

矿物电导率 Meyer-Neldel 补偿规律及其应用研究*

吴小平, 郑永飞

(中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要:大量矿物电导率数据分析表明, 矿物电导率存在 Meyer-Neldel 补偿规律, 即同一矿物在不同物理、化学条件下测得电导率有很大差异, 但其指前因子和活化能之间存在良好的线性关系。基于矿物电导率补偿规律, 形成了从矿物电导率计算元素扩散系数的新方法, 其计算结果与实验扩散数据符合较好。利用钙钛矿的电导率补偿关系, 结合电磁测深结果, 亦能获得更合理的地球深内部电导率结构。

关键词:电导率; 补偿规律; 电磁测深; 扩散

中图分类号:P319.2 **文献标识码:**A

The Meyer-Neldel compensation law for electrical conductivity in minerals and its applications

WU Xiao-ping, ZHENG Yong-fei

(CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, USTC, Hefei 230026, China)

Abstract: An analysis of a large number of published data of electrical conductivity shows there exists Meyer-Neldel compensation law for electrical conductivity in minerals, which refers to a good linear correlation between the logarithm of pre-exponential factor and activation enthalpy for the same mineral in spite of different values obtained in different physical and chemical conditions. Based on the compensation effect for electrical conductivity in the minerals, a new method to estimate diffusion coefficient from electrical conductivity was developed and it is shown that the computed results with the new method are in good agreement with experimental diffusivity. Combined with the results of electromagnetic sounding, the compensation relation for electrical conductivities of perovskite was also used to present a relatively reasonable electrical structure in the Earth's lower mantle.

Key words: electrical conductivity; compensation law; electromagnetic sounding; diffusivity

0 引言

矿物电导率是地球内部物理的重要参数, 随着高温高压条件下矿物电导率测量技术在近 20 年的快速发展^[1], 积累了许多地壳和地幔矿物的电导率实验数据^[2~12]。在地球物理反演依然存在严重不确

定性的情况下, 这些矿物电导率数据在约束电磁测深反演结果以获得更加可靠的地球内部结构方面起到重要作用。然而, 影响矿物电导率的物理、化学因素很多, 如温度、压力、氧逸度、含水量、含铁量、含铝量等, 导致同一矿物实验测得的电导率值不相同, 甚至有一个数量级或更大的差异, 应用这些电导率数

* 收稿日期: 2007-03-09; 修回日期: 2007-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(40374025, 40537033)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0553)资助。

作者简介: 吴小平(通讯作者), 1967年生, 博士/教授。研究方向: 电磁测深和矿物电导率。E-mail: wxp@ustc.edu.cn

据时就很难。

矿物电导率还可以用来研究电子和离子的迁移扩散。元素扩散系数的确定是定量分析造山作用中地壳压力-温度-时间(p - T - t)演化的基础,也是研究同位素化学平衡、地幔对流以及核幔边界化学变化的重要依据。由于元素扩散过程可能控制了地球深部的动力学过程,所以近年来扩散在地质过程的研究中越来越重要。现阶段高温高压条件下实验室测定元素扩散系数有相当的难度,因此实验测得的元素扩散系数还不够丰富。而且,也没有一个好的模型从理论上估计矿物中的离子扩散系数。建立经验模型来近似计算扩散系数则成为另一有效途径。Fortier and Giletti^[13]给出热液条件下由全离子空隙度计算 O 扩散的经验公式, Muehlenbachs and Connolly^[14]提出了类似的经验模型由阴离子空隙度预测无水条件下 O 扩散系数; Zheng and Fu^[15]利用阴离子空隙可同时预测无水和热液条件下 O 扩散系数;赵子福和郑永飞^[16]利用离子空隙度方法系统地预测了 Pb、Sr 和 REE 的扩散系数。这些经验公式作为实验数据的补充起到很大作用。然而,这些经验公式完全从已有的实验扩散数据形成的补偿关系导出,再由实验扩散数据验证其正确与否。众所周知,实验扩散数据的误差有可能很大,由此形成的经验模型预测结果将产生相应较大的误差^[15,16],而且再回到实验扩散数据给予验证也是不太完备的,需要其他物理性质的实验数据给予相对独立的约束。实际上,矿物电导率与扩散系数之间有着紧密联系,但同样由于矿物电导率的测量差异,还难于用来计算地球内部矿物中的元素扩散系数。

