

瑞雷-泰勒不稳定性与中国东部岩石圈 ——三论岩石圈地幔蘑菇云构造

袁学诚¹ 李善芳¹ 管 焯²

(1.中国地质调查局发展研究中心,北京 100037;2.中国地质科学院地质研究所,北京 100037)

摘要:本文讨论引起中国东部岩石圈巨变的动力。认为较重的岩石圈地幔位于较轻的软流圈之上形成的瑞雷-泰勒不稳定性驱动岩石圈地幔流动是东部岩石圈巨变的构造动力。由于瑞雷-泰勒不稳定性只存在于中年期大陆,老年期与青年期大陆都不存在瑞雷-泰勒不稳定性,因而只有像中国东部那样的中年期大陆才能发生蘑菇云地幔构造。

关键词:中国东部岩石圈;岩石圈地幔蘑菇云构造;瑞雷-泰勒不稳定性

中图分类号:P542 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)01-0001-11

1 大陆两大疑难构造问题与岩石圈拆沉

Bird P 在研究 Colorado 高原时指出,板块构造用于大陆地质已解决了许多重要问题,但至少有两个大陆构造问题看来是板块理论无法解决的。这就是:大陆内部出其不意的隆升及远离板块边界的岩浆活动^[1]。他随后指出,如果我们放弃大陆是一整体的板块的观念,而认为壳幔间可能脱偶,有可能找到问题的解决方案。他又说,实验室内研究变形发现在正常莫霍温度下,硅铝质地壳壳内可发生蠕变位移^[2]。当今的 Zagro 发现壳幔间滑脱^[3],喜马拉雅造山带壳幔间发现“拆离”^[4]。这些过程可以发生在大陆碰撞带,为什么它不能发生在板块内部?

如果在板块内部发生了这样的过程,因为岩石圈地幔的密度大于其下伏软流圈的密度(图 1)^[5],在力学上处在不稳定状态,致密的岩石圈地幔就可能从地壳脱落下沉。Bird 称这种作用为岩石圈拆沉。

2 使人困惑的中国东部岩石圈

Bird P 提出的大陆内部出其不意的隆升及远离

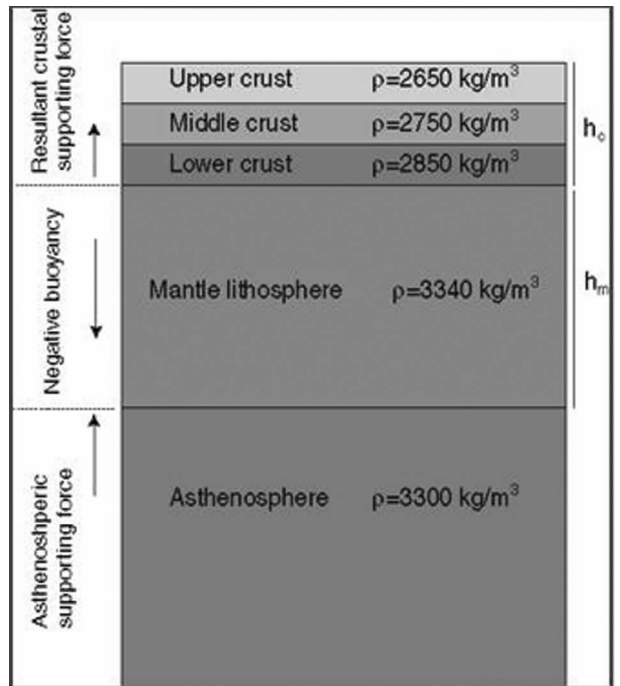


图 1 岩石圈几何及密度模型^[5]

Fig.1 Geometrical and density model of the lithosphere^[5]
Upper crust—上地壳;Middle crust—中地壳;Lower crust—下地壳;
Mantle lithosphere—岩石圈地幔;Asthenosphere—软流圈;Resultant crustal supporting force—地壳支持合力;Negative buoyancy—负浮力;
Asthenospheric supporting force—软流圈支持力

收稿日期:2011-10-13;改回日期:2011-10-29

基金项目:中国地质调查局“中国地质构造区划综合研究与区域地质调查综合集成”项目(1212010811033)资助。

作者简介:袁学诚,男,1928年生,教授级高级工程师,从事深部地球物理研究工作;E-mail:xcyuan@263.net.cn。

板块边界的岩浆活动等两个板块理论至今还无法解决的问题折射中国大陆构造中的两个为全球瞩目至今尚在热议的疑难构造问题。这就是世界最大的青藏高原的强烈隆升和远离太平洋板块西缘俯冲带的中国华北的岩浆活动。

中国东部地台匪夷所思的构造特征受到地质学家的关注已非一夕。黄汲清发现它们规模小,具有线状隆起和深凹陷,沉积盖层厚度大,盖层和基底都常受到强烈的褶皱以及岩浆作用发育广泛。因而将它们称为“准地台”,以有别于稳定的“正地台”^[6,7]。陈国达则认为中国东部中生代以来发育强烈岩浆活动,表明它们已失去地台的稳定性质,正在向地槽转化,因而将它们称为“活化地台”^[8]。

20 世纪末,地球物理和地球化学异军突起,并对华北地区的强烈构造活动进行了多方位的探索研究。中国东部最初浮出水面的重大深部问题是岩石圈“减薄”。

中国东部岩石圈减薄的发现首先来自地球化学的研究。地球化学家发现在山东蒙阴和辽宁复县等地奥陶纪金伯利岩筒中的太古宙地幔捕虏体样品以及金刚石中的矿物包裹体组合揭示该区的地幔成分具有低热导率、克拉通地温的特点。岩石圈与软流圈之间的界面深度约 180 km。而新生代发育区下的地幔玄武岩具高地温,岩石圈与软流圈界面深度约 80 km(图 2)^[9]。这就意味着从古生代到现在,岩石圈厚度已减薄了约 1/2。

中国东部古生代稳定岩石圈模型见图 3-A。被认为已减薄的岩石圈模型见图 3-B,它的地壳厚度已减至约为 35 km,岩石圈总厚度已减至 80 km。减薄后的岩石圈地幔组成有两种不同观点(图 3-B 虚线),一种观点认为现今的岩石圈地幔是由上部减薄后的残留和下部新生地幔组成,第二种观点则认为减薄已涉及到地壳,应是部分下地壳连同下部的岩石圈地幔一同被减薄(移离),地壳下直接就是新生地幔。支持前一种论点的主要证据是在新生代玄武岩的地幔橄榄岩捕虏体中存在高镁的橄榄岩包体或高镁的橄榄石捕虏晶,它们应该是残留的古老岩石圈地幔。后一种观点的主要证据是,新生代玄武岩中幔源包体的岩石学与地球化学特点反映的该时期岩石圈地幔以亏损型的海洋型地幔为主^[10]。

