

定量估算造山带地壳厚度的岩石 地球化学方法:综述与实例

官文慧,汪 洋

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083)

摘 要:应用岩石地球化学数据定量、半定量估算岩浆弧地壳厚度的方法包括:钙碱性岩套 K_2O 含量、 $w(Sr)/w(Y)$ 值、 $w(La)_N/w(Yb)_N$ 值,玄武质岩石 Na_2O 含量、 CaO 含量、 $w(Ce)/w(Y)$ 值等。目前提出的定量公式对厚度在 20~45 km 范围内的俯冲造山带地壳厚度反演结果可靠性较高。中酸性岩 $w(Dy)/w(Yb)$ 值可以指示造山带是否存在加厚的地壳。应用岩石地球化学数据定量、半定量反演造山带地壳厚度的公式要求:明确其适用条件与应用范围;有足够数量的样本;进行数据筛选并且剔除离群值。藏南冈底斯弧的实例研究表明, $w(La)_N/w(Yb)_N$ 值能够估算碰撞造山带古地壳厚度,印度板块与亚洲大陆碰撞引起的地壳显著增厚导致冈底斯地体中酸性岩浆岩 $w(Sr)/w(Y)$ 值、 $w(La)_N/w(Yb)_N$ 值在 40 Ma 以来明显跃升。三江地区三叠纪义敦岛弧地壳厚度为 60 km;福建长乐—南澳构造带早白垩世时期岩浆弧的地壳厚度为 42 km;辽西地区中侏罗世—早白垩世时期火山岩地壳厚度为 50~65 km。

关键词:地壳厚度;地球化学;岩浆弧;造山带;冈底斯弧;义敦岛弧;福建;辽宁

中图分类号:P595

文献标志码:A

Petrogeochemical Methods for Quantitative Estimation of the Crustal Thickness of Orogenic Belt: Overview and Case Studies

GUAN Wen-hui, WANG Yang

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The petrogeochemical data, which include K_2O content, $w(Sr)/w(Y)$ and $w(La)_N/w(Yb)_N$ of calc-alkaline suite, and Na_2O and CaO contents and $w(Ce)/w(Y)$ of basaltic rocks, can be used to quantitatively or semi-quantitatively estimate the crustal thickness of magmatic arc. The quantitative formulas are reliable to calculate the crustal thickness (20-45 km) of subduction orogenic belt. $w(Dy)/w(Yb)$ of intermediate-acidic rocks can constrain the thick crust with more than 50 km. The proper application for quantitatively or semi-quantitatively estimating the crustal thickness of orogenic belt requires that obeying the conditions and scopes of the method, gathering a dataset for analysis as large as possible, and doing data screen and outlier elimination. For the case of Gangdese in the southern Tibet, it concludes that $w(La)_N/w(Yb)_N$ can be used to estimate the thickness of crustal thickness in the post-collisional environment. The remarkable jump of $w(Sr)/w(Y)$ and $w(La)_N/w(Yb)_N$ of intermediate magmatic rocks in Gangdese terrane since 40 Ma is due to the crust thickening caused by the collision between India plate and Asia continent. The crustal thickness of Triassic Yidun island arc in Sanjiang

收稿日期:2016-12-15

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(D1606-1);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2652013021)

作者简介:官文慧(1993-),男,江西赣州人,工学硕士研究生,E-mail:whguan@cugb.edu.cn。

通讯作者:汪 洋(1969-),男,浙江杭州人,教授,理学博士,E-mail:allen_thalassa@sina.com。

area is 60 km; that of Early Cretaceous magmatic arc in Changle-Nan'ao tectonic zone of Fujian is 42 km; that of Middle Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks in the western Liaoning is 50-65 km.

Key words: crustal thickness; geochemistry; magmatic arc; orogenic belt; Gangdese arc; Yidun island arc; Fujian; Liaoning

0 引言

定量或半定量地确定造山带地壳厚度具有重要的理论意义,地壳厚度变化是造山过程中构造运动的直观表现。基于 Airy 均衡理论,地壳厚度变化必然导致地表高程的变化,而地表高程的起伏会影响大陆的古气候(行星风系、温度)、古环境,进而对生物的演化产生影响^[1-2]。Chiaradia 研究认为,斑岩铜矿的规模与岛弧地壳厚度存在正相关关系^[3];因此,恢复造山带(古)地壳厚度具有指导矿产勘探选区的重要意义。然而,由于造山事件之后的内、外地质作用(如裂隙伸展、剥蚀等)对造山带的改造,加之地质证据的匮乏,估算古造山带在造山运动发生时期的地壳厚度是比较困难的。岩石学和地球化学研究发现,造山时期岩浆的地球化学成分特征能够反映古地壳的厚度状态^[4-12]。

岩浆在结晶分离或部分熔融过程中,不同元素的地球化学行为不同。不同条件下,元素会选择性地进入固体相或者熔体相中。某些矿物相(如石榴石、角闪石、斜长石)的稳定性受压力的影响较大^[4],相容或不相容于这些矿物相的元素含量(质量分数,下同)可以指示岩浆源区的压力,从而反映岩浆的起源深度。可以利用这些元素含量或其比值估算造山带岩浆作用发育时期的地壳厚度^[4-12]。

虽然应用岩石地球化学数据估算造山带古地壳厚度的实践已有近 50 年历史(以 K_{60} 方法的提出为标志),但是目前中国对这种方法的认识存在一些误解,在实际工作中还存在误用的情况。本文系统总结了应用岩石地球化学数据估算造山带古地壳厚度的方法,指出其适用范围,同时采用最新的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值和 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值统计公式恢复了中国若干造山带的古地壳厚度,以期对造山带古地壳厚度定量研究提供参考。其中, $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量, $w(\cdot)_{\text{N}}$ 为元素含量球粒陨石标准化后的值。

1 利用主量元素估算地壳厚度

1.1 弧岩岩浆岩 K_2O 含量

弧岩岩浆岩的化学极性是指在垂直于相同年龄的弧-沟(Arc-trench)体系走向的方向上,弧岩岩浆岩在

相同 SiO_2 含量条件下,其 K_2O 、大离子亲石元素(LILE)含量等随着距离海沟的远近而显示出系统的变化特征^[13-14]。这种组成极性是俯冲带深度增加的函数^[15],也是地壳厚度的函数^[5,16]。例如,弧岩岩浆岩在给定 SiO_2 含量条件下,其 K_2O 含量随弧地壳厚度的增加而升高,岩性由拉斑玄武岩亚系列逐渐变化为(狭义的)钙碱性亚系列和钾玄岩亚系列^[13]。Condie 等对全球 26 个岩浆弧的统计显示,采用 SiO_2 标准化的火山岩 K_2O 含量(即 SiO_2 含量固定时的 K_2O 含量)与地壳厚度之间存在正相关关系,并且采用分组的数据处理方法给出了弧岩岩浆岩的 K_{60} 值、 K_{55} 值(K_{60} 、 K_{55} 代表 SiO_2 含量分别为 60%、55% 时 K_2O 含量的 100 倍)与地壳厚度(H)的线性关系^[5]。Condie 给出的 K_{60} 值与地壳厚度的关系式为^[6,14]

$$H = 18.2K_{60} + 0.45 \quad (1)$$

式中: K_{60} 为 K_{60} 值。

万天丰认为,Condie 的 K_{60} 值估算地壳厚度的式(1)对于估算太古宙和古元古代原始大陆地壳厚度是比较合适的^[17]。但对于古元古代以后形成的陆壳,由于其多半与古老陆壳物质再循环有关,岩浆岩 K 含量与地壳厚度的关系不清楚,所以不能用 K_{60} 值来估算地壳厚度。

