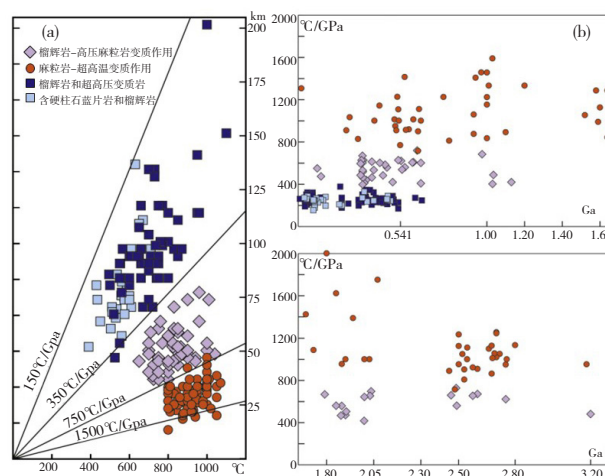


图5 (a) 岩石峰期变质条件下  $T/P$  划分示意图和 (b) 岩石  $T/P$ -年龄示意图 (引自 Brown, 2014)

Fig. 5 (a) Four apparent thermal gradients discussed in the text and (b) apparent thermal gradients of metamorphic belts by type plotted against age (Brown, 2014)



中识别出了高压低温的榴辉岩,由此认为现代类型的板块构造发生在 1.83 Ga,且全球的变质记录有被后期地质事件改造的趋势。

地球热量的耗散与现代板块构造的形成密切相关,板块构造的起源及演化是地球科学最重要和最具挑战性的问题之一。为了了解变质岩中所记录的地壳热量随时间的变化规律,Brown 和 Johnson (2019) 统计了 564 个地区变质岩温度 ( $P$ )、压力 ( $T$ )、 $T/P$  比值和变质时代的数据,这些变质岩的时代跨度从太古宙至新生代。文章中根据比值,将岩石分为高  $T/P$  ( $>775\text{ }^{\circ}\text{C/GPa}$ )、中  $T/P$  ( $775\sim 375\text{ }^{\circ}\text{C/GPa}$ ) 和低  $T/P$  ( $<375\text{ }^{\circ}\text{C/GPa}$ ) 三个类型(图 7),并根据这三种类型的岩石随时间的分布规律,划分出了不同的时间周期(图 8)。第一个周期从新太古代开始至古元古代结束,在该阶段多地出现了高  $T/P$  和中  $T/P$  的变质作用。第二个周期从古元古代哥伦比亚大陆的形成至新元古代罗迪尼亚超大陆的裂解,该时的高  $T/P$  变质岩中记录的温度的平均值明显高于其他时期。第三个周期从新元古代罗迪尼亚超大陆的裂解至晚古生代联合古陆的形成,该阶段高  $T/P$  变质作用的热压比值急速降低,并且出现了大量低  $T/P$  变质作用的岩石,表现出了现代板块构造的特征。 $\sim 0.175\text{ Ga}$  联合古陆的裂解可能指示了最后一个周期,该阶段出现高  $T/P$  变质作用的岩石数量明显减少。研究认为新元古代高  $T/P$  变质和新元古代晚期低  $T/P$  变质的广泛出现标志着全球地球动力学机制的重大变化;在新太古代和古元古代,以高压麻粒岩

和中高温榴辉岩为代表的中  $T/P$  变质作用和以麻粒岩、超高温麻粒岩为代表的高  $T/P$  变质作用的出现,指示了古元古代构造体制中出现的碰撞造山和伸展环境;从古元古代的开始,就已经出现了具有现代板块构造特征的双重变质热体制。从太古宙到新元古代,中  $T/P$  变质作用的压力平均增加了约  $0.25\text{ GPa}$ ,这可能与碰撞造山带相关;由于长期的冷却导致了地幔温度下降,因此板片拆沉发生的深度更深,从而导致了大陆岩石圈的俯冲,并形成了低  $T/P$  变质岩。

