

试论天然半导体矿物的热电特性及其 在地震预测中应用的可能性

申俊峰¹, 申旭辉², 刘 倩¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院地质过程和矿产资源国家重点实验室,
深部过程与探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地震局 地震预测研究所, 北京 100306

摘 要:本文基于半导体矿物热电特性的基本理论,通过大量科学研究成果之间客观联系的分析,论证了天然半导体矿物热电特性与地震预测的关系。结果表明,地壳内广泛存在天然半导体矿物,且绝大多数天然半导体矿物具有热电特性。孕震过程产生梯度热场时,会激发周围热电介质产生热电势,热电势的积累对孕震区电场具有一定的干扰效应,这种干扰效应可作为地震预测的信息源之一。另外,从成矿带和地震带之间的空间关系分析,可以认为天然半导体矿物的集中分布与地震活动带相一致。上述结论对深刻理解地震地电异常机理有重要的意义。

关 键 词:半导体矿物;热电性;地震预测

中图分类号:P579 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2009)03-0301-07

Thermoelectricity Property of Natural Semi-conductor Minerals and Its Application in Earthquake Prediction

SHEN Jun-feng¹, SHEN Xu-hui², LIU Qian¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences; Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Exploration, Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100306, China

Abstract: On the basis of theories of thermoelectricity of semi-conductor minerals and summarizing connections among many prior literature studies, this paper discussed the relationship between thermoelectricity of semi-conductor minerals and earthquake prediction. This paper believed: there are many semi-conductor minerals in the earth crust, and most of them have distinct thermoelectrical property; when there is a gradient heat field generated by seism, thermoelectrical potential of semi-conductor minerals will be aroused, and such thermoelectrical potential will disturb the earth electric field. This kind of interference can be read as information for earthquake prediction. In addition, the spatial distribution relations of ore zones and seism zones showed that the distribution of natural semi-conductor minerals enriched zones is consistent with that of seism zones. Results of this study are important for understanding the mechanisms of thermoelectricity anomaly during earthquakes.

Key words: semi-conductor minerals; thermoelectricity; earthquake prediction

孕震发震期间地电场会有显著的变化^[1,2];地电异常监测已成为地震预测的主要手段之一^[3]。但是,地电异常的机制似乎还没有得到完全、清楚、合理的解释,地电异常成因的复杂性使地震工作者对其解译难以形成规律性认识。因此,深入探索地震地电异常的可能机制,梳理和合理辨析主控因素的研究工作显得更为重要。本文基于半导体矿物热电

特性的基本理论,在总结大量研究成果和文献资料的基础上,立足客观事实间的联系,论证了天然半导体矿物热电特性与地震预测的关系,以开辟对地震地电异常机理认识的新途径。

1 天然半导体矿物的本质特征及其分布

天然矿物材料按照导电性可以划分为导体、半

收稿日期:2009-01-08 收到,03-31 改回

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BAC35B05)

第一作者简介:申俊峰(1964—),男,教授(博士),矿物学专业,研究方向:地震地质学。E-mail:shenjif@cugb.edu.cn.

导体和绝缘体。划分的主要依据是电阻率^[4]:电阻率(ρ)为 $10^{-4} \sim 10^{-6} \Omega \cdot m$ 时称为导体; ρ 为 $10^{11} \sim 10^{22} \Omega \cdot m$ 者为绝缘体; ρ 为 $10^{-2} \sim 10^{10} \Omega \cdot m$ 时为半导体。

矿物电阻率的差别取决于组成矿物元素之间的化学键类型和数量;也就是说,导体矿物中的绝大多数化学键为金属键,构成矿物晶体的原子或离子有相对松散的电子构型,即原子核对核外电子约束力较小,电子具有较大的自由运动空间,呈弥散态活动在非定域空间,一旦受到电场作用极易形成电子流,表现为导体,如自然金、银、铜等。绝缘体矿物的主要化学键为离子键和共价键,这两种化学键通过电子得失或共用电子对方式成键,所以原子核对核外电子的约束力较大,电子无法自由移动而呈定域型电子,受到电场作用时不能表现为定向流动,所以呈不导电体矿物,如纯的石英、长石、方解石等。半导体矿物中的化学键为上述两种键型的过渡键或混合键,核外电子的定域性介于导体和绝缘体之间,即存在一定量的自由电子,受到电场作用时表现为弱的定向电子流动,成为半导体,如黄铁矿、黄铜矿和方铅矿等。

