

# 含有限水体介质中地震波场数值模拟<sup>\*</sup>

孙楠<sup>1,2</sup>, 孙耀充<sup>1</sup>, 庾汕<sup>3</sup>

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224;  
3. 云南国际文化交流中心, 云南 昆明 650041)

**摘要:** 准确模拟地震波在复杂介质中的传播过程, 能够为分析主动源探测中获得的数据资料以及反演区域内部介质结构提供理论支持和依据。基于二维介质模型, 利用有限差分法对地震波场传播过程进行数值模拟。结果表明, 震源在不同介质中被激发后所产生的波场特征不同, 有限水体的存在对波场传播有显著影响, 随着水体水位的加深, 激发产生的波场能量先增强后减弱, 存在一个最佳水位深度, 此时激发产生的波场能量最强。在有限水体一侧激发震源时, 两侧等震中距台站的记录会有所差异, 靠近陆地的一侧的波场能量更大, 传播速度更快, 且水平分量的差异相比垂直方向更明显。因此, 可以通过数值模拟判断水库水位的最佳深度与震源的最佳沉放位置, 为水库激发气枪震源实验提供理论依据。

**关键词:** 有限差分法; 地震波场; 数值模拟; 有限水体; 震源位置

**中图分类号:** P315.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)04-0557-08

## 0 引言

2012年云南宾川建成全球首个气枪激发震源发射台, 选取宾川大银甸水库作为激发水体, 采用人工震源主动向地下发射地震波的方式, 来监测地下介质变化(王彬等, 2015)。主动源探测在某种程度上克服了利用有限的天然地震进行介质研究时存在的时空分辨率及精度上的不足, 水中激发气枪震源更是凭借其对近场破坏性小、可重复性高、绿色环保的优势, 成为进行地下介质检测的理想震源(王宝善等, 2016; 陈颢等, 2007)。目前, 宾川气枪激发震源实验获得了丰富的波形数据资料, 研究人员利用这些波形资料也进行了相关的工作(王彬等, 2016; 刘自凤等, 2015; 杨微等, 2016; 翟秋实等, 2016; 栾奕等, 2016)。

准确模拟地震波在复杂介质中的传播过程, 可以为分析解释主动源探测中获得的数据资料和反演该区域内部介质结构提供理论支持和依据, 对利用主动源方式探究地下介质性质研究具有重要意义。同时, 对于断层破裂过程研究、预测强地面运动对地表的破坏和地震灾害的评估以及采用地震波手段进行地下资源勘探等, 数值模拟都

不失为一个行之有效的理论工具, 被越来越广泛地应用于多种研究中(张海明, 陈晓非, 2003; 裴正林, 牟永光, 2004)。

早期在地震波研究中假设地球介质横向均匀, 但实际地球介质中, 具有复杂的横向非均匀性, 包括弹性、粘弹性、各项异性、含有流体的孔隙介质, 以及具有非线性效应的黏土介质等, 结构上具有复杂界面形状的分层或分块介质, 且介质内部物质参数可能存在不同尺度的渐变或随机特征(张伟, 2006)。地球介质复杂的内部非均匀性和复杂的地表形状, 对地震波的传播具有非常显著的影响。复杂起伏地形造成局部放大效应(Geli *et al.*, 1988), 比如在盆地内部复杂低速体和外部高速层, 造成盆地边缘产生较大振幅, 且地形起伏尺度同地震波波长量级相近时会产生明显的散射体波和面波。

目前对复杂介质中地震波的传播规律认识尚不足, 当同时考虑介质非均匀结构、近地表面物质粘弹性、非线性效应、起伏地形时, 对于地震地震波的传播过程及其在不同点的放大作用, 还缺乏定性和定量分析(王雪秋等, 2005)。对于复杂介质和复杂地形情况, 一般通过数值方法对地震波性质进行研究, 从而利用波形分析地下介质

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-04-11.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41474048)、震情跟踪定向工作任务项目(2017010501)和云南省地震局青年基金项目(201602)联合资助。

结构提供理论依据。有限差分法作为比较成熟的数值方法,在地震波模拟和强地面运动模拟中得到广泛应用,因此,本文将采用有限差分法进行地震波场的数值模拟研究。

宾川水库激发气枪震源实验中,大银甸水库作为有限水体,气枪震源在其中被激发后,穿过不同介质结构向外传播出去,传播过程中会遇到不同的介质界面发生反、折射现象,包括介质表面、有限水体边界的固-液界面、介质中的固-固界面等,使得波形特征变得异常复杂。且水库作为有限水体,其水位具有季节性变化,这种变化是否会对波形的传播特征带来影响,在大银甸水库中气枪震源被放置在水库一侧,是否会对水库两侧等震中距台站的记录带来不同的影响,也可通过数值模拟的方法进行研究。本文将利用有限差分法,数值模拟有限水体的水位深度和震源沉放位置的变化对波场传播特性的影响,以期能够为水库激发气枪震源研究提供理论依据。