汪洋对 K_{60} 值与地壳厚度关系的分析表明,Condie 的 K_{60} 值估算地壳厚度的式(1)只适用于岛弧(Island Arc)岩浆岩(K_{60} 值不高于 2.5),同时不能应用于地壳厚度超过 42 km 的情况^[18]。这是因为 Condie 构建的 K_{60} 值估算地壳厚度的关系式所依据的数据全部来自地壳厚度不大于 42 km 的岛弧,而且这些岛弧岩浆岩的 K_{60} 值不高于 2.5^[5];若 K_{60} 值高于 2.5, K_{60} 值与地壳厚度的线性关系明显偏离 Condie 给出的关系式^[18]。对前人应用 K_{60} 值估算中国大陆造山带古地壳的检验表明, K_{60} 值估算地壳厚度的关系式不适用于碰撞造山带^[18]。汪洋进一步给出 K_{60} 值与地壳厚度的对数关系式^[18]

$$H = 11.26 \ln K_{60} + 24.5 \quad (2)$$

式(2)的适用条件为: K_{60} 值介于 0.6~2.5 之间,地壳厚度为 15~42 km。由于岛弧被认为是形成新生陆壳的场所^[19],所以应用 K_{60} 值可以估算太古宙和古元古代原始大陆地壳厚度。

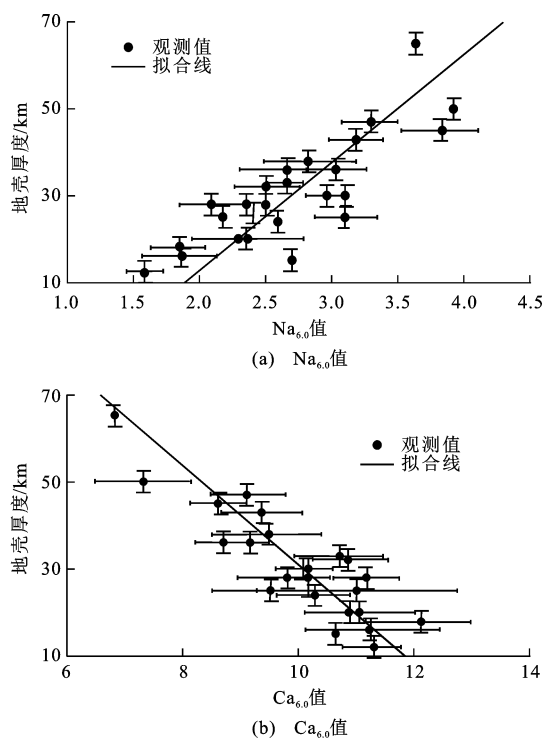
在 Leeman 研究工作^[16]的基础上,通过汇集 123 个西半球钙碱性岩套及少量东半球钙碱性岩套(共计超过 6 000 个钙碱性中性岩)分析数据, Best 等提出:①钙碱性岩套的 $K_{57.5}$ 值(SiO_2 含量为 57.5%时 K_2O 含量的 100 倍)与岩浆弧地壳厚度存在正相关关系,其统计数据集的地壳厚度范围为 30~70 km, $K_{57.5}$ 值为 0.5~3.0;②安山岩(SiO_2 含量为 57%~63%)的 $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 值与岩浆弧地壳厚度存在正相关关系,当地壳厚度超过 52 km 时, $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 值不再具有增加的趋势;③钙碱性岩套(SiO_2 含量低于 63%)的最小初始 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$ 值与岩浆弧地壳厚度存在正相关关系,其值从 0.703~0.704(岩浆弧地壳厚度为 30 km)变化到 0.705~0.706(岩浆弧地壳厚度为 70 km);④钙碱性岩套(SiO_2 含量为 45%~75%)的平均初始 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$ 值与岩浆弧地壳厚度存在正相关关系,其值从 0.704~0.705(岩浆弧地壳厚度为 30 km)变化到 0.706~0.708(岩浆弧地壳厚度为 70 km);⑤钙碱性岩套(SiO_2 含量为 45%~75%)的 Ba、Rb 含量与岩浆弧地壳厚度存在弱的正相关关系,但存在一些明显的例外^[8]。这些组合的线性判定系数(R^2)为 0.40~0.50^[8]。通过对比美国西南部 Great Basin 新生代钙碱性岩套的 $K_{57.5}$ 值、 $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 值、最小初始 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$ 值、平均初始 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$ 值、Ba 含量和 Rb 含量, Best 等将 Great Basin 地区在 17~42 Ma 时期的地壳厚度半定量地约束在 60~70 km 的数量级^[8]。其中, $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值, $N(\cdot)$ 为该元素的原子丰度。

综上所述,钙碱性岩套的 K_2O 含量可以用来定量、半定量地约束造山带的地壳厚度,但需要满足其适用条件以及具有大的数据样本。

1.2 弧玄武岩 $Na_{6.0}$ 值和 $Ca_{6.0}$ 值

根据全球 25 个岩浆弧的 100 座活火山玄武岩分析数据, Plank 等发现弧玄武岩的主量元素含量变化与岩浆弧地壳厚度之间存在相关关系^[7]。其中,弧玄武岩的 $Na_{6.0}$ 、 $Ca_{6.0}$ 值与岩浆弧地壳厚度的相关性最强, $Na_{6.0}$ 值与岩浆弧地壳厚度呈正相关关系,而 $Ca_{6.0}$ 值与岩浆弧地壳厚度则呈负相关关系(图 1)。其中, $Na_{6.0}$ 表示弧玄武岩 MgO 含量为 6%时的 Na_2O 含量, $Ca_{6.0}$ 表示弧玄武岩 MgO 含量为 6%时的 CaO 含量。

在排除了高压条件下分离结晶作用和同化混染-结晶分离(AFC)过程对 $Na_{6.0}$ 、 $Ca_{6.0}$ 值与岩浆弧地壳



图中数据引自文献^[7]

图 1 弧玄武岩 $Na_{6.0}$ 、 $Ca_{6.0}$ 值与岩浆弧地壳厚度的关系

Fig. 1 Relationships Between $Na_{6.0}$ and $Ca_{6.0}$ of Arc Basalt and the Crustal Thickness of Magmatic Arc