本文先讨论矿物电导率补偿规律(即补偿效应)及其机制,然后针对上述问题给出基于矿物电导率补偿效应的元素扩散系数计算方法,并结合电磁测深结果建立合理的下地幔电导率模型。

1 矿物电导率补偿规律及其机制

矿物电导率通常表示为 Arrhenius 关系式:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E/kT) \quad (1)$$

式中, σ_0/Sm^{-1} 是电导率的指前因子; E/eV 是电导率的活化能; k 为 Boltzmann 常数; T 为绝对温度。Wu and Zheng^[17]分析了不同条件下测得的方解石、刚玉、顽火辉石、铁辉石、橄榄石、石榴石和方镁石电导率实验数据,首次观察到这些矿物的电导率尽管有差异,但存在补偿效应,即同一种矿物在不同条件

下测得电导率指前因子的对数($\ln \sigma_0$)和活化能(E)之间有良好的线性关系,称为电导率补偿规律,即 Meyer-Neldel 规律^[18]:

$$\ln \sigma_0 = \alpha + \beta E \quad (2)$$

其中, α 和 β 为常数。

补偿规律最早出现在化学文献中^[19],因为反应速率亦表示为如(1)式的 Arrhenius 关系式,其指前因子和活化能(称为动力学参数)满足(2)式,是化学家们熟知的等动力学规律(isokinetic rule)^[20],亦称为动力学补偿效应(kinetic compensation effect)^[19,21];Meyer and Neldel(1937)^[18]发表了(2)式,用于描述畸变材料中的导电过程,因而物理学家们习惯上称之为 Meyer-Neldel 规律。所谓补偿效应是指,要使实验数据适合该表达式,活化能和指前因子都得增加或都得减少,结果电导率(或反应速率)改变就会比只是活化能或只是指前因子改变来得少,即一个参数的改变被另一个完全地或部分地“补偿”了。元素扩散系数表示为

$$D = D_0 \exp(-Q/RT), \quad (3)$$

其中, R 为气体常数。其指前因子 $D_0/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 和活化能 $Q/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ 之间的补偿效应有许多研究^[14~16,22~24],表现为同一元素在不同矿物中扩散的补偿关系和不同元素在同一种矿物中扩散的补偿关系。其中 $1 \text{ eV} = 96.485 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。电导率补偿效应在材料科学领域有诸多报道^[25~28],而地球内部产生的矿物电导率补偿效应则少有报道。仅 Tyburczy 与 Waff^[29]研究了硅酸盐岩浆的电导率补偿效应,由于硅酸盐岩浆多为离子扩散贡献的离子导电,因此其实质仍是元素扩散的补偿效应。

橄榄石是上地幔的主要矿物组成,约占 50%~60%^[30]。因而,准确测量高温高压下橄榄石的电导率非常重要,有大量在不同时期、不同条件、用不同样品和不同测量技术得到的橄榄石电导率数据。Wu and Zheng^[31]进一步研究了近 20 年来测得不同条件下大量的橄榄石电导率实验数据,发现它们均满足电导率补偿规律,其 $\ln \sigma_0$ 和活化能 E 之间有非常好的线性关系(线性相关系数达 $r=0.996$):

$$\ln \sigma_0 = -4.93841(\pm 0.34562) + 6.68493(\pm 0.12524)E \quad (4)$$

与之前仅由 20 世纪 90 年代测得橄榄石电导率数据形成的电导率补偿关系^[17]:

$$\ln \sigma_0 = -5.38972(\pm 1.28858) + 6.68005(\pm 0.39592)E \quad (5)$$

基本一致,说明矿物电导率补偿关系得到后续新的实验数据验证,是可靠的。

补偿规律的物理意义或机制尚不完全清楚^[28],已有一些模型来解释扩散或电导率补偿规律,如 Benjina^[32]提出用应变能模型解释 Si 在硅酸盐中扩散的补偿规律, Crandall^[33]、Chen 及合作者^[34,35]则将电导率补偿规律归于材料的畸变, Yelon 与 Movaghar^[36]提出多声子激发解释电导率补偿规律的发生。Wu 与 Zheng^[17,31]则从矿物中不同导电机制、晶体颗粒内部导电和边界导电、不同元素扩散贡献的电导率等方面,论证了不同导电机制或不同载流子导电是矿物电导率补偿规律的成因之一。而且,下文的大量实验扩散系数数据也支持这一观点。

