

# 基于自重应力场地壳均衡模型的 区域构造活动机制研究

陈紫云<sup>1,2</sup>

1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 成都 610017

**摘要:** 改进了 G. B. Airy(1855)地壳均衡假说模型,提出了基于地壳板块运动的动力源和动力机制分析地质构造活动的新方法,认为地壳层的板块运动是深部岩浆运动(流动)的结果。深部岩浆运动主要为层流型流动,是由岩浆密度梯度的变化进行驱动的,并且岩浆密度随深度而变化,形成了地壳表部破裂机制分析方法和运动机制分析方法。并以川西地块为例,应用新方法开展了岩浆流动与区域应力场、大地位移、断裂构造活动的相关关系分析,新方法均能够作出较好地解释,也可以较好地解释区域典型断裂活动构造的形态和活动性。分析结果与实际情况吻合度较好,可以初步论证新方法的可行性。

**关键词:** 断裂构造;破裂机制;动力机制;岩浆流动;地壳厚度

**中图分类号:** P541 **文献标识码:** A

## Study on Regional Tectonic Activity Mechanisms Based on a Self-Weight Stress Field Crustal Isostasy Model

CHEN Ziyun<sup>1,2</sup>

1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Provincial Communications Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China

**Abstract:** This study improves the crustal isostasy hypothesis model proposed by G. B. Airy (1855) and proposes a novel methodology for analyzing geological tectonic activity based on dynamic sources and mechanisms of crustal plate movement. The framework posits that plate motion in the crustal layer results from deep magma movement (flow), which primarily exhibits laminar flow characteristics driven by variations in magma density gradients. The magma density changes with depth, forming analytical methods for crustal surface fracture mechanisms and kinematic mechanisms. Taking the western Sichuan block as a case study, the new methodology was applied to investigate correlations among magma flow, regional stress fields, geodetic displacement, and fault structure activity. The results demonstrate that the proposed approach effectively explains the morphology and activity of regional fault structures, as well as the relationships between magma dynamics and tectonic

收稿日期: 2025-01-20 改回日期: 2025-02-24

基金项目: 四川省自然科学基金(2022NSFSC0439); 四川交通院科技计划项目(232023020)

作者简介: 陈紫云(1982—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事公路水运勘察设计和不良地质与公路结构物互馈效应研究。E-mail: chenziyun@scodi.cn

引文格式: 陈紫云. 基于自重应力场地壳均衡模型的区域构造活动机制研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(1): 97-107.  
CHEN Ziyun. Study on regional tectonic activity mechanisms based on a self-weight stress field crustal isostasy model[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 97-107.

deformation. The analysis outcomes align well with observational data, preliminarily validating the feasibility of the methodology.

**Key words:** Fault structures; Fracture mechanisms; Dynamic mechanisms; Magma flow; Crustal thickness

## 0 引言

当前,区域构造活动机制研究通常采取构造形迹和地质力学方法,或者通过研究地壳活动动力源等内动力地质作用,进而研究板块活动及板块内区域构造活动机制,直接通过地壳活动的动力源和动力机制研究区域构造活动机制的方法鲜有报道。本文即试图在这方面开展研究,希望为区域地质环境条件研究、重大地质灾害防治提供新思路。

地质构造的动力源和动力机制是地球科学中的一个重要研究领域。动力源通常指的是引起地壳活动的启动机制和动力学过程,而动力机制则是指这些过程是如何发生并如何影响地壳构造活动的,这些认识不仅是理解地壳运动的关键,更是预测各类区域地质活动的理论基础,对自然灾害评估、建设场地评价、矿产资源勘探等具有重大意义<sup>[1]</sup>。目前,板块构造理论获得较为广泛的认可,它能够较好地解释地壳运动的基本模式,为理解地壳运动的动力机制提供了基础理论框架。围绕该理论,相关学者开展了大量的深入研究,获得了较大的进展:第一,在理论研究方面,地幔对流、地球内部热力学过程、洋-陆相互作用等研究更加全面和深入<sup>[2-4]</sup>,一直在不断丰富板块构造理论<sup>[5]</sup>;提出并应用大系统科学概念以及跨学科研究理念,不断获取地球深部结构及内部过程信息,并形成了学界共识<sup>[6-8]</sup>。第二,理论验证研究方面也获得了长足的进展<sup>[9]</sup>;持续开展地震波的传播特性研究<sup>[10]</sup>,不断获取地壳和地幔的详细信息<sup>[11]</sup>,有助于推断地球内部结构及性质<sup>[12]</sup>,为动力学过程研究提供了基础条件<sup>[13]</sup>;使用各种地球物理方法,如重力测量<sup>[14]</sup>、地磁测量<sup>[15]</sup>、重力学<sup>[16]</sup>和地电测量<sup>[17]</sup>等,研究地球内部结构和地壳运动;应用大量的新技术,例如合成孔径雷达(SAR)、卫星遥感、地球物理探测技术等,为地壳和地幔的探测提供了新的工具,可以在更大范围内监测地壳运动;开展了地球内部物理和化学过程的数值模拟<sup>[18-19]</sup>,包括地幔对流<sup>[20]</sup>、板块相互作用等,有助于更加直观地理解地壳运动的动力机制。这些研究成果可以和理论研究相互印证,不断推动人类的认识进步。第三,在板块动力机制的认识方面,虽然一直存在争议,但主流仍然是2+1个模型<sup>[21]</sup>:推力模型<sup>[22]</sup>,其代表是

海底扩张学说;拉力模型<sup>[23-24]</sup>,其代表是俯冲板片拖曳假说;近些年,中国学者梁光河等提出了重力滑移自驱动模型<sup>[25]</sup>。此外,梁光河等还提出了新大陆漂移说<sup>[26]</sup>,认为持续推动大陆漂移的动力不是海底持续扩张,而是大陆板块后下方持续的岩浆上涌推动大陆板块向前漂移,是一个自发的连锁反应,等等。可以说,先驱们在这一领域开展了大量的基础性、尝试性、论证性的工作,把人类在这方面的认识向前推进了一大步。但是,上天容易入地难,鉴于地球深部结构本身的复杂性,以及勘探方法的局限性,尽管研究工作取得了重要的进展,但对于地壳的构造动力源和动力机制研究仍然是热点和挑战之一,例如板块内部变形、板块间相互作用以及过程等。综上所述,自德国的魏格纳1912年提出了大陆漂移学说,20世纪60年代初H. Hess提出海底扩张的概念,并得到古地磁学、地球年代学、海洋地质学和其他地球物理等方面一系列的证据支撑<sup>[27-28]</sup>,逐渐形成了板块构造学说并奠定了理论基础。虽然大量地球物理和古生物证据研究也证实了这一点,但是板块运动的动力源和动力机制问题仍是亟待解决的重大科学问题,认识上还有诸多的黑盒。因此,本文在地壳均衡模型的基础上提出改进假定,提出新方法,并以川西地区的地质构造活动性作为分析案例,以飨同行并作探索。

## 1 新方法的理论基础:新的板块运动动力源和动力机制假定

本文提出新的板块动力源和动力机制假定(基于改进地壳均衡假说模型的板块构造活动动力机制假定),用以分析地质构造活动。假定的边界条件:将地层结构由上至下分别定义为地壳层、塑性层、岩浆层等3个宏观层位,可以分别用杨氏模量 $E$ 、切变模量 $G$ 、压缩模量 $E_s$ 表征各层位的抗变形能力,且这些层位之间和层位内的物质形态、抗变形能力均为渐变状态。根据相关研究成果,该边界条件已为学界达成共识。

