2020年2月,第26卷,第1期,086-099页 February 2020, Vol. 26, No.1, pp.086-099

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019105

引用格式: 侯章帅, 樊隽轩, 张琳娜, 沈树忠. 2020. 全球古地理重建模型的构建方法、比较与知识发现[J]. 高校地质学报, 26 (1): 086-099

全球古地理重建模型的构建方法、比较与知识发现

侯章帅1,2*,樊隽轩3,张琳娜1,沈树忠3

中国科学院 南京地质古生物研究所,南京 210008;
2.中国科学技术大学,合肥 230026;
3.南京大学 地球科学与工程学院,南京 210023

摘要:作为深时数字地球项目的底层框架,全球古地理重建模型包括地质历史时期板块的位置和运动轨迹以及地表特征两方面的内容。过去数十年里,基于不同方法、不同资料的全球古地理重建模型不断涌现。综合古地磁学、古生物学、沉积学、地球物理、地球化学以及地球动力学领域的知识与资料解释古地理,并建立起数字化、可修改、随时间演变的模型是当前常见的方法。文章介绍了国内外全球古地理重建模型的构建方法,并比较了六种主流的重建模型(PaleoMap、PLATES、UNIL、GOLONKA、GMAP和EarthByte),旨在为国内相关领域研究提供参考。文章还介绍了数字化全球重建古地理模型在古气候、板块构造驱动力以及盆地演化方面的应用及知识发现。通过对现存模型的介绍,提出展望,希望在深时数字地球计划的框架下整合国内外优秀科学家,重新设计并建立真正统一的四维古地理重建模型。

关键字:深时数字地球;古地理;重建模型;古气候;应用 中图分类号: P531 文献标识码: A 文章编号: 1006-7493 (2020) 01-086-14

Construction Method and Comparison of Global Paleogeographic Reconstruction Models and Associated Knowledge Discovery

HOU Zhangshuai^{1, 2*}, FAN Junxuan³, ZHANG Linna¹, SHEN Shuzhong³

Nanjing Institute of Geology and Paleontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Paleogeographic models contain reconstructions on position and motion of the tectonic plates and their surface features, and serve as the framework for geological history reconstruction in the Deep-time Digital Earth (DDE) Big Science Program. Based on different data and methods, a lot of global paleogeographic models have been proposed in the past decades. Recently, it has become more common to use data from various fields such as paleomagnetism, paleontology, sedimentology, geophysics, geochemistry, and geodynamics to establish a digital, detail-adjustable, and self-evolving model. The current paper reviews the existing methods of global paleogeographic reconstruction models, and conducts a comprehensive comparison of the six main reconstruction models (PaleoMap, PLATES, UNIL, GOLONKA, GMAP, and EarthByte), as a reference for domestic research. We also introduced the applications and knowledge discoveries of reconstructed paleogeographic models in the field of paleoclimate, plate tectonics, and basin evolution. Under the framework of DDE program, a unified four-dimensional paleogeographic model will be reconstructed with efforts from paleogeographic scientists all over the world.

Key words: Deep-time Digital Earth; paleogeography; reconstruction model; paleoclimate; application

First auther: HOU Zhangshuai, Master Student; E-mail: zs.hou@foxmail.com

收稿日期: 2019-11-08; 修回日期: 2019-11-25

基金项目:国家重点研发计划(2018YFE0204201);国家自然科学基金(41725007;U1562213)联合资助

作者简介: 侯章帅, 男, 1994年生, 研究生, 主要从事与古地理重建相关的研究; E-mail: zs.hou@foxmail.com

古地理(Paleogeography)这一名词首先出现在 一篇名为"The Paleogeography of the North-American Continent"的论文中(Hunt, 1873),含义为根据 古生物化石研究地质历史时期的地理环境变迁。 随着地质学各个领域的发展,近200年来涌现了多 种古地理重建方法,这些方法基础数据的侧重点 各有不同,如沉积物的分布特征、动植物化石群 的组合、古气候信号、古地磁测量、海底的磁异 常和断裂带的分析等。由于处理的数据量和应用 的技术不同,古地理学可能是目前最复杂的地球 科学学科之一(Meinhold and Şengör, 2019)。

古地理学探索深时地球表面各种地理特征之间的关系,如深海盆地、浅海、滨岸带、河流系统、湖泊和山区等。重建的结果往往需要恢复到以板块构造为基础的地质历史时期的海陆位置之上,这会很大程度地影响对深时海洋环流模式、海洋化学条件、气候、生物演化以及矿产资源的形成和分布等诸多问题的认识(Müller et al., 2013; Goddéris et al., 2014; Butterworth et al., 2013; Goddéris et al., 2016; Brune et al., 2017; l'Anson et al., 2018)。因此,古地理研究对于更好地了解地球的演变、生命的演化以及探索自然资源的分 布规律至关重要。

从大陆漂移到板块构造再到地幔对流,从固 定论到活动论,古地理学研究正跨入深时数字建 模的阶段。自20世纪70年代以来,一系列不同时 间段的全球(Ziegler et al., 1977; Scotese and

McKerrow, 1990; Golonka and Ford, 2000; Stampfli and Borel, 2002; Gurnis et al., 2012; Seton et al., 2012; Müller et al., 2016; Merdith et al., 2017; Young et al., 2019) 或区域 (Belasky et al., 2002; Metcalfe, 2002, 2013; Cocks and Torsvik, 2006; Scotese and Schettino, 2017; Blakey and Ranney, 2018)的古地理重建模型逐渐涌现(图1)。这些 模型将现有的地学数据恢复到其深时古地理位置 (古板块、古经度和古纬度)。通过重建过去的全 球海陆格局、地形差异,可以更好地了解地球在 整个地质时期的演变。全球古地理模型的构建涉 及到地球科学不同领域的许多概念,如古生物 学,沉积学,地球物理学的地震层析成像、重力 异常、古地磁,地球化学的测年、源汇分析和大 数据汇编等,相应的重建结果必须与各学科的基 础证据一致,实现自洽性。此外,重建模型的时 间跨度应当足够长(一般跨越数十到数百个百万 年)以探讨重大地质事件的规律,如超大陆旋 回、大气 CO₂浓度的波动、气候的冷暖交替等 (Mitchell et al., 2012; Meer et al., 2014; Li et al., 2019; Macdonald et al., 2019).

近年来,数字化古地理模型的建立与研究极大的促进了地质学领域的重要发现(如俯冲带的时空分布及其对板块运动的驱动作用)(Ulvrova et al., 2019)。然而,目前中国科学家在这方面参与较少。本文首先介绍古地理重建模型的一般化构建方法,然后对比目前几种主流的古地理模型,





① 据 Scotese2017年在伦敦地质学会举办的"Plate Tectonics at 50"会议上的报告修改。

并简要介绍一些基于数字化古地理模型的知识发现,以期为国内地球科学家提供一个初步的认识和参考,并服务于由中国科学家发起和引导的深时数字地球(Deep-time Digital Earth, DDE)国际大科学计划(Wang et al., 2019)。

1 全球古地理重建模型的构建

全球古地理包括地质历史上板块的位置、边 界、板块的运动过程以及地表特征的重建。数字 化的古地理重建模型不仅指数字化的重建图,还 包括数字化、易修改、可重现、时间连续等特 征。数字重建模型由刻画板块形状的多边形文件 和表征其随时间变化的运动特征的旋转文件(由 一系列随时间变化的板块相对运动的欧拉旋转极 组成的格式化纯文本文件)组成(Müller et al., 2019),这两种重要的基础构件代表了板块运动 的重建与复原,但仍欠缺对地表形态的描述,如 古高程、地形起伏、河流系统、盆地演变等。恢 复古陆或地块在深时的全球位置往往是古地理重 建的首要环节,古地磁、古生物、沉积物分布、 地幔柱、海洋地球物理等资料提供重要的依据。

