



余阳,张宝华,刘永刚. 2021. 中国东部大别苏鲁造山带壳内低速高导异常成因探究. 地球物理学进展, 36(6):2371-2391, doi:10.6038/pg2021EE0400.

YU Yang, ZHANG BaoHua, LIU YongGang. 2021. Study on the origins of low-velocity and high-conductivity anomalies in the crust of Dabie-Sulu orogenic belt, eastern China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 36(6):2371-2391, doi:10.6038/pg2021EE0400.

中国东部大别苏鲁造山带壳内低速高导异常成因探究 Study on the origins of low-velocity and high-conductivity anomalies in the crust of Dabie-Sulu orogenic belt, eastern China

余阳^{1,2}, 张宝华^{1,3*}, 刘永刚¹

YU Yang^{1,2}, ZHANG BaoHua^{1,3*}, LIU YongGang¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 地球内部物质高温高压重点实验室, 贵阳 550081
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 浙江大学地球科学学院, 浙江省地学大数据与地球深部资源重点实验室, 杭州 310027
1. CAS Key Laboratory of High-Temperature and High-Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Key Laboratory of Big Data in Geosciences and Deep Earth Resources of Zhejiang Province, School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

摘要 地震学和大地电磁研究表明, 中国东部大别苏鲁造山带壳内广泛存在低速高导异常. 本文首次较系统地梳理了前人针对大别苏鲁造山带开展的地震学和大地电磁观测结果以及岩石矿物波速和电导率的高温高压实验结果, 建立了岩石波速、电导率随深度变化的模型, 探究了大别苏鲁造山带壳内低速高导异常的可能成因以及形成的基本条件. 大别苏鲁造山带壳内低速高导的成因复杂多样, 主要有: 含水矿物模型、部分熔融模型、高电导矿物模型、各向异性模型、含盐流体模型和名义无水矿物模型等. 我们认为普遍低热流的大别造山带中下地壳的低速异常层和高导异常可能与波速各向异性明显的成岩矿物有关, 高导异常可能与电性各向异性明显的成岩矿物有关. 普遍高热流的苏鲁造山带中上地壳的低速异常可能与含水矿物脱水熔融和波速各向异性较大的成岩矿物有关, 下地壳的低速异常可能是高压变质岩中角闪岩相退变质作用的结果; 而下地壳的高导异常可能与含水矿物脱水以及名义无水矿物中的结构水有关. 以上结论对于我们深入认识大别苏鲁造山带壳内物质组成、地质作用以及地球内部动力学过程具有重要意义.

关键词 大别苏鲁造山带; 低速高导异常; 高温高压实验; 波速; 电导率

Abstract Seismological and magnetotelluric studies indicate that there are widespread low-velocity and high-conductivity anomalies in the crust of the Dabie-Sulu orogenic belt, eastern China. This paper systematically summarises the seismological and magnetotelluric observation results of the Dabie-Sulu orogenic belt, as well as the experimental results of wave velocity and electrical conductivity of rocks and minerals under high temperature and pressure. Taking the temperature of the Dabie-Sulu orogenic belt into account, the models of rock wave velocity and conductivity changing with depth are established. In this way, the possible causes and basic conditions for the formation of low-velocity and high-conductivity anomalies in the Dabie-Sulu orogenic belt are discussed in detail. The origins of low velocity and high conductivity in the crust of the Dabie-Sulu orogenic belt are complex and diverse, mainly including hydrous minerals model, partial melting model, high-conductivity mineral model, anisotropic model, saline fluid model and nominal anhydrous mineral model. We think that the low-velocity anomalies in the middle and lower crust of the Dabie orogenic belt with low heat flow may be related to the diagenetic minerals with obvious anisotropy of wave velocity, and the high-conductivity anomalies may be related to the diagenetic minerals with obvious anisotropy of electrical property. The low-velocity anomalies in the middle and upper crust of the Sulu orogenic belt with high heat flow may be related to the dehydration and melting of hydrous minerals and diagenetic minerals with high-velocity anisotropy; the low-velocity anomalies in the lower crust may be the result of amphibolite facies retrograde metamorphism in the high-pressure metamorphic rocks; and the high-conductivity anomalies in the lower crust may be related to dehydration of hydrous minerals and structural water in nominal anhydrous minerals. Finally, we point out the problems of the current research and prospects of future research. These conclusions are of great significance for us to further understand the crustal composition, the geological process, and the geodynamics of the crust of the Dabie-Sulu orogenic belt.

Keywords Dabie-Sulu orogenic belt; Low-velocity and high-conductivity anomaly; High temperature and high pressure experiment; Wave velocity; Electrical conductivity

中图分类号 P315

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2021EE0400

收稿日期 2021-03-11; 修回日期 2021-09-05.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 中国科学院前沿科学计划从 0 到 1 原始创新项目(ZDBS-LY-DQC015)和国家自然科学基金(41973056,41773056)联合资助.

第一作者简介 余阳,男,1995年生,硕士研究生,主要从事高温高压岩石波速测量研究. E-mail: yuyang182@mails.ucas.ac.cn

* 通讯作者 张宝华,男,1978年生,研究员,主要从事地球内部物质输运性质的高温高压实验和理论研究. E-mail: zhangbaohua@zju.edu.cn

0 引言

大别苏鲁造山带位于我国东部(110°E ~ 123°E, 29°N ~ 39°N), 覆盖范围涉及湖北、安徽、河南、江苏和山东5省, 是扬子板块与华北板块间的陆陆碰撞造山带(图1)(徐佩芬等, 2000; Tang *et al.*, 2007; 吴萍萍等, 2015). 该造山带上的超高压变质岩是目前世界上规模最大、形成温压条件最高的一条超高压变质带. 目前大别苏鲁造山带上已开展了大量岩石学和构造学方面的研究, 有关其构造演化等动力学问题也成为我国乃至世界学者研究的热点问题(杨文采等, 2003; 肖骑彬等, 2007).

迄今为止, 前人在中国东部大别苏鲁造山带开展过大量地震学和大地电磁观测, 发现其壳内广泛存在低速高导异常, 并对其成因进行了研究(董树文等, 1993; 王椿镛等, 1995; 王椿镛等, 1997; 董树文等, 1998; Yang and Chen, 1998; 杨文采等, 1999; 徐佩芬等, 2000; Yang, 2002; 杨文采和汪集旻, 2002; 刘福田等, 2003; 杨文采等, 2003; Liu *et al.*, 2005; 王勤等, 2005; 张学民等, 2005; Bai *et al.*, 2007; 肖骑彬等, 2008; Xu *et al.*, 2016). 除了丰富的地球物理勘探工作, 也有学者对采自大别苏鲁造山带及周边地区的岩石矿物样品开展了高温高压波速和电性测量实验, 对低速高导异常的成因进行了深入分析(高山等, 1997; 高平等, 1998; Kern *et al.*, 1999; 张友南和孙君秀, 1999; 赵志丹等, 2001; 朱茂旭等, 2001; 王勤等, 2005; 郭颖星等, 2010; 王多君等, 2011; 郭颖星等, 2014; Dai *et al.*, 2016). 除了大别苏鲁造山带, 世界上其他地区也发现有低速高导异常的存在(Ocola and Meyer, 1972; Gupta *et al.*, 1996; Vanyan and Gliko, 1999; Pavlenkova, 2004; Li *et al.*, 2018), 所以研究大别苏鲁造山带壳内低速高导异常的成因对分析其他地区的低速高导异常具有一定的参考意义. 因此, 本文详细总结了过去几十年来大别苏鲁造山带壳内出现低速高导异常现象的地球物理学观测结果, 以及采自该地区岩石矿物波速和电导率的高温高压实验结果, 计算了大别苏鲁造山带岩石波速、电导率随深度变化的关系, 并结合地质背景, 进一步分析和探讨了异常可能的成因模型.

1 地球物理勘探结果

前人在研究大别苏鲁造山带的构造运动及内部结构时, 不仅需要地表的地质资料, 更需要地球内部的科学证据. 从20世纪90年代初期开始, 一系列地球物理勘探工作在大别苏鲁造山带上陆续展开, 其中地震学方法因其穿透距离深、精度高、信息畸变小, 为人们提供了详实的地球内部速度结构等信息. 大地电磁方法通过探测地球深部电性结构, 在研究地壳和上地幔内部温度、流体、熔体等方面具有独特的优势. 这两种地球物理勘探方法可以相互验证、相互补充, 直观地揭示了造山带地壳和上地幔的结构细节, 促进了地球构造运动等大陆动力学问题的研究(杨文采等, 2003; 赵志新等, 2004; 肖骑彬等, 2007; 金胜等, 2010b).

1.1 速度结构

大别苏鲁造山带的构造和演化有着复杂的构造运动过程, 为解决该造山带的动力学过程与超高压变质带形成机制

等问题, 对该地区地震波速度结构特征的研究是十分必要的. 王椿镛等(1997)完成了一条横穿大别造山带的人工地震测深剖面, 得到了沿这一剖面的二维P波速度结构模型. 他们发现在大别造山带北部合肥盆地13~17 km的中地壳内存在6.0 km/s的低速异常, 约比周围的速度低4%(图2a). 在大别山地区的深地震测深剖面实验中, 用三分量地震仪记录到较高质量的S波资料, 由此获得地壳S波结构. 根据大别造山带二维S波速度结构, 发现大别造山带北部合肥盆地14~18 km的中地壳存在3.3 km/s的低速异常, 约比周围的速度低10%(图2b).

董树文等(1998)重新处理了已有的深地震测深数据, 他们得到的结果与王椿镛等(1997)的结果相近(图2a), 同样在大别造山带北部合肥盆地, 发现地下15~19 km深的地壳中存在 V_p 为5.8 km/s的低速异常, 约比周围的波速低6%.

Yang和Chen(1998)利用人工地震的方法获得了大别地区的深地震反射剖面(图2a), 发现在南大别超高压变质地层以下, 10~21 km的深度范围内, 存在一个 V_p 为6.5 km/s的低速异常, 比周围的波速低约4%. 该超高压变质地层曾俯冲于中朝板块之下而后迅速折返, 并经历了碰撞后的强烈变形, 推测该低速异常可能为英云闪长变质岩.

徐佩芬等(2000)对大别苏鲁造山带进行更高分辨尺度的地震层析成像研究, 综合前人发表的该区及邻近区域的地壳速度结构研究成果, 重建其地壳及上地幔的三维P波速度图像. 结果表明, 在大别地块中部, 其中地壳15~25 km深度上存在低速区, 其速度值低至5.9~6.0 km/s(图2a). 推测其为构造滑脱带, 表明大别造山带中地壳发育有伸展滑脱构造.

为探测大陆深俯冲带三维精细结构, 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“大陆深俯冲作用”于2001年3月在东大别进行人工地震爆破, 采集了用于高分辨层析成像研究的地震走时数据. 刘福田等(2003)处理并解释了布设在东大别的6条深地震宽角反射/折射观测资料, 获得了研究区域的二维速度剖面结构. 结果表明, 东大别造山带地壳的速度结构在纵向和横向上均存在较为强烈的非均匀性. 东大别造山带地壳结构具有莫霍面垂向错断, 壳内发育高速穹隆构造, 其翼部的中上地壳发育有 V_p 约为6.1 km/s的低速异常(图2a). 该低速异常在空间位置和分布形态上对应于以穹隆构造为中心的拆离滑脱带.

2001年4月至2002年3月, 中国地震局地质研究所和德国波茨坦地质研究所在大别山碰撞造山带和华北地台进行了无源地震阵列实验. Liu等(2005)利用该密集地震台网的观测数据, 并通过接收函数法得到了大别造山带地壳和上地幔的S波速度结构. 发现在大别造山带中心部位10~30 km深的地壳中存在低速体, 其 V_s 约为2.8~3.4 km/s, 比周围波速低3%~6%(图2b). 推测其可能为扬子克拉通与中朝克拉通剧烈碰撞时的残留.

Bai等(2007)收集整理了前人得到的穿过北大别造山带和苏鲁造山带的P波速度剖面. 他们的研究表明: 在北大别造山带12~16 km深的地壳中, 存在一个P波速度约为5.8~6.0 km/s的低速异常, 其速度约比周围速度低5%

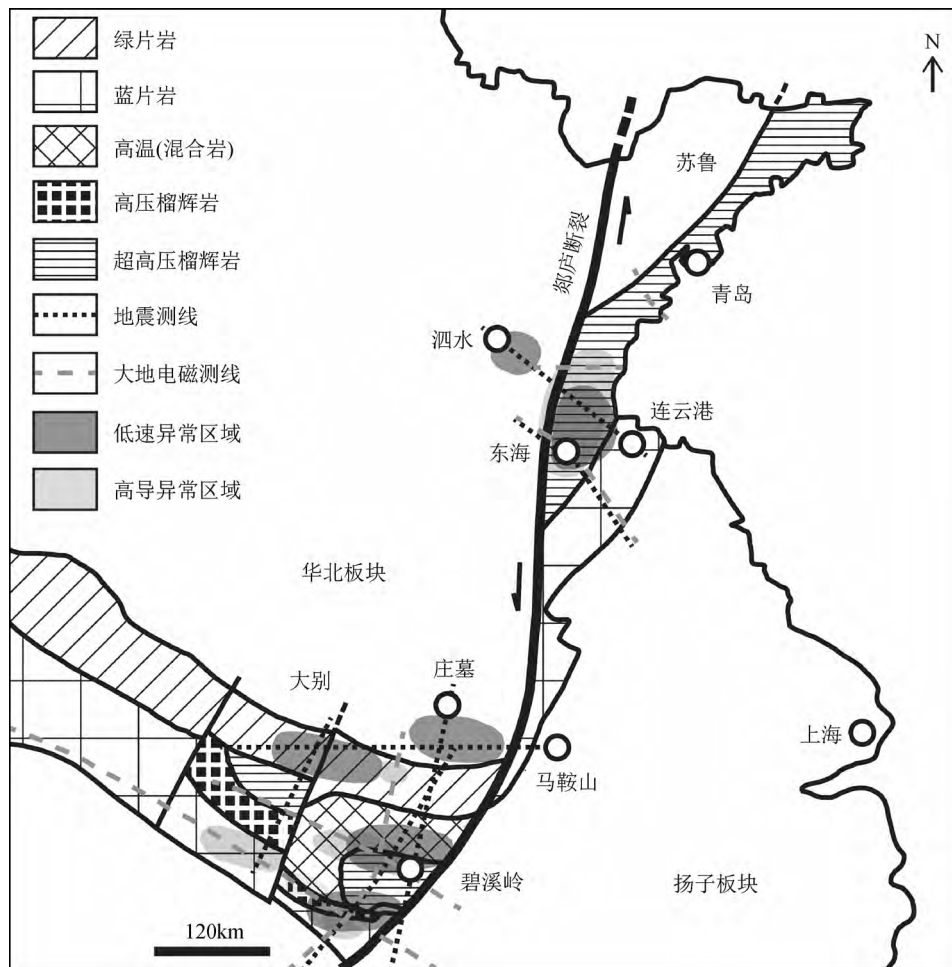


图1 大别苏鲁造山带地质及物探测线分布简图(改自 Tang *et al.*, 2007)

Fig. 1 Geological sketch map of the Dabie-Sulu orogenic belt with geophysical line locations (Revised from Tang *et al.*, 2007)

(图 2a);在苏鲁造山带 11~16 km 的地壳中,也存在着一个不太明显的低速异常,其 P 波速度约为 6.1 km/s, 约比周围速度低 2% (图 2a)。

图 2 显示了大别造山带 P 波与 S 波速度随深度的变化图,其中浅灰色区域代表低速区,在大别造山带地下 10~25 km 的深度范围内,前人得到的 P 波速度数据都表明存在低速异常区,其 V_p 的值约为 5.7~6.5 km/s;此外在大别造山带下 13~26 km 的深度范围内也存在一个 S 波的低速异常区, V_s 的值约为 2.8~3.4 km/s。

杨文采等(1999)在苏鲁地体北部进行了深反射地震调查的工作,采用联合反演方法,并用邻区折射波进行约束,得到了波速反演剖面。综合反射和折射反演结果,得到石门—桃园地区 V_p 与深度的关系图(图 3a)。在苏鲁造山带地下 7~12 km 发现存在一个 V_p 为 6.5 km/s 的低速异常,比周围波速低约 4%。根据前人华北地台和大别山超高压变质带岩石在高温高压下的测定结果,推测位于地下 7~12 km 的低速异常可能为经过高压变质的片麻岩或云英闪长岩,并含有后期侵入的花岗岩。

