

重力不稳定性与亚洲内陆三角形地震区 地球动力学特征

周 玖

(四川省地震局)

摘 要

本文研究了亚洲内陆三角形地震区的岩石圈厚度、上地幔顶部 Pn 波速度、上地幔密度分布、地壳结构、现代构造运动及地震活动等特征。认为该区内存在着地幔分异物质多元底辟现象,致使岩石圈减薄及地壳增生变厚,而巨厚的地壳处于重力不稳定状态,地壳物质发生流变,该区内现代构造运动与地震活动均与此有关。作者认为,重力是导致本区上地幔及地壳发生构造运动的主要力源之一。

亚洲内陆三角形地震区(下称三角区)面积约 $6 \times 10^6 \text{ km}^2$,其南西边为喜马拉雅山系,北西边由帕米尔至蒙古西部高原,东边为南北构造带。它是亚洲内陆一个重要的地震区。本世纪以来,该区内地震释放的总能量为亚洲内陆地震总能量的94%,因而该区是研究亚洲内陆地球动力学的理想场地。本文以重力为构造力源,讨论了该区地球动力学特征,藉以增进对区内现代构造运动及地震活动过程的认识。

一、三角区地貌与地壳结构特征

该区内分布有高原、盆地及褶皱山脉。其边缘展布着与边缘走向一致的喜马拉雅山、萨彦岭、贺兰山与龙门山等山脉,也有走向与边缘不尽一致的天山及阿尔泰山等山脉。部分边缘地带为明显的地形台阶(蒙古西部高原东侧)。该区是最新构造运动时期(3×10^7 年)差异性隆升区,成为一明显的分水岭。其北侧有叶尼塞河与鄂毕河等水系流入北冰洋,东侧有黄河与长江等水系汇入太平洋,南侧有印度河与恒河等流入印度洋,西侧的阿姆河等注入咸海。该区也是45km地壳等厚度线所围限的地壳增厚区^{[1][2]},其最大深度在70km以上,其边缘地区为地壳厚度剧变带。自上世纪末以来,三角区边缘带曾多次发生 $M \geq 8.0$ 级大地震,而其内部的地震活动性则相对较弱(图1)。该区外侧分布着印度、土兰、西伯利亚、鄂尔多斯及华南等稳定地块,其地壳厚度在40km以下(图2)。

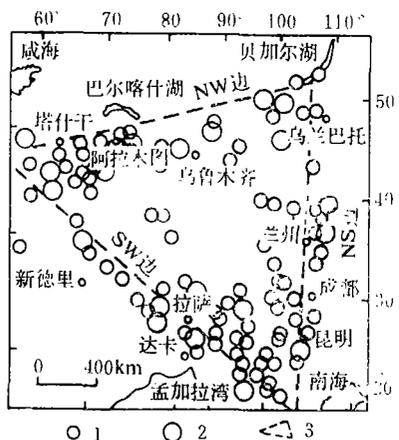


图1 亚洲内陆三角形地震区强震 (M ≥ 7.0) 震中分布图

1. M ≥ 7.0, 2. M ≥ 8.0 3. 三角区边缘带示意图

Fig. 1 The distribution of epicenters (M ≥ 7.0) in Asian Intracontinental Triangular Seismic Area (AITSA)

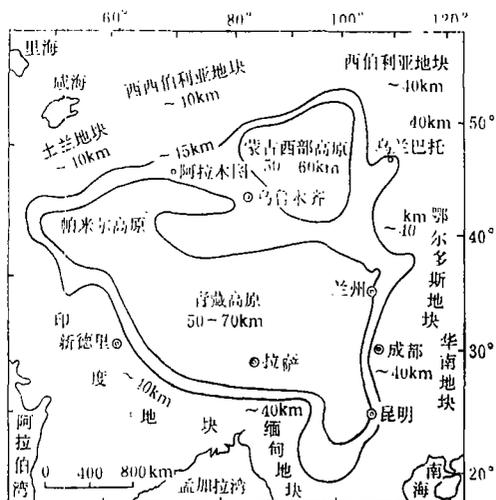


图2 亚洲内陆三角形地震区及其邻区地壳厚度分布示意图

Fig. 2 Sketch showing crustal thickness in AITSA and its adjacent areas

二、三角区构造力源、地壳物质运动方式及应力场

经拉萨的N22.5°E地壳剖面表明, 三角区内地壳具有中部增厚两端减薄的特征(图3 a)。在重力作用下, 该区内较厚的地壳中贮存着 1.5×10^{26} 焦耳位能。地壳的地形载荷与地幔对山根的上托形成该区地壳内水平应力体系(图3 b) [8], 它随深度而变化, 最大值达 2×10^8 Pa (图3 c), 在平面上呈辐射状展布(图3 d)。巨大的能量及强大的水平应力成为该区及邻近地带的构造力源。岩石的力学性质可以用伯格森方程来描述。伯格森体为

