

综述

层状材料褶皱对几种地质活动机理研究的启示*

许宏^{1)2)#} 苑争一^{3)#} 黄彤飞^{4)#} 王啸⁵⁾ 陈正先⁵⁾
韦进⁶⁾ 张翔^{5)†} 黄元^{1)‡}

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2) (中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083)

3) (中国地震台网中心, 北京 100045)

4) (山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590)

5) (北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

6) (中国地震局地震研究所, 地震大地测量重点实验室, 武汉 430071)

(2019年10月4日收到; 2019年11月19日收到修改稿)

从制备层状材料褶皱得到启示, 给出了地球地质活动的一些可能的机理性解释. 层状晶体的褶皱可以通过在柔性基底上施加的单轴或双轴应力实现, 这与地球的层状结构及地球表面的山体褶皱形成机理有许多相似之处. 由于地球质量分布不均匀且存在自转, 因此各个板块的转动惯量是不一样的, 本文指出南北半球之间存在自转角速度差异, 对赤道附近的地形地貌及地质活动可能产生重要影响. 本文给出了地震、火山以及大陆漂移等地质活动新的机理解释. 针对中国特殊的地形地貌, 提出了物质流假说并详细论述了物质流的流动趋势, 指出中国大陆地质活动和板块交界处的地质活动的机理存在明显差别. 物质流假说可以较好地解释中国的地震灾害、矿藏资源分布及中东地区石油丰富的可能成因, 为中国未来预测地震灾害及矿藏资源开发提供了新的理论参考. 该工作为人类更好地避免自然灾害、理解地球上的自然现象及合理利用自然资源提供了新的启示.

关键词: 层状材料, 褶皱, 应力应变, 地震, 火山, 物质流**PACS:** 61.46.-w, 68.03.Cd, 91.10.Kg, 91.35.-x**DOI:** 10.7498/aps.69.20190122

1 引言

大到宇宙的形成和演化, 小到人类社会的变迁, 任何纷繁复杂的表象背后都有其物理上的简单性. 从热力学的角度看, 世界总体在朝熵增加的方向发展, 简单来讲是在从不均匀到均匀的方向发展. 在固体材料中应力的存在正是不均匀性的一种

体现, 以石墨烯为例, 不同的应力可以使石墨烯产生气泡结构、褶皱结构等^[1-4]. 近年来, 随着二维材料研究领域的不断深入, 人们逐渐认识到应力调控可以有效地改变材料的各种性质. 在一些层状半导体材料中, 研究人员发现应力可以调控材料的能带结构, 改变材料的发光特性以及电学性质等^[5-7].

近十多年来, 二维材料的研究得到了广泛的关注, 极大推动了凝聚态物理和化学领域的发展, 也

* 国家自然科学基金(批准号: 11874405)、国家重点研发计划(批准号: 2019YFA0308000, 2018YFE0109700)和中国科学院青年创新促进会(批准号: 2019007)资助的课题.

共同第一作者.

† 通信作者. E-mail: zhangxiang@bit.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yhuang01@iphy.ac.cn

为未来柔性、透明电子器件的应用提供了新的突破口。第一个被发现的二维材料石墨烯,是利用胶带机械解理石墨晶体得到的,目前机械解理方法也逐渐发展成为二维材料制备中的一种重要手段。常用的机械解理方法包括氧气等离子体处理法,金属辅助解理法等。在过去的研究中,发展了一套新型机械解理方法,制备出了大面积高质量的二维材料,包括石墨烯、 MoS_2 、 WSe_2 等,并且可以通过优化不同的解理参数实现对材料应力的调控,在不同的材料体系中获得褶皱、气泡等特殊结构^[3,8,9],这种方法为研究层状材料的本征物理性质提供了新的契机。

在利用机械解理方法制备二维材料的过程中,常会在平整的薄片上发现一些褶皱结构,这是由于在解理过程中存在局域应力,使得层状材料层间产生滑移导致的。通过分析不同的应力施加形式,我们发展了一种制备层状材料褶皱的新方法,结果表明单轴应力可以产生平行的褶皱,而双轴挤压应力可以产生褶皱的网状结构。褶皱结构为研究层状材料在应力应变下的行为提供了一个非常好的微观物理模型。应力导致的应变不仅在微观的层状材料中很常见,在宏观世界中这种现象也是普遍存在的,如山脉的形成可以看作是地表附近受挤压应力后形成的褶皱结构。本文从层状材料褶皱里的应力应变行为作为切入点,系统地分析了微观层状材料到宏观地壳结构中的应变现象和产生的物理机理,对地震、火山以及大陆漂移等众多地质学相关的现象进行了深入地思考和分析,从理论层面对地球演变过程中的一些特殊地质现象给出了新的可能性解释。这不仅为人类探索地质活动提供了新的观点,也为未来人类预测和防范地震、火山等地质灾害开辟了新的思路。板块交界处火山带和地震带几乎是重合的,而中国大陆境内是多地震而少火山的,结合中国特殊的地形地貌及地质活动特点,本文提出了物质流假说,指出了中国境内可能的物质流分布、取向及随时间的演化规律。我国境内重力固体潮的变化分布也为验证物质流假说提供了较为直接的实验证据。物质流假说可以很好地解释中国的地震特点和石油、天然气分布规律,以及中东地区石油丰富的可能成因。物质流假说对于中国预测地震、寻找矿藏资源、合理开发利用自然资源及宏观经济布局都有非常重要的意义。

2 褶皱

2.1 层状材料褶皱的加工

褶皱的形成是由于材料内部受到不均匀挤压应力导致的,大到地球的表面,小到层状晶体材料都可以观察到这种现象。层状材料中的褶皱已经有很多研究报道,人们发现应力的引入使得材料的许多性质发生改变,如能带结构、光电性质等^[2,10,11]。通过对柔性衬底上的层状材料施加单轴应力,可以制备出平行褶皱^[12];而目前对于双轴应力施加后产生的褶皱还没有太多的报道。我们通过分析层状材料与基底热膨胀系数的差异,找到了一种制备层状材料褶皱的新方法。以石墨烯或薄层石墨为例,首先将石墨烯解理到聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 膜上,然后再将其放入液氮中进行瞬间冷却,就可以高效制备出石墨烯褶皱^[13]。选择 PDMS 是由于这种材料的热膨胀系数高^[14],在冷却的过程中形变量大,降温收缩时对层状材料有非常明显的双轴挤压应力。这种方法可以推广到更多的层状材料体系,如 MoS_2 、 WSe_2 等 (图 1(d))。褶皱产生后对材料的性质有显著的改变,以 WSe_2 为例,该材料的多层是间接带隙半导体,而单层是直接带隙半导体,单层具有很强的光致发光特性。荧光成像结果表明,由于层间耦合变弱,在多层 WSe_2 褶皱上也会出现较强的荧光峰,因此褶皱的引入对于层状材料性质有显著的调控作用。

褶皱形成后会改变层状材料的层间距,因此会引入一些新的效应。通过透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 对石墨烯褶皱的横截面进行研究,发现在褶皱产生之后,形变区域的层间距会发生明显增加^[13]。如图 2(e)–(f) 所示,在多层石墨烯的褶皱上,平整区域的层间距是 0.33 nm,而形变的区域层间距增加到 0.41 nm,层间距增加了 24%。层间距的增加会使褶皱产生一种微通道效应,为小分子或液态的物质提供一个更容易运输的通道,这与本文后面讲到的物质流有密切关系。

2.2 层状材料褶皱与地表的结构

众所周知,地球的结构可以分为地壳、地幔和地核,地壳处于最表面,也呈现出明显的层状特征 (图 2(a))。地幔顶部和地球下部构成的岩石圈是刚

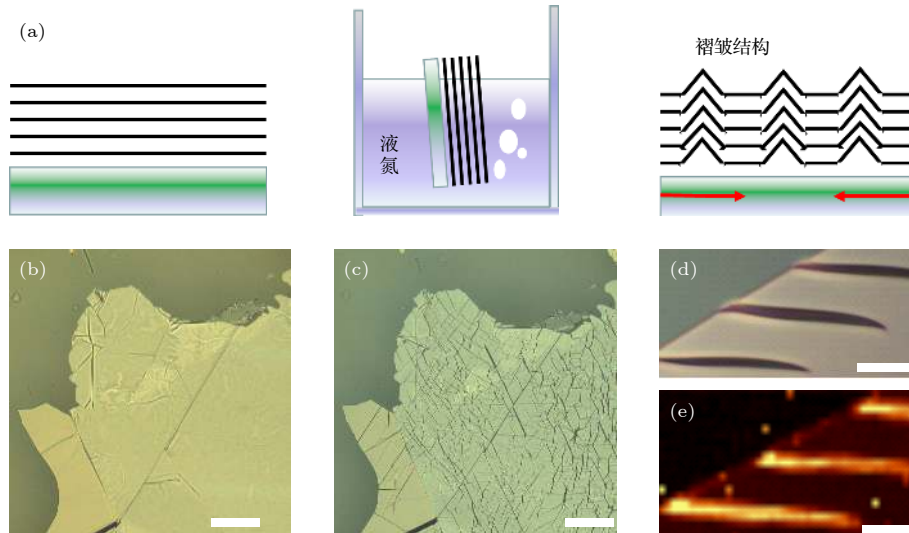


图 1 液氮法快速制备层状材料褶皱结构^[13] (a) 层状材料褶皱的制备过程示意图, 首先将层状材料解理到柔性 PDMS 基底上, 然后将其快速浸没到液氮中; (b) 解理到 PDMS 上的薄层石墨烯样品光学照片; (c) 液氮处理后石墨烯表面形成大量的褶皱网状结构; (d) 多层 WSe₂ 褶皱的光学照片; (e) WSe₂ 褶皱处的荧光成像 (1.6 eV 附近), (b) 和 (c) 图的比例尺为 50 μm, (d) 和 (e) 的比例尺为 5 μm

Fig. 1. Preparation of wrinkle structures on layered materials by fast-cooling treatment in liquid nitrogen^[13]: (a) Schematic diagram of the preparation process of layered material wrinkles. First, the layered material is cleaved onto the flexible PDMS substrate, then rapidly immersed the substrate in liquid nitrogen; (b) optical images of one thin-layer graphene flake cleaved onto PDMS film; (c) a large number of wrinkle network structures formed on the surface of graphene after liquid nitrogen treatment; (d) optical image of multilayer WSe₂ wrinkles; (e) photoluminescence mapping image of the multilayer WSe₂ flake with wrinkles (at ~1.6 eV). The scale bars are 50 μm for (b) and (c), and 5 μm for (d) and (e).

