

全球中、新生代大地构造特征及其演化框架

——《全球中、新生代大地构造图》编图研究进展

李江海¹⁾, 刘持恒¹⁾, 陶崇智²⁾

1) 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871;

2) 中国石化石油勘探开发研究院, 北京, 100083

内容提要: 全球中、新生代大地构造编图是全球构造理论研究的基础和切入点, 本文介绍了该图编制思路与方法、数据来源和大地构造区划, 并以地球圈层构造为主线, 讨论了全球中生代以来水平构造和全球垂向圈层之间的衔接关系, 认为大洋中脊和环太平洋边缘俯冲带通过印度洋、北冰洋、特提斯构造域以及南极洲板块发生构造衔接和转换。南极洲板块周缘被洋中脊环绕, 并衔接了全球洋中脊在地球南部的离散运动。结合构造赤道理论, 分析了全球不同构造背景下的构造单元之间的关系, 认为构造赤道是中生代以来全球构造体制大规模调整的产物。在此基础上, 从泛大陆裂解, 洋陆关系的角度探讨了中、新生代的全球构造演化。

关键词: 地震层析; 板片俯冲; 地幔对流; 大陆动力学; 大数据; 全球构造图; 构造演化

地球行星是太阳系独特的蓝色星球, 表现为有水圈、大气圈、生物圈的演化和发育, 以及大陆和大洋地壳的构造分异。它还是活动的行星, 表现为持续活动至今的构造、岩浆、变质作用和地质演化。如何从宏观上认识全球大地构造特征及其构造格局, 一直是数百年来地质学家、地球物理学和地理学家的梦想, 并为此开展了众多尝试和不懈的努力探索。

之前由于地学数据和知识的限制, 认识全球构造是困难的。新世纪以来, 随着人类调查水平的提高, 特别是全球观测技术的迅速发展, 大量高精度的地质与地球物理数据库得以建立和完善。整合全球不同尺度的相关地质地球物理资料, 已形成并不断发表地球科学大数据, 其中包括全球海陆高程数据、全球重—磁场数据、全球 GPS 数据、全球应力场数据、全球地震数据、全球热点数据、全球活火山数据、全球海底沉积厚度图、古生物化石等。这些地质与地球物理大数据成为描述地球现今构造特征和动力学过程的重要基础, 彻底改变了传统的地质研究思维。在此基础上, 世界不同学术机构和专家学者 (CGMW, NASA, USGS, NGDC, EarthByte, Gordon, 1998; Kreemer et al., 2003; Bird, 2003; Hagstrum,

2005; Müller et al., 2008; Schellart et al., 2008; Seton, 2012; 李江海等, 2014a, 2015a, b, 2016, 2017, 2019a, b) 出版或发表了各类全球地质、地貌、地球物理、地质构造图件, 内容涵盖海陆高程与地貌、地球物理场、活动构造 (断裂、火山、地震、应力、应变等)、陆上地质、洋壳年龄等, 这些专题性图件从不同角度反映了现今地球的构造特征与动力学过程。

前人综合性的全球和区域地质编图研究多着眼于陆地上不同岩石单元的分布, 时间跨度囊括太古宙至今的整个地质历史 (Bouysse et al., 2014), 因而难以清晰刻画中生代以来的大地构造特征, 更无法表达地史上大地构造过程与现今地球运动学与动力学过程的耦合关系。因此, 需要开展专门的编图研究工作, 突出刻画全球中、新生代大地构造格局, 及其与现今地球运动学和动力学过程的耦合关系, 编制《全球中、新生代大地构造图》的时机已经成熟。目前, 国际上成立了许多地质地球物理海底地质的数据中心和编图研究、以及许多的国际地质对比计划项目, 并不断发表其研究成果 (全球编图委员会), 它们成为本文全球构造研究的重要素材, 也是

注: 本文为大型油气田及煤层气开发国家科技重大专项 (编号: 2016ZX05033002-007) 和国家重点研发计划课题 (编号: 2016YFC0503301) 的成果。

收稿日期: 2018-10-14; 改回日期: 2019-04-18; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.001

作者简介: 作者简介: 李江海, 男, 1965 年生, 博士, 北京大学地球与空间科学学院教授、博士生导师, 主要从事大地构造学教学与研究, Email: jhli@pku.edu.cn。

表 1 全球中、新生代大地构造相关数据库列表

Table 1 List of database for global Mesozoic and Cenozoic tectonics

数据库	范围与分辨率	主要内容	数据库建立机构及资料来源
Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust (ver. 3, 2008)	180°E~180°W, 80. 738°N~80. 738°S; 2 弧分 (约 3. 7 km)	全球洋壳年龄、半扩张速率与不对称性	EarthByte; Müller et al., 2008
GEBCO's gridded bathymetric data sets (GEBCO_2014 Grid)	180°E~180°W, 90°N~90°S; 30 弧秒 (约 0. 92 km)	全球海、陆高程	General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)
Global Multi-Resolution Topography Data Synthesis (GMRT ver. 3. 2)	180°E~180°W, 90°N~90°S; 10 m~2 km	全球海、陆高程	Ryan et al., 2009
Landsat 8 OLI_TRIS 卫星数字产品详细信息	180°E~180°W, 90°N~90°S; 30 m	全球遥感影像	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (http://www.gscloud. cn)
World Gravity Map (2012)	180°E~180°W, 90°N~90°S; 1 弧分 (约 1. 8 km)	全球自由空气重力异常、布格重力异常	Bureau Gravimétrique International (BGI)
World Digital Magnetic Anomaly Map (EMAG3)	180°E~180°W, 90°N~90°S; 3 弧分 (约 5. 5 km)	全球磁力异常	National Geophysical Data Center (NGDC)
World Stress Map (2008)	—	全球地壳应力特征数据点 (21750 个)	Helmholtz Centre Potsdam——GFZ; German Research Centre for Geosciences
CRUST 1. 0	180°E~180°W, 90°N~90°S; 1 弧分 (约 1. 8 km)	全球地壳厚度	Laske et al., 2013
Geological Map of the World at 1 : 25000000 (3rd edition)	180°E~180°W, 90°N~90°S	全球地质体分布	Bouysse et al., 2014 (CGMW)
Total Sediment Thickness of the World's Oceans and Marginal Seas (Version 2)	180°E~180°W, 78. 8°N~70°S; 5 弧分 (约 9. 2 km)	全球沉积物厚度分布	National Geophysical Data Center (NGDC)
Digital Gaetteer of GEBCO Sub-Committee on Undersea Feature Names (SCUFN)	180°E~180°W, 78. 8°N~70°S	全球海底地理实体名称	General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)
SRTM 国际科学数据镜像服务系统	180°E~180°W, 60°N~56°S; 90 m、30 m	全球数字高程数据 (基于 SRTM 镜像数据)	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (http://www.gscloud. cn)
Volcanoes of the World	—	全球活火山分布	Smithsonian Global Volcanism Program
全球热点数据	—	全球热点分布	Whittaker et al., 2015
Global Centroid—Moment—Tensor (CMT) Project	—	全球震源机制解	Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO)
Ages of seamounts, islands and plateaus on the Pacific plate	太平洋	太平洋海山年龄	Clouard and Bonneville, 2001
Global PaleoMagnetic DataBase (GPMDB v4. 6)	—	全球古地磁数据 (7513 块样品获得的 9259 个数据)	Pisarevsky, 2005
Database of the Geologic Map of North America	北美	北美地质体分布	Garrity and Soller, 2009

从全球构造视角,审视地球科学理论的重要依托。

1 全球地质、地球物理数据基础

大地构造编图是基于地貌学、地质学、地球物理学等多学科研究成果,对地壳、岩石圈地质特征、地质组成总结凝练,形成的地质构造宏观的理论认识的综合性图件。它可以具有丰富多彩和灵活多样的表达形式。收集和整理全球区域地质调查资料和高精度观测手段获得的最新地球物理数据,参考目前公开的全球地质编图成果,通过地理信息平台

(GIS 平台)对资料进行数字化整合,结合大地构造研究新理论,进行图件绘制,突出表达全球中、新生代大地构造的最新成果和进展。

1.1 数据收集与处理

本次编图研究采用的基础地质数据和图件主要来源于公开发表的科学文献及数据库,它们包括:全球地理底图(海陆、海岸线、陆地地貌)、全球海底深度图及海底地貌图、全球 DEM 高程图、全球构造图(断裂带、活动火山、震中位置、盆地分布图、克拉通造山带分布图)、海底磁异常分布图(洋壳形成年代

的制约)、全球GPS板块运动矢量分布图等(表1)。对不同来源的地质与地球物理数据进行处理,统一投影方式统一成图,对于期刊文献、研究报告等多来源的栅格图件,进行统一标准的投影校正并叠加。

1.2 编制统一的地形底图

将统一投影后的数据整合至地理信息平台,提取所需信息并进行矢量化。根据研究区范围和图幅要求,选取 $180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$, $72^{\circ}\text{N}\sim 72^{\circ}\text{S}$ 为编图范围,采用墨卡托投影,选用1:45000000比例尺,编制统一的图件底图。