Holder 等 (2019) 重新甄选了 Brown 等 (2019) 所搜集的数据,并且将这些数据按变质时代分为五组,进行  $T/P$  核密度估计和柱状投图,对非高斯分布的数据组采用混合一高斯分布的方法将其分为两类。他们认为现代“双峰式”的变质作用在约  $2.5\text{ Ga}$  的新太古代末期就已经开始显现,而且全球性的“双峰式”变质作用在蓝片岩和超高压变质作用广泛出现前就已经有所显示(图 9)。并认为“双峰式变质作用”以及后期蓝片岩、超高压变质作用的出现都与地幔的长期冷却有关。地幔的长期冷却引起了大洋岩石圈厚度、浮力和流变学性质的改变,进而导致了俯冲和碰撞样式的改变。这一观点与之前所认为的板块构造起始于新元古代 (Stern, 2005) 和古元古代的观点不同 (Weller and St-Onge, 2017; Xu et al., 2018)。

虽然前人在大量收集变质岩信息的基础上展开了相关的研究工作,但是目前仍然没有合适的数据库和文献资料可以全面的囊括各个变

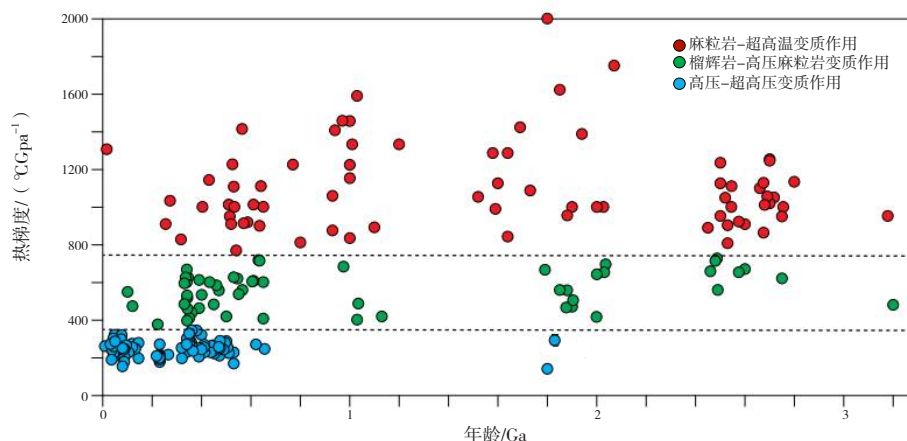


图6 全球变质岩变质  $T/P$  随时间变化的规律 (引自Weller, 2017)

Fig. 6 Results of this study with respect to a global compilation of metamorphic  $P$ - $T$ - $t$  data (Weller, 2017)



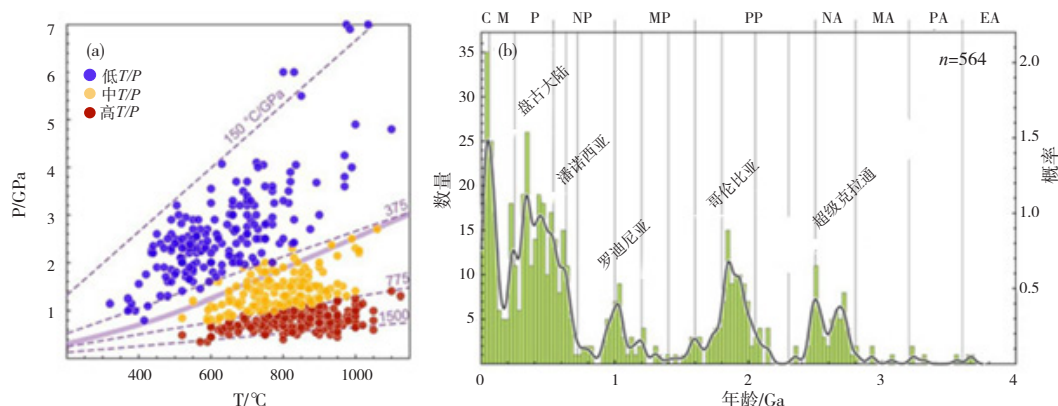


图7 (a) 三类 $T/P$ 划分示意图; (b) 564个地区变质年龄分布直方图及概率密度函数(PDF)曲线(引自Brown and Johnson, 2019)

Fig.7 (a) The three types of thermal gradients discussed in the text; (b) Histogram and probability density function curve for the age of metamorphism for the 564 localities (Brown and Johnson, 2019)