1.1 古地磁学的应用

古地磁是重建深时板块位置的唯一定量工 具,通过对古地磁场的重建可以获得板块的古纬 度、方向和旋转等信息。地磁场源于自转影响下 地球核幔间可导电物质的交换,其中的物质均受 到一定程度的磁化作用,记录地磁场的相关信 息。地球磁场通常用磁倾角、磁偏角和磁场强度 来表述。磁倾角与地表纬度位置相关,赤道地区 为0,两极地区近于90°,这一规律对于古地理重 建具有重要意义(Torsvik et al., 2016)。地磁南北 极与地理南北极不同,现代地磁轴与地理轴之间 有11.5°的交角。观测结果表明地质历史时期地 磁轴一直绕地理轴做周期性旋转,且磁场方向经常 倒转,这也是磁性年代学和地磁场轴向偶极子假说 的前提(Geocentric Axial Dipole, GAD; Domeier et al., 2012; Huang et al., 2018; Torsvik and Cocks, $2019)_{\circ}$

理想情况下,岩石中的铁磁性物质在形成之 初受地磁场的作用记录了当时古地磁场的磁性信 息,岩石中保存的磁倾角和磁偏角随其所在位置 不同而发生改变。假设深时古地磁场的方向保持

南北向不变(地磁场轴向偶极子假说),在之后的 板块运动过程中,岩石随板块漂移,其相应地保 存了不同时间的地磁极信息(图2)。但需要注意 的是地质历史中某些时间段(如晚古生代一早中 生代) 地磁场具有非常明显的非偶极性(即某些 时段地磁极轴不穿过地心,甚至表现为弯曲的状 态; Voo and Torsvik, 2001; Domeier et al., 2011; Domeier et al., 2012)。以运动的大陆为参考点,获 得岩石中保存的古地磁极随时间的变化,并可视 化这些古地磁极的运动路径,这就是视极移路径 的重建原理(Apparent Polar Wander, APW; Torsvik and Cocks, 2004, 2016, 2019)。如果某两个块体在 一段时间内的视极移路径重合,则说明它们在该 时间段内作为一个整体进行运动;从相似的视极 移路径到显示一定的差异性,则表明两者在某个 时间点开始进行不同方向和角度的离散漂移。

利用古地磁信息可以确定地块的古纬度以及地 块随时间的旋转运动,但古经度位置难以确定。频 繁倒转的古地磁极难以确定南北半球的归属。例 如,Cocks和Torsvik(2002)在重建早古生代 (500~400 Ma)的全球板块位置时,通过视极移路 径定义了主要地体的位置(如波罗的海和劳伦), 然而对于华北、华南和滇缅泰马等缺乏完整的视极 移路径的地块则将其表述为面向北方或南方。

1.2 古生物学的应用

定性的古生物学方法对于指示古地理环境和 地块相对位置有重要作用(Cao et al., 2017)。现 代动、植物区系的形成主要是由气候和纬度的不



Fig. 2 The relationship between continental drift and apparent polar wander path (from Torsvik et al., 2012)

同所引起的,但也与生物群能否穿过主要的陆地 (对海洋生物而言)和海洋(对陆生植物和动物而 言)阻隔有关。古地理研究,尤其是古生代的古 地理重建更依赖古生物区系的证据(基于海底磁 异常条带的证据只存在于200 Ma以来,更古老的 洋壳均已俯冲无法保存在大洋中)。

同一纬度的两个地块,如果彼此之间的距离 很近,它们的底栖生物类型很可能具有一定的相 似性。然而,如果这两个地块相互分离,原来相 似的底栖生物的幼体往往不能穿过两个块体之间 新形成的大洋(1000 km 宽度的大洋就可能造成地 理隔离) (Cocks and Torsvik, 2002), 它们的底栖生 物类型会在相对独立的两个地理环境内各自演 化,形成不同的生物组合,进而演变为两个不同 的动物区系(根据不同的属种差异划分为省、区 等)(Cecca, 2014)。同样的,如果拥有不同底栖生 物类型的两个地体不断靠近,在一段时间之后两 者便可能会融合为同一个动物区系。但是,块体 是否发生碰撞并不能仅仅根据生物区系的融合来 定义,需要更多的证据。此外,深时的一些古陆 (如冈瓦那、劳亚、盘古等) 面积太大跨越多个纬 度带,其南北边缘可能会发育差异显著的底栖生 物类群,从而反映古气候带的变化。

多门类化石在特定地质时间内的分布特征和 生态习性可以反映古地理特征。但是,在使用任 何古生物开展古地理研究之前,必须正确评估其 生存时代和个体生态。营浮游、远洋或游泳生活 的生物(在早古生代,以笔石为代表,另外包括 少数的三叶虫、头足类、几丁虫、疑源类和牙形 刺等)的分布受洋流和温度的控制,这些生物往 往扩散速度快,其化石记录对评估地块间亲缘性 的重要程度相对较弱(Cocks and Verniers, 1998)。 相反,营底栖生活的动物,其生活环境受限于海 底并受温度的控制,如腕足动物,大多数的三叶 虫、双壳类、腹足动物和大多数介形类等,在古 地理重建中,规模较大的底栖生物群(如有铰腕 足类、底栖有孔虫、珊瑚等)通常扮演重要的角 色(Shen et al., 2013; Zhang et al., 2019)。

1.3 岩石学的应用

基于古地磁与古生物的板块位置的重建还应 当受沉积记录(如冰川沉积、蒸发岩、煤等)和 构造运动(如大洋的关闭、造山运动等)的约 束。半定量或定性的岩石记录(如受纬度控制和 气候敏感的岩石类型的分布)(Ziegler et al., 1985; Golonka, 2007b; Boucot et al., 2009)在解释 古地理时表现出了很大的作用。相较于古地磁, 岩石学数据更为可靠和稳定(构造运动带来的高 温、高压环境可能会使得岩石中的古地磁信息改 变或消磁后获得新的古地磁信息)。

从Wegener (1966) 的原始工作开始,冰川沉 积物在确定古大陆的位置方面一直扮演着重要的 角色。地质历史中,除个别全球性大冰期外(如 雪球地球, Hoffman et al., 1998), 冰川沉积物一般 形成于高纬度地区。虽然冰川活动的原位沉积现 象(如蛇形丘、鼓丘等)很少保存下来,但岩石 中记录了大量的冰川擦痕,如前寒武纪的若干次 冰川事件 (Hoffman and Li, 2009), 晚奥陶世北非 发现的冰川沉积物 (Ghienne et al., 2007), 澳大利 亚及其他地区发现的中石炭世—早二叠世的冰川 擦痕 (Jones and Fielding, 2004; Montañez and Poulsen, 2013; Chen et al., 2018) 等。除此之外, 很多冰碛岩以及冰山携带的落石在各年代的岩石 中也有发现。但在古地理重建时,必须确定这些 特征沉积物是否原位保存。例如,洋流可将冰山 及其携带的沉积物质搬运到很远的距离(Boucot et al., 2013).

除上述对气候和纬度敏感的沉积物之外,具 有年代信息的岩性数据在反映古环境方面也具有 重要价值。传统的区域性岩相古地理图通常是基 于此类信息解释和编制的。自20世纪70、80年代 以来,涌现了一系列的岩性和古环境沉积记录数 据 库 (Ziegler et al., 1985; Rees et al., 2002; Kiessling et al., 2003; Boucot et al., 2013)。大规模 数据库的助力可以精细地重建地质时期全球的岩 相分布和地表特征。

1.4 海洋地球物理的应用

自20世纪60年代以来,海洋地球物理勘探的 快速发展(Dietz, 1961; Vine and Matthews, 1963) 不仅促进了板块构造学说的发展,也为古地理重 建提供了新的工具。海底磁异常条带以及海底扩 张和洋中脊的运动,是解读中生代至新生代大陆 和地块位置的重要工具。

二战后的海底军备竞赛激起了海洋探测的热 潮,科学家们分析了多航次的磁异常报告后注意 到贯穿洋底的磁异常条带现象,并认识到这些磁 异常条带近似对称地分布于洋中脊两侧。新的洋 底在洋中脊两侧对称生成,其中的岩浆冷却形成 洋壳时,磁性矿物得到与地球磁场一致的磁性。 在侏罗纪以来(200 Ma以前形成的洋壳已全部俯 冲消失在大洋中)的全球板块构造重建中,磁异 常条带是一个重要的重建工具,控制了旋转文件 中板块之间的相对运动。

基于海底磁异常条带和断裂带的识别,建立 全球海底扩张等时线(Müller et al., 2008)是中、 新生代以来全球古地理重建的一种重要方法。对 于保留了扩张系统(如洋中脊、裂谷)两个侧面 的区域,有限阶段旋转(一段时间内某个板块相 对于另一个板块的绝对旋转运动,用时间、旋转 极的经纬度位置和旋转角度来表达)的计算和海 底扩展等时线(根据海底磁异常条带计算的洋壳 等时线)的构建相对简单;但当仅保留了扩张系 统的单个侧面(例如,俯冲作用导致洋中脊的某 一侧洋壳完全消失)时,通常计算半阶段旋转 (单一侧面的相邻等时线之间的阶段旋转),并将 其翻倍(即假设该扩张是对称的)以产生完整的 阶段旋转;当扩张系统的两侧均已被俯冲消失 时,只能依赖陆上的地质记录(如大断裂、地体 边界、活动的和消失的岩浆弧等)来重建消失的 海底等时线 (Matthews et al., 2016; Müller et al., 2016; Young et al., 2019).

