

太平洋古陆的破碎消亡与中新生代华北 克拉通板内构造岩浆活化

周瑶琪¹, 赵士宝²

1. 石油大学地球化学与岩石圈动力学开放实验室, 山东东营 257061
2. 内蒙古第四地质矿产勘察开发院, 内蒙古集宁 012000

摘要: 回顾了太平洋撞击成因假说的主要内容, 重点围绕太平洋古陆消亡的内外动力学机制进行讨论, 认为 P/T 之交发生在太平洋地区的撞击事件撞裂了岩石圈板块, 导致岩石圈下的地幔对流方式发生重大转折。在这种全新的对流方式驱动下, 太平洋古陆板块伴随新生洋壳板块的俯冲和碰撞而逐渐消亡并拼接到环太平洋大陆边缘, 与此同时, 环太平洋构造域开始形成。这种以太平洋构造域为中心的深部构造热体制深刻地影响了环太平洋大陆板块在中新生代的构造岩浆活动。

关键词: 太平洋古陆; 撞击事件; 地幔对流; 环太平洋构造域。

中图分类号: P541

文章编号: 1000-2383(2004)05-0575-08

收稿日期: 2004-06-10

Disappearing Mystery of Ancient Pacific Land and Its Relationship with Mesozoic-Cenozoic Intraplate Magmatism in North China Craton

ZHOU Yao-qing¹, ZHAO Shi-bao²

1. *Geochemistry and Lithosphere Dynamics Laboratory, University of Petroleum, Dongying 257061, China*
2. *Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Inner Mongolia, Jining 012000, China*

Abstract: This paper reviews the main progress on the impact hypothesis of the Pacific Ocean for the past two decades and discusses the internal and external dynamics mechanism causing disappearance of ancient land of the Pacific Ocean. The impact event which happened between Permian and Triassic at the Pacific Ocean area resulted in the crash of the Pacific lithospheric plate, and changed greatly the mode of mantle convection. Under the action driven by the new mantle convection, ancient plate fragments of the Pacific Ocean withered away gradually and coalesced into the adjacent plates around the Pacific Ocean with the collision and subduction of paleo-Pacific plate. At the same time, a tectonic system of the surrounding Pacific Ocean began to form. The deep tectonic-thermal regime embracing the surrounding Pacific Ocean tectonic system severely affected the magma activity in the continental plates adjacent Pacific Ocean during Mesozoic and Cenozoic.

Key words: ancient Pacific land; impact event; mantle convection; surrounding Pacific Ocean tectonic system.

最近, 受中国自然科学基金委的邀请, 笔者在北京大学参加了一个关于华北板内构造演化的合作研究计划(NCP)的讨论会, 该计划是在中国地球科学促进会的建议下开始实施的, 其目的是为了“十五”期间实施一个重大的国际合作研究计划, 以了解稳定的华北板块内部在中新生代重新活化的机制。经过一天的讨论, 与会的科学家都一致认为华北板

块内部在中新生代重新活化是与地幔内部的对流方式和强度在中生代初期发生了重大的变化分不开的。而这种深部的变化与太平洋构造域的形成密切相关。这不由得让我回忆起 20 年前发表的太平洋撞击成因假说(周瑶琪, 1983)。假说认为在二亿五千万年前(P/T 界线), 一起发生在太平洋地区的巨大规模的小行星撞击事件导致了太平洋构造域的形成,

并使得古生代存在的太平洋大陆发生破碎和解体。结合 20 年前发表的假说和近 20 年来相关进展, 讨论古太平洋大陆的消亡、太平洋构造域的形成, 以及撞击事件对深部地幔对流的影响, 是应当有益于获得对华北板块内部在中新生代重新活化机制的正确认识的。

1 P/T 界线事件

P/T 界线事件在 20 世纪 80 年代是地学界的一个热点问题, 曾受到地学界的广泛关注和热烈讨论 (Asaro, 1982; Zhou *et al.*, 1987a, 1987b, 1987c; 周瑶琪等, 1988; 周瑶琪等, 1990a, 1990b; Zhou *et al.*, 1990c; Zhou and Cai, 1991; Cai *et al.*, 1992; Zhou *et al.*, 1992a, 1992b; 周瑶琪, 1995)。表 1 和图 1 总结了 P/T 界线时期发生的全球性地质事件和主要标志。目前, 关于该界线事件的成因主要有两大观点, 其一认为是全球性火山活动造成生物大绝灭 (Zoller *et al.*, 1983; 何锦文等, 1987; 何锦文等, 1988; 徐桂荣等, 1988; 殷鸿福等, 1989), 主要证据为界线粘土中普遍发现中酸性火山矿物和火山灰蚀变残余结构, 以及有些地区(如扬子区)界线上下均发现火山灰蚀变粘土层; 其二则认为是小行星撞击地球导致全球性生物大绝灭 (Sun *et al.*, 1984; Xu *et al.*, 1985; Bandrner *et al.*, 1986; Oddone and Vannucci, 1986; Clark *et al.*, 1987), 其直接证据是 P/T 界线粘土层中普遍发现高于背景值 5~10 倍的铱和其他铂族金属异常 (Asaro, 1982; Sun *et al.*, 1984; Xu *et al.*, 1985; Bandrner *et al.*, 1986; Oddone and Vannucci, 1986; Cai *et al.*, 1992),

