

# 大陆褶皱造山运动的星地碰撞成因

刘广润<sup>1</sup>, 张宏泰<sup>2</sup>

1. 华中科技大学水电学院, 湖北武汉 430074

2. 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430030

**摘要:** 大陆褶皱造山运动具有突发性、全球同步性, 以水平运动为主, 主要表现在地壳上部且具有上强下弱等特征, 除水平运动一项外, 与基于地幔对流的板块构造理论缺少共同之处. 想用板块构造理论解释遍布大陆地块内部的褶皱构造, 在形位特征与动力机制上都有难以解决的矛盾. 基于地球自转速度变化的地质力学理论, 对之所做的定性解释颇为合理, 但因只靠地球收缩及潮汐引力等缓变力作为引起地球自转速度变化的动力来源, 力量强度太小, 不足以引发强大的褶皱造山运动, 且有被海水运动取代的难题. 揭示了星地碰撞可以为大陆造山运动提供足够强大的突发性动力来源, 并简要阐明了其作用机制, 可以解决地质力学所遇到的力源不足和被海水运动取代的两大难题, 从而为大陆构造研究开辟了一个新境界.

**关键词:** 大陆褶皱造山运动; 成因; 星地碰撞.

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2007)01-0063-08

收稿日期: 2006-10-23

## Continental Folding Orogenesis from the Perspective of Collision Dynamics of a Celestial Body with the Earth

LIU Guang-run<sup>1</sup>, ZHANG Hong-tai<sup>2</sup>

1. School of Water and Electricity, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan 430030, China

**Abstract:** The continental orogenesis is characterized with the following features, such as sudden start, global synchronicity and horizontal movement, occurring mainly in the upper part of the crust and weakening with depth, and so on. It is difficult to explain these characteristics by the plate tectonic theory based on the heat convection in earth mantle. The geomechanics based on the change of rotating speed of the earth could answer a large part of the above mentioned questions, but the power which it depends on offered by the expansion or contract of the earth and tides et al is too weak to serve as the energy to change the rotating speed of the earth, so it is also difficult to explain them quantitatively. This paper reveals the collision energy of a celestial body with the earth could induce a sufficient change of rotating speed of the earth to make the folding orogenesis, and briefly explains its mechanics, and therefore offers a brandnew perspective for researching continental orogenesis.

**Key words:** continantal folding orogenesis; cause of formation; collision of a celestial body with the earth.

### 1 大陆造山运动的基本特征

大陆地壳的运动与形变, 一般以褶皱造山运动为主要研究对象. 造山运动的基本特征表现在构造运动与构造形迹两个方面(吴汉珍, 1997; 姜春发, 2002; 张国伟等, 2002). 在构造运动方面表现为强烈活动的突发性和全球同步性及间歇周期性, 且以水

平运动为主. 在构造形迹方面表现为极其强烈的褶皱及逆掩推覆, 且强度常上强下弱; 影响深度一般多限于沉积盖层或地壳上部; 其褶皱山脉展布方向有一定的几何规律性. 造山运动的猛烈突发性可由运动前后地层之间的显著不整合和大块粒磨拉石堆积的突现来证明. 造山运动的全球同步性和间歇周期性早已反映在一般公认的全球构造运动分期上, 如

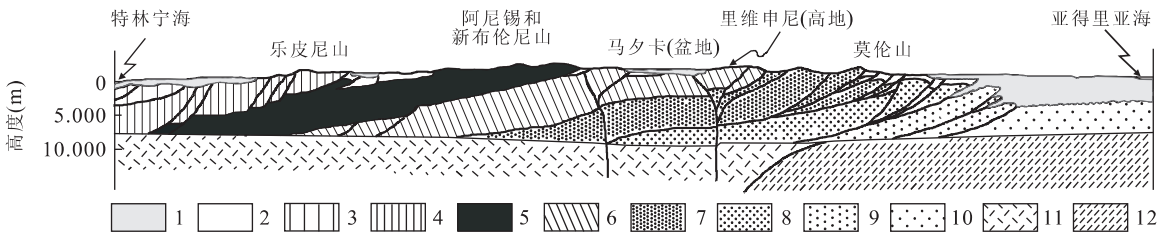


图 1 意大利亚平宁半岛中部逆掩断层带横剖面示意图(Piero Elter *et al.*, 2003)

Fig. 1 Schematic cross-section of the central Apennine thrust belt

1. 更新世及第四纪海相及陆相覆盖层; 2. 新第三纪沉积层; 3~9. 主要由碳酸盐岩陆台和沉积盆地物质构成的构造单元层; 10. 亚得里亚山前沉积层; 11. 逆掩断层带下的磁性基底; 12. 亚得里亚山前沉积下面的磁性基底

