浅地幔系统的动力学作用

杨文采

浙江大学地球科学学院,杭州,310027

内容提要:近年来地幔地球物理三维成像为地下深部构造和物质运动提供了大量数据和信息,促进了人们对浅 地幔系统物质运动的特征和动力学作用的认知。按照运动的方向不同,浅地幔系统的物质运动可分为三种主要形 式:水平运动、向上涌动和向下沉动。浅地幔系统物质向下运动由地球引力势能引起,其他方向的运动主要由热能 和动能引起。除了动力来源之外,浅地幔系统物质运动的方向还取决于岩石圈和软流圈的物质属性,因为高黏度介 质阻挡物质运动,而低黏度介质加速物质运动。软流圈物质的水平蠕动差异,产生了岩石圈的伸展、拆离和推覆等 复杂构造,速度和动能较大软流圈物质的蠕动,一定会带动岩石圈板块物质的运动和变形。软流圈物质的向上涌动 又可以进一步细分为上涌运动、上拱运动和穿刺运动三种方式,它们对上方岩石圈的作用效果是不同的。浅地幔系 统的物质下沉运动有多种形式,包括俯冲、拆沉和交代作用,也经常伴随有软流圈物质上涌,在微观上是一种对偶运 动。这种对偶运动造成了克拉通地壳的底垫和岩石圈的陆根。软流圈大规模的物质运动,包括大洋中脊物质上涌、 大陆碰撞造山和大洋俯冲的前陆拉张,在全球地震层析成像图上都有清晰的反映。中国东南沿海一带是浅地幔系 统物质运动的一个特殊地区,可能是由于白垩纪伊佐奈崎板块俯冲,激发东亚大陆边缘软流圈上涌,然后又造成大 陆边缘岩石圈局部拆沉等一连串动力学作用叠加形成的。

关键词:大陆动力学;浅地幔系统;三维地球物理图像;水平运动;向上涌动

这是讨论地球浅地幔系统的第三篇文章。在第 一篇"认知地球物质运动的大陆动力学方法"(杨文 采等,2020)一文中,为克服板块构造学的存在问 题,我们讨论了固体地球三维成像研究提供的基 础,通过大陆动力学的研究可以建立板块构造学的 升级版。从最近几年的地幔地球物理三维成像成果 (Anderson, 1989; Pakiser and Mooney, 1989; Ritsema, 2000; Unsworth et al., 2005; Shi et al., 2008; Cloetingh and Negendank, 2009)可见,对于地 球表面难以观察的软流圈和地下深部,对比三维的 地震波速和电阻率扰动图像,可以获得关于上地幔 物质运动的信息,认知已经发生在地壳---上地幔的 物质运动特征。在第二篇"浅地幔系统的组成和属 性相态"(杨文采,2020)一文中,我们讨论了地球系 统应该划分为地球表面、浅地幔、地幔对流和地核四 个子系统。浅地幔子系统由四个由不同质的单元相 互作用组成,它们是大洋岩石圈、大陆岩石圈、洋陆 转换带岩石圈和软流圈。系统的作用反映了大洋岩 石圈与大陆岩石圈的博弈,洋陆转换带是洋底扩张 与大陆增生之间博弈的主要战场。软流圈是地幔对 流的顶层,也是系统的能量库和主要动力来源。在 本文中我们将继续讨论浅地幔系统物质的三种主要 形式:水平运动、向上涌动和向下沉动。从目前的成 像结果可以看到,对于地球表面难以观察的岩石圈 深部和软流圈,对比三维的地震波速和电阻率扰动 等构造图像,可获得中生代以来物质运动的信息,认 知已经发生在地壳—上地幔的物质运动特征(杨文 采,1986,1989,1997;杨文采等,2014,2017;Yang Wencai, 2003, 2014;Yang Wencai et al., 2006)。

在板块构造学中假设,岩石圈板块是刚性的整体,浅地幔系统的物质运动用板块运动来代替就可以了。由于软流圈的黏度不够高,物质运动的形式 主要是大尺度的蠕动,板块构造学的假设不再适合 了。此外,大陆和大洋在年龄和结构上差别很大,对 物质运动有很大影响,而板块构造学对此也没有仔 细考虑。物理学用黏度来表示物质的宏观运动特 性。根据地球物理的观测推导,现今下地壳的黏度 比上地壳和下方的岩石圈地幔都低。但是,下地壳

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41574111)的成果。

收稿日期:2020-02-06;改回日期:2020-04-07;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.03.001

作者简介:杨文采,男,1942年生,浙江大学地球科学学院教授、中国科学院院士,主要从事大陆动力学和应用地球物理学研究和教学; Email:Yang007@ zju. edu. cn。

