

文章编号: 1672-8785(2018)01-0036-06

## 吉林一次暴雨激发平流层重力波的 AIRS 观测

孙 睿<sup>1,2</sup> 姚志刚<sup>2</sup> 严 卫<sup>3</sup> 文 韬<sup>4</sup> 许 伟<sup>5</sup> 章 越<sup>6</sup>

(1. 92916 部队, 海南 陵水 572400;

2. 北京应用气象研究所, 北京 100029;

3. 国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101;

4. 31008 部队, 北京 100091;

5. 94619 部队, 安徽 六安 237000;

6. 93968 部队, 新疆 乌鲁木齐 830075)

**摘 要:** 为了分析中国陆地区域深对流激发平流层重力波的特征, 针对 2010 年 7 月 20 日发生在吉林上空的一次暴雨事件, 利用 Aqua 卫星高光谱大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 的观测数据并结合 ERA-interim 高空背景场数据和 S 变换小波分析方法, 分析了与暴雨相伴的深对流激发平流层重力波的传播特征, 进一步讨论了重力波上传过程对暴雨发展的可能影响。

**关键词:** AIRS; 暴雨; 重力波

**中图分类号:** P421.291 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.01.006

## AIRS Observations of Gravity Wave in Stratosphere Excited by a Rainstorm in Jilin Province

SUN Rui<sup>1,2</sup>, YAO Zhi-gang<sup>2</sup>, YAN Wei<sup>3</sup>, WEN Tao<sup>4</sup>, XU Wei<sup>5</sup>, ZHANG Yue<sup>6</sup>

(1. No. 92916 Troops of PLA, Lingshui 572400, China;

2. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China;

3. Institute of Meteorology and Ocean, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;

4. No. 31008 Troops of PLA, Beijing 100091, China; 5. No. 94619 Troops of PLA, Liu'an 237000, China;

6. No. 93968 Troops of PLA, Wulumuqi 830075, China)

**Abstract:** To analyze the characteristics of the gravity waves excited by the deep convection stratosphere in the land area of China, the propagation characteristics of the gravitational waves excited by deep convection stratosphere accompanied with heavy rainstorm are analyzed. This analysis is carried out for a rainstorm event occurred over Jilin province on July 20, 2010. In the analysis, the observation data from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) onboard the Aqua satellite are used with the ERA-interim field data and the S-transform wavelet analysis method. The possible influence of gravity wave propagation on rainstorm development is further discussed.

**Key words:** AIRS; rainstorm; gravity wave

**收稿日期:** 2017-09-30

**作者简介:** 孙睿(1992-), 男, 甘肃灵台人, 硕士生, 研究方向为平流层重力波的卫星观测与数值模拟。

E-mail: sunr11@lzu.edu.cn

## 0 引言

对流层天气过程对中高层大气的影响一直是重点关注的问题<sup>[1]</sup>。深对流激发的上传重力波是高层大气环流的重要驱动因子之一<sup>[2]</sup>。Lane 等<sup>[3]</sup>的分析表明, 深对流激发平流层重力波的破碎会严重影响航空安全。Hung 等<sup>[4]</sup>的研究表明, 一次台风激发的重力波能够使热层大气密度的量值发生 28% 的变化。涂剑南<sup>[5]</sup>的分析指出, 中层大气的重力波能为电离层提供初始电子密度扰动。Mendillo 等<sup>[6]</sup>在静地磁条件下获得的数值模拟结果表明, 从低层大气上传的扰动会引起 F2 层电子浓度发生 10~30% 的变化。

对重力波源及其激发机制的认识是中层大气环流模拟的基础<sup>[7]</sup>。许多学者<sup>[8,9]</sup>的研究表明, 中国地区中高层大气环境受对流层天气过程的影响显著。尽管总体上中国陆地区域的深对流发生频率要弱于热带区域, 但与之相关的平流层重力波活动仍不可忽视。另一些学者<sup>[9-11]</sup>也指出, 夏季重力波能否上行传播等问题还需要进一步深入探讨, 特别是在电离层的变化受对流层天气过程影响的物理机制方面, 针对不同天气系统的可能物理解释也不尽相同。由于特大暴雨天气属于极端事件, 其发生频率相对较小, 对应的相关观测数据也比较有限, 对于以上问题的系统性研究还相对较少。

