

# 中国东北及邻区白垩纪岩浆活动与 古太平洋板块俯冲的关系

孙明道

中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

**摘要:** 本文简要综述了古太平洋构造演化历史和中国东北及邻区构造单元, 总结了我国东北及邻区白垩纪岩浆活动的时空分布规律及岩石组合特征, 认为我国东北额尔古纳-兴安-松辽-佳木斯地块 145~88 Ma 岩浆活动显著, 从西向东由老变新, 特征岩石组合为软流圈地幔来源玄武质岩石, 以及 I 型和 A 型花岗岩类; 88~65 Ma 岩浆活动较弱, 仅少量 OIB 型玄武岩。完达山-锡霍特-阿林-延边地区白垩纪岩浆活动也具有从西向东由老变新的规律, 特征岩石组合为高镁安山岩、埃达克岩、I 型及 S 型花岗岩等中酸性岩石。上述岩浆活动分别形成于弧后(板内)及大陆弧。我国东北早白垩世大陆弧具有弧后伸展, 与年老大洋岩石圈的俯冲有关, 是现代地球上少见的俯冲类型; 晚白垩世中晚期, 弧后发生构造挤压, 与智利型大陆边缘相似。

**关键词:** 活动大陆边缘; 古太平洋; 白垩纪; 俯冲后撤

中图分类号: P541 文章编号: 1007-2802(2016)06-1090-08 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.06.003

## Cretaceous Magmatism in NE China and Adjacent Areas and Its Relationship with the Paleo-Pacific Plate Subduction

SUN Ming-Dao

State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** This paper briefly reviewed the tectonic evolution history of the Paleo-Pacific Plate and tectonic regimes of NE China and adjacent areas. It also summarized the spatial and temporal association and petrogenesis of Cretaceous igneous rocks, proposing its relationship with Paleo-Pacific Plate subduction. The Erguna, Xing'an, Songliao, and Jiamusi blocks of NE China have significant igneous activities in 145–88 Ma, characterized by a spatial and temporal eastward migration and an association of I- and A-type granites and asthenosphere-derived basaltic rocks, with minor OIB-type basalts after ~88 Ma. The Cretaceous magmatism in the Wandashan-Sikhote-Alin and Yanbian area is also characterized by eastward migration but an association of intermediate to acidic rocks including high-Mg andesites, adakites, and I- and S-type granites. Cretaceous magmatism in Erguna-Xing'an-Songliao-Jiangmusi and Wandashan-Sikhote-Alin-Yanbian areas was thought to be formed in back-arc (intra-plate) and continental arc settings, respectively, and was controlled by roll-back of the Paleo-Pacific Plate. The Early Cretaceous continental arc accompanied with back-arc extension was most likely to result from subduction of old oceanic lithosphere, which rarely occurred in the modern earth. The Late Cretaceous continental arc at NE China, characterized by back-arc compression, was similar to the present Chilean continental margin.

**Key words:** active continental margin; Paleo-Pacific; Cretaceous; subduction roll-back

中国东北地区及毗邻的俄罗斯远东滨海边疆区发育巨量的白垩纪岩浆岩, 对区域地质构造演化、盆地形成以及油气藏的储备和破坏都有重大的影响 (Wu *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2013; Feng *et al.*,

2010)。作为古太平洋板块俯冲系统、欧亚活动大陆边缘的重要组成部分, 这些岩浆岩的时空分布特征、岩石地球化学特征及构造成因是近年来研究的热点 (Zhang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011; Sun *et*

收稿日期: 2016-08-01 收到, 2016-10-04 改回

基金项目: 973 项目 (2013CB429804)

作者简介: 孙明道 (1985-), 男, 博士, 研究方向: 岩石大地构造. E-mail: smd@zju.edu.cn.

*al.*, 2013)。笔者对古太平洋构造演化历史和中国东北及邻区构造单元进行简单的综述,之后总结归纳中国东北及邻区白垩纪岩浆活动的时空分布规律及岩石组合特征,在白垩纪岩浆活动与古太平洋板块俯冲的关系方面谈谈自己的认识,抛砖引玉,以期更广泛的交流和讨论。

## 1 古太平洋构造演化历史

古太平洋又名泛大洋(Panthalassa),受“自下而上”的地幔柱活动(Maruyama, 1994, Maruyama *et al.*, 2007)或“自上而下”的环超大陆俯冲作用(Cawood *et al.*, 2016)影响,于新元古代在Rodinia大陆的裂解中心诞生。它离散了东亚与北美、南美、南极-澳大利亚等大陆板块,又使得这些大陆在地球另一面汇聚,在古生代末形成了Pangea超大陆,标志着古太平洋进入最鼎盛时期,成为超大洋。之后,环古太平洋各大陆均受到俯冲,古太平洋进入到消减阶段,形成Izanagi、Phoenix、Farallon 3个子板块。中侏罗世新太平洋的扩张同大西洋的诞生、Pangea超大陆裂解一起,加速了古太平洋的消亡(Müller *et al.*, 2008)。环古太平洋大陆板块的共同特征是含有3个阶段的地质记录,分别为新元古代的板内伸展断陷、早古生代的被动大陆边缘以及晚古生代至中生代的主动大陆边缘。