杨文采和汪集旸(2002)利用位于苏北李恒附近反射信号对应的广角折射,得到了该处的地壳波速模型,图 3a 的结

果表明,其上地壳 4~11 km 的深度范围内存在一个 V_p 为 5.8 km/s 的低速异常,比周围速度低 5%。

杨文采等(2003)综合了肥城南、平邑、费县、临沭和连云港等地的地壳 V_p 速度结构资料,发现中地壳 10~17 km 处存在 V_p 为 5.1~5.5 km/s 的低速体,低于周围速度可达 15% 左右(图 3a)。考虑到苏鲁和鲁西地区燕山期都有大规模的岩浆火山活动,由于花岗质岩浆活动与中地壳的脱水作用有关,这种低速异常也许表明中地壳含有较多的水。此外,下地壳 26~35 km 也存在 V_p 为 5.9~6.9 km/s 的低速异常,暗示苏鲁与鲁西地区中新代以来有较强烈的壳幔作用(杨文采等,2003)。

王勤等(2005)发现在苏鲁造山带 3~5 km 深的地壳浅部,存在一个 V_p 约为 5.8 km/s、 V_s 约为 3.4 km/s 的低速异常,其 V_p 比周围低约 6%,而 V_s 比周围低约 5% (图 3a)。推测可能是俯冲陆壳折返时的韧性剪切带。

在苏鲁造山带中上地壳 3~15 km 的范围内,不同的地震学观测结果都有发现低速异常的存在(图 3a),其中灰色区域代表的 V_p 低速异常值为 5.1~6.0 km/s。此外,在苏鲁造山带下地壳 26~35 km 也存在 V_p 为 5.9~6.9 km/s 的低速异常。

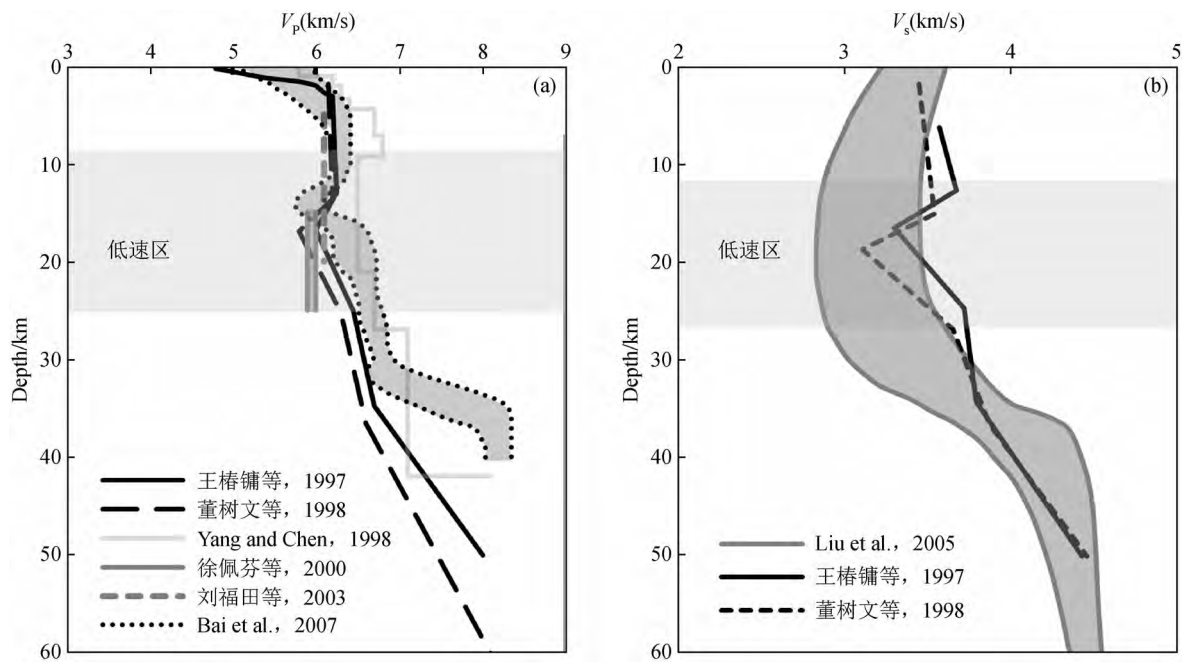


图2 大别造山带P波(a)与S波(b)速度随深度的变化

Fig. 2 P-wave (a) and S-wave (b) velocities with depth in the Dabie orogenic belt

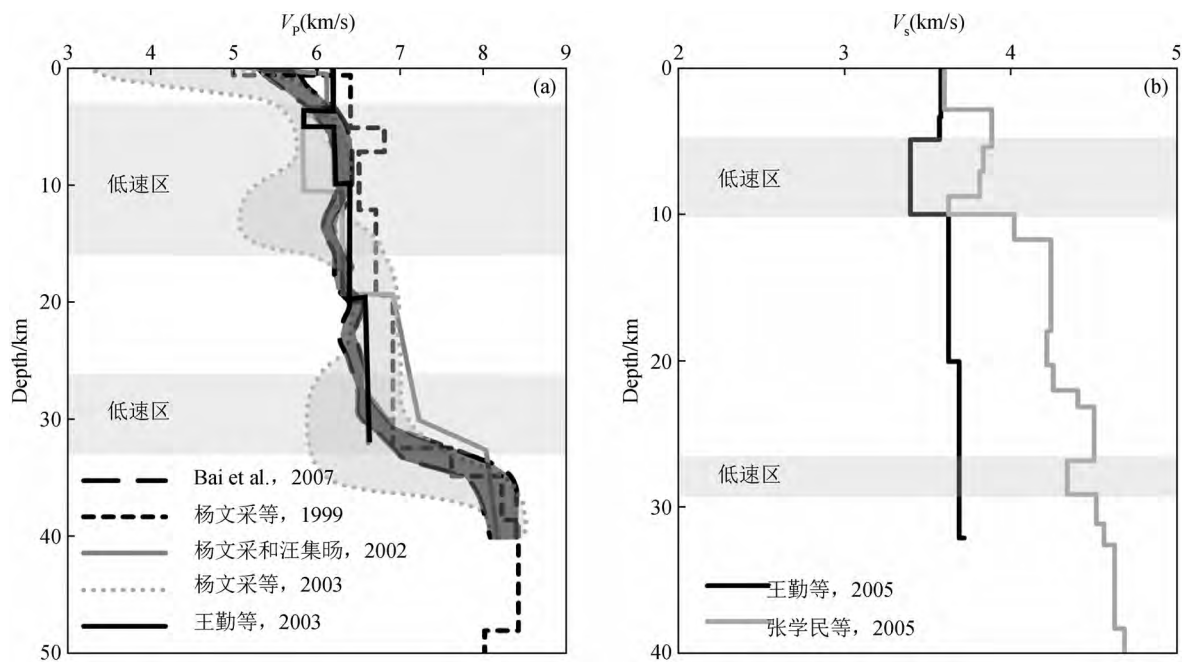


图3 苏鲁造山带P波(a)与S波(b)速度随深度的变化

Fig. 3 P-wave (a) and S-wave (b) velocities with depth in the Sulu orogenic belt

相较于苏鲁造山带多条P波速度结构剖面,前人对于苏鲁造山带S波速度结构的精细研究并不多。从图3b中可见,除了王勤等(2005)的结果,张学民等(2005)利用拟合深源远震的S波记录波形反演了苏鲁地区岩石圈S波速度结构,发现其整个上地壳速度都比较低,而且在上地壳底部出现一个 V_s 约为3.4~3.6 km/s的低速异常,比周围 V_s 低约5%;

此外在下地壳27~29 km深度范围内也存在一个 V_s 约为4.3 km/s的低速异常,比周围 V_s 低约4%,推测该下地壳低速异常与地幔的活跃程度较高有关。

图2和图3的结果表明,不同研究人员得到的速度结构存在一定的差异,主要因为选用的地震资料、数据精度、采用的反演方法以及选取的初始模型不同造成的。但总体上,可

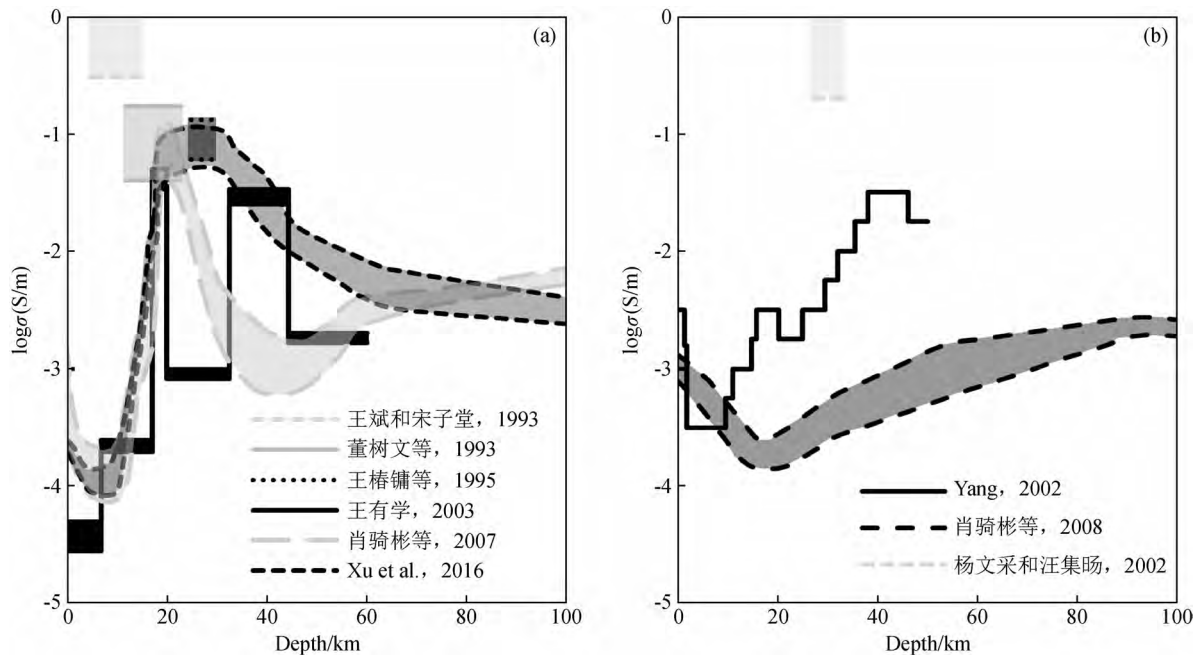


图4 大别(a)与苏鲁造山带(b)电导率随深度的变化

Fig. 4 Electrical conductivity with depth in the Dabie (a) and Sulu orogenic belt (b)

以认为大别苏鲁造山带地下的速度结构在纵向上呈现出均匀的状态. 其中大别造山带的低速异常存在于10~26 km, 其 V_p 值约为5.7~6.5 km/s, V_s 值约为2.8~3.4 km/s. 苏鲁造山带下的低速异常存在于3~15 km, 其 V_p 值整体低于大别造山带, 约为5.1~6.0 km/s, V_s 值整体高于大别造山带, 约为3.4~3.6 km/s. 此外, 与大别造山带不同, 在苏鲁造山带下地壳约23~35 km 深度范围内也存在低速异常, 其 V_p 为5.9~6.9 km/s, V_s 约为4.3 km/s.

1.2 电性结构

大地电磁测深是研究壳幔结构非常有效的一种方法, 对地震学结果解释也是一个很好的补充. 前人对高导异常成因的研究涉及地壳的精细结构、物质交换、变质作用及地球动力学等诸多方面, 为解决地球科学领域相关问题提供了科学依据(徐义贤, 1995; 金胜等, 2010b).

董树文等(1993)首次得到了安徽六安—江西瑞昌的大地电磁测深剖面, 发现在大别山壳内12~23 km 存在一个呈鞍状的高导异常(0.04~0.17 S/m)(图4a), 鞍状的凸处正位于南北大别界线上(岳西), 推测其为巨型滑脱构造, 形成时代要晚于碰撞带. 王斌和宋子堂(1993)发现大别山北麓地下介质的电性结构总体上具有明显的纵向分层、横向分块的特点. 在5~15 km 深度存在连续高导异常, 其电导率高达0.3~1.0 S/m(图4a), 并推测该高导异常可能是由花岗岩类物质部分熔融所形成的塑性软弱层.

王椿镛等(1995)利用反演方法获得了南襄盆地与大别隆起带电性结构, 发现在地壳底部(25~30 km)存在一个厚度约4~5 km 的高导层, 电导率为0.06~0.13 S/m, 该高导异常与南襄盆地东缘至大别隆起带下地壳的低速异常相一致(图4a), 并推测这个高导异常可能对应于壳内大型滑脱

构造.

肖骑彬等(2007)根据近年在大别造山带内观测的大地电磁测深资料, 对大别造山带地壳和上地幔电性结构进行了研究. 从图4a中可以发现, 在大别造山带的地壳浅部, 电导率值很低, 而随着深度增加到18~25 km, 高导异常出现, 其电导率的值最高可达0.1 S/m. 推测超临界状态下卤水的富集可能是形成壳内高导异常的关键因素.

最近 Xu 等(2016)发现在大别地区18~30 km 的深度范围内, 存在高导异常区, 其电导率值最高可以达到0.1 S/m(图4a). 这些高导异常在横向上并不连续, 而是在北大别杂岩带以及毗邻的高压-超高压变质带的壳内孤立存在. 他们推测这些中下地壳内的高导体可能是由于剪切作用导致颗粒边界连通的石墨膜造成的.

Yang(2002)通过大地电磁方法, 获得了穿过苏鲁超高压变质带的电导率剖面(图4b), 发现在地壳的深度范围内其电导率较低, 而在上地幔40 km 左右的深度, 其电导率可达0.03 S/m; 并推测苏鲁主冲断层下的高电导率可能代表扬子地壳含有古生代沉积物. 此外, 杨文采和汪集咏(2002)利用中国大陆科学钻探先行项目在苏鲁地区积累的地电学资料, 发现苏北壳幔过渡带27~33 km 的深度存在一个电导率大于0.2 S/m 的高导异常, 推测可能为岩石发生了局部熔融. 与已有研究不同的是, 肖骑彬等(2008)认为在苏鲁造山带及邻区不仅地壳, 上地幔浅部也不存在高导异常.

相较于地震学的结果, 前人利用大地电磁学方法得到的电导率结果差异更大, 除了测点、资料处理技术以及解释的不同, 还可能与大地电磁探测纵向分辨能力随着深度增加而迅速减弱以及其抗干扰能力较弱的特性有关(金胜等, 2010b). 对于这一区域地壳及上地幔的实际电性结构, 还需

要更详细的大地电磁测深勘探以及高温高压电性实验来约束和修正。

2 大别苏鲁地区矿物岩石物性的高温高压实验结果

高温高压实验是研究地球内部状态和过程最重要的一种手段,对了解地球内部不同深度的物质组成、物理和化学性质、结构构造及动力学过程等具有重要意义。高温高压实验技术的发展解决了人们无法对地球内部的物质进行直接观察和采样的难题,使得地球科学家能够在实验室里通过研究矿物岩石在高温高压下的物理化学性质,进一步认识地球深部的结构、成分、性质、状态和演化,并对其他间接方法提供直接的实验约束(宋茂双等,1996;马麦宁和白武明,1999)。

大别造山带及邻区地壳结构具有分层成块特征,地壳厚度有北薄南厚的趋势,具有三个结构层。其中上地壳主要由片麻岩组成,榴辉岩在其中仅占0~20%;中地壳主要由长英质片麻岩、花岗岩和闪长岩组成;更深部岩石则可能包括榴辉岩、辉石岩、麻粒岩与少量橄榄岩(赵志丹等,2001;杨文采等,2003;张本仁等,2004;Anderson, 2005)。位于东海县南部的中国大陆科学钻探结果表明,苏鲁造山带的中上地壳广泛分布着片麻岩。这种岩石从沉积盆地的底部开始,可分布到深达20 km左右的中地壳,在该深度地壳岩石力学性质由脆性转化为韧性。苏鲁造山带的下地壳可能分布有中基性片麻岩和麻粒岩,以及少量的榴辉岩。岩石圈地幔主要包括尖晶石二辉橄榄岩、方辉橄榄岩和二辉橄榄岩(杨文采等,2003;杨文采等,2004;王勤等,2005)。下面总结分析了前人对相关岩石矿物的高温高压波速和电性实验结果。

2.1 波速测量

高山等(1997)通过与国外学者合作,在安徽和湖北境内采集了约40件新鲜的大别山超高压榴辉岩和各类围岩样品,完成了首批大别超高压榴辉岩和各种围岩在高温高压条件下 V_p 和 V_s 的精确测定工作。从图5中可以发现,在室温下,当压力低于0.2 GPa时,岩石 V_p 和 V_s 均表现出随压力升高快速增加的趋势,压力大于0.2 GPa又呈近线性缓慢增加的趋势。这一特性与体积变化特征对应,表明低压下非线性段主要反映了岩石中微裂隙的闭合效应,而线性段则代表岩石的本征特性。在0.6 GPa的固定压力下,岩石中微裂隙已闭合,此时 V_p 随温度升高呈线性降低。