表 1 P-T 界线事件(周瑶琪, 1986a)

Table 1 P-T boundary events

序号	事件内容
1	地球自转速度突然加快
2	约 96% 以上的生物突然灭绝
3	海水大规模损失
4	全球温度突然升高
5	大气中 CO_2 含量急剧降低, $\delta^{34}\text{S}$ 突然增高
6	煤和油气的分布进入最低潮
7	地磁场发生重大倒转
8	联合古大陆的破碎和解体
9	古太平洋大陆发生破碎, 形成太平洋地体
10	太平洋构造域形成
11	形成高于本底值 10~20 倍铱异常的界线地层(界线粘土)

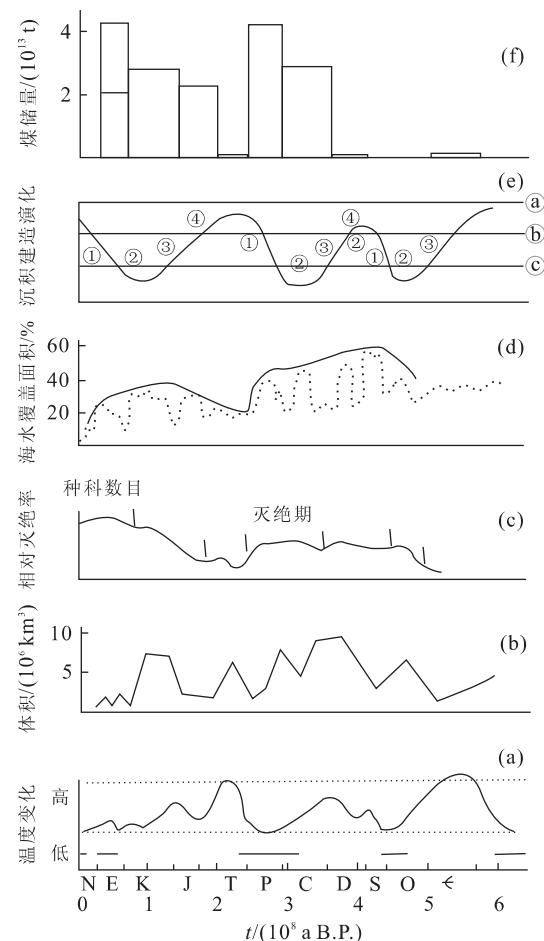


图 1 a. 全球温度变化,粗直线为冰川分布;b. 火山岩堆积体积;c. 生物种属灭绝曲线;d. 海水覆盖地表面积;e. 沉积建造演化;f. 世界各时代煤储量.
资料来源据周瑶琪(1986a)

Fig. 1 a. Global temperature variation; b. Volume change of the volcanic deposit; c. Curve of the organism extinction; d. Land area covered by sea; e. Sedimentary formation evolution; f. Coal resources in various periods
①. 大陆沉积; ②. 陆屑沉积; ③. 灰岩; ④. 下陆屑建造; ⑤. 灰岩建造; ⑥. 上陆屑建造; ⑦. 磨拉石建造

与撞击事件相关的微球粒 (周瑶琪等, 1988; Zhou *et al.*, 1992b)、碳氧硫和锶同位素异常 (周瑶琪等, 1990a)、来自月球的冲击溅射物 (周瑶琪等, 1990b), 以及冲击变质矿物 (如冲击石英和斯石英) (Zhou and Cai, 1991) 等。为了解释 P/T 界线粘土所具有的两类不同成因证据, Zhou *et al.* (1988)、周瑶琪等 (1991) 曾提出界线粘土混合成因模式, 认为界线粘土由 70% 中酸性火山灰和 30% 撞击溅射产物混合而成。撞击事件诱发大规模火山活动, 从而进一步导