## 1 数值模拟方法

有限差分法作为一种广泛应用的数值模拟方法,比较完善地解决了地震波模拟和强地面运动模拟中的内部任意非均匀介质的处理(包括粘弹性、各向异性、随机介质、多孔介质等)。低速层网格局部加密、单点震源和有限断层破裂源的耦合方式、吸收边界的处理、并行算法的实现以及水平地表和起伏地表的自由表面条件的实施等问题,成为地震波模拟和强地面运动模拟中比较成熟的数值方法(张伟,2006;Zhang,2012)。

本文在利用有限差分进行地震波数值模拟时,首先将研究区域网格化,在网格点上采用差商近似偏微分方程中时间和空间导数项,将连续的偏微分方程转化为离散格点上的值,采用一定的网格离散方法计算研究区域,其中空间差分采用二维 MacCormack 算子,时间积分采用四阶 Runge-Kutta 格式(Gottlieb, Turkel, 1976; Zhang, 2006)。

在含有限水体的二维模型中,由于有限水体的存在以及不同的固体介质结构,介质内部存在非均匀的介质间断,对于这种情况,本文通过内界面网格上的有效介质参数设置,包括密度采用算术平均值,剪切模量和拉梅常数采用调和平均值,(Moczo *et al*, 2002)等,让界面两侧的波场

自动满足连续性条件,自动处理内部介质的变化,使得有限差分法非常适用于计算介质具有任意非均匀性的地球介质中的地震波传播。在一个有限区域内进行波形模拟研究时,很难保证波形向外传播到区域边界后,反射回来的地震波不出现在所需要研究的时间窗内。因此,本文采用吸收层方法,在区域边界一定宽度的网格层内对波场进行吸收,使波场在吸收层内逐渐衰减弱化,使得波形传播到区域边界后,能够继续传播出去而不发生反射,从而避免影响所研究区域的震相特征(Berenger, 1994; 孙耀充等, 2013)。大规模问题模拟时,并行计算远远超过微机和普通工作站的计算能力(Bohlen, 2002),因此,本文将采用 MPI 对有限差分进行并行,提高有限差分的计算效率。

## 2 数值模拟模型

在水库激发气枪震源实验中,介质上层存在有限水体、沉积层等,波形传播经过不同界面时会产生反、折射效应,使波形特征发生变化。因此,数值模拟中需要考虑波形在水体与固体中不同的传播特征,固液界面对波形传播的影响,以及有限水体中激发震源特性等多个方面。下面将模拟多种介质模型(图1)中的波场传播特性,包括均匀水体半空间(图1a)、均匀固体半空间(图1b)、水体-固体层状半空间(图1c),以及与实际水库激发震源介质结构相似的包含有限水体的层状半空间介质模型(图1d)。

数值模拟中取研究区域为  $1\,200\text{ m} \times 600\text{ m}$ , 首先将研究区域进行网格化,网格大小为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ , 格点数为  $1\,200 \times 600$  个,计算中采用并行运算(占用 72 个核)。选取爆炸源作为激发震源,能量为  $2 \times 10^6\text{ J}$ 。水库作为有限水体,在其内部激发震源后产生气泡振荡,气泡振荡传播到水库边界时,受到有限水体边界的影响,向外传播的源可能为气泡与水体的耦合源,因此震源时间函数不能确定,考虑到雷克子波全频段覆盖的优点,本文选取雷克子波震源时间函数进行数值模拟,波形主频取为 10 Hz。介质模型配置见图1所示,具体介质参数配置见表1。其中,数值模型中震源位置固定,放置在表面以下 10 m 处,保持震源与表面的距离不变,模拟水库激发气枪震源实验中气枪沉放方式。

