Can the Law of Physics Be Unified?

地球内部物质的运动与动力

滕吉文^{①*}, 宋鹏汉^{①②}, 张雪梅^③, 刘有山^①, 乔勇虎^{①②}, 马学英^{①②}

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

② 中国科学院大学, 北京 100049;

③ 中国地震台网中心, 北京 100045

* 联系人, E-mail: jwting@mail.iggcas.ac.cn

2015-11-16 收稿, 2015-12-23 修回, 2016-01-04 接受, 2016-05-27 网络版发表

中国科学院地质与地球物理研究所自主研究项目(31531180)资助

摘要 地球物理学研究的主体内涵是地球内部物理学, 而地球内部物理学研究的核心则是地球内部结构、物质的运动和力源及其响应. 在研究和探索地球内部物质与能量交换的深层过程与力源机制的基础上提出: (1) 地球内部各圈层结构和物质组成是研究物质运动、介质属性、结构和深层过程的基础; (2) 大陆漂移、海底扩张和板块运动是地球内部岩石圈物质飘曳在软流圈上运动极为重要的地球科学事件, 大陆溢流玄武岩的喷发和地幔热柱的上升体现了水平力系与垂直力系并存和其耦合响应; (3) 强烈地震的发生、火山喷发、青藏高原的整体抬升、第二深度空间金属矿产资源、油气能源形成与聚集是地球内部物质与能量交换的产物; (4) 地球内部物质运动的驱动力源是其物质力学属性研究与探索的核心问题之一, 但有关一系列的假说却难以解释发生在地球上的诸多事件, 唯地幔对流说取得了较多的共识, 由于尚缺乏可靠的精确实测论据, 故乃为一假说; (5) 地球内部放射性元素蜕变和核-幔热动力边界层及其产生的热能可能是驱动地球内部物质运动最可能的能源. 地球内部是否可能还存在像天体运动研究中最近提出的“暗物质”和“暗能量”呢? 为此尚必须深化认识地球本体.

关键词 地球内部, 壳、幔结构, 物质与能量交换, 动力学响应, 力源机制

地球物理学研究的主体内涵是地球内部物理学, 是一门理论与应用并重的现代应用物理学. 由于它涉及学科甚广, 包括物理学、数学、信息科学、地质学等, 所以地球物理学乃是于20世纪中叶才蓬勃发展起来的一门多学科交叉的边缘科学.

地球是由多圈、层构成, 而其内部各圈层物质的物理属性和空间结构在纵向和横向都是不均匀的、各向异性的且其变化与势态均为非线性的. 基于地球内部物质是在地史期间多元力系和多期次作用下的一颗极为复杂的星体, 而且深部物质和能量不停地在进行着强烈的交换^[1~4]. 为此, 首先必须理解地球内部的空间结构和物质组成及状态, 此乃厘定地球

内部物质运动行为与轨迹和其运动的动力学机制的关键所在^[5].

关于地球内部物质运动与动力学问题在整个地球科学研究中确为热点^[6~10], 因为它在成山、成盆、成岩、成矿、成灾和对地球本体的深化认识中是核心^[11~14]. 当今在地球科学领域里, 很多分支学科多冠以“动力学”, 如地质构造动力学、地球化学动力学, 岩石动力学、沉积动力学、矿物动力学、油-气动力学、地震动力学、地壳动力学、地幔动力学、地核动力学、天文地球动力学、古地磁地球动力学等. 然而地球动力学是具有量化内涵的, 因为它必须涉及力或力系的作用, 即应当从定义出发厘定地球动力学

引用格式: 滕吉文, 宋鹏汉, 张雪梅, 等. 地球内部物质的运动与动力. 科学通报, 2016, 61: 1995–2019

Teng J W, Song P H, Zhang X M, et al. The driving force and movement of materials in the Earth's interior (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1995–2019, doi: 10.1360/N972015-01275

的内涵^[15-18]. 因为它是动力学和地球物理学两大科学之间的一门交叉学科.

基于上述, 本文将主要研讨, 地球内外圈、层结构和物质组成; 大陆漂移、海底扩张和板块构造; 地球内部物质运动的行为与轨迹和地球内部动力学4个问题, 以达试图回答地球内部物质运动与动力学响应的科学问题.

1 地球内部各圈、层结构和物质组成

地球属太阳系中八大行星之一, 沿轨道有序运动, 它从诞生至今已有46亿年了. 地球科学的最终目标是了解地球本体和其他行星从太阳系中诞生到目前状态的演化, 以便能对行星物理学、化学、地质学和生物学的作用过程建立起详细的、定量的概念性预测模式, 即要求建立行星地球的整体理论.

1.1 地球内部各圈层的结构

通过地震波场的观测, 可以反演求得地球内部各圈层的速度结构(图1), 即地壳、上地幔、过渡层、下地幔、D"层、外核和内核. 依据流变层则可分为岩石圈、软流圈、中间层、液态和固态.

由于高精度人工源深部地震探测理论、方法和技术的发展, 当今对岩石圈研究日趋精细, 它可分为沉积建造、结晶基底、上地壳、下地壳、壳-幔边界(Moho界面)、地幔盖层和软流圈顶部(图2). 在不同的构造单元地域各圈层的结构是各异的, 整个岩石圈呈成层结构, 地壳中存在低速层(LVZ), 而Moho界面较复杂, 即可为刚性界面, 速度梯度层和高、低速层相间

图1 地球内部各圈层P波和S波速度结构与物质组构分层示意图
Figure 1 Sketch map of velocity of P and S wave and the composition of the layered Earth's interior

图2 地球内部物质与能量交换的深层过程^[19]

Figure 2 Deep exchange process of the material and energy in the Earth interior

构成的壳-幔边界层. 可见, 地球内部由地壳到地核不论是速度结构、还是物质组成和运动轨迹及其动力学机制都是十分复杂的、各异的.

1.2 地球内部各圈层的物质组成

地球内部上地壳主要成分为绿片岩, 中地壳主要成分为角闪岩, 下地壳主要成分为麻粒岩^[20,21]. 上地幔上层(Moho面至410 km)的主要成分是橄榄岩, 410 km是橄榄石 $\alpha \rightarrow \beta$ 的相对快速变化的热相变面. 一个较小的520 km深处的不连续面相当于一个橄榄石 $\beta \rightarrow \gamma$ 的相对宽缓的发热相变面. 410~660 km的上地幔过渡层主要成分是尖晶石与榴辉岩, 其较高的速度梯度相当于榴辉岩到石榴子石的相对宽缓的热相变面, 也可能是钙质钙钛矿(perovskite)的出溶面. 660 km的不连续面相当于 γ 尖晶石到硅质钙钛矿与镁质矿物(magnesiowustite)特异的急剧转换面. 下地幔的主要成分是钙钛矿, 2900 km附近厚200~300 km的波速增加可能相当于钙钛矿结构的被破坏, 即D"层的物质成分向金属化方向转变. 地幔结构与均匀橄榄石成分的等容相变一致^[22]. 外核为由液态熔融金属铁(密度为10.7 g/cm³)产生磁场, 内核由固态铁(或铁、镍合金, 密度为13.5 g/cm³)组成.

基于地球物理学和地球化学对岩石圈中各圈层介质的物质组成研究表明: 上地壳主要为未变质的表壳沉积建造、绿片岩和伴随局部混合演化即花岗岩化的角闪岩相岩石组成, 下地壳为含长英质片麻岩和多种侵入体的麻粒岩相岩石组成^[23].

2 大陆漂移、海底扩张与板块构造

大陆漂移、海底扩张和板块构造是3个不同的独立主题,三者统一起来却说明岩石圈的形成、演化和运动过程,它们是20世纪中叶至今在地球科学发展中最为重要的研究领域,并被誉为“地学革命”。

(i) 大陆漂移. 依据地质构造的相似性、冰川分布、古地磁、地震活动及分布与震源机制、壳幔结构、重力场、大地热流分析等资料表明,大陆是岩石圈飘曳在软流圈顶部且不停顿地在运动^[8,11,24~28]. 基于各块体的几何形态与拼贴可以复原各陆块的原始状态(图3)。

(ii) 海底扩张. 海岭可能位于地幔对流圈的上升支,海沟位于对流圈的下降支(图4). 上升的地幔物质不断从海岭处溢出,并以每年数厘米的速度把两旁的地壳对称地推向远离中脊的两翼,形成新的大洋岩石圈,并被当时的磁场所磁化,形成正、负磁极年表^[29~32]. 海底扩张理论和海岭附近的地球物理异常场分布很相符. 海岭轴部发生地震,那里没有沉积,而且有火山;海岭处的热流较正常值大数倍,它们均表明地幔热物质在海岭附近上升。

海底扩张现象后来被进一步证实,主要因为它

图3 大西洋西侧、南美洲东侧和北美洲的大陆拼图^[8]

Figure 3 Puzzle of the west of Atlantic, the east of South America and North America

能够最恰当地解释海岭附近的磁异常场条带状展布特征. 磁异常场的展布时限等定量计算结果,可以在全球范围内互相验证与对比。

(iii) 板块构造. 在大陆漂移和海底扩张的基础上,并将其链接,故产生了板块构造学说^[33~41],是人类对固体地球外层构造运动的一种新认识,并形成了一个比较完整的全球构造理论。

板块之间的界带与构造活动、地震活动、且造山运动剧烈(图5),板块之间以及其与地球转动轴之间产生的相对运动,在海岭处则由于深部地幔物质沿大洋中脊处的裂口上涌,故促使板块两侧分裂产生了板块海底扩张,所以海岭是产生新岩石圈的地域,而海沟则是其消减的地区,板块与子板块之间沿水平向错动力的边界乃转换断层. 地震活动和震源机制恰当解释了海岭和转换断层的力学属性。

最早是将全球划分为六大板块^[34],随着科学与探查的进步相继提出了第二代模型^[43,35]、第三代模型^[44]、第四代模型^[33]。

3 地幔热柱

3.1 理念与现象

(i) 地幔柱与板块运动. 地幔柱是Morgan^[36]为解释热点成因而提出的概念. 热幔柱是地幔深处,乃至核-幔边界上产生的圆柱状上升的一股热物质流. 它携带着地幔物质和热能直至地幔上层,并在岩石圈和软流圈界域呈三维扩散流动,激起软流圈中物质的水平运动,从而可将地幔柱视为板块运动的驱动机制. 热点处的火山活动是地幔柱物质涌出地表的表征. 由于炽热的地幔物质上涌,而导致密度较高的物质盈余,形成正重力异常,故重力正异常值特高的地方,则往往是火山分布的地方. 热点大体上固定于地幔中,板块相对于热点的运动,即是相对于地幔固定部分的运动轨迹,亦为相对地理极或地球自转轴的绝对运动. Morgan^[37]用夏威夷-天皇海岭、莱恩-土阿莫土海岭和马绍尔海岭这三个热点运移的资料,计算了8000万年来太平洋板块相对于热点的运动. 所得结果与后来提出的板块绝对运动模型AM-1和AM-2求得的相对于热点系的运动大体相同。

(ii) D"层. 核-幔边界(CMB)乃下地幔与液态外核的分界面(D"层),是一个物理-化学界面. D"层的地震波速度梯度随着温度梯度的变化急剧变化,

图4 不同时期磁场磁极性分布和深部物质上涌与海底扩张^[8]

Figure 4 Magnetic polarity distribution, upwelling of deep material and sea-floor spreading

图5 全球地震震中分布(黑点)、构造划分、板块运移方向及速度(mm/a)分布图^[42]

Figure 5 Global earthquake's epicenter distribution (black dot), structural division, direction and velocity (mm/a) of plate movement^[42]

以热传导为主要的热传输机制,它是一个热动力边界层,其黏滞系数甚低,速度亦很低,有关物理参数见表1.

D"层是地球热演化和化学演化及地球外核与地幔之间相互作用的强烈变形地带,是产生热能的地域,即是地幔热柱的源地^[46].

3.2 地幔热点和热柱的极性特征

通常认为,热点特征^[39]为,地形相对高,火山喷发的拉斑玄武岩或碱性系列岩浆盖帽隆起,在某些热柱上表现为重力高,无震海岭或熄灭了的火山链,大地热流值高等.但随着研究的深入,对热点和地幔

热柱特征,如形态、深层过程等的描述更趋具体,地幔柱的头部也却越来越大.归纳起来,热点和地幔柱的一般特征^[38,47,48]有:(1)热点底下有一个狭窄(150~200 km宽)的中心热柱,它由温度异常高的上地幔物质组成;(2)上涌地幔流在板块下散开,形成一蘑菇状头状顶冠,其温度比正常温度高约100~200℃;(3)蘑菇状柱头的直径为1000~2000 km;(4)地幔热柱引起的岩石圈上隆幅度可达1000~2000 m.

在实验室中进行流体力学模型实验^[49]结果表明,起源于核幔边界的地幔热柱当其上升抵近地表处时,扩展成为一热物质的圆盘形(图6),其直径为150~200 km,厚度达100~200 km,这些数据与几个大陆溢流

表 1 CMB附近地核和地幔的物理参数^[45]

Table 1 Parameters of mantle and core around CMB

	半径 R (km)	密度 ρ (kg/m ³)	P波速度 V_p (km/s)	S波速度 V_s (km/s)	电导率 σ (Ω /m)	运动黏滞系数 γ (m ² /s)
下地幔	3480	5560	13.71	7.26	~10	~10 ¹⁹
外核	3480	9900	8.06	0	~3×10 ⁵	10 ² ~10 ⁻⁷

玄武岩区的大小相近,它源于650 km地方间断面的地幔热柱在地表的扩展直径可达660 km^[51]. 按此模型,柱头的温度依然可达1350~1400℃,而地幔热颈上升的热物质温度可达1550℃. 由地幔热柱物质的正浮力导致的地面抬升可达1000 m或更大.

