

# 超高压变质岩物理性质的相关性对建立结晶岩区地球物理解释标尺的意义\*

欧新功<sup>1</sup> 金振民<sup>2</sup> 夏斌<sup>1</sup> 徐海军<sup>2</sup> 金淑燕<sup>2</sup>

OU XinGong<sup>1,2</sup>, JIN ZhenMin<sup>2</sup>, XIA Bin<sup>1</sup>, XU HaiJun<sup>2</sup> and JIN ShuYan<sup>2</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广州 510640

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

1. GuangZhou Institute of Geochemistry, Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, GuangZhou 510640, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources (GPMR), China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2005-01-20 收稿, 2005-05-10 改回.

Ou XG, Jin ZM, Xia B, Xu HJ and Jin SY. 2005. Correlations between petrophysical properties of ultra-high pressure rocks and its significance on establishing the geophysical interpretation standards for crystalline rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (3): 1005 – 1014

**Abstract** Scientific Drilling has become a critical tool to provide data essential to understand the structure, composition, mechanical behavior and physical state of the deeper crust. Petrophysical studies are necessary for the calibration of borehole logging results and for the interpretation of surface geophysical investigations. Such studies, in combination with petrological investigations, are also required for the understanding of chemical alteration and metamorphism. Correlation investigation and cluster analysis are performed on petrophysical properties of ultra-high pressure rocks from 100 ~ 3100m of CCSD main hole, and the conclusions are given as following: (1) the strong correlations among seismic wave, density and thermal conductivity are controlled by the mineral assemblage and proportion in the rocks; (2) electrical resistivity and susceptibility are controlled by the metal oxide in the rocks and associated with the lithology of the rocks, but the porosity and permeability have no correlation with lithology; (3) the lithology of the rocks can be classified according to their petrophysical properties. Eclogite and gneiss can be distinguished according to the seismic velocity, density and thermal conductivity, but the ultra-mafic rocks, prargneiss and orthogneiss can be well recognized if the susceptibility and resistivity are added to the analysis parameters. These conclusions are of great important to the parameter selection in geophysical interpretation and also have the great significance on establishing the geophysical interpretation standards for crystalline rocks.

**Key words** Ultrahigh-pressure rocks, Petrophysics, Cluster analysis, CCSD

**摘要** 大陆科学钻探为认识深部地壳的结构、组成、力学性质和物理状态提供了重要的基础数据。岩石物理性质的测量对于原位测井资料的校正和地表地球物理测量的解释具有重要意义, 岩石物理性质和岩石学研究相结合, 还能为岩石的变质作用以及变质过程中化学成分的迁移提供必要的约束。本文主要对 CCSD100 ~ 3100m 的综合岩石物理资料进行了相关性调查和聚类分析, 并得出如下结论: (1) 岩石物理性质中的地震波速度、密度、热导率之间具有强相关性, 他们都受岩石中主要矿物的组成和含量所控制; (2) 岩石的电阻率和磁化率受金属氧化物含量的控制, 与岩性有相关性; 孔隙度、渗透率与岩性没有相关性; (3) 利用岩石的物理性质可以反演不同的岩性, 其中地震波速度、密度和热导率对榴辉岩和片麻岩大类具有很好的分类效果, 而结合磁化率和电阻率则能更好的区分出超基性岩、正片麻岩和副片麻岩。上述结论对综合地球物理解释中物理参数的选取和结晶岩区地球物理解释标尺的建立具有重要的意义。

**关键词** 超高压岩石; 岩石物理性质; 聚类分析; 中国大陆科学钻探

**中图分类号** P584

\* 本文为国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716506)、中科院王宽诚博士后奖励基金、地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金以及中国博士后科学基金(2003034457)的联合资助成果。

第一作者简介: 欧新功, 男, 1974 年生, 博士后, 主要从事岩石物理学和岩石流变学方面的研究, E-mail: xgou@gig.ac.cn

## 1 引言

岩石物理性质之间的相关性是岩石物理学研究的重要内容,是了解岩石不同物理属性及其相互关系的有力工具。更为重要的是,如果确定了某一地区两个或多个岩石物理参数之间的相互关系,就可以利用已知的参数间接获取其它不易测量的物理参数。这在估算岩石物理性质,建立岩石物理学和岩石学模型,约束实测地球物理数据方面均有重要的意义,因而备受研究者的重视。关于这方面的研究,在大别-苏鲁地区研究较早的是岩石密度和地震波速度之间的关系(高山等,1997; Kern *et al.*, 1999; 2002; 赵志丹等2001; 金振民等,2004),此外还包括岩石的孔隙度和渗透率对地震波速度和密度的影响(Popp *et al.*, 1998; 2000),水饱和度和孔隙流体对波速的影响等(Knigh *et al.*, 1990; 施行觉等,1995; Holl *et al.*, 1997; 史调等,2003)。另外一个最重要的研究方向是岩石的弹性性质(主要是地震波速度)和岩石热物理性质之间的关系,包括地震波速度对地热模型的约束等(Correia *et al.*, 1999)。Tukkonen *et al.* (1998)通过对芬兰大量的岩石物理数据的分析,详细探讨了岩石热物理性质和弹性性质之间的关系。虽然他得出的各物理参数之间的相关性不是很明显,但关于热导率和地震波(Zamora *et al.*, 1993)、生热率和地震波速度之间的关系(Huenges *et al.*, 1997),以及影响弹性和热物理性质的因素(Bayuk *et al.*, 1998; Seipold *et al.*, 1998; Ogilvie *et al.*, 2001),已无疑是一个重要的研究方向。