大规模的物质运动只能发生在局部地区(杨文采 等,2018,2019a,b,c;杨文采,2019)。岩石圈板块浮 在软流圈之上,可以作切线方向运动;也可以在软流 圈黏性物质运动带动下作上下运动。关于岩石圈物 质运动的理论必须建立在浅地幔系统的所有物质运 动的基础上,结合地质测年和岩石同位素测量的数 据,从软流圈物质大尺度蠕动图像中揭示上地幔构 造,分析它们形成的动力学作用的根源,尽可能避免 想象。这就是在本文关于浅地幔系统的讨论中我们 的主导思想。

1 浅地幔系统物质的水平运动 及其效应

浅地幔系统在不受外来力量冲击的情况下,造

成浅地幔系统物质运动的能量主要包括来自软流圈 及其下方的热能和动能,以及由地球引力产生的势 能。造成浅地幔系统物质向下运动的能量由地球引 力产生的势能引起,其他方向的运动主要由热能和 动能引起。除了动力来源之外,浅地幔系统物质运 动的方向还取决于岩石圈和软流圈的构造,因为高 黏度介质阻挡物质运动,而低黏度介质加速物质运 动。

全球板块构造是了解岩石圈构造复杂性的好模型,可惜没有揭示软流圈构造的复杂性。中国及邻区软流圈地震 P 波速度扰动三维成像(图1)揭示了软流圈构造的复杂性(Li Chang et al.,2006)。由图 1a 可见,岩石圈和软流圈的界面是起伏不平的,软流圈上部蓝色为高波速区,反映了位于克拉通下方



图 1 中国及邻区软流圈地震 P 波速度扰动三维成像平面图(据 Li Chang et al., 2006), 平面图对应深度: (a) 200 km, (b) 300 km, (c) 400 km, (d) 600 km

Fig. 1 The P-wave velocity disturbance images around China(from Li Chang et al. , 2006):(a) at depth of 200 km;

(b) 300 km; (c) 400 km; (d) 600 km

蓝色为高波速区,以F开头编号;红色为低波速区,以S开头编号

Blue shows high-velocity blocks with numbering from letter "F"; yellow shows low-velocity blocks with numbering from letter "S"

的大陆的根,如F2是西伯利亚克拉通,F5是华北鄂 尔多斯克拉通,F6是上扬子克拉通。红色的低波速 区主要反映中—新生代大陆构造活动带,如S1~S4 反映西太平洋板块俯冲的前方拉伸带。在软流圈下 部(图1c,深度300~410 km),波速扰动图像发生了 根本的变化,与岩石圈板块构造的相关性很差,与 中—新生代大洋板块俯冲作用和其他深层作用的相 关性增强了。在软流圈下方(如图1d,深度600 km),波速扰动图像的格局几乎完全改变,红色的低 波速区(S5~S7)主要反映大陆,蓝色的高波速区 (F4~F8)主要反映含大量大洋俯冲板块的洋陆转 换带,但是也有可能反映地幔热羽柱的低波速区 (TZ3)。由此可见, 地震 P 波速度扰动三维成像揭示了软流圈的构造和物质运动的三维图像。

板块构造学揭示了大陆漂移和岩石圈板块水平 运动的事实,也指出岩石圈板块水平运动的可能性 来自软流圈的流变性。其实,是软流圈物质的蠕动 带动了岩石圈板块的水平运动,可以用图 2(James, 1989;Jolivet and Hataf, 2001;Rogers, 2004)加以说 明。图 2a、b 说明软流圈物质的水平蠕动差异,产生 了岩石圈的伸展,差异水平运动的积累逐渐形成了 沉积盆地。图 2c 表明,如果岩石圈原来就有拆离带 存在,差异的软流圈物质的水平蠕动,也可能造成地 壳的推覆。除了物质水平蠕动的差异,地幔对流在



图 2 浅地幔系统的物质运动的不同方式示意图(据 James, 1989; Jolivet and Hataf, 2001; Rogers, 2004 等修改):(a) 差异 水平运动,产生岩石圈伸展;(b) 差异水平运动,产生沉积盆地;(c) 差异水平运动,产生地壳推覆;(d) 软流圈垂直上 涌,产生岩石圈伸展;(e) 软流圈斜侧上涌,产生岩石圈推覆;(f) 软流圈垂直下沉,产生岩石圈推覆

Fig. 2 The mass movement modes in the shallow mantle system(modified from James, 1989; Jolivet and Hataf, 2001; Rogers, 2004 et al.):(a) discrepancy in horizontal movement and causing extension; (b) discrepancy in horizontal movement and emerging basins; (c) discrepancy in horizontal movement and emerging nappes; (d) discrepancy in vertical upwelling and causing extension; (e) discrepancy in dipping upwelling and emerging nappes; (f) discrepancy in vertical depression emerging nappes



图 3 大洋岩石圈软流圈流体地球化学的研究结果:顶面熔融和物质运动方式示意图(据 Liu Jia et al., 2020) Fig. 3 Top melting and mass movement in the oceanic asthenosphere studied by fluid geochemistry(from Liu Jia et al., 2020)

