

雷雨次声波的三维动态频谱测量研究 *

苏 昉 田 维

(石油大学(北京)基础科学系 北京昌平 102200)

2000 年 12 月 25 日收到

摘要 采用三台电容式次声接收器,在北京昌平安装次声三点阵,并测量到 2000 年 7-8 月 15 次强降雨的次声波 P-t 曲线及其三维动态频谱。频谱分析结果表明:(1)雷阵雨的次声波主要来自雷次声。(2)雷次声的频谱有三大特点:其一是听到雷声越响时,雷次声振幅越强;其二是特强振幅持续时间很长;其三是周期范围时而连续、时而分布在周期较长和较短端,形成谱图上一个一个空洞。据此可区别它与其它次声波。(3)初步探讨了雷次声的产生机理和传播特点。

关键词 次声波, 三点阵, 三维动态频谱, 雷

Measurements of the three-dimensional dynamic frequency spectrum of infrasonic waves from thundershowers

SU Fang TIAN Wei

(Department of Basic Sciences, University of Petroleum(Beijing), Beijing 102200)

Abstract With three infrasound receivers of the condenser type, a tripartite array in Changping, Beijing was arranged. The infrasonic signals (P-t curve) generated by 15 thundershowers in July and August 2000 were measured. With fast Fourier transform, the three-dimensional dynamic frequency spectra were obtained. The results of the spectrum analysis are as follows: (1) The infrasonic waves of thundershower come from thunder. (2) The frequency spectrum of infrasonic wave of thunder possesses three characteristics. Firstly, the louder the heard thunder is, the stronger the amplitude of the infrasonic wave of thunder; Secondly, the especially strong amplitude lasts a long time; Thirdly, the range of period is successive or separated when time increases, which leads to lots of hollows in the frequency spectrum. Accordingly, we may distinguish the infrasound of thunder from that of the others. (3) The generating mechanism and propagating trait of infrasonic waves of thunder were primarily discussed.

Key words Infrasonic wave, Tripartite array, Three-dimensional dynamic frequency spectrum, Thunder

* 石油大学(北京)校科研基金资助项目 (99-I-02)

1 引言

夏日多雷雨。雷电的破坏力很大,常常击毙人畜,毁坏房屋,炸劈树木,造成森林火灾,故引起人们研究。

1914年 Schmidt^[1]制作了共振箱和垂直短烟道两种新的压力感应装置,首次准确记录雷造成的气压变化。他指出雷辐射的大多数能量处于 5Hz 以下的次声范围,峰值在 1.85Hz。但 1952 年 Arabadzhi^[2]仿制该装置,观测到次声峰值在 0.5Hz。

1967 年 Rice 大学和新墨西哥矿业技术学院的联合小组 Few 等^[3]分析了 12 次云地闪电和 11 次云中闪电的雷后认为:雷声频谱中不存在优势的峰值频率。相反发现:在 1-200Hz 范围内功率增大两个量级;在 200-2000Hz 功率几乎降低一个量级。1969 年 Few^[4]修正指出:功率谱极大值在 40Hz。

1971 年新墨西哥矿业技术学院 Holmes 等^[5]改进了电容式传声器(用厚 5 μ m 的镍箔),其频响在 0.3-20000Hz 之间是平直的,组成四点阵发现:雷功率谱的峰值在小于 4Hz 到 125Hz 的频率范围内,对云中放电或某些云地放电在次声频,而对另一些云地放电在声频范围。他们观测到功率谱峰值频率随闪电之后的到达时间 t 变化: 61Hz、81dB ($t=13$ s) 和 5Hz、83dB ($t=21$ s)。前者可能与产生雷的热通道有关,后者可能归因于静电机制^[6],它激发的基频约 1Hz。此外,Young 等^[7]1968 年也观测到 1-30s 周期范围内的雷次声。鉴于前人对雷的可听声和 1-20Hz 次声已作较多测量研究,故我们着重观测研究 1Hz 以下的长周期雷次声。