卫星和地基遥感技术能用于观测中高层大气的重力波。其中, 大气垂直探测器能够获取平流层重力波信息<sup>[12]</sup>, 卫星微光探测器能够获取中层大气顶的重力波信息<sup>[13,14]</sup>, 地基的气辉观测能揭示中层大气的重力波特征<sup>[15]</sup>。Azeem 等<sup>[16]</sup>基于高光谱红外垂直探测器、微光晨昏通道(Day-Night Band, DNB)数据、地基的全球定位系统(Global positioning system, GPS)观测到的电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)数据, 首次报道了美国东南部春季一次从对流层到电离层高度的重力波传播过程。Xu 等<sup>[17]</sup>利用卫星 AIRS 以及地基

气辉观测数据首次报道了中国北部区域的环状重力波过程。显然, 多种观测资料的同步观测能够揭示对流层天气过程激发重力波的上传过程。

本文针对 2007 年 7 月至 2011 年 8 月间发生在吉林上空的一次暴雨事件, 利用 AIRS 812.16  $\text{cm}^{-1}$  通道的亮温观测数据和 15  $\mu\text{m}$  (2039~2064  $\text{cm}^{-1}$  和 2071~2086  $\text{cm}^{-1}$  共计 42 条通道的平均)、4.3  $\mu\text{m}$  (75 条通道 667.76  $\text{cm}^{-1}$ ) 的扰动观测结果, 并结合欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF)再分析数据(European Reanalysis interim, ERA-interim)提供的背景场信息, 分析与暴雨相伴的深对流激发平流层重力波的传播特征, 并进一步讨论重力波上传过程对暴雨发展的可能影响。这一工作将有助于理解该区域深对流系统激发的平流层重力波特征的上传特征。

## 1 数据和方法

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射的太阳同步轨道卫星——“水”卫星(Aqua)上携带了 AIRS 等 6 个地球观测传感器, 主要用于获取地球大气系统的水循环数据。AIRS 共有 2378 个红外通道, 可实现地表到 65 km 高度大气水分、温度等的垂直探测<sup>[18,19]</sup>。其中, 15  $\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  吸收带可用于探测 100~2 hPa 的重力波(30~40 km 高度)<sup>[18]</sup>, 4.3  $\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  强吸收带也可用于观测 10~3 hPa(41 km 高度)中高层大气重力波, 后者对垂直波长较小的波动更敏感<sup>[20]</sup>。同时需要注意, 受星下点水平分辨率(约 13 km)的影响, 这两个波段的权重函数半峰宽约为 12 km, 故垂直波长小于 12 km 的波动难以被 AIRS 捕捉到<sup>[21]</sup>。

对于高空天气环流形势, 主要分析 500 hPa 高度场、850 hPa 水平风场和相对湿度。在计算亮温扰动值时, 采用多通道低阶拟合和单通道高阶拟合的方法去除背景场信息。

具体是:对于 30~40 km 高度的多通道平均观测采取二阶拟合方式扣除背景场信息,对于 41 km 高度的单通道观测采取四阶拟合去除,其好处是既保证了保留足够详细的波动信息,又能保证足够高的信噪比。

## 2 卫星观测及背景场

图 1 给出了 2010 年 7 月 20 日 0 时和 12 时的 500 hPa 高度场、850 hPa 风场和相对湿度。00 时华北地区的深槽右支与西太副高的西北支在山东、吉林附近汇合,从风场矢量图亦可见明显的低空西南急流,西南风所过之处的相对湿度均大于 80%。到 12 时,槽线向东北方向移动并稍有减弱,但紧随其后又有新的低压中心形成并向东而来,可见降水过程仍在继续,并可能持续一定的时间,急流与相对湿度的分布亦可印证这一推断。郑蕾等<sup>[22]</sup>的天气

学分析结果亦表明,西南涡和西太副高的共同作用配合东北西南走向的切变线形成强劲的西南风水汽通道,是造成本次暴雨的根本原因,再加上大气垂直不稳定,降水使流云发展旺盛并持续较长的生命周期,降水时间断断续续长达 48 h,在吉林、江苏等多地形成严重灾害。

图 2 给出了 2010 年 7 月 20 日 05:05 时 AIRS 12.31  $\mu\text{m}$  的亮温观测及其极值、15  $\mu\text{m}$  和 4.3  $\mu\text{m}$  的亮温扰动观测及其极值(K)。由图 2(a)可见,在湖北、辽宁、吉林和东海存在显著的亮温低值区,最小亮温值低于 200 K,吉林省东部处于冷暖气团交汇处。亮温扰动图上的主要弧状波动结构出现在江西、安徽和江苏刚好处于冷暖气团交汇处,洋面上海陆交界处也存在重力波扰动。其中,41 km 高度的亮温扰动揭示了更细致的波动结构,但 30~

