谈固体地球动力学系统的自组织

杨文采
浙江大学地球科学学院,杭州, 310027

www.geojournals.cn/georev

内容提要: 地球在3.8 Ga前不断有小星体撞击,属于不稳定的开放系统,积累了大量物质和能量。太古宙以后开始形成了准圈层结构,转变为封闭的能量消散系统,并开始建立了系统整体凝聚力和活力之间高度平衡的自组织机制。固体地球系统的重力和化学亲和力产生地球系统物质向内运动的凝聚力。地球存储在地核中的热能和放射性物质的核能,是驱动和维持着固体地球内部物质向外运动的活力来源。地球的自组织指的就是自我调控系统凝聚力和活力之间平衡的调节能力。固体地球系统局部时空尺度的物质运动是各态遍历的,大尺度全局的物质运动规律是确定性的,是自组织机制发挥作用的结果。固体地球系统的自组织能力现在还保持在很高的水平。

关键词:地球动力学;固体地球;系统结构;自组织;凝聚力; 活力

目前地学界把地球系统划分为三个子系统:① 地球外层空间系统,即月—地和高空系统;② 由岩石圈、大气圈、水圈、生物圈组成的地球表面系统;③ 固体地球(地球内部)系统。固体地球系统是地球的质量核心,也是最难观测其物质运动的子系统。研究地球内部系统的组成、结构、属性、相态和自组织机制,才能完全理解人类赖以生存的地球;因此固体地球动力学系统是地球科学研究永恒的主题之一。本文根据近40年来国内外地球成像的结果,尤其是亚洲地区的地球物理成像成果(杨文采, 2011~2020; 杨文采等, 2011~2020; Yang Wencai, 1992~2016; Yang Wencai et al., 1992~2016; Wang et al., 2001; Sun Yanyun et al., 2015, 2016; 瞿辰等, 2020),总结对固体地球动力学系统的组成、结构的认知,结合系统理论与地球动力学作用研究,对的固体地球动力学系统的组织机制进行探讨。

1 固体地球的组成和结构

固体地球系统有9个功能不同的组元(见表1)。组元① 和 ② 是下地幔和内地核,它们是地球结构的框架,框架指结构最坚实的物质支撑组元。组元 ③ 是外核,它是固体地球物质运动的主要动力来源。组元 ④ 是岩石圈,它是固体地球的保护层。组元 ⑤ 、⑥ 、⑦包括软流圈、融流体通道和水圈,它们是物质运动的载体。组元 ⑧ 、⑨都是上述组元的过渡层,有上地幔底部层和D"层。上地幔底部层也叫过渡层或者中幔圈,是软流圈与下地幔之间的过渡层。D"层是外核与下地幔之间的过渡层。过渡层属于特殊的圈层,它们的组成物质是其上下圈层物质相互渗透构成的,属性与上下圈层都不同。融流体通道不是单独的圈层,而是沟通所有圈层的网络,在地球系统自组织中起独特的作用。

表1 固体地球组元的特性对比表

Table 1 Comparison og the element attributes of the Earth system

序号	组元	厚度(km)	空间形状	运动形式
①	水圈	0~10	局部圈层	渗透、流动
②	岩石圈	1~300	圈层	侵位、俯冲
③	软流圈	50~410	圈层	蠕动
④	融流体通道		网络形状	地幔热羽
⑤	中幔层	260	圈层	多种交汇
⑥	下地幔	~2300	圈层	对流
⑦	D"层	1~200	局部圈层	磁流体上拱
⑧	上地核	~2300	圈层	磁流体循环
⑨	下地核	~1200	圈层	重力沉淀

固体地球是没有集中调控组元的准圈层系统,除了融流体通道外,其他组元都是圈层。融流体通道沟通系统内所有圈层的物质运动,不需要有一个

注: 本文为浙江省院士专家工作站资助项目(编号: 41574111)的成果。
收稿日期:2021-02-22;改回日期:2021-03-31;网络首发: 2021-04-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.315
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。

组元来集中调控,人类想去集中调控地球也是不可能的。地球圈层内和圈层之间通过多种对流来实现物质的内部循环(图 1),如地幔对流、外核的磁流体对流和威尔逊循回等(Stacey, 1992; Jolivet and Hataf, 2001)。

