

低频信号在玄武岩地区深层成像中的应用研究

余德平^{1,2}, 吴继敏¹, 李佩², 金晓蕾²

(1.河海大学土木工程学院,江苏南京 210098;2.中国石油化工股份有限公司南京石油物探研究所,江苏南京 210014)

摘要:以江汉油田陵北玄武岩地区深层成像问题为例,分析了玄武岩地区深层成像困难的主要原因,并在此基础上利用地震波场数值模拟技术模拟了玄武岩地区地震波的传播规律.结果表明:非均匀性很强的高速玄武岩地层会对常规频率勘探地震波场产生散射和屏蔽作用,长波长信号具有较强的穿透非均质体的能力.

关键词:玄武岩;成像;低频信号;非均匀性;数值模拟

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2006)01-0083-05

地震勘探的成像质量依赖于穿透上覆地层到达勘探目标层并返回到地面的地震信号的强弱.玄武岩地层一般具有高速、多层等非均匀性特征,该地层与围岩之间会出现强波阻抗界面.常规地震勘探方法的地震能量难以有效地穿透强波阻抗界面,因而深层反射信号较弱.这些弱反射信号与玄武岩强波阻抗界面所形成的强多次波信号相互交织在一起,且产状基本一致,难以有效区分.广角地震技术^[1]能削弱玄武岩地层粗糙表面对地震波场的散射及层间多次波的干涉作用,并且可以较准确地得到深层大套地层的层速度,但并不能从根本上提高深层反射信号的质量^[2].此外,广角地震所需要的排列长度极大.这一方面会大大提高野外数据采集的成本,另一方面会增加室内资料处理的工作量,同时对计算机资源的要求也会大大提高.与P波相比,转换S波穿透高速地层的能力更强^{[3]①}.因此,有些学者^[4,6]企图利用P波来提高玄武岩覆盖区深层的成像质量,但在实施过程中遇到了很大困难.其主要原因是如何确保高速层中的波为转换S波、如何布置观测系统才能确保地表接收的转换波能量最强等问题还未解决.同时,要获得强转换波信号,也需要极长的观测排列.为此,本文在Gennady等^{②④}研究结果的基础上,首先分析了玄武岩地层的介质非均匀性及其与传播波波长之间的相对关系,然后以我国江汉油田陵北玄武岩覆盖区为靶区,用数值模拟技术模拟了地震波的传播规律.

1 基本原理

玄武岩地层在其喷发和冷却过程中由于受围岩等环境因素的影响而表现出很强的非均匀性.这种非均匀性主要体现在^[7](a)岩浆喷发流动过程中由于围岩结构的影响而出现表面凹凸不平的现象;(b)岩浆在冷却的过程中,环境温度和压力变化的非均匀性会导致玄武岩内部结构的非均匀性;(c)岩浆喷发往往是多期的,它与围岩会产生以薄互层为主要特征的纵向非均匀性.这种非均匀性将对地震波场的传播产生散射作用.通常情况下,玄武岩中地震波的传播速度很高.对常规地震勘探而言,高速地层与围岩之间会产生强波阻抗差界面.强波阻抗差界面不仅会对地震波场造成能量屏蔽,而且会导致强多次波的产生.这种多次波的动力学特征与深层一次波的动力学特征差异较小,有些多次波的振幅还会大于深层一次波的振幅.多次波与深层一次波的相互叠加干涉会使得深层反射信号难以识别,从而会严重影响深层资料的成像质量.

介质的非均匀性与分辨率的高低有关,而分辨率的高低又与地震子波的主频有关,主频越高,分辨率越

收稿日期:2005-05-24

基金项目:中国石油化工股份有限公司重大科技攻关项目(P01062)

作者简介:余德平(1965—),男,安徽巢湖人,高级工程师,博士研究生.主要从事石油地震勘探数值模拟和地震属性技术研究.

① PETER H, LI X Y, ANTON Z. Converted waves for sub-basalt imaging//70nd Annual SEG Meeting Extended Abstracts.2000:1174-1177.

② GENNADY M G, VALERI A K. Seismic low-frequency effects from fluid-saturated reservoir//70nd Annual SEG Meeting Extended Abstracts.2000:1671-1674.

③ GENNADY M G, VALERI A K, VJACHESLAV M V. Seismic low-frequency effects from oil-saturated reservoir zones//72nd Annual SEG Meeting Extended Abstracts.2002:1813-1816.