厚度相关关系的影响之后, Plank 等指出 $Na_{6.0}$ 、 $Ca_{6.0}$ 值与岩浆弧地壳厚度之间的相关关系是由于岩浆弧地壳厚度控制了地幔熔融过程的上边界^[7]。

本文根据 Plank 等的的数据^[7]对弧玄武岩 $Na_{6.0}$ 、 $Ca_{6.0}$ 值与岩浆弧地壳厚度的关系进行线性回归。其关系式分别为

$$H = 25.71N_{6.0} - 39.23 \quad R^2 = 0.6733 \quad (3)$$

$$H = 141.11 - 0.96C_{6.0} \quad R^2 = 0.7778 \quad (4)$$

式中: $N_{6.0}$ 为 $Na_{6.0}$ 值; $C_{6.0}$ 为 $Ca_{6.0}$ 值。

根据 Plank 等的的数据筛选方法^[7], 应用弧玄武岩估算岩浆弧地壳厚度时, 要求弧玄武岩的 MgO 含量为 3%~10%(无挥发分归一为 100%时), 符合该范围的样品数须大于 3 个, 并且其中至少包含一个 MgO 含量大于 5.5%的样品。

2 利用微量元素估算地壳厚度

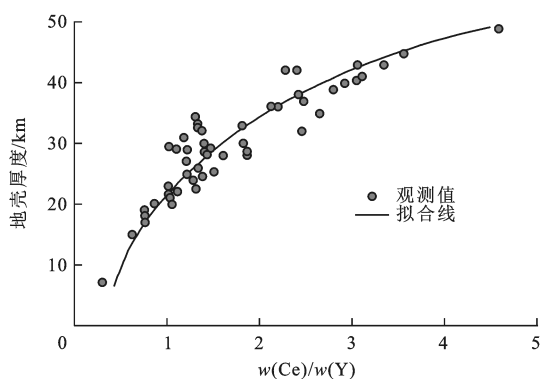
2.1 弧玄武岩 $w(Ce)/w(Y)$ 值

Mantle 等根据全球绝大多数火山弧的 50 个活动火山 1 100 余个玄武岩地球化学数据, 发现弧玄武岩的轻、重稀土元素分馏程度与火山弧地壳厚度(莫霍面深度)具有正相关关系^[9]。采用 $w(Ce)/w(Y)$ 值代表轻、重稀土元素分馏程度, 弧玄武岩

$w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值与地壳厚度的关系式为

$$H = 18.0505 \ln(3.3014 w(\text{Ce})/w(\text{Y})) \quad (5)$$

式(5)中弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值取数据集的最大值(图2)。应用式(5)的前提是:玄武岩为俯冲作用的产物; SiO_2 含量为 44%~53%; MgO 含量高于 4%;烧失量低于 4%;排除硅不饱和及富 K 的玄武质岩石;统计 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值的样品数量至少为 10 个^[9]。弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值的高低与其分离结晶过程中石榴石结晶相是否存在及其含量有关,而石榴石的稳定域受制于压力。由于玄武质岩浆的密度较大,往往底侵(Underplating)于火山弧地壳的底部,弧地壳厚度制约了这些玄武质岩浆的分离结晶相中的石榴石,所以弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值可以指示弧地壳厚度。



图中数据引自文献^[9]

图2 弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值与地壳厚度的关系

Fig. 2 Relationship Between the Crustal Thickness and $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ of Arc Basalts

根据上述弧玄武岩反演弧地壳厚度的统计公式, Mantle 等指出新西兰造山带至少经历了 3 次地壳增厚阶段^[9]: 晚泥盆世(360~370 Ma)时期, 弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值最大达到 2, 指示了地壳增厚过程, 地壳厚度达到约 32 km; 晚泥盆世—中二叠世(260~270 Ma)时期, 弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值下降至 1 以下, 反映新西兰造山带地壳厚度减薄至 20 km; 中二叠世—晚侏罗世(144~260 Ma)时期, 弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值上升至 2, 新西兰造山带发生第 2 次地壳增厚, 地壳厚度达到 33 km; 之后弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值持续增加, 在 120 Ma 时达到峰值(3.7), 此时新西兰造山带经历第 3 次地壳增厚, 地壳厚度达到约 50 km; 至 100 Ma 时, 弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值降至 2.5, 地壳厚度减薄至 36 km。

2.2 弧岩浆岩 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值

Mamani 等应用弧岩浆岩稀土元素含量比值刻画的重稀土元素亏损程度作为反映造山带地壳厚度

的指标^[10,20-22]。其原理是岩浆岩 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值的变化与岩浆源区残留相的角闪石和石榴石含量密切相关: 低 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值(即 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 值低于 4, $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值低于 2) 指示残留相中存在相当数量的角闪石; 高 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值(即 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 值高于 4, $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值高于 2) 则指示残留相中存在相当数量的石榴石^[10]; 而角闪石和石榴石在残留相组合中的稳定性受压力的制约, 因此, 造山带岩浆岩 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值的变化可以反映地壳厚度的变化。Mamani 等认为: 一个时间段内发育的岩浆岩 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 最大值反映了岩浆的起源深度^[10]; 在一组样品中有一个样品具有高 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 值或 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值, 足以表明存在加厚的地壳(石榴石为稳定残留相), 而同组其他样品较低的 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 值或 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值并不构成否定加厚地壳存在的证据。

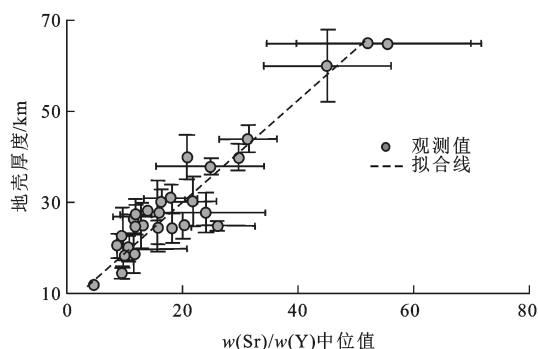
Mamani 等应用中安第斯火山岩带(Central Volcanic Zone)与俯冲作用相关的火山岩微量元素含量比值追踪该地区地壳厚度随时间的变化^[10]。通过绘制 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值随成岩年龄变化图, Mamani 等指出^[10]: 90~100 Ma 时期中安第斯火山岩带地壳厚度较薄; 30~90 Ma 时期岩浆岩 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值缓慢增加, 表明该地区地壳厚度逐步增厚, 反映了弧地壳的成熟; 10~30 Ma 时期岩浆岩 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值显著增高, 是中安第斯火山岩带地壳显著增厚的第 1 阶段; 而 1~10 Ma 时期岩浆岩 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值增高幅度缓于上一阶段, 是中安第斯火山岩带地壳显著增厚的第 2 阶段。

