

文章编号:0258-7106(2002)01-0091-06

隐伏矿床的地震波动力学信息探测^{*}

曾校丰 许维进

(中国地质大学,北京 100083)

何文能

(江西省地矿厅,江西 南昌 331200)

摘 要 为进一步拓展地震勘探方法在金属矿勘探中的应用,寻找到更多的隐伏固体矿产,文章应用复数地震道分析方法,将地震波中以三瞬信息为主的动力学信息提取出来。这些信息形象直观地反映了地下矿体的赋存状况和展布形态,从而达到勘探的目的。通过对某地已知和未知矿区实测地震波动力学信息的提取分析和钻探验证,证明地震波三瞬信息对地下岩体成像效果好,为地下金属矿藏探测提供了一个新的有效手段。

关键词 隐伏岩体 矿产勘探 地震波动力学信息

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

地震勘探方法对弹性差异明显、成层性好的地质体的勘探效果明显,因此倍受地球物理工作者的重视,尤其是在油气、煤田勘探中,已成为不可替代的方法手段(何樵登,1986)。地震勘探在固体矿产勘探中也受到了关注,从 20 世纪 50 年代后期开始,国内开始尝试使用地震勘探方法进行金属矿勘探,并取得了一些成果^{①②③}(何樵登等,1991);同一时期,前苏联、美国、澳大利亚和西欧一些国家也开展了这方面的实验研究工作,在金属矿地震勘探的野外数据采集及其运动学信息的处理方法上取得了一些进展,对地震勘探方法在金属矿中的实际应用前景和难度有了新的认识(Rihaczek,1968;Sengbush,1983)。但是,无论是在国内还是在国外,金属矿地震勘探都还处于实验研究阶段,还只是地震波运动学信息的提取和利用(何樵登等,1986)。由于金属矿与围岩之间界面的不规则性,金属矿地震勘探的效果不明显,因此,还很少直接应用于生产中。

70 年代以后,地震波动力学信息的提取和利用受到了重视(何樵登等,1991;Anton et al.,2001),希尔伯特变换与复数地震道分析技术在油气地震勘探资料处理中得到了广泛的应用(何樵登等,1986;Taner et al.,1979;James et al.,1984;Yilmaz,1994)。受此启发,笔者将该方法引入到金属矿地震

勘探中,并结合两处金属矿探区进行研究实验,即通过地震资料的复数道分析,将记录中反映岩体与接触带的地震波动力学信息——瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位(简称三瞬信息,下同)提取出来,进行分析和解释,获取隐伏侵入体及其与围岩接触带的信息,进而探寻隐伏矿藏。实验获得了成功,证明了三瞬信息在金属矿地震勘探中的有效性和实用性^④。

1 原理简介

弹性波理论表明:地震波在岩性和结构差异明显的地质体中传播时,除了其所具有的运动学信息外,还必然携带反映这些地质体特殊属性的动力学特征信息(何樵登,1986)。处理地震资料时,在消除或大部分消除了传播介质性质(岩性和结构形态)以外的各种干扰因素的影响后,可从地震资料中提取地震波动力学信息(如三瞬信息),分析其特征和差异,进而预测地下地质体的岩性和结构形态^{⑤⑥}。

金属矿的形成常与岩浆侵入沉积地层及其所形成的接触带有关。火成岩侵入体、围岩以及接触带的结构、形态复杂多变,物理性质不同。对于这种复杂多变的地质体难以用地震波的运动学信息使其有效成像。而通过对地震波进行复数道分析(何樵登,

* 本文得到江西省地质矿产局“金属矿地震方法技术试验”项目资助

第一作者简介 曾校丰,男,1943 年生,副教授,从事应用地球物理的教学、科研及开发工作。

收稿日期 2001-01-31;改回日期 2001-07-10。李岩编辑。

① 崔霖沛,1992.地震方法在固体矿产勘探中的应用.地质矿产部情报研究所。

② 何文能,曾校丰,1994.金属矿地震勘探方法技术试验总结报告.江西省地质矿产局,1~2,46~61。

③ 华东一,1990.复数地震道分析及其在金属矿地震勘探中的应用.中国地质大学(北京),11~12,33~34。

1986; Taner et al., 1979; Yilmaz, 1994), 即可将反映接触带及其相邻岩体的动力学信息提取出来。这样, 就能依据这些信息异常特征发现隐伏岩体, 并确定岩体及其与围岩的接触带在地下的位置、埋深和形态等。