2 基于矿物电导率补偿关系计算元素扩散系数的新方法

由 Nernst-Einstein 方程,从电导率计算扩散系数的表达式为^[37]

$$D = H_R \cdot \sigma kT / (z^2 e^2 n) \quad (6)$$

式中, D 是扩散系数; σ 是电导率; n 是载流子浓度; z 是载流子价数; e 是电子电荷; k 是 Boltzmann 常数; T 是绝对温度。 H_R 为 Haven 比, 取值在 0.1 至 1.0 之间。 H_R 值目前难于解决, 由于实验扩散系数的误差较大, 一般令 $\ln H_R = (\ln 0.1) / 2 = -1.15$ 计算扩散系数, 其误差仍控制在可以接受的范围内^[17,31]。由式(6)从电导率计算元素扩散系数似乎很简单, 但由于上式是表示一种载流子迁移(如电子或离子)产生的电导率和其扩散系数之间的关系, 若要计算某种元素的扩散系数, 必须测得该元素扩散独立贡献的离子电导率。这一点很难满足, 因为实验测得的通常是电子和离子的混合电导率, 而不是某一种离子独立扩散贡献的电导率。因此, 在没有清楚其导电机制之前, 由电导率计算扩散系数是没有意义的, 甚至都不知道计算得到的是什么载流子的扩散系数。另一方面, 较小的物理化学条件变化都会造成测得矿物电导率差异很大, 则差异很大的一组电导率值用哪一个进行计算也是个困难选择。

基于电导率的补偿效应, 可以巧妙地解决上述由矿物电导率计算元素扩散系数的关键问题。因为同一种矿物在不同条件下测得的电导率尽管有差异, 但其指前因子 ($\ln \sigma_0$) 和活化能 (E) 之间有良好的线性关系, 即该矿物的 α 、 β 常数是一定的, 因此可以从电导率补偿效应这一新的角度来探讨扩散系数

的计算途径。由式(1), 矿物中任一导电机制或载流子(扩散离子)产生的电导率可表示为

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - E / kT = \alpha + (\beta - 1 / kT) E \quad (7)$$

如果矿物电导率存在补偿效应, 由上一部分的讨论可知, 同一矿物中不同导电机制或不同载流子导电产生的电导率在特征温度 $T_0 = (\beta k)^{-1}$ 条件下趋于常数 $\sigma_C = \exp(\alpha)$ 。则在 $T = T_0$ 时, 扩散系数指前因子 D_0 可表示为

$$D_0 = H_R \cdot \sigma_C \cdot \exp(Q / RT_0) \cdot kT_0 / (z^2 e^2 n) \quad (8)$$

因此只要知道活化能 Q , 无需知道导电机制就可以计算 D_0 。利用文献[15]中氧扩散活化能与阴离子孔隙度在无水和热液条件下的经验公式, Wu 与 Zheng^[17]通过上式求得无水和热液条件下氧在方解石、刚玉、顽火辉石、铁辉石、橄榄石、石榴石和方镁石中的扩散系数, 计算得到的氧扩散系数同样很好地遵从氧扩散补偿规律, 而且, 其扩散补偿方程与实验测定的氧扩散遵从的补偿方程基本一致, 说明基于多种矿物的电导率补偿效应计算元素扩散系数的方法是有效的。

类似的, 可以利用实验测得的扩散系数活化能 Q 代入式(8), 由电导率计算得到扩散系数指前因子 D_0^e 与实验测的指前因子 D_0^{meas} 比较也可以验证该方法的有效性。Wu 与 Zheng^[31]利用上世纪 80 年代以来实验测得的大量橄榄石中 Fe、Mg、Fe-Mg、Mn、H 等元素扩散系数, 通过式(8)由橄榄石电导率补偿关系计算得到的扩散系数指前因子 D_0^e 与实验测的指前因子 D_0^{meas} 有以下关系:

$$\ln D_0^e = 0.51582 (\pm 0.21064) + 0.97052 (\pm 0.02851) \ln D_0^{\text{meas}} \quad (9)$$