根据上述实例, 弧岩浆岩的 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值适合于约束经历了显著增厚过程的造山带古地壳厚度(最大古地壳厚度大于 50 km, 对应压力大于 1.5 GPa)。

2.3 弧岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值

基性岩部分熔融或分异过程中, 压力较低(低于 1.0 GPa)时, 斜长石是稳定相, Sr 是相容元素, 当压力增高(高于 1.2 GPa)时, 斜长石变得不稳定, Sr 优先进入熔体相, 变为不相容元素; 与之相反, 低压条件下, 不相容元素 Y、Yb 由于高压下石榴石和角闪石的存在而变为相容元素^[20,23]。弧岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值受制于其源区残留相或分离结晶相中斜长石、石榴石和角闪石的比例, 分离

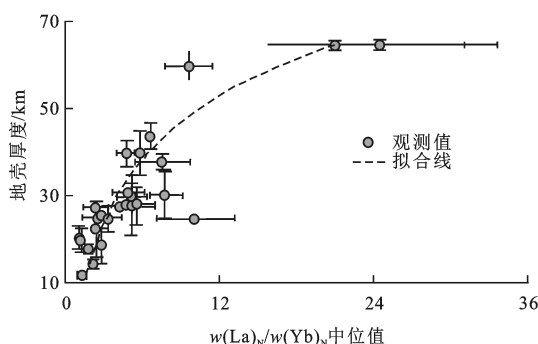
结晶相中斜长石、石榴石和角闪石的稳定域则受到压力的制约,故而弧岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值可以指示岩浆弧地壳厚度^[4]。Chiaradia 指出弧岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值与弧地壳厚度之间存在正相关关系^[4]。Chapman 等根据全球岩浆弧地壳厚度和中性岩岩石地球化学分析数据,分别回归得到 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值与弧地壳厚度的相关关系(图 3、4),为利用 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值定量估算与俯冲作用相关的造山带古地壳厚度提供了基础^[11-12]。



图中数据引自文献^[11]

图 3 弧岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 中位值与地壳厚度的关系

Fig. 3 Relationship Between the Crustal Thickness and the Median $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ of Arc Magmatic Rocks



图中数据引自文献^[12]

图 4 弧岩浆岩 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 中位值与地壳厚度的关系

Fig. 4 Relationship Between the Crustal Thickness and the Median $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ of Arc Magmatic Rocks

Chapman 等归纳的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值与地壳厚度的回归关系式为^[11]

$$H = 1.11w(\text{Sr})/w(\text{Y}) + 8.05 \quad (6)$$

应用式(6)的要求是:弧岩浆岩 SiO_2 含量为 55%~70%, MgO 含量为 1%~6%, $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 值为 0.05~0.20;数据集要排除由蚀变洋壳部分熔融形成的埃达克岩,还要采用改进的 Thompson-tau 统计检验方法剔除 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 的离群值(Outlier);计算中采用的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值为数据集的中位值(Median)。

Profeta 等归纳的 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值与地壳厚度的回归关系式为^[12]

$$H = 21.277 \ln(1.0204w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N) \quad (7)$$

应用式(7)的要求是:弧岩浆岩 SiO_2 含量为 55%~68%, MgO 含量小于 4%, $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 值为 0.05~0.20;数据集要排除由蚀变洋壳部分熔融形成的埃达克岩,还要采用改进的 Thompson-tau 统计检验方法剔除 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 的离群值; $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值采用 McDonough 等提出的球粒陨石标准化稀土元素数据^[24];计算中采用的 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值为数据集的中位值。

Chapman 等应用 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值研究了美国科迪勒拉西南部盆岭省的地壳厚度变化,得到了与构造地质学、古海拔高程研究相符的结果^[11]。Profeta 等应用 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值约束了新生代中安第斯火山带、不列颠哥伦比亚西海岸岩基(Coastal Batholith)、内华达岩基和 Mojave-Transverse Range 地区中生代岩浆弧的地壳厚度变化,得到了与构造地质学研究相符的结果^[12]。同时,这些实例中 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值反演的地壳厚度变化趋势相同。据此,Profeta 等认为,式(6)、(7)可以用于定量估算长寿命(Long Term)岩浆弧古地壳厚度,但能否用于估算短寿命岩浆弧(如地中海地区岩浆弧)和碰撞造山带的古地壳厚度,尚待进一步验证^[12]。

3 实例检验

3.1 三江地区三叠纪义敦岛弧

三江构造-成矿带义敦地区是三叠纪时期发育的古岛弧^[25-28]。根据 Wang 等得出的数据^[27],剔除 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值大于 60 的数据^[12],对剩余数据采用改进的 Thompson-tau 统计检验方法剔除 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 的离群值后,义敦地区三叠纪卡尼期—诺利期(215~230 Ma)中酸性侵入岩(SiO_2 含量为 55%~70%)的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 中位值为 48.40,估算地壳厚度为 62 km, $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 中位值为 15.67,估算地壳厚度为 59 km。采用两种方法得到的古地壳厚度在误差范围内完全一致,表明估算结果是可信的。筛选后,适合于估算地壳厚度的数据集 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 最大值分别为 3.80 和 2.29, $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值大于 2,指示岩浆源区残留相中存在石榴石^[10],这同样表明义敦岛弧三叠纪时期存在加厚地壳(厚度大于 50 km,对应压力大于 1.5 GPa)。

3.2 东南沿海侏罗纪—白垩纪岩浆弧

福建长乐—南澳构造带在早侏罗世—白垩纪发育俯冲环境下的钙碱性岩浆活动,是晚中生代时期中国东南沿海岩浆弧的组成部分^[29-31]。根据 Xu 等的分析数据^[32-34],采用改进的 Thompson-tau 统计检验方法剔除 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 的离群值,结果显示长乐—南澳构造带早白垩世时期(115~131 Ma)中酸性侵入岩的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 中位值为 19.3,估算地壳厚度为 29 km, $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 中位值为 7.0,估算地壳厚度为 42 km。筛选后,适合于估算地壳厚度的数据集 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 最大值分别为 2.05 和 1.63, $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值小于 2,指示岩浆源区的残留相中缺少石榴石^[10],这也表明长乐—南澳构造带早白垩世时期的地壳厚度小于 50 km。

角闪石全铝压力计指示长乐—南澳构造带早白垩世钙碱性中酸性侵入岩的结晶压力为 0.35~0.70 GPa^[29,33-34],对应于原始侵位深度(10~25 km)。同时,长乐—南澳构造带早白垩世发育含岩浆成因绿帘石的花岗闪长岩^[34],岩浆成因绿帘石的结晶压力不低于 0.8 GPa^[35],指示含绿帘石花岗闪长岩的起源深度大于 28 km。福建沿海地区现今地壳厚度约为 30 km^[36],据此可以估算长乐—南澳构造带早白垩世时期的古地壳厚度为 40~50 km。这与 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值估算的古地壳厚度(42 km)结果一致。采用 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值估算的古地壳厚度偏低,这是由于长乐—南澳构造带早白垩世侵入岩经历了区域变质作用的改造^[34],活泼元素 Sr 在变质作用过程中流失,导致 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值降低。

