

·花岗岩新思维问题讨论·(6)

中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗？

张 旗

(中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 通常认为, 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块的向西俯冲有关, 而本文的研究表明, 中生代时中国东部不属于环太平洋构造带, 不处于安第斯活动陆缘环境, 没有岛弧玄武岩和岛弧花岗岩。许多资料表明, 在中生代早期, 太平洋板块基本上是向北俯冲的, 至早白垩世中期(125 Ma 左右)才转向西俯冲, 而中国东部大规模岩浆活动主要发生于侏罗纪—早白垩世(约 180~130 Ma), 因此, 中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块的向西俯冲无关。太平洋板块真正向西俯冲的时间非常短暂, 只有 125~110 Ma 和 43~0 Ma 两个时段。在前一时段, 中国东部岩浆活动仅限于中国东部沿海, 在后一个时段, 中国东部岩浆活动几乎绝迹。因此, 中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关的命题是错误的。

关键词: 中国东部; 中生代; 岩浆活动; 花岗岩; 太平洋板块; 俯冲; 古地磁

中图分类号: P511.4; P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)01-0113-16

Is the Mesozoic magmatism in eastern China related to the westward subduction of the Pacific plate?

ZHANG Qi

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: It is usually thought that the Mesozoic magmatism in eastern China was related to the westward subduction of the Pacific plate. However, the researches conducted by the author show that eastern China did not belong to circum-Pacific tectonic belt in Mesozoic. It was not in the Andean active continental margin tectonic environment, and there were no island arc basalts and island arc granites. Lots of research work shows that the Pacific plate basically subducted northward in the early Mesozoic and turned to west in the middle early Cretaceous (at about 125 Ma). The large-scale magmatism in eastern China mainly occurred in Jurassic-early Cretaceous period (about 180~130 Ma), and during this period the Pacific plate basically subducted northward. Therefore, the Mesozoic large-scale magmatism in eastern China was not related to the subduction of the Pacific plate. The westward subduction of the Pacific plate only lasted for a very short period, i. e., during 125~110 Ma and 43~0 Ma. During 125~110 Ma, magmatism of eastern China was confined to the east coast of China; during 43~0 Ma, the magmatism in eastern China was almost gone. So the proposition that Mesozoic magmatism in eastern China was related to the westward subduction of the Pacific plate is a wrong unwarranted proposition.

Key words: eastern China; Mesozoic; magmatism; granite; Pacific plate; subduction; paleomagnetism

收稿日期: 2012-10-28; 修订日期: 2012-11-18

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91014001)

作者简介: 张 旗(1937-), 男, 研究员, 岩石学和地球化学专业, E-mail: zq1937@sina.com

中国东部中生代发生的大规模岩浆活动和与之伴随的大规模成矿作用,是中国地学界长期以来最关注的课题之一。中生代中国东部这么多岩浆活动是怎么产生的?许多文献认为与太平洋板块的俯冲有关,在中国东部,不论大兴安岭、吉林、张家口、湖南、广西甚至海南的中生代岩浆岩都是太平洋板块俯冲造成的,而笔者认为这几乎是不可能的。一个板块俯冲带能够影响多远?现代的西太平洋板块俯冲的角度陡,影响所及一般约 300 km,最远不超过 500 km(从日本海沟到日本海)。东太平洋在安第斯是低角度俯冲($<30^{\circ}$),有人认为还有一段属于平板俯冲,影响所及也就 500 km 左右,极限不超过 800 km(抵达智利以东的阿根廷,据 Best and Christiansen, 2001)。中国东部大陆架的界线从日本九州以西向南,沿冲绳海槽至台湾东部再拐向西南。张家口距中国东部大陆架东缘约 1 500 km,湖南印支期花岗岩据台湾东海岸约 1 200 km,均超过板块俯冲所能影响的最大极限。许多人说中国东部中生代花岗岩类似岛弧花岗岩,笔者查阅了大量中生代花岗岩资料,发现它们绝大多数不具有岛弧花岗岩的特征。那么,问题出在哪里?为什么学术界众口一词这样说?事实究竟是怎样的?下面谈谈笔者的见解,与大家一起探讨。

1 中国东部是否环太平洋构造带？

许多人认为中国东部是环太平洋中生代造山带的一部分,属于环太平洋构造-岩浆-成矿带,可与

美国西部和安第斯对比。环太平洋构造带的一个重要特征是存在一系列地体,在美国和加拿大西部已经鉴别出几百个这样的地体(Coleman, 1984; Howell *et al.*, 1985)。美国和加拿大西部的科迪勒拉造山带宽度超过 1 000 km,其中分布着大量的地体,时代从早古生代至今,仅中生代就有三叠纪、侏罗纪、白垩纪和第三纪的多条蛇绿岩,有上述不同时期的众多岛弧岩浆岩、蓝片岩、消减杂岩、古海山等的记录。该造山带主要是由原先的洋内碎块拼贴而成,大多来自赤道或南半球,而很少有古老的陆壳。在亚洲可与美国西部对比的有日本、俄罗斯远东、朝鲜半岛的东南端、菲律宾、巴布亚新几内亚等,中国只有东北东端的那丹哈达-兴凯地块和台湾的东部可以归入环太平洋构造带的范围(图 1)。图 1 中深色区域为中生代环太平洋地体分布范围(东北亚地区资料据 Shao, 1997;北美资料据 Howell, 1980),浅色区域为具古老基底的陆壳,后者不属于环太平洋构造-岩浆-成矿带。中国东北的大部为古亚洲洋闭合以后形成的地体,有一些蛇绿岩和岛弧岩浆岩,是古生代时期的,不属于环太平洋构造带。华北和华南为古老的克拉通,华北没有任何时期蛇绿岩的记录,华南的蛇绿岩仅见于赣东北和皖南,是新元古代的,显生宙没有任何蛇绿岩存在的迹象(张旗和周国庆, 2001),也未见任何中生代的地体。中生代中国东部虽然也有大规模岩浆活动,这一点似乎与美国西部、安第斯和日本类似,但是,中国东部缺少与中生代岩浆活动相伴的蛇绿岩、增生楔、蓝片岩、古海山、双变质带等岩石组合,没有中生代

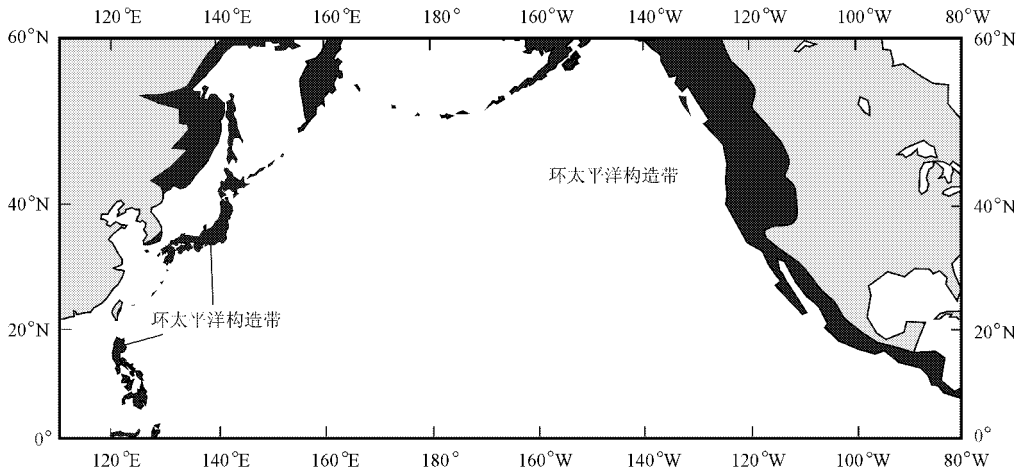


图 1 环太平洋地体分布图 [据张旗和李承东(2012)简化]

Fig. 1 Circum-Pacific terrane maps (modified after Zhang Qi and Li Chengdong, 2012)

的洋壳地体。因此,中国东部不可能属于环太平洋中生代构造带。

2 中国东部是否安第斯活动陆缘?

有人认为中国东部属于安第斯活动大陆边缘,实际上中国东部与安第斯没有可比性(张旗和李承东,2012)。这是因为:①安第斯以大量的安山岩著称,中国中生代安山岩(和闪长岩)奇缺;②安第斯有相当数量的玄武岩和辉长岩分布,而中国东部非常罕见(不到1%);③安第斯岩浆活动主要是拉斑质和钙碱性的,中国东部则以高钾钙碱性为主;④安第斯从西向东随板块俯冲带距离远近岩浆岩有成分变化的规律,近海沟为拉斑质的,向东为钙碱性的,最东部在阿根廷出现钾玄岩系列的岩石,中国东部则无此规律(详见后述)。

3 中国东部中生代玄武岩是否岛弧环境的?