致全球性生物绝灭。尽管对该界线事件的成因还有一些争议,但普遍的看法均认为 P/T 界线事件与大规模撞击事件有关。

2 古太平洋大陆的破碎和消亡

周瑶琪(1986b)、周瑶琪等(1986)认为太平洋是一个遭到后期板块运动改造的地球上最大的撞击坑。它是古、中生代之交(即 P/T 界线时期)形成的,主要证据如下:(1)太平洋虽经中、新生代板块运动改造,但仍保留古撞击坑的形成外貌,与其他大洋不同。(2)在环太平洋带边缘的前中生代变质沉积岩中发现有冲击变质矿物——柯石英。(3)中国南方长兴、广元、合山、中梁山、围柴坡山、汤山及苏联外高加索等剖面 P—T 界限粘土层中 Ir、Os、Au、Pt、Cr、Cu、As、Sc 等与陨石相关的亲铁、亲硫元素具有向太平洋方向富集的趋势(周瑶琪等,1986)。而界线粘土层中冲击石英和斯石英的发现(Zhou and Cai, 1991),则将 P/T 界线事件与撞击事件联系起来。(4)太平洋洋底玄武岩年龄不大于 2 亿年(周瑶琪,1986b)。(5)晚古生代的联合古大陆(包括分布在过去称之为“超级大洋”中的古太平洋大陆)是在古、中生代之交发生破碎并随后逐渐解体的(周瑶琪,1987)。(6)太平洋边缘分布着大量的古太平洋大陆的残块。它们绝大部分是三叠纪初开始随大洋板块一起陆续对接到太平洋边缘大陆上去的(Ben-Avraham, 1981)。(7)从瓣鳃类和珊瑚化石的生长线所得出的结论表明,地球的轨道和自转速度在 P—T 之交发生了突变,自转速度加快了许多。(8)环太平洋地区的构造—岩浆活动研究表明,前中生代并不存在环太平洋构造域的活动。前中生代以纬向构造运动为特征,各种岩浆活动都呈近纬向分布,环太平洋方向的构造—岩浆活动则是从印支运动的起始幕开始的(周瑶琪,1986a)。(9)太平洋环状构造域的形成时间正好与地史期间最大的一次生物灭绝(约 96%以上的生物中灭亡),以及地磁场的重大倒转、古气温的突然升高、地球的剧烈膨胀、海水的大规模损失等突然性事件相重合。

最新的研究表明,在南极 P—T 界线发现了球粒陨石碎片(Retallack, 1999),在中国浙江长兴 P—T 界线地层中发现包含地外气体同位素组成的富勒烯 C₆₀,则进一步证实 P—T 界线事件与地外撞击事件有关。

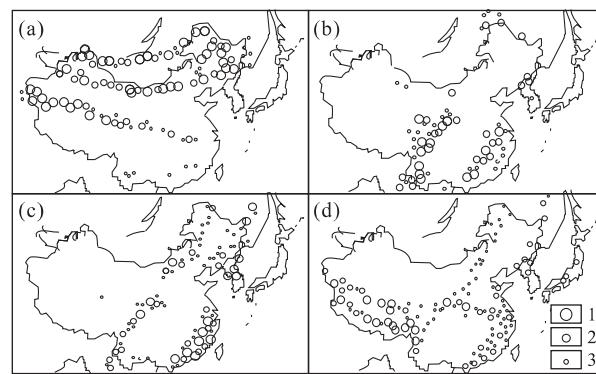


图 2 中国及其邻区中、深成岩浆活动分布(周瑶琪, 1986a)

Fig. 2 Distribution of mesogenetic and plutonic magmatic activity in China and its adjacent areas

a. 海西期; b. 印支期; c. 早、中燕山期; d. 晚燕山—喜山期; 1. 大型岩体; 2. 中型岩体; 3. 小型岩体

由上看来,P—T 之交太平洋地区确实发生了一起不寻常的撞击事件。这一事件与从中生代初开始的太平洋板块的大规模活动和大西洋、印度洋、北冰洋的分裂有无联系?广泛分布于西太平洋的那些具有大陆结构和成分的海台(图 2),以及在环太平洋带广泛存在的那些外来的陆块(或称地体、terrasse)是怎样形成的?这些外来陆块又是怎样对接到环太平洋大陆上去的?看来,他们最初都可能与太平洋撞击事件有密切的联系,值得深入地进行讨论。

3 全球性板块的破裂模式

很难设想,一个天衣无缝的坚硬的全球性岩石圈板块是怎样开始运动的。另外关于地球上四大洋的形成,究竟是具有统一的成因还是分别具有不同的成因。显然这些都可以归结为一个问题,即全球性的岩石圈板块最初是怎样破碎和漂移的。

笔者认为,P—T 间发生的太平洋撞击事件撞破了岩石圈,才导致板块和各种大小地块的产生。由于板块的运动,洋壳增生,才形成大洋(周瑶琪,1988)。

天体以一个角度冲击到地幔里,塑性流体将这股强大的冲击流传递到对面,使这里的岩石圈层发生破裂,破裂面或追踪或沿衰老的构造薄弱带。随着冲击波的传递,地球的膨胀也同时发生。地球一膨胀,破裂面便被拉开,板块也就开始形成了。随着破裂面的拉开,玄武岩浆将会沿破裂处喷发,地幔塑性

物质开始加快流动,板块也就随着运动起来。

地球受到天体的斜向撞击,自转轴在短期内将发生偏移,自转速度加快。陨星在太平洋地区留下的直径上千公里的窟窿需要填补。软流圈层为塑性流体,在填补窟窿的过程中,近于刚性的岩石圈层会滞慢于软流圈。这样软流圈层就带动着刚形成的欧亚板块、非洲板块、印度板块、澳洲板块奔向太平洋。而美洲板块也不能对在它西侧的大窟窿无动于衷。虽然它底下的软流圈补给速度较来自西岸的慢得多,但总具有填补窟窿的趋势。所以美洲板块也慢慢“漂”向太平洋,这样大西洋中裂就被拉开了。在中裂拉开过程中,洋壳不断增生,大西洋就逐渐形成。同样道理,印度洋和北冰洋也由于中裂拉开而逐渐形成。