### 1.1 基于G. B. Airy地壳均衡假说的改进假定模型

众多的地球物理探测资料已经证实了地壳均衡现象的存在。追溯平衡理论,最早是由流体静力学

衡所推导的, G. B. Airy(1855)提出地壳均衡假说模型(图 1), 将地壳由厚度不同但密度相同的许多岩块组成, 这些岩块漂浮在密度比它大的可塑岩浆上面, 将海平面与理想的岩浆面之间的距离称为正常地壳厚度  $D$ 。依据阿基米德浮力定律, 相同面积所承载的质量趋于相等, 地面上大面积质量的增减, 地下必有所补偿, 故地壳越厚凸出部位会在地幔层出现“山根”, 海洋下面地壳变薄出现“反山根”, 从而实现地壳重力均衡<sup>[29]</sup>。

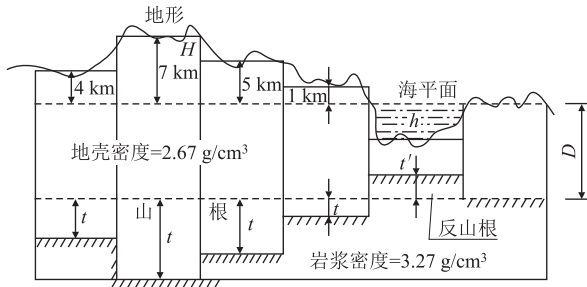


图 1 G. B. Airy(1855)的地壳均衡假说模型

依据 G. B. Airy 假说模型, 存在 3 个重大的立论疑问: ①岩浆不可能每次都是沿整个海沟或洋脊长度发生, 存在岩浆的溢出范围和火山活动的地壳平衡问题; ②重力密度和地壳厚度问题, 重力密度不可能是单一的, 且地表地形起伏与莫霍面的形态不具有严格的对应性, 这在很多测量成果中已经予以证实; ③地幔的判定不是由其密度值所决定的, 是由其是否存在流动性作为唯一判别标准。因此, 基于该模型, 又先后发展提出了多种类型修正的均衡补偿模型, 如局部补偿、区域补偿、试验补偿、动态补偿等。本文参考并综合前人的研究成果, 对 G. B. Airy 模型边界条件予以改进形成“自重应力场地壳均衡”模型: ①地壳至地幔存在密度梯度, 且壳幔密度差不恒定, 密度梯度不恒定, 密度梯度主要因为围压差所致, 因为密度临界值的存在而导致岩体外在表现为呈现固态或液态, 所以导致莫霍带的存在, 但因为岩浆的流动, 客观上将造成围压的变化, 因此密度梯度将会产生变化, 密度只与所处的环境, 如埋深、围压有关; ②在深入地幔的地球深部, 其应力状态为流体静力平衡状态, 鉴于壳状结构的约束, 因此, 在竖直方向上, 产生平衡的控制因素不是流体“浮力”, 而是与旋转惯性力相平衡的引力——“自重应力”, 因此本模型为自重应力场地壳均衡模型(图 2)。

基于改进模型, 前述的立论问题可以得到解释: ①洋壳的岩浆活动服从力学判据, 从破裂带范围溢出, 进而可以解释断裂活动、火山活动的变化性; 其

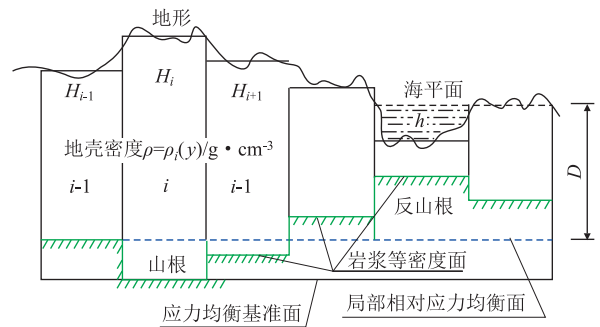


图 2 改进的基于自重应力场的地壳均衡模型

次, 当岩浆溢出后, 洋壳厚度增加, 洋壳与陆壳的压力差降低, 并且洋壳产生了密度重构, 当达到平衡条件时, 岩浆溢出事件中止, 岩浆流将寻找新的溢流出口而为下一次发生作准备。②因地壳至地幔存在密度梯度, 这可以解释陆壳上采用地球物理方法探测的厚度比 G. B. Airy 假说模型要小得多的原因。并且, 如果地幔物质呈现液态仅仅是因为温度的话, 那么根本不会形成“山根”和“反山根”, 这与板块构造学说所证实的情况是相悖的, “山根”也只是在重力密度梯度下所形成的相对固态层, 只是该固态层的相对流动速率更小。

综上所述, 目前已有大量的地球物理探测证据表明, 地壳的厚度在全球是不均衡的, 洋壳更薄而陆壳相对更厚, 重力探测就是依据该理论而发展, 这为改进地壳均衡模型的成立提供了理论基础, 因此在此基础上改进提出的本假定具有理论合理性。

## 1.2 支撑模型的相关论据: 密度梯度和地壳厚度

### (1) 关于地壳地幔存在密度梯度的实测论据

Thybo 等<sup>[29-31]</sup>在乌克兰地盾做了一个地震深反射剖面和高精度重力测量(图 3), 反映出地球纵波波速向地球深部逐步有增大的趋势, 客观上论证了地壳至地幔的物质存在密度梯度, 且密度梯度不是恒定的。

王椿镛等在川西地区开展了人工地震测量<sup>[32-33]</sup>, 其  $P$  波速度模型成果显示特征如表 1, 且与图 3 所示的国外测量数值非常接近(该剖面的莫霍面约 40~45 km), 地壳层的波速一般介于 5.80 km/s 到 7.60 km/s 之间: ①竹巴笼至资中剖面(自西向东)(图 4), 在地壳竖直的深度方向进行了 5 个波速分带, 数值从表层的 5.95 km/s 逐步增加到地幔顶部的 8.30 km/s, 中间局部有变化, 但总体具有非常明显的梯度特性; ②奔子栏至唐克剖面(由南向北)(图 5), 也进行了 5 个波速竖直分带, 数值从 5.85 km/s 逐步增加到 7.90 km/s, 梯度特性也非常明显; ③地壳表层之下似乎存在一层低速层; ④莫

