

刘春禹, 杨宏峰, 杨微等. 2024. 源区水位对云南宾川大容量气枪震源子波特性的影响. 地球物理学报, 67(11): 4160-4170, doi: 10.6038/cjg2024R0296.

Liu C Y, Yang H F, Yang W, et al. 2024. Effects of reservoir water level changes on the characteristics of airgun wavelets in Binchuan, Yunnan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(11): 4160-4170, doi: 10.6038/cjg2024R0296.

源区水位对云南宾川大容量气枪 震源子波特性的影响

刘春禹^{1,3}, 杨宏峰^{2,3*}, 杨微¹, 王伟涛¹, 杨军⁴, 茶文剑⁴, 李孝宾⁴, 叶泵⁴

- 1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081
- 2 香港中文大学地球与环境科学系, 香港
- 3 香港中文大学深圳研究院, 广东深圳 518057
- 4 中国地震科学实验场大理中心, 云南大理 671000

摘要 近些年来, 大容量气枪震源逐渐被用于研究中国大陆地壳结构以及其时变特征, 但激发水库的水位不可控, 气枪震源子波信号的重复性受到严重影响, 研究地壳介质时变特征存在着很大挑战. 以往研究环境因素对气枪子波的影响时, 假设水体为半无限空间介质, 常忽视气枪至水体底部的距离, 而陆地有限水体的水位因素不应该被忽略. 针对这一问题, 本文从经验公式角度解析云南宾川大银甸水库水位变化对气枪子波信号的影响, 包括子波主脉冲振幅、优势频率、气泡脉冲优势频率和主脉冲-气泡脉冲振幅比等. 研究结果表明 4 支气枪在激发过程中存在相互作用, 显示气泡脉冲优势频率、主脉冲振幅和优势频率与气枪至水库底距离呈正相关关系, 主脉冲-气泡脉冲振幅比与气枪至水库底距离呈负相关关系. 研究成果可优化有限水体气枪震源激发实验参数, 为利用陆地大容量气枪震源开展地下介质时变特征研究奠定基础.

关键词 陆地水体; 大容量气枪; 气枪子波特征; 气枪相互作用; 气枪子波经验公式

doi: 10.6038/cjg2024R0296

中图分类号 P315

收稿日期 2023-05-14, 2024-01-31 收修定稿

Effects of reservoir water level changes on the characteristics of airgun wavelets in Binchuan, Yunnan

LIU ChunYu^{1,3}, YANG HongFeng^{2,3*}, YANG Wei¹, WANG WeiTao¹, YANG Jun⁴,
CHA WenJian⁴, LI XiaoBin⁴, YE Beng⁴

- 1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China
- 2 Earth and Environmental Sciences Programme, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China
- 3 Shenzhen Research Institute, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen Guangdong 518057, China
- 4 Dali Center, China Seismic Experimental Site, China Earthquake Administration, Dali Yunnan 671000, China

Abstract A large volume airgun array has been increasingly used to investigate the subsurface structure and to monitor the shallow crustal response in Chinese mainland. However, changes in the water level of the reservoir affect the repeatabilities of airgun wavelets, hindering the monitoring of crustal velocity changes. In previous research on the wavelet characteristics, the water body was usually treated as a half-space model, neglecting the

基金项目 国家自然科学基金(41974069), 中央公益类科研院所基本科研业务专项(DQJB22K46), 和香港研究资助局优配研究基金(14306122) 共同资助.

第一作者简介 刘春禹, 男, 1990 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事背景噪声和主动源研究浅地壳速度时变特征. E-mail: cliu@cga-ign.ac.cn

*** 通讯作者** 杨宏峰, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 主要从事震源物理、断层结构以及时变特征、断层滑动模拟等研究.

E-mail: hyang@cuhk.edu.hk

distance from the Airgun to the Bottom of the reservoir (DAB). However, when studying wavelet characteristics of inland airguns, we cannot neglect the effects due to the limited depth of the water body. In this study, we explored the empirical relationship between the DAB and the amplitude and frequency of the primary pulse, the frequency of the bubble pulse, and the amplitude ratio of the primary to the bubble pulse. We found that four airguns interacted with each other. We observed that the maximum amplitude of the primary pulse, the dominant frequency of the primary pulse and bubble pulse had a positive correlation to the DAB. The amplitude ratio of the primary pulse to the bubble pulse had a negative correlation with the DAB. Our results can help adjust the experimental settings and provide a foundation for investigating subsurface velocity changes.

Keywords Inland reservoir; A large volume airgun array; Airgun wavelet characteristics; Airgun interaction; Airgun wavelet empirical formula

0 引言

探测地壳的速度时变特征对于理解地震的孕育和发生具有重要意义. 由于地震发生时间不可控, 通过设置密集台阵并利用重复地震来研究断层区的速度时变特征受限 (如 Yang et al., 2020). 利用背景噪声互相关中尾波的到时变化也可获取浅地壳的速度变化, 但背景噪声源的分布不均匀与季节性变化影响尾波的到时, 进而影响浅地壳速度时变的计算. 另外, 噪声互相关方法解析的速度时变时间分辨率较主动源方法低. 因此, 寻找稳定、安全、高度重复主动源来研究断层区时变特征势在必行. 在 19 世纪中期, 化学爆炸已经被应用于浅层地壳结构研究 (Mallet, 1852). 自 20 世纪以来, 炸药爆破在地震反射和折射试验的应用, 加速了对浅层地壳结构的理解, 并推动了矿产资源的开发 (Mooney et al., 1983; Catchings, 1999). 但是, 炸药震源信号重复性一般, 并且破坏环境和安全隐患. 尽管陆续出现了多种可控震源 (Wang et al., 2008; 王伟涛等, 2009; 杨微等, 2010; 王宝善等, 2011), 但是大多能量有限, 穿透距离较近, 深度较浅. 气枪得益于其激发能量高、转换效率高、传播距离远、以及节能环保等特点, 已被广泛应用于海洋石油勘探和地质探测 (如 Wan et al., 2019). 陈颀等 (2007) 提出使用大容量气枪来研究内陆断层区速度结构和其时变特征. 经过在内陆水体多方测试其可运行性 (Chen et al., 2007, 2008; 丘学林等, 2007; Wang et al., 2010), 并在云南宾川大银甸水库建立了由 4 支美国 Bolt 公司生产的 Longlife 气枪组成的发射台阵, 这标志着全球首次在内陆地区建立了固定气枪震源信号发射台 (Wang et al., 2012). 自建成以来, 众多研究着力于解析信号监测速度结构、速度时变特征和地震同震变化 (王宝善等,

2016; 魏芸芸等, 2016; 陈佳等, 2017; 刘志国等, 2019; 杨建文等, 2019; Yang et al., 2020; Jiang et al., 2021; Song and Yang, 2022; She et al., 2022; 苏金波等, 2022). 张云鹏等 (2020) 应用气枪数据研究了宾川地区的三维速度结构并对地震重定位, 为理解控震构造以及深部特征提供了重要证据. Wang 等 (2020) 和 Luan 等 (2022) 则利用短期连续激发的气枪信号研究地下介质日变化特征, 推断日温度变化是控制浅地壳结构速度变化的主要因素.

