

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2020023

引用格式: 林成发, 刘少峰, Simon Williams. 2020. 基于GPlates平台的“深时”板块构造重建: 数据库现状与应用实例 [J]. 高校地质学报, 26(4): 444-463

基于GPlates平台的“深时”板块构造重建: 数据库现状与应用实例

林成发^{1,2}, 刘少峰^{1,2*}, Simon Williams³

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

3. 西北大学地质学系, 西安 710069

摘要: 板块构造重建是大地构造领域一项关键的研究工作, 是构建“深时数字地球”(Deep-time Digital Earth, DDE)的重要途径。板块重建工作需要整合地球科学多个研究领域、海量的数据, 同时又是地球动力学和气候模拟等研究的重要约束条件。因此, 追踪目前国际主流的板块重建所需的数据库以及板块重建工具的最新进展和应用为了解板块重建研究的前沿提供全面的信息。文章系统介绍了支持板块构造重建研究的多个主流数据库, 着重描述数据库的数据格式、数据获取方式及数据如何支持基于GPlates平台的板块构造重建。为了阐述大地构造研究相关数据库在板块重建研究中的应用, 此次研究从板块构造重建的三个不同层次出发, 列举了多个最新的板块重建模型及其在探索地球系统演化方面的意义。最后, 结合DDE项目的相关任务, 对250 Ma以来全球板块构造和变形的演化、量化大地构造在地球系统演化中的作用、超大陆旋回中的古大陆和古海洋构造重建以及前中生代(>250 Ma)全球板块运动模型重建这四个关键科学问题作出了新的展望。

关键词: 构造重建; GPlates平台; 数据库; 地幔动力学模型

中图分类号: P628+.4; P542+.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2020)04-444-20

“Deep-time” Plate Tectonic Reconstructions in GPlates: Database Reviews and Applications

LIN Chengfa^{1,2}, LIU Shaofeng^{1,2*}, WILLIAMS Simon³

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Natural Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: Plate tectonic reconstruction plays a key role in tectonics and is an important step to build the “Deep-time Digital Earth (DDE)”. Plate tectonic reconstruction needs large amount of data from multiple disciplines in Earth Sciences and in the meanwhile, provides crucial constraints for geodynamics and climate modeling areas. Here we introduced various mainstream databases related to plate tectonic reconstruction with emphases on data type, data delivery path, and their applications in plate

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-06-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0204204); 国家重点研发计划(2017YFC0601405); 中国科学院战略先导项目(XDB18000000); 国际(地区)合作与交流重点基金项目(41820104004)联合资助

作者简介: 林成发, 男, 1989年生, 博士后, 主要从事盆地分析; E-mail: lin_cf@outlook.com

*通讯作者: 刘少峰, 男, 1959年生, 教授, 主要从事大地构造研究; E-mail: shaofeng@cugb.edu.cn

tectonic reconstruction. we also present several published global reconstructions of rigid plate motion, global and regional tectonic reconstruction with continuously deforming and evolving rigid plates, and regional reconstruction of plate subduction and its relationship with deep mantle convections. Regarding the DDE-related tasks four key scientific questions are proposed including global plate tectonics reconstructions and crustal deformations since 250 Ma, quantifying the role of plate tectonics in Earth evolution, paleo-continents and paleo-oceans reconstructions in the assembly-and-breakup cycles of supercontinents, and pre-Mesozoic (>250 Ma) global plate motion recover.

Key words: plate tectonic reconstruction; GPlates; database; mantle geodynamic model

Corresponding author: LIU Shaofeng, Professor; E-mail: shaofeng@cugb.edu.cn

1 板块构造重建及GPlates平台

板块构造重建计算和描述了地球表层岩石圈板块在地质历史时期内的位置、运动特征和变形过程 (Boyden et al., 2011; Gurnis et al., 2012; Müller et al., 2018), 是研究地表和深部系统演化过程的重要工具。尤其是在探索现今地幔结构、板块运动模型、海平面变化、地球重力场以及全球热点分布等方面有着重要的作用 (Gurnis et al., 2012)。同时, 板块构造重建也被广泛运用于地球科学的其他领域, 例如应用于油气勘探 (Satyana, 2016)、区域地质调查 (Sandwell et al., 2014)、古地理和古生物研究 (Wright et al., 2013), 以及作为古气候模拟的输入数据 (Tabor et al., 2019)。板块构造重建的全球板块运动模型为海量的地质数据的整合提供时空框架 (Seton et al., 2015)。

GPlates 是由悉尼大学 EarthByte 工作组、挪威

地质调查中心以及加州理工大学的科学家和软件开发者共同创建的一款开源软件, 能运行在包括 Windows、MacOS 以及 Linux 在内的主流操作系统中。GPlates 是提供交互式板块重建、地理信息系统 (GIS) 功能以及栅格数据可视化功能有机组合的软件平台系统, 允许用户对板块重建和相关数据进行可视化和操作。作为一款新世代的板块重建工具, GPlates 除了具备传统板块重建软件所具有的功能, 如在用户指定的地质时期和区域进行板块重建和展示、通过鼠标“拖拽”板块到重建位置进行交互式重建、控制重建数据的可视化模式等, 其优势在于拥有板块运动模型 (plate-motion model), 以树状结构的形式描述板块间的相对运动特征 (图 1)。GPlates 的另一个优势是利用“连续封闭板块” (Continuously Closed Polygon, CCP) 的概念和算法解决板块变形区域的重建问题, 使重建结果更符合地质事实 (Gurnis et al., 2012,

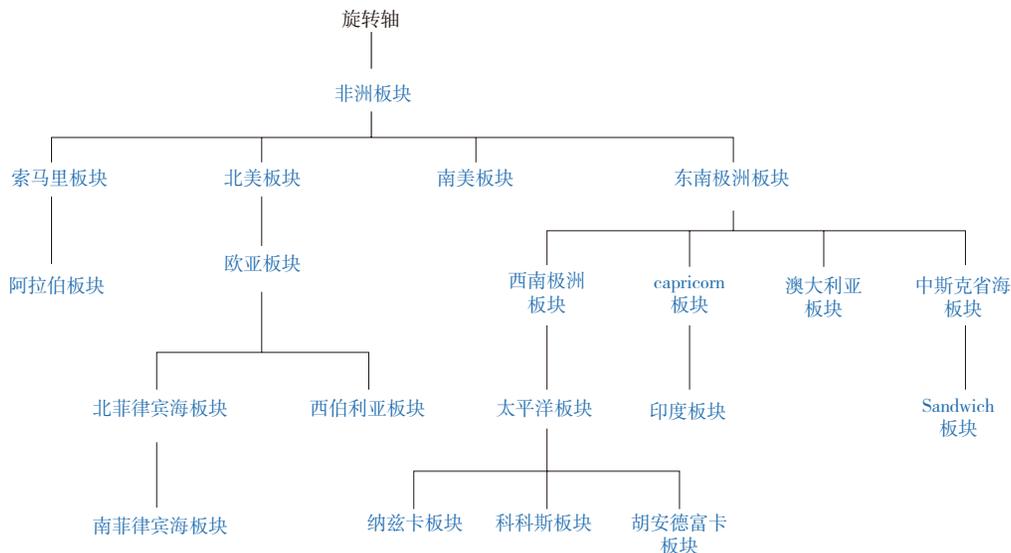


图1 GPlates平台中部分全球板块相对模型的树状结构 (修改自Müller et al., 2016)
Fig. 1 Illustration of part of the global plate circuit hierarchy in GPlates (after Müller et al., 2016)

2018; Liu et al., 2017)。同时, GPlates 软件还能处理各种几何形态和各种格式的数据, 包括栅格数据, 使其可视化并进行操作。利用 GPlates 软件平台, 用户可以方便地输入数据并生产高质量的图件。

2 支持GPlates平台板块构造重建的数据库介绍

由于大地构造学是一门综合性学科, 板块构造重建工作需要大量的地质、地球物理、地球化学, 甚至古生物等数据作依托。随着地球科学的不断发展, 有越来越多的板块构造相关的基础数据和解释数据, 如 GPS 测量数据、洋底词条带异常数据、大洋钻探得到的岩石、地化和地物数据以及全球重力异常数据等, 产生并形成了浩瀚的数据海洋。面对这些数量庞大、不断扩充的数据, 各国政府、科研单位和机构先后建立了大量的专业数据库来进行数据的获取、存储、管理和分析, 为本国和全世界的科研人员、工程师、教育人员等提供数据服务。遗憾的是, 国内政府机构和科研单元、高校院所对板块构造相关的数据积累较少, 导致相关的数据库的研究程度不足, 目前尚未有数据库可供使用。

数据库将分为两个类型进行介绍, 分别是原始数据库和解释数据库。原始数据库中存储的数据都是第一手获得的数据, 例如未解译的地震剖面、GPS 测量数据、大洋钻探获得的岩芯数据和测井数据等; 而解释数据库中存储的数据则是经过处理、分析后得到的数据。以下将对几个主流的、具有代表性的板块构造重建相关的数据库进行介绍, 并着重阐述其数据格式和下载渠道。

2.1 原始数据库

2.1.1 World Stress Map

World Stress Map (WSM) (<http://www.world-stress-map.org>) 是一个整合了现今全球地壳应力场的数据库。该数据库最早在 1986 年作为国际岩石圈计划 (International Lithospheric Program, ILP) 的一个课题, 在 Mary-Lou Zoback 的领导下建立。在 1995~2008 年期间, WSM 课题隶属于 Heidelberg 科学和人类研究所, 其数据库维护和更新工作由 Karl Fuchs 和 Friedmann Wenzel 领导。自 2012 年以

后, WSM 数据库则并入 ICSU (International Council for Science Union) 世界数据系统 (ICSU World Data System) 进行统一的维护和更新。WSM 数据库中所有的数据都是用 ICSU 标准格式进行储存和分析, 并且进行数据的质量排序提升全球尺度下数据维护的可靠性和数据对比的可行性 (Heidbach et al., 2018)。目前, 最新版本的 WSM 数据库 (2016 年发布) 中包含了 40 km 深度以上地壳的 42870 个应力数据记录, 其中相比老版本数据库 (2008 年发布) 新增了将近 4000 口钻井的岩性和地物数据, 同时数据量还在不断增加。WSM 作为一个面向公众开放的数据库, 可以为全世界学术和研究机构提供多个地球科学学科, 包括地球动力学、地质灾害评估、石化勘探以及工程地质, 开展研究所需的相关数据 (Heidbach et al., 2010, 2018)。

WSM 数据库中整合的地壳瞬时应力数据来自于多种应力标志 (stress indicators) (Zoback et al. 1989), 主要包括以下 4 个类型: (1) 地震震源机制 (Earthquake focal mechanisms); (2) 钻井井眼崩落 (Well bore breakouts) 和钻井钻进引发的断裂 (drilling-induced fractures); (3) 原地应力测量 (水压破裂、钻井开槽、套钻); (4) 年轻地质数据 (来自于断—滑分析和火山管道排列)。

WSM 数据库通过质量排序方案和标准化方案对输入数据库的数据进行质量评估, 确保数据库中的应力数据具有高质量、来源可靠的特点。WSM 数据库使用标准的地质/地球物理标识来确定应力数据的大小, 即挤压应力为正并且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, σ_1 为最大主应力, σ_2 为中间主应力而 σ_3 为最小主应力, 并借由这些标识来确定地壳所处的应力状态。除了标准的正断层 (NF)、逆冲断层 (TF) 和走滑断层 (SS) 应力状态, WSM 还采用了张扭断层 (NS, 结合了 NF 和 SS) 和压扭断层 (TS, 结合了 TF 和 SS) 的应力状态方案, 使数据库更贴合地质现实。此外, 由于板块边缘处的应力表现有别于板内区域, 因此 WSM 数据专门设置了 PBE (possible plate boundary events) 标注体系来区分板块边缘地区获得的应力数据, 方便用户进行筛选。