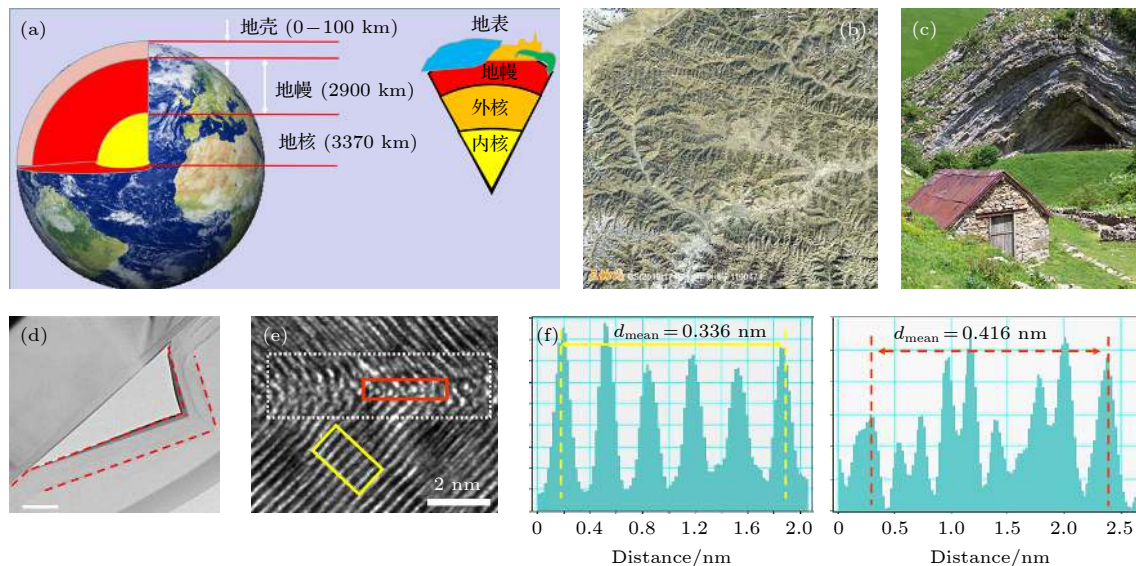


图 2 地球的结构与材料中的褶皱 (a) 地球的结构由内而外可以分为地核、地幔和地壳; (b) 念青唐古拉山附近的卫星地图、隆起的山体交错在一起, 形成褶皱的网状结构; (c) 山体断面处的褶皱; (d) 石墨烯褶皱截面处的 TEM 照片^[13]; (e) 高倍下的 TEM 照片; (f) 图 (e) 中黄色和红色框中的石墨烯层间距, 可以看出形变区域相比于平整区域层间距从 0.33 nm 增加到 0.41 nm

Fig. 2. The structure of the Earth and wrinkles in materials: (a) The structure of the Earth can be divided into core, mantle and crust from the inside out; (b) the satellite map near the Nyainqentanglha Mountain, where the uplifted mountains are intertwined to form a wrinkle network structure; (c) wrinkle structures at the cross section of one mountain; (d) transmission electron microscopy (TEM) image at the cross section of one graphene wrinkle^[13]; (e) high-resolution images of the wrinkle corner; (f) the lattice spacing at the selected areas marked by yellow and red box in (e), the interlayer distance increased from 0.33 nm at the flat region, to 0.41 nm at the strained region.

性比较大的层. 地球上陆地表面存在许多的山脉和河流, 如果从卫星上俯瞰地球, 会发现这些地表非常类似层状材料表面产生的褶皱网状结构 (图 2(b)). 许多山体在断面上呈起伏的褶皱结构 (如图 2(c)), 并且表现出明显的层状特征, 与图 1 中层状材料中褶皱的产生过程类似, 都是由于受到应力后产生的形变.

3 地震、火山等地质活动

3.1 山体的形成与地壳活动

前面提到层状材料褶皱可以通过快速冷却的方法进行加工, 而大陆表面山体的形成与层状材料褶皱的形成机理极其相似. 地球形成早期温度非常高, 岩浆在逐渐降温过程中由于物质分布不均匀, 从液态变成固体的过程中本身就会产生起伏, 这一过程类似冬天玻璃上形成的冰花. 在逐渐降温的过程中, 地壳上层逐渐受到下层凝固时产生的挤压, 地球上大部分板块内部的山体都是凝固过程 (即冷却过程) 中产生的应力造成的. 而部分板块交界处的山体是由于板块相遇后挤压隆起形成的, 最典型的的就是喜马拉雅山脉, 以及南北美洲之间的科迪勒拉山脉 (Cordillera), 这两个山脉的走向和板块的边缘是平行或者重合的.

3.2 地震的形成与新的分类方法

长期以来地震的形成机理都是地质学领域的重要研究方向, 科学家们提出了许多机理解释^[14-16]. 在讨论地震产生的成因之前, 先考虑在什么情况下地球上是没有地震的, 在不考虑太空中陨石坠落地球和人类开采矿产资源引起的地震情况下, 以下几种情况将不会导致地震等地质活动.

1) 如果地球没有自转, 那么板块之间在不考虑太阳引力的情况下将不会产生滑移, 因此也不会出现地震、火山等现象.

2) 如果地球是一个全固态非层状星球, 将不会有地壳板块的滑移, 就不会产生地震.

由于地球的自转及地球质量分布不均匀, 导致不同板块之间的转动惯量 ($I = \sum_i m_i r_i^2$, 其中 I 为转动惯量, m_i 为某一板块的质量, r_i 为距离地轴的垂直距离) 和转动动能是有差别的. 地壳层是较硬的层, 而地幔是较软的层, 这就使得不同板块之间

在自转过程中产生滑移和相对运动, 表现出挤压、碰撞和撕裂等行为, 从而引起地震和火山等地质活动. 因此大陆漂移学说背后有简单的物理机制, 地球板块间质量不均匀和自转的关联是造成这一现象的最主要原因, 这与李四光先生关于板块漂移产生机理的猜想是一致的^[17]. 在不考虑地球以外的星体、陨石对地球的影响情况下, 地球的角动量是守恒的, 如果人类的探测手段足够精确, 就会发现不同区域或板块间的角速度并不相同, 大陆漂移就是角速度差异的表现之一. 板块的漂移驱使着地球各处的角速度逐渐趋于相同.

从物理学的角度来看, 根据板块间受力形式的不同, 可以分为挤压和拉伸应力, 因此将地震分为上抬型地震、下陷型地震和滑移型地震似乎更加的简单合理. 板块交汇处常常是应力最集中的区域, 这些地方地震和火山活动也非常活跃 (图 3). 最为大家熟知的就是喜马拉雅山脉和青藏高原, 它们是由于亚欧板块和印度洋板块碰撞形成的巨大地表褶皱. 由于地球自转的影响, 亚欧大陆和美洲大陆在太平洋区域逐渐靠近, 如果把太平洋板块看作静止的, 那么就相当于太平洋板块在受到来自欧亚大陆和美洲大陆的挤压, 而在地轴的另外一侧, 大西洋却在被撕裂, 因此在大西洋的中间有一个贯穿南北半球的洋中脊. 太平洋被挤压逐渐变小, 而大西洋被拉伸逐渐变大, 这解释了为什么环太平洋周围全是火山和地震带, 而大西洋周边没有大的火山地震带. 如果按照这一解释对环太平洋周围的地震分类, 环太平洋区域的地震应该主要是上抬型地震. 在中国境内, 沿郯庐断裂带分布的渤海湾地震 (1888 年)、海城地震 (1974 年、1975 年) 等均与郯庐断裂的走滑剪切运动相关. 大西洋本应该作为一个独立的板块来进行地质研究, 但是由于被撕裂成了三大块, 因此往往被地质学家分别划分到了美洲板块、亚欧板块和非洲板块. 印度尼西亚是全球地震和火山最活跃的区域之一, 从卫星图片上观察, 这个区域处于多个板块交汇的地方, 并且也是南北半球交汇处, 地震火山等地质活动非常多. 印度尼西亚的南面和西南面是澳大利亚-印度板块, 北面是亚欧板块, 东部伊里安岛的北面是太平洋板块, 东北部的塔劳群岛、马鲁古群岛北段的东北方是菲律宾板块, 因此印尼处于四个板块交界处. 更为重要的是, 由于南北半球的质量分布不均匀, 导致转动惯量和转速会有差别, 南半球的质量小, 转动惯

量小, 因此自转角速度就相对要快; 相反, 北半球转速要稍慢, 使得南北半球在印度尼西亚区域有咬合和扭转. 印度尼西亚东侧的班达海旋涡状构造主要是由于南北半球咬合、扭转以及板块相互挤压形成的特殊结构. 南北半球的自转角速度之间的差异

会使在赤道附近的地形发生扭曲, 这也是造成印度尼西亚、中美洲和大西洋中部的海岭特殊形状(S形)的可能原因(图4). 南北半球的角速度差别在之前的地质研究中鲜有报道, 这一假说也需要更多地质学家深入地探索和印证.