3.3 超级地幔柱

地幔热柱是由地幔热物质构成的上升柱体. Fu-kao^[52]的P波层析成像显示,地幔柱有两个来源:一是D"层,另一是400 km深度的上地幔. 来源于D"层的地幔柱又有两种类型:一是超级地幔柱,其底面直径约为5000 km;另一为小地幔柱,其底面直径小于500 km. 实际上,要严格地界定超级地幔柱与一般地幔柱,或者地幔柱构造假说和热点-地幔柱假说中所提的地幔柱是很困难的.

(i) 南太平洋超级地幔热柱. 南太平洋超级地幔柱呈蘑菇状坐落在下地幔的D"层上,在2000 km深度处呈圆柱状,最小横向直径约为1500 km,并从这一深度向670 km界面展开成南北向延伸的椭圆形伞面. 在上地幔内,它又可分解成几个小地幔柱(图7). 太平洋是600~700 Ma时由于冈瓦纳古陆裂解产生的. 开裂点位于北美、西伯利亚和澳大利亚大陆所限定的洋脊-洋脊-洋脊(RRR)型三联点处.

(ii) 非洲超级地幔热柱. 非洲超级地幔柱是在

图 6 核-幔边界(CMB)与D"层的起伏与物理属性^[50]

Figure 6 Fluctuation and physical property of CMB and D" ^[50]

图 7 在实验室将热液注入充满彩色液槽底部形成的地幔热柱照片^[49]

Figure 7 Picture of the simulated hot mantle plume formed in the spherical flask by injecting hot colorful liquid in laboratory^[49]

200 Ma时突然出现的,它使非洲大陆被裂解为冈瓦纳大陆的一部分. 与这个超级地幔柱有关的几个起源于核-幔边界的地幔柱相继出现在地表,并形成一一个地幔热柱链,称为中央泛大陆超级地幔热柱链. 地幔热柱链似乎与沿泛大陆西缘发育的科迪勒拉造山带平行,表明地幔热柱来源于450 Ma以来消减板片的聚集地. 地幔热柱的形态很复杂,它从D"层上升并缩颈,待升达地幔的中部后逐渐向670 km深度扩展. 在670 km深度处,地幔热柱分裂成若干较小的二级地幔热柱,如非洲和南太平洋超级地幔热柱及其分裂的小地幔热柱^[53,54]. 它们在板块底部后再次扩展,并沿着板块的断裂或薄弱地带上升,地幔热柱并再次分裂为三级地幔热柱(图8). 现在地球上大约有50多个热点,且可用这些三级地幔热柱来解释.

4 地球内部物质运动的行为与资源和灾害

地质科学是一门古老的学科,而地球物理学则

图 8 地球内部分层图结构与地幔柱形成模型图^[54]

Figure 8 Model of layered structure in Earth interior and the formation of mantle plume

是20世纪中叶前后才蓬勃发展起来的一门多学科交叉的边缘学科。这两大学科的前者是研究地表,即浅表层过程和派生现象的分析与推断,即以描述为主体的定性研究;而后者却是研究与探索地下未知,即通过观测、数据采集和反演、刻划地球内部的介质属性和圈层结构,即要对地球本体给出定量或半定量的解释,以求得逼近的物理响应。

4.1 地震和火山形成的深层过程

环太平洋地带、地中海-喜马拉雅-南亚地带是世界上最大的强烈地震活动带，也是火山活动带，同时

也是构造活动和金属矿产资源的聚集地带。那么它们三者为何能叠置在这样的特殊地域上,发生、发展和产出呢?这是因为地震的发生、火山的喷发、矿产资源的形成都是地球内部物质在温度和压力环境下,即在力系作用下重新分异、调整和深部物质与能量交换的产物。

地震的孕育、发生和发展,人类在地球上耕耘、繁衍、生息,社会在进步,科学在发展,而地球内部确是地震和火山灾害的策源地.在全球范围内,强烈地震主要发生在环太平洋地震带和地中海-喜马拉雅-南亚地震带,而在我国大陆内部则主要受控于兴都

库什-南北构造带-贝加尔湖-兴都库什这一“三角形”地震活动带的制约。我国是世界上的一个多地震的国家。20世纪以来,全球因地震灾害死亡人数是160万,历史记载死亡超过20万人的地震有6次,其中中国有4次(中国地震局局长陈建民,2006年7月6日)。在世界上,古代的七大奇迹无一不是毁于地震灾害,如埃及的金字塔、巴比伦的空中花园、亚历山大塔、阿特米斯庙(月亮女神)、土耳其卡里亚王陵、阿波罗青铜巨像、奥林匹克宙斯雕像。此外,地震造成的次生灾害,如海啸等亦会导致重大人员伤亡和经济损失。

发生在地壳内部的浅源强烈地震,因为它震源浅、破坏性极强,如2008年汶川 M_s 8.0地震的震源深度为 15 ± 5 km,1920年海源大地震震源深度为17 km,1966年邢台6.8级地震震源深度为8 km,1976年唐山7.8级大地震震源深度为23 km,1999年台湾7.6级地震震源深度为8 km,2004年苏门答腊9.0级大地震震源深度为28 km,2011年日本东北本州海城9.0级大地震震源深度为20 km,2015年尼泊尔8.1级大地震震源深度为20 km等。特别是,1960年5月22日在南美洲智利发生的9.5级地震,这是20世纪全球发生的震级最大的地震,震中烈度可达Ⅺ。在南纬 $36^\circ\sim 48^\circ$ 之间,沿海岸线南北长1400 km的狭长地带,发生了上百次强烈地震,其中大于8级的3次,大于7级的10次。这次地震还导致附近火山喷发。地震引起的海啸席卷了整个太平洋地区。又如2004年12月26日,印度尼西亚苏门答腊岛北部的海域发生了8.9级的大地震,引发了印度洋大海啸,席卷了南亚和东南亚及印度洋周边岛国。

震源深处的介质在应力作用下开始破裂,即微破裂,而应力在不断积累,并促使介质破裂而形成“破裂链”。这时破裂深处的质点以地震波动为载体向外辐射,待应力集中达近临界状态时,破裂穿越束缚的地层冲出地表,而发生强烈地震,并导致震中人员的重大伤亡和财产的重大损失。为此必须首先查明强烈地震孕育、发生和发展的深部介质和构造环境与其深层动力过程,以为强烈地震和大地震为什么在这里孕育和发生提供震源区介质的物理属性和变异的壳、幔结构^[1,55~59]。

由于地震的发生机制十分复杂,又均发生在地下几十千米的深处,故至今地震预测仍是一大难题。尽管1975年2月4日辽宁海城7.3级地震、美国西海岸帕克菲尔德6级左右的地震等进行了预报,取得了成

效,但仍然不是物理的预报,即非必然的“王国”。因此,地震预报尚有待于深化认识和探索,以达逼近于彼岸。

4.2 地球内部物质与能量的交换与火山喷发

火山也是一种来自壳幔深处物质与能量强烈交换的产物,它与地震的发生和发展有着内在联系,且与世界上的地震活动带相符。由于环太平洋周边地带集中了世界上大部分的活火山(60%),并被称为地球的“火山圈”(http://www.volcano.si.edu/word/find_regions.html),即火山的喷发亦与地震的发生密切相关,如1960年智利康赛普西翁大地震发生时,不仅引发了数以千计的山崩,驱使6座死火山复活,且又引发了3座新火山的喷发,火山灰和火山气体形成的云雾升至6 km的高空,遮天蔽日。

一次强烈火山的喷发不仅会造成万顷良田被毁,多少房屋化为灰烬,多少人无家可归,同时还会大大影响社会的安定和经济的发展,如冰岛火山喷发,其火山灰升高数千米,欧盟国家竟有10万次航班被取消,1000万人滞留,造成欧盟国家的航空公司直接经济损失达25亿欧元。

一些火山喷发甚至改变人类的文明。公元前16世纪地中海一次火山喷发毁灭了地中海岛上的米诺文明。公元79年意大利维苏威(Vesuvius)火山喷发埋葬了古罗马的庞贝等两个城市。1980年美国的圣海伦斯(St. Halens)火山喷发将山脉的高度消掉了300 m,夹带着大小岩石碎片的炙热的碎屑岩流动速度超过了台风,达到了700 km/h,这种自然破坏力令人惊心动魄。1991年菲律宾Pinatubo火山喷发,导致200多人死亡和10亿美元的损失,摧毁了美国在菲律宾的克拉克空军基地,削弱了美国在东南亚的军事影响力^[60]。

当今世界上约有1500座火山,海底也有很多火山,尚难以查明。在这些火山中,最著名的要数意大利的维苏威火山(最近一次喷发为1944年),美国西部的圣海伦斯火山(1980年喷发),菲律宾马尼拉附近的Pinatubo火山(1991年喷发)等^[61]。我国火山近期几乎没有喷发,实际上火山还是不少的,如东部的长白山火山(1902年喷发),五大连池火山(1972年喷发)、腾冲火山(1969年喷发?)、琼北火山(1883年喷发?)等。

显而易见,地球内部乃是地震和火山自然灾害的策源地。

5 第二深度空间的矿产资源

古人找矿是通过人的肉眼与地表,即以光的联系来寻找矿产资源.我国解放后对金属矿产资源的勘查和开发主体上为在第一深度空间(0~500 m),石油和天然气则集中在3500 m以内.半个世纪过去了,浅表层的矿产资源已绝大多数被发现和开采,而且很多老矿山已步入“老年”,正处于减产或关闭状态,为此对外的依存度在逐年上升.当今我国正处在快速工业化和经济腾飞之际,需要大量的矿产资源消费.为此必须强化向第二深度空间“挺进”,金属矿产为500~2000 m,油、气为5000~10000 m,以达在深处探查和发现大型、超大型金属矿产资源和油、气能源.

5.1 第二深度空间金属矿产资源(500~2000 m)

地球深部的有利成矿空间为5~10 km,这一空间乃是地壳内部物质与能量交换和动力作用的交错地域,也是多种成矿要素发生突变和耦合的转换地带,适宜于成矿元素的聚集以及大量岩浆岩矿床和热液型矿床的产生^[62].前苏联在北极附近的科拉半岛打了一口超深科学钻井,深达12.26 km.通过岩芯观察和测试发现在深度0~12 km之间存在着30余种矿化现象,具有18种矿物形态,有8种元素(铁、镍、铜、铅、锌、银、钼)的化合物,在1.5~1.8 km区间的“矿产层”中发现了早先尚不知道的含镍超基性岩带,在9.5~11 km深处发现了含大量银的自然金^[63],幔源金刚石可能最初形成于岩石圈底部.这便说明,在地壳中相当大的深度空间内,即具有形成金属矿床的有利空间和成矿条件,故第二深度空间对发现大型和超大型金属矿产资源有着巨大的潜力.

我国在第二深度空间发现了一系列矿床^[63~72],如红透山火山喷发、沉积变质型铜矿勘探开发深度抵1100 m时见富矿,且还在向深处延伸,并见到厚层大矿体;铜陵砂卡岩型铜矿,该矿区冬瓜山特大型铜矿的产出深度在800~1000 m以下;江西银山铜、铅、锌、金、银矿在800 m深度左右为金和铜,12个深度>1000 m的钻井,在其中3个孔深1500 m的钻井中均发现富有Cu-Pu-Zn的矿床;福建紫金山金铜矿床距地表的深度达1900~2000 m左右;新疆阿尔泰阿舍勒铜、金、锌特富矿床深达1506 m左右,可可塔勒铅锌矿在深达1200 m处矿体近于垂直;云南会泽麒麟厂铅锌矿的富矿体产出已达1300 m深;湖北大冶铁矿在1100

m以下发现了巨型的铁、铜、金共生富集矿藏;山东济宁在1500 m深度以下发现大型铁矿;辽宁本溪桥头钻井钻抵2200 m时尚未打穿铁矿层;最近中国地质局地质科学院在长江中下游深700~1200 m处发现了大型铁矿床,1700 m处发现了铀矿床,等等.此外,湖南、湖北、安徽、云南、山西、江西、山东、广西、辽宁、河北等地在第二空间均发现了具有一定工业品位和规模的金属矿床.

当今国外金属矿产资源开采超过1000 m深度的已有80多座,金矿床的勘探深度平均为1600 m.国外在已有矿床区(带)的深部已不断找到和发现了一系列大型、超大型矿床和大、中型金属矿集区^[67,73,74].如:目前世界上开采最深的矿床是南非的席兰德(Western Deep Level)金矿,其勘查与开采深度已达4800 m,不久将会达到5000 m,巴金布顿金矿开采深度为3800 m;加拿大萨德伯里(Sudbury)铜镍矿床,围绕萨德伯里杂岩体有30多个铜镍矿床,其中有多个大、中型矿床,现已开采到2000 m.目前探测最深的矿体在维克多(Victoria),已达2430 m,鹰桥公司(Falconbridge)和因科(Inco)公司最深金属矿的钻井已达到3050 m,2004年在西麦克雷迪(McCreedy)和莱尼氏克·福特沃尔(Levack Footwall)矿区在1180 m深处发现了特富的矿床;澳大利亚奥林匹克坝(Olympic Dam)Cu-Au-U金属矿体在深处发现隐伏的直立矿床.矿床产于中元古代热液蚀变岩中,以碱性花岗岩为主,角砾岩岩筒-岩墙杂岩体内,长度>5 km,延伸达1000 m;国外有很多金属矿床垂向延伸均很深,平均可达1600 m左右;其中如印度科拉提金矿床的深度已达3200 m;美国和加拿大的加绿岩型金矿的开采深度为1600~2600 m.