软流圈的垂直上涌,会受岩石圈阻挡转为反向的水 平运动(图2d),也产生岩石圈伸展。但是,如果软 流圈斜侧上涌(图2e),则可能产生岩石圈的推覆。 如果软流圈物质在对称旋转中垂直下沉,则可能同 时产生产生岩石圈的拆离和推覆等复杂构造形态 (图 2f)。从动力学角度看,速度和动能较大软流圈 物质的蠕动,一定会带动岩石圈板块物质的水平运 动和变形。



图 4 浅地幔系统的物质垂直上涌运动不同方式的示意图(据杨文采,2010):(a)大洋中脊的地震 S 波速度结构和软流圈 上涌模型;(b)由地震波速度结构取得的东非大裂谷的软流圈上涌模型;(c)软流圈上涌、上拱和穿刺运动的差异示意 图

Fig. 4 The mass uprising modes in the shallow mantle system (from Yang Weicai, 2010&): (a) the S-wave velocity and upwelling model of the oceanic ridge; (b) the seismic velocity and upwelling model of the East Africa rift; (c) the difference between the asthenosphere upsurge, upwelling and diapir



图 5 过内蒙古白云鄂博的大地电磁法电阻率剖面,揭示软流圈流体的冷穿刺作用(据笔者等资料): (a) 过 111°E 的 南北向剖面; (b) 过 110°E 的南北向剖面; (c) 过 42°N 的东西向剖面; (d) 过 43°N 的东西向剖面 Fig. 5 Crustal and upper-mantle resistivity disturbance profiles around North China (based on writers' data): (a) N—S profile of longitude 111°E; (b) 110°E; (c) W—E profile of latitude 42°N, and (d) 43°N

在浅地幔系统物质运动主要是流体和熔体的运动,流体地球化学方法是研究系统物质运动的重要途经之一。由于黏度大的岩石圈阻挡,软流圈上部和下部物质的蠕动的方向是不同的。在软流圈上部流体和熔体的运动主要呈现为水平方向,下部物质的蠕动主要呈现为垂直方向。图3为大洋岩石圈软流圈流体地球化学的研究结果(Liu Jia et al.,

2020),说明软流圈顶面熔融和物质运动的方式。 由此可见,软流圈顶面含有很多的辉石熔融体,可以 水平运动到洋陆转换带。大洋岩石圈含有较多的碳 酸钙,它们在古俯冲带上地幔会积累起来,在后来的 俯冲带软流圈的局部对流中,造成 CO₂ 气体的排 放。在浅地幔系统物质运动方面地球化学和地球物 理调查的结果是一致的,可以从不同侧面说明同一



图 6 过中国东部和海区的地震 P 波速度扰动剖面(据 Huang et al.,2006):(a) 过华北中部的 EW 向剖面; (b) 过扬子克拉通的 30°N 的东西向剖面

Fig. 6 Two P-wave velocity disturbance profiles in East China(from Huang et al. ,2006) :

(a) a EW profile across North China , and (b) across South China along latitude $30^\circ N$

个物质运动模式。

2 软流圈物质的上涌运动及其效应

在图 2d、e 和图 3 都讨论过地幔对流在软流圈的垂直运动,带动了岩石圈板块物质的运动和变形。 软流圈物质的上涌运动在板块构造学中已经提出, 例如在大洋中脊的软流圈上涌(图 4a),造成了洋中 脊扩张(杨文采,2010)。图 4b 是由地震波速度结 构取得的东非大裂谷的软流圈上涌模型,软流圈上 涌造成大陆张裂并产生沉积盆地(杨文采,2010)。 从现今软流圈地震波速扰动和电阻率扰动的三维图 像分析,软流圈物质的上涌运动有多种不同的模式。 在图 4c 中我们总结了浅地幔系统的物质垂直上涌 运动的三种方式:上涌运动、上拱运动和穿刺运动。 图 4a、b 都是属于软流圈上涌的类型。

上涌运动类型属于软流圈局部的上涌,由于岩 石圈对流体运动的阻挡,常呈蘑菇形或山丘状,如图 4所示。穿刺运动类型属于软流圈小局部上涌,常 呈垂直柱状,如图 5 所示。在大洋中有许多洋岛,软 流圈垂直柱状上涌比较常见;但是在大陆内部,由于 岩石圈厚度大,软流圈垂直柱状上涌比较少见。图 5 是笔者等在内蒙古白云鄂博的大地电磁法测量数 据反演取得的地壳和浅地幔电阻率剖面,低阻体 B 揭示了软流圈流体的穿刺作用。内蒙古白云鄂博位 于古亚洲洋缝合带,是多组多期构造带的交汇点和 超级大稀土矿的所在地。现在地热调查表明,白云



