

青藏高原山地系统动力学模型研究

毕思文

(中国科学院遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101)

摘 要: 以地球系统科学为研究思路, 研究了青藏高原山地系统各圈层相互作用的统一构造动力模型、力学模型和数值模拟等。关于青藏高原山地系统动力学特征, 主要研究高原山地系统现今构造应力场演化特征和高原山地系统统一构造动力模型, 认为均起源于喜马拉雅运动期印度—欧亚板块碰撞引发的统一的板块汇聚动力体系和各圈层与之相应的一系列运动学和动力学过程。关于青藏高原山地各圈层力学系统描述, 主要把山地各圈层块体质点作为一个力学系统来描述, 求解速度向量、位移向量、密度场、温度场、应力张量等物理量和状态空间, 最后求解运动方程。关于青藏高原山地系统的非稳定性问题, 将给定的载荷历史分成许多小的增量步, 对每一个增量步求解一个非线性边值问题。使用失稳量准则判断山地系统的稳定性。关于青藏高原山地各圈层多体系统力学描述, 青藏高原是由多圈层多块体不同物质结构组成的, 皆可用若干塑性、流变体、流体和弹性组成的系统模型予以有效地描述。主要研究内容有: 高原山地系统碰撞隆升的分类和现象、山地主动碰撞构造体特性和山地被动碰撞体(靶体)特性等力学模型。文中初步分析和推断了演变的历史与现状, 探讨了青藏高原隆升的动力学过程。

关键词: 青藏高原; 山地系统; 各圈层统一相互作用; 动力学模型

中图分类号: P55

文献标识码: A

1 青藏高原山地系统动力学特征¹⁾

笔者根据所提出的统一构造理论基础^[1~6]以及青藏高原山地系统构造特征的大面积特高的地势、青藏高原的构造系统、岩石圈明显的层块结构、青藏高原是由多体地块拼合的大陆、岩浆岩具有明显的时空演化规律、高原地壳具有不同的变形特征、高原各地块具有一定的漂移规律、高原岩石圈热结构具有南北不均一性、高原岩石圈具有纵横方向不均一性、高原地壳具有一定的磁场特征、重力异常所反映的构造特征和印度板块的持续北移等 12 个方面进行研究^[7~29], 认为大陆碰撞之后, 印度次大陆并没有因此而停止其向北的运动, 时至今日, 这一状态并无多大改变。由于印度次大陆主动的持续北移, 必然以巨大的力量推挤喜马拉雅和青藏高原; 然而, 印度次大陆推挤着青藏高原向北运动过程中在北部遇到了塔里木、华北以及西伯利亚等刚性地块的被动抵

阻, 这样对青藏高原来说实际上就处于南北向的巨大挤压应力作用下。目前无论从地震震源机制解还是其它各种地球物理场资料以及地质上的各种证据都符合上述这一统一应力场。但由于高原岩石圈各圈层结构复杂, 同时随着变形的发展, 不同的时空尺度、不同阶段物质的性质也在改变。因此, 即使在这一统一应力场中, 其表现形式也是多种多样的。

1.1 高原山地系统现今构造应力场演化特征

青藏高原是新生代以来印度板块向北推挤欧亚板块、地壳缩短、加厚、隆升的结果, 在持续强大的板块间汇聚作用下, 在高原的周边形成了一系列强度和规律均十分可观的走滑或逆冲活动断裂, 并导致破坏性地震频繁发生, 这里是中国大陆内部块体间相互协调运动的纽带, 是对青藏高原现今构造运动反映敏感的地区。通过断层滑动资料反演的构造应力场, 与地壳均衡作用产生的地壳加厚、减薄过程分析相结合, 探讨了青藏高原的圈层断裂运动及地壳动力作用过程。其基本特征是: (1) 由断层滑动资料

收稿日期: 2001-02-13, 改回日期: 2001-04-30。

基金项目: 中国博士后科学基金一等资助。

作者简介: 毕思文(1956—), 男, 山东济南人, 博士后, 研究员, 构造地质学、固体力学专业, 主要从事青藏高原构造地质与区域地质、地球系统力学与数值模拟研究。

1) 毕思文, 青藏高原大陆碰撞各圈层统一相互作用研究, 博士后研究报告, 清华大学力学系, 1999 年 12 月。

确定的青藏高原现代构造应力特征,与由震源机制解资料和原地应力测量所得结果有着较好的一致性,这种一致性反映了该区构造应力场作用自早更新世末期以来是持续稳定的^[27,32]; (2)现代构造应力场作用以水平挤压为主,绝大多数由断层滑动资料确定的构造应力张量的最大主应力轴和震源机制解的P轴是近水平的,应力张量结构多为走滑型^[32~35]; (3)青藏高原现代构造应力场的变化趋势表现出较好的稳定性,其最大主压应力方向从北西向东南,呈现出由北北东方向逐渐偏转为南南东方向的变化趋势; (4)现代构造应力场分区特征不仅表现在应力作用方向上不同,而且也表现在应力张量结构上的不同,青藏高原北、东缘主要为走滑应力区和逆断型应力区^[33~36]; (5)现代构造应力场主压应力方向相对第四纪早期构造应力场发生了顺时针方向的旋转。