Kern等(1999)选取大别苏鲁地区出露的超高压变质岩作为样品,在最高873 K和0.6 GPa的温压条件下进行了波速测量实验。实验样品为采自磨子潭的英云闪长质片麻岩、碧溪岭榴辉岩和惠兰山麻粒岩样品。图5显示在室温下,当压力升高到0.2 GPa,样品 V_p 和 V_s 随压力呈非线性增加,该现象可以被解释为岩石样品的微裂隙的闭合过程;随着压力继续升高至0.6 GPa,波速随压力近乎线性增加。在0.6 GPa的固定压力下,波速随温度升高呈缓慢线性下降。这些变化反映了波速由主要矿物体积百分比、单晶弹性特性和晶格优选取向等岩石固有属性决定。

张友南和孙君秀(1999)使用活塞圆筒压机对采自大别山岳西的花岗闪长质麻粒岩样品进行了高温高压条件下的

V_p 波速测定实验。图5的结果表明,在室温下,波速 V_p 随压力而升高,0.3 GPa的压力下为非线性段,大于0.3 GPa的高压下为线性段。在0.8 GPa的定压下,样品 V_p 随温度的升高呈缓慢线性下降。

赵志丹等(2001)在室温和等静水压下测定了大别超高压变质带榴辉岩和麻粒岩至1.0 GPa压力的 V_p 和 V_s ,使用采自大悟宣化店的12个榴辉岩样品(25%的石榴石、35%透闪石、20%的黝帘石、10%的单斜辉石、5%的白云母、5%的金红石和磁铁矿)。从图5a、b中可以发现波速随压力增大表现出不同特征,在低压范围内(小于0.2 GPa), V_p 和 V_s 快速增大;在0.2~1.0 GPa范围内,波速呈线性缓慢增加。

王勤等(2005)在室温和最高0.6 GPa的温压条件下,对采自苏鲁造山带南部的榴辉岩进行弹性波速测量实验。根据样品粒径、退变质程度和波速特征,将采得的榴辉岩样品分为I、II和III三类。I类榴辉岩由粗颗粒的石榴石和绿辉石组成,较为新鲜,几乎未经退变质作用;II类榴辉岩主要由细粒石榴石和绿辉石组成,在折返过程中形成,代表剪切后的榴辉岩;III类榴辉岩为返到地壳后经历了角闪岩相退变质作用的榴辉岩。根据图5中苏鲁地区典型的三类榴辉岩高压P波和S波测量结果,发现从I类、II类到III类榴辉岩,波速逐渐降低,而这一变化趋势可由这几类榴辉岩组成矿物的地震波性质来解释。其中石榴石的波速很高,无各向异性;而绿辉石的波速略低,但各向异性较大。因此超高压榴辉岩的各向异性主要归因于绿辉石的优选定向,随着石榴石含量的减少,榴辉岩的波速降低(Ji *et al.*, 2003)。

从图5中可以发现,榴辉岩的波速最快,麻粒岩和片麻岩稍慢。Ji等(2002)的主要成岩矿物的波速数据表明,在相同条件下,石榴石和绿辉石的波速最高,斜长石、辉石和石英的波速次之。因此,主要由石榴石和绿辉石组成的榴辉岩波速最高,主要由斜长石、辉石和石英组成的麻粒岩和片麻岩波速低于榴辉岩。此外,图5中也可以直观地看出,室温条件下,不同研究人员测得的榴辉岩样品波速测量结果差异较大。这可能是由于不同研究组采集的榴辉岩样品中主要矿物含量、实验样品组装方式以及波速测量方法等差异造成。

2.2 电导率测量

电导率是重要的地球物理参数,对矿物组成、温度、压力、挥发分、熔体及固态高导相等十分敏感,因此矿物岩石电导率是研究地球深部最有效的手段之一。开展高温高压下地球深部物质电学性质的实验可为地球内部物质组成和结构等提供重要信息,也能够为大地电磁测深、地震学等地球物理方法得到的电导率或速度结构的多解性及其成因解释提供科学依据(朱茂旭等,2001;于英杰等,2011)。

对于大别苏鲁造山带的高电导率异常,前人的高温高压电导率实验主要集中在榴辉岩。高平等(1998)首次公开报道了秦岭—大别山壳幔岩石电导率的测定结果,并得到地壳深部电性结构模型。实验样品主要为榴辉岩(50%的绿辉石和50%的石榴石)以及辉石岩(90%的单斜辉石和少量黑云母、磁铁矿和角闪石)等。从图6a中可以看到,当温度从453 K升至1573 K时,其榴辉岩样品的电导率值变化幅度大于辉石岩;在更高的温压条件下,两者的电导率持续增大并发生电导率跳变,这可能与岩石中微量黑云母等含水矿物脱水

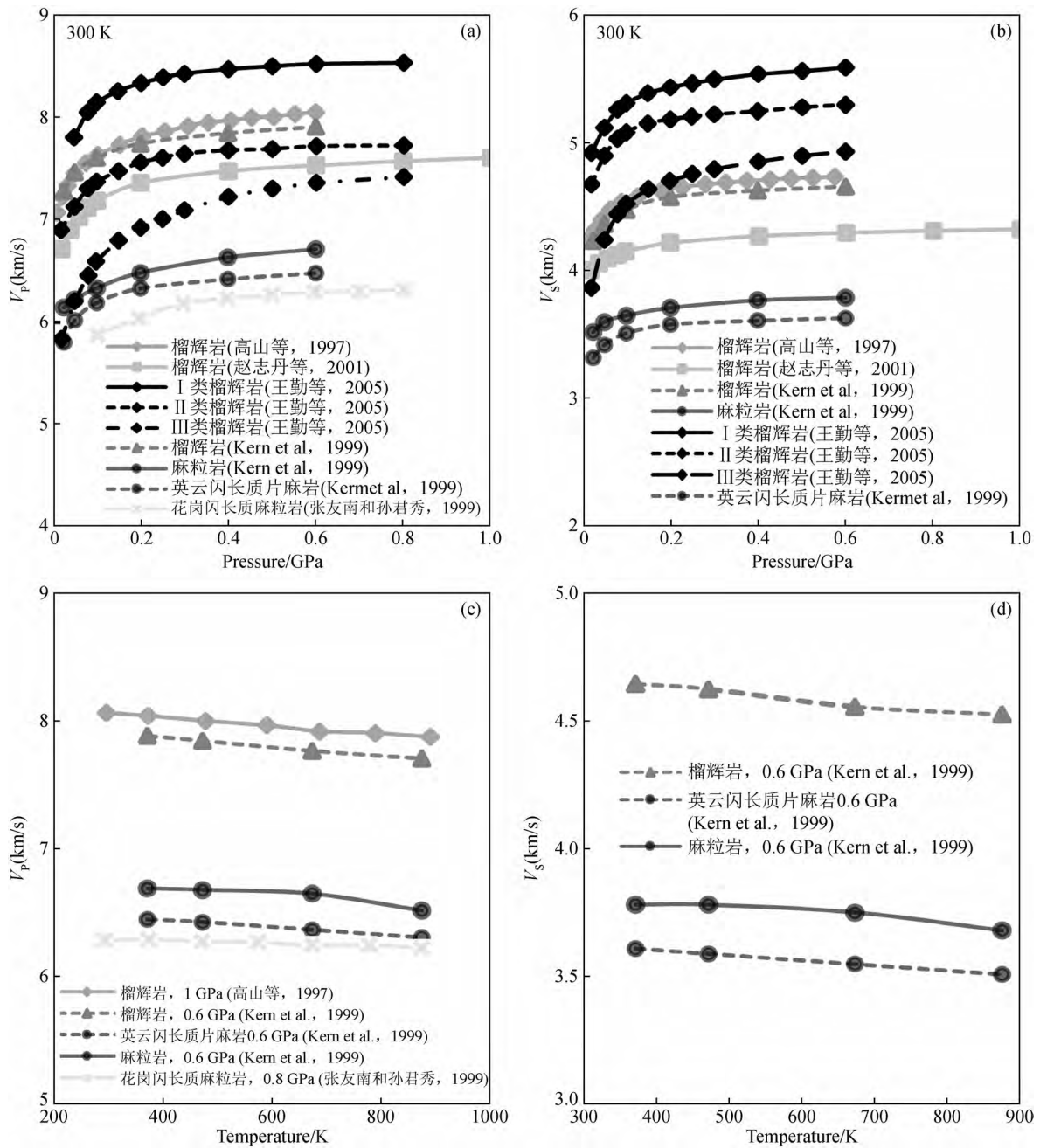


图5 大别苏鲁造山带岩石样品 P 波 (a) 与 S 波 (b) 速度随压力的变化, 大别苏鲁造山带岩石样品 P 波 (c) 与 S 波 (d) 速度随温度的变化

Fig. 5 Rock samples' P-wave (a) and S-wave (b) velocities with pressure, P-wave (c) and S-wave (d) velocities with temperature in the Dabie-Sulu orogenic belt

有关。

朱茂旭等(2001)在 300 ~ 800 K、1.0 GPa 的温压条件下测定了 1 mol/L NaCl 溶液饱和的榴辉岩电导率。实验样品为采自大别地区安徽省潜山五庙的新鲜含柯石英榴辉岩,其矿物组成为 45% 的石榴石、45% 的绿辉石和 10% 的含水矿物(角闪石和白云母)。从图 6a 可见,在相同的温度下,平行线理方向的电导率比垂直线理方向的高 1 ~ 2 个数量级。在 473 K 以下,平行线理方向的电导率随温度的增加而增大,在

473 ~ 523 K 之间出现一最大值(约 0.001 S/m),然后开始下降,这是由于流体密度进一步减小,离子配对程度增加,从而降低溶液载流子的密度,导致电导率下降。

Dai 等(2016)在 873 ~ 1173 K、1.0 ~ 3.0 GPa 的温压条件以及 $10^6 \sim 10^{-1}$ Hz 的频率范围内,测量了采自大别苏鲁超高压变质带新鲜榴辉岩样品的电导率。天然榴辉岩样品新鲜、未氧化、无裂缝,榴辉岩样品含有 41% 的石榴石、58% 的绿辉石和不到 1% 的副矿物(如角闪石、云母等)。对样品进

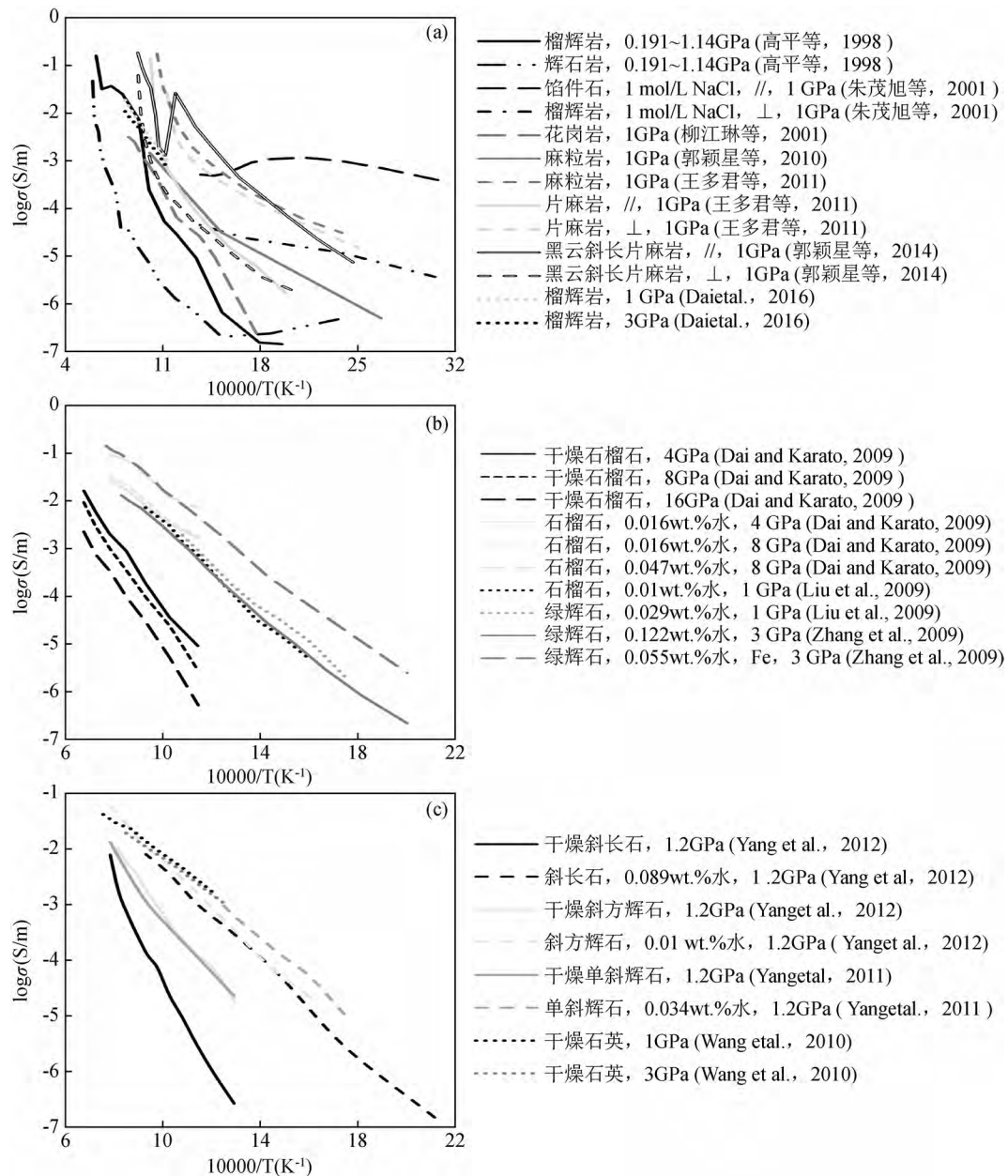


图6 不同岩石矿物电导率随温度的变化

Fig.6 Electrical conductivity of different rocks and minerals with temperature

行红外光谱测量,显示榴辉岩样品含水量很少,可视其为不含水的榴辉岩.图6a的实验结果表明电导率在固定压力下随温度升高而增大,并遵循 Arrhenius 方程.电导率随压力的升高而减小,但降幅不大,可以认为压力对榴辉岩电导率影响很小,可忽略不计.

根据前人的岩石学等研究,大别苏鲁造山带地壳存在多种岩石种类,因此除了整理大别苏鲁造山带上榴辉岩等岩石的电导率实验结果,我们也补充收集了其他地区不同岩石矿物样品的电导率实验资料,进一步讨论研究区域的电导率.

柳江琳等(2001)在 563 ~ 1173 K 和 1 ~ 2.5 GPa 的高温高压条件下,对采自喀喇昆仑的花岗岩进行了电导率测量实

验.实验发现花岗岩在 1.0 GPa 的固定压力,563 ~ 1133 K 的温度范围内,电导率随温度的变化约达到 4 个数量级(图 6a).其中在 710 ~ 830 K 温度段内变化较为平缓,在 830 ~ 1133 K 范围内电导率变化幅度较大.白武明等(2000)根据显微薄片分析,部分熔融是导致花岗岩样品出现电导率迅速增大的主要原因.