WSM 数据库 (<http://doi.org/10.5880/WSM.2016.001>) 面向全球用户提供免费的下载服务, 下载的数据格式包括逗号隔开的文本和

Excel 工作簿, 以及谷歌地球平台适用的 kml 和 kmz 文件(注: 已压缩为压缩文件)。同时, 数据库官网还为用户提供交互式的应力地图可视化工具 -CASMI, 方便用户自行创建应力地图并下载相关数据和图件。

2.1.2 Marine Geoscience Data System (MGDS)

MGDS (<http://www.marine-geo.org/index.php>) 数据库免费为公众提供全球大洋和临近的大陆边缘地区的海洋地球科学数据。该数据库最早于 2003 年由美国自然科学基金委出资建立, 旨在为美国南极洲项目 (United States Antarctic Program, USAP)、大洋中脊 2000 项目 (Ridge, 2000) 和大陆边缘项目 (MARGINS) 数据和主动源地震数据提供数据管理服务。MGDS 数据库广泛支持固体地球领域的研究, 从洋中脊、俯冲带到热点作用, 再到地质灾害、大陆边缘演化过程、沉积物在陆缘环境的搬运和沉积等不一而足。2005 年, 数据库管理的数据包纳了全球大洋深度数据在内。而自 2010 年起, MGDS 数据库被吸收成为跨学科地球数据联盟 (Interdisciplinary Earth Data Alliance, IEDA) 数据库的一部分。

目前 MGDS 数据库拥有的数据量超过 956000, 容量高达 87.6 TB, 数据来源于 20 世纪 70 年代以来超过 3150 个科研项目。MGDS 数据库的数据主要是科研船只、钻井平台和潜水器等设备和平台获得的一手数据和资料, 还包括衍生的解释数据和支持数据。主要的数据类型包括大洋水深、声纳、洋底照片、主动地震反射数据以及一系列其他的长尾探测数据, 例如原位的温度和化学探测、光学背反射数据等。而解释数据则包括地球物理数据、地图、微地震目录、地震解译、影像拼贴、数据模拟和可视化。此外, MGDS 数据库还兼容了美国自然科学基金资助的其他项目, 如 GeoPRISMS 项目、MARGINS 项目、Ridge 2000 项目、深潜及海岸项目和极地项目, 的数据进行管理。

用户可通过 IEDA 的数据浏览器 (<http://app.iedadata.org/databrowser>) 和网站的数据搜索界面 (<http://www.marine-geo.org/tools/search/>) 查询数据。用户还可通过下载 MGDS 团队开发的可视化和分析工具 -GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org/>) 在客户端查询和下载数据, 并对数据进行初步的分析

和可视化。针对大洋水深数据, MGDS 提供 GMRT Map Tool (http://www.marine-geo.org/tools/maps_grids.php), 允许用户探索 MGDS 数据库的数据并创建用户自定义的全球或区域大洋水深地图。

2.1.3 National Centers for Environmental Information (NCEI)

NCEI (<https://www.ngdc.noaa.gov/>) 数据库隶属于美国海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), 为来自太阳、地球洋底和固体地球环境的数据提供管理服务。其下分支数据库包括全球大洋水深和底形数据库 (Bathymetry & Global Relief, BGR)、卫星观测数据库 (Earth Observations from Space, EOS)、地磁数据库 (Geomagnetic Data & Models, GDM)、海洋地质和地球物理数据库 (Marine Geology & Geophysics, MGG)、自然灾害数据库 (Natural Hazards, NH) 以及空间气候和太阳事件数据库 (Space Weather & Solar Events, SWSE)。对于板块重建而言, MGG 数据库包含重建工作所需的重要数据。MGG 数据库包括以下三方面的数据: (1) 海洋地球物理数据, 包括大洋沉积物厚度、地震反射、大洋重力异常和梯度、被动生源等; (2) 海洋地质数据, 包括地质样品测量数据、大洋地壳年龄网格数据以及大洋钻探数据; (3) 大洋水深和地形数据, 包括大洋水文特征、滨岸海拔数据、多波段水深数据、渔业地图、大洋古水深数据等。

2.2 解释数据库

2.2.1 GEM (Global Earthquake Model) Strain Rate Model

GEM Strain Rate Model (<https://gsrm2.unavco.org>) 的建立最初来源于国际岩石圈计划 (International Lithosphere Program, ILP) 1998 年发起的新项目: 全球应变率分布图 (Global Strain Rate Map, GSRM)。GSRM 项目的目标是基于现今大地测量数据和地质观察数据建立一个自治的全球应变率和速度场模型。GSRM 1.0 版本于 2000 年由纽约市立大学的 C. Kreemer, W.E. Holt 和 A.J. Haines 等人发布, 是一个结合现今地壳运动数据的全球速度梯度向量场数字模型, 能够为研究者探索大陆动力学和定量评价地震灾害提供大量、关键的信息 (Kreemer et al., 2000, 2003)。2004 年后, NASA

(National Aeronautics and Space Administration) 和 ILP 建立全球地震模型基金 (GEM Foundation), 出资并联合内华达大地测量实验室 (Nevada Geodetic Laboratory) 和 NAVSTAR 大学联盟 (UNAVCO) 将 GSRM 1.0 版本进行升级为 GSRM 1.2 版本, 随后在 2013 年又升级为 GSRM 2.1 版本并重新命名为 GEM Strain Rate Model (GSRM v.2.1)。

新模型相对于旧模型在数据量上有巨大的扩充, 并且有大量的大地测量和地壳速度场研究的文章作为数据库的基础, 能够为地震灾害研究、建立板块运动模型、约束岩石圈和地幔动力学提供重要的信息 (Kreemer et al., 2014)。GSRM 2.1 版本数据库综合了 22415 个大地测量站点、18536 个水平速度测量站点以及 233 篇文献的数据, 用户可以通过 GEM Strain Rate Model 官网查看和下载应变率和速度场的观测点地图和数据, 也可以使用网站提供的可视化工具 (Voyager: ILP GSRM) 建立和查看用户自定义地图范围内的应变率和速度场矢量数据并以文本格式的形式下载该区域内的数据。同时, 用户还可以结合其他的数据库, 例如哈佛大学的 CMT 数据、以及 World Stress Map 数据库, 创建在 GSRM 中运行得到的数据可视化地图。另外, 用户还可以通过联系 Corne Kreemer 教授本人获取文本格式的数据和模型结果。GSRM 数据库经过 2 代的更迭, 已经解释得到了大量的全球岩石圈板块应变状态数据并提供了方便的下载渠道。该数据库的数据来源于全球大量的感测站和相关的研究文章, 数据源可靠。值得注意的是, 目前该网站已经停止维护, 不再更新数据和可视化、下载工具。虽然用户仍可以从数据库下载相关数据, 但数据更新的停滞和网站维护的终止将导致获取数据的途径、数据格式应用以及数据的时效性等方面的堵塞和降低。同时, 由于该数据库记录、解释的是现今岩石圈板块的应变状态, 而非地质历史时期的板块应变速率和方向, 因此该数据库可以作为现今岩石圈板块运动状态的展示和部分板块重建结果的一个现今约束条件, 而不能作为直接的数据用来重建地质历史时期的板块格局和运动模型。

2.2.2 GEM Global Active Faults

GEM Global Active Faults 项目在 GEM 基金资

助下建立的综合性数据库, 整合了全球范围内主要的活动断层的特征信息, 为地震灾害评价、地震学研究以及教育提供数据支持。Global Active Faults 数据库的建立和维护由 GEM 灾害团队负责。该数据库主要由 GIS 数据构成, 以及少量的属性数据和元数据 (包括地层几何形态、运动学特征、滑动率、断距等), 可用于地震灾害模拟和板块边界重建等研究工作。Global Active Faults 数据库属性列表的数据类型主要分为 3 种: tuple、integer 和 string。tuple 数据类型为浮点型或整数格式, 代表活动断层的连续随机变量, 如断层滑动率等。Integer 数据类型在数据库中作为类型变量存在, 主要用来标示数据的可信度, 如“1”代表极为可信, “2”代表中等可信, “3”则代表不可信。String 数据类型则用于数据库中的属性描述。数据库提供 4 种下载文件格式, 包括 GeoJSON 文件、GeoPackage 文件、KML 文件和 ESRI ShapeFile 文件, 用户根据自己的可视化平台选择下载格式, 如谷歌地球平台使用 KML 文件, ArgGIS 平台则可使用包括 KML、ShapeFile 和 GeoPackage 在内的文件, QGIS 平台推荐使用 GeoJSON 文件。除了数据下载之外, Global Active Faults 数据库还提供在线交互式可视化工具, 允许用户直接在地图上浏览、查询活动断层的数据 (<https://blogs.openquake.org/hazard/global-active-fault-viewer/>)。另外, 用户还可在 GitHub 网站的相关页面 (<https://github.com/GEMScienceTools/gem-global-active-faults>) 下载所有的数据文件、浏览工具和说明文档。

GEM Global Active Faults 数据库与 GSRM 数据库一样, 展示的是现今地球表层活动断层的信息, 而不涉及地质历史时期的断层活动状态、展布特征等, 因此同样无法作为直接的约束数据输入板块重建中, 而只能作为评价重建结果和模拟结果的一个指标。在数据库的质量和可靠程度方面, 由于该数据库主要使用 GIS 数据, 因此其所展示的断层位置具有较高的精度。同时数据库内还挂载包括断层几何形态、滑动率等属性数据, 对断层的活动特征也具有较完整的描述。最重要的是, 该数据库还为用户提供了数据可信度的指标, 使用户能够在不同的研究目的指引下选择相应质量的数据进行下载。

2.2.3 LITHO1.0

LITHO1.0 (<https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/litho1.0.html#surfcodes>) 是一个描述地球地幔顶部和地壳结构的数据库, 随着数据库的不断更新和数据扩充, 其数据涵盖的地球圈层扩展到地表的水圈、冰层、上部沉积地层、中部沉积地层和下部沉积地层, 以及地球深部上地幔部分的岩石圈地幔(盖)、软流圈地幔以及 ak135(软流圈之下的深部结构)(Pasyanos et al., 2014)。LITHO1.0 在 2014 年由 LLNL (Lawrence and Livermore National Laboratory) 的 Michael Pasyanos、IGPP (Institute of Geophysics) 的 Guy Masters、Gabi Laske 和 Zhitu Ma 创建并进行维护和更新。该数据库通过横向将地球表面划分为 1° 为单元的网格和垂向将地球圈层划分为一系列地球物理识别层, 如水圈、冰层、沉积盖层、结晶地壳、岩石圈盖和软流圈等, 来定量地将地球上地幔之上的结构参数化 (Pasyanos et al., 2014)。LITHO1.0 模型的建立是基于 CRUST1.0 的基础进行修改, 以此在很宽的频段 (5~40 mHz) 内容纳高精度的表面波扩散地图 (如 Love, Rayleigh, group, phase 等)。模型的主要数据为关键的岩石圈参数, 例如平均地壳波速、地壳厚度、上地幔波速以及岩石圈厚度等, 同时将模型参数与一系列关于区域或全球尺度的地球浅部 (上地幔之上) 结构的研究结果进行比对, 发现更为可靠的参数载入数据库。