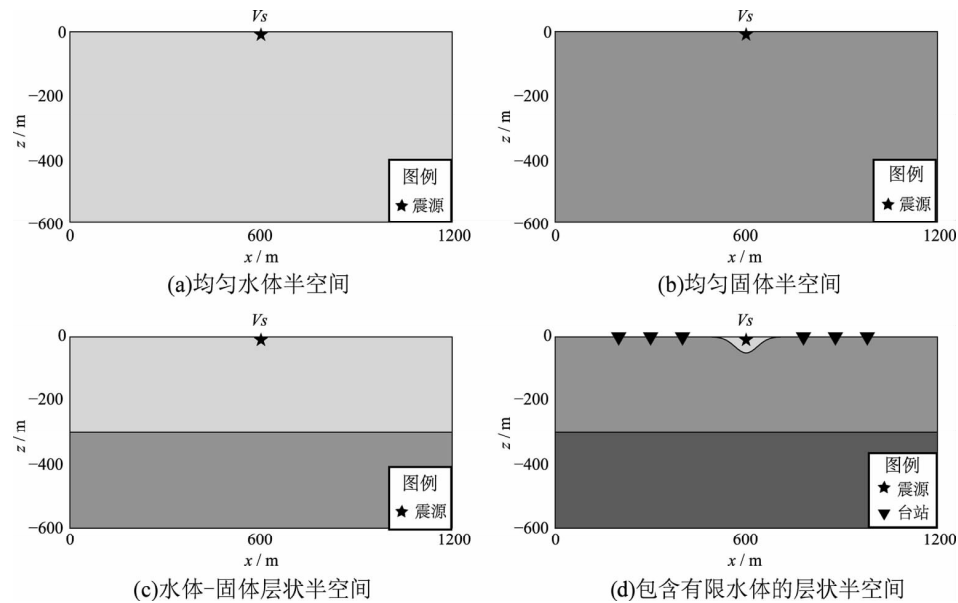


图 1 数值模拟中采用的不同介质模型

Fig. 1 Medium models used in numerical simulations

模型 d 中介质参数配置与真实水库激发实验相似，在模拟区域的地表处设置 6 个台站，分布在震源两侧，具体位置见表 2，用来监测水库水位变化带来的影响，以及震源位于水库一侧时，水库两侧的等震中距的台站接收到的波形不同特征。

表 1 数模模拟中模型介质参数

Tab. 1 Model media parameters used in numerical simulations

序号	模型	密度 $\rho/$ ( $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	P 波速度 $V_P/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	S 波速度 $V_S/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	均匀水体半空间	1.0	1.5	0.0
2	均匀固体半空间	2.5	3.0	1.732
3	水体 - 固体	1.0	1.5	0.0
	层状半空间	2.5	3.0	1.732
4	包含有限水体 的层状半空间	1.0	1.5	0.0
		2.5	3.0	1.732
		3.0	4.0	2.039

表 2 数值模拟中台站位置

Tab. 2 Location seismic stations used in numerical simulations

序号	台站代码	位置/(m, m)
1	sta1	(0, 200)
2	sta2	(0, 300)
3	sta3	(0, 400)
4	sta4	(0, 780)
5	sta5	(0, 880)
6	sta6	(0, 980)

3 结果分析

真实水库激发气枪震源实验中，震源在水库中被激发后，穿过不同介质结构向外传播，传播过程中会遇到不同的介质界面发生反、折射现象，包括表面、固 - 液界面、固 - 固界面等，使得波形特征变得异常复杂。那么，水库作为有限水体，其水位的变化是否会对波形的传播特征带来影响，以及在水库中激发的震源被放置在水库一侧时，是否会使水库两侧同等震中距的台站记录的穿过不同路径的波形特征不同。因此，下面选取不同的介质模型，利用有限差分法进行数值模拟，探讨不同介质空间中波场传播特性，以及有限水体的水位深度和激发震源沉放位置变化时，地震波场和台站接收波形的变化特征，为水库激发气枪震源波形研究提供理论依据。

3.1 不同介质模型中波场传播特性

数值模拟中不同的介质模型分别为：均匀水体半空间模型、均匀固体半空间模型、水体 - 固体层状半空间模型以及包含有限水体的层状半空间模型，不同介质模型中的波场快照见图 2。

震源在不同介质中被激发后所产生的波场特征不同。在均匀水体半空间中，由震源激发所产生的波场传播方向与振动方向相同，介质表面对波场传播无影响（图 2a）。对于均匀固体半空间

(图 2b), 波场快照显示介质表面对波场传播有明显影响, 从而产生面波频散现象。波场会沿介质表面方向向外传播, 且大部分能量集中在表面及附近区域。与均匀水体半空间相比, 均匀固体半空间中波场传播能量非常小, 且向下传播衰减更快, 波场传播过程更复杂。

对于上层为水体、下层为固体的层状半空间介质 (图 2c), 震源在水体中被激发产生的波场传播方向与振动方向相同, 传播到达固液界面后, 一部分能量通过固液界面进入固体介质后, 继续向外传播。一部分能量则反射回水体介质中, 到达介质表面后再次传播到固液界面, 在固液界面发生多次反、折射效应。介质中水体的存在使其