大银甸水库主要用于农业灌溉, 水位变化幅度较大. 在大多数年份中, 由于水库水位低于气枪悬挂深度 12 m, 因此在 5 月至 9 月期间无法进行激发. 杨微等 (2020) 发现水库水位的改变可影响气枪信号的重复性. Liu 等 (2021) 利用 2016 年气枪数据研究了宾川盆地的速度季节性变化, 发现水库水位的变化影响了气枪信号优势频率的变化, 进而影响体波到时的变化, 并表明在从理论上理解水库水位如何影响信号优势频率变化之前, 要消除这种影响仍存在很大的困难. 因此, 利用气枪来获取研究区域季节性时变特征仍存在巨大挑战.

针对源区水位的影响, 一种解决方法是发展新方法去除水库水位变化引起的震源效应, 但是目前仍处在理论层面; 另一种方法是通过定量方法来理解水库水位变化对气枪子波的影响, 从而优化实验参数, 为气枪激发实验奠定基础 (郭晓等, 2020). 胡久鹏等 (2018) 通过数值模拟方法研究了水库水位变化对气枪子波影响, 但水体高度复杂的环境可能会影响子波模拟的准确性. 本文旨在从经验公式的角度研究水库水位变化对气枪子波特征参数的影响, 包括主脉冲振幅变化、气泡脉冲优势频率变化, 以及主脉冲-气泡脉冲振幅比的变化.

1 实验数据

2010年,在云南宾川大银甸水库中,基于大容量气枪震源构建了地震信号发射台,气枪处于水下12 m左右,悬挂在一个尺寸为7 m × 7 m的气枪架四边(图1)。它的激发气压为15 MPa,4支气枪的总容积为8000 in³(每支2000 in³,即0.032774 m³),在激发时保持恒定不变。为了监测气枪信号和研究该区域速度结构以及时变特征,在该区域布设了40个短周期台阵(图2)。其中,位于水库边缘、距离气枪发射台约50 m远的CKT2台站记录的信号被用作气枪子波信号。子波信号主要包括主脉冲(频率范围主要在6~30 Hz)和气泡脉冲(频率范围主要在2~6 Hz)(林建民等,2008;杨微等,2013,2021;王宝善等,2016;魏斌等,2016;Wang et al., 2018; Liu et al., 2021)。CKT2台站记录的震源信号作为参考台站波形,通过反褶积处理被用于研究速度日变化(Wang et al., 2018; Luan et al., 2022)。Liu等(2021)发现气枪信号存在时间跳动问题。因此在截取主脉冲和气泡脉冲信号前,利用AIC-picker(Maeda, 1985)来拾取气枪P波到时并校正。经过时间校正之后,图3显示0~0.15 s气枪信号的主要频率在6~30 Hz之间,为主脉冲信号。因0.3~0.7 s信号频率分布范围广,可能存在多个气枪的气泡脉冲、水库底部多次反射相互干扰(胡久鹏等,2018),因此选用了0.7~3 s之间的信号为气泡脉冲信号,主要频率在2~6 Hz左右。

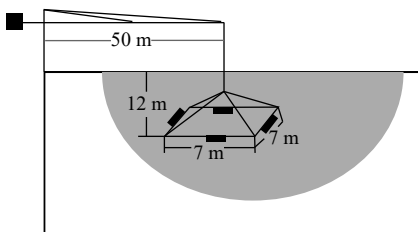


图1 枪和水库架构图

黑色长方形代表4支气枪,安装在7 m × 7 m枪架之下,位于水下恒定12 m的距离。气枪悬挂于距离水库边50 m的塔吊下。

Fig. 1 The setup of the airgun experiment

Black rectangular boxes represent four airguns hanging under a 7 m by 7 m floating frame at 12 m below the water surface. The airgun shooting array is 50 meters from the bank of the reservoir.

对2013年至2020年所有气枪子波经过时间校正和叠加后生成参考信号。大部分年份中在第150天至250天期间气枪不激发,日平均激发2次以上(Liu et al., 2021中Figure S1)。然后,计算每一个气枪激发信号与参考信号的互相关系数,发现水库水

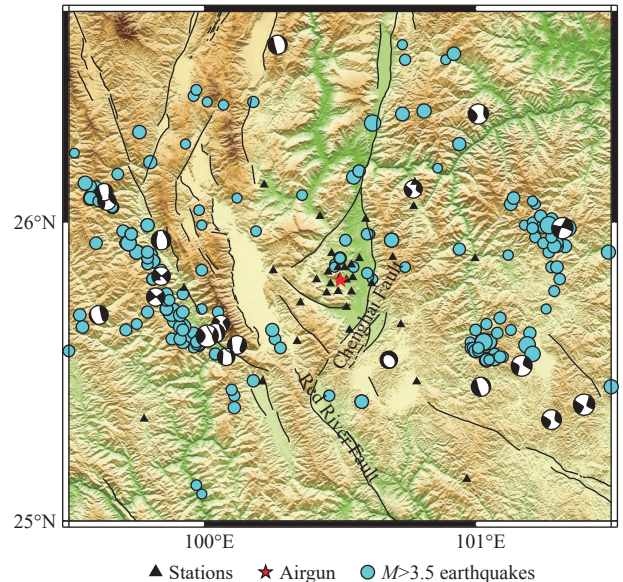


图2 云南宾川盆地气枪激发台阵(红色五角星)与40个短周期台阵(黑色三角形)分布

参考台CKT2离激发台阵50 m左右。青色圆形代表该区域震级大于3.5的地震。该区域处于程海断裂与红河断裂交界处。断裂带位置来自于中国地震科学实验场数据产品(Liu et al., 2019)。

Fig. 2 Distribution of the airgun shooting array (red star) and the short-period receiver array (black triangles)

The reference station CKT2 is 50 meters away from the shooting array. Earthquakes with magnitude larger than 3.5 are marked with cyan circles. The study region is in the intersection of Chenghai Fault and Red River Fault. The location of faults are from the China Seismic Experimental Site products (Liu et al., 2019).

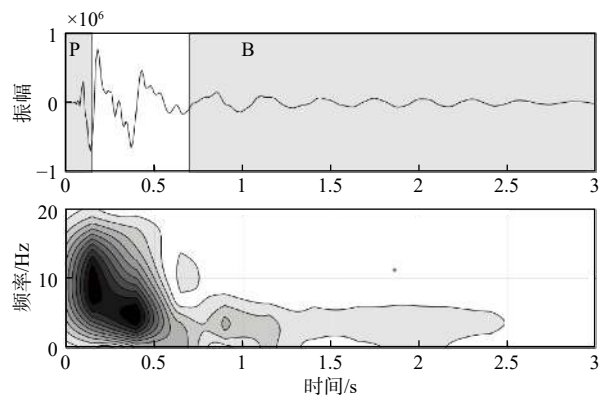


图3 CKT2台站观测到的气枪体波以及频谱图变化。0~0.15 s为气枪主脉冲信号到达时间(P阴影区域),0.7~3 s为气泡脉冲到达时间(B阴影区域)。

Fig. 3 Airgun signature observed in the reference station CKT2 and its spectrogram

We select the arrival time from 0 to 0.15 s as the primary pulse window (Shaded area marked with the letter P) and 0.7 to 3 s as the bubble pulse window (Shaded area marked with the letter B).