综上所述,可概括为以下几点: (1)青藏高原第四纪经历两期主要的构造引力场作用。第1期大约在中新世中晚期至早更新世末期,构造应力场的主要特征为最大主压应力作用于垂直高原边界的方向上,应力场结构以逆断型为主;第2期自早更新世末期以来至今,也即现代构造应力场。其最大主压应力方向相对早期构造应力场发生了顺时针方向的旋转,应力场结构以走滑型为主。 (2)青藏高原及周边地壳形变分析表明,印度板块对青藏块体的推挤作用穿过青藏块体北缘继续向北延伸,而在青藏块体的南东边缘,由于受青藏块体大幅度北移的影响,在其东侧形成了北西—南东的局部拉张。 (3)构造应力场的演化和地壳形变分析较好地解释了青藏高原北、东边缘的地壳动力作用过程。早期在青藏高原北、东缘主要受来自印度板块碰撞青藏块体产生的垂直块体边界方向的挤压,尤其在高原东部产生强大侧压;后期高原内部块体横向挤出,在高原东侧受地壳减薄产生拉张的诱导,东缘块体向东、南东方向迁移。

1.2 青藏高原山地系统统一构造动力模型

由地壳运动观测结果可以看出^[30, 37~40],青藏高原物质存在向北东及南东方向逸出的运动趋势。在高原物质运动的影响下,川滇菱形块体向南东运动的速率约为16mm/a。华南地块主要承受着青藏高原向东挤压作用的影响,以及菲律宾海板块北西向的较弱挤压作用。其块体的整体运动方向向东,应力场的水平向主压力方向也基本上是这个方向。此

外,青藏高原的重力势能对应力场及应变场的影响也是不能忽略的。青藏高原内部正断层活动大约是从8(±3)百万年前开始(Molnar et al., 1993)。正断层活动说明在该时间,高原的海拔高度发生明显的抬升。England和Houseman(1988, 1989)为解释高原快速抬升的机制,认为印度洋板块的挤压,导致欧亚板块岩石圈整体增厚,形成凸进软流层的岩石圈根。因岩石圈上地幔组成与软流层相近,在同一深度处较冷的岩石圈层根部物质的密度要大于软流层物质。随着岩石圈根的不断增长,冷的岩石圈根的负浮力导致其不稳定性,致使岩石圈根部与上部剥离而深入软流层。原来岩石圈根部位置的密度突然降低,产生了一个大浮力托举岩石圈整体上升快速抬升。如果在重力均衡之外确实存在这样的岩石圈底部浮力作用,则在高原表面抬升时,不再需要巨大的水平向压应力。研究结果表明,印度洋板块仍然以平均50mm/a的速度向欧亚板块挤入,据此可以认为,目前青藏高原仍承受着印度洋板块水平方向的挤压作用,但挤压力可能要比以前设想的小一些。这样,地壳山根浮力(均衡作用结果)、岩石圈底部浮力和水平方向边界力共同作用,维持了青藏高原平均海拔5km高地势的继续抬升,同时软流层也有向东流出的趋势。而高原地壳则处于拉张减薄状态。同时,青藏高原表面的垂直变形图像,亦同时被用来约束边界条件的调整。总体上,西伯利亚板块的约束和印度板块的北上形成了中国陆内一系列走滑造山带和盆地^[41],在整体上构成协调一致的统一应变场。

所以,青藏高原无论是多种变形方式和多种热源(汇)项;多种地质特征和多种抬升相关过程,三维变形机制和三个垂向变形层次、或三分式壳幔热结构,还是两大演化系列和两套力系、多种隆升机制、方式和阶段。均起源于喜马拉雅运动期印度—欧亚板块碰撞引发的统一的板块汇聚动力体系和各圈层与之相应的一系列运动学和动力学特征。

2 青藏高原山地各圈层力学系统描述

一个圈层块体质点的集合称为一个力学系统。如果这个集合的状态可以用有限个随时间变化的参数来描述(例如有有限个块体质点或有限个刚体组成的系统),则称为有限自由度系统,反之称为无限自由度系统或连续系统。

对于有限自由度系统,通常引进广义坐标

$X_i(t)(i=1, 2, \dots, m)$ 和广义速度 $\dot{X}_i(t)(i=1, 2, \dots, m)$ 来描述。有时采用广义动量 $P_i(t)$ 来代替 $\dot{X}_i(t)$, $(X, P) \in R^{2m}$ 称为相空间, 这里 $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$, $P=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ 。