虎克体, 由开尔文体与牛顿体串联而成(图4 a), 其表达式为

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \\ &= \frac{\sigma}{\mu_1} + \frac{\sigma}{\mu_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) + \frac{\sigma}{\tau} t \end{aligned}$$

式中 ϵ 为总形变量, ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 分别为弹性、韧性及塑性形变分量, σ 为应力, μ_1 、 μ_2 为弹性与弹性后效模量, τ 为粘滞系数, τ_k 为弹性后效松弛时间。岩石在常应力长时间作用下, 塑性形变渐占主导位置(图4 b), 因而三角区内地壳物质可通过流变、断块滑动及地震活动等释放其内的剩余能量。

地壳物质扩展受水平应力的影响, 并且这种影响将随深度而变化, 按其变化特征可

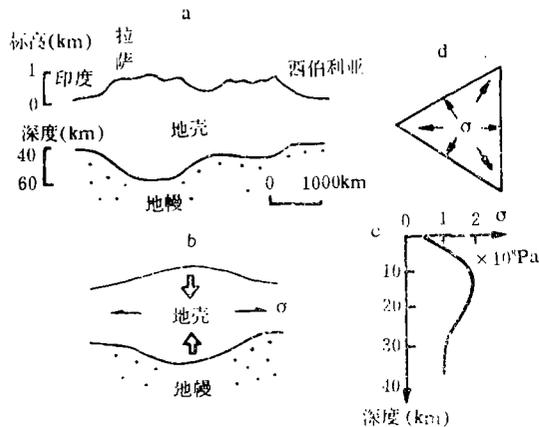


图3 亚洲内陆三角形地震区壳内水平应力示意图

Fig. 3 Sketch showing the horizontal stress within the crust of AITSA

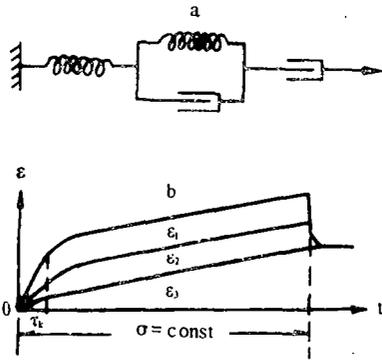


图4 伯格流变体模式与岩石形变—时间关系
a. 伯格体模式 b. 岩石形变—时间关系
Fig. 4 Bjrjers rheological Model and relationship between rock deformation and time

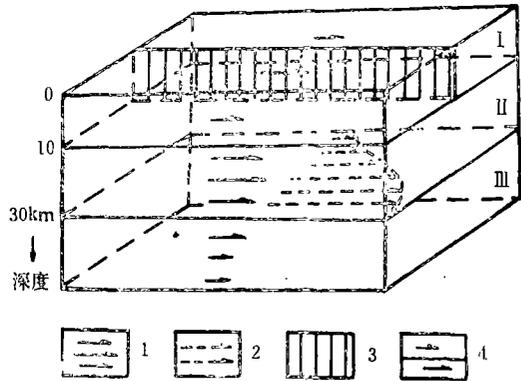


图5 地壳物质重力扩展三层模式
I. 载流层 II. 扩展层 III. 背景扩展层
1. 壳内物质扩展速率垂向变化 2. 壳内物质扩展速率水平向变化 3. 断层面 4. 断块差异运动
Fig. 5 Three-layer model of crustal material spreading

将地壳物质扩展过程简化为三层模式(图5)。深度在10km以内为载流层,以载流性断块活动为主;10~30km为扩展层(其中10~20km为优势扩展层);30km以下为背景扩展层。第二、三层均以连续介质式运动为主。扩展层是地壳内最重要的活动物质层,它控制着上载断块的水平与垂直运动,不仅是地壳内的孕震层,而且还是超变质带。

三角区内地壳厚度不均,其“拟质心”必然偏向地壳最厚的青藏地区。根据地壳内水平应力背离质心呈辐射状展布的特点,参考水平应力与地壳结构的关系[4],可以概略再造三角区现代构造应力场(图6)。该区内震源机制解P轴呈辐射状展布的势态与主压应力轴迹