复数地震道分析的数学原理可简述如下:

设 $x(t)$ 为地震波实连续信号, 它的频率谱为 $X(f)$, 其中 t 为时间, f 为频率。

$$x(t) = \int_0^{\infty} 2 X(f) e^{i2\pi ft} df$$

$x(t)$ 也可表示成复信号的实部:

$$x(t) = \operatorname{Re}\left\{\int_0^{\infty} 2 X(f) e^{i2\pi ft} df\right\}$$

上式中令 $\int_0^{\infty} 2 X(f) e^{i2\pi ft} df = d u(t)$, 式中 $u(t)$ 为 $x(t)$ 的复信号。

经过付氏变换和希尔伯特变换得:

$$u(t) = x(t) + i \frac{1}{\pi t} * x(t)$$

令 $u(t)$ 的虚部为 $r(t)$, 则:

$$r(t) = \frac{1}{\pi t} * x(t) = h(t) * x(t)$$

其中 $h(t)$ 为滤波器函数, 则:

$$u(t) = x(t) + i r(t)$$

令 $A(t) = \sqrt{r^2(t) + x^2(t)}$, 则 $A(t)$ 为瞬时振幅。

令 $\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$, 则 $\omega(t)$ 为瞬时频率。

令 $\theta(t) = \arctg \frac{r(t)}{x(t)}$, 则 $\theta(t)$ 为瞬时相位。

根据上述数学原理进行计算机编程, 而后用该程序对实际地震资料进行计算机处理, 就可将瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位提取出来, 并显示相应处理结果, 供分析解释。其粗略处理流程如图 1。

2 地质实例

供试验的地震勘探资料采自长江中下游某地, 采集方法与常规地震勘探方法大体相同。三瞬信息的提取分析采用由已知到未知的思路和方法进行, 先对有岩体 (M_1) 露头、已知相关资料的某测线的地震波动力学信息进行提取、分析, 并和已知地质资料进行对比解释, 获得有规律的理性认识后, 再对其他未知区各测线进行三瞬信息的提取分析。

从工区十几条测线所提取的地震波动力学信息剖面来看, 瞬时相位对岩体的反映效果不如瞬时振

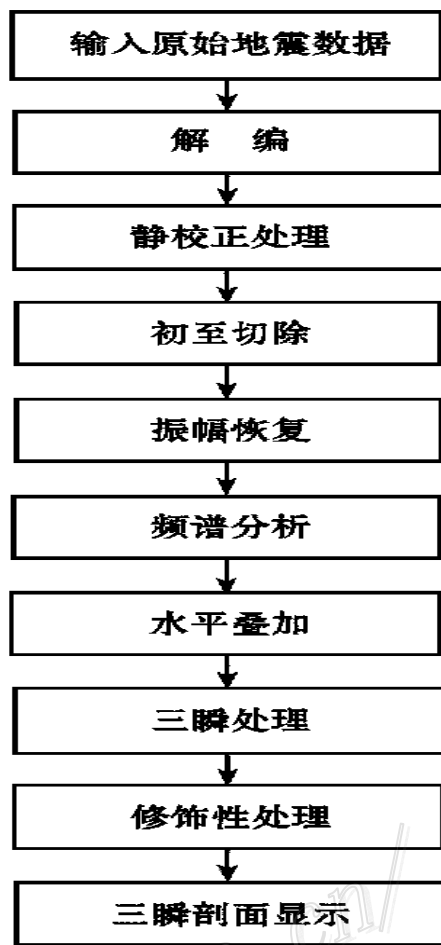
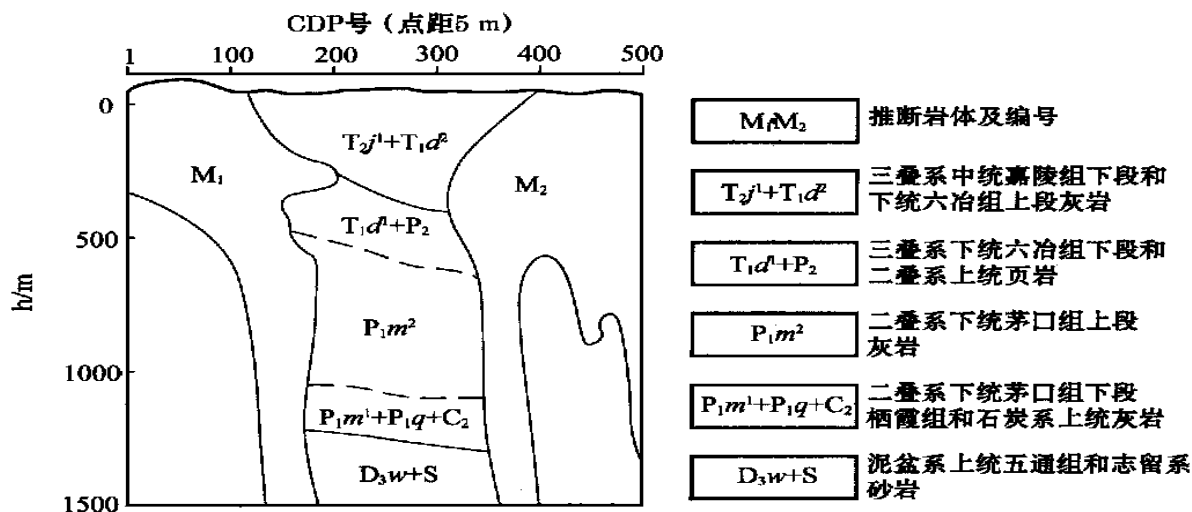