## 2 中国东北及邻区构造单元

中国东北位于西伯利亚克拉通和华北克拉通之间,由多个地块拼贴组成,包括额尔古纳地块、兴安地块、松辽地块、布列亚-佳木斯-兴凯地块等(Wu *et al.*, 2005; 余星等, 2008; Kotov *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010; Sorokin *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2011)。它们是中亚造山带的东端部分(Eastern CAOB),又名兴蒙造山带(XMOB)(Xu *et al.*, 2015)。随着新元古代新林-喜桂图洋(Feng *et al.*, 2016)、锡林浩特-黑河洋和古牡丹江洋在寒武纪至志留纪的关闭(Xu *et al.*, 2015),各地块拼贴为一个整体。

从额尔古纳(Tang *et al.*, 2013; Ge *et al.*, 2015)、兴安(Cui *et al.*, 2015)、松辽(Pan *et al.*, 2014)到布列亚-佳木斯-兴凯(颧颧强等, 2008; 吕长禄等, 2014; 杨浩等, 2015),都有新元古代岩浆活动的记录。这些岩浆活动可能形成于板内伸展的构造背景,并与Rodinia超大陆裂解有关(Tang *et al.*, 2013)。这与这些地块之间相隔小洋盆的特征也是一致的。另一方面,这些地块在晚志留世至石炭纪都发育滨浅海相地层,包括石英砂岩、灰岩等

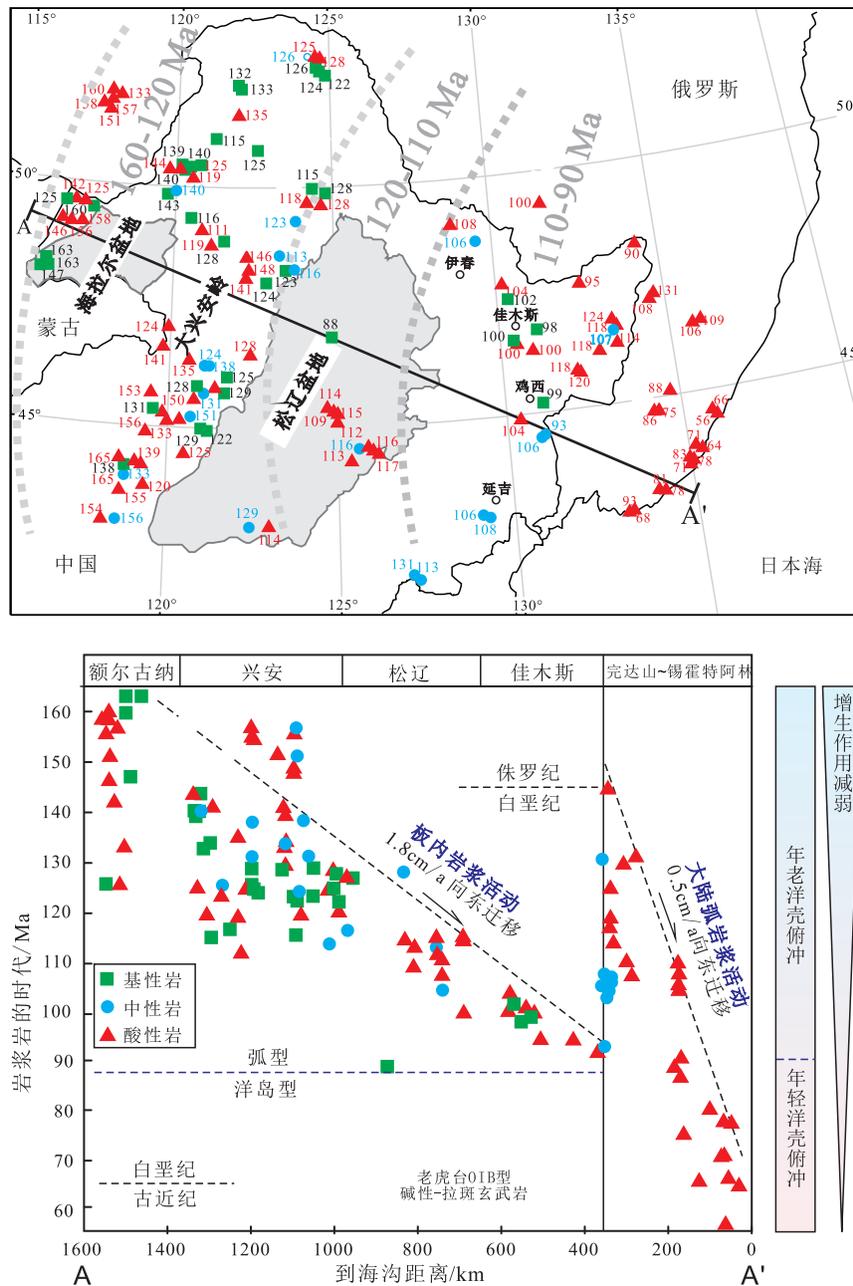
(王成文等, 2009),可能代表了被动大陆边缘沉积。因此,中国东北各地块具有相似性,可能自新元古代起就一直位于古太平洋边缘。它们不仅记录了晚古生代至中生代古太平洋主动大陆边缘的地质历史,也很可能记录了新元古代板内伸展断陷、晚志留世至石炭纪被动大陆边缘2个阶段。特殊的是,这2个阶段没有直接过渡,中间夹有寒武纪至志留纪各地块拼合的过程(Xu *et al.*, 2015),被认为是泛非造山带的一部分(Wilde *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2009, 2011)。