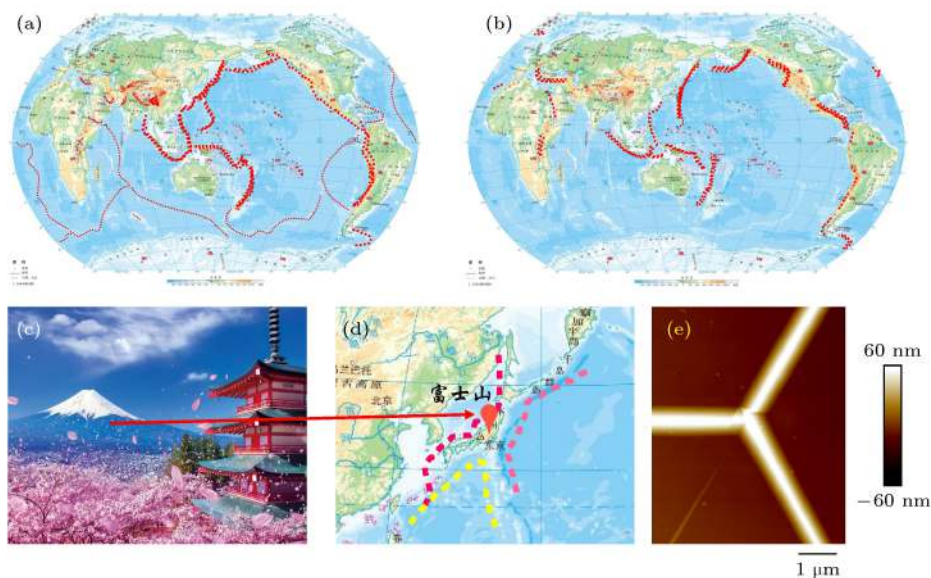


图3 (a) 全球地震分布图; (b) 全球火山分布图, 可以看出除中国大陆以外, 火山分布和地震分布是吻合的; (c) 和 (d) 日本的富士山地面图片和卫星图片, 从图 (d) 中可以看出富士山恰好处于三个板块的交汇处; (e) 石墨烯褶皱的原子力显微镜照片, 可以看出褶皱的交汇点与地面上火山 (c), (d) 有相似之处

Fig. 3. (a) Global seismic distribution map; (b) global volcanic map. It can be seen that volcanic distribution and seismic distribution are consistent except for mainland China; (c) and (d) are the ground and satellites pictures of Japan's Mount Fuji, it can be seen that Mount Fuji is just at the intersection of three plates (d); (e) atomic force microscopy image of the graphene wrinkle, which is similar to the volcano shown in (c) and (d).

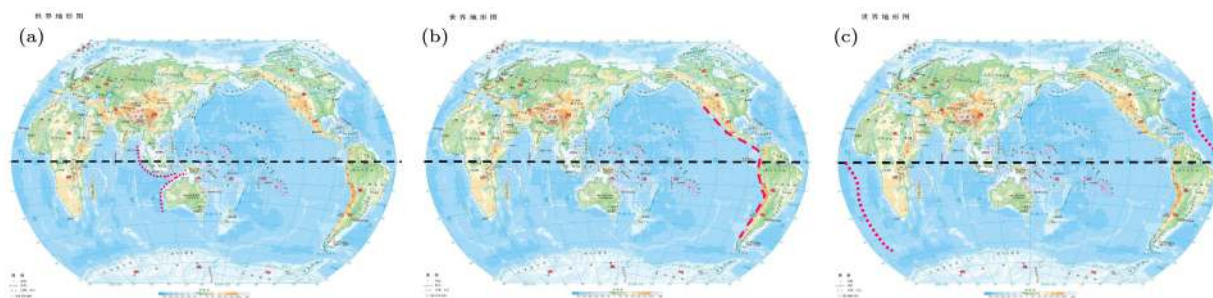


图4 由于南北半球角速度之间存在差别, 赤道附近地区会出现地形的扭曲 (a) 印度尼西亚地区; (b) 南北美洲交界处; (c) 大西洋中部. 红色虚线表示的是该地区总体的地形走势, 黑色虚线表示赤道

Fig. 4. Due to the angular velocity difference between the northern and southern hemispheres, the terrain distortion will occur in the vicinity of the equator: (a) The Indonesian region; (b) the border between North and South America; (c) the central Atlantic Ocean. The red dotted line indicates the overall topographic trend of the region, the black dotted line is the equator.

3.3 中国大陆境内的物质流

中国的台湾、新疆、西藏和云南处于板块交界处, 因此地震活动也比内陆其他地区更加频繁. 台湾位于环太平洋地震带上, 而中国的西南边陲处于

喜马拉雅山地震带上, 原则上中国的其他地区不应该有较大的地震, 但实际情况并非如此. 从图 3(a) 和 3(b) 的对比可以看出, 地球上火山和地震带的分布基本是一致的, 但是中国却是一个多地震但少火山的国家, 由此可知中国内陆的大部分地震与环

太平洋地震带等板块交界处的地震类型不一样, 有着自己的特点. 首先, 中国的地势结构表明, 西部海拔高, 东部海拔低, 这也就使得地壳上的塑性物质在这个区域有从势能高到势能低的方向移动的趋势^[18,19]. 如果从地球卫星图片上来看中国的版图, 会非常容易地发现有三条主要的地势走向: 一条是沿阿尔金山脉、祁连山脉、秦岭、太行山脉和大兴安岭; 另一条是沿着喜马拉雅山脉, 也就是中国的西南边界; 还有一条是沿四川中部和横断山脉, 如图 5 所示. 这和中国的地震带的分布是吻合的. 前面通过研究多层石墨烯横截面发现, 褶皱产生之后会使得形变区域的层间距发生明显的增加, 这就为一些小分子或者流体类物质提供了一个非常好的通道, 使得物质在扩散和流动的过程中更加容易从形变的区域通过. 大型的山脉是这种地壳宏观层状材料的褶皱, 它们在产生形变之后也同样会使得层间距增加, 为一些流动性的物质提供一个天然的通道 (如图 2(c) 中的山洞). 层状材料褶皱产生后的通道效应与具体材料没有关系, 只与层状结构有关系, 任何的层状结构受到挤压产生褶皱后都会有层间距的增加, 不管是石墨烯类的层状晶体还是地壳. 因此我们提出了针对中国特殊地形地貌的物质流假说, 这里的物质流包括石油、天然气、地

下水和上地幔中的塑性物质等多种在地壳内部可流动的物质. 下面将围绕这一假说进行多方位的探讨.

首先对具有褶皱结构的通道进行水流速模拟. 如图 6 所示, 将具有层状结构的通道在不同褶皱顶角的情况下进行模拟, 设定入口处压强为 1000 Pa, 出口处的压力为 0 Pa; 平整区域的层间距为 1 mm, 通道的长度为 80 mm. 结合 Navier-Stokes 方程, 并将其转化为 $k-\varepsilon$ 方程组:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho\varepsilon, \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

$$P_k = \mu_T [\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)], \quad (4)$$

其中 ρ 为流体介质的密度; \mathbf{u} 为流体速度; μ 为动力黏性系数; μ_T 为湍流黏性系数; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ 和 C_μ 为湍流模型常数; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; P_k 为湍流动能生成项. 根据以上方程组和边界条件, 即可得到图 6 中不同结构的模拟结果. 这些数值计算的结果表明, 褶皱形成后, 由于顶端的