我们在北京昌平安装了一个次声测量三点阵,并在 1999 年 1-7 月和 2000.4-2001.4 连续观测强地震是否有前兆次声波,详见文^[8]。希望为临震预报探索一种新方法。然而除地震外,许多自然现象也能发出次声波。经过昌平三点阵长期观测发现:干扰较大的有 4-8 级大

风形成的气压扰动,其实验研究见文^[9]。但干扰最大的当属雷雨。2000 年 7 月有 13 天降雨,其中 3、4、8、9、15、20、21、28 日昌平均有雷阵雨。8 月有 16 天降雨,其中 2、11、17、25、26、27、30 日昌平均有雷阵雨。借此机会,我们利用先进的三维动态频谱技术,对雷雨的次声波详细进行比较研究。本文总结其特点及实验规律,不仅对今后准确区分识别它与其它次声波将大有帮助,而且还提供了多种雷次声(1Hz 以下)的科学数据。

2 测量装置与方法

2.1 接收器频率响应曲线

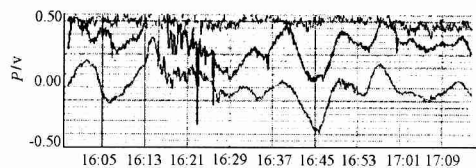
我们使用电容式 CSH-1 型次声接收器,它由中国科学院声学研究所制造,特性曲线见文^[10]图 1。所测频率范围为 0.00026-1Hz,即周期 $T=1-3900$ s。

2.2 次声三点阵

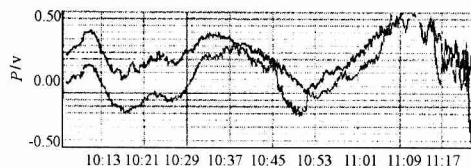
我们布置三台次声波接收器构成次声测量的三点阵,如文^[10]图 2 所示。OA=984.5m, OA 与正北方向的夹角 $\alpha=27.626^\circ$; OB=500.3m, OB 与正北方向的夹角 $\beta=138.017^\circ$; AB=1251m。其尺度与北京中关村的次声接收三点阵^[11]大小相当。

2.3 P-t 曲线

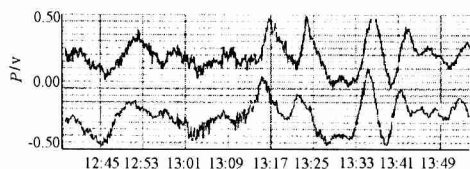
次声接收器 O、A、B 把次声波声压转变为信号电压,再通过校园电话线同时输送给奔腾 PC 机内的 A/D 卡, A/D 卡完成模/数转换并输出脉冲信号电压。我们将其乘以探测器灵敏度(本实验中为 0.050Pa/mV),就得到 P-t 曲线—次声压随时间的变化。采样周期选择 1.00s。借助于计算机我们能进行每天 24 小时实时测量并记录 P-t 曲线。接收器 O、A、B 在同一时间测到的不同波形能同时显示在计算机屏幕上,分别用绿、白和红线表示,如图 1 所示(时间间隔:每格 8min)。从图 1 明显可见:雷雨的次声波 P-t 曲线具有 8-16min 以