3.3 藏南中生代—新生代冈底斯弧

藏南冈底斯岩基带在中生代岛弧岩浆作用基础上发育而成,印度板块与亚洲大陆发生碰撞之后又叠加了与碰撞造山过程有关的中酸性岩浆活动^[30,37-40]。冈底斯岩基保留了从弧岩浆活动到后碰撞(Post-collisional)岩浆活动的连续记录。在全面收集 Chuang 等的分析数据^[41-56]基础上,对弧岩浆作用发育时期(60 Ma 之前)的样品剔除 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值大于 60 的数据^[12],对剩余数据采用改进的 Thompson-tau 统计检验方法剔除 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 的离群值,得到冈底斯弧晚中生代—新生代时期地壳厚度变化(图 5)。

从图 5 可以看出:冈底斯弧中侏罗世—早白垩世时期(135~180 Ma)地壳厚度由 30 km 增加到约 60 km;晚白垩世—始新世早期(45~90 Ma)地壳厚

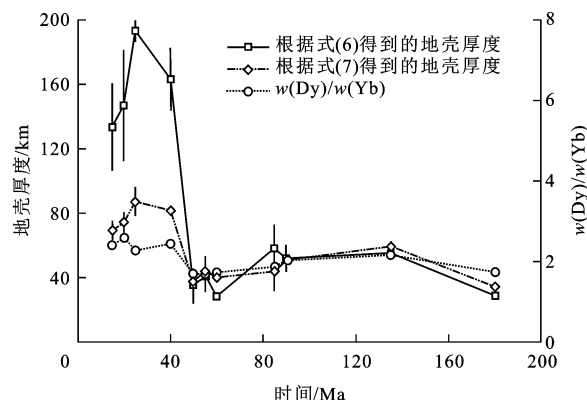


图 5 藏南冈底斯弧地壳厚度随时间的变化

Fig. 5 Change of Crustal Thickness of Gangdese Arc in the Southern Tibet with Time

度介于 40~60 km,采用 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值得到的地壳厚度基本一致;在 45~180 Ma 时期,冈底斯弧中酸性岩浆岩 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值不高于 2,表明残留相中制约重稀土元素分馏的矿物以角闪石为主;始新世中期(40 Ma),冈底斯地体所处大地构造环境变为碰撞造山带^[38];自 40 Ma 以来,冈底斯弧中酸性岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值显著增高,采用 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 中位值估算的地壳厚度为 70~85 km,对应的 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值大于 2,表明残留相中制约重稀土元素分馏的矿物以石榴石为主,指示冈底斯弧地壳明显加厚。采用式(6),根据 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值求得的 40 Ma 以来冈底斯弧地壳厚度大于 120 km,显然不代表真实的地壳厚度。但是, $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值的协同变化表明:这些地球化学指标能够很好地指示冈底斯地体从岛弧转变为活动大陆边缘岩浆弧,再到碰撞造山带过程的古地壳厚度变化趋势;印度板块与亚洲大陆碰撞导致的地壳挤压变形与增厚可以很好地解释冈底斯弧中酸性岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值在 40 Ma 之后的显著增高。

冈底斯地体的实例表明,可以应用式(6)、(7)估算特提斯域岩浆弧的古地壳厚度, $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值可以用来估算碰撞造山带的古地壳厚度。虽然式(6)无法给出冈底斯地体在碰撞造山阶段古地壳厚度的合理数值,但中酸性岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值相结合仍然可以定性地表征碰撞造山带古地壳厚度的变化趋势。

3.4 辽西地区中侏罗世—早白垩世火山岩

辽西地区在中侏罗世—早白垩世时期(125~180 Ma)发育了 3 套钙碱性火山岩,依次为海房沟

组、髫髻山组(蓝旗组)和义县组火山岩^[57-58],是华北克拉通北缘燕山运动时期岩浆活动的典型代表。在收集陈义贤等的分析数据^[59-64]基础上,采用改进的Thompson-tau统计检验方法剔除 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 的离群值,得到辽西地区侏罗纪—白垩纪时期火山岩地壳厚度变化(图6)。

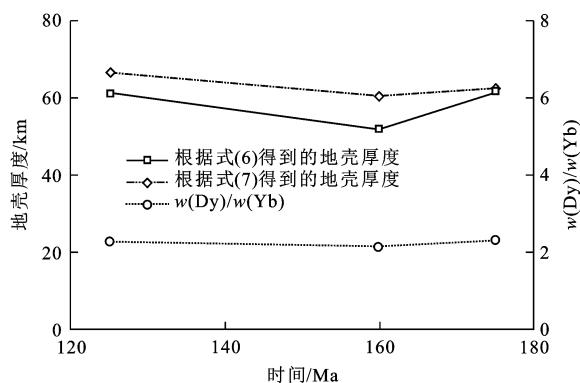


图6 辽西地区火山岩地壳厚度随时间的变化

Fig. 6 Change of Crustal Thickness of Volcanic Rocks in the Western Liaoning Area with Time

从图6可以看出:辽西地区中侏罗世时期海房沟组火山岩(年龄为 (175 ± 5) Ma)的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 中位值为48.0,估算地壳厚度为61 km, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 中位值为18.3,估算地壳厚度为62 km;晚侏罗世时期髫髻山组(蓝旗组)火山岩(年龄为 (160 ± 5) Ma)的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 中位值为39.4,估算地壳厚度为52 km, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 中位值为16.7,估算地壳厚度为60 km;早白垩世时期义县组火山岩(年龄为 (125 ± 5) Ma)的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 中位值为47.9,估算地壳厚度为61 km, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 中位值为22.4,估算地壳厚度为67 km。筛选后,适合于估算各组火山岩地壳厚度的数据集 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 中位值依次为2.31、2.17和2.28, $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值大于2,指示岩浆源区的残留相中存在石榴石^[10],表明辽西地区中侏罗世—早白垩世时期火山岩存在厚度大于50 km的地壳。

构造地质学研究表明,包括辽西地区在内的燕山造山带在180 Ma之前经历了一次上盘向南运动的大规模逆冲推覆事件,到上侏罗统髫髻山组发育时期发生了小规模的伸展活动,而晚侏罗世—早白垩世早期(125~150 Ma)燕山造山带处于持续的挤压变形状态,同时推覆岩片又被快速剥蚀,形成土城子组磨拉石建造^[57-58]。根据 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值估算的辽西地区火山岩地壳厚度显示出厚→(略减)薄→厚的变化趋势,与构造地质学的研

究结果不谋而合。同时,构造地质学研究还表明,燕山造山带发育的科迪勒拉型变质核杂岩形成时代在125 Ma之后,科迪勒拉型变质核杂岩是加厚陆壳在自生重力势能作用下发生伸展变形的结果^[57,65]。在义县组火山岩发育时期(125 Ma),燕山造山带具有厚度大于50 km的地壳是合理的。