许多人认为中国东部中生代玄武岩具有岛弧的特征,这是一个误判。许多人以为玄武岩只要亏损 Nb-Ta 即为板块消减带的标志,这是不充分的。Nb-Ta 亏损的含义指的是与 Th 和 La 对比的结果,是一个相对的概念。玄武岩亏损 Nb-Ta 是否岛弧的标志不仅要看 Th/Ta 比值,还要看 Th、Ta(以及 Nb)含量。毕竟含量是最基本的,比值是派生的。比值有时具有鲜明的特征,具有直观性,有它的优点,颇受地球化学家的青睐,但是有时也会给出模糊的认识, Th/Ta、Sr/Y、Rb/Sr 比值等即如此。

MORB 来自弱亏损的地幔源岩(二辉橄橄榄岩), MORB 的 TiO_2 平均含量在 1.2%~1.5% 之间, $Ta = 0.16 \times 10^{-6}$, $Nb = 3 \times 10^{-6}$, $Th = 0.18 \times 10^{-6}$ (因此 $Th = Ta$), $Yb > 2 \times 10^{-6}$ (Pearce *et al.*, 1984b)。岛弧拉斑玄武岩是在有水加入的情况下强烈亏损的地幔橄橄榄岩(方辉橄橄榄岩)部分熔融形成的,以强烈亏损高场强元素和富集大离子亲石元素为特征。高场强元素主要来自亏损的地幔源岩,大离子亲石元素主要是板块消减带带入的水提供的。水携带了大量的陆壳物质,陆壳是强烈富集大离子亲石元素的。Th 是大离子亲石元素, Ta 是高场强元素,如果没有板块消减作用带来的水,亏损地幔的 Th 和 Ta 的含量本来是大大相当的。由于板块消减带来大量的

Th,使岛弧玄武岩的 Th 含量增加了,故 $Th > Ta$ 。MORB 的 Ta 含量很低(Pearce *et al.*, 1984b),岛弧比 MORB 亏损,因此,岛弧玄武岩的 Ta 含量比 MORB 还要低,大约在 0.1×10^{-6} 左右。中国东部发表了不少中生代玄武岩的资料,其 Ta 的含量是多少呢?极少有 $< 0.2 \times 10^{-6}$ 的,而不乏 $> 1.0 \times 10^{-6}$ 的,虽然 $Th > Ta$ 。一个 Ta 含量很高的玄武岩,尽管 $Th > Ta$,它也不可能是岛弧环境的。

中国中生代 Ta 含量高的玄武岩合理的解释可能是大陆下富集地幔部分熔融形成的。亏损地幔亏损 Th 和 Ta,由亏损地幔部分熔融形成的玄武岩(MORB)也同样亏损 Th 和 Ta($< 0.2 \times 10^{-6}$),但它们的含量大体相当,故 $Th = Ta$ 。富集地幔 Th 和 Ta 含量高,故由富集地幔形成的洋岛玄武岩(OIB)的 Th、Ta 含量也高(如夏威夷玄武岩的 Ta 含量为 0.8×10^{-6} 左右,据 Wilson, 1989),Th 等于 Ta 或 Th 略大于 Ta。如果 Th 明显大于 Ta,则可能还受到陆壳混染的影响。大陆溢流玄武岩通常(如峨眉山玄武岩) $Th > Ta$ 即可能与此有关,中国东部中生代玄武岩高的 Th、Ta 含量和高的 Th/Ta 比值也可能是这个原因(玄武岩源于大陆下的富集地幔,富集地幔本身即富 Th,再加上陆壳混染的影响)。

岛弧玄武岩还有一个重要的特征即贫 Ti,其平均的 TiO_2 含量在 0.8% 左右(Pearce *et al.*, 1984b; Wilson, 1989)。中国东部中生代玄武岩有多少是贫 Ti 的?岛弧玄武岩还贫钾,属于拉斑系列和钙碱性系列,而中国东部中生代玄武岩富钾,大多属高钾和中钾钙碱性系列(周建等,2012)。岛弧玄武岩之所以为岛弧环境是因为加入了大陆的印记。可是我们在论证玄武岩性质的时候,却本末倒置,把大陆玄武岩说成为岛弧环境的,这在逻辑上是有问题的。

4 中国东部中生代中酸性岩浆岩产于什么环境?

许多人认为中国东部中生代中酸性岩浆岩产于岛弧环境,与太平洋板块的向西俯冲有关。他们的依据大多来自各种判别图。在这里,笔者要强调两点:

第一,不是所有的中酸性岩浆岩都可以判别其形成的构造环境,只有那些产于洋盆内或边缘的中酸性岩浆岩才有判别其形成的构造环境的可能性和必要性(张旗等,2008;张旗和李承东,2012)。所有花岗岩构造环境判别图就是建立在这样的基础上

的,其判别也是有据可循的;但是,产于大陆的中酸性岩浆岩,尤其是来自古老陆壳的中酸性岩浆岩,不能用现已发表的各种判别图来判断其形成的构造环境。因此,中国东部中生代来自华北和华南古老陆壳基底的中酸性岩浆岩不具备判别构造环境的前提。

第二,花岗岩的地球化学性质主要反映的是花岗岩源区的性质和源区岩石的构造环境,而非花岗岩形成时的构造环境。花岗岩(古老的)源岩形成的环境与花岗岩形成时的环境可能是根本不同的(Roberts and Clemens, 1993)。例如在岛弧地区,如果岛弧底部主要由岛弧拉斑玄武岩(IAT)组成,该IAT部分熔融形成的花岗岩即为岛弧花岗岩(VAG)。如果该IAT刚刚形成即发生了部分熔融,形成的VAG即可代表花岗岩形成时的构造环境。假定一个IAT是在120 Ma之前形成的,并立即或不久即发生了部分熔融,则以 $IAT_{(120\text{ Ma})}$ 作为源岩的花岗岩 $VAG_{(120\text{ Ma})}$ 必定具有 $IAT_{(120\text{ Ma})}$ 的印记,Pearce等(1984a)的构造环境判别图的依据即在此。如果20 Ma之后有另外的热源供给,该 $IAT_{(120\text{ Ma})}$ 在大致相同的条件下再次发生部分熔融,形成的 $VAG_{(100\text{ Ma})}$ 仍然具有IAT的特征,但它反映的仍然是20 Ma之前的 $IAT_{(120\text{ Ma})}$ 的构造环境。这里可能会有两种情况:情况一,如果20 Ma后该区仍然保持岛弧环境,则 $VAG_{(100\text{ Ma})}$ 反映的岛弧环境还可以应用,但是,其含义与 $VAG_{(120\text{ Ma})}$ 已经不同了;情况二,如果20 Ma之后由于构造变动使原先 $IAT_{(120\text{ Ma})}$ 的环境发生了变化(例如,被转移到大陆内部),但是,花岗岩仍然具有 $VAG_{(120\text{ Ma})}$ 的特点,并不反映100 Ma时的板内构造环境,此时再这样判别就失误了(张旗等,2008)。例如张家口一个早白垩世的花岗岩,经过判别如果是岛弧环境的,其结论只能说它的古老源岩(其时代可按年代学方法给出的模式年龄推测)具有岛弧的特征,而非早白垩世花岗岩产于岛弧环境。这个概念不搞清楚,结论必错。

5 中国东部中生代岩浆岩的组成

中国东部中生代岩浆岩的组成不同于岛弧和活动陆缘岩浆岩的组成。日本和印尼是公认的岛弧,安第斯为全球最典型的活动陆缘。从图2看,日本和印尼的玄武岩-安山岩-流纹岩都比较发育,其中玄武岩多一些,安山岩次之,流纹岩较少。日本弧岩

浆岩可分为两个系列:拉斑系列,从玄武岩到流纹岩全部是贫钾的,类似初始洋内弧的特征;钙碱性-高钾钙碱性系列,其特征是:玄武岩和安山岩为钙碱性系列,至流纹岩($SiO_2 > 65\%$)K含量增加,少数仍为钙碱性系列,大部为高钾钙碱性系列(图2a)。推测流纹岩的不同系列可能与岛弧地壳厚度有关,地壳厚则流纹岩K含量高(Best and Christiansen, 2001)。

印尼不同于日本,岩浆岩拉斑质较少而钙碱性居多,特殊的是有相当数量的安山岩和安山玄武岩是高钾钙碱性的,暗示印尼岛弧的地壳厚度大一

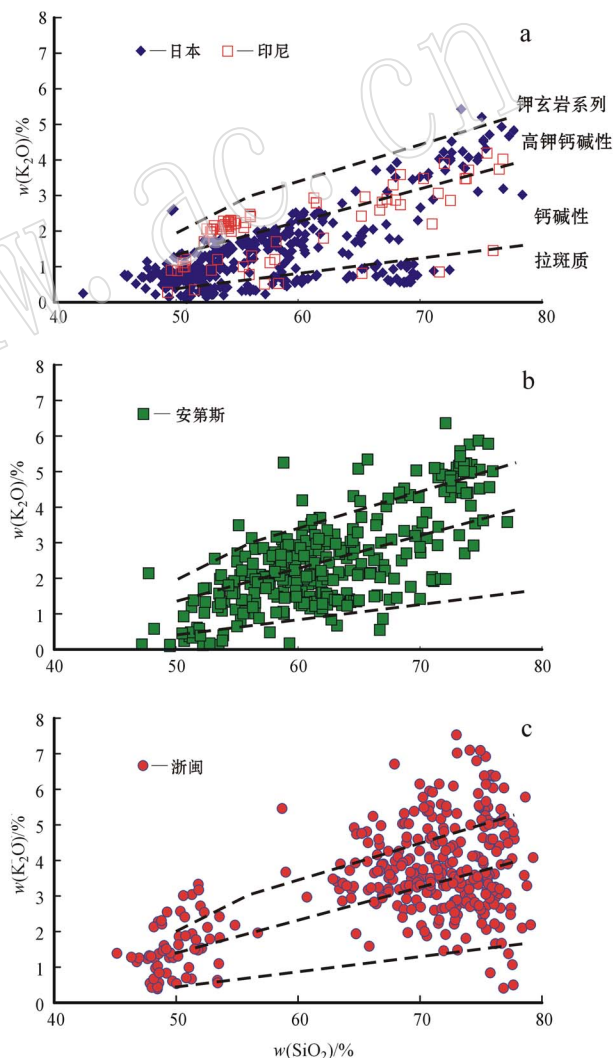


图2 浙闽中生代岩浆岩与岛弧和活动陆缘岩浆岩的 K_2O-SiO_2 图(张旗和李承东, 2012)