位变化与互相关系数存在一定的正相关关系(图4),这说明了水库水位变化会影响气枪子波信号。

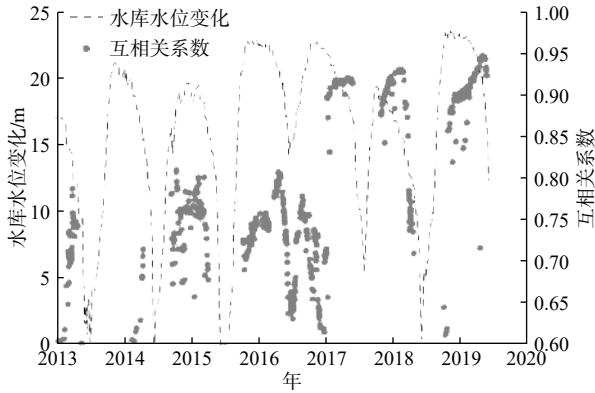


图4 水库水位变化与互相关系数的对比图

Fig. 4 Comparison of reservoir water level changes with correlation coefficients

2 气枪相互作用

前人研究都侧重于气枪气压、气枪容积和悬挂深度对于气枪子波的影响 (Safar, 1976; Nootboom, 1978; Vaage, 1983; Safar, 1985). 不同学者提出了不同的经验公式, 均考虑到的一个主要因素是各个气枪之间是否存在相互作用, 尤其是对于气泡脉冲优势频率的影响. Safar(1976) 提出当两个气枪之间的距离为气泡破裂前一刻半径的 10 倍时, 气枪之间的相互作用可以忽略不计. 破裂前气泡的半径 $r = (3V/4\pi)^{1/3}(P/P_w)^{1/3.24}$. 气枪不相互作用所需的气枪之间的最小距离为 10 倍的半径, $S = 6.2V^{1/3}(P/P_w)^{1/3.24}$. 在等温膨胀的假设下, Nootboom(1978) 提出破裂前气泡的半径 $r = 0.6204V^{1/3}(P/P_w)^{1/3}$. 当两个枪同时激发时, 枪与枪激发不相互作用所需枪之间的最小距离 S 为

$$S = 5.1 \frac{P^{1/3}V^{1/3}}{P_w^{1/3}}, \quad (1)$$

其中, P 是激发气压, P_w 是气枪所处深度的静态水压, V 是激发单枪的容积. Vaage 等 (1983) 指出, Nootboom(1978) 的经验公式和 Safar(1976) 的经验关系是一致的. 基于宾川气枪实验设置, 根据公式 (1) 计算, 两个气枪之间不相互作用的最小距离约为 9 m 左右, 与宾川气枪实验设置的 7 m 距离基本相符. 然而, 以上经验公式只是针对两个气枪同时激发. 针对多个气枪同时激发实验中, Safar (1985) 指出以上经验公式不适用, 并指出可以通过气泡脉冲优势频率的变化来衡量枪与枪之间是否存在相互作用. 对于多个同时激发, 同种类的气枪, 气泡脉冲的优势周期为

$$T_1 = T \left(1 + r \sum_{i=2}^N 1/S_1^i \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中, T 是第一支参考枪的气泡脉冲优势周期, r 是气泡脉冲破裂前的半径, N 是气枪的个数, S 是各气枪距离参考气枪的距离. 基于气枪激发台阵正方形框架设计, 当假设多枪引发的气泡脉冲周期 T_1 相对于参考枪的周期 T 变化在 4% 相对于参考枪的周期 T 变化在 4% (与 Safar, 1976 取值一致) 以内时, $S > 33r$. 针对 Safar(1976) 和 Nootboom(1978) 所得到的气泡破裂时最大半径, 所得到的 4 支气枪不相互作用的最小距离分别为 29 m 和 33 m. 但是, 宾川相邻气枪间隔只有 7 m, 故 4 支气枪之间必定存在相互作用, 气泡脉冲存在相互混杂.

3 气枪至水库底距离影响气泡脉冲优势频率

大量理论和实验研究得到气泡脉冲优势频率与气枪激发气压、容积、气枪至水体表面的距离有一定关系. Willis(1941) 提出传统的 Rayleigh-Willis 经验公式:

$$T = C \frac{P^{1/3}V^{1/3}}{(10+Z)^{5/6}}, \quad (3)$$

其中, T 是气泡脉冲信号的优势周期, P 是激发气枪的气压, V 是气枪容积, Z 是气枪至水体表面的距离, 即悬挂深度, C 是常量. Vaage 等 (1983) 指出气泡脉冲的优势周期与气压关系为: $T \propto P^{1/3}$, 并且根据气枪波形板的位置调整了传统经验公式. Safar (1976) 考虑了不同气枪之间的相互作用, 并提出新的公式为

$$T = C \frac{P^{1/3}V^{1/3}}{(10+Z)^{5/6}} \left(1 + r \sum_{i=2}^n 1/D_{1i} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

其中 R 是气泡破裂前平均半径, D_{1i} 是第一个气枪与第 i 个气枪之间的距离. 因为本次实验中气枪气压、容积和悬挂深度都不改变, 故理论气枪气泡脉冲优势频率应该保持恒定. Wang 等 (2020) 指出 2012 年 11 月气枪数据具有高达 99% 相识度, 其可以用于研究浅地壳速度的日变化. 在传统 Rayleigh-Willis 公式基础上, Langhammer 和 Landrø(1993a, b) 指出水体的温度和液体的黏度也应该被考虑, 他们发现当水体温度从 5 °C 上升至 29 °C 时, 气泡脉冲优势频率降低 5% 左右. Xia 等 (2016) 根据实验数

据确定了 Rayleigh-Willis 经验公式的常量 C . 栾奕等 (2016) 和 Liu 等 (2021) 也发现气枪距水库底距离对气泡脉冲信号的优势频率也有一定影响. 传统气枪激发都是在海上进行, 气枪距离海底的距离比较大, 在气泡脉冲 Rayleigh-Willis 经验公式中忽略气枪距离海底距离这一参数. 但陆地上是在有限水体内激发, 且水库水位存在季节性变化. 因此, 气枪至水库底部距离对子波信号的影响不容忽视.

对每一天的气枪激发信号进行叠加, 通过计算功率谱密度来获取气泡脉冲优势频率. 由图 5, 气泡脉冲优势频率和气枪至水库底部距离的变化呈正相

关的关系. 水库水位的变化是基于水库干枯期时的底部海拔计算得到. 因此, 使用水库水位的变化减去气枪的恒定水深 12 m (图 1) 可得到气枪至水库底部的距离. 针对多气枪激发的实验, Safar (1976) 指出应该考虑多个气枪之间的互相作用, 因此利用公式 (4) 而非公式 (3) 来解释气泡脉冲优势频率的变化. 基于传统公式 (3), 在恒定 P 、 V 、 Z 不变的情况下, 气枪气泡脉冲的优势频率同样也会恒定不变, 但仍然观测到了季节性变化 (图 5a). 为了定量的理解气泡脉冲优势频率的变化, 回归分析得到气泡脉冲优势频率与气枪至水库底部距离两者的关系为 (图 5b):