辽西地区的实例表明,中酸性岩浆岩的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值相结合可以指示碰撞造山带古地壳厚度的变化趋势,可以应用式(6)、(7)定量估算碰撞造山带的古地壳厚度。

4 结 语

(1)不断增长的观测数据是应用岩石地球化学数据定量、半定量估算造山带古地壳厚度的基础。其理论依据是元素在熔体与残留相或结晶相之间的分馏。对于岩浆弧,可以应用钙碱性岩套 K_2O 含量,玄武质岩石 Na_2O 含量($\text{Na}_{6.0}$)、 CaO 含量($\text{Ca}_{6.0}$)、 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值,中酸性岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值等估算其地壳厚度。对于其他类型的造山带,钙碱性岩套 K_2O 含量、Sr同位素初始比值、 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 值、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值等可以半定量地约束其地壳厚度范围。

(2)由于参与统计的大部分岩浆弧地壳厚度在45 km以下,所以目前提出的定量公式对厚度在20~45 km范围内俯冲造山带的地壳厚度反演结果可靠性较高。对于厚度在60~75 km范围内的岩浆弧,只能采用玄武岩 $\text{Na}_{6.0}$ 值、 $\text{Ca}_{6.0}$ 值,以及中性岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值估算地壳厚度。 K_{60} 值以及弧玄武岩 $w(\text{Ce})/w(\text{Y})$ 值估算地壳厚度的公式只适用于地壳厚度不超过50 km的情况,而中酸性岩 $w(\text{Sm})/w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值可以约束岩浆弧是否存在超过50 km(压力大于1.5 GPa)的加厚地壳。

(3)对三江地区义敦岛弧及福建长乐—南澳构造带中生代俯冲造山作用岩浆岩的检验结果显示,中酸性岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值可以估算俯冲造山带的古地壳厚度。对藏南冈底斯弧中生代—新生代岩浆岩的检验结果显示,中酸性岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值均可估算冈底斯弧在中生代时期的古地壳厚度, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值可估算冈底斯弧在碰撞造山阶段(40 Ma以来)的古地壳厚度。冈底斯地体中酸性岩浆岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在40 Ma以来的明显跃升对应于印度板块与亚洲大陆碰撞导致的地壳显著

增厚。

(4)运用岩石地球化学数据定量、半定量反演造山带地壳厚度时必须注意:要有足够数量的样本;要严格遵循原始作者提出的数据筛选标准,剔除不合格数据;在必要时采用适合的统计检验方法剔除数据集的离群值;明确计算公式的适用条件与应用范围;考虑到回归公式的误差,估算出的地壳厚度具体数值常常仅具有数量级的意义,不宜做过度解释。

参考文献:

References:

- [1] VERARD C, HOCHARD C, BAUMGARTNER P O, et al. 3D Palaeogeographic Reconstructions of the Phanerozoic Versus Sea-level and Sr-ratio Variations [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 4(1): 64-84.
- [2] 刘少锋, 王成善. 构造古地理重建与动力地形[J]. *地学前缘*, 2016, 23(6): 61-79.
LIU Shao-feng, WANG Cheng-shan. Reconstruction of Tectono-paleogeography and Dynamic Topography [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(6): 61-79.
- [3] CHIARADIA M. Copper Enrichment in Arc Magmas Controlled by Overriding Plate Thickness[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(1): 43-46.
- [4] CHIARADIA M. Crustal Thickness Control on Sr/Y Signatures of Recent Arc Magmas: An Earth Scale Perspective[J]. *Scientific Reports*, 2015. DOI: 10. 1038/srep08115.
- [5] CONDIE K C, POTTS M J. Calc-alkaline Volcanism and the Thickness of the Early Precambrian Crust in North America[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1969, 6(5): 1179-1184.
- [6] CONDIE K C. Archean Magmatism and Crustal Thickening[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1973, 84(9): 2981-2992.
- [7] PLANK T, LANGMUIR C H. An Evaluation of the Global Variations in the Major Element Chemistry of Arc Basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(4): 349-370.
- [8] BEST M G, BARR D L, CHRISTIANSEN E H, et al. The Great Basin Altiplano During the Middle Cenozoic Ignimbrite Flareup: Insights from Volcanic Rocks[J]. *International Geology Review*, 2009, 51 (7/8): 589-633.
- [9] MANTLE G W, COLLINS W J. Quantifying Crustal Thickness Variations in Evolving Orogens: Correlation Between Arc Basalt Composition and Moho Depth[J]. *Geology*, 2008, 36(1): 87-90.
- [10] MAMANI M, WÖRNER G, SEMPERE T. Geochemical Variations in Igneous Rocks of the Central Andean Orocline (13°S to 18°S): Tracing Crustal Thickening and Magma Generation Through Time and Space[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 122 (1/2): 162-182.
- [11] CHAPMAN J B, DUCEA M N, DECELLES P G, et al. Tracking Changes in Crustal Thickness During Orogenic Evolution with Sr/Y: An Example from the North American Cordillera[J]. *Geology*, 2015, 43(10): 919-922.
- [12] PROFETA L, DUCEA M N, CHAPMAN J B, et al. Quantifying Crustal Thickness Over Time in Magmatic Arcs[J]. *Scientific Reports*, 2015. DOI: 10. 1038/srep17786.
- [13] JAKES P, WHITE A J R. Major and Trace Element Abundances in Volcanic Rocks of Orogenic Areas[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1972, 83(1): 29-40.
- [14] CONDIE K C. Plate Tectonics and Crustal Evolution [M]. 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1982.
- [15] DICKINSON W R, HATHERTON T. Andesitic Volcanism and Seismicity Around the Pacific[J]. *Science*, 1967, 157: 801-803.
- [16] LEEMAN W P. The Influence of Crustal Structure on Compositions of Subduction-related Magmas[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1983, 18(1/2/3/4): 561-588.
- [17] 万天丰. 中国大地构造学纲要[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
WAN Tian-feng. The Outline of China Tectonics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [18] 汪 洋. 中国东部中生代钾质火成岩研究中的几个问题[J]. *地质论评*, 2007, 53(2): 198-206.
WANG Yang. A Discussion on Some Problems in the Research on the Mesozoic Potassic Igneous Rocks in Eastern China[J]. *Geological Review*, 2007, 53 (2): 198-206.
- [19] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [20] KAY S M, MPODOZIS C. Central Andean Ore Deposits Linked to Evolving Shallow Subduction Systems and Thickening Crust[J]. *GSA Today*, 2001, 11 (3): 4-9.
- [21] HASCHKE M, SIEBEL W, GUNTHER A, et al. Repeated Crustal Thickening and Recycling During the Andean Orogeny in North Chile (21°-26°S) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107