目前, LITHO1.0 提供 3 种模型和数据下载格式。第一种是在 IGPP 官网 (<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/litho1/litho1.0.tar.gz>) 下载 LITHO1.0 模型的 C++ 原始代码, 安装到本地计算机后就可查看、操作和下载模型相关数据。第二种模型是搭建在由 Sandia 和 Los Alamo 国家实验室开发的地壳和地幔三维层析成像模型 GEOTESS 之上, 可登录其官网 (www.sandia.gov/geotess) 下载 GEOTESS 模型, 随后可在该模型上运行 LITHO1.0 进行查看和数据提取。第三种模型是运行在 ArcGIS 软件平台之上, 由 Statoil 的 Stoney Clark 创建并发布, 用户可登陆其网站 (<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/litho1/LABvel.mpk>) 下载该 LITHO1.0 模型并运行于本地的 ArcGIS 平台。另外, LITHO1.0 团队还同时发布了其用于构建模型的地震表面波数据和源代码以

及部分频段的表面波扩散地图供用户下载。

LITHO1.0 数据提供的全球地幔顶部、地壳以及水圈的定量化描述数据, 是利用板块重建结果进行地球动力学模拟过程中的重要参数。数据库所涵盖的数据具有高精度、多维属性的特点, 同时该数据库对原始数据的解释也随着地球物理模型的改进和新技术的使用而不断更新, 并能够与新的研究结果进行比对, 引入更新、更可靠或者更准确的解释方法对数据进行解释并将旧的解释数据和模型进行替换。这种数据库的更新和维护能保证解释数据的可信度。不过 LITHO1.0 最近的更新时间为 2016 年 1 月, 说明可能已经停止维护和更新。目前数据和模型仍可正常下载。

2.2.4 Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)

IRIS (<https://www.iris.edu>) 是一个由全美超过 120 所高校所组建的非营利组织, 为全世界地球科学研究提供地震数据查询、存储和管理平台, 最早在 1984 年由美国自然科学基金委出资组建。IRIS 的主要目标是: (1) 提供地震和其他地球物理数据协助震源和固体地球属性的研究; (2) 为数据格式和操作提供统一的标准, 推动地震和其他地球物理数据和知识在地球科学领域的交换和沟通; (3) 促进 IRIS 成员以及其他机构和组织之间的合作, 从而提高地震研究和教育的水平, 拓宽地球科学研究方向的多样性, 从而更好地在普通公众之间传播地球科学知识。

IRIS 数据库提供的数据类型包括以下四种: (1) 时间序列数据 (time series data), 又称波形数据 (waveform data): 由传感器实时记录下来的一系列测量数据, 是 IRIS 数据库主要存储和分析的数据类型。(2) 事件数据 (event data): 时间数据为地震以及其他地震相关事件提供信息, 包括地震事件发生的时间、地点等。(3) 元数据 (metadata): 元数据包括 IRIS 数据库地震数据来源地震站点和仪器信息。(4) 历史数据 (historical data): 历史数据指 IRIS 数据库中对未电子化的文献、档案等纸质记录进行扫描而获得的数据。

IRIS 针对不同的数据, IRIS 数据库提供了不同的数据查询工具和下载工具。时间序列数据主要通过网站下载和电子邮件获取方式, 相应

的下载工具为 BREQ_FAST (批量查询/下载工具, 用户通过邮件查询数据后借由 FTP/HTTP 通道 (https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/manuals/breq_fast/) 传输数据以及 SeismiQuery/Wilber3 (通过网页提供多种交互操作界面获取数据库数据, <https://ds.iris.edu/SeismiQuery/> 和 <https://ds.iris.edu/wilber3/>)。此外, 用户还可以通过第三方工具获取 IRIS 数据库的时间序列数据, 包括 SAC (Seismic Analysis Code, 一款专为时间序列数据研究而设计的交互式软件, <https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/software/downloads/sac/>)、JWEED (基于 Java 脚本的数据获取软件, <https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/software/downloads/jweed/>) 和 SEEDLink (一款传输实时数据的软件, <https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/services/seedlink/>)。而元数据则主要通过网页下载工具在 IRIS 数据库进行下载, 使用的网页下载工具包括 Metadata Aggregator (提供所有地震监测站点和网络的列表, <https://ds.iris.edu/mda/>)、GMap (在交互式地图上展示地震监测网络, <https://ds.iris.edu/gmap/>) 以及 BUD (实时提供附近地震站点信息, <https://ds.iris.edu/data/bud/>)。时间数据和历史数据则通过 IRIS 网站提供的数据浏览器 Interactive Earthquake Browser (IEB, <https://ds.iris.edu/ieb/>) 进行展示和下载。

IRIS 数据库解释并存储了现今和有地震测量仪器以来的地震相关数据, 为板块构造重建工作提供关于板块边界位置、几何形态、断裂性质等基础信息, 但也受限于其采集数据的历史, 无法为重建地质历史时期的板块格局、运动状态提供信息, 更多的仍是作为重建和模拟结果的现今约束。IRIS 数据库提供全球地震数据和解释结果的实时更新, 数据来源于全球地震网点同时向全球研究人员提供方便的数据获取途径, 并提供研究人员将解释数据上传至网站的工具, 使网站的地震数据解释模型也能活得最及时的更新。因此该网站的数据和模型都具有很高的可信度。

2.2.5 SubMachine

SubMachine (<https://www.earth.ox.ac.uk/~smachine/cgi/index.php>) 数据库集成了一系列全球尺度的层析成像数据模型, 为用户提供模型的交互式可视化、分析和量化对比服务。该

数据库由英国牛津大学的一个工作小组建立并维护, 负责人为 Kasra Hosseini 教授。SubMachine 数据库内的层析成像数据包括层析成像深部切片模型 (tomography depth-slices)、层析成像剖面 (tomography cross-sections)、地震波速度直方图、地震波速度-深度曲线图和 Crust 1.0 模型。该数据库目前整合了 40 个地震层析成像模型 (其中包括 16 个地震 p 波层析成像模型、21 个地震 s 波层析成像模型和 3 个平均模型)、3 个板块重建模型、2 个全球热点数据库、1 个剪切波分离数据库和 1 个超大火山活动区数据库。网站提供交互式的可视化数据查询工具 (图 2.x), 方便用户查询、下载数据。用户只需勾选查询窗口右侧菜单栏中相应的模型选项和剖面位置、深度, 可视化窗口即实时显示模型的二维数据剖面。用户还可调节模型参数、地图投影类型以及颜色条来自定义数据图并进行下载。网站下载的数据格式包括 JPEG 图片格式和可编辑的 PDF 格式、TIFF 格式、raster 格式等, 方便用户导入不同的板块构造重建软件和制图软件, 如 GPlates、GMT (Generic Mapping Tools) 等, 进行后续处理。

层析成像所展示的是现今地球内部圈层的结构特征, 因此也是板块重建和地球动力学模拟结果的一个重要而可靠验证。SubMachine 数据库提供了多种 (40 个) 层析成像模型供用户对比使用, 同时还提供了内部圈层的地震波特征、地球表面的热点信息以及超大型火山活动信息, 为用户验证板块重建和模拟结果提供多维、交叉的依据。由于该数据库的模型来自于对最新的地球内部结构的研究结果, 并一直根据新发表的文章进行实时更新, 因此其解释模型具有较高的解释质量和可信度。同时, 网站也提供了不同模型之间的对比结果以及对旧模型替换的理由和解释。

2.2.6 The Marine Gravity Map

The Marine Gravity Map (https://topex.ucsd.edu/grav_outreach/index.html) 是加利福尼亚大学 Exploring Ocean Tectonics from Space 项目基于 CryoSat-2 (European Space Agency, ESA)、Jason-1 (NASA)、Envisat (ESA)、ERS-1/2 (ESA) 和 Geosat (US Navy) 这些装备雷达测深仪器的卫星所获得的全球大洋和边缘海地区地球引力细

微差异数据所建立的数据库, 并将这些数据以交互式三维可视化的方式绘制全球大洋重力分布图 (Sandwell et al., 2009, 2014)。The Marine Gravity Map 数据库主要存储测深卫星所获得的三种重力数据, 包括大洋重力异常数据 (marine gravity anomaly)、大洋垂向重力梯度数据 (vertical gravity gradient) 和大洋重力误差数据 (gravity error)。通过 The Marine Gravity Map 数据库, 研究人员可以绘制全球大洋构造, 例如 Sandwell 等 (2014) 利用该数据库并结合已有数据绘制出墨西哥湾下一处停止活动的洋中脊以及南大西洋地下一个不断扩张的裂谷 (图 2), Hwang 和 Chang (2014) 则利用数据库的大洋重力异常数据建立中国南海地区隐藏在巨厚沉积物之下的洋底构造。

数据库的主要贡献者和网站维护人员包括 Scripps 海洋研究所的 David T. Sandwell、悉尼大学的 R. Dietmar Müller、美国海洋和大气局 (NOAA) 卫星测深实验室的 Walter H. F. Smith、Scripps 海洋研究所的 Emmanuel S. Garcia 和欧洲航天局 (ESA) 欧洲航天研究和技术中心的 Richard Francis。数据库网站提供多种支持不同软件平台的数据格式可供下载, 包括谷歌地球平台的 KML 文件 (可用于在谷歌地球上对数据库的三种重力数据进行可视化)、GMT 软件平台的网格化数据格式 (适用于 GMT 软件进行可视化操作) 和 GPlates 平台适用的文件格式 (可用于在线重力数据可视化)。

The Marine Gravity Map 数据库主要解释和存储卫星获得的全球大洋重力数据, 绘制重力分布图。这些数据同样是现今的大洋重力分布状态的

展示, 无法直接应用于地质历史时期的板块重建, 更多的是作为重建和模拟结果的验证手段。但如同上文中提到的 Sandwell 等 (2014) 利用该数据库发现墨西哥湾下一处停止活动的古洋中脊, The Marine Gravity Map 数据库的解释模型可以结合大洋磁异常条带或同位素测年手段厘定地质历史时期的古板块边界。该网站为全球研究员提供数据和解释模型方便的下载渠道, 同时也提供研究人员上传最新解释模型的工具, 能保持数据库中解释模型的时效性和可信度。网站最新的一次大规模更新是在 2015 年 3 月, 目前仍正常提供给用户进行免费数据查看和下载。

2.2.7 The Global Seamount Database (KWSMTS v0.1)

The Global Seamount Database (<http://www.soest.hawaii.edu/wessel/smts/>) 是基于上述 The Marine Gravity Map 数据库中的大洋垂向重力梯度网格数据 v16.1 而获得的全球海山数据库, 里面包含现今全球海山的分布位置、分布密度、深度、年龄、重力异常数据以及重力梯度等数据 (Wessel 1997, Wessel and Lyons 1997)。现今的全球海山数据库版本为 KWSMTS v0.1, 数据库中包含有全球各板块内部共 11882 个海山的相关数据 (Kim and Wessel, 2011; Wessel et al., 1997, 2010, 2015)。The Global Seamount Database 由韩国首尔国立大学的 Seung-Sep Kim 和夏威夷大学莫纳分校的 Paul Wessel 创建和维护、更新。早期版本的数据库提供包括 ASCII、Excel 和 KML 三种数据格式下载, 详细的数据格式介绍和使用见 (Wessel et al.,

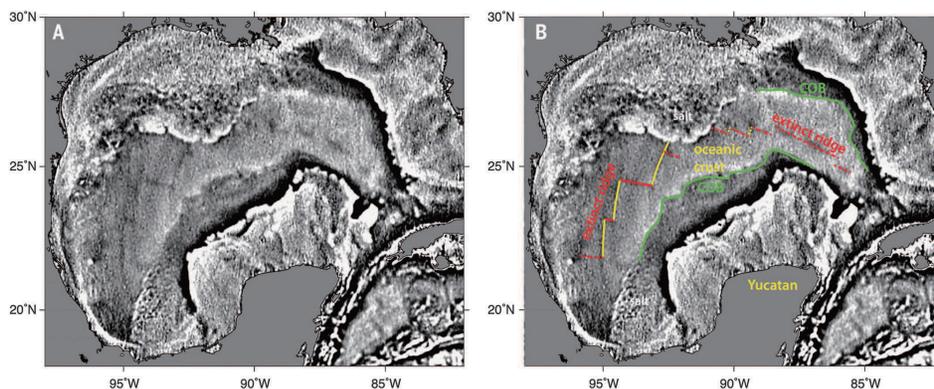


图2 墨西哥湾底部隐藏的大洋扩张脊 (Sandwell et al., 2014)