可见, $\ln D_0^e$ 与 $\ln D_0^{\text{meas}}$ 在很大的取值范围内是相当一致的, 即同一矿物中大量不同元素扩散系数的计算结果也验证了上述计算方法的可靠性。特别提及的是, 橄榄石中氢(含结构水)扩散以及含水情况下 Fe-Mg 互扩散实验数据也均支持上述结论。同时表明, 元素扩散系数计算新方法的基础, 即我们提出的矿物电导率补偿效应形成机制是可行的。

3 基于矿物电导率补偿关系的下地幔电导率模型

下地幔主要由硅酸盐钙钛矿组成^[30], 因此下地幔电导率主要由钙钛矿所决定^[1]。其电导率实验数据近年来也有诸多报道^[4~6, 38, 39], 由于成分(如含

Fe、Al 等)或温压条件不同,测量结果有相当的差异.问题是,目前尚不能精确地确定下地幔中钙钛矿的各种成分,实验中给定的矿物所处下地幔环境的温压条件、氧逸度条件等也是近似的,因此各种实验结果与真实矿物在下地幔中的电导率相比有许多不确定性.若还考虑到一些特殊成分(如水)的含量对矿物电导率的影响^[7, 9, 40],情况则更复杂.电磁测深是获得地球深部电导率结构的另一有效手段,国内外有许多这方面的成果^[41~50],与电磁测深的反演结果进行比较似乎可以增加电导率实验结果的可靠程度,但值得注意的是,地球物理反演结果中固有的非惟一性使得这种不确定性依然存在.有无可能对同一矿物不同实验的结果进行整合,并结合电磁测深结果给出与各实验结果相符的、相对合理的电导率模型?电导率的补偿规律可做到这一点.若钙钛矿电导率存在补偿效应,则其补偿关系的 α 、 β 常数是一定的,由此形成的电导率表达形式可以很好地整合不同的电导率实验数据;另一方面,尽管我们不能精确地知道橄榄石或钙钛矿在地幔中的物理、化学条件,但实验中给定的条件应该是与其真实条件相近的,也就是说,假设我们能够设计一个完全如钙钛矿在真实下地幔条件下的电导率实验,其结果也应满足由我们已完成的电导率实验建立的补偿关系,这一点很重要,因为它意味着基于电导率补偿关系我们有可能建立起相对合理、准确的下地幔电导率模型.

本文首次观察到硅酸盐钙钛矿在不同物理、化学条件下测得的电导率满足补偿规律(见图 1),其 $\ln \sigma_0$ 和 E 之间有非常好的线性补偿关系(相关系数达 $r=0.995$):

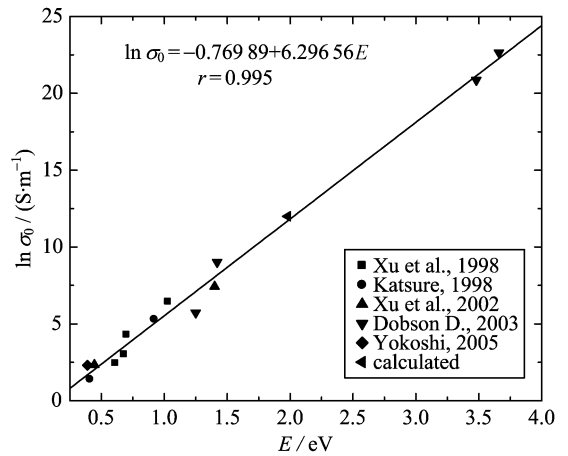
$$\ln \sigma_0 = -0.769 89 + 6.296 56E \quad (10)$$

据此,我们有可能建立起一个统一的下地幔电导率模型.