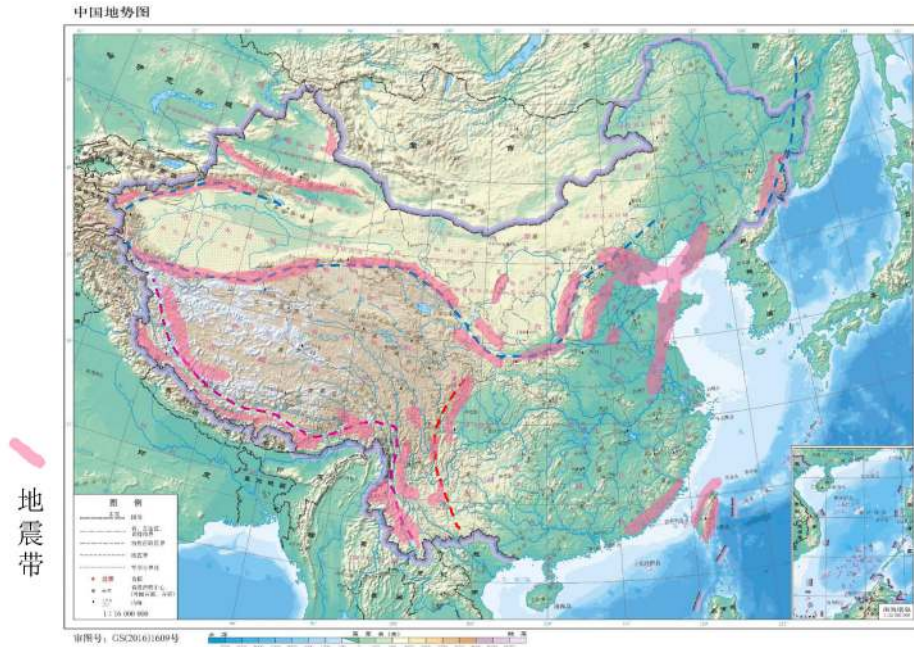


图 5 中国的地势走势及地震带 针对中国特殊的地形结构, 可以将中国的大型山脉走势用虚线进行表示, 粉色部分是中国主要的地震带分布

Fig. 5. China's topographic trend and seismic zone. In view of China's special topographical structure, the orientation of the main mountains can be marked with the dashed lines, and the distribution map of China's seismic belt is marked with the pink color.

层间距增加,褶皱拐角处的水流速度会大于平整的区域,顶角处的水流随着顶角角度的减小也随之增加.这进一步印证了褶皱形成后会产生明显的通道效应.

在地表上可以将巨大的山脉看成是隆起的褶皱,而在山脉的底下可以更好地为物质运输提供通道.印度板块和亚欧板块碰撞形成喜马拉雅山脉以后,地幔处的液体物质为了保持压力的平衡,会使流动性的液体物质从隆起的区域上涌,然后再沿着层状褶皱中的缝隙向其他区域扩散.在中国特殊的地势环境下,更有利于地下物质从势能高的区域流向势能低的区域.在物质不断移动的过程中,会有应力在各个位置积累,这种地震的成因和环太平洋周围的地震是不一样的.因此从这个角度来看,中国西部的地震往往会使海拔下降,而在东部地震则会导致海拔升高.

针对中国地形地貌提出的物质流假说可以通过一些实验进行检测.第一种是物质标定的方法:在这三股物质流的上游通过钻探的方式把标记物注入到特定地层,然后在注入地点的多个方向进行采集,最后的结果应该是只有沿物质流的方向才会检测到高浓度的标记物质,例如在甘南藏族自治州附近注入标记物,一定时间在四川西部山区及秦岭地区应该会观察到标记物.第二种方法是在物质

流的上游进行注水,物质流的下游会受到压力的影响产生响应.大庆油田开采之初,很多油井非常浅,有些油井直接往上喷(松基三井,井深 1050 m),但是随着开采得越来越多,只有更深的油井才能产石油,而如果在上游对其进行物质注入,将会压迫两段之间的石油往下游移动,进而提高石油的产量.另外一个现象也可以很好地证实物质流假说的正确性:很多枯竭的油井在闲置一段时间后可以恢复到开采之初的水平,这说明在停产的时间段内有物质重新补充过来,当然这不能够用来证明石油是可再生资源.

在此需要指出的是,根据大量的调查和分析,我们认为石油天然气不可能是生物死亡后形成的,而应该是星球形成早期就存在,并且也不应该只是地球上独有的(太阳系行星中如火星、木星已被证实有甲烷^[20,21]).石油天然气是化石燃料的观点是经不起推敲的,像沙特的加瓦尔油田(3264 km²),探明储量达 112 亿吨,而目前全球的生命体总的有机物含量才约为 550 亿吨^[22],通过简单的比较就可以知道把地球上五分之一的生命体聚集在一个小的区域并完全转化为石油几乎是不可能的.生命体死亡之后要参与到食物链循环和地球的物质循环中,而不是一直在某个地方持续不断的收集碳元素并沉积转换为碳氢化合物.未来如果在其他星球

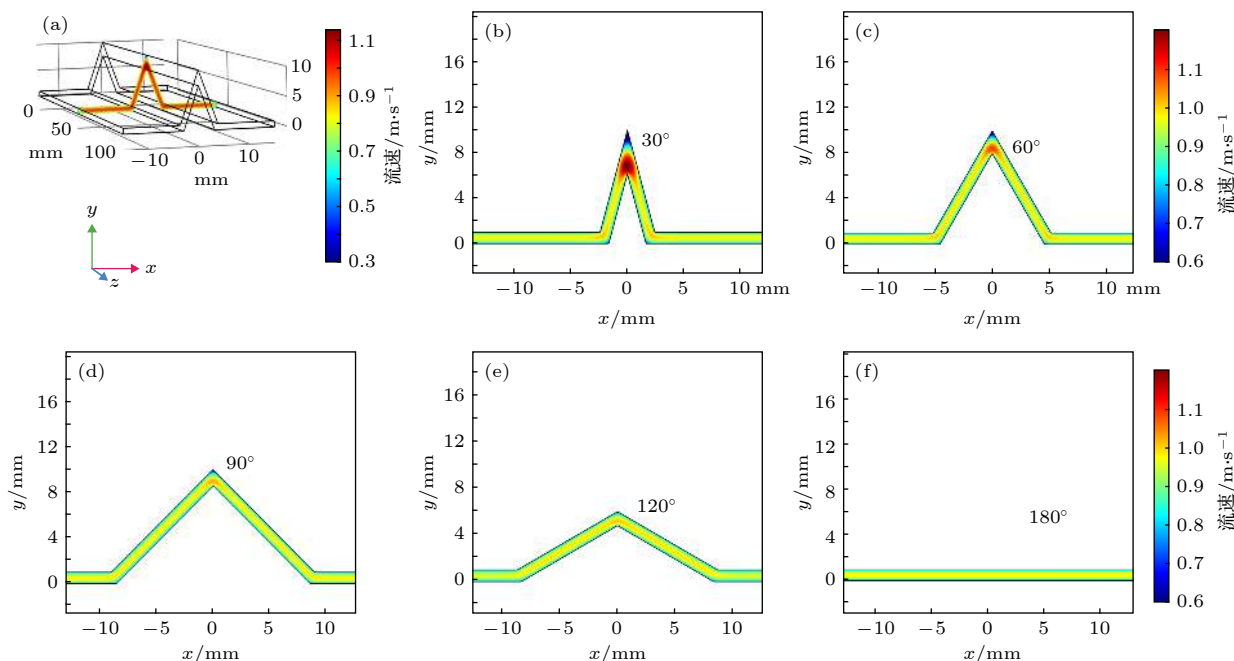


图 6 水在不同结构的管道中流速模拟结果 (a) 弯折管道模型的侧视图; (b)—(f) 不同顶角的管道横截面流速分布图

Fig. 6. The simulation results of water flow rate in different channel structures: (a) The side view of one wrinkled channel; (b)–(f) the flow rate mapping images selected at cross section of channels with different top angle.

上找到石油将进一步印证这一假说. 一百多年来, 石油的有机成因说和无机成因说一直存在争议. 已经证实, 地球深层存在大量的富二氧化碳流体, 这些流体所排出的二氧化碳在上升的过程中, 可以与 H_2 发生著名的费托反应而生成烃类, 并且二氧化碳在高温高压下也可以直接和水反应生成有机物, 因此从无机的二氧化碳生成石油和烃类的反应渠道其实非常多, 完全没有必要等到生命产生之后再形成石油和天然气等有机物. 有机物与生命起源的因果关系和时间顺序或许长期以来都被搞反了, 从事物发展的角度来看也应该是先有地球早期形成的石油、天然气等简单的有机物, 再出现生命这样的复杂有机物. 太阳系的行星中甲烷等有机物是普遍存在的, 把星体初期形成的物质作为生命存在过的假设是不合理的. 越来越多的科学实验证明, 海底的火山口很可能是生命起源的地方, 在这种有温度梯度的环境下, 有机物、无机盐以及水有很大几率可以产生微小囊泡状的单细胞结构, 关于生命的起源是一个非常大的话题, 受限于本文研究范围不作深入地探讨, 仅作为物质流假说的一个引申.

3.4 火山与海啸的形成

在制备的层状材料褶皱中, 经常会看到在网状褶皱结构中的一些交汇点, 这些区域由于产生了很大的形变, 导致晶格结构、晶格曲率等发生很明显的变化, 直接影响材料的物理和化学性质. 通过氢气等离子体处理, 发现所有褶皱交汇的点都是化学反应活性最高的地方, 以多层石墨烯褶皱为例, 褶

皱交汇点的碳原子要比平面区域碳原子化学活性高许多. 同样的反应时间和反应条件, 褶皱交汇处被刻蚀得更快, 其次是褶皱上, 而平整区域化学活性相对是最稳定的 (图 7(b) 和图 7(c)). 褶皱和褶皱交汇点除了化学键被拉伸和改变方向以外, 层间耦合也与平整区域有很大差别, 这些都会改变材料的物理和化学性质, 在化学反应中该区域变得比平整区域更加活跃.