与岩石圈减薄推论相反,地球物理却在中国东部岩石圈内发现蘑菇云构造^[11-12]。地球物理用地震

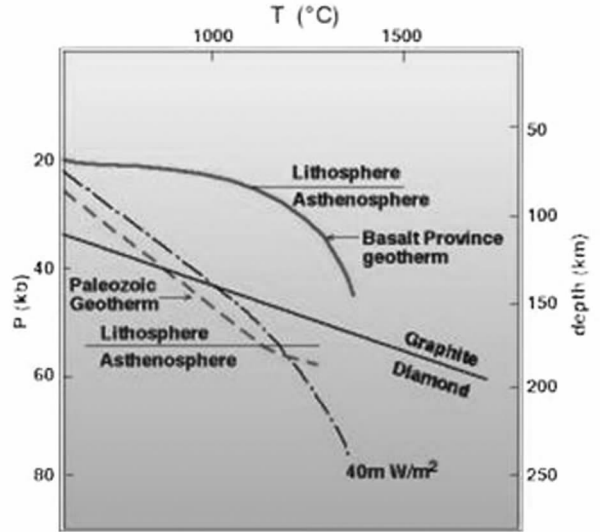


图 2 太古宙地温和年轻地温的比较^[9]
Fig.2 Comparison between the Archean and the younger geotherms^[9]
Lithosphere—岩石圈;Asthenosphere—软流圈;Basalt province geotherm—玄武岩省地温;Paleozoic geotherm—古生代地温;Graphite—石墨;Diamond—金刚石

层析实测证实岩石圈并没有“减薄”,而是由于软流圈物质蘑菇云状的上升,岩石圈被改造重组(图 3-C)。它的上部出现一个新的壳幔过渡层,由下地壳和岩石圈地幔顶部局部熔融重组而成(蘑菇云盖),这一过渡层的埋深约 35 km,厚度约 45 km。它的下部形成一个软幔过渡层,它由高角度侵入的软流圈物质(蘑菇云柄)和残留的古老岩石圈地幔组成。在这一地区地表出露中生代火山岩有高钾钙碱性岩与橄榄安粗岩等两个系列。前者常被误认为是岛弧火山岩,实际上却是代表壳幔过渡层中的壳源熔融体。后者则代表软幔过渡层中的幔源熔融体。由于软幔过渡层的埋深大,除了高分辨率的地震体波方法外,别的地球物理方法都无法得到它们内部细结构,只能探测得到一个速度和电阻率的数值与上覆的壳幔过渡层不同的低速低阻层。这一巨层顶部埋深约为 80 km。将岩石圈地幔厚度误认为减薄的原因就是将这个岩石圈地幔内部的新界面误认为是岩石圈的底界。

地球物理与地球化学对东部岩石圈结构认识上的巨大落差源于两个学科研究对象与研究方法的不同。地球化学研究化学元素及其同位素在地球演化历史中的分布和迁移规律,但它不能得到岩石圈的构造图像。地球物理可以得到当今地质体各种物理

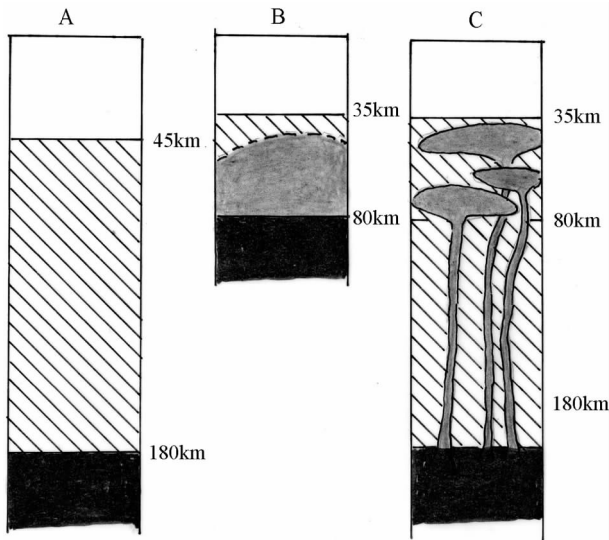


图 3 正常岩石圈(A)、减薄岩石圈(B)与蘑菇云地幔岩石圈(C)
(白色为地壳,斜线为地幔,黑色为软流圈,灰色为新生地幔)

Fig.3 Normal lithosphere, thinning lithosphere and mushroom mantle lithosphere
(White-Crust, Oblique line-Mantle, Black-Asthenosphere; Grey-Juvenile mantle)

特性的二维甚至三维深部图像,但它不能直接得到深部物质的成分,更不用说它们的演化。因此,不同学科应该精诚团结、共创辉煌。得到的推论应具包容性,不能与各学科分别得到的基本事实相抵触。否则就容易陷入“白马非马”的诡辩泥潭。

3 热议中的中国东部岩石圈拆沉模型

Bird P 等^[1-3]所描述的岩石圈拆沉过程是一个连续的“三脚跳”:第一跳,必须出现贯通岩石圈地幔的构造,岩石圈地幔遭受重创;第二跳,壳幔边界发生局部熔融,出现险情;第三跳,大块岩石圈地幔与地壳脱离而下沉。拆沉导致软流圈和岩石圈地幔换防,岩石圈地幔掉进软流圈而被融化消失,软流圈上升占领失去控制下沉的岩石圈地幔块体的位置,形成新生地幔。其后果是大地热流值大增,引发镁铁质火山作用,地震波传播速度下降。

有多种地质作用可以完成从软流圈到地壳底部的贯通构造的第一跳,如板块内部的不稳定(instability)、裂解(rifting)、地幔柱上升(plume erosion)、俯冲(subduction)等(图 4)^[1]。纵贯华北的郯庐断裂被认为可能就是这样的构造^[13]。

壳幔边界局部熔融的第二跳至少有两种可能^[14]:

一种可能是随着地幔物质上升,它的内部压力释放导致地幔熔点下降,另一种可能是岩石圈地幔中混入壳源物质导致熔点下降。属第一种情况的有洋中脊。洋中脊下方的地幔隆升时,其内部压力逐步下降,当上升到深约 50 km 处,地幔物质开始熔融而涌出地面。而地壳沿俯冲带俯冲到地幔内则属于第二种情况,俯冲使含有水、钠、钾等不相容元素的地壳物质带入地幔,地幔熔点下降。

岩石圈拆沉最后一跳最具戏剧性,岩石圈地幔的顶界已沿壳幔边界拆离,它已成为一个没有后方的孤立块体,在重力作用下好像遇难的泰坦尼克号,无奈向下沉没到软流圈内。

触发岩石圈地幔拆沉的诸多地质过程中,最容易被接受的是俯冲。俯冲带本身常常就是一个贯通岩石圈地幔的不连续带。板块俯冲时壳幔已拆离,被拆离的岩石圈地幔块体自然下沉,软流圈便像替补队员迅速回流到位,形成新生地幔。