郭颖星等(2010)在 373 ~ 1002 K 和 1.0 GPa 的温压条件、 $10^6 \sim 10^{-1}$ Hz 的范围内,测量了麻粒岩样品的电导率.该麻粒岩包含 40% ~ 50% 的斜长石、40% 的角闪石、10% 的紫苏辉石和不到 5% 的石英.实验过程中多次升降温度,以确保实验数据的稳定性.从图 6a 中可以发现,麻粒岩的电导率在 667 K 附近发生突变.推测是由于在 373 ~ 667 K 的温度

区间内存在杂质离子,而在 667 ~ 1002 K 的温度区间内,麻粒岩的电导率主要由辉石和角闪石所控制。

王多君等(2011)在 400 ~ 900 K、1.0 GPa 的温压条件下,使用 YJ-3000t 紧装式六面顶压机测量了采自河北的片麻岩(平行面理和垂直面理方向)和麻粒岩样品的电导率,得到了样品电导率与温度之间的关系。图 6a 的结果表明,片麻岩的电导率低于麻粒岩,片麻岩平行面理方向的电导率低于其垂直面理方向上的电导率,但是随着温度的升高,电导率差别逐渐减小。片麻岩和麻粒岩在 740 ~ 870 K 的温度区间内,电导率会显著增高。这是由于其含水矿物在高温下发生脱水反应,引起导电机制的变化,导致电导率升高。

郭颖星等(2014)在 400 ~ 1073 K、1.0 GPa 的温压条件下,在 YJ-3000t 紧装式六面顶压机上,运用交流阻抗谱法研究了采自山东泰山(鲁西)的黑云斜长片麻岩平行及垂直面理方向的电导率。该实验样品的主要矿物为 21% 的黑云母、52% 的石英、25% 的斜长石和 2% 的钾长石。实验前后用傅里

叶变换红外光谱方法测得了黑云斜长片麻岩的水含量,发现样品的水含量主要由含水矿物黑云母决定。图 6a 的结果表明,在实验温度范围内,黑云斜长片麻岩实验样品电导率与温度满足 Arrhenius 方程,且电导率在平行面理方向比垂直面理方向高出约 1 个数量级,这是因为在平行于面理方向上,这是因为在平行于面理方向上,黑云母具有更好的形状优选方位而形成导电通路。平行面理方向样品电导率分别在第 3 轮升温和降温过程中的 881 ~ 1040 K 之间出现一个明显的电导率突变过程,这可能与黑云母的脱水或熔融有关。样品中含水矿物黑云母相对于斜长石及石英来说导电性更强,因此,样品的导电性主要由黑云母决定。

除了对榴辉岩、片麻岩和麻粒岩等岩石样品进行了高温高压电导率测量实验,前人也对榴辉岩、麻粒岩和片麻岩的组成矿物(石榴石、绿辉石、斜长石、斜方辉石、单斜辉石和石英等)也展开了大量电导率测量,实验数据和拟合参数详见表 1。

表 1 部分名义无水矿物高温高压电导率实验条件及参数值
Table 1 Experimental conditions and parameter values of conductivity of some nominal anhydrous minerals at high temperature and high pressure

石榴石(Dai and Karato, 2009) : $\sigma = A \cdot \exp[-(E^* + PV^*)/RT]$, $A = A_0(1 - B \cdot P)$; $\sigma = A \cdot C_w^r \cdot \exp[-(E^* + PV^*)/RT]$							
温度(K)	压力(GPa)	$\log_{10}A(S/m)$	r	$E^*(kJ/mol)$	$V^*(cm^3/mol)$		
873 ~ 1473	4.0 ~ 16.0	$A_0 = 1036(236)$	—	128(6)	2.50(48)		
		$B = 0.044(7)$	0.63(19)	70(5)	-0.57(5)		
绿辉石(Zhang et al., 2019) : $\sigma = A \cdot X_{Fe}^n \cdot C_w^r \cdot \exp[-(\Delta E_0 - \alpha X_{Fe} - \beta C_{H_2O}^{1/3})/kT]$							
温度(K)	压力(GPa)	$\log_{10}A(S/m)$	r	n	$\alpha(eV)$	$\beta(eV)$	$-\Delta E_0(eV)$
500 ~ 1300	3.0	3.17(241)	1.10(10)	0.09(3)	0.71(5)	0.38(7)	1.05(3)
斜长石(Yang et al., 2012) : $\sigma = A \cdot \exp(-\Delta H/RT)$; $\sigma = A \cdot C_w^r \cdot \exp(-\Delta H/RT)$							
温度(K)	压力(GPa)	$\log_{10}A(S/m)$	r	$\Delta H(kJ/mol)$			
473 ~ 1273	0.6 ~ 1.2	4.12(34)	—	161(6)			
		2.49(14)	0.83(6)	77(2)			
斜方辉石(Yang et al., 2012) : $\sigma = A \cdot \exp(-\Delta H/RT)$; $\sigma = A \cdot C_w^r \cdot \exp(-\Delta H/RT)$							
温度(K)	压力(GPa)	$\log_{10}A(S/m)$	r	$\Delta H(kJ/mol)$			
473 ~ 1273	0.6 ~ 1.2	2.39(18)	—	105(3)			
		3.83(10)	0.90(4)	81(1)			
单斜辉石(Yang et al., 2011) : $\sigma = A_{Fe} \cdot \exp(-\Delta H_{Fe}/RT) + A_w \cdot C_w^r \cdot \exp(\Delta H_w/RT)$							
温度(K)	压力(GPa)	$\log_{10}A(S/m)$	r	$\Delta H(kJ/mol)$			
773 ~ 1273	1.2	2.16(27)	—	102(5)			
573 ~ 1273	0.6 ~ 1.2	3.56(10)	1.13(5)	71(1)			
石英(//c)(Wang et al., 2010) : $\sigma = A \cdot \exp(-\Delta H/RT)$							
温度(K)	压力(GPa)	$\log_{10}A(S/m)$	$\Delta H(kJ/mol)$				
855 ~ 1601	1.0 ~ 3.0	1.13(2)	63(1)				

注:式中 R 为理想气体常数, k 为玻尔兹曼常数。

Dai 和 Karato(2009)在 873 ~ 1473 K 和 4.0 ~ 16.0 GPa 的温压条件、 $10^6 \sim 10^{-2}$ Hz 的频率范围内测定了石榴石单晶

的电导率。图 6b 的实验结果表明石榴石的电导率随温度升高而增大,遵循 Arrhenius 方程。电导率随压力的升高而减

小,但降幅较小.而含水石榴石具有更高的导电性,且石榴石电导率随着水含量的增加而增加.

Liu 等(2019)使用活塞-圆筒压机在 1.0 GPa 和 623 ~ 1073 K 的温压条件和 $10^6 \sim 1$ Hz 的频率范围内,测量了含水绿辉石和石榴石的电导率.实验前后,样品水含量几乎没有变化.图 6b 的结果表明,绿辉石和石榴石的电导率均随温度的上升而升高,随含水量的增加而升高,且近似呈线性.

Zhang 等(2019)在 500 ~ 1300 K, 3.0 GPa 的温压条件和 $10^6 \sim 10^{-1}$ Hz 条件下研究了水(0.005 ~ 0.122%)和铁对绿辉石电导率的影响.实验结果表明,含水无铁绿辉石的电导率随着水含量的增加而增加,且电导率与温度的倒数呈线性关系,这意味着单一的传导机制.对于含铁绿辉石,其电导率比含水量相同的无铁绿辉石高 1 个数量级以上.含铁绿辉石的活化焓较低,这表明铁对其导电行为有很大影响.可以认为水显著提高了绿辉石的电导率,而铁通过加速 H^+ 的扩散和降低其活化焓来促进导电性.

Yang 等(2012)在 473 ~ 1273 K 的温压条件下,测定了下地壳斜长石和斜方辉石的电导率.从图 6c 中可以发现,相同压力条件下,不含水斜长石的电导率低于斜方辉石;水能显著增强电导率,水含量越大,电导率越高.干燥样品和含水样品的导电机制明显不同,干燥斜长石的导电机制可能与 Na^+ 的移动有关,干燥斜方辉石的导电机制可能与小极化子有关;含水斜长石和斜方辉石的导电机制可能与质子传导有关.

Yang 等(2011)在 523 ~ 1273 K, 1.2 GPa 的温压条件下,测量了下地壳单斜辉石的电导率,研究了单斜辉石电导率和水含量之间的关系.图 6c 的结果表明,干燥单斜辉石的电导率低于含水单斜辉石的电导率 1 ~ 2 个数量级,且随着温度的升高,两者的差值逐渐减小.对于不含水样品,主要导电机制为小极化子.对于含水样品,其传导机制是质子导电.

Wang 等(2010)在大约 855 ~ 1601 K 和 1.0 ~ 3.0 GPa 的温压条件下,对单晶石英样品的电导率进行了测量.发现石英的导电性是高度各向异性的,沿 c 轴的导电性最强,比其他方向的电导率大几个数量级.从图 6c 中可以发现,电导率随温度升高而升高,而压力对电导率的影响很小.

图 6 的结果表明,即使对同一类岩石或矿物的高温高压电性实验结果以及解释也存在一定的差异,这个差异可能是由于岩石样品中矿物含量、测量方法、氧逸度控制等因素造成的.

3 大别苏鲁造山带低速高导异常成因

关于大别苏鲁造山带低速高导的成因,目前还没有统一的解释.深入研究造山带低速高导异常的形成机制,能够帮助我们解释物探结果,并了解地球内部的物质组成、岩石矿物的物理化学性质以及造山带的演化过程.为进一步探讨大别苏鲁造山带低速高导的成因,本文在已发表数据基础上选择了几个模型,并结合大别苏鲁造山带实际的地质条件,分别考虑其合理性.

3.1 大别苏鲁造山带低速异常成因

前人得到大别苏鲁造山带的低速异常成因复杂多样,主要的机制有:含水矿物模型、部分熔融模型、各向异性模型和

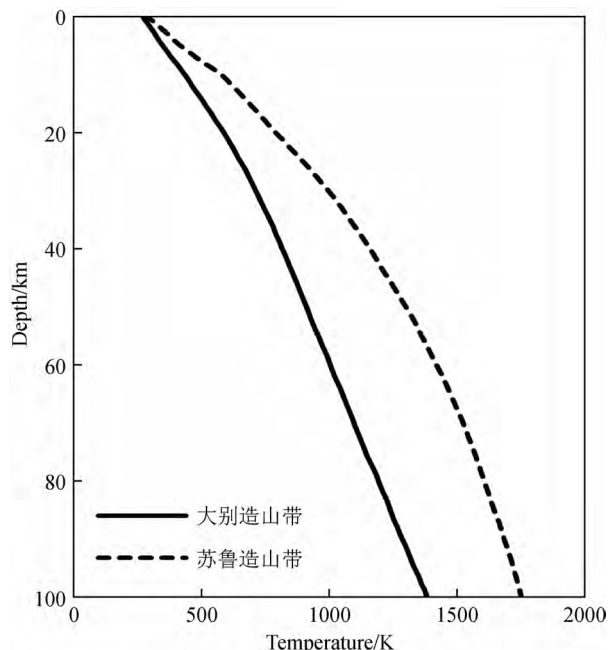


图 7 大别造山带温度随深度变化关系(Wang, 2010)与苏鲁造山带温度随深度变化关系(He *et al.*, 2009)
Fig. 7 Depth-temperature relations in the Dabie (Wang, 2010) and the Sulu orogenic belt (He *et al.*, 2009)

退变质模型等.而 α -石英的软化、铁磁矿和岩石的蛇纹石化等成因,由于满足的条件较特殊,难以解释大别苏鲁造山带普遍存在的低速异常.总之,造成低速异常的成因是多方面的,由于部分熔融模型、含水矿物模型和退变质模型等都受到地球内部温度场的控制,所以在分析其成因时,要首先考虑构造热背景(杨晓松等,2003).

收集 He 等(2009)和 Wang(2010)的地热资料,得到大别苏鲁造山带温度随深度变化关系(图 7).Wang(2010)的地热资料表明,大别造山带整体的地表热流值不高,但大别造山带与华北克拉通的交界附近仍然存在高热流值(大于 70 mW/m^2)(姜光政等,2016).此外,杨文采等(2003)计算得到苏鲁造山带地表热流值为 76 mW/m^2 ,结合图 7 的结果,可以认为苏鲁造山带具有比较高的地表热流值.

为了进一步研究岩石弹性波速以及地壳岩石的组成关系,我们将前人的高温高压波速测量结果(波速与温度、压力之间的关系)换算成波速随深度的变化关系.根据图 7 的温度模型(He *et al.*, 2009; Wang, 2010)、表 2 中岩石样品高温高压波速测量数据(吴宗絮和郭才华,1993; Kern *et al.*, 1999; 张友南和孙君秀,1999)以及表 3 的大别苏鲁造山带地壳分层模型(王椿镛等,1997;王勤等,2005),我们使用公式(1)计算了麻粒岩、片麻岩和榴辉岩等岩石样品的速度剖面,然后将速度剖面与地震反射/折射数据得出的低速异常区域进行了比较(图 8).公式(1)为

$$V(h) = V_0 + \left(\frac{dV}{dP}\right)_T P + \left(\frac{dV}{dT}\right)_P T, \quad (1)$$

式中, $V(h)$ 表示不同深度的波速, V_0 为零压的波速, $\frac{dV}{dP}$ 为压

表2 岩石样品零压波速、波速的压力和温度偏导数数据

Table 2 Zero pressure wave velocity, pressure and temperature partial derivative data of wave velocity of rock samples

样品	V_0 /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)		dV/dP (室温) /($10^{-1} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{GPa}^{-1}$)		dV/dT (0.6 GPa) /($-10^{-4} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		数据来源	
	V_{0P}	V_{0S}	dV_p/dP	dV_s/dP	dV_p/dT	dV_s/dT		
黑云母片麻岩	6.14	—	7.664	—	8.909 ^a	19.854 ^b	—	吴宗絮和郭才华,1993
麻粒岩	6.39	3.69	5.483	1.814	3.288	2.017	—	—
榴辉岩	7.68	4.55	3.799	1.758	3.627	2.525	—	Kern <i>et al.</i> , 1999
英云闪长质片麻岩	6.28	3.56	3.516	1.113	2.848	2.000	—	—
斜长角闪岩	6.75	—	1.312	—	1.756 ^c	28.594 ^d	—	—
石榴石麻粒岩	7.34	—	4.014	—	2.572 ^e	41.845 ^f	—	张友南和孙君秀,1999

注:a; dV/dT 的温度区间为318~523 K;b; dV/dT 的温度区间为523~723 K;c; dV/dT 的温度区间为室温~953 K;d; dV/dT 的温度区间为953~1275 K;e; dV/dT 的温度区间为室温~896 K;f; dV/dT 的温度区间为896~1078 K.

表3 大别苏鲁造山带地壳分层模型

Table 3 Stratification model in the crust of the Dabie-Sulu orogenic belt

大别造山带(王椿镛等,1997)		苏鲁造山带(王勤等,2005)	
深度/km	密度/(g/cm^3)	深度/km	密度/(g/cm^3)
0~2(沉积盖层)	2.48	0~5(沉积盖层)	2.72
2~9(上地壳)	2.67	5~10(上地壳)	2.77
9~18(中地壳)	2.79	10~22(中地壳)	2.86
18~26(下地壳浅部)	2.89	22~32(下地壳)	2.96
26~35(下地壳深部)	2.95	—	—

力的偏导数, $\frac{dV}{dT}$ 为温度的偏导数, $P = \rho gh$ (Kern *et al.*, 1999).

(1) 含水矿物模型

Gong等(2007)和Chen等(2011)对大别苏鲁造山带超高压变质岩中含水矿物的分析表明,角闪石的含水量约为1.9364%~3.1988%,白云母的含水量约为4.1715%~4.8507%,黑云母的含水量约为3.6586%~4.3890%,绿帘石的含水量约为1.9472%~2.1168%。虽然含水矿物在造山带深部只有很小的占比,但其较高的含水量仍然是造山带下地壳主要的储水层(陈仁旭等,2011)。

图8a、b的结果表明,使用大别造山带的热流数据,榴辉岩、麻粒岩、英云闪长片麻岩、石榴石麻粒岩和斜长角闪岩的波速都随着深度的增加变化幅度很小。而黑云母片麻岩的波速在中上地壳内缓慢下降,在中地壳约16 km处, V_p 从6.0 km/s突降至5.4 km/s。使用苏鲁造山带的热流数据,榴辉岩、麻粒岩和英云闪长片麻岩的波速都随着深度的增加而小幅变化。而黑云母片麻岩在中上地壳约9 km处 V_p 从5.9 km/s突降至5.3 km/s,形成中上地壳的低速异常;石榴石麻粒岩和斜长角闪岩分别在下地壳的27 km和24 km深处, V_p 陡降至4.1 km/s和3.9 km/s,造成下地壳的低速异常。

吴宗絮和郭才华(1993)认为黑云母片麻岩出现波速突降的现象可能是孔隙未完全闭合,进而受热膨胀造成的。此

外黑云母片麻岩中虽然存在含水矿物黑云母,但吴宗絮等(1995)的实验表明黑云母在1 GPa的压力下脱水温度为1085 K,远高于计算得到的黑云母片麻岩 V_p 陡降时的温度,因此大别苏鲁造山带中上地壳的低速异常与含水矿物黑云母的脱水无关(图8a、c)。张友南和孙君秀(1999)推测,低速异常可能源自石榴石麻粒岩和斜长角闪岩中的含水矿物。在图8c中,前人大地电磁测深得到的下地壳低速异常区也与这几个岩石波速模型相交。前人的研究表明:角闪石在1 GPa的压力下,脱水温度为1135~1163 K(吴宗絮等,1995;白利平等,2002;蒋玺等,2013),与苏鲁造山带下地壳的高温较为匹配。因此我们可以初步认为,苏鲁造山带下地壳的低速异常与含水矿物有关。因为岩石中含水矿物(如黑云母、角闪石和类沸石等)在高温高压下发生脱水熔融作用,从而导致速度降低(赵志丹等,1996;张友南和马瑾,1997;Gao *et al.*, 2000)。

对于苏鲁造山带的中上地壳存在的低速异常,杨文采等(2003)考虑到苏鲁和鲁西地区燕山期都有大规模的岩浆火山活动,该处低速异常的成因可能是因为经过高压变质的花岗质片麻岩或云英闪长岩发生了脱水作用造成,Zheng(2008)对中国大陆科学钻探工程主孔岩芯岩片的岩相学观察也证实了花岗质片麻岩中部分熔融产物的存在。

(2) 部分熔融模型

岩石在地球内部的温度接近或达到岩石的固相线时会发生部分熔融,引起岩石内部结构和成分变化,导致波速大

幅度下降(即低速异常),且波速随熔融部分的增加而呈倒数衰减.近年来的实验研究表明,即使岩石中的熔体含量不高,也能够使波速显著降低(Williams and Garnero, 1996; 杨晓松和金振民,1998;林传勇等,2001).