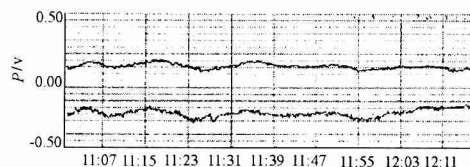
(a) 15:57-17:17(2000/07/03) 雷暴雨



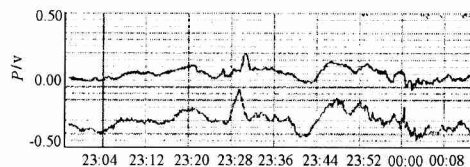
(b) 10:05-11:25(2000/08/02) 长时特强雷雨



(c) 12:37-13:57(2000/08/02) 长时特强雷雨



(d) 10:59-12:19(2000/08/08) 有雨无雷



(e) 22:56(2000/08/10)-00:16(2000/08/11) 有雷无雨

图1 2000年7-8月4次雷雨次声波的P-t曲线

上的长周期。该波形特征明显不同于流星雨次声波^[10]或大风P-t曲线^[9], 后者都有几秒至几十秒的短周期。

2.4 三维动态频谱

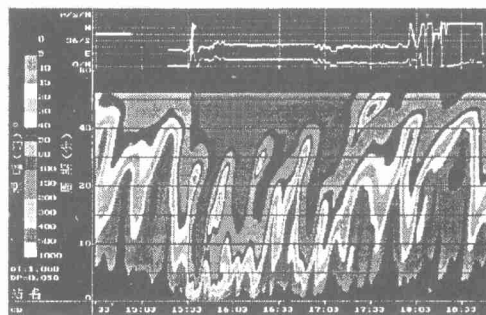
让计算机对次声接收器O测到的P-t曲线波形做4096点的快速傅立叶变换, 采用余弦窗, 窗宽4096s。每隔60s做一次傅氏变换, 并将其结果画成纵直线表示, 得到在每min各种频率成分对应的能量值, 即相应的三维动态

频谱, 如图2-5所示。横坐标代表时间(时间间隔: 30min); 纵坐标代表测到的次声波周期(单位: min)(因所测雷次声频率在1/120-1/3900Hz范围, 表达不便, 按国际惯例, 改用频率的倒数—周期表示); 深浅不同的各种颜色代表测到的次声波振幅范围(单位: Pa)。

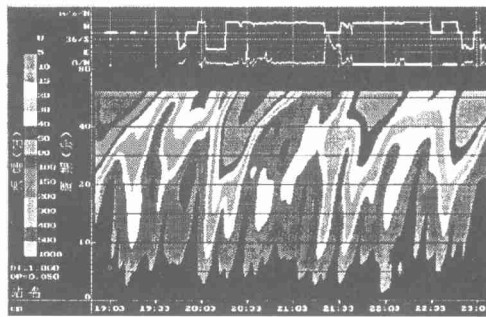
3 观测结果与分析

3.1 2000年7月3日雷暴雨的次声波

2000年7月3日15:33被36°C以上高温天气长期困扰的北京突然打雷下暴雨, 直至17:03雨停。与此同时, 我们测到振幅极强的次声波P-t曲线(见图1a)及其三维动态频谱(见图2)。



(a) 14:33-18:53(2000/07/03)



(b) 18:53-23:13(2000/07/03)

图2 2000年7月3日雷暴雨之前、之中、之后的次声波三维动态频谱

图2(a)表明:

(1) 打雷前14:36-15:33已出现振幅较强

(40-80Pa)、长周期(13-65 分)的次声波。
15:33-17:21 雷雨持续近两小时, 次声振幅变成特强(80-179Pa)。(对 P-t 曲线重新计算, 得到三维动态频谱中每个时刻对应的次声波周期和振幅数值, 其中, 该时间段的最大振幅为 179Pa 。) 特强振幅持续时间很长—这是雷次声频谱特点之一。

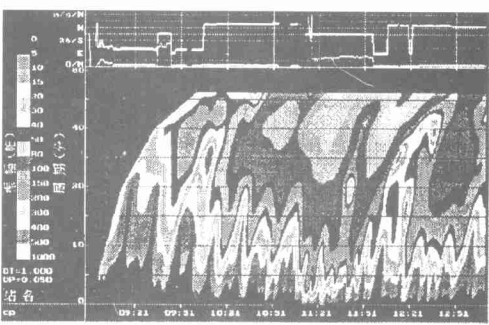
(2) 强振幅对应的周期范围非常宽。如 15:36-15:43 它分别在周期较短端(2-20min) 和周期较长端(24-65min); 15:43-15:48 周期范围是连续的(2- 65min)。15:48-16:01 它又分别在(3-13min)和(20 左右 -65min), 两端间有空白。 16:01-16:18 周期范围又是连续的(7-65min)。16:18-16:24 它分别为(6-22min)和(32-65min), 两端间仍有空白。结果形成一个个空洞。周期范围时而连续、时而分布在周期较长和较短两端, 形成空洞—这是雷次声的频谱特点之二。