5.2 第二深度空间的油、气能源

世界各地石油和天然气勘探与开发多限定在3500 m这一门限内,随着理论和科学技术的不断进步,现早已突破了这一门限.我国的四川省、新疆维吾尔自治区,美国的墨西哥湾等地在6000 m的深度处均发现了一系列大型和超大型油气田.这是因为在各沉积盆地中的沉积建造均比较厚,我国柴达木盆地沉积厚度达15~20 km^[75],十分重要的是在盆地中的陆相沉积层下面,还存在着海相沉积岩层,而我国古生代的沉积层是不变质的或由变质很轻微的岩相组成,即为双相沉积.这就为突破5000 m向第二深

度空间(5000~10000 m)“挺进”开辟了广阔前景。

我国早期找油、气主要集中在中生代沉积层中;在西北为侏罗纪,在东部为白垩纪,即被中、新生界的基底所控。当今由于古生代沉积层中,如寒武纪、奥陶纪的沉积层中,均为海相,且存在着丰富的油和气,故必须要追溯到古生代的变质岩基底,即结晶基底。这就表明在油、气勘查中必须重视中、新生界基底和古生界的结晶基底,即为双层基底所控。当今在世界范围内,在第二深度空间又发现了大量的油、气藏,而且还在继续发现。

(i) 国外深层油气藏的勘探与发现。在这一方面俄罗斯科学家做了大量的工作,且最早将深层油、气藏勘查提上议程^[76~81],并在深层油、气形成与聚集的理念和实践中取得了重要成效。

国外在第二深度空间油、气的勘探方面已取得的重要成效^[76,80,82~84]。原苏联有24个含油、气沉积盆地,沉积建造厚度超过6000 m的有18个,在其中的4个含油、气盆地中发现了埋藏深度大于6000 m的工业油、气藏。

在全球范围内,深部油、气藏普遍存在,资源潜力亦十分巨大。据已发表资料统计^[85~88],目前已在4500~8103 m深度内开发了1000多个油气田,石油原始可开采量仅相当于全球石油储量的7%,而天然气储量则高为25%。埃及、意大利、墨西哥、法国和美国在这一深度空间对天然气探明储量约占这些国家天然气总储量的47%。在4500~6668 m深度内,阿根廷、意大利、利比亚、墨西哥、美国、特立尼达和多巴哥所发现的石油占这些国家现今可开采石油储量的31%以上。在墨西哥和美国,深部具工业价值油、气田的发现率高达50%~71%,其中有25个是巨型油气田,美国西内盆地阿纳达科凹陷米尔斯兰奇气田在7663~8083 m埋深的下奥陶统碳酸盐岩内发现了世界上最深的气藏,储量达 $365 \times 10^8 \text{ m}^3$,单井日产气 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在美国墨西哥湾密西西比三角洲的列克-华盛顿湖油田6540 m深处发现了世界上最深的油藏。当今世界上最深的油气勘探井是美国在俄克拉马州打的Bertha Rogess-1号科探井,钻井深达9583.2 m,获得了多层油、气生成和储集层属性方面的重要信息。

(ii) 我国深层油气藏的勘探与开发。近年来中国石油天然气股份有限公司(中石油)和中国石油化工股份有限公司(中石化)加大了油、气田的勘探和开采深度,在第二深度空间,陆续发现了一系列油气藏。

(1) 塔里木油气藏。1998年初在塔里木盆地塔中构造带上完钻的塔参1井为亚洲第一深井,完钻井深为7200 m,于4000 m钻入奥陶系风化壳,并在5059~6930 m钻遇12段油、气显示层段。国内最深的工业油田为塔里木盆地的东河塘油田,其油层埋深5700~5800 m。目前在塔里木盆地已测试的156个油、气层井段中,有58个油、气层的底界均超过了5000 m。勘探层位从上奥陶统鹰山组增加到中、下奥陶统的一间房组 and 良里塔格组^[89~92],而中石化在塔里木盆地打的一口8040 m深钻井,不仅发现深部奥陶到三叠纪存在厚达200 m左右的白云岩,而且还发现了液态烃。

(2) 我国东部油气藏盆地。松辽盆地是中国地温梯度最高的含油气盆地,目前主要在5000 m以内进行钻探。2009年2月10日完钻的古龙1井,完钻井深6400 m,是目前大庆油田最深的一口深层天然气探井,井底温度约260℃,也是目前中国储层温度最高的钻井。

渤海海域具有良好的资源潜力,渤中凹陷乃最大的富生烃凹陷,面积达8660 km²,沉积地层以古近系沙河街组、东营组和新近系馆陶组和明下段组为主。沙河街组烃源岩有机质类型好,烃源岩最大埋藏深度可达9000 m,处于高-过成熟阶段,东三段有机质类型型II,平均埋深为6000 m,处于成熟-高成熟阶段^[93],南堡凹陷油、气藏为次生,储油田,一直到深6000 m左右还存在油藏。

(iii) 我国中部四川盆地油气藏。由于第二深度空间地震勘探资料的信噪比和分辨率大幅度提升,继2003年普光气田发现后,自2006年在四川省广元、南充和巴中相邻地带(即元坝地带),发现该区存在飞仙关-长关组礁滩储层异常体,钻井深度达7330~7467.6 m,发现高产气源,即发现了元坝大气田。这是四川盆地继普光大气田之后^[94]发现的第二个海相千亿方级深层大气田。最近又发现了安岳震旦系-寒武系特大气田。预计在古隆起及斜坡带、蜀南凹陷带、川东高陡级构造带,有利的勘探目标面积可达 $9.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,埋藏深度要达5000~8000 m^[95]。

在这里,仅举出了中外有关第二深度空间油、气能源勘探与开发的几个典型例子,他们给出了一个共同的理念,即在5000~10000 m深处不仅存在着油气储集层,可以发现大型与超大型油气田,而且表明第二深度空间的油、气藏存在着巨大潜力。

6 青藏高原壳、幔结构和深层动力过程与高原的隆升

6.1 壳、幔结构与动力学模型

(i) 青藏高原壳、幔结构与地球物理边界场响应. 青藏高原地壳巨厚、岩石圈相对较薄, 且其分布是不均匀的和各向异性的^[59,96~101]. 地壳厚度在55~75 km范围内变化, 地壳内部存在低速层, 软流圈深度为 100 ± 10 km; 上地幔顶部的速度为 $V_p(8.05\pm 0.05$ km/s). 由南向北, 即恒河平原-喜马拉雅造山带-拉萨-那曲-柴达木盆地, 其地壳厚度分布为40, 55, 70, 65, 52 km, 且呈不对称状展布.

青藏高原周边为高重力梯度带所围, 加德满都重力场均衡异常为+120 mGal, 即重力未达均衡, 向北一直到雅鲁藏布江处均衡重力异常才趋近于零, 即达到均衡. 岩石圈地幔流在高原腹地为向上发散, 而周边则为收敛地带^[102,103].

(ii) 高原抬升的基本模型. 青藏高原为多期次碰撞、挤压作用下多块体拼合的产物, 其形成与演化的过程十分复杂. 由于未能有计划的在该地域统一部署目标一致的地球物理场(包括重、磁、电、震、热场)、地质构造和地球化学的综合研究, 故至今模型众多, 归纳起来应为俯冲、短缩和挤压3种模型.

(1) 俯冲模型. 该模型支持者认为, 印度洋板块向北运动可达2000~2500 km, 而其中1/3为由印度洋板块俯冲效应所致, 其中1/2则转化为喜马拉雅造山带的逆冲与推覆变形, 故以 $15^\circ\sim 20^\circ$ 的角度向北插入青藏高原之下达200~300 km^[104]. 这一模型认为, 它为印度洋板块向北的俯冲作用, 但却未能与地壳缩短增厚和高原隆升统一起来分析.

(2) 短缩增厚模型. 在印度洋板块与欧亚板块碰撞、挤压水平力系作用下、地壳缩短与地壳垂向增厚^[105~107]. 这一模型基本上接近共识.

(3) 挤出模型. 在南北向强劲挤压下, 导致高原内部不均匀物质产生近东西向拉张, 并形成一系列大型的走滑断裂, 构成了高原壳、幔物质侧向运移的通道与边界. 它有利于对我国东部走滑断裂系和南中国海裂开的解释^[108,109].

6.2 地球内部壳、幔物质运动与高原隆升的“耦合链”

当今人们不能分隔地或孤立地去认识和建立模

型, 而是首先必须厘定其形成与隆升的边界条件. 从深层过程, 即必须从地球内部物质运动的样式、轨迹和其动力学响应出发, 对诸多因素进行集成, 并基于物理理念去理解它, 而对派生现象的描述和推断则必须占有一定的因果关系, 并须慎之.

三个模型实质上是一个统一的过程, 即耦合链. 青藏高原的地壳缩短、增厚与整体隆升的1/2体力源应为在印度洋板块与欧亚板块的强力碰撞、挤压作用, 即在近南北向力系和地下热动力共同作用下, 高原地壳缩短、增厚, 并在这一过程中驱使高原整体抬升. 在这样的东西向拉张力系作用和动力环境中, 高原腹地壳、幔物质要突破高原周边地带的阻隔, 且主体向东, 转而向东南运移^[96,97,99,100,102,110~115]. 显然它们不是分隔的模型, 而是一个统一的“耦合链”.

6.3 垂直运动与水平运动

关于地壳运动是以水平运动为主呢? 还是以垂直运动为主呢? 这在地球科学界自20世纪以来一直存在着争论. 20世纪60年代以后, 基于海洋地球物理的测量结果, 证明了海底扩张和大陆漂移现象的存在, 持水平运动论者占据了主流, 基于近年来一系列的新数据、新现象和新的事实却说明, 在地球内部物质运动中垂直运动仍占有重要的地位^[116]. 当然, 当今所论及的垂直运动已不是原来的概念, 而是赋予了一系列的新内涵. 因为它与水平运动是相辅相成的“孪生”.

(i) 垂直向运动. 自20世纪80年代前后, 利用天然地震观测数据可以反演求得地球内部, 特别是壳、幔介质的三维速度结构. 通过对不同深度的层析切片可以把深部热物质, 如岩浆体形态、位置和特征大体得勾绘出来, 使人们可以详细地研究岩浆侵入, 推断地壳介质的应变和应力变化及构造运动.

地球物理位场观测与发现. 大陆和海域呈现出大面积的大陆和海洋溢流玄武岩(flood basalt). 这些玄武岩却与大洋中脊处上涌的岩浆岩不同, 因为其示踪元素和原子同位素的组成各异, 其物源为来自岩石圈底部, 乃上涌到地面喷发, 且喷发期短暂, 然后则是长时间的平静. 翁通瓜圭(Otong Tava)高原的规模可达200 km². 南极北部的科尔盖伦(Kerguelen)高原、北大西洋沃尔林(Voring)高原, 其面积亦均在数百万平方千米(7×10^6 km²). 以翁通瓜圭高原为例^[117], 其玄武岩的喷发量达12~15 km³/a, 西伯利亚

玄武岩省可能是最大规模的大陆溢流玄武岩区,其覆盖面积达 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,体积为 $2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6 \text{ km}^3$ ^[49].这样大规模的火山喷发对全球的海平面,气候变暖等乃至地震灾害均会产生一定程度的影响.

地表所见来自壳、幔及核-幔边界(D'')的物质:由于地球内部物质与能量不停地交换,故在地表可以观测到一系列的深源导致的派生现象,来自幔源的柯石英便是证据之一,当今在全球多处已发现柯石英,我国在大别山的榴辉岩中也发现了柯石英.依据柯石英生成的压力和温度条件,推断须在上地幔深度为120~150 km处产生^[118].

地幔热柱,特别是南太平洋和非洲巨大的超级地幔热柱,主要来自上地幔和核-幔边界的D''层,即热动力边界层.该层厚度可达200~400 km^[54,23],起伏变化强烈,故在核-幔边界(D''层)热物质运移的同时,应存在着垂直运动和水平运动.

山体的抬升:在印度洋板块和欧亚板块,两陆-陆板块强劲作用下,喜马拉雅造山带却未达均衡,即没有“山根”,山体仍在上升,故构造和地震十分活跃.我国台湾由于菲律宾板块向西俯冲到台湾岛之下,而中央山脉却以1~2 mm/a的速率上升,这一由东向西仰冲的板体覆盖在台湾岛上,而台湾岛则必会逐渐下沉.又如青藏高原的整体抬升和南海的下沉,这一高一低乃东亚中、新生代以来最为壮观的地球科学事件.

以上各类事件均雄辩地表征着地球内部物质的垂向运动和基于水平运动所导致的各类事件是相辅相成的.

(ii) 水平向运动. 人们在地球的内部及表层均可见到诸多的物质呈水平向运动的事件.

大陆内部大规模的走滑断层和走滑断层系.它们既是促使壳、幔物质运移的边界,又可构成其运移的限定通道.我国境内的阿尔金山、昆仑山、鲜水河和龙门山断裂带;青藏高原东北缘的复杂大型走滑断裂系;东部贯穿南北的郯庐大断裂带;美国西海岸的圣安德列斯大断裂,乃至大洋中脊被错动的转换断裂等.它们的水平滑动速率每年可达数毫米至数厘米,累积水平位移量可达数百千米以上.这是由于壳、幔内部物质在力系作用下的结果.

大陆漂移、海底扩张和板块构造的问世,大洋中脊被水平错断和转换断层的呈现,使人们对壳、幔物质漂曳在软流圈上运动有了新的认识,并理解了水

平运动存在的边界条件.

地磁场的场源为地球的液态外核,且存在着长期变化.这不仅在壳、幔介质中如此,而在核、幔边界,即D''层处亦然,D''层地震波速变小,且不论在纵向和横向都是不均匀的,且起伏变化强烈,故说明在地球内部核-幔边界处也存在着水平向物质运动.地磁场的长期变化要比磁层和电离层干扰造成的短暂变化强得多,并为研究核-幔边界相互作用和液核动力学提供了重要的论据^[46,119~121],而全球磁场西向运移的平均速率为 $0.2^\circ/\text{a}$ ^[122].有证据表明,大约500万年前,大陆是分散的块体,而是后来才逐渐聚集成为Pangea超级大陆(位于非洲与大西洋之间),于100万年前则又分离为现今的大陆和海洋的格局.