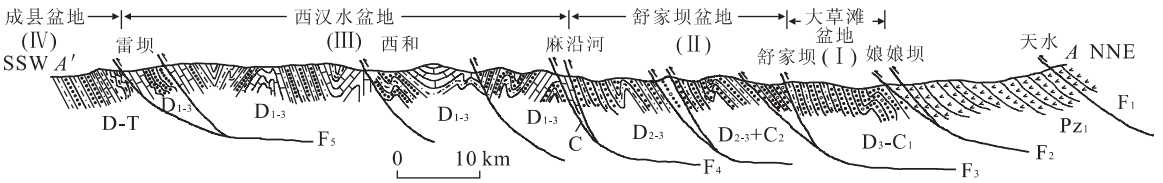


图 2 西秦岭上古生界构造剖面图(王宗起等, 2005)

Fig. 2 Structural section and sedimentary columns of the Upper Paleozoic in the West Qinling

P<sub>Z1</sub>. 下古生界李子园群; D-T. 泥盆系—三叠系; D<sub>2-3</sub>. 中、上泥盆统舒家坝群; D<sub>1-3</sub>. 泥盆系西汉水群; D<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>. 泥盆—石炭系大草滩群; C. 石炭系; F<sub>2</sub>. 断层及其编号

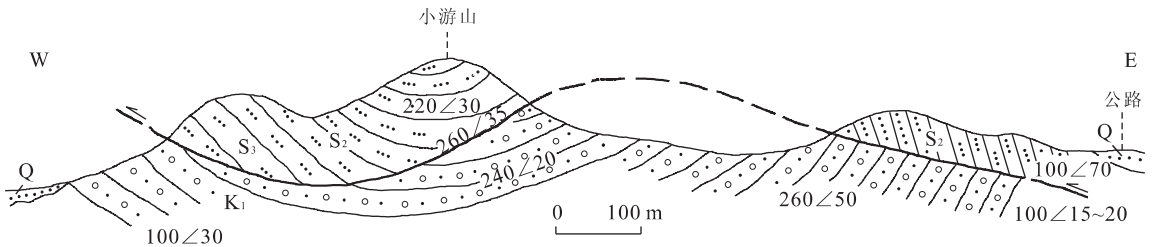


图 3 苏南小游山推覆构造剖面图(胡连英和李起彤, 1986)

Fig. 3 Xiaoyoushan structural profile diagram

Q. 第四系; K<sub>1</sub>. 下白垩统; S<sub>2</sub>. 中志留统; S<sub>3</sub>. 下志留统

加里东运动、海西运动、燕山运动、喜马拉雅运动等，它们的间隔周期约为 1.5~2.0 亿年。褶皱山脉的展布规律在李四光先生的地质力学著作中有较全面的论述，如分出纬向构造、经向构造、山字型构造等体系(李四光, 1973)。近东西向的大型褶皱山脉多在中纬度地区按一定间隔出现。造山运动的影响深度一般具有局限于地壳上部的特征，这可从中国及世界地质图上清楚地看出，在各地褶皱山区出露的一般都是沉积岩和中、酸性岩浆岩及其变质岩，很少有较大片的非层状基性岩存在，超基性岩更是星星点点，难以找见。至于造山运动以水平方向动力为主且上强下弱的特征，则明显地反映在广泛存在的大规模逆掩断层、平卧推覆构造及拆离构造上。很多强烈褶皱推覆构造下面的基底都保持着连续完整状态。即

使是在比较典型的大陆板块(地台)区域内也有这种情况,如图 1~3 所示。

## 2 现有的构造理论难以很好地解释造山运动的动力成因

现有的构造理论最为流行的莫过于全球板块构造理论(竹内均等, 1978; 许靖华, 1985; 马宗晋和杜品仁, 1995; 许志琴等, 2003; 陈琦和刘永祥, 2004)。它起源于大洋构造, 以洋脊扩张及转换断层为基本构造形迹, 配以地幔热对流作动力来源, 较好地阐明了大洋区的构造发育特征及其与大陆地壳的接触关系, 并依此进行了全球构造板块的划分。其魅力强大, 被广泛接受, 这是可以理解的。但当有人将其搬

用到大陆构造上来时,将大陆区很多褶皱构造都想用板块构造的机制来解释,极力寻找古板块“缝合线”的证据,找不到就说成是“小板块”缝合线甚至“板内”构造等等,则显得牵强附会,难以令人信服。大陆区内褶皱山脉的形成是难以用板块构造理论加以恰当解释的,因为两者动力来源及受力方式很不相同。板块构造理论的动力来源是地幔热对流从底下对地壳板块施行拖曳,对地壳上层的影响理应越来越小,这与前述褶皱构造强度上强下弱的表现正好相反。从褶皱造山运动的形变表现来看,其所受的驱动力似应来自上部对下部的剪切搓动,而这是板块运动所无法给予的。