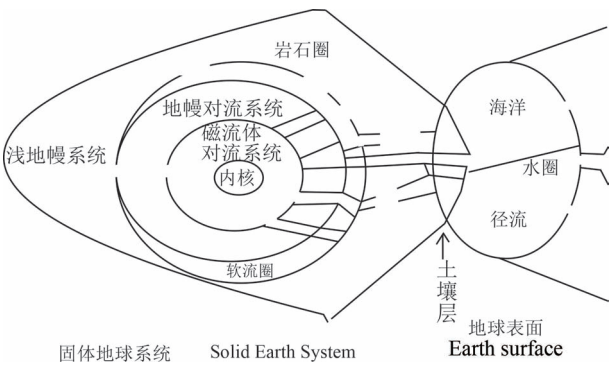

图 1 固体地球系统准圈层结构示意图

Fig. 1 Illustration of the quasi-spherical structure of thesolid Earth system

2 多时空尺度圈层系统的复杂性

从系统动力学的角度看,固体地球的空间尺度 $1\sim10^{10}$ cm, 属于世界的宏观尺度。固体地球的时间尺度为 $0\sim10^{10}$ a, 属于世界的天文尺度。世界是多时空尺度层次的复杂系统,它的能量运动有 6 个维度,分别为空间的 3 个维度、时间、空间尺度和时间尺度。在物质运动速度远低于光速的宏观尺度,经常把物质运动当作四维系统处理。但把对四维系统的视觉直接推广到六维系统,有时会出现错误。

太阳系的空间尺度比地球大得多, 属于世界的宇观尺度。太阳系的自组织机制与地球是完全不同的。宇宙的自组织机制是在把高度浓缩的能量转换为星系物质的同时,通过膨胀尽量减小因物质碰撞造成的能量损失。太阳系的自组织机制是在服从银河系旋转和膨胀运动机制的同时,通过引力吸引行星围绕其旋转。地球的自组织机制是在重力吸积、物质凝聚的同时,通过分层次的物质对流尽量减小内部热能的损失。由此可见,宇观尺度下系统的复杂性体现在层间与层内作用力的对立统一。高级层次通过整体凝聚力控制低层次子系统的能量与物质运动走向,低层次子系统的物质运动在服从高级层次自组织机制的约束下,也在摸索和试验自己生存发展的能力,这就构成了系统演化中“适者生存”中“适者”必备的各态遍历属性。复杂系统中的各态遍历指具有一定自由度的组元的无法预见的行为。在太阳系中,地球是具有一定自由度的组元,它与其他星球又竞争又协作,体现了太阳系的自组织和各态遍历。

在现代哲学界研究的系统哲学认为,系统是一种或者多种组织的集合体,它的基本属性是组织性。例如,生物界的物种进化也形成对应系统的多层次结构,进化较慢的子系统成为进化比较快的子系统的下层体系。系统可分为以自然为研究对象的物理系统和以人类社会为研究对象的认知系统,后者具有进行内省分析的认知组件,而前者没有。

动力学定义系统为由不同质的组元相互作用形成的组织。行为与秩序只是系统的表象,而系统的内涵是其组织机制。真实世界是一个时空尺度巨大的多层次复杂系统,包含人类能够感知的所有存在;不仅仅有物质存在,具有能量的精神也是客观存在。例如,牛顿的身体不存在了,他的精神和留下的知识都存在至今。与系统哲学不同的是,哲学家更重视精神与物质关系的研究,而科学家更侧重于具体系统组构、行为、属性、相态和组织机制的研究。

对于什么是简单系统,什么是复杂系统,还没有统一的认识。认为线性系统是简单系统,非线性系统是复杂系统,有道理; 但是有的非线性系统也可能是简单系统。目前可以认为,行为符合一一对应因果律的属于简单系统,不符合因果律的属于复杂系统。复杂系统可能一因多果,也可能多因一果。经典物理学中的牛顿动力学模型仅仅是四维的,时、空间尺度限定在适合人类社会的宏观尺度上。六维世界的动力学系统有分层次的复杂系统属性,它的行为是多因多果的,大数定理就是多因多果事件统计规律的反映。地球的宏观维度只是世界系统结构中的一个分层。地球系统是太阳系中下一个层次的子系统。从结构上看,固体地球不是一个简单的分层系统,而是有物质运动网络连接的复杂准圈层系统(图 1)。

人造系统的结构往往是集中控制的,反映了人智慧的局限性。自然系统的结构是千变万化的,有的集中控制,有的协调互动而不需要集中控制,反映自然的各态遍历属性。例如,蜂群属于两层次的塔形系统,有集中控制;而网络是平面的多点线联络系统,可以不需要集中控制。但是,时空尺度巨大的复杂系统通常是多层次的,常见的有:① 有集中控制的多层次塔形系统,如国家机器。② 多层次网络系统,如山系、道路网、智能网络。③ 多层次圈层系

统,如银河系、太阳系和地球。④ 多层次混合多层系统,如人体。人体是由各种细胞组成的更加复杂的系统,包含网络与圈层的交叉和复合。尤其是人的大脑,要建立从物质到精神转换的物理化学模型极其困难。

