

# 壳幔过渡带的复杂性特征及其动力学意义

赖晓玲<sup>1</sup>, 孙译<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002 2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450008)

**摘要:**不同构造单元的地震测深资料 Pm 波形的复杂性有明显的差异, 这种差异与深部构造特征有密切的联系。利用波的瞬时特性和波列长度, 给出一种地震波形复杂性系数的计算方法。古老稳定的地块的 Moho 复杂性系数小, 反映一级间断面的特征; 反之对于活动性强烈地块, Moho 复杂性系数大, 反映壳幔过渡带的特征。处理了穿过青藏高原东北缘的一条地震测深剖面, 并对结果进行了动力学意义的解释。

**关键词:**壳幔过渡带; Pm 波形; 复杂性系数; 动力学意义

**中图分类号:** P631.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2005)02-0111-05

21 世纪地球科学研究的重要方向之一是各间断面的研究。Moho 界面是全球性重要间断面中距离人类生活的地表最近的一个间断面。但是许多迹象表明 Moho 在某些特殊区域不是十分清楚, 它具有“递变层”的结构, 因此也称 Moho 为壳幔过渡带<sup>[1]</sup>。近年来随着人们对地球科学认识的进步, 壳幔过渡带在岩石层构造演化中的作用和意义越来越受到关注<sup>[2-3]</sup>。并且壳幔过渡带的形成和性质还与矿床成因、油气贮存、强震机理、挤压造山、裂谷作用、岩浆活动等有着密切的联系<sup>[4-5]</sup>。

地震测深宽角反射(DSS)剖面是研究壳幔过渡带的主要手段之一, 从中国大陆各个地区不同构造单元的 DSS 记录截面反映出 Pm 波形的复杂性有十分明显的差异<sup>[6-9]</sup>。总体特征为, 在 Moho 构造稳定区主要为震相简单清晰、强振幅突出、波列较短。反之对构造活动区则显示出震相复杂、强振幅不突出、波形紊乱、波列长等。对记录截面分析可以看出这种波形复杂性的差异与深部构造特征有密切的联系。以往的工作, 对 DSS 剖面记录的 Pm 波主要是利用其走时, 或者说是以研究壳幔过渡带速度结构为主要目的。没有从壳幔过渡带 Pm 波形的复杂性与深部构造动力学关系的角度进行过直接研究。

## 1 壳幔过渡带的复杂性定量描述

### 1.1 方法原理

R. F. Mereu<sup>[10]</sup>提出了利用复杂性系数来补充对莫霍界面性质的进一步描述, 给出了基于地震波

能量的复杂性系数计算方法, 获得了加拿大一条 DSS 剖面所穿过的几个构造单元的 Moho 复杂性系数平均值。考虑到前人的方法计算较复杂并且结果的表示太粗糙(仅仅给出各构造单元的平均值), 本研究将延用与能量相关的概念给出一种新的复杂性系数计算方法。改进的目的其一是简化运算, 其二是为了表示成图形并且寻找图形特征与深部动力过程的关系。本研究提出的复杂性系数计算方法以数字信号分析为基础, 利用了波的瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率<sup>[11]</sup>和波列长度。计算表达式为:

$$A(t) = \sqrt{[f(t)]^2 + [\hat{f}(t)]^2}, \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \arctan[\hat{f}(t)/f(t)], \quad (2)$$

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{f(t) \frac{d\hat{f}(t)}{dt} - \hat{f}(t) \frac{df(t)}{dt}}{[f(t)]^2 + [\hat{f}(t)]^2}, \quad (3)$$

$$C_x = Nt_0 \quad (4)$$

(1)~(3)式分别为瞬时振幅  $A(t)$ , 瞬时相位  $\varphi(t)$ 、瞬时频率  $F(t)$  的计算公式。式中  $f(t)$  为地震记录,  $\hat{f}(t)$  为相应地震记录的 Hilbert 变换。(4)式为波组的复杂性系数  $C_x$  的计算公式,  $N$  为波组的波包络数,  $t$  为波组的延续时间。

$N$  的求取, 首先对波组进行 Hilbert 变换, 然后利用(1)~(3)式计算瞬时特征, 瞬时振幅  $A(t)$  曲线又称为波的包络线, 在可视化图形上可以看出波的包络数量。对于实测资料, 由于干扰背景等原因, 波的包络数量有时不太清楚, 因此还需要参考瞬时相位和瞬时频率特征。