实际上,用能带理论也可合理解释上述三者电阻率的差异:导体之所以能够导电,是因为晶体中的能带结构的禁带宽度为零(或 $E_g = 0$),电子很容易在外电场的作用下从价带跃迁到导带形成电子流,电阻率自然就很小。如果晶体中的能带结构禁带较宽(E_g 一般在 5.5 eV 以上),电场很难激发其价带的电子跃迁到导带,就难以形成激发电子流而表现为较大的电阻率,这类晶体称为绝缘体。半导体矿物的能带结构禁带的能量宽度介于导体和绝缘体之间,如果遇有合适强度的能量激发,价带的电子也会跃迁到导带而形成有限电子流动,电阻率也就居于导体和绝缘体之间。

需要特别指出的是,由于天然矿物形成条件的复杂性和不确定性,本征半导体矿物(即理想结晶条件下形成的“纯净完整”的半导体晶体)的数量极少,绝大多数天然半导体矿物是由结晶过程中混入杂质元素或结晶条件不稳定而形成晶体结构缺陷(瑕疵)所致,形成的半导体也称杂质半导体。这就是说,天然矿物中导体、绝缘体和半导体之间的界线不是绝对的,不同的形成环境将决定其导电特征。地壳中绝大多数天然绝缘体矿物会因杂质混入或晶格缺陷而表现出半导体特征,其含量也就会相当高^[5]。事实上,关于绝缘体矿物因杂质混入或晶格缺陷而演变为半导体矿物的现象,早已通过人工合成半导体

材料得到了验证。如电阻率为 $2.45 \times 10^5 \Omega \cdot m$ 单晶硅,加入 10^{-7} 的B即使电阻率降为 $0.4 \Omega \cdot m$;加入 P^{5+} 也可以显著降低电阻率而成为优质半导体材料^[4]。因此可以认为,地壳中广泛存在的、通常被认为是绝缘体矿物的长石、石英、方解石、磷灰石和金刚石,以及大量硅酸盐矿物,实际上均有可能由于杂质或结构缺陷而成为半导体矿物。最新的大地电性结构测量结果^[6]表明,地壳至上地幔电阻率约为 $n \sim (n \times 10^3) \Omega \cdot m$,局部可达 $10^4 \Omega \cdot m$,这也从一个侧面证实地壳中广泛存在着半导体矿物。

2 天然半导体矿物的热电特性

这是指半导体矿物在温差条件下产生电流的性质。热电性一般包括导电类型(电子导电、电子型、N型;空穴导电、空穴型、P型)、温差电动势 E (单位mV,电子移动形成的冷端负电积累而表现出的电势,表示为“-”号;空穴移动形成的冷端正电积累而表现出的电势,表示为“+”号)和热电系数(即单位温差下的热电势,单位为 $\mu V/^\circ C$,极性符号的“-”或“+”分别对应于N型导电和P型导电)。

关于热电特性的形成机制,一般认为是由于半导体矿物在不均一受热条件下,由热激发而产生部分载流子(非平衡载流子),冷、热部位载流子浓度的差异形成电场,该电场驱使载流子由热端向冷端扩散形成温差电动势(E)^[7]。

地质作用的复杂性使得天然矿物不可避免地存在杂质元素和结构缺陷,因而地壳中广泛存在“杂质型”半导体矿物。而天然产出的半导体矿物均有热电特性^[8]。只是现有条件下,限于测试手段的灵敏度不能将所有天然半导体矿物的热电性测量所得。只有那些热电敏感矿物可以利用热电图谱仪(简称热电仪)测得其导电类型和热电势的大小^[9]。因此可以预测:随着测控技术的发展,能够测量热电敏感性较差半导体矿物的高分辨率热电仪一定可以研制出来。届时,半导体矿物的热点特性在生产和生活中的应用必将变得更加广泛。

3 孕震热场对天然半导体矿物热电特性的激发

地震已成为威胁人类安全的最大自然灾害之一。但是,地震的中短期预报仍然是一个巨大的难题。除了监控手段外,对地震机理的认识也存在诸多盲点。所以,深入研究孕震发震机制有非常重要的意义。