从大别苏鲁造山带温度与深度的变化关系(图7)中可以发现,在15~20 km的深度范围内,大别造山带中下地壳的温度可低至500 K,而苏鲁造山带中下地壳的温度高达1000 K.前文提到,斜长角闪岩和石榴石麻粒岩样品在地下壳的深度波速出现了陡降(图8c),考虑到苏鲁造山带中下地壳温度较高,中下地壳的低速异常可能与含水矿物在高温下的脱水有关.而当深度增加,温度更高时,脱出的水将促进熔融,进而使得岩石的波速大幅度降低.因此苏鲁造山带中下地壳的低速异常可能是中基性片麻岩和麻粒岩等发生部分熔融造成的.

(3) 各向异性模型

刘建华等(1995)、徐佩芬等(2000)和刘福田等(2003)认为大别造山带中地壳内的低速异常对应着地下的推覆-滑脱构造,王勤等(2005)推测苏鲁造山带地壳浅部内的低速区可能为超高压岩片折返时的韧性剪切带,而组成韧性剪切带的岩石通常表现出异常强的各向异性.各向异性的形成主要与三个因素相关,一是地壳和上地幔在演化过程中的变形机制以及流动方向(Zhang and Karato, 1995; Long and Becker, 2010).二是岩石中的矿物含量及矿物单晶的各向异性,Babuska(1981)研究发现地壳中主要造岩矿物都具有一定的各向异性,如白云母、黑云母、角闪石、单斜辉石以及石英等矿物的各向异性强度分别约为57.9%、59.7%、27.2%、20.4%以及26.5%,在构造应力的作用下这些矿物的定向排列使岩石在宏观上表现出各向异性.三是岩石中矿物定向排列形成的宏观线理和面理,地震波在平行构造面理方向上的传播速度较快,而在垂直构造面理方向上的传播速度较慢(相差可达到10%以上),可以引起速度的明显降低(杨晓松等,2003).因此我们认为大别苏鲁造山带壳内的低速异常,可能与成岩矿物(云母、角闪石、长石和辉石等)的各向异性、体积分数和定向排列有关.

(4) 退变质模型

研究表明,在折返过程中,大别超高压变质岩在中下地壳会经历角闪岩相退变质作用(钟增球等,1999).由于角闪石、斜长石、云母和石英等退变质矿物的波速远低于石榴石和辉石,角闪岩相的退变质作用可显著地降低麻粒岩、片麻岩和榴辉岩等大别苏鲁造山带中下地壳深部岩石的波速,并提高其各向异性(王勤等,2005).退变质角闪岩相的温压条件约为845~973 K、1.0 GPa(游振东等,2000),结合大别造山带温度随深度变化关系(图7),可知其在大别造山带对应深度约为43~57 km,该深度与地震学探测得到的低速异常深度不符.结合苏鲁造山带随温度变化关系(图7),在苏鲁造山带退变质作用发生的深度约为23~29 km,符合地震学探测结果.因此对于苏鲁造山带中下地壳的低速异常,可能与麻粒岩、片麻岩和榴辉岩中角闪岩相的退变质有关;而苏鲁造山带中上地壳的低速异常成因,退变质模型无法解释.

3.2 大别苏鲁造山带高导异常成因

与波速类似,总结前人的大地电磁测量结果和高温高压

电导率实验结果及成因,到目前为止,大别苏鲁造山带壳内高导异常的形成机制还是一个很有争议的问题,其成因主要有以下几种模型:含水矿物模型、部分熔融模型、高电导矿物模型、各向异性模型和名义无水矿物模型等.

我们将前人的高温高压电导率测量结果(电导率与温度、压力之间的关系)换算成电导率随深度的变化关系,进一步讨论大别苏鲁造山带高导异常的各种成因模型.根据图7的温度模型(He *et al.*, 2009; Wang, 2010)以及前人部分岩石样品高温高压电导率测量结果(含1 mol/L NaCl溶液榴辉岩、麻粒岩、黑云斜长片麻岩和花岗岩等)(柳江琳等,2001;朱茂旭等,2001;郭颖星等,2010;郭颖星等,2014),可得到这些岩石样品电导率随深度的变化关系(图9).

此外,为了验证名义无水矿物对电导率的影响,我们以榴辉岩、麻粒岩和片麻岩为例,使用Dai和Karato(2009)、Zhang等(2019)、Yang等(2012)、Yang等(2011)以及Wang等(2010)各自对石榴石、绿辉石、斜长石、斜方辉石、单斜辉石和石英等名义无水矿物高温高压电导率实验结果(具体数值见表1),结合Hashin-Shtrikman边界模型(公式(2))计算榴辉岩、麻粒岩和片麻岩模型的电导率上下限:

$$\sigma_{\text{HS}\pm} = \left[\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{\sigma_i + 2\sigma_{\text{max,min}}} \right]^{-1} - 2\sigma_{\text{max,min}}, \quad (2)$$

式中 σ_i 以及 v_i 分别对应各种矿物组分的电导率和体积含量.上式中,若使用 σ_{max} 计算,则结果为该模型电导率的上限,用 $\sigma_{\text{HS}+}$ 表示;若使用 σ_{min} 计算,则结果为该模型电导率的下限,用 $\sigma_{\text{HS}-}$ 表示(Hashin and Shtrikman, 1963).

我们假设模型中的水含量存在三种情况,即干燥不含水、0.01%和0.1%水.在榴辉岩模型中,假设石榴石和绿辉石的比例为50%:50%(采自大别苏鲁造山带上的榴辉岩样品中主要矿物为石榴石和绿辉石,且两者比例相当).在麻粒岩模型中,假设斜长石:斜方辉石:单斜辉石的比例为30%:30%:40%,忽略其他副矿物.而片麻岩中长石和石英的含量大于50%,长石含量一般大于20%(李昌年,2010),因此在片麻岩模型中,我们假设斜长石:石英的比例为60%:40%,同样也忽略其他副矿物.此外,为简化计算过程,本文不考虑氧逸度、压力效应以及晶粒大小等影响.使用公式(2)进行计算,可得到榴辉岩模型、麻粒岩模型和片麻岩模型的电导率,再分别结合大别苏鲁造山带温度随深度变化关系(图7),建立了岩石模型的电导率剖面,最后将电导率剖面与大地电磁测深数据得出的高导异常区域进行了比较(图10).

(1) 含水矿物模型

高平等(1998)、肖骑彬等(2007)、王多君等(2011)、于英杰等(2011)和郭颖星等(2014)认为高导异常与岩石中含水矿物(如黑云母、白云母和角闪石等)有关.当温压条件超过含水矿物的稳定域时,含水矿物会发生脱水反应释放出自由水,这些自由水会溶解一定量的导电离子(H^+ 、 Na^+ 、 Mg^+ 和 K^+ 等),这些离子在水中迁移速率很快,能够使岩石的电导率大幅度上升(郭新转,2016).

前文提到了大别苏鲁造山带下地壳中存在含水矿物,虽然含水矿物占比很低,但其中含水量很高.而从图9b中可以发现,使用苏鲁造山带的热结构,黑云斜长片麻岩垂直面理

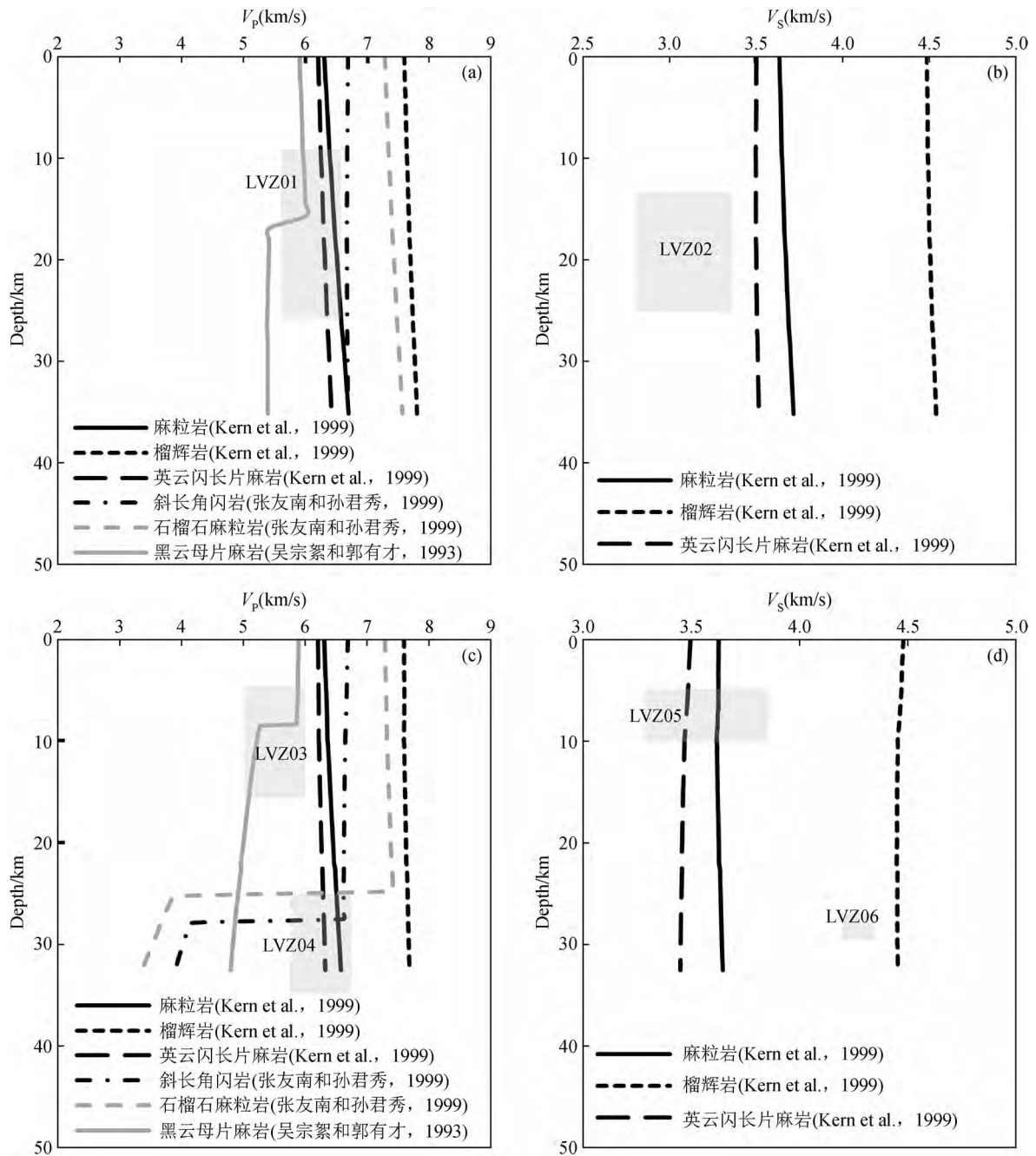


图8 实验波速结果与地震学结果的对比

使用大别造山带热结构数据计算得到岩石P波(a)与S波(b)速度,使用苏鲁造山带热结构数据计算得到岩石P波(c)与S波(d)速度;浅灰色矩形区域代表大别苏鲁造山带地震学得到的低速异常(LVZ01:王椿镛等,1997;董树文等,1998;Yang and Chen, 1998;徐佩芬等,2000;刘福田等,2003;Bai *et al.*, 2007; LVZ02:王椿镛等,1997;董树文等,1998;Liu *et al.*, 2005;LVZ03:杨文采和汪集暘,2002;杨文采等,2003;王勤等,2005;Bai *et al.*, 2007; LVZ04:杨文采等,2003;LVZ05:王勤等,2005;LVZ06:张学民等,2005).

Fig. 8 Comparisons of experimental wave velocity results and seismological results

The P-wave (a) and S-wave (b) velocities of rocks are calculated by using the thermal structure data of the Dabie orogenic belt, and the P-wave (c) and S-wave (d) velocities of rocks are calculated by using the thermal structure data of the Sulu orogenic belt. The light gray rectangular areas represent the low-velocity anomalies obtained from the seismology of the Dabie-Sulu orogenic belt (LVZ01: Wang *et al.*, 1997; Dong *et al.*, 1998; Yang and Chen, 1998; Xu *et al.*, 2000; Liu, 1998; LVZ02: Wang *et al.*, 1997; Dong *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2005; LVZ03: Yang *et al.*, 2002; Yang, 2003; Wang *et al.*, 2005; Bai *et al.*, 2007; LVZ04: Yang, 2003; LVZ05: Wang *et al.*, 2005; LVZ06: Zhang *et al.*, 2005).

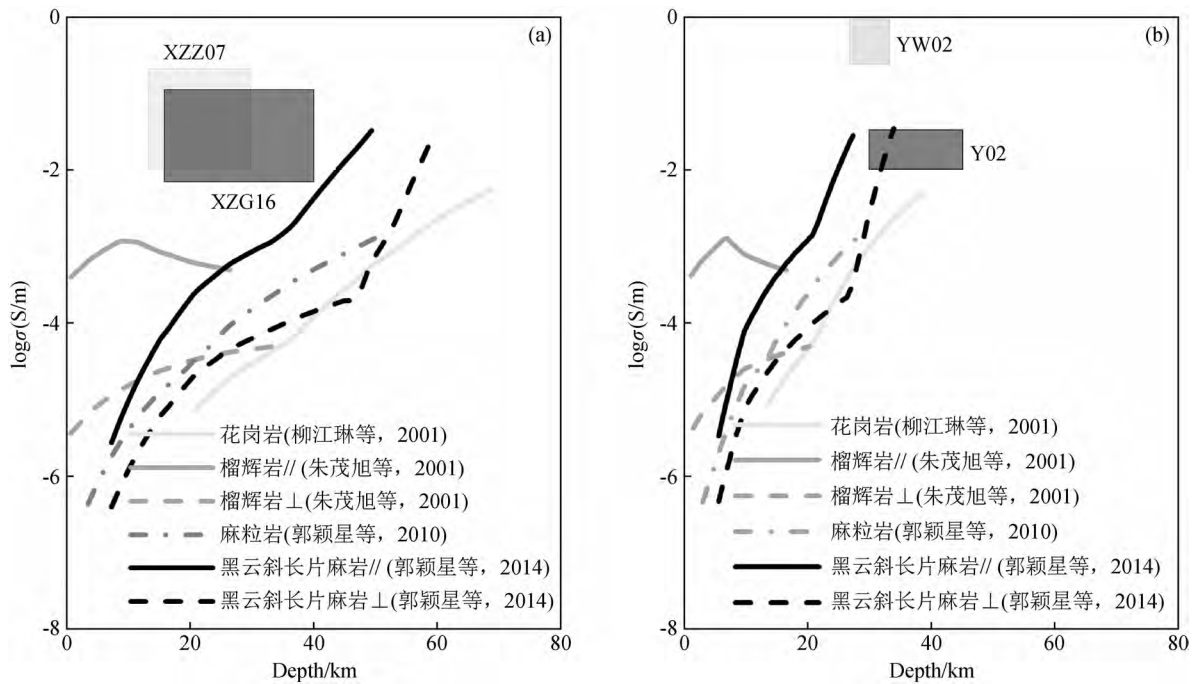


图9 实验电导率结果与大地电磁结果的对比

使用大别造山带热结构数据(a)和苏鲁造山带热结构数据(b);浅灰色和深灰色矩形区域分别代表大地电磁得到的大别造山带高导异常(a)(XZZ07:肖骑彬等,2007;XZG16: Xu *et al.*, 2016),浅灰色和深灰色矩形区域分别代表大地电磁得到的苏鲁造山带高导异常(b)(Y02: Yang, 2002; YW02: 杨文采和汪集飏,2002).