Fig. 2 Hidden spreading ridge beneath the Gulf of Mexico (Sandwell et al., 2014)

2010)。目前最新版本的数据库不再支持 Excel 格式的文件下载。

海山的分布通常代表现代或古代大洋板块内热点的位置,通过海山的分布位置以及同位素测年数据可以揭示相对固定热点的大洋板块的运动方向和速率,如夏威夷的皇帝海岭所揭示的太平洋板块在新生代的运动轨迹。因此 KWSMTS 数据库可以为板块构造重建提供不同地质历史时期大洋板块相对运动的轨迹和速率。同时,由于 KWSMTS 数据库的数据是根据 2.2.6 节的 The Marine Gravity Map 数据库中的重力异常数据解释得到,因此相对大洋测深计划,能够揭示更多隐没在大洋之下的海山,并提供更精确的海山位置、范围、内部结构等信息。

2.2.8 The Global Seafloor Fabric and Magnetic Lination Data Base Project (GSFML)

全球海底构造和磁条带数据库 (<http://www.soest.hawaii.edu/PT/GSFML/>) 是由美国自然科学基金委出资联合夏威夷大学莫纳分校和 EarthByte 组织建立,其目的是作为全球洋底构造迹线和地磁等时点的数据集合体,为全球板块重建提供基础数据 (Wessel et al., 2015)。同时,该数据库还存储了已发表的板块运动模型文章中的重建控制点数据。在数据库的后续更新中,维护人员开发了软件自动识别垂向重力梯度模型中的线状洋底构造控制点并将这些控制点数据整合到数据库中,随着垂向重力梯度模型的不断更新,该数据库中的控制点和相应的洋底构造模型也会随之更新 (Matthews et al., 2011, 2016)。目前数据库中主要包含 3 类数据。

(1) 不断演化的洋底构造线 (<http://www.soest.hawaii.edu/PT/GSFML/SF/index.html>), 通常以 GMT/OGR、KMZ 和 ESRI ShapeFile 文件格式存储,主要的数据处理软件为谷歌地球和 GMT 制图软件,搭载 GSRML 配件。

(2) 已发表的地磁条带控制点 (<http://www.soest.hawaii.edu/PT/GSFML/ML/index.html>), 以大洋盆地为单位组织数据。同样的,这部分数据也存储为 3 种文件格式,同上一数据类型。此外,这部分数据也提供可视化的 PNG 图片格式,展示全

球洋底地磁条带控制点的分布情况。用户也可以分区域,如大西洋地区、印度洋地区等,下载区域内的地磁条带控制点数据。

(3) 从已发表的板块运动模型中获得的参数。该数据类型包含所有已发表的大洋地磁异常和洋底断裂控制点,这些数据以 Hellinger 软件的输入文件格式储存,同时也包括该软件的输出文件和参数文件,方便用户重建这些板块运动模型 (Seton et al., 2014)。这部分数据主要的处理软件为 (Kirkwood et al., 1999) 开发的数据处理软件 (<http://www.soest.hawaii.edu/PT/Chang.zip>)。用户根据所需的数据,点击相应的数据库链接进入下载页面下载数据和处理软件。

洋底的构造迹线,如转换断层等,以及磁异常条带是确定地质历史时期板块相对运动的欧拉极坐标和角速度的关键地质数据,因而在板块构造重建中扮演重要的角色。GSFML 数据库汇聚了全球目前为止所获得的最全面的洋底磁异常条带数据,并利用 The Marine Gravity Map 数据库中的重力异常和重力梯度数据解释、提取洋底构造控制点,绘制高精度全球洋底构造分布图。同时,利用已发表的全球板块运动模型来验证这些数据的可靠性和精度。因此,随着重力数据库的不断更新和新的全球板块运动模型的更迭,GSFML 数据库的解释模型也将不断提高其可信度和精度。

2.2.9 Large Igneous Provinces (LIPs) record

LIPs record 数据库是由 LIPs Commission 所建立和维护、更新的关于编录全球广泛分布的基性侵入事件并将其与地幔柱坐关联的数据库。LIPs Commission (<http://www.largeigneousprovinces.org/>) 是国际火山学和地球内部地球化学协会建立的、旨在推动大火成岩省领域研究并促进地质学家国际合作和交流的机构,该机构始建于 1993 年,目前由 Richard E. Ernst 领导。LIPs Commission 目前专注于建立 LIPs 在时间和空间上的分布、地外星球上的 LIPs 研究以及 LIPs 的成因,并建立相关的数据库和研究课题,LIPs record 正是其中的一个数据库,专注于收集、数据化、存储和可视化 LIPs 在时间和空间上的分布特征,包括频率、超级地幔柱事件、与气候之间的关系(时间)和间

距、与隆升事件的联系、与裂谷作用 / 超大陆裂解之间的联系 (空间) (Ernst et al., 2005)。LIPs record 数据库中包含了全球超过 210 个大火成岩省的各项特征, 包括大火成岩省事件的名字、形成时间、位置、规模、图片以及相关的文献。数据库的下载格式包括 Excel 和 Access 文档, 用户可免费在官网 (<http://www.largeigneousprovinces.org/downloads>) 进行下载。同时, 该数据库还提供各个时期大火成岩省的全球分布地图, 以时间段编排, 包括 >2500 Ma, 2000~2510 Ma, 1500~2000 Ma, 1000~1500 Ma, 500~1000 Ma 以及 0~500 Ma (图 2.x) (Ernst and Youbi, 2017)。数据库除了编列大火成岩省的特征数据, 还依据其与地幔柱头部演化过程之间的关系对大火成岩省进行分类, 分为 A 类 (与地幔柱具有可信的相关性)、B 类 (与地幔柱存在可能的相关性) 和 C 类 (与地幔柱存在弱相关性)。

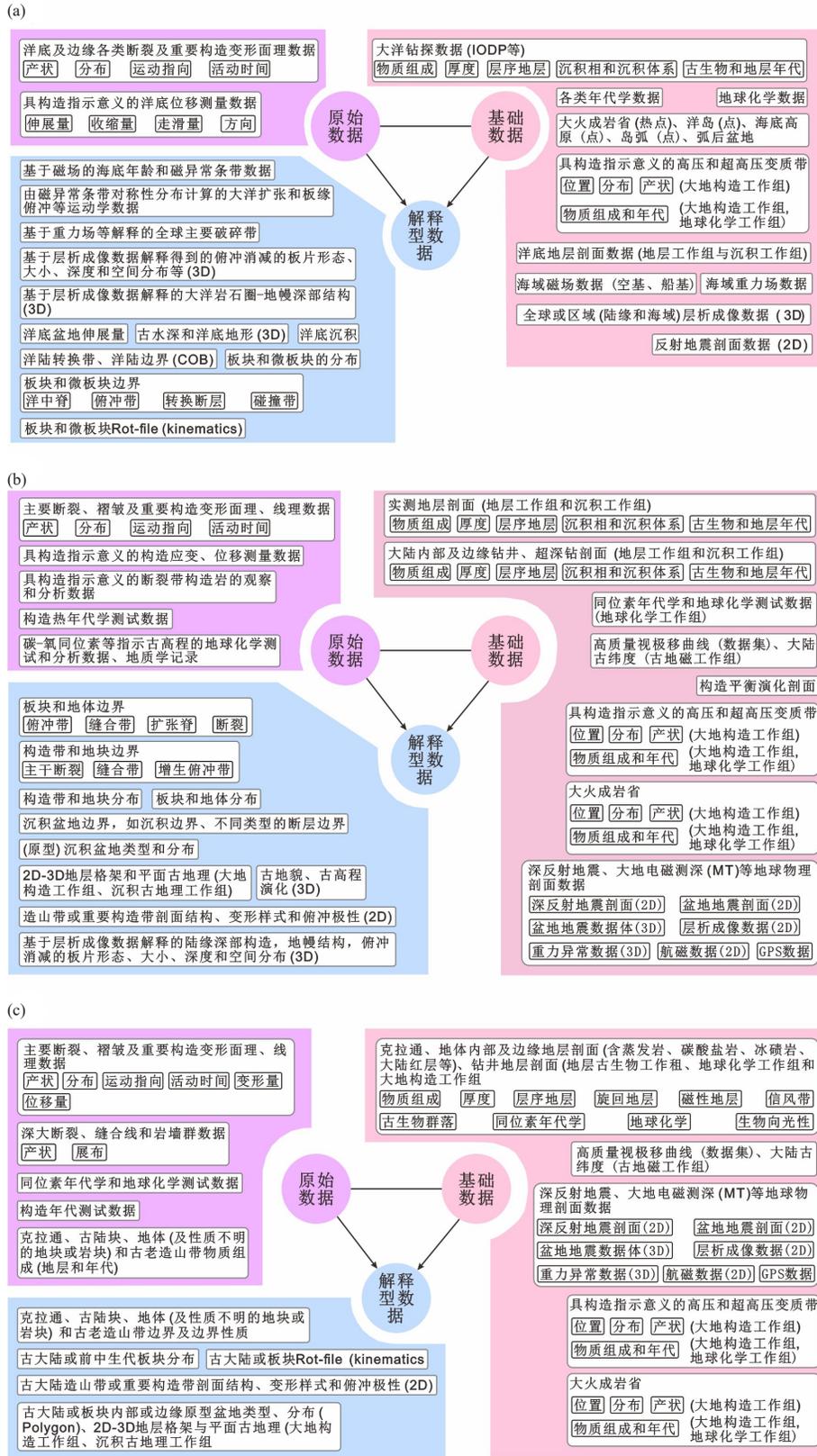
目前 LIPs 数据库完全是一个对研究结果的综合、数据化, 并提供相应的数据存储和可视化的平台, 其数据来源都是已发表的文献。因此该数据库的内容会随着越来越多的大火成岩省研究文章的发表而逐渐丰富, 但对于数据的筛选、质量评价和可信度并没有给出明确的界定。因此研究人员在使用该数据库的时候需要自行建立一个评价体系对其中的数据进行取舍。而对该数据库提供的基于大火成岩省数据进行解释得到的结果, 可能随着数据的不断增加而发生改变, 例如与地幔柱头部演化之间的关系分类。

2.3 DDE 大地构造学科数据库建设前景

大地构造学作为一门综合性极强的地质分支学科, 其研究需要融合地质学、地球物理学等学科的数据作为支撑。虽然目前国际上有数目众多的专业数据库为大地构造学, 尤其是板块构造重建研究, 提供数据支持, 但这些数据库由不同的专业机构和组织所开发、运行和维护, 缺乏一个统一的平台对不同数据库的数据进行整合、交互处理和可视化。同时, 国内研究人员在最近二十年来也积累了大量的大地构造研究相关数据, 却一直没有一个专业的数据库对这部分数据进行存储和管理, 导致数据难以在研究人员之间流动, 限制高水平、综合的研究成果的产出。