1.3 编制大地构造图

在统一的底图上首先叠加前中生代主要大地构造单元,反映中生代之前全球大地构造格局。图面主要内容包括:前寒武克拉通与地盾,新元古代前的造山带,前寒武沉积盆地,新元古代造山带,早古生代造山带,晚古生代造山带等,以及前中生代重要线状构造,如断裂带、构造线、异常带等。在前中生代构造单元的基础之上,补充中、新生代主要构造单元,以反映中、新生代大地构造格局。

以上基础数据,形成地质地球物理底图,即构造区划的基本依据,划分出来重大构造边界及构造单元。现代板块边界的识别和解释主要来自地形、火山活动、地震活动等证据,并结合板块相对运动速率的分析(由磁异常、震源机制解及大地测量得出;Bird, 2003)在此基础上,形成全球大地构造略图,突出全球尺度上的地质构造。由于不同地质探测技术手段精度的差异,地质和地球物理学的不同单元,常具有平面投影叠合关系,而不是简单的对应特征。深部地幔对不同圈层影响的表达主要包括:大火成岩省(LIP)、热点、大洋高原、火山岛链(地质年代及其板块运动方位转折)—板块俯冲带迁移轨迹(太平洋、特提斯、地中海)、核幔边界的大型剪切波低速异常区(LLSVP)。

2 全球中、新生代大地构造区划

构造单元分级为大地构造编图的基础。本文全球大地构造编图(比例尺1:45000000,墨卡托投影),力图表达中、新生代构造地质单元、深部超级地幔柱在地表的投影界线,涉及全球板块构造划分、大陆构造单元划分(造山带、克拉通、裂谷系)、LIP—热点等。

依据地质、地貌、地球物理图件,可以综合划分全球岩石圈构造单元,简化为三级构造单元。超级构造单元包括:巨型大陆板块(欧亚大陆、非洲大

陆、南、北美洲大陆)、构造域、超级幔柱(深部波速异常区地表投影)。全球板块边界表现为构造活动、地貌高度变化、地球物理等方面异常特征,以大洋中脊体系(太平洋、大西洋、印度洋)、大陆裂谷系、转换断层、俯冲带及碰撞造山带为标志。为此,岩石圈表面可以清晰地划分为板块边界和板块单元。

一级构造单元为板块,指内部应变较小(第二应变速率不变量 $\varepsilon_{II} < 10^{-9}/\text{a}$),Kreemer et al., 2003)、相对连续的岩石圈块体。一级构造边界:洋中脊(包括转换断层)、俯冲带(海沟、增生楔、火山—侵入岩带、弧后盆地、弧前增生杂岩带)、三联点、构造结等(Schellart et al., 2008, 2010)。根据板块规模和存在时间,将其分为大板块、小版块和微板块三类,大板块为组成全球岩石圈的主要块体,通常包括发育前寒武基底的大陆地壳和中生代以来的大洋地壳,或面积大、存在时间长的大洋岩石圈(如太平洋板块)。小板块为面积较小(约 10^6km^2)、主要部分已俯冲消亡的大洋岩石圈(如纳兹卡板块、科科斯板块等),或大板块之间构造调节形成的岩石圈块体(如安托利亚板块、加勒比板块等)。微板块为小型岩石圈块体,规模远小于其他板块(约 10^5km^2),受板块边界调节和迁移作用控制,被板块边界围限。小板块和微板块常分布于板块边缘地区或者多个板块交界区域,是板块之间几何形态和运动变形、构造调节、裂解作用的产物或者是巨型大洋板块消亡后残留部分,如加勒比小板块、如加洛林小板块、冈瓦纳大陆北缘(早古生代)、欧亚大陆南缘(中、新生代)等。虽然它们在运动上相对独立,但发育历史短暂、板块边界运动性质多变。

在此基础上,可以细化全球二级构造单元:裂谷系、微板块、陆块、克拉通(地盾、地台)、陆上残余沉积盆地(叠合于克拉通或造山带上)、造山带、火山带、LIP、热点轨迹—洋底高原—海岭等。

在结合前人研究基础(Bird, 2003),根据上述板块边界类型,将全球划分为22个板块(图1),其中包括大板块10个,欧亚板块、印度板块、北美板块、太平洋板块、南美板块、非洲板块、南极洲板块、阿拉伯板块、澳大利亚板块、索马里板块;小板块8个,包括加勒比板块、加洛林板块、科科斯板块、摩羯座板块、胡安德福卡板块、纳兹卡板块、菲律宾板块、斯科舍板块;微板块4个,包括复活节微板块、胡安费尔南德兹微板块、设得兰微板块、桑威奇微板块。欧亚板块东部与北美板块分界不明显,以发育中的

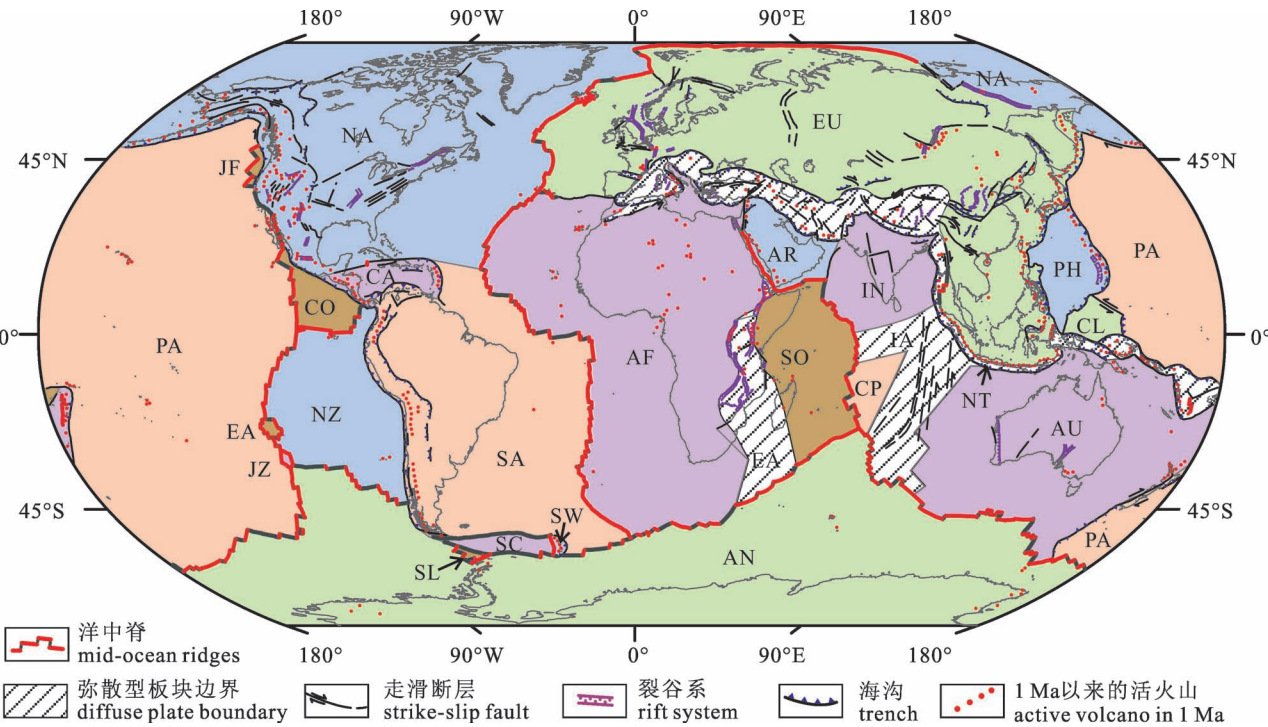


图 1 全球板块划分新方案

Fig. 1 New classification for global plate

板块: AF—非洲板块; AN—南极洲板块; AR—阿拉伯板块; AU—澳大利亚板块; EU—欧亚板块; IN—印度板块; NA—北美板块; PA—太平洋板块; SA—南美板块; SO—索马里板块。小板块: CA—加勒比板块; CL—加洛林板块; CO—科科斯板块; CP—摩羯座板块; JF—胡安德福卡板块; NZ—纳兹卡板块; PH—菲律宾板块; SC—斯科舍板块。微板块: EA—复活节微板块; JZ—胡安费尔南德兹微板块; SL—设得兰微板块; SW—桑威奇微板块。弥散型板块边界: EA—东非弥散型板块边界; IA—印澳弥散型板块边界; NE—新特提斯构造带

Plate: AF—Africa Plate; AN—Antarctica Plate; AR—Arabia Plate; AU—Australia Plate; EU—Eurasia Plate; IN—India Plate; N—North America Plate; PA—Pacific Plate; SA—South America Plate; SO—Somalia Plate. Small plate: CA—Caribbean Plate; CL—Caroline Plate; CO—Cocos Plate; CP—Capricorn Plate; JF—Juan de Fuca Plate; NZ—Nazca Plate; PH—Philippine Plate; SC—Scotia Plate. Microplate: EA—Easter Microplate; JZ—Juan Fernandez Microplate; SL—Shetland Microplate; SW—Sandwich Microplate. Diffuse plate boundary: EA—East Africa diffuse plate boundary; IA—India—Australia diffuse plate boundary; NE—Neo-Tethys Belt