④ PATRICK L, DELPRAT-JANNAUD F. Can we trust high resolution seismic imaging//73nd Annual SEG Meeting Extended Abstracts.2003:1869-1872.

高^[8-9]。当地震信号主频的分辨率不能用以分辨介质的非均匀性时,一般可以将该介质等效为均匀介质。由此可以看出,介质的非均匀性与传播波的波长密切相关,含有一定尺度的非均质体(带)的介质对短波长的波而言是非均匀介质,而对长波长的波而言也许可等效为均匀介质。因此,地下介质的非均匀性是针对一定尺度的波长而言的。

玄武岩是一种侵入岩,受围岩等周围环境因素的影响,其非均匀性的尺度一般都较小。这种尺度的非均匀性对常规地震勘探而言(主频为30 Hz左右时)是成立的,而对长波长(如主频为10 Hz或更低)的波而言则不成立。因此,在对玄武岩覆盖区进行深部成像处理时,可采用低频信号成像方法来弱化非均匀性强的玄武岩层对波场传播信号的散射和屏蔽作用。

图1为一理想玄武岩薄互层模型及其不同主频单炮记录的对比结果。其中薄层玄武岩和沉积岩的厚度均为20 m。由图1可以看出,由于强波阻抗玄武岩薄互层的存在,出现了层间多次反射现象,影响了对深层一次波(图1(b)(c)中所标T波组)的识别,但20 Hz的目标波组附近多次波明显弱于40 Hz的多次波。这说明低频信号具有较强的穿透薄互层非均质体的能力。