俄罗斯远东的滨海边疆地区,构造上属锡霍特-阿林(Sikhote-Alin)造山带,同中国境内的完达山造山带一起,是环太平洋增生造山带的重要组成部分,记录了古太平洋板块晚古生代至中生代对中国东北的俯冲历史(Kojima, 1989; 邵济安等, 1991)。其主体由三叠纪-侏罗纪古太平洋板内的沉积岩-火山岩组成,受古太平洋板块俯冲作用影响,于晚侏罗世拼贴增生在布列亚-佳木斯-兴凯地块的东缘(Zhou *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2015)。

在白垩纪时,中国东北各地块已拼合完成,完达山-锡霍特-阿林造山带的主体也已经拼贴,在统一的大陆上发生了广泛而巨量的岩浆活动(林强等, 1998; Jahn *et al.*, 2000; 张旗, 2013)。前人已经对中国东北白垩纪岩浆活动完成了大量的高质量工作,结合近年新发表的关于俄罗斯滨海边疆区的资料以及作者对完达山地区白垩纪岩浆活动的研究,使得对这些岩浆活动的构造成因进行深入探讨成为可能。

## 3 额尔古纳-兴安-松辽-佳木斯地区白垩纪岩浆活动特征

额尔古纳-兴安-松辽-佳木斯地区白垩纪岩浆活动主要发生在早白垩世以及晚白垩世早期,145~88 Ma。根据时空分布关系,可以划分为大兴安岭、松辽、伊春-佳木斯3个岩浆岩带(图1)。大兴安岭岩浆岩带形成时代相对最早,岩浆作用主要发生在162~125 Ma,主要出露火山岩,南部为满克头鄂博组、玛尼图组、白音高老组、梅勒图组(Wang *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010; Ying *et al.*, 2010a);中部和北部为塔木兰沟组、吉祥峰组、上库力组、依列克得组等(Fan *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2010; Ying *et al.*, 2010b),具有典型的双峰式特征。在松辽盆地,早白垩世火山岩研究样品主要来自于钻井岩心,以火石岭组、营城组火山岩地层为代表,夹有沙河子组含煤陆相碎屑沉积地层,火石岭组时代为129 Ma



数据来源：Sorokin *et al.*, 2005；程瑞玉等, 2006；Wang *et al.*, 2006；Ji *et al.*, 2007；Zhang *et al.*, 2008, 2010；裴福萍等, 2008；王璞珺等, 2009；张磊等, 2009；朱占平等, 2009；Yu *et al.*, 2009；Ying *et al.*, 2010a, 2010b；Zhang, 2010；Zhang *et al.*, 2011；徐美君等, 2011；孟恩等, 2011；孙德有等, 2011；王建国等, 2013；于介江等, 2013；刘阁等, 2014；Jahn *et al.*, 2015；Ren *et al.*, 2016

图1 中国东北及俄罗斯滨海边疆区晚侏罗世至古近纪初岩浆活动时空分布特征

Fig.1 Spatial and temporal distribution of Late Jurassic to Paleogene magmatism in NE China and Russia Primorye

左右(裴福萍等, 2008)；营城组流纹岩的形成时间为  $115 \pm 2$  Ma 到  $109 \pm 2$  Ma(章凤奇等, 2009；徐岩等, 2010；Zhang *et al.*, 2011)。在伊春-佳木斯地区, 伊春地区的美丰组玄武岩、粗面岩时代为  $106 \pm 2$  Ma(张明鹏, 2010；潘荣, 2010)。在佳木斯地区, 佳木斯双峰式岩墙群的时代为  $100 \pm 2$  Ma(Sun *et al.*, 2013)；鸡西地区的辉绿岩岩墙的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄为  $100 \pm 4$  Ma(朱占平等, 2009)；双鸭山地区的辉长

岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $98 \pm 2$  Ma(张磊等, 2009)；俄罗斯 Khingan-Olonoi 地区(Khingan-Okhotsk 火山岩带)火山岩的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄为  $100 \pm 1$  Ma(Sorokin *et al.*, 2005)；抚远地区的花岗斑岩锆石年龄为 95~90 Ma(于介江等, 2013)。总之, 额尔古纳-兴安-松辽-佳木斯地区白垩纪岩浆活动具有从西向东由老变新的演化趋势, 揭示了岩浆活动从西向东的迁移, 迁移速率大约为 1.8 cm/a。