图 7 浅地幔系统物质拆沉不同方式的示意图(据 Jolivet and Hataf, 2001;Rogers, 2004; Liu Jia et al., 2020): (a) 大陆克 拉通岩石圈重力失稳,产生岩石圈地幔拆沉; (b) 大陆碰撞带岩石圈重力失稳,产生岩石圈地幔拆沉; (c) 大陆碰撞带岩 石圈地幔拆沉的过程,从大洋俯冲到陆陆俯冲软流圈构造的改变

Fig. 7 The mass delamination modes in the shallow mantle system(from Jolivet and Hataf, 2001; Rogers, 2004; Liu Jia et al., 2020): (a) craton gravitational instability, causing delamination of lithospheric mantle; (b) gravitational instability in collisional orogeny, causing delamination of lithospheric mantle; (c) the delamination processes of the collisional orogeny, from the subduction of oceanic plate to change of the asthenosphere structures

鄂博的地壳不热,低阻体 B 反映的是冷的流体存 在。

上拱运动类型属于软流圈大面积上涌,常呈现 出面包形状,如图 6(Huang and Zhao, 2006)所示。 图 6 为过中国东部和海区的地震 P 波速度扰动剖 面,由此可见,西太平洋板块向亚欧大陆下方俯冲, 到达上地幔底部后继续沿 670 km 间断面水平方向 前进,进入中国大陆东部的软流圈下方,造成中国大 陆东部沿海地带的软流圈上拱。此软流圈上拱在波 速度扰动图上反映为大片的低速异常,在图1和图 6 中标记为 S3 和 TZ3。它们不是西太平洋俯冲带弧 前沿的拉张带:但是有可能受西太平洋俯冲作用的 影响,由于动能和热流体的释放产生的后果。根据 深反射地震调查的资料可知,现今中国东部华北和 下扬子克拉通的岩石圈厚度在 80 km 以下,而其他 克拉通的岩石圈厚度一般在 140 km 以上。因此可 知,软流圈上拱造成中国东部华北和下扬子克拉通 的岩石圈大范围减薄了 60 km 以上,表明软流圈上 拱作用的影响是巨大的和与众不同的。

3 浅地幔系统的物质下沉运动 及其效应

浅地幔系统的物质下沉运动通常称为拆沉,它 指岩石圈块体因为重力失稳下沉到软流圈。其实, 下沉运动有多种形式,包括俯冲和拆沉,交代作用也 伴随有软流圈物质下沉。在熔融和物质交代的过程 中,软流圈物质中的轻元素上涌,重元素则下沉,这 是微观上同时进行的对偶运动。在地壳底部,这种 对偶运动造成了克拉通地壳的底垫作用,使克拉通 地壳缓慢增厚(杨文采等,2002)。在岩石圈底部, 这种对偶运动也会使克拉通岩石圈缓慢增厚,造成 "陆根"。在图 1a 的波速图上,西伯利亚、印度、鄂 尔多斯和四川等克拉通岩石圈,在 200 km 深度都有 高波速体对应,表明它们有"陆根"存在。

由于克拉通岩石生成年代古老,岩石圈物质的 密度大,陆根的不断生长一定会使浅地幔系统的物 质结构产生重力失稳,最后可能导致拆沉(图7a)。 大洋岩石圈物质的密度也比较大,俯冲到大陆碰撞 带下方软流圈后也会产生重力失稳,使大洋岩石圈



图 8 马里亚纳海沟地区浅地幔系统物质运动过程的示意图(根据 G. A. Davis 教授赠送底图修改):(a) 在 60 Ma 前马里 亚纳海沟地区的岩石圈板块及其边界;(b) 在 60 Ma 时太平洋板块东侧岩石圈构造和产生重力失稳的形势;(c)由于重 力失稳使太平洋板块向菲律宾海板块下方俯冲,产生了马里亚纳海沟

Fig. 8 The mass movement in the shallow mantle system and subduction along the Mariana Trench(modified from the base map presented by Prof. G. A. Davis): (a) the plate distribution in 60 Ma; (b) gravitational instability along the Mariana Trench in 60 Ma; (c) the subduction of oceanic plate caused by the gravitational instability and lithospheric mass motion

向下拆沉(图 7b)。拆沉之后岩石圈底部的空间需 要物质填充,因此软流圈上涌作用随之而来。在大 陆碰撞带,大洋板块俯冲之后常常跟随陆—陆俯冲, 已经俯冲的大洋板块和正在俯冲大陆岩石圈地幔之 间有间断面,很容易被大洋板块拆沉利用,进一步加 快大洋板块俯冲到软流圈之后的拆沉,详见图 7c 的 图解(Jolivet and Hataf, 2001;Rogers, 2004; Liu Jia et al., 2020)。