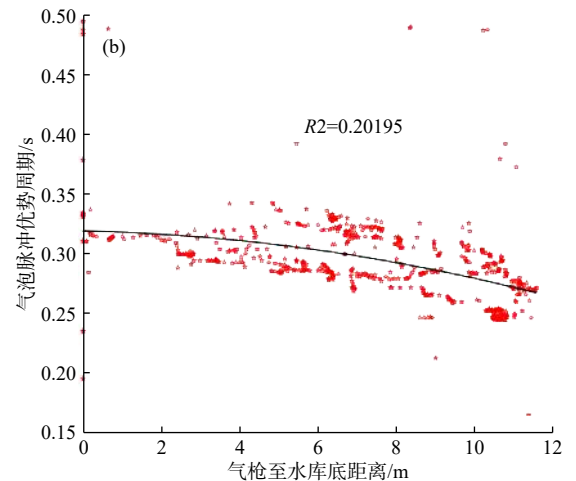
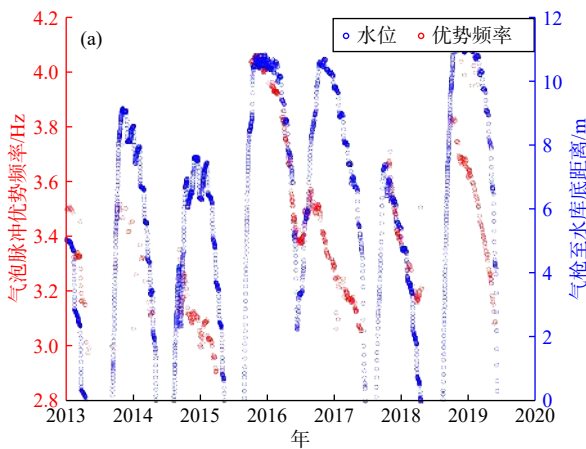


图 5 (a) 气枪至水库底部的距离 (蓝色) 与气泡脉冲优势频率 (红色) 的变化趋势. 因气枪持续保持在水面以下 12 m 的距离, 用水库水位的变化减去恒定 12 m 的深度, 可以得出气枪到水库底的距离; (b) 气枪到水库底部的距离与气枪气泡脉冲优势周期之间的关系 (黑色代表拟合曲线).

Fig. 5 (a) Comparison between the depth to the bottom of the reservoir (blue circle) and the dominant frequency of bubble pulse (red circle). The airgun array is under the water table at 12 meters, so we use reservoir water level subtracting 12 meters to get the depth to the bottom of the reservoir. (b) A polynomial fit (black solid line) of the correlation between the dominant period of bubble pulse and the depth to the bottom of reservoir

$$T = -3.0242 \times 10^{-8} \frac{P^{1/3} V^{1/3}}{(10+Z)^{5/6}} \left(1 + r \sum_{i=2}^n 1/D_{1i} \right)^{1/2} H^2 - 7.16 \times 10^{-4} H + 0.32. \quad (5)$$

由于图 5b 中数据点分布较分散, R^2 拟合系数只有 0.20195, 因此公式 (5) 并不能十分准确地反映气泡脉冲优势周期与气枪至水库底部距离之间的关系, 但可得出气泡脉冲优势周期随气枪至水库底部的距离的增大而减小, 或者说公式 (5) 中 H 的次幂应该是大于 1 的. 可见, 随着水库水位的升高, 气泡脉冲的优势周期下降. 宾川大营甸水库主要用于灌溉, 夏季水库水位是最低的, 冬季或者早春季是水位最高时间. 因此, 气泡脉冲优势周期在春季或者冬季为最小值, 约 0.26 s; 而夏季水位低的时候, 优势

周期为最大值, 约 0.32 s.

4 气枪至水库底距离影响主脉冲振幅

多个单枪实验研究 (Giles and Johnston, 1973; Nootboom, 1978) 得到主脉冲振幅主要与气枪激发气压与激发气枪的容积有关, 并提出

$$A \propto CV^{1/3}, \quad (6)$$

其中, A 是主脉冲的振幅; C 是常量, 取决于枪的种类. 但是, 对于同时激发的多枪, $A \propto V^\alpha$. 当激发的多枪相互作用时, $\frac{1}{3} < \alpha < 1$. 实验数据得到 $\alpha = 0.85$. Johnston (1982) 针对多枪激发得出 α 在 0.65~0.85 之间. 当激发的多枪不相互作用时, $\alpha = 1$. 也有学者指

出主脉冲振幅与气枪激发气压呈线性关系, $A \propto P$ (Giles and Johnston, 1973; Dragoset, 2000; Chen et al., 2014). Johnston(1980) 指出在气压范围 13~48 MPa 内, 主脉冲振幅与气压关系为: $A \propto P^{0.551}$. 当激发气枪气压远大于气枪所处深度水压时, $A \propto P$. Vaage 等 (1983) 发现在气压范围 10~14 MPa 内, $A \propto P^{3/4}$.

通过计算 0~0.15 s 之间主脉冲的最大振幅, 发现主脉冲振幅与气枪至水库底部的距离呈正相关的关系 (图 6a). Chen 等 (2014) 研究了宾川实验设置得出主脉冲振幅与气枪气压关系为: $A \propto P$. Johnston (1980) 指出当悬挂深度处的静水压远小于激发气压时, $A \propto P$. 在宾川气枪震源信号发射台中, 气枪悬挂深度为 12 m, 水压约 0.12 MPa, 远小于激发气压 15 MPa, 可以确定宾川气枪震源信号发射台产生的信号主脉冲振幅与气压关系为: $A \propto P$. 由于气枪之间存在着相互作用, 主脉冲振幅与激发容积的关系为: $A \propto V^\alpha$, 其中 α 在 0.65~0.85 之间. 对于研究气枪至水库底距离对于主脉冲振幅的影响, 可假设 α

等于 0.7. 在实验过程中气枪激发的总容积不变, 所以 α 的选择不会影响主脉冲振幅与气枪至水库底距离的关系, 只会影响常量 C 的大小. 因此, 主脉冲振幅与激发气压、容积的关系可以表示为

$$A = CPV^{0.7}. \quad (7)$$

基于公式 (7), 通过线性回归得到主脉冲振幅与气枪气压、激发容积和气枪至水库底距离之间的关系为

$$A = 5.3259 \times 10^{-4} PV^{0.7} H^2 + 2.865 \times 10^3 H + 1.625 \times 10^5, \quad (8)$$

其中, H 是气枪至水库底的距离. 类似于之前讨论, 图 6b 中点的分布比较分散, 因此拟合系数只有 0.40767. 但是, 公式 (8) 中 H 的次幂是大于 1 的, 表明主脉冲最大振幅随气枪至水库底距离的增加而增加. 夏季水位低时候, 气枪激发的主脉冲振幅比较小; 冬季或者早春季水位高的时候, 气枪激发的振幅较大.