岩石地球化学特征方面,区内 145~88 Ma 岩浆活动具有相似的特征(表 1)。火山活动以裂隙式喷发为主,边界受断裂带控制,往往形成于负地形,充注于盆地中,形成火山岩地层,并与沉积地层互层。岩浆岩具双峰式岩浆活动特征(林强等,2003;张吉衡等,2006;Sun *et al.*,2013;刘阁等,2014),并出现 I 型-A 型花岗岩组合(Wu *et al.*,2002,2003;林强等,2004;李竞妍等,2014)。大兴安岭南部钠闪石流纹岩(王建国等,2013),中部的吉祥峰组、上库力组(徐美君等,2011;孟恩等,2011),松辽盆地营城组(Zhang *et al.*,2011),佳木斯地区松木河组(Sun *et al.*,2013)等,都具有 A 型(铁质,Frost and Frost,2011)花岗岩的地球化学特征,暗示相对贫水的环境,可能与幔源岩浆底侵作用有关。幔源岩浆岩则普遍具有软流圈地幔的贡献(Zhang *et al.*,2010),佳木斯地块 100 Ma 辉绿岩-流纹岩中的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值最高达+16(孙明道,2013)。依据岩浆岩的特征、结合区域盆地演化的历史可以判定,额尔古纳-兴安-松辽-佳木斯地区 145~88 Ma 岩浆活动形成于板内伸展的构造环境。

晚白垩世中后期,区内岩浆活动十分微弱,壳源以及具弧型“arc-like”地球化学特征的岩浆岩消失,仅出现极少量的 OIB 型玄武岩(张辉煌等,2006;Kuang *et al.*,2012;Xu,2014)。尽管这些 OIB 型的玄武岩不能用来判别区域构造是伸展还是挤压,但是沉积盆地演化历史显示(Zhang *et al.*,2015;

Song *et al.*,2015;Wang *et al.*,2016),晚白垩世-88 Ma 之后,区内处于构造挤压的背景。

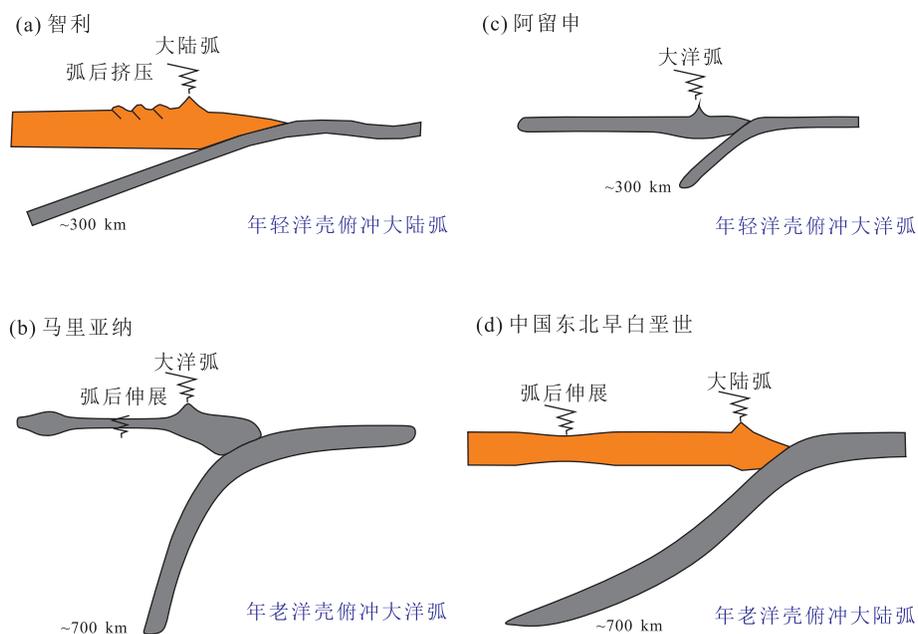
#### 4 完达山-锡霍特-阿林-延边地区白垩纪岩浆活动特征

完达山-锡霍特-阿林-延边地区白垩纪岩浆岩的主体时代为~130~65 Ma(程瑞玉等,2006;Jahn *et al.*,2015;Grebennikov *et al.*,2016;Ren *et al.*,2016)。完达山地区早白垩世高镁安山岩中的捕获锆石定年结果显示,岩浆活动至少在~145 Ma 时就已经开始(孙明道,2016)。时空分布上也具有从西向东由老变新的规律(图 1)。如表 1 所示,区内岩浆活动与额尔古纳-兴安-松辽-佳木斯地区显著不同。火山活动以中心式喷发为主,火山岩多具有盾状、帽状、锥状的分布特征,往往形成于正地形上,不与沉积地层互层;受剥蚀作用影响,形成由外至内从火山岩、次火山岩到侵入岩的环状结构;侵入岩常形成复式岩体,受后期热液活动影响,伴生有铜、金成矿(Ren *et al.*,2016)。岩性上以酸性岩为主,少量中性岩,不具有双峰式岩浆活动特征。特征岩浆岩组合为高镁安山岩、埃达克岩、I 型-S 型花岗岩等(孙明道,2016)。幔源岩浆岩主要来自岩石圈地幔,岩石和矿物组合特征反应了相对富水的环境。火山岩的产状、岩石组合特征等暗示了挤压的构造背景。结合空间位置关系、岩石组合及地球化学特征,认为完达山-锡霍特-阿林-延边地区白

表 1 中国东北及俄罗斯滨海边疆区白垩纪岩浆活动特征及构造环境

Table 1 Cretaceous igneous rocks and tectonic implications of NE China and Russia Primorye