(iii) 力系作用耦合与地球内部物质运动. 板块运动的本质是深部物质重新分异、调整和能量的转化过程.板块构造的提出,在地球科学领域确可称之为具有“革命性”的学说,它对成山、成盆、成岩、成矿、成灾和深化认识地球本体均起到了促进与引领作用.然而它在力源体系方面并未能给出一个科学的定量理念,这是由于板块理论是基于块体以水平向运动为基石,故大大限制了其对地球内部物质与能量交换和深层动力过程的理解.近年来,特别是地幔热柱的提出,大面积溢流玄武岩的呈现,陆内造山和盆、山耦合等确是对板块构造的一个挑战.实际上板块运动也不能单纯的以水平向运动来理解.由图9可见,在整个板块构造体系中,大洋中脊处地幔热物质的上升表现为热物质的垂向上涌,然后岩石圈物质向两侧呈对称状运移(由大西洋中脊两侧磁条带展布可证实),此乃水平向运动所致,并在海沟处俯冲、消减.这便充分表明,板块运动本身就是一个垂向与水平运动的耦合体.为此在思考地球内部物质运动与力源作用问题时,必须将水平运动和垂直运动有机地结合起来,以厘定地球内部物质运动的行为与轨迹,探索其驱动的力源机制,以达为人类营造一个良好的生活与生存环境,并促进可持续发展.

7 地球内部物质运动的驱动力源

地球动力学涉及到多学科的交叉,从广义上说,是研究固体地球整体及其内部各圈层的物质运动,物质与能量的动力过程 and 与其相关的地球物理边界场响应;从狭义上说,它是研究板块运移的轨迹和其动力学机制.

图9 地球内部物质运动与板块运移路线示意图^[123]

Figure 9 Sketch map of the movement of material in the Earth interior and plate motion in the surface^[123]

地球内部物质在动力作用下重新分异、调整,深部和浅部物质与能量进行着强烈的交换和运动,并导致成山、成盆、成岩、成矿和地震与火山等灾害的形成.地球动力学受到地球科学界的高度重视,并相继产生了诸多假说,如地球的收缩说、膨胀说、脉动说、自转说、涌流说、地幔对流说、地壳均衡说等等,而问题是何为其力源?因为力源确是驱动地球内部物质运动的核心所在.

7.1 地球内部物质运动的动力学假说应满足于一定的边界条件

由于科学的进步和人们对事物发展认识的不断升华,各种地球动力学假说当必会受到质疑或挑战.这是因为各种地球动力学假说均为建立在一定的科学现象或事实的基础上,而每一种假说也只是考虑了一定的事实和科学推断,而对诸多的科学现象与事实却未能全面分析与涉及.任何一种合理的、科学的驱使地球内部物质运动的动力学假说则要满足一定的边界条件:(1)应对全球构造运动的行为、轨迹与变异规律及变形特征和演化过程,给出在力系作用下的物理解释;(2)驱动地球内部物质运动力的能量要足够强势,且有方向性和力学属性,并对空间结构与变形,即对力系作用和方式及响应作出解答;(3)必须符合地球物理学的基本原理、定义和地球内部物质运动的物理、化学过程,且可通过物理和数学模拟给予检验;(4)必须能够厘定地球内部物质运动的行为与轨迹和其作用的深层动力过程及力源机制;(5)力源属于驱动地球内部物质运动的主体而非浅表层作用所致,且必须有质量、强度和方向;(6)可建立起数学表达和符合物理理念的地球动力学模型,并可

检验或进行物理-数学模拟.

7.2 地球内部物质运动与过程的动力假说

地球本体是一个非常错综复杂的巨型动力系统,因为它必须经受多要素的交叉制约,故难以用某种单一的动力参数来描述如此复杂的深层作用过程,而必须考虑多元要素制约与影响下的主体力学响应.这就是说必须要在多要素约束下建立起边界条件,提取初始模型.

人类研究地球内部物质运动及其动力来源由来已久,曾经提出过各种各样的假说,早期的地球动力学假说,主要是依据大陆的构造特征,地球的整体运动设想与推断提出的^[41].例如地球膨胀说、地球收缩说、地球膨胀与收缩交替进行的地球脉动说及潮汐说等.

(i) 地球收缩说. 地球收缩说是假定在地球形成的初期是一个炽热的天体,在其发展早期,分异为一个铁质的地核和一个基本上是硅质的地幔^[124].地幔从液态铁核处的基底开始向外凝固,在传导过程中逐渐变冷.由地心到地表700 km以下的空间内,即从地球开始凝固以来还没有来得及发生任何显著的冷却或体积变化.在700~70 km的深度范围内,由传导所引起的冷却正在发生,致使这一层收缩,并因围绕内核受到拉张而处于内部拉伸状态.在近地表处,由于岩石早已冷却,靠太阳辐射维持热平衡,故不会有太大的温度变化.在浅于70 km的范围内,处于一种内部压缩状态,而70 km深处为无应变面.

显见,该假说并没有给出地球收缩所产生作用的力及量级,这一收缩假说基本上是一种固定论,它无法解释大陆漂移、海底扩张和板块运动,更无法解

释地幔热柱和海洋板块的俯冲、消减乃至火山喷发和强烈地震的发生。它还认为全球的应力场是相同的,应变面以上无压缩,应变面以下是拉伸,这与地球内部物质运动的行为与轨迹相矛盾,因为地球内部物质的分布不是一个均匀体,且是各向异性的,其变化又为非线性的。

(ii) 地球膨胀说。1602年培根(F. Bacon)提出这一假说,并用以理解造山运动和大洋的形成。它假定地球是由若干层组成的,最上部为地壳、其下面为膨胀层,这种猜想难以解释地球膨胀引起的物理量的变化,如巨大速度变化和引起地球膨胀的可能机制(热效应),以及地球内部物质的化学变化、相变和万有引力常数的缓慢变化等^[125]。

(iii) 地球脉动说。基于地球物质的膨胀和收缩交替而发生的地球脉动说^[126~128]。它可解释构造运动的周期性,但却不能解释地壳构造的方向性,地球内部物质的多元组成、结构变异和大型地质构造运动及灾害事件的发生与发展,特别是难以解释大规模水平力系作用下的板块构造与运移。

(iv) 地球自转说。李四光先生1926年提出地球自转动力学理论,其基本论点是:巨型构造体系都具有一定的方向性,即纬向构造体系、经向构造体系和扭转构造体系,而各种扭转构造又可视为东西南北向构造的变异种。1929年他提出沿着跟不上重圈转动步伐地区的西缘,应找到径向挤压带,而在能跟上重圈速度增加地区的西侧,应找到南北向张裂带,并认为此类运动主要是地球自转的离心力^[129~131]。Doglioni^[132]和Meyerhoff等人^[133,134]对这一假说给予了新的解释。应当看到地球自旋假说有一定的合理内核,但对陆内造山、成盆及其耦合响应,地震与火山灾害的形成等一系列巨型构造体系,特别是其深层动力过程和物质与能量的交换尚难以给出理念和解释。因为地球自转假说所涉及的仅为地球的浅表层过程,而在地球动力学研究与探索中,其深层动力过程是主要的。

(v) 涌流构造说。Meyerhoff等人^[133,134]于1992和1996年提出,是一种反板块构造的假说。他们认为大多数地壳构造包括板块构造不能解释的一些构造现象均可用软流圈涌流来解释,其机制是软流圈涌动驱动机制即地球收缩引起的岩石圈塌陷,而强烈岩浆的涌动对构造运动起决定作用,并对板块构造给予了批判,但却未能给出涌流形成的原因。这一假说特别强调软流圈的作用,但却从根本上没有涉及

力源驱动的机制问题,因为软流圈效应不可能制约地球内部的物质在力系作用下的运动行为与轨迹,更无法理解壳、幔边界(D")这一热动力边界层物质的运动和动力学响应。

7.3 地球内部物质运动的动力学响应

地球动力学是地球物理学领域具有挑战性的研究课题。它是以物理、数学为基础的一门量化学科,而非定性推断的描述性学科。尽管当今已有不少地球动力学模型,但由于初始条件和边界条件的不唯一性制约,故仍备受争议。

我国地球动力学研究的重要方向和任务还必须加强基础性研究,即必须将理念、观测、实验和物理-数值模拟结合起来以取得逼近的认识。这是因为,在地球深部物质运动作用下,在地面有着多种形态和类型各异的构造样式展布,如成山、成盆、成岩、成矿、成灾等,故必须强化对地球本体的认识。因此对地球内部物质与能量的交换和其深层过程及动力学响应乃是当今地球动力学研究,以致整个地球物理学研究中对深层过程和力源机制研究的核心。

(i) 深部物质分异、调整和运移的物理属性。地球动力学是研究地球内部各圈层的物质组成、岩石和矿物的力学性质及变形行为^[135,136]。地球各圈层的构造变形,首先必须精细刻划壳、幔介质的精细结构,深刻理解多矿物复合岩石在各种物理条件(例如温度、围压、差应力、应变速率、应变方式等)下和化学环境(主要是氧逸度和水含量)中的物理变化行为与轨迹。显然要回答地球动力学中一系列的重要问题,无不需要我们对地壳和地幔的介质和结构及其物理属性和运动行为有着较深刻的理解,即必须:(1)厘定和给出比较切合实际的深部物质运移的动力学响应和力源及模型,则必须加强复杂介质地球模型应用中初始和边界条件的限定,即在多要素约束下给出科学的和合理的初始条件与边界条件,并提取地球动力学的初始模型;(2)充分利用当代发展和成熟的高、新科学技术,并通过高温、高压实验研究岩石的变形,通过精细研究上、中、下地壳和上地幔盖层中主要岩石的变形机理,物理-力学行为,以达正确认识不同地域、不同地层中介质的物理属性。不难理解,影响地壳和地幔岩石圈介质变形的因素很多;包括温度、围压、应变和应变率、水含量、熔体含量、颗粒径、变形机制(位错蠕变、晶内扩散蠕变、超塑

性等)、造岩矿物含量、氧逸度等,且均尚难以界定和量化。

(ii) 地球内部物质运动的地幔对流说. 地幔对流说是自大陆漂移、海底扩张和板块构造提出后为解释岩石圈板块拖曳在软流圈顶部移动力源的运动样式理解,即由大洋中脊地幔物质沿通道上涌,在海沟附近俯冲、消减而形成—“视传送带”路径。

地幔对流是指地幔物质在地球内部在动力驱动下呈水平向和垂直向的“环形”运动,最简单的对流假说是指,一个牛顿黏性水平层状液体,当在其下面加热时,并待竖直方向的温度大于临界值时,便会产生对流圈. 虽然地幔物质不可能完全具备牛顿液体的性质,但数值分析结果却证明,它仍能够满足对流圈的基本条件. 当然当温度梯度很小时,液体的运动是稳定的,当温度梯度超过一定数值后才能产生对流(图10(a))^[137,138]. 另一种观点认为,基于地幔介质中的温度分布不均便可能产生对流,如岛弧处停滞的板片是“冷的”,其密度较大,俯冲产生的应力可驱动整个板块沿水平方向运动,而地幔的回流方向却与岩石圈物质的运动方向相反^[139,140].

固体的地幔是否可能运动,对这一根本性的物理问题,对流必须遵循物理学的基本原则,即动量守恒、能量守恒和质量守恒,若地幔物质可以流动则必须满足3个基本条件:第一,组构系统的物质必须是软弱层,地热则需达到足以使地幔物质可以“流动”的程度;第二,系统内部的温度梯度必须至少略大于组成系统物质的绝热自压温度梯度;第三,需要有足够的能量以维持物质流动。

地表和地壳即地幔内部的物质运移和转换效应很可能与地幔、甚至核、幔热动力边界层(D”)密切相关,而板下全地幔热物质的运移和上涌乃是岩石圈板块运动的动力学响应所致. 为此,壳、幔边界,上、下地幔和核、幔边界在地球科学的研究中占有重要地位(图10(c)). 因为它们是促使地球内部物质与能量交换的一个热动力系统,而核、幔边界和D”层乃是热动力边界层,又是一个复杂的非线性系统(图10). 由于高精度人工源地震深部探测的发展,数字地震观测系统的建立,3D地震层析成像技术的进步,使得人们对于地球内部逐渐有了一个较全面的轮廓性的新认识;地球内部物质的复杂运动与驱动机制,特别是地壳和地幔的横向不均匀性和各向异性的新认识;地球内部物质的复杂运动与驱动机制,特别是地壳和

图10 地幔过渡带地幔对流的可能响应图。(a) 地温梯度与对流流示意图;(b) 全地幔单层对流模型;(c) 地幔双层对流模型

Figure 10 Model of three kinds of mantle convection in transition zone. (a) Sketch map of geothermal gradient and convection system; (b) single layered whole-mantle convection model; (c) double layered mantle convection model

地幔的横向不均匀性和各向异性,即由地幔精细结构和横向不均匀性所呈现的地幔物质运移与其热动力学响应. 为此人们可以利用这种深层过程和动力学响应去追溯、探求全球构造体系,特别是地幔构造演化的历史,从而深化理解人类所居住的这个星球的演化过程。

近20多年来出现了不少的地幔结构和热动力学模型^[136,141],板片俯冲可达300 km^[142,143],600 km,以致于1300 km或更深^[144]. 应当承认它必当是一个非常复杂的系统,绝非理想的简单过程所能包含,但它却记录了地幔底辟和深部物质上升的地史. 应当看到,核-幔边界、D”层以上的地幔对流乃是驱动板块运动,以致造成区域构造活动、地震和火山发生以及