## 1.2 复杂性系数的物理意义

瞬时振幅表示波的能量传播随时间变化的强弱状态,其幅值均为正值。瞬时相位反映了波通过地层的连续性特征,由于相位与信号强弱无关,因而它能清晰地表现最弱的接收信号。瞬时频率是瞬时相位对时间的变化率,由于来自同一反射层的地震波的瞬时频率具有单调连续性质,在不考虑随机干扰的条件下,假若地震记录上某一时刻的瞬时频率发生了间断,就可以认为是从下一个反射层来的地震波干涉的结果,波列长度反映介质的衰减性质。通过这些参数定义的复杂性系数,可以描述壳幔过渡带结构和物性的复杂程度。从应用上,通过复杂性系数图可以比较相邻地块间的 Moho 复杂性差异,对穿过多个构造单元的剖面可给出活动块体 Moho 的横向复杂性变化特征,为我们从 Moho 层次研究块体的运动补充新的信息。

## 2 壳幔过渡带的复杂性应用实例

对穿过青藏高原东北缘的一条 DSS 剖面的 Pm 波形资料进行了处理。玛沁—靖边地震测深剖面为北东向,长约 1 000 km,共放了 9 炮,穿过了多个构造单元<sup>[12]</sup>。剖面的西南段进入青藏高原东北部,中段通过祁连山、六盘山与贺兰山脉的交汇区,北段进入鄂尔多斯地块的毛乌素沙漠的南缘,从西到东剖面穿过的地质构造单元为巴颜喀拉地槽带、秦祁褶皱系,陵中盆地、海原盆地、鄂尔多斯盆地。在不同的构造单元剖面穿过了多条断裂,并通过海原 1920 年 8.5 级大震区。

### 2.1 记录截面分析

图 1 给出该剖面其中的 2 炮典型记录截面,它们分别来自不同的构造单元。从图中可以看出 Pm 波在走时和波形上都有较大的差异。图 1a 为靖边炮点记录截面,反映古老稳定的鄂尔多斯地块 Moho 的波形特征。其 Pm 波形简单,波的振幅大,震相清晰,起始尖锐,波列短(持续时间大约为 0.5~0.6 s)。图 1b 反映巴颜喀拉地块和柴达木地块的结合带,穿过玛沁断裂的 Moho 波形特征。它的 Pm 波形很复杂,波列持续时间大约为 2~3 s,并且呈叠瓦状,反映出多层和不连续的 Moho 特征。另外,穿过海原地震区的同心炮记录的 Pm 波形也很复杂并且紊乱,反映了该震区深部构造的强烈活动性。