波场能量在表面处无衰减, 因此向下传播的波场能量比均匀固体半空间中更大。

而真实水库激发实验中水体为有限体, 当在有限水体中激发震源后, 波场很快到达有限水体边界, 在固液界面发生反、折射效应后, 透过固液界面向外传播, 而到达固体介质的波场在介质表面形成面波沿表面方向向外传播, 且存在明显的频散现象。向下传播的能量中少部分到达下层层状固固界面, 通过固固界面后沿界面向外传播, 波场传播特征与均匀半空间、层状半空间等存在显著差异。因此, 有限水体的存在对波场传播有明显的影响, 4 种介质模型比较, 水体存在的介质中向外传播的波场能量更强。

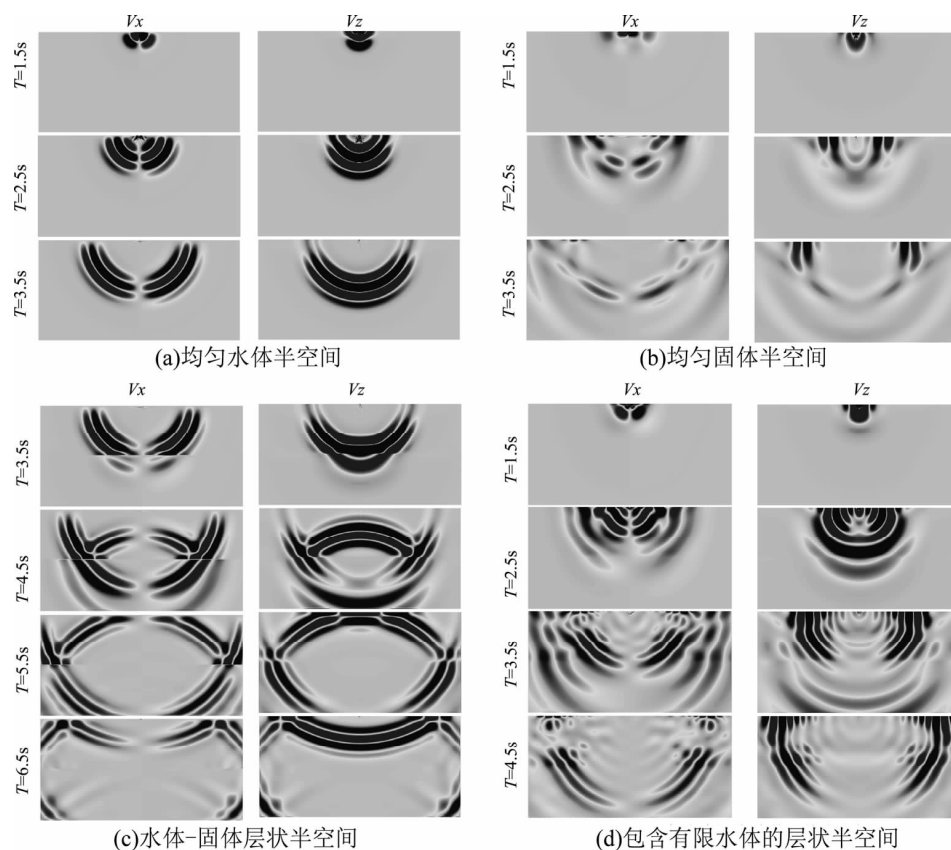


图 2 二维模型中  $T$  时刻地震波传播的波场快照

Fig. 2 Snapshots of seismic wave propagation at moment  $T$  in 2-D models

### 3.2 不同水位的波场传播特性

在宾川水库激发气枪震源实验中, 水库作为有限水体, 其水位存在季节性变化。通过介质模型的波场传播数值模拟结果显示, 水体的存在对波场传播有一定的影响, 但不能确定波场传播能量的大小

是否与水体尺度有关系。下面用水位变化表征水体尺度的变化, 选取包含有限水体的层状半空间模型 (图 1d), 数值模拟有限水体中水位深度的变化对波场传播的影响。其中, 水位深度 (即水底到水面的距离) 分别为  $h = 20、25、30、35、40$  m, 且固定震源沉放于水面以下 10 m 处不变。