地球受撞击后,自转角速度很快达到极大值。在地球轴自转开始恢复的同时,自转速度也开始递减。在自转速度递减过程中,岩石圈会滞慢于软流圈运动。填补撞击留下的窟窿,窟窿周围的软流圈物质都要出力。但由于地球快速自转(自转轴已发生偏移),所以,填补作用以来自西南方向的最为显著。就在这一强大的填补作用下,位于太平洋西南方的印度洋中裂东枝,在下伏软流圈物质的拖动下,由于玄武岩浆的喷发,出现洋壳增生,在软流圈物质的作用下,也会出现板块的消减,即一个板块向另一个板块底下俯冲。随着澳洲板块和印度板块与南极板块和非洲板块的分离,以及南美洲与非洲的分离,大西洋中裂开始通过印度洋西枝断裂与印度洋东枝断裂相连。这就奠定了印度洋中裂板块以后的运动方向和印度洋的形态。

北冰洋的形成同样与软流圈作用分不开,但由于它靠近地球自转轴极,充填作用较大西洋和印度洋位置弱得多,但它们存在使中裂分离的力,这就是地球自转速度增快而导致的离心惯性力。这种离极趋势和填充作用一起导致了北冰洋中裂的分离,从而洋壳增生,形成北冰洋。北冰洋较大西洋、印度洋小得多的原因可以部分归结于其下伏软流圈填充作用较后两者位置弱得多。

4 太平洋撞击构造的板块演化模式

在环太平洋边缘广泛分布的那些外来陆块已越来越引起人们的重视。现已确认的沿环太平洋边缘分布的那些外来陆块绝大部分都是从二叠纪以后陆续碰撞到大陆上去的,古生物、古地磁和古地层特征

表明它们都是异地成因的太平洋大陆碎块(Ben-Avraham, 1981)。它们最初都是嵌在大洋板块内并随之一起运动,最后增生到濒太平洋俯冲带的大陆上去的(周瑶琪, 1986a)。

这些引人注目的环绕太平洋分布的陆块最初是怎样形成的,或者说太平洋大陆最初是怎样破碎成碎块,这些大陆碎块又是怎样嵌在大洋板块内的,目前的地体(terrane)理论尚不能回答这些问题。实际上,太平洋大陆的破碎正是由于 P—T 间太平洋撞击事件而导致的。板块运动对太平洋撞击构造的破坏过程就是这些地体的分离并嵌在大洋板块内向太平洋边缘的运动过程。

这一运动过程至今仍在进行之中。那些高出洋底的海台(图 3)可能就是正在运动中的古太平洋大陆的碎块(Ben-Avraham, 1981)。他们缺乏磁条带,并且有类似陆壳的厚度;在某些地方,这些地壳具有接近大陆值的纵波速度结构。西南太平洋的奥托贾瓦海台就是一个典型例子,其壳厚为 36~43 km,深 20 km 的地震波速仅有 6.3 km/s,是典型的花岗岩基底。

另外,在那些西太平洋海岭或火山链底下也是非常有希望找到太平洋大陆的残块的。这些海岭和海山的分布与太平洋西岸近于平行,仍保留原始环状撞击构造的痕迹。事实上在天皇海岭的推古海山和神武海山处便曾采到过花岗岩、片麻岩等。

太平洋整体作为一个撞击构造的形态仍然依稀可辨。从古太平洋大陆残块、火山岛链和海台的分布特征和环太平洋带的构造特征,以及环太平洋边缘广泛分布的外来陆块的古生物、古地磁和古地层特

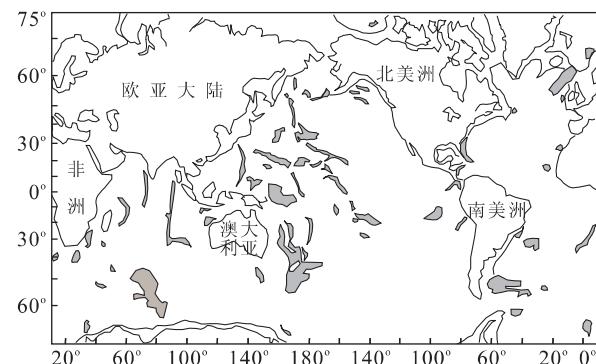


图 3 世界大洋中具有大陆地壳结构海台(阴影区域)的分布(Ben-Avraham, 1981)

Fig. 3 Distribution of oceanic plateaus (shaded areas) in the world's oceans

征,可以重新恢复撞击构造的初始形态(图4a)

太平洋撞击构造由一系列放射状和环状断裂所构成。由于软流圈最初的自西南向北东的充填作用以及太平洋板块的扩张作用,该撞击构造遭到了一定的破坏。这一破坏过程一直延续到今天,并且仍然

在继续进行着。

当太平洋窟窿愈合后,软流圈的充填作用已不再是主要的了,而太平洋洋脊的扩张作用影响却日益增大。从图4中可以看出后来对太平洋板块起巨大作用和影响的太平洋洋脊在早期不过是太平洋撞

