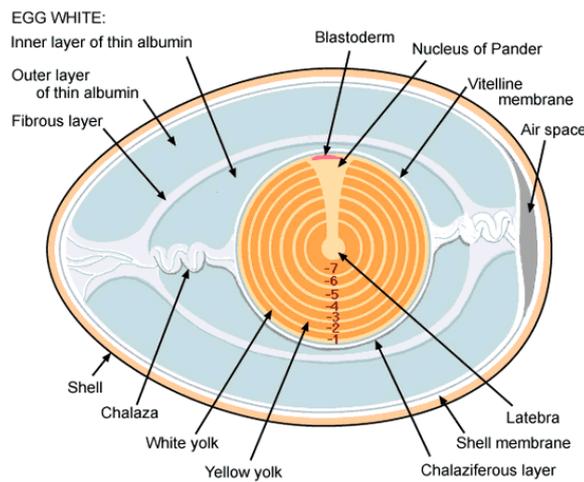


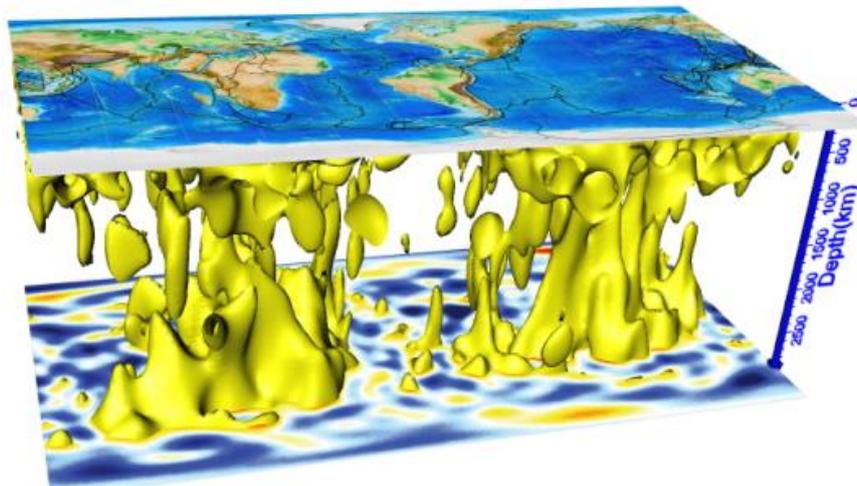
附件 2-1 关于超级地幔树 (super mantle tree) 命名的说明 Appendix 2-1 Appendix of the naming of the super mantle tree

如果视地球为最原始生命体, 那么, 由 Darwin 生物演化树可知, 原核细胞演变为真细菌域与古菌域; 古菌域从原核生物界逐渐演化到原生生物界; 原生生物界进一步演化为真菌界与动物界。动物界逐渐演化为无脊动物与脊索动物; 然后演化为卵生动物; 再演化为爬行类、鸟类、哺乳类动物。哺乳类动物为胎生, 逐渐向高级动物演化; 爬行类、鸟类动物为卵生, 保留了低等动物特征。我们知道“集体表象越强, 动物群体越低等”, 越是低等动物, 携带地球的信息越丰富。既然地球为最低等生命, 是生命最原始表现, 那么, 爬行类、鸟类动物的卵(蛋)必定具有地球类似结构。蛋与地球都是圈层构造, 我们可以通过蛋几何结构对比地球几何结构, 达到认识地球内部构造之目的。

将地壳类比于蛋壳, 上地幔类比于外层蛋白, 下地幔类比于内层蛋白, 地核类比于蛋黄, 系带植根于卵黄膜上。地球内部存在植根于地核顶部的“系带”吗? 答案是肯定的(附件 2-1 图 1, 附件 2-1 图 2)。



附件 2-1 图 1 蛋几何结构纵剖面,引自 http://chickscope.beckman.uiuc.edu/explore/embryology/day01/the_yolk.html



附件 2-1 图 2 起始经纬度为 E150°、S60°到 N60°地幔横波低速异常体(黄色)三维显示图(数据引自 French 与 Romanowicz, 2015)

科学术语的命名原则是对概念的内涵与外延的准确表达，让人一眼抓住术语表达的科学意义。如岩石学采用成因命名法（如火成岩、沉积岩、变质岩等）。构造是地球科学的灵魂，人们一般采用形貌特征加动力内涵命名构造现象（如正断层、逆断层、走滑断层、高原、盆地、造山带等）。对特大型构造体，还需加上地名进行约束（青藏高原、四川盆地、圣安德烈斯大断裂、郯庐断裂等）。

1963年，Wilson首次使用 mantle plume 术语解释 Hawaiian-Emperor 岛链的年龄变化与板块运动方向的关系(Wilson, 1963)。Morgan (1971, 1972)支持 Wilson 观点，提出部分 mantle plume 来自核幔边界（CMB）。然后，Larson (1991)使用 super plume 一词描述南太平洋下方大规模地幔物质上升运动，Maruyama (1994)在 Larson (1991)工作的基础上，进一步指出地球内部存在来自核-幔边界的一个冷 plume 与二个热 super plume，二个热 super plume 分别位于南太平洋下方与非洲南部下方。横波地震层析进一步证明地球内部仅存在二个 super mantle plume (French and Romanowicz, 2015)。如果视二个 super mantle plume 相当于地球的“系带 1”、“系带 2”，分别将它们称为 Jason 与 Tuzo (Burke, 2011)。