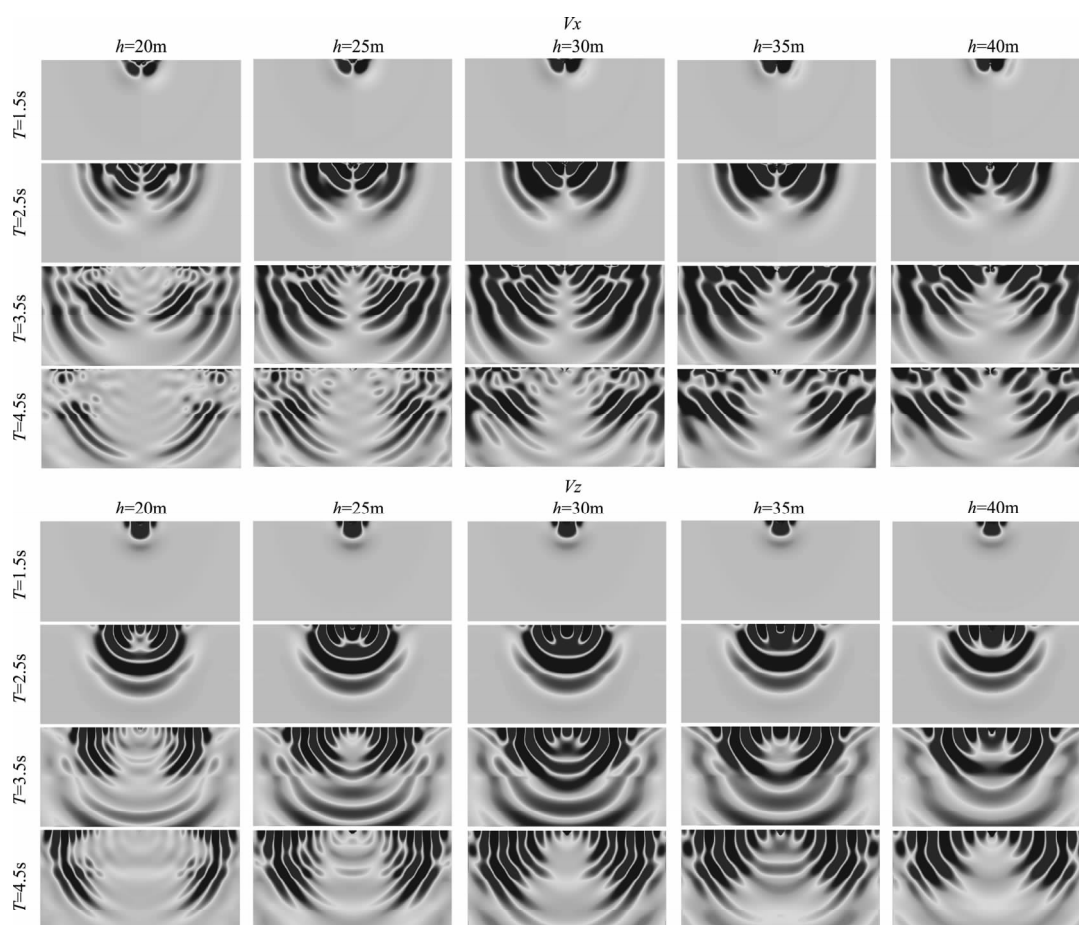


图3 不同水位深度的二维有限水体层状模型中  $T$  时刻地震波传播的波场快照

Fig. 3 Snapshots of seismic wave propagation at moment  $T$  in 2-D layered half-space models containing limited water with different water levels

对比分析有限水体中不同水位的波场传播特征 (图3), 结果显示随着水位深度增加, 波场能量增强, 水位  $h = 30\text{ m}$  时波场能量明显比  $20\text{ m}$  的情况增强。但当水位继续增加到  $40\text{ m}$  时, 波场能量没有明显增加, 反而出现减弱现象, 尤其是速度波场垂直向  $V_z$  在  $T = 3.5\text{ s}$  时, 波场能量明显比  $30\text{ m}$  深度范围内有所减弱。从波场快照结果显示, 水位深度在  $30\text{ m}$  的范围内, 震源激发传播的能量最强。

对比分析3个台站 (sta1、sta2、sta3) 在水位深度  $30\text{ m}$  左右 ( $h = 25、30、35\text{ m}$ ) 的情况下的速度波形特征 (见图4), 显示 sta1 记录的速度波形的水平分量  $V_x$  在  $h = 30\text{ m}$  时振幅最大; sta2 记录的  $V_x$  在  $h = 25\text{ m}$  时振幅最大,  $h = 30\text{ m}$  次之; sta3 记录的  $V_x$  在  $h = 35\text{ m}$  时振幅最大,  $h = 30\text{ m}$  次之。sta1、sta2、sta3 记录的垂直分量  $V_z$  均在  $h = 30\text{ m}$  时振幅最大。因此, 在有限水体中激发震