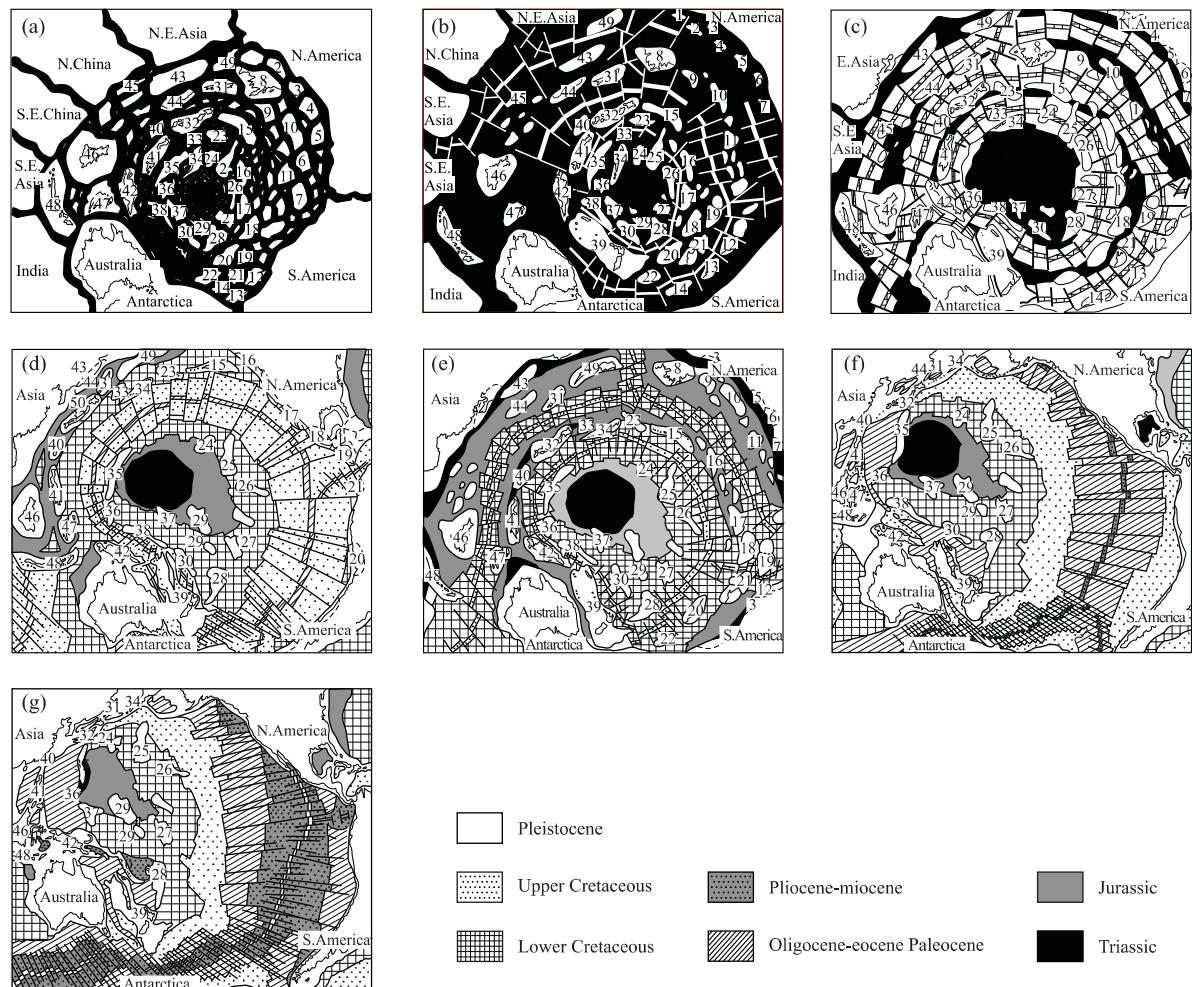


图4 太平洋撞击坑的破裂图解模型

Fig. 4 Schematic model of the breakup of Pacific impact crater

再造阶段的可能年龄:a. 230 Ma; b. 190 Ma; c. 134 Ma; d. 96 Ma; e. 64 Ma; f. 25 Ma; g. 0 Ma; 1. Seward Peninsula; 2. north slope; 3. Yukon-Tanana; 4. eastern assemblage; 5. Blue Mountains; 6. Golconda and Roberts Mountains; 7. Mojave; 8. Alaska (composite), includes Ruby, Innoko, Nixon Fork, Goodness, Chulitna etc.; 9. Wrangellia, Pingston and McKinley; 10. Stikine terrane and Tracy Arm; 11. Sonoma; 12. small blocks in the Serrania de Baudo in Columbia; 13. Gorgona Island and the continental shelf off Columbia; 14. Pampean massif; 15. Alaska Peninsula; 16. Chugach; 17. Baja and Vizaino; 18. small blocks in the Sierra Madre del Sur in Mexico; 19. South Guatemala, Honduras, Nicaragua, El Salvador and Costa Rica; 20. small blocks in the coastal range of Peru and Chile; 21. Santa Marta Mountain in Columbia; 22. Deseado massif and Patagonian massif; 23. Bowers Ridge and Umnak Plateau; 24. Shatsky Rise; 25. Hess Rise and Meiji Guyot; 26. Hawaiian Ridge; 27. Canton Islands; 28. Lau Ridge and Fiji Plateau; 29. Marcus Ridge, Marshall Islands and Gilbert Islands; 30. New Hebrides Ridge; 31. Sakhalin Island; 32. Japan Island; 33. Okhotsk massif; 34. Southeastern Kamchatka and Iles Kouriles; 35. Mariana Islands; 36. Erikipi Ridge; 37. Caroline Islands; 38. Bougainville Islands; 39. New Zealand, Chatham Rise, Norfolk Ridge, Campbell Plateau and Lord Howe Rise; 40. Taiwan Island; 41. Philippine Islands; 42. Maoke; 43. Northeastern China; 44. Sikhote-Alin Terrane; 45. Macclesfield Bank and Paracel Island; 46. Borneo; 47. Celebes; 48. Sumatra and Java; 49. Northwestern Kamchatka and Kortaksky; 50. Yamato Rise