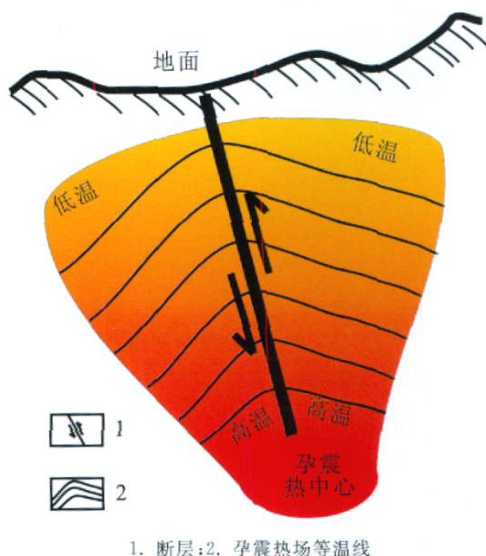
尽管目前对地震的成因机制解释还不尽人意,

但有一些现象表达的事实是客观存在的。比如,孕震或发震时往往在震源附近引起热场^[10~13]、电场^[14]和磁场^[15]的变化。因此,有理由认为孕震热场和电场、磁场的存在及其变化有一定联系。基于这些场之间关系研究(特别是热场和电场之间关系的研究)将能从一个侧面获取映震信息。

那么,地震热场和电场的变化与天然半导体矿物及其热电特性有何关系呢?如前所述,地壳中广泛存在具热电性的半导体矿物,它们使任何一个地震震源周围都有可能形成热电介质体。当孕震并伴随地壳热活动和热应力作用时,受断裂、流体和地温梯度的控制,地壳热活动会形成一个由热中心向上温度逐渐衰减的梯度热场^[11],梯度热场对周围的热电介质体形成热激发而产生热电效应,热电效应的累加效应可能导致对该处电场的影响,这个影响可以看作是热电效应对孕震电场的干扰效应。鉴此,天然半导体矿物热电效应与孕震电场的变化存在着必然的联系。由于地震常常是深大断裂作为通道借助流体将深部热能向地表传递的地壳热活动的综合体现^[11,16,17],据文献[11,16~18]描述,勾画图1以示意孕震过程中断裂与伴生热场之间的关系(由于断裂带对热流体的传导作用,其等温线呈上拱趋势^[18])。

4 天然半导体矿物的热电干扰效应与地震预测

由于孕震热场的客观存在和热电介质分布广泛,因孕震热场激发电热介质产生热电效应也应当



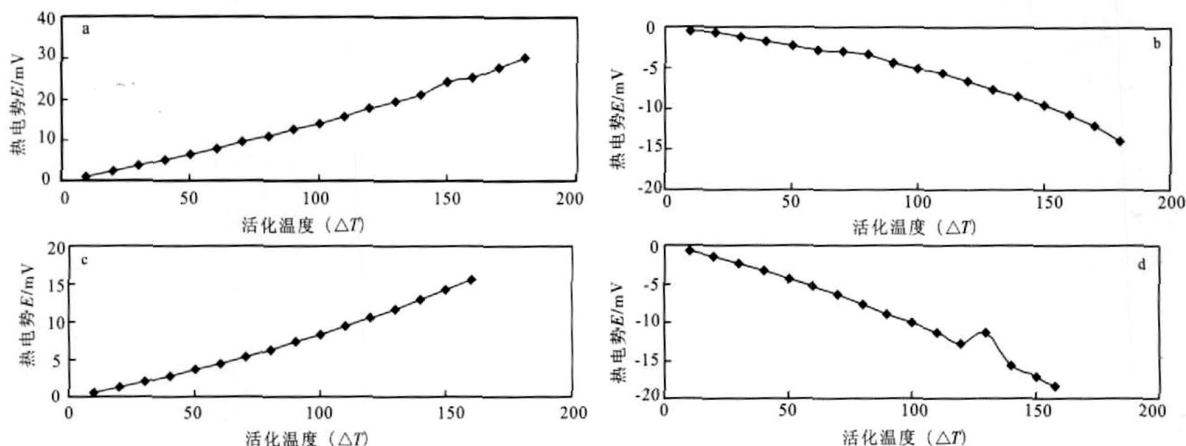
1. 断层;2. 孕震热场等温线
1. Fault;2. Isotherm of the thermal field while earthquake gestation