在复杂系统研究中,最可能进行研究的是对系统在平衡态的物质运动建立模型。但是,这种模型不符合系统内部长期的动力学作用研究,也不适合于分层边界上的作用研究。两个分层的边界是系统层与层之间相互作用最活跃的空间,常常形成特殊的边界层。例如,地球上的生态子系统就是地球岩石圈、大气圈和水圈交互的特殊的边界层。地球上的 D"层也是物质交换激烈的复杂子系统。对自然界复杂系统长期和精细的演化预测是极其困难的。

3　对立统一规律与二元系统组织机制模型

自然界复杂系统的定量建模虽然很困难,但是有定性的建模范例。马克思从逻辑推演抽象出来的辩证法,指明了客观世界动力作用的内在原理。辩证法中对立统一、量变质变和否定之否定这三大规律,对于地球科学研究的思维都具有重要的指导作用。对立统一规律抽象出有普遍意义的二元矛盾系统的简约模型。从动力学系统的作用力分析可见,对立统一规律揭示了动力学系统具有的共同特点:凝聚力与活力的对立统一,是事物发展变化的源泉和动力。二元矛盾系统的不同相态反映了系统凝聚力与活力的对立统一的特征(表 2)。

地球系统的凝聚力主要来自地幔和内核的重力,它们都是在地球早期由于万有引力作用形成的。地球早期在重力吸积作用和高温下的重力分异作用下,形成了地幔和地核,这两种作用的交会形成了系统的正反馈,使地球的凝聚力不断增强。太古宙地球的重力吸积作用变弱了,但是由于降温形成了保护组元岩石圈,使固体地球成为稳定的正反馈凝聚系统。系统的正反馈使地球的凝聚力保持稳定。

地球系统的活力主要来自外核的热力,作为动力组元的外核的热能在地球早期由于小星体碰撞形成,一直保留到现今。地球内部放射性物质的核能也为地球提供热能。由于固体地球的散热作用主要发生在地球的表层,地核的热能在重力分异作用下形成了磁流体循环的外地核,并通过融流体通道网络传递到整个地幔,促进了软流圈、D"层和上地幔底层的融流体循环运动,体现了固体地球源源不息的活力。地球的水圈从表面的海洋一直渗透到整个上地幔,是固体地球物质运动活力的催化剂。水圈与融流体通道共同构成贯通全部地球的融流体通道网络,通过低黏度的载体使地球物质运动充满活力。

辩证法的量变质变规律揭示系统相变事件发展过程具有的共同特点,系统的相变就是指在各态遍历力辟演化新径时从量变发展造成质变的规律性。地球凝聚力的主方向是向内的,地球热力的主方向是向外的,但是在圈层的边界又发生转折。凝聚力与活力产生的两种性质不同作用的交会,构成了固体地球对立统一的复杂二元系统,系统的组织机制与相态取结于凝聚力与活力作用的平衡。表 2 中列出了二元矛盾系统从萌芽到湮没的 8 种主要相态,它们是① 相遇,② 涌现,③ 协同,④ 平衡,⑤ 准平衡,⑥ 失衡,⑦ 临界,⑧ 混沌。从地球物质运动反映的力量对比来看,固体地球系统目前处于准平衡相态。辩证法的否定之否定规律揭示了矛盾运动过程具有的另一个共同特征:二元系统中主导力量通过自我否定使演化轨迹逆转,促进系统动力方向的转化和自组织能力的提升。地球岩石圈多次相变构成了演化的威尔逊循回(杨文采, 2015; Yang Wencai, 2015),体现了否定之否定规律的普适性。

4　地球系统的活力与其各态遍历属性

自然系统都具有一定程度的各态遍历属性,反映组元的活力(杨文采, 2008)。系统的一个状态在相空间中由一个点代表,系统各态遍历,指在系统在长期演化过程中进入相空间中每一个点的概率都不会永远等于零。多层次结构的复杂系统中组元的物

表 2 二元动力学系统的对立统一相态特征

Table 2 Attributes of unity of opposites of dynamic system phases

系统相态名称	力量的对立统一体现	主要特性
平衡	整体凝聚力极大值	自组织完善,组元活力冻结
准平衡	局部活力促使整体凝聚力下降	平衡在扰动中波动涨落
失衡	整体凝聚力下降梯度极大	去组织出现
临界	局部活力超过整体凝聚力	去组织主导
混沌	整体凝聚力极小值	系统组织消亡
相遇	局部活力萌芽发育	新组织力量在混沌中萌芽
涌现	局部活力壮大形成主导力量	新组织力量成主导力量
协同	局部活力促使整体凝聚力上升	组元力量整合