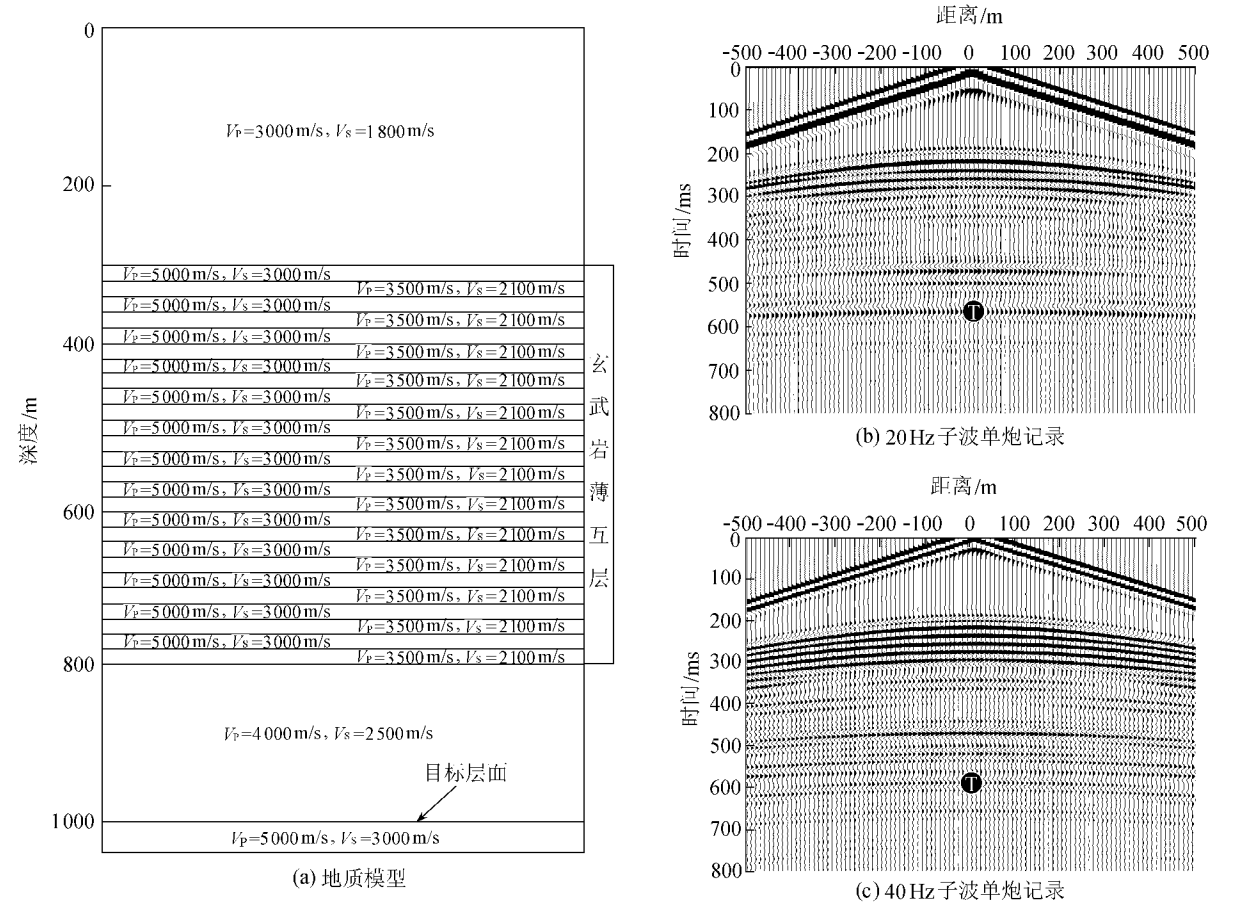


图1 水平层状薄互层模型不同频率子波单炮记录对比

Fig.1 Shot records of wavelets with different frequencies in horizontal thin-interlayer model

图2为一表面起伏不平的玄武岩模型及其不同频率单炮记录的对比结果。由这2个不同频率的单炮记录可以看出,受浅层玄武岩粗糙表面的影响,不同频率的深层反射波组(图2(b)(c)标明为T的同相轴相)相邻道之间的振幅都存在不同程度的差异,但20 Hz的反射波组的振幅明显比40 Hz反射波组的振幅均匀。这说明玄武岩粗糙表面对低频信号的散射作用较弱。

2 模拟实例

为了检验低频信号在提高深层成像质量方面的应用效果,以江汉油田江陵凹陷北部高速玄武岩覆盖区为研究靶区,应用各向同性高阶有限差分数值模拟技术^[10],分析不同主频的地震波在该地区的传播规律。

江陵凹陷油气资源丰富,是江汉油田重点勘探区块之一,但凹陷内以新沟嘴组为主要勘探目的层的陵北

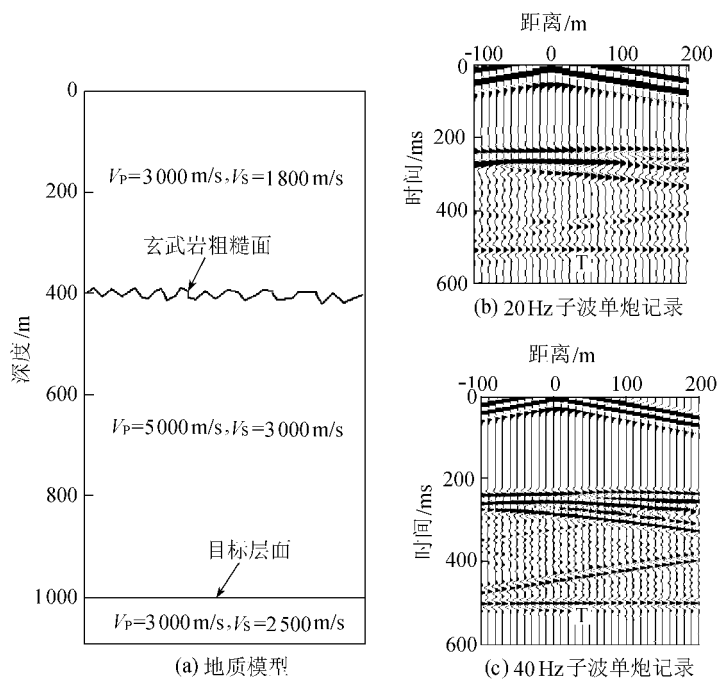


图 2 高速层粗糙表面模型不同频率子波单炮记录对比

Fig.2 Shot records of wavelets with different frequencies in rough surface model of high-velocity layers

反射资料的上述特征.