1972年，Morgen 清晰说明 plume 是来自深地幔、物质相对原始、携带热量上升到软流层中，使用 petrological 给出 plume 的动态内涵。但是，居里面以下物质不含磁性，应该使用 material 称之。从这里开始，Morgen 对 plume 动态内涵的理解是有歧义的。plume 英文原意是羽。羽是由羽根、羽轴、羽枝构成的扁状体。从分形几何角度来看，羽的维度小于 2.5。1994年，Maruyama 直接说明 mantle plume 形如蘑菇。2001年，Kent C. Condie 定义 mantle plume 是地幔中因其浮力而上升的漂浮物质，到达岩石圈底部时，发生横向扩散。且指出，当 plume 的黏滞系数大于围岩的黏滞系数时，它呈指状上升；当 plume 的黏滞系数小于围岩的黏滞系数时，它呈蘑菇状上升。plume 尾含有热液体，当 plume 头部浮力上升时，plume 尾部会将热液“喂食”头部。我们认为，使用 plume 表述形如蘑菇的地幔中因浮力而上升的漂浮物质，文字表述与图像表述不符。

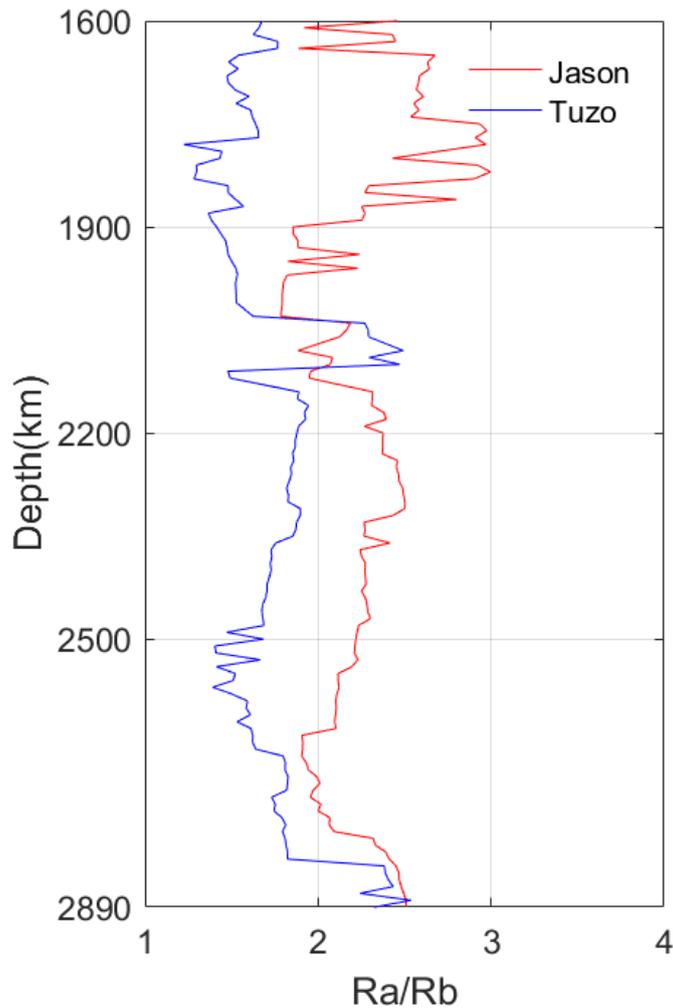
此外，Maruyama (1994)将 super mantle plume 分为三层结构（底界面深度分别为 2900 km、670 km、100 km），而且将板块厚度直接定义为 100 km (Maruyama, 1994)。这种定义没有地质地球物理依据。无论称作羽，还是形如菇，都是有根物，前人为什么忽略根的问题？然而“柱”既无“树根”也无“树枝”，将 mantle plume 翻译为地幔柱是不恰当的。

我们使用 Otsu-Method 与 Gaussian Mixture Model clustering algorithm, 对 French and Romanowicz(2015)发表的全球层析成像横波速度数据体进行处理，利用 Volxer 软件显示处理后的全球横波相对低速异常体。附件 2-1 图 2 反映 Jason 与 Tuzo 仿佛植根于外核顶部（类比于卵黄膜），生长在 CMB 上，逐渐延伸到地壳中，整体形态犹如主干旋转缠绕的自然树，我们将其命名为超级地幔树（super mantle trees），也就是地球的“系带”。我们继续使用 Kevin Burke 对它们的各自称谓 Jason 与 Tuzo。