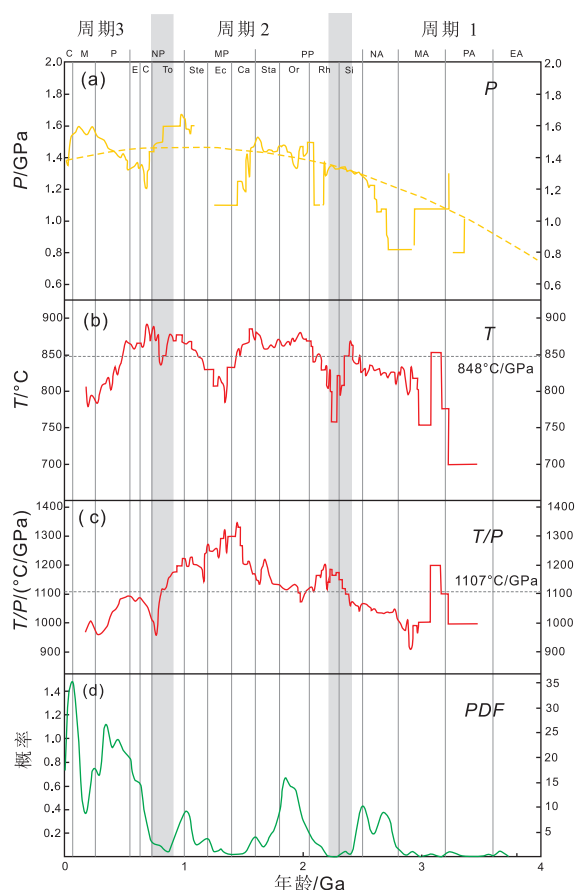


图8 (a) 中、高 $T/P$ 变质作用压力-年龄的最佳拟合线和移动平均值; 高 $T/P$ 变质作用温度-年龄(b)和 $T/P$ -年龄(c)的算术移动平均值; (d) 变质年龄分布的概率密度函数(PDF)曲线(引自Brown and Johnson, 2019)

Fig. 8 (a) Best fit line and moving mean of pressure against age for high and intermediate  $T/P$  metamorphism; Arithmetic and moving means of temperature (b) and thermobaric ratios (c) against age for high  $T/P$  metamorphism; (d) PDF for the age distribution (Brown and Johnson, 2019)

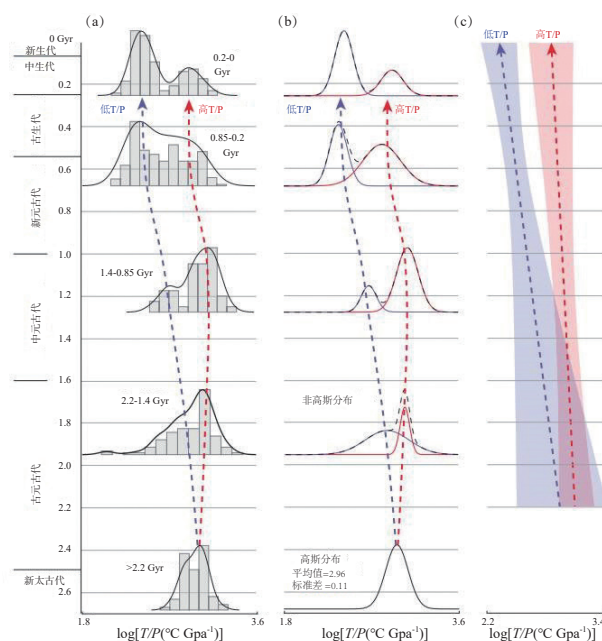


图9 “双峰式”变质作用随时间演化的规律(引自Holder et al., 2019)

Fig. 9 The bimodal distribution of modern metamorphism evolved through time (Holder et al., 2019)

质地区中的各类地质数据, 这一点制约了对变质信息的解读, 但是同时在大数据时代下, 也给变质岩岩石学的研究提供了新的机遇。另外, 如何准确地获得对应的变质温压( $P$ - $T$ )条件和变质时代( $t$ )的信息也是对变质岩数据库建立的巨大挑战, 大多数的数据信息需要与图片相对应来进行检验, MetPetDB 数据库对图像信息的收集和可视化处理方面进行了一定的探索和