南美阿根廷安第斯高原是俯冲拆沉并引发火山作用的一个例子。2~3 Ma 时,阿根廷 Puna 地区地壳减薄、地壳缩短,镁铁质火山作用遍布全区,地表上升^[15]。

图 5-a 是穿越安第斯的地震剖面及其地质解释。俯冲将大陆岩石圈撕开一个空间,大陆岩石圈和地壳组成的块体拆层下沉,软流圈上升填充到位。并引发火山,地面上隆。痕量元素分析,地震透明体处的洋岛玄武岩(OIB)的熔融程度最高,在 OIB 靠海岸一侧的钙碱性火山岩的熔融程度中等,而分布在厚岩石圈的东南地区的橄榄玄粗岩(shoshonite)熔融程度最低。

类似的俯冲拆沉还发生在内华达^[17-18],西地中海阿尔沃兰海盆^[19-20],东喀尔巴千山^[21-23],Tyrrhen 裂谷^[24],加拿大西北^[25],伊朗北部^[26],安纳托利亚东部^[27],豪勋爵岛^[28]等地。

许多学者认为俯冲拆沉是引起中国东部岩石圈巨变的主要原因。但中国大陆以东地区是一个多板块活动的复杂地区。要确认东部岩石圈拆沉由板块俯冲所引发,首先要破解到底是哪一个板块对华北陆块俯冲引发岩石圈拆层的谜团。有以下几种可能的解:

(1)太平洋板块或菲律宾海板块:有人认为使得东部岩石圈发生剧变的罪魁祸首是太平洋板块,或菲律宾板块,是它们向中国大陆俯冲引发了岩石圈

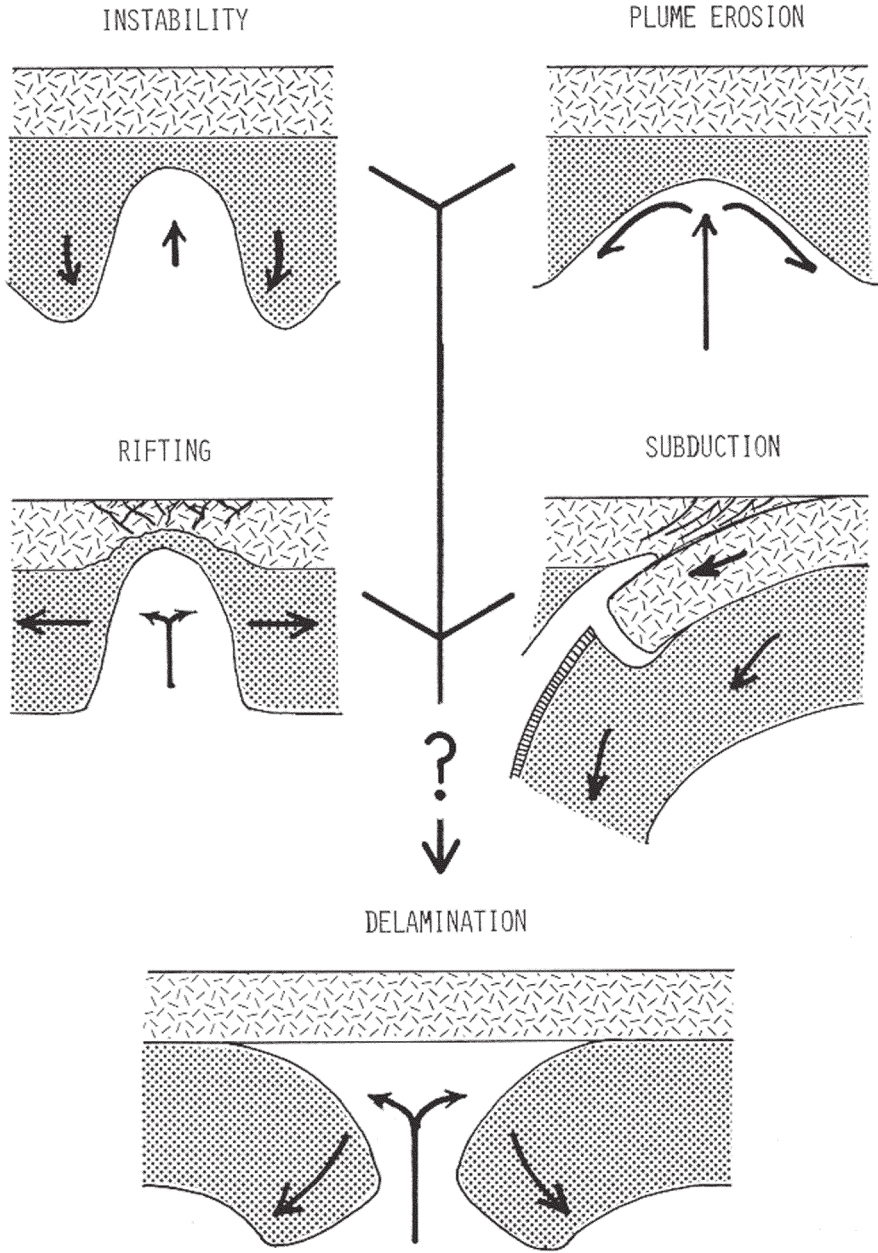


图 4 诱发拆沉的 4 种可能^[1]
 Fig.4 Four possibilities of delamination^[1]

拆层。

菲律宾海板块是被太平洋板块与欧亚大陆所夹持的块体。它的东部边界是太平洋板块的西缘俯冲带。它从千岛海沟,经日本海沟,伊豆—小笠原海沟,马里安纳海沟,到雅浦海沟。菲律宾海板块的西部边界则是菲律宾海板块的东缘俯冲带。它从琉球海沟,经台湾,到吕宋海沟。

有多种地球物理方法可以探测到俯冲带的俯冲

方向及其形态,其中最具有单一解的地球物理证据应数地震震中分布^[2]。沿菲律宾海板块东缘俯冲带从地表到 200 km 的深度处,地震震中均分布在很窄的一个范围内,说明它们的俯冲从地表到深 200 km 是近垂直向下的。太平洋板块西缘俯冲带的深部形态按地震震中的分布可分成内带与外带。外带的位置与千岛海沟、日本海沟、伊豆—小笠原海沟和马里安纳海沟一致,震中深度一般小于 200 km,也分布