质运动的普适规律,一方面体现在多层次结构的系统中,受控于局部的下层子系统要服从上层(整体)设定的自组织规律。二方面是在本层次子系统内的运动轨迹力求各态遍历。例如,地球围绕太阳旋转是大时空尺度维上设定的运动规律,而地球上大陆的飘移、碰撞和裂解,是在地球时空尺度维上自身各态遍历的天性使然。

地质学研究表明,岩石圈没有完全一样的两块石头,也没有完全一样的两个构造,说明地球系统在力图摸索和试探自己生存发展机制的更新,以适应环境持续的变化。各态遍历反映自然有一种内在的"与时俱进"品格与属性,在一定的时空尺度内总是力辟其演化轨迹的新径,不走回头路,这正是系统活力所在。大自然的和谐永存和各态遍历属性是共存的,凝聚力促进和谐永存,各态遍历促进繁荣昌盛。人类出现是宇宙演化过程中偶然出现的事件,出现的概率非常小。因此,要保持人类在地球上的长期存在是一件非常不容易的事情。努力保持人类社会的长期和谐存在,是人类的共同愿望和价值。人类只有学习自然的和谐永存和各态遍历的属性,才能长期和谐存在。

世界上有大大小小无数个动力学系统,其结构都有所区别。但是,各态遍历的结果不是系统演化轨迹的均匀分布,而是系统演化轨迹的不重复,正是因为轨迹不重复,才使系统具有活力,创造出无穷无尽的世界万物。一个动力学系统的能量同时产生凝聚力和活力,凝聚力是约束的力量,而活力不是。活力是在一定的时空尺度内力辟演化轨迹的新径,不走回头路的力量,是各态遍历属性的根源。系统组元运动的自由度是其各态遍历属性的度量。耗散结构系统的"涨落"描述系统状态随环境的随机变化,这种随机变化就是系统整体上各态遍历属性的表现。但是各态遍历具体的内容是难以用准确的方程来定量描述的,仅仅在统计学角度上看是有序和有规律可循的。

世界系统行为的后果是改变了世界,改变世界的事件的产生要消耗一定的能量,从消耗能量的角度看,世界系统事件的发生符合大数定理。各态遍历产生了大量不相同的事件,其中特征量越大的同类事件发生几率就越小。特征量指能量(或者时空尺度),能量巨大的事件发生的频数极低,而随着能量的减少事件发生的频数逐渐增加。这个规律称为大数定理,它反映了世界系统整体与局部具有的内在自相似性。地震的能级与频数的关系在双对数平面座标系中表示为一条直线,完全符合大数定理。地震是地球为防止系统破裂而进行的地应力自动释放,反映了地球系统在各态遍历的物质运动中的自组织。

5 固体地球系统的自组织

地球系统属于能量消散系统,能量的消散会使系统活力逐渐减小,变得老化,其作用过程符合热力学第二定律。地球的生物圈是依靠太阳能运转的开放系统,是地球表面通过吸收太阳能量造成熵减的系统,其作用过程不符合热力学第二定律。生物圈必须通过吸收外来能量造成熵减才能生存,地球不是这样。地球主要是通过内部积存的能量来保持活力的能量保守系统,固体地球的组织要求她内部积存的能量的散发最小化,在太古宙以后系统的熵增是逐渐减小的。如果不受天体的干扰,地球会从初期的岩浆洋覆盖的相态,慢慢冷却,顺序地形成岛屿、大陆块、大陆洲,超级大陆;最后成为一个内核完全固化、海洋全部消失的死寂星球。这个周期在火星可能只有 1.0 Ga,在地球上可能会有 15.0 Ga。地球之所以能够长期生气勃勃、保持活力,就是因为她有比其他星球更强的自组织机制。地球的自组织指的就是自我调控系统凝聚力和活力之间平衡的能力。

地球是一个能量流动系统,能源包括势能、热能、化学能、核能和外来的太阳能。地球的重力和化学亲和力产生地球系统物质向内运动的凝聚力。地球存储在地核中的热能和放射性物质的核能,是驱动和维持着固体地球内部物质向外运动的活力来源。地球接受的太阳能量比其内部能量小两个级次,它驱动和维持着地球表面流体物质的运动与生命系统的生存。地球系统物质向内运动增加系统凝聚力,向外运动的活力散发地球内部的热能和核能。地球系统的自组织表现在其物质向内运动凝聚力和向外运动的活力的平衡调节上,能够在保持活力的同时尽量减少地球内部的热能和核能的散失。