1.5 地幔柱方法

地幔对流导致地幔内热的物质上涌形成地幔柱,通常假设地幔柱在一定时间内的位置不变(Wilson, 1963)。由地幔柱引发的热点跟随板块运动不断迁移,形成一系列的热点轨迹,即海山和火山的链状分布,因此移动的热点轨迹反映了其所在板块的运动(Müller et al., 1993)。基于全球四条主要的热点轨迹(Hawaiian、Louisville、Tristan和Réunion),定义了130百万年以来的板块的绝对运动,这也就是所谓的全球移动热点参考体系(Steinberger et al., 2004; Torsvik and Cocks, 2016)。

大火成岩省(Large Igneous Province, LIP)是上 地幔熔化的结果,过去300百万年形成的大火成岩 省喷发点和金伯利岩的报道都位于核幔边界慢1%的 剪切波速度(Vs)轮廓线之上(Burke and Torsvik, 2004; Torsvik et al., 2010a),该轮廓线勾画出了位于 非洲和太平洋之下的核幔边界上的两个大低速剪切波 速度省(large low shear-wave velocity provinces, LLSVPs)(Garnero and McNamara, 2008)。产生大火 成岩省和主要热点火山的地幔柱大多位于这两个低 速剪切波速度省的极窄边缘上,从而可以定义地幔柱 生成区(Plume Generation Zone, PGZ)的位置 (Burke et al., 2008; Torsvik et al., 2008c)。

300百万年以来地幔柱生成区的稳定位置指示 一种新型的重建古地理方法。该方法利用地表和 地幔深部过程之间的基本联系确定板块的古经 度。例如,根据古地磁和生物面貌证据(二叠纪 华南发育独特的华夏植物群,与盘古超大陆主体 的差异巨大),学者认为华南板块在晚二叠世位于 远离盘古超大陆的赤道地区,但其距盘古大陆的 距离一直没有很好的限制,因此在之前的全球古 地理重建中被赋予了完全不同的古经度位置(如 Scotese and McKerrow, 1990; Golonka and Ford, 2000; Blakey, 2003)。258 百万年在华南板块上发 生的峨眉山大火成岩省提供解决争议的线索。其 古地磁数据显示古纬度位置为南纬4°,如果峨眉 山大火成岩省形成于地幔柱生成区之上, 就会有 几种可能的古经度位置(晚二叠世南纬4°线与地 幔柱生成区的交点),其中盘古大陆占据了2个交 点,只剩下与太平洋之下的地幔柱生成区有关的 位置(图3)。鉴于对后续板块运动速度的限制 (板块在地史时期中的绝对运动速度一般小于15厘 米/年), 东经134°(太平洋下地幔柱生成区的西部 边缘)是一种可行的解释(Torsvik et al., 2008c)。

1.6 地表古高程重建

全球古地理重建模型不仅包含前述的对大陆、地块位置和运动特征的确定,还要恢复深时地表特征的演变。全球板块构造框架(Scotese and McKerrow, 1990; Golonka, 2007a; Seton et al., 2012; Matthews et al., 2016; Müller et al., 2016; Young et al., 2019)建立后,往往需要重建深时地表特征的高程信息(Paleodigital Elevation Models, PaleoDEM; Scotese and Wright, 2018)并绘制包含高山、低地、浅海和深海盆地等环境分布的全球古地理图。

数字古高程的建立通常分几个步骤完成,首 先是绘制反映各时代沉积环境的岩相图。例如, 厚层的纯灰岩序列可能代表温暖的浅海环境;由 安山岩和花岗闪长岩组成的地层可能代表曾经的



图 3 晚二叠世(258 Ma)华南板块的古经度重建(据Torsvik and Cocks, 2016修改) Fig. 3 Paleomagnetic reconstruction of the South China Plate in the Late Permian (258 Ma, from Torsvik and Cocks, 2016)

大陆火山弧或安第斯型造山带的产物。Scotese和 Schettino(2017)总结了与沉积环境对应的岩相和 岩石类型,这些典型沉积物的出现可用来恢复相 应的沉积环境,并对应一定的高程关系(表1)。 岩相只能用于绘制岩石记录相对完整的古地理环

PaleoDEM (Scotese and Schettino, 2017)								
代码	海拔/m	环境	地质记录					
9	10000~ 4000	碰撞造山带	高温高压变质作用					
8	4000~ 2000	安第斯型造山带	大陆环境的安山岩/花岗闪长岩					
7	2000~	1. 岛弧火山	海洋环境的安山岩/花岗闪长岩					
	1000	2. 陆内裂谷边缘	邻近的洪积扇砾岩					
6	1000~	1. 断裂谷	地堑中的玄武岩/湖相沉积					
	200	2. 一些弧肘脊	构造混杂着					
5	200~0	1. 滨海平原	冲积复合物					
		2. 较低的河流系统	大的漫滩复合沉积					
		3. 三角洲顶部	沼泽和河道砂岩					
4	0~-50	1.内陆架	非均质海洋沉积物					
		2. 筑礁的大陆架	巴哈马型碳酸盐岩					
		3. 三角洲前缘	顶积粉砂岩和砂岩					
3	-50~ -200	1. 外陆架	细粒沉积物,大多数生物产物					
		2. 一些陆表海盆地	细粒碎屑岩或碳酸盐岩					
		3. 前三角洲	前积粉砂岩和近源浊积岩					
2	-200~ -4000	1. 大陆斜坡/隆起	重力流和等深流沉积					
		2. 洋中脊	年龄小于60Ma的洋壳					
		3. 前三角洲扇	底积粘土和远源浊积岩					
1	-4000~	洋库	洋壳上的远洋层序					
	-6000	1771						
0	-6000~	海沟	远洋层序上的浊积流					
	-12000	1-2-1-3						

表1 用于古数字高程重建的地质记录 (Scotese and Schettino, 2017)

1. 0

境,但许多地方的岩石记录不完整,如已被侵 蚀、受构造作用破坏或被年轻的地层所覆盖。因 此通常需要根据区域的构造历史反演,推断构造 作用发生前的古环境和古地理特征。通过类似的 方式,基于洋壳下沉的深度与时间的关系(Stein and Stein, 1992),可以获取地质历史时期海底水深 的信息。

绘制完各个时间段的古地理图并获得相对地 形和水深后,下一步的工作是对这些信息进行数 字化表达。通常根据各个时代重建的岩相和古环 境信息对现代数字高程信息进行修改(Scotese and Schettino, 2017; Scotese and Wright, 2018),并根据 全球板块构造模型恢复到当时的古地理位置,获 得古数字高程模型。基于每个时代的独特的重建 数字高程模型获得古海平面的位置,进而检验地 质历史时期海平面重建的结果(Miller et al., 2005; Haq and Schutter, 2008),并可以作为古气候 模拟的输入条件(Baatsen et al., 2016)。

除上述各种构建全球古地理重建模型的方法 外,还有一些对重建模型的校正方法,如真极移路 径(true polar wander, TPW)(Torsvik et al., 2002; Steinberger and Torsvik, 2008)、俯冲板片(subduction slabs)(Meer et al., 2009, 2018; Butterworth et al., 2014)、岩石圈净旋转(net lithosphere rotation) (Evans, 2003; Funiciello et al., 2008; Torsvik et al., 2010b)等,限于文章篇幅此处不做赘述。