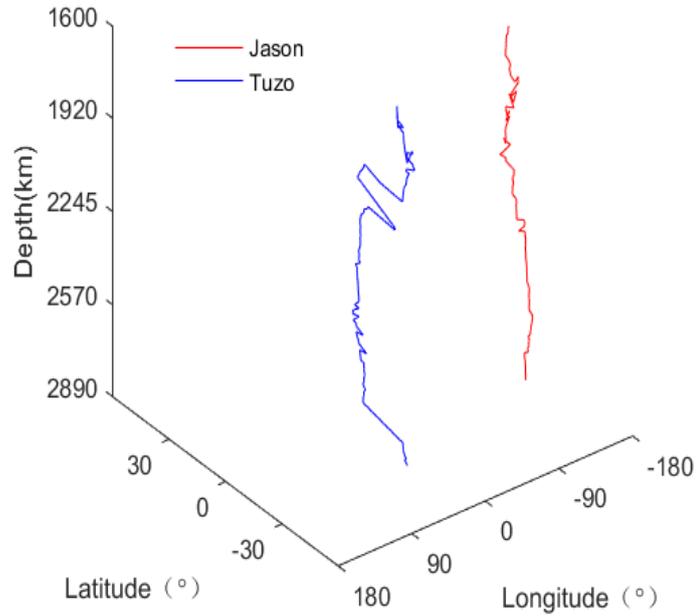
超级地幔树命名方法反映地球“系带”（Jason 与 Tuzo）生长过程中的化学、物理等活动对地幔运动的影

响，体现地幔横波低速异常体的整体性，突出它们作为地核与地壳的纽带以及在全球构造演化过程中的作用，进一步明晰 Jason 与 Tuzo 的内涵与外延。

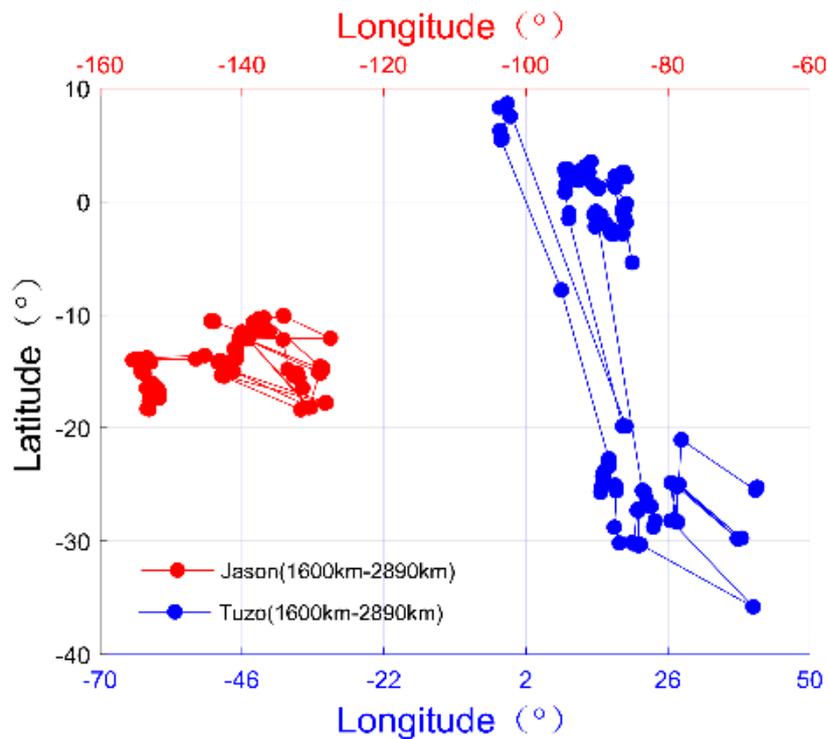
我们以 10 km 为间隔，部分深度段为 5 km，从 2890 km 开始向上横切 Jason 与 Tuzo，二者皆呈椭圆分布。大致在深度 1600 km 以上，Jason 与 Tuzo 呈多椭圆形态分布。使用不同阈值，Jason 与 Tuzo 为多椭圆形态分布特征基本在 1600~1550 km 深度空间范围内开始出现，由此，我们将 Jason 与 Tuzo 在 2890~1600 km 深度范围命名为超级地幔树的“树干”，1600 km 以上命名为超级地幔树“树冠”。Large low shear velocity provinces (LLSVPs)属于超级地幔树“树干”的底部。2890~2600 km 处的铁含量数据来源于 Mosca et al. (2012) 的研究成果。附件 2-1 图 3 是 Jason 与 Tuzo 的“树干”椭圆扁率随深度变化曲线，该曲线显示 Jason 的“树干”椭圆扁率恒大于 Tuzo 的“树干”椭圆扁率。附件 2-1 图 4 是 Jason 和 Tuzo 的“树干”椭圆中心随深度变化曲线。按 10 km 间隔，不同深度的“树干”椭圆中心经纬度坐标投影反映 Tuzo 活跃度大于 Jason 活跃度（附件 2-1 图 5）。



附件 2-1 图 3 Jason 与 Tuzo 的“树干”椭圆长轴与短轴之比 Ra/Rb 随深度变化曲线



附件 2-1 图 4 Jason 与 Tuzo 的“树干”椭圆中心随深度变化曲线



附件 2-1 图 5 Jason 与 Tuzo 的“树干”不同深度椭圆中心在经纬度坐标平面上的投影

主要参考文献

- Burke K. 2011. Plate tectonics, the Wilson cycle, and mantle plumes: Geodynamics from the top. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39: 1~29.
- French S W, Romanowicz B. 2015. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots. *Nature*, 525: 95~99.
- Larson R L. 1991. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 19(6): 547.
- Maruyama S. 1994. Plume tectonics. *Journal of the Geological Society Japan*, 100:24~49.
- Morgan W J. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230: 42~43.
- Morgan W J. 1972. Deep mantle convection plumes and plate motions. *AAPG Bulletin*, 56: 203~213.
- Mosca I, Cobden L, Deuss A, Ritsema J, Trampert J. 2012. Seismic and mineralogical structures of the lower mantle from probabilistic tomography. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 117(B6): B06304.
- Wilson J T. 1969. Static or mobile earth: The current scientific revolution. *Tectonophysics*, 7(5): 600~601.