击构造中几条环状、放射状断裂的组合而已,只是由于后期的扩张作用使它变得愈加壮观了。太平洋洋脊的扩张作用致使太平洋板块大规模地消亡在环太平洋大陆底下,并使镶嵌在太平洋板块内部的相对靠近边缘俯冲带的那些古太平洋大陆碎块逐渐对接到环太平洋大陆边缘。

从世界大洋中海台的分布(图 3)和碰撞地体主要分布于太平洋东岸大陆边缘可以看出,中新生代太平洋板块的俯冲主要以向东俯冲为主,向西俯冲的速率远远低于向东俯冲。这种东西向俯冲速率的差异可能主要与地球自转方向有关。

由上看来,联合古大陆未分解前,太平洋地区的的确存在古太平洋大陆。当时很可能存在着全球统一大陆,只是由于 P-T 发生的巨大规模的太平洋撞击事件,才使得古太平洋大陆破碎、消亡、联合古陆分解。

另一值得讨论的问题是环太平洋大规模的构造—岩浆为什么直到晚三叠世以后才全面展开。

从 T₁—T₃ 这段滞后过程来看,与早三叠世太平洋地区大量的玄武岩浆涌出有关。因为 P-T 间的撞击事件撞破了岩石圈,最初在地壳上留下一个很大的窟窿。这就为地球内部热流创造了一个突破口。大量玄武岩浆从这一窟窿涌出,其结果必然导致早中三叠世地球上其他地区地下热流值大幅度降低,在其他地区的火山和岩浆活动也必然进入最低潮。事实上也正是如此(图 1b)。

这种趋势的必然结果,是导致环太平洋大陆上的那些古生代地台和褶皱带的活化在时空中显示出有规律性的变化。由于大陆在撞击事件后最初一段时间内的热流亏损,致使三叠纪的活化作用未能全面展开(在濒大西洋边缘地区例外,例如西欧,那里的构造—岩浆活化是随大西洋的形成同时进行的)。只是当太平洋撞击构造基本愈合后,太平洋板块固结形成并开始大规模向西俯冲和碰撞时,亚洲地区,尤其是东亚,才从晚三叠世和侏罗纪开始大规模活化。

图 5 给出了从 P/T 界线太平洋撞击事件开始,深部地幔的软流圈充填和对流作用是怎样驱动太平洋西部大陆板块的演化模型。从苏皖运动开始到早中三叠世期间(图 5b, 5c),软流圈层向东的充填作用是导致这一地区张性破裂的主要原因。由于大量的深部热流从太平洋地区散失,致使其他地区在这期间的表现主要为冷张性质。大规模的板块俯冲、

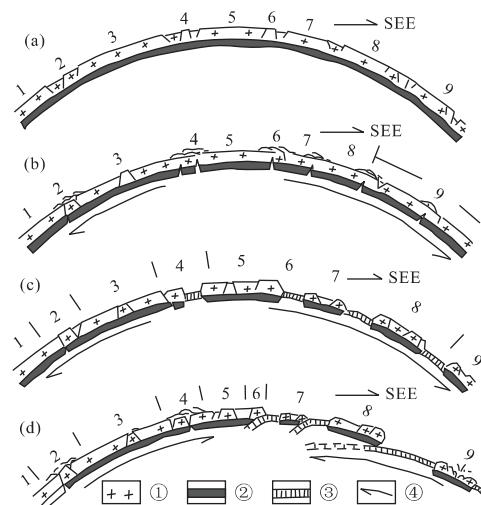


图 5 中国东部及邻区三叠纪板块演化模式(周瑶琪, 1986a)

Fig. 5 Plate model about the tectonic evolution of the Triassic period in eastern China and its adjacent areas

a. 前活化期; b. “苏皖运动”阶段; c. 早、中三叠世; d. 晚三叠世。1. 内蒙—准噶尔; 2. 阴山北—塔里木北缘; 3. 古华北地台; 4. 金沙江以东—滇西—龙门东—东秦岭; 5. 古东南地台; 6. 那丹哈达—东南沿海—台湾—海南岛; 7. 大和滩(日本)—南部朝鲜; 8. 日本—琉球—菲律宾。①. 硅铝层; ②. 硅镁层; ③. 新生洋壳; ④. 软流圈活动方向