### 2.2 资料处理

将上述方法用于该剖面 Pm 波形资料处理。挑选穿过各个不同构造单元的 Pm 波形资料,在 DSS 数据库的波形拾取菜单下完成各炮 Pm 波形的拾

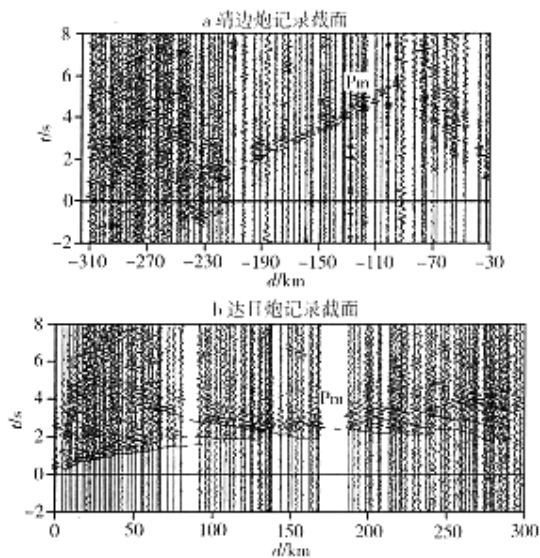


图 1 玛沁—靖边地震测深剖面记录截面

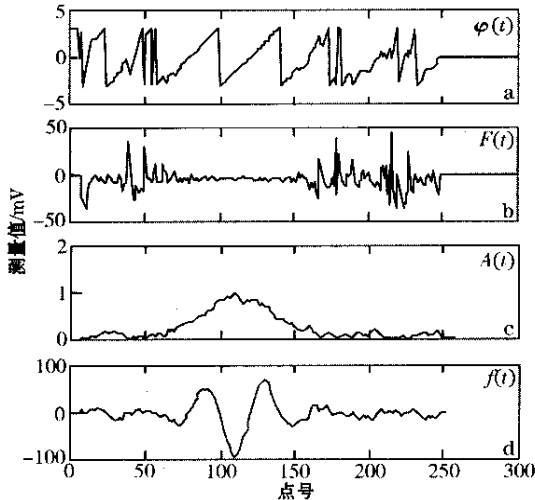


图 2 鄂尔多斯地块的瞬时特征和一个 Pm 波形记录

取,然后将所拾取波形的相应道记录转换为与计算程序相符合的数据格式。计算各个波形记录的 Hilbert 变换,然后计算瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率。分析相应记录的瞬时特征,得到波包络数并计算出该记录的复杂性系数值。图 2 给出了位于鄂尔多斯地块的一个 Pm 波形记录的分析结果,图 2a、b、c、d 分别对应瞬时相位、瞬时频率、瞬时振幅、Pm 波形。可以看出在 50~165 号采样点之间存在一个有效波的包络,并且瞬时频率和瞬时相位在相应位置标记也很明显。信号的采样率为每秒 200 个样点,可以计算出该记录的复杂性系数约为 0.6。图 3 给出了鄂尔多斯盆地与海原盆地结合带的 Pm 波形分析结果。该记录的有效波为 2 个包络,分布在 0~260 个采样点之间。第一个和第二个包络的分界大约在 155 样点,在那里瞬时相位和瞬时频率都有明显的突跳,计算出该记录的复杂性系数约为 2.6。

对穿过剖面的各个构造单元的多炮记录中所选的记录都进行同样的波形处理,图 4 给出几个构造单元的部分  $P_m$  波形记录的瞬时振幅(包络)。图 4a 为鄂尔多斯地块的结果,可以看出  $P_m$  波为一个清晰的包络,波列延续时间约为 0.5~0.7 s,复杂性系数约为 0.5~0.7;图 4b 为海原盆地(海原地震区)的包络计算结果,它的  $P_m$  波为 3~5 个包络,波列延续时间约为 1.5~2.5 s,复杂性系数约为 3.6~7.5;图 4c 为陵中盆地的包络计算结果,它的  $P_m$  波为 1~2 个包络,波列延续时间约为 0.6~1.1 s,复杂性系数约为 0.7~1.1;图 4d 为巴颜喀拉地块和柴达木地块的结合带的包络计算结果,它的  $P_m$  波为 2~4 个包络,波列延续时间约为 1.1~2.0 s,复杂性系数约为 4.3~8.1。对其他几炮也同样进行瞬时特征分析,然后对各炮的所有记录进行排序