尝试,但是当大量的数据汇聚在一起时,如何快速准确地对信息进行筛选和对明显错误的数据进行合理的剔除,对大数据驱动下的变质作用研究提出了进一步的挑战。

### 3.2 地球早期陆壳的形成与演化

地球是迄今为止唯一具有花岗岩陆壳的类地行星,因此陆壳的起源与演化关系到固体地球形成与演化这一重大基础问题。地球的陆壳从始太古代(4.0~3.6 Ga)起就开始逐渐形成(Condie, 1981; Polat, 2012),地球化学研究表明现今所观察到的60%~70%陆壳都是在太古宙末期形成的(Dhuime et al., 2012),90%的太古宙地壳由灰色片麻岩组成(Nutman et al., 1996; Moyen, 2011),这些灰色片麻岩中最重要的组分就是高Na,贫K的端元,即通常所说的石英闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩系列(TTG)(Moyen and Martin, 2012)。这些TTG岩石的存在说明了在太古宙末期长英质的陆壳来源于主要成分为超镁铁质—镁铁质的原始地壳(Glikson, 1979; Martin et al., 2005; Hawkesworth et al., 2010; Moyen and Martin, 2012; Laurent et al., 2014; Dhuime et al., 2015)。因此,太古宙的TTG代表了大陆地壳和克拉通形成的最早阶段的建造,对地球成为宜居星球起到至关重要的作用。

西澳 Jack Hill 沉积岩中的碎屑锆石年龄为4.4 Ga(Wilde et al., 2001),是目前地球上被发现的最古老的物质,其氧同位素和微量元素特征表明它们来自于TTG片麻岩(Mojzsis et al., 2001);地球上最古老的岩石为加拿大的Acasta TTG片麻岩(Harrison et al., 2006)。为了探寻TTG片麻岩与最早的太古宙地壳之间的关系,Guitreau等(2012)对来自全世界4.0~2.5 Ga的141个TTG样品的全岩和锆石Lu-Hf、Pb-Pb同位素数据进行了统计(图10)。他们认为在过去的40亿年中,TTG岩石中的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值和陆壳地幔源区的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值的变化均不大,接近于球粒陨石平均值。因此,大陆最有可能起源于近乎原始的未分异的物质(来自于深部地幔,而不是通常认为的亏损地幔),通过地幔柱的方式,并且在上地幔留下亏损熔体残余。Johnson等(2019)为了研究TTG成分随时间的变化,统计了从始太古代至新太古代的563个样品的主量元素和微量元素的数据(图11)。发

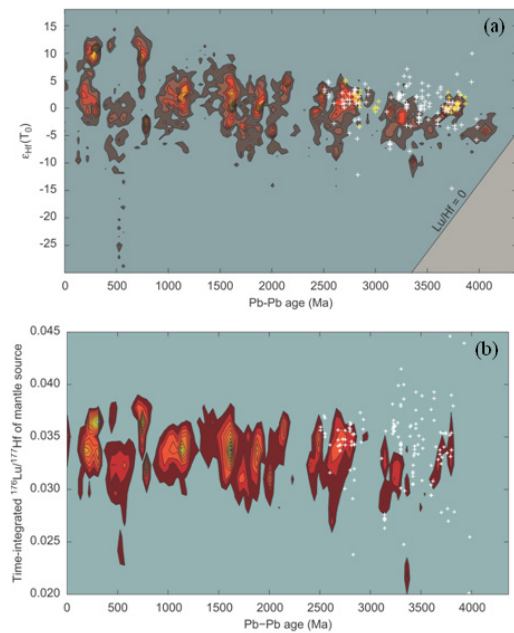


图10 (a) 岩浆锆石和碎屑锆石的初始 $\varepsilon_{\text{Hf}}(T_0)$ 随Pb-Pb变化的二维直方图; (b)  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 随Pb-Pb变化的二维直方图(引自Guitreau et al., 2012)

Fig. 10 (a) Two-dimensional histogram of initial  $\varepsilon_{\text{Hf}}(T_0)$  of detrital and magmatic zircons as a function of their Pb-Pb age; (b) Two-dimensional histogram of time-integrated  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  of detrital and magmatic zircons as a function of their Pb-Pb age (Guitreau et al., 2012)

现 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Sr}/\text{Y}$ 和 $\text{LaN}/\text{YbN}$ 的比值在3.3~3.0 Ga之间发生了显著的变化,这些变化可能与太古宙晚期地幔温度的降低和地球动力学机制的改变相关;另一个显著的变化则发生在2.8~2.7 Ga,可能与更多的富钾质的大陆弧岩浆的出现有关。TTG成分的变化显示出了岩石圈演化的不可逆转性。