对于无限自由度系统, 设它在初始时刻 $t=0$ 时占据三维空间的区域 Q 。用 $X=(x_{01}, x_{02}, x_{03}) \in R^3$ 表示 Q 中的质点, 这里 X 可以用通常的曲线坐标来描述。它在 t 时刻在曲线坐标的位置为

$$X(X_0, t) \in R^3 \tag{1}$$

在 t 时刻所有 X 占据的区域为 $Q_t \subset R^3$, 称为位形空间。相应的速度为

$$\dot{X}=\dot{X}(X_0, t) \tag{2}$$

位移为

$$u=u(X_0, t)=X(X_0, t)-X_0 \tag{3}$$

一个连续的力学系统的位置函数、连同描述它的力学状态的其他物理量如速度向量、位移向量、密度场、温度场、应力张量等等构成了它的状态空间。状态空间一般记为

$$Z=\{X, \dot{X}, \mu, \dots, t \in T, X \in Q\} \tag{4}$$

无论是对有限自由度力学系统还是对连续力学系统, 所引入的描述变量在构成相空间或状态空间时都将服从一定的物理规律, 即它们之间满足一定的关系, 这些关系体现为一组方程, 称为运动方程。

3 青藏高原山地系统的非稳定性问题

将问题简化为准静态的, 用增量方法研究山地系统的稳定性问题需要将实际的载荷路径或历史分成许多小的载荷增量步, 逐步地对每一个增量步求解。现在考虑一个典型的增量步。在这个步长的开始, 山地体内的应力 σ , 应变 ϵ , 间断面的位移间断量 $\langle u \rangle$, 以及山地材料的结构和间断面已有变形历史的各种内状态变量都是已知的。这时相对应的渗透压力和渗水参数分别记为 q 和 η 。在这个增量步内, 在边界 ST 上给定外载增量 dp , 在边界 S_n 上给定位移增量 du_0 , 在山地体内给定体力载荷增量 df , 已知渗透压力和渗水参数的增量为 dq 和 $d\eta$ 。我们要确定的是山地体内的应力增量 $d\sigma$, 应变增量 $d\epsilon$, 位移增量 du , 间断面内的应力增量和位移断增量 $d\langle u \rangle$, 以及相应的各内状态变量的增量。待求的各外变量增量应满足以下三方面条件:

(1)平衡条件

$$\text{在山地体 } V \text{ 内: } Ld\sigma + df = 0 \tag{5}$$

$$\text{在间断面 } \Gamma \text{ 上: } L_1 d\sigma^+ = L d\sigma^- = d\sigma^- \tag{6}$$

$$\text{在边界 } S_T \text{ 上: } L_2 d\sigma = dP \tag{7}$$

其中

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$L_i = \begin{bmatrix} l_i & 0 & 0 & 0 & n_i & m_i \\ 0 & m_i & 0 & n_i & 0 & l_i \\ 0 & 0 & n_i & m_i & l_i & 0 \end{bmatrix} \quad i=1, 2 \tag{9}$$

其中 l_1, m_1, n_1 和 l_2, m_2, n_2 分别是间断面 Γ 和边界 ST 的外法线方向余弦。

(2)几何条件

$$\text{在山地体内: } L^t du = d\epsilon \tag{10}$$

$$\text{在间断面 } \Gamma \text{ 上: } d\langle u \rangle = du^+ - du^- \tag{11}$$

$$\text{在边界 } S^\mu \text{ 上: } du = du_0 \tag{12}$$

(3)本构条件

$$\text{对山地体: } d\sigma = D_\varphi d\epsilon + D_\eta d\eta + edq \tag{13}$$

$$\text{对间断面: } d\sigma = D_\varphi du + D_\eta d\eta + dq \tag{14}$$

如果作用的外载荷是充分小的, 山地介质和间断面处于弹性阶段和硬化塑性阶段, 我们按上述提法得到的增量解是唯一确定的, 相应的应力和变形状态是稳定的平衡状态。随着载荷增加, 介质或间断面进入软化塑性阶段。所得到的应力和变形状态可能是不稳定的平稳状态。

我们考察山地系统的一个平衡状态, 它的变形和应力记为 $u, \langle u \rangle, \epsilon, \sigma, \bar{\sigma}$ 等, 我们在这个状态上施加一组很小的不违背几何条件的虚位移 δu 和 $\delta \langle u \rangle$:

$$\text{在 } V \text{ 内: } L^t \delta u = \delta \epsilon \tag{15}$$

$$\text{在 } \Gamma \text{ 上: } \delta \langle u \rangle = \delta u^+ - \delta u^- \tag{16}$$

$$\text{在 } S^\mu \text{ 上: } \delta u = 0 \tag{17}$$

从而得到一个新的状态。如果外力所作的虚功不超过内能(包括贮存的弹性应变能和塑性耗散能)的增加, 那么山地系统是稳定的。如果这个条件对某组虚位移不成立, 那么超出的能量将转化为动能。这表明所考虑的平衡状态是不稳定的。由此可推导出能量形式的失稳准则

$$\int_v \delta \varepsilon_i \delta \sigma_i dv + \int \Gamma < u >^t \delta \bar{\sigma} d\Gamma < 0 \quad (18)$$