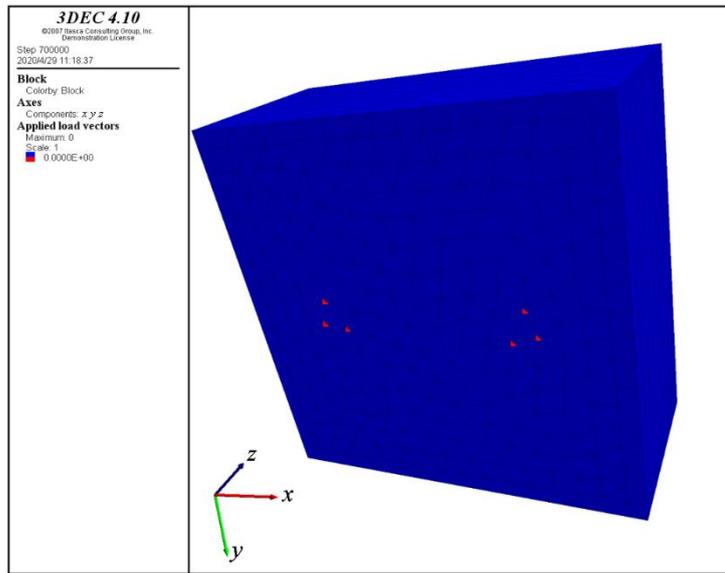
附件 2-2 有限元数值模拟与光弹试验

Appendix 2-2 The results of element numerical simulations and photoelastic experiments

1 双孔有限元（静态）数值模拟实验（Finite element numerical simulation program and model parameters）

Considering the use of million years as the age unit in earth science, in the mechanical sense, the effect of the outer core top on the lower mantle bottom belongs to statics. Therefore, we use static finite element numerical simulation (3DEC V4.10).

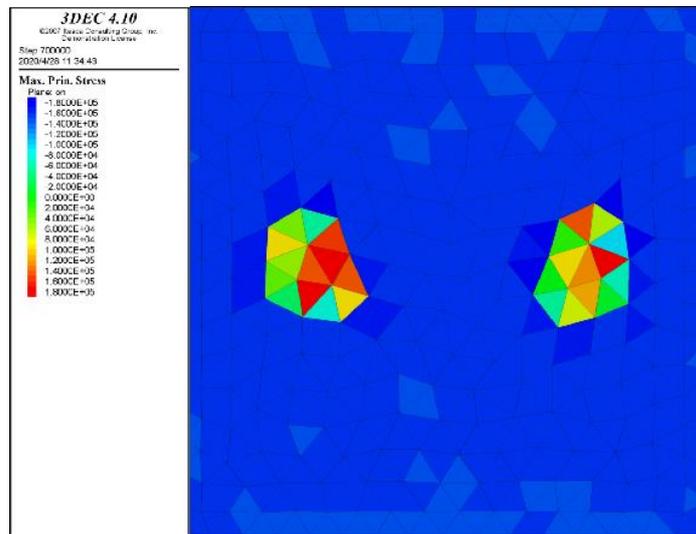
(1) Model and boundary condition.



Appendix 2-2 Fig. 1 Model ($x=64$ m, $y=64$ m, $z=30$ m) are subdivided by tetrahedral elements with 4 m cell size. Red points are point loading positions

The bottom ($z=0$) and its four boundaries are fixed and use displacement constraint condition. Two point loads are located at A ($x=15$ m, $y=33$ m, $z=0$ m) and B ($x=49$ m, $y=33$ m, $z=0$ m); the point loadings are 1000 N along z -axis forward direction

(2) Numerical simulation results.



Appendix 2-2 Fig. 2 Distribution nephogram of maximum principal stress slice along z -axis from bottom (0 m) to 25 m

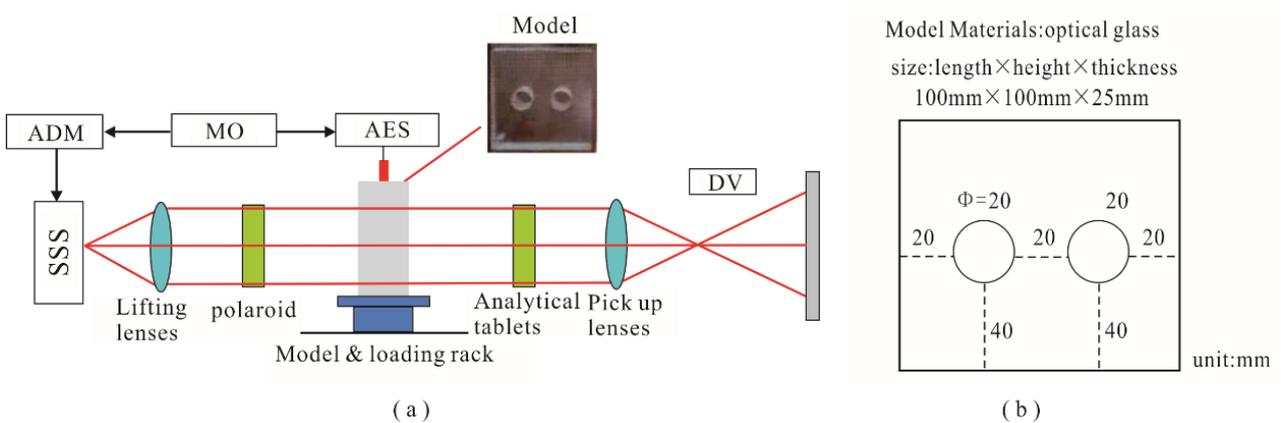
2 双孔光弹试验 (Principle of simulation system of photo-elastic test with two holes and model and test parameters)