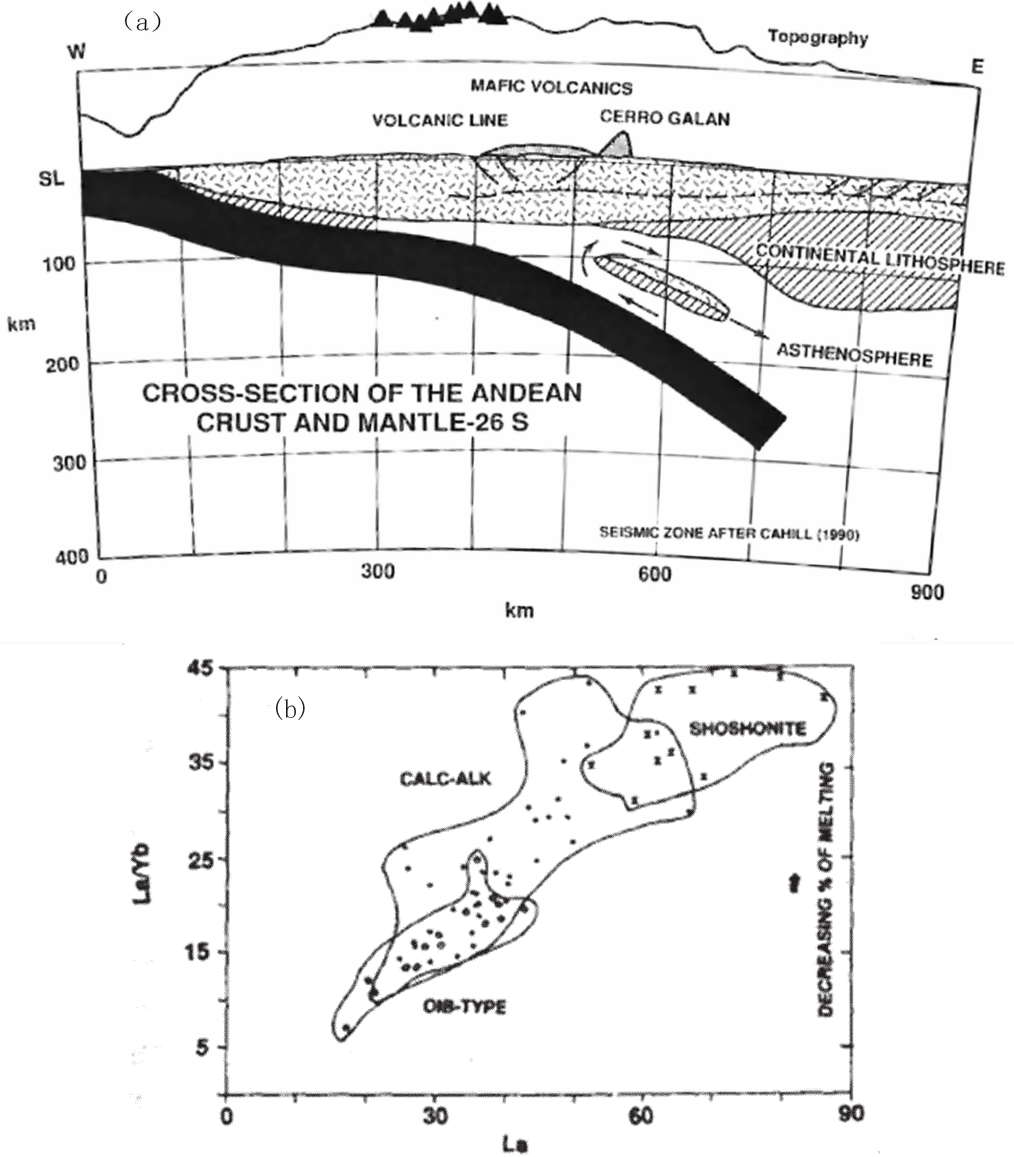


图 5 安第斯岩石圈剖面图^[16] (a)和安第斯火山岩地球化学分类^[16](b)

Fig.5 Lithospheric profile across Andes^[16](a) and Geochemical classification of volcanics in Andes^[16](b)

在一个很窄的范围内,意味着它们的俯冲也是近垂直向下的。内带位于日本海内,它经萨哈林岛南端向东北收拢,与外带逐渐合并。内带的南东方向则约经京都,与外带逐渐靠拢合并。位于日本海内的地震震中分布弥散,并已透入中国东北地区。地震震中的分布说明,在软流圈以上,太平洋板块近垂直向下俯冲,在软流圈以下,太平洋板块楔状越过日本海向亚洲大陆俯冲。图 7 是以板片等深线表示的太平洋板块俯冲的形态^[29]。

因此,根据地震震中的分布,太平洋板块和菲律宾

海板块都没有俯冲到除中国东北而外的中国大陆下。

(2)在中国东北地区 600 km 不连续面上,地震层析发现有一个平卧的高速异常^[30]。有人认为它是从日本海沟俯冲入中国大陆下太平洋板块的反映;有人更认为,它是推动中国东部岩石圈巨变的“杀手”。

大陆岩石圈厚度大,需要很高的温度才能使上升的地幔物质冲破固相线达到岩石圈底部。地幔的位温为 1 475 °C,如它上升到约 115 km 处时,将会因减压而熔融,在 115 km 以下,地幔的静水压力将阻止其熔融^[14](图 8)。因此它们对中国东部岩石圈的构

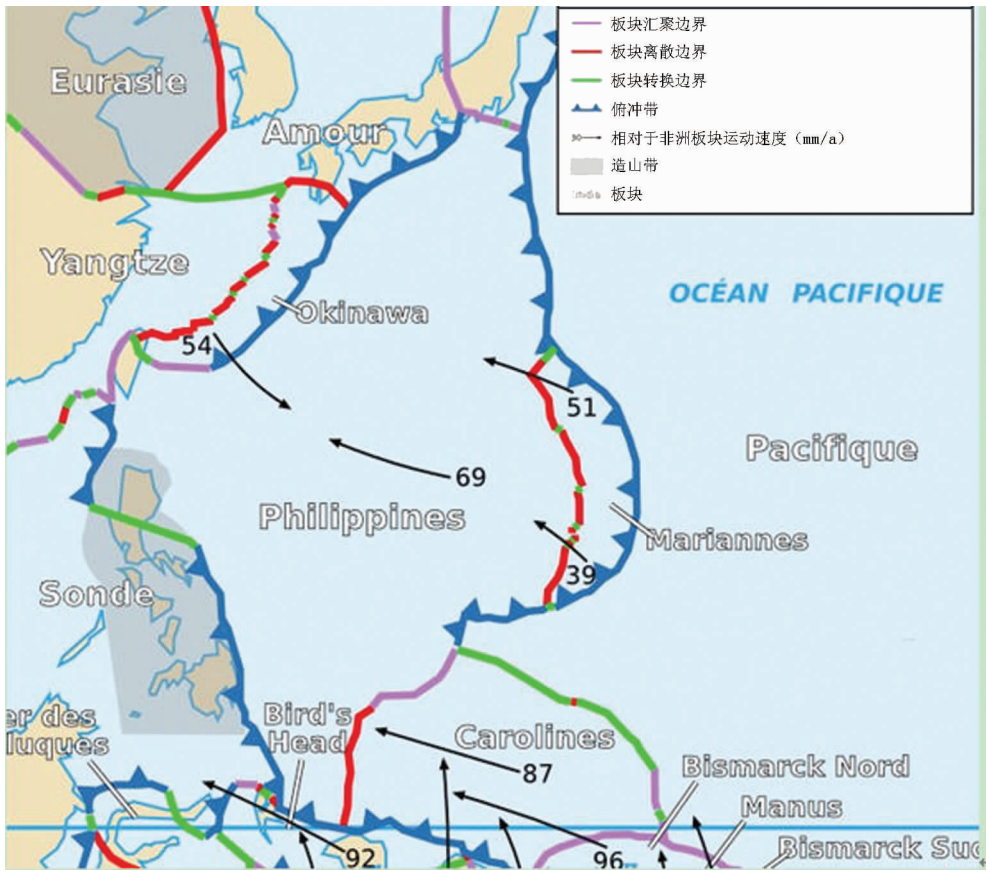


图6 西太平洋地区的板块(据维基百科辞典)