大陆型转换断裂为界,代表正在发育的板块边界 (Pease et al., 2014)。

3 关键地区的中、新生代构造衔接关系

3.1 水平构造衔接关系:洋中脊、转换断层与俯冲带的衔接关系

依据洋中脊几何形态和磁异常年代分布特点,可以划分为两条巨型弧形分布的洋中脊 (李江海等,2019c):①外支洋中脊系统,包括探索者—东太平洋—东南印度洋—中印度洋—卡斯伯格洋中脊—亚丁湾—红海 (图 2a);②内支洋中脊,包括西南印度洋—大西洋—北冰洋加科尔洋中脊 (图 2b)。全球内、外支洋中脊为两条相对独立的洋脊系统,两条洋脊系统均表现为中部扩张速率快,两端扩张速率

降低的趋势,可近似看作为统一的欧拉运动 (角速度一致,两端线速度低,中间线速度高),并在印度洋罗德里格斯三联点相连,西南印度洋中脊形成密集的转变断层系,发生构造转换及斜向扩张,实现南大西洋与东南印度洋中脊构造上的衔接。因此全球洋中脊系统的其起点和终点可以分别视为东北太平洋的探索者洋中脊和北冰洋加科尔洋中脊,长度达到 65000 km。

洋中脊首、尾最终在北太平洋—北冰洋地区靠近,形成太平洋俯冲带与洋中脊之间的桥梁和枢纽。加科尔洋中脊纵向延展与东北亚—阿拉斯加俯冲带交汇 (李江海等,2016)。洋脊中首部被东北太平洋俯冲边界环绕,被迫俯冲,还伴随洋中脊的转换断层大幅度错动调节,阿留申海沟—岛弧、阿拉斯加岛弧被错动,由此适应洋中脊构造末端的复杂构造应力

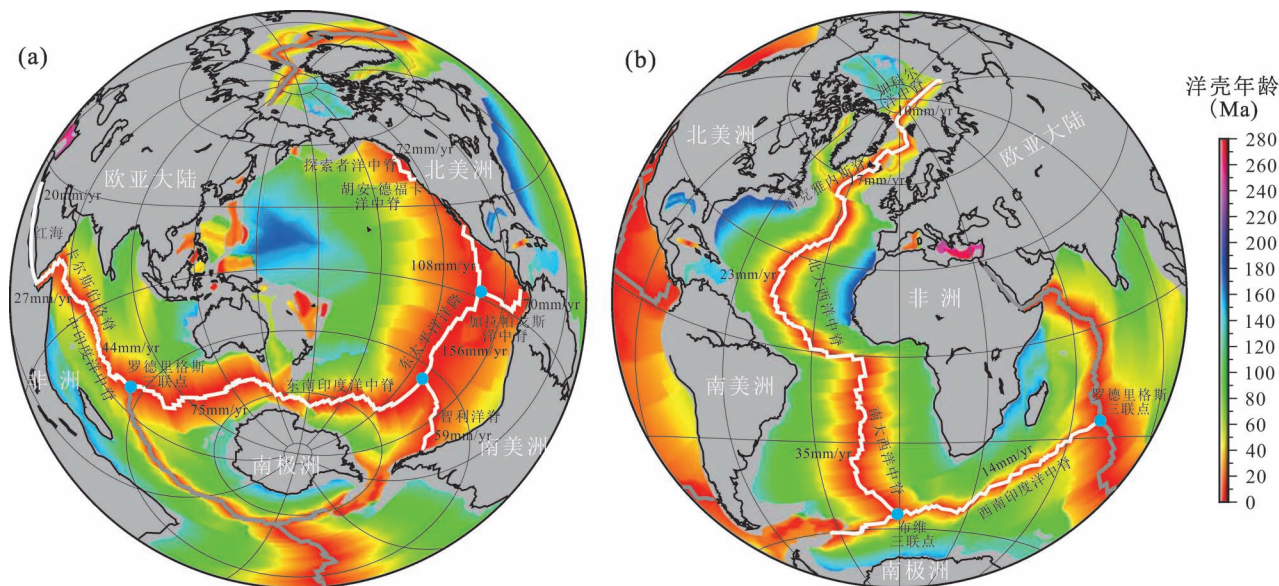


图 2 全球外支洋中脊系统(a)和内支洋中脊系统(b)分布图(李江海等,2019c)
Fig. 2 Global internal and external ridge system and lithosphere age map(Li Jianghai et al., 2019c&)

条件。

大洋中脊和环太平洋边缘俯冲带,构成形成全球尺度上两个不同性质的构造域(伸展、挤压),代表大洋岩石圈构造演化的两个端元。全球洋中脊与俯冲边界形成复杂的螺旋式交织的几何特征。它们通过印度洋、北冰洋、特提斯构造域以及南极洲板块发生构造衔接和转换。南极洲板块周缘被洋中脊环绕,西南印度洋超慢速扩张和东南印度洋中脊中速

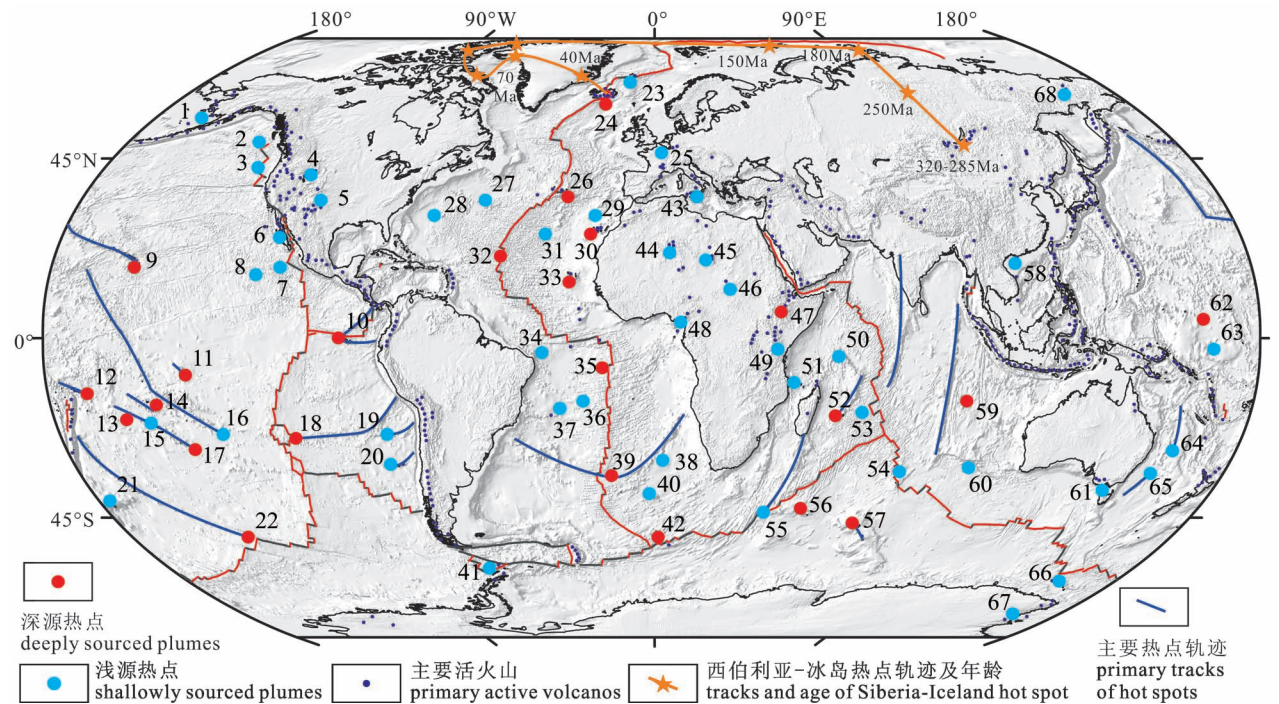


图 3 全球热点、热点轨迹及活火山分布图
(热点据 Whittaker et al., 2015;西伯利亚—冰岛热点轨迹及年龄据 Kuzmin et al., 2010)

Fig. 3 Global map of active volcanos, hotspots and their tracks (the locations of hot spots refer to Whittaker et al., 2015; the tracks and age of Siberia—Iceland hot spot refer to Kuzmin et al., 2010)

扩张,造成南极板块的顺时针方向慢速旋转,旋转角速率为 $0.2240/\text{Ma}$ (Kreemer et al., 2003)。南极板块衔接了全球洋中脊在地球南部的离散运动,南极板块的运动受控于浅层地幔对流。