在重力作用下浅地幔系统物质运动还会造成大 洋板块对大洋板块的俯冲,例如马里亚纳海沟形成 的情况。图 8a 是由古地磁和大洋钻探数据得到的、 在 60 Ma 前西太平洋的岩石圈板块的分布图。当时 马里亚纳海沟的前身是转换断层(TF)。由于太平 洋板块年龄大、西缘岩石圈密度和厚度大,新生的菲 律宾海板块岩石圈密度和厚度小(图 8b),在转换 断层(TF)的两侧浅地幔系统物质产生重力失稳。 由于重力失稳使太平洋板块向菲律宾海板块下方俯 冲,产生了马里亚纳海沟(图 8c)。

由于在大陆碰撞带岩石圈地幔下方有间断面, 很可能造成大洋板块俯冲到软流圈之后的拆沉,青 藏高原就是典型的例证。图9是青藏高原及邻区软 流圈和下方地震 P 波速度扰动三维图像(杨文采 等,2019a,2019c)。在深度270 km 的平面图上 (图9a),蓝色的高波速区不多,高原北部红色的低 波速异常对应同碰撞期的火山爆发。在深度390 km 的软流圈底部(图9b),蓝色的高波速区覆盖高



图 9 青藏高原及邻区软流圈和下方地震 P 波速度扰动三维图像(杨文采等,2019a,c):(a) 深度 270 km 平面图; (b) 深度 390 km 平面图;(c) 深度 470 km 平面图;(d) 过 92°E 的南北向剖面图

Fig. 9 The P-wave velocity disturbance images around Qinghai—Xizang(Tibet) Plateau(Yang Wencai et al. ,

2019a&,c&): (a) at depth of 270 km;

(b) 390 km; (c) 470 km; (d) profile along longitude $92^\circ E$

"Is"标记印度克拉通俯冲板块现今位置,"Ts"标记特提斯洋俯冲板块现今拆沉位置;蓝色为高波速区,红色为低波速区

"Is" marks the current position of the Indian Craton subducting plate, and "Ts" marks the current position of

the Tethys Ocean subducting plate. Blue is high wave velocity region, red is low wave velocity region

原中、北和东部,对应碰撞前期的特提斯洋板块俯冲 到软流圈之后的拆沉。在深度 470 km 的软流圈下 面,高原变为低波速异常,仅仅在东北部有一线高速 异常,对应特提斯洋板块俯冲的最深部位。现今特 提斯洋俯冲板块在过 92°E 的南北向剖面图上看得 更加清楚(图 9d),其中,"Ts"标记特提斯洋俯冲板 块的现今拆沉位置,"Is"标记印度克拉通现今俯冲 板块位置。

软流圈上涌和岩石圈拆沉图到软流圈但是大规 模的物质运动,在全球地震层析成像图上都有清晰 的反映。图 10 是全球软流圈的地震 P 波速度扰动 图像。在深度 185 km P 波速度扰动图上(图 10a), 全球主要的克拉通,如加拿大、西伯利亚、南美、西非 洲和西澳大利亚,它们的陆根都反映为高速异常。 在深度 265 km P 波速度扰动图上(图 10b),除了主 要的克拉通还有高速的陆根反映外,还有许多低速 带异常,它们分别反映大洋中脊、大陆碰撞造山带和 大洋俯冲前陆的拉张带。在深度 355 km 的软流圈 底部(图 10c),大面积的高速异常标明了特提斯洋、 伊佐奈崎大洋等古板块俯冲到软流圈之后的存在位 置。由于现今西太平洋板块没有拆沉,所以它在软 流圈经过的面积不大。中国东南沿海一带是浅地幔 系统物质运动比较特殊的地区(图 10d),它在软流 圈主要反映低速异常带,在软流圈底部依然有低速 异常存在,不过面积大大减小。邓晋福等(2000, 2004)对此解释为,由于白垩纪伊佐奈崎板块俯冲 引起东亚大陆边缘软流圈上涌,然后又造成大陆边 缘岩石圈局部拆沉(图 10d)。这个解释与地球物理 成像结果比较一致。

4 结论

近年来地幔地球物理三维成像为地下深部构造



图 10 全球软流圈 P 波速度扰动及其解释[(a)—(c) 据 Simmons et al., 2012; (d) 据邓晋福等,2000,2004)]: (a) 深度 185 km P 波速度扰动,标明高速的克拉通陆根名称; (b) 深度 265 km P 波速度扰动,标明低速带的位置; (c) 深度 355 km P 波速度扰动,标明高速的洋壳位置; (d) 中国东南的浅地幔系统物质运动解释剖面,剖面位置在图 a—c 中用黑色直 线标明

Fig. 10 The globe P-wave velocity disturbance images with interpretation [(a)-(c)] from Simmons et al., 2012; (d) from Deng Jingfu et al., 2000&, 2004#)]; (a) at depth of 185 km; (b) 265 km; (c) 355 km; (d) a model on mass movement in the shallow mantle system around Southeast China