碰撞则是从晚三叠世开始的(图 5d)。这与深部热流重新聚集并开始正常对流有关,也与太平洋板块形成和开始大规模扩张有关。这一期间环太平洋边缘大陆板块的表现主要为热压或热张性质,华北克拉通内大规模的火山活动也是从这一时期开始的。

Abbott and Isley(2002)对大型撞击事件能增强地幔活动性的原因进行了分析,认为:(1)撞击能引起地壳产生裂缝并导致应力释放,允许由于构造应力或(和)非渗透边界所圈闭的岩浆较易上升到地表;(2)撞击能在地球表面产生大的裂隙,允许新的板块边界形成薄的岩石圈和更长的岩浆柱;(3)撞击在核、幔边界能产生微岩浆脉,如果岩浆脉比较薄,毛细管作用力能促使熔融的地核与地幔物质的混合,这将大幅度地增加用来熔融地幔的热量,在遭受大的星体撞击后使原有的地幔柱活动快速增强,这也能较好地解释大型地幔柱中含地核组分的原因。但如果撞击的规模更大,例如 P/T 界线撞击事件,岩石圈板块能发生破碎,那么地幔的反应首先是物理方面的充填作用,这一期间地球其他地区的热活动会进入相对低潮。只有当地幔充填作用结束,新的

洋壳形成后,正常的地幔热对流才开始在其他地区发挥作用。这也就是华北板块从晚三叠世以后才开始大规模活化的原因。

References

- Abbott, D. H., Isley, A. E., 2002. Extraterrestrial influences on mantle plume activity. *Earth and Planetary Science Letters*, 205: 53–62.
- Asaro, F., 1982. Geochemical anomalies near the Eocene/Oligocene and Permian/Triassic boundaries. *The Geological Society of America (Special Paper)*, 190: 517–527.
- Bandrner, R., Donofrio, D. A., Krainer, K., et al., 1986. Events at the Permian-Triassic boundary in the Southern and Northern Alps. In: Abstract for field conference on Permian and Permian-Triassic boundary in the South Alpine segment of the Western Tethys, and additional regional reports. 15—16. Pavia: Soc. Geol. Ital. and IGCP—203.
- Ben-Avraham, Z., 1981. Continental accretion: From oceanic plateaus to allochthonous terranes. *Science*, 213: 47—54.
- Cai, Z. F., Zhou, Y. Q., Mao, X. Y., et al., 1992. Geochemical constraints on the Permian-Triassic boundary event in South China. In: Sweet, W. C., ed., Permo-Triassic event in the Eastern Tethys. Cambridge University Press, Cambridge, 158—168.
- Clark, D. L., Wang, C. Y., Orth, C. J., et al., 1987. Conodont survival and low iridium abundances across the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 233: 984—986.
- He, J. W., Cai, Z. F., Ma, S. L., 1988. The discovery of high-temperature quartz in the P-T boundary of Changxing, Zhejiang, China, and its implications. *Chinese Science Bulletin*, 33(14): 1088—1091 (in Chinese).
- He, J. W., Nei, L., Cai, Z. F., 1987. The volcanic activities across the Permian-Triassic boundary in Changxing, Zhejiang, China. *Journal of Stratigraphy*, 11(3): 194—199 (in Chinese with English abstract).
- Oddone, M., Vannucci, R., 1986. Geochemical stratigraphy at the P/T boundary in the Southern Alps. In: Abstract for field conference on Permian and Permian-Triassic boundary in the South Alpine Segment of the Western Tethys, and additional regional reports. 44. Pavia: Soc. Geol. Ital. and IGCP—203.
- Retallack, G. J., 1999. Search for evidence of impact at the Permian-Triassic boundary in Antarctica and Australia: Comment and reply. *Geology*, 27: 859—860.
- Sun, Y. Y., Xu, D. Y., Cai, Z. F., 1984. The discovery of iridium anomaly in the Permian-Triassic boundary clay in Changxing, Zhejiang, China and its significance. In: Tu, G. Z., ed., Development in geoscience. Science Press, Beijing, 235—246.
- Xu, D. Y., Cai, Z. F., Sun, Y. Y., et al., 1985. Abundance variation of iridium and trace elements at the Permian/Triassic boundary at Shangsi in China. *Nature*, 314: 154—156.
- Xu, G. R., Zhang, K. X., Huang, S. J., et al., 1988. The Upper Permian and the P-T boundary events in Huangshi, Hubei, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 13(5): 521—527 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Huang, S. J., Zhang, K. X., et al., 1989. The volcanic activities across the Permian and Triassic boundary in South China, and its affection to the mass extinction. *Acta Geologica Sinica*, 63(2): 169—181 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., 1983. One possible catastrophe and the relationship with the plate movement. *Journal of College Student*, 1(1): 21—30 (in Chinese).
- Zhou, Y. Q., 1986a. On the origin and beginning of the tectono-magmatic activation of the Meso-Cenozoic era in eastern China. *Geotectonica et Metallogenesis*, 10(3): 273—285 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., 1986b. Pacific formation relation to the impact event of the P-T boundary. *Chinese Science Bulletin*, 31(13): 1039 (in Chinese).
- Zhou, Y. Q., 1987. The Pacific impact event. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 7(1): 15—26 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., 1988. The origin of ocean—Differentiation, plate or catastrophe. *Geology Geochemistry*, 4: 39—42 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., 1995. Calculation of thermodynamics in induced nuclear reaction by impact event and its implication in study of event geology. *Geoscience*, 9(1): 91—98 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., 1991. The discovery of shocked quartz and stishovite in Permian/Triassic boundary clay of Huangshi, China. The 54th annual meeting of the meteoritical society, July 21—26, 1991, Monterey, CA, United States, LPI Contribution, 766: 260—268.
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Ma, J. G., et al., 1988. The preliminary study of the iron-microspherules in the P/T