首先可以统一差异很大的钙钛矿电导率实验数据,即钙钛矿的电导率统一表示为

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - E/kT = -0.769 89 + (6.296 56 - 1/kT)E \quad (11)$$

电磁测深得到的电导率尽管存在许多不确定性,但许多电磁测深结果仍存在某些一致性,如下地幔电导率从 $h=800$ km 处的 1 S/m 左右增长到 $h=2 000$ km 处的 $5\sim 10$ S/m 左右^[46~50]. Petersons^[47] 的结果表明在 $650\sim 1 000$ km 的平均电导率为 1.18 S/m,因此取 800 km(温度为 $1 942$ K)处的电导率为 1.18 S/m, $2 000$ km(温度为 $2 301$ K)处的



由两个地球物理点计算得到的电导率参数 $E=1.983$ eV 和 $\ln \sigma_0=12.019$ S/m,也很好满足该补偿关系

图 1 钙钛矿的电导率补偿关系

Fig. 1 Compensation plots for electrical conductivity in perovskite

电导率为 7.5 S/m,并认为这两个地球物理点是可靠的.将它们作为两个实验数据代入式(1)可求得电导率指前因子和活化能两个参数 $E=1.983$ eV 和 $\ln \sigma_0=12.019$ (S/m),并将这个数据对 $(E, \ln \sigma_0)$ 点入图 1.令人非常感兴趣的是,它也非常好地满足钙钛矿的电导率补偿关系.因此可以认为,基于(11)式的电导率补偿关系(计算中取 $E=1.983$ eV)建立的电导率模型,既符合现有的几乎所有钙钛矿高温高压实验数据,也能够与电磁观测结果达到有机的统一.

图 2 是由钙钛矿的电导率补偿关系,结合电磁

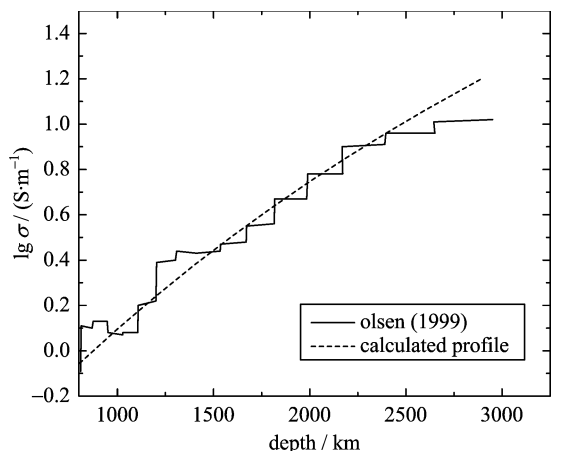


图 2 计算得到下地幔 $800\sim 2 800$ km 电导率与 Olsen(1999)电磁测深结果的比较

Fig. 2 Comparison of calculated conductivity profile from $800\sim 2 800$ km in lower mantle with the results of electromagnetic sounding

测深数据计算得到的下地幔 800~2 800 km 电导率剖面与目前获得较多认可的电磁测深结果 Olsen^[46] 比较,基本是一致的。

4 结论

诸多壳、幔矿物电导率存在可靠的补偿效应,并得到新的数据验证。基于矿物电导率补偿效应计算得到的元素扩散系数及地幔电导率结构,也均与实验数据和电磁观测结果符合较好。目前,这些工作尚在初始阶段,矿物电导率补偿规律、其形成机制和应用仍有许多有待深入研究。

参考文献(References)