3.2 垂直构造衔接关系:圈层之间的构造衔接关系

从全球垂向维度上,可以划分为多个层圈(岩石圈、上地幔、软流圈、下地幔、外核),以超级地幔柱和板片俯冲为标志,发生层圈之间和层圈内部的物质对流和机械—热运动,形成 LIP—热点、洋底高原、巨型板块俯冲边界带。深部地幔对岩石圈层影响包括: LIP、大洋高原、火山岛链(地质年代及其板块运动方位转折)、热点运动轨迹、板块俯冲带迁移轨迹(太平洋、特提斯、地中海)、板片俯冲深度及其几何形态、LLSVP。

(1)火山、热点和大岩浆岩省。地球表面已识别出了约 68 处热点,它们记录了地球圈层之间的垂向作用过程以及岩石圈水平运动的轨迹。在全球地震波层析成像研究的基础上 (Montelli et al. 2004; Zhao, 2004; Van der Meer et al., 2009),根据起源深度,可以将热点分为浅源和深源两种 (Courtillot et al., 2003)。深源热点起源于下地幔底部(约 2700 km),全球范围包括 23 个(图 3)。浅源热点共 45 个,其中一种来源于 ~ 670 km 地幔过渡带,受非洲和太平洋 LLSVP 控制,另一种来源浅于 670 km,为上地幔岩浆作用的产物。

活动热点主要见于南大西洋、非洲大陆、印度洋、东太平洋,代表全球最活跃的深部(非洲超级地幔柱、太平洋超级地幔柱)和浅部(洋中脊)地幔活动区 (Burke et al., 2008)。热点出现于板块内部,热点也可以出现在扩张洋中脊,前者如夏威夷、西伯利亚、克洛泽、留尼旺、凯尔盖朗—圣保罗、马里昂和阿法尔热点,后者有如冰岛、特里斯坦。热点还可以出现于俯冲带,如黄石。为此,热点成因并不受岩石圈板块控制,地震层析成像还表明其地幔来源深度差异巨大(670~2700 km)。热点轨迹可以由洋中脊延伸到陆地上也可以在大洋盆地内延伸,如巴西巴拉纳—特里斯坦海岭,记录泛大陆裂解或者大洋岩石圈板块运动的轨迹。值得注意的是,南大西洋盆地的热点轨迹与转换断层方位并不一致,指示不同参照系下岩石圈的绝对运动和相对运动特征有差异(图 3)。

陆地上的西西伯利亚—冰岛热点的迁移轨迹,对应于欧亚大陆的运动轨迹(李江海等, 2016)。相比大洋上热点的活动轨迹,陆地上热点轨迹不发育

或者保留不完整,与大陆岩石圈较厚、长期构造变形和侵蚀作用有关。另外,大陆岩石圈常处于地幔对流下沉环或板块汇聚位置,也是热点轨迹不发育的重要原因。全球、中生代热点轨迹,清晰地记录了大西洋张开过程以及欧、亚、非大陆汇聚运动过程,即岩石圈相对深部地幔的运动轨迹。

全球已发现近百处中、新生代的大火成岩省,它们包括洋底高原、大陆溢流玄武岩、火山岩裂解边缘等。这些火山岩省体积巨大,一般认为 LIP 为地幔热柱成因,伴随巨量火山喷发的同时,与洋中脊玄武岩 (MORB) 的连续喷发不同, LIP 的喷发是突然发生的、和幕式的短期事件。因此,它不仅与超级大陆裂解和伸展盆地发育关系密切,还是地球演化历史中的突变事件,对我们理解与它同时发生或与之有成生联系的水圈和大气圈中环境与生物的突变事件的发生有重要意义。

大火成岩省的发育通常伴随超大陆裂解,在地表常形成巨型裂谷系,两者在空间和时间上具有相关性 (Torsvik and Cocks, 2013)。泛大陆中生代开始的裂解与凯尔盖朗、特里斯坦—达库尼亚、圣海伦、留尼旺等热点活动密切相关。在大陆上,二叠纪末期热点活动 (251 Ma 形成的西伯利亚大火成岩省、275 Ma 形成的塔里木大火成岩省),形成中亚造山带—西伯利亚克拉通上规模巨大的玄武岩省 (可达 $350 \times 10^6 \text{ km}^2$),随后中亚造山带伸展裂解,形成西西伯利亚巨型的克拉通盆地。欧洲北海盆地的发育也受控于中生代地幔柱活动的穹隆作用,随后形成白垩纪三叉裂谷系 (Vyssotski et al., 2006)。非洲东北部的阿法尔地幔柱到达非洲岩石圈底部时,引发了大陆溢流玄武岩喷发 (30 Ma),形成巨厚的大面积玄武岩,并伴随大规模穹状隆升,形成肯尼亚—埃塞俄比亚穹隆和随后的裂谷系 (Ebinger, 2005)。

(2) 超级地幔柱。全球地震层析成像 (剪切波) 结果表明,在核幔边界之上的地幔底部 (约 2800 km 深) 发育两个明显的低速异常区,分别位于太平洋板块和非洲板块以下的位置 (Becker and Boschi, 2002),被称为大型剪切波低速异常区 (Large Low Shear wave Velocity Provinces, LLSVP) (图 4)。在核—幔边界之上 20~40 km 厚度范围内观测到 10%~30% 的地震波速度减小,解释为地核外层高温异常区分布范围 (图 4b, Murakami and Bass, 2011),对应着地幔从核地边界上升的地区,最终沿着异常边缘在地表形成前源热点。

300 Ma 以来大火成岩省和热点中心喷发古位

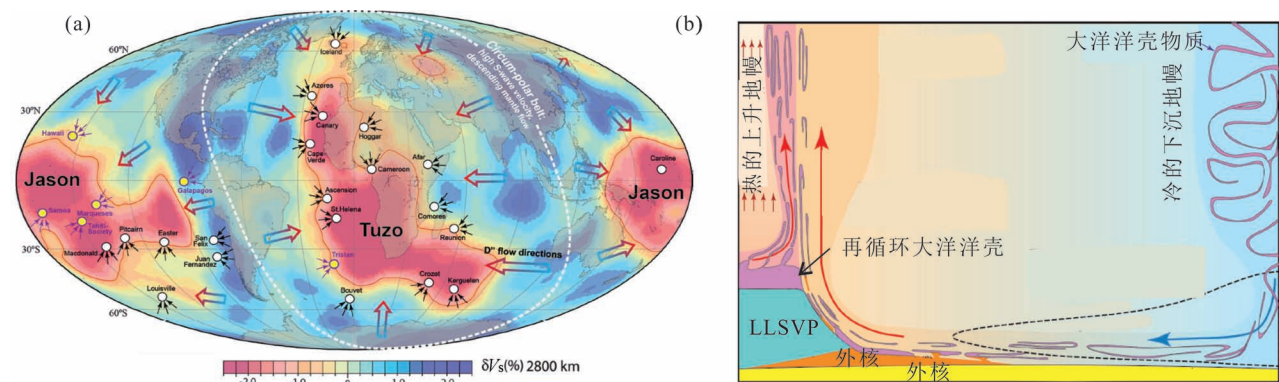


图 4 非洲和太平洋大型剪切波低速异常区 (LLSVP) 与全球热点分布图(a),白色虚线为冷的下沉地幔界限,并在两个 LLSVP 上升,图 b 为全地幔对流卡通图(据 Torsvik et al., 2016 修改)

Fig. 4 The relationship between Large Low Shear wave Velocity Provinces (LLSVPs) and global hotspots (a). White dash line is the location of cold, sinking mantle. Cartoon shows the process of whole mantle convection (b, modified from Torsvik et al., 2016)

置恢复表明,它们大部分集中在核—幔边界的两个剪切波低速带(LLSVP)地表投影边缘之上(深度约 2800 km),大部分在非洲 LLSVP 和太平洋 LLSVP 边缘,个别分布在小规模的 LSVPs 边缘,暗示中生代以来大火成岩省或热点的形成源于超级地幔柱(低速带)边缘(Becker and Boschi, 2002; Burke et al, 2008;Torsvik et al., 2012)。对金伯利岩古位置

的恢复,也发现了现今仍活跃的幔源热点也具有同样的分布规律,证明核—幔边界的低速带(超级地幔柱)的位置在过去的 0.3 Ga 内(甚至 0.54 Ga)是相对固定或略微变动可忽略不计(与板块漂移速率相比)。为此,超级地幔柱为全球古板块重建通过了绝对的运动参考系(Torsvik et al., 2012;Wang et al., 2016),核—幔边界的运动明显不同于岩石圈