区域	额尔古纳-兴安-松辽-佳木斯	完达山-锡霍特-阿林-延边
位置	大陆板内	大陆边缘
基底岩石	成熟大陆地壳 新元古代-寒武纪岩浆岩-变质岩	不成熟大陆地壳 晚古生代-中生代增生杂岩
时空分布规律	早期(145~88 Ma)从西向东由老变新 岩浆岩带迁移速率约 1.8 cm/y 晚期(88~65 Ma)岩浆活动极少	从西向东由老变新 岩浆岩带迁移速率约 0.5 cm/y
特征岩石组合	早期双峰式岩浆活动为主,玄武岩、I 型、A 型花岗岩类;晚期 OIB 型玄武岩	中酸性岩为主,高镁安山岩、埃达克岩、I 型、S 型花岗岩类
岩浆系列	早期钙碱性为主,少量碱性 晚期碱性-拉斑	钙碱性系列
地球化学特征	早期岩浆弧型,晚期洋岛型(OIB-type)	均为岩浆弧型
幔源岩浆	有软流圈地幔贡献	富集岩石圈地幔
火山岩产状	裂隙式喷发为主	中心式喷发为主
喷发时所处地貌	负地形,与沉积地层互层	正地形,不与沉积地层互层
构造体制	早期伸展,晚期挤压	挤压
构造分类	弧后	大陆弧



参考自 Uyeda and Kanamori, 1979; Defant and Drummond, 1990

图 2 大洋俯冲的基本类型

Fig.2 Fundamental types of oceanic subduction

垩纪岩浆活动形成于大陆弧。

## 5 构造意义

Uyeda 和 Kanamori (1979) 将大洋俯冲作用划分为 2 种基本的类型, 一类为年轻洋壳俯冲形成大陆弧, 以智利为代表, 俯冲角度较小, 弧后大陆挤压 (图 2a); 另一类为年老洋壳俯冲形成岛弧, 以马里亚纳岛弧为代表, 俯冲角度较大, 弧后洋盆伸展 (图 2b)。Defant 和 Drummond (1990) 指出, 年轻洋壳俯冲也可以形成岛弧并发育埃达克岩, 如阿留申岛弧 (图 2c)。

中国东北及邻区早白垩世活动大陆边缘具大陆弧以及弧后伸展, 空间分布特征显示与古太平洋板块俯冲有关。然而, 其早白垩世俯冲作用显然并不属于前面 3 种大洋俯冲类型, 因此可能构成第 4 种基本类型, 即年老洋壳俯冲形成大陆弧 (图 2d)。由年老洋壳俯冲形成的大陆弧在现代地球上基本不存在, 难以用将近论古的思维研究。如图 2 所示, 年轻洋壳的俯冲通常不能将大量水带入被俯冲板块内部的地幔中, 俯冲深度在 300 km 左右, 只形成一个岩浆活动中心; 年老洋壳的俯冲能够将大量的水带入到板内, 俯冲深度近 700 km, 可到达并滞留于地幔转换带 (Kuritani *et al.*, 2011), 形成弧和弧后 2 个岩浆活动中心。

年老洋壳俯冲形成大陆弧在地质历史上显然

并不总是罕见的, 在超大陆的裂解过程中, 这种大洋俯冲类型可能扮演了重要的角色。年轻洋壳俯冲形成的岩浆活动集中在大陆边缘, 而年老洋壳的俯冲及后撤才能够将水带入大陆内部之下的地幔并引起板内伸展断陷; 年轻洋壳缺少足够的时间沉积大量沉积物和发育大量海山, 而年老洋壳的俯冲及增生才能在大陆边缘形成宽广的增生型造山带。这可能解释了为什么超大陆内部的断陷和裂解总是和超大陆周缘的初始俯冲和增生型造山作用共生 (Cawood *et al.*, 2016)。

中国东部及邻区晚白垩世中晚期可以与智利型大陆弧对比, 弧后地区逐渐转变为构造挤压, 松辽盆地由弧后伸展断陷盆地转变为弧后前陆盆地 (Zhang *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016), 暗示了俯冲洋壳由老变新的过程。受俯冲后撤作用以及俯冲洋壳变年轻影响, 俯冲无法为板内提供大量的水, 板内岩浆活动类型也如前所述发生了转变。俯冲洋壳逐渐变年轻的过程与 Seton 等 (2012) 对全球板块构造的复原十分吻合。

在 ~88 Ma 之后, 古太平洋板块俯冲仍然可以引起大陆弧岩浆活动, 但已经不能对板内岩浆活动产生贡献, 这时离其洋中脊俯冲可能还有 ~30 Ma (Seton *et al.*, 2012)。对二叠纪末的古亚洲洋和侏罗纪末的鄂霍茨克洋这些濒临消失、洋中脊距离大陆边缘已经很近的大洋来说, 其俯冲的洋壳极其年

