

论自然中的对流与结构

钱维宏

(北京大学地球物理系)

本文首先从数学上划分了对流与结构,然后论述了银河系、太阳系以及地球大气、海洋和固体地球中的对流和结构。本文只给出这些介质中在空间上的一些分布规律。

令任一动力系统(大气、海洋、固体地球或它们的全体)中的所有(R 个)状态变量的集合为 $S = (d_1, d_2, \dots, d_R)^T$ (这里 T 为转置), d_1, d_2, \dots, d_R 分别为温度、密度和流速分量等,其中任一变量 $d_p = \{d_p(i, j, k)\}; i, j, k = (1, 2, \dots, \infty)$ 为描述任一分子的空间坐标。大多数动力系统都是非线性的,存在一个非线性算子 N 和一个线性算子 L ,系统还受外力的作用 F (矩阵形式),于是这一系统的任一行为(无论是结构还是对流)都包含在下列数学模型中(钱维宏, 1995)。

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (N + L)S = F \tag{1}$$

(1)式中 S 描述的是 R 维相空间的一个点, S 随时间的变化是外部强迫和内部动力学 ($N + L$) 作用的结果。在任一时刻 t_0 相空间中只有一个点 S_0 , 随着 t 的变化, 相空间中的 S 就形成了一条轨迹。为从这条轨迹中分辨出结构和对流, 我们用 $S = \tilde{S} + S'$ 代入 (1) 式并作如下分解

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial t} + L\tilde{S} = F \tag{2}$$

$$\frac{\partial S'}{\partial t} + N(\tilde{S} + S') + LS' = 0 \tag{3}$$

(2)式描写的是一个线性系统, \tilde{S} 轨迹依赖于 F , 如果 F 是周期强迫, 则 \tilde{S} 存在周期解。而 (3)式描写的是一个非线性系统, 一般来说 $\tilde{S} \gg S'$, 于是 S' 是叠加在 \tilde{S} 上的一种涨落。当我们考虑到分子运动时, (3)式仍然描写的是确定论系统。只要能确切知道初始时刻在分子程度上的状态 S_0 和外强迫 F , 又对这一系统的动力学有了充分的认识, 即具体地知道 ($N + L$) 的形式, 那么, 我们就可以对未来的一切作出预报了。然而, 由于人们不可能对每个分子进行测量, 因而初值误差是不可避免的, 加之分子之间相互作用的动力学是非线性的, 更不知道其细节。因此, (1)式实际上是长期不可预报的。而 (2)式能给出 (1)式所包含的总体结构。这正是我们研究地球动力学过程需要知道的。无论在空间上, 还是在时间上, 我们称 \tilde{S} 为结构, 而称 S' 为对流。

银河系中的恒星星云中的结构: 如将恒星星云看作连续介质流体对 (2)式作简化和推导, 可得到恒星星云绕银河中心运动的旋臂结构(钱维宏, 1994), 而那些星座则为对流。

太阳系中的对流和结构: 太阳系中的行星自转方向被认为是无规律的, 但是从水星到冥王星, 这些行星绕太阳公转的线速度是光滑递减的。如果把行星形成前的星云理解为象现代土星光环一样绕当时太阳的运动, 星云绕转太阳的线速度也是光滑递减的, 这就是太阳系中的结构。由于绕转星云引力波的原因, 在这一线速度总体递减上出现了波动, 这些为对流。在水星

到冥王星的距离上有 7 个波,因此可以形成 14 个流体切变带绕太阳运行,每个切变带上可形成若干个同一方向的旋转涡核,这些涡核就是行星胚胎,于是可以解释相邻行星的正转和反转了。

大气中对流和结构:如果我们考虑行星尺度的大气系统为结构,那么象台风、气旋等可移动性的天气系统都看作为对流。大气行星尺度的结构是海平面气压异常变化的南方涛动。它的变化在低纬纬向方向只有一个波,表现为东太平洋海平面气压与西太平洋和印度洋上的海平面气压异常反向振荡。变压零线经过日界线和沿南北美大陆带。数值模拟发现,这一结构是行星尺度海温异常和大陆地形共同作用的结果(钱维宏,1995)。

海洋中的对流和结构:可将海洋中的局地环流看作为对流,除局地海温异常外,现已分析到海温异常在年际时间尺度内具有行星尺度的结构。这一异常结构是与 El Niño 和 La Niña 现象相联系的,表现为赤道东太平洋海温升高时,低纬印度洋海温也升高,而西北太平洋和西南太平洋的海温降低。