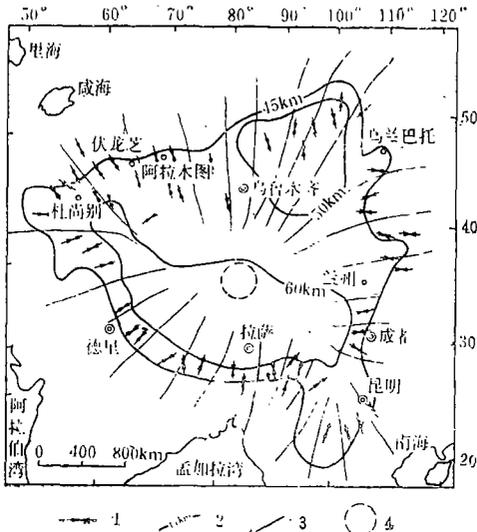


图6 亚洲内陆三角形地震区现代构造应力场
1. 震源主压应力轴方向 2. 地壳概略等厚度线
3. 最大主压应力轴迹线 4. 拟质心
Fig. 6 Recent tectonic stress field in AITSA

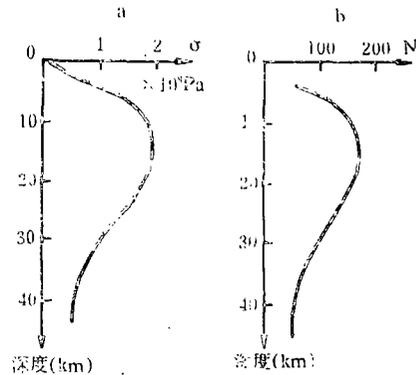


图7 亚洲内陆三角形地震区壳内水平应力垂向分布图与壳内震源深度频次分布曲线对比图
a. 壳内水平应力垂向分布曲线
b. 壳内震源深度频次分布曲线
Fig. 7 Sketch for comparing horizontal stress varying with depth and frequency distribution curve of focal depth in AITSA

线基本符合〔5、6〕。

根据对发生在中国、苏联与蒙古西部的300个地震的震源机制解资料的统计〔5、6〕，P轴仰角小于40°的占82%，表明震源部位受力状态是以水平力为主，与重力导致的壳内水平应力系一致。这些地震的震源深度一般为10—30km，震源深度频次分布曲线与水平应力垂向变化曲线相似（图7），表明地震的发生与地壳物质扩展速率相关。

三、现代构造运动与地震活动特征

1. 三角区边缘地带的构造活动性

三角区外侧分布有印度、土兰、西伯利亚、鄂尔多斯及华南地块，这些稳定的“凉”地

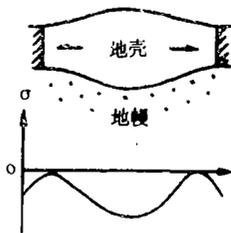


图8 地壳物质扩展阻滞前缘壳内水平应力分布特征

Fig. 8 The stress change in the resistance front of the boundary regions in AltSA

块地壳内物质粘滞系数与该区内部相比必然偏高。因此使三角区地壳内物质向外扩展受到程度不同的阻滞，在其边缘地区形成强压应力带〔8〕（图8）。以致边缘地区构造活动性最强，巨大地震均发生于边缘地区。

2. 地震能量释放规律与地震周期

上世纪末以来，三角区边缘地带巨大地震释放能量约为全区的90%，其释放顺序是由南西边→北西边→南北边，遂后又转入南

西边→北西边，以相同的能级按顺时针方向进行，显示出该区地震的发生受呈辐射状展布的壳内水平应力系的控制。至今在北西边释放的地震能量仍显不足（表1）。

三角区内的强震有重复发生的特点，其概略周期一般为10年及百年级次两类（表2）。由重力导致的壳内物质匀速流变时，岩石内部应力随时间增长而增强，当超过破裂强度时岩石破裂〔7〕，从而可得出岩石破裂周期： $T = \frac{\sigma_p}{\mu \dot{\epsilon}_0}$ 。

式中 σ_p 为岩石破裂强度， $\dot{\epsilon}_0$ 为形变速度。若取岩石弹性模量 $\mu = 3.4 \times 10^{10} \text{ N/cm}^2$ ，破裂强度 $\sigma_p = 980 \text{ N/cm}^2$ ，则当地壳物质相对形变率为 $10^{-5}/\text{年}$ 与 $10^{-6}/\text{年}$ 时，地震周期分别为十年与百年级次。因而强震重复周期与地壳物质流速有关，流速快者周期短，反之则长。