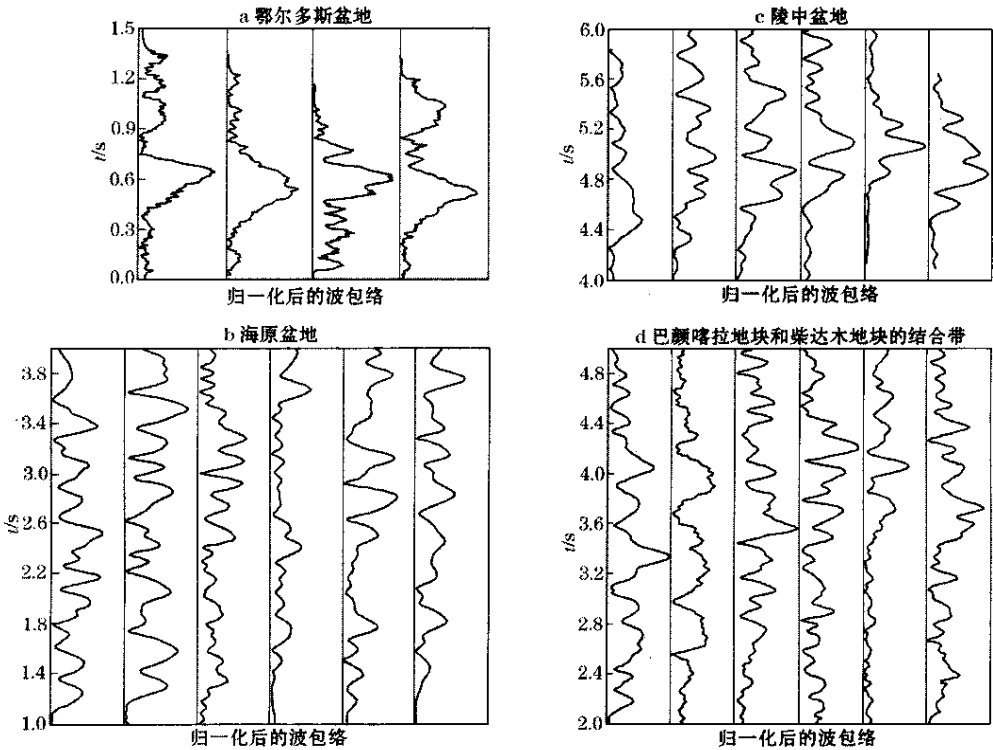


图 4 几个构造单元的瞬时振幅特征

叠加和归位处理并绘制出整条剖面的复杂性系数分布图(图 5)。

2.3 结果解释

从图 5 可以看出,剖面从东(靖边)到西 Moho 的复杂性系数存在 2 个十分明显的横向变化特征(图中虚线所示),第一个变化为从鄂尔多斯盆地到海原盆地的海原地震区的下方,Moho 复杂性系数往西明显增大。第二个变化为从陵中盆地到巴颜喀拉槽地与秦祁褶皱系边界的玛沁断裂带附近,Moho 复杂性系数同样是从东到西明显增大。这 2 个复杂性系

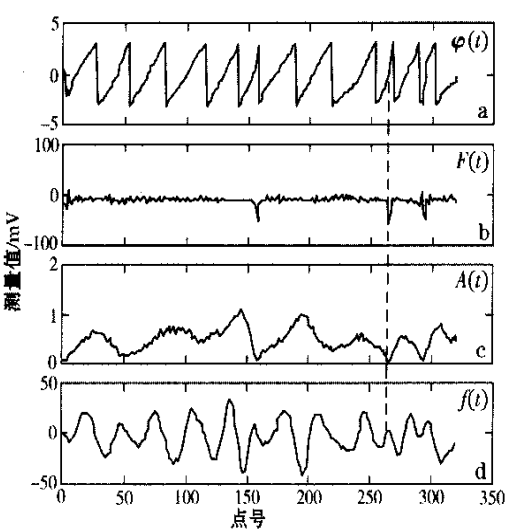
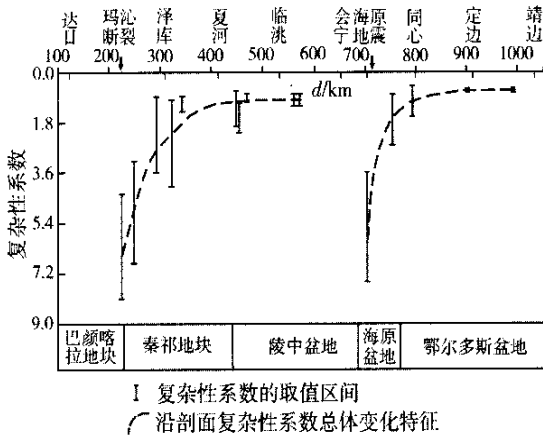


图 3 鄂尔多斯盆地与海原盆地结合带的瞬时特征和一个  $P_m$  波形记录

数极大的区域对应于鄂尔多斯地块和祁连地块的陆—陆碰撞带以及巴颜喀拉地块和柴达木地块的陆—陆碰撞带。从各个构造单元来看,鄂尔多斯盆地复杂性系数最小,反映古老稳定的地块具有一级间断面的 Moho 特征;在鄂尔多斯盆地和海原盆地的结合带复杂性系数增大,并且在海原震中区的下方,复杂性系数有一陡变的增大,达到了极大值,反映了该震区 Moho 具有很复杂的构造特征;陵中盆地  $P_m$  波形较简单,复杂性系数较小,反映出该盆地是一稳定地块,具有一级间断面的 Moho 特征;秦祁



竖道表示局部区域复杂性系数的取值区间,虚线表示沿剖面复杂性系数总体变化特征

图5 玛沁—靖边地震测深剖面壳幔过渡带复杂性系数褶皱系的复杂性系数较陵中盆地大,反映出比盆地复杂的 Moho 特征;从秦祁褶皱系到巴颜喀槽地褶皱带复杂性系数进一步增大,在玛沁断裂带附近复杂性系数达到另一个极大值。