图1 孕震区热场示意图

Fig. 1 The sketch of earthquake thermal field

是客观存在的,它对孕震电场的影响是毋庸置疑。问题的关键是,如何从这种复杂的干扰场中过滤提取与发震有关的电场变化信息,而且能够与其他场的变化相互佐证以预测地震。

早期的研究者^[4]从热场温差的变化探讨了活化温度(热场内热端温度与冷端温度之差)与热电势的关系。他们援引赵亨达关于矿物热电图谱仪研制报告中关于黄铁矿和单晶硅热电势的测试数据,认为它们均具“随活化温度增加,其热电势绝对值增大(导型不同电势符号不同)”规律(图2)。



a. P型黄铁矿活化温度与热电势关系图;b. N型黄铁矿活化温度与热电势关系图;

c. P型单晶硅活化温度与热电势关系图;d. N型单晶硅活化温度与热电势关系图;引自文献[4].

a. the relationship between thermoelectricity and active temperature on P type pyrite;b. the relationship between thermoelectricity and active temperature on N type pyrite;c. the relationship between thermoelectricity and active temperature on P type silicon;

d. the relationship between thermoelectricity and active temperature on N type silicon;modified from ref. [4]

图2 黄铁矿和单晶硅活化温度与热电势之间的关系

Fig. 2 The relationships of thermoelectricity and active temperature on pyrite and silicon

笔者认为,实测半导体样品黄铁矿和单晶硅可以代表半导体矿物的两个边缘样品,即黄铁矿导电性好,属接近导体的半导体矿物;单晶硅导电性差,属接近绝缘体的半导体矿物。由此推测地壳中不乏有相当多的半导体矿物也有“活化温度大,热电势大”的规律,它们处于同一个孕震梯度温度场中时,“活化温度大,热电势大”就具有累加和放大效应,必然在局部空间形成较强的热电干扰效应或显著的“低电阻域”效应^[15,19,20]。这样的场效应很容易通过物理方法取得,为地震分析预报提供一些决策参数。

按照上述论证,热电干扰效应应该是一个主要的地震预测参数指标,遗憾的是目前还没有测试手段能够直接采集所需的数据。笔者认为可以将地壳中广泛存在的半导体矿物按照热电敏感程度分为两大类:现有测试手段能测到热电势者为热电敏感矿物,尚不能测得热电势者为非热电敏感矿物。

目前大约有 65 种以上天然矿物可以采用热电仪测得到热电势,它们主要是金属硫化物和硫盐类矿物,其次是金属氧化物类矿物和一些自然元素类矿物^[8]。如方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿、白铁矿、辉钼矿、毒砂、黄铜矿、黝铜矿、斑铜矿、硫砷铜矿、闪锌矿、黝锡矿、车轮矿、辉锑锡铅矿、脆硫锑铅矿、辉锑矿、磁铁矿、磁-赤铁矿、赤铁矿、钛铁矿、铬铁矿、软锰矿、锡石、石墨、自然锗、自然铋和自然锑等。从理论上说,还有很多天然矿物是具热电性的,只是测试方法尚不完善和测试仪器的灵敏度不高而限制了参数的获取。

虽然地壳中绝大多数半导体矿物在热电仪上还不能测出热电势值^[4,8]。但从热电原理可以认定,电阻率也是反映天然半导体矿物热电特征的一个间接参数。从收集到的一些天然半导体矿物的电阻率(表 1)看,目前热电仪能够测到热电势的半导体矿物的电阻率为 $10^{-6} \sim 10^8 \Omega \cdot m$,这几乎涵盖了整个半导体矿物的电阻率分布范围。由可以得到启示,电阻率值位于 $10^{-6} \sim 10^8 \Omega \cdot m$ 范围内的半导体矿物均具热电效应,只是一定温差下热电势积累的显著性不同而已。当一定温差下热电势具有显著积累时,其热电势值即能够在现有热电仪上获得,当一定温差下热电势不具有显著积累时,热电仪就测不到热电势。所以,开发高分辨率热电仪是极有意义的科学任务。

5 天然半导体矿物的时空分布与地震活动带

目前,大量采集测试地壳内存在的热电敏感和

表 1 几种常见半导体矿物的电阻率值

Table 1 The resistance of several common semiconductor minerals

矿物	电阻率/ $\Omega \cdot m$	矿物	电阻率/ $\Omega \cdot m$
斑铜矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	赤铁矿	$10^{-3} \sim 10^6$
磁铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	锡石	$10^0 \sim 10^3$
磁黄铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	辉锑矿	$10^0 \sim 10^3$
黄铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	软锰矿	$10^0 \sim 10^3$
黄铁矿	$10^{-3} \sim 10^0$	菱铁矿	$10^0 \sim 10^3$
方铅矿	$10^{-3} \sim 10^0$	铬铁矿	$10^0 \sim 10^6$
辉铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	闪锌矿	$10^3 \sim 10^6$
辉钼矿	$10^{-3} \sim 10^0$	钛铁矿	$10^3 \sim 10^8$