- [1] Xu Y S. A reviews on the electrical conductivity of mantle minerals and rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(1): 229-238.
徐有生. 地幔矿物岩石的电导率研究进展 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(1): 229-238.
- [2] Tyburczy J A, Fislser D K. Electrical properties of minerals and melts [M]//*Mineral Physics and Crystallography: A Handbook of Physical Constants AGU Reference Shelf 2*. American Geophysical Union, 1995: 185-207.
- [3] Xu Y S, Poe B T, Shankland T J, et al. Electrical conductivity of Olivine, Wadsleyite, and Ringwoodite under upper-mantle conditions [J]. *Science*, 1998, 280: 1 415-1 418.
- [4] Xu Y S, McCammon C, Poe B T. The effect of Alumina on the electrical conductivity of silicate perovskite [J]. *Science*, 1998, 282: 922-924.
- [5] Xu Y S, McCammon C. Evidence for ionic conductivity in lower mantle (Mg,Fe)(Si,Al)O₃ perovskite [J]. *J Geophys Res*, 2002, 107 (B10). 2251, doi: 10.1029/2001JB000677.
- [6] Katsure T, Sato K, Ito E. Electrical conductivity of silicate perovskite at lower-mantle conditions [J]. *Nature*, 1998, 395: 493-496.
- [7] Huang X G, Xu Y S, Karato S. Water content in the transition zone from electrical conductivity of wadsleyite and ringwoodite [J]. *Nature*, 2005, 434: 746-749.
- [8] Wang D J, Li H P, Liu C Q, et al. Experimental study on electrical conductivity of dunite at high temperature and pressure—The evidence of electrical conductivity of cold mantle in the Gaize-Lugu area [J]. *Chin Sci Bull*, 2001, 46(24): 2 089-2 092.
- [9] Wang D J, Mookherjee M, Xu Y S, et al. The effect of water on the electrical conductivity of olivine [J]. *Nature*, 2006, 443: 977-980.
- [10] Liu J L, Bai W M, Kong X R, et al. Electrical conductivity of granite, basalt and pyroxene peridotite under high temperature high pressure [J]. *Chinese J Geophys*, 2001, 44(4): 528-533.
柳江琳,白武明,孔祥儒,等. 高温高压下花岗岩、玄武岩和橄榄岩电导率的变化特征 [J]. *地球物理学报*, 2001,44(4):528-533.
- [11] Zhu M X, Xie H S, Zhao Z D, et al. Experimental studies on electrical conductivity of the Dabie ultrahigh pressure eclogites at high pressures and temperatures [J]. *Chinese J Geophys*, 2001, 44(1): 94-102.
朱茂旭,谢鸿森,赵志丹,等. 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*, 2001, 44(1):94-102.
- [12] Zhu M X, Xie H S, Guo J, et al. An experimental study on electrical conductivity of talc at high temperature and pressure [J]. *Chinese J Geophys*, 2001, 44(3): 430-435.
朱茂旭,谢鸿森,郭捷,等. 高温高压下滑石的电导率实验研究 [J]. *地球物理学报*, 2001, 44(3):430-435.
- [13] Fortier S M, Giletti B J. An empirical model for predicting diffusion coefficients in silicate minerals [J]. *Science*, 1989, 245: 1 481-1 484.
- [14] Muehlenbachs K, Connolly C. Oxygen diffusion in leucite: Structural controls [M]//*Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*, *Geochem Soc Spec Publ*,1991(3):27-34.
- [15] Zheng Y F, Fu B. Estimation of oxygen diffusivity from anion porosity in minerals [J]. *Geochemical Journal*, 1998, 32: 71-89.
- [16] Zhao Z F, Zheng Y F. Lead, strontium and REE diffusion compensation and estimation of their diffusivity in minerals [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17: 69-94.
赵子福,郑永飞. Pb、Sr 和 REE 在矿物中的扩散补偿关系及其对扩散系数的预测 [J]. *岩石学报*, 2001, 17: 69-94.
- [17] Wu X P, Zheng Y F. The compensation effect for electrical conductivity and its applications to estimate oxygen diffusivity in minerals [J/OL]. *J Geophys Res*, 2003, 108(B3). 2139.
- [18] Meyer W, Neldel H Z. *Tech Phys*,1937,12: 588.
- [19] Constable F H. The Mechanism of Catalytic Decomposition [J]. *Proceedings of the Royal Society of London; Series A*, 1926, 108: 355-378.
- [20] Linert W, Jameson R F. The isokinetic relationship [J]. *Chem Soc Rev*, 1989,18:477-505.
- [21] Roginskii S Z, Khart, Yu L. The origin of the compensation effect in chemical kinetics [J]. *Doklady*