Fig. 2 K_2O-SiO_2 diagram of Mesozoic magmatic rocks in Zhejiang and Fujian, and island arc of Japan and Indonesia, and active continental margin in Andean (Zhang Qi and Li Chengdong, 2012)

些(与日本弧比较)地幔源区可能更富水一些。

教科书引述相关的资料指出,岛弧上玄武岩和安山岩占优,英安岩和流纹岩很少,后者加起来可能不到总岩浆量的10%(徐夕生和邱检生,2010,第304页的图14-5)。

安第斯不同于上述岛弧岩浆岩,日本和印尼岩浆岩大多集中在玄武岩和安山玄武岩范围($\text{SiO}_2 = 48\% \sim 54\%$),而安第斯呈大肚子形状(图2b),集中在安山岩和英安岩范围(SiO_2 从58%~64%),且随着 SiO_2 含量的增加,有从拉斑质-钙碱性-高钾钙碱性-钾玄岩系列演化的趋势。日本安山岩中有相当数量的高镁安山岩,其中部分具有赞岐岩的特征(Shimoda and Tatsumi, 1999),是富水的地幔部分熔融形成的,属于钙碱性系列(Yogodzinski *et al.*, 1995; Stern and Kilian, 1996),而安第斯的安山岩大多是下地壳部分熔融形成的,不少具有埃达克型花岗岩的特征,为钙碱性和高钾钙碱性系列的。

浙闽地区的火山岩明显不同于上述岛弧和活动陆缘火山岩(图2c),玄武岩很少,安山岩奇缺,流纹岩很多。玄武岩和流纹岩有钙碱性、高钾钙碱性和钾玄岩的,说明浙闽地区玄武岩和中酸性岩浆岩的源区成分(地幔和下地壳)变化大。周建等(2012)指出,中国东部中生代岩浆岩以酸性岩浆岩占绝对优势,基性和中性岩浆岩数量极少($< 1\%$),中酸性岩浆岩主要为富碱、富钾的高钾钙碱性系列,基性岩浆岩为高钾和中钾钙碱性系列。

浙闽地区的中生代岩浆岩明显不同于日本、印尼和安第斯,既不属于岛弧环境,也不是安第斯型活动大陆边缘环境,与板块俯冲作用无关,是大陆内部岩浆活动的产物。

6 中国东部中生代岩浆活动的时空分布

众所周知,沿着俯冲带的方向,岛弧岩浆的性质随深度增加是有规律变化的:近海沟处是拉斑质的,然后出现钙碱性、高钾钙碱性岩浆,到俯冲的最远处出现钾玄岩系列,则是弧后盆地了。在安第斯,海沟在智利以西,钾玄岩距离海沟最远,出现在安第斯山以东的阿根廷。在日本,海沟在本州以东,弧后盆地在日本海。

如果中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关,必然也会在岩浆性质的变化上得到印证。从上个世纪80年代开始就有许多人热衷于探

索中国东部中生代岩浆活动的时空分布问题,结果却是令人失望的。在华南,钾玄岩是广泛分布的,距板块俯冲带最近的浙闽沿海主要是早白垩世晚期的A型花岗岩。华南有一条Nd同位素值较低的花岗岩带,有人尝试用板块俯冲来解释,但是它却不是靠近俯冲带的沿海,而是在华南腹地(从浙江经江西到湖南)。中国东部闪长岩不多,在长江中下游和鲁西—冀南—豫北—晋中有两条以闪长岩为主的岩浆岩带,可惜是近东西向分布的,恰恰与西太平洋板块俯冲的方向顶牛。中国东部中生代岩浆岩主要是面型分布而非呈带状分布的,拉斑质系列极少,钙碱性系列的也不多,主要是高钾钙碱性和钾玄岩系列的,这是板块俯冲所无法解释的。

关于岩浆岩的时空分布问题,有人认为中国东部中生代岩浆活动是东部早西部晚,指示随着板块的向西俯冲,东部(包括日本、朝鲜、辽东、胶东、东南沿海等)岩浆形成早,西部(燕山、太行山、大别等)晚。可是大量的资料却不是这样的,甚至相反。以华北为例,中生代岩浆活动的西界在山西中部和豫陕边界,花岗岩主要是130~150 Ma的,在山西运城地区是139~141 Ma的(笔者未发表的资料),河北、山东主要以160~130 Ma的岩体为主,太行山、鲁西和苏北有一些120~130 Ma的岩体,大别和长江中下游则以150~130 Ma时期的居多(张旗和李承东, 2012)。华北时代最新的花岗岩是130~100 Ma的,主要分布在辽东-胶东-皖东-江苏一带,恰恰不符合板块俯冲的规律。而且,胶东还不乏160~130 Ma花岗岩的大量出露。因此,华北不存在岩浆活动从东向西有规律的分布。

华南与华北不同,大体是颠倒过来的。据孙涛(2006)的总结,华南印支期花岗岩主要分布在西部湖南、广西一带,侏罗纪花岗岩在华南分布最广,呈面型而非带状分布,华南110 Ma以后的花岗岩主要分布在两个地区,一个在浙闽粤沿海,另一个在海南和粤西桂东地区(张旗和李承东, 2012)。晚于100 Ma的花岗岩在华南也有一些出露,规模无法与之前的花岗岩相比,但与钨锡成矿的关系密切,如分布于闽粤桂滇几省的A型花岗岩。

中国东部中生代岩浆活动是否与太平洋板块俯冲有关的问题其实并不复杂,可是迄今拿不出一个令人信服的结果来,即表明中国东部中生代岩浆活动与太平洋俯冲有关是一个子虚乌有的命题。

7 太平洋板块何时向西俯冲？

学术界有一个被忽略了的问题：大家都说中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块的俯冲有关，可是却很少有人关心太平洋板块在中生代时究竟是否向西俯冲了？这个问题至关重要，它是中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块俯冲有关的命题的前提。前提没有了，作为结论的俯冲也自然就不成立了。

一个关键的问题是：古太平洋板块是什么时候开始向西俯冲并影响到中国东部的？不少人认为俯冲从燕山早期甚至印支期就开始了。中国东部中生代大规模岩浆活动主要发生在中侏罗世—早白垩世

期间。邵济安等(1995)指出，在晚侏罗世—早白垩世时东亚大陆边缘发生的是南北向和 NNE 向的剪切—走滑运动，中国东部具转换大陆边缘性质。Engelbreton等(1985) 根据对伊泽奈崎(Izanagi)板块的古地磁研究指出，太平洋板块向东亚大陆边缘的俯冲作用最早也在晚白垩世以后。邵济安等(1995) 也认为太平洋板块向亚洲大陆下的正面俯冲始于晚白垩世。

Koppers 等 (2001)利用古地磁资料总结了 140 Ma 以来太平洋内海山链演变的情况，他们的研究表明，海山链延伸的方向(大体相当于太平洋板块扩张的方向)从 140 Ma 至今发生了多次变化(图 3，黄色区域为中生代环太平洋地体分布范围，灰色区域为具古老基底的陆壳)。从图 3 看，在 140~125 Ma 期

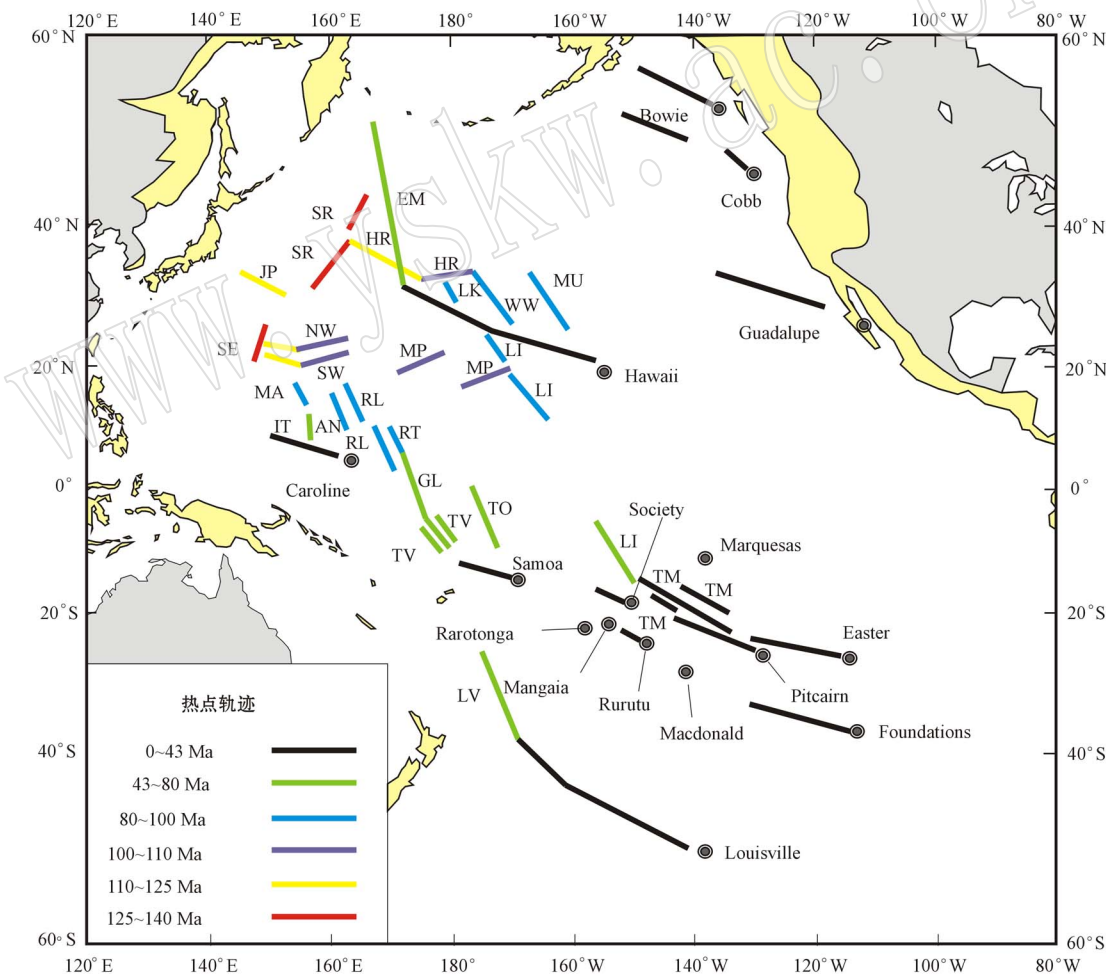


图 3 太平洋热点轨迹随时间的演变(据 Koppers 等, 2001)