DDE 项目的技术、资金、人员等平台优势和 Gplates 软件为我们建设一个综合、统一的大地构造数据库提供了契机。为建设统一的大地构造数据库, 我们首先应该建立完善的、由顶至底的大地构造知识体系, 提供数据库内在的学科逻辑框架; 其次, 在知识体系的指导下, 需要对所需数据对应的、已有的数据库有充分的了解。前面两个小节所描述的数据库多为地球物理学的观测和解释数据库, 对于板块构造重建工作更为重要的数据, 如古生物数据、古地磁数据、古地理数据、岩浆岩数据等描述较少。而 DDE 项目旗下完整的工作组体系则为我们寻找、掌握这些数据库提供极大的便利。不同的工作组之间可以相互交流各自领域的专业数据库、为建立统一的数据库提供意见和建议; 在此基础上, 下一步的工作重点就是基于 Gplates 软件平台建设开源数据库, 存储来自于不同数据库、文献等来源的数据, 并将这些海量数据融合到 Gplates 平台, 提供上传和下载数据、数据可视化交互操作以及多类型数据处理结果导出等功能。

大地构造数据库的建立是基于 Gplates 平台, 因此其中最为关键的是确定该数据库需要整合的数据及其在 Gplates 平台上对应的数据类型。如上所述, 板块构造重建所需的地质学和地球物理学的数据主要为 2 个大类: 原始数据和解释型数据, 其中原始数据又包含有基础数据 (图 3)。而目前 Gplates 平台能够整合的数据类型则包括以下几种: 几何数据、空间数据和运动学数据。具体的, 几何数据又可分为矢量数据和栅格数据。矢量数据包含一系列构造点状数据 (如构造年代测试点、同位素年代学和地球化学测试点、地层剖面点和化石点、钻井剖面点等)、线状数据 (如俯冲带、缝合带、断层、线理等) 和多边形数据 (如古老造山带、大火成岩省、岛弧、洋底高原、盆地、活动的板块等) (图 3)。栅格数据可分为 grid (2D) 和 Cell (3D), 具体包括构造图、高分辨率遥感影像、航磁图像、重力异常图、地震数据体 (3D) 和层析成像数据体 (3D)。另一个数据大类是空间数据, 从维度上可以分为 1 维 (1D) 到 4 维 (4D, 包括时间维度) 的数据类型, 而从功能上则可以分为定位、定性 (即定 ID)、定时 (随时间的变化而变化的数据, 即 Rotfile)、空间拓扑关系 (如构建各



(a) 重建全球中—新生代 (<230 Ma) 洋底构造所需的数据; (b) 重建全球中—新生代 (<230 Ma) 大陆构造所需的数据; (c) 重建全球前中生代 (>230 Ma) 大地构造所需的数据

图3 基于Gplates平台的大地构造数据库相关的数据

Fig. 3 Data for construction of Gplates platform-based tectonic database

个点之间的运动场和变形场、数字化的地层剖面、测井曲线的地层对比等)这4种数据类型。数据库的建设需要考虑将整合的数据转化为上述的数据类型,以便在GPlates平台上进行管理和操作。

3 基于GPlates软件平台的板块构造重建实例

目前的板块构造重建分为三个不同的层次,分别是重建刚性板块的运动模型、重建板块变形过程以及重建板块俯冲过程以及深部地幔活动(Seton et al., 2012; Liu et al., 2017; Ma et al., 2019; Müller et al., 2019)。针对这三个不同层次的板块重建工作,笔者例举最新的研究成果展示如何基于GPlates软件平台利用全球巨量的地质、地球物理、地球化学等数据重建板块运动历史、恢复板块变形过程以及揭示板块俯冲作用与深部地幔活动的联系。

3.1 全球板块相对运动历史重建

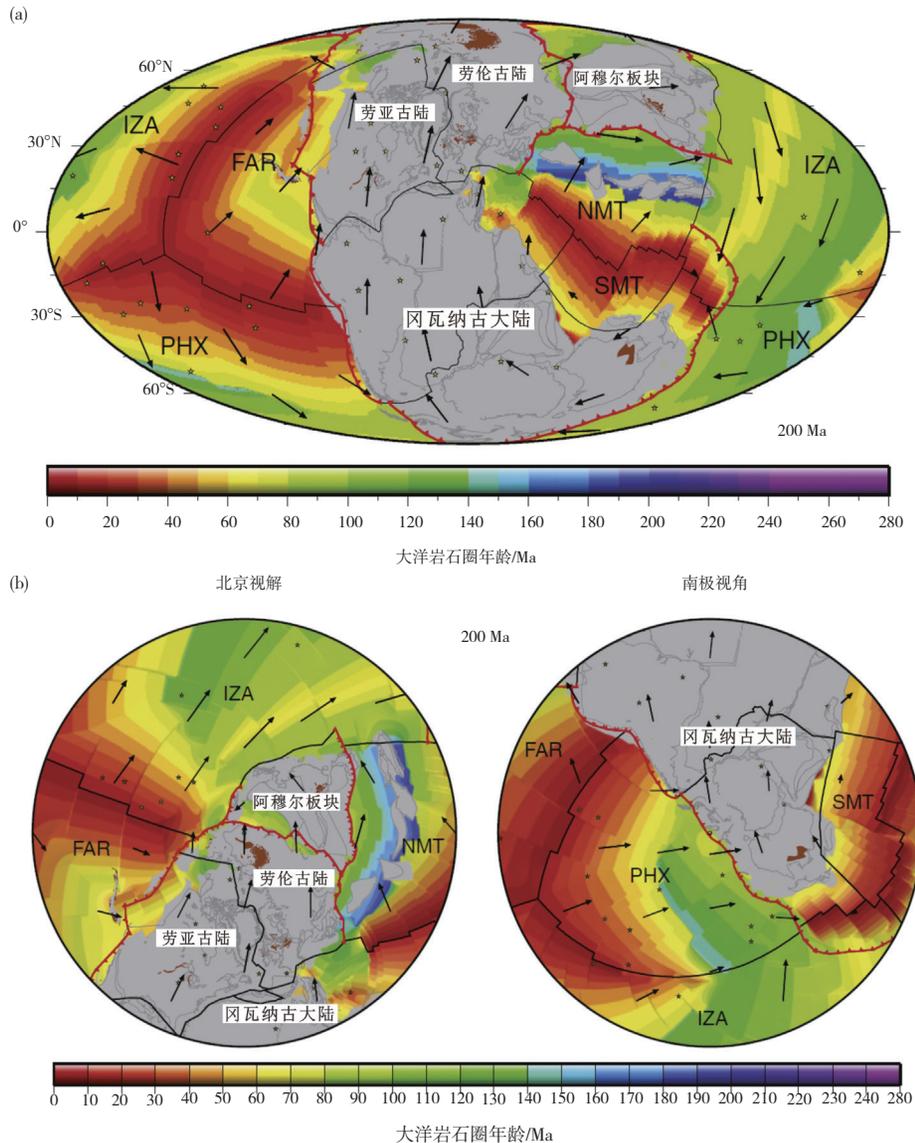
GPlates软件平台的一个重要应用就是将相关的地质和地球物理数据进行交互式整合,产生全球(刚性)岩石圈板块的相对运动模型,从而重建时间序列上的板块运动历史(Müller et al., 2018)。而用于约束该类板块重建工作的数据包括洋壳地磁异常,重力异常数据解释得到的全球海山分布和洋底构造线,古地磁数据,全球大火成岩省,蛇绿岩,大型活动断裂带等(Seton et al., 2014)。传统的全球板块运动模型通常以某个地质时间的静态重建图为样式,缺少描述板块之间相对运动的数字旋转模型以及随时间演化的板块边界结构。而基于GPlates软件平台重建得到的全球板块运动模型具有描述板块相对运动的旋转文件(rotation files),可以通过一系列连续封闭的板块多边形的演化真实体现板块本身的动态性质(Gurnis, 2012),允许计算地质历史时期板块的运动速度(Zahirovic et al., 2015),能够准确评估板块规模随时间的变化(Morra et al., 2013),将全球板块运动与全球深部动力模型联系起来(Shephard et al., 2012)。Seton等(2012)重建了早侏罗世(约200 Ma)到Pangea超大陆裂解期间的全球板块模型(图4),基于这个模型获得了200 Ma以来的全球板块运动速率和详细的板块作用事件

(Zahirovic et al., 2015)。Müller等(2013)通过中—新生代全球洋底板块年龄分布重建获得不同时期大洋中脊扩张的速率及其变化,指示超大陆的裂解、古老洋壳岩石圈的俯冲消亡和相应的大洋海水物理—化学性质的转变,进一步探讨了全球地壳增生速率的变化。这两个全球板块模型都包括了完整的大洋岩石圈年龄分布重建结果,能够用于探索地质历史时期的全球气候事件和大洋化学性质波动与板块构造运动之间的联系。(Müller et al., 2013)。基于Seton等(2012)的板块重建工作,Müller等(2016)重建了230 Ma以来的全球板块相对运动模型是目前最新的、时间覆盖范围最广的深时板块运动模型。该模型基于GPlates平台构建,主要利用了以下几个方面重建数据。

(1) 相对板块运动参数(通常是欧拉极)描述了板块之间的相对运动关系,是通过全球地磁异常点计算得到的一系列关于板块旋转轴和位移量的数据(Kirkwood et al., 1999)。该模型将非洲板块作为其他板块运动所参照的“锚点”板块,所有的板块运动描述都是基于其相对非洲板块的运动状态,而小型板块(如那兹卡板块等)又是相对于大型板块(如欧亚板块等)进行运动的。这种“树状”板块相对运动层次是GPlates平台有别于传统板块重建软件的一个重要优势。另外,在经历复杂变形作用的地区,如东南亚地区,板块运动重建需要整合更多的地质数据,包括构造、岩石学、古生物学、地层学等数据,和地球物理数据,包括地磁和重力异常、地震、古地磁、地幔层析成像等数据。

(2) 洋底扩张等时线是在GPlates平台上结合已发表的地磁异常数据(Seton et al., 2014)和新近通过重力异常数据解译得到的全球断裂分布数据(Wessel et al., 2015)计算得到。

(3) 大陆裂谷重建是作为洋底扩张作用之前的运动模型补充数据,用于描述超大陆裂解开始至新生洋壳扩张之间的一段时期(>10 Myr)板块之间的相对运动状态。与洋中脊重建不同,大陆裂谷重建需要的数据为裂陷期岩石圈伸展量、地震剖面、裂陷期沉积和火山活动年龄、伸展速率以及伸展方向。大陆裂谷重建的数据主要来自针对Pangea超大陆裂解的研究,包括大西洋裂谷作用



FAR: 法拉隆板块 (Farallon Plate); IZA: 伊佐纳歧板块 (Izanagi Plate); NMT: 北中特提斯板块 (North Meso-Tethys);
 PHX: 凤凰板块 (Phoenix Plate); SMT: 南中特提斯板块 (South Meso-Tethys)

图4 Seton 等 (2012) 重建的200 Ma的全球板块运动模型 (修改自Seton et al., 2012)

Fig. 4 Global plate reconstruction at ca. 200 Ma (after Seton et al., 2012)

(Kneller et al., 2012; Heine et al., 2013; Barnett-Moore et al., 2017) 和澳大利亚与南极的裂解 (Williams et al., 2011)。

(4) 静态板块多边形数据勾绘了现今全球板块和地块的格局, 这些多边形主要用于将地质和地球物理数据分配到各个板块之中, 并根据具体的板块运动模型对数据进行重建。

相比于 Seton 等 (2012) 的模型, 这个新的全球板块运动模型融合了更多新数据、对多个地区的重建结果进行了升级和提高, 包括北极地区、

加勒比地区、北大西洋地区、阿拉伯-非洲-索马里地区和印度洋地区。根据这个新的板块运动模型计算得到全球主要大陆板块 230 Ma 以来的平均运动速率 (图 5), Müller 等 (2016) 发现在 140~120 Ma 全球范围内的平均绝对板块运动速度达到 9~10 cm yr⁻¹, 远超平均 5~6 cm yr⁻¹ 的全球板块运动速率, 可能受该时期全球范围内大规模的大火成岩省侵位事件驱动而加速运动。而大约 80 Ma 期间的另一期板块运动速度由 6 cm yr⁻¹ 增加到 8 cm yr⁻¹ 的加速事件则可能对应于印度板块向北开始俯冲