式中, $\delta \varepsilon$ 和 $\delta \sigma$, $\delta < u >$ 和 $\delta \bar{\sigma}$ 之间的关系分别由本构方程(13)和(14)给出, 因而山地系统的稳定性与增量的本构性质直接相关。例如, 在无渗水情况, 并且山地介质和间断面处于理想塑性或硬化塑性阶段, 矩阵 D_{ep} 和 D_{ep} 是正定的, (18)式左端总为正值, 所考虑的状态一定是稳定的平衡状态。因而介质和间断面具有应变软化和渗水软化特性是山地系统失稳的必要条件。

综上所述, 研究青藏高原山地系统的物理非稳定性问题的方法是将给定的载荷历史分成许多小的增量步, 对每一个增量步求解一个非线性边值问题。对于出现应变软化和渗水软化之后的每一个增量步, 使用失稳量准则式(18)判断山地系统的稳定性。一旦(18)式成立, 表明已达到稳定性的临界载荷。通过对变形场的分析还可得到失稳时的破坏形式以及失稳的变形前兆。

4 青藏高原山地系统各圈层多体系统力学描述

青藏高原是由多圈层多块体不同物质结构组成的, 皆可用若干塑性、流变体、流体成弹性组成的系统模型予以有效地描述。另外, 青藏高原在统一动力源背景下各圈层块体进行着相互作用, 本文把这些系统和模型称为“多体系统”, 而把建立力学模型的过程称为“有限段建模法”。根据青藏高原系统内各物体运动状态的不同, 多体系统可有几种分类方法: (1)联接或分离; (2)弹性、塑性或流变体、流体; (3)各地质体形成封闭或开放体系。

笔者主要研究了青藏高原多体系统的运动学表示、力系概念、缩短与走滑、碰撞系统力学的分类和现象、主动碰撞构造体特性、被动碰撞体(靶体)特性、地壳和岩石圈的碰撞动力学过程、青藏高原各圈层塑性力学描述和模型研究等, 因受篇幅所限, 公介绍部分内容。

4.1 高原山地系统碰撞隆升的分类和现象

1. 碰撞分类 碰撞体的现象可以按各种因素分类。例如: ①按碰撞时的入射角分类; ②按碰撞体的形状和块体物质结构特性分类; ③按侵入体(俯冲体)的形状和物质结构体的特性分类; ④按碰撞体的初速度的范围分类

2. 碰撞体在撞击中发生的现象 碰撞体撞击速度范围的根据是碰撞体在撞击中所出现的各种现象。在撞击体的撞击速度很低时, 碰撞体只产生弹性变形, 这是实验时经常遇到的低速范围。当撞击体的撞击速度达到某一极限值时, 不是靶体就是碰撞体的接触应力达到压缩屈服应力。这时靶体或碰撞体或两者同时产生永久变形, 这种变形经常是一种较为复杂的力学过程。我们首先研究弹性撞击的弹性应力和撞击速度的关系。

设一碰撞体以速度 v_n 垂直撞击靶体的某一平面。碰撞体的密度为 P_p , 碰撞体上的弹性波速

$$C_p = \sqrt{E_p / P_p} \quad (19)$$

式中 E_p 为碰撞体的杨氏模量; 靶体中膨胀压缩弹性波的传播速度为

$$C_{Dt} = \sqrt{[(\lambda_t + 2G_t) / P_t]} \quad (20)$$

其中 λ_t 和 $G_t = E_t / [2(1 + r_t)]$ 为靶体的拉梅常数, E_t 和 r_t 分别为靶体的杨氏模量和泊松比, P_t 为靶体的密度。在弹性撞击后, 碰撞体和靶体之间的接触应力为 σ_c , 相对速度为零。设碰撞体的头部由于接触应力 σ_c 的作用而引起的向左方后退速度为 v_1 , 靶体由于接触应力 σ_c 的作用而引起的向右方后退速度为 v_2 。接触面的真空速度为

$$v_E - v_1 = v_2 \text{ 或 } v_E = v_1 + v_2 \quad (21)$$

根据碰撞时的动量冲量守恒定律, 设在微小的碰撞时间 δt 内, 撞击应力波在碰撞体内向左传播 $\delta \bar{Q}$, 则有

$$\delta \bar{Q} = P_p \delta \bar{Q} v_1 \quad (22)$$

4.2 山地主动碰撞构造体特性

碰撞体变形和靶体变形之间, 在撞击过程中是密切相关的, 显然不能单独考虑。但是, 在一定条件下, 人们还是可以略去靶体的变形, 从碰撞体的变形估计碰撞体材料的动力屈服强度。泰勒理论的基本假定是单轴向的、不可压缩的和略去了侧向运动的惯性。碰撞体中, 凡是塑性波前尚未到达的部分, 是以速度 v_0 作为一个刚性向前运动的。