- Akademii Nauk SSSR, 1960, 130: 366-369.
- [22] Ruetschi P. The relation between frequency factor and activate energy (compensation law)[J]. *Z Phys Chem Neue Folge*, 1958, 14: 277-291.
- [23] Winchell P. The compensation law for diffusion in silicates [J]. *High Temp Sci*, 1969, 1: 200-215.
- [24] Hart S R. Diffusion compensation in natural silicates [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1981, 45: 279-291.
- [25] Rosenberg B, Bhowmik B B, Harder H C, et al. Pre-exponential factor in semiconducting organic substances [J]. *J Chem Phys*, 1968, 49: 4 108-4 114.
- [26] Johnston G R, Lyons L E. On the compensation effect in electrical conduction through organic crystals [J]. *Phys Stat Sol*, 1970, 37: K43-45.
- [27] Hughes K, Isard J O. Ionic transport in glasses[M]// *Physics of Electrolytes*, Vol. 1. New York: Academic, 1972:351-400.
- [28] Gong J H, Li Y, Tang Z L, et al. Ionic conductivity in the ternary system $(\text{ZrO}_2)_{1-0.08x-0.12y}-(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.08x}-(\text{CaO})_{0.12y}$ [J]. *J Mater Sci*, 2000, 35: 3 547-3 551.
- [29] Tyburczy J A, Waff H S. Electrical conductivity of molten basalt and andesite to 25 kilobars pressure: geophysical significance and implications for charge transport and melt structure [J]. *J Geophys Res*, 1983, 88: 2 413-2 430.
- [30] Ringwood A E. *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*[M]. New York: McGraw-Hill, 1975: 190-197.
- [31] Wu X P, Zheng Y F. The Meyer-Neldel compensation law for electrical conductivity in olivine [J/OL]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(25). 252116
- [32] Bejina F, Jaoul O. Silicon diffusion in silicate minerals [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 153 (3): 229-238.
- [33] Crandall R S. Defect relaxation in amorphous-silicon-stretched exponentials, the Meyer-Neldel rule, and the Staebler-Wronski effect [J]. *Phys Rev B*, 1991, 43 (5): 4 057-4 070.
- [34] Chen Y F, Huang S F. Connection between the Meyer-Neldel rule and stretched-exponential relaxation [J]. *Phys Rev B*, 1991, 44 (24): 13 775-13 778.
- [35] Wang J C, Chen Y F. The Meyer-Neldel rule in fullerenes [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 73 (7): 948-950.
- [36] Yelon A, Movaghar B. Microscopic explanation of the compensation (Meyer-Neldel) rule [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 65(5): 618-620.
- [37] Chakraborty S. Diffusion in silicate melts [J]. *Reviews in Mineralogy*, 1995, 32: 453-454.
- [38] Dabson D P, Brodholt J P. The electrical conductivity and thermal profile of the earth's mid-mantle [J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(15): 2 325-2 328.
- [39] Yokoshi S, Katsura T, Ito E, et al. Pressure dependence of the electrical conductivity of $(\text{Mg}_{0.93}\text{Fe}_{0.07})\text{SiO}_3$ ilmenite and perovskite determined by a multi-anvil apparatus with sintered diamond anvils [C]//COE-21 International Symposium, Misasa, Japan, 2005: M13D.
- [40] Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle [J]. *Nature*, 1990, 347: 272-273.
- [41] Schultz A. On the vertical gradient and associated heterogeneity in mantle electrical conductivity [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 1990, 64: 68-86.
- [42] Wei W B, Unsworth W, Jones A, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies [J]. *Science*, 2001, 292: 716-718.
- [43] Chen L, Booker J R, Jones A G, et al. Electrically conductive crust in southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying [J]. *Science*, 1996, 274: 1 694-1 696.
- [44] Ma X B, Kong X R, Yu S. Magnetotelluric sounding in western Tibet [J]. *Chin Sci Bull*, 1997, 42(8): 678-681.
- [45] 詹艳, 赵国泽, 王继军. 青藏高原东北缘海原弧形构造区地壳电性结构探测研究[J]. *地震学报*, 2005, 27 (4): 431-440.
- [46] Olsen N. Long-period(30 days-1 year) electromagnetic sounding and the electrical conductivity of the lower mantle beneath Europe [J]. *Geophys J Int*, 1999, 138: 179-187.
- [47] Petersons H F, Constable S. Global mapping of the electrical conductive lower mantle [J]. *Geophys Res Lett*, 1996, 23:1 461-1 464.
- [48] Semenov V Y, Jozwiak W. Model of the geoelectrical structure of the mid-and lower mantle in the Europe-Asia region[J]. *Geophys J Int*, 1999, 138: 549-552.
- [49] Kuvshinov A V, Utada H, Avdeev D, et al. 3-D modelling and analysis of Dst C-responses in the North Pacific ocean region[J]. *Geophys J Int*, 2005, 160: 505-526.
- [50] Kuvshinov A, Olsen N. A global model of mantle conductivity derived from 5 years of CHAMP, Ørsted, and SAC-C magnetic data [J/OL]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33. L18301.