图 1 地震波三瞬信息处理流程图

Fig. 1 Flow chart of the seismic tri-instantaneous information

幅和瞬时频率明显, 而瞬时频率对岩体成像效果最好; 这是由于相位反映地震反射界面的横向连续性, 而岩体与围岩相比是不连续的, 所以其瞬时相位必然变差。地震波的振幅反映波阻抗界面的反射能量, 因地下岩体形态复杂多变, 使地震波发生散射, 因而其瞬时振幅一般为弱能量。同样, 由于侵入体及其与围岩的接触带一般是不规则、不平滑的, 和围岩相比, 其瞬时频率一般明显表现为杂乱的高频, 通过它很容易将岩体和接触带识别出来。由于瞬时频率的这一突出优势, 在进行地震波动力学信息分析解释时, 一般以它为主要依据, 再参考其他两种信息。文中的各地震波动力学信息剖面图, 均是瞬时频率剖面, 在黑白剖面图中瞬时频率异常一般以黑色阴影表示, 阴影分布的位置和范围及其形态和尺度直接勾勒出相应岩体的赋存和展布状况。

图 2 岩体 M_1 、 M_2 测段地质剖面Fig. 2 Geological sections of M_1 and M_2

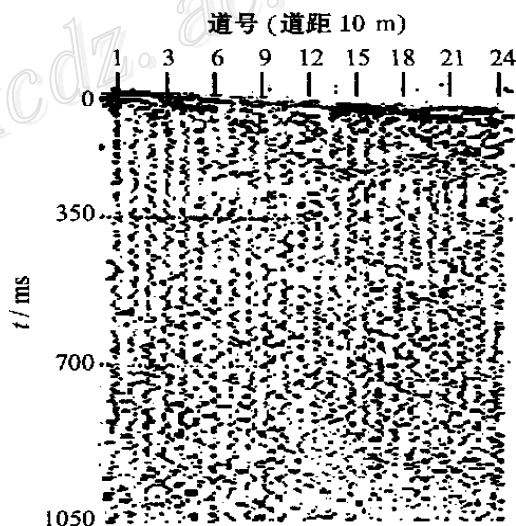
2.1 工区地质结构简介

工区内第四系沉积层厚度在 0 ~ 50 m 之间变化。其下沉积岩为第三系红色砂砾岩,三叠系、二叠系、石炭系灰岩和少量的页岩、砂岩,志留系砂泥岩。断裂、褶皱发育,地层倾角在 0 ~ 90° 之间变化,局部地层倒转。区内沉积岩中有岩浆岩侵入形成的隐伏体,地面有零星的火成岩侵入体出露,它们形成于燕山期^①。区内矿产资源丰富,已发现大、中、小型铜矿产多处,这些矿产与燕山期火成岩侵入体关系密切,因此找到火成岩侵入体及其接触带,就很可能在接触带内找到铜金等多种矿产。