根据工区特点,对玄武岩地层进行了简化,即不考虑层内及表面的变化而将其设计为 3 个均匀层.图 4 为其 2D 地质模型.由图 5 可以看出 (a)玄武岩层间及玄武岩与地面之间的多次波极为发育且强度大.多次波与一次波在波场特征方面没有明显的区别.在玄武岩层顶界面反射波波前之后有一系列与反射波波前基本平行的弧形波前.这些波前,有些是下层界面的反射波波前,但更多的是玄武岩层之间的层间多次波波前.玄武岩层之间的波场能量明显强于近地表和深部的波场能量,且出现了典型的槽波现象.这说明玄武岩地层对波场传播能量具有较强的屏蔽作用.(b)玄武岩层粗糙表面波场绕射强烈,在对非水平层状的玄武岩地层进行数字化处理时会产生一系列的网格台阶.由于这种网格台阶可看作是粗糙表面的一种形式,所以在模型设计时未考虑玄武岩的粗糙表面问题.但这种小的网格台阶仍然会产生强烈的波场绕射现象(快照图中的第 1 层界面极明显).(c)处理剖面中目的层的成像效果较差,但总体上与浅层多次波差异不大.由此可以看出,常规频率的地震勘探难以解决玄武岩覆盖区深目的层的成像问题.

地区的资源探明率极低.主要原因是陵北地区发育的玄武岩层制约了该区的勘探进程.前期的勘探和研究表明,陵北玄武岩主要分布在下第三系潜江组 and 荆沙组(分布深度范围一般为 300~2200m,部分区域出露地表),它具有分布层数多(最多可达 110 层)、单层厚度小(最大单层厚度不超过 50m)、累计厚度大(最大累计厚度达 550m)、分布范围广(分布面积为 1.2 万 km² 左右)、平面分布不规则、厚度变化大和空间上呈朵状重叠等特征.火成岩高速层相对于围岩的波阻抗差异较大,会对能量产生屏蔽作用,而主要目的层新沟嘴组地层的波阻抗差异较小、地震信号弱,且构造走向与玄武岩层基本一致.常规的地震采集和处理方法难以获得目的层的有效反射信号,资料品质很差,具体表现为地震反射波组不清、信噪比低、连续性差、多次波发育.由于地震资料的品质存在严重问题,该区新沟嘴组内部结构无法查清.从图 3 所示的地震剖面中可以明显地看出地震

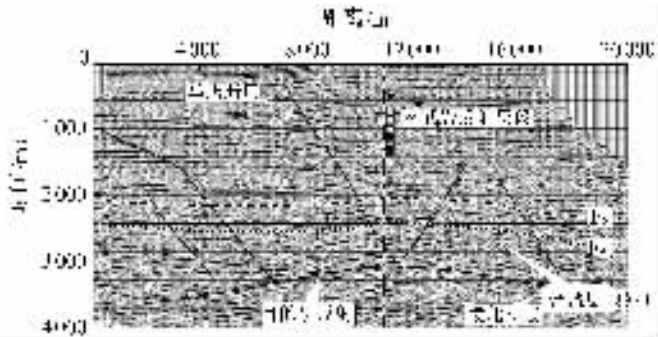


图 3 陵北工区玄武岩覆盖区某地震剖面
Fig.3 A seismic profile for Linbei area covered by subbasalt

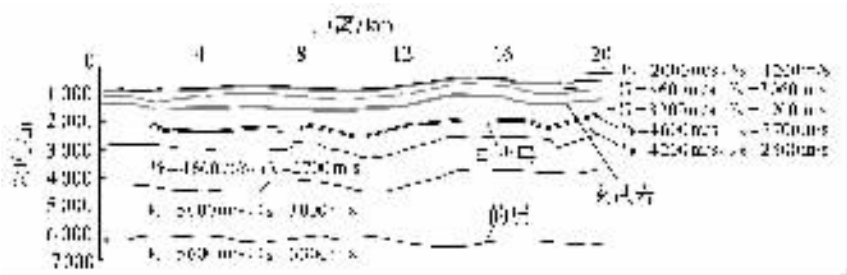


图 4 陵北工区玄武岩覆盖区模型地质剖面
Fig.4 Geological profile for Linbei area covered by subbasalt

为了比较不同主频子波模拟资料的深层成像效果,在图5模拟子波主频由30 Hz降为5 Hz,其他参数不变的情况下对图4地质剖面重新进行了模拟和处理,结果如图6所示.由图6可以看出:单炮记录中只有