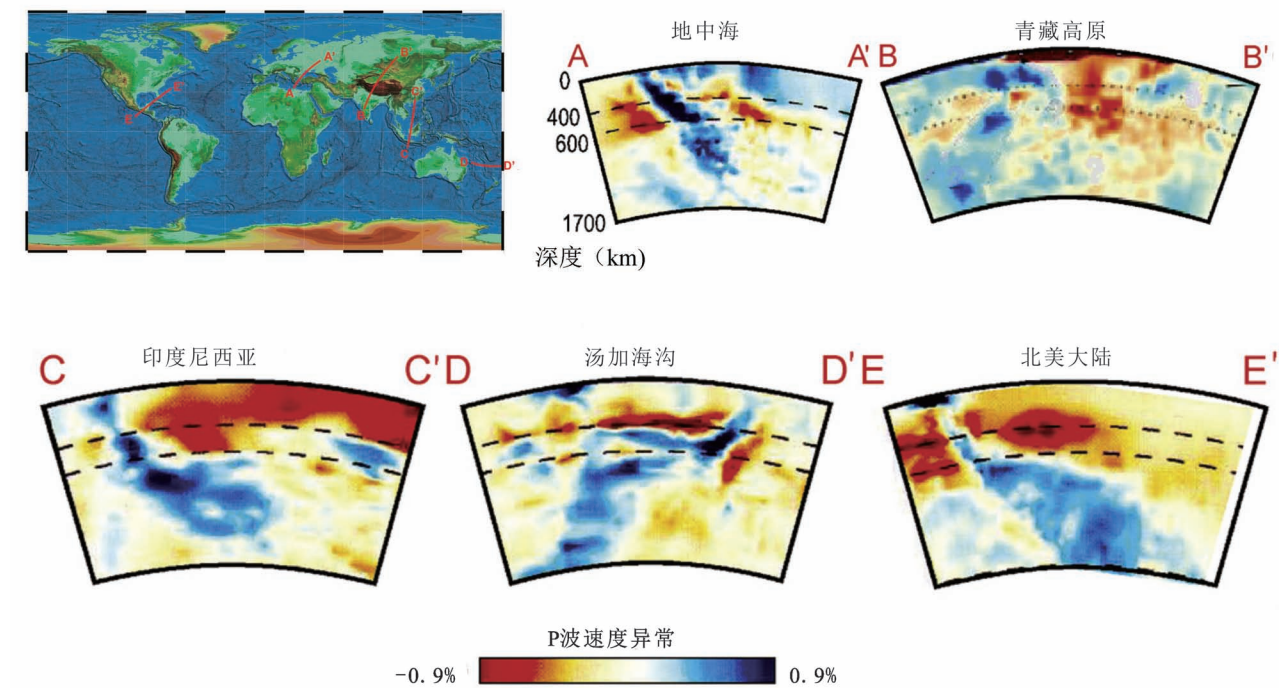


图 5 全球俯冲带地幔层析成像 P 波速度异常剖面(据 Vanderhaeghe et al., 2012 修改)

Fig. 5 Tomographic imaging of the mantle structure shows P waves velocity anomalies continuous from the trench at the surface to the deep mantle suggesting the presence of subducted slabs along all active convergent plate boundaries (modified from Vanderhaeghe et al., 2012)

层。超级地幔柱与地球化学异常的耦合也解释地球深部动力过程。

非洲超级地幔柱现今空间位置上与南大西洋中脊—西南运动洋中脊重叠,对冈瓦纳大陆中生代以来的裂解和漂移有重要影响,并形成环绕非洲和印度板块的扩张边界。太平洋超级地幔柱现今洋中脊没有明确的空间联系,主要表现为板内热点活动,尽管也有人将东太平洋洋隆解释超级地幔柱活动侧枝产物(Maruyama et al., 2007)。由此可以认为,洋中脊与超级地幔柱涉及地幔不同深层的对流作用,超级地幔柱与洋中脊活动叠加,是岩石圈板块扩张运动的重要动力因素,并控制岩石圈板块一级尺度的运动形式。

(3) 板片俯冲。高分辨率地震层析成像不断揭示板片俯冲(高速异常体)进入(或穿过)地幔过渡带(400~600 km 深处)(Maruyama et al., 2010)。板片俯冲动力学过程及其相关的地幔对流作用尺度(特别是深度)和方式,也成为大地构造研究的热点之一。

在亚洲东北部(我国东北、蒙古、俄罗斯)地幔过渡带内,北极地区(北亚、阿拉斯加、白令海)普遍发现停滞的平坦型太平洋俯冲板片(Torii and Yoshioka, 2007)。在中国东北(如长白山火山)太平洋板块俯冲形成的岩浆作用最远可达到上千千米内陆(Zhao, 2011)。

层析成像揭示了 P 波速异常带代表的俯冲板片普遍存在于汇聚边界上(Vanderhaeghe, 2012),在鄂霍茨克海、汤加、爱琴海、马里亚纳、印尼和中南美洲之下俯冲进入下地幔。年轻板片如菲律宾海、胡安德富卡板片仍在上地幔和地幔过渡带内俯冲,而老板片要么在地幔过渡带内停滞或者俯冲进入下地幔(图 5)。下地幔深内的 S 波异常高速带,见于太平洋周缘的东亚、南亚及中美洲(Van der Hilst and Karason, 1997; Van der Hilst et al., 1999; Voo et al., 1999)。在菲律宾板块以北地区,俯冲板片基本全部位于地幔过渡带内,向南则有部分低速体出现于下地幔中,表明俯冲板块部分物质进入下地幔(Zhao, 2011)。在中美洲之下,法拉龙板块(可可斯板块残余)可以持续俯冲达下地幔,在其南、北两端则在过渡带附近停留和持续累积。

在印度板块和非洲北缘(特提斯造山带)下地幔内也发现板片深俯冲证据。随着欧亚大陆汇聚,南缘俯冲板片拆沉、呈水滴式垂直下沉、形成冷幔柱(Maruyama, 2007)。在帕米尔揭示了大陆板块俯冲

到 500 km 以上,是中亚大陆腹地次级板片俯冲的产物。

中美洲西部和亚洲东部是地幔内板片俯冲的重要地区,其俯冲板片几何形态差异明显,前者连续完整或弯曲,后者平坦堆积、断续—水滴式下沉。其他地区地幔内的俯冲板片形态介于两者之间,并且俯冲深度较浅(660 km 深度以上),在下地幔内具有几何形态过渡的特点。

板片地幔深俯冲的认识,使汇聚板块边缘及造山带的研究向三维尺度上延伸,推动了地幔层次的板块运动及其物质循环探讨(Billen, 2008)。地幔过渡带的流变性质对平坦板片聚集具有重要影响。大洋岩石圈俯冲板片可以穿过地幔过渡,在下地幔浅层停滞和变形(Marquardt and Miyagi, 2015),甚至俯冲到核—幔边界(2900 km 深处)(如东亚和中美洲之下的法拉龙板块),堆积形成“俯冲板片墓地”(Voosen, 2016)。板片俯冲以地幔内形成地震波高速体和代表形成大地水准面负异常为特征(White, 2010)。千岛—日本俯冲板片在 670 km 深处停滞并弯曲,证实 Ringwood(1998)对地幔过渡带界面的高压实验预测,在一些地区俯冲板片在地幔过渡带并未停滞,表明停滞只是暂时现象,最终将以板片崩塌方式沉入下地幔。

3.3 构造赤道理论:全球质量的平衡及潮汐力作用

全球板块运动的空间定量观测发现,板块主要运动矢量具有一致的优势方位特点,构成构造赤道(Cuffaro and Doglioni, 2007)。在全球热点参考系中,岩石圈板块相对深部地幔一致向西漂移。运动方位解析表明,全球板块运动沿着纬向具有主流方向,即构造赤道。在该线上每一点的绝对运动方向与其切线方向拟合度高达 85% 以上(刘仲兰等, 2015; Garzanti et al., 2007; Doglioni et al., 2015)。全球构造赤道在地理上由西向东,跨越非洲大陆、阿拉伯半岛、亚洲大陆西南部—中部—东部、西北太平洋、南美北部大陆、南大西洋盆地。在中、新生代全球构造上,涉及西冈瓦纳大陆、南大西洋盆地、新特提斯造山带中段、中亚造山带、西伯利亚板块南缘、华北陆块、西北太平洋等(图 6a)。在地幔层次上,跨越非洲超级幔柱、太平洋超级幔柱,以及两者之间的亚洲超级冷幔柱(图 6b),沿线经过的中、新生代热点和大岩浆岩生包括特里斯坦—达库尼亚、鲸鱼海岭、Etendeka、阿法尔、夏威夷、格拉帕格斯、加勒比、巴拉纳、格兰德河海岭等。