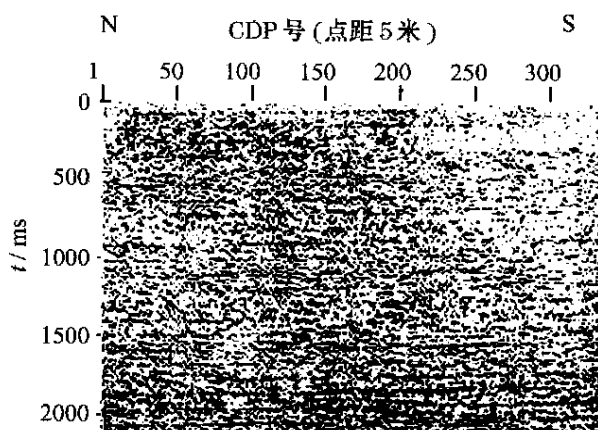
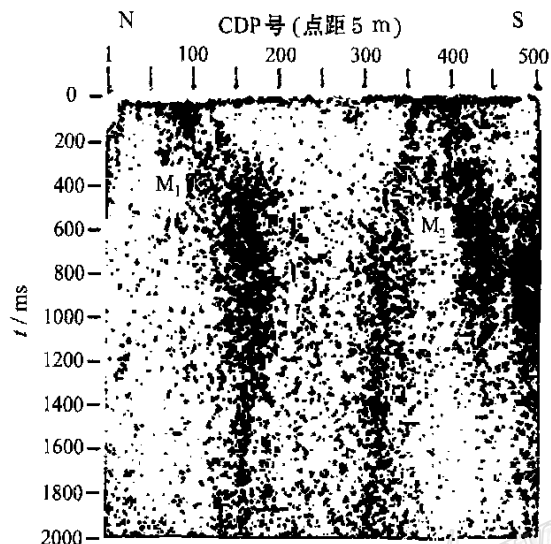
2.2 已知岩体探测试验

某地震测线上,岩体 M_1 出露地表,是一个半隐伏的燕山期火成岩侵入体,经矿产部门勘探表明为一大型铜矿。该测线对应的地质剖面见图 2,图中左侧为实测地质剖面,右侧 M_2 由地震勘探解释而得。地震测线由北向南穿过岩体,在此测线原始地震炮集记录(图 3)和相应常规地震时间剖面(见图 4)中,该岩体基本上没有成像显示,故不能被识别。图 5 为其地震波瞬时频率剖面,图中地面($t = 0$)以下,CDP 号 50 ~ 200 之间,地震波动力学信息出现明显的瞬时频率异常(即黑色阴影区域),它是该岩体形态及其与围岩接触关系的真实而生动的反映,图中阴影部分显示出岩体 M_1 上部由北向南、由浅表向深

处斜插,倾角较大,而其下部则呈直立状态。这与根据其他勘探资料所推断的岩体形态以及钻探获得的岩体剖面形态吻合。图 5 右侧人字型阴影部分,即 M_1 的南部存在一个由两大部分组成的岩体 M_2 ,其顶部几乎已出露地表。剖面上 CDP 号约 310 ~ 390 之间可解释为一夕卡岩化的熔蚀带;CDP 号 390 ~ 500 之间解释为一穿刺岩体。

图 3 岩体 M_1 测段原始地震炮集记录Fig. 3 Raw seismic record of M_1

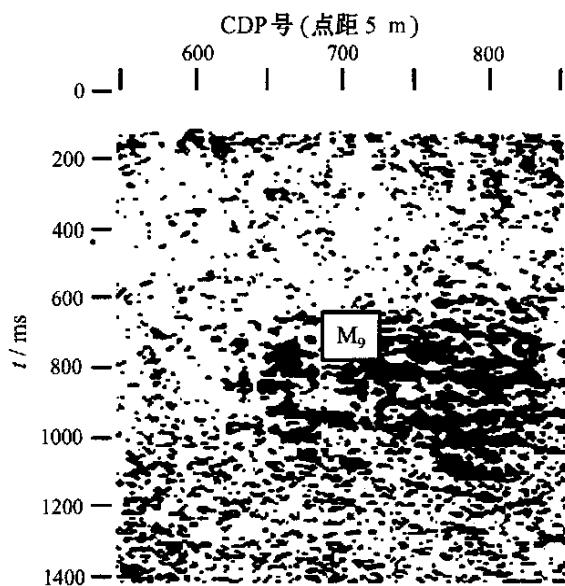
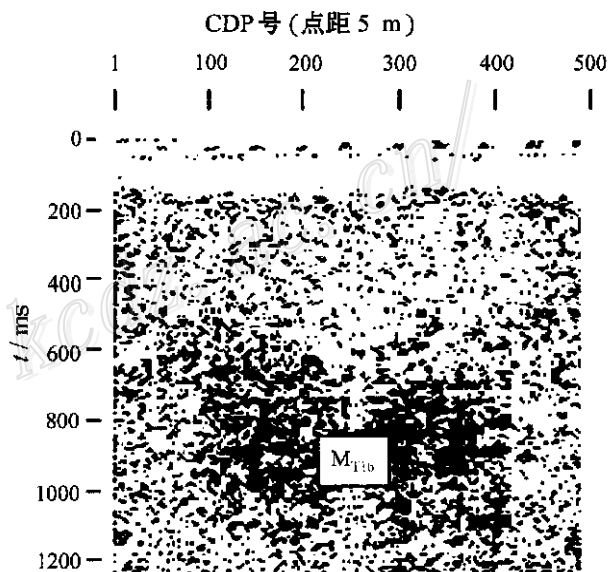
① 何文能, 曾校丰. 1994. 金属矿地震勘探方法技术试验总结报告. 1 ~ 2, 46 ~ 61.