地球超强的自组织能力表现在其内部物质运动形成的细结构上。地球系统物质向内运动的凝聚力主要是重力和化学亲合力,它使地球的密度向内逐渐增加。固体地球向外运动的活力主要是热力,它反映在地球的温度向外逐渐减小。因此,固体地球内部密度和温度平均曲线的对称性就反映了系统凝聚力和活力的平衡;而密度和温度曲线的不对称性就反映系统凝聚力和活力的平衡破缺。地球物理学

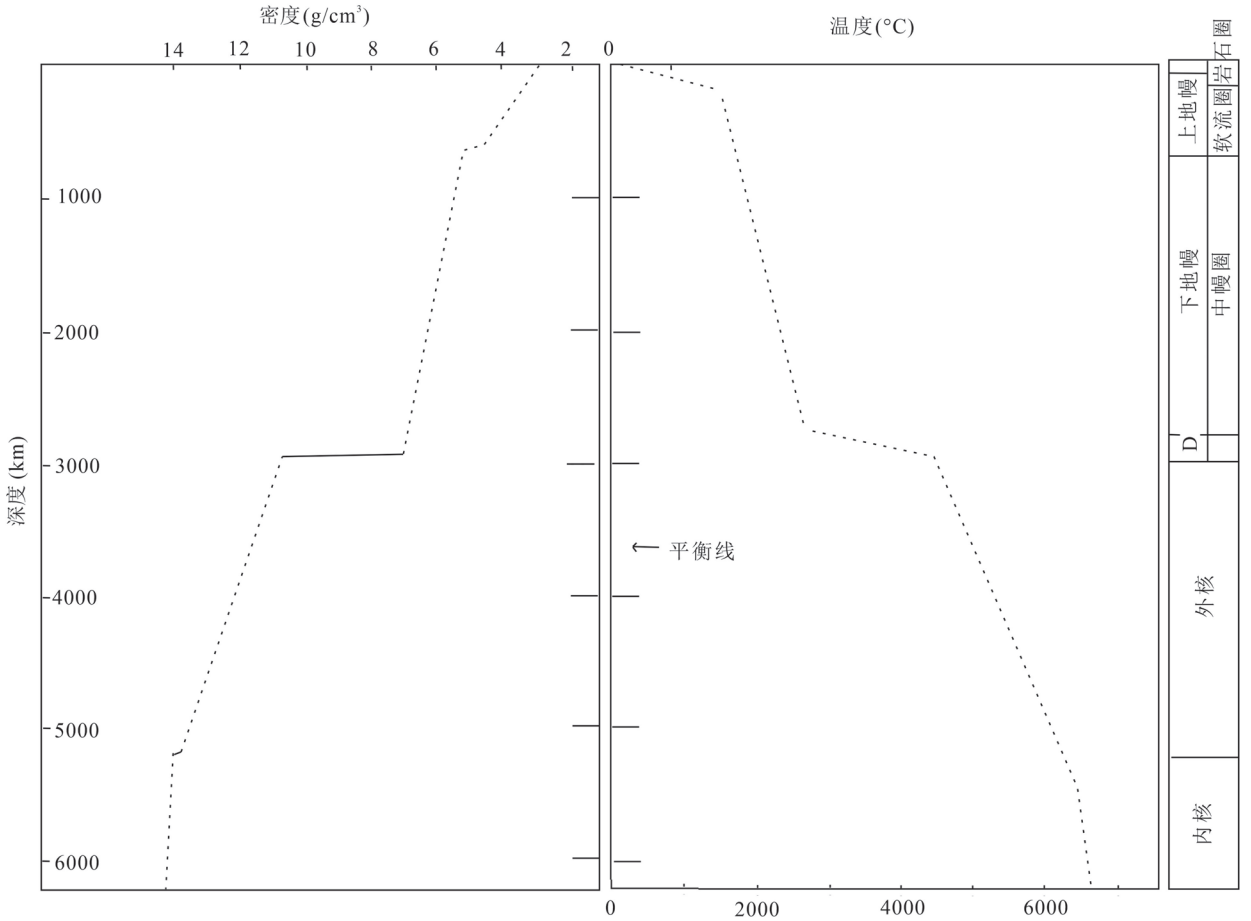

图 2 固体地球内部密度和温度平均曲线的对比(据 Hartmann, 1999)

Fig. 2 Comparison of the average density and temperature curves with depth of thesolid Earth (from Hartmann, 1999)

研究表明(Stacey, 1992; Jolivet and Hataf, 2001),现今固体地球内部密度和温度平均曲线的对称性非常好(图 2),表明地球处在自组织能力强、系统凝聚力和活力之间高度平衡的相态。