Fig. 3 Pacific hotspot trails according to age range (from koppers *et al.*, 2001)
AN—Anewetak; EM—Emperor; GL—Gilbert; HR—Hess Rise; IT—Ita Mai Tai; JP—Japanese; LI—Line Islands; LK—Liliuokalani; LV—Louisville; MA—Magellan; MP—Mid Pacific Mountains; MU—Musicians; NW—North Wake; RL—Ralik; RT—Ratak; SE—Seth; SR—Shatsky Rise; SW—South Wake; TM—Tuamotu; TO—Tokelau; TV—Tuvalu; WW—Wentworth

间(图 3 中的红色实线),太平洋板块是向东北方向扩张的(注意:没有向西俯冲的迹象);在 125~100 Ma(图 3 中的黄色实线)期间是向西偏北方向扩张的;在 110~100 Ma 期间(图 3 中的紫色实线)扩张方向转向了南西,在 100~43 Ma 期间又大幅度转向了北西(图 3 中的蓝色和绿色实线),在 43 Ma 以后(图 3 的黑色实线)才转向北西。

中国东部中生代大规模岩浆活动主要发育在 180~130 Ma 期间,例如,东北主要在 180~130 Ma,华北在 150~130 Ma,华南在 170~130 Ma。130 Ma 以后的岩浆活动规模缩小了,主要出现在辽东、胶东、皖东(谢成龙等,2009)、江苏和浙闽粤沿海一带

(张旗和李承东,2012)。图 4 是以吴福元等(2007)图 6~图 8 的资料拼接而成的(华南的资料引自孙涛,2006),其中华北和华南花岗岩的时代有所区分,东北花岗岩的时代未分,可能包括了古生代和中生代的花岗岩,但绝大多数是中生代的(吴福元等,2007),不同颜色的箭头指示太平洋板块在不同时代扩张方向的变化(图 3)。

对比图 3 和图 4,能看出以下问题:

(1) 140~125 Ma 是中国东部大规模岩浆活动的时期,令人匪夷所思的是,这个时期的太平洋板块并不是向西扩张的,而是向东北方向约 33°方向扩张的!也就是说,这个时期中国东部岩浆活动与太平

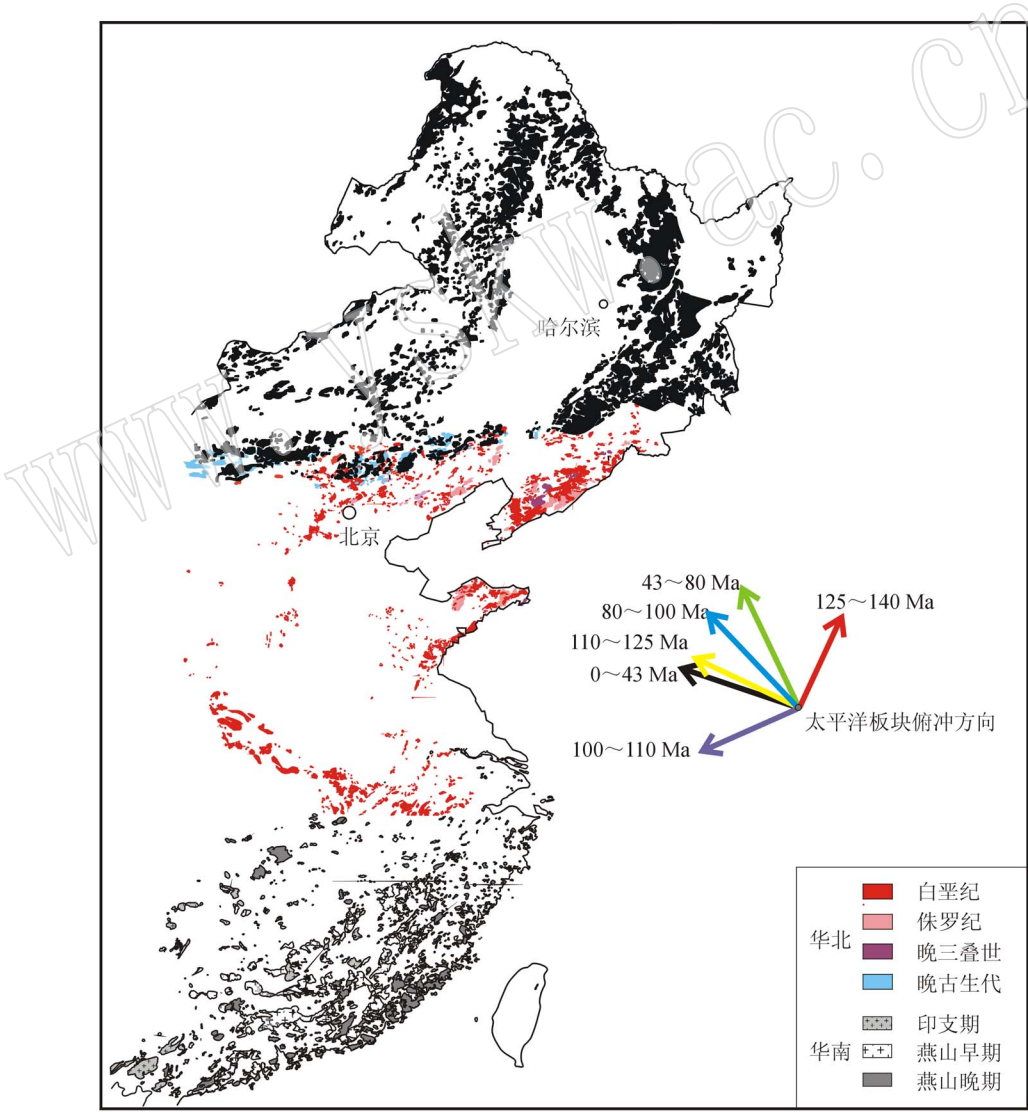


图 4 中国东部中生代花岗岩类分布与太平洋板块俯冲的关系(张旗和李承东, 2012)

Fig. 4 Mesozoic granitoids distribution in eastern China in relation to the subduction of the Pacific plate (from Zhang Qi and Li Chengdong, 2012)

洋板块的活动一点关系也没有。

(2) 125~110 Ma 期间太平洋板块是向西扩张的,这个时期的岩浆活动可能与太平洋板块的俯冲有关。但 125 Ma 以后中国东部腹地大规模岩浆活动已经停止了,岩浆活动向东迁移到沿海地区,局部(如胶辽和浙闽)仍然具有一定的规模(张旗和李承东,2012)。但是,如图 2 所示,它们不具有岛弧环境的特征,表明它们与太平洋板块的俯冲无关,虽然该时期太平洋板块的确是向西俯冲的。

(3) 110~100 Ma 期间太平洋板块扩张方向从 NWW 转向 SWW 或 SW,从 100~43 Ma 扩张方向又大幅度调整为 NW 向。110 Ma 以后,华北中酸性岩浆活动几近绝迹,但华南很多,分布范围很广,从东南沿海直抵云南东南部。看来,板块扩张方向及其变化与东南沿海的花岗岩也没什么关系。80 Ma 以后,中国东部岩浆活动已近尾声,仅在东北和华南有零星出露。

(4) 43 Ma 以后,太平洋板块扩张的方向又转向了西,这应当是最有利于中国东部形成大规模岩浆活动的时期了,可惜这个时期中国东部几乎没有任何花岗岩出露。虽然缺少中酸性岩浆活动,但不乏玄武岩的出露,主要是第四纪的,少数是第三纪的,从五大连池、长白山、汉诺坝、女山、福建沿海直至海

南。它们是否岛弧环境的产物呢?很遗憾,研究的结果表明,中国东部这些新生代玄武岩大多是 OIB 类型的,全部是板内环境。

总括上述,除了 125~110 Ma 和 43~0 Ma 两段时间外,从 140 Ma 至今,太平洋板块并非向西俯冲的,中国东部何来与太平洋板块俯冲有关的岩浆活动?