轻,能否还为大陆板内地区的岩浆活动提供贡献,值得进一步研究。

**致谢:**感谢特邀主编许文良教授的邀请及评审,陈汉林、杨树峰、章凤奇三位老师对本文观点早期的形成起到了重要作用。谨以此文深痛悼念江博明先生。

#### 参考文献 (References):

- Cawood P A, Strachan R A, Pisarevsky S A, Gladkochub D P, Murphy J B. 2016. Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: Implications for models of supercontinent cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 449: 118-126
- Cui F H, Zheng C Q, Xu X C, Yao W G, Ding X, Shi L, Li J. 2015. Detrital zircon ages of the Jiageda and Woduhe formations: Constrains on the tectonic attribute of the Xing'an terrane in the central Great Xing'an Range, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 427-442
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, Lin G. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1-2): 115-135
- Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, Zhang S, Feng Z H, Cross T A. 2010. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China. *Basin Research*, 22(1): 79-95
- Feng Z Q, Liu Y J, Liu B Q, Wen Q B, Li W M, Liu Q. 2016. Timing and nature of the Xinlin-Xiguitu Ocean: Constraints from ophiolitic gabbros in the northern Great Xing'an Range, eastern Central Asian Orogenic Belt. *International Journal of Earth Sciences*, 105(2): 491-505
- Frost C D, Frost B R. 2011. On Ferroan(A-type) Granitoids: Their compositional variability and modes of origin. *Journal of Petrology*, 52(1): 39-53
- Ge W C, Chen J S, Yang H, Zhao G C, Zhang Y L, Tian D X. 2015. Tectonic implications of new zircon U-Pb ages for the Xinghuadukou Complex, Erguna Massif, northern Great Xing'an Range, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 106: 169-185
- Grebennikov A V, Khanchuk A I, Gonevchuk V G, Kovalenko S V. 2016. Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia): Geochemistry and tectonic implications. *Lithos*, 261: 250-261
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82-92
- Jahn B M, Valui G, Kruk N, Gonevchuk V, Usuki M, Wu J T. 2015. Emplacement ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characterization of Mesozoic to early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian Far East: Crustal growth and regional tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 872-918
- Ji W Q, Xu W L, Yang D B, Pei F P, Jin K, Liu X M. 2007. Chronology and geochemistry of volcanic rocks in the Cretaceous Suifenhe formation in eastern Heilongjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 266-277
- Kojima S. 1989. Mesozoic terrane accretion in northeast China, Sikhote-Alin and Japan regions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 69: 213-232
- Kotov A B, Velikoslavinskii S D, Sorokin A A, Kotova L N, Sorokin A P, Larin A M, Kovach V P, Zagornaya N Y, Kurguzova A V. 2009. Age of the amur group of the Bureya-Jiamusi Superterrane in the Central Asian fold belt: Sm-Nd isotope evidence. *Doklady Earth Sciences*, 429(8): 1245-1248
- Kuang Y S, Wei X, Hong L B, Ma J L, Pang C J, Zhong Y T, Zhao J X, Xu Y G. 2012. Petrogenetic evaluation of the Laohutai basalts from North China Craton: Melting of a two-component source during lithospheric thinning in the late Cretaceous-early Cenozoic. *Lithos*, 154: 68-82
- Kuritani T, Ohtani E, Kimura J I. 2011. Intensive hydration of the mantle transition zone beneath China caused by ancient slab stagnation. *Nature Geoscience*, 4(10): 713-716
- Li W M, Takasu A, Liu Y J, Guo X Z. 2010. Newly discovered garnet-barroisite schists from the Heilongjiang Complex in the Jiamusi Massif, northeastern China. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 105(2): 86-91
- Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, Steinberger B, Heine C. 2008. Long-term sea-level fluctuations driven by ocean basin dynamics. *Science*, 319(5868): 1357-1362
- Maruyama S. 1994. Plume tectonics. *Geological Society of Japan*, 100(1): 24-49
- Maruyama S, Santosh M, Zhao D. 2007. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the Core-Mantle Boundary. *Gondwana Research*, 11(1-2): 7-37
- Pan S K, Zheng J P, Griffin W L, Chu L L, Xu Y X, Li Y L, Ma Q, Wang D. 2014. Precambrian tectonic attribution and evolution of the Songliao terrane revealed by zircon xenocrysts from Cenozoic alkali basalts, Xilinhot region, NE China. *Precambrian Research*, 251: 33-48
- Ren Y S, Chen C, Zou X T, Zhao H L, Hao Y J, Hou H N, Hu Z C, Jiang G H. 2016. The age, geological setting, and types of gold deposits in the Yanbian and adjacent areas, NE China. *Ore Geology Reviews*, 73: 284-297
- Seton M, Müller R D, Zahirovic S, Gaina C, Torsvik T, Shephard G, Talsma A, Gurnis M, Turner M, Maus S, Chandler M. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. *Earth-Science Review*, 113(3-4): 212-270
- Song Y, Stepashko A A, Ren J Y. 2015. The Cretaceous climax of compression in Eastern Asia: Age 87-89 Ma (late Turonian/Coniacian), Pacific cause, continental consequences. *Cretaceous Research*, 55: 262-284
- Sorokin A A, Ponomarchuk V A, Derbeko I M, Sorokin A P. 2005.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and geochemical characteristics of Mesozoic