6 结论

从现今的地质资料看来,地球在太古宙以后,开始形成了准圈层结构,转变为封闭的能量消散系统,并开始建立了系统凝聚力和活力之间高度平衡的自组织机制。固体地球系统的重力和化学亲和力产生地球系统物质向内运动的凝聚力。地球存储在地核中的热能和放射性物质的核能,是驱动和维持着固体地球内部物质向外运动的活力来源。地球的自组织指的就是自我调控系统凝聚力和活力之间平衡的调节能力。固体地球系统局部时空尺度的物质运动是各态遍历的,大尺度全局的物质运动规律是确定性的,是自组织机制发挥作用的结果。固体地球系统的自组织能力现在还保持在很高的水平。

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)

瞿辰, 刘晓宇,于常青,胥颐, 杨文采. 2020. 青藏高原 S 波速度和泊松比层析成像. 地球物理学报,63(10): 3640~3653.

杨文采. 2008. 复杂性与各态遍历假说. 科技导报 26(3):3~4.

杨文采,魏文博,金胜,孟小红,叶高峰,徐义贤,方慧,邓明,景建恩. 2011a. 大陆电磁参数标准网实验研究—SinoProbe-01 项目介绍. 地球学报,32(Supp-1):24~33.

杨文采,瞿辰,于常青. 2011b. 华北东部地区地壳泊松比异常及其成因. 地学前缘, 18(3) : 13 ~21.

杨文采,于常青. 2011c. 从亚洲 S 波波速结构看地幔流体运动特征. 地质学报, 85(9): 1400~1408.

杨文采,宋海斌. 2014a,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,于长青. 2014b. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞造山作用. 地质论评, 60(2):237~259.

杨文采,于长青. 2014c. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞和地体拼合作用. 地质论评, 60(3):486~502.

杨文采. 2014d. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞带的克拉通化. 地质论评, 60(4):721~740.