Koppers 等(2001)研究了 140 Ma 以后的问题,那么,140 Ma 以前呢?根据对东亚环太平洋造山带日本、俄罗斯和东北那丹哈达-兴凯地区的研究(邵济安等,1995;刘德来和马莉,1997;李朋武等,1997;唐克东等,2004),三叠纪和侏罗纪时期的古太平洋板块主要是南北向扩张的(图 5),也不可能对中国东部产生任何影响。

按照邵济安等(1995)的归纳,东北那丹哈达地体晚古生代生物群可与贵州南部对比,三叠纪硅质岩的放射虫化石可与云南的古特提斯对比,说明晚石炭世—早二叠世时那丹哈达地体位于南半球,三叠纪时那丹哈达在赤道附近,晚三叠世时大约位于北纬 12.2°,早白垩世大约位于北纬 33.6°,估计在早白垩世晚期才到达现今的位置(邵济安,个人交流)。古地磁研究表明,那丹哈达地体在约 75 Ma 的时间范围内向北漂移了 2 000 多公里。兴凯地体在晚二叠

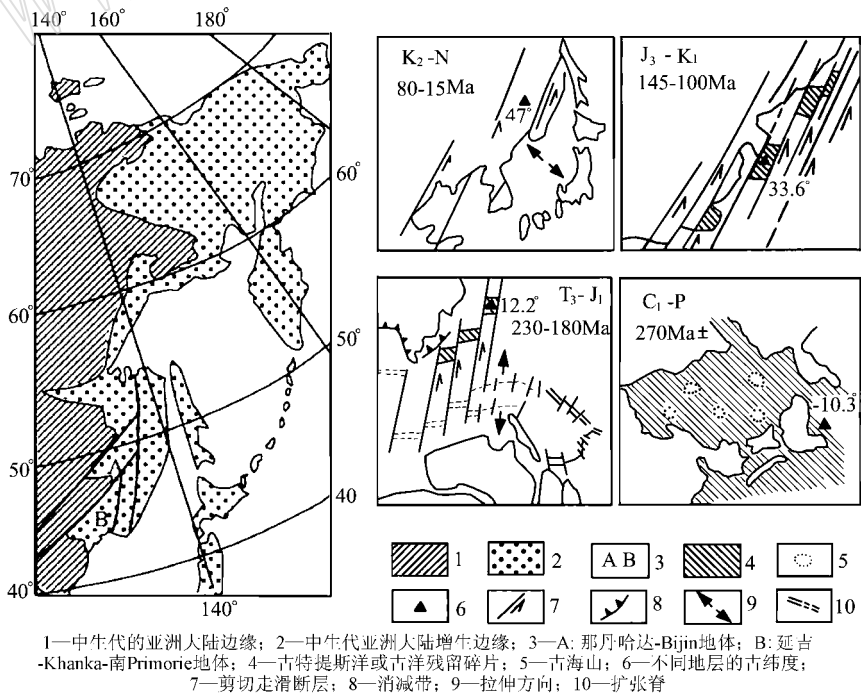


图 5 中生代东北亚大陆边缘演化史(据 Shao, 1997)

Fig. 5 The Mesozoic Northeast Asian continental margin and its evolutionary history(after Shao, 1997)

世一早三叠世也处于低纬度地区，俄罗斯远东和日本列岛的许多地体也是从赤道附近的低纬度地区漂移到现今位置的(邵济安等, 1995)。而据李朋武等(1997)的资料，那丹哈达地区晚三叠世的古纬度在 5.4° ，晚侏罗世在 19.8° ，晚侏罗世末至早白垩世初为 33.3° 。从古纬度数据看，从中三叠世至早白垩世初，那丹哈达地体向北漂移了近 40° 纬度，大约相当 4 000 km。

综合上述资料，我们可以粗线条地勾勒出一个太平洋板块与中国东部构造-岩浆事件的轮廓图(图 6)：

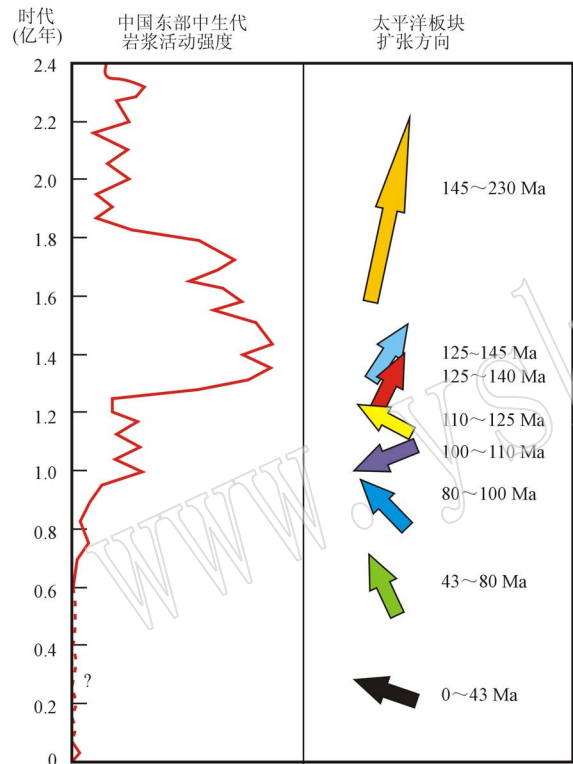


图 6 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块俯冲方向关系示意图

Fig. 6 Schematic subduction direction of the Pacific plate in relation to Mesozoic magmatism of eastern China

(1) 从三叠纪—中白垩世(125 Ma 前)，古太平洋板块大体是南北向扩张的，在 230~145 Ma 期间，扩张方向大约是 12.2° ，在 145~125 Ma 转向北东(扩张方向大约为 33.6°)[230~145 Ma 和 145~125 Ma 时太平洋板块的扩张方向据邵济安等(1995)，140 Ma 以后的资料据 Koppers 等(2001)]。因此，在 125 Ma 以前，中国东部发生的岩浆活动无论规模大小均与古太平洋板块的俯冲无关。

(2) 125 Ma 以后，古太平洋板块开始向西扩张，

而该时期中国东部腹地的大规模岩浆活动已经基本上结束了，规模较大的岩浆活动仅限于东部沿海地区(辽东—鲁东—浙闽粤)。从理论上它们可能与板块俯冲有关，但是，需要岩石学和地球化学研究的支持。而从浙闽地区来看，那里的中酸性岩浆岩显然与俯冲无关(图 2)。

(3) 太平洋板块扩张方向在 125 Ma 以后经历了多次变化，主要是向北西方向的，偶尔转向南西，向西俯冲的时间并不多(110~100 Ma 和 43~0 Ma)。从图 4 看，在 43 Ma 之后(图 4 的黑色实线)太平洋板块才真正是向西(NWW)扩张的。按照板块俯冲产生岩浆论者的观点，在 43 Ma 之后中国东部处于消减带之上的活动陆缘环境，应当出现大规模的岩浆活动。可惜中国东部却缺少这个时期的中酸性岩浆活动记录。43 Ma 之后东亚最重要的事件不是岩浆活动而是一系列伸展盆地和走滑构造，前者如日本海的拉开、渤海和黄海的拉开、南海的扩张以及华北平原的沉陷等(图 7)。图 7 中用虚折线表示中生代盆地(早白垩世)，斜十字表示新生代盆地，锯齿线表示现代板块俯冲带，箭头表示菲律宾板块俯冲方向，浅灰色区域表示堪察加俯冲带(日本弧以北)和琉球俯冲带(日本弧以南)影响的范围。43 Ma 以后也有岛弧，如琉球岛弧，俯冲带在琉球海槽，岛弧在琉球群岛，弧后在冲绳海槽，其影响范围不超过 300 km(图 7 中的浅灰色范围)。中国东部包括日本海、渤海、黄海、东海均处于板块俯冲带影响范围之外，主要受伸展构造控制。数值模拟也证明菲律宾板块俯冲的影响不会超过 200~300 km(刘翠等, 2006)。中国东部与太平洋向西俯冲有关的不是大规模岩浆活动而是一系列伸展盆地，说明俯冲的作用不是只有岛弧一种效应。之所以出现这种动力学特点，可能与俯冲角度大和俯冲带的向后退缩以及距离俯冲带太远有关。

综上所述，中国东部中生代岩浆活动的规模主要集中在 180~130 Ma。另外，从图 6 中看出，在中国东部大规模岩浆活动期间，太平洋板块是向北偏东方向俯冲的，说明中国东部中生代大规模岩浆活动不可能与太平洋板块的俯冲有关。

8 地震层析资料告诉我们什么？

最近几年，利用地震层析成像资料解释板块俯冲火了起来。这种俯冲不同于早先的俯冲，是俯冲

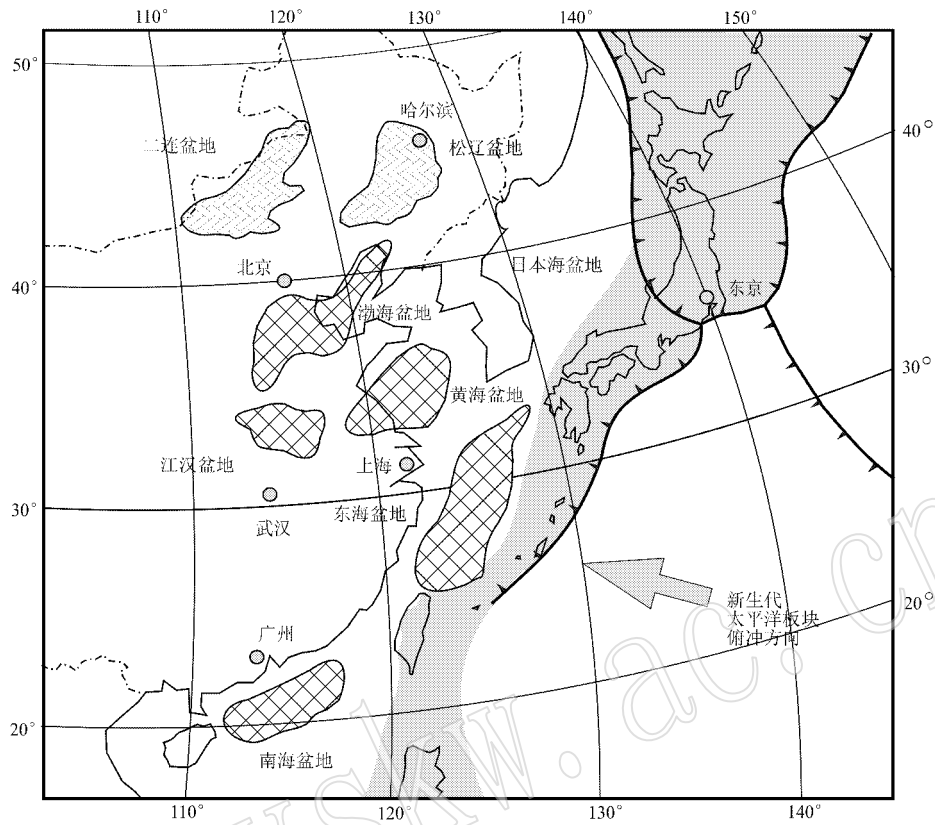


图 7 东亚中生代盆地分布图(刘德来和马莉,1997)