非热电敏感矿物的热电性数据还不现实。但可以了解热电性的热电敏感矿物的分布规律,探讨天然半导体矿物的时空分布与地震活动带的关系。

於崇文^[21]指出,在构造活跃区域,伴随地质作用或构造活动生成矿物的条件极其复杂,当然也就很难形成组分纯净且结构完整的矿物晶体。换句话说,构造活动频繁区域形成的天然矿物晶体中,或多或少有一些杂质元素并具一定的结构缺陷。这说明构造活跃的区域也是半导体矿物集中的区域。从成矿规律看,构造活跃区域也是成矿有利部位,其中含有大量金属半导体矿物^[18]。下列区域是内生金属矿成矿有利地带^[22]:1) 板块长期活动及其碰撞带边缘;2) 不同大地构造单元交汇处;3) 超壳断裂带附近的岩浆构造带和同生断裂带;4) 两期或多期主干断裂的交叉带;5) 大型隆起或拗陷的过渡地带;6) 各种成矿作用的叠加地带等。

可以看出,这些成矿带无一不是构造活跃带。

许多学者^[23~25]在论述大型-超大型矿床成矿规律时指出,世界上大多数内生金属矿床都沿大陆边缘分布。从目前中国东部深部构造与矿集区关系的研究结果看,矿集区内的 Au、Mo、Cu、Pb、Zn、Ag、Fe 等的矿化过程,都以深大断裂为通道,将深部含矿热物质(岩浆和流体)传输并就位于浅部地壳形成金属矿床,如“邯郸柱”、“中条柱”、“郅庐柱”等深大断裂均被认为是金属矿质的传输通道^[26]。因此,矿集区与深大断裂、岩浆活动有着非常密切的关系。

按照一般的成矿理论,构造带控制了多数内生金属矿床的分布^[27]。一些金属矿体往往就赋存于一定的构造环境之中,是地质构造直接作用的结果^[28]。这也佐证了成矿带与构造带的密切关系。

需要说明的是,关于成矿带和构造带的关系中不可忽视的流体作用。几乎所有的金属矿床形成过程均与金属从源岩的活化、原始渗滤、矿质运移和金

属沉淀富集成矿密切相关,这些过程主要由流体的运动和作用完成,流体起纽带作用^[29]。正是基于流体的纽带作用,低速高导体和深大断裂构造促使了强震的孕育和发生^[17,30]。世界范围内许多地区的地壳中存在着不同规模的高导低速层,这些地区几乎都是地震或构造活动带,都是高热流区^[31,32]。可以说,流体是地质作用过程中,尤其是成矿作用过程中最活跃的因素,也是地震和滑坡等灾害的诱发因素。它是地壳与地幔之间的物质和能量交换的介质^[33]。

还需特别指出的是,活动地热系统是非常重要的现代成矿作用系统,也是重要的地震活动带。如东太平洋洋中脊扩张带排放出来的含金属热卤水堆积形成块状硫化物矿床,围绕新西兰的 Brolllands 地热喷泉口沉淀出非晶质砷和锑化物等,并含较高的 Au、Ag、Hg 和 Cr 等元素,深部沉淀物中有 Zn、Pb、Cu 等硫化物^[33]。

综上所述,深大断裂构成了深部热物质(流体、岩浆等)上涌的通道,这些地区就容易富集内生金属矿床;流体等在深大断裂带的热活动也是诱发地震的重要因素,所以,成矿带与地震地带经常吻合在一起。

从数千个震例分布看,构造活动频繁地区,确实是地壳薄弱地带,也是地震多发地带。对照中国和全球地震带分布图和成矿分带图,不难发现二者存在惊人的吻合。这预示从成矿的角度分析具热电特征天然半导体矿物时空分布规律,进一步探讨半导体矿物热电效应在地震预测的应用前景深远。

6 结 论

(1) 半导体矿物的本质特征(杂质和结构缺陷)决定了地壳中广泛存在天然半导体矿物。天然半导体矿物普遍具有热电特性。目前可用热电仪测得热电敏感矿物的热电势,而多数半导体矿物属非热电敏感矿物,目前尚不能测得热电势。