和物质运动提供了大量数据和信息,促进了人们对 浅地幔系统物质运动的特征和动力学作用的认知。 按照运动的方向不同,浅地幔系统的物质运动可分 为三种主要形式:水平运动、向上涌动和向下沉动。 造成浅地幔系统物质向下运动的能量由地球引力产 生的势能引起,其他方向的运动主要由热能和动能 引起。除了动力来源之外,浅地幔系统物质运动的 方向还取决于岩石圈和软流圈的物质属性,因为高 黏度介质阻挡物质运动,而低黏度介质加速物质运 动。软流圈物质的水平蠕动差异,产生了岩石圈的 伸展、拆离和推覆等复杂构造,速度和动能较大软流 圈物质的蠕动,一定会带动岩石圈板块物质的运动 和变形。软流圈物质的向上涌动又可以进一步细分 为上涌运动、上拱运动和穿刺运动三种方式,它们对 上方岩石圈的作用效果是不同的。浅地幔系统的物 质下沉运动有多种形式,包括俯冲、拆沉和交代作 用,也经常伴随有软流圈物质上涌,在微观上是一种 对偶运动。这种对偶运动造成了克拉通地壳的底垫 和岩石圈的陆根。软流圈大规模的物质运动,包括 大洋中脊物质上涌、大陆碰撞造山和大洋俯冲的前 陆拉张,在全球地震层析成像图上都有清晰的反映。 中国东南沿海一带是浅地幔系统物质运动的一个特 殊地区,可能是由于白垩纪伊佐奈崎板块俯冲,激发 东亚大陆边缘软流圈上涌,然后又造成大陆边缘岩 石圈局部拆沉等一连串动力学作用叠加形成的。

致谢:笔者感谢国家自然科学基金委员会对本 项研究的资助。同时向中国地质大学邓晋福教授、 G A Davis 教授,以及浙江大学夏群科教授致谢,他 们与作者讨论了许多问题并为本文提供了部分插 图。

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)

- 邓晋福,赵国春,赵海玲,罗照华,戴圣潜,李凯明. 2000. 中国东部 燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程. 地质论评,46(1): 41~48.
- 邓晋福,罗照华,苏尚国. 2004. 岩石成因、构造环境和成矿作用. 北 京:地质出版社.
- 杨文采. 1986. 应用地震体波的 CT 技术和地球探查. 中国地震, 2 (3):1~13.
- 杨文采. 1989. 地球物理反演与地震层析成像. 北京:地质出版社.
- 杨文采. 1997. 地球物理反演的理论与方法. 北京: 地质出版社.
- 杨文采,汪集旸. 2002. 苏鲁地区地壳岩浆底侵的地球物理判识. 地 质学报, 76(2):173~179.
- 杨文采. 2010. 东亚古特提斯域大地构造物理学(附录——系统论笔记). 北京:石油工业出版社: 378~443.

- 杨文采,宋海斌. 2014. 从地壳上地幔构造看洋陆转换作用. 地质论 评,60(1):1~21.
- 杨文采,侯遵泽,徐义贤,颜萍. 2017. 青藏高原下地壳热变形和管道 流研究. 地质论评, 63(5):1141~1152.
- 杨文采,于常青,杨午阳. 2018. 从地壳密度结构看中国大陆深层油 气盆地的分布. 地质论评,64(6):1315~1323.
- 杨文采,瞿辰,任浩然,黄连捷,胥颐,于常青.2019a.青藏高原地壳地 震纵波速度的层析成像.地质论评,65(1):2~14.
- 杨文采,江金生,瞿辰,侯遵泽,任浩然,于常青. 2019b. 西藏新生代 裂谷系成因的探讨. 地质论评, 65(2)267~279.
- 杨文采,瞿辰,任浩然,黄联捷,胥颐,于常青,刘晓宇. 2019c. 青藏高 原软流圈与特提斯洋板块俯冲. 地质论评, 65(3)520~532.
- 杨文采. 2019. 岩石圈—软流圈物质循环促进大陆增生的新方式. 地质论评, 65(5):1039~1053。
- 杨文采,曾祥芝. 2020. 认知地球物质运动的大陆动力学方法. 地质 论评,66(1):1~12.
- 杨文采. 2020. 浅地幔系统的组成和属性相态. 地质论评,66(2):263 ~275.
- Anderson D L. 1989. Theory of the Earth. Boston: Blackwell Scientific.
- Cloetingh S and Negendank J. 2009. New Frontiers in Integrated Solid Earth Sciences. Amsterdam: Springer.
- Davices G F. 2007. Dynamic Earth, Plates, Plumes and Mantle Convection. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Deng Jingfu, Zhao Guochun, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, Dai Shengqian, Li Kaiming. 2000&. Yanshanian igneous perotectonic assemblage and orogenic—deep processes in east China. Geological Review, 46(1): 41~48.
- Deng Jingfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo. 2004 #. Petrogenesis, Tectonic Environment and Formation of Ore Deposits. Beijing: Geological Publishing House.
- Huang J and Zhao D. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J. Geophys. Res., 111: B09305
- James D E. 1989. The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. New York: Van Nostrand Reinhold Co.
- Jolivet L and Hataf H-C. 2001. Geodynamics. Lisse: A. A. Balkema Pub.
- Li Chang, Robert D, van der Hilst, et al. 2006. Constraining P-wave velocity variations in the upper mantle beneath southeast Asia. Physics of Earth and Planetary Interior, 154:180~195.
- Liu Jia, Naoto Hirano, Shiki Machida, et al. 2020. Potential mechanism of partial melts below the oceanic LAB. Nature Communication. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13958-w
- Pakiser L C and Mooney W D. 1989. Geophysical framework of the continental United States. Geological Society of America, Memoir 172.
- Ritsema J and van Heijst H J. 2000. Seismic imaging of structural heterogeneity in Earth's mantle: Evidence for large-scale mantle flow, Sci. Progr., 83: 243~259
- Rogers J W. 2004. Continents and Supercontinents. Oxford: Oxford Univ. Press.
- Shi Y, Cuo J, et al. 2008. Computation and discussion of the effective viscosity coefficient of continental lithosphere in China. Geoscience Frontiers, 15(3): 82~95.
- Simmons N A, Myers S C, Johannesson G, Matzel E. 2012. LLNL-G3Dv3: Global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction. J. Geophys. Res., 117. B10302, doi:10.1029/2012JB009525.
- Unsworth M, Jones A J, Wei W, et al. 2005. Crustal rheology of the

Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data. Nature, 4383, doi:10:78-81.

- Yang Wencai. 1986&. Underground exploration with body-wave seismic tomography. Earthquake Research in China, 2(3): 1~13.
- Yang Wencai. 1989#. Geophysical Inversion and Seismic Tomography. Beijing; Geological Pub. House; 1~252.
- Yang Wencai. 1997#. Theory and Methods in Geophysical Inversion. Beijing; Geological Pub. House.
- Yang Wencai. 1998#. Introduction to Interior Solid Earth Geophysics. Beijing; Geological Pub. House.
- Yang Wencai and Wang Jiyang. 2002&. Geophysical evidences for magmatic underplaying in the Sulu area of East China. Acta Geologica Sinica, 76(2):173~179.
- Yang Wencai. 2003. Flat mantle reflectors in eastern China: Possible evidence of lithospheric thinning. Tectonophysics, 369(3~4): 219 ~230.
- Yang Wencai, Chen Zhide. 2006. Seismic multi-arch structures in East China. Science in China (Ser. D), 49(2): 133~146.
- Yang Wencai. 2010 #. Tectonophysics of Paleo-Tethyan (Appendix: notes on system theory). Beijing: Petroleum Publishing House: 378~443.
- Yang Wencai, Song Haibin. 2014&. Ocean—continent transition process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. Geological Review, 60(1): 1~21.
- Yang Wencai. 2014. Solid earth geophysics mingles with plate tectonics. Geoscience Frontiers, 21(1): 89~99.

- Yang Wencai, Hou Zunze, Xu Yixian, Yan Ping. 2017&. A study on thermal deformation and lower crust channel flows in Qinghai— Tibetan plateau. Geological Review, 63(5): 1141~1152.
- Yang Wencai, Yu Changqing, Yang Wuyang, 2018&. Distribution of Deep Oil/Gas Sedimentary Basins of China. Geological Review, 64 (6): 1315~1323.
- Yang Wencai, Qu Chen, Ren Haoran, Huang Lianjie, Yu Changqing. 2019a&. Crustal P-wave Seismic tomography of Qinghai—Tibetan Plateau. Geological Review, 65(1): 2~14.
- Yang Wencai, Jiang Jinshen, Qu Chen, Hou Zunze, Ren Haoran, Yu Changqing. 2019b&. A study on origin of Cenozoic rifts in Qinghai—Xizang(Tibetan) Plateau. Geological Review, 65(2)267 ~279.
- Yang Wencai, Qu Chen, Ren Haoran, Huang Lianjie, Xu Yi, Yu Changqing, Liu Xiaoyu. 2019c&. The asthenosphere of the Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau and subduction of the Tethys Ocean. Geological Review, 65(2): 520~532.
- Yang Wencai. 2019&. A new mode for continental accretion induced by interaction between the lithosphere and asthenosphere. Geological Review, 65(5):1039~1053.
- Yang Wencai, Zeng Xiangzhi. 2020&. Continental dynamics with cognition of Earth matter movement. Geological Review, 66(1):1~ 12.
- Yang Wencai. 2020&. On composition, attributes and phases of the shallow- mantle system. Geological Review, 66(2):263~275.