2 现有的古地理重建模型的比较

近半个世纪涌现了大量定量或定性的全球古地理 重建模型,几种主流的全球模型见表2,但还有很多 优秀的全球古地理重建模型(McElhinny et al., 2003;

表2 全球古地理模型对比表

Table 2 Comparison of global paleogeographic reconstruction models

模型	时间跨度/Ma	重建步长	开放性	模型构成	参考文献		
PaleoMap	750~0	显生宙 5~10 Ma; 前寒武纪 50~100 Ma	可开放获取	文本式的旋转文件;具有 PaleoDEM 信息的全球 古地理重建图;显生宙板块构造图集、古气候带 重建图、古温度重建图、古降雨量重建图、海水 古盐度和氧含量重建图、古上涌流重建图;及一 系列的重建演示动画(http://www.scotese.com/)	Scotese and Baker, 1975; Scotese and McKerrow, 1990; Scotese, 2016; Scotese and Wright, 2018		
PLATES	750~0	10 Ma	可开放获取	以PowerPoint格式提供了每10Ma的全球重建 图,包含不同视角和不同投影方式的重建,对于 一些关键区域提供了PowerPoint动画模拟(http: //www-udc.ig.utexas.edu/external/plates/)	Muller et al., 1993;Dalziel, 1997;Lawver et al., 2015		
UNIL	600~0	10~20 Ma	2010年之前的	包括24张海陆变化重建图,主要关注特提斯域			
			成果部分开放	的演化(https://www.unil.ch/iste/en/home/	Stampfli and Borel, 2002,		
			获取;现在产	menuinst/recherche/	2004; Vérard et al., 2015;		
			权属于Neftex	geology-and-geodynamics-of-mountain-belts/	Vérard, 2019		
			石油咨询公司	gerard-stampfli.html)			
GOLONKA	544~0	10~20 Ma	可开放获取	文本式板块旋转文件;全球和区域的各时代岩 相分布图、古环境重建图,侧重于古生代的重 建。Cao等(2017)提供了数字化的各个时代古 地理重建图(冰川、山地、大陆、浅海)和相应的 旋转文件	Golonka and Ford, 2000; Golonka, 2007a, b; Cao et al., 2017		
GMAP	750~0	20~50 Ma	可开放获取	包括旋转文件和一系列用于重建的基础地质资	Cocks and Torsvik, 2002;		
				料(如大火成岩省的分布、PGZ的位置、微地块、	Torsvik and Cocks, 2004, 2016;		
				热点轨迹等)(http://www.earthdynamics.org/	Torsvik et al., 2008a; Domeier		
				earthhistory/)	and Torsvik, 2019		
EarthByte	1000~0	连续动态重建	可开放获取	包括一系列用于不同时代的数字旋转模型和板			
				块多边形,通过拓扑方法重建连续闭合板块多	Gurnis et al., 2012; Seton et al.,		
				边形,包括大量对于板块运动的分析、板块数量	2012; Matthews et al., 2016;		
				和大小的时空分布、板块边界变形及动力地形	Müller et al., 2016, 2019;		
				的重建,且该团队一直处于高产出状态(https://	Merdith et al., 2017; Young et		
				www.earthbyte.org/category/resources/data-models/	al.,2019		
				global-regional-plate-motion-models/)			

Smith et al., 2004),限于本文的篇幅并未论及。

2.1 PaleoMap 模型

PaleoMap项目重建的全球古地理模型是最具 有国际声誉的。早在20世纪70年代,Scotese就开 始借助计算机,依据古地磁和岩石记录等数据进 行全球古地理重建(Scotese and Baker, 1975),并 引发了后续一系列基于古地磁学(Voo and Torsvik, 2001)、岩石地层指标(Ziegler et al., 1985; Boucot et al., 2013)、古生物地理学(Cocks and Fortey, 1982; Cocks and Verniers, 1998)及古气候(Rees et al., 2002)等学科的古地理重建方法。

PaleoMap 模型以 5~10 Ma 的时间间隔重建了 750 Ma 以来的全球古地理图,并可以开放获取。 相关重建资料都可以通过 PaleoMap 网站(http:// www.scotese.com/)联系获取(非开放下载),包括 数十张高精度的全球古地理重建图和3张预测的未来 地理图(+50 Ma,+100 Ma 和+250 Ma)。此外, Scotese 开发了多个版本的古地理图以适配不同的 重建软件(如 ArcGIS 和 GPlates)(Scotese and Moore, 2013; Scotese, 2016),并制作和公布了相应 的模拟动画(https://youtube.com/user/cscotese/)。 除了全球古地理重建图外,PaleoMap模型还包括 一系列的深时全球板块构造重建图、古气候带重 建图、古温度重建图、古上涌流重建图等。通过 古高程信息的重建(PaleoDEM)反映地表特征是 PaleoMap模型独有的一大特点。

需要注意的是,由Ronald Blakey制作的Deep Time Maps 系列全球古地理图(Blakey, 2003; Blakey and Ranney, 2018)的基础模型也是源于 PaleoMap,其古地理特征通过Photoshop软件采用 现代地形纹理进行描绘,色彩渲染美观,是学术 界广泛使用的古地理图之一,但现已商业化,需 要购买使用(http://deeptimemaps.com/)。

2.2 PLATES模型

PLATES 项目(http://ig.utexas.edu/marine-andtectonics/plates-project/) 是由德克萨斯大学奥斯汀 分校地球物理研究所的研究团队开发的,其主要 目标是:(1)对过去和现在的板块运动进行建 模,构建高精度的全球、区域板块运动;(2)建 立综合性数据库,应用地理、地球物理和岩石资 料进行板块建模;(3)开发计算机软件,用于处理 数据、重建板块位置和展示板块模型等;(4)基于 板块重建模型讨论全球或区域的地质现象,发掘 地质规律。该项目在Sclater, Scotese和Lawver的 领导下建立了第一个全球海底磁异常条带和等时 线数据库,并提供了一系列 PowerPoint 格式的重建 图和重建模拟及相关的支撑资料(如数据格式描 述文档、数据转换软件、板块边界、大火成岩省 数据库、蛇绿岩数据库、磁异常条带数据库、旋 转文件等),可开放获取。

PLATES模型使用 Rothwell 公司开发的 Paleo-GIS软件(https://www.paleogis.com/)重建了 750 Ma 以来的全球古地理演变模型,并将其成果表示为 10 Ma 间隔的全球和极地视角的古地理图(包括 170 Ma 以来的海底构造重建)(Dalziel, 1997; Lawver et al., 2015)。值得注意的是,其早期成员 之一Dietmar Müller 后来成立了 EarthByte项目。近 年来 PLATES项目不再进行全球古地理重建的更 新,而是着重于南极洲、印度洋、太平洋的深时 高精度区域重建。

2.3 UNIL模型

UNIL项目是在瑞士洛桑大学 Gérard Stampfli 教授的指导下开展的,该项目在2004~2010年间取得很大进展,重建了600 Ma以来覆盖完整地表的古地理图(包括46张古地理重建图)。2010年该重建模型全部产权出售给了 Neftex 石油顾问有限公司,作为其地球系统软件包的一个组件,不再为学术

界所获取。但仍可从 2010 年之前零散发表的相关 文献(Stampfli and Borel, 2002; Stampfli and Borel, 2004; Vérard et al., 2015)中获得,且可通过网站 (https://www.unil.ch/iste/en/home/menuinst/recherche/ geology-and-geodynamics-of-mountain-belts/ gerard-stampfli.html)获得部分该模型的高清重建 图。

UNIL 模型的后续改进是 Panalesis 模型 (Vérard, 2019),该模型使用UNIL开发的方法和技术,但是重新开发了新的框架以适应未来的发展,试图通过多种模型的结合(如地球动力学模型、地层和岩相古地理模型、沉积剥蚀模型、气候模型、板块应力模型、地幔动力学模型以及地球旋转模型等)以全面重建深时的古地理面貌。

2.4 Golonka 模型

Golonka的全球古地理重建模型侧重于岩相和 古环境恢复(Golonka and Ford, 2000; Golonka, 2007a, b; Cao et al., 2017),包括544 Ma以来的32 张全球古地理重建图,其板块划分方案和旋转文 件主要基于PLATES和PaleoMap项目,但对特提斯 域进行了修改和完善。