- (B1):ECV6-1-ECV6-18.
- [22] HASCHKE M, GUNTHER A. Balancing Crustal Thickening in Arcs by Tectonic Vs. Magmatic Means[J]. *Geology*, 2003, 31(11): 933-936.
- [23] LEE C T A, MORTON D M, KISTLER R W, et al. Petrology and Tectonics of Phanerozoic Continent Formation: From Island Arcs to Accretion and Continental Arc Magmatism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 263(3/4): 370-387.
- [24] MCDONOUGH W F, SUN S S. The Composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [25] 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
MO Xuan-xue, LU Feng-xiang, SHEN Shang-yue, et al. Tethysian Volcanism and Mineralization in Sanjiang Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [26] LIU S W, WANG Z Q, YAN Q R, et al. Indosinian Tectonic Setting of the Southern Yidun Arc: Constraints from SHRIMP Zircon Chronology and Geochemistry of Dioritic Porphyries and Granites[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2006, 80(3): 387-399.
- [27] WANG B Q, ZHOU M F, LI J W, et al. Late Triassic Porphyritic Intrusions and Associated Volcanic Rocks from the Shangri-La Region, Yidun Terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic Magmatism and Porphyry Copper Mineralization[J]. *Lithos*, 2011, 127(1): 24-38.
- [28] 刘学龙, 李文昌, 张娜. 西南三江义敦岛弧南端地壳抬升历史及资源评价意义[J]. *地质学报*, 2015, 89(2): 289-304.
LIU Xue-long, LI Wen-chang, ZHANG Na. The Crustal Uplift History of the Southern Tip of Yidun Island Arc in Southwest Sanjiang Region and Significance of Resource Evaluation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(2): 289-304.
- [29] LAN C Y, CHUNG S L, MERTZMAN S A. Mineralogy and Geochemistry of Granitic Rocks from Chinmen, Liehyu and Dadan Islands, Fujian[J]. *Journal of the Geological Society of China*, 1997, 40(3): 527-558.
- [30] 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. *地学前缘*, 2016, 23(6): 1-23.
PAN Gui-tang, LU Song-nian, XIAO Qing-hui, et al. Division of the Tectonic Stages and Tectonic Evolution in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(6): 1-23.
- [31] 张鹏, 胡秋韵, 丰成君, 等. 海峡西岸长乐—南澳断裂带中段现今原位地应力测量[J]. *地球学报*, 2015, 36(4): 483-490.
ZHANG Peng, HU Qiu-yun, FENG Cheng-jun, et al. Present In-situ Stress Measurement in Middle Segment of Changle-Nan'ao Fracture Belt Along the Western Coastal Region of Taiwan Strait and an Analysis of Its Activity[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(4): 483-490.
- [32] XU X S, DONG C W, LI W X, et al. Late Mesozoic Intrusive Complexes in the Coastal Area of Fujian, SE China: The Significance of the Gabbro-diorite-granite Association[J]. *Lithos*, 1999, 46(2): 299-315.
- [33] CHEN C H, LIN W Y, LAN C Y, et al. Geochemical, Sr and Nd Isotopic Characteristics and Tectonic Implications for Three Stages of Igneous Rock in the Late Yanshanian (Cretaceous) Orogeny, SE China[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2004, 389: 237-248.
- [34] 冯艳芳, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 长乐—南澳构造带花岗岩类年代学岩石组合与构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
FENG Yan-fang, DENG Jin-fu, XIAO Qing-hui, et al. The Geochronology, Petroassemblage and Tectonic Evolution of Changle-Nan'ao Tectonic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [35] ZEN E A, HAMMARSTROM J M. Magmatic Epidote and Its Petrologic Significance[J]. *Geology*, 1984, 12(9): 515-518.
- [36] 熊小松, 高锐, 李秋生, 等. 深地震探测揭示的华南地区莫霍面深度[J]. *地球学报*, 2009, 30(6): 774-786.
XIONG Xiao-song, GAO Rui, LI Qiu-sheng, et al. The Moho Depth of South China Revealed by Seismic Profiling[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(6): 774-786.
- [37] PAN G T, WANG L Q, LI R S, et al. Tectonic Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 3-14.
- [38] 潘桂棠, 王立全, 张万平, 等. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1:1 500 000)[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
PAN Gui-tang, WANG Li-quan, ZHANG Wan-ping, et al. The Geotectonic Map of Tibetan Plateau and Its Adjacent Area and Explanatory Text (1:1 500 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [39] 曾忠诚, 刘德民, 王明志, 等. 西藏冈底斯东段驱龙—甲马地区构造-岩浆演化与成矿[J]. *地质论评*, 2016, 62(3): 663-678.
ZENG Zhong-cheng, LIU De-min, WANG Ming-zhi,