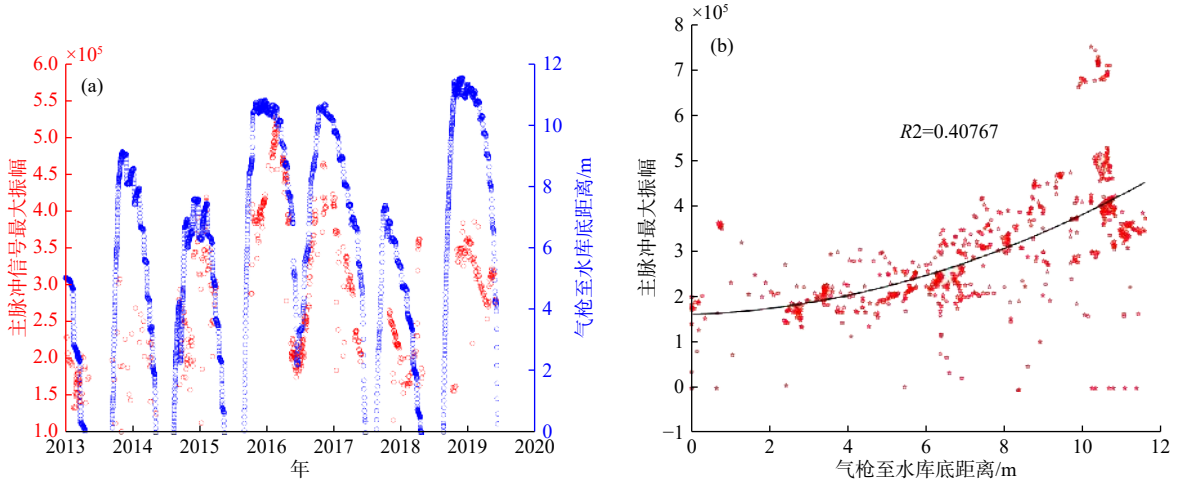


图 6 (a) 主脉冲最大振幅和气枪至水库底部距离呈正相关的关系; (b) 主脉冲最大振幅与气枪至水库底距离的关系的二次项拟合

Fig. 6 (a) Positive correlation between the maximum amplitude of primary pulse and the depth to the bottom of the reservoir; (b) A polynomial fit of the relationship between the maximum amplitude of primary pulse and the depth to the bottom of the reservoir

5 气枪至水库底距离影响主脉冲-气泡脉冲振幅比

主脉冲-气泡脉冲振幅比 R_{pb} 与激发气枪容积 V 可以近似为: $R_{pb} \propto V^{1/4}$ (Giles and Johnston, 1973; Johnston, 1980; Vaage et al., 1983). 振幅比与悬挂深度的关系可以近似为: $R \propto Z^{-1}$. 主脉冲-气泡脉冲振幅比与激发容积、悬挂深度传统经典公式为: $R_{pb} =$

$CV^{1/4}Z^{-1}$. 夏季等 (2016) 推导出主脉冲-气泡脉冲振幅比与气枪气压、气枪容积和悬挂深度有关,

$$R_{pb} = \frac{C}{\left[34.73Z \left(\frac{PV}{Z+10} \right)^{-1/3} - 1 \right]^{1/2} + 0.2}. \quad (9)$$

计算发现主脉冲-气泡脉冲振幅比与气枪至水库底距离存在一定负相关关系. 为了更清晰的展示两者之间的相关性, 对比气泡-主脉冲振幅比与气枪

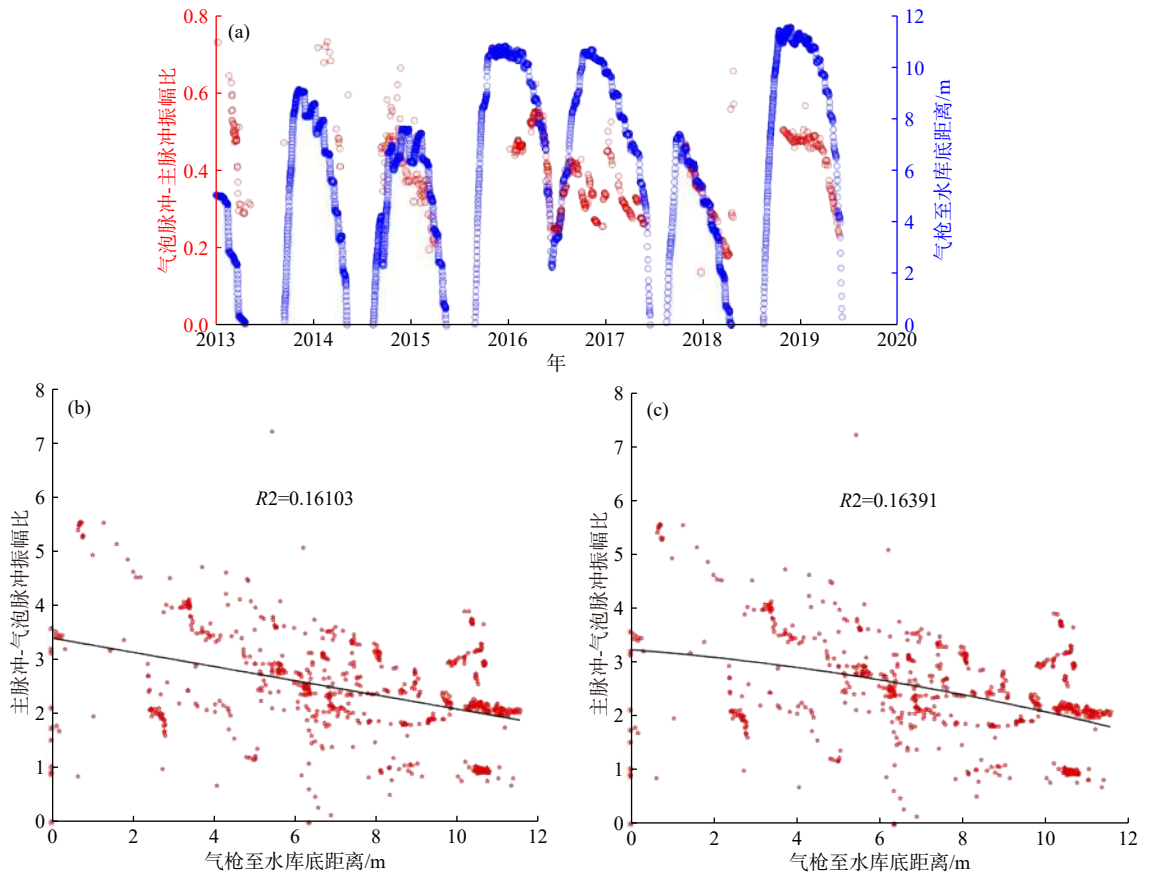


图 7 (a) 气泡脉冲-主脉冲振幅比与气枪至水库底距离的关系; (b) 主脉冲-气泡脉冲振幅比与气枪至水库底距离的线性关系; (c) 二项式拟合

Fig. 7 (a) Comparison between bubble-primery pulse amplitude ratio and the depth to the bottom of the reservoir; (b) A linear fit between the primary-bubble amplitude ratio and the depth to the bottom of the reservoir; (c) A polynomial fit

至水库底距离 (图 7a). 为了定量研究振幅比与气枪至水库底距离的关系, 采用线性回归的方法来拟合数据. 基于以上讨论, 主脉冲-气泡脉冲振幅比与激发容积、悬挂深度关系可总结为:

$$R_{pb} = -0.1667P^{1/6}V^{1/4}Z^{-1}H + 3.4051. \quad (10)$$

二次项拟合 (图 7c) 得到经验公式为

$$R_{pb} = -0.007P^{1/6}V^{1/4}Z^{-1}H^2 - 0.0608H + 3.2332. \quad (11)$$

6 气枪至水库底距离影响主脉冲频率

主脉冲信号的优势频率和气枪至水库底距离具有一定的正相关关系 (图 8a). Safar (1976) 提出利用上升至最大振幅的起落时间的变化来评估主脉冲信号的变化. Watson 等 (2019) 也提出不同环境因素可影响起落时间, 主脉冲信号的起落时间的变化可通过信号优势频率变化来评估. 2016 年数据包含了夏季水库水位下降的重要数据, 主要频率都在 10 Hz