Fig. 7 Distribution of Mesozoic-Cenozoic basins in East Asia(from Liu Delai and Ma Li , 1997)

到地幔深部 410~660 km 所产生的效应。就东亚和太平洋地区来说,以赵大鹏(Zhao D P)等的研究成果比较集中,下面看看他们的最新成果。

地震层析成像研究发现,在东亚大陆下地幔深部存在若干低速带,有人把它与太平洋板块的俯冲联系起来,认为是板块俯冲到软流圈地幔 410~660 km 的痕迹(图 8)。图 8 中的红色和蓝色分别示高速和低速带,速度变化的尺度见图下方的标尺,白色圆点示剖面 100 km 宽度范围内的地震震源中心,两条实线分别示 410 和 660 km 的不连续面。Zhao (2004, 2009)认为,在弧后地区地幔低速带通常伴随弧后岩浆活动,与消减带板块的脱水部分熔融作用以及地幔楔的地幔对流有关,这些作用可以导致软流圈的大规模上涌(图 9)。

在 Zhao (2004, 2009), Zhao 等(2004, 2007)的模式中,太平洋板块可以沿日本海沟一直向下俯冲到 410~660 km 的地幔过渡带,向西深入东亚大陆内部,最远终止于贝加尔。他们认为,地幔对流可以发生在 410 km 的俯冲带之上,称之为大地幔楔(big

mantle wedge, BMW, 图 9b)对流。他们认为俯冲到 410 km 的消减带可以产生脱水作用,使上覆热和湿的软流圈地幔上涌,导致岩石圈的破裂和减薄,认为中国东北长白山和五大连池板内玄武岩的形成以及贝加尔、山西地堑以及郯庐断裂带等裂谷作用与太平洋板片俯冲到东亚之下的作用有关(Tatsumi *et al.* , 1990 ; Zhao *et al.* , 2004 , 2007)。国内也有此理论的拥护者,如陈斌等(2005)即用这个模式解释华北中生代岩浆作用的成因,他们的板块俯冲图(图 10)也与 Zhao 等的见解如出一辙。

笔者认为, Zhao 等的模式有新意,但也有不尽合理之处。板片俯冲带来的水导致地幔楔发生部分熔融形成弧后岩浆作用是可能的,但是,其范围有限,仅发育于岛弧和弧后盆地地区[即通常所说的地幔楔, Zhao 等称之为“小地幔楔”(Zhao , 2004 , 2009)]。从图 11 看,沿琉球海沟向西俯冲的影响只到冲绳海槽为止,不可能如 Zhao (2004 , 2009)所说的俯冲带消减可以达到东亚大陆腹地。因此,板块构造得出的小地幔楔对流模式是合理的,而 Zhao 等(Zhao ,

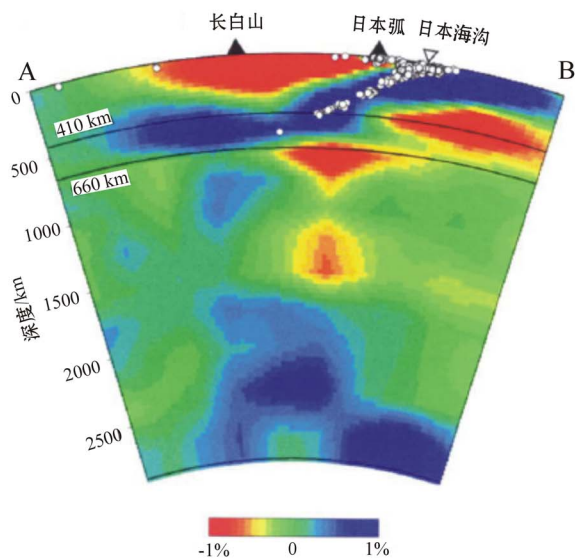


图 8 穿过中国东北和日本中部的地震 P 波层析成像剖面(Zhao DP, 2004)

Fig. 8 Vertical cross-section of P-wave velocity image along a profile passing through Northeast China and central Japan

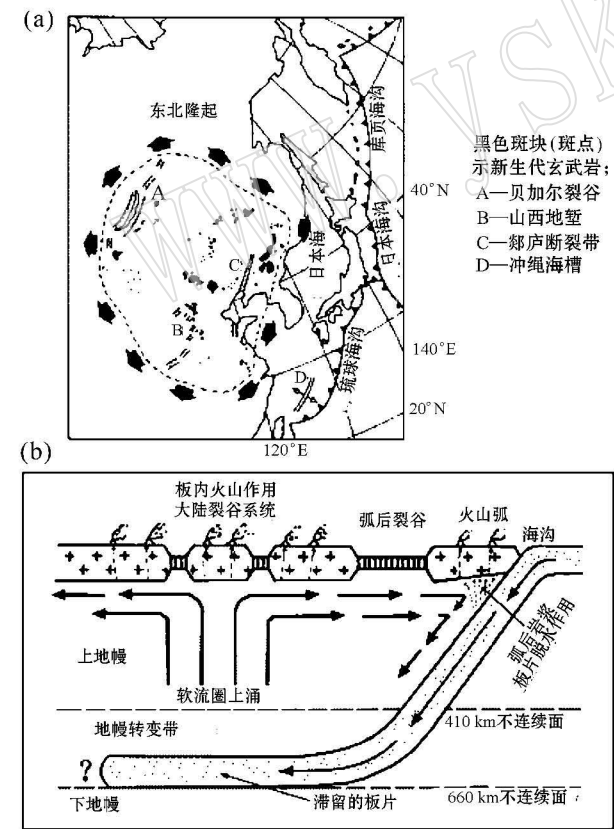


图 9 西北太平洋和东北亚构造图(a)和东北亚东西向上地幔结构示意图(b)(Zhao, 2009)

Fig. 9 Tectonic features in Northwest Pacific and Northeast Asia (a), and the schematic east-west vertical cross section showing the upper-mantle structure beneath Northeast Asia (b) (Zhao, 2009)

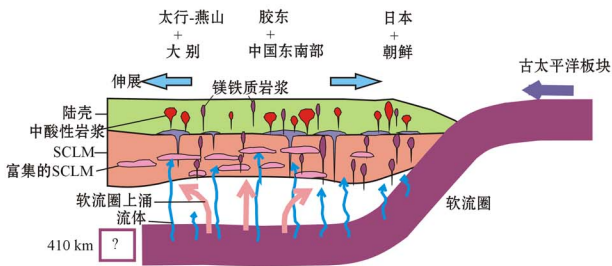


图 10 华北中生代岩浆岩成因和构造环境的模式
[据陈斌等(2005)重绘]

Fig. 10 Cartoon showing the origin and tectonic setting of the Mesozoic magmatism in the NCC (after Chen Bin *et al.*, 2005)

2004, 2009; Zhao *et al.*, 2004, 2007)提出的大地幔楔对流模式是不可能的。其次,深入到大陆内部的俯冲带是冷的和无水的,不可能有流体释放出来,更不可能引起上覆软流圈的对流,也不可能造成大陆板内岩浆活动及岩石圈伸展减薄。

那么,如何解释东亚大陆之下的地震层析成像资料呢?笔者认为,下述几点可能是解释中需要注意的:

(1) 太平洋板块向西俯冲可以深达 410 km 甚至 670 km 的上下地幔过渡带,这是可能的。但是,俯冲板片总体上应当在上地幔底部回流向东,而不是一直向西。因为,板块构造是建立在地幔对流基础上的,如果俯冲板片一直向西不回头,消减带的物质不返回板块扩张脊,地幔对流就停止了,板块运动、海底扩张也就停止了,这是无论如何不可能发生的。

(2) 地震层析成像表明在东亚大陆下部存在低速带,这个低速带很可能与太平洋板块的俯冲有关,这也是可能的。笔者推测,虽然板块俯冲总体上要向东回流,但是,不排除有一部分俯冲的物质可以滞留在上地幔底部过渡带中。如同汽车高速转弯时由于离心力的作用可能把一部分东西甩下来一样,在板块俯冲时也可能有一部分物质堆积在俯冲带的转弯处。后续的板块俯冲作用不断带来新的物质,把原先老的滞留物逐渐向西推挤深入到大陆的内部,如地震层析成像所显示的(图 8)。因此,这个低速带可能是由不同时代消减带物质堆积组成的,越向西时代越老(图 11 中以不同颜色的斑块表示)。

(3) 值得注意的是,这个进入软流圈地幔的消减带滞留物(图 8 中由蓝色指示的低速带和图 11 中不同颜色的斑块组成的区域)是重的、冷的和干的,

生物物质交换。因此,说俯冲板片存在大量蛇纹石和滑石是不可能的,把俯冲脱水作用建立在蛇纹石和滑石的基础上也是不对的。

地震层析成像资料是客观的事实,它让我们进一步认识到地幔成分和结构的复杂性,但如何解释它是极具挑战性的,必须慎重行事,不能违背板块构造的基本原理,也不能想当然地用它来解释地表的岩浆活动和构造作用。