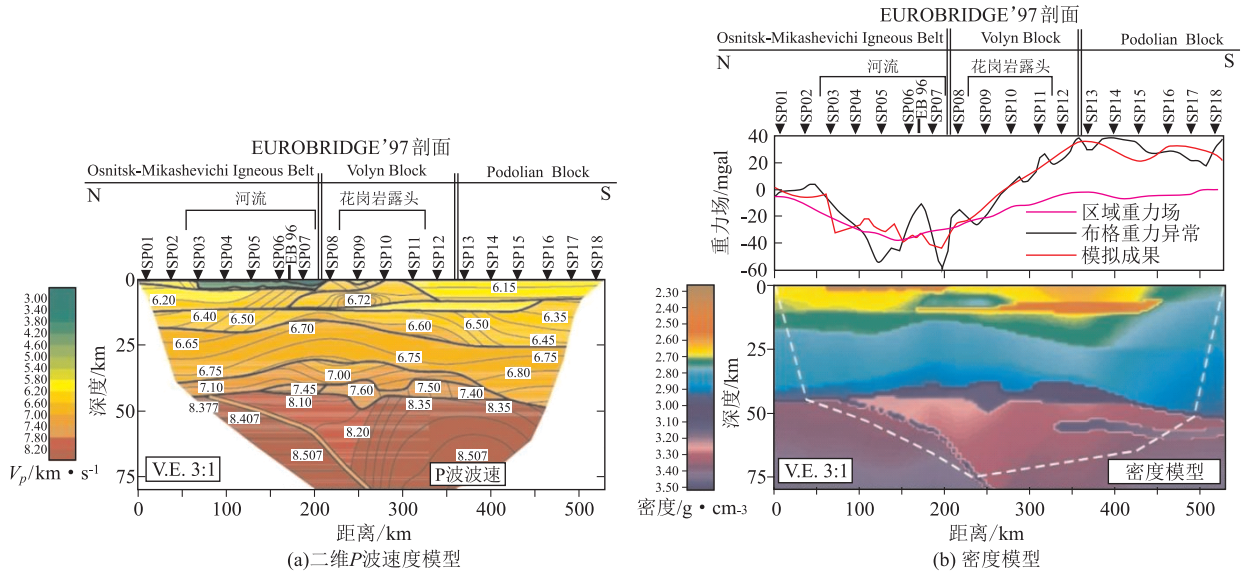


图 3 EUROBRIDGE'97 剖面<sup>[30]</sup>

表 1 川西地区 2 个代表性人工地震测深剖面地壳结构分层表

竹巴笼至资中剖面			奔子栏至唐克剖面		
地壳竖直方向 二维速度结构分层	平均速度 /km · s <sup>-1</sup>	底界面深度(高原/盆地) /km	地壳竖直方向 二维速度结构分层	平均速度 /km · s <sup>-1</sup>	底界面平均深度 /km
第 1 层	6.00	13/17	第 1 层	5.90	12
第 2 层	5.80	21~23/17(厚度为 0)	第 2 层	5.85	22
第 3 层	6.25	30/28	第 3 层	6.18	30
第 4 层	6.55	44/39	第 4 层	6.50	42
第 5 层	6.85	61/45	第 5 层	6.80	58

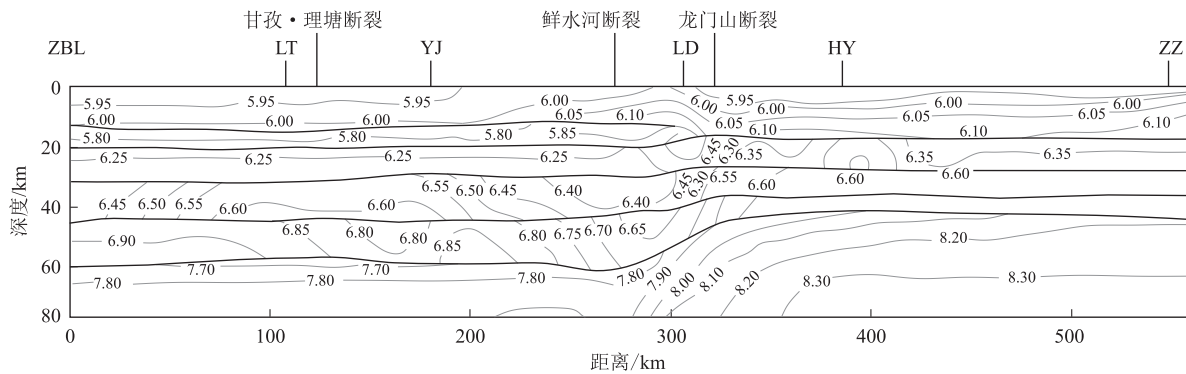


图 4 竹巴笼至资中人工地震测深剖面<sup>[32]</sup>

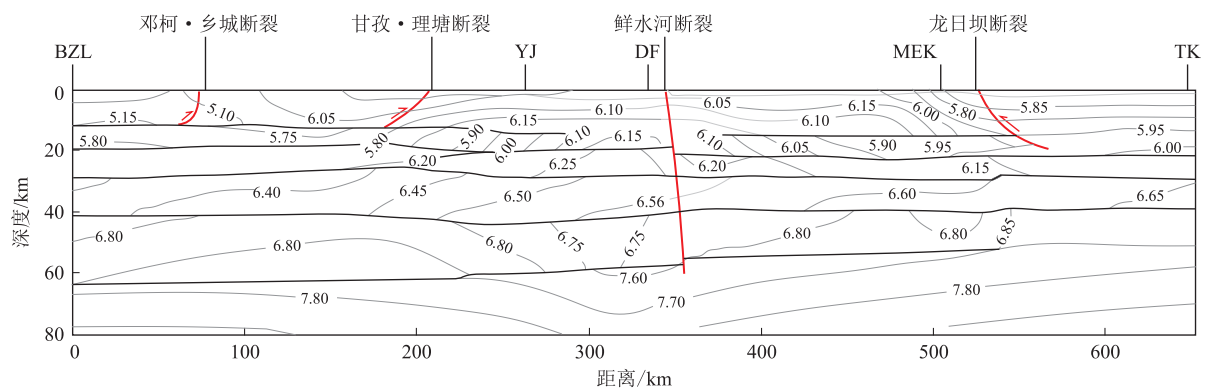


图 5 奔子栏至唐克人工地震测深剖面<sup>[33]</sup>

霍面的深度不一,竹巴笼至资中剖面东西距离约560 km,莫霍面深度分别约为40 km、60 km,短距离呈现较大的变化,特别是在龙门山地区出现了一个显著的急剧变化带,奔子栏至唐克剖面的莫霍面也有一定变化,南北相距约650 km,地壳从62 km减小到52 km,逐步变薄,在鲜水河断裂带附近也有突变。

参考其他物探测深成果,也存在类似论据,如川西高原和四川盆地地壳厚度约60~65 km和45~50 km,平均纵波速度约6.25~6.30 km/s和6.45~6.50 km/s,且均存在随深度变化的渐变过程。总之,这些成果均能够不同程度地反映地壳至地幔存在密度梯度的事实。

## (2) 关于地壳厚度不均的实测论据

地壳厚度由莫霍面的深度所决定,该面是否存在,还是属于一个过渡带,是当前研究的热点,个人观点更倾向于过渡带。地壳的厚度通常采用地球物理探测方法来间接测量、计算获取,一般如重力探测法、宽频地震探测法/折射地震法/深地震反射法两类方法。莫霍面(带)的埋深在全球不等厚,在构

造活动强烈的地区一般存在突变,且陆壳较厚、洋壳相对较薄,已经获得了大量的实测数据论证,形成了广泛共识<sup>[34-35]</sup>。张佩等<sup>[36]</sup>利用地震和重力数据联合反映了青藏高原东北缘区域的地壳厚度,获得了高原地壳厚度从内部向外逐步变薄的基本认识,青藏高原平均厚度50 km以上,最厚68 km,西秦岭地区厚度约50 km,高原周边内蒙古和四川盆地地壳的平均厚度则只有40 km左右,例如祁连山造山带厚度达到了66 km,鄂尔多斯盆地最薄处36 km,松潘甘孜地块地壳底部存在低速区的软流层;马小军等<sup>[37]</sup>采用反射波噪声干涉方法获得了相似的结论,青藏高原东北缘及周边不同块体地壳厚度差异显著,沿高原北东向地壳厚度逐渐变薄,祁连山中、西段约55~65 km,西秦岭造山带从西至东从53 km左右减小至42 km上下,阿拉善块体约50 km,鄂尔多斯块体西缘约40~45 km,六盘山断裂、海原断裂与天景山断裂附近呈现局部的地壳增厚;李长军等<sup>[38]</sup>综合前人大量的地球物理观测成果显示,在青藏高原区域,地形变化与地壳和岩石圈厚度的变化基本一致(图6),等等。