在大陆造山运动方面的研究,以李四光(1973)基于水平运动观点并以地球自转速度变化为动力来源的地质力学最为系统、全面。地质力学在构造形迹特征方面所作的阐释符合大陆构造的实际;在形成机理方面认定地球自转速度的快慢变化(而非转速本身)所导致的惯性离心力增减是其主要动力来源,用来对大陆构造现象进行的定性解释,也很合乎逻辑。因之,在国内外曾享有众多拥护。但是,当寻找造成地球自转速度变化的原因时,因把目光只放在了地球内部物质变化引起的体积涨缩及日月潮汐引力作用等传统说法上,所得到的转速变化率非常小(最多只有  $400 \times 10^{-10}$ ),不足以造成强烈的褶皱山脉。这就使客观存在的构造现象与合理的定性机制解释之间失去了有效的动力支撑,因之遭到质疑。李四光先生对此也只得无奈表示:这种水平推动的力量,只是使地壳发生拗褶或褶皱,至于把褶皱的地带抬高起来成为山岳,则是与重力有关的均衡作用的结果。说褶皱不能自力成山,似乎有悖于地质力学造山运动理论的初衷,这不过是在举不出足够的力源依据的情况下出现的尴尬。此外,李先生还坦城地指出,依靠上述缓慢渐进动力引起的地球转速变化为主要动力来源的地质力学造山运动理论,即使全被接受,也还不可避免地面对又一个更大的问题,那就是大洋水体的自由流动可以随时很快地调整地球扁度以适应因转速变化而引起的新需求,从而使地壳岩体为此而进行的缓慢水平运动完全失去其必要性。由此看来,地质力学在对造山运动的理论解释上,也因未找到足够强大的能使地球转速产生更大变化的突发动力而存在若干难以解决的重大问题。

## 3 星地碰撞能够引发大陆褶皱造山运动

### 3.1 星地碰撞事件概况

外来星体对地球的碰撞是常有的事(库利寇夫斯基,1954; Stanton, 1972; 欧阳自远, 1996; 王道经等, 1997)。每天都有很多流星飞向地球,它们一般都在大气层中燃烧殆尽,少数残体坠地成为陨石。地面上现存的最大陨石个体重 60t。据估计,凡遗留有陨石落地的天体在进入大气层前的原有质量都会超过 1 000 t。较大的陨石撞击地面形成陨石坑,全球已发现不同时代的陨石坑数百处,坑径 10 m 至 200 余千米不等。已知最大的陨石坑为墨西哥境内的奇克苏鲁普(Chixulub)陨石坑,直径 240 km,据估计系由一颗直径 10~14 km 的小行星所撞成。不能排除地球曾遭受过比这更大的星体碰撞,因为月球和其他星体上就存在着直径远大于 200 km 的撞击环形山。由于地球上不断发生的造山运动、剥蚀作用和大部分为海洋,会使不少(特别是古老的)撞击坑被破坏、覆盖或淹没而不复得见。

撞击地球的天体主要来自太阳系的小行星和彗星,也不能排除来自太阳系外的天体。小行星群基本上都运行于火星与木星轨道之间,推测总数约有 5 万个,已被人们编号者近 2 700 个,直径多在几千米至几十千米之间,最大者为谷神星(Ceres)达 770 km。彗星也多是太阳系成员,已发现有 1 500 余颗。彗星的体积常很大,但密度甚微,基本上皆由稀疏的气体及冰粒、尘埃组成。只有慧核中有石质及铁质块体,块径一般不超过 10 km。大部分彗星和某些小行星的绕日公转偏心率和与黄道面的夹角不同于地球及各大行星,再加上受较大星体引力导致的轨道变化,故总有发生其撞击地球或其他行星(及其卫星)的机会。1994 年发生的苏梅克-利维 9 彗星撞击木星的壮观景象就是现代星体碰撞的一个典型事例。天文学家已发现有 100 多个与地球轨道偶可相交的天体,并估计太空中大得足以破坏地球且又可与地球轨道相交的天体可达 2 000 个之多,大约每 10 万年就会有一个直径 1 km 左右的天体碰撞地球。在更小的时间概率上,应有更大的系内天体撞击地球的机会。此外,整个太阳系正围绕银河系中心以 250 km/s 的速度运行,约 2.5 亿年周转一圈(称为一个宇宙年)。在其绕银心周转中,不能排除与其他

星系穿插遭遇,发生太阳系外较大星体撞击地球的可能性.因之,在百万年、千万年以至亿年一遇的水平上,估计有几十千米乃至几百千米直径的星体撞击地球的机会当不过为.

### 3.2 星地碰撞引发造山运动的动力机制分析

星地碰撞的动力作用性质因碰撞方式而有所不同.碰撞方式可概分为直撞和斜撞,相应的动力作用则为正向冲击和斜向剪切.人们对其正向冲击作用易于直观想象,有关报道及其影响的研究多系对此进行,如星地冲撞激起尘埃蔽空,形成长期黑冷,造成植物难活及恐龙灭绝的灾难已被广泛流传.而对其斜向剪切作用则从未见有人提及.正是这种斜向剪切作用能够加快或减慢地球自转速度,从而为地壳的水平运动提供强大的突发动力来源,因之是我们研究的焦点.

设一半径 300 km、密度(与地球相当)为  $5.518 \text{ t/m}^3$  的外星,以  $50 \text{ km/s}$  的速度与地球相向飞行并在赤道线上,顺地球自转方向,与地球剪切撞击,并且设其为非弹性碰撞.按照理论力学的碰撞理论(沃伦科夫,1954),旋转体在碰撞冲量的作用下角速度发生的变化等于该碰撞冲量对于转动轴之矩除以旋转体的转动惯量,其表达式如下:

$$\omega - \omega_0 = \frac{mom_0(S)}{J_z},$$

式中: $mom_0$  为地球半径, $S$  为碰撞冲量, $J_z$  为地球的转动惯量.