迄今为止,大陆地壳在何时形成依旧具有很大的争议(Armstrong, 1991; McCulloch and Bennett, 1994; Wilde et al., 2001; Valley et al., 2005; Belousova et al., 2010; Reimink et al., 2016; Vervoort and Kemp, 2016)。冥古宙与太古宙的地热梯度要高于地球演化的后期,这也导致了大陆早期的地球动力学机制与现今板块构造的不同。大陆早期的构造格局与岩石类型的分布在不同构造位置上也具有不同的特点。另外,前寒武纪岩石经历了广泛的变质作用,且与显生宙的变质作用具有不同的特点(Bohlen, 1987; 赵宗溥等, 1993; 沈其韩等, 1992; Bucher and Frey, 1994; 翟明国, 2012)。太古宙的构造格局主要由绿岩带和高级区组成,与显生宙构造格局的差异很大。高级区的

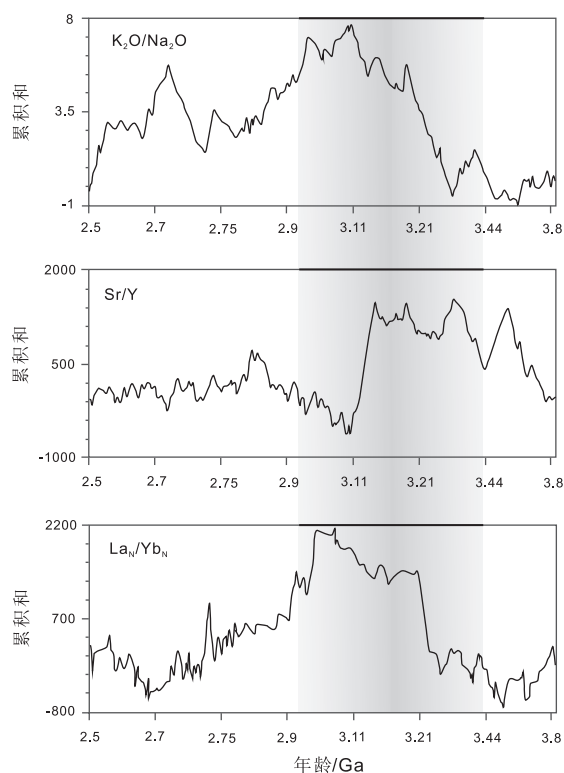


图11 所选样品的数据累积总变化示意图  
(引自Johnson et al., 2019)

Fig. 11 Cumulative sum (CUSUM) change-point analysis for selected geochemical proxies (Johnson et al., 2019)

岩石主要有 TTG 片麻岩、高级变质的表壳岩和超基性-辉长质-斜长岩体，绿岩带中的岩石主要有玄武岩、科马提岩、中酸性钙碱质火山岩和沉积岩，以及辉长岩和辉绿岩等。其中，TTG 片麻岩、科马提岩等在地球后期的演化中是非常罕见的。在数据驱动下，如何从时间尺度上将地球早期和晚期的岩石类型、展布方式、化学成分、变质条件等信息进行对比，这可能会为研究地球早期陆壳的形成和演化等问题提供新的思路。

此外，揭示大陆下地壳的组成、结构与性质不仅对认识大陆地壳的形成和演化具有重要的理论意义，而且也是理解地球深部过程、地质灾害、地球环境的关键之一。大陆下地壳一般指变质程度达到角闪岩相 (20~25 km) 和麻粒岩相 (>25~45 km) 的深部地壳单元，由于难以进行直接观察，常使用地球物理手段对大陆下地壳的物质组成和结构进行推断，对于地质上的依据，暴露于地表的下地壳剖面尤为重要。大陆下地壳可以分为克拉通型下地壳和造山带型下地壳两大类，两种下地壳的

结构、组成以及稳定性和运动规律的差异是大陆地质的关键课题之一。克拉通和造山带两类下地壳的组成和结构、形成的时代和机制、在现代的地壳稳定性上发挥的作用都截然不同；同时，受后期造山过程的影响，在克拉通内部和边缘，造山带内部不同部位的下地壳也存在明显差异。结合变质作用动力学研究，综合地球物理、岩石学、地球化学多方面的数据，运用大数据分析方法，为获取造山带和克拉通下地壳的结构、组成、性质以及运动规律带来新的挑战。

## 4 展望

变质岩记录了地球特别是自大陆形成以来近 45 亿年的演化历史，在岩石学和区域构造范畴，变质作用是深时地质记录最典型的地质指纹和记录仪器。随着地质学数据库的不断发展，各类变质岩的数据不断被纳入到 EarthChem、GeoRoc、NAVDAT、PetDB、MetpetDB、DARWIN、NAVDAT 等数据库中，其中一些数据库的运行和更新一直保持非常活跃的状态。