雷雨结束后, 17:21-18:33 仍然存在较强振幅(40-80Pa)、长周期(20 -65min)的次声波。它可能是远去的雷次声。

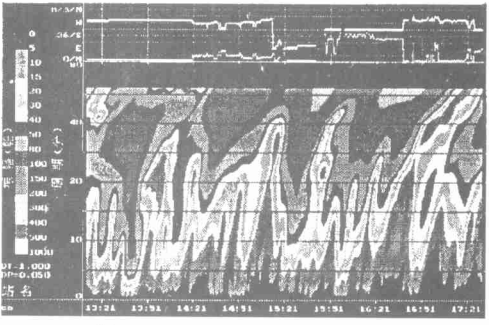
3.2 2000 年 8 月 2 日长时特强雷雨的次声波

2000 年 8 月 2 日 10:00 昌平有雷阵雨, 天空中雷声不断。10:45、11:03 及 11:25 前后均闻响亮的雷声, 尤其 12:30 雷声震耳。直到约 16:30 雨才停。在长时特强雷雨的同时, 我们测到极强的次声波, 其 P-t 曲线见图 1 (b) (c), 频谱如图 3 所示。

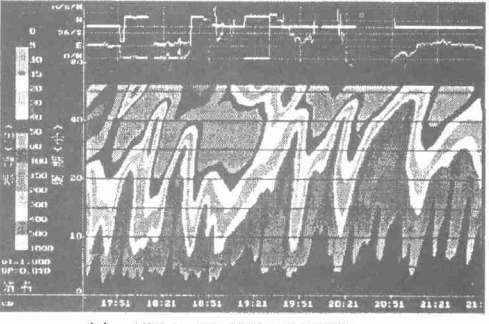
图 3 (a) 表明: 9:45 开始出现较强振幅(40-80Pa)、长周期(17-61min)的次声波。10:19-13:06 变成特强振幅(80-150Pa), 其周期范围亦加宽(10- 60min)。特别在 10:41-12:39 雷声最响、惊天动地时, 次声波 P-t 曲线波形周期增大至 24 分钟以上(图 1b), 频谱亦呈现极强振幅(150-400Pa), 其周期约(17-65min)。同时较强振幅(40-80Pa)对应的周期范围极宽(2-65min)。12:39 -13:07 雷声震耳仍较响时, 雷雨次声波 P-t 曲线波形周期减



(a) 09:01-13:11(2000/08/02)



(b) 13:11-17:31(2000/08/02)



(c) 17:31-21:51(2000/08/02)

图 3 2000 年 8 月 2 日长时特强雷雨的次声波三维动态频谱

小为(8-16min) (图 1c), 频谱振幅亦有所减弱(80-159Pa), 对应周期(15-65min)。

图 3 (b) 表明: 13:21-14:03 隆隆雷声稍微轻些时, 雷雨次声波的振幅又相对变小: (40-80 Pa)对应周期(4-63min); (80-150 Pa) 对应周期(7- 50min)。先后在 14:28-15:20、15:22-16:04 和 16:04-17:06 出现三次高潮, 振幅和周期分别达到(40-163Pa, 15-65min), (40-209Pa, 10-65min), (40

-208Pa, 16-65min)。图3(a)(b)再次证实雷次声频谱有3.1的两大特点,还表明雷声越响时,雷次声也越大。

图3(c)表明:约17:00雷雨停后,17:07-21:51仍不断测到振幅最大值不断减弱、长周期范围逐渐变小的次声波。分别是17:17-17:57(10-103Pa, 5-65min), 17:57-19:29(10-100Pa, 5-65min), 19:46-20:56(10-80Pa, 6-65min)和21:03-21:51(10-59Pa, 8-65min)。估计它们仍是逐渐远去的雷雨次声。