将地球的半径、质量、自转角速度、转动惯量及公转速度和外星在上述数据代入公式,得出所获地球自转角速度变化( $\Delta\omega$ )为  $3.94 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ ,其相对变化率为  $5.4 \times 10^{-2}$ . 这比前述  $400 \times 10^{-10}$  相比提高了 6 个数量级.下面对此种条件下地壳上部块体产生水平运动并褶皱成山的情况进行一个粗略计算:

假设前缘在中纬度地带的—个地壳块体(地体),长宽皆为 4 000 km,厚度为 10 km,当上述外星剪切撞击地球时,其所能产生的经向离心力可按下式计算:

$$\Delta f_c = m_3 R_1 \sin 2\varphi \omega^2 \left( \frac{\Delta\omega}{\omega} \right),$$

式中: $m_3$  为地体质量,以密度为  $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  计算,为  $4.27 \times 10^{20} \text{ kg}$ .  $\varphi$  为通过  $m_3$  地体质量中心的地球半径与赤道半径的夹角,中纬度地带按  $45^\circ$  计.计算结果, $\Delta f_c = 7.8 \times 10^{17} \text{ N}$ . 其前锋立面上所受侧向压强(推力)  $P = \frac{\Delta f_c}{Q}$ ,  $Q$  为立面面积,等于

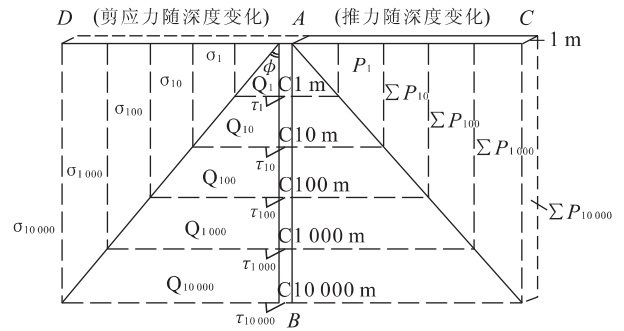


图 4 运动地体在不同深度的软弱面上造成剪切破坏的力学解析示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing dynamics of shearing crack along weak surfaces in different depths caused by a moving shallow crust block

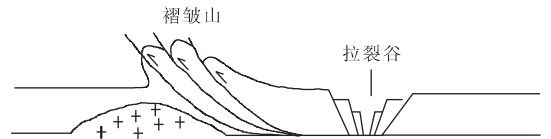


图 5 浅层地体在经向惯性离心力作用下褶皱造山示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing folding orogenics with meridional inertial centrifugal force of a shallow crust block

$4 \times 10^{10} \text{ m}^2$ , 故得出  $P = 1.95 \times 10^7 \text{ t/m}^2$ , 即  $P$  为  $1989 \text{ t/m}^2$ .

这个侧向推力可使地体前方的岩层沿着底下的软弱面(带)产生滑移破坏,形成拆离、推覆,褶皱成山.其形成机制可用下列图 4 和图 5 加以解析说明.

图 4 为运动地体在不同深度的软弱面上发生剪切破坏的力学解析示意图,我们将地体受星地碰撞产生的经向离心力推动其前方岩层发生剪切破坏视同一个超大型的岩体平推直剪(抗剪断)试验(张喜发等,1989;陶振宇和潘别桐,1991;常士骠,1992;唐辉明和晏同珍,1993).

表示岩体抗剪强度的库仑公式为  $\tau = \sigma \times \text{tg}\varphi + C$ ,  $\tau$  为剪应力,即抗剪强度的综合指标,  $\sigma$  为垂直于剪切面的法向压力,  $\varphi$  为岩石的内摩擦角(常用  $\text{tg}\varphi$ , 即内摩擦系数  $f$  表示),  $C$  为凝聚力. 岩体发生剪切破坏的力学判据为  $P/\tau > 1$ ,  $P$  为水平推力. 图 4 上的纵坐标按对数比例表示深度;左、右两侧分别表示底部软弱面的抗剪强度与其上面岩体所受水平推力随深度的变化.

根据经验数据,软弱岩层或软弱结构面的内摩擦系数  $f$  一般为  $0.4 \sim 0.7$ , 我们取  $0.5$ .  $C$  值一般为

50~100 kPa,我们取 80 kPa. 令  $\sigma \times \operatorname{tg}\varphi = Q, \tau = Q + C$ . 在图 4 上  $\tau_i = Q_i + C$ .  $\tau_i$  代表在  $i$  m 深度上向前剪断 1 m 所需克服的剪应力.  $\sum P_i$  代表在  $i$  m 深度上, 前锋面上所受的总推力.