On dynamic processes of the shallow-mantle system

YANG Wencai

School of Geosciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: In recent years, the geophysical 3D imaging of the mantle has provided a great deal of data and information of deep structures and of the underground material motion, promoting the cognition of the characteristics and dynamics of the shallow mantle system. According to the direction of motion, the material movement in the shallow mantle system can be divided into three main forms; horizontal motion, upwelling and sinking motions. The energy that causes the downward movement of matter in the shallow mantle system is caused by the potential energy generated by the earth's gravity, and the motion in other directions is mainly caused by deep heat and kinetic energy. In addition to the power sources, the direction of the material motion of the shallow mantle system also depends on the material properties of the lithosphere and the asthenosphere, as the high viscosity rocks resist the movement of the material and the low viscosity medium accelerates the movement of the material. The horizontal creep difference of asthenosphere mass produces complex structures such as stretching, underplating and nappe in the lithosphere, and the creeping of asthenosphere material with greater velocity and kinetic energy will certainly drive the movement and deformation of the lithosphere plates. The uprising of the asthenosphere can be further subdivided into three ways, the upsurge motion, the upper welling movement and the diapir motion, which have different effects on the upper lithosphere. The material sinking movement of the shallow mantle system takes many forms, including subduction, delamination and metasomatosis, and is often accompanied with the upwelling of the asthenosphere. These mass movements causes the delamination of the craton crust and the land roots of the lithosphere. Large-scale material movements in the asthenosphere, including upwelling of matter in the mid-ocean ridge, collisions of continents, and pre-land pull-ups of ocean subduction, are clearly reflected in the global

seismic tomography maps. The southeast coast of China is a special area of the material movement of the shallow mantle system, which may be caused by the subduction of the Izonaqi plate in the Cretaceous period, which stimulates the asthenosphere upsurge motion along coast zone of the East Asian continent, and then causes a series of dynamic effects such as magma intrusion and delamination of the lithosphere.

Keywords: continental dynamics; shallow mantle system; geophysical 3D images; mass horizontal motion; upwelling

Acknowledgements: This study is supported by National science foundation of China (No. 41574111)

First Author: YANG Wencai, Ph. D. on geophysics at McGill University in 1984. He is a professor of Zhejiang University, working on continental dynamics and applied geophysics; Email: yang007@zju.edu.cn

Manuscript received on: 2020-02-06; Accepted on: 2020-04-07; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.03.001

中国地质学会第一届科普奖揭晓

为了进一步加强地质学科学普及,鼓励会员参与地质科普,中国地质学会设立了科普奖。中国地质学会第一届科普奖近日揭晓,5位科学家获人物奖,5组作品获产品奖。该获奖名单是由各省级地质学会和中国地质学会各专业委员会推荐,经专家评选后确定,并于2020年4月21日~26日在中国地质学会网站公示。

中国地质学会第一届科普获——人物奖(按获奖者姓名汉语拼音字母序)							
姓名		工作单位		职称		推荐单位	
金利勇		吉林大学		研究馆员 吉村		林省地质学会	
唐立梅 自然资		源部第二海洋研究所		副研究员 浙江		T省地质学会	
王 莉	中国地质调查局地学文献中心			馆员 中国地质词		周查局地学文献中心	
吴跃东	安徽省地质调查院			正高级工程师 安谷		数省地质学会	
邢立达	中国地质大学(北京)			副教授	中国地	也质大学(北京)	
中国地质学会第一届科普奖——产品奖(按获奖新产品主要完成人姓名汉语拼音字母序)							
产品名称		完成单位		主要完成人		推荐单位	
地质灾害科学认知主动避		北京市地质研究所		曹颖、王晟宇、焦润成、马晓雪、南赟、闫驰、郭		北京地质学会	
险系列三维动画				学飞、赵丹凝、赵佳			
海洋地质虚拟现实科普系		青岛海洋地质研究所		苏国辉、刘京鹏、魏合龙、王诏、孙治雷、杨金		地质期刊专业委员会	
统 V2.0				玉、孙记红、张兆代、林文荣、张玉玺			
安徽池州九华山国家地质		中国地质大学(武汉)脚爬客(武 汉)信息技术有限公司		吴春明、孟耀、李鑫、韩非、李红梅		中国地质大学(武汉)	
公园科普系列丛书							
《龙门山断裂带地质灾		中国地质科学院探矿工艺研究所		谢忠胜、田尤、佘涛、黄海、杨顺、李金洋、韩新 强、孙金辉、赵重、陈欢		四川省地质学会	
害》科普动画							
可燃冰利率	华玄列产品			叶建良、秦绪文、杨胜雄、梁金强、盛 堰、陈惠		广州海洋地质调查局	
马 添动 竹 百 赤 2 引) 明		/ 川母住地灰舸迫四		玲、唐琳、刘鑫、陈晨、薛俊辉		/ 川時行地) 例 直向	

中国地质学会第一届科普获奖名单

DAI Guobiao: The first popular science award of Geological Society of China announced

参见:http://www.geosociety.org.cn/?category=bm90aWNl&catiegodry=OTYxOA==&year= (代国标 供稿 章雨旭 编辑)