3.3 有雨无雷时的次声波

8月8日08:15-12:31一直下雨,但无雷声。检查其P-t曲线波形平平(图1d),观其次声频谱,主要是较弱振幅(10-30Pa),见图4。

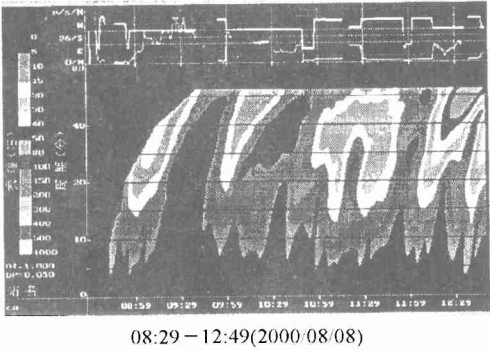


图4 2000年8月8日有雨无雷时的次声波三维动态频谱

7、8月有许多天有雨无雷,其次声频谱皆无强振幅。由此推断:雷雨次声波的强振幅来自雷,而非来自雨。

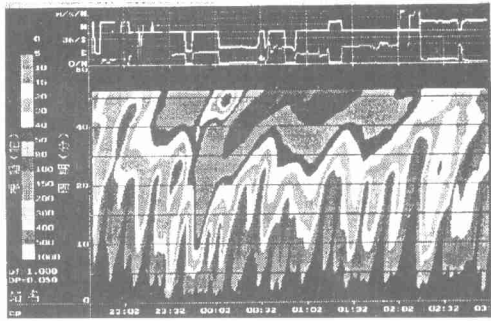
3.4 有雷无雨时的次声波

为进一步证实上述推论,我们特别注意观测有雷无雨时的情况。8月10日23:30后天空中接连闪电,而且雷声隆隆可闻,但并未下雨。检查其P-t曲线波形变化(图1e)比图1d大,比图1abc小,次声频谱如图5所示。

图5表明:23:20前收到中等振幅(20-40Pa)、长周期(13-65min)的次声波。23:20-11

日02:17变成较强振幅(50-80Pa),周期范围较宽(10-65min)。尤其00:05-01:39呈现特强振幅(80-101Pa)、长周期(30-65min)的成分。它们具有类似3.1的两大特点。

根据3.3结果,有雨无雷则无强次声。根据3.4结果,有雷无雨则有类似3.1-3.2的强次声。因此确认:雷雨的次声频谱主要来自雷次声。



22:42(2000/08/10)-03:02(2000/08/11)

图5 2000年8月11日有雷无雨时的次声波三维动态频谱

4 雷次声机理探讨

在惊天动地的雷声中竟还含有一种听不见的次声波,它也占去雷声的相当一部分能量。雷次声究竟怎样形成的?

4.1 雷次声产生机理

文献[12][13]总结近20年的观测验证和数值模拟计算结果后认为:对强对流云来说,雷暴云的起电机理很可能最初来自冰的热电效应,即温差起电理论(又称“淞附起电机理”)。冰中水分子常分解成H⁺和OH⁻。冰条的暖端正负离子多,但负离子迁移率几乎为零,正离子迁移率却很大。故冷端正离子累积,出现正空间电荷,而暖端为负电荷。雹块(或霰粒)通过混合云中的过冷水滴和小冰晶区下落时,由于大量过冷水滴碰冻在雹块上放出冻结潜热,使冰块表面温度高,而小冰晶温度较低。雹块与冰晶相碰,则雹块带负电,冰晶带正电。这

两种带电体下落末速不同,在上升气流的分选作用下,带正电的小冰晶被带到云的上部,带负电荷的雹块被带到云的下部,形成上正下负的电荷中心。

但当电场建立后,感应(极化)起电机机制就变得越来越重要。在指向朝下的晴天电场中,云粒子和降水粒子都要受到极化,使其下半部带正电,上半部带负电。两者相碰撞,一般发生在降水粒子下半部,云粒子的负电荷将传到降水粒子上,弹开的云粒子带正电而降水粒子带负电。再经上升气流的分选,小云粒向上运动,降水粒子向下运动,形成雷暴云上正下负两个主要电荷中心。此外,指向下的电场越强,碰撞时电荷交换量也越多,构成正反馈过程。

根据无线电探空仪研究^[12,13]:平均说来,雷暴云的上部(高度约9-15km)带正电荷约+24C(库仑),其下部(高约3-8km)带负电荷约-20C。在紧贴融化层的下方,有一很小的正电荷囊区约+4C。