表1 CCSD 岩石物理性质测量参数一览表

Table 1 Summary of petrophysical parameters measured on cores in the CCSD program

参数	测量方法	代号	单位	样品状态	各向异性	参考文献*
密度	阿基米德定律	$\sigma$	$10^3 \text{ kg/m}^3$	干燥、饱水		
超声波速度	超声波	$V_p, V_s$	$10^3 \text{ m/s}$	干燥、饱水	测量	Rauen and Winter, 1995;
热导率	瞬时加热法	$\kappa$	$\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	干燥	测量	Pribnow <i>et al.</i> , 1995;
电阻率	欧姆定律	$\rho$	$\Omega\text{m}$	饱水		Rauen and Soffel, 1995
磁化率	卡帕桥	Sus	SI	干燥	测量	
孔隙度	达西定律	$\varphi$	%	干燥		
渗透率	气流定律	K	$10^{-15} \text{ m}^2$	干燥		

在纵向上,本文涉及的样品深度从100~3100m,共计500余件样品,每一件样品包括上述的10项属性,这样就形成了一个500(样品) $\times$ 10(属性)的数据库,这就是本文进行各种分析和反演的基础数据资料。最终的数据资料结构如表2所示。表3给出了测量数据的统计结果和测量误差,由于岩石电阻率和磁化率的测量值在数量级上差别很大,为了便于作图,对这两个物理量取对数之后再参与各项分析。

在岩石物理性质研究中,大陆科学钻探提供了获得地壳深部物理状态最为直接的手段。岩石物理性质的研究对于钻孔录井结果的校正和地表地球物理调查的解译都是非常重要的。岩石物理学和岩石学研究相结合,还能对岩石的变质作用以及变质过程中化学成分迁移提供必要的约束(Berckhemer *et al.*, 1997)。中国大陆科学钻探(CCSD)提供了苏鲁超高压变质带丰富的垂向连续的超高压岩石样品,为系统研究该区的岩石物理资料提供了绝好的机会。鉴于已经有文章报道了CCSD100~2000m岩石的弹性性质(金振民等,2004)以及热导率特征(欧新功等,2004),本文则主要选取CCSD100~3100m岩心的不同物理参数(表1),重点分析它们之间的相关性和内在联系,探讨物理性质对超高压变质岩研究的启示和意义。通过对样品物理属性的分析以及样品的聚类,探讨在结晶岩区通过岩石物理属性反演岩性的最佳方法,对综合地球物理资料反演和建立解释标尺提供直接和有力的证据。

鉴于已经有大量文献资料介绍了CCSD和苏鲁地区的地质背景,本文不再赘述。

## 2 数据构成

在CCSD岩石物理性质的研究中,实际测试的岩石物理参数包括密度 $\sigma$ 、弹性纵波 $V_p$ 、横波 $V_s$ 、热导率 $\kappa$ 、电阻率 $\rho$ 、磁化率Sus、孔隙度 $\varphi$ 、渗透率K,再加上深度和岩性特征,每件样品包括10个属性,这就是数据库的横向组成。各物理量的测试原理、数据单位和数据处理方法如表1所示:

## 3 相关性分析(Correlation analysis)

相关性分析是对客观现象具有的相关关系进行的研究分析。其目的在于帮助我们对关系的密切程度和变化的规律性有一个具体的数量上的认识,作出判断,并且用于推算和预测。其主要内容包括(1)确定现象之间有无关系(2)确定现象之间关系的密切程度(3)测定两个变量之间的一般关系值(4)测定因变量估计值和实际值之间的差异。

表2 岩石物理性质数据结构

Table 2 Database structure of organized petrophysical measurements

样品号	深度	岩性	热导率	密度	Vp	Vs	电阻率	磁化率	孔隙度	渗透率
001	101.65	多硅白云母金红石榴辉岩	3.223	2.87	6.30	3.72	7252	1227	1.63	0.17
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
507	3105.50	二云长英质片麻岩	2.506	2.65	5.19	2.50	5026	15033	1.03	0.109

表3 对所测数据的质量评估

Table 3 Quality evaluation of acquired dataset

物理量	热导率	密度	Vp	Vs	电阻率	Log(电阻率)	磁化率	Log(磁化率)	孔隙度	渗透率
最大值	4.27	3.87	8.35	4.64	103783	5.02	103762	5.02	3.20	4.67
最小值	1.69	1.80	4.85	2.13	1.85	0.27	59.58	1.78	0.46	0.07
平均值	2.84	2.91	6.03	3.28	8735	3.70	5818	3.21	1.88	0.22
标准偏差	0.50	0.29	0.70	0.44	9724	0.63	13806	0.66	0.72	0.26
测量误差	≤2%	±0.01	±0.02	≤1%	≤5%		≤2%		±0.10	±0.05

表4 岩石物理性质之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between petrophysical parameters

相关系数	样品数: N = 507									
	热导率	密度	Vp	Vs	电阻率	磁化率	孔隙度	渗透率		
热导率	1.00									
密度	0.39	1.00								
Vp	0.51	0.85	1.00							
Vs	0.51	0.75	0.94	1.00						
电阻率	0.13	0.11	0.30	0.37	1.00					
磁化率	0.23	-0.07	-0.01	-0.09	-0.08	1.00				
孔隙度	0.32	0.09	0.19	0.14	0.25	0.14	1.00			
渗透率	0.25	0.47	0.31	0.19	-0.16	-0.07	0.20	1.00		