金属矿产资源和油、气能源聚集的重要源地^[145],为此要深化研究和探索其形成的地球物理边界场响应、运动学行为与轨迹和深层动力学过程。

地幔对流的物理、数学模拟和实验分析. 基于地幔对流至今仍是一个偏于认识论与理解的产物,则应有尽可能的创造条件,在取得精确数据的前提下提供判据. (1) 地幔对流的物理模拟. 物理模拟有着十分重要的作用^[146],如垂直构造运动与水平构造运动的关系和物质运移的轨迹;上地幔中玄武岩岩浆的形成、运移、萃取与聚集;圈层耦合和解耦的深层动力学过程;成山、成盆、成岩、成矿和成灾的深层动力学响应;若以660 km间断面作为化学界面却能够阻止对流;地幔对流的行为、轨迹及其逼近模型的建立^[147]等. (2) 地幔对流的数值模拟. 在给定边界条件下的数学模拟往往当必带有一定的先验性,但却在不断深化^[148~153]. 显然,地幔物质的混合,即地幔均匀化是地幔对流研究中不可回避的问题^[154~156]. 早期研究认为:依照地球化学组分推测大洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)源于660 km间断面的上、下地幔^[157]. 显然必须深入研究板块在地幔对流机制的驱动下,多尺度的地幔物质混合,3D球域中现代地幔对流条件下的地幔混合效率. (3) 地幔对流的实际观测和检验. 由地震层析成像得出,俯冲板片介质可突破660 km间断面挤入深部地幔处,从而使得地幔对流结构成为超级的全球地幔对流. 也有研究认为,即使是分层地幔对流,若当下地幔黏滞性大于上地幔达100倍时,全地幔对流仍然能使下地幔保持地幔的原始状态^[106]. 这便表明,地幔混合效应是地幔黏滞性的横向变化或与原始地幔中物质的高黏滞性密切相关. 当今的问题是通过实验和计算求得的较为准确的黏滞系数,确是一大难题,大大限制了对地球介质属性的理解和厘定其逼近的模型^[158,159]. (4) 当今尚缺乏给出高精度观测和精细刻划对流层运动轨迹的定量证据. 基于上述,自板块构造学说问世后,国际上在地幔对流研究的基点上来理解板块运

动,洋壳深部物质上涌和在陆缘地域的俯冲、消减,即以地幔对流模型来解释其运动的动力学响应^[27,160],故地幔动力学研究一直是地球科学家们所关注的重要方向之一. 尽管地幔对流可以解释很多地球科学中的现象,但不等于就是本质,就是终极. 当今的问题是一切地学模型都是建立在一个假设模型的基础之上^[161],尚十分缺乏观测数据的量化证实和检验.

尽管大量的地球物理观测、地震层析成像、地球化学等新的观测数据和大规模计算机数值模拟不断涌现出不同的模型或认识^[162~165],但解并不唯一,所给定的模型中往往包括了许多未知数,也只能是定性的解释或推断,所以在地幔对流研究中,不能孤立地去仅研究地幔,也不能孤立地研究地幔热动力系统中单一子系统的行为,而要在深化研究地幔对流的过程中必须注意系统的概念^[166~168],在考虑各子系统的固有特征时,尚必须顾及各子系统之间的耦合响应^[169~172]. 在考虑统一驱动力响应作用下,而却决不可忽视不同驱动力源的共同作用. 显然,物理、数学模拟的前提必须要有要素的约束,方能提取一个可能、且比较合理的初始模型,以求得近似解. 因而确切地说:系统的地球物理深部探测和地面高精度的观测,高分辨率数据的采集确是第一位的. 这就必须进行适宜观测系统的设计和布局,以完善观测体系的联合观测、数据采集和综合分析取得逼近的认识.

当今地幔对流在揭示板块运动和地幔热物质沿大洋中脊上涌,在陆-海界域海沟处俯冲、消减及在整体板块运移中起到了重要作用,亦为多人所共识,同时不论是全地幔单层对流,还是地幔分层对流(表2,图10),它均应为一种驱动力,则主要取决于瑞雷数 R 的量级:

$$R = \alpha \beta d^4 / KV. \quad (1)$$

应当说现在讨论所基于的对流模型都尚十分简单,而人们对其机理及相关约束的参量和条件尚理解不足,尽管通过模拟实验、数值计算及感性图像可以给予它一定的权重,但尚未能给出高精度的观测,

表2 地温梯度为 $\beta=0.1^\circ\text{C}/\text{km}$, $g=10\text{ m/s}^2$, 计算瑞雷数 R 的参数表^[139]

Table 2 Parameters used to compute Rayleigh Number when the geothermal gradient $\beta=0.1^\circ\text{C}/\text{km}$, $g=10\text{ m/s}^2$

模型		热膨胀 $\alpha(\text{K}^{-1})$	层厚度 $d(\text{m})$	热扩散 $\kappa(\text{m}^2/\text{s})$	运动黏滯度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$	瑞雷数 R
分层地幔对流	上地幔	2.5×10^{-5}	3×10^5	1.1×10^{-6}	3×10^{16}	6×10^3
	下地幔	1.5×10^{-5}	2×10^6	1.3×10^{-6}	2×10^{17}	9×10^5
全地幔对流		1.9×10^{-5}	2.7×10^6	1.3×10^{-6}	2×10^{17}	4×10^6

地幔介质样本在温、压相应条件下的精确测试和反演及精细刻划其行为与轨迹,因为现有的地震层析成像是不能给出定量的理念或结论. 尽管地幔对流的物理背景可以证明地幔物质的流动是可能的,但仍有许多细节尚待深入探索,特别是实际高精度的地震观测和高分辨率数据的精细结构刻划和物理属性厘定,同时对岩石圈和地幔之间的过渡,如670 km附近区域的热结构, D"层作为热动力边界层的热属性和热结构以及地幔温度分布的横向不均匀性,非线性及各向异性. 应给予重视的是在南极发现了来自150 km深处, 年龄为30亿年的钻石^[173], 若真是这样确实令人振奋, 但又令人疑惑不解^[174]. 因为在一个热地幔中尚存在着寿命如此长的大陆根, 显然是对地幔动力学的一个新的挑战. 所以地幔对流乃为一种“猜想”.

(iii) 重力均衡作用. 如果地形起伏仅仅是多余或亏损的物质附加在一个大致均匀的地球表面, 则经过正常校正、地形校正和布格校正之后, 重力异常应无系统偏差. 但事实并非如此, 山区重力异常往往是负的, 且山脉每升高1 km, 而异常值却大约下降近千个g.u. ($1 \text{ g.u.} = 10^{-6} \text{ m/s}^2$). 这表明, 在增加了多余质量的高山之下, 有某种质量亏损, 因为对地形的重力影响会产生一种补偿作用. 类似的现象在重力垂向偏差的观测中亦见到. 1854年, 英国人普拉特(J. H. Pratt)在喜马拉雅山附近, 观测到重力垂线偏差为5", 但根据地形的计算, 应为28"; 这说明, 地下物质的变化起了某种补偿作用, 部分地抵消了高山的影响. 类似的影响在重力偏差观测中也多有发现^[175-179].

显然在当岩石圈不均匀的地带, 会产生深部物质与能量的垂向变换和运动, 但却难以解释大陆漂移、海底扩张和板块运动.

由于地球内部壳、幔介质的厚度变化, 物质分布的不均匀性, 即密度不一可产生应力场, 并导致地表重力场的变化.

7.4 地球内部放射性物质的衰变, 核-幔热动力边界层可能提供大量的热能

正是由于强大的热能, 故可驱动板块拖曳在软流圈上面运动和地幔热柱的形成、并向上运移和形成地幔对流. 因为以上讨论的动力作用问题, 而均系动力学响应, 而非力源本体.

(i) 地球内部的放射性元素衰变产生的热能. 地球内部的²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th和⁴⁰K等放射元素蚀变,

其总产热率为 $2 \times 10^{13} \text{ W}$, 核幔分异时转化的热量使地球平均温度上升了2000 K. 现今海洋板块平均热流为 101 mW/m^2 , 大陆平均地热流量为 65 mW/m^2 , 地表平均热流为 87 mW/m^2 , 即大陆总热流失率 $1.3 \times 10^{13} \text{ W}$, 海洋总热流失率为 $3.1 \times 10^{13} \text{ W}$, 总热流失率为 $4.4 \times 10^{13} \text{ W}$ ^[180]. 基于目前地球的产热率仅为散热率的一半左右, 故地球在逐渐冷却. 地幔物质的比热为 1250 J/(kg K) , 地核物质比热为 700 J/(kg K) , 地球总体热容量为 $6.4 \times 10^{27} \text{ J/K}$, 按目前热损失计, 每一千万年地球温度将下降 1°C ^[181].

对于地球内部的热结构可分为两部分: 即岩石圈作为一个边界层, 其热传递的主要机制是热传导; 其下部地幔介质的热传递主要机制为热对流, 而对流使得地球内部横向温度起伏变化十分复杂, 故可讨论地球内部不同深度处的平均温度, 研究其热状态(表3)^[141].

(ii) 地球内部温度与深度的关系. 地球内部的温度分布尽管给出的是平均温度值, 但其变化却呈线性, 不同时期的资料来源中亦存在差异. 由表3可见, 对流液体内部平均温度随着深度可近似的沿一绝热曲线增加. 地幔中的压力随深度增大而增加, 故足以使压缩岩层的温度随深度有明显的绝热增加. 绝热自压温度应当是地幔平均温度的下限, 而地幔物质的熔点可以认为是地幔温度的上限. 这就是说, 不论是地幔对流本身在理论研究和数值模拟中均必须重视地球内部的热结构和热动力过程及其相互作用, 因为地幔物质的运动乃是地球内部绝热压缩温度差导致的. 为此可以认为, 地球内部的热能应是物质运动的根本力源.

(iii) 地球内部生热量的估计. (1) 平均热流体.

表3 对地幔计算得到的温度(T)、熔融温度(T_m)、液态温度(T_L)、固态温度(T_s)、Debye温度(θ)和Gruneisen比(γ)

Table 3 Temperature of normal(T), melting(T_m), liquid(T_L), solid(T_s), Debye(θ), Gruneisen(γ)

深度(km)	T	T_m	T_L	T_s	θ	γ
600	2230	2300	2300	2300	900	0.74
1100	2400	2500	3500	3000	1100	1.00
1500	2600	2700	4200	3800	1200	0.97
1900	2700	2800	5500	4500	1250	0.95
2200	2800	2950	6000	4900	1300	0.94
2900	3200	3200	6500	5000	1400	0.91

当今尚难取得精确、可靠的热流值,且在地球上很多地方是不能取得热流资料的,就是已有的热流值精度亦难厘定,因为在所有2592个 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 的大地系统中68%的区内没有观测点,每一热流值中9%仅有一个观测点,仅有1%超过20个观测点.依据这些残缺的热流值取得大陆地区为 65 mW/m^2 ,海洋地区为 101 mW/m^2 ,全球平均值为 87 mW/m^2 ^[180].此外地表热流随陆地岩石年龄减小反而增大,且在海域和陆域变化规律亦异^[182]. (2) 地球内部的热量估计.通过放射性同位素,即通过球粒陨石分布估计发生热量为 $1.1\times 10^{31}\text{ J}$,又估计其所释放的热量可使地球升温约 1645 K ^[13].除放射性元素外,还有两个物理过程可为地球升温做出贡献^[183],即地球形成过程中重力能的释放,约为 $1.18\times 10^{31}\text{ J}$ (误差为20%左右),地球旋转转化的热能,约为 $1.5\times 10^{31}\text{ J}$,总计以上估计可使地球平均升温 3345 K .这一温度已超过了地幔物质的熔点温度,可是现代地震观测表明,地幔物质却呈固态. (3) 问题是上述这些热能并未完全存入地球内部,那么又哪里去了?放射性元素在地球内部分布必然是不均匀的,那又么怎样分布?由于核幔边界,即D"层是一个热动力边界层,它即是板块俯冲、消减后形成地幔冷柱的场所,同时又是地幔热柱产生的源地,且在热动力作用下驱使地幔物质上涌,那么核幔边界D"层的强势热能又是怎样产生的?地球内部是否也存在着类似天体物理学研究中,即近期提出的“暗物质”和“暗能量”呢?

显然关于地球内部物质运动行为与轨迹和其深层动力过程与力源及其机理等问题尚需理解、认识和深化研究与探索.

8 结语

关于地球内部物质的运动、力系作用和力源及机制乃是当今地球物理学的核心所在,故必须给予研究、探索并逐步求得逼近的解答,但这确是一个世界难题.因为人们可以提出很多个为什么?但这却是对地球物理学乃至整个地球科学的发展是机遇,同时又是一个难度极大的挑战.

(1) 大陆漂移、海底扩张和板块构造的问世为水平力系作用提出了广阔的铺垫,而大陆溢流玄武岩

的溢出,地幔热柱的呈现则迫使人们在认识水平运动的同时,必须同步考虑垂直运动,即地球内部物质运动的双向力系作用和制约.

(2) 地球内部强烈地震的孕育、发生和发展,第二深度空间金属矿产资源和油、气能源的形成与聚集,青藏高原的整体抬升等充分体现了在力源作用下深部物质与能量的交换,纵向与横向,深部与浅部的相互作用和水平力系与垂直力系的耦合效应,物质运动的行为与轨迹和其深层动力过程.

(3) 关于地球内部物质运动的力系作用尚为一难题,尽管假说甚多,但却尚难以解译诸多的地球物理事件.当今地幔对流确已为多人所共识,但确仍是一个定性的概念.因为至今尽管从物理学的角度出发是可行的,宏观的地震层析成像可以给出有关的定性的或框架结构的解释及推断,但尚十分缺乏高精度的地球物理探测与对流轨迹的精细刻画,多要素约束下的物理与数学模拟并给出逼近的量化答案,所以它乃为一“猜想”.