Fig.6 Plates in Western Pacific (after Wiki)

Eurasian—欧亚板块; Yangtze—扬子板块; Amour—黑龙江板块; Okinawa—琉球板块; Sonde 巽他板块;
 Bird' Head—鸟头板块; Philippines—菲律宾板块; Pacific—太平洋板块; Mariannes—马里安娜纳板块;
 Carolines—卡罗琳板块; Bismarck Nord—北俾斯麦板块; Bismarck sud—南俾斯麦板块; Manus—米诺斯板块

造作用几乎为零(这里的位温是指一束压力为 P 的流体绝热地提升到标准参考压力 100 kPa 的温度)。

(3)还有一种观点认为,虽然当今太平洋板块向西北俯冲,难于和中国东部强烈的岩浆活动相联系。推测在中生代时,太平洋板块曾向西向中国大陆俯冲。中国东部岩石圈巨变是中生代太平洋板块向中国大陆俯冲的遗迹。但是基于在西太平洋保存下来的磁条带和断裂带进行构造复原,在晚侏罗世时,太平洋板块才形成于法龙板块、凤凰板块和伊佐奈歧板块的三联点处^[31]。中国东部岩石圈巨变的峰期是晚侏罗世—早白垩世。要说中生代时太平洋板块影响东部岩石圈,就会是上演关公战秦琼了。

(4)那么,会不会是太平洋的父辈,伊佐奈歧板块向西俯冲,造成东部岩石圈的巨变?伊佐奈歧板块在 130~100 Ma 时开始俯冲到东欧亚板块之下。它的快速运动使得日本的西北部及西南外圈北移。

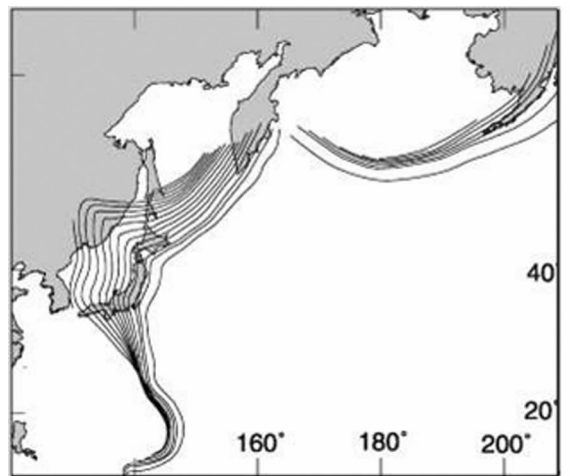


图7 阿留申板片与库页—日本—马里安娜板片等深图^[29]
(日本海沟处等深线从 0 到 700 km)

Fig.7 Slab contours for the Aleutian slab and the Kuril-, Japan- and Mariana slabs^[29]
(Depth contours are shown every 50 km from 0 km to 700 km in the Japan Trench)

约95 Ma年,伊佐奈歧板块完全俯冲并被向北西方向俯冲的西太平洋板块所代替。在60~55 Ma,伊佐奈歧—太平洋洋脊遭受灭顶之灾俯冲消失,太平洋板块才运动到目前的位置。伊佐奈歧板块的研究材料还太少。它的俯冲带位置在哪里?俯冲角度多大?俯冲到大陆的什么地方等问题还需要今后继续探讨。

(5)也有人认为华北岩石圈的拆沉是扬子板块向华北板块俯冲结果^[32-33]。但是穿过秦岭造山带的以反射地震为主的综合地球物理剖面 and 穿过大别山的以反射地震为主的综合地球物理剖面都显示,秦岭—大别造山带是由华北和扬子两大陆对冲形成的^[34-35],俯冲带近垂直向下。

4 岩石圈地幔蘑菇云构造模型

既不是板块俯冲,也不是拆沉,那么是什么机制造成中国大陆以东地区岩石圈巨变的呢?根据大量地球物理资料,可以判定是岩石圈的瑞雷-泰勒不

稳定性(Rayleigh-Taylor instability)造成岩石圈蘑菇云构造。

在物理学上,密度较大的流体位于密度较小的流体上时要发生不稳定流动,称为瑞雷-泰勒不稳定性流动。因为它是由重力推动的,所以瑞雷-泰勒不稳定性又称重力不稳定性。Taylor 洞察到,这种情况等同于在无重力作用下,轻的流体加速进入到重的流体中。

在中国东部,岩石圈从地表到地幔底部,密度都是递增的,从岩石圈地幔过渡到软流圈,密度才发生突变。岩石圈地幔的密度为 3 340 kg/m³,而软流圈的密度为 3 300 kg/m³(图 1)。岩石圈地幔密度大于软流圈,形成一个瑞雷-泰勒不稳定性,便会发生瑞雷-泰勒不稳定性流动。

由瑞雷-泰勒不稳定性流动引发的岩石圈地幔蘑菇云构造模型对岩石圈的改造不需要外力,不需要复杂的“三脚跳”过程,而是一步到位。当发生瑞雷-泰勒不稳定性时,向下流动的重流体将形成指

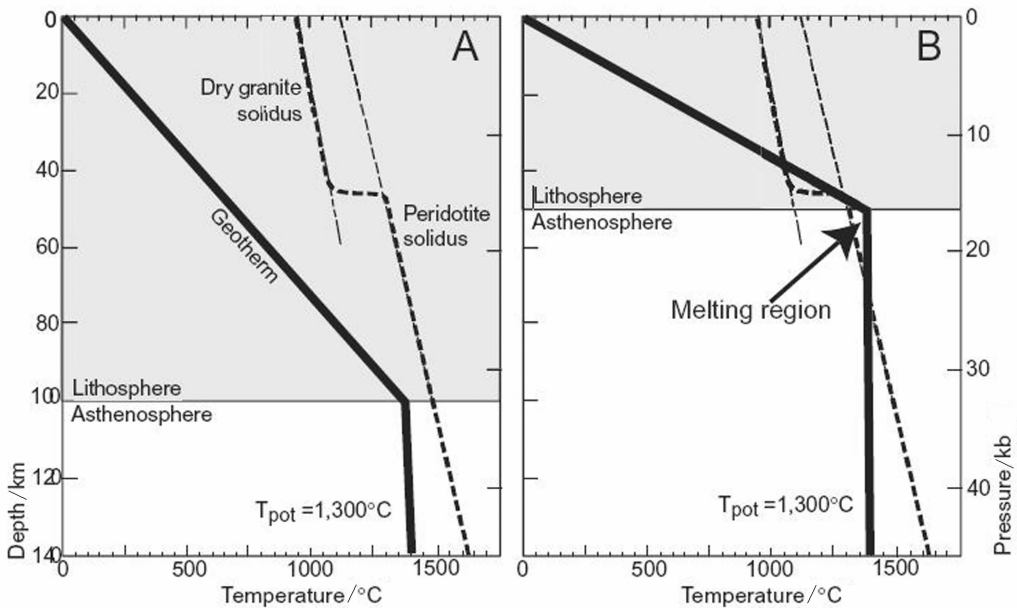


图 8 大陆下熔融热模型^[14]