(2) 孕震发震梯度热场可激发天然半导体矿物产生热电势,其中相当一部分半导体矿物的激发热电势随活化温度的增加而增高。这种激发热电势对地震电场有一定的干扰效应。

(3) 天然半导体矿物热电干扰效应的积累效应(也可能形成“低电阻域”效应)可作为地震预测的信息源之一,获取并解译这些信息能提供有价值的地震分析数据。

(4) 成矿带和地震带的空间关系表明,天然半导体矿物的集中分布带与地震活动带相一致。

参考文献 (References):

- [1] 汪志亮,王志贤,余素荣,李纲. 地电前兆场特性及有关地震预报问题探讨[J]. 地震, 2000, 20(增刊): 147 - 153.
Wang Zhiliang, Wang Zhixian, Yu Surong, Li Gang. The features of the geoelectric precursor and the related issues in earthquake prediction [J]. Earthquake, 2000, 20 (suppl.): 147 - 153. (in Chinese with English abstract)
- [2] 叶淑华, 陈述彭. 特大自然灾害预测的新途径和新方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 52 - 53.
Ye Shuhua, Chen Shupeng. The new approach and methods for forecast of super-elemental disasters[M]. Beijing: Science Press, 2002: 52 - 53. (in Chinese)
- [3] 郝建国, 张云福. 地震静电预测学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 4 - 7.
Hao Jianguo, Zhang Yunfu. The Static forecasting for earthquake [M]. Dongying: Petroleum University Publishing House, 2001: 4 - 7. (in Chinese)
- [4] 李高山, 杨殿范, 许虹, 胡大千, 贾克实. 矿物中的电子-空穴心及其在找矿勘探中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1.
Li Gaoshan, Yang Dianfan, Xu Hong, Hu Daqian, Jia Keshi. The electron-cavity centers in the mineral and it's application on deposits prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1. (in Chinese)
- [5] 国家地震局预测预防司. 电磁学分析预报方法[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 19.
Forecasting and Defence Depatement, China Earthquake Administration. Electromagnetic analysis and forecasting methods for earthquake [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1998: 19. (in Chinese)
- [6] 魏文博, 叶高峰, 金胜, 邓明, 景建恩, 彭志强, 林昕, 宋石磊, 唐宝山, 屈柱柱, 陈凯, 杨宏伟, 李国强. 华北地区东部岩石圈导电性结构研究——减薄的华北岩石圈特点[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 204 - 215.
Wei Wenbo, Ye Gaofeng, Jin Sheng, Deng Ming, Jing Jian'en, Peng Zhiqiang, Lin Xin, Song Shilei, Tang Baoshan, Qu Shuangzhu, Chen Kai, Yang Hongwei, Li Guoqiang. Geoelectric structure of lithosphere beneath eastern North China: Features of a thinned lithosphere from magnetotelluric soundings [J]. Earth Science Frontier, 2008, 15(4): 204 - 215. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社, 1989: 325.
Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. Genetic mineralogy of gold deposits in Jiaodong region with emphasis on gold prospecting [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1989: 325. (in Chinese)
- [8] 李家驹. 矿物的热电效应及其应用[J]. 地质论评, 1965, 23(4): 316 - 317.
Li Jiaju. The thermoelectric effects of minerals and it's use-ness [J]. Geological Review, 1965, 23(4): 316 - 317. (in Chinese with English abstract)
- [9] 邵伟, 孙岱生, 陈光远. 黄铁矿热电性[J]. 现代地质, 1992,