值得注意的是, Golonka重建模型的数字化文件 已由 Cao 等(2017)发表,该模型包括了402~2 Ma 期间的全球古地理动态重建(包括冰川、山区、 陆地和浅海的时空演变),原始旋转文件来源于 Golonka (2007a)。

2.5 GMAP 模型

挪威奥斯陆大学的Torsvik团队开发了GMAP 软件,用于处理古地磁数据和重建深时古陆的位 置,并据此开发了一系列全球古地理重建模型 (Torsvik et al., 1996, 2008a; Cocks and Torsvik, 2002;Torsvik and Cocks, 2004, 2019)(侧重于定位 古陆位置和板块构造重建)。GMAP模型首次通过 组合基于地幔和古地磁的绝对板块运动模型获得 了全球古地理重建模型的长尺度时间联系:将 120 Ma以来的移动热点绝对参考体系(Doubrovine et al., 2012)和120 Ma之前的经真极移(由于地球 自转产生的地球旋转轴相对于地幔的运动)校正 的古地磁绝对参考体系(Torsvik et al., 2012)结 合,并假设盘古大陆解体以来南非板块的经度变 化非常小,将其作为锚定板块来构建板块运动环 路,从而在绝对参考体系下重建板块的相对运 动。以往的绝对古经度重建只能实现在200 Ma以来, Torsvik 等基于地幔层析成像和300 Ma以来大火成岩省和金伯利岩产出位置的关系提出重建古生代以来板块绝对古经度的方法(PGZ方法; Burke and Torsvik, 2004; Burke et al., 2008; Torsvik et al., 2008b, 2010a), 从而可以在更老的时间确定板块绝对位置。

GMAP模型的相关资料都可公开获取,包括一系列板块重建的旋转文件、板块多边形文件、大火 成岩省数据库、PGZ位置、微地块、热点轨迹数据 库等(http://www.earthdynamics.org/earthmodel/)。 需注意的是,GMAP的许多功能已经整合到新的板 块构造重建软件GPlates中,且其大部分重建数据 也均发布为GPlates兼容的格式,可方便的使用和 修改,甚至据此建设自己的数据集。GMAP模型的 最新发展是前侏罗纪全板块重建方面的探讨(Domeier and Torsvik, 2019),虽然相关的模型数据集 尚未发表,但重建古海洋的洋底构造(如洋中 脊、转换断层、俯冲带等)和古陆的绝对经度位 置是其中最重要的工作。

2.6 EarthByte 模型

EarthByte 团队(https://www.earthbyte.org/)由 一大批板块构造、古地理重建和软件开发方面的 科学家组成,团队成员大多就职于悉尼大学。自 GPlates 软件发布以来(Boyden et al., 2011; Müller et al., 2018),该团队开发了一系列板块重建模 型,覆盖了地质历史的各个阶段。Gurnis 等 (2012)发表了该团队第一个板块构造重建模型, 开创了连续闭合板块重建方法,以板块边界的不 断变化界定各个时期板块位置,获取形状的改 变,从而奠定了整个EarthByte模型的基础构建方 法。该团队聚焦多个前沿的热点科学问题(如地 幔对流、板块边缘变形、古气候模拟、深时碳循 环模拟等),发表了大量新颖的研究成果。

Seton 等(2012)发表了 200 Ma 以来的全球板 块运动模型,以 20 Ma 的时间间隔绘制了古地理重 建图,同时重建了海底等时线的演变。Müller 等 (2016)提出了 230 Ma 以来的连续闭合板块的全球 重建模型,并分析了板块运动速度的限制以及对 全球构造事件的审查。Matthews 等(2016)结合 之前发表的 400~250 Ma(Torsvik and Cocks, 2004) 和 230 Ma 以来(Müller et al., 2016)的重建结 果,提出了第一个晚古生代以来的连续全球板块运动模型。Merdith等(2017)基于地质记录和古地磁数据提出了第一个新元古代(1000~520 Ma)的完整板块拓扑模型,并讨论了该全球重建模型作为古气候建模和地球动力学模型输入条件的可行性,发表了对新元古代全球俯冲作用强度和纬度分布的重新认识。Müller等(2019)发表了加入了板块变形修正的240 Ma以来的全球板块运动模型,为建立详细的板块区域变形网络提供了框架,并为盆地演化和板块一地幔模型提供了约束。Young等(2019)基于Matthews等(2016)的重建模型进行了深入探讨,通过降低整体板块运动速度的方法提出了新的410 Ma以来的全球板块重建,拟合了板块和俯冲带运动学在内的地球动力学,并重建了早古生代以来的地幔流变化。

EarthByte 模型的已发表数据都可开放获取, 包括一系列板块多边形文件、旋转文件、拓扑板 块边界文件,及用于重建的相关支持数据(如海 岸线、年龄等时线、洋中脊、洋陆边界、热点、 古地磁、重力异常数据、海底磁异常数据、动力 地形、海底断裂带、构造应力场、用于赋值板块 ID的静态多边形文件等),所有文件可通过相关文 献的补充材料或EarthByte 网站(https://www.earthbyte.org/category/resources/data-models/)获得。

3 基于古地理重建模型的知识发现

数字全球古地理重建模型的出现深化和改进 了学界对许多地质事件(如超大陆旋回、板块俯 冲机制、构造运动的驱动力)的认识,并出现了 许多新的重要发现。基于数字化的重建模型,多 学科交叉与数值模拟结果激发了对深时地球演化 规律的探讨,并在诸如古气候演变及其控制因 素、俯冲带的形成背景与时空分布,以及盆地演 化与油气勘探等方面涌现了大量的知识发现。

3.1 古气候研究

气候变暖日益得到人们的关注,重建深时古 气候的演变规律对于如何面对和解决当代气候变 暖问题具有重要的指示意义。大气中的二氧化碳 浓度是影响地球气候的关键因素。尽管板块运动 对碳循环具有重要的影响,但如何量化和证实这 种机制一直是个难以解决的问题(Brune et al., 2017)。俯冲带长度与全球板块边界的火山二氧化 碳脱气量成正比, Meer等(2014)通过从板块重 建模型中提取各时代的俯冲带总长度,并将其作 为古气候模拟的输入条件(Baatsen et al., 2016), 重建了250 Ma以来的大气二氧化碳浓度曲线,这 一结果与地球化学指标获得的结果较为一致,从 而通过板块运动建立了固体地球与大气圈、生物 圈之间的联系。

不同古地理位置的陆地及其主要物质组成反 映不同的硅酸盐风化速率,这是控制大气二氧化 碳浓度的关键因素 (Goddéris et al., 2014)。一般 认为,当大量陆地板块位于赤道附近时,全球具 有较高的风化速率,对应于气候较冷的时期。最 近的一项研究表明,深时低纬地区的大规模弧-陆碰撞是全球冰期的主要诱发机制(Macdonald et al., 2019)。研究认为在弧-陆碰撞中,火山弧仰 冲到大陆上,形成蛇绿岩。火山弧和蛇绿岩主要 由易风化的富含钙和镁的玄武岩和超镁铁质岩石 组成, 高效的硅酸盐风化能够吸收大量二氧化 碳。热带地区化学风化效率高及仰冲期间产生的 地形起伏,提高全球风化强度并促进全球降温。 基于 Müller 等(2016)的全球板块重建模型恢复 了各个时间段的热带区域蛇绿岩缝合带的长度, 并对比显生宙的冰期事件,获得很好的相关性 (图4)。重建获得的热带地区缝合线长度记录的 主要峰值(赤道两侧20°范围内的活动缝合带总 长度大于10000 m) 在奥陶纪晚期、石炭纪一二叠 纪和新生代,与显生宙三次主要冰期的纪录对 应;且在非冰室气候的较长时期(如250~50 Ma期 间),没有主要的热带缝合线长度峰值。该研究首 次定量地证明了显生宙气候调节的关键机制就是 赤道区域发生的弧-陆碰撞及之后引发全球风化强 度加强,但与此同时的俯冲作用停止所导致的火 山二氧化碳脱气减少也加快了全球的气候变冷。

3.2 俯冲带的重建

刚性板块的俯冲是行星内部与表面物质交换 的基本机制,控制了地球地幔的热演化。与俯冲 作用有关的火山作用、地震、造山等过程强烈地 塑造了地表形态。但地质历史中的俯冲从何处开 始,在哪里结束?俯冲板片的面积和进入地幔的 通量如何变化,其对地表的响应又如何表达?这 些问题在深时全球古地理重建模型下得到了解答。