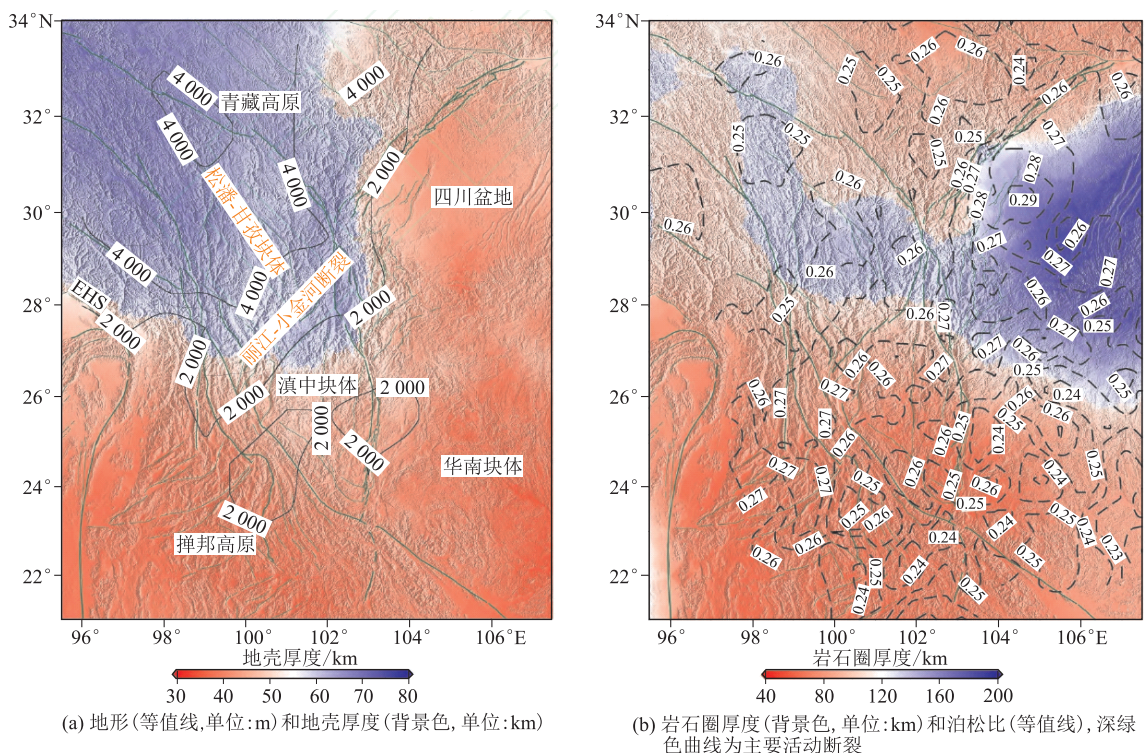


图6 青藏高原东南缘地形、地壳和岩石圈厚度<sup>[38]</sup>

前人也采用均衡模型开展了大量的莫霍面深度反演分析<sup>[39]</sup>,在均衡性较好的地区取得了较好的效果,但是不均衡地区一直是研究的难点。以本假定的观点来看,在重力均衡地区,地幔岩浆的流动性

小,而在不均衡地区,重力异常现象明显,出于重力自我补偿的需要,岩浆的流动性更大,如本文作为案例研究的川西地区,也可以反证本假定具有一定的理论合理性。

## 2 区域构造活动机制新方法研究

### 2.1 表部破裂机制分析方法

地壳层的板块运动是深部岩浆运动(流动)的结果。岩浆流动过程中发生压缩剪切变形,在岩浆层与塑性层之间产生了粘滞力→导致塑性层产生韧性剪切变形,层内形成韧性剪切带,对地壳层产生摩擦力→摩擦力作用于地壳层,驱动地壳发生水平运动,但因地壳层抗变形能力增强,在地壳层内形成剪切应力,一旦超过其抗剪强度,即产生层内破裂。

根据本假定,将中部塑性层简化,作图 7 演示破裂机制。 $k$  层内的岩浆以速度  $V_k$  流动,层内产生粘

滞剪切应力  $\tau_k = \chi_k(\sigma_k, \eta_k, \dots)$ , 其中  $\eta_k$  为层内粘滞系数,在地壳层,该剪切应力与水平应力  $\sigma_1$  存在密切的关系,因此第  $k$  层内的  $\sigma_1$  的值也可以用  $\sigma_{1k} = \lambda_k(\sigma_{1k}, v_{1k}, \eta_{1k} \dots)$  进行表达。

(1) 当地壳厚度均匀时,如图 7(1)所示,对地壳层间产生粘滞-摩擦力  $\tau_{k1} = \chi_{k1}(\sigma_{k1}, v_{k1}, \eta_{k1} \dots)$ , 该力与其所处环境的竖直方向自重正应力  $\sigma_{3k} = \sigma_{3k}(y)$  密切相关,其中  $y$  为深度函数,且因地壳被动产生运动,边界条件可视为弹簧——粘弹性体。此时,在地壳层内选取一个单元作为研究对象,它服从压剪破坏变形模式(图 8),变形破坏服从摩尔-库仑强度准则。

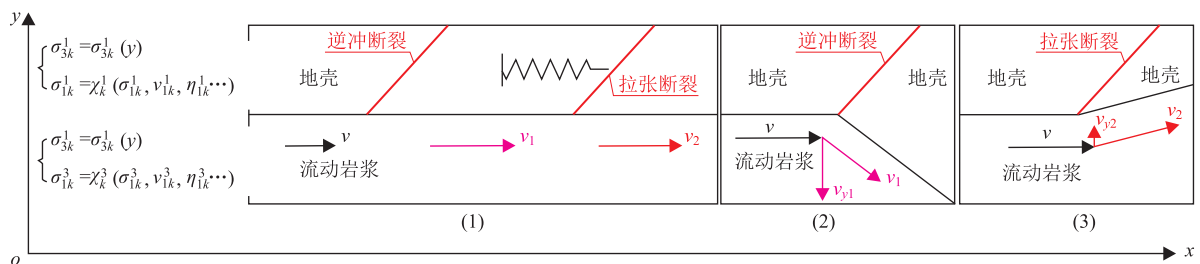


图 7 地壳表部破裂机制假定的分析模型示意图

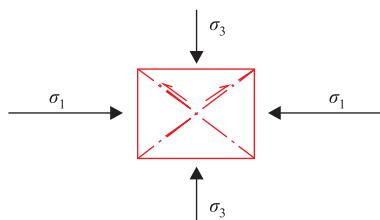


图 8 摩尔-库仑压剪破坏力学模型示意图

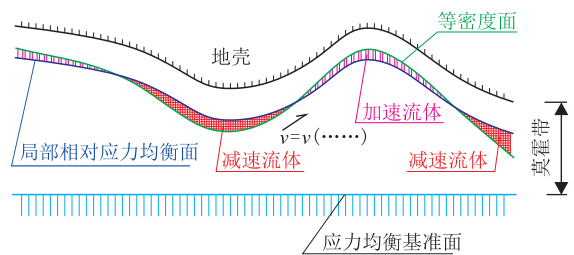


图 9 岩浆流动模型示意图

(2) 当地壳厚度变厚时,如图 7(2)所示,岩浆的流动速度  $v_1$  降低,在水平方向产生的速度分量  $v_x$  对上部地壳层产生剪切应力,在竖直方向产生的速度分量  $v_y$  加大了环境正应力  $\sigma_1$  的量值,更易造成应力集中,加速逆冲断裂的发育。