(干固相线代表地壳,干橄榄岩固相线代表岩石圈地幔及上地幔)

A—岩石圈下无熔融发生;B—岩石圈减薄一半,上地幔和下地壳均有熔融发生。此图说明,在厚岩石圈下很难发生地幔熔融

Fig.8 Thermal model for melting under continents^[14]

Approximate dry solidi are shown for both granite (as a proxy for crust) and peridotite (as a proxy for both lower lithosphere and mantle). A, no melt is produced under the lithosphere. In panel B, the lithosphere has been thinned by half, and in both the upper mantle and the lower crust ambient temperatures exceed the solidi, creating melt. These figures demonstrate the difficulty of producing mantle melt under thick lithosphere

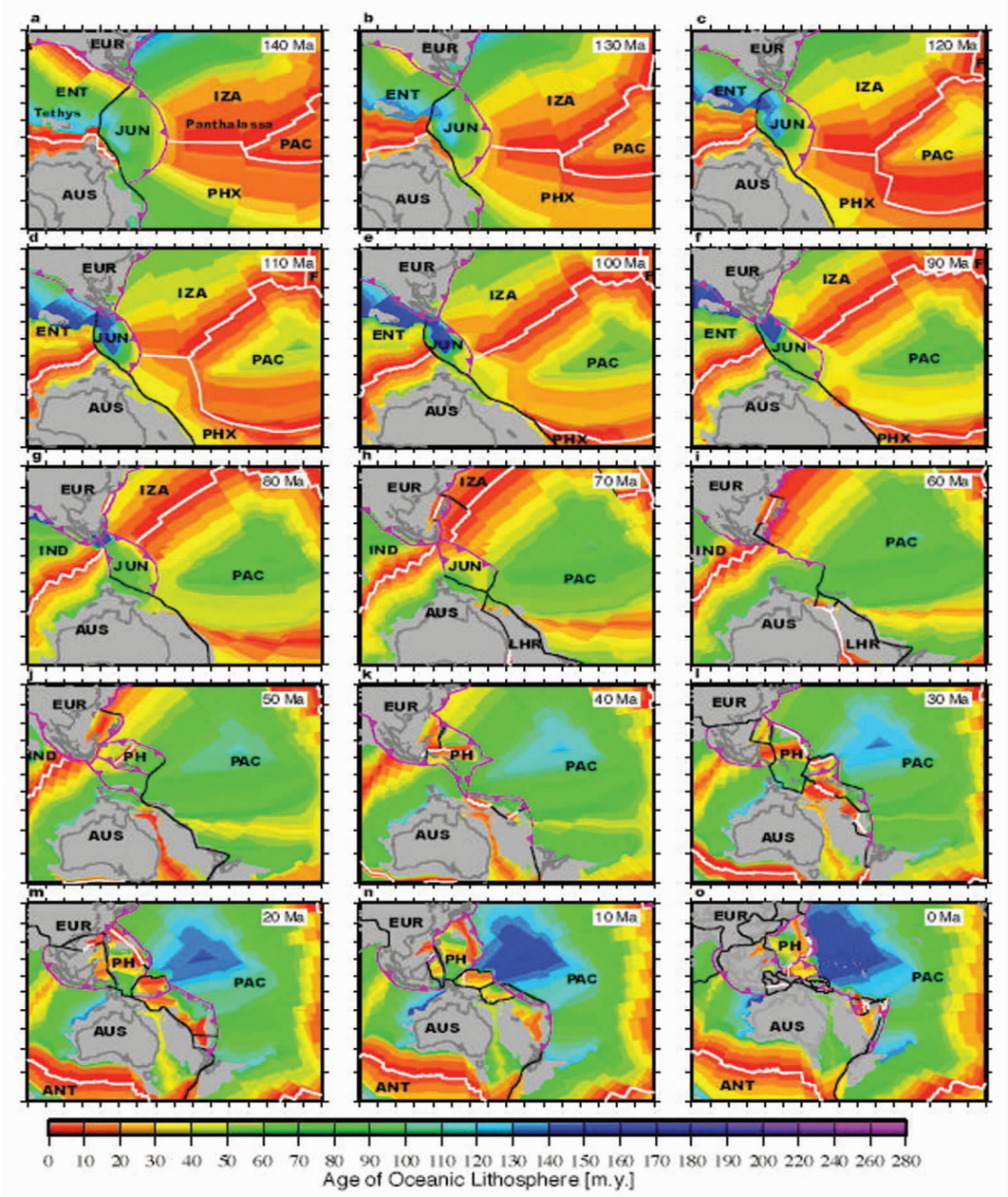


图9 澳大利亚以北以东地区板块运动重建^[31]

(从 140 Ma 至今, 每隔 10 Ma 年)

AUS = 澳大利亚板块; EUR = 欧亚板块; ENT = 东新特提斯板块; JUN = 连接板块(澳大利亚北); PAC = 太平洋板块; F = 法拉龙板块; PHX = 凤凰板块; IZA = 伊佐奈歧板块; LHR = 豪勋爵岛板块; IND = 印度板块; ANT = 南极板块; PH = 菲律宾海板块
白色线条为活动扩张脊, 齿状线条为俯冲带线上三角形示俯冲方向, 黑线为转换边界, 灰色区为大陆地壳岛弧或未知地壳

Fig.9 Absolute plate motion reconstructions^[31]

(Mercator projection) showing age of oceanic lithosphere every 10 MM years from 140 Ma to the present day for the northern and eastern Australian region. AUS = Australian Plate, EUR = Eurasian Plate, ENT = Eastern Neo-Tethys Plate, JUN = Junction Plate (north of Australia), PAC = Pacific Plate, F = Farallon Plate, PHX = Pheonix Plate, IZA = Izanagi Plate, LHR = Lord Howe Rise Plate, IND = Indian Plate, ANT = Antarctic Plate, PH = Philippine Sea Plate. White lines denote active spreading ridges, magenta lines are subduction zones with triangles denoting the direction of subduction, black lines are transform boundaries. Filled grey areas indicate continental crust, island arcs or unknown crust