- 6(4):404 - 410.
Shao Wei, Sun Daisheng, Chen Guangyuan. Thermoelectricity of Pyrite[J]. Geoscience, 1992, 6(4): 404 - 410. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘耀伟, 高安泰, 施锦, 苏鹤军. 天水地区地壳结构热分布与热应力特征初步研究[J]. 地震学报, 2007, 29(6): 605 - 610.
Liu Yaowei, Gao Antai, Shi jin, Su hejun. Priliminary study of temperature distribution and associated thermal stress in crust in Tianshui, China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(6): 605 - 610. (in Chianese with English abstract)
- [11] 张永仙, 梅世蓉. 孕震区内热物质运移过程及其伴生地震前兆[A]. 张国民. 地震中短期预报物理基础研究[M]. 北京: 地震出版社, 2002: 69 - 93.
Zhang Yongxian, Mei Shirong. The movement process of the thermal substance in earthquake gestation zone and concomitant earthquake premonitor[A]. Zhang Guoming. The basal reseach on middle-short term forecast physics[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2002: 69 - 93. (in Chinese)
- [12] Valiya M. Hamza. 陈大庆译. 断层含水层在非等温条件下的构造性渗流一种震前热前兆异常产生的机理[J]. 国际地震动态, 2006, 7(7): 51 - 60.
Valiya M. Hamza. Translated by Chen Daqing. The tentonic seepage in hydrated layer of the fault under unisothermal — As a interpret for the mechanism of occure of thermal premonitory abnormity[J]. Recent Developments in World Seismology, 2006, 7(7): 51 - 60. (in Chinese)
- [13] 王林瑛, 朱传镇. 唐山地震和海城地震前地温的异常变化[J]. 地震研究, 1984, 7(6): 449 - 456.
Wang Linying, Zhu Chuazhen. The abnormal change of geothermal before Tangshan earthquake and Haicheng earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 1984, 7(6): 449 - 456. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈有发, 董奇珍, 马钦忠, 王燕琼, 丁卉, 康好林. 地电学预报地震的综合跟踪方法[J]. 中国地震, 1994, 10(4): 405 - 413.
Chen Youfa, Dong Qizhen, Ma Qingzhong, Wang Yanqiong, Ding Hui, Kang Haolin. The comprehensive tracing method of earthquake prediction by using geoelectricity[J]. Earthquake Research in China, 1994, 10(4): 405 - 413. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张宝盈. 地震电磁成因假说[J]. 高原地震, 2005, 17(2): 1 - 21.
Zhang Baoying. A hypothesis about the cause of the electromagnetism of earthquake[J]. Earthquake Research in Plateau, 2005, 17(2): 1 - 21. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨文采. 全球流体通道网[J]. 地球物理学报, 1998, 41(5): 621 - 633.
Yang Wencai. On globe fluid pathway network[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(5): 621 - 633. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘耀伟, 施锦, 曹玲玲, 潘树新, 高安泰. 岩石圈内的流体通道研究概述[J]. 国际地震动态, 2001, (2): 21 - 27.
Liu Yaowei, Shi Jin, Cao Lingling, Pan Shuxin, Gao Antai. Brief introduction to the researches on fluid pathway in the lithosphere[J]. Recent Developments in World Seismology, 2001, (2): 21 - 27. (in Chinese with English abstract)
- [18] 马东升. 南华南重要金属矿床的成矿规律——时代爆发性、空间分带性、基底继承性和热隆起成矿[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(3): 209 - 217.
Ma Dongsheng. Metallogenetic characteristics of the important deposits in south China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(3): 209 - 217. (in Chinese with English abstract)
- [19] 钱家栋, 曹爱民. 1976 年唐山 7.8 级地震地电阻率和地下水前兆综合物理机制研究[J]. 地震, 1998, 18(增刊): 1 - 9.
Qian Jiadong, Cao Aimin. Research on comprehensive mechanism of precursors in apparent resistivity and water table associated with 1976 Tangshan earthquake (M = 7.8) [J]. Earthquake, 1998, 18 (suppl.): 1 - 9. (in Chianese with English abstract)
- [20] 秦乃岗, 刘昌谋. 5 次中强震前河源地电台地电阻率的异常变化[J]. 华南地震, 1998, 18(3): 46 - 51.
Qing Naigang, Liu Changmou. The abnormal variations of earth resistivity observed at Heyuan city before five moderate earthquake[J]. South China Journal of Seismology, 1998, 18(3): 46 - 51. (in Chinese with English abstract)
- [21] 於崇文. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性[J]. 地学前沿, 1998, 5(4): 347 - 361.
Yu Chongwen. Complexity and self-organized criticality of solid earth system[J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(4): 347 - 361. (in Chinese with English abstract)
- [22] 曹显光, 梁秉强. 地震带与矿产密集区的相关性分析[J]. 西南矿产地质, 1997, (3, 4): 88 - 94.
Cao Xianguang, Liang Bingqiang. Anlysis on relativity between earthquake zone and deposit dense zone[J]. Southwest Mineral Deposit Geology, 1997, (3, 4): 88 - 94. (in Chinese with English abstract)
- [23] 涂光炽. 超大型矿床的探寻与研究的若干进展[J]. 地学前沿, 1994, 1(3): 45 - 53.
Tu Guangchi. Recent progresses on the studies and searches for superlarge mineral deposits[J]. Earth Science Frontiers, 1994, 1(3): 45 - 53. (in Chinese with English abstract)
- [24] 翟裕生. 古大陆边缘构造演化和成矿系统[A]. 北京大学地质系. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集[C]. 北京: 地震出版社, 1998: 769 - 778.
Zhai Yusheng. Structure evolvement of ancient-tcontinent edge and mineralization system[A]. School of Earth Science, Peking University. Proceeding of Beijing University international geoscience workshop[C]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1998, 769 - 778. (in Chinese)
- [25] 张正伟, 张中山. 华北古大陆南缘构造格架与成矿[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(3): 276 - 288.
Zhang Zhengwei, Zhang Zhongshan. Geotectonic framework and metallogenic system in the south margin of North China Palecontinent [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and