研究表明,俯冲板片在板块运动作用中表现



(a)活动缝合线总长度;(b)过去520 Ma重建的位于赤道两侧10°, 15°和20°范围内的活动缝合线总长度;(c)蓝色标识大陆冰川的 纬度范围,不包括阿尔卑斯冰川



the latitudinal extent of continental glaciation (from Macdonald et al., 2019)

为巨大的拉力 (Meer et al., 2009, 2018; Steinberger et al., 2012; Butterworth et al., 2014; Mallard et al., 2016), 甚至可能是板块运动的主要驱动力, 了解 俯冲作用的样式与机制是揭秘板块构造作用机制 的重要一环。Ulvrova 等(2019)通过地幔对流数 值模拟, 与通过全球古地理重建模型 (Müller et al., 2016)和地幔层析成像 (Meer et al., 2018)中 恢复的板片俯冲历史进行对比,发现地质历史时 期俯冲带的开始与终止并不是随机分布的。其数 值模型表明, 俯冲的启动主要受岩石圈强度和大 陆边缘长度的控制。强度较大的岩石圈有利于引

发大陆附近的俯冲开始,而对于强度较弱的岩石 圈,俯冲的开始位置则遵从随机分布。在大陆边 缘形成的俯冲带往往留在原位,而在大洋内部形 成的俯冲带则往往迁移并与其他大洋内部俯冲带 合并,或到达大陆边缘终止。

基于不断变化的拓扑板块边界重建模型, East等(2020)提取了随时间变化的海沟收敛 速率,并计算了不同时代的俯冲板块面积,结 合海底年龄格网计算俯冲岩石圈的厚度,从而 获得随时间变化的俯冲板片通量。该研究重建 了230 Ma以来的全球俯冲板片通量(图5)。结 果表明板片通量在180 Ma到130 Ma之间相较之 前翻了一倍,超过了500 km³/yr,随后又朝着白 垩纪一古近纪边界再次减半,这主要是由于太 平洋洋盆边缘的俯冲带的驱动。130 Ma(白垩 纪中期)的峰值可归因于盘古超大陆破裂后洋 中脊长度增加了两倍,板块俯冲速度也同时增 加,平均速度超过10 cm/yr。在短短的50个 Ma 期间,大约三分之一的俯冲板片通量进入了地 幔,这种俯冲板片超通量现象使得地幔中物质 激增,从而反馈为地幔上涌物质的增加。这一 白垩纪中期事件可能是达尔文地幔超隆起事件 和南非高原的动力地形隆起的起因,并伴随着 大量地幔深处金伯利岩在地表的形成。该研究 成果对于理解俯冲所消耗的物质随时间变化的 通量非常重要,俯冲板片的超通量事件可能是 超大陆裂解后大陆扩散的普遍特征。

3.3 盆地演化与油气勘探

在传统的油气勘探中,古地理被用于描绘关键层位(烃源岩、储层、盖层)的堆叠、分布与质量评价。通过对全球岩相和古地理环境的编图(Golonka and Ford, 2000; Golonka, 2007a),结合已知的钻井、地震、油田的古地理位置可推测潜在的油气富集区,这种油气勘探价值相较于地震剖



(a) 基于 Müller等(2016)重建的130Ma全球板片俯冲通量,代表了重建时段内的最大值,浅灰和深灰色分别表示非洋壳区域和现代陆地区域,灰色箭头指示板块绝对运动速度;(b)基于 Müller等(2016)重建的俯冲板片通量曲线以及相应时段的大火成岩省(包括陆地上的和海上的)面积,黄色信号代表数据来源于 Johansson等(2018),深蓝色信号代表数据来源于 Whittaker等,2015; East 等,2020

图 5 全球俯冲板片通量随时间的演变重建 Fig. 5 Reconstruction of global slab volume flux in deep time 面和钻探而言精度不高,但相当廉价、便捷,具 有重要的宏观指导意义。除了对关键层位的预 测,古地理模型在盆地演化方面还可以提供重要 的指导(I'Anson et al., 2018)。

I'Anson等(2018)最近基于全球重建模型(Müller et al., 2016)中的动力地形演变重建了澳大利亚加利利盆地(the Galilee Basin)的埋藏和暴露剥蚀历史。研究发现,当地主要的烃源岩层系是二叠纪沉积的煤系地层,其在晚白垩纪达到了最大埋深(约1.5~2 km),同时处于超过100°C的地温中,在该阶段生成了大量的天然气(约45 m³/t)。但由于原太平洋板块俯冲的停止(约100 Ma前),该盆地所处区域的重力地形负荷突然降低(约95 Ma前),从而导致了一段时间的隆升和剥蚀,逸散了大量的天然气,残余气体经过后期的再次沉降保存最终构成了现今当地的天然气资源。该研究表明由俯冲作用驱动的动力地形对盆地的沉降、隆升和资源潜力的保存可产生重要影响。

4 总结与展望

古地理重建经过半个世纪的发展,已经迈入 了基于模型重建的阶段,无论是区域覆盖度、时 间跨度还是技术手段都有了巨大的进步,众多基 于不同重建理论和方法的全球古地理重建模型为 我们提供了更多的手段解读深时地球的演化。现 存的主流的全球古地理重建模型主要包括 Paleo-Map、 PLATES、 UNIL、 GOLONKA、 GMAP 和 EarthByte 等,这些模型在时间跨度、模型构成、重 建方法和公开性方面有很大的区别。基于数字化古 地理重建模型的许多应用已有重要理论突破,如热 带地区的弧-陆碰撞调节古气候模式(Macdonald et al., 2019)、俯冲通量的激增反馈为地表高原的隆起 和金伯利岩的形成(East et al., 2020)、受动力地形 控制的沉积盆地的沉降与抬升与烃源岩勘探的关系 (I'Anson et al.. 2018) 等。这些基于古地理重建模 型的二次开发和模拟为我们提供了大数据驱动下地 球科学创新和突破的参考案例。

但是现存的各种古地理重建模型有或多或少的不足之处,如PaleoMAP模型的古地理重建图修订代价高、UNIL模型已商用,不可开放获取、GMAP和EarthByte模型缺少地表特征的重建等。随着深时数字地球(DDE)项目的不断开展,作

为底层框架的深时全球古地理、古构造重建模型 呈现了新的发展机遇。整合国内外顶尖资源和科 研团队共同开发新一代的综合性全球古地理重建 框架,服务整个大科学计划的目标和愿景,是目 前的重要任务之一。未来的全球重建模型应当是 涵盖完整的地质历史时期板块运动、地表特征和 深部过程的四维数字模型,并可便于修改和调 试,从而构建真正的深时"数字地球"。

参考文献(References):