图 4 岩体 M_1 地震常规叠加时间剖面Fig. 4 M_1 section of seismic stacking图 5 岩体 M_1 、 M_2 的地震波瞬时频率剖面图Fig. 5 M_1 and M_2 sections of seismic instantaneous frequency

2.3 隐伏岩体探测

据前述已知岩体的地震波动力学信息特征,对未知岩体埋藏区十几条测线的地震波动力学信息进行分析解释,发现大小隐伏岩体近 20 处。如图 6 中 CDP 号 620~830、 t 为 580~1180 ms 范围内出现明显的地震波动力学信息异常,推断为侵入岩体 M_9 ; 同样,图 7 中 CDP 号 85~440、 t 为 600~1050 ms 范围内存在明显的动力学信息异常,解释为隐伏岩体 M_{T16} ,该岩体也可从高精度航磁水平剖面上明显地得到证实。

从图 5 至图 7 完全可以看出,地震波动力学信

图 6 M_9 地震瞬时频率剖面图Fig. 6 M_9 section of seismic instantaneous frequency图 7 M_{T16} 地震动力学信息剖面图Fig. 7 M_{T16} section of seismic dynamic information

息清晰、直观地反映了沉积地层中隐伏侵入岩体在下的位置、形态、埋深及其与围岩的接触关系,效果比一般的地震波运动学信息,即时间剖面要生动、细致、清楚、准确、真实得多。在相应测线常规地震时间剖面图上岩体 M_9 、 M_{T16} 基本上没有异常反应,无法确认它们的存在。这两个岩体的地震时间剖面与图 4 类似,限于篇幅未附在文中。

表 1 M_0 岩体钻孔岩性表
Table 1 Lithology of M_0 drill hole

深度 / m	成 分	备 注
0.00 ~ 31.90	第四系粘土碎砾石层	① 375 m 以下岩心破碎
31.90 ~ 375.05	三叠系中、下统白云质灰岩夹少量页岩	② 从 583 m 至终孔见良好的
375.05 ~ 559.99	二叠系灰岩, 含少量煤系地层	金矿化显示
559.99 ~ 561.54	燕山期煌斑岩	
561.54 ~ 565.14	二叠系灰岩	
565.14 ~ 567.80	燕山期煌斑岩	
567.80 ~ 651.99	二叠系灰岩	
651.99 ~ 704.96	燕山期石英闪长玢岩(未钻穿)	

3 钻探验证

图 5、图 6、图 7 中的地震波动力学信息是否是侵入岩体的真实反映? 隐伏岩体 M_2 、 M_0 、 M_{T16} 是否存在? 其可信度如何? 还需要验证。因此, 笔者对图 6 中的 M_0 岩体进行了钻探, 钻孔位置定在 CDP 号 643 处。

钻探验证的具体目标是验证地震波动力学信息所预测的 M_0 异常是否存在, 是否是隐伏岩体, 以及其埋深和形态是否与图 6 所示的情形吻合。由于本区表层为大片厚约数十米的第四系覆盖层, 是地质找矿工作的盲区, 上述预测如能得到验证, 就为该区寻找隐伏矿床展示出美好前景。