3. 三角区断层活动方式

当壳内物质扩展受阻滞时，高原一侧强烈抬升，边缘山脉陡峻，震源错动均以逆冲为主（图9A），以南西边喜马拉雅山一带最典型。根据对地震断裂错动方式的研究〔5〕，北西边绝大部分地区地震断裂错动以逆冲型为主（表3），东萨彦岭及蒙古西部也以逆冲型居多〔5〕。

在壳内物质扩展过程中，如两侧对其阻滞强而中间弱，则形成地壳物质流区。背离高原呈舌形结构的地壳等厚度线表征着地壳物质扩展扇，以川滇地区最典型〔4〕。该区内走滑断层发育，断层错动方式有序可循，走滑断层两侧物质作同向性差异运动（图9B）。此外，在扩展前缘的后方可形成张应力极大区（图9c）〔3〕，青藏高原发育有一系列南北向张性活断层，与高原地壳物质向东转南南东的扩展有关。综上所述，三角区内断层活动与地壳物质重

表 1

震时	地点	震级	能量(J)	边名	能量和(J)
1897	阿萨姆	8.7	7.1×10^{17}	SW	7.7×10^{17}
1905	克什米尔	8.0	6.3×10^{16}		
1905	蒙古	8.3	1.8×10^{17}		
1905	蒙古	8.3	1.8×10^{16}	NW	7.4×10^{17}
1906	玛纳斯	8.0	6.3×10^{16}		
1907	塔什干	8.0	6.3×10^{16}		
1911	阿拉木图	8.4	2.5×10^{17}		
1912	缅甸	8.0	6.3×10^{16}	SN	4.9×10^{17}
1920	海原	8.5	3.6×10^{17}		
1927	古浪	8.0	6.3×10^{16}		
1931	富蕴*	8.0	6.3×10^{16}	SW	6.0×10^{17}
1934	印尼边界	8.3	1.8×10^{17}		
1950	察隅	8.5	3.6×10^{17}		
1951	当雄	8.0	6.3×10^{16}		
1957	蒙古	8.3	1.8×10^{17}	NW	1.8×10^{17}

表 3

地 区	地震断裂错动方式		
	逆冲	正断	走滑
兴都库什	34	10	10
帕米尔	32	42	15
彼得一世山脉	10	5	2
吉萨尔山区	4	2	2
塔吉克凹陷	16	9	13
塔什干地区	9	3	1
费尔干纳地区	12	14	12
依萨库尔地区	6	4	3
北天山	2	6	1
纳勒恩地区	9	8	3
西哈萨克斯坦	1	—	—
乌兹别克	6	5	1
土库曼	2	2	1

*富蕴地震可能为本世纪初北西边活动期内的晚期震, 未予统计。

表 2

震时	地点	震级	Δt (年)	概略周期(年)
1897	阿萨姆	8.7	53	5×10^1
1950	察隅	8.5		
1905	蒙古西部	8.3	52	5×10^1
1957	蒙古西部	8.3		
1913	峨山	7.0	57	6×10^1
1970	通海	7.7		
1933	迭溪	7.5	43	4×10^1
6976	松潘	7.2		
1939	平罗	8.0	181	2×10^2
1920	海原	8.5		
1889	阿拉木图	7.5	22	2×10^1
1911	阿拉木图	8.4		
1536	西昌	7.3	314	3×10^2
1850	西昌	7.5		
1907	杜尚别	8.0	42	4×10^1
1949	杜尚别	7.6		
1119	奥希	7.8	35	4×10^1
1946	奥希	7.6		

力流变有关, 各类活动断层的根部终止于壳内流变层, 以倾滑型断层最明显, 其断层面从浅往深应由陡变缓, 渐趋水平。

四、三角区地球动力学模式

根据中国和邻区的深部探测成果[8-10], 三角区内软流层深度是在100km左右, 其外侧软流层较深或缺失(表4)。另外三角区内部岩石圈较薄, 而外区较厚, 内部上地幔顶部折射波速 V_{p_2} 值低于外区(表5)[10, 11]。