相关关系可以用数据来看出两个变量(Y与X,或两个X)间紧密程度如何,两者之间关系的强度通过相关系数(r)(correlation coefficient)可以计数化。

例如对n件岩石样品的两个物理属性X,Y分别进行了测量,得到两组数据:

{X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>n</sub>} 以及 {Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, ..., Y<sub>n</sub>} ,并且这两种属性的平均值分别为  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$

则这两种属性之间的相关系数定义为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

r表示两种属性之间的相关程度,其范围介于-1和1之间。

根据以上公式,对500件样品的8项物理性质分别求出相关系数,得出相关系数矩阵如表4所示:

由于岩石样品的复杂性,并且样本数量较大(>500个),这里根据r的值分类如下:如果|r|>0.50时具有强相关性;如果0.30>|r|>0.50时具有弱相关性;如果|r|<0.30时认为没有相关性。根据这一标准,从表3中可以看出,在岩石物理性质中,具有强相关性的物理量包括:密度/波速,热导率/波速。岩石的密度和波速之间的相关性已经被很多文献所证实,但关于岩石热导率,尤其是超高压岩石的热导率和波速之间相关性还没有被相关的资料所证实。

此外,具有弱相关性的物理量包括:热导率/密度,热导率/孔隙度,密度/渗透率,波速/电阻率。这些弱相关物理量的相关性主要受岩石本身裂隙的影响。其它的物理量之间则不具有明显的相关性。

这里需要指出的是,磁化率与其它任何的物理量之间都没有明显的相关性,这主要是因为岩石样品的平均磁化率主

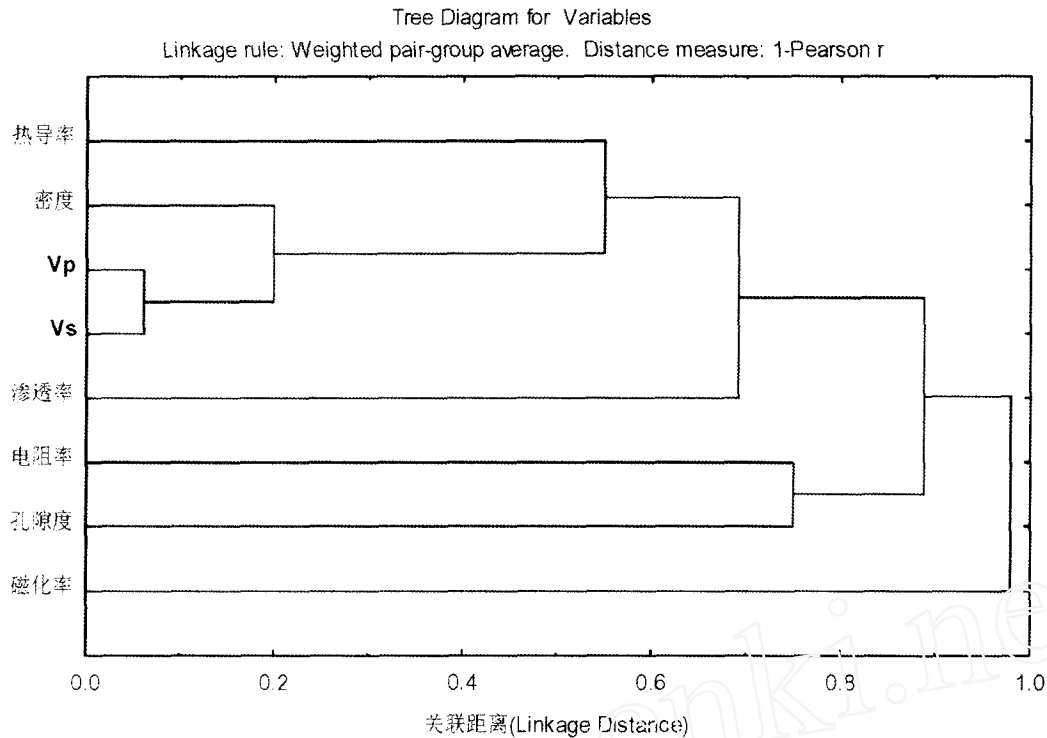


图1 对岩石物理属性的聚类分析树状图

Fig. 1 The tree diagram of cluster analysis on Variables of petrophysics.

要受样品中磁性矿物(大多为副矿物)的含量控制,而与岩石中的主矿物关系不大,所以与其它物理量相关性很差。

从统计学的角度上讲,即使证明 $Y$ 与 $X$ 间具有相关性,也并不意味着 $Y$ 的变动一定是 $X$ 的变动引起的,可能存在引起 $X$ 与 $Y$ 同时变动的第3个隐藏变量。两个变量间有关系的结论并不意味着因果关系,在岩石物理性质上表现为:两个相关物理量的变化实际上是随岩性的变化而变化,所以仅仅对样品属性的相关分析还不够,还要通过对样品和其属性进行归类,这就是下面的聚类分析。

#### 4 聚类分析(Cluster analysis)

聚类分析是根据事物本身的特性研究个体分类的方法,其原则是同一类中的个体有较大的相似性,不同类的个体差别比较大。聚类分析实质上是寻找一种能客观反映元素之间亲疏关系的统计量,然后根据这种统计量把元素分成若干类。是物以类聚的一种统计分析方法。根据分类对象的不同分为样品聚类和变量聚类。