Fig.9 Comparisons of experimental conductivity results and magnetotelluric results

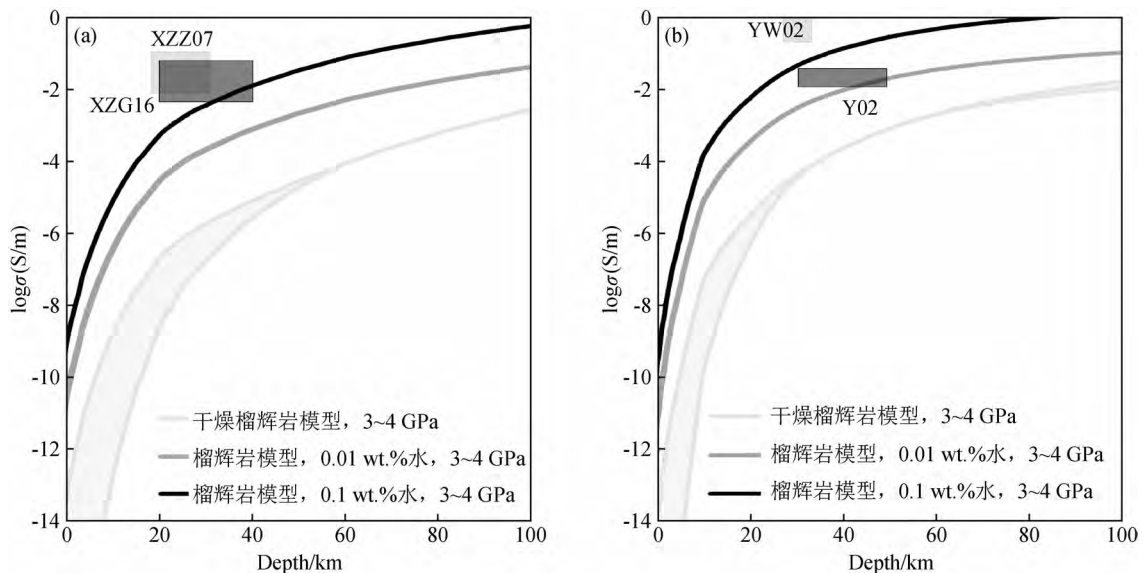
Using the thermal structure data in the Dabie (a) and the Sulu orogenic belt (b); The light gray and dark gray rectangular areas represent the high-conductivity anomalies of the Dabie orogenic belt (a) (XZZ07: Xiao *et al.*, 2007; XZG16: Xu *et al.*, 2016), while the light gray and dark gray rectangular areas represent the high-conductivity anomalies of the Sulu orogenic belt (b) (Y02: Yang, 2002; YW02: Yang and Wang, 2002).

方向的电导率在 26 km 处增速突然变大,郭颖星等(2014)推测这个突变可能与黑云母的脱水有关.随深度增加,其电导率剖面也穿过了前人大地电磁测深得到的高导区域.因此可认为具有含水矿物的岩石在高温下发生脱水,能够提高电导

率值,从而造成苏鲁造山带中下地壳的高导异常.

(2) 部分熔融模型

我们使用大别地区的热结构,图9a的结果表明,花岗岩样品约在 36 km 处有一个突变点;使用苏鲁地区的热结构,



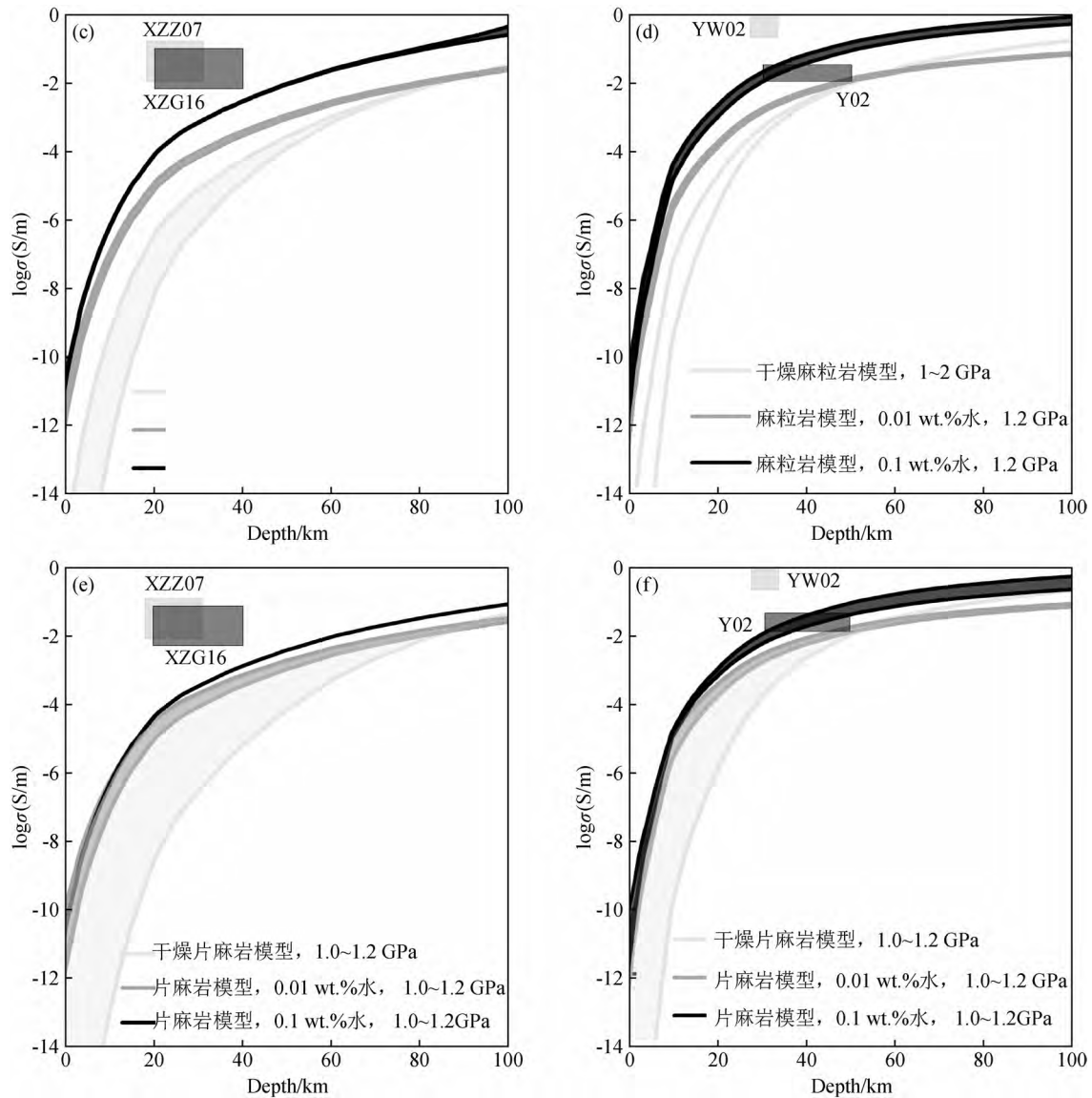


图 10 岩石模型电导率结果与大地电磁结果的对比

使用大别造山带热结构数据(a)和苏鲁造山带热结构数据(b)计算得到榴辉岩模型(Dai and Karato, 2009; Zhang *et al.*, 2019); 使用大别造山带热结构数据(c)和苏鲁造山带热结构数据(d)计算得到麻粒岩模型(Yang *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012); 使用大别造山带热结构数据(e)和苏鲁造山带热结构数据(f)计算得到片麻岩模型(Wang *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012). 浅灰色和深灰色的矩形区域代表大地电磁得到的大别造山带高导异常(a)(c)(e)(XZZ07:肖骑彬等,2007;XZG16: Xu *et al.*, 2016), 浅灰色和深灰色矩形区域代表大地电磁得到的苏鲁造山带高导异常(b)(d)(f)(Y02:Yang, 2002; YW02:杨文采和汪集昉,2002).

Fig. 10 Comparisons of conductivity of rock models and magnetotelluric results

Eclogite models are calculated by using the thermal structure data in the Dabie (a) and the Sulu orogenic belt (b) (Dai and Karato, 2009; Zhang *et al.*, 2019); Granulite models are calculated by using the thermal structure data in the Dabie (c) and the Sulu orogenic belt (d) (Yang *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012); Gneiss models are calculated by using the thermal structure data in the Dabie (e) and the Sulu orogenic belt (f) (Wang *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012). The light gray and dark gray rectangular areas represent the high-conductivity anomalies in the Dabie orogenic belt (a) (c) (e) (XZZ07: Xiao *et al.*, 2007; XZG16: Xu *et al.*, 2016), while the light gray and dark gray rectangular areas represent the high conductivity anomalies in the Sulu orogenic belt (b) (d) (f) (Y02: Yang, 2002; YW02: Yang and Wang, 2002).

其约在 21 km 处有一个突变点,白武明等(2000)认为造成电导率增速变大的原因与花岗岩的部分熔融有关。然而花岗岩样品的电导率总是小于物探得到的高导异常值,因此我们认为在大别苏鲁造山带的中下地壳,花岗岩含量较少。图 9 的

结果还表明,郭颖星等(2010)的麻粒岩电导率结果也始终要小于大地电磁测深得到的高导异常结果 1~2 个数量级。我们认为干燥的麻粒岩并不能解释大别苏鲁造山带中下地壳内的高导异常,但该麻粒岩电导率计算结果只是其电导率

值的下限,当有水的存在,熔融有可能发生,从而提高整体电导率.前文提到,黑云斜长片麻岩垂直面理方向在苏鲁造山带下地壳的温度条件下,黑云母发生脱水作用,而脱出的水促进了岩石的部分熔融,使得电导率进一步增加,造成高导异常.

前人的研究也表明,电导率为 3 S/m 的熔体若要造成 0.1 S/m 的高导异常,至少需要有 5% 的熔体分数,但 S 波和瑞利波的速度变化表明大多数低速异常(通常也是高导异常)内的熔体分数为 1%~2%,远不能满足高导异常所需的熔体体积.且如此多的熔体在下地壳内难以长时间稳定存在,也不能解释电导率的高向异性(Forsyth *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2003; 杨晓志, 2006, 2014).

(3) 高电导矿物模型

Luo 等(2011)和 Xu 等(2016)认为大别苏鲁造山带中下地壳的高导异常与富含高电导率矿物(如石墨、金属硫化物等)有关.石墨具有很强的导电性,在温度为 773 K 时其电导率可达 $10^4 \sim 10^5$ S/m,因此只需要极少量的石墨就可以产生高导异常.但是,这一小部分也意味着石墨间的相互连通也很重要,这种情况往往出现在沉积变质岩中,而在大别苏鲁造山带内广泛存在的结晶基底中并不常见,并且石墨在下地壳较高的氧逸度条件下也难以稳定存在(Hyndman *et al.*, 1993; McCammon, 2005; Frost and McCammon, 2008; 金胜等, 2010a).金属硫化物(如铁与铜的硫化物)规模有限,常常出现在离散分布的矿体内,其产生的高导异常分布范围也很有限(金胜等, 2010a).因此我们认为石墨和金属硫化物等高导相不能解释研究区域内普遍存在的高导异常.

(4) 各向异性模型

王斌和宋子堂(1993)、董树文等(1993)和王椿镛等(1995)认为大别苏鲁造山带存在的高导异常可能为壳内的推覆-滑脱构造.其中的韧性剪切带发育有透入性糜棱面理和矿物拉伸线理,糜棱岩中的矿物在韧性剪切作用下,产生塑性流变,变形过程中显示出明显的定向排列,因此在特定的方向上,岩石表现出高导异常(高平等, 1998; 李德威和王家映, 2001).

图 9 中榴辉岩和黑云斜长片麻岩的计算结果都表明:岩石的导电性具有各向异性,其中榴辉岩平行面理方向的电导率高于垂直面理方向的电导率;黑云斜长片麻岩垂直面理方向的电导率高于平行面理方向的电导率,且在苏鲁下地壳的温度条件下与物探高导异常区域相交,因此电导率的高向异性也能够一定程度上解释高导异常.

(5) 含盐流体模型

肖骑彬等(2007)认为大别山高导异常可能与超临界状态下含盐流体的富集有关,Huang 等(2019)最近的地球化学研究也表明,俯冲带的流体中,NaCl 是重要的组成部分.从图 9 中,我们可以发现无论使用大别还是苏鲁地下热结构数据,得到的结果都表明,1 mol/L NaCl 溶液饱和榴辉岩的电导率最大值 10^{-3} S/m 仍比大别苏鲁造山带 20~45 km 深处的高导异常值低 1~2 个数量级.Yardley 和 Valley(1997)、林传勇等(2001)分析认为,在下地壳的环境中含盐流体由于重力不稳定,不可能长时间保持稳定的相互连接状态,而流体也会与下地壳矿物发生退变质反应而被大量消耗,因此不

可能有较高的含量.此外,含盐流体的富集需要满足低孔隙度的条件(否则流体将在地质时间尺度内不断渗透减少直至耗尽),但是大地电磁测深结果表明大别苏鲁造山带地下广泛存在高导异常,这又要求含盐流体需要高孔隙度来相互连通(Hyndman and Shearer, 1989; Hyndman *et al.*, 1993).前后矛盾也表明,含盐流体模型不太可能成立.

(6) 名义无水矿物模型

Dai 等(2016)认为在高温高压的区域变质作用条件下,榴辉岩通常与麻粒岩相岩石共存,榴辉岩可与麻粒岩可一起解释地壳深部的高导异常,但前人对采自该区域的榴辉岩和麻粒岩天然样品进行了大量高温高压电导率实验,并未观测到高导异常.近年来水含量研究发现,几乎所有的名义无水矿物中都可以含有一定量的 H_2O ,以 OH^- 或者 H^+ 的形式存在在矿物晶格缺陷中,统称为结构水(Rossmann, 1996).Karato(1990)发现少量的结构水就能极大地提高橄榄石的电导率,因此榴辉岩、麻粒岩以及片麻岩中的名义上无水矿物的水也可以提高岩石的电导率.盛英明等(2005)对采自大别山(包括南大别和北大别)几个典型产地的榴辉岩中的石榴石进行了红外光谱(FTIR)分析,结果显示所有石榴石样品都含有一定量的结构水,最高可达 0.1859%.蒋素会等(2020)研究发现榴辉岩的组成矿物中,石榴石和绿辉石都含有一定量的水.麻粒岩和片麻岩是中下地壳的主要岩石类型,其成岩矿物主要为斜长石、斜方辉石、单斜辉石和石英等名义上无水矿物.杨晓志等(2005)对麻粒岩包体中斜长石、斜方辉石和单斜辉石的研究发现,这些名义上无水矿物的水含量分别可以高达 0.091%、0.159% 和 0.234%.

我们使用大别造山带的热流数据,计算得到的榴辉岩模型、麻粒岩模型和片麻岩模型电导率深度剖面如图 10a、c、e 所示.发现除了含 0.1% 水的榴辉岩模型外,其余模型的电导率值都未与前人得到的大别高导异常区域相交,因此可认为大别造山带中下地壳存在的高导异常与名义无水矿物关系不大.使用苏鲁造山带的热流数据,计算得到的榴辉岩模型、麻粒岩模型和片麻岩模型电导率深度剖面如图 10b、d、f 所示.发现不含水榴辉岩、麻粒岩和片麻岩模型都未能与物探得到的高导异常区域相交,而其余含水的岩石模型电导率都穿过了高导异常区.我们初步认为在苏鲁造山带更高的地表热流条件下,下地壳的榴辉岩、麻粒岩和片麻岩中名义上无水矿物中的结构水能够解释高导异常现象.

4 结论与展望

利用地震学和大地电磁测深的方法,前人在大别苏鲁造山带发现了低速异常(V_p 为 5.7~6.1 km/s, V_s 为 2.8~3.4 km/s)和高导异常(电导率高达 0.1 S/m)的存在.为了解释地球物理观测到的异常成因,前人进行了一系列的高温高压物性研究,测量了采自大别苏鲁造山带及周边地区矿物岩石样品的波速和电导率.前人研究认为引起低速异常的成因主要有:含水矿物模型、部分熔融模型、各向异性模型以及退变质模型等;而造成高导异常的成因主要有:含水矿物模型、部分熔融模型、高电导矿物模型、各向异性模型以及名义无水矿物模型等.

大别造山带地下的低速异常主要存在于 10~25 km 的

深度范围内,而高导异常主要集中在15~30 km的深度范围内,两者并不完全重叠.大别造山带地表热流值不高,其低速高导异常可能与韧性剪切带中各向异性的成岩矿物有关.而对于一些局部高热流集中地区,低速高导异常可能与含水矿物的脱水及部分熔融作用有关.