当碰撞体一端垂直撞击平整的刚性靶体时, 碰撞体接触端的压应力迅速增长, 应该达到弹性极限, 同时有一个弹性压缩波以声速 $C_p = \sqrt{E_p / P_p}$ 向碰撞体尾部自由端传播。这个弹性压缩波的应力强度等于弹性压缩极限强度 σ_{rc}^D 。

碰撞体各点的运动速度应该是 v_1 , 它等于

$$v_1=v_\sigma-\frac{\sigma_{rc}^p}{P_pC_p} \tag{23}$$

而在声波波面的前方,是无应力区。它还没有感觉到在接触面上有了撞击,所以这个区域的材料仍以原速度 v_σ 向靶体运动。

我们的问题是:在各个地质时期内,弹塑性交界面的向前扩展速度 u 是时间的什么函数?最后的弹性部份有多长?塑性变形有多大?

$$\Delta t=\frac{2X}{C_p}, \Delta h=u\Delta t, \Delta x=-(v+u)\Delta t \tag{24}$$

连续方程为

$$A_0(u+v)=Au \tag{25}$$

动量冲量守恒方程

$$P_pA_0(u+v)v=\sigma_{rc}^D(A-A_0) \tag{26}$$

碰撞体撞击后的形状尺寸表达式

$$h=h_2-L_e^{-\frac{1}{2}R}\left\{\Gamma\left(\frac{A}{A_0}\right)+e^{\frac{1}{2}}-\left(\frac{A}{A_0}\right)^{-\frac{1}{2}}e^{\frac{1}{2}\frac{A}{A_0}}\right\} \tag{27}$$

4.3 山地被动碰撞体(靶体)特性

主要研究内容有:决定被动碰撞模式的各种假设、局部影响假定、块体运动假定、略去热效应的假定、厚度判据和碰撞体材料等。

如厚度判据

$$n=\frac{C_t}{C_p}\frac{L}{h} \tag{28}$$

式中 C_t 为靶体中应力波传播速度, C_p 为碰撞体中应力波传播速度, L 为碰撞体长度, h 为靶板厚度。

如果用 h/D 表示,其中 D 为碰撞体直径,则

$$n=\frac{C_t}{C_p}\frac{L/D}{h/D} \tag{29}$$

4.4 山地碰撞构造的侵入和俯冲

1. 弹塑性被动碰撞体变形理论

撞击变形有三种隆起和俯冲凹陷。对于半径为 R 的地壳层,在平面应力和轴对称条件下的总塑性应变能为 ϵ_p ,其增量为

$$d\epsilon_p=\int_{\Gamma}(\sigma_r d\epsilon_r+\sigma_\theta d\epsilon_\theta)d\Gamma \tag{30}$$

式中 $d\epsilon_r$ 、 $d\epsilon_\theta$ 为应变增量, r , θ 为径向环向坐标。积分域 Γ 为以 R 为半径的靶板域。得碰撞体变形的应变能

$$\epsilon_p=\frac{2\pi h}{\sqrt{1-\nu+\nu^2}}\int_0^R\left\{\frac{1}{8}E_p\left(\frac{d\omega}{dr}\right)^4+\frac{1}{2}\sigma_0\left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2\right\}rdr \tag{31}$$

这些应变能都来自地壳层被动碰撞体撞击时的

动能 $\frac{1}{2}mv_0^2$, 所以有 $\epsilon_p=\frac{1}{2}mv_0^2$ 。

2. 山地动量守恒模式

这个模式认为碰撞碰撞体的动量 mv_0 在撞击后,变成碰撞体 m 和挤凿下来的靶元 $\rho_t\pi R_p^2h_t$ 的总动量 $(m+\rho_t\pi R_p^2h_t)v_f$ 。其中 v_f 为靶元挤凿下来后的速度,它也是碰撞体在击穿靶体后的速度。用动量守恒定律,有

$$mv_0=(m+\rho_t\pi R_p^2h_t)v_f \tag{32}$$

$$v_f=\frac{L_0}{L_0+h_t}v_0 \tag{33}$$

这就是碰撞体剩余速度 v_f 和靶体厚度 h_f 的关系式。

3. 山地流阻运动模式

在碰撞俯冲过程中,可以把凿离的碎块和剩留的碰撞体间的相对运动看作为流体的流动。碰撞体头部每单位面积的流动动压力为 $\frac{1}{2}\rho_tv^2$,碰撞体头部的面积为 πR_p^2 ,于是碰撞体运动时的阻力为 $\frac{1}{2p}\pi R_p^2\rho_tv^2$,碰撞体运动方程为

$$m\frac{dv}{dt}=-\frac{1}{2}\pi R_p^2\rho_tv^2 \tag{34}$$

4. 山地摩阻运动模式

假设当碰撞俯冲挤凿下来的靶块体对靶元的其余部分作相对运动时,其阻力主要来自剪切屈服应力 σ_{sy} 。它的总和等于剪切屈服应力 σ_{sy} 乘凿离靶块和靶元的其余部分的瞬时接触面积 $2\pi R_p(h_t-x)$,其中 x 为碰撞体在撞击后向前运动的距离,所以总摩阻为