(4) 本文讨论了早期与近期有关驱使地球内部物质运动的动力学问题,确切的说它们均为地球动力学响应,而非力源本体.只有热能则是地球内部物质运动的最可能的力源.

(5) 驱使地球内部物质运动的动力源除了热能和由其转化产生的动力学响应外还有什么力源可以起到驱动地球内部物质运动的效应?在分析了星际空间各大行星沿自己的轨道有序的运行时,而近年来却提出了“暗物质”与“暗能量”的问题.所以地球内部是否也存在,或存在着类似的“暗物质”和“暗能量”呢?应给予思考.

(6) 深化对地球本体的认识,创造地球科学的未来.有关地球内部物质运动的行为与轨迹和动力学响应与力源确是地球物理学与大陆动力学领域的重大核心科学问题,人们均尚在不断研究、探索,远未终结.因此尚需一代代人们的刻苦奋进!在超前思维引导下去发现,以创造未来.因为它对地球科学的发展、创造和为人类营造一个想好的生活与生存空间极为重要.为此必须在研究、探索地球内部物质与能量交换的基点上,深化认识地球本体,创造地球科学的未来.

参考文献

- 1 Teng J W. The exchange of substance and energy, different sphere coupling and deep dynamical process within the Earth (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2001, 8: 1–8 [滕吉文. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害. 地学前缘, 2001, 8: 1–8]
- 2 Teng J W. Dynamic process of substance and energy exchanges in depths of the Earth and formation of mineral resources (in Chinese). *Geotect Metall*, 2003, 27: 3–21 [滕吉文. 地球深部物质和能量交换的动力过程与矿产资源的形成. 大地构造与成矿学, 2003, 27: 3–21]
- 3 Teng J W. Introduction to Solid Geophysics (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003 [滕吉文. 固体地球物理学概论. 北京: 地震出版社, 2003]
- 4 Teng J W. Some important scientific problems and ponders in lithospheric physics research of China at the present time (in Chinese). *Progr Geophys*, 2006, 21: 1033–1042 [滕吉文. 当今中国岩石圈物理学研究中的几个重要问题与思考. 地球物理学进展, 2006, 21: 1033–1042]
- 5 Teng J W, Pi J L, Yang H, et al. The ponder for study the intension and locus of continental dynamics in China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 851–862 [滕吉文, 皮娇龙, 杨辉, 等. 中国大陆动力学研究内涵与轨迹的思考. 地球物理学报, 2012, 55: 851–862]
- 6 Bercovici D. *Mantle Dynamics*. Oxford: Elsevier LTD, 2009
- 7 Condie K C. Archean geotherms and supracrustal assemblages. *Tectonophysics*, 1984, 105: 29–41
- 8 Kearey P, Vine F J. *Global Tectonics*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Blackwell, 1990. 751
- 9 McWilliams J C. *Fundamentals of Geophysical Fluid Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006
- 10 Peter O. *Core Dynamics*. Oxford: Elsevier, 2009
- 11 Wegener A. *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. 4th ed. Brunswick, Germany: Friedr. Vieweg und Sohn, 1929
- 12 Bai W M. *Geodynamics* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003 [白武明. 地球动力学. 北京: 地震出版社, 2003]
- 13 Fu R S. *Geodynamics* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2001 [傅容珊. 地球动力学. 北京: 高等教育出版社, 2001]
- 14 Hou G T. *Geodynamics of Bohai Bay Basin* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2014 [侯贵廷. 渤海湾盆地地球动力学. 北京: 科学出版社, 2014]
- 15 Teng J W. The core scientific problems and development direction for the contemporary geophysical research (in Chinese). *Progr Geophys*, 2008, 23: 637–640 [滕吉文. 当代地球物理学研究的核心科学问题和发展导向. 地球物理学进展, 2008, 23: 637–640]
- 16 Teng J W, Bai W M, Zhang Z J, et al. Development direction and ponders of the continental dynamics in China (in Chinese). *Progr Geophys*, 2009, 24: 1913–1936 [滕吉文, 白武明, 张中杰, 等. 中国大陆动力学研究导向和思考. 地球物理学进展, 2009, 24: 1913–1936]
- 17 Teng J W, Yang H, Zhang X M. Development direction and task of the geodynamical research in China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2010, 26: 3159–3176 [滕吉文, 杨辉, 张雪梅. 中国地球动力学研究的方向和任务. 岩石学报, 2010, 26: 3159–3176]
- 18 Ye S H. *Astro-geodynamics* (in Chinese). Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 2000 [叶淑华. 天文地球动力学. 济南: 山东科学技术出版社, 2000]
- 19 Senshu H, Maruyama S, Rino S, et al. Role of tonalite-trochjemetite-granite (TTG) crust subduction on the mechanism of supercontinent breakup. *Gondwana Res*, 2009, 15: 433–442
- 20 Fountain D M, Salisbury M H. Exposed cross-sections through the continental crust: Implications for crustal structure, petrology, and evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1981, 56: 263–277
- 21 Liu R X. Review of petroectonics in mid-crust of north China (in Chinese). In: Ma Z J, ed. *China Earthquake Study*. Beijing: Seismological Press, 1992 [刘若新. 华北中地壳某些岩石—构造构造特征综述. 见: 马宗晋, 主编. 大陆多地震研究. 北京: 地震出版社, 1992]
- 22 Helffrich G R, Wood B J. 410 km discontinuity sharpness and the form of the olivine α - β phase diagram: Resolution of apparent seismic contradictions. *Geophys J Int*, 1996, 126: F7–F12
- 23 Teng J W, Zhang Z J, Bai W M. *Lithosphere physics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004 [滕吉文, 张中杰, 白武明. 岩石圈物理学. 北京: 科学出版社, 2004]
- 24 Blackett P M S. A negative experiment relating to magnetism and the Earth's rotation. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 1952, 245: 309–370
- 25 Bullard E, Smith A G. The fit of the continents around the Atlantic. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 1965, 258: 41–51
- 26 Runcorn S K. Palaeomagnetic comparisons between Europe and North America. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 1965, 258: 1–11

-
- 27 Fu C Y. Continental Drift, Sea-floor Spreading and Plate Motion (in Chinese). Beijing: Science Press, 1972 [傅承义. 大陆漂移、海底扩张和板块构造. 北京: 科学出版社, 1972]
- 28 Yin Z X. Review of plate tectonics (in Chinese). Geoscience, 1973 [尹赞勋. 板块构造述评. 地质科学, 1973]
- 29 Davidson J P, Davis P M. Exploring Earth: An Introduction to Physical Geology. London: Prentice Hall, 1997
- 30 Dietz R S. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, 1961, 190: 854–857
- 31 Hess H H. History of Ocean Basins, in *Petrologic Studies*. Boulder, CO: Geol Soc Am, 1962, 4: 599–620
- 32 Vine F J. Spreading of the ocean floor: New evidence. *Science*, 1966, 154: 1405–1415
- 33 DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 2191–2194
- 34 Le Pichon X. Sea-floor spreading and continental drift. *J Geophys Res*, 1968, 73: 3661–3697
- 35 Minster J, Jordan T, Molnar P, et al. Numerical modelling of instantaneous plate tectonics. *Geophys J Int*, 1974, 36: 541–576
- 36 Morgan W J. Deep mantle convection plumes and plate motions. *AAPG Bull*, 1972, 56: 203–213
- 37 Morgan W J. Plate motions and deep mantle convection. *Geol Soc Amer Mem*, 1972, 132: 7–22
- 38 Wilson J T. Evidence from islands on the spreading of ocean floors. *Nature*, 1963, 197: 536–538
- 39 Wilson J T. A possible origin of the Hawaiian Islands. *Can J Phys*, 1963, 41: 863–870
- 40 Wilson J T. A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, 1965, 207: 343–347
- 41 Ma Z J. Tectonics and Dynamics of Earth (in Chinese). Guangzhou: Guangdong Technology Press, 2003 [马宗晋. 地球构造与动力学. 广州: 广东科技出版社, 2003]
- 42 Wen L X. Challenge of China Seismology in Earthquake Disaster Reduction (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011 [温联星. 我国地震减灾中地震学面临的巨大挑战. 北京: 科学出版社, 2011]
- 43 Chase C G. The N plate problem of plate tectonics. *Geophys J Int*, 1972, 29: 117–122
- 44 Chase C G. Plate kinematics: The Americas, East Africa, and the rest of the world. *Earth Planet Sci Lett*, 1978, 37: 355–368
- 45 Fu R S. Earth's geoid anomalies mantle convection and stress field under lithosphere (in Chinese). *J Univ Sci Tech Chin*, 1990, 2: 184–190 [傅容珊. 岩石层底部切向应力场及地球大地水准面异常. 中国科学技术大学学报, 1990, 2: 184–190]
- 46 Lay T, Ahrens T J, Olson P, et al. Studies of the Earth's deep interior: Goals and trends. *Phys Today*, 1990, 43: 44–52
- 47 Burke K C, Wilson J T. Hot spots on the Earth's surface. *Sci Am*, 1976, 235: 2
- 48 White R, McKenzie D. Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts. *J Geophys Res-Solid Earth*, 1989, 94: 7685–7729
- 49 Campbell I, Griffiths R. The changing nature of mantle hotspots through time: Implications for the chemical evolution of the mantle. *J Geol*, 1992, 497–523
- 50 Hirose K. Postperovskite phase transition and its geophysical implications. *Rev Geophys*, 2006, 44, doi: 10.1029/2005RG000186
- 51 Griffiths R W, Campbell I H. Stirring and structure in mantle starting plumes. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 99: 66–78
- 52 Fukao Y, Maruyama S, Obayashi M, et al. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography. *J Geol Soc Jpn*, 1994, 100: 4–23
- 53 Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 205: 295–308
- 54 Gillian R F. Plates vs Plumes: A Geological Controversy. New York, NY: John Wiley & Sons, 2011
- 55 Teng J W. Ponder and research on the genesis and occurrence of strong earthquakes and the prediction of their place, time and intensity (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2010, 53: 1749–1766 [滕吉文. 强烈地震孕育与发生的地点、时间及强度预测的思考与探讨. 地球物理学报, 2010, 53: 1749–1766]
- 56 Teng J W, Liu C, Han L G, et al. The Dynamical Mechanism for Medium Rapture and Motion of Deep Matler on Wenchuan-Yingxiu Ms8.0 Earthquake, 2008 (in Chinese). *J Jilin Univ: Earth Sci Ed*, 2009, 39: 559–583 [滕吉文, 刘财, 韩立国, 等. 汶川-映秀 Ms8.0 地震的介质破裂与深部物质运移的动力机制. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39: 559–583]
- 57 Teng J W, Pi J L, Yang H, et al. Wenchuan-Yingxiu Ms8.0 earthquake seismogenic faults and deep dynamic response (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2014, 57: 392–403 [滕吉文, 皮娇龙, 杨辉, 等. 汶川-映秀 Ms8.0 地震的发震断裂带和形成的深层动力学响应. 地球物理学报, 2014, 57: 392–403]
- 58 Teng J W, Yang H, Zhang H S, et al. Wenchuan-Yingxiu Ms8.0 earthquake, fine velocity structures of the lithosphere, and dynamical mechanism (in Chinese). *Quat Sci*, 2010, 30: 637–651 [滕吉文, 杨辉, 张洪双, 等. 汶川-映秀 8.0 级大地震的发生与岩石圈精细速度结构和动力机制. 第四纪研究, 2010, 30: 637–651]
- 59 Teng J W, Zhang Z J, Zhang B M, et al. Environmental change and the uplift of Tibetan Plateau (in Chinese). *Earth Sci Front*, 1997, Z1: 251–258 [滕吉文, 张中杰, 张秉铭, 等. 青藏高原的隆升与环境变化. 地学前缘, 1997, Z1: 251–258]
- 60 Chen Y. Natural Disasters (in Chinese). Beijing: Beijing Normal University Press, 2008 [陈颙. 自然灾害. 北京: 北京师范大学出版社, 2008]