- Geochemistry, 2008, 27(3): 276 - 288. (in Chinese with English abstract)
- [26] 邢集善, 杨巍然, 邢作云, 刘建华, 赵斌. 中国东部深部构造特征及其与矿集区关系[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 114 - 130.
- Xing Jishan, Yang Weiran, Xing Zuoyun, Liu Jianhua, Zhao Bin. Deep-seated structure characteristics of eastern China and its relation with metal mineralization-concentrated region [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 114 - 130. (in Chinese with English abstract)
- [27] 黄建军, 肖文进, 高军辉. 华北地台北缘东部地区金矿成矿地质特点及预测[J]. 黄金科学技术, 2008, 16(1): 19 - 23.
- Huang Jinajun, Xiao Wenjin, Gao Junhui. The gold deposit metallogeny characteristics and forecast in eastern area of north China[J]. Gold Science and Technology, 2008, 16(1): 19 - 23. (in Chinese with English abstract)
- [28] 朱大岗, 孟宪刚, 冯向阳, 张贺鹏, 邵兆刚, 马寅生, 付海涛, 曲玮, 王建平. 辽西阜新金-多金属成矿区主要断裂带构造特征及其控矿作用[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 35 - 40.
- Zhu Dagang, Meng Xiangang, Feng Xiangyang, Zhang Hepeng, Shao Zhaogang, Ma Yingsheng, Fu Haitao, Qu Wei, Wang Jianping. The constructive characteristic of primary fault zone of Au-Polymetallic mineralization zone and its deposit control function in Fuxin, Liaoning[J]. Journal of Geosciences, 2003, 24(1): 35 - 40. (in Chinese with English abstract)
- [29] 贾跃明. 流体成矿系统与成矿作用研究[J]. 地学前缘, 1996, 3(3-4): 253 - 258.
- Jia Yueming. Investigation of fluid ore forming systems and processes[J]. Earth Science Frontiers, 1996, 3(3-4): 253 - 258. (in Chinese with English abstract)
- [30] 施锦, 刘耀炜, 高安泰. 甘肃天水强震多发区中地壳低速高导体的成因探讨[J]. 地震研究, 2004, 27(4): 318 - 321.
- Shi Jin, Liu Yaowei, Gao Antai. Studies on the possible reasons causing the low-velocity-and-high-conductive layer in mid-crust of Tianshui earthquake-prone area[J]. Journal of Seismological Research, 2004, 27(4): 318 - 321. (in Chinese with English abstract)
- [31] 赵志丹, 高山. 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, 1996, 39(5): 642 - 651.
- Zhao Zhidan, Gao Shan. 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, 1996, 39(5): 642 - 651. (in Chinese with English abstract)
- [32] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一): 坚固体孕震模式的由来与证据[J]. 地震学报, 1995, 17(3): 273 - 282.
- Mei Shirong. The physics model of earthquake premonitory field and research of mechanism of premonitor space-time contribution(first): The origin and evidence of solid earthquake-gestation model[J]. Acta Seismoica Sinica, 1995, 17(3): 273 - 282. (in Chinese)
- [33] 芮宗瑶, 艾永德, 王龙. 金属矿床学的研究热点[J]. 地质论评, 1996, 42(4): 334 - 340.
- Rui Zongyao, Ai Yongde, Wang Long. Research hot spots of ore deposits[J]. Geological Review, 1996, 42(4): 334 - 340. (in Chinese with English abstract)