地球上的火山与层状材料中的褶皱有非常相似的地方, 这些位置都是活性非常强的区域. 如果俯视地球表面会发现, 许多火山都是在受到板块挤压的区域, 尤其是在环太平洋火山带周围, 而大型的火山往往是在三个板块交汇的中心区域, 如日本的富士山、意大利的埃特纳火山等, 这两座火山都类似于层状材料中褶皱交汇的节点 (图 3(c)–(e)), 该区域为地质结构的薄弱带, 岩浆更容易在该区域顶破地层喷出地表.

地震、火山和海啸有着密切的关系, 但也有很大差别. 上抬型地震、隆起型海啸和火山都是地壳某些区域受到挤压后上抬形成的, 环太平洋周围的地震、火山和海啸大都属于这种类型. 下降型地震和海啸都是由于某些区域被拉伸后地壳下沉导致的. 对于某些大型活火山引发的地震, 主要为下陷型地震, 影响范围较小, 震级也相对较弱. 从短时间上来讲, 火山的爆发有利于特定区域释放应力, 降低了特大型地震灾害的发生; 而从更长远的时间来看, 火山的爆发是在释放地球内部的能量 (主要是热量), 这将加速地球的能量耗散, 从而使地球更

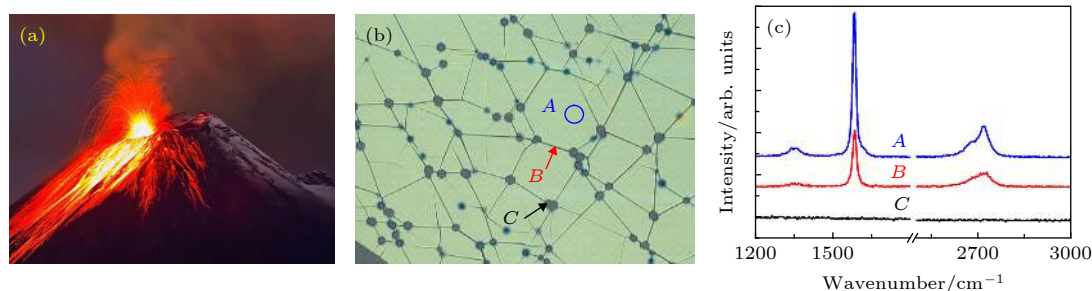


图 7 层状材料中的褶皱与地球上的火山 (a) 一座正在喷发的火山; (b) 石墨烯褶皱在氢气等离子体中处理 10 h 后的形貌图片^[13]; (c) 图 7(b) 中不同位置 (A, B, C 三个区域) 测得的拉曼光谱, 结果表明在褶皱交汇处石墨烯被完全刻蚀掉, 而在褶皱上被部分刻蚀掉, 在平整区域变化最小, 位于 1580 和 2720 cm^{-1} 的 G 峰和 2D 峰在平整区域相对较强

Fig. 7. The wrinkles in layered material and the volcanoes on the Earth: (a) An erupting volcano; (b) an optical image of graphene wrinkles after 10 hours hydrogen plasma treatment^[13]; (c) Raman spectra of graphene measured at different locations (A, B, C) in Fig. 7(b). The Raman spectroscopy results show that the graphene is completely etched away at the intersection of the wrinkles, and partially etched away on the single wrinkles, with the smallest change in the plane region, and the G and 2D peaks (1580 and 2720 cm^{-1}) measured at flat area are relatively strong.

快地冷却,降低地质活动的数量,最终影响地球的自然寿命.当然地球表面的温度除了受太阳能量、内部能量和人为因素以外,还受太阳在银河系中公转的影响,地球在某些特定时期曾经非常寒冷(如冰河纪).

任何事物都有其两面性,地震和火山等地质活动的发生表明我们地球仍然处于非常有活力的阶段,地球衰亡的过程也是这些地质活动逐渐消失的过程;但对于我们当今人类社会的活动来讲,这些地质活动更多的是一种灾难,因此研究地震等地质活动的机理从而避免和降低自然灾害的影响,对于人类发展有着重要的现实意义。

3.5 中国的特殊地质结构

中国的地震类型与环太平洋的地震有很大的不同.中国的地震除了喜马拉雅山脉、台湾和东北地区受板块间挤压以外,其他大部分地区的地震活动都是由于中国特殊的西高东低的地势结构决定的.从卫星图片和中国以往的地震发生位置可以判断,中国大陆境内可能存在物质流动,这类物质(石油、天然气、地下水等可流动的物质)在地壳的浅层进行输运,主要是在地表褶皱(山脉)的底下进行流动.虽然山脉在地表上看主要是坚硬的岩石,但从层状结构的角度来分析,山脉以下更容易形成物质流的通道(图2(c)),这一点与图2(d)中的石墨烯褶皱是一样的,当褶皱隆起之后,褶皱下面的三角区域成为了基底和石墨烯之间的一个微小管道,物质可以更容易地在该通道流通.因此在中国主要的大型山脉(如秦岭、太行山脉和横断山脉等)下面有望开采出更多的矿藏资源,如石油和天然气等.物质流主要也是沿着大型的山脉流动,成为中国地质活动的主要驱动力,当源自中国西部的物质流在某些地区发生堵塞、加速或者断流等现象时都会积累应力或改变地层之间的摩擦系数,诱导该地区产生地震,这种地震不是板块直接碰撞造成的,而是局部物质积累或者流失造成的.从某种意义上讲这是欧亚板块和印度板块碰撞后产生的次生地质活动,青藏高原被抬高以后,为了保持地球内部相同深度的压力平衡,地壳下的物质在板块碰撞的裂缝处先上涌,然后密度较大的流动物质再从地势高的地方移动到地势低的地方,如水、石油、天然气等;而密度低的气态流体则会往地势高的地方聚集并溢出地壳,如氦气.因此,寻找氦气

资源应该在地势较高的地方去勘探,而不是去盆地里.

中国大陆范围内自西向东存在物质流动也可以从石油和天然气的分布上获得证据,这些资源的分布与中国的地震带及图5所示的三条线有密切关系.中国东北大庆油田与西部的塔里木油田实际上是一脉相承的,大庆油田正是沿着图5所示的蓝色线自西往东的物质流聚集在松辽盆地周围产生的.中国西北部与吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、巴基斯坦交界的区域,一部分物质往东流,另外一部分物质往西流.在往西流的过程中逐渐形成了下游的伊朗、伊拉克等石油大国的地形地貌(图8).结合物质流假说和地表的形貌可以判断出来上游的阿富汗和巴基斯坦也应该有相当可观的石油资源,而阿曼湾、波斯湾和阿拉伯海地区处于这股物质流的下游,石油储量更是多的惊人,几乎占了目前已经探明的世界石油储量的三分之二以上.长期以来对于中东地区的石油形成机理并没有比较信服的理论,而物质流假说可以很好地解释这一现象.根据物质流假说就可以很好地理解为什么陆地上也有石油,因为这些有机物本身就是地球形成初期就存在的物质,也就没有必要区分陆相生油和海相生油理论,生物成油学说也都无需再回答生物是如何死亡、如何被掩埋等问题.



图8 塔里木盆地形成后西侧的物质流,途经巴基斯坦、阿富汗、伊朗和伊拉克等国家

Fig. 8. The matter flow on the west side after the formation of the Tarim Basin, which flow through countries such as Pakistan, Afghanistan, Iran, and Iraq.

塔里木盆地形成后,另外一股物质流从西侧往东流(图9(a)),该过程中遭遇到了特殊的地形结构,逐渐的被分流和汇合.鄂尔多斯盆地的形成使

得这股自西向东的物质流被扭转朝东南方向流动,同时形成秦岭地貌.在很长一段时间里,这股物质流从甘肃南部与来自青藏高原的物质流汇合朝东南方向流动(图9(b)),造就了东南各省的主要地貌结构,辐射范围包括了两湖、两广、浙江、福建、云南、贵州和四川.在漫长岁月中,这股强大的物质流不断受到外部环境带来的影响,包括两湖盆地、湘中盆地和南昌盆地等,这些盆地的形成顺序也是有先后的,这一点可以通过山体的走势进行大致地判断(图9(c)).物质流的北侧沿着陇南市-汉中-十堰-襄阳-安庆-黄山-台州方向流动,浙江省东侧的东海地区正是由于处于这股物质流的下游,因此蕴藏着丰富的石油天然气,未来有望在浙江和福建两省沿海周围发现新的大油田.中国境内的大别山和黄山等都是这股物质流作用下产生的.后来这股物质流被分流成两支,其中一支被南阳盆地和南华北盆地阻挡改道朝东北方向流(图9(f)),

而另外一支朝西南方向流(图9(d)).朝东北的物质流形成了太行山、大兴安岭,并且在下流的松辽盆地出形成了中国著名的大庆油田,当然也包括渤海湾油田;而朝西南方向流的物质流与喜马拉雅山脉和昆仑山之间的物质流汇合,形成了横断山脉的特殊地形,下游的缅甸、老挝、越南、泰国和马来西亚的地貌与这股物质流都有密切关系(图9(e)),而这些国家的石油和天然气也都是这股来自中国的物质流带来的.在这个区域地势最低的是中国南海,这里应该蕴藏着这股物质流最大的石油和天然气资源,尤其是中沙群岛到南沙群岛之间的区域,该地区的石油储量有望和波斯湾媲美,具体数据还需要地质勘探人员来核算.根据中国地形地貌和物质流的分析可以知道,中国境内物质流有三个大的流出口分别位于新疆喀什地区、云南省的西南部和黑龙江与内蒙古的北部.如果未来物质流假说得到进一步的验证,中国应该针对这三股物质流出口,