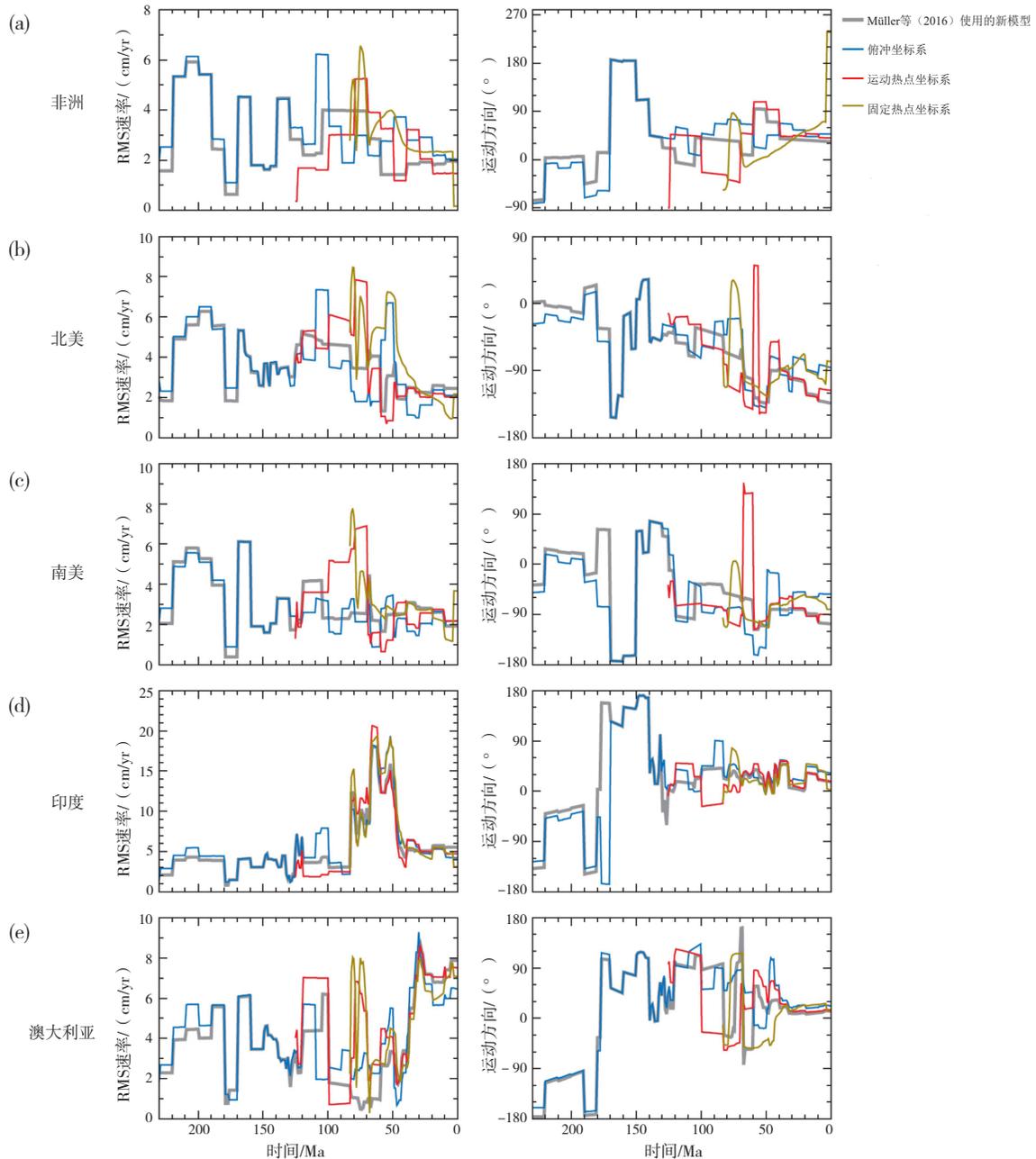


图5 通过全球板块运动模型计算得到的各大陆板块230 Ma以来每10 Myr的均方根 (RMS) 绝对运动速率和运动方向 (Müller et al., 2016)

Fig. 5 Root-mean-square(RMS) absolute velocities and directions of major continents computed in basis of the global plate-motion model with time step of 10 Myr

于欧亚大陆南缘。然而在大约 50 Ma, 全球板块平均运动速率由 6 cm yr^{-1} 下降为 $4\sim 5 \text{ cm yr}^{-1}$ 则可能是印度板块和欧亚板块发生陆—陆碰撞以及西太平洋地区洋中脊 (如 Izanagi 板块—太平洋板块洋中脊) 发生俯冲共同作用的结果。

3.2 区域板块变形重建

传统的板块重建方法将岩石圈板块当成刚性块体, 即板块的内部不允许有变形发生, 来探讨

板块之间的相互运动状态并产生相关的数据, 如板块运动速率等。但板块构造研究内容实际包括岩石圈板块在地质历史时期的运动和变形 (Wessel and Müller, 2015)。虽然板块构造理论认为整个地球表面完全由大小不一的数十个板块拼贴而成, 实际现今地球表面有大约 10%~15% 的区域并不表现为刚性板块, 而发生着广泛、强烈、透入式的变形作用, 包括地壳伸展、挤压以及地块旋转等

(Gordon and Stein, 1992; Kreemer et al., 2014)。现今的板块变形重建主要利用分布在全球各个角落的GPS监测点所获得的数据, Kreemer等(2000, 2003, 2014)综合了GPS测量数据、活动断层数据以及地震监测数据以及全球刚性板块模型建立了全球应变速率模型(GSRM-1及后续的更新版本GSRM 2.1), 用于研究瞬时变形速率与地震灾害的联系以及板块变形的相关问题。

而针对地质历史时期的板块变形重建, GPlates提供了全新的、不同于传统板块重建软件的算法——“连续封闭板块”(CCP), 即在板块边缘独立运动时, 板块多边形能够随着时间推进保持封闭, 从而避免了板块多边形之间出现缝隙和缺口(Gurnis et al., 2012)。通过CCP算法, 用户可以在GPlates软件中对板块变形进行重建, 并将重建结果融入传统的全球板块运动模型(Müller et al., 2018)。在GPlates平台上可以新建、编辑、可视化以及导出使用CCPs算法的重建模型。利用“连续封闭板块”的概念, Gurnis等(2018)在GPlates平台上整合已发表的变形数据重建新生代北美西部加利福尼亚地区的板块变形并将重建结果导入全球板块运动模型中(图6a, b)。利用重

建结果, GPlates软件可以计算得到北美西部加利福尼亚地区在Farralon板块俯冲期间的有限应变速率(图6c, d)。针对太平洋西部俯冲带西侧东亚地区中生代以来复杂的板块俯冲作用和大陆变形过程, Liu等(2017)基于最新的全球板块运动模型(Seton et al., 2012; Müller et al., 2016)对200 Ma以来西太平洋俯冲作用以及东亚大陆增生、碰撞和区域变形作用进行“深时”重建(图7)。这个基于GPlates的东亚变形重建包括三以下个步骤: (1) 基于构造平衡剖面恢复分析得到的5阶段变形, 并对变形进行应变恢复; (2) 基于地质和地震层析成像资料约束西太平洋俯冲和陆缘增生过程; (3) 板内变形运动学重建, 包括创建变形区和无变形块体、变形对象(如断层、褶皱等)的逐步回撤、在变形三角网格中插入伸展应变率以及正演计算累积应变标志的有限应变。

地球表面板块的格局和运动是板块-地幔耦合作用以及地幔对流演化的内在体现, 因此对东亚地区进行板块变形重建可以揭示中生代以来西太平洋俯冲作用与深部东亚大地幔楔对流作用的关系(Liu et al., 2017)。重建结果显示, 东亚陆缘200 Ma以来经历多期次、不同性质、不同方向的

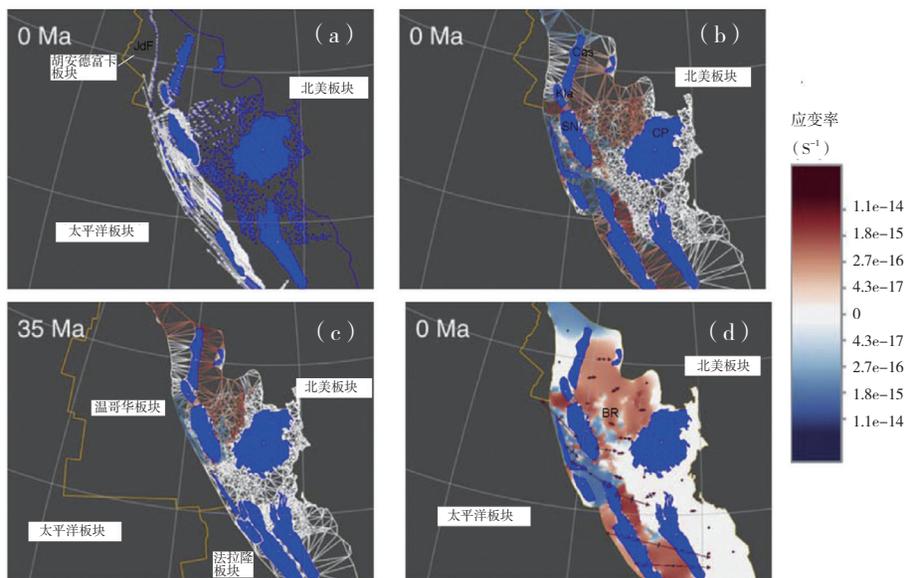


图6 使用GPlates 2.1变形网络重建的北美西部36 Ma以来的板块构造变形和计算得到的应变速率状态 (Gurnis et al., 2018)
Fig. 6 Reconstruction of western North America from 36 Ma to present using GPlates 2.1 deforming networks and the calculated strain rate of particular strain markers (Gurnis et al., 2018)

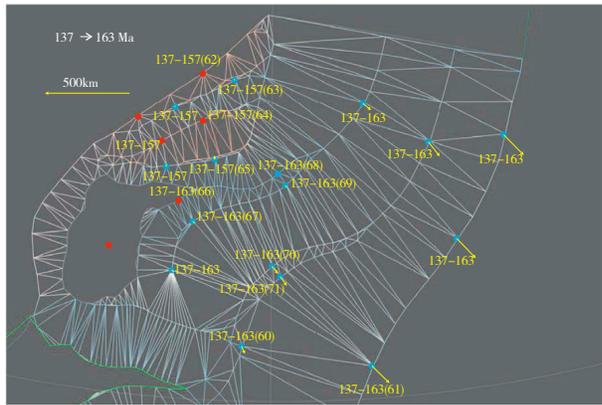


图7 东亚变形区137 Ma的变形网格 (Liu et al., 2017)
Fig. 7 Network maps of the East Asian deformation zone at 137 Ma (Liu et al., 2017)