为了深入研究哪些物理性质之间具有最直接的影响,以及在综合物理性质控制下,哪些样品之间的关系最为紧密,聚类分析是很好的数学手段之一。根据样品的数据特征,在聚类分析中选取的是系统聚类法(hierarchical clustering method),先把 $N$ 个对象(样品或属性)看成 $N$ 类,然后逐步合并,直至 $N$ 个对象并成一类为止。合并数据使用的规则是

WPGMA (weighted pair-group method using arithmetic averages), 计算类与类之间的距离采用 Pearson 相关系数,具体计算公式如下:

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N})(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N})}} \quad (2)$$

其中 $X, Y$ 表示两组变量, $N$ 表示对象数(样品数或属性数)。

根据上面的原理和公式分别对物理性质(变量)和样品进行聚类分析。

##### 4.1 对物理性质的聚类分析

岩石物理性质之间的某些属性是相互关联的,也有的属性之间没有直接关系,为了弄清这些关系,利用取得的数据库进行分析,得出如下变量之间的关系,如图1所示:

在树状聚类图上可以看出,关系最近的是波速,这一点是因为它们来就是两种不同的弹性波,反映的是物质的同一种属性。然后与之相关的是密度,这一点也已经得到相关文献的证实。聚类图中还明显反应的一点:与密度和波速属性最为相近的就是热导率,对超高压变质岩来说,这一点还没有相关的资料证实。从地质实际情况来看,以上这四种属性都与岩石的矿物组成有关,反应的是矿物集合体的属性。而接下来的磁化率和电阻率则主要受控于岩石中金属氧化物含量的影响,所以与其它物理属性之间关系较远。

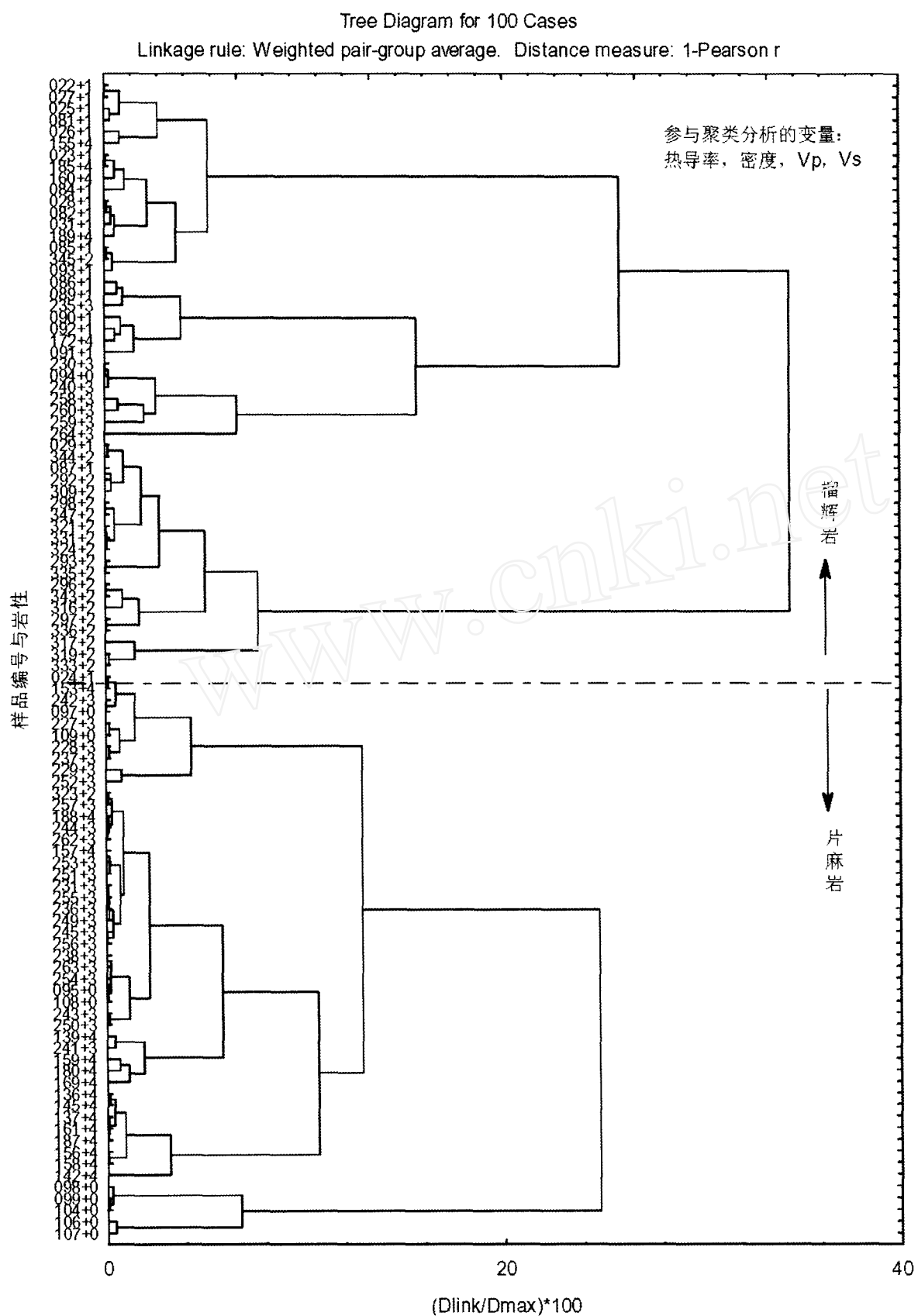


图2 利用4个物理参数(密度、Vp、Vs、热导率)对样品进行的聚类分析图解

Fig. 2 Tree diagram of cluster analysis on 100 samples according to their 4 petrophysical parameters.