Appendix 2-2 Fig. 3 Dynamic photoelasticity physical simulation system (polarimeter $\phi 300$ mm)

System configuration:

- (1) Stroboscopic spark source (SSS)
- (2) Adjustable delay meter (ADM)
- (3) Main oscillato (MO)
- (4) Acoustic emission source (AES) (piezoelectric wafer 500 KHz)
- (5) Optical lenses (OL)
- (6) Digital video (DV)
- (7) Image processing system (IPS)



Appendix 2-2 Fig. 4 Principle of simulation system of photo-elastic test with two holes (a) and model and test parameters (b)

附件 2-3 地幔横波低速体异常分布与全球板块构造对比图的成图说明

Appendix 2-3 Supplementary notes for the comparison of low shear velocity anomaly distribution and globe tectonics

通过整理前人对玄武岩和热点分布的研究成果 (Morgan, 1983; O'Connor et al., 1992; Müller et al., 1993; Richards et al., 2000), 利用 GMT 绘图工具, 采用 Hammer 投影绘制了洋壳年龄、玄武岩年龄和热点分布。洋壳年龄数据来源于 National Centers for Environmental Information (Müller, 2008)。全球层析成像横波速度数据体来自 French and Romanowicz (2015)。

地磁场东向分量与地磁场地磁偏角图的成图说明: 数据来源于 International Geomagnetic Reference Field (IGRF), 12th Generation。

主要参考文献

- Morgan J W. 1983. Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, 94(1): 123~139.
- Müller R D, Royer J Y, Lawver L A. 1993. Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks. *Geology*, 21(3): 275.
- O'Connor J M, Le Roex A P. 1992. South Atlantic hot spot-plume systems: 1. Distribution of volcanism in time and space. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(3): 343~364.
- Richards M A, Gordon R G, Van der Hilst R D. 2000. *The History and Dynamics of Global Plate Motions*. Washington, D.C.: American Geophysical Union.
- French S W, Romanowicz B. 2015. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots. *Nature*, 525: 95~99.

附件 2-4 超级地幔树不同深度的“树干”椭圆投影及全球大地构造略图的成图说明与构造认识 Appendix 2-4 Supplementary notes for the ellipse projection of the “trunks” of the super mantle tree at different depths and sketch of the global tectonic structure

首先, 根据地幔分隔面将全球划分为大西洋半球与太平洋半球两个一级构造体。其次, 利用 USGS 提供的板块边界数据和 NOAA 提供的 ETOPO5 全球高程数据, 在一级构造体内进一步划分出大陆和大洋构造区。最后, 根据全球大地构造观点 (Wilson, 1969; Yang et al., 2020), 在大陆构造区内继续划分出若干三级构造区。

黑色虚线为岩石圈平均年龄等值线, 是根据全球各地热点岩石年龄研究成果 (Morgan, 1983; O'Connor and Le, 1992; Müller et al., 1993; Richards et al., 2000), 通过分析和归纳绘出各区域岩石圈平均年龄等值线。热点是岩石圈表面的高热岩石露头, 其年龄值可直观的揭示出板块扩张过程。

底图采用 GMT 绘制, 构造分区采用 CorelDraw 绘制。

超级地幔树 (Jason 与 Tuzo) 是地球内部二个规模巨大的三维横波低速异常体。Jason 与 Tuzo 之间的地幔分隔面, 使得二者生长空间各自独立。地幔分隔面北端大致指向地磁北极, 南端基本指向地磁南极。地幔分隔面二侧地球化学特征有着显著的差异。地幔分隔面将全球划分为大西洋半球构造体与太平洋半球构造体, 属于一级构造。依据全球大陆架分布, 可将两半球分别划分出大陆与大洋构造的二级构造。依据本文思想, 在二级构造区的基础上划分出三级构造区。

从超级地幔树的“树干”椭圆与全球构造形态来看, 超级地幔树生长演化控制全球构造的水平运动、旋转运动与垂直运动。Jason 的“树干”椭圆中心主要呈近东西向分布, 椭圆中心分布相对集中; Tuzo 的“树干”椭圆中心主要呈近 NNW 向分布, 椭圆中心分布相对分散。说明 Tuzo 活跃度大于 Jason 活跃度。由于超级地幔树的“树干”椭圆中心基本位于南半球, 它们产生的南向运动相对较弱, 当今大陆分布形态可能是超级地幔树周期性幕式运动综合作用的结果。