(3) 当地壳厚度变薄时,如图 7(3)所示,岩浆的流动速度  $v_1$  增大。同理,仍然为在水平方向产生的速度分量  $v_x$  对上部地壳层产生剪切应力,更加容易造成正断裂的发育。但是,在竖直方向产生的速度分量  $v_y$  降低了环境正应力  $\sigma_1$  的量值,造成逆冲断裂的可能性降低。

推论 1:以球心作等厚线图,以地壳厚度作参照,岩浆流动的方向为从厚向薄处,但产生逆冲断裂的位置为从薄向厚的急剧变化带,产生正断裂的位置为从厚向薄的穹隆中心地带(图 9)。

如图 10 所示,将各层作更细的划分,各层的变形模量均与所处的深度存在函数关系,相应的,各层

的变形距离  $L$  与竖直应力  $\sigma_1$ 、水平应力  $\sigma_3$ 、下一微观层的粘滞剪切应力  $\tau_{k+1}$ 、各层的模量等具有一定的函数关系(式 1),且液态、半液半固态、固态的模量值逐步增大。当深部岩浆产生流动时,在较长的距离上产生压缩、剪切变形,并将之传导至上一层的半液半固态区域,产生韧性剪切变形,但变形范围缩小,再传导至地壳层,变形区变得更小,但应力更加集中,产生破裂的概率变大,乃至超过其剪切强度而发生剪切破坏。因此,从剖面上看,整个的变形区域呈三角形,各层的变形范围与其应力状态、岩体(浆)密度和物质状态、下层传导的剪切应力、变形模量、埋藏深度等存在密切的关系(式 2)。

$$\begin{cases} E_k^1 = E_k^1(y) \\ G_k^2 = G_k^2(y) \\ E_{Sk}^3 = E_{Sk}^3(y) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_k^1 = f_k^1(\sigma_{1k}^1, \sigma_{3k}^1, \tau_{k+1}^1, E_k^1, \dots) \\ L_k^2 = f_k^2(\sigma_{1k}^2, \sigma_{3k}^2, \tau_{k+1}^2, G_k^2, \dots) \\ L_k^3 = f_k^3(\sigma_{1k}^3, \sigma_{3k}^3, \tau_{k+1}^3, E_{sk}^3, \dots) \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 地壳运动的动力机制分析方法

深部岩浆运动为流动,是由岩浆密度梯度的变化进行驱动的。地球深部为流动状态的存在一定密度梯度的岩浆,可能是由高压导致的熔融而产生,具有向低压状态运动的趋势,由此产生流动。

地壳至地幔的各层不是 2 个或 3 个相对均一的密度带,而是在逐步变大的围岩压力下,形成了一定

的密度梯度的渐变带,并且温度逐步升高。理论上讲,当围压足够大,超过物质的熔点时,物质将转变为液态,当然此时的液体与高温常压下的熔融液态存在很大的区别,其密度比固态时更大,状态不稳定,向密度更低、围压更小的状态发展趋势明显。因此,有向地壳厚度更薄的穹隆位置运动的天然属性,这是岩浆产生流动的主要动力机制,也是岩浆流动的内动力机制。本机制可与前文的推论形成理论闭环,这也可以解释为什么地球物理探测发现地壳厚度不断发生变化。

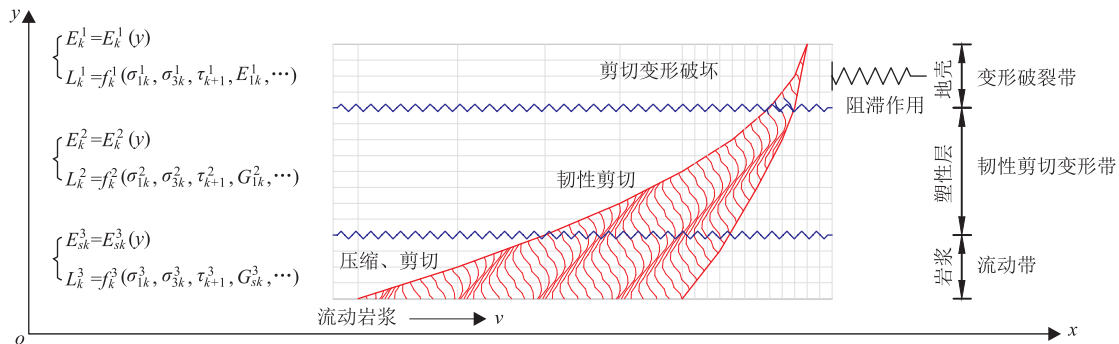


图 10 基于假定的韧性剪切模型示意图

推论 2: 岩浆运动是由“流动势”所驱动的。即由密度大(围压大)的区域向密度小(围压小)的区域流动时,流动过程中因围压的变化,密度将会随之降低,速度将会随之变大,此为主驱动;反之,则密度增大、速度变小,此为被动驱动;其流动表现可能均为层流。因此,地壳至地幔的密度梯度是恒定存在的,但同一深度的密度是不断变化的,因此密度梯度的值是变化的。并且,只要有密度梯度存在,则“流动势”将存在,岩浆的流动将会“自发”的进行。

## 3 基于新方法的示范案例:川西地块活动特征研究

### 3.1 川西地块的地壳厚度及形态

据刘玉法等<sup>[40]</sup>地壳厚度等值线,如图 11(a)所示(单位:km)。新龙以西地壳厚度最大且呈岛状,深度达 70 km,向东南方向逐次减薄至 40 km 左右,且各地不均衡。

(1) 小金和马尔康以西的毛日坝、马尔康东北部、九龙县至沙德乡之间出现向地心凸起的 3 个岛状,甘洛和金阳及大山包景区出现 1 个带状增厚区,增加值分别约 4 km、3 km、5 km、12 km,长轴走向分别约 N22°W、N72°E、S41°E、SN 向,长度分别约 70 km、130 km、50 km、215 km。

(2) 小金至宝兴、磨房沟一带,稻城东北部至亚

丁、雅砻江镇一带,冕宁向南至金河乡、西昌至攀枝花一带,瓦屋山至乐山、眉山、邛崃、雅安一带出现 4 个倒槽状、倒撮箕状的地壳减薄区,减薄厚度值分别约 8 km、2 km、10 km、12 km,撮箕口指向分别为 S44°E、S55°E 转 S23°E、S7°W、N47°E 转 N76°E,其长/短轴的值分别约 100/56 km、150/52 km、≥160/200 km、≥200/75 km。

(3) 雅江至新龙县子拖西乡一带出现地壳减薄的穹隆,规模约 99 km×86 km,减薄值约 4 km。

(4) 道孚至乾宁(惠远寺)东北隐约出现一地壳增厚带,泸定至石棉、冕宁一带地壳减薄。

### 3.2 地块深部的岩浆流动分析

根据本文提出的新方法,结合图 11(a)可得出如图 11(b)所示的成果:

(1) 地壳厚度由西北向东南逐步减薄,因此总体的流动方向与此一致,大部分为加速区(深色箭头所示)。

(2) 区域的 NW-SE 方向存在规模性的阻力线,宽度约 50~150 km,形成了“∩”字形岩浆流速降低区(浅色箭头所示):位置为由区域西北部毛日坝西北开始,至道孚、康定,延伸至石棉、越西、金阳、大山包一线,原因为道孚至乾宁东北椭圆形地壳增厚,泸定至石棉、越西、冕宁一带地壳减薄的速率变缓,梯度降低,越西至昭觉、金阳至大山包哑铃状地壳增厚。