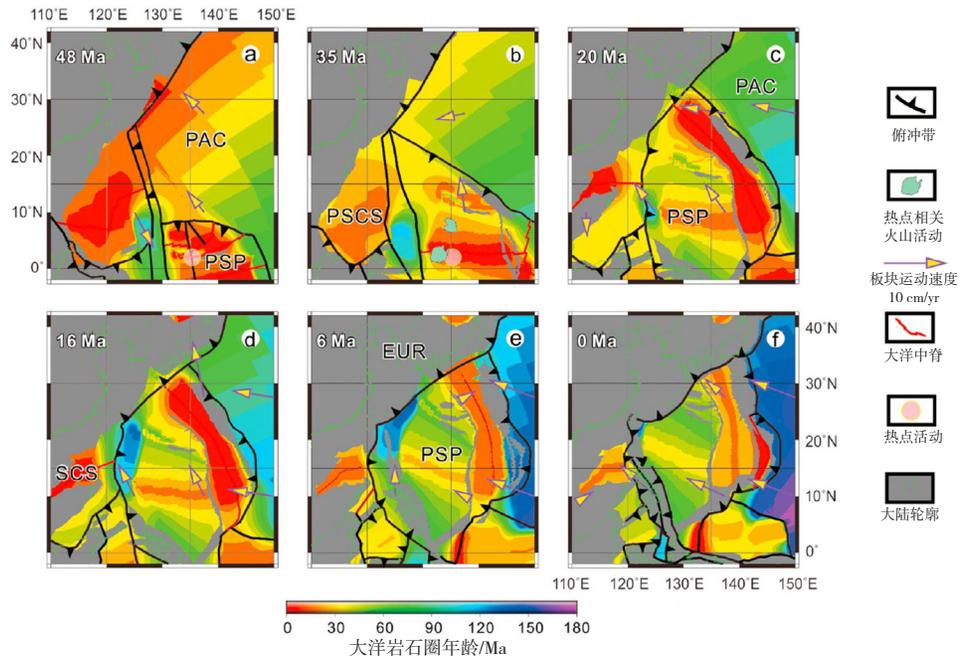
板块构造活动及相对应的区域构造作用, 表现为伸展和挤压作用的交替以及不同构造的叠加。进一步地, 这些构造活动暗示了西太平洋洋壳板块俯冲模式发生变化, 由侏罗纪期间 (200~137 Ma) 的前进式平板俯冲作用转变为后期 (137~128 Ma, 130~90 Ma 以及 ~60 Ma) 的海沟后撤高角度俯冲作用。

3.3 板块俯冲过程重建与深部地幔活动

目前, 越来越多的研究工作着重于将 GPlates 平台作为一个板块重建与全球地球动力学和气候模拟之间的界面, 把板块重建结果作为约束条件导入到动力学和气候模拟过程中 (Bower et al., 2015; Lunt et al., 2017; Gurnis et al., 2018)。地球动力学模拟方面, 板块与地幔系统演化研究的主要手段是正演和反演伴随模型 (forward and inverse associated model)。这些模型依赖地表板块运动场作为约束条件, 进而揭示板块与地幔柱之间、板块与软流圈之间、板块与俯冲板片之间的相互作用以及深部过程对地表地形的影响。通过将地幔动力学模型 (CitcomS) 与全球板块构造模型 (如 GPlates) 相结合, 构建地球的四维模型, 从而实现正演模拟地幔流动过程、板块俯冲过程及地表动力地形响应。与之相对应, 伴随数据同化的地幔动力学反演模型基于现今的地震层析成像结构, 并采用前部古地理演化、盆地动力沉降等资料进行约束和调试, 模拟恢复地质历史时期的地幔流动、板块俯冲过程。

Ma 等 (2019) 在 GPlates 平台上整合东亚地

区一系列地质和地球物理数据对新近发表的全球板块重建模型 (Zahirovic et al., 2016) 进行修改并揭示 50 Ma 以来该地区的板块边界和板块运动学特征 (图 8)。其中, 50~35 Ma 的板块重建采用了 Deschamps 和 Lallemand (2002) 提出的菲律宾海板块 (Philippine Sea Plate, PSP) 的运动模型, 该模型主要依赖地表地质信息和 PSP 的洋底扩张年龄数据进行重建; 35~16 Ma 的板块重建则主要参考已发表的文献中的关于东亚陆缘的地质数据, 例如岛弧带的迁移、增生陆块和蛇绿岩碎屑的分布范围等; 15 Ma 期间, PSP 古位置的确定依靠全球层析成像数据库中的 MIT-P08 模型。对 609 km 深处的层析成像切片进行解译和分析, 推测 Izu-Bonin-Mariana 海沟的位置, 从而获得 PSP 在 15 Ma 的古位置; 而 6 Ma 以来 PSP 的古位置则是通过现今 GPS 测量数据计算得到的板块运动速率回推获得的。通过 GPlates 平台有机融合区域上的地质资料以及深部地球物理观测资料, 获得东亚地区板块 50 Ma 以来的运动模型。随后将导出的运动模型数据作为地表速度边界条件输入 CitcomS 模拟组件求解地幔不可压缩流体在球壳中的热对流方程解, 正演模拟获得地幔流动过程、板块俯冲作用以及地表地形响应等四维地球动力特征。对多种不同的板块重建方案进行 CitcomS 板片同化数值模拟得到的地球动力学预测结果与现今深部的地震层析成像影像进行对比, 发现二者高度重合 (图 9)。虽然对于未知的边界条件, 如俯冲板片的倾角、海沟的位置等, 还需要考虑其合理性, 但该板片同化模型的意义在于测试了不同重建方案的合理性以及板块—地幔系统的第一级时空演化。Ma 等 (2019) 提出的同化模型也匹配了目前绝大多数观测资料, 因此可以通过该模型对东亚地区大约 50 Ma 以来的地球动力学背景和板块运动过程进行探讨。Ma 等 (2019) 的板块重建和四维地球动力数值模拟结果揭示了板块三联点的迁移和其配套的双层俯冲模型, 即菲律宾海板块顺时针旋转过程中“切割”俯冲的太平洋板块, 导致大量的俯冲的太平洋板块以水平板片的形式滞留于 660 km 不连续面上, 形成现今层析成像上所见到的该不连续面上水平横卧的巨大板片。这种俯冲板片之间的相互“撕扯”在全球板块俯冲系



PAC: 太平洋板块 (Pacific Plate); PSCS: 古南海盆地 (Paleo-South China Sea Basin); PSP: 菲律宾板块 (Philippines Plate); SCS: 南海 (South China Sea)

图8 Ma等(2019)基于Zahirovic等(2016)修改的50 Myr以来东亚地区板块构造重建结果

Fig. 8 New tectonic reconstructions of East Asia since 50 Myr modified from models of Zahirovic et al. (2016) by Ma et al. (2019)

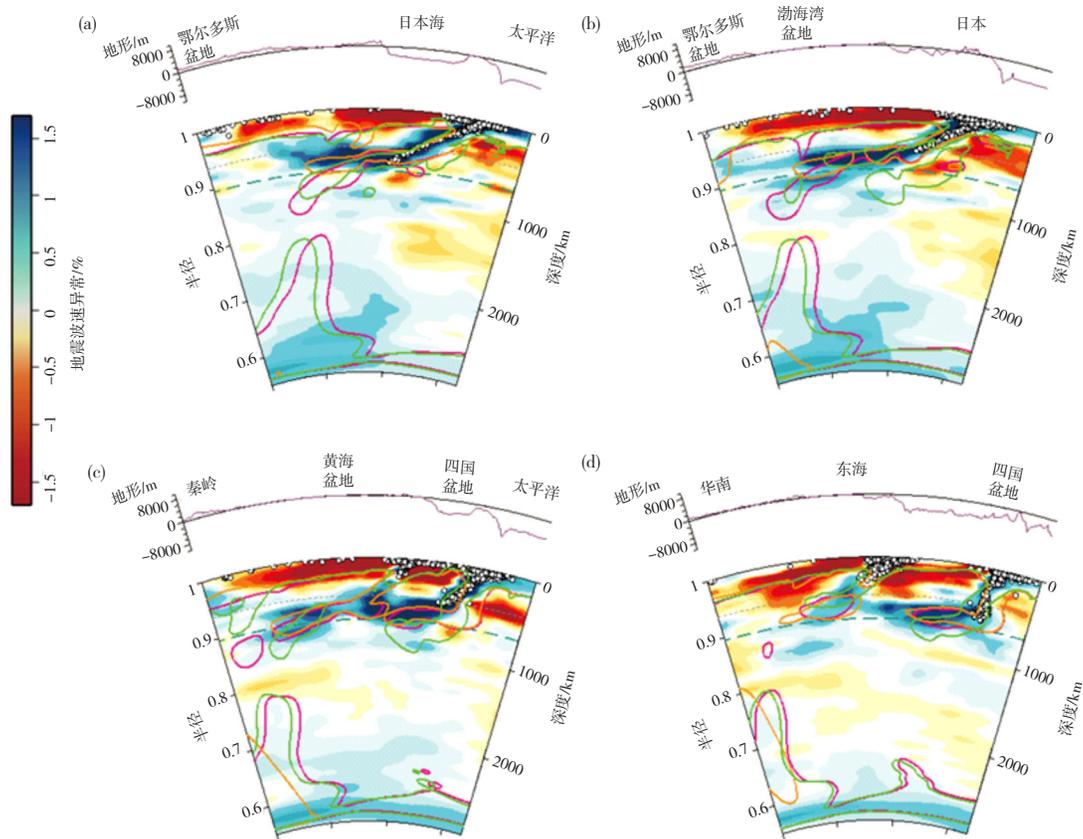


图9 模拟结果预测的俯冲和滞留板片结构与全球地震层析成像显示的地幔结构对比 (修改自Ma et al., 2019)

Fig. 9 Comparison between the predicted slab structures and the global seismic-tomographic models (after Ma et al., 2019)

统中并不少见，对于研究板块俯冲模式的变化机制有着重要意义。

4 展望

4.1 250 Ma以来全球板块构造和变形的“深时”演化

板块构造理论的两个基本假设为板块是刚性的及刚性的板块被狭窄的边界分隔。尽管在过去几十年中，对板块变形的理解取得了巨大进步，但是到目前为止还没有一个能真实表达地质历史时期弥散变形的全球板块构造模型。尽管最近Müller等(2019)利用GPlates软件构建了一个全球中生代变形模型，定量揭示了自Pangea超大陆裂解以来的大洋扩张、大陆变形和陆缘弧后逆冲或伸展过程。但是，该模型还存在多种不确定性，如大约250~150 Ma间的地幔参考系中的绝对板块运动反演重建，250 Ma至200 Ma洋底构造重建；陆内变形的约束数据量较少；基于应变测量和观察资料进行构造变形重建的区域较少。因此，有必要实施板块构造和变形的“深时”重建，构建全球新一代的中生代板块构造模型，探索地壳或岩石圈变形过程与动力学，为创建全球古地貌模型和古气候模型、研究地表过程、盆地沉降与沉积过程提供基础资料和模拟参数。

4.2 超大陆旋回中的古大陆原型、原位与盆-山体系重建、古海洋构造重建

如何重建潘基亚超大陆旋回之前的古大陆位置、原型与盆-山体系及古海洋构造演化，揭示超大陆裂解成因等，是近期在研究超大陆旋回大地构造中突显出来的重大科学问题和难点。在多个超大陆周期中，深部地幔上涌区是否保持相对稳定？是否存在响应俯冲方式变化和深部地幔下降流变化的超大陆旋回？我们如何以一种新的方式去检验这些推测和想法？需要利用哪些资料去检验？可以进行模拟检验吗？是什么驱动着超大陆裂解？其上升驱动力是来自于地球深部，还是来自于大陆边缘俯冲带的拉力？这些均为亟待回答的重要科学问题。传统的超大陆重建集中于残存的大陆地壳重建，并将其视为刚性块体。新的重建软件使我们能够模拟板块变形。我们如何通过合理重建去推断超大陆旋回中的大洋盆地几何

特征、古洋底构造特征和海平面变化？如何利用陆上地质去验证模型的真实性和可靠性？如何利用DDE数据库资料恢复超大陆聚集和裂解过程中的海洋古地理？这更是古海洋构造重建的难点。