$\sum P_i / \tau_i$  的比值即表示在  $i$  m 深度上, 地体推力能使前方岩体沿软弱面发生剪切破坏的前进长度 (m). 为计算方便, 取前锋面上的单位宽度 1 m 为计算宽度.

据此, 则上述外星  $m_2$  撞击地球后, 在地体  $m_3$  的前锋面上所形成的侧向压强 (推力)  $P = 1\,989 \text{ t/m}^2$ , 相应地:

$$P_1 = 1\,989, \tau_1 = 2.67 \times 0.5 + 80 = 81.34, P_1 / \tau_1 = 24.45;$$

$$\sum P_{10} = 19\,890, \tau_{10} = 26.7 \times 0.5 + 80 = 93.35, \sum P_{10} / \tau_{10} = 213.07;$$

$$\sum P_{100} = 1\,989 \times 10^2, \tau_{100} = 213.5, \sum P_{100} / \tau_{100} = 931.62;$$

$$\sum P_{1\,000} = 1\,989 \times 10^3, \tau_{1\,000} = 1\,415, \sum P_{1\,000} / \tau_{1\,000} = 1\,405.65;$$

$$\sum P_{10\,000} = 1\,989 \times 10^4, \tau_{10\,000} = 13\,430, \sum P_{10\,000} / \tau_{10\,000} = 1\,481.01;$$

即在 1 m 深度上, 可向前剪切破坏 24.45 m; 在 10 m 深度上, 可向前剪切破坏 213.07 m; 100 m 深为 931.62 m; 1 000 m 深为 1 405.65 m; 10 000 m 深为 1 481.01 m. 可见随着深度的增加, 向前推进的距离在不断增大, 但增大的幅度由渐大变渐小, 最终趋向一个常数.

至于岩体沿深部剪切破裂面能否滑移逆冲向上推覆褶皱成山, 我们认为只有当剪切破裂长度大于其埋藏深度时方有可能. 因为岩体的最大剪应力面常位于最大 ( $\sigma_1$ ) 与最小 ( $\sigma_3$ ) 主应力面之间, 且与最大主应力方向呈  $45^\circ \sim 1/2\varphi$  的夹角, 当剪切破裂面长度小于其埋深时, 岩体将难以向上斜冲至地面. 从理论上讲, 其长深比值愈大, 愈有利于滑移上冲. 此例地体在 100 m 深度上, 其破裂面长深比大于 9, 将容易滑移上冲; 至 1 000 m 深度, 长深比为 1.4, 仍可以滑移上冲, 估计 1 200~1 300 m 深度将是其上冲下限. 不过它所能造成的褶皱山当是个高度为几百米至千米的中低山. 欲造成更大的褶皱山脉则需要更大一些的推力, 这可由质量更大些或速度更快些的外星撞击来提供. 譬如, 若撞击地球的外星半径增大至 400 km, 则相应的单位推力  $P$  可增为  $4\,700 \text{ t/m}^2$ , 其  $P_1 / \tau_1 = 57.78$ ;  $\sum P_{10} / \tau_{10} = 503.48$ ;

$\sum P_{100} / \tau_{100} = 2\,201.90$ ;  $\sum P_{1\,000} / \tau_{1\,000} = 3\,010.64$ ;  $\sum P_{10\,000} / \tau_{10\,000} = 3\,499.62$ . 即在 1~10 km 的深度上可剪切前进 3~3.5 km, 这样形成的褶皱山脉就将是巍巍大山了.

或者由来自太阳系外的星体, 以 250 km/秒的迎击速度相撞. 若其半径为 300 km, 相应的  $P$  值为  $6\,222 \text{ t/m}^2$ , 可推进 4.6 km 成山. 若其半径为 400 km, 其相应  $P$  值为  $14\,739 \text{ t/m}^2$ , 则  $P_i / \tau_i$  值依次为 181.20、1 578.90、6 903.51、10 416.25、10 974.68. 即可在 1~10 km 的深度上, 推进长度超过 10 km 的地层褶皱形成高大山脉.

侧向推力  $4\,700 \text{ t/m}^2$  及  $6\,222 \text{ t/m}^2$  相当于压强为  $47 \times 10^6 \text{ Pa}$  及  $62 \times 10^6 \text{ Pa}$ , 它们超过所有软岩及大部分次坚硬岩石的抗压强度,  $14\,739 \text{ t/m}^2$  的压强则超过了几乎所有坚硬、极坚硬岩石的抗压强度, 这就是在不同强度的造山运动中, 很多软岩或全部岩层常发生强烈挤压破碎并伴生区域性构造变质 (片理化、糜棱岩化、混合岩化) 的原因. 一些所谓“超高压变质带”的出现, 也可能与此有关.

从理论上讲, 在地层向前推进褶皱成山的同时, 在其后方应出现相应的拉裂谷, 而实际上这也是确实存在的现象, 如秦岭山脉北侧即有渭河地堑; 大巴山脉北面有月河地堑等.

整个浅层地体在经向惯性离心力推动下的褶皱造山作用机制如图 5 所示.