当电位梯度加大到超过空气的承受能力(对干空气约 $3 \times 10^6 \text{V/m}$ 。若存在半径1mm水珠则为 $1 \times 10^6 \text{V/m}$ 。尖端放电只要 $2 \times 10^6 \text{V/m}$),将出现介质被击穿,即表现为云地闪电或云内闪电。云地闪又分为自上而下的先导闪(梯级先导:每级约50m,维持 $1 \mu\text{s}$,级间距约 $50 \mu\text{s}$,以平均速度105m/s传向地面)和自下而上的回闪(以 10^7-10^8m/s 向上传播,峰值电流可达10-20kA)。

回闪通过闪道时,可将其内空气温度提高到 $3 \times 10^4 \text{K}$ 。由于升温过程很短,空气来不及膨胀,因而闪道内气压立即剧增至10甚至100个大气压以上。高压闪道迅速向周围大气膨胀,造成很猛烈的冲击波正压峰值(以超声速传播)。

Wilson^[6]最早提出,庞大体积的雷雨云的突然收缩将提供“给雷一个决不容忽视的贡献”。放电后当电应力(等于 $E^2/8\pi$, E 的典型值为 100V/cm)解除时,在一部分带电雷

雨云中的流体动压力将减小到约0.3mm汞柱的程度(即 4×10^{-4} 大气压)。故正压后边有一个负压区。随着向前传播距离的增加,峰值逐渐降低,波形也拉长了。传到远处峰值继续下降,冲击波就转变为声波—震撼山岳的爆炸声。从很远处看云地闪电,类似核爆炸一样,像一个巨大的球面脉冲声源,球体突然向外膨胀后又收缩一下,这时球体的脉动就辐射出次声波并向四周传播。图2、5的次声波由此而来。

一个雷暴云叫一个雷暴单体,其水平尺度约十几km,经历着发展、成熟和消散阶段。但往往多个雷暴单体聚集在一起形成雷暴群(或雷暴带),水平尺度可达几十km。它们产生的次声波就此起彼伏,绵延不断。图3的次声波由此产生。

4.2 雷次声传播特点

Dessler^[14]对次声波源再次分析研究。他估计由直径4km的圆盘状云产生的频率0.5Hz、波长0.6km的声波几乎要沿上、下延伸的圆柱垂直轴线传播。

文[15]亦对无限大障板上作简谐振动的圆活塞(半径 a)给出其远区场声压表达式及指向性图案。波数 $k = 2\pi/\lambda$,当 $ka=0.25$ 时几乎是一个圆,即各方向辐射的声能均等。随 a 增大, $ka=2, 3, 6$ 时,辐射声能越来越向轴向(即活塞法线方向)集中($ka=6$ 时已不超过 $\pm 30^\circ$)。

因此如果雷次声是由扁平的带电云团产生的,这个云团的范围比它产生次声波相应的波长大一些,那么只有在它的正上方或正下方较小的区域才可以收到次声波信号。故通常在闪电的下方才容易收到次声频雷声。正因如此,当昌平上空雷雨结束后,就逐渐收不到其它远处的雷次声了,如图3(c)所示。

5 结论

雷次声的三维动态频谱有三大特点:

(下转第34页)

有利影响,促进沥青质向可溶质的转化,如果体系中存在有氧化剂(体系处于氧化环境),会产生不利影响,促进可溶质向沥青质的转化。因此,在适当条件下对渣油进行超声分散,可能会提高渣中沥青质的稳定性,同时使部分沥青质转化为可溶质,从而延缓或减轻渣油加工过程中的生焦行为,具有潜在的工业利用价值,但这一研究领域尚未得到国内外研究者的足够重视。