验证孔设计深度 800 m, 终孔深度 704.96 m。孔中揭示的地质信息及岩性见表 1。

对钻孔岩心进行分析, 发现二叠系灰岩中多出现角砾岩、构造角砾岩, 岩石强烈破碎。经岩心取样分析, 在 580.0 m 以上金含量低, w_{Au} 一般为 9×10^{-12} 。从 583.00 m 开始至终孔(即岩体接触带)存在金矿化, w_{Au} 一般为 100×10^{-12} , 其背景值明显增高, 个别样品达到边界品位($w_{Au} = 1.1 \times 10^{-6}$), 与邻近几公里远的一金矿背景值类似, 表明金矿化与岩体有关, 金围绕岩体和接触带富集^①。

钻探揭示结果和由地震波动力学信息所解释的地质成果吻合, 因此可以推断本区地下存在一个规模较大、埋深不大的隐伏岩体; 又因在灰岩和接触带地段有良好的金矿化显示, 说明该区具有良好的成矿条件和寻找隐伏金矿资源的前景。实践证明, 由地震波动力学信息所推断的地质成果可信度高。

4 结 论

由已知区到未知区的探测和研究及钻探验证, 说明地震波三瞬信息对地下岩体成像效果好、分辨率高。利用它探测地下隐伏火成岩侵入体, 并确定地质体在地下的空间位置、规模、埋深及其与围岩的接触关系, 方法可行, 为探寻隐伏矿藏提供了一个新的有效手段。

References

- Anton A D and Sergey V G. 2001. Analysis of seismic wave dynamics by means of integral representation and the method of discontinuities[J]. Geophysics, 66(2): 413 ~ 418 .
- He Q D. 1986. Theory and method of seismic exploration[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 31, 348 ~ 356 (in Chinese).
- He Q D and Xiong W G. 1991. Seismic exploration[M]. Beijing: Geol. Pud. House. 1 ~ 44 (in Chinese).
- James D R, Henry N, et al. 1984. Complex seismic trace analysis of thin beds[J]. Geophysics, 49(4): 344 ~ 352 .
- Rihaczek A W. 1968. Signal energy distribution in time and frequency [J]. IEEE Transaction Information Theory, 14(3): 369 ~ 374 .
- Sengbush R L. 1983. Seismic exploration methods[M]. Boston: International Human Resources Development Corporation. 158 ~ 176 .
- Taner M T, Koehler F and Sheriff R E. 1979. Complex seismic trace analysis[J]. Geophysics, 44: 1 041 ~ 1 063 .
- Yilmaz O. 1994. Seismic data processing[M]. sl: Society of Exploration Geophysicists. 484 ~ 486, 521 .

附中文参考文献

- 何樵登. 1986. 地震勘探原理和方法[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 31, 348 ~ 356 .
- 何樵登, 熊维纲. 1991. 地震勘探[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 44 .

① 何文能, 曾校丰. 1994. 金属矿地震勘探方法技术试验总结报告. 江西省地质矿产局. 1 ~ 2, 46 ~ 61 .

Application of Seismic Wave Dynamic Information to Detection of Concealed Ore Deposits

Zeng Xiaofeng, Xu Weijin

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

He Wenneng

(Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanchang 331200, Jiangxi, China)

Abstract

Nowadays it is increasingly important for geophysical experts both at home and abroad to find more concealed ore deposits by means of seismic exploration. The authors conducted experimentation in some known and unknown metallogenic zones in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The derivation, analysis, interpretation and application of seismic wave dynamics were studied. The dynamic information revealed that there existed nearly 20 concealed deposits. Subsequent drilling and test in the M_9 rock body demonstrated that the seismic tri-instantaneous information was effective in imaging the ore deposits. The test proved to be a wonderful success. This method provides a new effective means for metallic deposit exploration.

Key words: concealed rock body, mineral exploration, seismic wave dynamics

2001 年《矿床地质》副主编毛景文、秦克章获得多项荣誉

本刊副主编毛景文研究员于 2001 年 9 月入选国家“长江学者奖励计划”第四批特聘教授,并代表中国首次进入国际矿床地质学会(The Society of Geology Applied Mineral Deposits, 简称 SGA)任理事。

本刊副主编秦克章研究员获得了中组部、人事部和中国科学技术协会组织评选的第七届中国青年科技奖,并获得 2001 年度中国科学院优秀博士后荣誉称号,现应邀作为美国经济地质学会(The Society of Economic Geologists, 简称 SEG)的中国联系人。