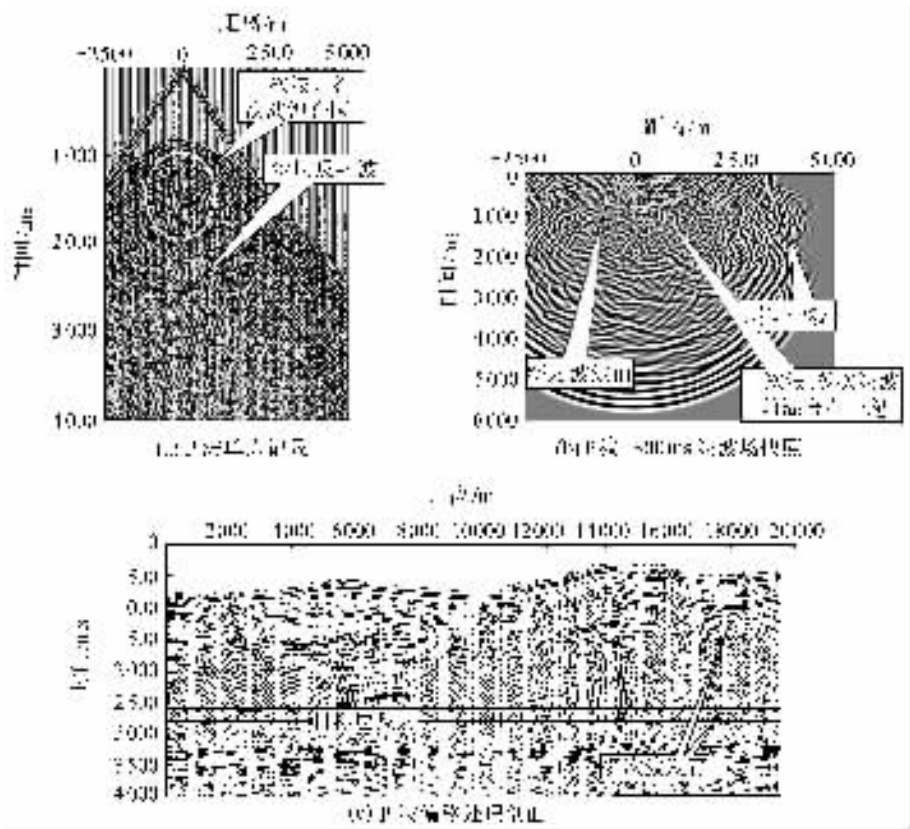


图5 陵北玄武岩模型 30 Hz 子波模拟结果

Fig.5 Modeling result of Linbei subbasalt model by use of wavelet of 30 Hz

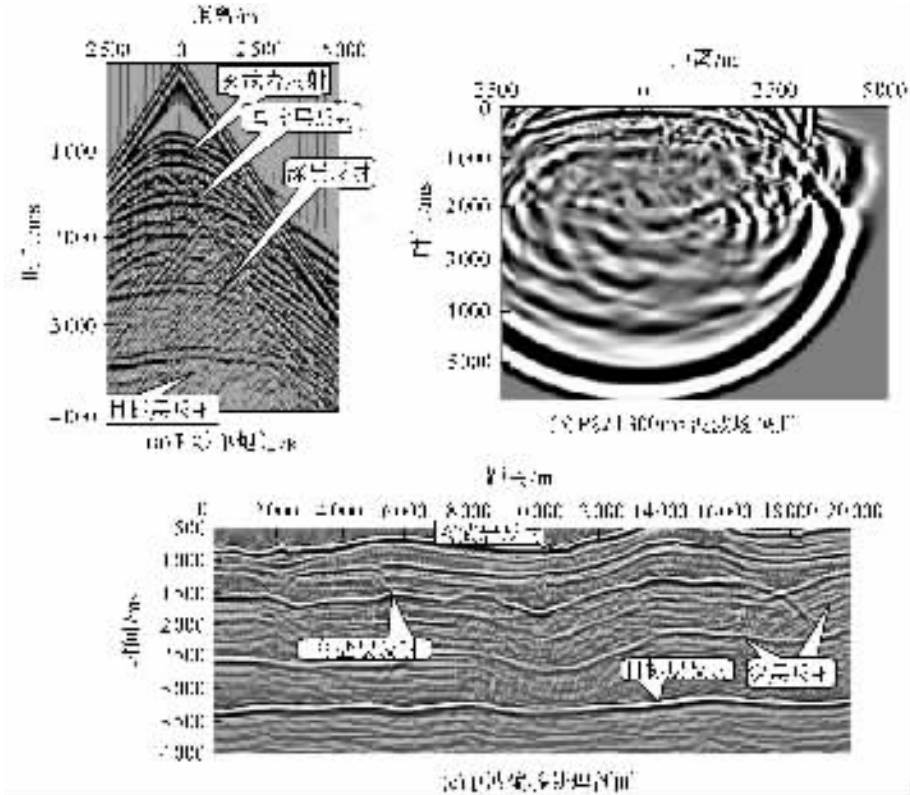


图6 陵北玄武岩模型 5 Hz 子波模拟结果

Fig.6 Modeling result of Linbei subbasalt model by use of wavelet of 5 Hz

几个大套地层的反射波组,且极易分辨,快照图中也只有几个大套地层反射波波前,基本上不存在多次波和绕射波;在处理剖面中,深目的层和浅层成像都极为清晰,多次波也不明显.对比图 5 和图 6 可知,低频信号的分辨率明显低于高频信号的分辨率,但低频信号的信噪比有了很大的提高.因此,在低信噪比地区,利用低频信号可显著提高深层资料的成像质量.

3 结 论

- a. 玄武岩地层内部及玄武岩地层与围岩之间具有很强的纵、横向非均匀性,这种非均匀性对地震波场会产生很强的散射和屏蔽作用.
- b. 介质的非均匀性与波的波长密切相关,长波长信号具有较强的穿透非均匀介质的能力,因此利用低频信号可降低非均匀性强的玄武岩地层对地震波场的散射和屏蔽作用,提高深层成像质量.
- c. 尽管这种利用低频信号进行成像的方法降低了地震资料的分辨率,但却大大提高了信噪比.因此,对于那些因信噪比低而难以成像的地区来说,这是一种有效的方法.

参考文献:

[1] 胡中平,顾连兴,王良书,等.陵北凹陷北部高速玄武岩下二维广角地震初探[J].高校地质学报,2004,10(1):70-77.

[2] ZIOLKOWSKI A,HANSSEN P,GATLIFF R,et al. Use of low frequencies for sub-basalt imaging[J].Geophysical Prospecting,2003,51(1):169-182.

[3] PURNELL G W. Imaging beneath a high-velocity layer using converted waves[J].Geophysics,1992,57(11):1444-1452.

[4] MOSHE R H,BEN-AVRAHAM Z. A case study of sub-basalt imaging in land region covered with basalt flows[J]. Geophysical Prospecting,2003,51(3):247-260.

[5] MARTINI F,CHRISTOPHER J B. Application of pre-stack wave equation datuming to remove interface scattering in sub-basalt imaging[J]. First Break,2002,20(6):395-403.