状体,称为瑞雷-泰勒手指。因此,瑞雷-泰勒不稳定性又常称为是指状不稳定性。而向上运动的轻流体则形成蘑菇云。核弹爆炸时热的轻的气体在下,冷的

重的空气在上,热气体猛烈向上运动,形成壮观的蘑菇云是瑞雷-泰勒不稳定性流动的一个最佳实例。

不稳定的开始时间可写成^[7]:

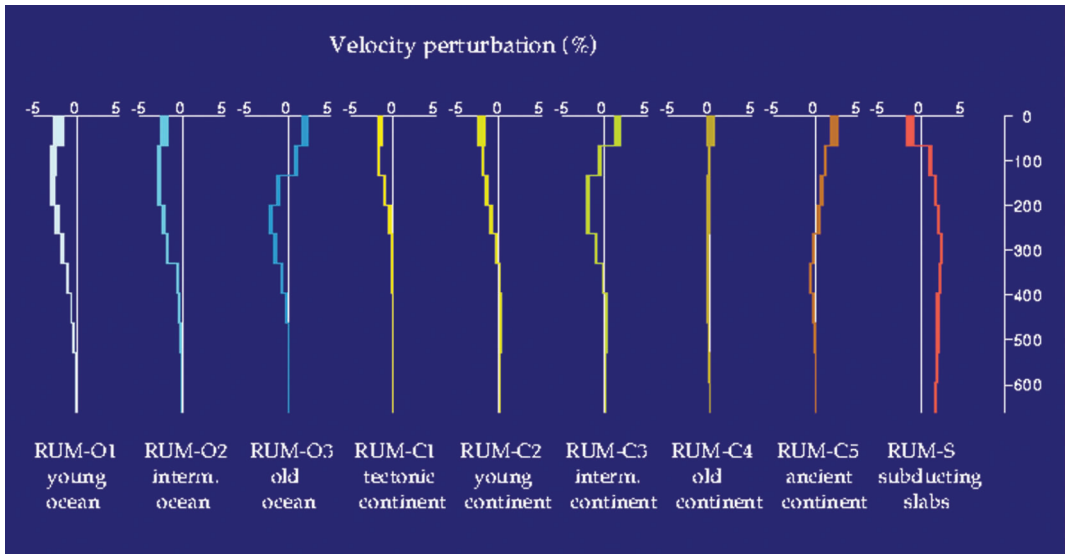


图 10 上地幔 P 波分区模型(RUM)(Gudmundsson and Sambridge)

Fig.10 A regionalized upper mantle P-wave RUM model of the Earth. Velocity profiles corresponding to each tectonic region (after Gudmundsson and Sambridge)

$$t = \frac{6.5 \eta_2 \eta_1^{\frac{1}{3}}}{\Delta \rho g h}$$

其中, η_1 —岩石圈地幔的粘滞性; η_2 —软流圈的粘滞性; $\Delta \rho$ —密度差; g —重力加速度; h —一块体下沉深度。

公式表明, 粘滞性越大, 越难发生不稳定性流动。并且由于岩石圈地幔的粘滞性要比软流圈的粘滞性大 10^6 。因此, 不稳定流动开始的时间取决于硬的岩石圈地幔的流变性质。

从上述可知, 发生瑞雷-泰勒不稳定性, 首先要在岩石圈地幔下部出现低速、高导、高温的软流圈。软流圈的成因存在不同观点。有人认为是由于岩石部分熔融所致; 有人则认为是随着岩石圈年龄的增加, 岩石圈冷却固结的部分加厚, 下垫熔融岩石圈部分加深所致。有人则认为温度超过岩石部分熔融, 出现晶格位错。

那么, 为什么瑞雷-泰勒不稳定性发生在中国东部?

Gudmundsson 及 Sambridge^[29]根据地震层析将全球地幔进行分区, 提出地幔分区模型(RUM), 他们提供的 P 波地震层析分区模型见图 10。他们将地幔分成三大类: 大洋、大陆和俯冲板块。大陆岩石圈又分成构造期(tectonic)大陆、青年期(young)大陆、中年期(intermediate)大陆、老年期(old)大陆和远古

期(ancient)大陆。构造期大陆和青年期大陆速度结构相似, 在深度约 300 km 以上均为低速, 表明现代的活动大陆边缘和岛弧与中生代大陆的地幔并无巨大差别。中年期大陆发育了一个高速岩石圈, 而它的软流圈与青年期大陆的软流圈相似。老年期大陆下不能再分出不同的构造。远古期大陆具高速, 但高速区并不太厚, 约 200 km。

中国东部是一个中年期大陆, 它既不像西伯利亚地盾及北美地盾那样的远古大陆具有很深的岩石圈根, 也不同于构造大陆。它们有一个发育良好的软流圈, 形成一个瑞雷-泰勒不稳定性。

在晚侏罗世—早白垩世期间, 整个东亚西太平洋地区处在强烈的拉张环境中。这个时期也是形成岩石圈蘑菇云构造的峰期。现在还无法断定是岩石圈蘑菇云构造造就了这个时期的强烈拉张, 还是因为岩石圈处在强力拉张的环境中, 它的内部应力弱化引发了蘑菇云构造的形成。这似乎是一个先有鸡还是先有蛋的疑难问题。

在岩石圈完成蘑菇云地幔改造后, 它的岩石圈地幔的平均密度下降到接近软流圈的密度, 岩石圈由不稳定转为基本上达到均衡, 从地表到软流圈已无速度倒转。

致谢: 本文得到中国地质大学路凤香教授的审阅, 并提出许多宝贵意见, 特此感谢。

参考文献 (References):