Jason 的“树干”椭圆长轴表现为 NW 向, 椭圆扁率相对较大。2400 km 以下, Jason 东部几乎抵达南美洲边缘。2000~2300 km 深度空间, Jason 的“树干”呈歪斜状, 并抵达下加利福尼亚半岛、墨西哥湾、加勒比地区、巴西中东部地区, 使得太平洋东部地区地幔分隔面也呈歪斜状。1800 km 以上, Jason 的“树干”开始向西收缩。110 km 深度, Jason 低速体在东太平洋地区表现为西向拉张型横向连续分布, 东缘抵达美洲西岸。该现象说明: ① 北美西部向西拉张可能是 110 km 上部空间横波低速体运动所致, 加勒比与南美洲向东位移可能是 110 km 下部空间横波低速体运动所致。② 东太平洋地区横波低速体拉张型横向连续分布, 导致横波低速体失去向上运动的动力, 可能是该区火山欠发育、地震性质表现为张剪型的主要因素。

中太平洋到西太平洋地区 Jason 横波低速体主要表现为西向挤压与顺时针旋转二种运动, 加大了横波

低速体纵向运动力量。致使中太平洋到西太平洋地区火山与地震活动频繁，中太平洋地区火山岛链呈折线状顺时针方向分布，玄武岩年龄西老东新，地震性质表现为挤压走滑型。

Jason 的“树干”西部大致抵达澳大利亚东北部、印度尼西亚东部、菲律宾一线，西太平洋弧状构造体系可能主要是 Jason 顺时针运动所致。西太平洋地区构造特征主要表现为多期西向挤压、北向移动、短暂南移特征。马里亚纳海沟与郯庐断裂可能是这种构造运动的产物。澳大利亚构造形态可能主要是 Jason 的“树干”由深到浅顺时针旋转所致。在中国境内，Jason 向西挤压形成中国东部南北向构造形态。到达郯庐断裂北段，Jason 顺时针旋转力已经微弱，难以产生类似于南段与中段的深大断裂，使得郯庐断裂北段表现为扇状小断裂特征，导致中国东部南北向构造表现为南强北弱。Jason 由东向西、由下往上、多期次、多层次、顺时针旋转可能是太平洋收缩（closing）的主要原因。

Tuzo 的“树干”表现为上下细、中间粗的鼓状特征，“树干”椭圆长轴表现为 NW 向。结合附件 2-1 可知，2830 km 以下与 2000 km 以上，Tuzo 的“树干”较细，椭圆中心基本位于南纬 20 度以南。2000~2830 km，Tuzo 的“树干”较粗，椭圆中心基本位于南纬 6 度以北。Tuzo 的“粗树干”逆时针旋转可能是形成北大西洋，导致北大西洋与北美的 NW 向与 SWW 向运动皆为单边运动的主要因素。Tuzo 的“细树干”逆时针旋转可能是形成南大西洋及其宏观构造形态与运动特征的主要因素。Tuzo 不同深度的“树干”的幕式运动可能是导致中大西洋脊减薄的主要因素(Turner et al.,1993)。受 Tuzo 逆时针旋转作用，东印度洋地区主要以挤压运动为主。

Jason 旋转产生的构造活动主要改造中国东部构造，形成中国东部南强北弱的南北向构造形态。Tuzo 旋转产生的构造活动主要改造中国西部构造，形成中国西部西强东弱的东西向构造形态。

主要参考文献

- Morgan J W. 1983. Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, 94(1): 123~139.
- Müller R D, Royer J Y, Lawver L A. 1993. Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks. *Geology*, 21(3): 275.
- O'Connor J M, Le Roex A P. 1992. South Atlantic hot spot-plume systems: 1. Distribution of volcanism in time and space. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(3): 343~364.
- Richards M A, Gordon R G, Van der Hilst R D. 2000. *The History and Dynamics of Global Plate Motions*. Washington, D.C.: American Geophysical Union.
- Turner S, Hawkesworth C, Liu Jiaqi, Rogers N, Kelley S, van Calsteren P. 1993. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 364: 50~54.
- Wilson J T. 1969. Static or mobile earth: The current scientific revolution. *Tectonophysics*, 7(5): 600~601.
- Yang Weiran, Jiang Chunfa, Zhang Kang, Guo Tieying, You Zhendong. 2020. Applying the view of opening-closing-rotating tectonics to study how the Earth's interior is working. *Earth Science Frontiers*, 27: 204~210.