杨文采. 2014e. 从地壳上地幔构造看大陆岩石圈伸展与裂解. 地质论评, 60(5):945~961.
杨文采. 2014f. 探测大陆岩石圈的属性、相态与物质运动: 固体地球物理学的新使命. 地质论评,60(6):1181~1198.
杨文采. 2015a. 从扩充的威尔逊循回看中国大陆演化轨迹. 地质论评, 61(2):237~244.
杨文采,侯遵泽,孙艳云,等. 2015b. 用于区域重力场定量解释的多尺度刻痕分析方法. 地球物理学报, 58(2): 520~531.
杨文采,于长青. 2015c. 根据形成地质作用对中国大陆岩石圈作构造分区. 地质论评, 61(4):715~726.
杨文采,徐义贤,张罗磊. 2015d. 塔里木地体大地电磁调查和岩石圈三维结构. 地质学报, 88(7): 1151~1161.
杨文采,侯遵泽,于常青. 2015e. 青藏高原地壳的三维密度结构和物质运动. 地球物理学报, 58(11):4223~4234
杨文采,孙艳云,于常青. 2015f. 青藏高原地壳密度变形带及构造分区. 地球物理学报, 58(11):4115~4128
杨文采. 2016. 揭开南岭地壳形成演化之谜. 地质论评, 62(2): 257~266.
杨文采,瞿辰,侯遵泽. 2017a. 中国大陆造山带地壳密度结构特征. 地质论评, 63(3): 539~548.
杨文采,瞿辰,侯遵泽, 2017b. 中国大陆克拉通地体地壳密度结构特征. 地质论评, 63(4): 843~853.
杨文采,侯遵泽,徐义贤,颜萍. 2017c. 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, 2018. 扬子区地壳密度扰动成像和华南燕山期花岗岩成因. 地质论评, 64(5): 1045~1054.
杨文采,瞿辰,任浩然, 等. 2019a. 青藏高原地壳地震纵波速度扰动的层析成像. 地质论评, 65(1): 2~14
杨文采,瞿辰,任浩然, 等. 2019b. 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, 曾祥芝. 2020a. 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. 2020b. 浅地幔系统的组成和属性相态. 地质论评, 66(2): 263~275
杨文采. 2020c. 浅地幔系统的动力学作用. 地质论评, 66(3): 521~532.
杨文采,金胜,张罗磊,瞿辰, 胡祥云,魏文博,于常青,于鹏. 2020d. 青藏高原岩石圈三维电性结构. 地球物理学报, 63(3): 817~827.
Jolivet L and Hataf H C. 2001. Geodynamics. Lisse: A. A. Balkema Pub.
Qu Chen, Xi Yu, Yang Wencai, Wang Chen, Liu Xiaoyu. 2020&. Crustal S-wave velocity and Poisson´s ratio tomography of Qinghai—Tibetan Plateau. Chinese J. Geophys., 63(3): 63(10): 3640~3653.
Rugh W J. 1981. Nonlinear System Theory. USA: JohnsHopkins University Press.
Stacey F D. 1992. Physics of the Earth. New York: Brookfield Press.
Sun Yanyun, Yang Wencai, Yu Changqing. 2015. Multi-scale scratch analysis in Qinghai—Tibet Plateau and its geological implications. Pure & Applied Geophys., 172(8): 2083~2332.
Sun Yanyun, Yang Wencai, Hou Zunze, Yu Changqing. 2016. The crustal density structures and deformation scratches in Qinghai—Tibet Plateau. Journal of Applied Geophysics, 135 :32~42.
Wang J, Hu S, Yang W, et al. 2001. Geothermal measurements in the pre-pilot holes of the Chinese continental scientific drilling. Chinese Sci. Bull., 46(10): 847~850.
Yang Wencai and Du Jianyuan. 1992. Seismic scattering tomography with application to crustal investigations. Earthqakue Research in China, 6(2): 221~239.
Yang Wencai. 1997. Crustal structure and development of Sulu UHPM Terrane in East—Central China. Episodes, 20(2): 40~43.
Yang Wencai. 1998. Crustal structure and development of Dabie UHPM Terrane in East—Central China. Continental Dynamics, 3(1~2): 86~95.
Yang Wencai. 2000a. Analysis of deep intracontinental subduction. Episodes, 23(1): 20~24.
Yang Wencai. 2000b. Heat dissipation and entropy variation of the solid Earth. Continental Dynamics, 5(1): 76~78.
Yang Wencai, Yu Changqing. 2001. Kinetics and dynamics of development of the Dabie—Sulu UHPM terrane based on geophysical evidence. Chinese J. Geophys, 44(3): 346~359.
Yang Wencai. 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, Eastern China. Tectonophysics, 354: 277~288.
Yang Wencai. 2003a. Flat mantle reflectors in eastern China: possible evidence of lithospheric thinning. Tectonophysics, 369(3~4): 219~230.
Yang Wencai. 2003b. Deep structures of the east Dabie ultrahigh-pressure metamorphic belt, East China. Science in China: Ser. D, 46(6): 612~624.
Yang Wencai, Yang Wuyang, Jin Zhenming, Cheng Zhengyan. 2005. Lithospheric seismic fabrics of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt. Science in China: Ser. D, 48(5): 585~600.
Yang Wencai, Chen Zhide. 2006. Seismic multi-arch structures in East China. Science in China: Ser. D, 49(2): 133~146.
Yang Wencai, 2008&. Complexity and ergodicity. Science and Technology Review, 26(3):3~4.
Yang Wencai. 2009. The crust and upper mantle of the Sulu UHPM belt. Tectonophysics, 475(2): 226~234.
Yang Wencai, Wei Wenbo, Jin sheng, et al. 2011a&. Experimental study of the continental standard grid of electromagnetic parameters: An introduction to Project Sinoprobe-01. Acta Geoscientica Sinica, 32(Supp. 1): 24~33.
Yang Wencai, Qu Chen, Yu Changqing, 2011b&. Crustal poisson's ratio anomalies in the eastern part of North China and their origins. Geoscience Frontiers, 18(3) : 13 ~21.
Yang Wencai, Yu Changqing, 2011c&. Viewing movement features of mantle fluid flows based on S-wave velocity structures of Asia. Acta Geoscientica Sinica, 85(9): 1400~1408.
Yang Wencai, Song Haibin. 2014a&. Ocean—continent transition process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. Geological Review, 60(1), 1~21.
Yang Wencai, Yu Changqing. 2014b&. Continental collision process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (I). Geological Review, 60(2), 237~259.
Yang Wencai and Yu Changqing. 2014c&. Continental collision process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (II). Geological Review, 60(3), 486~502 .
Yang Wencai. 2014d&. Cratonization processes of continental collision belts reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. Geological Review, 60(4):721~740.
Yang Wencai. 2014e&. Continental extension and rifting reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. Geological Review, 60(5): 945~961.
Yang Wencai. 2014f&. Exploring lithospheric attribute, phases and mass motion: New mission to the Earth geophysics. Geological Review, 60(6):1181~1198.

Yang Wencai. 2015a&. Evolutional trajectory of the Chinese continental lithosphere revealed by the expanded Wilson cycle. Geological Review, 61(2): 237~244.

Yang Wencai, Yu Changqing, Sun Yanyun, Hou Zunze. 2015b&. The multi-scale scratch analysis method for quantitative interpretation of regional gravity field. Chinese J. Geophys., 58(2): 520~531.