苏鲁造山带中上地壳3~15 km和下地壳26~35 km都有低速异常的存在,高导异常主要存在于下地壳20~33 km处.苏鲁造山带的中上地壳内没有观测到高导异常,该处低速异常的成因推测为含水矿物发生了脱水和部分熔融作用.此外,苏鲁造山带超高压岩片折返时,韧性剪切带中波速各向异性较大的成岩矿物也可能是造成中上地壳存在低速异常的原因.由于苏鲁造山带地下温度普遍较高,我们认为其下地壳的低速异常很可能与榴辉岩、麻粒岩和片麻岩等高压变质岩中角闪岩相的退变质作用有关.下地壳的高导异常可能为含水矿物发生脱水作用所致,榴辉岩、麻粒岩和片麻岩中名义无水矿物所含的结构水也在一定程度上提高了下地壳整体的电导率.

总体而言,单一模型难以很好解释大别苏鲁造山带低速高导异常的成因,对于其复杂的地质构造环境,还需要具体情况具体分析,并同时考虑多个模型共同作用的可能性.

经过多年的研究,前人对大别苏鲁造山带低速高导异常成因的研究已经有了显著的进展,本文也对前人的研究成果进行了详细地梳理,但仍然存在一些不足:

(1)本文中研究的低速和高导异常多集中在纵向上,缺少大别苏鲁造山带横向低速高导异常的总结.

(2)目前为止,在大别苏鲁造山带,对同一区域进行的物探和高温高压实验较少,实验的结果及解释还有待深入分析.

(3)总结前人的实验,发现不同研究团队间的结果差异较大.这可能与温压条件、样品组装方式以及数据处理方法等不同有关.

(4)在结合热流数据对成因进行解释时,使用的大别苏鲁造山带大地热流数据过于笼统,没有针对特定区域具体讨论.

(5)对研究区域内的低速高导异常成因进行解释时,往往只考虑单一模型,没有分析多种模型共同作用的可能性.

在今后的工作中,可以补充大别苏鲁造山带各区域横向的低速高导异常分析,增加对同一剖面的地球物理探测和高温高压物性研究.还需要深入分析不同研究团队得到实验结果存在差异的原因,这对下一步的工作具有重要意义.此外,温度对低速高导异常的形成有重要的影响和控制作用,所以在接下来的对低速高导异常成因的研究工作中,温度因素要具体位置具体分析.在计算岩石波速、电导率时,可考虑增加参数用以约束模型,使得出的结论更加准确.最后,在解释异常成因时,要多角度去思考不同成因的可能性,不应拘泥于一种思路.

我们应当认识到,研究大别苏鲁造山带低速高导异常,可以帮助人们更好地理解低速高导异常与各种地质作用的关系以及对地球物理场的影响,同时深化人们对深部地质作用发生和发展过程的认识(杨晓松和金振民,1998).

致谢 感谢两位匿名评审专家提出的宝贵意见和编辑部的大力支持!

References

- Anderson D L. 2005. Large igneous provinces, delamination, and fertile mantle [J]. *Elements*, 1(5): 271-275, doi: 10.2113/gselements.1.5.271.
- Babuska V. 1981. Anisotropy of V_p and V_s in rock-forming minerals [J]. *Journal of Geophysics*, 50(1): 1-6.
- Bai L P, Du J G, Liu W, *et al.* 2002. Experimental studies of electrical conductivities and P-wave velocities of gabbro at high pressures and high temperatures [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences (in Chinese)*, 32(11): 959-968, doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2002.11.011.
- Bai W M, Ma M N, Liu J L. 2000. Testing study on elastic wave velocities and electrical conductivity of crustal rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese)*, 19(Supplement): 899-904.
- Bai Z M, Zhang Z J, Wang Y H. 2007. Crustal structure across the Dabie-Sulu orogenic belt revealed by seismic velocity profiles [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4(4): 436-442, doi: 10.1088/1742-2132/4/4/009.
- Chen R X, Zheng Y F, Gong B. 2011. Fluid activity in continental subduction zones: Insights from stable isotopes and water contents in minerals from ultrahigh-pressure metamorphic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 27(2): 451-468.
- Chen R X, Zheng Y F, Gong B. 2011. Mineral hydrogen isotopes and water contents in ultrahigh-pressure metabasite and metagranite: constraints on fluid flow during continental subduction-zone metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 281(1-2): 103-124, doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.12.002.
- Dai L D, Hu H Y, Li H P, *et al.* 2016. Influence of temperature, pressure, and oxygen fugacity on the electrical conductivity of dry eclogite, and geophysical implications [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(6): 2394-2407, doi: 10.1002/2016GC006282.
- Dai L D, Karato S. 2009. Electrical conductivity of pyrope-rich garnet at high temperature and high pressure [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 176(1-2): 83-88, doi: 10.1016/j.pepi.2009.04.002.
- Dong S W, Sun X Z, Zhang Y, *et al.* 1993. The basic structure of Dabie collisional orogen [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 38(6): 542-545.
- Dong S W, W X Z, Gao R, *et al.* 1998. On the crust velocity levels and dynamics of the Dabieshan orogenic belt [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 41(3): 349-361.
- Forsyth D W, Scheirer D S, Webb S C, *et al.* 1998. Imaging the deep seismic structure beneath a mid-ocean ridge: the MELT experiment [J]. *Science*, 280(5367): 1215-1218, doi: 10.1126/science.280.5367.1215.
- Frost D J, McCammon C A. 2008. The redox state of Earth's mantle [J]. *Annual Review of Earth and Planet Sciences*, 36: 389-420, doi: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124322.
- Gao P, Yang P Y, Li Y J. 1998. Experimental study on the electrical conductivity under high pressure and high temperature for the crust-mantle rocks in Qinling-Dabie mountain [J]. *Scientia Geologica Sinica (in Chinese)*, 33(2): 195-203.
- Gao S, Jin Z M, Kern H, *et al.* 1997. Preliminary experimental study of seismic velocity and density at high temperature and high pressure on ultrahigh-pressure eclogite from Dabie Implications to the composition of the crustal and the Moho's characteristics in orogeny [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 42(8): 862-866, doi: 10.1360/csb1997-42-8-862.

- Gao S, Kern H, Liu Y S, *et al.* 2000. Measured and calculated seismic velocities and densities for granulites from xenolith occurrences and adjacent exposed lower crustal sections: A comparative study from the North China craton [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105 (B8): 18965-18976, doi: 10.1029/2000JB900100.
- Gong B, Zheng Y F, Chen R X. 2007. TC/EA-MS online determination of hydrogen isotope composition and water concentration in eclogitic garnet [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 34(10): 687-698, doi: 10.1007/s00269-007-0184-4.
- Guo X Z. 2016. Experimental study of the electrical conductivity of the hydrous minerals in the crust and the mantle under high pressure and high temperature [J]. *Science China: Earth Sciences (in Chinese)*, 46(3): 301-312, doi: 10.1360/N072015-00342.
- Guo Y X, Wang D J, Li D Y, *et al.* 2014. Electrical conductivity of biotite-plagioclase gneiss at high temperature and high pressure [J]. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 36(3): 907-917, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.03.027.
- Guo Y X, Wang D J, Li H P, *et al.* 2010. The electrical conductivity of granulite at high temperature and high pressure [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 53(11): 2681-2687, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.015.
- Gupta H K, Sarma S V S, Harinarayana T, *et al.* 1996. Fluids below the hypocentral region of Latur earthquake, India: Geophysical indicators [J]. *Geophysical Research Letters*, 23(13): 1569-1572, doi: 10.1029/96GL01032.
- Hashin Z, Shtrikman S. 1963. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11(2): 127-140, doi: 10.1016/0022-5096(63)90060-7.
- He L J, Hu S B, Yang W C, *et al.* 2009. Radiogenic heat production in the lithosphere of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3-4): 525-538, doi: 10.1016/j.epsl.2008.11.022.
- Huang Y, Nakatani T, Nakamura M, *et al.* 2019. Saline aqueous fluid circulation in mantle wedge inferred from olivine wetting properties [J]. *Nature Communications*, 10(1): 1-10, doi: 10.1038/s41467-019-13513-7.
- Hyndman R D, Shearer P M. 1989. Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results [J]. *Geophysical Journal International*, 98(2): 343-365, doi: 10.1111/j.1365-246X.1989.tb03357.x.
- Hyndman R D, Vanyan L L, Marquis G, *et al.* 1993. The origin of electrically conductive lower continental crust: saline water or graphite? [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 81(1-4): 325-345, doi: 10.1016/0031-9201(93)90139-Z.
- Ji S C, Saruwatari K, Mainprice D, *et al.* 2003. Microstructures, petrofabrics and seismic properties of ultra high-pressure eclogites from Sulu region, China: implications for rheology of subducted continental crust and origin of mantle reflections. [J] *Tectonophysics*, 370(1-4): 49-76, doi: 10.1016/S0040-1951(03)00177-X.
- Ji S C, Wang Q, Xia B. 2002. Handbook of seismic properties of minerals, rocks and ores [M]. Montreal: Polytechnic International Press.
- Jiang G Z, Gao P, Rao S, *et al.* 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. *Chinese Journal Of Geophysics (in Chinese)*, 59(8): 2892-2910, doi: 10.6038/cjg20160815.
- Jiang S H, Wang Z M, Chen R X, *et al.* 2020. Water of garnet in eclogite from Jinheqiao area in the Dabie orogen [J]. *Earth Science (in Chinese)*, 45(4): 1168-1186, doi: 10.3799/dqkx.2019.132.
- Jiang X, An B, Tang B, *et al.* 2013. P-wave velocities of partially molten bojiite at pressures of 0.6 ~ 2.0 GPa [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica (in Chinese)*, 32(4): 505-514.
- Jin S, Wen W B, Wang S, *et al.* 2010a. Discussion of the formation and dynamic signification of the high conductive layer in Tibetan crust [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 53(10): 2376-2385, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.011.
- Jin S, Zhang L T, Wei W B, *et al.* 2010b. Magnetotelluric method for deep detection of Chinese continent [J]. *Acta Geologica Sinica (in Chinese)*, 84(6): 809-817.
- Karato S. 1990. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle [J]. *Nature*, 347: 272-273, doi: 10.1038/347272a0.
- Kern H, Gao S, Jin Z M, *et al.* 1999. Petrophysical studies on rocks from the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, Central China: implications for the composition and delamination of the lower crust [J]. *Tectonophysics*, 301(3-4): 191-215, doi: 10.1016/S0040-1951(98)00268-6.
- Li C N. 2010. Concise Petrology (in Chinese) [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press.
- Li D W, Wang J Y. 2001. Geophysical anomaly of continental lower crust and its tectonic significance [J]. *Geological Science and Technological Information (in Chinese)*, 20(3): 11-20.
- Li P, Guo X Z, Chen S B, *et al.* 2018. Electrical conductivity of the plagioclase-NaCl-water system and its implication for the high conductivity anomalies in the mid-lower crust of Tibet Plateau [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 173(2): 16, doi: 10.1007/s00410-018-1442-9.
- Li S H, Unsworth M J, Booker J R, *et al.* 2003. Partial melt or aqueous fluid in the mid-crust of Southern Tibet? Constraints from INDEPTH magnetotelluric data [J]. *Geophysical Journal International*, 153(2): 289-304, doi: 10.1046/j.1365-246X.2003.01850.x.
- Lin C Y, Zhang Y N, Shi L B, *et al.* 2001. Measurements of elastic wave velocity of lower crustal xenoliths and their geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica (in Chinese)*, 75(2): 277-285.
- Liu F T, Xu P F, Liu J S, *et al.* 2003. The crustal velocity structure of the continental deep subduction belt: study on the eastern Dabie orogen by seismic wide-angle reflection / refraction [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 46(3): 366-372.
- Liu H Y, Zhu Q, Yang X Z. 2019. Electrical conductivity of OH-bearing omphacite and garnet in eclogite: the quantitative dependence on water content [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174(7): 57, doi: 10.1007/s00410-019-1593-3.
- Liu J H, Liu F T, Sun R M, *et al.* 1995. Seismic tomography beneath the Qinling-Dabie orogenic belts and both the northern and southern fringes [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 38(1): 46-54.
- Liu J L, Bai W M, Kong X R, *et al.* 2001. Electrical conductivity of granite, basalt and pyroxene peridotite under high temperature high pressure conditions [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 44(4): 528-533.
- Liu Q Y, Kind R, Chen J H, *et al.* 2005. Dislocation structure of the crust-mantle boundary and low-velocity body within the crust beneath the Dabie Shan collision orogen [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(7): 875-885, doi: 10.1360/04yd0360.
- Long M D, Becker T W. 2010. Mantle dynamics and seismic anisotropy [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3-4): 341-354, doi: 10.1016/j.epsl.2010.06.036.
- Luo M, Pan H P, Zhao Y G. 2011. Resistivity logs of the Chinese Continental Scientific Drilling main hole: Implication for the crustal electrical structure of Dabie-Sulu Terrane, Central-Eastern China [J]. *Journal of Earth Science*, 22(2): 292-298, doi: 10.1007/s12583-011-0182-9.
- Ma M N, Bai W M. 1999. Progress of high temperature and pressure study on elastic wave velocity and its geodynamical implications [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 14(1): 40-55.
- McCammon C. 2005. The paradox of mantle redox [J]. *Science*, 308