在年际时间尺度内,大气和海洋之间存在着行星尺度的相互作用,表现出行星尺度的异常结构,同时大气和海洋在此时间尺度上有通过山脉力矩和摩擦力矩对固体地球施加影响,特别是地气之间的角动量异常交换。在年际时间尺度内,把大气圈、水圈和固体地球三者看作为一个系统,则这一系统的角动量是守恒的。但在这个系统的内部不同介质之间,由于行星尺度的热力和动力异常会发生角动量在不同介质中的交换。这可以解释大气、海洋和固体地球中的灾害常常在同一个时期频繁发生的现象。

地球从它形成到今天已经历了 4600Ma 年的时间,如摄取地球表面的全貌每年一张照片,46 亿张照片象电影一样放出来,那么,群山就象海洋中的波浪在运动和变幻。这些运动中既有对流,也有结构。问题是我们得不到这些照片,但这些运动的痕迹一定存在于现今的地球表面。我们希望能有一个统一的理论解释地球的结构和依此理论发现新的结构和对流。固体地球中的结构及其变化决不是年际时间尺度内形成和完成的事,它的时间尺度达百万年到亿年。在此时间尺度上大气和海洋可以不考虑与地球耦合,而需考虑地球内部不同圈层的耦合与动量交换。

根据对行星形成的认识,地球是由一个星云切变带内的涡核行星胚胎发展而成的。最初的星云温度较低,可解释地核的固体结构。地球胚胎在吸引其它星云和胚胎的过程中位能转为动能与地球胚胎相撞转为热能致使地球胚胎表面温度升高,从某一时刻起地球固核外形成熔融岩浆流体。岩浆流体相对固核的旋转加快,则表面岩浆流体的流线在北半球指向 WN,在南半球指向 WS。于是岩浆流体中轻的物质将集中在两极,同时旋转位势面在两极最高,赤道带最低。当地球所在的星云切变带内的星云和小胚胎都被胚胎捕捉完后,地球就形成了。随后地球表面不断冷却,大陆地壳形成在两极,海洋地壳形成在低纬带,也即高纬和极地为大陆,低纬为海洋。此时,地球除大气和海洋圈层外,地壳以下至少可分三层,它们依次是地壳、岩浆流体圈层和固核。当时的固体地壳相对岩浆圈层很薄,我们仅考虑岩浆圈层与固核的动量耦合。在此系统中当固核失去旋转角动量的时候,岩浆流体得到旋转角动量,于是北半球的表层岩浆流体向 ES 运动,南半球的向 EN 运动,赤道上形成一条岩浆流体辐合带。位于两极的、相对低纬较厚的地壳在底部岩浆流体运动的作用下发生分裂和漂移,南半球的大陆板块向 EN 漂移,北半球的大陆板块向 ES 漂移,大陆漂移的方向性可以解释南半球的岛屿主要位于大陆板块的东侧和 EN 侧,北半球的岛屿主要位于大陆板块的东侧和 ES 侧。大陆板块的漂移也改变了地壳的角动量分布,地壳与岩浆流体的动量耦合必然改变岩浆流体的角动量,于是岩浆流体的旋转

极和赤道辐合带发生了变化,大陆板块在岩浆流体上向新的流体辐合带方向运动。这一岩浆流体赤道辐合带经过地中海、青藏高原的南边缘、斐济、加勒比海和地中海一线。两半球的大陆板块在岩浆流体的带动下持续向这一辐合带运动,于是可以解释这一辐合带上纬向山系的结构。自然界中的结构都具有对称性和整体性,以这一辐合带将地球分成两半,则两半球上大陆面积相等。

在过去的 4600Ma 中地球不断冷却,各圈层的质量(厚度)发生了变化,但不同圈层在不同时间尺度下的耦合从未停止过。不同圈层的相互作用反映到地壳上表现为大陆的水平运动(漂移)和与水平运动相联系的垂直运动(造山)。不同圈层的相互作用反映到地壳上,人们能够测量到地球自转速度变化经历了多次加快和减慢,尤其在地球形成的初期,不同圈层相互作用的变幅大,时间长,当时地壳薄,大陆板块漂移距离相对远,即低纬地区的大陆板块可以在 EW 方向上漂移,大陆板块相对海洋地壳的 EW 向运动可以解释如南北美洲大陆西侧的山系和洋中脊走向与大陆边缘的吻合。纬向山系和洋中脊是大陆板块往复漂移遗留的痕迹,包括多个火山形成的带,它们都是呈结构的。那些小的山系和火山带中的每一个火山则是一种对流。结构之中包含了对流,只有认识了结构的形成后,才能进一步去研究那些对流。那些试图从对流去研究结构的做法是违背自然规律的。

如果我们认识了地球各圈层中的行星尺度结构,又解释了这些结构演化的物理基础和规律,那么,对预报地震和探寻大的矿藏就有了依据。同时,这些结构的认识和解释又能为进一步的对流研究提供基础和背景。