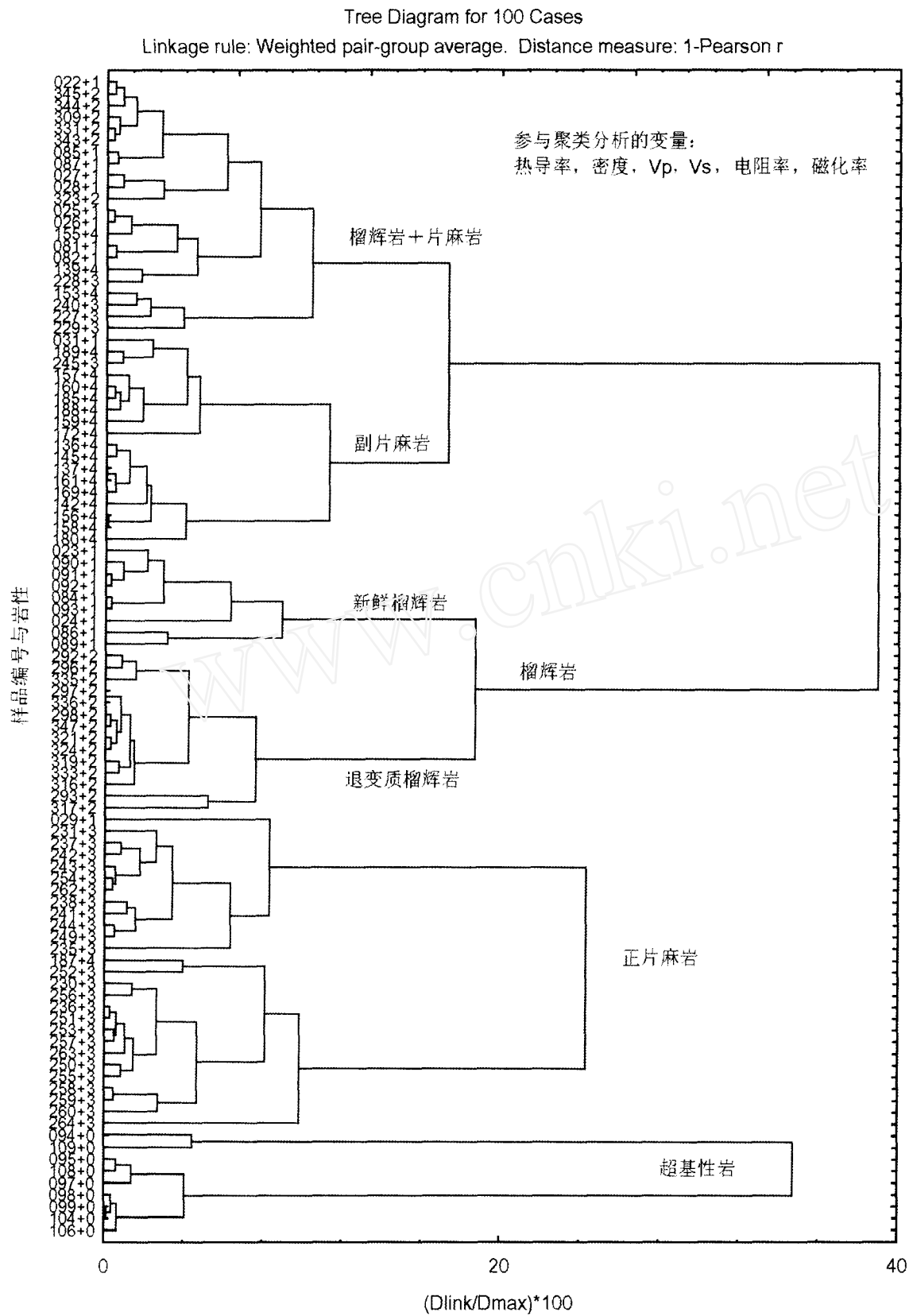


图3 利用6个物理参数(密度、Vp、Vs、热导率、孔隙度、渗透率)对样品进行的聚类分析图解

Fig. 3 Tree diagram of cluster analysis on 100 samples according to their 6 petrophysical parameters.