由星地碰撞引起的惯性离心力是突然施加在全球表部岩体和水体的每个质点上, 使大陆地体和海洋水体同时突发强烈水平运动, 这样就不会出现 (像缓慢变形那样) 全由海洋水体运动包揽完成地球扁度调整任务, 而大陆地体运动无需 (无机会) 发生的问题了.

至于南北向 (经向) 展布的褶皱山脉的形成, 是因为地球自转速度变化时, 还有一个由切线加速度引起的纬向惯性离心力 ( $f_s$ ), 其数学表达式为:  $f_s = m \frac{d\omega}{dt} R \cos\phi$ , 式中  $\frac{d\omega}{dt}$  为地球自转速度变化的角加速度, 其值大于零时, 纬向惯性力的方向由东向西; 其值小于零时, 纬向惯性力的方向由西向东, 这种纬向惯性力有足够大时, 可以引起地球表部地体向西或向东运动, 形成褶皱山脉.

介于东西向与南北向之间的一些斜向或弧形褶皱山脉, 则是东西向或南北向构造在受力不平衡条件下的变种. 这方面我们赞成李四光先生在地质力

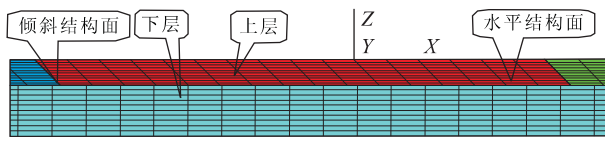


图 6 三维模型计算网格正视图(典型段:单元 6 040 个,节点为 13 398 个)

Fig. 6 Elevation of 3D-model mesh

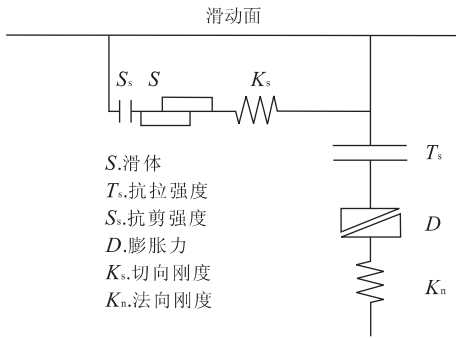


图 7 FLAC<sup>3D</sup>软件中 interface 的本构模型

Fig. 7 Constructive model of interface in FLAC<sup>3D</sup>

学中的解释,只是我们为之提供了足够强大的突发动力来源。

### 3.3 星地碰撞引发褶皱造山运动的数值模拟分析

为了进一步阐述星地碰撞形成褶皱造山的机制,本文采用数值仿真技术,对建立的三维地质模型进行了数值计算。

(1)采用的计算软件.数值计算软件采用国际著名的岩土工程软件 FLAC<sup>3D</sup>.该软件是由美国 Itasca Consulting Group Inc 开发的三维显式有限差分法程序,它可以模拟岩土或其他材料的三维力学行为.无论是动力问题,还是静力问题,FLAC<sup>3D</sup>程序均由运动方程用显式方法进行求解,这使得它利于模拟动力问题,如振动、失稳、大变形等.因此,适合处理复杂的高度非线性地质力学问题。

(2)计算范围与地质概化模型.根据前述图 1、2、5,建立图 6 所示的三维数值模型.模型为前文所述 4 000 km 受力地体前端部分,即切取 200 km 进行建模.因此,模型的  $x$  方向取 200 000 m;  $z$  方向(竖直向上)取 3 000 m;  $y$  方向取一个单位宽度.共划分单元 6 040 个,节点为 13 398 个.模型分上下两层,上层竖直向厚 1 000 m.

(3)地壳中软弱结构面的模拟.模型中设有在地体上、下层之间的水平方向软弱面以及在上层地体中的随机倾斜结构面.根据地壳中软弱结构面的物理力学性质,模型中的各组软弱结构面采用 inter-

face 结构单元进行模拟. FLAC<sup>3D</sup>提供的 interface 结构单元可以很好地模拟库仑滑动、拉伸和剪切等功能.它具有许多的物理特性,如:摩擦、粘聚力、剪胀性、法向刚度、剪切刚度、抗拉和抗剪强度等.其本构模型的物理元件组合关系见图 7(Itasca Consulting Group Inc.).

(4)岩体材料力学参数.根据图 4 和第二部分的分析,软弱结构面的材料力学参数( $c, \varphi$ )随深度的变化采用相应变化的数值进行赋值.模型中除软弱结构面之外的岩体部分,其粘弹塑性等力学性质采用岩体力学界普遍采用的莫尔—库仑模型。

(5)三维地质力学模型的地应力场及边界条件.根据以上分析,本计算主要采用自重应力场和构造应力场叠加的方式进行模拟.其边界条件,模型的底面因为是深部地壳,所以采用全约束形式;模型  $y$  方向采用法向约束形式;  $x$  方向一端(前方)采用法向约束,另一端(后方)采用位移边界.对于由外星撞击引起的地球径向惯性离心力增量施加在模型地体上的纵向推力(即模型体内的水平压应力)则采用上文地质分析得出的单位推力中常概数  $P=4\ 000\ \text{t}/\text{m}^2$ (即 40 MPa). FLAC<sup>3D</sup>软件中规定压应力为负,拉应力为正,本数值模拟中也采用同样的符号规定。