图5还反映出,在海原地震区的东西两侧均为坚硬块体的盆地(复杂性系数小)。印度板块对欧亚板块向北东的碰撞推移<sup>[13]</sup>在该区段由于两侧坚硬块体的限制和阻挡,块体的运动受地壳“压缩—挤出—旋转”机制的控制<sup>[14]</sup>,使得在海原地震区产生了一系列的弧形断裂带。在玛沁断裂对应的复杂性系数极大值区段,所反映的情况与海原震区是不同的。主要的差异是自东向西沿陵中盆地—秦祁褶皱系—巴颜喀槽地褶皱带复杂性系数逐渐增大,反映出地壳缩短褶皱变形的特征,往西复杂性系数逐渐增大意味着深部的形变增强,这可能与自西向东的推挤作用强烈程度有关。玛沁断裂附近称为“阿尼玛卿缝合带”<sup>[15]</sup>,出现有大量蛇绿岩,它们代表大洋岩石圈的物质。该带同时也是一条强形变带,具有强烈的劈理化、构造透镜体、膝褶等<sup>[13]</sup>,并且后期的陆内变形也很强烈,由此改造了它的原来面目。

我们对该剖面穿过海原地震区和玛沁断裂带的2炮记录进行的小波分析结果表明<sup>[16]</sup>,海原地震区的 Moho 为复杂壳幔过渡带,它至少由3~5层组成,厚度大约为20 km。玛沁断裂带同样为复杂壳幔过渡带,但是与海原地震区有不同的分层细结构。该剖面的二维速度结构研究表明 Moho 界面从东到西深度增加,地壳变厚。在海原地震区和玛沁断裂带,由于 Pm 波不清晰, Moho 可能有异常的错断。这些结果与图5的复杂性系数分析相互印证,表明图5中复杂性系数的2个极大值位置均为陆-陆碰撞的重要位置。相关地区的研究认为<sup>[17,18]</sup>可以用

多重地壳俯冲来解释印度—欧亚碰撞过程地质活动的多寡性,因而可以认为,玛沁断裂和海原地震区可能是该区域多重俯冲带其中的2个重要位置。

3 结论与讨论

我们给出了一种复杂性系数的计算方法,利用了波的瞬时参数和波列长度,可以用于补充对不同构造单元 Moho 性质的描述。对于稳定的地块, Moho 复杂性系数小,反之对于活动性强烈地块, Moho 复杂性系数大。对于穿过多个构造单元的 DSS 剖面,利用复杂性系数图,可以反映活动地块间相互作用的特征。

实际资料处理中,对于稳定地块的简单 Pm 波形,其震相清晰,波列的提取和计算是容易的。但是,对于活动性强烈的复杂 Pm 波形,由于信噪比低,波列的提取和计算需要进行资料的预处理(滤波),并且要参考整炮记录的波组特征,而不是孤立地处理一条记录。

参考文献:

[1] 邓万明,钟大赉. 壳—幔过渡带及其在岩石圈构造演化中的地质意义[J]. 科学通报,1997, 42(23) 2478—2482.  
[2] Meissner R. The 'Moho' as a transition zone [M]. Geophys Survys, 1973, (1) 195—216.  
[3] Lin Ge, Fan Weiming. The Crust-mantle transition zone and its geological processes [A]. In :Pang Z H. Advances in Solid Earth Science [C]. Beijing :Science Press, 1996. 50—54.  
[4] ChaPman D S, Furlong K P. Thermal state of the continental lower crust [A]. In :Fountain D M, Arculus R, Kay R W. Continental Lower Crust [C]. Amsterdam :Elsevier, 1992. 179—199.  
[5] Mooney W D, Meissner R. Multi-genetic origin of crustal reflectivity : a review of seismic reflection profiling of the continental lower crust and MOHO [A]. In :Fountain D M, Arculus R, Kay R W. Continental Lower Crust [C]. Amsterdam :Elsevier, 1992.  
[6] 熊绍柏,郑晔,尹周勋,等. 丽江—攀枝花—海地带二维地壳结构及其构造意义[J]. 地球物理学报,1993, 36(4) 434—444.  
[7] 董树文,吴宣志,高锐,等. 大别造山带地壳速度结构与动力学[J]. 地球物理学报,1998, 41(3) 349—361.  
[8] 张先康,祝治平,张成科,等. 张家口—渤海地震带及其两侧地壳上地幔构造与速度结构研究[J]. 活动断裂研究理论与应用,1998, (6) 1—16.  
[9] 尹周勋,赖明惠,熊绍柏,等. 华南连县—博罗—港口地带地壳结构及速度分布的爆炸地震探测结果[J]. 地球物理学报, 1999, 42(3) 383—392.  
[10] Mereu R F. The complexity of the crust from refraction/wide-angle reflection data Pure Apple [J]. Geophys, 1990, 132(1,2) 269—288.  
[11] 程乾生. 希尔伯特变换与信号的包络、瞬时相位和瞬时频率[J]. 石油地球物理勘探, 1979, (3) 1—14.