将构造赤道的廊带宽度(图 6a 红色条带)用于

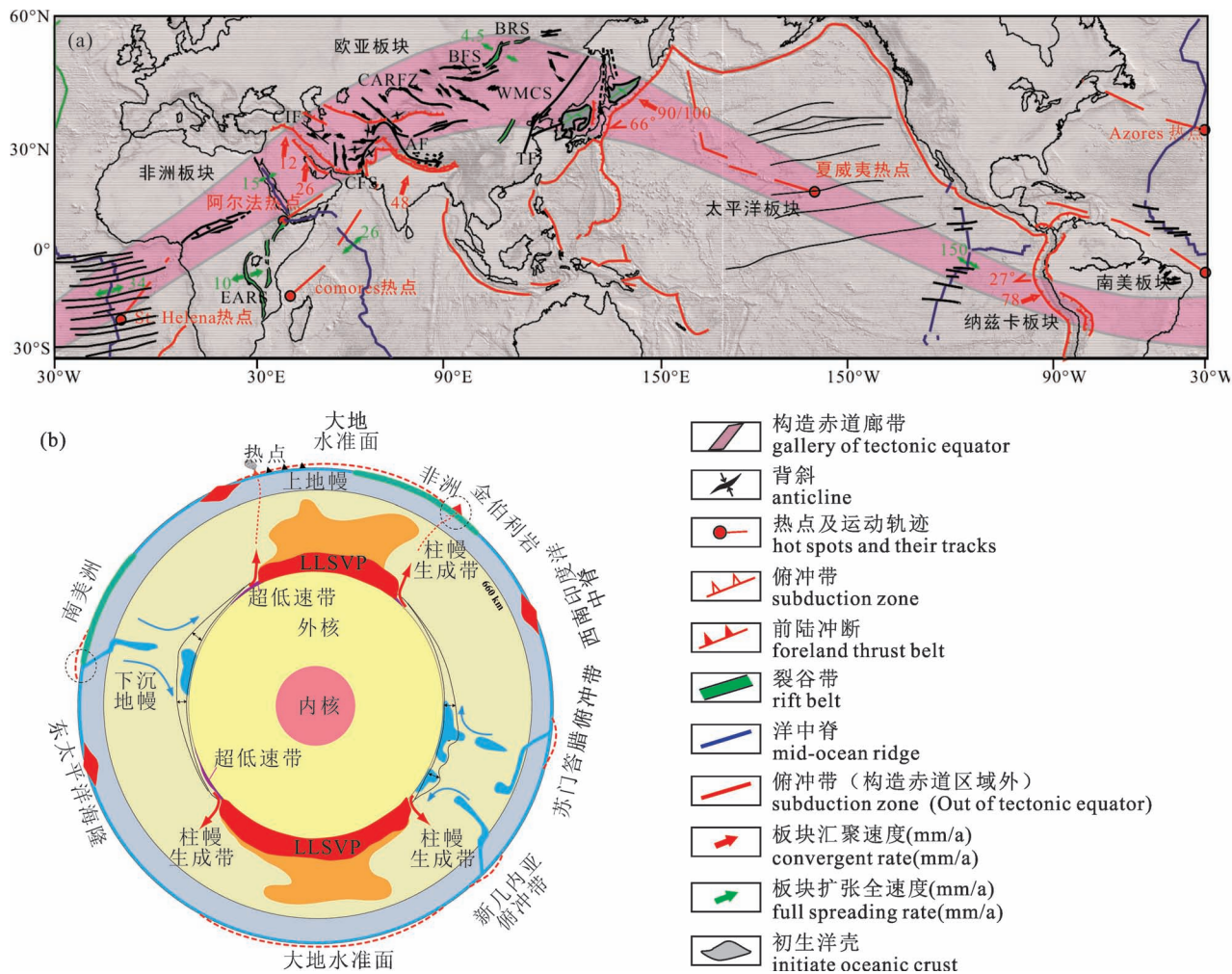


图 6 构造赤道 (a) 及其对应的地球内部结构 (b) (全球深部热点参考系据 Cuffaro and Doglioni, 2007, 构造赤道分布据刘仲兰等, 2016, 地球内部结构据 Torsvik et al., 2016)

Fig. 6 Tectonic equator (a) and the structure of interior earth (b) (the global deep hotspot frame of reference refers to Cuffaro and Doglioni, 2007; the distribution of tectonic equator refers to Liu et al., 2016; the interior structure of earth refers to Torsvik et al., 2016)

表述板块绝对运动矢量(相对深部地幔)的集中程度,构造赤道廊带在大洋地区的宽度较窄,表明其运动优势方位较集中,大陆地区构造赤道廊带宽度较宽,表明其运动方位较弥散(Doglioni et al., 2015),这可能与大陆地壳和大洋地壳流变性质差异有关。构造赤道在大陆地区主要位于非洲泛非期—显生宙地壳区(中亚、东北亚)(Rino et al., 2008),地壳强度的薄弱,是其发生强烈构造变形的物质基础;大洋区,它与鲸鱼海岭、夏威夷岛链运动保持一致。沿着构造赤道,岩石圈板块相对软流圈向西漂移,岩石圈剖面结构显示明显的不对称性,依次显示了伸展—挤压反复交替的运动特征(刘仲兰等, 2015)。几乎所有向西的俯冲带俯冲倾角均大于向东的俯冲带

(Doglioni et al., 2015),相应的弧后盆地、前陆盆地也有较大差异。在板块离散边界,洋中脊扩张和大陆裂谷形态也有不对称性(Doglioni et al., 2007)。

构造赤道理论主张月地之间的潮汐力沿着黄道面对岩石圈产生影响,造成岩石圈向西漂移(Scoppola et al., 2006),以及全球造山带、洋中脊等在纬向上剖面(构造赤道)的构造特征及其运动具有不对称性,包括向东和向西的洋中脊扩张速率、俯冲带倾角等差异明显。构造赤道是白垩纪以来全球构造体制大规模调整的产物,地球不同圈层之间发生剪切变形,全球岩石圈质量发生重新分配,岩石圈相对于深部地幔发生一致向西的纬向净漂移,地幔软流圈向东流动,指示地球自转以及月—地之间引

力的作用 (Maruyama et al., 2007; Torsvik et al., 2008)。

4 中、新生代全球构造演化

泛大陆中生代以来的裂解和聚合重组,控制了全球构造演化的主体格局(李江海等,2013,2014),欧亚非超级大陆开始形成、四大洋盆扩张—俯冲,西南非洲和西南太平洋两大超级地幔活动也达到高峰。

全球古地磁恢复表明(Collins, 2003),中生代—新生期间大陆岩石圈板块轨迹(200 Ma~今)显示了向相对静止的阿尔泰造山带发生反时针方向的涡旋式汇聚。180 Ma以来,新特提斯造山带的构造运动也具有由西向东反时针旋转运动特点,俯冲带位置持续向南迁移。此外,西太平洋俯冲带弧后扩张也具有反时针运动特点。

中生代以来,泛大陆尺度上全球面积守恒,造山带聚合与大洋裂解过程相伴随,大西洋盆张开和特提斯洋盆闭合以及太平洋盆俯冲收敛相对应。太平洋长期处于冈瓦纳大陆和劳亚大陆的外缘,现今的太平洋板块最初形成始175~170 Ma,它的形成演化与中生代以来泛大洋洋中脊扩张,是古老洋盆再生的产物(Hall, 2002)。东太平洋中生代俯冲带的位置自中生代以来向西持续后退,西太平洋俯冲带向东后撤引起大陆岩石圈被动漂移并处于伸展状态,大陆边缘发生裂解形成弧后盆地,特提斯北缘俯冲带位置向南西持续后退(Tamaki and Honza, 1991)。

与太平洋盆不同的是,大西洋和印度洋两个洋盆是泛大陆内部裂解和持续扩张的产物,是中生代以来的新生大洋盆。大西洋盆和印度洋盆的张开,伴随冈瓦纳北缘陆块群向北飘移和碰撞作用。大西洋盆地张开在时间上对应太平洋板块俯冲,岩石圈强烈的伸展作用被太平洋俯冲消减所平衡。南大西洋两岸被动大陆边缘盆地结构(沉积地层厚度和盆地宽度)明显不对称,非洲西缘较宽阔,而巴西陆缘较狭窄并且基底强烈上拱,记录晚期太平洋挤压变形向大西洋区的传递(Chulick et al., 2013; 李江海等, 2014b)。伴随大西洋盆的持续张开、构造分段性差异增强。大西洋中脊两侧板块具有明显的构造分段性,这种构造分段性以转换断层作为分段边界,其源于超大陆裂解过程的继承性薄弱带,可以从大陆向大洋盆地追踪,控制了大陆架沉积盆地的分段性。大西洋中脊向北延展,造成北冰洋盆打开。冈瓦纳大陆的中生代—第三纪的持续裂解,最终造成

其核心南极大陆的孤立分布。印度洋盆是全球两条巨型(大西洋和太平洋)洋中脊交汇的部位,形成“入”字形的构造格局(李江海等,2015)。印度和非洲板块向北飘移,造成特提斯洋盆最终关闭。某种意义上讲,新特提斯洋盆的关闭,与西南印度洋中脊走向延伸、扩张造成密切相关,印度洋盆的发育代表了太平洋盆的新生。各大洋盆之间具有密切的构造成因联系。