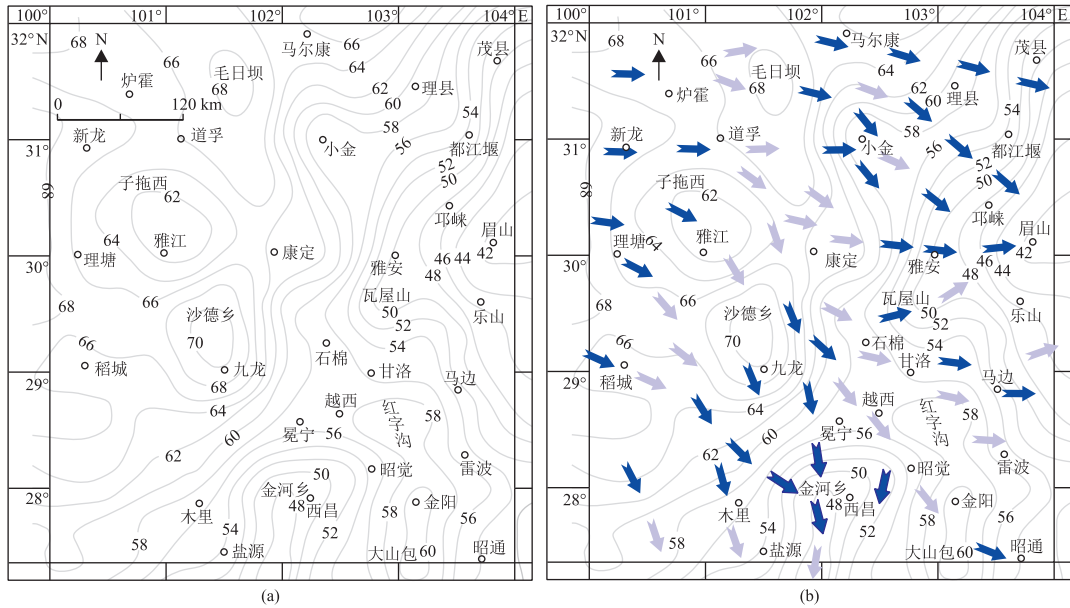


图 11 川西地块地壳厚度等值线(a)及地下岩浆流动趋势(b)分析图

(3) 局部存在小范围的流速降低区:沙德乡至九龙岛状地壳增厚形成阻力线;小金至宝兴、磨房沟一带,稻城东北部至亚丁、雅砻江镇一带,瓦屋山至乐山、眉山、邛崃、雅安等 4 个倒槽状、倒撮箕状的地壳减薄区的槽谷带,地壳减薄的速率变缓、梯度降低,形成阻力线。

(4) 局部存在相对平稳区:马尔康至毛日坝东北、康定、九龙、木里、盐源一线西北,地壳厚度梯度变化小,岩浆流动相对平稳,该线东南,梯度增加显

著,岩浆流动速率明显加大;雅江至新龙县子拖西乡地壳减薄的穹隆区规模小,减薄值小,亦为岩浆活动相对平稳区。

### 3.3 岩浆流动与区域应力场和断裂构造的关系

根据前人研究成果的相关资料<sup>[41-43]</sup>,以及区域地质资料,绘制了区域应力场和 GPS 地表位移图和断裂构造分布图,参见图 12 的底图,并结合本文提出的假定,开展岩浆流动与区域应力场、大地位移、断裂构造活动的相关关系分析,结果如图 12 所示。

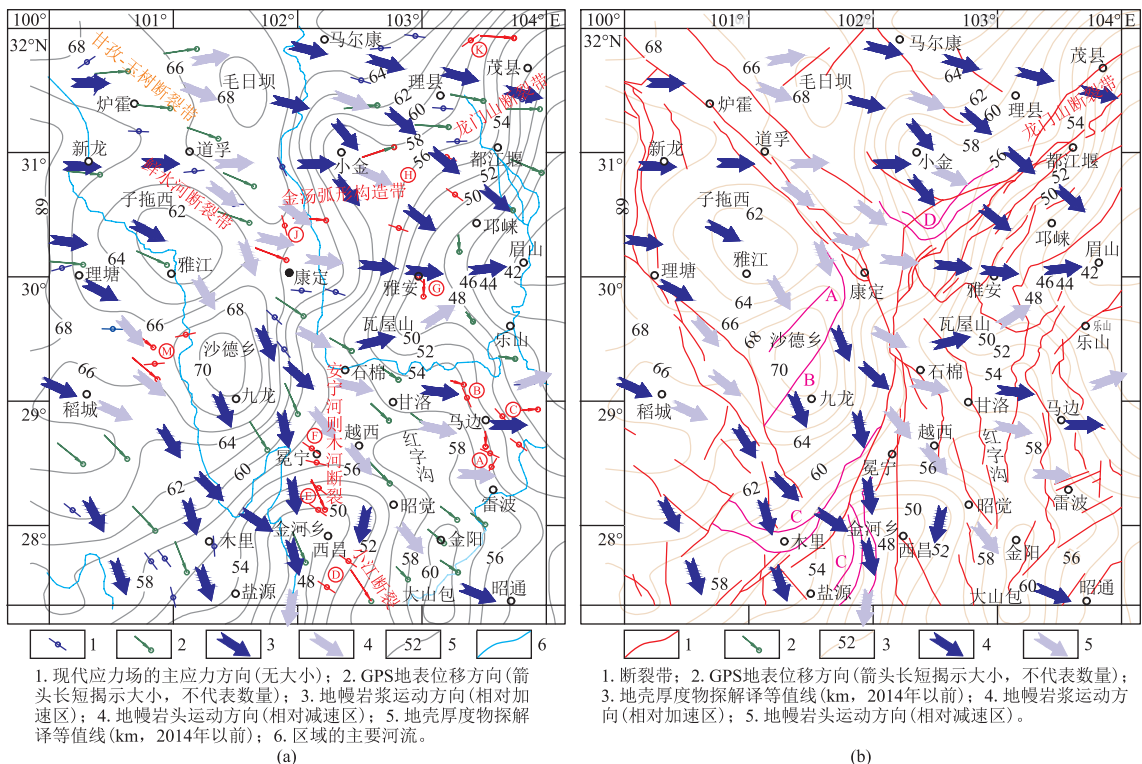


图 12 岩浆流动与区域应力场、断裂活动的关系分析图

### 3.3.1 岩浆流动与区域应力场的关系

由图 12(a)可知,区域应力场的方向与 GPS 大地位移的方向总体趋势一致,但在局部存在较大的差异,而岩浆流动方向与 GPS 大地位移的方向差异性则小得多,总体具有以下规律:

(1) 马尔康至毛日坝东北、康定、九龙、木里、盐源一线西北,地壳厚度梯度变化小的区域,区域应力场的方向与 GPS 大地位移的方向表现出高度的一致性,仅在九龙至沙德乡这个圆形的地壳增厚带西北,它们的方向发生明显的差异性偏转,参见图 12(a)的⑭点。