- boundary clay of Shangsi Guangyuan, Sichuang. *Chinese Science Bulletin*, 33(5): 397—398 (in Chinese).
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Ma, S. L., et al., 1987a. The Pacific Ocean—A product of the Permian-Triassic boundary event? The second working session of IGCP-199, rare event in geology, 3—5 March, 1987, Beijing, China, 36—37.
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Ma, S. L., et al., 1987b. The impact events records at the Permian/Triassic boundary of Changxing, Zhejiang, China. *Chinese Science Bulletin*, 32: 1655—1656.
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1987c. On the catastrophic environment of the Permo-Triassic boundary in South China. The final conference of IGCP-203, 5—20, Sept., 1987, Beijing, China, 38—43.
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1986. The impact event between the Permian and Triassic in Changxing, Zhejiang. *Chinese Science Bulletin*, 31(23): 1838—1839 (in Chinese).
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1988. A mixed model on the Permian-Triassic boundary event. *Meteoritics*, 24(4): 345—355.
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1990a. The strontium isotope anomaly event across the Permian/Triassic boundary section in Meishan, Zhejiang, China. *Journal of Graduate School, USTC*, 7(1): 83—88 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1990b. Impact sputtering materials from the moon. *Geotectonica et Metallogenesis*, 14(2): 171—184 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1990c. Chemical sequence of microspherules at the Permian/Triassic boundary. The 53rd annual meeting of the meteoritical society, Sept. 17—21, 1990, Perth, West. Aust., Australia.
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1991. A mixing model—The elemental geochemistry of Permian-Triassic boundaries in South China and its implications. *Geological Review*, 37(1): 51—63 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1992a. On the REE across the Permian/Triassic boundary in South China. *Science Acta of Academia Sinica*, 9(2): 215—224.
- Zhou, Y. Q., Cai, Z. F., Mao, X. Y., et al., 1992b. Chemical sequence of microspherules at the Permian/Triassic boundary. *Meteoritics*, 25(4): 423—429.
- Zoller, W. H., Parrington, J. R., Phelan Kotra, J. M., 1983. Iridium enrichments in airbone particles from Kilauea volcano. *Science*, 222: 1118—1121.
- ### 附中文参考文献
- 何锦文,柴之芳,马淑兰,1988.浙江长兴P/T界线剖面高温石英的发现及其意义.科学通报,33(14): 1088—1091.
- 何锦文,内林,柴之芳,1987.浙江长兴地区二叠/三叠系之交的火山活动.地层学杂志,11(3): 194—199.
- 徐桂荣,张克信,黄思骥,等,1988.湖北黄石地区上二叠统和二叠、三叠系界线事件研究.地球科学——中国地质大学学报,13(5): 521—527.
- 殷鸿福,黄思骥,张克信,等,1989.华南二叠—三叠纪之交的火山活动及其对生物绝灭的影响.地质学报,63(2): 169—181.
- 周瑶琪,1983.一次可能的灾变及其与板块运动的关系.大学学生刊,1(1): 21—30.
- 周瑶琪,1986a.中国东部中—新生代构造—岩浆活化的起因和起点.大地构造与成矿学,10(3): 273—285.
- 周瑶琪,1986b.太平洋的形成与P—T之交的撞击事件有关.科学通报,31(13): 1039.
- 周瑶琪,1987.太平洋撞击事件.海洋地质与第四纪地质,7(1): 15—26.
- 周瑶琪,1988.大洋的成因——分异,板块,还是灾变.地质地球化学,4: 39—42.
- 周瑶琪,1995.撞击事件诱发核反应热力学过程及其在事件地质学中的意义.现代地质,9(1): 91—98.
- 周瑶琪,柴之芳,马建国,等,1988.四川广元上寺P/T界线粘土中铁质小球的初步研究.科学通报,33(5): 397—398.
- 周瑶琪,柴之芳,毛雪英,等,1986.浙江长兴二叠、三叠纪之间的冲击事件.科学通报,31(23): 1838—1839.
- 周瑶琪,柴之芳,毛雪英,等,1990a.浙江长兴二叠三叠系界线Sr同位素异常事件.中国科技大学研究生院学报,7(1): 83—88.
- 周瑶琪,柴之芳,毛雪英,等,1990b.来自月球的冲击溅射物.大地构造与成矿学,14(2): 171—184.
- 周瑶琪,柴之芳,毛雪英,等,1991.混合成因模式——中国南方二叠—三叠系地层元素地球化学及其启示.地质论评,37(1): 51—63.