地震学研究结果表明, 在苏联中亚、帕米尔等造山活动强烈的地区内, 在不同层次的高速上地幔物质中存在着柱状、团块状或

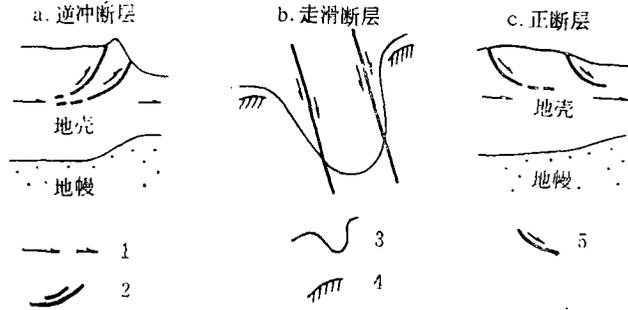


图9 断层活动方式示意图

1.地壳物质扩展的不同速率 2.逆冲断层倾滑面 3.地壳等厚度线表示的地壳物质扩展扇 4.地壳物质流阻滞前缘 5.正断层倾滑面

Fig. 9 Schematic diagram showing types of active faults

表 5

表 4

三角区内部地段	软流层深度 (km)
喜马拉雅和西藏	100~140
新疆塔里木	100~140
南北带北段文县	120
西海固	89
礼县西	92
南北带中南段	100
蒙古西部	75~100
贝加尔西	100
戈壁阿尔泰	100
东萨彦	100
哈萨克斯坦东南	100~120
帕米尔	110
兴都库什	110
三角区外固地段	软流层深度 (km)
印度地块及恒河平原	---
西西伯利亚地块东南	---
土兰地块	---
西伯利亚地块南部	200
蒙古东部	150~170
额尔多斯地块	120
四川地块	160
中国东南部	---

三角区内部地段	V_{p_n} (km/s)
新疆	8.06
伊犁	7.64
柴达木东	8.10
西藏当雄亚东	8.05
青藏高原东部	7.88
塔里木东部	7.90
南北带北段	7.93
南北带中南段	7.70
川西北高原	7.0~7.4
龙门山	7.5
云南地区	7.7
滇西南、缅北	7.59
天山帕米尔	7.8~8.0
苏联中亚	7.9
外贝加尔	7.7~7.8
阿尔泰、萨彦	8.0~8.1
三角区外固地段	V_{p_n} (km/s)
哈萨克斯坦北中部	8.4~8.6
土兰地块	8.4~
西伯利亚地块	8.1~8.4
贝加尔西	8.2~8.4
印度地块及恒河平原	8.1~8.4
华北平原西部山区	8.1~8.2
四川盆地	8.2~8.6

透镜状的低速物质。在西伯利亚地块以南的辽阔范围内,在地下250km以内的不同深度上发现有低速低密度异常物质,蒙古西部也存在大规模的非地幔物质^[12]。

由重力反演得出的中国上地幔120km深度的密度分布特征显示,在三角区内分布着一些圆形或椭圆的极低密度值(3.15)异常区,其外围则由极高密度值(3.40)异常带所环绕^[13],这一现象为邻区所未见。从中国 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 均衡重力异常图中也可以看出^[14],三角区内存在一些圆形或椭圆形负异常,显示出地壳底部增生而山根过剩。

作者认为,三角区岩石圈减薄可能与地幔分异低粘度热物质上涌,使岩石圈底部受到侵蚀有关。这种上涌作用并不均匀,在上地幔中形成若干低速低密度物质上升中心,其周围物质被压密形成高速高密度带。在这种多元底辟现象中,各底辟体在其发展的不同阶段,可表现为低速低密度的圆柱体、蘑菇体、透镜体或水平层。据计算,地幔深处的热物质上升速度相当快,可达1—2cm/年,系统的热损耗很小,根据上升至地壳底部的地幔物质成分及PT条件,这些物质将“焊接”在壳下,使地壳增生变厚,同时还具有较低的波速^[15]。以上推论也可以解释三角区岩石圈减薄、地壳增厚、 $V_{p\alpha}$ 减低,上地幔速度与密度非均质及重力均衡异常等现象。

结 语

三角区上地幔与地壳物质运动与重力不稳定性有密切的关系,这种运动也是重力作用下地球网层形成过程的继续。马杏垣教授曾指出,地球里所有物质的变位最终都是重力作用的结果,它在地壳运动中的重要性是无庸置疑的,不能不把它看作是地球构造过程中最现成、最强大的力量^[16]。美国地球动力学委员会在岩石圈讨论会的报告中也提出,重力是构造活动的控制力,这是无可非议的,尽管这是很少强调的事实。本文的研究也表明三角区上地幔与地壳物质运动特征也显示重力作用的重要性。