- Boucot A J, 陈旭, Scotese C R, et al. 2009. 显生宙全球古气候重建[M]. 北京:科学出版社.
- Baatsen M, Hinsbergen D J J V, Heydt A S V D, et al. 2016. Reconstructing geographical boundary conditions for palaeoclimate modelling during the Cenozoic [J]. Climate of the Past, 12: 1635–1644.
- Belasky P, Stevens C H and Hanger R A. 2002. Early Permian location of western North American terranes based on brachiopod, fusulinid, and coral biogeography [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 179: 245–266.
- Blakey R C and Ranney W D. 2018. Ancient Landscapes of Western North America---A Geologic History with Paleogeographic Maps [M]. Springer.
- Blakey R C. 2003. Carboniferous–Permian paleogeography of the assembly of Pangaea XVth International Congress on Carboniferous and Permian Stratigraphy [M]. Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences; Utrecht, the Netherlands: 443–456.
- Boucot A J, Chen X, Scotese C R, et al. 2013. Phanerozoic Paleoclimate: An Atlas of Lithologic Indicators of Climate [M]. Tulsa: SEPM (Society for Sedimentary Geology).
- Boyden J A, Müller R D, Gurnis M, et al. 2011. Next-Generation Plate-Tectonic Reconstructions Using GPlates [M] // Keller G R, Baru C, Geoinformatics: Cyberinfrastructure for the solid Earth sciences. Cambridge University Press; Cambridge: 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: 941–946.
- Burke K, Steinberger B, Torsvik T H, et al. 2008. Plume generation zones at the margins of large low shear velocity provinces on the core-mantle boundary [J]. Earth and Planetary Science Letters, 265: 49–60.
- Burke K and Torsvik T H. 2004. Derivation of large igneous provinces of the past 200 million years from long-term heterogeneities in the deep mantle [J]. Earth and Planetary Science Letters, 227: 531–538.
- Butterworth N P, Talsma A S, Müller R D, et al. 2014. Geological, tomographic, kinematic and geodynamic constraints on the dynamics of sinking slabs [J]. Journal of Geodynamics, 73: 1–13.
- Butterworth N, Steinberg D, Müller R D, et al. 2016. Tectonic environments of South American porphyry copper magmatism through time revealed by spatiotemporal data mining [J]. Tectonics, 35: 2847–2862.
- Cao W C, Zahirovic S, Flament N, et al. 2017. Improving global paleogeography since the late Paleozoic using paleobiology [J]. Biogeosciences, 14: 5245–5439.
- Cecca F. 2014. Palaeobiogeography of Marine Fossil Invertebrates: Concepts and Methods [M]. Florida: CRC Press.
- Chen J T, Montañez I P, Qi Y P, et al. 2018. Strontium and carbon isotopic evidence for decoupling of p CO₂ from continental weathering at the apex of the late Paleozoic glaciation [J]. Geology, 46: 395–398.
- Cocks L R M and Fortey R A. 1982. Faunal evidence for oceanic separations in the Palaeozoic of Britain [J]. Journal of the Geological Society, 139: 465–478.
- Cocks L R M and Torsvik T H. 2002. Earth geography from 500 to 400 million

Cocks L R M and Torsvik T H. 2006. European Geography in A Global Context from the Vendian to the End of the Palaeozoic [M] // Gee D G, Stephenson R A, European Lithosphere Dynamics. The Geological Society of London; London: 83–95.

Geological Society, 159: 631-644.

- Cocks L R M and Verniers J. 1998. Applicability of planktonic and nektic fossils to palaeogeographic reconstructions [J]. Acta Universitatis Carolinae-Geologica, 42: 399–400.
- Dalziel I W D. 1997. Overview: Neoproterozoic–Paleozoic geography and tectonics: Review, hypothesis, environmental speculation [J]. Geological Society of America Bulletin, 109: 16–42.
- Dietz R S. 1961. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor [J]. Nature, 190: 854–857.
- Domeier M and Torsvik T H. 2019. Full-plate modelling in pre-Jurassic time [J]. Geological Magazine, 156: 261–280.
- Domeier M, Voo R V D, Tomezzoli R N, et al. 2011. Support for an "A-type" Pangea reconstruction from high-fidelity Late Permian and Early to Middle Triassic paleomagnetic data from Argentina [J]. Journal of Geophysical Research, 116.
- Domeier M, Voo R V D and Torsvik T H. 2012. Paleomagnetism and Pangea: The road to reconciliation [J]. Tectonophysics, 514–517: 14–43.
- Doubrovine P V, Steinberger B and Torsvik T H. 2012. Absolute plate motions in a reference frame defined by moving hot spots in the Pacific, Atlantic, and Indian oceans [J]. Journal of Geophysical Research, 117: B09101.
- East M, Müller R D, Williams S E, et al. 2020. Subduction history reveals Cretaceous slab superflux as a possible cause for the mid-Cretaceous plume pulse and superswell events [J]. Gondwana Research, 79: 125–139.
- Evans D A D. 2003. True polar wander and supercontinents [J]. Tectonophysics, 362: 303–320.
- Funiciello F, Faccenna C, Heuret A, et al. 2008. Trench migration, net rotation and slab-mantle coupling [J]. Earth and Planetary Science Letters, 271: 233–240.
- Garnero E J and McNamara A K. 2008. Structure and dynamics of Earth's lower mantle [J]. Science, 320: 626–628.
- Ghienne J F, Le Heron D P, Moreau J, et al. 2007. The Late Ordovician Glacial Sedimentary System of the North Gondwana Platform [M] // Hambrey M J, Christoffersen P, Glasser N F, et al., Glacial sedimentary processes and products. John Wiley & Sons: 295–319.
- Goddéris Y, Donnadieu Y, Le Hir G, et al. 2014. The role of palaeogeography in the Phanerozoic history of atmospheric CO₂ and climate [J]. Earth-Science Reviews, 128: 122–138.
- Golonka J and Ford D. 2000. Pangean (Late Carboniferous–Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 161: 1–34.
- Golonka J. 2007a. Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 244: 297–307.
- Golonka J. 2007b. Phanerozoic paleoenvironment and paleolithofacies maps: late Palezoic [J]. Geologia/Akademia Górniczo–Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, 33: 145–209.
- Gurnis M, Turner M, Zahirovic S, et al. 2012. Plate tectonic reconstructions with continuously closing plates [J]. Computers & Geosciences, 38: 35–42.
- Haq B U and Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. Science, 322: 64–68.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. 1998. A Neoproterozoic snowball earth [J]. Science, 281: 1342–1346.
- Hoffman P F and Li Z X. 2009. A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 277: 158–172.
- Huang B C, Yan Y G, Piper J D A, et al. 2018. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during Late Paleozoic and Early Mesozoic times [J]. Earth-Science Reviews, 186: 8–36.
- Hunt T S. 1873. The paleogeography of the north-American continent [J].

Journal of the American Geographical Society of New York, 4: 416-431.

- I' Anson A, Deighton I, Müller R D, et al. 2018. Burial and exhumation history of the Galilee Basin, Australia: implications for unconventional hydrocarbon prospectivity [J]. AAPG Bulletin, 102: 483–507.
- Johansson L, Zahirovic S and Müller R D. 2018. The interplay between the Eruption and Weathering of large igneous provinces and the deep-time carbon cycle [J]. Geophysical Research Letters, 45: 5380–5389.
- Jones A T and Fielding C R. 2004. Sedimentological record of the late Paleozoic glaciation in Queensland, Australia [J]. Geology, 32: 153–156.
- Kiessling W, Flügel E and Golonka J. 2003. Patterns of Phanerozoic carbonate platform sedimentation [J]. Lethaia, 36: 195–225.
- Lawver L A, Dalziel I W D, Norton I O, et al. 2015. The Plates 2014 Atlas of Plate Reconstructions (550 Ma to Present Day), Plates Progress Report No. 374–0215 [M]. University of Texas Institute for Geophysics Technical Reports No. 201: 220.
- Li Z X, Mitchell R N, Spencer C J, et al. 2019. Decoding Earth's rhythms: modulation of supercontinent cycles by longer superocean episodes [J]. Precambrian Research, 323: 1–6.
- Macdonald F A, Swanson-Hysell N L, Park Y, et al. 2019. Arc-continent collisions in the tropics set Earth's climate state [J]. Science, 364: 181–184.
- Mallard C, Coltice N, Seton M, et al. 2016. Subduction controls the distribution and fragmentation of Earth's tectonic plates [J]. Nature, 535: 140–143.
- Matthews K J, Maloney 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.
- McElhinny M W, Powell C M and Pisarevsky S A. 2003. Paleozoic terranes of eastern Australia and the drift history of Gondwana [J]. Tectonophysics, 362: 41–65.
- Meer D G V D, Hinsbergen D J J V and Spakman W. 2018. Atlas of the Underworld: slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity [J]. Tectonophysics, 723: 309–448.
- Meer D G V D, Spakman W, Hinsbergen D J J V, et al. 2009. Towards absolute plate motions constrained by lower-mantle slab remnants [J]. Nature Geoscience, 3: 36–40.
- Meer D G V D, Zeebe R E, Hinsbergen D J J V, et al. 2014. Plate tectonic controls on atmospheric CO₂ levels since the Triassic [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111: 4380–4385.
- Meinhold G and Şengör A M C. 2019. A historical account of how continental drift and plate tectonics provided the framework for our current understanding of palaeogeography [J]. Geological Magazine, 156: 182–207.
- Merdith A S, Collins A S, Williams S E, et al. 2017. A full-plate global reconstruction of the Neoproterozoic [J]. Gondwana Research, 50: 84–134.
- Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 20: 551–566.
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 66: 1–33.
- Miller K G, Kominz M A, Browning J V, et al. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change [J]. Science, 310: 1293–1298.
- Mitchell R N, Kilian T M and Evans D A D. 2012. Supercontinent cycles and the calculation of absolute palaeolongitude in deep time [J]. Nature, 482: 208–213.
- Montañez I P and Poulsen C J. 2013. The Late Paleozoic ice age: an evolving paradigm [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 41: 629–656.
- Müller R D, Cannon J, Qin X D, et al. 2018. GPlates-building a virtual earth through deep time [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19: 2243–2261.
- Müller R D, Dutkiewicz A, Seton M, et al. 2013. Seawater chemistry driven by supercontinent assembly, breakup, and dispersal [J]. Geology, 41:

907-910

- Müller R D, Royer J Y and Lawver L A. 1993. Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks [J]. Geology, 21: 275–278.
- Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. 2008. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 9: Q04006.
- 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: 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: 1884–1907.
- Rees P M, Ziegler A M, Gibbs M T, et al. 2002. Permian phytogeographic patterns and climate Data/Model comparisons [J]. The Journal of Geology, 110: 1–31.
- Scotese C R and Baker D W. 1975. Continental drift reconstructions and animation [J]. Journal of Geological Education, 23: 167–171.
- Scotese C R and McKerrow W S. 1990. Revised world maps and introduction [J]. Geological Society, London, Memoirs, 12: 1–21.
- Scotese C R and Moore T L. 2013. Teaching and research tools for deep time studies: Ancient Earth app, Global Geology website, and the PALEOMAP PaleoAtlas for ArcGIS [C] // Conference: Geological Society of America Annual Meeting, Abstracts with Program, At Denver, CO, 45: 1–73.
- Scotese C R and Schettino A. 2017. Late Permian-Early Jurassic Paleogeography of Western Tethys and the World [M] // Soto J. I., Flinch J., Tari G., Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins: Tectonics and Hydrocarbon Potential. Elsevier: 57–95.
- Scotese C R and Wright N. 2018. Paleomap Paleodigital Elevation Models (PaleoDEMS) for the Phanerozoic PALEOMAP Project [OL]. https://www. earthbyte.org/paleodem-resourcescotese-and-wright-2018.
- Scotese C R. 2016. PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter Program [M]. PALEOMAP Project (http://www.earthbyte.org/ paleomap-paleoatlas-for-gplates/): 1–56.
- Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma [J]. Earth-Science Reviews, 113: 212–270.
- Shen S Z, Zhang H, Shi G R, et al. 2013. Early Permian (Cisuralian) global brachiopod palaeobiogeography [J]. Gondwana Research, 24: 104–124.
- Smith A G, Smith D G and Funnell B M. 2004. Atlas of Mesozoic and Cenozoic Coastlines [M]. Cambridge: Cambridge University Press:
- Stampfli G M and Borel G D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons [J]. Earth and Planetary Science Letters, 196: 17–33.
- Stampfli G M and Borel G D. 2004. The Transmed Transects in Space and Time: Constraints on the Paleotectonic Evolution of the Mediterranean Domain [M]. Cavazza W, Roure F, Spakman W, et al., The Transmed Atlas. The Mediterranean region from crust to mantle. Springer; Berlin, Heidelberg: 53–90.
- Stein C A and Stein S. 1992. A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age [J]. Nature, 359: 123–129.
- Steinberger B, Sutherland R and O'connell R J. 2004. Prediction of Emperor-Hawaii seamount locations from a revised model of global plate motion and mantle flow [J]. Nature, 430: 167–173.
- Steinberger B, Torsvik T H and Becker T W. 2012. Subduction to the lower mantle - a comparison between geodynamic and tomographic models [J]. Solid Earth Discussions, 4: 851–887.
- Steinberger B and Torsvik T H. 2008. Absolute plate motions and true polar wander in the absence of hotspot tracks [J]. Nature, 452: 620–623.
- Torsvik T H, Burke K, Steinberger B, et al. 2010a. Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary [J]. Nature, 466: 352–355.
- Torsvik T H and Cocks L R M. 2004. Earth geography from 400 to 250 Ma: a palaeomagnetic, faunal and facies review [J]. Journal of the Geological

Society, 161: 555-572.

- Torsvik T H and Cocks L R M. 2016. Earth History and Palaeogeography [M]. Cambridgeshire: Cambridge University Press.
- Torsvik T H and Cocks L R M. 2019. The integration of palaeomagnetism, the geological record and mantle tomography in the location of ancient continents [J]. Geological Magazine, 156: 242–260.

Torsvik T H, M ü ller R D, Voo R V D, et al. 2008a. Global plate motion frames: Toward a unified model [J]. Reviews of Geophysics, 46: RG3004.

- Torsvik T H, Smethurst M A, Burke K, et al. 2008b. Long term stability in deep mantle structure: Evidence from the~300 Ma Skagerrak-Centered Large Igneous Province (the SCLIP) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 267: 444–452.
- Torsvik T H, Steinberger B, Cocks L R M, et al. 2008c. Longitude: Linking Earth's ancient surface to its deep interior [J]. Earth and Planetary Science Letters, 276: 273–282.
- Torsvik T H, Smethurst M A, Meert J G, et al. 1996. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic—A tale of Baltica and Laurentia [J]. Earth-Science Reviews, 40: 229–258.
- Torsvik T H, Steinberger B, Ashwal L D, et al. 2016. Earth evolution and dynamics—a tribute to Kevin Burke [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 53: 1073–1087.
- Torsvik T H, Steinberger B, Gurnis M, et al. 2010b. Plate tectonics and net lithosphere rotation over the past 150My [J]. Earth and Planetary Science Letters, 291: 106–112.
- Torsvik T H, Voo R V D, Preeden U, et al. 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics [J]. Earth-Science Reviews, 114: 325–368.
- Torsvik T H, Voo R V D and Redfield T F. 2002. Relative hotspot motions versus true polar wander [J]. Earth and Planetary Science Letters, 202: 185–200.
- Ulvrova M M, Coltice N, Williams S E, et al. 2019. Where does subduction initiate and cease? A global scale perspective [J]. Earth and Planetary Science Letters, 528: 115836.
- Vérard C, Hochard C, Baumgartner P O, et al. 2015. Geodynamic evolution of the Earth over the Phanerozoic: Plate tectonic activity and palaeoclimatic indicators [J]. Journal of Palaeogeography, 4: 167–188.
- Vérard C. 2019. Panalesis: towards global synthetic palaeogeographies using integration and coupling of manifold models [J]. Geological Magazine, 156: 320–330.
- Vine F J and Matthews D H. 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges [J]. Nature, 199: 947–949.
- Voo R V D and Torsvik T H. 2001. Evidence for late Paleozoic and Mesozoic non-dipole fields provides an explanation for the Pangea reconstruction problems [J]. Earth and Planetary Science Letters, 187: 71–81.
- Wang C S, Shen S Z, Zhou C H, et al. 2019. Decodification of earth evolution in Deep-Time [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 93: 1–2.
- Wegener A. 1966. The Origin of Continents and Oceans [M]. Chicago: Courier Corporation.
- Whittaker J M, Afonso J C, Masterton S, et al. 2015. Long-term interaction between mid-ocean ridges and mantle plumes [J]. Nature Geoscience, 8: 479–483.
- Wilson J T. 1963. A possible origin of the Hawaiian Islands [J]. Canadian Journal of Physics, 41: 863–870.
- Young A, Flament N, Maloney K T, et al. 2019. Global kinematics of tectonic plates and subduction zones since the late Paleozoic Era [J]. Geoscience Frontiers, 10: 989–1013.
- Zhang Y C, Shen S Z, Zhang Y J, et al. 2019. Middle Permian foraminifers from the Zhabuye and Xiadong areas in the central Lhasa Block and their paleobiogeographic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 175: 109–120.
- Ziegler A M, Hansen K S, Johnson M E, et al. 1977. Silurian continental distributions, paleogeography, climatology, and biogeography [J]. Tectonophysics, 40: 13–51.
- Ziegler A M, Rowley D B, Lottes A L, et al. 1985. Paleogeographic interpretation: with an example from the mid-Cretaceous [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 13: 385–423.