- [1] Bird P. Continental delamination and Colorado Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84:7561–7571.
- [2] Tullis J, Yund R A. Experimental deformation of dry Westerly granite[J]. *Jour. Geophys. Res.*, 1977, 82:5705–5718.
- [3] Bird P. Finite-element modeling of lithosphere deformation: The Zagros collision orogeny[J]. *Tectonophysics*, 1978, 50:307–336.
- [4] Bird P. Initiation of intracontinental subduction in the Himalaya[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83:4975–4987.
- [5] Christopher Gerbi. An analytical model for lithosphere delamination [J]. <http://www.geology.um.maine.edu/geodynamics/>.
- [6] 黄汲清. 中国主要地质构造单位[M]. 北京:地质出版社, 1954.
Huang Jiqing. Main Geological Tectonic Unit of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1954(in Chinese).
- [7] 黄汲清. 中国大地构造特征的新研究 [J]. 中国地质科学院院报, 1984, 第 9 号:5–18.
Huang Jiqing. New researches on the tectonic characteristics of China [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1984, No.9:5–18(in Chinese).
- [8] 陈国达. 中国地台“活化区”的实例并着重讨论“华夏古陆问题” [J]. 地质学报, 1956, 36(3):239–272.
Chan Kuota. Examples of “activizing region” in the Chinese platform with special reference to the “Cathaysia” problem[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1956, 36(3):239–272 (in Chinese).
- [9] O’Reilly S Y, Griffin W L. 4-D lithospheric mapping: a review of the methodology with examples[J]. *Tectonophysics*, 1996, 262:1–18.
- [10] 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 2008, 24(6):1145–1174.
Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, et al. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(6):1145–1174(in Chinese with English abstract).
- [11] 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3):209–215.
Yuan Xuecheng. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 36(3):235–244.
- [12] 袁学诚. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因 [J]. 中国地质, 2007, 34(5), 737–758.
Yuan Xuecheng. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: revisited[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5), 737–758(in Chinese with English abstract).
- [13] 郑建平, 路凤香, O’Reilly S Y, 等. 华北地台东部古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化[J]. 地质学报, 1999, 73:47–56.
Zheng Jianping, Lu Fengxiang, O’Reilly S Y, et al. Comparison between Palaeozoic and Cenozoic lithospheric mantle in the eastern part of the North China Block—with a discussion of mantle evolution [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73:47–56 (in Chinese with English abstract).
- [14] Linda T. Elkins-Tanton, Continental magmatism caused by lithospheric gravitational instability. www.mantleplumes.org/.
- [15] Isacks B L. Uplift of the central Andean Plateau and bending of the Bolivian Orocline [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93, (B4): 3211–3231.
- [16] Kay and Mahlburg Kay. Delamination and delamination magmatism [J]. *Tectonophysics*, 1993, 219:177–189.
- [17] Andrea M Figueroa, Jeffrey R Knott. Tectonic geomorphology of the southern Sierra Nevada Mountains (California): Evidence for uplift and basin formation[J]. *Geomorphology*, 2010, 123:34–45.
- [18] Lang Farmer G, Allen F Glazner, Curtis R Manley. Did lithospheric delamination trigger late Cenozoic potassic volcanism in the southern Sierra Nevada, California? [J]. *GSA Bulletin*, 2002, 114(6):754–768.
- [19] Seber D, Barazangi M, Ibenbrahim A, et al. Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran–Sea and Rif–Betic Mountains[J]. *Nature*, 1996, 379:785–790.
- [20] Calvert, A. Geodynamic evolution of the lithosphere and upper mantle beneath the Alboran region of the western Mediterranean: Constraints from travel time tomography[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105:10871–10898.
- [21] Radu Gîrbacea, Wolfgang Frisch. Slab in the wrong place: Lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathian subduction retreat[J]. *Geology*, 1998, 26(7):611–614.
- [22] Chalot –Prat F. Partial delamination of continental mantle lithosphere, uplift-related crust–mantle decoupling, volcanism and basin formation: a new model for the Pliocene ± Quaternary evolution of the southern East –Carpathians, Romania [J]. *Tectonophysics*, 2000, 327:83–107.
- [23] Melvin A Fillerup. Mantle earthquakes in the absence of subduction—Continental delamination in the Romanian Carpathians. 2010.
- [24] Channell J E T, Mareschal J C. Delamination and asymmetric lithospheric thickening in the development of the Tyrrhenian Rift [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 45: 285–302.
- [25] Cook F A, van der Velden A J, Hall K W, et al. Tectonic delamination and subcrustal imbrication of the Precambrian lithosphere in northwestern Canada mapped by lithoprobe [J]. *Geology*, 1998, 26(9):839–842.
- [26] Mirnejad H, Hassanzadeh J, Cousens B L, et al. Geochemical evidence for deep mantle melting and lithospheric delamination as the origin of the inland Damavand volcanic rocks of northern Iran [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2010, 198(3/4):288–296.
- [27] Oguz H Göü, Russell N. Pysklywec. Mantle lithosphere delamination driving plateau uplift and synconvergent extension in eastern Anatolia[J]. *Geology*, 2008, 36(9):723–726.
- [28] Sutherland Rupert, Collot Julien, Lafoy Yves, et al. Lithosphere delamination with foundering of lower crust and mantle caused permanent subsidence of New Caledonia Trough and transient

- uplift of Lord Howe Rise during Eocene and Oligocene initiation of Tonga-Kermadec subduction, western Pacific [J]. *Tectonics*, 2010, 29:1-16.
- [29] Ólafur Gudmundsson and Malcolm Sambridge. A regionalized upper mantle (RUM) seismic model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B4):7121-7136.
- [30] Editorial. Processes and consequences of deep subduction: Introduction [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 127:1-7.
- [31] Seton M, Müller D. Reconstructing the junction between Panthalassa and Tethys since the Early Cretaceous, PESA Eastern Australasian Basins Symposium III Sydney, 2008.
- [32] 李超, 陈衍景. 东秦岭—大别地区中生代岩石圈拆沉的岩石学证据评述[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2002, (3):431-441.
Li Chao, Chen Yanjing. A Review on Petrologic Evidences for Mesozoic Lithosphere Delamination in East Qinling -Dabie Mountains [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2002, (3):431-441(in Chinese with English abstract).
- [33] Li Shuguang, Huang Fang. Post-collisional lithosphere delamination of the Dabie -Sulu orogen [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002,47(3):259-263.
- [34] 袁学诚, 李善芳, 华九如. 秦岭陆内造山带岩石圈结构 [J]. *中国地质*, 2008, 35(1):1-17.
Yuan Xuecheng, Li Shanfang, Hua Jiuru. Lithospheric structure of the Qinling intercontinental orogen[J]. *Geology in China*, 2008, 35(1):1-17(in Chinese with English abstract).
- [35] 袁学诚, 李善芳. 大别造山带岩石圈结构与超高压变质岩折返的另类模型[J]. *中国地质*, 2008, 35(4), 567-576 .
Yuan Xuecheng, Li Shanfang. Lithospheric structure under the Dabie orogen and another of exhumation of UHP rocks [J]. *Geology in China*, 2008, 35(4):567-576(in Chinese with English abstract).
- [36] Linda T. Elkins-Tanton, Continental magmatism caused by lithospheric delamination[J]. *Geological Society of America, Special Paper* 388, 2005.
- [37] Hess P C, Parmentier E M. A model for the thermal and chemical evolution of the moon's interior: Implications for the onset of mare volcanism; *Earth and Planetary* [J]. *Science Letters*, 1995, 134: 501-514.

Rayleigh - Taylor instability and lithosphere of eastern China

YUAN Xue-cheng¹, LI Shan-fang¹, GUAN Ye²

(1. *Center of Development and Research, China Geological Survey, Beijing 100037, China*; 2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: This paper deals with the dynamic sources responsible for tremendous changes of the lithosphere in eastern China. It seems that the flow of mantle caused by Rayleigh-Taylor instability is the main tectonic force. As Rayleigh-Taylor instability exists only in intermediate continent, mushroom cloud mantle can occur only in such intermediate continents as eastern China.

Key words: lithosphere of eastern China, mushroom cloud of lithospheric mantle, Rayleigh-Taylor instability

About the first author: YUAN Xue-cheng, male, born in 1928, professor, engages mainly in the study of deep geophysics; E-mail: xcyuan@263.263.com.