同时,对于渣油这样一个组成复杂、非常粘稠的体系,超声作用的空化强度和还原剂的加入等都是研究者所面临的困难。

参 考 文 献

- 1 马加利尔(前苏联)著,徐亦方等译.石油化学加工过程理论基础:石油工业出版社,1982.
- 2 Wiehe I A. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1993, **32**: 2447-2454.
- 3 应崇福主编.超声学:科学出版社,1990.第七章.
- 4 袁易全主编.近代超声原理与应用:南京大学出版社,1996.第五章.
- 5 Lian H J, Lee C, Yen T F., Fraction of Asphalt by Thin-Layer-Chromatography Interfaced with Flame Ionization Detector (TLC-FID) and subsequent Characterization by FTIR, Asphaltene Particles in Fossil Fuel Exploration, Recoery, Refining, and

Production Processes, Edited by M.K.Sharma and T.F.Yen, Plenum Press, New York, 1994.

- 6 Lin J R, Yen T F. *Energy & Fuels*, 1993, (7): 111-118.
- 7 Dunn K, Yen T F. *Fuel Chem. American Chemistry Society*, 1998, **44**: 213-215.
- 8 Briggs L J. *J.Appl.Phys.*, 1950, **21**: 721-722.
- 9 Flint E B, Suslick K S. *Science*, 1991, **253**: 1397-1399.
- 10 Suslick K S, Hannerton D A, Cline R E. *J. Am. Chem. Soc.*, 1986, **108**: 5641-5642.
- 11 Suslick K S, Casadonte D J, Green M L H, et al. *Ultrasonics*, 1987, **25**: 56-59.
- 12 Chatakondur K, Green M L H, Thompson M E, et al. *J.Chem.Soc., Chem.Commun.*, 1987, 900-901.
- 13 周红梅,孙建刚,张招勤.新疆石油科技,1996,6(4): 70-72.
- 14 Sakanishi K, Yamashita N, Whitehurst D D, et al. *Catalysis Today*, 1998, **43**: 241-247.
- 15 Lian H J, Lee C, Yen T F. Fraction of Asphalt by Thin-Layer-Chromatography Interfaced with Flame Ionization Detector (TLC-FID) and subsequent Characterization by FTIR, Asphaltene Particles in Fossil Fuel Exploration, Recoery, Refining, and Production Processes, Edited by M.K.Sharma and T.F.Yen, Plenum Press, New York, 1994.
- 16 Niemczewski B. *Ultrasonics*, May 1980, 107-110.
- 17 Lin J R, Yen T F. *Energy & Fuels*, 1993, **7**: 111-118.

(上接第 21 页)

- (1) 听到雷声越响时,雷次声振幅越强;
- (2) 特强振幅持续时间很长;
- (3) 周期范围时而连续、时而分布在周期较长和较短端,形成谱图上许多空洞。

参 考 文 献

- 1 Schmidt. W. *Met.Z.*, 1914, bf 31: 487-498.
- 2 Arabadzhi, Dokl V I. *Akad. Nauk SSSR*, 1952, **82**: 377-378.
- 3 Few A A, Thunder. Ph.D.Thesis, Rice University, 1968.
- 4 Few A A. *J.Geophys.Res.*, 1969a, **74**: 6926-6934.
- 5 Holmes C R, Brook M, Krehbiel P, et al. *J.Geophys.Res.*, 1971, **76**: 2106-2115.

- 6 Wilson, C T R. *Phil. Trans. R. Soc.*, 1920, **221**: 73-115.
- 7 Young J M, Green G E, Browman H S. *Trans. Am. Geophys.Un.*, 1968, **49**, 688(Abstract).
- 8 苏昉,苏晓.石油大学学报,2000,24(6): 106-112.
- 9 苏昉,田维.石油大学学报,2001,25(6): (待发表).
- 10 苏昉,苏晓.应用声学,2000,19(3): 1-6.
- 11 谢金来,谢照华.声学学报,1996,21(1): 55-61.
- 12 王衍明.大气物理学.青岛:青岛海洋大学出版社,1993. 459-465.
- 13 黄美元,徐华英.云和降水物理.北京:科学出版社,1999. 207-217.
- 14 Dessler A J. *J.Geophys.Res.*, 1973, **78**: 1889-1896.
- 15 管善群,陈通.电声技术基础.北京:人民邮电出版社,1998. 182-187.