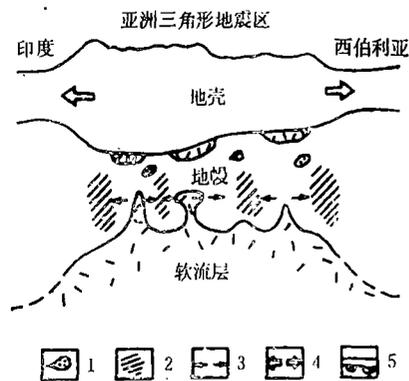


图10 亚洲内陆三角形地震区
地球动力学模式

- 1.上浮的上地幔较轻物质
- 2.上地幔物质压密区
- 3.软流层底辟体侧压
- 4.地壳物质重力扩展
- 5.地壳增生

Fig.10 A supposing geodynamic model in AITSA

(本文1989年9月22日收到)

参 考 文 献

- [1] Жуни Н.Я., Потапов С.В., Основные морфоструктуры поверхности верхней мантии азиатского континента, Физика Земли, No. 5, 1986.
- [2] 王谦身等, 亚洲大陆地壳厚度分布轮廓及地壳构造特征的探讨, 地震地质, Vol. 4, No. 3, 1982.
- [3] Artys Kkov E.V., Stresses in the lithosphere caused by crustal thickness inhomogeneities, J. Geophys. Res., Vol. 78, No. 32, 1973.
- [4] 周玖, 黄修武, 在重力作用下的我国西南地区地壳物质流, 地震地质, Vol. 2, No. 4, 1980.
- [5] Лук А.А., Механизмы очагов землетрясений и сейсмоструктурная Деформация средней Азии и Казахстана, в сб. "Землетрясения в СССР", изд. «Наука», Москва, 1985.
- [6] 国家地震局地质研究所, 亚欧地震构造图说明书, 地图出版社, 1981.
- [7] 周玖, 西南地壳物质流区应力积累机制与强震周期现象, 地震研究, Vol. 12, No. 1, 1989.

- [8] 国家地震局深部物探成果编写组, 中国地壳上地幔地球物理探测成果, 地震出版社, 1986.
- [9] Зорин и др., Толщина литосферы под Монголо-Сибирской горной страной и сопредельными регионами, Физика Земли, No. 7, 1988.
- [10] Рябой В.З., Структура верхней мантии территории СССР по сейсмическим данным, Изд. «Недра», Москва, 1976.
- [11] 国家地震局科技监测司, 中国大陆深部构造的研究与进展, 地质出版社, 1988.
- [12] Винник Л.П., Структурная геология глубоких недр земли, Природа, No. 5, 1988.
- [13] 冯锐, 中国地壳厚度及上地幔密度分布(三维重力反演结果), 地震学报, Vol. 7, No. 7, 1985.
- [14] 王懋基、程振炎, 均衡异常与地壳结构, 物化探研究报导, No. 9, 1982.
- [15] Furlong K.P., Fountain D.M., Continental crustal underplating; thermal considerations and seismic petrologic consequences, J.G.R., Vol. B91, No. 8, 1986.
- [16] 马杏垣等, 重力与构造, 构造地质论丛(1), 地质出版社, 1981.

GRAVITATIONAL INSTABILITY AND CHARACTERISTICS OF GEODYNAMICS IN THE ASIAN INTRACONTINENTAL TRIANGULAR SEISMIC AREA

Zhou Jiu

(*Seismological Bureau of Sichuan Province, Chengdu, China*)

Abstract

Since 1900 the Asian intracontinental great earthquakes ($M \geq 8.0$) mainly have distributed in the three boundary zones of a vast triangle-shaped area, in addition, within this area the seismic activities are rather strong. The three boundary zones in turn are as follows: the Himalayas, the mountainous regions from Pamirs to West Mongolia, and the North-South Tectonic Belt in China. The author terms this area as the Asian Intracontinental Triangular Seismic Area (AITSA).

Based on the characteristics of the lithosphere thickness, the values of V_{pn} , the distribution of the upper mantle density, the isostatic gravity anomalies, the crustal structure, recent tectonic movement and seismic activities, the author infers preliminarily that, under the action of the gravity force, beneath AITSA there exists multi-diapirism from asthenosphere. Owing to this process of the upper mantle materials, the thinning of the lithosphere as result of erosion and the thickening of the crust due to accretion may take place. The thickened crust is in a state of gravitational instability, resulting in the crustal materials flow, which controls the recent tectonic movements and the seismic activities within the crust.

According to this paper, the gravity may be the major one of the un-negligible tectonic driving forces in the AITSA.