附件 2-5 关于青藏高原及邻区地质地球物理三维构造模型的建模说明

Appendix 2-5 Supplementary notes for the geological and geophysical three-dimensional structural model of the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas

1 正文图 5 数据来源与建模过程

(1) 正文图 5 中，深度 60 km（正文图 5 中红色点划线标出）以上为不同阶数卫星重力异常数据体，数据来源于 ICGEM（International Centre for Global Earth Models）的 EGM2008 重力场模型。60 km 以下为横波速度异常数据体，数据来自 Jiang Guangzheng et al. (2019)。

(2) 利用卫星重力异常研究地球圈层结构和深部构造，一般采用点源模型建立球谐分解阶数与场源深度关系。附件 2-5 表 1 为利用 GFZ（Helmholtz-Centre Potsdam - German Research Centre for Geosciences）-ICGEM 提供的 EGM2008 卫星重力场模型球谐分解不同阶数对应的扰动场源深度。

附件 2-5 表 1 EGM2008 卫星重力场球谐分解阶数与场源深度关系

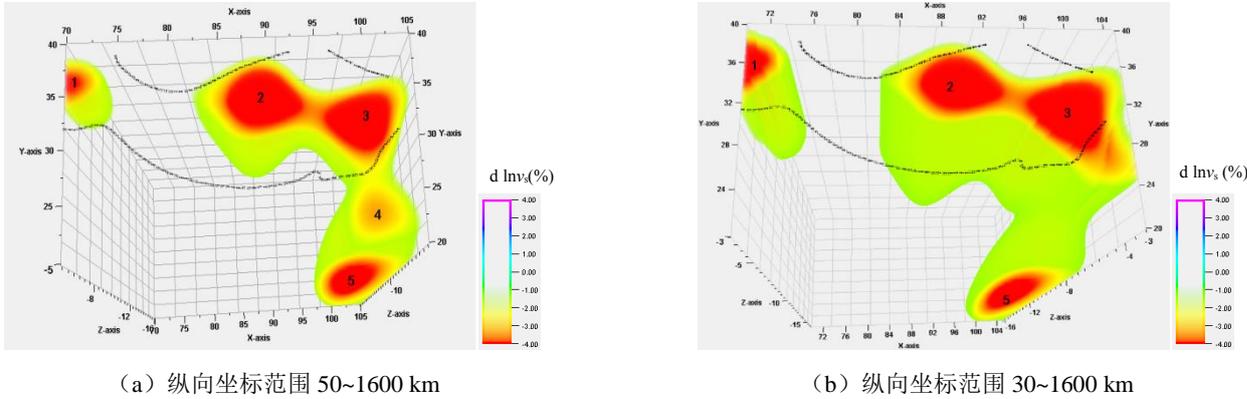
阶数 n	场源深度 (km)
171~300	10
151~170	20
131~150	30
111~130	40
91~110	50
71~90	60

根据我们 20 多年对青藏高原综合研究的地质认识，以及地面重力、航磁、反射地震等资料的约束，对不同阶数卫星重力异常进行地质解释，利用 Cinema 4D 进行网格化建模，然后，利用 Matlab 软件数字化，最后，利用 Paraview 软件进行实体建模，获得正文图 5。为方便读者检查与阅读，没有填充 10 km 至地面卫星重力异常数据。

2 青藏高原构造成因

经过对 French and Romanowicz (2015) 成果数据的认真分析，我们发现 $E70^{\circ}$ — $E105^{\circ}$ ， $N20^{\circ}$ — $N40^{\circ}$ 范围内，由 45~2890 km 处的数据是连续覆盖的。使用斯伦贝谢公司 Petrel 软件分别绘制了 60~1600 km 与 45~1600 km 的横波低速异常体三维图（附件 2-5 图 1），图中虚黑线大致是青藏高原边界，附件 2-5 图 1a 纵向坐标范围为 50~1600 km，显示 60~1600 km 横波低速异常体。附件 2-5 图 1b 纵向坐标范围为 30~1600 km，显示 45~1600 km 横波低速异常体。附件 2-5 图 1 显示，1 号、2 号、3 号三个 Tuzo 横波低速异常体形似火炬（用“火炬”称之）。来自西部深处的 Tuzo“火炬 1”上升过程形成青藏高原西部喇叭状地貌构造形态与西昆仑构造形态。位于藏北的“火炬 2”上升过程中，其西缘控制中昆仑与东昆仑的构造形态及走向。位于藏东的“火炬 3”上升过程中，其东缘控制龙门山与横断山脉的构造形态及走向。“火炬 2”与“火炬 3”底部深度大约为 110~120 km，它们的物质来自印度洋深部的 Tuzo 的“树枝”（图中标号 5）。附件 2-5 图 1a 中的 4 号异常

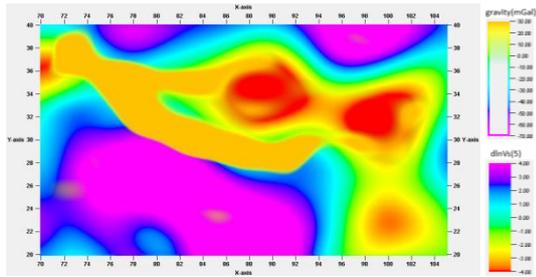
在附件 2-5 图 1b 中大约 55 km 深度处消失，说明 4 号异常是 Tuzo 的“树枝”由深部向 NNE 斜升过程中的产物。“火炬 3”在附件 2-5 图 1b 中呈台阶状向 SE 方向突出，位置对应云贵高原，意味着“火炬 3”向 SE 方向运动可能影响云贵高原地貌构造形态。



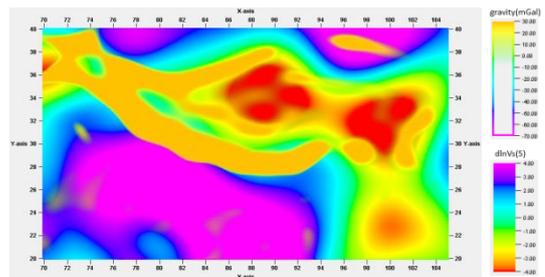
附件 2-5 图 1 E70°—E105°和 N20°—N40°范围内，横波低速异常体三维图（图中虚黑线是青藏高原大致边界）