- 61 Hong H J, Yu Y, Zheng X Z, et al. Global volcano distribution: Pattern and variation (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2003, S1: 11–16 [洪汉净, 于泳, 郑秀珍, 等. 全球火山活动分布特征. 地学前缘, 2003, S1: 11–16]
- 62 Pei R F, Qiu X P, Yin B C, et al. The explosive anomaly of ore-forming process and super-accumulation of metals (in Chinese). *Miner Deposit*, 1999, 4: 333–340 [裴荣富, 邱小平, 尹冰川, 等. 成矿作用爆发异常及巨量金属堆积. 矿床地质, 1999, 4: 333–340]
- 63 Yakovlev, Kazanskiy, Ding W L. Mineralization comparison of Kola peninsula ultra-deep drilling profile and the surface (in Chinese). *World Geol*, 1999, 36–46 [亚科夫列夫 IO H, 卡赞斯基 B H, 丁万烈. 科拉半岛超深钻井剖面与地表的矿化对比. 世界地质, 1999, 36–46]
- 64 Deng J F. Characteristics of the Geophysical Fields, Deep Geology and Mineralizing Processes in China (in Chinese). Beijing: Geology Publishing House, 2008 [邓晋福. 中国地球物理场特征及深部地质与成矿. 北京: 地质出版社, 2008]
- 65 Guo Z L, Kang J C, Zhang X L, et al. Analysis on the Deep Exploration Potential at Keketale Pb-Zn Deposit, Altay (in Chinese). In: *The Eighth Session of the National Deposit*, 2006 [郭正林, 康吉昌, 张秀林, 等. 阿尔泰可可塔勒铅锌矿床深部找矿潜力分析. 见: 第八届全国矿床会议, 2006]
- 66 Huang J B, Ni P, Wu S Q, et al. Characteristic of fluid inclusions in Shandong Linglong gold deposits and metallogenic model discussion (in Chinese). In: *The 14th National Conference on Inclusions and Geological Fluid on International Research and Application of Organic Inclusion Short-term Training*, 2004 [黄建宝, 倪培, 吴树青, 等. 山东玲珑金矿流体包裹体特征及成矿模式讨论. 见: 《国际有机裹体研究及其应用》短训班第十四届全国包裹体及地质流体学术研讨会论文集, 2004]
- 67 Qiu R Z, Deng J F, Li T D, et al. Lithospheric discontinuity and continental metallogenesis (in Chinese). *Miner Deposit*, 2004, S1: 32–40 [邱瑞照, 邓晋福, 李廷栋, 等. 岩石圈不连续与大陆成矿作用. 矿床地质, 2004, S1: 32–40]
- 68 Shi J B, Xie Y L, Xu J H, et al. The application of the integrated ore prognosis method to deep prospecting of the Daye iron mine (in Chinese). *Miner Deposit*, 2006, 443–446 [石教波, 谢玉玲, 徐九华, 等. 综合找矿方法在大冶铁矿深部勘查中的应用. 矿床地质, 2006, 443–446]
- 69 Wang Q S, Teng J W, An Y L, et al. Restriction role of geophysical fields and deep structures in mineralization of sanjiang minerogenetic zone (in Chinese). *Miner Deposit*, 2004, S1: 32–40 [王谦身, 滕吉文, 安玉林, 等. 三江成矿带的地球物理场与深部结构及其对成矿作用的制约. 矿床地质, 2004, S1: 32–40]
- 70 Xu Y, Wang D H, Chen Y C, et al. Titanium mineralization of the ultrahigh-pressure metamorphic rock: Based on the Chinese continental scientific drilling 5158 m main hole (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2008, 82: 612–624 [徐珏, 王登红, 陈毓川, 等. 中国大陆科学钻 5158 m 主孔超高压变质岩中的钛矿化. 地质学报, 2008, 82: 612–624]
- 71 Zhang Y H, Yang F T, Yang T J, et al. The train of thought for continuous resource exploration of the Hongtoushan type Cu-Zn deposit in Qingyuan, Liaoning (in Chinese). *Miner Deposit*, 2006, S1: 451–454 [张永红, 杨福田, 杨铁军, 等. 辽宁清原红透山式铜、锌矿床接替资源勘查思路及效果. 矿床地质, 2006, S1: 451–454]
- 72 China Nonferrous Metals Industry Corporation. Yinshan Cu-Pb-Zn-Au-Ag Deposit in Jiangxi Province (in Chinese). Beijing: Geology Publishing House, 1996 [中国有色金属工业总公司. 江西银山铜铅锌金银矿床. 北京: 地质出版社, 1996]
- 73 Nekrasov E M. The near-surface deposits and hypabyssal deposits related to volcanic structure with spatial relationships (in Chinese). *Metal Ore Deposit Geol Explor Trans*, 1980 [涅克拉索夫 E M. 与火山构造有空间关系的近地表矿床和浅成矿床. 金属矿床地质与勘查译丛, 1980]
- 74 Xiao Q H, Shi J F, Liu S C. The main trends of development of mineral resources research abroad (in Chinese). *Land Res Inf*, 2003, 12: 1–4 [肖庆辉, 施俊法, 刘树臣. 国外矿产资源研究的主要发展趋势. 国土资源情报, 2003, 12: 1–4]
- 75 Teng J W, Kan R J, Liu D H, et al. Head wave and reflected wave in the bedrock of east Qaidam basin (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1973, 1: 62–70 [滕吉文, 阚荣举, 刘道洪, 等. 柴达木东盆地的基岩首波和反射波. 地球物理学报, 1973, 1: 62–70]
- 76 Bally A, Snelson S. Realms of subsidence. *CSPG Special Publications*, 1980
- 77 Cambenob P T, Wang J S. The characteristics for the formation and occurrence of deep oil and gas fields. *Petrol Geol Form*, 1996, 17: 133–139
- 78 Krayushkin B, Ren Y. The plutonic oil-gas fields. *Xinjiang Petrol Geol*, 2009, 30: 136–141
- 79 Meihejef. The oil bearing temperature conditions on deep strata. *Petrol Geol Form*, 1993, 17: 1–4
- 80 Murris R. Facts and principles of world petroleum occurrence. *Hydrocarbon Habitat of the Middle East: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir*, 1980, 6: 765–800
- 81 Sun Y X. The formation and distribution of Russia deep oil and gas reservoirs (in Chinese). *Nat Gas Geosci*, 1997, 2: 33–38 [孙永祥. 俄罗斯境内深部油气藏的形成及分布特点. 天然气地球科学, 1997, 2: 33–38]
- 82 Lerche I, Lowrie A. Quantitative models for the influence of salt-associated thermal anomalies on hydrocarbon generation, northern Gulf of Mexico continental margin. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 1992, 42: 213–225
- 83 Mello U T, Karner G D, Anderson R N. Role of salt in restraining the maturation of subsalt source rocks. *Mar Petrol Geol*, 1995, 12: 697–716

- 84 O'Brien J, Lerche I. Impact of heat flux anomalies around salt diapirs and salt sheets in the gulf coast on hydrocarbon maturity: Models and observations. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 1988, 38: 231–243
- 85 Burruss R. Stability and flux of methane in the deep crust: A review. Professional Paper. United States Geological Survey, 1993. 1570
- 86 Kutcherov V. Theory of abyssal abiotic petroleum origin: Challenge for petroleum industry. *AAPG European Region Newsletter*, 2008. 2–4
- 87 Bai G P, Cao B F. The global deep reservoirs and their distribution rule (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2014, 35: 19–25 [白国平, 曹斌凤. 全球深层油气藏及其分布规律. *石油与天然气地质*, 2014, 35: 19–25]
- 88 Wu F Q, Xian X F. Current state and countermeasure of deep reservoirs exploration (in Chinese). *Sed Geol Tethys Geol*, 2006, 26: 68–71 [吴富强, 鲜学福. 深部储层勘探、研究现状及对策. *沉积与特提斯地质*, 2006, 26: 68–71]
- 89 Cai X Y. Main factors controlling hydrocarbon accumulation of middle- and large-sized oil and gas fields and their distribution rules in the Tarim Basin (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2007, 28: 693–702 [蔡希源. 塔里木盆地大中型油气田成控因素与展布规律. *石油与天然气地质*, 2007, 28: 693–702]
- 90 Han G H, Qi L X, Li Z J, et al. Prediction of the Ordovician fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe oil field (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2006, 27: 860–870 [韩革华, 漆立新, 李宗杰, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术. *石油与天然气地质*, 2006, 27: 860–870]
- 91 Jia C Z. Tectonic Characteristics, Oil and Gas of Tarim Basin, China (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1997 [贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1997]
- 92 Tao C Z, Bai G P, Wang D P, et al. A comparison of hydrocarbon accumulation characteristics of the Paleozoic marine carbonates in Tarim Basin and Williston Basin (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2013, 34: 431–440 [陶崇智, 白国平, 王大鹏, 等. 塔里木盆地与威利斯顿盆地古生界海相碳酸盐岩油气成藏特征对比. *石油与天然气地质*, 2013, 34: 431–440]
- 93 Jiang F J, Pang X Q. Quantitative evaluation of hydrocarbon resource potential and its distribution in the Bozhong Sag and surrounding areas, Bohai Bay Basin (in Chinese). *Petrol Explor Dev*, 2011, 38: 23–29 [姜福杰, 庞雄奇. 环渤中凹陷油气资源潜力与分布定量评价. *石油勘探与开发*, 2011, 38: 23–29]
- 94 Ma Y S. Generation mechanism of Puguang Gas Field in Sichuan Basin (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2007, 2: 9–14 [马永生. 四川盆地普光超大型气田的形成机制. *石油学报*, 2007, 2: 9–14]
- 95 Zou C N, Du J H, Xu C C, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China (in Chinese). *Petrol Explor Dev*, 2014, 41: 278–293 [邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. *石油勘探与开发*, 2014, 41: 278–293]
- 96 Teng J W. Explosion seismic study for velocity distribution and structure of the crust and upper mantle from Damxung to Yadong of Xizang Plateau. *Chin J Geophys*, 1981, 24: 155–170
- 97 Teng J W, Wei S, Sun K, et al. The characteristics of the seismic activity in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau of China. *Tectonophysics*, 1987, 134: 129–144
- 98 Teng J W. The structure of crust and upper mantle and formation of huge thick crust in Qinghai-Xizang Plateau, China (in Chinese). *Geotect Metall*, 1990, 333–338 [滕吉文. 青藏高原地区地壳—上地幔结构与巨厚地壳的形成. *大地构造与成矿学*, 1990, 333–338]
- 99 Teng J W, Zhang Z J, Hu J F, et al. Physical-mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang Plateau and the lateral shortening and vertical thickening of the crust (part two) (in Chinese). *Geol J Univ*, 1996, 2: 307–323 [滕吉文, 张中杰, 胡家富, 等. 青藏高原整体隆升与地壳短缩增厚的物理-力学机制研究(下). *高校地质学报*, 1996, 2: 307–323]
- 100 Teng J W, Zhang Z J, Hu J F, et al. Physical-mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang Plateau and the lateral shortening and vertical thickening of the crust (part one) (in Chinese). *Geol J Univ*, 1996, 2: 121–133 [滕吉文, 张中杰, 胡家富, 等. 青藏高原整体隆升与地壳短缩增厚的物理-力学机制研究(上). *高校地质学报*, 1996, 2: 121–133]
- 101 Teng J W, Zhang Z J, Yang D H, et al. Study on the division mark of Tibet Plateau terrane (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1996, 39: 629–641 [滕吉文, 张中杰, 杨顶辉, 等. 青藏高原地体划分的地球物理标志研究. *地球物理学报*, 1996, 39: 629–641]
- 102 Teng J W. Characteristics of the geophysical fields and plate tectonics of the Qinghai-Xizang Plateau and its neighbouring regions. *Acta Geophys Sin*, 1980, 23: 254–268
- 103 Xiong X, Teng J W. Study on crustal movement and deep process in eastern Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2002, 45: 507–515 [熊熊, 滕吉文. 青藏高原东缘地壳运动与深部过程的研究. *地球物理学报*, 2002, 45: 507–515]
- 104 Molnar P. The geologic history and structure of the Himalaya. *Am Sci*, 1986, 74: 144–154
- 105 Dewey J F, Bird J M. Mountain belts and the new global tectonics. *J Geophys Res*, 1970, 75: 2625–2647
- 106 Dewey J F, Hempton M R, Kidd W S F, et al. Shortening of continental lithosphere: The neotectonics of Eastern Anatolia: A young collision zone. *Geol Soc London Spec Publ*, 1986, 19: 1–36
- 107 England P, Houseman G, Sonder L. Length scales for continental deformation in convergent, divergent, and strike-slip Environments: Analytical and approximate solutions for a thin viscous sheet model. *J Geophys Res-Solid Earth*, 1985, 90: 3551–3557