(6)计算结果.基于上述计算条件,经计算得出如下计算结果:模型地层褶皱及隆起成山的位移等值线见图 8,位移矢量图见图 9。

本次模拟中地体所受的水平推力为 4 000 t/ $\text{m}^2$ ,隆起高度约为 1 500 m,如果遇到如地质分析中所论述的上万吨推力,隆起高度还会增加许多.由以上数值模拟的结果,我们可以看出由星地碰撞提供的动力来源所引起的地球自转速度突然变化而产生的惯性离心力增量可以使地层产生大型褶皱,同时可以使变形地体沿着软弱层或软弱结构面逆推上冲而隆起成几百米甚至几千米的高山。

## 4 结论

(1)本文揭示了星地碰撞可以为大陆造山运动提供合适的动力来源,并简要阐明了其引发造山运动的作用机制。

(2)本文阐明的星地碰撞引发大陆造山运动的基本力学机制,是通过改变地球自转速率而产生的惯性增量来完成的.在这方面与李四光先生的“地质力学”有共同之处,但碰撞提供的强大而突发的动

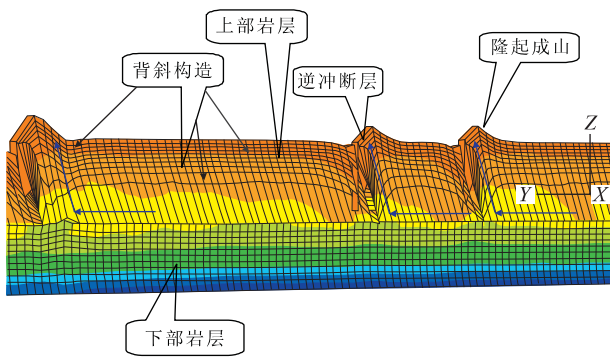


图 8 模型地层褶皱及隆起成山的位移等值线图(典型段)

Fig. 8 Drape and the displacement contour map

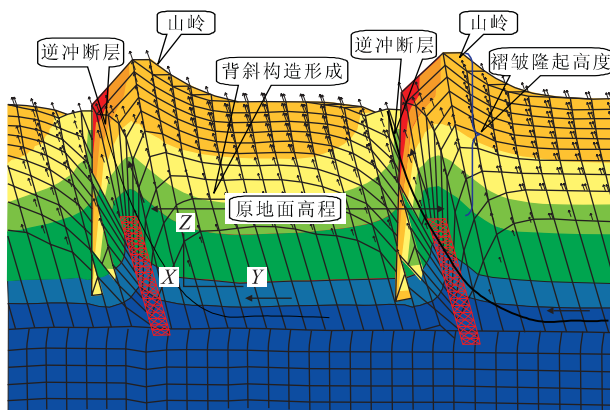


图 9 模型地层褶皱及隆起成山的位移矢量图(典型段)

Fig. 9 Drape and the displacement vector map

力,可以解决地质力学所遇到的力源不足和被海洋运动取代的两大难题。

(3)星地碰撞的地质构造效应理念给广泛发育于大陆地区、具有自身特色的褶皱造山作用提供了独立存在的动力依据,从而有助于人们在大陆构造研究中摆脱勉强搬用板块构造理论解释大陆构造的追风压力,但我们并不一概反对板块运动对大陆构造的可能影响。我们认为,星地碰撞构造与板块构造之间,以及所有地球内外动力所引发的构造作用之间的组合关系是应该加以统一研究的问题。

(4)本文是一个新的大胆假设,是否符合实际,还有很多问题有待进一步研究。如星地碰撞的外星来源、机遇及撞击遗迹(撞击坑)的研究;星地碰撞动力学的研究,我们现在是按传统的碰撞动量定理进行计算的,可否按动能定理或其他理论方法计算?它们的结果都关系到碰撞所产生的地球角动量变化率的大小和所引起的构造运动的强弱。

(5)星地碰撞的地质效应很广泛,除地质构造效应外,还有地层及岩石学效应、古气候及古生物学效

应、古地磁效应(刘广润和张宏泰,2005)等,有待全面、系统地加以研究。

致谢:中国地质大学(武汉)唐辉明教授及胡斌博士等、华中科技大学黄敏生博士和中国核工业集团公司董仕枢高工对本文的数值模拟、力学计算及资料收集方面给了有益帮助,特予致谢。