- igneous complexes in the Khingan-Olonoi volcanic zone(Far East). *Stratigraphy and Geological Correlation*, 13(3): 276-290
- Sorokin A A, Kotov A B, Sal'nikova E B, Kudryashov N M, Anisimova I V, Yakovleva S Z, Fedoseenko A M. 2010. Granitoids of the Tyrma-Bureya complex in the northern Bureya-Jiamusi superterrane of the Central Asian fold belt: Age and geodynamic setting. *Russian Geology and Geophysics*, 51(5): 563-571
- Sun M D, Chen H L, Zhang F Q, Wilde S A, Dong C W, Yang S F. 2013. A 100 Ma bimodal composite dyke complex in the Jiamusi Block, NE China: An indication for lithospheric extension driven by Pale-Pacific roll-back. *Lithos*, 162-163: 317-330
- Sun M D, Xu Y G, Wilde S A, Chen H L. 2015. Provenance of Cretaceous trench slope sediments from the Mesozoic Wandashan Orogen, NE China: Implications for determining ancient drainage systems and tectonics of the Paleo-Pacific. *Tectonics*, 34(6): 1269-1289
- Tang J, Xu W L, Wang F, Wang W, Xu M J, Zhang Y H. 2013. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Research*, 224: 597-611
- Uyeda S, Kanamori H. 1979. Back-Arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research*, 84(B3): 1049-1061
- Wang F, Zhou X H, Zhang L C, Ying J F, Zhang Y T, Wu F Y, Zhu R X. 2006. Late mesozoic volcanism in the Great Xing'an range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1-2): 179-198
- Wang P J, Chen F K, Chen S M, Siebel W, Satir M. 2006. Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the Songliao basin, NE China. *Geochemical Journal*, 40(2): 149-159
- Wang P J, Mattern F, Didenko N A, Zhu D F, Singer B, Sun X M. 2016. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin. *Earth-Science Review*, 159: 82-102
- Wilde S A, Dorsett-Bain H L, Lennon R G. 1999. Geological setting and controls on the development of graphite, sillimanite and phosphate mineralization within the Jiamusi Massif: An exotic fragment of Gondwanaland located in north-eastern China? *Gondwana Research*, 2(1): 21-46
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1-2): 143-173
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3-4): 191-204
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in north-eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1-30
- Wu G N, Sun F Y, Zhao C S, Li Z T, Zhao A L, Pang Q B, Li G Y. 2005. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granites in northern margin of the Erguna massif and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 50(23): 2733-2743
- Xu B, Zhao P, Wang Y Y, Liao W, Luo Z W, Bao Q Z, Zhou Y H. 2015. The pre-Devonian tectonic framework of Xing'an-Mongolia orogenic belt(XMOB) in north China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 183-196
- Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B, Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167-193
- Xu Y G. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90-40 Ma basalts in North and Northeast China: Evidence, provenance and significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 49-67
- Ying J F, Zhou X H, Zhang L C, Wang F. 2010a. Geochronological framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, NE China, and their geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6): 786-793
- Ying J F, Zhou X H, Zhang L C, Wang F, Zhang Y T. 2010b. Geochronological and geochemical investigation of the late Mesozoic volcanic rocks from the Northern Great Xing'an Range and their tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 99(2): 357-378
- Yu Y, Xu W L, Pei F P, Yang D B, Zhao Q G. 2009. Chronology and geochemistry of mesozoic volcanic rocks in the Linjiang area, Jilin province and their tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 245-257
- Zhang F Q, Chen H L, Yu X, Dong C W, Yang S F, Pang Y M, Batt G E. 2011. Early Cretaceous volcanism in the northern Songliao Basin, NE China, and its geodynamic implication. *Gondwana Research*, 19(1): 163-176
- Zhang F Q, Chen H L, Batt G E, Dilek Y, A M N, Sun M D, Yang S F, Meng Q A, Zhao X Q. 2015. Detrital zircon U-Pb geochronology and stratigraphy of the Cretaceous Sanjiang Basin in NE China: Provenance record of an abrupt tectonic switch in the mode and nature of the NE Asian continental margin evolution. *Tectonophysics*, 665: 58-78
- Zhang J H, Gao S, Ge W C, Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination. *Chemical Geology*, 276(3-4): 144-165
- Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, Wilde S A, Yang J H, Liu X M. 2008. Large-scale early cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, northeastern China. *Lithos*, 102(1-2): 138-157
- Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, Zhao G C, Zheng C Q, Wang Y J, Zhang X H. 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt. *Tectonophysics*, 478(3-4): 230-246
- Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, Zhao G C, Liu F L, Qiao D W, Ren S M, Liu J H. 2011. A>1300 km late Pan-African metamorphic belt in NE China: New evidence from the Xing'an block and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 509(3-4): 280-292
- Zhou J B, Cao J L, Wilde S A, Zhao G C, Zhang J J, Wang B. 2014. Paleo-Pacific subduction-accretion: Evidence from Geochemical and U-Pb zircon dating of the Nandanhadha accretionary complex, NE China. *Tectonics*, 33(12): 2444-2466