在调研的众多数据库中，MetPetDB 是专门的变质岩数据库，其数据库的设计理念和所收集的数据资料类型对变质岩研究者来讲最具有吸引力。虽然该数据在近年来的活跃程度不高，但是其设计的理念为变质岩在 DDE 计划下建立新的数据共享平台提供了一些很好的借鉴。例如，该数据库提供的建立项目的功能，方便了不同地区和不同工作组之间地质学家进行交流，尤其是对于分享未公开发表的数据。MetPetDB 数据库与其他岩石地球化学数据库有一点不同：即使没有化学分析的数据也可以上传岩石的地理坐标和岩石类型。这样的数据虽然缺少化学数据的支撑，但是可以使研究者高效率的查询到变质区中各类变质岩的分布状况，后续的研究者可以根据自己的需求进行样品的采集，对之前没有化学分析的样品根据自身的需求进行分析测试，而新的数据可以进一步反馈给数据库进行共享。从这个意义上说，这不但不会影响数据库发挥作用，还可以为后来的研究者提供便利的信息。

随着大数据和人工智能时代的到来，DDE 计划将建立开放、共享、统一的大数据平台，以地球演



化为主线进行多学科的数据融合。在地球的演化历史中,构造体制、岩石类型等都有着不可逆转的变化,例如富 Na 的 TTG 岩石、科马提岩、BIF 铁矿等大量出现在早前寒武纪的岩石,在地球的后期非常罕见;而在早期的演化历史中没有出现高压、超高压岩石。岩石地球化学的成分也随时代发生变化(例如 Ti 和 K/Na 比值的升高、Mg 的降低、Eu/Eu\* 的变化)等。因此,在“深时数字地球”大科学计划下,建立以解决演化问题为轴线的数据平台,无疑会为地球科学工作者提供新的研究方式和思维模式。结合目前学界正在开展的相关研究,可以先行对部分科学问题开展研究,如:(1)早期大陆的物质、形成机制、生长过程和稳定化;(2)造山带、克拉通结构以及洋陆相互作用的过程;(3)壳-幔相互作用、接触带结构、能量、相转换与物质交换;(4)地球的热体制演化及其与大陆结构与成分演变的时空联系。当然,目前的研究,还是以单一数据源为主,对于多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:**本研究受益于“深时数字地球”国际大科学计划的培训和 PI 们的指导。