东亚大陆是由一些小板块和众多微陆块及其间的褶皱带或造山带组合、演化形成的复合型大陆。中生代以来处西太平洋和印度挤压构造背景下,受到碰撞、俯冲和消减作用的影响;喜马拉雅期特提斯洋消失。欧亚板块与印度板块、澳大利亚板块、太平洋板块的碰撞聚合,决定了亚洲大陆中、新生代以来的盆山构造格局,造成欧亚大陆南部构造变形和山脉复活、高原隆升、盆地沉降,伴随发育古构造边界断裂逆冲、走滑活动、伸展沉降(如贝加尔裂谷系),这些都与印度板块的远程构造效应有关(Yin, 2006)。另外,大量区域地质研究表明,新生代以来西伯利亚板块反时针方向旋转,对北亚—东北亚地区裂谷系具有重要影响。青藏高原的形成与印度板块向北构造楔入有关(Klootwijk, 2013)。西太平洋构造域对亚洲大陆东部的叠加改造宽度巨大。欧亚板块北部是现在地球上比较稳定的板块;中生代以来,除局部隆升(波罗的、西伯利亚克拉通等)外,总体上变形微弱,深大断裂不发育,盆地地层产状平缓。

5 初步讨论和新认识

(1)大洋中脊和环太平洋边缘俯冲带,构形成全球尺度上两个不同性质的构造域(伸展、挤压),代表大洋岩石圈构造演化的两个端元。全球洋中脊与俯冲边界形成复杂的螺旋式交织的几何特征。它们通过印度洋、北冰洋、特提斯构造域以及南极洲板块发生构造衔接和转换。南极洲板块周缘被洋中脊环绕,并衔接了全球洋中脊在地球南部的离散运动。

(2)全球垂向维度以超级地幔柱和板片俯冲为标志,发生层圈之间和层圈内部的物质对流和机械—热运动,形成LIP—热点、洋底高原、巨型板块俯冲边界带。地球表面热点分为浅源和深源两种。深源热点起源于下地幔底部(~2700 km),全球范围包括23个,浅源热点共45个,一种来源于约670 km地幔过渡带,受非洲和太平洋LLSVP控制,另一

种来源浅于 670 km,为上地幔岩浆作用的产物。

(3)构造赤道是中生代以来全球构造体制大规模调整的产物,在中、新生代全球构造上,涉及西冈瓦纳大陆、南大西洋盆地、新特提斯造山带中段、中亚造山带、西伯利亚板块南缘、华北陆块和西北太平洋等,并跨越非洲超级幔柱、太平洋超级幔柱,以及两者之间的亚洲超级冷幔柱。从构造体制上分析,现今构造赤道形成于泛大陆白垩纪大规模裂解、新特提斯闭合消减的背景下。

(4)晚古生代以来,随着泛大陆裂解和欧亚非超级大陆形成,造山带聚合与大洋裂解过程相伴随,大西洋盆张开和特提斯洋盆闭合以及太平洋盆俯冲收敛相对应。太平洋的形成演化与继承于中生代以来泛大洋洋中脊的扩张,大西洋和印度洋两个洋盆是泛大陆内部裂解和持续扩张的产物,是中生代以来的新生大洋盆,并伴随冈瓦纳北缘陆块群向北漂移和碰撞作用。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

李江海,姜洪福. 2013. 全球古板块再造、岩相古地理及古环境图集. 北京:地质出版社:1~127.

李江海,韩喜球,毛翔. 2014a. 全球构造图集. 北京:地质出版社:1~127.

李江海,李维波,周肖贝,杨静懿,程雅琳,毛翔. 2014b. 全球沉积盆地结构与构造演化特征:洲际纬向超长剖面对比研究. 大地构造与成矿学, 38(1): 1~11.

李江海,张华添,李洪林. 2015a. 印度洋大地构造背景及其构造演化——印度洋底大地构造图研究进展. 海洋学报, 37(7): 1~14.

李江海,周肖贝,李维波,王洪浩,刘仲兰,张华添,塔斯肯. 2015b. 塔里木盆地及邻区寒武纪——三叠纪构造古地理格局的初步重建. 地质论评, 61(6): 1225~1234.

李江海,刘仲兰,王洛,张华添. 2016. 北极地区大地构造特征及其构造演化——北极地区大地构造编图研究进展. 海洋学报, 38(07): 85~96.

李江海,张华添,陶春辉. 2017. 全球中、新生代大地构造图及说明书. 北京:科学出版社:1~113.

李江海,刘仲兰. 2019a. 地幔内板片俯冲运动模式及其大地构造意义——俯冲的屏障与穿越机制. 地质论评, 65(2): 453~463.

李江海,宋珏琛,毛翔. 2019b. 二叠纪泛大陆球壳三维力学模拟及其构造意义. 地质论评, 65(3): 551~557.

李江海,刘持恒,韩喜球. 2019c. 全球洋中脊系统的构造特征及其运动学意义. 地学前缘, 26(3): 154~162.

刘仲兰,李江海,张华添,王洪浩. 2015. 构造赤道及其地球动力学意义. 大地构造与成矿学, 39(6): 1041~1048.

Review of Earth & Planetary Sciences, 36(36): 325~356.

Bird P. 2003. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(3): 1027.

Bouysson P. 2014. Geological Map of the World at 1:35000000. CGMW Edition, Paris.

Bryan S E and Ferrari L. 2013. Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years. *Geological Society of America Bulletin*, 125(7~8): 1053~1078.

Burke K, Steinberger B, Torsvik T H, Smethurst M A. 2008. Plume generation zones at the margins of large low shear velocity provinces on the core—mantle boundary. *Earth and Planetary Science Letters*. 265:49~60.

Chulick G S, Detweiler S, Mooney W D. 2013. Seismic structure of the crust and uppermost mantle of South America and surrounding oceanic basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 42: 260~276.

Clouard V, Bonneville A. 2001. How many Pacific hotspots are fed by deep-mantle plumes? *Geology*, 29(8): 695~698.

Collins W J. 2003. Slab pull, mantle convection, and Pangaea assembly and dispersal. *Earth & Planetary Science Letters*, 205(3): 225~237.

Courtillot V, Davaille A, Besse J, Stock J M. 2003. Three distinct types of hotspots in the earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3): 295~308.

Cuffaro M and Doglioni C. 2007. Global kinematics in deep versus shallow hotspot reference frames. *Special Paper of the Geological Society of America*, 430: 359~374.

Doglioni C, Carminati E, Crespi M, Cuffaro M, Penati M, Riguzzi F. 2015. Tectonically asymmetric earth: from net rotation to polarized westward drift of the lithosphere. *Geoscience Frontiers*, 6(3): 401~418.

Doglioni C, Carminati E, Cuffaro M, Scrocca D. 2007. Subduction kinematics and dynamic constraints. *Earth Science Reviews*, 83(3~4): 125~175.

Ebinger C. 2005. Continental break-up: the East African perspective. *Astronomy & Geophysics*, 46(2): 216~221.

Garrity C P, Soller D R. 2009. Database of the geologic map of North America—adapted from the map by J C Reed, Jr. and others (2005). U.S. Geological Survey.

Garzanti E, Doglioni C, Vezzoli G, Ando S. 2007. Orogenic belts and orogenic sediment provenance. *The Journal of Geology*, 115(3): 315~334.

Gordon R G. 1998. The plate tectonic approximation: plate nonrigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1): 615~642.

Hagstrum J T. 2005. Antipodal hotspots and bipolar catastrophes: Were oceanic large-body impacts the cause? *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1): 13~27.

Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4): 353~431.

Klootwijk C. 2013. Middle—Late Paleozoic Australia—Asia convergence and tectonic extrusion of Australia. *Gondwana Research*, 24(1): 5~54.