- 108 Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet. *Science*, 1992, 255: 1663–1670
- 109 Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geol Soc London Spec Publ*, 1986, 19: 113–157
- 110 Teng J W. Explosion study of the structure and seismic velocity distribution of the crust and upper mantle under the Xizang (Tibet) Plateau. *Geophys J Roy Astr S*, 1987, 89: 405–414
- 111 Teng J W, Lin B. Earthquake activity and tectonics of the Himalaya and its surrounding regions. *Inter Karakoram Project*, 1984, 1: 221–235
- 112 Teng J W, Xiong S B, Yin Z X, et al. Structure of the crust and upper mantle pattern and velocity distributional characteristics in the northern Himalayan mountain region. *J Phys Earth*, 1985, 33: 157–171
- 113 Teng J W. Geophysical research on the Qinghai-Tibetan Plateau and discussion on some related problems (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2006, 13: 19–22 [滕吉文. 青藏高原地球物理研究中几个重要问题之我见. *地学前缘*, 2006, 13: 19–22]
- 114 Teng J W, Si X, Wang Q S, et al. Collation and stipulation of the core science problems and theoretical concept in the geoscience study on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 103–124 [滕吉文, 司芴, 王谦身, 等. 青藏高原地球科学研究中的核心问题与理念的厘定. *地球物理学报*, 2015, 58: 103–124]
- 115 Teng J W, Zhang Z J, Wang G J, et al. The deep internal dynamical processes and new model of continental-continental collision in Himalayan collision orogenic zone (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1999, 42: 481–494 [滕吉文, 张中杰, 王光杰, 等. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力过程与陆-陆碰撞新模型. *地球物理学报*, 1999, 42: 481–494]
- 116 Zeng R S. Radial and lateral movement of the Earth (in Chinese). In: *The 10th Academic Conference Proceedings of the Chinese Geophysical Society*, 1994 [曾融生. 地球的径向运动和横向运动. 见: 中国地球物理学会第十届学术年会论文集. 1994]
- 117 Marzoli A, Renne P R, Piccirillo E M, et al. Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, 1999, 284: 616–618
- 118 Wang Q C, Cong B L. Geodynamics of ultrahigh pressure metamorphic rocks on Dabie Mountain. *Sci Chin Ser D-Earth Sci*, 1996, 3: 271–276 [王清晨, 从柏林. 大别山超高压变质岩的地球动力学意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 3: 271–276]
- 119 Dziewonski A M, Woodward R L. *Acoustic Imaging at the Planetary Scale*, in *Acoustical Imaging*. Berlin: Springer, 1992
- 120 Forte A M, Dziewonski A M, Woodward R L. Aspherical structure of the mantle, tectonic plate motions, nonhydrostatic geoid, and topography of the core-mantle boundary. *Dyn Earth Deep Inter Earth Rot*, 1993, 135–166
- 121 Morelli A, Dziewonski A M. Topography of the core-mantle boundary and lateral homogeneity of the liquid core. *Nature*, 1987, 325: 678–683
- 122 Bloxham J, Jackson A. Fluid flow near the surface of Earth's outer core. *Rev Geophys*, 1991, 29: 97–120
- 123 Press F. *Earth*. New York: W.H. Freeman and Company, 1982
- 124 Jeffries H. *The Earth*. London: Cambridge University Press, 1929
- 125 Kremp G. Earth expansion theory versus statical Earth assumption. In: Chatterjee S, Horton N, eds. *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock: Texas Tech University Press, 1992. 297–307
- 126 Bucher W H. Volcanic explosions and overthrusts. *Eos Trans Ame Geophys Univ*, 1933, 14: 238–242
- 127 Milanovsky E. Problems of the tectonic development of the Earth in the light of concept on its pulsations and expansion. *Rev Géol Dynam Géogr Phys*, 1980, 22: 15–27
- 128 Umbgrove J H F. *The Pulse of the Earth*. Berlin Heidelberg: Springer, 1971
- 129 Scheidegger A E. *Principles of Geodynamics*. Berlin Heidelberg: Springer, 1982
- 130 Li S G. The main reason of the change of the Earth surface. *Bull Geol Soc China*, 1926, 6: 209–262 [李四光. 地球表面形象变迁之主因. *中国地质学会志*, 1926, 6: 209–262]
- 131 Li S G. Some tectonic pattern of East Asia and its significance on continental movement problem (in Chinese). In: Li S G, ed. *Geologic Mechanics Methods*. Beijing: Science Press, 1976 [李四光. 东亚一些构造型式及其对大陆运动问题的意义. 见: 李四光. *地质力学方法*. 北京: 科学出版社, 1976]
- 132 Doglioni C. The global tectonic pattern. *J Geodyn*, 1990, 12: 21–38
- 133 Meyerhoff A A, Agocs W, Taner I. Origin of midocean ridges. In: Chatterjee S, Horton N, eds. *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock: Texas Tech University Press, 1992
- 134 Meyerhoff A A, Taner I, Morris A E L, et al. *Surge Tectonics: A New Hypothesis of Global Geodynamics*. Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic, 1996
- 135 Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Rev Geophys*, 1995, 33: 267–310
- 136 Fu R S. Model of mantle geothermal dynamics (in Chinese). *Progr Geophys*, 1993, 2: 13–26 [傅容珊. 地幔热动力学模型. *地球物理学进展*, 1993, 2: 13–26]
- 137 Peltier W. Mantle convection and viscoelasticity. *Annu Rev Fluid Mech*, 1985, 17: 561–608

- 138 Pollack H N, Chapman D S. Flow of heat from the Earth's interior. *Sci Am*, 1977, 237: 60
- 139 Bott M H P. Interior of the Earth: Its Structure, Constitution and Evolution. 2nd ed. London (UK): Edward Arnold, 1982. 416
- 140 Parmentier E M, Turcotte D L, Torrance K E. Studies of finite amplitude non-Newtonian thermal convection with application to convection in the Earth's mantle. *J Geophys Res*, 1976, 81: 1839–1846
- 141 Anderson D L. Lithosphere, asthenosphere, and perisphere. *Rev Geophys*, 1995, 33: 125–149
- 142 Su W J, Woodward R L, Dziewonski A M. Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle. *J Geophys Res-Solid Earth*, 1994, 99: 6945–6980
- 143 Zhang Y S, Tanimoto T. Ridges, hot spots and their interaction as observed in seismic velocity maps. *Nature*, 1992, 355: 45–49
- 144 Bijwaard H, Spakman W. Tomographic evidence for a narrow whole mantle plume below Iceland. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 166: 121–126
- 145 Teng J W, Yang H. Deep physical and dynamical process for the formation and accumulation of oil and gas resources in the second deep space (5000–10000 m) (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 4164–4188 [滕吉文, 杨辉. 第二深度空间(5000~10000 m)油、气形成与聚集的深层物理与动力学响应. *地球物理学报*, 2013, 56: 4164–4188]
- 146 Loper D E. A simple model of whole-mantle convection. *J Geophys Res*, 1985, 90: 1809–1836
- 147 Van der Hilst R, Widiyantoro S, Engdahl E. Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*, 1997, 386: 578–584
- 148 David B, Yanick R. Energetics of a two-phase model of lithospheric damage, shear localization and plate-boundary formation. *Geophys J Int*, 2003, 152: 581–596
- 149 Davies G F. *Dynamic Earth: Plates, Plumes and Mantle Convection*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- 150 Hofmann A W. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 1997, 385: 219–229
- 151 Hofmann A W, White W M. Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, 57: 421–436
- 152 Tackley, Paul J. Three-dimensional simulations of mantle convection with a thermo-chemical basal boundary Layer: D"? *American Geophysical Union*, 2013. 231–253
- 153 Huang J P, Fu R S, Zheng Y, et al. The influence of mantle convection to the lithosphere deformation of China mainland (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2008, 51: 1048–1057 [黄建平, 傅容珊, 郑勇, 等. 地幔对流拖曳力对中国大陆岩石层变形的影响. *地球物理学报*, 2008, 51: 1048–1057]
- 154 Ferrachat S, Ricard Y. Regular vs. chaotic mantle mixing. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 155: 75–86
- 155 Schmalzl J, Houseman G, Hansen U. Mixing in vigorous, time-dependent three-dimensional convection and application to Earth's mantle. *J Geophys Res*, 1996, 101: 21847–21858
- 156 Fu R S, Leng W, Chang X H. The new progress in the study of mantle convection and deep substance migration (in Chinese). *Progr Geophys*, 2005, 20: 170–179 [傅容珊, 冷伟, 常筱华. 地幔对流与深部物质运移研究的新进展. *地球物理学进展*, 2005, 20: 170–179]
- 157 Gurnis M. Large-scale mantle convection and the aggregation and dispersal of supercontinents. *Nature*, 1988, 332: 695–699
- 158 Teng J W. Geophysics and geodynamics related to computational mathematics (in Chinese). *Progr Geophys*, 2010, 25: 343–358 [滕吉文. 地球物理学及地球动力学研究与计算数学. *地球物理学进展*, 2010, 25: 343–358]
- 159 Teng J W, Ruan X M, Zhang Y Q, et al. The stratification velocity structure of crust and covering strata of upper mantle and the orbit of deep interaquifer substance locus of movement for Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2012, 28: 4077–4100 [滕吉文, 阮小敏, 张永谦, 等. 青藏高原地壳与上地幔成层速度结构与深部层间物质的运移轨迹. *岩石学报*, 2012, 28: 4077–4100]
- 160 Ji S. *Deformation Mechanisms, Rheology, and Seismic Properties of Rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 2008
- 161 Kellogg L H, Hager B H, van der Hilst R D. Compositional stratification in the deep mantle. *Science*, 1999, 283: 1881–1884
- 162 der Hilst B. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China. *GSA Today*, 2008, 18: 5
- 163 Chen Y T. On the Magnitude and the Fault Length of the Great Wenchuan (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2008, 26: 26–27 [陈运泰. 汶川特大地震的震级和断层长度. *科技导报*, 2008, 26: 26–27]
- 164 Teng J W, Wang Q S, Wang G J, et al. Specific gravity field and deep crustal structure of the Himalayas east structural knot (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2006, 49: 1045–1052 [滕吉文, 王谦身, 王光杰, 等. 喜马拉雅“东构造结”地区的特异重力场与深部地壳结构. *地球物理学报*, 2006, 49: 1045–1052]
- 165 Xu Z Q, Yang J S, Ji S C, et al. On the continental tectonics and dynamics of China (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2010, 84: 1–29 [许志琴, 杨经绥, 嵇少丞, 等. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识. *地质学报*, 2010, 84: 1–29]
- 166 Allègre C J, Turcotte D L. Implications of a two-component marble-cake mantle. *Nature*, 1986, 323: 123–127
- 167 Maruyama S, Okamoto K. Water transportation from the subducting slab into the mantle transition zone. *Gondwana Res*, 2007, 11: 148–165
- 168 Fu R S, Xu Y M. Numerical simulation of the extrusion process of the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2000, 43: 346–355 [傅容珊, 徐耀民. 青藏高原挤压隆升过程的数值模拟. *地球物理学报*, 2000, 43: 346–355]
- 169 Kohlstedt D L, Holtzman B K. Shearing melt out of the Earth: An experimentalist's perspective on the influence of deformation on melt extraction. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2009, 37: 561–593

- 170 O'Nions R. Relationships between chemical and convective layering in the Earth William Smith Lecture. *J Geol Soc*, 1987, 144: 259–274
- 171 Pysklywec R N, Beaumont C. Intraplate tectonics: Feedback between radioactive thermal weakening and crustal deformation driven by mantle lithosphere instabilities. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 221: 275–292
- 172 Pysklywec R N, Cruden A R. Coupled crust-mantle dynamics and intraplate tectonics: Two-dimensional numerical and three-dimensional analogue modeling. *Geochem Geophys Geosyst*, 2004, 5, doi: 10.1029/2004GC000748
- 173 Richter F M. Regionalized models for the thermal evolution of the Earth. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 68: 471–484
- 174 Hager B H, Clayton R W. Constraints on the structure of mantle convection using seismic observations, flow models, and the geoid. In: *Mantle Convection: Plate Tectonics and Global Dynamics. Fluid Mechanics of Astrophysics and Geophysics. No.4.* New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1989. 657–763
- 175 Jacoby W, Smilde P L. *Gravity Interpretation: Fundamentals and Application of Gravity Inversion and Geological Interpretation.* Berlin: Springer Science & Business Media, 2009
- 176 Turcotte D, Schubert G. *Geodynamics.* New York: Cambridge University Press, 2002
- 177 Watts A B. *Isostasy and Flexure of the Lithosphere.* New York: Cambridge University Press, 2001
- 178 Wang Q S. *Gravimetry (in Chinese).* Beijing: Seismological Press, 2003 [王谦身. 重力学. 北京: 地震出版社, 2003]
- 179 Zhang Y Q. The deep crustal structure of the Ordos basin and the orogenic belts around its north and south margin (in Chinese). Final Report of Post Doctor. Beijing: Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 2013 [张永谦. 鄂尔多斯与其南北缘造山带地域的深部地壳结构. 博士后出站报告. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2013]
- 180 Pollack H N, Hurter S J, Johnson J R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev Geophys*, 1993, 31: 267–280
- 181 Christensen U R. Thermal evolution models for the Earth. *J Geophys Res-Solid Earth*, 1985, 90: 2995–3007
- 182 Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem Geophys Geosyst*, 2008, 9, doi: 10.1029/2007GC001743
- 183 Tozer D. The present thermal state of the terrestrial planets. *Phys Earth Planet Inter*, 1972, 6: 182–197

滕吉文

教授, 研究员, 博导, 中国科学院院士. 1934 年生, 地球物理学家. 1956 年毕业于原东北地质学院地球物理系(现吉林大学). 1962 年在前苏联科学院大地物理所研究生毕业, 获得物理-数学副博士学位. 回国后一直致力于地球物理学和大陆动力学研究, 同时在中国科学院研究生院从事学位课教学工作达 30 年. 半个多世纪以来, 在壳幔精细结构, 地球物理场响应和深部物质与能量交换, 物质运动的行为与轨迹, 深层动力过程与动力学机制, 深化认识地球本体的研究与探索中做出了重要贡献. 已在国内外学术期刊上发表论文 300 余篇, 出版专著 9 部. 曾获得国家自然科学一等奖 1 项; 国家公关奖 1 项; 中国科学院自然科学、科技进步和重大科技成果等奖项各 1 项; 攻关奖和特等奖各 1 项. 是我国该学科领域研究的杰出学科带头人和教育工作者.

The driving force and movement of materials in the Earth's interior

TENG JiWen¹, SONG PengHan^{1,2}, ZHANG XueMei³, LIU YouShan¹, QIAO YongHu^{1,2} & MA XueYing^{1,2}

¹ *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³ *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*

The main connotation of geophysical research is the physics of the Earth's interior whose core issue includes the Earth's internal structure, the forces and responses for the motion of materials. Based on the researches of deep exchange process and dynamic source mechanism of material and energy in the Earth's interior, we draw the following conclusions: (1) The layered structure and material composition of the Earth's interior lay a solid foundation for the researches of the material movement, the properties and structures of the medium, and the deep processes in the Earth's interior. (2) The important geoscience events, such as the continental drift, sea-floor spreading and plate motion indicate that the lithosphere is flowing on the asthenosphere. The eruption of continental flood basalt and the upwelling of hot mantle plume reflect the coupled responses and coexistences of the horizontal and vertical force systems. (3) The exchange process of material and energy in the Earth's interior bring up many products, such as the strong earthquake, the eruption of volcano, the elevation of Tibet Plateau, metal mineral resources in the second deep space, and the formation of oil and gas field. (4) In related to the researches of mechanics properties of the Earth medium, although the driving source of material movement in the Earth's interior become one of the key problems, a series of involved hypothesis cannot explain many geosciences events very well. The mantle convection theory acquire some consensus, however it is still a hypothesis due to the lack of reliable and high precision measured data. (5) The heat from radioactive decay and the thermodynamic boundary layer at core-mantle boundary may be the driving source of the deep processes in the Earth's interior. Whether the dark matter and dark material recently proposed by in the studies of astronomical movement are analogously exist in the Earth's interior, which needs to deepen the understanding of the Earth.

Earth's interior, crust and mantle structure, exchange of material and energy, dynamic response, driving force mechanism

doi: 10.1360/N972015-01275