$$F=2\pi R-P(h_t-x)\sigma_{sy} \tag{35}$$

碰撞体和凿离靶块的运动方程为

$$(m+\pi R_p^2h_t\rho_t)\frac{dv}{dt}=-2\pi R_p(h_t-x)\hat{q} \tag{36}$$

5 山地碰撞构造体俯冲时的复合抗力函数模式

轴向运动的复合抗力 $F(x)$ 为

$$\begin{aligned} F(x)= & \pi\rho_1(r^2(x)-r^2(x-h)] \\ & +\pi\rho_2\int_{x-h}^xr(x)\left[\frac{dr(x)}{dx}\right]^2dx \\ & +\frac{4\pi h_t\rho_tR_p^2v^2}{3(R_p+\frac{1}{2}L_N)^2}x(L_N+\frac{1}{2}h-x) \\ & +\pi\left\{p_1[J(x-h)-J(x)]\right. \\ & \left.+p_2[r^2(x)-r^2(x-h)]\right\} \end{aligned} \tag{37}$$

设 L_p 为碰撞体整体总长度,当 $x\leq 0$, $r(x)=0$;

当 $L_N\leq x<L_p$, $r(x)=R_p$ 。

6. 山地变形碰撞体多阶段俯冲挤齿机理的塑性力学理论

本节所述既适用于地壳薄层也适用于岩石圈, 共分为三个阶段: 即碰撞俯冲; 俯冲拆沉, 剪切刀力增加, 裂离; 俯冲停止, 压缩也停止, 剪应力起作用。

第一阶段: 在碰撞体前方的靶板材料被压缩到破坏压缩应力 σ_{ic} , 靶板材料一部分从碰撞体的运动

$$\begin{aligned} F_1(t) &= -\frac{1}{2} C_1 \rho_t A_p v^2 - \sigma_{ic} A_p \\ &= \rho_t A_p v^2 + (C_m + \rho_t A_x) v \frac{dv}{dx} \\ (0 \leq x \leq h_t - h_1) \end{aligned} \quad (38)$$

其中 m 为碰撞体质量; A 为碰撞体截面积; h_t 为靶板厚度; h_1 为剩余的待击穿的厚度; C_1 为与碰撞体头形状有关的一个常数。

第二阶段: 在这一阶段内, 惯性力、压缩力和剪应力同时起作用。惯性力作用在俯冲齿块截面 A_q 上, 在不少情况下, A_q 和碰撞体截面 A_p 相等。如果齿块的根部直径变化很大, 则齿块的截面直径 D 可以假定是 X 的线性函数。在第一阶段传速时, 我们发现力 $F_1(x)$, $F(x)$ 基本上是连续的, 其不连续性很小。压缩力 $\sigma_v A_q$ 在第二阶段传速时减小到零, 其变化假定是抛物线型的。剪应力可以根据宾汉 (Bingham) 型本构方程决定

$$\sigma_x = \sigma_{ys}^D + \mu \frac{\partial v}{\partial r} = \sigma_{ys}^D + \mu \frac{v}{\Delta r} \quad (39)$$

式中 Δr 是剪应力区的宽度, 有时称为“径向余隙”。 μ 是高速变形的材料特性, 可以从实验来测定。第二阶段的运动方程式

$$\begin{aligned} F_2(t) &= -\frac{1}{2} C_1 \rho_t A_q v^2 - (\sigma_{ys}^D + \mu \frac{v}{\Delta r}) \pi D_2 \\ &\quad \times [x - (h_t - h_1)] \\ &\quad - \sigma_{ic} A_q \left\{ 1 - \left[\frac{x - (h_t - h_1)}{h_1^2} \right]^2 \right\} \\ &= A_t A_q v^2 + (m_0 + \rho_t A_q x) v \frac{dv}{dx} \end{aligned} \quad (40)$$

第一阶段传速时的有效质量

$$m_{e1} = m_0 + \rho_t A_1 (h_t - h_1) \quad (41)$$

第二阶段历经的时间

$$t = \int_{h_t - h_1}^{h_t} \frac{1}{v} dx \quad (42)$$

第三阶段碰撞体和齿块的总质量

$$m_{e2} = m_0 + \rho_0 + \rho_t A h_t \quad (43)$$

式中 m_{e2} 为常数, 它运动时, 只受面积 A_q^* 上的剪应力作用。第三阶段的运动方程为

$$m_{e2} \frac{d^2 x}{dt^2} = F_3(t) = -\sigma_{r2} A_2^* = -(\sigma_{ys}^D + \mu \frac{v}{\Delta r}) A_q^* \quad (44)$$