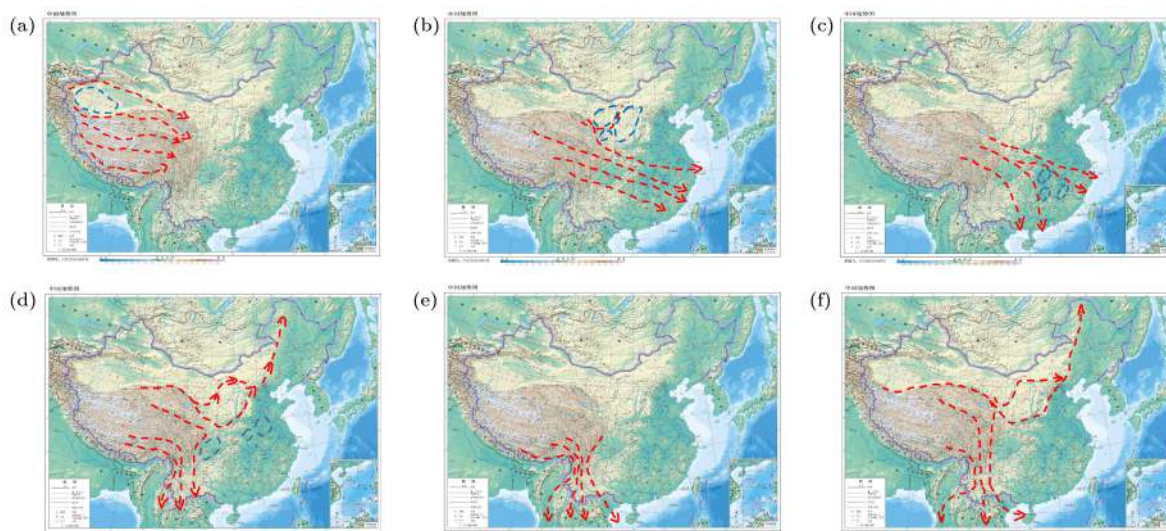


图9 根据物质流假说提出的中国地形地貌的演变过程 (a) 亚欧板块和印度板块撞击后形成了喜马拉雅山脉,使得中国境内的物质流自西向东移动,如红色虚线所示,蓝色虚线代表塔里木盆地; (b) 物质流被鄂尔多斯盆地改道朝东南方向流动,形成了中国东南沿海的特殊地形; (c) 两湖盆地,湘中盆地和南昌盆地形成后,物质流被进一步改道,形成多个山脉; (d) 四川盆地的形成使得朝东南方向的物质流产生了两个主要分支,一部分向南流动形成横断山脉,另一部分在南阳盆地和南华北盆地的影响下朝东北方向流动,形成了太行山脉和大兴安岭; (e) 受四川盆地的影响,朝南的物质流继续向南流动,对缅甸、老挝、泰国、越南和马来西亚的地形地貌产生了重要影响; (f) 中国目前大陆周边的主要物质流走向示意图

Fig. 9. The evolution process of China's topography based on matter flow hypothesis: (a) After the collision of the Asia-Europe plate and the Indian plate, the Himalayas are formed, causing the matter flow in China to move from west to east, as indicated by the yellow dotted line; the red dotted line represents the Tarim Basin; (b) the matter flow is diverted to the southeast by the Ordos Basin, forming a special terrain on the southeast coast of China; (c) after the formation of the two lake basins, the Xiangzhong Basin and the Nanchang Basin, the matter flow is further diverted to form multiple mountain ranges; (d) the formation of the Sichuan Basin caused the matter flow along southeast into two main branches, one of which flows southward to form the Hengduan Mountains, and the other part flows northeastward under the influence of the Nanyang Basin and the South North-China Basin, forming the Taihang Mountains and the Daxinganling Mountains; (e) affected by the Sichuan Basin, the southward matter flow continues to flow southward, which influences the topography of Myanmar, Laos, Thailand, Vietnam, and Malaysia; (f) a schematic diagram of the main current matter flows around China's mainland.

保护并利用好境内的资源,防止境内资源过度的流失.

综上所述,中国的地质活动及石油天然气的分布与中国西高东低的地形有直接关系.除了喜马拉雅山脉和台湾地区,中国的地震灾害可能都是由于三股主要的物质流产生的,因此只要能够把握这股物质流的流动特性就会对中国地震发生做出更准确的预测.石油天然气等资源的分布看上去与地震活动无关,实则有着非常密切的关系.石油和天然气的开发会对物质流产生影响,中国境内近代的一些大地震除了自然因素以外,还应将一些人为因素考虑进去,尤其是在一些大型油气田的上游及周边.

为了更好地阐述物质流的观点,本文以近几年四川地区地震为例进行展开说明.四川盆地是中国最大的天然气工业基地.据中石油的最新一次资源评价结果显示(2018年),四川盆地天然气总资源量达到38万亿方(1方=1 m³),约合300亿吨石油当量.其中,可采天然气资源量达到26万亿方,约合200亿吨石油当量,位居全国第一.在2004年,四川盆地天然气年产量突破100亿方.随后以年均20亿方的惊人增速上产,并于2015年达到了300亿方的年产量,相当于3万个100 m长宽高的山体体积,如此巨大体积的物质不断地从四川盆地被抽走,导致四周高山地区的物质不断地往低地势补充.来自青藏高原的物质流(朝东南方向)和从甘南地区的物质流(朝西南方向)在四川西部汇合,随着四川盆地地区资源的开发,物质流会产生朝东南方向的应力,最终有可能是自然因素和人为诱导的因素共同起作用,使得在极其浅层(7—14 km)的地方发生了这场8.0级大地震.地震发生后该地区整体在水平方向朝东侧移动,并且水平高度升高了11—12 m^[23],这也有力地证明了物质流假说的正确性.

近年来,中国地震局利用定点台站连续重力观测手段,对中国大陆境内的重力固体潮汐因子进行了系统地观测.固体地球潮汐变化导致地球表面的重力产生周期性的微小变化,称之为重力固体潮,重力固体潮的潮汐和非潮汐变化是重力场的动态表现,可反映出地球表层环境和地球内部的物质运动特征.潮汐因子是刻画重力固体潮潮汐变化的有效参数.潮汐因子并不是一个固定不变的值,而是非常容易发生变化,这表明地壳中存在一些流动的物质使得潮汐因子随时间发生变化.这为上面讨论

的物质流提供了非常直接的证据.目前国家地震局利用潮汐因子的变化,推测物质流动和聚集的方向,并根据其变化特征推测未来强震可能的发生地点^[24].通常,区域物质集聚的地方,在重力场的作用下向外扩散,地壳发生“张裂”变化;区域物质流失的地方,在重力场的作用下流入物质,地壳发生“压缩”变化,震例研究表明,地震容易发生在“张裂”-“压缩”的转换部位.

需要指出的是,尽管地震的产生原因和诱导因素很多,但是在分析成因的时候要把主要原因和诱导因素进行区分对待.早在20世纪80—90年代,中国的地质学家周玖等^[25,26]就针对中国西南地区的地质活动提出过物质流的论述,2010年中国科学院地质与地球物理研究所的白登海等^[27]通过对地磁观测也发现了中国青藏高原存在两股巨大的物质流.但是本文关于物质流假说的讨论与他们的研究不同,本文基于中国地貌的几何结构和基本的物理原理为出发点,通过矿藏分布及地质活动作为印证,系统地解释了中国宏观地形地貌的形成顺序和演变过程,同时也解释了中东地区、东南亚地区矿藏资源和地形地貌的形成机理.这一物质流学说对于预测中国大陆境内的地质灾害,合理开发利用矿产资源以及经济建设过程中的宏观布局都有重要意义.

4 地质灾害的预测

上面对各种地震、火山和海啸的成因进行的分析,有些观点是在前人的基础上结合作者近年来的研究成果提出的新思路.虽然人类在巨大的自然灾害面前表现得非常渺小,但是当理解了其背后的机理之后则有利于更好地做好预测和防范.

地震、火山和海啸都是地壳在应力作用下释放能量的过程,要想在较大时间范围准确地预测这些地质活动目前还非常困难,建立准确的预测模型需要对地球结构及质量分布、不同板块间力学常数(如弹性系数,杨氏模量等)、以及与太阳、月亮的相对位置等信息进行系统地分析.虽然经过几个世纪的积累,地质学家已经发展出了多种预测地质活动的方法,但是到目前为止地质活动的预测仍然缺乏非常有效的技术手段.辽宁海城里氏7.3级地震是世界上截至目前唯一一次没有争议、具有科学意义和社会效益的成功地震预报^[28—30].在对前面几种

地质活动机理理解的基础上,人们应该跳出之前的一些思维定式,从原理上出发来寻找新的预测手段.下面将主要以地震为主,阐述一下对于地震预测的一些新见解.