以上 (图 8a), 因此将数据分成了包含夏季激发的 2016 年数据和不包含夏季激发的其他年份数据. 分别对 10 Hz 以上的 2016 年数据和 10 Hz 以下的其他年份数据进行线性回归 (图 8b). 对于 10 Hz 以下的数据, 主脉冲优势频率与气枪至水库底的距离的关系为

$$T = -1.84 \times 10^{-4}H^2 + 0.0015H + 0.1186, \quad (12)$$

该关系代表水位变化不大的春夏季经验关系. 对于水位变化较大的 10 Hz 以上的数据, 经验关系为

$$T = -5.24 \times 10^{-4}H^2 + 0.005H + 0.0728. \quad (13)$$

7 分析与讨论

基于传统经验公式, 当激发容积、激发气压和悬挂深度不变时, 气泡脉冲的优势频率、主脉冲振幅和主脉冲-气泡脉冲振幅比理应保持不变. 然而, 仍然在实验数据中观测到季节性变化. 初步观测数

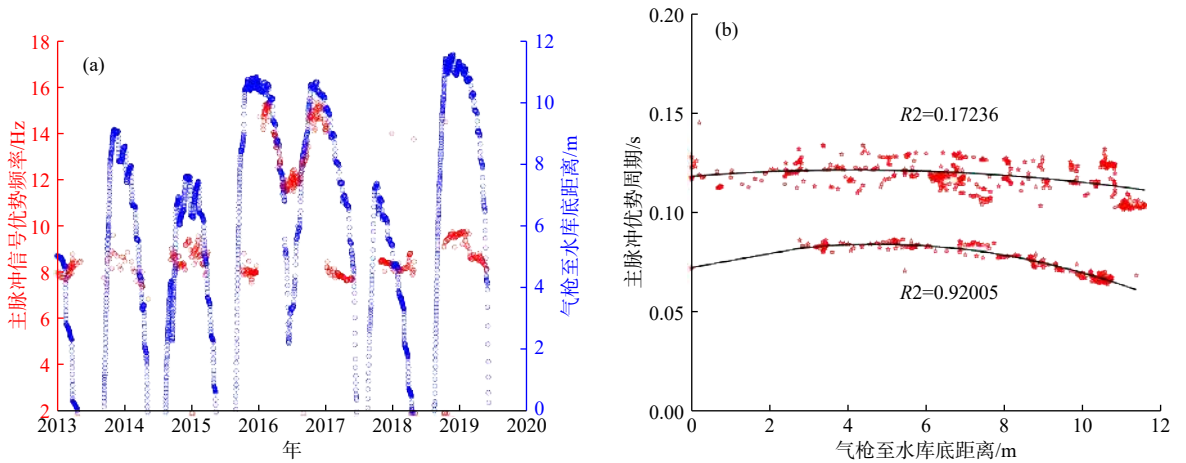


图 8 (a) 主脉冲信号的优势频率和气枪至水库底部距离的关系; (b) 主脉冲的优势周期与气枪至水库底部距离的关系的二项式拟合

Fig. 8 (a) Comparison of the dominant frequency of the primary pulse and the depth to the bottom of the reservoir; (b) Polynomial fits of the function between the dominant period of the primary pulse and the depth to the bottom of the reservoir

据分析表明,这种季节性变化与水库水位的季节性变化存在一定关系。由于气枪悬挂深度不变,故推测气泡脉冲优势频率的变化与气枪至水库底距离存在一定的关系。在海洋气枪激发实验中,通常把气枪至水体底部距离作为半空间处理,而在陆地气枪实验中,由于水体较浅,不能忽略气枪至水体底部距离的影响。

首要关注的问题是气枪至水底的距离对于优势频率、振幅和振幅比的影响幅度。本研究获取了气枪至水库底距离对气枪子波不同特征参数的经验公式。当该气枪至水库底部距离从 0 m 增加到 10 m 的过程中,其对于气泡脉冲优势周期的影响能从 0.32 s 减小到 0.26 s,变化幅度约为 20%,这极大的阻碍浅地壳速度的时变特征的研究,因为浅地壳速度变化仅有 0.1% 左右。主脉冲的振幅增加了一倍左右,增加幅度将近 100%,这可能与传播距离有一定关系。当秋冬季水位较高时,气枪处于高位距水库底 10 m,气枪到水库边监测台距离较近,此时主脉冲振幅较大。当夏季水位较低时,气枪处于低位,主脉冲传播距离较远,与岸边相互作用时间更长,因此信号衰减能量较多,故振幅较小。主脉冲-气泡脉冲振幅比变化了 42% 左右。当气枪处于夏季低位时,主脉冲与气泡脉冲振幅比约为 3.4 左右,此时更利于激发主脉冲信号。当气枪处于秋冬高位时,主脉冲与气泡脉冲振幅比约为 2 左右,此时更利于激发气泡脉冲。主脉冲信号的优势频率基本没有变化,从秋冬季高位时的优势周期的 0.12 s 变化至夏季低位

时的 0.11 s。综合以上讨论来看,气枪至水体底部距离的变化,引起最大的变化是主脉冲的振幅,影响最小的是主脉冲的优势频率。

气枪之间的相互作用往往会使信号中气泡脉冲部分互相叠加混杂,阻碍信号分析与解释。最优化的实验设置是气枪之间不存在相互作用。采取的四边形实验设置,最小气枪不相互作用的距离为 33 倍的气泡破裂前半径。云南宾川气枪激发台至水库边只有 50 m 距离,如果气枪之间的距离要大于 30 m 的话,这就影响了主脉冲信号的叠加。一种既保持主脉冲信号不受影响又能使气泡脉冲不相互作用的方法是增加气枪激发台至子波接收台的距离。另一种方法是减小气枪的激发容积或者激发气压来减小气泡的半径,从而减小相互作用的距离,但是采取以上措施会制约气枪信号传播的距离。所以,针对于不同的实验设置,例如气枪激发台到断层区的距离,理应根据水体大小来调整气枪激发气压、激发容积和气枪之间的距离。

另外,本研究还发现气枪至水库底距离的增加对于主脉冲信号频率变化较小。但是,存在不同季节不同经验公式的变化,这预示着不同季节中温度的变化可能会有一定的作用。因没有监测水体温度的变化,在接下来的研究中,可以分季节研究不同的经验公式验证以上观点。因宾川气枪实验只有 2016 年具有全年完整数据,需要更多其他气枪激发区域,如人工水体呼图壁水库数据,来验证以上经验公式。