(2) 该线东南虽然地壳厚度变化大,但在梯度均匀变化的范围,区域应力场的方向与 GPS 大地位移的方向表现出高度的一致性,表现出明显差异性的主要有 3 个小的类别:①地壳厚薄变化梯度的二阶导数驻点范围,即梯度变化剧烈→变化小→变化剧烈这个过程中的变化小这个区域,如图 12(a)所示的⑮⑯⑰⑱点;②倒槽状、倒撮箕状,以及宽缓穹隆的地壳减薄区中,其顶部及两侧梯度变化小的范围,如图 12(a)所示的⑲⑳点;③岩浆流动方向上岛状地壳增厚区的背面,如图 12(a)所示的㉑㉒点。并且,若区域内岩浆流动方向稳定,则主应力方向与大地位移方向的夹角为锐角,并与总体流动方向一致,如图 12(a)所示的⑲⑱⑳点等;若流动方向不稳定,则夹角不稳定,主应力方向与大地位移方向的夹角不稳定,如图 12(a)所示的㉑㉒㉓㉔㉕点等。

综上,岩浆流动与区域应力场的方向与 GPS 大地位移的方向存在密切的关系,初步推断,区域主应力方向为流动产生次生压应力的合力方向,大地位移方向为流动方向合矢量方向。

### 3.3.2 岩浆流动与断裂构造的关系

由图 12(b)可知,因地壳深度和形态原因,岩浆运动速率、方向均有一定的规律,反射至地表所导致地表位移、应力积累呈现出较好的规律性,因此地表破裂也具有较好的规律性。

(1) 毛日坝及炉霍以北,至道孚、康定南存在阻滞带,并由于流动前方存在隐形岛状增厚区,便于蓄积较高地应力,反射至地表呈现压缩、走滑特征,且以走滑为主,力学模式为压剪;石棉、越西、昭觉、大山包一线区域也存在阻滞带,但总体处于阻力降低区,地壳厚度梯度变化缓慢、均匀,不利于应力积累,反射至地表呈现压缩、走滑特,并以压缩为主,力学模式也为压剪。

(2) 宝兴、芦山至茂县一带整体处于阻力降低区,但因为地壳厚度梯度变化和向成都地区汇流趋

势,且成都为一个大型的穹隆区域,为隐形阻滞区,加之小金槽型地壳减薄区导致两侧边缘流动加速等综合作用,因此,区域上呈现明显压缩,走滑特征不明显,便于蓄积高地应力,地表破裂具有明显的逆冲特点;宝兴西至大川镇因岩浆流动趋势的交汇,略呈伸张状态,力学模式为拉张,但不利于应力积累,大川镇至都江堰略有压缩,但应力积累有限,应力积累高、发展快的区段位于都江堰北东向的区域。

(3) 冕宁、西昌以南呈现明显的拉张、左旋走滑特征,力学模式为剪切,地应力蓄积有限。

(4) 木里一带具有较强的压缩特征,木里至冕宁西、木里至稻城南则呈现剪切走滑特征,力学模式为压缩和压剪,均便于蓄积更高地应力;理塘至木里则因为地处雅江穹隆和九龙岛状增厚区的边缘,影响小,不便于应力积累,地表破裂呈现左旋走滑特点。

(5) 因为九龙岛状增厚区的存在,北西流动速率降低,南东流动速率增加,沙德存在一个明显的可以蓄积较高应力的压缩区,地表破裂为逆冲,如图 12(b)的 A 所示;九龙县城及西北存在一个明显的拉张应力蓄积区,加之雅江穹隆、康定隐形阻滞区的作用,在康定以西可以蓄积较高应力,力学模式以压剪为主,地表破裂呈现走滑为主、兼有逆冲的特点,九龙县城一带则以拉张为主,表现为正断层,两相联结形成了一个奇特的同期发育的“L”形断裂,如图 12(b)的 B 所示;类似的机制还有木里-盐源、宝兴这两个区域的断裂构造,如图 12(b)的 C、D 所示的位置。

(6) 川西“Y”形构造的中心部位(泸定至石棉区域)呈现剪切压缩特征,也是北部走滑压缩断裂和南部走滑断裂的分界。

综上,岩浆流动与区域断裂构造活动存在密切的关系,为断裂构造活动的动力源,可以用地质力学机制解释断裂的地表破裂特征和破裂机制。

## 4 结论及展望

(1) 本文基于 G. B. Airy 提出的地壳均衡假说模型,改进提出了自重应力场地壳均衡模型,以及地壳板块运动的动力源和动力机制假定,认为地壳层的板块运动是深部岩浆运动(流动)的结果,深部岩浆运动主要为层流型流动,是由岩浆密度梯度的变化进行驱动的,并且岩浆密度随深度而变化。在此基础上,分析提出了地表破裂、板块运动等 2 个力学机制,提出了区域构造活动机制研究的新方法。

(2) 应用本文提出的新方法,以川西地块为例,

开展了岩浆流动与区域应力场、大地位移、断裂构造活动的相关关系分析,推断岩浆流动与区域应力场的方向与GPS大地位移的方向存在密切的关系。区域主应力方向为流动产生次生压应力的合力方向,大地位移方向为流动方向的合矢量方向,岩浆流动为断裂活动的动力源,满足相应的地质力学机制,能够较好地解释区域应力场的方向、GPS大地位移的方向,以及这两个方向之间存在差异的原因,也可以较好地解释区域典型断裂活动构造的形态和活动性。分析结果与实际情况吻合度较好,可以初步从理论上论证新方法的可行性。

(3) 新方法和改进的假定模型还很粗糙,科学性还很欠缺,希望与行业研究者、爱好者共同努力,还需要进一步从理论上研究证明其客观科学性,也需要进一步结合更多的区域应力场、大地位移、断裂活动构造案例进行分析,以及地壳不均衡地区构造活动与莫霍面深度的关系,论证其可行性合理性。