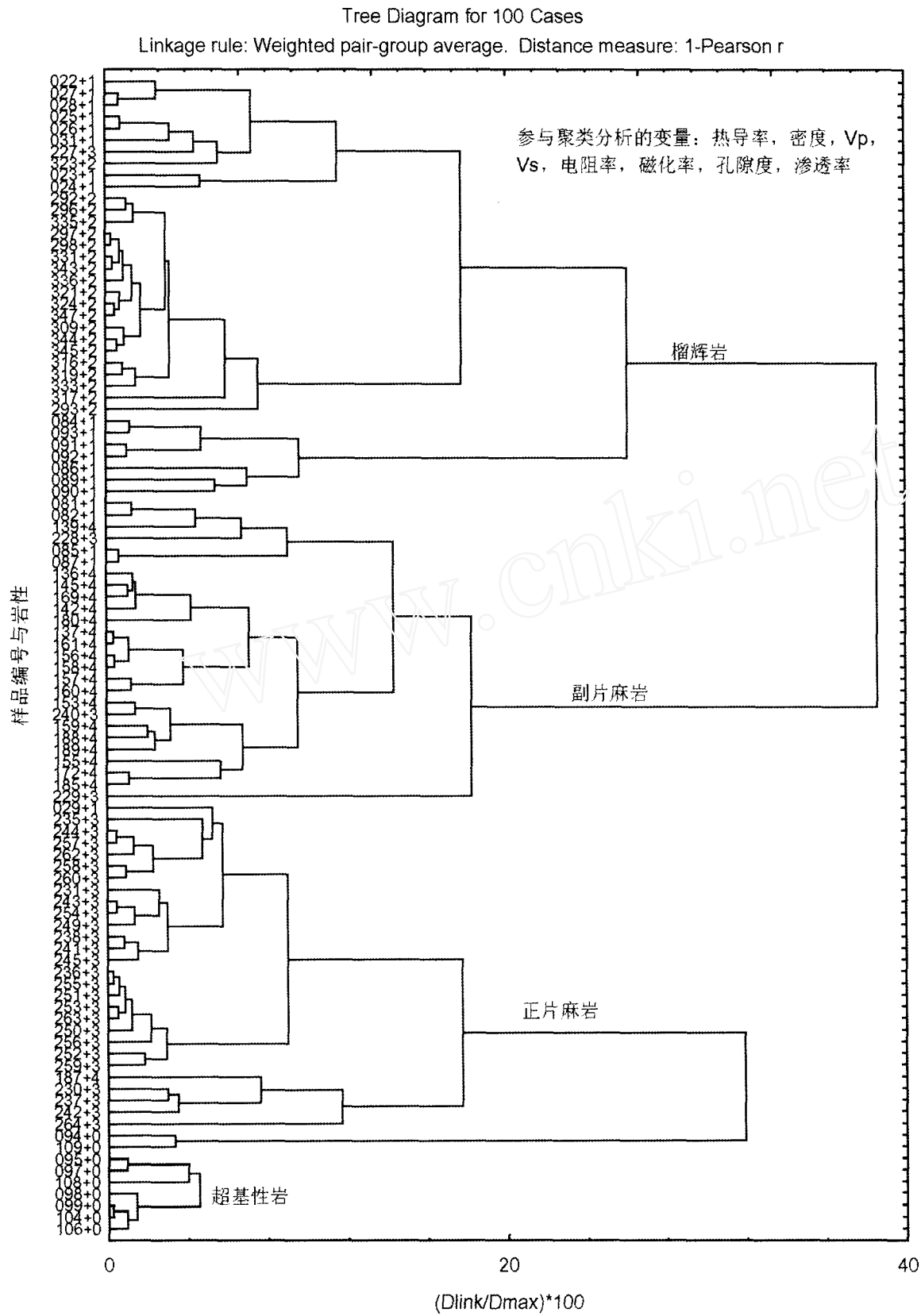


图4 利用8个物理参数对样品进行的聚类分析图解

Fig.4 Tree diagram of cluster analysis on 100 samples according to their 8 petrophysical parameters.

#### 4.2 对样品的聚类分析

岩石物理学研究的重要目的之一就是通过直接测量到的样品性质反演岩性,这在综合地球物理解释中具有非常重要的意义。但地质岩石岩性非常复杂,同一岩石类型之间的变化也很大,为了既便于统计学上研究的方便,又便于识别岩性,对 CCSD100~2000m 数据库中的样品进行抽样。根据许志琴(2004)文献中提供的岩性柱状图,选取以下深度的样品参与分析:

200~250m,新鲜榴辉岩 10 件; 500~600m,新鲜榴辉岩 10 件;

1600~2000m,退变质榴辉岩 20 件;

1200~1500m,正片麻岩 30 件, 800~1070m,副片麻岩 20 件;

600~680m,超基性岩 10 件;

以上共计 100 件样品,基本代表了 CCSD 主孔 2000m 的物质组成和样品特征。

在这 100 件样品中,每件样品均有 10 个物理属性(100×10 的数据库),依据不同的属性组合分别对这 100 件岩性已知的样品进行归类,聚类分析结果如图 2~图 4 所示。为了便于清晰识别分类效果,对图 2~图 4 的纵坐标定义如下:每件样品编号均有 4 个数字构成,前面 3 个数字代表样品序号,最后一个数字代表岩石类型,其含义分别为:1-新鲜榴辉岩;2-退变质榴辉岩;3-正片麻岩;4-副片麻岩;0-超基性岩。例如:022+1 表示样品序号 022 的新鲜榴辉岩。

从前节的相关性分析已经知道,热导率、密度、波速之间的相关性最强,首先依据这 4 种属性进行样品的归类,结果如图 2 所示。从这张图可以看出,这 4 种属性把样品区分成了 2 大类,图中水平虚线的下部是片麻岩,上部是榴辉岩,有 50% 的超基性岩被区分出来,另外的 50% 被混于片麻岩中。

考虑到超基性岩具有特征的电阻率和磁化率特征,把这两个变量加入,然后依据 6 个变量(密度、 $V_p$ 、 $V_s$ 、热导率、电阻率、磁化率)再进行聚类分析,得到了明显不同的分类图(图 3 所示)。首先,10 件超基性岩被完整的区分出来,单独成一类。正片麻岩和副片麻岩被区分开,榴辉岩中新鲜榴辉岩和退变质榴辉岩被分开。除了图的顶部有一点各岩类的混杂外,几种主要的岩石类型被清晰的归类。