8 结论

本文基于云南宾川气枪震源信号发射台资料,研究了气枪震源在有限水体里激发产生的子波信号的特征参数,包括主脉冲信号的频率与振幅、气泡脉冲信号优势频率和主脉冲-气泡脉冲振幅比。观测到了在激发气压、容积和悬挂深度等实验参数不变时,子波信号的特征参数呈季节性变化。结合前人给出的半空间水体经验公式,通过分析发现气泡脉冲优势频率、主脉冲振幅、主脉冲优势频率与气枪至水库底的距离呈正相关关系,主脉冲-气泡脉冲振幅比与其呈负相关关系。本研究结果表明在半无限空间水体里的经验公式不适用于陆地有限水体,在水位存在变化的有限水体里气枪至水库底的距离对子波信号的影响不可忽视。同时,还发现主脉冲-气泡脉冲振幅比在不同季节可能存在不同的变化,说明水温对气枪子波信号也存在影响。另外,研究发现宾川气枪震源信号发射台存在气枪之间的相互作用,导致气泡脉冲相互叠加混杂,为理解信号特征提供理论支持。该研究有助于校正水位变化引起的信号差异,对于宾川气枪震源信号发射台的激发参数、波形信号的理解以及子波经验公式的建立都具有重要意义。另外,该研究也为其他区域气枪震源信号发射台提供理论与实践参考。

致谢 云南宾川气枪震源信号发射台自陈颢院士提出并建立以来,持续工作与运行 10 余年,在此过程中,得到了中国地震局地球物理研究所、云南省地震局、中国地震科学实验场大理中心等多家单位相关研究人员的大力支持,在此表示衷心的感谢。同时,感谢评审专家提出的宝贵意见与建议。

References

Catchings R D. 1999. Regional V_p , V_s , V_p/V_s , and Poisson's ratios across earthquake source zones from Memphis, Tennessee, to St. Louis, Missouri. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(6): 1591-1605.

Chen J, Ye B, Gao Q, et al. 2017. Study on travel time variation of the wave from large volume air-gun source before and after the 2016 Yunlong $M_{5.0}$ earthquake. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 40(4): 550-556.

Chen M, Yang W, Wang W T, et al. 2014. Influencing factors of seismic signals generated by un-tuned large volume airgun array in a land reservoir. *Earthquake Science*, 27(4): 365-376.

Chen Y, Liu L B, Ge H K, et al. 2008. Using an airgun array in a land

reservoir as the seismic source for seismotectonic studies in northern China: experiments and preliminary results. *Geophysical Prospecting*, 56(4): 601-612.

Chen Y, Wang B S, Ge H K, et al. 2007. Proposed of transmitted seismic stations. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 22(5): 441-446.

Chen Y, Zhang X K, Qiu X L, et al. 2007. A new way to generate seismic waves for continental crustal exploration. *Chinese Science Bulletin*, 52(16): 2264-2268.

Dragoset B. 2000. Introduction to air guns and air-gun arrays. *The Leading Edge*, 19(8): 892-897.

Giles B F, Johnston R C. 1973. System approach to air-gun array design. *Geophysical Prospecting*, 21(1): 77-101.

Guo X, Zhang Y S, Liu X Z, et al. 2020. Development and prospects of active-source construction in Gansu province. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 42(5): 1146-1150, doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1146.

Hu J P, Wang W T, Wang B S, et al. 2018. Calculating the propagation of airgun source in a limited water body using the back-projection method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(3): 1000-1012, doi: 10.6038/cjg2018L0109.

Jiang X H, Hu S Q, Yang H F. 2021. Depth extent and V_p/V_s ratio of the Chenghai fault zone, Yunnan, China constrained from dense-array-based teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(8): e2021JB022190, doi: 10.1029/2021JB022190.

Johnston R C. 1980. Performance of 2000 and 6000 PSI air guns: theory and experiment. *Geophysical Prospecting*, 28(5): 700-715.

Johnston R C. 1982. Development of more efficient airgun arrays: theory and experiment. *Geophysical Prospecting*, 30(6): 752-773.

Langhammer J, Landrø M. 1993a. Temperature effects on airgun signatures. *Geophysical Prospecting*, 41(6): 737-750.

Langhammer J, Landrø M. 1993b. Experimental study of viscosity effects on air-gun signatures. *Geophysics*, 58(12): 1801-1808.

Lin J M, Wang B S, Ge H K, et al. 2008. Study on large volume airgun source characteristics and seismic phase analysis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(1): 206-212.

Liu C Y, Yang H F, Wang B S, et al. 2021. Impacts of reservoir water level fluctuation on measuring seasonal seismic travel time changes in the Binchuan basin, Yunnan, China. *Remote Sensing*, 13(12): 2421, doi: 10.3390/rs13122421.

Liu J, Xu X Y, Han L F, et al. 2019. Major faults in the China Seismic Experimental Site KMZ version (in Chinese). The CSES Technological Products, doi:10.12093/04md.09.2019.02.v1. <http://www.cses.ac.cn/sjpc/ggmx/2021/135.shtml>.

Liu Z G, Zhang Y S, Zou R, et al. 2019. Travel time changes of the airgun signal before the Zhangye $M_{5.0}$ earthquake in Gansu province. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 41(6): 1402-1406, doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1402.

Luan Y, Yang H F, Wang B S, et al. 2022. Time-lapse monitoring of daily velocity changes in Binchuan, Southwestern China, using large-volume air-gun source array data. *Seismological Research Letters*, 93(2A): 914-930.