源时, 并非水位越深激发能量越大, 能量与有限水体水位深度间不是单一的递增关系, 而是存在最佳水位深度。本文所用二维有限水体模型中, 震源沉放于水面以下  $10\text{ m}$  处, 数值模拟得到的波场快照以及波形特征均显示, 最佳水位深度 (水面至水底的距离) 为  $30\text{ m}$ 。

### 3.3 不同震源位置的波场传播特性

宾川水库激发气枪震源实验中, 气枪震源被放置在水库一侧进行激发, 波形传播路径中介质结构的差异, 可能会使水库两侧等震中距的台站记录的波形特征不同。选取包含有限水体的层状半空间模型 (图1d), 变化震源在水体中的水平沉放位置, 分别位于水体左侧 ( $590\text{ m}, -10\text{ m}$ )、中央 ( $600\text{ m}, -10\text{ m}$ )、右侧 ( $610\text{ m}, -10\text{ m}$ ), 保持震源在水体中的沉放深度  $10\text{ m}$  不变, 通过数值模拟研究波场传播特征随震源位置不同的变化。

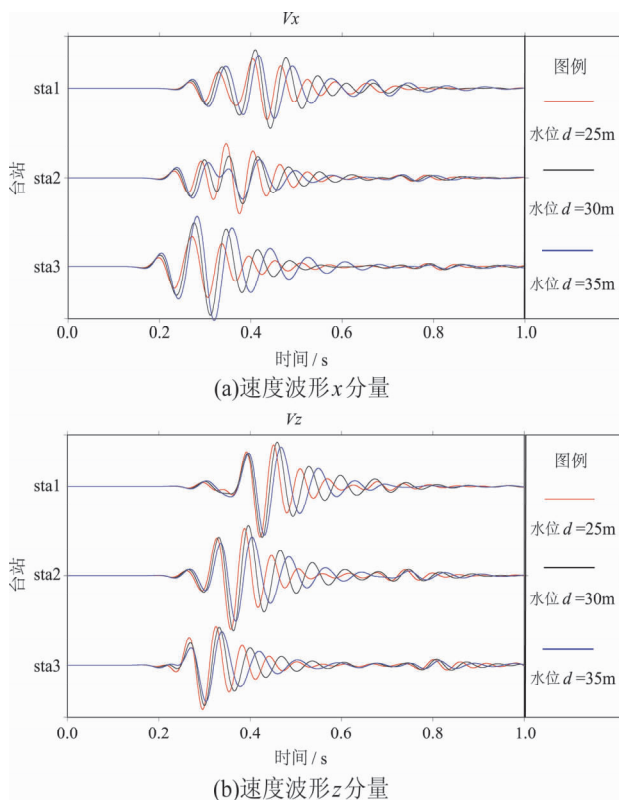


图4 二维有限水体层状介质模型中不同水位深度对应的台站记录的波形特征

Fig. 4 Waveforms for different water levels recorded by stations in 2-D layered half-space models containing limited water

震源在水体中不同位置的波场快照结果 (图5) 显示, 震源在水体中左 (右) 侧时, 速度波形水平分量  $V_x$  的左 (右) 侧波场传播速度快, 波场能量强, 对应一侧的能量则相对较弱; 垂直分量  $V_z$  传播方向会向左 (右) 侧偏转, 但两侧差异不如  $V_x$  分量明显。因此, 震源沉放位置对水平向的波场传播影响更明显。

将震源固定在水体中左侧 (590 m, -10 m) 处, 比较水体三组等震中距的台站接收到的波形 (图6), 具体台站位置见表2。结果显示, 水体左侧的台站 sta1、sta2、sta3 记录的波形振幅比右侧等震中距的台站 sta6、sta5、sta4 的记录大, 且两侧台站记录的  $V_x$  分量差异比  $V_z$  分量的更明显。因此, 在有限水体一侧激发震源时, 两侧等震中距台站的记录会有差异, 靠近陆地的一侧的波场能量更大, 传播速度更快, 且水平分量的这种差异比垂直方向更明显。