Yang Wencai, YU Changqing. 2015c&. Tectonic divisions of the Chinese continental lithosphere based on forming tectonic processes. Geological Review, 61(4): 715~726.

Yang Wencai, Xu Yixian, Zhang Luolei, et al. 2015d&. Magnetotellruic investigation and 3D lithospheric structures in the Tarim terrane. Acta Geologica Sinica, 88(7): 1151~1161.

Yang Wencai, Hou Zunze, Yu Changqing. 2015e&. The three dimensional density structures of Qinghai—Tibet Plateau and crustal mass movement, Chinese J. Geophys., 58(11): 4223~4234.

Yang Wencai, Sun Yanyun, Yu Changqing, 2015f&. The crustal density and deformation structures of Qinghai—Tibetan Plateau, Chinese J. Geophys., 58(11): 4115~4128.

Yang Wencai. 2015. Expanding the Wilson cycle based on worldwide comparison of continental structures revealed by lithospheric geophysical investigations. Acta Geologica Sinica (English Edition), 89(2): 101~106.

Yang Wencai, Sun Yanyun. 2016a. Discovering crustal deformation bands by processing regional gravity field. Acta Geologica Sinica (English Edition), 90(1): 66~74.

Yang Wencai, Chen Zhaoxi, Hou Zunze. 2016b. Three dimensional crustal density structure of Central Asia and its geological implications. Acta Geophysica, 64. DOI: 1515/acgeo - 2015 - 0056.

Yang Wencai. 2016&. Raise the curtain on formation and evolution of Nanling Mountain ranges. Geological Review, 62(2): 257~266.

Yang Wencai, Qu Chen, Hou Zunze, et al., 2017a&. Crustal density structures beneath orogenic belts of Chinese continent. Geological Review, 63(3): 539~548.

Yang Wencai, Qu Chen, Hou Zunze, et al. 2017b&. Crustal density structures beneath Chinese cratons. Geological Review,63(4): 843~853.

Yang Wencai, Hou Zunze, Xu Yixian, et al. 2017c&. A study on thermal deformation and lower crust channel flows in Qinghai—Tibetan plateau. Geological Review, 63(5): 1141~1152.

Yang Wencai. 2018&. Crustal density Imaging of Yangtze craton and formation of the Yanshanian granitites in South China. Geological Review, 64(5): 1045~1054.

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, Qu Chen, Ren Haoran, et al. 2019b&. The asthenosphere of the Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau and subduction of the Tethys Ocean. Geological Review, 65(2): 520~532.

Yang Wencai, Zeng Xiangzhi. 2020a&. Continental dynamics with cognition of Earth matter movement. Geological Review, 66(1):1~12.

Yang Wencai, Ji Sheng, Zhang Luolei, Qu Chen, et al. 2020b&. The three-dimensional resistivity structures of the lithosphere beneath the Qinghai—Tibet Plateau. Chinese J. Geophys., 63(3): 817~827.

Yang Wencai. 2020a&. On composition, attributes and phases of the shallow-mantle system. Geological Review, 66(2):263~275.

Yang Wencai. 2020b&. On dynamic processes of the shallow-mantle system. Geological Review, 66(3):521~532.

Learning the spirit of scientist from dialectic principles

YANG Wencai

School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: The Earth, which was hit by small stars 3.8 billion years ago, is an unstable open system that accumulates a great deal of material and energy. Afterwards, it formed spherical structures, becoming a closed energy dissipation system, and began to establish a high-degree self-organization system and the balance mechanism between cohesion and vigour forces. The gravity and chemical affinity forces of the solid earth system produce the cohesion force for inward motion of the earth masses. The thermal energy and radioactive nuclear energy stored within the Earth drive the outward movement of solid Earth´s internal masses. The earth´s self-organization refers to the ability to balance the cohesion and vigour forces in the self-regulating way. The material motion of the local space—time scales of the solid earth system is ergodic, and the large-scale global material motion law is deterministic and the result of the function of the self-organizing mechanism. The self-organizing capacity of the solid Earth system today is still at a very high level.

Keywords: geodynamics; solid Earth; system; self-organization; cohesion force; vigour force

Acknowledgements: This study was financially supported by the Academician Consultant Project of Zhejiang Province (No. 41574111)

The author: YANG Wencai, born in 1942, Ph. D. on geophysics at McGill University in 1984; a professor of Zhejiang University, working on continental dynamics and applied geophysics; Email: yang007@zju.edu.cn

Manuscript received on: 2021-02-22; Accepted on: 2021-03-31; Network published on: 2021-04-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.315　　**Edited by**: ZHANG Yuxu