[12] 刘宝峰,李松林,张先康,等. 玛沁—靖边剖面 S 波资料研究与探讨[J]. 地震学报, 2003,25(1) 82-88.

[13] 孙鸿烈,郑度. 青藏高原形成、演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社,1998.

[14] 虢顺民,江在森,张崇立. 青藏高原东北缘晚第四纪块体划分与运动态势研究[J]. 地震地质, 2000,22(3) 219-231.

[15] 许志琴,杨经绥,姜枚,等. 青藏高原北部东昆仑—羌塘地区的岩石圈结构及岩石圈剪切断层[J]. 中国科学(D 辑),2001,31(增刊) 1-7.

[16] 赖晓玲,张先康,李松林,等. 小波多分辨分析在壳幔非均匀尺度研究中的应用[J]. 地球物理学报,2003,46(1) :47-53.

[17] 曾融生,丁志峰,吴庆举. 喜马拉雅—祁连山地壳构造与大陆—大陆碰撞过程[J]. 地球物理学报,1998,41(1) 49-60.

[18] 曾融生,丁志峰,吴庆举,等. 喜马拉雅及南藏的地壳俯冲带—地震学证据[J]. 地球物理学报,2000,43(6) 780-797.

COMPLEXITY FEATURE OF CRUST-MANTLE  
TRANSITIONAL ZONE AND ITS DYNAMIC IMPLICATIONS

LAI Xiao-ling<sup>1</sup>, SUN Yi<sup>2</sup>

(1. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China 2. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, China )

**Abstract :** Obvious differences exist in the complexity of Pm waves obtained by deep seismic sounding (DSS) in different tectonic units. These differences are closely related to deep structural features. In this paper, a method is proposed for computing the complexity of seismic waves on the basis of its transient features and duration. For an ancient stable block, the Moho complexity coefficient is small, which reflects the feature of first order discontinuous interface. In contrast, for a strongly active block, the Moho complexity coefficient is large, which reflects the feature of crust-mantle transitional zone. Data processing was carried out with respect to a DSS profile which passes through the northeastern edge of Qinghai-Xizang Plateau. The result was interpreted dynamically.

**Key words :** crust-mantle transitional zone ; Pm wave ; complexity coefficient ; dynamic implications

**作者简介:** 赖晓玲(1957-),女,副研究员,1982年毕业于成都地质学院物探系.主要从事地震成像和数字信号分析的软件开发和综合解释工作。



上接 107 页

[6] 侯智慧. 团结构地区岩石、土壤、植物和天然水含金性研究及其砂金成因初步探讨[D]. 1985.

[7] 李明伟,陈保秀. 植物样品中超痕量金的测试方法研究[A]. 张肇宏,钟妙兰. 金矿找矿方法与技术论文集[C]. 北京: 地质出版社,1995.

THE DETERMINATION OF THE SAMPLING HORIZON IN  
ULTRA-LOW DENSITY DEEP PENETRATION GEOCHEMICAL SURVEY IN  
THE FOREST-SWAMP AREA OF CENTRA HEILONGJIANG PROVINCE

HU Zhong-xian<sup>1,2</sup>, YANG Zhao-wu<sup>1,2</sup>, CHENG Zhi-zhong<sup>3</sup>, WANG Xue-qiu<sup>3</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China 2. Heilongjiang Institute of Regional Geological Survey, Harbin 150080, China 3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

**Abstract :** Based on the study of the difference between aqua regia solution and HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>-HCl solution and the distribution of elements in flood plain sediments A, B and active stream sediments, the authors hold that flood plain sediments A can be used as the effective sampling media in the ultra - low density deep penetration geochemical survey in the forest-swamp area of central Heilongjiang Province.

**Key words :** ultra-low density ; deep penetration geochemistry ; aqua regia solution ; HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>-HCl solution ; flood plain sediments A ; sampling horizon ; forest-swamp landscape

**作者简介:** 胡忠贤(1970-),男,工程师,中国地质大学(北京)地质学、地球化学专业在读博士研究生,主要从事地质矿产勘查工作。 万方数据