9 郯庐断裂带与太平洋板块俯冲的关系

郯庐断裂带是中国东部最大最明显的构造形迹,为左型走滑断裂,对其主要活动时间不同学者有不同的认识,认为大体在 135~110 Ma 期间,其滑移幅度估计在 640~1 260 km 之间(邵济安等, 1995)。郯庐断裂带主要活动时间与学术界认为的太平洋板块向西俯冲的时间大体吻合,那么,太平洋板块向西俯冲能否驱动郯庐断裂带的大规模走滑呢? 显然不可能。按照板块构造理论,板块俯冲的力主要向下进入地幔,是全球地幔对流循环的一个环节,其对俯冲带上盘的挤压主要出现在海沟前缘的弧前地带。郯庐断裂带距俯冲带很远,即使有影响的话,也是伸展而非挤压。图 3 的资料表明,在郯庐断裂带活动期间,太平洋板块是向北偏东方向俯冲的,可能带动大陆边缘出现一系列 NNE 方向的走滑断裂,这从力学机制上看恰恰是比较合理的。

10 晚中生代日本弧的启示

李廷栋(1999)归纳了日本弧的特征,指出日本弧是由包括从前侏罗纪至今的许多地体组成的,表明东亚存在一个左旋断裂系,它展布于中国大陆东部、朝鲜、日本和俄罗斯远东地区,是东亚晚中生代构造的主要组成部分。东亚左旋断裂系是由于 Izanagi 板块大约从 140 Ma 快速向北俯冲造成的。古地磁恢复的日本弧在中生代时位于低纬度地区,大体相当于现今的浙闽沿海一带(如四国岛靠近台湾,北纬 24°)。日本弧随着板块向北漂移,至 28~22 Ma 左右由于日本海的打开而折向东移至现今的位置(图 12)。图中绿色表示早中生代时日本弧的位置,浅蓝色为日本现今的位置,箭头示日本弧北移的轨迹(为笔者推测)。据古地磁研究,日本美浓地体晚三叠世至晚侏罗世为燧石和硅质页岩沉积,古纬

度在 4.3°至 10.5°之间,早白垩世古纬度为 31°,85~112 Ma 为 45.3°,80 Ma 至 15 Ma 期间在 30°左右(李朋武等, 1997)。Hattori (1982)和 Zheng 等(1990)的研究表明,那丹哈达地体和美浓地体在白垩纪之前处于相近的古纬度,那丹哈达地体晚三叠世时位于北纬 12°20′,美浓地体晚三叠世时位于北纬 11°,那丹哈达地体早二叠世时位于南纬 10°30′,美浓地体中三叠世时位于赤道附近(0.7°±3°40′,张庆龙等, 1997)。按照 Osozawa (1998)的研究,日本弧在 115~110 Ma 期间向北运移了约 2 500 km。

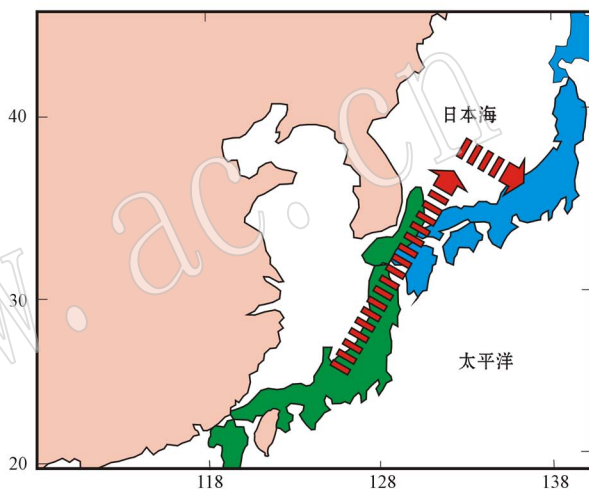


图 12 日本弧中生代早期古构造位置复原图

[据 Sengor 和 Natalin(1996)简化]

Fig. 12 Diagram of early Mesozoic paleostructure position of Japan arc (after Sengor and Natalin, 1996)

日本弧与中国东部紧邻,由一系列增生地体组成,与太平洋板块的活动密切相关。中国具古老陆壳基底的东部地区,地壳结构不同于日本,中生代虽然“活化”了,其特征也不同于日本。中国东部的“活化”主要表现为具有强烈的中酸性岩浆活动及伸展盆地,而无日本同时期发育的蛇绿岩、增生楔和双变质带,无法与太平洋板块的俯冲联系起来(毛建仁等, 2009)。

上述一系列事实表明,中国东部中生代岩浆活动与古太平洋板块俯冲的关系是似是而非的,如果一定要说有关,只有短短的 125~110 Ma 和 43~0 Ma 两个时间段可能与之有关。而令人尴尬的是,恰恰 43 Ma 之后中国东部缺少岩浆活动。因此,中国东部岩浆活动总体上与太平洋板块的活动无关,虽然太平洋板块离中国东部那么近。

11 结论和建议

由上述讨论得出的结论是：

(1) 中生代的中国东部不属于环太平洋构造带,不是安第斯活动陆缘环境,没有岛弧玄武岩和岛弧花岗岩。

(2) 古地磁资料表明,在中生代早期,太平洋板块基本上是向北扩张的,至早白垩世中期(125 Ma左右)才转向西(包括向北西和南西方向)。中国东部大规模岩浆活动主要是侏罗—早白垩世的(约180~130 Ma),在这个时期,太平洋板块主要是向北扩张的。因此,中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块的俯冲无关。

(3) 太平洋板块真正向西俯冲的时间非常短暂,只有125~110 Ma和43~0 Ma两个时段。在前一个时段,中国东部岩浆活动仅限于中国东部沿海;在后一个时段,中国东部岩浆活动几乎绝迹。

(4) 地震层析成像资料表明,中国东部大陆下存在一个低速带,它是冷的、干的和重的,不可能有流体释放出来,不可能促使上覆软流圈发生部分熔融和上涌,相反,它的作用是抑制了软流圈的部分熔融,与中国东部中生代大规模岩浆活动无关。

令人费解的是,中国东部中生代岩浆岩与太平洋俯冲有关的见解几乎没有站得住脚的、比较靠谱的、经得起推敲的证据,为什么许多人还毫不怀疑地、争先恐后地这样说呢?笔者猜测可能与外国人的见解有关。笔者曾经试图查证是谁最先提出中国东部与太平洋向西俯冲有关的观点的,还没有准确的答案,但初步推测可能是海外人士(外国人或海外华人学者)提出来的(张旗等,2008;张旗和李承东,2012)。外国人到中国来,看到中国东部面临太平洋,而且太平洋板块现今是向西俯冲的,于是毫不犹豫地联想:中国东部岩浆岩与太平洋板块的俯冲有关。他们认为,这可能是中国东部中生代岩浆岩最简单、最合理的解释了。有这种联想无可指摘,但是,必须予以论证。但是,外国人又没有这个耐心来认真论证,他们大多数人来中国不过是蜻蜓点水,走马观花,不可能坐下来对中国东部做细致的研究,何况外国人对中国东部地质背景并没有深厚的了解。他们熟悉板块构造,熟悉美国西部,但是,不太明白中国东部的事情,也搞不清中国东部与美国西部有

多大差别。外国人不研究也就罢了,那本来不是他们的事情,可惜中国人也没有认真把这件事情做好。

为了解决这个问题,笔者建议:

(1) 认真对比一下中国东部中生代岩浆岩与岛弧环境的岩浆岩究竟有什么区别。为此,建议把研究的触角伸到国外去。我们不是认为中国东部属于环太平洋构造带吗?那好,我们去美国西部看看,对比一下美国西部古生代、中生代、新生代的岩浆-构造活动与中国东部有何异同。我们不是认为中国东部岩浆岩是岛弧环境的吗?那好,我们可以去日本、印尼、菲律宾、新西兰做一些研究,了解一下那里的岩浆岩具有什么特征,再与中国东部进行一下比较,看看能够得出什么结论。我们不是认为中国东部属于活动陆缘背景吗?那好,我们就去安第斯,看看那里都出露些什么岩石,与中国东部比较一下。笔者设想,经过这样的对比研究,一定可以拿出一些过硬的材料,拿出一些真凭实据,对中国东部岩浆活动必定会有进一步的认识。

(2) 查明太平洋板块在中生代时活动的规律,解决太平洋板块是否和何时向西俯冲的问题。这个问题至关重要,是中国东部岩浆岩与太平洋板块是否有关的命题的前提,前提不存在,一切皆白搭。这个研究也不难,我们可以选择太平洋的某些岛链,做一些古地磁研究;可以去日本和俄罗斯远东研究一下当地中生代地体活动的情况。

(3) 换一个思路,尝试一下是否还有别的解释。科学研究必须博采众长,广开思路,不能一条道走到黑。例如,国内也有少数学者持另外的观点(鲍亦冈等,1995;谢家莹等,1996;陆志刚等,1997;陶奎元等,1999;白志民等,2001;邵济安等,1999,2007),他们的依据是什么?他们的研究思路和研究方法有何不同之处?笔者认为,中国东部中生代岩浆活动不可能与太平洋板块的俯冲有关,而可能与东亚中生代强烈的地幔柱活动有关。理由是什么?笔者将另文详述。

致谢 感谢匿名审稿人的评论和建议,笔者参考审稿意见对本文做了进一步的修改,增加了对地震层析成像资料的评述。成文过程中与邵济安研究员多次讨论,采纳了她提出的许多建设性意见;与邢光福研究员的反复交流也开阔了笔者的思路;本文的完成还得到焦守涛同学的帮助,特此一并致谢。