- Luan Y, Yang H F, Wang B S. 2016. Large volume air-gun waveform data processing (I): Binchuan, Yunnan. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 32(2): 305-318.
- Maeda N. 1985. A method for reading and checking phase time in auto-processing system of seismic wave data. *Zisin*, 38(3): 365-379.
- Mallet R. 1852. Second Report on the Facts of Earthquake Phenomena. Taylor & Francis.
- Mooney W D, Andrews M C, Ginzburg A, et al. 1983. Crustal structure of the northern Mississippi embayment and a comparison with other continental rift zones. *Tectonophysics*, 94(1-4): 327-348.
- Nooteboom J J. 1978. Signature and amplitude of linear airgun arrays. *Geophysical Prospecting*, 26(1): 194-201.
- Qiu X L, Chen Y, Zhu R X, et al. 2007. The application of large volume airgun sources to the onshore-offshore seismic surveys: implication of the experimental results in northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 553-560.
- Safar M H. 1976. The radiation of acoustic waves from an air-gun. *Geophysical Prospecting*, 24(4): 756-772.
- Safar M H. 1985. Comment on "Interaction between airguns" by S. Vaage, B. Ursin and K. Haugland. *Geophysical Prospecting*, 33(7): 1063-1066.
- She Y Y, Yao H J, Yang H F, et al. 2022. Constraining the depth extent of low-velocity zone along the Chenghai Fault by dense array ambient noise interferometry and horizontal-to-vertical spectral ratio. *Tectonophysics*, 827: 229265, doi: 10.1016/j.tecto.2022.229265.
- Song J H, Yang H F. 2022. Seismic site response inferred from records at a dense linear array across the Chenghai fault zone, Binchuan, Yunnan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(1): e2021JB022710, doi: 10.1029/2021JB022710.
- Su J B, Yang W, Li X B, et al. 2022. Co-seismic velocity changes with Yunnan Yangbi $M_s 6.4$ earthquake measured by airgun source. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 65(2): 649-662, doi: 10.6038/cjg2022P0636.
- Vaage S, Haugland K, Utheim T. 1983. Signatures from single airguns. *Geophysical Prospecting*, 31(1): 87-97.
- Wan X L, Li C F, Zhao M H, et al. 2019. Seismic velocity structure of the magnetic quiet zone and continent-ocean boundary in the northeastern South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(11): 11866-11899.
- Wang B S, Ge H K, Wang B, et al. 2016. Practices and advances in exploring the subsurface structure and its temporal evolution with repeatable artificial sources. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 32(2): 168-179.
- Wang B S, Ge H K, Yang W, et al. 2012. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(5): 49-50.
- Wang B S, Tian X F, Zhang Y P, et al. 2018. Seismic signature of an untuned large-volume airgun array fired in a water reservoir. *Seismological Research Letters*, 89(3): 983-991.
- Wang B S, Wang W T, Ge H K, et al. 2011. Monitoring subsurface changes with active sources. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 26(3): 249-256.
- Wang B S, Yang W, Wang W T, et al. 2020. Diurnal and semidiurnal P - and S -wave velocity changes measured using an airgun source. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(1): e2019JB018218, doi: 10.1029/2019JB018218.
- Wang B S, Yang W, Yuan S Y, et al. 2010. An experimental study on the excitation of large volume airguns in a small volume body of water. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7(4): 388-394.
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, et al. 2008. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B12): B12313, doi: 10.1029/2007JB005023.
- Wang W T, Wang B S, Ge H K, et al. 2009. Using active source to monitor velocity variation in shallow sediment caused by the Wenchuan earthquake. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 25(3): 223-233.
- Watson L M, Werpens J, Dunham E M. 2019. What controls the initial peak of an air-gun source signature?. *Geophysics*, 84(2): P27-P45.
- Wei B, Su J B, Wang H T, et al. 2016. Site selection and construction of Hutubi airgun source signal transmitting seismic station and its characteristic of source. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 32(2): 222-230.
- Wei Y Y, Wang H T, Su J B, et al. 2016. The preliminary study on travel time abnormal variation of reflection wave phase of air-gun in Xinjiang before two earthquakes with $M_s 5.0$. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 32(2): 270-281.
- Willis H F. 1941. Underwater explosions, time interval between successive explosions. *Underwater Explosion Research*, 2: 13-33.
- Xia J, Jin X, Cai H T, et al. 2016. The time frequency characteristic of large volume airgun source wavelet and its influencing factors. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 32(2): 249-260.
- Yang H F, Duan Y H, Song J H, et al. 2020. Fine structure of the Chenghai fault zone, Yunnan, China, constrained from teleseismic travel time and ambient noise tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7): e2020JB019565, doi: 10.1029/2020JB019565.
- Yang J W, He Y W, Zhang P Y, et al. 2019. Travel-time variations before and after the Yangbi $M_s 5.1$ earthquake on March 27, 2017 from the airgun source seismic data. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 35(4): 676-684.
- Yang W, Ge H K, Wang B S, et al. 2010. Velocity changes observed by the precisely controlled active source for the Mianzhu $M_s 5.6$ earthquake. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 53(5): 1149-1157, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.016.
- Yang W, Wang B S, Ge H K, et al. 2013. The active monitoring system with large volume airgun source and experiment. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 29(4): 399-410.
- Yang W, Wang B S, Wang W T, et al. 2020. Influence factors and control methods for the repeatability of air gun source in land reservoirs. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 40(4): 1-9.
- Yang W, Wang B S, Zhang Y P, et al. 2021. Review on advances in the detection technology using airgun source fired in continental water. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 64(12): 4252-4268, doi: 10.6038/cjg2021P0282.

Zhang Y P, Wang B S, Lin G Q, et al. 2020. Upper crustal velocity structure of Binchuan, Yunnan revealed by dense array local seismic tomography. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 63(9): 3292-3306, doi: 10.6038/cjg2020N0455.

附中文参考文献

- 陈佳, 叶泵, 高琼等. 2017. 利用气枪震源信号研究 2016 年云龙 $M_s 5.0$ 地震前后波速变化特征. *地震研究*, 40(4): 550-556.
- 陈颢, 王宝善, 葛洪魁等. 2007. 建立地震发射台的建议. *地球科学进展*, 22(5): 441-446.
- 郭晓, 张元生, 刘旭宙等. 2020. 甘肃主动源建设发展与展望. *地震工程学报*, 42(5): 1146-1150.
- 胡久鹏, 王伟涛, 王宝善等. 2018. 利用反投影方法计算陆地有限水体气枪震源激发过程. *地球物理学报*, 61(3): 1000-1012, doi: 10.6038/cjg2018L0109.
- 林建民, 王宝善, 葛洪魁等. 2008. 大容量气枪震源特征及地震波传播的震相分析. *地球物理学报*, 51(1): 206-212.
- 刘静, 徐心悦, 韩龙飞等. 2019. 实验场区主要活动断裂地表迹线 KMZ 版. 中国地震科学实验场科技产品, doi: 10.12093/04md.09.2019.02.v1.
- 刘志国, 张元生, 邹锐等. 2019. 甘肃张掖 $M5.0$ 地震前气枪信号走时变化研究. *地震工程学报*, 41(6): 1402-1406.
- 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. *中国地震*, 32(2): 305-318.
- 丘学林, 陈颢, 朱日祥等. 2007. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用: 南海北部试验结果分析. *科学通报*, 52(4): 463-469.
- 苏金波, 杨微, 李孝宾等. 2022. 基于气枪震源信号的云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震前后波速变化. *地球物理学报*, 65(2): 649-662, doi: 10.6038/

cjg2022P0636.

- 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. *中国地震*, 32(2): 168-179.
- 王宝善, 王伟涛, 葛洪魁等. 2011. 人工震源地下介质变化动态监测. *地球科学进展*, 26(3): 249-256.
- 王伟涛, 王宝善, 葛洪魁等. 2009. 利用主动震源检测汶川地震余震引起的浅层波速变化. *中国地震*, 25(3): 223-233.
- 魏斌, 苏金波, 王海涛等. 2016. 新疆呼图壁人工水体大容量气枪信号发射台性能研究. *中国地震*, 32(2): 222-230.
- 魏芸芸, 王海涛, 苏金波等. 2016. 新疆 2 次中强地震前气枪震源反射波震相走时异常变化初步研究. *中国地震*, 32(2): 270-281.
- 夏季, 金星, 蔡辉腾等. 2016. 大容量气枪震源子波时频特性及其影响因素. *中国地震*, 32(2): 249-260.
- 杨建文, 何应文, 张鹏映等. 2019. 2017 年 3 月 27 日漾濞 5.1 级地震前后气枪震源观测走时数据的变化. *中国地震*, 35(4): 676-684.
- 杨微, 葛洪魁, 王宝善等. 2010. 由精密控制人工震源观测到的绵竹 5.6 级地震前后波速变化. *地球物理学报*, 53(5): 1149-1157, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.016.
- 杨微, 王宝善, 葛洪魁等. 2013. 大容量气枪震源主动探测技术系统及试验研究. *中国地震*, 29(4): 399-410.
- 杨微, 王宝善, 王伟涛等. 2020. 陆地水体气枪震源重复性的影响因素及控制方法. *华南地震*, 40(4): 1-9.
- 杨微, 王宝善, 张云鹏等. 2021. 陆地水体气枪震源探测技术回顾与进展. *地球物理学报*, 64(12): 4252-4268, doi: 10.6038/cjg2021P0282.
- 张云鹏, 王宝善, 林国庆等. 2020. 利用密集台阵近震层析成像研究云南宾川上地壳速度结构. *地球物理学报*, 63(9): 3292-3306, doi: 10.6038/cjg2020N0455.

(本文编辑 何燕)