环太平洋周围的火山和地震主要是由于地球自转过程中,不同板块挤压产生的.这类地震大都是地壳深处的挤压后断裂形成的,因此震源深度较深(大于60 km).深源地震常常发生在太平洋中的深海沟附近.在马里亚纳海沟、日本海沟附近,都多次发生了震源深度达五六百公里的大地震.以近代智利和印尼的几次地震为例:

2018年12月16日17时42分在印度尼西亚(南纬3.85°,东经140.29°)发生6.0级地震,震源深度80 km;

2005年3月28日23时09分(印尼当地时间),8.7级地震,震源深度46 km;

1934年6月29日发生于印度尼西亚苏拉威西岛东的地震,震源深度720 km,震级为6.9级,为目前地震震源最深的记录;

2018年11月1日19时19分(北京时间2日6时19分),智利塔拉帕卡大区伊基克市东北89 km处,震源深度为95 km;

2018年9月7日10时39分在智利发生5.6级地震,震源深度90 km;

2010年2月27日,智利第康塞普西翁发生里氏的8.8级特大地震,震源位于地下60 km,为有史以来的第五强震.

环太平洋周围地震的特点通常是震源深度大、活动频繁,这类地震在地表非常难以预测.通过分析震后的横波和纵波可以判断震源的大致位置,利用地震波这种机械波与电磁波的速度差来实现预警的方法往往只能在短时间内提供信息.原理上,在距离震源50 km内的地区,会在地震前10 s收到预警信息;90—100 km内的地区,能提前约20 s多收到预警信息,因此这种方法很难让人们有足够的时间来应对.针对板块交界处的地震(如环太平洋地震带),利用高精度空间测量技术,可以建立相对位置的网状系统来对地震进行预测.由于这类地震是板块间相对运动造成的,受限于目前人类的技术水平,如果只是探测地下浅层的各种信息往往不能全面地了解各个地区所受应力的大小,因此也就不能准确地估计地震的发生时间、地点和强度.假如在环太平洋周围以及太平洋各个岛上建立

一些精确位置测量系统,利用不同地区间的相对位置变化,就可以较准确地得知两个区域之间相对位置是靠近还是远离,或者移动速度是变大还是减小.

中国的火山活动较少,而地震活动较多,并且地震都属于浅源地震,这也是中国地质活动不同于太平洋周围其他国家的地区.正如前面提到的那样,中国的地震应该主要归因于西高东低的地势结构,地幔处的流动性物质从喜马拉雅山脉上涌之后从势能高的区域流向势能低的区域,如果在某些地方物质流受到阻碍、截流或者加速等,都会引发潜在的地震灾害.陆坤权和曹则贤等^[14,31]从流变学角度出发,在研究地震机理时也提出了浅源地震和深源地震都是堵塞-解堵塞转变,是解堵塞后岩石层块滑移或流动造成的能量释放,这一观点与物质流的解释有很多相通之处.张国民等^[32]以1970年1月—2000年5月中国大陆震级 ≥ 2.0 的浅源地震为基础,研究了它们的深度分布特征,结果表明,中国大陆地震的平均深度为 16 ± 7 km,东部地区为 13 ± 6 km,西部为 18 ± 8 km,东部比西部平均偏浅5 km,而青藏高原的海拔在3—5 km,平均海拔4 km,这也进一步暗示中国东西部之间有明显物质流是符合实际情况的.

针对中国的地震类型,许多地震学家提出了多种预测方法,包括动物行为异常、早震理论等.大地震前许多动物会表现出行为异常,这种现象在中国的多次大地震中都有记录,并且得到了国际上地震学家的关注^[12,33—38].日本和美国的地震学家也曾研究过地震与动物行为异常之间的关系,但是他们的结论是二者之间并没有明显的联系.美国地质勘探局的地球物理学家 Andy Michael 说^[39]:“动物的举动被太多的因素所干扰,交配、捍卫领地、掠食等.很难从中找到与地震相关联的举动.”德国波兹坦地球科学研究中心的科学家通过对新西兰、日本和意大利的地震进行研究,发现地震与动物之间的行为并没有特别确定的关系^[40].尽管震前动物行为异常的观点在中国和日本非常流行,并且在中国境内成功预测了几次大地震,但是西方学者对动物预测地震持怀疑态度.地震前会有超声波、次声波、地表温度变化及微弱的机械振动等,这些人类不敏感的信号,对于一些动物来说会非常容易感受到,因此这种观点是有一定科学依据的,但为什么这种现象多数是在中国被观察到,而在其他地区不是那么的灵验一直是一个未解之谜.这主

要是因为中国的地震与世界其他地区的地震成因不同导致的, 所以这种利用动物来预测地震的方法并不具有普适性. 中国内陆的地震并不是地球板块运动造成的, 而是较为缓慢的物质流造成的, 这种地质活动发生在地表较浅的区域, 并且地震前的变化需要积累较长时间. 由于震源浅, 并且震前几天或者几个月内会提前释放一些信号, 这就使得一些动物能够感受到地表震动前的变化. 而对于板块交界处的地震, 震源深, 且地震过程时间短, 因此地震发生时信号衰减快, 持续时间短, 动物难以感受到次声波、超声波、温度及振动的变化, 地震前也就不会表现出异常行为.

除此以外, 中国的地震还有一些自身的特点, 比如大地震前都会有长时间的干旱. 1972年, 耿庆国^[4]提出“早震关系与大地震中期预报方法”, 成功预报了1975年的海城地震, 特别是1976年的唐山地震. 他提出的早震理论认为, 6级以上大地震的震中区, 震前1—3年半时间内往往是旱区. 旱区面积随震级大小而增减. 在旱后第三年发震时, 震级要比旱后第一年内发震增大半级. 早震理论其实与本文前面提出的物质流假说有密切联系, 通过物质流假说可以很好地理解早震理论的正确性和适用范围. 由于中国西高东低的地势结构, 物质流迁移过程中会在某些地方发生堵塞、减速和堆积, 在某些局部物质被抽空的过程中也会加速上游或周围物质的补充. 当物质在某些区域流动受到阻碍并逐渐积累时, 该地区就会有逐渐被抬高的趋势, 导致地下水逐渐下移, 当物质流携带的物质热量较高时, 还会导致该地区地温升高, 出现暖冬和降水减小等现象. 在地震爆发前, 地下水位变化将会更加地明显. 这也就解释了为什么中国的大地震前几年都会出现大面积的干旱, 并且在地震前几天会出现地下水位的急剧变化, 井水变浑浊, 地电导率变化等现象. 如果这股物质流中携带大量的磁性金属物质将会导致地磁场发生变化. 早震理论虽然被中国的多次大地震验证, 但是它对于板块交界处的国家并不适用, 如印尼、日本、智利、美国等国家, 因为这些国家的地震大多是板块交界处的深层地震, 地震发生频繁、积累时间短或降雨量本身较多, 不一定出现明显的长年干旱现象. 特别是对于赤道附近的国家, 长年的干旱现象比较少见, 如印尼、厄瓜多尔、秘鲁、巴西等国家, 除了降雨量丰沛以外, 该地区的有些地震也受到南北半球咬合扭转的影

响, 这些与干旱没有直接关系. 美国加州自从2011年以来长期处于干旱状态, 根据早震理论加州最晚应该在三年后的2014年左右发生大地震, 但是8年过去了, 人们仍然没有看到早震理论预测的大地震的发生; 而印尼的火山和地震等更是难以找到与干旱的相关性. 因此早震理论是有适用范围的.

根据不同的地震成因, 科学家需要寻求不同的预测手段, 并且将多种变化相互联系起来, 做好长期、中期和短临的预测, 最大限度地降低地质灾害给人类生活造成的生命和财产损失. 简单来讲, 针对板块交界处的地震活动, 人们应该通过观测不同地区水平方向的变化来判断地震可能发生的位置和时间; 针对中国的地震灾害, 应该在物质流假说的指导下主要探测物质流流动过程中的变化, 以及由垂直方向引起的变化, 如干旱、水位变化、地磁和地电导率的变化等, 同时结合宏观的异常变化, 实现对中国地震从中长期预测到减灾时效更好的短临预测的转变.

5 结 论

通过把层状材料转移到柔性基底上进行应力加工, 制备了层状材料褶皱的网状结构. 柔性基底与层状材料的复合结构与地球的结构有很多相似之处, 地表的山体对应层状材料中的褶皱, 而火山对应层状材料褶皱的交汇节点. 通过进一步的分析发现, 由于地球的自转和地球质量的分布不均, 导致地幔上的不同板块之间会有滑移, 成为造成地震、火山和海啸的主要原因. 在地震的分类中, 针对其产生的机理不同分成了上抬型地震、下陷型地震和滑移型地震. 通过对赤道附近, 尤其是印度尼西亚地区的地质活动和地貌分析, 指出了南北半球之间的自转角速度不一致, 印度尼西亚和中美洲的特殊地形分布正是由于南北半球之间的转动惯量存在差异, 导致在赤道附近产生了咬合和扭转造成的.