最后把数据库中的 8 个物理变量一起作为归类的标准,得出聚类分析图 4。这种分类基本区分出了各大岩类,但分类效果不如图 3,超基性岩的识别率为 80%。

综上所述,图 3 所采取的分类变量最为有效,即选取岩石的密度、地震波速度、热导率、电阻率和磁化率对样品进行反演,可以区分出苏鲁地区不同的超高压变质岩。

## 5 结论与讨论

通过对超高压岩石样品的物理属性进行综合聚类分析,岩石的波速、密度和热导率之间具有很强的相关性,可以作为互相推导的依据。这为通过地球物理方法估算地下岩石的热导率提供了可能。近年来,随着热导率测量技术和测量手段的发展(Lee, 1989; Seipold, 1998),大量的结晶岩热导率数据以及它们之间的关系被不断认识(Clouser *et al.*, 1995; Seipold, 1998)。在充分评估热导率与地震波速度关系的基础上,利用地球物理数据或测井资料可以定性分析地下岩石的热导率。

不同类型岩石的物理性质之间具有不同的内在联系,受控的影响因素也不一样:岩性(主要矿物的组成和含量)是控制强相关物理量之间关系的主要因素,如地震波速度、密度和热导率;副矿物和岩石构造特征是控制弱相关物理量相关性的因素(如磁化率、电阻率等)。这里需要指出的是,关于电阻率和孔隙度的关系,在致密的结晶岩区遇到了新的挑战。由于传统测量孔隙度的原理所限,对极低孔隙度的测量有较大的相对误差,再加上钻孔岩心均为致密的超高压变质岩,孔隙度和渗透率都非常低,在绝对值上非常接近,造成岩石孔隙度和电阻率并不相关。若在沉积岩区,二者应该有较大的相关系数。

在对大量岩心进行测量的基础上,可以利用物理属性反演样品的岩石类型。近年来,随着对深部地壳地震波反射及其各向异性的认识(Christensen, 1989; Warner, 1990; Jones *et al.*, 1996),地球物理学家希望通过遥测的数据推测地下结构乃至成分,但这种推测往往具有多解性,需要一定的解释约束。大陆科学钻探钻孔所在地区有详细的地球物理资料(杨文采等,1999; 2002),也有对地表样品初步的岩石物理工作(余钦范等,2002),但总体来说还缺乏系统的岩石物理资料及其相互关系对地球物理解释进行约束。本文的研究指出,在苏鲁超高压变质岩区,利用岩石的密度和地震波速度可以大致区分出片麻岩类和榴辉岩类,但无法区分出岩石类型的细节;而利用密度、地震波速度、热导率、磁化率和电阻率,则可以区分出榴辉岩的退变质程度、超基性岩、正片麻岩和副片麻岩。该结论对反演综合地球物理资料、建立结晶岩区地球物理的解释标尺具有重要意义。