#### 参考文献

- [1] 张国伟,郭安林,董云鹏,等. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学[J]. 地学前缘,2011,18(3):1-12.
- [2] 陈茜. 板块构造样式的演化及其对地幔热状态的影响[D]. 青岛:中国科学院大学(中国科学院海洋研究所),2021.
- [3] 刘光莲,张爱奎. 地球科学发展趋势的思考——以地球动力学和超大型矿床形成机制为例[J]. 科技导报,2015,33(11):114-119.
- [4] 岳来群. 试论当今地球科学的某些新进展及其现实意义[J]. 福建地质,2000,19(3):153-160.
- [5] 滕吉文,宋鹏汉,毛慧慧. 当代大陆内部物理学与动力学研究的导向和科学问题[J]. 中国地质,2014,41(3):675-697.
- [6] 马宗晋,高祥林. 大陆构造、大洋构造和地球构造研究构想[J]. 地学前缘,2004,11(3):9-14.
- [7] 张国伟,郭安林,董云鹏,等. 深化大陆构造研究发展板块构造促进固体地球科学发展[J]. 西北大学学报(自然科学版),2009,39(3):345-349.
- [8] 郑永飞,郭正堂,焦念志,等. 地球系统科学研究态势[J]. 中国科学:地球科学,2024,54(10):3065-3090.
- [9] 刘少峰,程三友,张会平,等. “地球动力学”的研究现状与展望——第32届国际地质大会研究成果综述[J]. 现代地质,2004,18(4):404-414.
- [10] 梅迁,曲宏略,黄雪,等. 地震波传播特性研究综述[J]. 工程建设与设计,2020,(4):10-12.
- [11] 张冰,钟卫星,周铭,等. 多种地震方法探测青藏高原东北缘地壳上地幔结构的研究进展[J]. 地球物理学进展,2015,30(4):1507-1515.
- [12] 赵书栋,宋建国,雷刚林. 基于地震波波形相似的薄互层识别方法[J]. 石油地球物理勘探,2024,59(1):133-141.
- [13] 李灿苹,刘学伟,王祥春,等. 地震波的散射理论和散射特征及其应用[J]. 勘探地球物理进展,2005,28(2):81-89,9.
- [14] 李哲. 高精度绝对重力测量仪器与应用研究[D]. 北京:清华大学,2016.
- [15] 慕志江. 海洋矢量磁测仪姿态测量技术与数据归算方法研究[D]. 三河:防灾科技学院,2023.
- [16] 孙林松. 我国近几年重力测量进展情况综述[J]. 国际地震动态,1988,(10):8-14.
- [17] 席继楼. 地电场观测方法与观测技术研究[J]. 地震地磁观测与研究,2019,40(2):1-20.
- [18] 李忠海,崔起华,钟辛易,等. 大陆动力学数值模拟:问题、进展与展望[J]. 地质学报,2021,95(1):238-258.
- [19] 应舒畅. 基于python的分子动力学模拟程序编写及应用[J]. 电子测试,2019,(14):52-54.
- [20] 铁志杰,高才生,邢梯良. 某些微量元素地球化学行为的高温模拟研究及其应用[J]. 地球化学,1986,(1):90-96.
- [21] 袁家义. 海底扩张说与板块构造[J]. 海洋科技资料,1978,(5):52-62.
- [22] 梁光河. 大地构造演化模式创新[C]//中国地球物理学会. 2023年中国地球科学联合学术年会论文集——专题八十三深地过程与地球宜居性、专题八十四地球流体系统及其资源、环境和灾害效应. 中国科学院地质与地球物理研究所,2023:1.
- [23] 梁光河. 如何揭示板块运动动力机制[C]//2021年中国地球科学联合学术年会论文集(二十六)—专题七十六地球流体系统及其资源、环境和灾害效应、专题七十七特提斯—青藏高原地质演化与成矿、专题七十八中亚造山带构造演化、深部过程与成矿作用. 中国科学院地质与地球物理研究所,2021:4.
- [24] 陈凌,王旭,梁晓峰,等. 俯冲构造 vs. 地幔柱构造——板块运动驱动力探讨[J]. 中国科学:地球科学,2020,50(4):501-514.
- [25] 梁光河. 板块运动动力机制及地球物理证据[C]//中国地球物理学会. 2023年中国地球科学联合学术年会论文集——专题六十六陆陆碰撞带深部结构和动力学意义、专题六十七板块构造和地球动力学过程. 中国科学院地质与地球物理研究所,2023:2.
- [26] 梁光河. 大陆板块漂移是海底扩张驱动的吗?——从地球物理资料得到的启示[C]//中国地球物理学会,全国岩石学与地球动力学研讨会组委会,中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会,中国地质学会区域地质与成矿专业委员会. 2014年中国地球科学联合学术年会—专题39:板块与大陆构造前缘论坛论文集. 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院矿产资源研究重点实验室,2014:1.
- [27] 高锐,熊小松,李秋生,等. 由地震探测揭示的青藏高原莫霍面深度[J]. 地球学报,2009,30(6):761-773.
- [28] 代宏睿. 川西藏东地区重磁处理解释与地壳结构研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.
- [29] 闫足,马杰,徐明喆,等. 引入地壳均衡模型的重力梯度图的制备方法[J]. 地球物理学进展,2014,29(02):603-609.
- [30] E Kozlovskaya, T Janik, J Yliniemi, et al. 由 EUROBRIDGE'97 地震剖面的 P 波与 S 波速度模型和重力数据得到的岩石层上部密度—速度关系[J]. 世界地震译丛,2012,(2):33-48.
- [31] YEGOROVA T P, STAROSTENKO V I, KOZLENKO V C, et al. Lithosphere structure of the Ukrainian Shie-ld and Pripjat Trough in the region of EUROBRIDGE-97 (Ukraine and Belarus) from gravity modelling [J]. Tectonophysics, 2004,381(1):29-59.

- [32] 王椿镛, 吴建平, 楼海, 等. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2003, 33(S1): 181-189.
- [33] 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平, 等. 松潘-甘孜造山带地壳速度结构[J]. 地震学报, 2003, 25(3): 229-241, 342.
- [34] 符伟, 侯贺晟, 杨璠, 等. 莫霍面: 距离人类生活最近的全球性分界面[J]. 中国矿业, 2018, 27(S1): 418-420.
- [35] 马小军, 吴庆举. Moho 反射波噪声干涉方法及其在青藏高原东北缘地壳结构成像的应用初探[J/OL]. 地球与行星物理理论评(中英文), 1-15[2024-10-25]. <https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-018>.
- [36] 张佩. 利用地震和重力数据联合反演青藏高原东北缘区域岩石圈精细结构[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2023.
- [37] 马小军, 吴庆举. Moho 反射波噪声干涉方法及其在青藏高原东北缘地壳结构成像的应用初探[J]. 地球与行星物理理论评(中英文), 2025, 56(2): 167-181.
- [38] 李长军, 王洋, 刘丽军, 等. 青藏高原东南缘岩石圈变形特征及其深部动力学过程[J/OL]. 中国科学: 地球科学, 1-26[2025-01-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5842.P.20241016.0917.004.html>.
- [39] 邢健, 郝天珧, 徐亚, 等. 均衡模型在莫霍面反演中的应用综述[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 61-72.
- [40] 刘玉法, 何强, 亢川川. 雅康高速公路康定过境连接线工程场地地震安全性评价报告[R]. 四川赛思特科技有限责任公司, 2015.
- [41] 张荣斗, 黄丁发, 廖华, 等. 基于 GPS 的四川地区现时地壳形变分析[J]. 测绘科学, 2008, 33(6): 30-32.
- [42] 徐锐, D Sarah Stamps, 黄圣睦. GPS 资料获取的四川地区应变率演化状态[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 344-350.
- [43] 白卓立, 张学刚, 薛二峰, 等. 基于 GPS 速度场的四川地区 1999~2018 年应变场特征演化分析[J]. 地质科学, 2020, 55(4): 1315-1326.

## 《地质灾害与环境保护》征稿启事

本刊主管单位: 四川省教育厅; 主办单位: 成都理工大学、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室。学术性期刊, 季刊。1990 年 9 月创刊, 国内外公开发行。本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”, “万方数据网络系统(ChinaInfo)数字化期刊群”, “中文科技期刊数据库”。欢迎投稿, 欢迎订阅。

**征稿内容:** 自然灾害(特别是地质灾害)与人为灾害防治, 生态环境、资源环境和地质环境保护, 水文地质与工程地质, 岩土工程与工程勘察, 与本学科有关的边缘和交叉学科等方面的优秀论文, 最新科技成果, 新理论、新方法、新技术研讨, 及工程技术经验总结, 新成就、新动向方面的综述、述评, 新书刊、新设备评介等。

### 来稿注意事项:

(1) 文章正文应主题突出, 数据翔实可靠, 论点正确, 图件清晰。

(2) 每篇稿件必须有: 中英文篇名、摘要(摘要以第三人称书写)、图表名, 所在单位中英文名称; 第一作者简介, 主要包括: 姓名、性别、出生年、职务、职称, 最高学历、专业、研究方向, 主要科技成果及其获奖情况, 以及出版专著、发表论文等简况。

(3) 来稿可电子邮件投稿, 地址: [dzzh@cdut.edu.cn](mailto:dzzh@cdut.edu.cn), 也可在线投稿: [https://cont.cdut.edu.cn/jx\\_dzzh](https://cont.cdut.edu.cn/jx_dzzh)。

《地质灾害与环境保护》编辑部

2025 年 3 月 25 日