### 参考文献(References):

- 郭华东,王力哲,陈方,等. 2014. 科学大数据与数字地球[J]. 科学通报, 59(12): 1047-1054.
- 沈其韩,许惠芬,张宗清,等. 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩[M]. 北京:地质出版社: 105-109.
- 魏春景. 2011. 变质作用 P-T-t 轨迹的研究方法与进展[J]. 地学前缘, 18(2): 1-16.
- 魏春景. 2013. 变质相平衡模拟方法. 固体地球科学研究方法[M]. 北京:科学出版社: 752-763.
- 吴春明. 2013. 矿物温度计和压力计的标定方法及其应用. 固体地球科学研究方法[M]. 北京:科学出版社: 699-714.
- 吴春明,肖玲玲,倪善芹. 2007. 泥质变质岩系主要的矿物温度计与压力计[J]. 地学前缘, 14(1): 144-150.
- 翟明国. 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报, 86(9): 1335-1349.
- 翟明国,杨树锋,陈宁华,等. 2018. 大数据时代:地质学的挑战与机遇[J]. 中国科学院院刊, 33(8): 825-831.
- 赵鹏大. 2014. 大数据时代呼唤各科学领域的数据科学[J]. 中国科技奖励, 9: 29-30.
- 赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化[M]. 北京:科学出版社: 389-390.
- Armstrong R L. 1991. The persistent myth of crustal growth [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 38: 613-630.
- Belousova E A, Kostitsyn Y A, Griffin W L, et al. 2010. The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data [J]. Lithos, 119: 457-466.
- Bohlen S R. 1987. Pressure-Temperature-Time Paths and a tectonic model for the evolution of granulites [J]. Journal of Geology, 95(5): 617-632.
- Brown M. 2006. Duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoproterozoic [J]. Geology, 34 (11): 961-964.
- Brown M. 2006. Duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoproterozoic [J]. Geology, 34: 961-964.
- Brown M. 2007. Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change [J]. International Geology Review, 49: 193-234.
- Brown M. 2010. Paired metamorphic belts revisited [J]. Gondwana Research, 18(1): 46-59.
- Brown M and Johnson T. 2019. Time's arrow, time's cycle: Granulite metamorphism and geodynamics [J]. Mineralogical Magazine, 83(3): 323-338.
- Brown M. 2014. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics [J]. Geoscience Frontiers, 18: 553-569.
- Brown M and Johnson T. 2018. Invited centennial article: Secular change in metamorphism and the onset of global plate tectonics [J]. American Mineralogist, 103: 181-196.
- Bucher K and Frey M. 1994. Petrogenesis of Metamorphic Rocks [M]. Springer-Verlag: 100-103.
- Condie K C. 1981. Archean Greenstone Belts. Developments in Precambrian Geology [M]. New York: Elsevier.
- Dhuime B, Hawkesworth C J, Cawood P A, et al. 2012. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago [J]. Science, 335(6074): 1334-1336.
- Dhuime B, Wuestefeld A and Hawkesworth C J. 2015. Emergence of modern continental crust about 3 billion years ago [J]. Nature Geoscience, 8 (7): 552-555.
- England P C and Richardson S W. 1977. The influence of erosion upon the mineral facies of rocks from different metamorphic environments [J]. J. Geol. Soc. London, 134: 201-213.
- England P C and Thompson A B. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism, Part I: Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust [J]. J. Petrol., 25: 894-928.
- Ernst W G. 1988. Tectonic history of subduction zones inferred from retrograde blueschist P-T paths [J]. Geology, 16 (12): 1081-1084.
- Glikson A Y. 1979. Early Precambrian tonalite-trondhjemite sialic nuclei [J]. Earth Science Reviews, 15: 1-73.
- Guireau M, Blichert-Toft J, Martin H, et al. 2012. Hafnium isotope evidence from Archean granitic rocks for deep-mantle origin of continental crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 337-338: 211-223.
- Guiraud M, Powell R and Rebay G. 2001. H<sub>2</sub>O in metamorphism and unexpected behaviour in the preservation of metamorphic mineral assemblages [J]. Journal of Metamorphic Geology, 19(4): 445-454.
- Harley S L. 1985. Garnet-orthopyroxene bearing granulites from Enderby Land, Antarctica: Metamorphic pressure-temperature-time evolution of the Archean Napier Complex [J]. Journal of Petrology, 26(4): 819-856.
- Harley S L. 1989. The origins of granulites: a metamorphic perspective [J]. Geological Magazine, 126 (3): 215-247.
- Hawkesworth C J, Dhuime B, Pietranik A B, et al. 2010. The generation and evolution of the continental crust [J]. Journal of the Geological Society of London, 167: 229-248.
- Harrison T M, McCulloch M T, Blichert-Toft J, et al. 2006. Further Hf isotope evidence for Hadean continental crust [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70 (18): A234.