通过对中国地形地貌进行分析, 提出了宏观的物质流假说并进行了系统地阐述, 指出喜马拉雅山脉和青藏高原的形成对中国的地质活动和矿藏资源分布产生了潜在影响. 该理论不仅系统地解释了中国大陆境内的地震活动、石油等矿藏分布, 还进一步指出了缅甸、泰国、老挝及越南的地形地貌、

矿产资源与中国境内物质流的关系, 以及中东地区如伊朗、伊拉克等地区石油丰富的可能原因. 中国大陆的地震都与源自西部青藏高原及新疆地区的物质流有密切关系. 随着科技的发展和生产力水平的提高, 中国的地震已经不仅仅是一种纯粹的自然灾害, 人类的生产活动 (如石油、天然气的开采等) 也会诱发大地震的形成. 物质流假说与耿庆国先生提出的早震理论具有相通之处, 同时本文也指出了早震理论的适用范围.

根据地震的不同成因, 本文提出了针对中国地震和板块交界处地震预测的新见解. 在板块交界处, 除了常规的预测手段以外应该重点观察不同区域之间相对运动速率的变化; 而在中国境内的地震应该主要关注由物质流引起的变化, 如地下水位的变化, 地表垂直位移的变化等.

本工作从层状材料的应力加工出发, 提出了地质活动和地球演化的新见解, 对于理解地球上的地震、火山和海啸等自然灾害的形成以及预测各种自然灾害有重要帮助; 物质流假说为中国境内寻找多种矿产资源提供了新的思路, 对于中国未来的经济发展和战略布局都会有重要意义.

参考文献

- [1] Boddeti N G, Liu X, Long R, Xiao J, Bunch J S, Dunn M L 2013 *Nano Lett.* **13** 6216
- [2] Feng J, Qian X F, Huang C W, Li J 2012 *Nat. Photonics* **6** 865
- [3] Huang Y, Wang X, Zhang X, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 186104
- [4] Kim S, Ryu S 2016 *Carbon* **100** 283
- [5] Bao Z, Miao F, Chen Z, Zhang H, Jang W Y, Dames C, Lau C N 2009 *Nat. Nanotechnology* **4** 562
- [6] Guinea F, Katsnelson M I, Geim A K 2010 *Nat. Phys.* **6** 30
- [7] Luo S W, Hao G L, Fan Y P, Kou L Z, He C Y, Qi X, Tang C, Li J, Huang K, Zhong J X 2015 *Nanotechnology* **26** 105705
- [8] Huang Y, Sutter E, Shi N N, Zheng J B, Yang T Z, Englund D, Gao H J, Sutter P 2015 *ACS Nano* **9** 10612
- [9] Xu H, Meng L, Li Y, Yang T Z, Bao L H, Liu G D, Zhao L, Liu T Y, Xing J, Gao H J, Zhou X J, Huang Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 218201 (in Chinese) [许宏, 孟蕾, 李杨, 杨天中, 鲍丽宏, 刘国东, 赵林, 刘天生, 邢杰, 高鸿钧, 周兴江, 黄元 2018 物理学报 **67** 218201]
- [10] Castellanos-Gomez A, Roldan R, Cappelluti E, Buscema M, Guinea F, van der Zant H S J, Steele G A 2013 *Nano Lett.* **13** 5361
- [11] Ni Z H, Yu T, Lu Y H, Wang Y Y, Feng Y P, Shen Z X 2008 *ACS Nano* **2** 2301
- [12] Wang Y, Yang R, Shi Z W, Zhang L C, Shi D X, Wang E G, Zhang Y Z 2011 *ACS Nano* **5** 3645
- [13] Meng L, Li Y, Liu T S, Zhu C Y, Li Q Y, Chen X J, Zhang S, Zhang X, Bao L H, Huang Y, Xu F, Ruoff R S 2020 *Carbon* **156** 24
- [14] Lu K Q, Cao Z X, Hou M Y, Jiang Z H, Shen R, Wang Q, Sun G, Liu J X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 219101 (in Chinese) [陆坤权, 曹则贤, 厚美瑛, 姜泽辉, 沈容, 王强, 孙刚, 刘寄星 2014 物理学报 **63** 219101]
- [15] Lu K Q, Hou M Y, Jiang Z H, Wang Q, Sun G, Liu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 119103 (in Chinese) [陆坤权, 厚美瑛, 姜泽辉, 王强, 孙刚, 刘寄星 2012 物理学报 **61** 119103]
- [16] Scholz C H 1996 *Nature* **381** 556
- [17] Li S G 1973 *Scientia Sinica* **4** 400 (in Chinese) [李四光 1973 中国科学 **4** 400]
- [18] Clark M K, Royden L H 2000 *Geology* **28** 703
- [19] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, Wang E, Chen Z L, Shen F, Liu Y P 1997 *Science* **276** 788
- [20] Hand E 2018 *Science* **359** 16
- [21] Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K, et al. 2018 *Science* **360** 1093
- [22] Bar-Ona Y M, Phillips R, Milo R 2018 *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **115** 6506
- [23] Li H B, Si J L, Fu X F, Qiu Z L, Li N, Woerd J, Pei J L, Wang Z X, Hou L W, Wu F R 2009 *Quat. Sci.* **29** 387 (in Chinese) [李海兵, 司家亮, 付小方, 邱祝礼, 李宁, Woerd J, 裴军令, 王宗秀, 侯立玮, 吴富峤 2009 第四纪研究 **29** 387]
- [24] Wei J, Shen C, Liu S, Dai M 2014 *Geodesy and Geodynamica* **5** 55
- [25] Zhou J, Huang X W 1980 *Seismol. Geol.* **2** 4 (in Chinese) [周玖, 黄修武 1980 地震地质 **2** 4]
- [26] Zhou J 1989 *J. Seismol. Res.* **12** 23 (in Chinese) [周玖 1989 地震研究 **12** 23]
- [27] Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010 *Nat. Geosci.* **3** 358
- [28] Jones L M, Wang B Q, Xu S, Fitch T J 1982 *J. Geophys. Res.* **87** 4575
- [29] Mogi K 1987 *Tectonophysics* **138** 33
- [30] Wyss M, Wu Z L 2014 *Seismol. Res. Lett.* **85** 126
- [31] Lu K Q, Cao Z X, Hou M Y, Jiang Z H, Shen R, Wang Q, Sun G, Liu J X 2018 *Int. J. Mod. Phys. B* **32** 1850080
- [32] Zhang G M, Wang S Y, Li L, Zhang X D, Ma H S 2002 *Chin. Sci. Bull.* **47** 663 (in Chinese) [张国民, 汪素云, 李丽, 张晓东, 马宏生 2002 科学通报 **47** 663]
- [33] Aronova E 2018 *Stud. Hist. Philos. Sci.* **70** 50
- [34] King C Y 1983 *Nature* **302** 763
- [35] Kirschvink J L 2000 *B Seismol. Soc. Am.* **90** 312
- [36] Logan J M 1977 *Nature* **265** 404
- [37] Otis L 1984 *Am. Sci.* **72** 81
- [38] Tributsch H 1984 *MIT Press* **115** 24
- [39] Harnett C 2012 *Young Scientists J.* **12** 60
- [40] Woith H, Petersen G M, Hainzl S, Dahm T 2018 *Bull. Seismol. Soc. Am.* **108** 1031
- [41] Geng Q G 1984 *Sci. Sin.* **27** 658 (in Chinese) [耿庆国 1984 中国科学 **27** 658]

REVIEWS

Inspiration of wrinkles in layered material for the mechanism study of several geological activities*

Xu Hong^{1)2)#} Yuan Zheng-Yi^{3)#} Huang Tong-Fei^{4)#} Wang Xiao⁵⁾
Chen Zheng-Xian⁵⁾ Wei Jin⁶⁾ Zhang Xiang^{5)†} Huang Yuan^{1)‡}

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

3) (*China Earthquake Network Center, Beijing 100045, China*)

4) (*College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China*)

5) (*School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

6) (*Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China*)

(Received 4 October 2019; revised manuscript received 19 November 2019)

Abstract

In this work, we propose a universal method of preparing wrinkle structures in layered crystals, which provides a good model for studying the physical properties of layered materials under strain. More importantly, there are some similarities between wrinkle engineering and geological activities, which inspires us to give some possible explanations to the mechanism for geological activities like earthquake and volcanic. The wrinkle structures of layered crystals can be achieved by exerting uniaxial or biaxial stress on the flexible substrate, which is very similar to the layered structure of the Earth and the formation of mountain folds on the Earth's surface. Since the Earth has an uneven mass distribution and self-rotation as well, the moments of inertia for plates are different from each other. Here in this work, we point out that there is a difference in angular velocity between the north hemisphere and south hemisphere, which may strongly influence the topography and geology activities near the equator. This work provides a possible mechanism explanation for several geological phenomena such as earthquakes, volcanoes, and continental drift. Based on China's special topography, we propose a matter flow hypothesis and discuss the orientation of matter flow in detail. We point out that the geological activity mechanism in China and the regions around plate boundaries is quite different. The matter flow hypothesis can be well applied to explain the causes of earthquake disasters in China, the distribution of mineral resources, and the possible causes of oil in the Middle East countries. Besides, it also provides a new theoretical guidance for predicting the earthquake disasters and prospecting the mineral resources in China. This work provides a new idea for humans to avoid natural disasters, to understand the natural phenomena on the Earth, and to make rational use of natural resources.

Keywords: layered material, wrinkles, stress and strain, earthquake, volcano, matter flow

PACS: 61.46.-w, 68.03.Cd, 91.10.Kg, 91.35.-x

DOI: [10.7498/aps.69.20190122](https://doi.org/10.7498/aps.69.20190122)