References

- Bai Zhimin, Xu Shuzhen and Ge Shiwei. 2001. Badaling Granites [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~169 (in Chinese with English abstract).
- Bao Yigang, Bai Zhimin, Ge Shiwei, *et al.* 1995. Volcanic Geology and Volcanic Rocks in Yanshan Period from Beijing Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~164 (in Chinese with English abstract).
- Best M G and Christiansen E H. 2001. Igneous Petrology [M]. Blackwell Science Ltd., 1~458.
- Chen Bin, Tian Wei, Zhai Mingguo, *et al.* 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 13~24 (in Chinese with English abstract).
- Coleman R G. 1984. The diversity of ophiolites [J]. *Geol. Mijnbouw*, 63: 141~150.
- Engelbreton D C, Cox A and Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin [J]. *Geol. Soc. Am.*, Special Paper, 206: 1~59.
- Hattori I. 1982. The Mesozoic Evolution of the Mino Terrane, Central Japan: A geologic and paleomagnetic synthesis [J]. *Tectonophysics*, 85: 313~340.
- Howell D G. 1980. Mesozoic accretion of exotic terranes along the New Zealand segment of Gondwana [J]. *Geology*, 8: 487~491.
- Howell D G, Jones D L and Schermer E R. 1985. Tectonostratigraphic Terranes of the Circum-Pacific Region [M]. Houston, Texas, U. S. A., 3~30.
- Koppers A A P, Morgan J P, Morgan J W, *et al.* 2001. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trail [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 185: 237~252.
- Li Pengwu, Zhang Shihong and Shen Ninghua. 1997. The contrast of Paleomagnetic results between Nadanhadu area, Heilongjiang Province and Mino area, Japan, and its significance [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 27(1): 62~66 (in Chinese with English abstract).
- Li Tindong. 1999. Western Pacific island arcs research trend [J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 20 (in Chinese with English abstract).
- Liu Cui, Deng Jinfu, Zhang Guibin, *et al.* 2006. Numerical simulation of the mechanism of Cenozoic lithospheric extension-thinning in North China [J]. *Geology in China*, 33: 885~895 (in Chinese with English abstract).
- Liu Delai and Ma Li. 1997. Mesozoic tectonic evolution of continental margin in East Asia [J]. *Geoscience*, 11: 444~451 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhigang, Tao Kuiyuan, Xie Jiaying, *et al.* 1997. Volcanic Geology and Mineral Resources of Southeast China Continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~431 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Yutaka T, Li Zilong, *et al.* 2009. Correlation of Mesozoic Cenozoic tectono-magmatism between SE China and Japan [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 844~856 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama S. 1994. Plume tectonics [J]. *J. Geol. Soc. Jpn.*, 100: 24~49.
- Osozawa S. 1998. Major transform duplexing along the eastern margin of Cretaceous Eurasia [A]. Flower M F J, Chung S L, Lo C H, *et al.* *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia* [C]. Washington D C: American Geophysical Union, 245~257.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984a. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984b. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites [A]. *Marginal Basin Geology* [C]. Geological Society of London Special Publications, 16: 77~94.
- Roberts M P and Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids [J]. *Geology*, 21: 825~828.
- Sengor A M C and Natalin B A. 1996. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis [A]. Yin A and Harrison T M. *The Tectonic Evolution of Asia* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 486~641.
- Shao J A. 1997. Discussion on the transform of Paleothethys into the Pacific [J]. *Continental Dynamics*, (1): 77~82.
- Shao Ji'an and Tang Kedong. 1995. Terranes in Northeast China and Evolution of Northeast Asia Continental Margin [M]. Beijing: Seismic Press, 1~185 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Lujiao, Mu Baolei, *et al.* 2007. Upwelling of Da Hinggan Mountains and Its Geodynamic Background [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~250 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhao Guolong, Wang Zhong, *et al.* 1999. Tectonic setting of Mesozoic volcanism in Da Hinggan Mountains, northeastern China [J]. *Geological Review*, 45(Sup.): 422~430 (in Chinese with English abstract).
- Shimoda G and Tatsumi Y. 1999. Generation of rhyolite magmas by melting of subducting sediments in Shodo-Shima island, southwest Japan, and its bearing on the origin of high-Mg andesites [J]. *The Island Arc*, 8: 383~392.
- Stern C R and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zond [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 263~281.
- Sun Tao. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes [J]. *Geological Bulletin of China*, 25: 332~335 (in Chinese with English abstract).
- Tang Kedong, Shao Ji'an, Li Jingchun, *et al.* 2004. Nature of the Yanbian suture zone and structure of Northeast Asia [J]. *Geological Bulletin of China*, 23: 885~891 (in Chinese with English abstract).
- Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Xing Guangfu, *et al.* 1999. Strong Yan-shanian volcanic magmatic explosion in east China [J]. *Mineral De-*

- posits, 18: 316~322 (in Chinese with English abstract).
- Tatsumi Y, Maruyama S and Nohda S. 1990. Mechanism of back arc opening in the Japan Sea: role of asthenospheric injection[J]. *Tectonophysics*, 181: 299~306.
- Wilson M. 1989. *Igneous. Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1~465.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jiaying, Tao Kuiyuan, Yin Jiaheng, *et al.* 1996. Mesozoic Volcanic Geology and Volcano-Intrusive Complexes of Southeast China Continent[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~277 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Qiu Jiansheng. 2010. *Igneous Petrology*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, *et al.* 1995. Magnesium andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implications for slab melting and pressures in the mantle wedge[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 107: 505~519.
- Zhang Qi and Li Chengdong. 2012. Granites: Implications for Continental Geodynamics[M]. Beijing: Ocean Press (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, *et al.* 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: China Land Press, 1~344 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi and Zhou Guoqing. 2001. Ophiolites of China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qinglong, Shinjino M and Satoru K. 1997. Radiolaria and correlation study of terranes[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 36(2): 245~252 (in Chinese with English abstract).
- Zhao D P. 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146: 3~34.
- Zhao D P. 2009. Multiscale seismic tomography and mantle dynamics[J]. *Gondwana Research*, 15: 297~323.
- Zhao D, Lei J and Tang R. 2004. Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: evidence from seismic tomography[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49: 1401~1408.
- Zhao D, Maruyama S and Omori S. 2007. Mantle dynamics of western Pacific to East Asia: new insight from seismic tomography and mineral physics[J]. *Gondwana Research*, 11: 120~131.
- Zheng Z, Kono M and Shao J A. 1990. The Amalgamative history of eastern Asia inferred from Paleomagnetism of North China[J]. *Rock Magnetism and Paleogeophysics*, 17: 1~18.
- Zhou Jian, Xu Shanfa, Chi Qinghua, *et al.* 2012. Geochemical characteristics of the Mesozoic volcanic belt in southeast coast of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 93~100 (in Chinese with English abstract).
- ## 附中文参考文献
- 白志民, 许淑贞, 葛世伟. 2001. 八达岭花岗杂岩[M]. 北京: 地质出版社, 1~169.
- 鲍亦冈, 白志民, 葛世伟, 等. 1995. 北京燕山期火山地质及火山岩[M]. 北京: 地质出版社, 1~164.
- 陈 斌, 田 伟, 翟明国, 等. 2005. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义[J]. *岩石学报*, 21: 13~24.
- 李朋武, 张世红, 申宁华. 1997. 黑龙江省那丹哈达与日本美浓地区古地磁结果对比及意义[J]. *长春地质学院学报*, 27(1): 62~66.
- 李廷栋. 1999. 西太平洋岛弧研究动向[J]. *地学前缘*, 6(3): 20.
- 刘 翠, 邓晋福, 张贵宾, 等. 2006. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄机制的数值模拟[J]. *中国地质*, 33: 885~895.
- 刘德来, 马 莉. 1997. 中生代东亚大陆边缘构造演化[J]. *现代地质*, 11: 444~451.
- 陆志刚, 陶奎元, 谢家莹, 等. 1997. 中国东南大陆火山地质及矿产[M]. 北京: 地质出版社, 1~431.
- 毛建仁, 高桥浩, 厉子龙, 等. 2009. 中国东南部与日本中-新生代构造-岩浆作用对比研究[J]. *地质通报*, 28(7): 844~856.
- 邵济安, 唐克东, 等. 1995. 中国东北地体与东北亚大陆边缘演化[M]. 北京: 地震出版社, 1~185.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 等. 2007. 大兴安岭的隆起与地球动力学背景[M]. 北京: 地质出版社, 1~250.
- 邵济安, 赵国龙, 王 忠, 等. 1999. 大兴安岭中生代火山活动构造背景[J]. *地质论评*, 45(增刊): 422~430.
- 孙 涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. *地质通报*, 25: 332~335.
- 唐克东, 邵济安, 李景春, 等. 2004. 吉林延边缝合带的性质与东北亚构造[J]. *地质通报*, 23: 885~891.
- 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 等. 1999. 中国东部燕山期火山岩岩浆大爆发[J]. *矿床地质*, 18: 316~322.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23: 1217~1238.
- 谢成龙, 朱 光, 牛漫兰, 等. 2009. 滁州火山岩地球化学及其对郑庐断裂带内岩石圈减薄的指示[J]. *岩石学报*, 25(1): 92~108.
- 谢家莹, 陶奎元, 尹家衡, 等. 1996. 中国东南大陆中生代火山地质及火山-侵入杂岩[M]. 北京: 地质出版社, 1~277.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. *火成岩岩石学*[M]. 北京: 科学出版社.
- 张 旗, 李承东. 2012. 花岗岩: 地球动力学意义[M]. 北京: 海洋出版社, 1~287.
- 张 旗, 王 焰, 熊小林, 等. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社, 1~344.
- 张 旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社.
- 张庆龙, 水谷伸治郎, 小 智. 1997. 放射虫化石及地体对比研究[J]. *古生物学报*, 36(2): 245~252.
- 周 建, 徐善法, 迟清华, 等. 2012. 东南沿海中生代火山岩带地球化学特征[J]. *地学前缘*, 19(3): 93~100.