- Holder R M, Viete D R, Brown M, et al. 2019. Metamorphism and the evolution of plate tectonics [J]. *Nature*, 572(7769): 378–381.
- Thompson A B and England P C. 1984. Pressure–temperature–time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks [J]. *J. Petrol.*, 25: 929–955.
- Holland T J B and Powell R. 1990. An enlarged and updated internally consistent thermodynamic data set with uncertainties and correlations; The system  $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2O-O_2$  [J]. *J. Metamorphic Geol.*, 8: 89–124.
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest [J]. *J. Metamorphic Geol.*, 16: 309–343.
- Johnson T E, Kirkland C L, Gardiner N J, et al. 2019. Secular change in TTG compositions: Implications for the evolution of Archaean geodynamics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 505: 65–75.
- Kelsey D E and Powell R. 2011. Progress in linking accessory mineral growth and breakdown to major mineral evolution in metamorphic rocks: A thermodynamic approach in the  $Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-ZrO_2$  system [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(1): 151–166.
- Laurent O, Martin H, Moyen J F, et al. 2014. The diversity and evolution of late-Archaean granitoids: evidence for the onset of ‘modern-style’ plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga [J]. *Lithos*, 205: 208–235.
- McCulloch M T, Bennett V C. 1994. Progressive growth of the Earth’s continental crust and depleted mantle: geochemical constraints [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(21): 4717–4738.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. 2005. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 79 (1–2): 1–24.
- Miyashiro A. 1961. Evolution of metamorphic belts [J]. *J. Petrol.*, 2: 277–311.
- Mojzsis S J, Harrison T M and Pidgeon R T. 2001. Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth’s surface 4,300 Myr ago [J]. *Nature*, 409: 178–181.
- Moyen J F. 2011. The composite Archaean grey gneisses: petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archaean crustal growth [J]. *Lithos*, 124 (1–2): 21–36.
- Moyen J F and Martin H. 2012. Forty years of TTG research [J]. *Lithos*, 148: 312–336.
- Nutman A P, McGregor V R, Friend C R L, et al. 1996. The itsaq gneiss complex of southern West Greenland: the world’s most extensive record of early crustal evolution (3900–3600 Ma) [J]. *Precambrian Research*, 78: 1–39.
- Palin R M, St-Onge M R, Waters D J, et al. 2014. Phase equilibria modelling of retrograde amphibole and clinozoisite in mafic eclogite from the Tso Moriri massif, northwest India: Constraining the P–T–M ( $H_2O$ ) conditions of exhumation [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(7): 675–693.
- Polat A. 2012. Growth of Archaean continental crust in island arcs [J]. *Geology*, 40 (4): 383–384.
- Powell R and Holland T J B. 1998. An internally consistent data set with uncertainty and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer programme [J]. *J. Metamorphic Geol.*, 6: 173–204.
- Powell R and Holland T J B. 1990. Calculated mineral equilibria in the pelitic system KFMASH( $K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ) [J]. *Am Mineral*, 75: 367–380.
- Powell R and Holland T J B. 1999. Relating formulations of the thermodynamics of mineral solid solutions: Activity modeling of pyroxenes, amphiboles, and micas [J]. *Am Mineral*, 84: 1–14.
- Powell R, Holland T J B and Worley B. 1998. Calculating phase diagram involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC [J]. *J. Metamorphic Geol.*, 16: 577–586.
- Powell R and Holland T J B. 2008. On thermobarometry [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(2): 155–179.
- Powell R and Holland T J B. 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids [J]. *J. Metamorphic Geol.*, 29: 333–283.
- Reimink J R, Davies J H F L, Chacko T, et al. 2016. No evidence for Hadean continents within Earth’s oldest evolved rock unit [J]. *Nature Geoscience*, 9: 777–780.
- Sandiford M A and Powell R. 1986. Deep crustal metamorphism during continental extension: Ancient and modern examples [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 151–158.
- Spear F S. 2009. MetPetDB: A database for metamorphic geochemistry [J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10: 1–15.
- Spear F S, Selverstone J, Hickmott D, et al. 1984. P–T paths from garnet zoning: A new technique for deciphering tectonic processes in crystalline terranes [J]. *Geology*, 12 (2): 87–90.
- Stern R J. 2005. Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time [J]. *Geology*, 33(7): 557–560.
- Taylor J, Nicoli G, Stevens G, et al. 2014. The processes that control leucosome compositions in metasedimentary granulites: Perspectives from the Southern Marginal Zone migmatites, Limpopo Belt, South Africa [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(7): 713–742.
- Valley J W, Lackey J S, Cavosie A J, et al. 2005. 4.4 billion years of crustal maturation: oxygen isotope ratios of magmatic zircon [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 561–580.
- Vervoort J D and Kemp A I S. 2016. Clarifying the zircon Hf isotope record of crust–mantle evolution [J]. *Chemical Geology*, 425: 65–75.
- Weller O M and St-Onge M R. 2017. Record of modern-style plate tectonics in the Palaeoproterozoic Trans-Hudson orogen [J]. *Nature Geoscience*, 10: 305–311.
- Wilde S A, Valley J W and Peck W H. 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Ga ago [J]. *Nature*, 409: 175–178.
- White R W and Powell R. 2002. Melt loss and the preservation of granulite facies mineral assemblages [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(7): 621–632.
- Wu C M and Chen H X. 2015. Calibration of a Ti-in-muscovite geothermometer for ilmenite-and  $Al_2SiO_5$ -bearing metapelites [J]. *Lithos*, 212–215: 122–127.
- Wu C M. 2017. Calibration of the garnet–biotite– $Al_2SiO_5$ –quartz geobarometer for metapelites [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 35(9): 983–998.
- Xu C, Kynicky J, Song W, et al. 2018. Cold deep subduction recorded by remnants of a Paleoproterozoic carbonated slab [J]. *Nature Communications*, 9(1): 2790.