7. 山地碰撞俯冲深度的经验公式: 大陆碰撞俯冲的深度

所有的公式都有一定的限制, 如材料、速度、几何形状和尺寸等限制。

俯冲侵入深度 P 和轨道极限速度 v_n 常常是用碰撞体质量 m_p 、靶厚 h_t 、初始碰撞体速度 v_0 和半径 R_p 作为独立变量来表示的, 即

$$P = r_1 m_p^c v_0^c \quad (45)$$

$$v_n = r_2 m_p^c h_t^c R_p^c \quad (46)$$

式中 r_i 和 C_i 都是与材料和几何形状有关的常数。

如果碰撞俯冲侵入阻力只和迎面的面积成正比, 则侵入深度 P 可以写成

$$P/D = r_7 \rho_p v_0^2 + b_s \quad (47)$$

式中 r_7 为经验常数, b_s 是用来考虑自由表面的影响的。

由上分析得出山地碰撞俯冲深度的经验公式

$$F = A_N [P_a(\Theta) + a_{11} \frac{\rho_1}{m^e} (\frac{1}{2} m v^2 - \frac{F_2}{3}) + a_{12} \frac{v}{2}] \quad (48)$$

式中 P_a 为靶板的抗压强度, 它是温度 Θ 的函数;

A_N 为嵌埋的碰撞体头部的基圆面积。

5 结语

本文以统一构造理论、地球系统力学和现代力学为理论基础, 从地球系统科学的研究思路, 对青藏高原大陆碰撞隆起各圈层统一互相作用的力学模型进行了探索和研究, 工作是初步的还有不足之处, 如: 在边界条件上, 采取的建模方式是沿纵深方向上采用一致的边界条件, 这与实际情况有一定出入, 然而, 其影响是局部的, 今后可以根据实际构型建模, 有利于边界条件的逼近性。

致谢: 崔鹏、陈自生二研究员审阅全文并对本文的发表给予经费资助, 谨致谢意。

参考文献:

- [1] 毕思文. 全球变化与地球系统科学统一研究的最佳天然实验室——青藏高原[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 72~77
- [2] 毕思文. 青藏高原及其周缘岩石圈动力学研究的新思维——系统

- 构造统一理论[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(2): 39~44.
- [3] 毕思文. 地球系统科学与可持续发展(III)—统一构造理论中的表层构造系统[J]. 系统工程理论与实践, 1997 年, 17(6): 83~92.
- [4] 毕思文, 何国琦, 李继亮, 等. 地球系统科学与可持续发展(IV)—统一构造理论中的青藏高原大地构造特征与地质过程[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(9): 83~92.
- [5] 毕思文. 统一构造理论初探[J]. 地学前缘, 1998, 8(增刊), 青年科学家论坛, 198~210.
- [6] 毕思文. 地球系统科学与可持续发展[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [7] 李庭栋. 青藏高原隆升的过程机制[J]. 地球学报, 1995, (1): 1~9.
- [8] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26: 289~295.
- [9] 王成善, 丁学林. 喜马拉雅隆升研究新进展综述[J]. 地球科学进展, 1998 (6): 625~531.
- [10] 许志琴, 等. 青藏高原的深部构造物理作用: 地幔底辟及多向陆内俯冲. 见: 青藏高原动力学研究讨论会论文摘要[Z], 1995.
- [11] Wenjin Zhao Nelson K D. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern tibet[J], *Nature*, 1993, 366: 557~559.
- [12] 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 西藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26: 308~315.
- [13] 高锐, 成湘洲, 丁谦. 格尔木—额济纳旗地学断面地球动力学模型初探[J]. 地球物理学报, 1995, 38: 3~14.
- [14] Kazuo Amano, Asaira Taira. Two-phase uplift of Higher Himalayas Since 17 Ma[J]. *Geology*, 1992, 20: 391~394.
- [15] Quade J. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in Northern Pakistan[J]. *Nature*, 1989, 342: 163~165.
- [16] 崔之久, 高全训, 刘耕年, 等. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26: 378~385.
- [17] 吴锡诒, 安芷生. 黄土高原—古土壤序列与青藏高原隆升[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26: 103~110.
- [18] Bi Siwen, Peter M Blisniuk, Brad Hacker, Johannes Glodny, Rick Ryerson. Timing of Late Neogene Neogene Extension in Central Tibet, 1999, 11(AGU).
- [19] 毕思文. 西藏北部新发现具有一定规模的煤层[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(9): 144.
- [20] Gue jingRu, Bi Siwen. INDEPTH—III 藏北双湖陆内碰撞俯冲深部地球物理的初步结果[A]. 见: 国际第 14 届 HKT 研讨会论文集[C]. 1999, 3.
- [21] 文世宣, 章炳高, 王义刚, 等. 西藏地层[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [22] 潘裕生. 昆仑山区构造区划初探[J]. 自然资源学报, 1989, 4(3): 196~203.
- [23] 潘裕生. 青海省通天河发现蛇绿岩套[J]. 地震地质, 1984, (2): 44.
- [24] 肖序常. 藏南日喀则蛇绿岩及其大地构造问题[A]. 见: 中法喜马拉雅考察结果(1980)[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [25] Copeland P, Harrison T M. Episodic rapid uplift in the Himalaya revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis of detrital K-feldspar and muscovite[J]. *Begal Fan. Geology*, 1990, 18: 354~357.
- [26] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet[J]. *Science*, 1992, 225: 1663~1670.
- [27] 李方全, 刘光勋. 我国现今应力状态及有关问题[J]. 地震学报, 1986, 8(2): 156~171.
- [28] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征[J]. 地球物理学报, 1987, 30(5): 476~486.
- [29] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J]. 地球物理学报, 1989, 32(6): 636~647.
- [30] 汪素云, 许忠淮, 葛民. 黄海、乐海及邻区的地震构造应力场[J]. 中国地震, 1987, 3(3): 18~25.
- [31] 张东宁, 许忠淮. 青藏高原南部正断层地震活动的可能机制[J]. 地震学报, 1995, 17(2): 188~195.
- [32] 阚荣举, 张四昌, 晏风桐, 等. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 1977, 20(2): 96~98.
- [33] 谢富仁, 张世民, 窦素芹, 等. 青藏高原北、东边缘等四纪构造应力场演化特征[J]. 地震学报, 1999, 21(5): 502~510.
- [34] 谢富仁, 刘光勋. 阿尔金断裂带中段区域新构造应力场分析[J]. 中国地震, 1989, 5(3): 26~36.
- [35] 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆. 我国西南地区现代构造应力场基本特征[J]. 地震学报, 1993, 15(4): 407~417.
- [36] 谢富仁, 祝景忠, 舒塞兵. 鲜水河断裂带区域构造应力场的分期研究[J]. 地震地质, 1995, 17(1): 35~43.
- [37] 崔作舟, 等. 青藏高原地壳结构构造及其与地震的关系[J]. 中国地质科学院院报, 1987, 21: 215~226.
- [38] 张东宁, 许忠淮. 中国大陆岩石层动力学数值模型的边界条件[J]. 地震学报, 1999, 21(2): 133~139.
- [39] 周硕愚, 张跃则, 丁国瑜, 等. 依据 GPS 数据建立中国大崇板内块体现时运动模型的初步研究[J]. 地震学报, 1998, 20(4): 347~355.
- [40] Mohnar P, Lyon—Caen H. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins[J]. *Geophys J Int*, 1989, 99: 123~153.
- [41] 刘和甫, 夏义平, 殷进根, 等. 走滑造山带与盆地耦合机制[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 121~122.
- [42] 毕思文. 初论地球系统力学(I)研究的意义及其内涵[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(7): 25~29.
- [43] 毕思文, 徐秉业. 初论地球系统力学(II)多体地球系统力学基础[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(12):