## References

- Chang, S. B., 1992. Handbook for engineering geology. China Architecture and Building Press, Beijing, 286—292, 319—320 (in Chinese).
- Chen, Q., Liu, Y. X., 2004. Introduction to geology. Jilin University Press, Changchun (in Chinese).
- Hu, L. Y., Li, Q. T., 1986. The nappe structure in Maoshan area. *Journal of Nanjing Geologic Institute (Special Issue of Nappe Structure)*, 25 (in Chinese).
- Jiang, C. F., 2002. Several significant geological problems about central orogenic belt and the progress of its research. *Geological Bulletin of China*, 21(8—9): 453—455 (in Chinese).
- Li, S. G., 1973. Introduction to geomechanics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, G. R., Zhang, H. T., 2005. Cause of geomagnetic polarity reversal; A view of collision dynamics of a celestial body with earth. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 371—376 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. J., Du, P. R., 1995. Current problems of earth movement. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ouyang, Z. Y., 1996. Impact of asteroid to paleoenvironmental catastrophe—Study on six Cenozoic bolide-impact events. Science & Technology of Hubei Press, Wuhan (in Chinese).
- Piero Elter, Mario Grasso, Maurizio Parotto, et al., 2003. Structural setting of the Apennine-Maghrebian thrust belt. *Episodes*, 26(3): 205—211.
- Stanton, R. L., 1972. Ore petrology (contains the description of Sudbury crater, Ontario, Canada). McGraw-Hill Book Company, 331—346.
- Tang, H. M., Yan, T. Z., 1993. The theory of rockmass fracture and its application. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Tao, Z. Y., Pan, B. T., 1991. Principle and methods of rock mechanics. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).

- Wang, D. J., Wang, X. J., Ding, S. J., et al., 1997. Baisha crater in Hainan island. Hainan Island Press, Hainan (in Chinese).
- Wang, Z. Q., Wang, T., Yan, Z., et al., 2005. Late Paleozoic forearc accretionary piggyback type basin system in the South Qinling, Central China. *Geological Bulletin of China*, 21(8-9): 456-464 (in Chinese).
- Wu, H. Z., 1997. Geodynamics of the rotating earth. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xu, J. H., 1985. A stormy record of geoscience revolution. Translated by He, Q. X.. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Zhao, Z. X., Yang, J. S., et al., 2003. Tectonic beneath plates and mantle dynamics. *Geological Bulletin of China*, 22(3): 149-159 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Dong, Y. P., Yao, A. P., 2002. Some thoughts on the study of continental dynamics and orogenic belts. *Geology in China*, 29(1): 7-13 (in Chinese).
- Zhang, X. F., Liu, C. C., Luan, Z. T., et al., 1989. Engineering test in situ. Geological Publishing House, Beijing, 123-134 (in Chinese).
- Zhu, N. J., Shangtian, C. Y., Jinshen, B. X., 1978. A hypothesis of crust movement—From continent drift to plate structure. Translated by Mou, W. G.. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Kulikovski, П. Г., 1954. Handbook for the lovers of astronomy. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Woronkov, И. М., 1954. Course of theoretical mechanics. Translated by Theoretical Mechanics Section, Harbin Institute of Technology. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- 附中文参考文献
- 常士骠, 1992. 工程地质手册(第三版). 北京: 中国建筑工业出版社, 286-292, 319-320.
- 陈琦, 刘永祥, 2004. 地质学概论. 长春: 吉林大学出版社.
- 胡连英, 李起彤, 1986. 茅山推覆构造. 南京地质矿产研究所所刊(推覆构造专题论文集): 25.
- 姜春发, 2002. 中央造山带几个重要地质问题及其研究进展. 地质通报, 21(8-9): 453-455.
- 李四光, 1973. 地质力学概论. 北京: 科学出版社.
- 刘广润, 张宏泰, 2005. 地球磁极倒转的星地碰撞成因. 地球科学——中国地质大学学报, 30(3): 371-376.
- 马宗晋, 杜品仁, 1995. 现今地壳运动问题. 北京: 地质出版社.
- 欧阳自远, 1996. 小天体撞击与古环境灾变——新生代六次撞击事件的研究. 湖北科学技术出版社.
- 唐辉明, 晏同珍, 1993. 岩体断裂力学理论与工程应用. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 陶振宇, 潘别桐, 1991. 岩石力学原理与方法. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 王道经, 王秀娟, 丁式江, 等, 1997. 海南岛白沙陨石坑. 海南: 海南岛出版社.
- 王宗起, 王涛, 闫臻, 等, 2005. 秦岭晚古生代弧前增生的背驮型盆地体系. 地质通报, 21(8-9): 456-464.
- 吴汉珍, 1997. 旋转地球动力学. 北京: 地质出版社.
- 许靖华, 1985. 地学革命风云录. 何起祥, 译. 北京: 地质出版社.
- 许志琴, 赵志兴, 杨经绥, 等, 2003. 板块下的构造及地幔动力学. 地质通报, 22(3): 149-159.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平, 2002. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考. 中国地质, 29(1): 7-13.
- 张喜发, 刘超臣, 栾作田, 等, 1989. 工程地质原位测试. 北京: 地质出版社, 123-134.
- 竹内均, 上田诚也, 金森博雄, 1978. 地壳运动假说——从大陆漂移到板块构造. 牟维国, 译. 北京: 地质出版社.
- 库利寇夫斯基 П. Г., 1954. 天文爱好者手册. 北京: 科学出版社.
- 沃伦科夫 И. М., 1954. 理论力学教程. 哈尔滨工业大学理论力学教研室译. 北京: 高等教育出版社.