4.3 量化大地构造在地球系统演化中的作用

大地构造过程可以控制挥发物进入和流出地幔的流量，控制地表的隆升和侵蚀风化作用及其对大气的影响，控制全球海平面变化及地表热流波动，控制大陆和大洋的配置及海洋环流的变化。实现精细的深时大地构造重建使我们能够更好地理解大地构造与地球系统的相互作用过程。CO₂向大气圈的排放量是否受到全球俯冲系统长度变化控制(e.g., van der Meer et al., 2012)? 或受到超大陆裂谷系统长度变化控制(e.g., Brune et al., 2017)? 回答这些问题，需要我们更好地估算在现代板块边界的CO₂排放量，对历史板块边界分布进行精细重建。有学者认为山脉风化作用(特别是热带地区较高的风化速率)可以解释全球地表温度变化，那么，全球气候在多大程度上受到造山作用的控制？海底扩张速率控制了海洋盆地的体积，深部地幔流动可导致地表地形变化，地壳伸展和收缩改变了海洋区域大小。固体地球构造过程是全球海平面变化的主控因素。因此，全球大地构造重建可帮助我们揭示造山作用对全球气候的影响，评估超大陆旋回期间全球海平面变化。

4.4 前中生代(>250 Ma)的全球板块相对运动模型重建

目前，关于全球板块构造重建，包括板块运动模型和区域变形重建，以及相应的地球动力学模拟工作，都聚焦于中-新生代时期(250 Ma以来)(Seton et al., 2012; Zahirovic et al., 2013; Yang et al., 2016; Tetley et al., 2019; Torsvik et al., 2019)。这主要是现今能够用来精细定量约束板块运动模型的洋底结构和磁异常条带的最老年龄不超过侏罗纪。然而，长期以来地质学家、地球物理学家在古地磁、古地理重建、岩浆岩分布、造山带分布、古生物群落分布等研究领域已经积攒了大量的新元古-古生代的相关数据。虽然目前关于这部分中生代之前的板块重建工作通常获得的是低分辨率、非动态的板块运动模型，但已有学者将这部分工作推进到使用GPlates平台整合已有的板块运

动模型、古生物分布和古地理重建结果来恢复古生代全球板块构造格局和板块运动模型 (Wright et al., 2013; Domeier and Torsvik, 2014; Matthews et al., 2016)。基于他们的工作基础, 笔者期待在 Gplates 平台上汇聚更多的地质和地球物理数据, 对这部分 >250 Ma 的“深时”板块运动模型、板块边界进行量化的、可交互式的重建。

5 结论

本次数据库调研主要考察了国际主流的地质和地球物理数据库, 包括原始数据库, 如 World Stress Map、MGDS、NCEI 等, 和解释数据库, 如 IRIS、LITHO1.0、SubMachine 等。对数据库的结构体系、数据类型以及传输渠道进行详细介绍, 阐述这些数据库如何在 GPlates 平台可视化以及如何应用于的板块构造重建。同时, 通过本次调研也发现目前国际数据库有相互融合、兼并的趋势, 越来越多的数据库正在合并成为综合数字平台, 使数据的存储、管理、处理和分析能够在统一的平台进行, 有利于数据的共享。然而, 国内的板块重建相关的数据库尚未起步, 亟须 DDE 团队在国际数据库的基础上, 整合国内的资源和科研力量建立基于 Gplates 平台的统一的数据共享体系。

结合最新发表的板块重建结果, 本文详细论述了国内外研究团队如何运用上述数据库的资源重建板块运动模型、恢复板块变形过程以及探讨板块俯冲作用与深部地幔对流的关系, 为 DDE 大地构造与构造地质工作组下一步基于 GPlates 平台建立大地构造“深时数字地球”提供参考案例。

在结合 DDE 下一步工作目标的基础上, 提出大地构造工作组当前的关键科学问题, 包括构建 250 Ma 以来全球板块构造和探讨变形的“深时”演化、超大陆旋回中的古大陆与古海洋重建、量化大地构造在地球系统演化过程中的作用以及重建前中生代 (>250 Ma) 的全球板块运动模型。

参考文献(References):

Barnett-Moore N, Hassa R, Müller R D, et al. 2017. Dynamic topography and eustasy controlled the paleogeographic evolution of northern Africa since the mid-Cretaceous [J]. *Tectonics*, 36: 929-944.

Bower D J, Grunis M and Flament N. 2015. Assimilating lithosphere and slab history in 4-D Earth models [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 238: 8-22.

Boyden J A, Müller R D, Grunis M, et al. 2011. Next-generation Plate-Tectonic Reconstructions Using Gplates [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 95-114.

Brune S, Williams S E and Müller R D. 2017. Potential links between continental rifting, CO₂ degassing and climate change through time [J]. *Nature Geoscience*, 10(12): 941-946.

Domeier M and Torsvik T H. 2014. Plate tectonics in the Late Paleozoic [J]. *Geoscience Frontiers*, 5: 303-350.

Ernst R E, Buchan K L and Campbell I H. 2005. Frontiers in large igneous province research [J]. *Lithos*, 79(3-40): 271-297.

Ernst R E and Youbi N. 2017. How large igneous provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 478: 30-52.

Gordon R G and Stein S. 1992. Global tectonics and space geodesy [J]. *Science*, 256: 333-340.

Gurnis M, Turner M, Zahirovic S, et al. 2012. Plate tectonic reconstructions with continuously closing plates [J]. *Computers & Geosciences*, 38(1): 35-42.

Gurnis M, Yang T, Cannon J, et al. 2018. Global tectonic reconstructions with continuously deforming and evolving rigid plates [J]. *Computers & Geosciences*, 116: 32-41.

Heidbach O, Rajabi M, Cui X F, et al. 2018. The world stress map database release 2016: Crustal stress pattern across scales [J]. *Tectonophysics*, 744: 484-498.

Heidbach O, Tingay M, Barth A, et al. 2010. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008 [J]. *Tectonophysics*, 482: 1-15.

Heine C, Zoethout J, Müller R D, et al. 2013. Kinematics of the south Atlantic rift [J]. *Solid Earth Discuss*, 4: 215-253.

Hwang C and Chang E T. 2014. Seafloor secrets revealed [J]. *Science*, 346(6205): 32-33.

Kim S S and Wessel P. 2011. New global seamount census from altimetry-derived gravity data [J]. *Geophysical Journal International*, 186(2): 615-631.

Kirkwood B H, Royer J Y, Chang T C, et al. 1999. Statistical tools for estimating and combining finite rotations and their uncertainties [J]. *Geophysical Journal International*, 137(2): 408-428.

Kneller E, Johnson C A, Karner G D, et al. 2012. Inverse methods for modeling non-rigid plate kinematics: application to Mesozoic plate reconstructions of the Central Atlantic [J]. *Comput. Geosci.*, 49: 217-230.

Kreemer C, Blewitt G and Klein E C. 2014. A geodetic plate motion and global strain rate model [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15: 3849-3889.

Kreemer C, Haines A J, Blewitt G, et al. 2000. On the determination of a global strain rate model [J]. *Earth Planets Space*, 52: 765-770.

Kreemer C, Holt W E and Haines A J. 2003. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation [J]. *Geophysical Journal International*, 154: 8-34.

Liu S F, Gurnis M, Ma P, et al. 2017. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma [J]. *Earth-Science Reviews*, 175: 114-142.

Ma P F, Liu S F, Gurnis M, et al. 2019. Slab horizontal subduction and slab tearing beneath east asia [J]. *Geophysical Research Letters*,

- 46(10): 5161–5169.
- Matthews K J, Malone K T, Zahirovic S, et al. 2016. Global plate boundary evolution and kinematics since the late Paleozoic [J]. *Global and Planetary Change*, 146: 226–250.
- Matthews K J, Müller R D, Wessel P, et al. 2011. The tectonic fabric of the ocean basins [J]. *Journal of Geophysical Research*, 116: B12109.
- Morra G, Seton M, Quevedo L, et al. 2013. Organization of the tectonic plates in the last 200 Myr [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 373: 93–101.
- Müller R D, Cannon J, Qin X D, et al. 2018. GPlates: Building a virtual earth through deep time [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7): 2243–2261.
- Müller R D, Dutkiewicz A, Seton M, et al. 2013. Seawater chemistry driven by supercontinent assembly, breakup, and dispersal [J]. *Geology*, 41(8): 907–910.
- Müller R D, Seton M, Zahirovic S, et al. 2016. Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since pangea breakup [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44(1): 107–138.
- Müller R D, Zahirovic S, Williams S E, et al. 2019. A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the triassic [J]. *Tectonics*, 38(6): 1884–1907.
- Pasyanos M E, Masters T G, Lake G, et al. 2014. An updated crust and lithospheric model of the Earth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 119(3): 2153–2173.
- Sandwell D T, Müller R D, Smith W H, et al. 2014. Marine geophysics. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure [J]. *Science*, 346(6205): 65–66.
- Sandwell D T and Smith W H F. 2009. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114: B01411.
- Satyana A H. 2016. The emergence of pre-Cenozoic petroleum system in East Java Basin: Constraints from New Data and interpretation of tectonic reconstruction, deep seismic, and geochemistry [C]. AAPG Forthieth Annual Convention & Exhibition, Proceedings, Indonesian Petroleum Association.
- Seton M, Flament N, Whittaker J, et al. 2015. Ridge subduction sparked reorganization of the Pacific plate-mantle system 60–50 million years ago [J]. *Geophysical Research Letters*, 42: 1732–1740.
- Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma [J]. *Earth-Science Reviews*, 113(3–4): 212–270.
- Seton M, Whittaker J M, Wessel P, et al. 2014. Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(4): 1629–1641.
- van der Meer D G, Torsvik T H, Spakman W, et al. 2012. Intra-Panthalassa Ocean subduction zones revealed by fossil arcs and mantle structure [J]. *Nature Geoscience*, 5(3): 215–219.
- Tabor C R, Feng R and Otto-Bliesner B L. 2019. Climate response to the splitting of a supercontinent: Implications for the breakup of Pangea [J]. *Geophysical Research Letters*, 46(11): 6059–6068.
- Wessel P and Lyons S. 1997. Distribution of large Pacific seamounts from Geosat/ERS-1: Implications for the history of intraplate volcanism [J]. *Journal of Geophysical Research*, 102(22): 459–475.
- Wessel P, Matthews K J, Müller R D, et al. 2015. Semiautomatic fracture zone tracking [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(7): 2462–2472.
- Wessel P, Sandwell D T and Kim S S. 2010. The global seamount census [J]. *Oceanography*, 23(1): 24–33.
- Williams S E, Whittaker J M, Müller R D, et al. 2011. Full-fit, palinspastic reconstruction of the conjugate Australian–Antarctic margins [J]. *Tectonics*, 30: TC6012–TC6032.
- Wright N, Zahirovic S, Müller R D, et al. 2013. Towards community-driven paleogeographic reconstructions: integrating open-access paleogeographic and paleobiology data with plate tectonics [J]. *Biogeosciences*, 10(3): 1529–1541.
- Zahirovic S, Matthews K J, Flament N, et al. 2016. Tectonic evolution and deep mantle structure of the eastern Tethys since the latest Jurassic [J]. *Earth-Science Reviews*, 162: 293–337.
- Zahirovic S, Müller R D, Seton M, et al. 2015. Tectonic speed limits from plate kinematic reconstructions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 418: 40–52.
- Zahirovic S, Seton M and Müller R D. 2013. The Cretaceous and Cenozoic tectonic evolution of Southeast Asia [J]. *Solid Earth Discussions*, 5(2): 1335–1422.
- Zoback M L, Zoback M D, Adams J, et al. 1989. Global pattern of tectonics stress [J]. *Nature*, 341: 291–298.