- 程瑞玉, 吴福元, 葛文春, 孙德有, 柳小明, 杨进辉. 2006. 黑龙江省东部饶河杂岩的就位时代与东北东部中生代构造演化. 岩石学报, 22(2): 353-376
- 李竞妍, 郭锋, 李超文, 李红霞, 赵亮. 2014. 东北地区晚古生代-中生代 I 型和 A 型花岗岩 Nd 同位素变化趋势及其构造意义. 岩石学报, 30(7): 1995-2008
- 林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 闵庚德, 陈明植, 李文远, 权致纯, 尹成孝. 1998. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义. 地质科学, 33(2): 129-138
- 林强, 葛文春, 曹林, 孙德有, 林经国. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征. 地球化学, 32(3): 208-222
- 林强, 葛文春, 吴福元, 孙德有, 曹林. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学. 岩石学报, 20(3): 403-412
- 刘阔, 吕新彪, 陈超, 杨永胜, 王庆军, 孙耀锋. 2014. 大兴安岭嫩江地区中生代双峰式火山岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 33(3): 458-470
- 吕长禄, 冯俊岭, 郑卫政, 任凤和, 王强茂. 2014. 佳木斯地块角闪黑云花岗岩片麻岩的锆石定年及其地质学意义: 新元古代结晶基底的证据. 中国矿业, 23(S2): 127-132
- 孟恩, 许文良, 杨德彬, 邱昆峰, 李长华, 祝洪涛. 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 岩石学报, 27(4): 1209-1226
- 潘荣. 2010. 黑龙江省伊春市乌伊岭地区美丰组火山岩地球化学特征及成因分析. 西安: 长安大学
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 纪伟强, 于洋, 张兴洲. 2008. 松辽盆地南部中生代火山岩: 锆石 U-Pb 年代学及其对基底性质的制约. 地球科学(中国地质大学学报), 33(5): 603-617
- 邵济安, 唐克东, 王成源, 臧启家, 张允平. 1991. 那丹哈达地体的构造特征及演化. 中国科学 B 辑, (7): 744-751
- 孙德有, 苟军, 任云生, 付长亮, 王晰, 柳小明. 2011. 满洲里南部玛尼吐组火山岩锆石 U-Pb 年龄与地球化学研究. 岩石学报, 27(10): 3083-3094
- 孙明道. 2013. 中国东北佳木斯地块及邻区晚中生代岩浆作用和构造意义. 杭州: 浙江大学
- 孙明道. 2016. 完达山造山带地质演化. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- 王成文, 孙跃武, 李宁, 赵国伟, 马小琴. 2009. 中国东北及邻区晚古生代地层分布规律的大地构造意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(10): 1429-1437
- 王建国, 和钟铎, 许文良. 2013. 大兴安岭南端钠闪石流纹岩的岩石成因: 年代学和地球化学证据. 岩石学报, 29(3): 853-863
- 王璞珺, 高有峰, 任延广, 刘万洙, 张建光. 2009. 松辽盆地青山口组橄榄粗安岩:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄、地球化学及其成盆、成烃和成藏意义. 岩石学报, 25(5): 1178-1190
- 颜炳强, 张福勤, 苗来成, 陈福坤, 刘敦一. 2008. 东北牡丹江地区“黑龙江群”中斜长角闪岩与花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质学意义. 岩石学报, 24(6): 1237-1250
- 徐美君, 许文良, 孟恩, 王枫. 2011. 内蒙古东北部额尔古纳地区上护林-向阳盆地中生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征. 地质通报, 30(9): 1321-1338
- 徐岩, 陈汉林, 章凤奇, 董传万, 余星, 肖骏, 庞彦明, 舒萍, 丁日新. 2010. 东北地区中生代岩石圈减薄时间上限的厘定: 来自松辽盆地营城组火山岩年代学约束. 地质科学, 45(1): 194-206
- 杨浩, 葛文春, 赵国春, 毕君辉, 王智慧, 董玉. 2015. 佳木斯-兴凯地块新元古代花岗岩片麻岩及泛非期 S 型花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 中国矿物岩石地球化学学会第 15 届学术年会论文集. 长春: 中国矿物岩石地球化学学会
- 于介江, 张彦龙, 葛文春, 杨浩. 2013. 三江盆地北缘晚白垩世花岗岩质岩石的年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29(2): 369-385
- 余星, 肖骏, 陈汉林, 章凤奇, 徐岩, 董传万, 庞彦明. 2008. 松辽盆地基底显生宙岩浆热事件: 来自营城组火山岩捕获锆石的 SHRIMP 定年证据. 岩石学报, 28(5): 1123-1130
- 章凤奇, 程晓敢, 陈汉林, 董传万, 余星, 肖骏, 徐岩, 庞彦明, 舒萍. 2009. 松辽盆地东南缘晚中生代火山事件的锆石年代学与地球化学制约. 岩石学报, 25(1): 39-54
- 张辉煌, 徐义刚, 葛文春, 马金龙. 2006. 吉林伊通-大屯地区晚中生代-新生代玄武岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报, 22(6): 1579-1596
- 张吉衡, 葛文春, 吴福元, 柳小明. 2006. 大兴安岭扎兰屯地区中生代双峰式火山岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及其地质意义. 地质学报, 80(2): 311
- 张磊, 韩宝福, 朱永峰, 徐钊, 陈家富, 宋彪. 2009. 黑龙江省东部双鸭山二长辉长岩的年代学、矿物学、结晶过程及其地质意义. 岩石学报, 25(3): 577-587
- 张明鹏. 2010. 乌伊岭地区美丰组火山岩地层学及构造背景分析. 西安: 长安大学
- 张旗. 2013. 中国东部中生代大规模岩浆活动与长英质大火成岩省问题. 岩石矿物学杂志, 32(4): 557-564
- 朱占平, 刘立, 马瑞, 邱增凯, 马胜晖. 2009. 黑龙江省鸡西盆地基性岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素定年及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 39(2): 238-243

(本文责任编辑: 龚起颖; 英文审校: 高剑峰)