使用斯伦贝谢公司 Petrel 软件绘制的附件 2-5 图 2 揭示，藏南与藏北、藏东深部物质性质及运动特征差异较大，藏南主要为横波高速异常、高密度物质北向作用，藏北、藏东主要为横波低速异常、低密度物质火炬式上升，与地面表现为藏南高热流、藏北低热流现象基本一致（Turner et al., 1993; An et al., 2001; Spicer et al., 2003; Currie et al., 2005; Jiang Guangzheng et al., 2019）。早期，藏北 Tuzo 的“树枝”呈火炬状向上运移，调整青藏高原软流圈，出现软流圈热隆起，下地壳热软化，中下地壳顺层汇聚大量热物质。青藏高原南部构造体制发生转换，青藏高原内部及南部开始伸展松弛，先期挤出体外侧发生水平伸展拆离，形成藏南系列滑覆构造体，并伴随大量的淡色花岗岩浆上涌。青藏高原开始整体上升，青藏高原核部一系列以南北向为主的正断层开始活动，青藏高原周缘地区向外逆冲扩展，早期形成的部分逆冲断层开始活化。后期，Tuzo 的“树枝”持续快速向上生长，藏南岩石圈热汇聚熔断拆沉减薄，软流圈大量热流体上涌。青藏高原原隆升到一定高度，发生重力均衡调整，陆内滑覆。青藏高原继续快速上升过程中，青藏高原内部强烈走滑拉张，南北向伸展热隆构造系统形成，以温泉、火山等形式释放出大量热能，青藏高原周缘形成强烈走滑挤压(Liu et al., 2020)。附件 2-5 图 2 形象地反映青藏高原总体呈“S”形逆时针旋转构造地貌形态，每个带地质特征不同，构造形态不一。

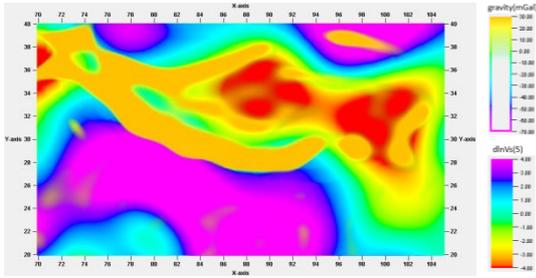
此外，西向运动的 Jason“树枝”改变了北向运动的 Tuzo“树枝”空间运动形态，使之变成向西弯曲的弧形运动形式，二者共同作用形成青藏高原东构造结。该实例将表层认识与深部物质运动有机结合起来，说明深部物质运动是表层地质现象的成因，反映超级地幔树“树冠”运动进一步细化和改造全球构造格架，形成全球复杂而有规律的构造全景。



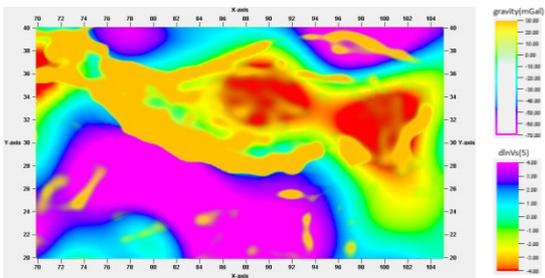
(a) 71 阶—90 阶卫星重力异常与 60 km 深度横波速度异常体叠合图



(b) 111 阶—130 阶卫星重力异常与 60 km 深度横波速度异常体叠合图



(c) 111 阶—130 阶卫星重力异常与 45 km 深度横波速度异常体叠合图



(d) 171 阶—300 阶卫星重力异常与 45 km 深度横波速度异常体叠合图

附件 2-5 图 2 青藏高原不同阶数卫星重力异常与 60 km、45 km 深度横波速度异常体叠合图

主要参考文献

- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. 2001. Evolution of Asian mon-soons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411: 62~66.
- Currie B S, Rowley D B, Tabor N J. 2005. Middle Miocene paleoaltimetry of southern Tibet: Implications for the role of mantle thickening and delamination in the Himalayan orogen. *Geology*, 33: 181~184.
- French S W, Romanowicz B. 2015. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots. *Nature*, 525: 95~99.
- Jiang Guangzheng, Hu Shengbiao, Shi Yizuo, Zhang Chao, Wang Zhuting, Hu Di. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications. *Tectonophysics*, 753: 36~48.
- Liu Demin, Yang Weiran, Guo Tiejing, Ru Jiangtao, Xiong Aimin. 2020. Discussion on the Cenozoic tectonic evolution and dynamics of southern Tibet. *Earth Science Frontiers*, 27: 275~286.
- Spicer R A, Harris N B W, Widdowson M, Herman A B, Guo Shuangxing, Valdes P J, Wolfe J A, S P. Kelley. 2003. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. *Nature*, 421: 622~624.
- Turner S, Hawkesworth C, Liu Jiaqi, Rogers N, Kelley S, van Calsteren P. 1993. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 364: 50~54.