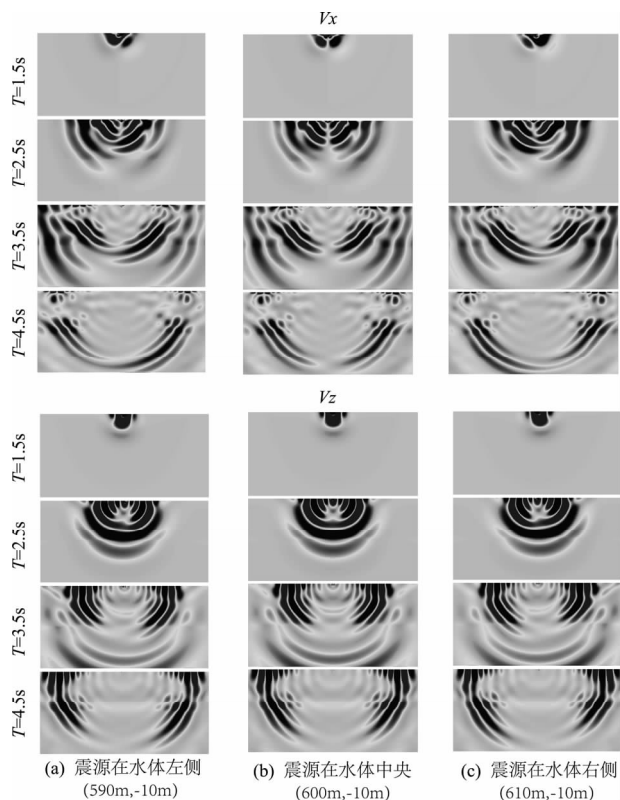


图5 不同震源位置的二维有限水体层状模型中  $T$  时刻地震波传播的波场快照

Fig. 5 Snapshots of seismic wave propagation at moment  $T$  in 2-D layered half-space models containing limited water with different source locations

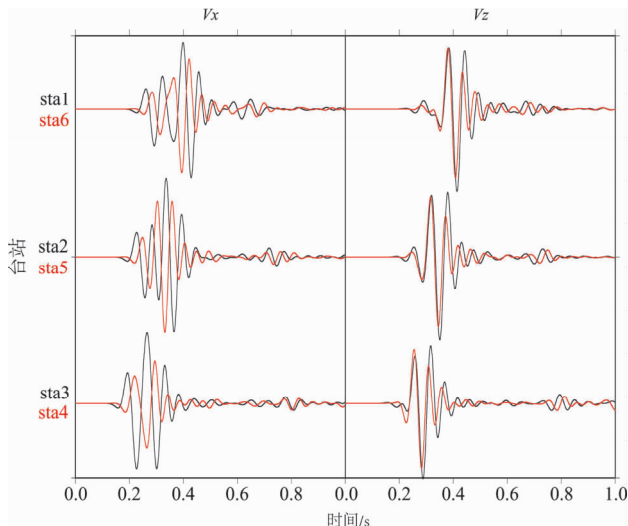


图6 震源沉放在有限水体中左侧时三组等震中距的台站记录的波形特征比较

Fig. 6 Waveform comparison of 3 groups of stations with equal epicentral distance when the source is located on the left side of the limited water



## 4 讨论与结论

本文基于二维介质模型,利用有限差分法数值模拟了含有限水体的介质空间内激发震源的波形和波场传播特征,得到以下初步结论。

震源在不同介质中被激发后所产生的波场特征不同,水体中激发震源后产生的波场能量更强,波场在固体介质中传播时衰减更快。如果有固液界面存在,波场能量在固液界面处发生多次反射、折射效应。在有限水体中激发震源后,波场经过固液界面后进入固体介质,在固体介质表面处沿表面向外传播,且伴随明显的频散现象。因此,水体对波场传播有非常显著的影响,水体存在的介质中向外传播的波场能量更强。

在有限水体中激发震源时,随着水位的增加,其激发产生的波场能量越大,与陈蒙(2014)研究结果一致,宾川气枪信号振幅随水库水位的增加而增高,其研究中最高水位为18 m。但本文模拟结果显示,随着水位继续加深到30 m以后,波场能量与水位深度间不再是单一的递增关系,波场能量开始减弱,即水体存在最佳水位深度,使得激发震源产生的波场能量最大。本文所用二维有限水体模型中,震源沉放于水面以下10 m处,最佳水位深度(水面至水底的距离)即为30 m。

在有限水体的一侧激发震源时,两侧等震中距台站的记录会有差异,靠近陆地一侧的波场能量更大,传播速度更快。反而靠近水体一侧的台站记录振幅更小,水体的存在并未使其表现出比靠近陆地一侧更强的波场能量,表明此侧接收到的波形并不是直接穿过水体被台站接收到,可能是通过水体底部投射到固体介质中后,再次传播出去才被地面台站接收。因此,可以通过数值模拟选取最佳震源位置,使得该方向的波场能量最强,从而更有利于研究此方向的波形传播特性以及地下介质变化。

通过含有限水体介质中地震波场传播的数值模拟研究,为水库激发气枪震源实验中设置水库水位的最佳深度以及气枪震源放置的最佳位置提供理论依据。之后,会采用与真实介质更相似的三维模型进行数值模拟计算,以期气枪实验及研究提供更为精确的理论支持。