[6] ROBERT R S,GAISER J E,BROWN R J,et al. Coverted-waves seismic exploration:Applications[J]. Geophysics,2003,68(1):40-57.

[7] PLANKE S,ALVESTAD E,ELDHOLM O. Seismic characteristic of basalt extrusive and intrusive rock[J].The Leading Edge,1999,18(3):242-248.

[8] 李庆忠.走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M].北京:石油工业出版社,1993:12-30.

[9] 邹才能,张颖.油气勘探开发实用地震新技术[M].北京:石油工业出版社,2002:148-151.

[10] CARCIONE J M,HERMAN G C,KROODE A P E. Seismic modeling[J]. Geophysics,2002,67(4):1304-1325.

Application of low-frequency signals to imaging of deep layers in subbasalt areas

SHE De-ping^{1,2}, WU Ji-min¹, LI Pei², JIN Xiao-lei²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Nanjing Institute of Geophysical Prospecting for Petroleum, SINOPEC, Nanjing 210014, China)

Abstract :A case study was performed of imaging of Linbei subbasalt area at Jiangnan Oil Field. Some difficulties in imaging of deep layers were analyzed, and the law of seismic wave propagation in subbasalt areas was studied with the technique of numerical modeling of seismic wave fields. The result shows that the high-velocity subbasalt layer with great inhomogeneity has scattering and shielding effect on wavelets of conventional frequency for inspection of seismic wave fields, and that low-frequency signals have powerful capacity in penetrating subbasalt heterospheres.

Key words :subbasalt ; imaging ; low-frequency signal ; inhomogeneity ; numerical simulation