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

- Kuzmin M I, Yarmolyuk V V, Kravchinsky V A. 2010. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province. *Earth-Science Reviews*, 102(1~2): 29~59.
- Laske G, Masters G, Ma Z, Pasyanos M. 2013. Update on CRUST1.0 – A 1-degree global model of earth's crust. EGU General Assembly.
- Li Jianghai, Jiang Hongfu. 2013&. Atlas of Paleoplate Reconstruction, Lithofacies Paleogeography and Paleoenvironment. Beijing: Geological Publishing House: 1~127.
- Li Jianghai, Han Xiqiu, Maoxiang. 2014a&. Atlas of Global Tectonics. Beijing: Geological Publishing House: 1~127.
- Li Jianghai, Li Weibo, Zhou Xiaobei, Yang Jingyi, Cheng Yalin, Mao Xiang. 2014b&. Characteristics of structural and tectonic evolution of global sedimentary basins: evidence from the comparison of e—w global-scale profile. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 1~11.
- Li Jianghai, Zhang Huatian, Li Honglin. 2015a&. The tectonic setting and evolution of Indian Ocean—research progress of tectonic map of Indian Ocea. *Haiyang Xuebao*, 37(7): 1~14.
- Li Jianghai, Zhou Xiaobei, Li Weibo, Wang Honghao, Liu Zhonglan, Zhang Huatian, Abitkazy Taskyn. 2015b&. Preliminary reconstruction of tectonic paleogeography of Tarim Basin and its adjacent aeras from Cambrian to Triassic, NW China. *Geological Review*, 61(6): 1225~1234.
- Li Jianghai, Liu Zhonglan, Wang Luo, Zhang Huatian. 2016&. The tectonic setting and geological evolution of the Arctic—from compiling of tectonic map of the Arctic. *Haiyang Xuebao*, 38(7): 85~96.
- Li Jianghai, Liu Zhonglan. 2019a&. Subduction patterns within mantle and its tectonic significance—subduction barrier and crossing mechanism. *Geological Review*, 65(2): 453~463.
- Li Jianghai, Song Juechen, Mao Xiang. 2019b&. Mechanical simulation of 3D spherical shell model for Permian Pangaea supercontinent and its tectonic significance. *Geological Review*, 65(3): 551~557.
- Li Jianghai, Liu Chiheng, Han Xiqiu. 2019c&.. Tectonic characteristics and kinematic significance for the global mid-ocean ridge system. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 154~162.
- Li Jianghai, Zhang Huatian, Tao Chunhui. 2017&. Explanatory Notes for Mesozoic and Cenozoic Tectonic Map of the World. Beijing: Science Press: 1~113.
- Liu Zhonglan, Li Jianghai, Zhang Huatian, Wang Honghao. 2015&. Tectonic equator and its geodynamical implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(6): 1041~1048.
- Marquardt H and Miyagi L. 2015. Slab stagnation in the shallow lower mantle linked to an increase in mantle viscosity. *Nature Geoscience*, 8(4): 311~314.
- Maruyama S, Masago H, Katayama I, Iwase Y, Toriumi M, Omori S. 2010. A new perspective on metamorphism and metamorphic belts. *Gondwana Research*, 18(1): 106~137.
- Maruyama S, Santosh M, Zhao D. 2007. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the Core—Mantle Boundary. *Gondwana Research*, 11(1~2): 7~37.
- Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, Masters G, Engdahl E R, Hung S H. 2004. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science*, 303(5656): 338~343.
- Müller R D, Sdrolas M, Gaina C, Roest W R. 2008. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's socean crust. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(4): 1~19.
- Murakami M and Bass J D. 2011. Evidence of denser MgSiO₃ glass above 133 gigapascal (GPa) and implications for remnants of ultradense silicate melt from a deep magma ocean. *PNAS*, 108(42): 17286~17289.
- Pease V, Drachev S, Stephenson R, Zhang X. 2014. Arctic lithosphere—a review. *Tectonophysics*, 628: 1~25.
- Pisarevsky S. 2005. New edition of the global paleomagnetic database. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 86(17): 170.
- Ringwood A E and Irifune T. 1988. Nature of the 650-km seismic discontinuity: implications for mantle dynamics and differentiation. *Nature*, 331(6152): 131~136.
- Rino S, Kon Y, Sato W, Maruyama S, Santosh M, Zhao D. 2008. The Grenvillian and Pan- African orogens: World's largest orogenies through geologic time, and their implications on the origin of superplume. *Gondwana Research*, 14(1~2): 51~72.
- Ryan W B F, Carbotte S M, Coplan J O, O'Hara S, Melkonian A, Arko R, Weissel R A, Ferrini V, Goodwillie A, Nitsche F. 2009. Global multi-resolution topography synthesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(3): 1~9.
- Schellart W P, Rawlinson N. 2010. Convergent plate margin dynamics: New perspectives from structural geology, geophysics and geodynamic modelling. *Tectonophysics*, 483(1): 4~19.
- Schellart W P, Stegman D R, Freeman J. 2008. Global trench migration velocities and slab migration induced upper mantle volume fluxes: constraints to find an earth reference frame based on minimizing viscous dissipation. *Earth-Science Reviews*, 88(2008): 118~144.
- Scoppola B, Boccaletti D, Bevis M, Carminati E, Doglioni C. 2006. The westward drift of the lithosphere: a rotational drag? *Geological Society of America Bulletin*, 118(1~2): 199~209.
- Scoppola B, Boccaletti D, Bevis M. 2006. The westward drift of the lithosphere: a rotational drag? *Geological Society of America Bulletin*, 118(1~2): 199~209.
- Seton M, Müller R D, Zahirovic S, Gaina C, Torsvik T, Shephard G, Talsma A, Gurnis M, Turner M, Maus S, Chandler M. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. *Earth-Science Reviews*, 113(3~4): 212~270.
- Tamaki K, Honza E. 1991. Global tectonics and formation of marginal basins: role of the western Pacific. *Episodes*, 14(3): 224~230.
- Torii Y and Yoshioka S. 2007. Physical conditions producing slab stagnation: Constraints of the Clapeyron slope, mantle viscosity, trench retreat, and dip angles. *Tectonophysics*, 445: 200~209.
- Torsvik T H, Cocks L R M. 2013. Gondwana from top to base in space and time. *Gondwana Research*, 24(3): 999~1030.
- Torsvik T H, Steinberger B, Ashwal L D, Doubrovine P V, Trønnes R G. 2016. Earth evolution and dynamics—a tribute to kevin burke. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(11): 1~15.
- Torsvik T H, Steinberger B, Cocks L R M, Burke K. 2008. Longitude: Linking Earth's ancient surface to its deep interior. *Earth & Planetary Science Letters*, 276(3): 273~282.
- Torsvik T H, Voo R V D, Preeden U, Niocaill C M, Steinberger B, Doubrovine P V. 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth- Science Reviews*, 114(3~4): 325~368.
- Van der Hilst R D and Karason H. 1999. Compositional heterogeneity in the bottom 1000 kilometers of earth's mantle: toward a hybrid convection model. *Science*, 283(5409): 1885~1888.
- Van der Hilst R D, Widiyantoro S, Engdahl E R. 1997. Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*, 386(6625): 578~584.
- Van der Meer D G, Spakman W, Hinsbergen D J J V, Amaru M L,

- Torsvik T H. 2009. Towards absolute plate motions constrained by lower- mantle slab remnants. *Nature Geoscience*, 3 (1): 36~40.
- Vanderhaeghe O. 2012. The thermal—mechanical evolution of crustal orogenic belts at convergent plate boundaries: A reappraisal of the orogenic cycle. *Journal of Geodynamics*, 56~57(3): 124~145.
- Voo R V D, Spakman W, Bijwaard H. 1999. Mesozoic subducted slabs under Siberia. *Nature*, 397(6716): 246~249.
- Voosen P. 2016. Graveyard of cold slabs mapped in earth's mantle. *Science*, 354(6315): 954.
- Vyssotski A V, Vyssotski V N, Nezhdanov A A. 2006. Evolution of the West Siberian Basin. *Marine & Petroleum Geology*, 23(1): 93~126.
- Wang H H, Li J H, Zhang H T, Xu L, Li W B. 2016. The absolute paleoposition of the North China Block during the Middle Ordovician. *Science China Earth Science*, 59 (3): 573~582.
- White W M. 2010. Oceanic island basalts and mantle plumes: the geochemical perspective. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 38(38): 133~160.
- Whittaker J M, Afonso J C, Masterton S, Müller R D, Wessel P, Williams S E, Seton M. 2015. Long-term interaction between mid-ocean ridges and mantle plumes. *Nature Geoscience*, 8(6): 25~2015.
- Yin. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. *Earth-Science Reviews*, 76(1): 1~131.
- Zhao D, Yu S, Ohtani E. 2011. East Asia: Seismotectonics, magmatism and mantle dynamics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(3): 689~709.
- Zhao D. 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep earth dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146 (1~2): 3~34.

Global tectonic characteristics of Mesozoic and Cenozoic and its evolution framework

——Updates from the compilation of *Mesozoic and Cenozoic Global Tectonic Map*

LI Jianghai¹⁾, LIU Chiheng¹⁾, TAO Chongzhi²⁾

1) *The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871;*

2) *Sinopec petroleum exploration and production research institute, Sinopec petroleum, Beijing, 100083*

Abstract: The tectonic Mapping of global Mesozoic and Cenozoic is the basis of the global tectonic theory research, which is compiled to reflect the integrated geology, geomorphology, geophysics. This paper introduced the compiling methods, data, map content, and tectonic division. We analyzed the connection relationship between global horizontal tectonic and vertical tectonic based on layer structure of earth. The mid-ocean ridge and the subduction zone around Pacific are connected and transformed by the Indian Ocean, the Arctic ocean, Tethys tectonic zone and Antarctic plate. Antarctic plate is surrounded by the mid-ocean ridge and absorb all of discrete motion of the global mid-ocean ridge in the southern part of earth. In addition, the theory of tectonic equator supports the relationship between tectonic units under different global tectonic zone, which is the result of global tectonic of Mesozoic and Cenozoic adjustment. Finally, this paper discussed the global tectonic evolution of the Mesozoic and Cenozoic in the perspective of Pangea breaking.

Keywords: Seismic tomography; Subduction slab; Mantle convection; Big data Continental dynamics; Global tectonic map; tectonic evolution

Acknowledgements: This research was supported by the National Science and Technology Major Project (No. 2016ZX05033002-007) and The National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0503301)

First author: LI Jianghai, Male, born in 1965, Doctor of Science, Professor, supervisor of doctoral, who is engaged in global tectonic. Email: jhli@pku.edu.cn

Manuscript received on: 2018-10-27; Accepted on: 2019-04-18; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.001