## 参考文献:

- 陈蒙. 2014. 利用水库大容量非调制气枪阵列进行区域尺度地下结构探测和监测[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 陈颢,张先康,丘学林,等. 2007. 陆地人工激发地震波的一种新方法[J]. 科学通报 52(11):1317-1321.
- 刘自凤,苏有锦,王宝善,等. 2015. 宾川主动源地震波走时变化分析方法研究[J]. 地震研究,38(4):591-597.
- 栾奕,杨宏峰,王宝善. 2016. 大容量气枪主动源波形资料处理(一):云南宾川[J]. 中国地震,32(2):305-318.
- 裴正林,牟永光. 2004. 地震波传播数值模拟[J]. 地球物理学进展,19(4):933-941.
- 孙耀充,张伟,陈晓非. 2013. 基于同位网格有限差分方法的三维TTI介质中地震波场数值模拟[C]. 中国地球物理2013——第十三分会论文集.
- 王宝善,葛洪魁,王彬,等. 2016. 利用人工重复震源进行地下介质结构及其变化研究的探索和进展[J]. 中国地震,32(2):168-179.
- 王彬,李孝宾,刘自凤,等. 2016. 宾川地震信号发射台的震源系统、观测系统和观测结果[J]. 中国地震,32(2):193-201.
- 王彬,吴国华,苏有锦,等. 2015. 宾川地震信号发射台的选址、建设及初步观测结果[J]. 地震研究,38(1):1-6.
- 王雪秋,孙建国,张文志. 2005. 复杂地表地质条件下地震波数值模拟综述[J]. 吉林大学学报(地), (增刊1):16-22.
- 杨微,王宝善,刘政一,等. 2016. 不同激发环境下井中气枪震源特征研究[J]. 中国地震,32(2):231-240.
- 翟秋实,姚华建,王宝善. 2016. 气枪震源资料反褶积方法及处理流程研究[J]. 中国地震,32(2):295-304.
- 张海明,陈晓非. 2003. 地震波研究[J]. 地震学报,25(5):465-474.
- 张伟. 2006. 含起伏地形的三维非均匀介质中地震波传播的有限差分算法及其在强地面震动模拟中的应用[D]. 北京:北京大学.
- BERENGER J. 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. J Comput. Geophys,114(2):185-200.
- BOHLEN T. 2002. parallel 3 - d viscoelastic finite difference seismic modelling[J]. computers & geosciences,28(8):887-899.
- GELI L, BARD P Y, JULLIEN B. 1988. The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results[J]. Bull Seism Soc Am,78(1):42-63.
- GOTTLIEB D, TURKEL E. 1976. Dissipative 2 - 4 methods for time - dependent problems[J]. Mathematics of Computation,30(136):703-723.
- MOCZO P, KRISTEK J, VAVRYCUK V, et al. 2002. D heterogeneous staggered - grid finite - difference modeling of seismic motion with volume harmonic and arithmetic averaging of elastic moduli and densities[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,92(8):3042-3066.
- ZHANG W. 2006. Traction image method for irregular free surface boundaries in finite difference seismic wave simulation[J]. Geophysical Journal International,167(1):337-353.

ZHANG W. 2012. Three – dimensional elastic wave numerical modelling in the presence of surface topography by a collocated – grid finite –

difference method on curvilinear grids[J]. *Geophysical Journal International*, 190(1):358 – 378.

## Numerical Simulation of Seismic Wave Field in medium with limited water

SUN Nan<sup>1,2</sup>, SUN Yaochong<sup>1</sup>, YU Shan<sup>3</sup>

(1. *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

(2. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(3. *Yunnan International Cultural Exchange Center, Kunming 650041, Yunnan, China*)

### Abstract

Accurate simulation of seismic propagation through in complex medium could provide theoretical support and basis for analyzing the data obtained from the active source detection and inversion of regional interior medium structure. Based on 2D models, we use the Finite difference method to simulate the seismic wave field propagation. The results show that the source stimulated in different medium could generate different wave characteristics, and the existence of limited water has a significant influence on the wave propagation. The wave field energy strengthen following the level increasing of the limited water, until a water depth with the energy starts to weaken, while the water depth is the optimal depth with the maximum energy. When source located on the side of the limited water, the records of stations in different sides with equal epicentral distance show obviously difference, and the wave from the land side has much more fast velocity and larger energy, and difference between the two sides is more obvious in horizontal component than that in vertical component. Consequently, we can use numerical simulation method to estimate the optimal water level and source location, and on this account we can provide theoretical support for the experiment of the air gun source stimulated in reservoirs.

**Keywords:** finite difference; seismic wave field; numerical simulation; limited water; hypocentral location