Study on Dynamic Model of Mountain System in Tibet Plateau

BI Si-wen

(Laboratory of remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Application, CAS, Beijing 100101)

Abstract: Since millions years, the formation of mountain system of Tibet plateau, which is the region of indoplate collision to Eurasia since 45 million years, is one of the most important events of the Earth history. It becomes known to the world for its unique geology, geography and complex lithosphere structure. After decades of years research, study about Tibet plateau has turned to theme study and systematic theory. At the same time, the study now has surpassed imaginal thinking and come to abstract thinking phase. The uplifting of Tibet plateau is the result of inter-spherical dynamic acting and its effects.

According to the idea of earth system science, the paper studied on the overall dynamic model, mechanical model and numerical simulation of unified inter-spherical acting of mountain system of Tibet plateau, based on author's researches and other data of geology, geography, geophysics and geochemistry etc.

1 Dynamic characteristics of mountain system of Tibet plateau

The paper mainly studies the evolutionary characteristics of structure stress field and unified structure dynamic model of mountain system of Tibet plateau. And thinking that all these dynamic geology processes are resulted from the indoplate collision to Eurasia during the movement of Himalayas.

2 Presentation of spherical mechanical system of Tibet plateau

The multi-spherical blocks can be simulated as a mechanical system, and velocity vector, displacement vector, density field, temperature field, stress field can be resolved, finally a movement equation can be resolved.

3 Non-stability of mountain system of Tibet plateau

In this paper, the history of given load is divided into many incremental steps, and for each incremental step, it is equal to the solution to one non-linear marginal problem. The stability of mountain system can be determined by using the quantitative criteria of non-stability.

4 Presentation of multi-body collision mechanics of mountain system of Tibet plateau

Tibet plateau is composed of multi-spherical and multi-body substances and can be stated effectively by using some plastic fluid, elastic system models. The paper studies the phenomenon and classification of uplifting of plateau mountain system, the active collision mechanical model of mountain. And from this, its evolution history and status quo are analyzed and inferred. Finally, the mechanical process of uplifting of Tibet plateau is discussed.

Key words: Tibet plateau; mountain system; unified inter-spherical acting; dynamic model