- (5723): 807-808, doi: 10.1126/science.1110532.
- Ocola L C, Meyer R P. 1972. Crustal low-velocity zones under the Peru-Bolivia Altiplano [J]. *Geophysical Journal International*, 30(2): 199-208, doi: 10.1111/j.1365-246X.1972.tb02353.x.
- Pavlenkova N I. 2004. Low velocity and low electrical resistivity layers in the middle crust [J]. *Annals of geophysics*, 47(1): 157-169, doi: 10.4401/ag-3268.
- Rossmann G R. 1996. Studies of OH in nominally anhydrous minerals [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 23(4-5): 299-304, doi: 10.1007/BF00207777.
- Sheng Y M, Xia Q K, Ding Q, et al. 2005. Water in garnets from Dabieshan eclogites; FTIR analysis [J]. *Acta Mineralogica Sinica (in Chinese)*, 25(4): 334-340.
- Song M S, Xie H S, Zheng H F, et al. 1996. P-wave velocities of main upper mantle minerals at high temperature and high pressure and its geological implication [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences (in Chinese)*, 26(2): 173-178, doi: 10.1360/zd1996-26-2-173.
- Tang H F, Liu C Q, Nakai S, et al. 2007. Geochemistry of eclogites from the Dabie-Sulu terrane, eastern China: new insights into protoliths and trace element behaviour during UHP metamorphism. *Lithos* [J]. 95(3-4): 441-457, doi: 10.1016/j.lithos.2006.09.007.
- Vanyan L L, Gliko A O. 1999. Seismic and electromagnetic evidence of dehydration as a free water source in the reactivated crust [J]. *Geophysical Journal International*, 137(1): 159-162, doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00767.x.
- Wang B, Song Z T. 1993. Geological interpretation of magnetotelluric sounding data from south margin of the North China basin and the genesis approach of the Dabieshan nappe [J]. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 28(3): 333-338.
- Wang C Y, Ding Z F, Song J L, et al. 1997. Shear wave velocity structure in Dabieshan orogenic belt [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 40(3): 337-346.
- Wang C Y, Lin Z Y, Chen X B. 1995. Comprehensive study of geophysics on geoscience transect from Menyuan, Qinghai Province, to Ningde, Fujian Province, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 38(5): 590-598.
- Wang D J, Li H P, Yi L, et al. 2010. Anisotropy of synthetic quartz electrical conductivity at high pressure and temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B9): 9211, doi: 10.1029/2009JB006695.
- Wang D J, Yu Y J, Guo Y X, et al. 2011. Laboratory derived constraints on electrical conductivity in the earth's interior [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry (in Chinese)*, 2011, 30(1): 40-45.
- Wang Q. 2010. A review of water contents and ductile deformation mechanisms of olivine; implications for the lithosphere-asthenosphere boundary of continents [J]. *Lithos*, 120(1-2): 30-41, doi: 10.1016/j.lithos.2010.05.010.
- Wang Q, Ji S C, Xu Z Q, et al. 2005. Seismic properties of eclogites: implications on crustal composition and exhumation mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 21(2): 451-464.
- Williams Q, Garnero E J. 1996. Seismic evidence for partial melt at the base of Earth's mantle [J]. *Science*, 273(5281): 1528-1530, doi: 10.1126/science.273.5281.1528.
- Wu P P, Ding Z F, Ma X J, et al. 2015. Rayleigh wave group velocity tomography beneath Dabie-Sulu and its adjacent areas from ambient seismic noise [J]. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 37(2): 218-229, doi: 10.11939/jass.2015.02.002.
- Wu Z X, Deng J F, Wyllie P J, et al. 1995. Dehydration-melting experiment of the biotite-gneiss, Eastern Hebei, at 1 GPa pressure [J]. *Scientia Geologica Sinica (in Chinese)*, 30(1): 12-18.
- Wu Z X, Guo C H. 1993. Experimental measurement of V_p on the crust rocks of East Hebei Province at high temperature and pressure [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 8(4): 206-213.
- Xiao Q B, Zhao G Z, Wang J J, et al. 2008. Deep Electrical Structure of the Sulu Orogen and Neighboring Areas. *Science in China Series D: Earth Sciences (in Chinese)*, 38(10): 1258-1267, doi: 10.1360/zd2008-38-10-1258.
- Xiao Q B, Zhao G Z, Zhan Y, et al. 2007. A preliminary study on electrical structure and dynamics of the ultra-high pressure metamorphic belt beneath the Dabie Mountains [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 50(3): 812-822, doi: 10.1002/cjg2.1085.
- Xu P F, Liu F T, Wang Q C, et al. 2000. Seismic tomography beneath the Dabie-Sulu collision orogen—3-D velocity structures of lithosphere [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 43(3): 377-385, doi: 10.1002/cjg2.50.
- Xu Y X. 1995. Review of the mechanism of the high conduction layers in middle of lower continental crust [J]. *Geological Science and Technology Information (in Chinese)*, 14(3): 15-22.
- Xu Y X, Zhang S, Griffin W L, et al. 2016. How did the Dabie Orogen collapse? Insights from 3-D magnetotelluric imaging of profile data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(7): 5169-5185, doi: 10.1002/2015JB012717.
- Yang W C. 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, eastern China [J]. *Tectonophysics*, 354(3-4): 277-288, doi: 10.1016/S0040-1951(02)00386-4.
- Yang W C, Chen Z Y. 1998. Crustal structure and development of the Dabie UHPM terrane in East-Central China [J]. *Continental Dynamics*, 3(1-2): 86-95.
- Yang W C, Chen Z Y, Chen G J, et al. 1999. Geophysical investigations in Northern Sulu UHPM belt, part I: deep seismic reflection [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 42(1): 41-52.
- Yang W C, Wang J Y. 2002. Geophysical evidences for magmatic underplating in the Sulu area, East China [J]. *Acta Geologica Sinica (in Chinese)*, 76(2): 173-179.
- Yang W C, Xu J R, Cheng Z Y, et al. 2003. Regional geophysics and crust mantle interaction in Sulu Dabie orogenic belt [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Yang W C, Yang W Y, Jin Z M, et al. 2004. Lithospheric seismic fabrics of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences (in Chinese)*, 34(4): 307-319, doi: 10.1360/zd2004-34-4-307.
- Yang X S, Jin Z M. 1998. The low velocity zone resulted from crustal partial melting and its significance [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 13(3): 38-45.
- Yang X S, Ma J, Zhang X J. 2003. Summarization of genesis of low-velocity layer in continental crust [J]. *Geological Science and Technology Information (in Chinese)*, 22(2): 35-41.
- Yang X Z. 2014. Electrical petrology: principles, methods and advances [J]. *Science China: Earth Sciences (in Chinese)*, 44(9): 1884-1900, doi: 10.1360/zd-2014-44-9-1884.
- Yang X Z, Keppler H, McCammon C, et al. 2011. Effect of water on the electrical conductivity of lower crustal clinopyroxene [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B4): 4208, doi: 10.1029/2010JB008010.
- Yang X Z, Keppler H, McCammon C, et al. 2012. Electrical conductivity of orthopyroxene and plagioclase in the lower crust [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(1): 33-48, doi: 10.1007/s00410-011-0657-9.
- Yang X Z, Xia Q K, Sheng Y M, et al. 2005. Structural water in lower crustal granulite xenoliths from Nushan volcano; Micro-FTIR investigations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1669-1676.
- Yang X Z, Xia Q K, Yu H M, et al. 2006. The possible effect of hydrogen on the high electrical conductivity in the lower continental crust [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 21(1): 31-

- 38, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2006.01.0031.
- Yardley B W D, Valley J W. 1997. The petrologic case for a dry lower crust [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B6): 12173-12185, doi: 10.1029/97JB00508.
- You Z D, Suo S T, Zhong Z Q, et al. 2000. Retrogressive microstructures in high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie Mountains: enlightenment to the exhumation process [J]. *Acta Geologica Sinica (in Chinese)*, 74(3): 224-233.
- Yu Y J, Wang D J, Guo Y X, et al. 2011. The electrical conductivity of amphibole-bearing gneiss at high temperature and high pressure [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 54(3): 764-770, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.016.
- Zhang B H, Zhao C C, Ge J H, et al. 2019. Electrical conductivity of omphacite as a function of water content and implications for high conductivity anomalies in the Dabie-Sulu UHPM belts and Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12): 1-14, doi: 10.1029/2019JB018826.
- Zhang B R, Zhang H F, Gao S. 2004. Rock constitution of various structural layers of the present crust in the Dabie orogenic belt, central China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry (in Chinese)*, 23(3): 185-193.
- Zhang S Q, Karato S. 1995. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear [J]. *Nature*, 375(6534): 774-777, doi: 10.1038/375774a0.
- Zhang X M, Diao G L, Su P Y, et al. 2005. Study on shear wave velocity structure beneath Jiangsu and Shandong Province and its relationship to earthquakes [J]. *Northwestern Seismological Journal (in Chinese)*, 27(2): 101-108.
- Zhang Y N, Ma J. 1997. Investigation on compressional wave velocities of mafic rocks in deep crust [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 40(2): 221-230.
- Zhang Y N, Sun J X. 1999. Characters of wave velocity and constitution structure of rocks of the craton crust in north part of China [J]. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 21(2): 147-155.
- Zhao Z D, Gao S, Luo T C, et al. 1996. Origin of the crustal low velocity layer of Qinling and North China—evidence from laboratory measurement of P-wave velocity in rocks at high PT conditions [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 39(5): 642-652.
- Zhao Z D, Xie H S, Zhou W G, et al. 2001. Rock high pressure flexibility velocity and its restrict for the lithosphere compose and crust-mantle circulation in Dabie mountainous country area [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 11(1): 52-57.
- Zhao Z X, Xu J R, Xu Z Q. 2004. 3-D S wave velocity structure in the upper mantle and the mechanism investigation for the ultrahigh-pressure metamorphosed belt in the Dabie-Sulu region [J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 20(1): 157-164.
- Zheng Y F. 2008. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(20): 3081-3104, doi: 10.1007/s11434-008-0388-0.
- Zhong Z Q, Zhang H F, Suo S T, et al. 1999. Partial melting in exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks, Dabieshan Mountains, China [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences (in Chinese)*, 24(4): 393-399.
- Zhu M X, Xie H S, Zhao Z D, et al. 2001. Experimental studies on electrical conductivity of the Dabie Ultrahigh-pressure eclogites at high pressures and high temperatures [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 44(1): 93-102.
- 968, doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2002.11.011.
- 白武明, 马麦宁, 柳江琳. 2000. 地壳岩石波速和电导率实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 19(增刊): 899-904.
- 陈仁旭, 郑永飞, 龚冰. 2011. 大陆俯冲带流体活动: 超高压变质岩矿物水含量和稳定同位素制约 [J]. *岩石学报*, 27(2): 451-468.
- 董树文, 孙先如, 张勇, 等. 1993. 大别山碰撞造山带基本结构 [J]. *科学通报*, 38(6): 542-545.
- 董树文, 吴宣志, 高锐, 等. 1998. 大别造山带地壳速度结构与动力学 [J]. *地球物理学报*, 41(3): 349-361.
- 高平, 杨僻元, 李艳军. 1998. 秦岭-大别山壳幔岩石高温高压下的电性特征 [J]. *地质科学*, 33(2): 195-203.
- 高山, 金振民, 金淑燕, 等. 1997. 大别超高压榴辉岩高温高压下地震波速和密度的初步实验研究——对造山带地壳深部组成和莫霍面性质的启示 [J]. *科学通报*, 42(8): 862-866, doi: 10.1360/csb1997-42-8-862.
- 郭新转. 2016. 高温高压下壳幔含水矿物电导率实验研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 46(3): 301-312, doi: 10.1360/N072015-00342.
- 郭颖星, 王多君, 李丹阳, 等. 2014. 黑云斜长片麻岩电导率研究 [J]. *地震地质*, 36(3): 907-917, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.03.027.
- 郭颖星, 王多君, 李和平, 等. 2010. 高温高压下麻粒岩电导率研究 [J]. *地球物理学报*, 53(11): 2681-2687, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.015.
- 姜光政, 高翔, 饶松, 等. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第四版) [J]. *地球物理学报*, 59(8): 2892-2910, doi: 10.6038/cjg20160815.
- 蒋素会, 王志民, 陈仁旭, 等. 2020. 大别山金河桥超高压榴辉岩石榴石中的水 [J]. *地球科学*, 45(4): 1168-1186, doi: 10.3799/dqkx.2019.132.
- 蒋玺, 安邦, 唐波, 等. 2013. 0.6~2.0 GPa 压力下部分熔融角闪辉长岩的纵波波速 [J]. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 505-514.
- 金胜, 魏文博, 汪硕, 等. 2010a. 青藏高原地壳高导层的成因及动力学意义探讨——大地电磁探测提供的证据 [J]. *地球物理学报*, 53(10): 2376-2385, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.011.
- 金胜, 张乐天, 魏文博, 等. 2010b. 中国大陆深探测的大地电磁测深研究 [J]. *地质学报*, 84(6): 809-817.
- 李昌年. 2010. 简明岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 李德威, 王家映. 2001. 大陆下地壳地球物理异常及其构造意义 [J]. *地质科技情报*, 20(3): 11-20.
- 林传勇, 张友南, 史兰斌, 等. 2001. 下地壳麻粒岩包体波速测定及其地质意义 [J]. *地质学报*, 75(2): 277-285.
- 刘福田, 徐佩芬, 刘劲松, 等. 2003. 大陆深俯冲带的地壳速度结构——东大别造山带深地震宽角反射/折射研究 [J]. *地球物理学报*, 46(3): 366-372.
- 刘建华, 刘福田, 孙若味, 等. 1995. 秦岭-大别造山带及其南北缘地震层析成像 [J]. *地球物理学报*, 38(1): 46-54.
- 柳江琳, 白武明, 孔祥儒, 等. 2001. 高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率的变化特征 [J]. *地球物理学报*, 44(4): 528-533.
- 马麦宁, 白武明. 1999. 高温高压实验弹性波速研究及其地球动力学意义 [J]. *地球物理学进展*, 14(1): 40-55.
- 盛英明, 夏群科, 丁强, 等. 2005. 大别山榴辉岩中石榴石的结构

附中文参考文献

- 白利平, 杜建国, 刘巍, 等. 2002. 高温高压下辉长岩纵波速度和电导率实验研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 32(11): 959-

- 水:红外光谱分析[J]. 矿物学报, 25(4): 334-340.
- 宋茂双, 谢鸿森, 郑海飞, 等. 1996. 高温高压下主要上地幔矿物的波速测量及地质意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 26(2): 173-178, doi: 10.1360/zd1996-26-2-173.
- 王斌, 宋子堂. 1993. 华北盆地南缘大地电磁测深资料地质解释及大别山推覆体成因探讨[J]. 石油地球物理勘探, 28(3): 333-338.
- 王椿镛, 丁志峰, 宋建立, 等. 1997. 大别造山带地壳 S 波速度结构[J]. 地球物理学报, 40(3): 337-346.
- 王椿镛, 林中洋, 陈学波. 1995. 青海门源-福建宁德地学断面综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 38(5): 590-598.
- 王多君, 于英杰, 郭颖星, 等. 2011. 地球深部电导率的实验室约束[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(1): 40-45.
- 王勤, 嵇少丞, 许志琴, 等. 2005. 榴辉岩的地震波性质: 对苏鲁超高压变质带地壳成分和折返机制的探讨[J]. 岩石学报, 21(2): 451-464.
- 吴萍萍, 丁志峰, 马小军, 等. 2015. 基于背景噪声研究大别-苏鲁及其邻区的瑞雷波群速度结构[J]. 地震学报, 37(2): 218-229, doi: 10.11939/jass.2015.02.002.
- 吴宗絮, 邓晋福, Wyllie P J, 等. 1995. 冀东黑云母片麻岩在 1 GPa 压力下脱水熔融实验[J]. 地质科学, 30(1): 12-18.
- 吴宗絮, 郭才华. 1993. 冀东陆壳岩石在高温高压下波速的实验研究[J]. 地球物理学进展, 8(4): 206-213.
- 肖骑彬, 赵国泽, 王继军, 等. 2008. 苏鲁造山带及邻区深部电性结构研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(10): 1258-1267, doi: 10.1360/zd2008-38-10-1258.
- 肖骑彬, 赵国泽, 詹艳, 等. 2007. 大别山超高压变质带深部电性结构及其动力学意义初步研究[J]. 地球物理学报, 50(3): 812-822, doi: 10.1002/cjg2.1085.
- 徐佩芬, 刘福田, 王清晨, 等. 2000. 苏鲁碰撞造山带的地震层析成像研究——岩石圈三维速度结构[J]. 地球物理学报, 43(3): 377-385, doi: 10.1002/cjg2.50.
- 徐义贤. 1995. 中下地壳高导层成因研究综述[J]. 地质科技情报, 14(3): 15-22.
- 杨文采, 程振炎, 陈国九, 等. 1999. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(I)——深反射地震[J]. 地球物理学报, 42(1): 41-52.
- 杨文采, 汪集旻. 2002. 苏鲁地区地壳岩浆底侵的地球物理认识[J]. 地质学报, 76(2): 173-179.
- 杨文采, 徐纪人, 程振炎, 等. 2003. 苏鲁大别造山带地球物理与壳幔作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨文采, 杨午阳, 金振民, 等. 2004. 苏鲁超高压变质带岩石圈的地震组构[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 34(4): 307-319, doi: 10.1360/zd2004-34-4-307.
- 杨晓松, 金振民. 1998. 壳内部分熔融低速层及其研究意义[J]. 地球物理学进展, 13(3): 38-45.
- 杨晓松, 马瑾, 张先进. 2003. 大陆壳内低速层成因综述[J]. 地质科技情报, 22(2): 35-41.
- 杨晓志. 2014. 电导岩石学: 原理、方法和进展[J]. 中国科学: 地球科学, 44(9): 1884-1900, doi: 10.1360/zd-2014-44-9-1884.
- 杨晓志, 夏群科, 盛英明, 等. 2005. 安徽女山地下壳麻粒岩包体中的水: 红外光谱分析[J]. 岩石学报, 21(5): 1669-1676.
- 杨晓志, 夏群科, 于慧敏, 等. 2006. 大陆下地壳高电导率的起源: 矿物中的结构水[J]. 地球科学进展, 21(1): 31-38, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2006.01.0031.
- 游振东, 索书田, 钟增球, 等. 2000. 大别山超高压变质岩的退变质显微构造: 折返过程的启示[J]. 地质学报, 74(3): 224-233.
- 于英杰, 王多君, 郭颖星, 等. 2011. 高温高压下角闪片麻岩的电导率研究[J]. 地球物理学报, 54(3): 764-770, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.016.
- 张本仁, 张宏飞, 高山. 2004. 大别造山带现今地壳结构-岩石组成研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(3): 185-193.
- 张学民, 刁桂苓, 束沛一, 等. 2005. 苏鲁地区剪切波速度结构研究与地震关系探讨[J]. 西北地震学报, 27(2): 101-108.
- 张友南, 马瑾. 1997. 深部地壳镁铁质岩石波速的研究[J]. 地球物理学报, 40(2): 221-230.
- 张友南, 孙君秀. 1999. 华北北部克拉通地壳岩石的波速特征与地壳物质组成[J]. 地震地质, 21(2): 147-155.
- 赵志丹, 高山, 骆庭川, 等. 1996. 秦岭和华北地区地壳低速层的成因探讨——岩石高温高压波速实验证据[J]. 地球物理学报, 39(5): 642-652.
- 赵志丹, 谢鸿森, 周文戈, 等. 2001. 大别山地区岩石高压弹性波速及其对岩石圈组成和壳-幔循环的限制[J]. 自然科学进展, 11(1): 52-57.
- 赵志新, 徐纪人, 许志琴. 2004. 上地幔三维 S 波速度结构与大别苏鲁超高压变质带俯冲折返机制探讨[J]. 岩石学报, 20(1): 157-164.
- 钟增球, 张宏飞, 索书田, 等. 1999. 大别超高压变质岩折返过程中的部分熔融作用[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 24(4): 393-399.
- 朱茂旭, 谢鸿森, 赵志丹, 等. 2001. 大别超高压榴辉岩高温高压下电导率实验研究[J]. 地球物理学报, 44(1): 93-102.