- et al. Tectonic-magmatic Evolution and Mineralization of the Qulong-Jiama Areas in Eastern Section of Gangdese Mountains, Tibet[J]. Geological Review, 2016, 62(3): 663-678.
- [40] 邱检生,王睿强,赵蛟龙,等. 冈底斯中段早侏罗世辉长岩-花岗岩杂岩体成因及其对新特提斯构造演化的启示:以日喀则东嘎岩体为例[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3569-3580.
- QIU Jian-sheng, WANG Rui-qiang, ZHAO Jiao-long, et al. Petrogenesis of the Early Jurassic Gabbro-granite Complex in the Middle Segment of the Gangdese Belt and Its Implications for Tectonic Evolution of Neo-Tethys: A Case Study of the Dongga Pluton in Xigaze[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(12): 3569-3580.
- [41] CHUANG S L, LIU D Y, JI J Q, et al. Adakites from Continental Collision Zones: Melting of Thickened Lower Crust Beneath Southern Tibet[J]. Geology, 2003, 31(11): 1021-1024.
- [42] GAO Y F, HOU Z Q, WEI R H, et al. Post-collisional Adakitic Porphyries in Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb Isotopic Constraints on Partial Melting of Oceanic Lithosphere and Crust-mantle Interaction[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2003, 77(2): 194-203.
- [43] GUO Z F, WILSON M, LIU J Q. Post-collisional Adakites in South Tibet: Products of Partial Melting of Subduction-modified Lower Crust[J]. Lithos, 2007, 96(1/2): 205-224.
- [44] WEN D R, CHUANG S L, SONG B, et al. Late Cretaceous Gangdese Intrusions of Adakitic Geochemical Characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. Lithos, 2008, 105(1/2): 1-11.
- [45] 康志强,许继峰,陈建林,等. 藏南白垩纪桑日群麻木下组埃达克岩的地球化学特征及其成因[J]. 地球化学, 2009, 38(4): 334-344.
- KANG Zhi-qiang, XU Ji-feng, CHEN Jian-lin, et al. Geochemistry and Origin of Cretaceous Adakites in Mamuxia Formation, Sangri Group, South Tibet[J]. Geochimica, 2009, 38(4): 334-344.
- [46] 莫宣学,赵志丹,喻学惠,等. 青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩[M]. 北京:地质出版社, 2009.
- MO Xuan-xue, ZHAO Zhi-dan, YU Xue-hui, et al. Igneous Rocks of Cenozoic Collision-post Collision in the Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [47] 管琪,朱弟成,赵志丹,等. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩:新特提斯洋脊俯冲的产物?[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2165-2179.
- GUAN Qi, ZHU Di-cheng, ZHAO Zhi-dan, et al. Late Cretaceous Adakites in the Eastern Segment of the Gangdese Belt, Southern Tibet: Products of Neo-Tethyan Ridge Subduction? [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(7): 2165-2179.
- [48] 黄玉,赵志丹,张凤琴,等. 西藏冈底斯仁布—拉萨一带花岗岩基的地球化学及其意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 3131-3142.
- HUANG Yu, ZHAO Zhi-dan, ZHANG Feng-qin, et al. Geochemistry and Implication of the Gangdese Batholiths from Renbu and Lhasa Areas in Southern Gangdese, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 3131-3142.
- [49] 徐旺春. 西藏冈底斯花岗岩类锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成的空间变化及其地质意义[D]. 武汉:中国地质大学, 2010.
- XU Wang-chun. Spatial Variation of Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Compositions of the Gangdese Granitoids and Its Geologic Implications[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [50] GUO L, ZHANG H F, HARRIS N, et al. Origin and Evolution of Multi-stage Felsic Melts in Eastern Gangdese Belt: Constraints from U-Pb Zircon Dating and Hf Isotopic Composition[J]. Lithos, 2011, 127(1/2): 54-67.
- [51] ZHU D C, ZHAO Z D, NIU Y L, et al. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301(1/2): 241-255.
- [52] GUAN Q, ZHU D C, ZHAO Z D, et al. Crustal Thickening Prior to 38 Ma in Southern Tibet: Evidence from Lower Crust-derived Adakitic Magmatism in the Gangdese Batholith[J]. Gondwana Research, 2012, 21(1): 88-99.
- [53] JI W Q, WU F Y, LIU C Z, et al. Early Eocene Crustal Thickening in Southern Tibet: New Age and Geochemical Constraints from the Gangdese Batholith [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 53: 82-95.
- [54] CHEN L, QIN K Z, LI G M, et al. Zircon U-Pb Ages, Geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes of the Nuri Intrusive Rocks in the Gangdese Area, Southern Tibet: Constraints on Timing, Petrogenesis, and Tectonic Transformation[J]. Lithos, 2015, 212/213/214/215: 379-396.
- [55] MA L, WANG B D, JIANG Z Q, et al. Petrogenesis of the Early Eocene Adakitic Rocks in the Napuri Area, Southern Lhasa: Partial Melting of Thickened Lower

- Crust During Slab Break-off and Implications for Crustal Thickening in Southern Tibet[J]. *Lithos*, 2014, 196/197: 321-338.
- [56] 水新芳, 贺振宇, 张泽明, 等. 西藏冈底斯带东段早侏罗世英云闪长岩的岩浆起源及其对拉萨地体地壳演化的意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(11): 3129-3152.
SHUI Xin-fang, HE Zhen-yu, ZHANG Ze-ming, et al. Magma Origin of Early Jurassic Tonalites in the Eastern Gangdese Magmatic Belt, Southern Tibet and Its Implications for the Crustal Evolution of the Lhasa Terrane[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90 (11): 3129-3152.
- [57] DAVIS G A, ZHENG Y D, WANG C, et al. Mesozoic Tectonic Evolution of the Yanshan Fold and Thrust Belt, with Emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, Northern China[J]. *Geological Society of America Memoirs*, 2001, 194: 171-197.
- [58] WANG Y. Yanshan Fold-and-thrust Belt of the North China Craton: A Mesozoic Analogue of Himalaya[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2013, 87(S1): 325-327.
- [59] 陈义贤, 陈文寄. 辽西及邻区中生代火山岩: 年代学、地球化学和构造背景[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
CHEN Yi-xian, CHEN Wen-ji. The Mesozoic Volcanic Rocks of Western Liaoning and Its Adjacent Area: Geochronology, Geochemistry and Tectonic Environment[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [60] 王晓蕊, 高山, 柳小明, 等. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳拆沉作用和 Sr/Y 变化的指示[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2005, 35(8): 700-709.
WANG Xiao-rui, GAO Shan, LIU Xiao-ming, et al. Geochemistry of High-Mg Andesites from the Early Cretaceous Yixian Formation, Western Liaoning: Implications for Lower Crustal Delamination and Sr/Y Variations[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2005, 35(8): 700-709.
- [61] 杨蔚. 辽西中生代火山岩年代学及地球化学研究: 对华北克拉通岩石圈减薄机制的制约[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
YANG Wei. Geochronology and Geochemistry of the Mesozoic Volcanic Rocks in Western Liaoning: Constraints Mechanism for the Lithospheric Thinning in the North China Craton[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [62] 李伍平. 辽西中侏罗统海房沟组火山岩的地球化学特征[J]. *地球科学*, 2013, 38(6): 1153-1168.
LI Wu-ping. Geochemical Characteristics of the Middle Jurassic Volcanic Rocks of Haifanggou Formation, Western Liaoning Province, North China[J]. *Earth Science*, 2013, 38(6): 1153-1168.
- [63] 马强. 辽西三叠纪—侏罗纪火山岩: 华北北缘东段下地壳再造与克拉通破坏[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
MA Qiang. Triassic-Jurassic Volcanic Rocks in Western Liaoning: Implications for Lower Crustal Reworking and Lithosphere Destruction in the North Part of Eastern North China Craton[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [64] 崔芳华. 辽西兴城地区中生代花岗质岩石的成因与地壳演化[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
CUI Fang-hua. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Crustal Evolution in Xingcheng Area, Western Liaoning Province[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [65] DAVIS G A, XIA H R. The Yanshan Allochthon of North China: ≥ 40 Million Years of Late Jurassic-Early Cretaceous Mid-crustal Detachment[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2013, 87(S1): 127-130.

《地球科学与环境学报》荣获 2015 年度“中国科技论文在线优秀期刊”一等奖

近日, 教育部科技发展中心公布 2015 年度“中国科技论文在线优秀期刊”暨“中国科技论文在线科技期刊优秀组织单位”评选结果。《地球科学与环境学报》荣获“中国科技论文在线优秀期刊”一等奖。

为了更好地贯彻落实党的十八大提出的创新驱动发展战略, 促进科技期刊健康发展, 提高科技期刊的质量, 推动科技期刊的数字化建设, 提高期刊刊载论文的引用率, 扩大期刊的影响力, 促进论文免费共享, 建设良好的科研环境, 使科技期刊更好地为科研和科研工作者服务, 教育部科技发展中心开展了此次评选活动。此次共评选出“中国科技论文在线优秀期刊”一等奖 120 项, 二等奖 171 项, “中国科技论文在线科技期刊优秀组织单位”53 个。