**致谢** 参加本文部分数据测试的还有王璐、王永锋、罗震宇、宋衍茹、余日东等,中国大陆科学钻探工程现场的许多科研和管理人员提供了很多帮助,在此表示衷心的感谢。



## References

- Bayuk I O, Chesnokov E M. 1998. Correlation between Elastic and Transport Properties of Porous Cracked Anisotropic Media. *Phys. Chem. Earth.*, 23 (3): 361-366
- Berckheemer A, Rauen A, Winter H, *et al.* 1997. Petrophysical properties of the 9-km deep crustal section at KTB. *J. Geophys. Res.* 102(B8): 18337-18362
- Christensen N L. 1989. Reflectivity and seismic properties of the deep continental crust. *J. Geophys. Res.* 94: 17795-17804
- Clauser C, Huenges E. 1995. Thermal conductivity of rocks and minerals. In Ahrens T. J. (ed.). *Rock physics and phase relations: A handbook of physical constants*, Washington DC, AGU Publisher, 3:105-126
- Correia A, Ramalho E C. 1999. One-dimensional thermal models constrained by seismic velocities and surface radiogenic heat production for two main geotectonic units in southern Portugal. *Tectonophysics*, 306: 261-268
- Gao Shan, Jin Zheming, Jin Shuyan, *et al.* 1997. Preliminary study on seismic velocities and density of ultrahigh-pressure eclogite from Dabie shan; Implication for composition of deep crust and Moho characters. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*. 42(8): 862-866
- Holl A, Althaus E, Lempp C. 1997. The petrophysical behavior of crustal rocks under the influence of fluids. *Tectonophysics*. 275: 253-260
- Huenges E, Lauterjung J, Becker C. *et al.* 1997. Seismic velocity, density, thermal conductivity, and heat production of cores from the KTB pilot hole. *Geophys. Res. Lett.*, 24(3): 345-348
- Huenges E. 1997. Factors controlling the variances of seismic velocity, density, thermal conductivity, and heat production of cores from the KTB pilot hole. *Geophys. Res. Lett.*, 24(3): 341-344
- JIN ZhenMin, OU XinGong, XU HaiJun, *et al.* 2004. Elastic wave velocities of the 2000m depth at Chinese Continental Scientific Drilling; Constrains on deep seismic reflection. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 81-96
- Jones K A, Warner M R, Morgan R P. 1996. Coincident normal-incidence and wide-angle reflection from the Moho; evidence for crustal seismic anisotropy. *Tectonophysics*
- Kern H, Shan Gao, Zhenmin Jin, *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. *Tectonophysics*. 301: 191-215
- Kern H, Zhenmin Jin, Shao Gao, *et al.* 2002. Physical properties of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Sulu terrain, eastern China: implications for the seismic structure of the Donghai (CCSD) drilling site. *Tectonophysics*. 354: 315-330
- Knigh R, Nolen-Hoeksema R. 1990. A laboratory study of the dependence elastic wave velocities on pore scale fluid distribution. *Geophys. Res. Lett.* 17(10): 1529-1532
- Lee, T-C. 1989. Thermal conductivity measured with a line source between two dissimilar media equals their mean conductivity. *J. Geophys. Res.*, 94(B9): 12,443-12,447
- Ogilvie S R, Glover P W J. 2001. The petrophysical properties of deformation bands in relation to their microstructure. *Earth and Planetary Science Letters*, 193: 129-142
- OU XinGong, JIN ZhenMin, WANG Lu, *et al.* 2004. Thermal conductivity and its anisotropy of rocks from the depth of 100-2000m mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling; revelations to the study on thermal structure of subduction zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 109-118
- Popp T, Kern H. 2000. Monitoring the State of Microfracturing in Rock Salt During Deformation by Combined Measurements of Permeability and P- and S- Wave Velocities. *Phys. Chem. Earth.*, 25 (2): 149-154
- Popp T, Kern H. 1998. Ultrasonic Wave Velocities, Gas Permeability and Porosity in Natural and Granular Rock Salt. *Phys. Chem. Earth.*, 23 (3): 373-378
- Prinow, D. F. C, and Sass J. H, 1995. Determination of thermal conductivity for deep boreholes, *J. Geophys. Res.*, 100, 9981-9994
- Rauen A, Winter H. 1995. Petrophysical properties. In: Emmermann R. *et al* (Ed), *KTB Report 95-2, Hannover*, D24-D28
- Rauen, A., and Soffel H C. 1995. Determination of electrical resistivity, its anisotropy and heterogeneity on drill cores: a new method, *Geophys. Prospect.*, 43, 285-298
- Seipold U, Mueller H-J, Tuisku P. 1998. Principle Differences in the Pressure Dependence of Thermal and Elastic Properties of Crystalline Rocks. *Phys. Chem. Earth.*, 23(3): 357-360
- Seipold U, Raab S. 2000. A Method to Measure Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity under Pore and Confining Pressure. *Phys. Chem. Earth.*, 25 (2): 183-187
- Seipold U. 1998. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks; a general law. *Tectonophysics*, 291(1-4): 161-171
- Shi Ge, Shen Wenlue, Yang Dongquan. 2003. The relationship of elastic wave velocity with saturation and fluid distribution in pore space. *Chinese J. Geophys (in Chinese with English abstract)*. 46(1): 138-142
- Shi Xingjue, Xu Guoming. 1995. Experimental study on the effect of water-saturation on compressional and shear wave velocity and attenuation. *Chinese J. Geophys (in Chinese with English abstract)*. 38 (supplement): 281-287
- Tukkonen I T, Peltoniemi S. 1998. Relationships between Thermal and other Petrophysical Properties of Rocks in Finland. *Phys. Chem. Earth.*, 23(3): 341-349
- Warner M. 1990. Absolute reflection coefficients from deep seismic reflections. *Tectonophysics*. 173: 15-23
- XU ZhiQin. 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1-8
- Yang Wencai, Cheng Zhenyan, Chen Guojie. 1999. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (I): Deep seismic reflection. *Chinese J. Geophys (in Chinese with English abstract)*. 42(1): 41-52
- Yang Wencai, Zhang Chuhe, Zhu Guangmin. 2002. Calibration of seismic reflectors in Chinese Continental Drilling area (in Chinese with English abstract). 45(3): 370-384
- Yu Qingfan, Yao Changli, Meng Xiaohong. 2002. Petrophysical properties at site of continental scientific Drilling, Northern Jianshu

- province. Chinese J. Geophys (in Chinese with English abstract). 45(1): 93-100
- Zamora M, Vo-Thanh D, Bienfait G. *et al.* 1993. An empirical relationship between thermal conductivity and elastic wave velocities in sandstone. *Geophys. Res. Lett.*, 20(16): 1679-1682
- Zhao Zhidan, Xie Hongsheng, Zhou Wenge. 2001. Density and seismic velocity of eclogite from Dable shan and implications for cycle of crust-mantle. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (in Chinese with English abstract). 20(1): 52-57
- 附中文参考文献**
- 高山, 金振民, Kern H 等. 1997. 大别山超高压榴辉岩高温高压下地震波速和密度的初步研究——对造山带地壳深部组成和莫霍性质的启示. *科学通报*, 42(8): 862-866
- 金振民, 欧新功, 徐海军等. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000m 岩石弹性波速度: 对地震深反射的约束, *岩石学报*. 20(1): 81-96
- 欧新功, 金振民, 王璐等. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000m 岩石热导率及其各向异性: 对研究俯冲带热结构的启示, *岩石学报*. 20(1): 109-118
- 施行觉, 徐果明. 1995. 含水饱和度对纵横波速度和衰减影响的实验研究. *地球物理学报*, 38(增刊): 281-287
- 史譔, 沈文略, 杨东全. 2003. 岩石弹性波速度和饱和度、孔隙流体分布的关系. *地球物理学报*, 46(1): 138-142
- 许志琴. 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. *岩石学报*, 20(1): 1-8
- 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. *地球物理学报*, 42(1): 41-52
- 杨文采, 张春贺, 朱光明. 2002. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体. *地球物理学报*, 45(3): 370-384
- 余钦范, 姚长利, 孟小红. 2002. 苏北大陆科学钻探靶区岩石物理性质. *地球物理学报*, 45(1): 93-100
- 赵志丹, 谢鸿森, 周文戈. 2001. 大别山榴辉岩的密度和波速及其对壳-幔循环的启示. *矿物岩石地球化学通讯*, 20(1): 52-57

www.cnki.net