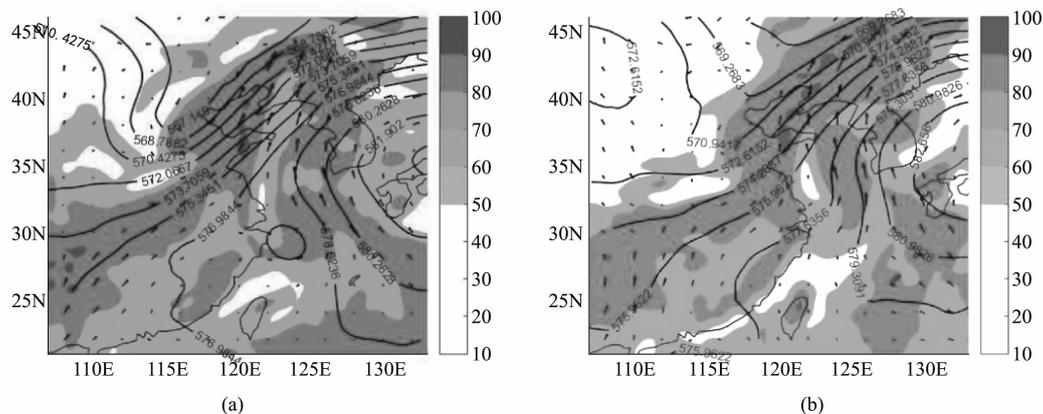


图 1 2010 年 7 月 20 日的 500 hPa 高度场、850 hPa 风场和相对湿度, (a) 表示 00 时, (b) 表示 12 时

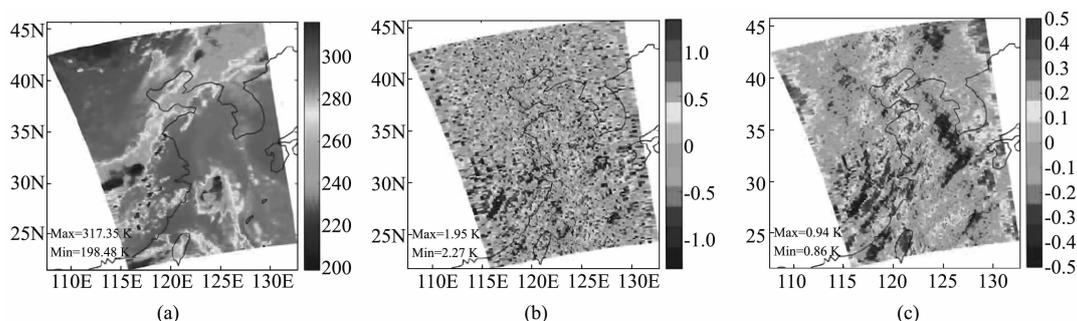


图 2 2010 年 7 月 20 日 05:05 时的 AIRS 观测结果, (a) 表示 12.31  $\mu\text{m}$  通道( $812.16\text{ cm}^{-1}$ ) 观测的亮温(K)的水平分布, (b) 表示 15  $\mu\text{m}$ ( $667.76\text{ cm}^{-1}$ , 对应 41 km 高度)通道的亮温扰动(K)的水平分布, (c) 表示 4  $\mu\text{m}$ (对应 30~40 km 高度) 42 条通道平均亮温扰动(K)的水平分布

40 km 的亮温扰动图探测到了山东半岛和辽宁附近较大尺度的波动结构, 可见对于不同尺度的波动,  $15\ \mu\text{m}$  和  $4.3\ \mu\text{m}$  的亮温扰动的敏感程度具有较大的差异。

暴雨重力波的 AIRS  $12.31\ \mu\text{m}$  红外云图的亮温极小值处于  $190\sim 200\ \text{K}$  之间, 比极大值小  $100\ \text{K}$  以上。AIRS  $15\ \mu\text{m}$  波段扰动极值的绝对值达到  $2\ \text{K}$  左右,  $4.3\ \mu\text{m}$  波段扰动极值在  $\pm 1\ \text{K}$  左右。配合更多类似个例分析, 深入研究暴雨深对流与其伴随重力波之间的联系, 或可通过平流层重力波的分布结构与传播特征预报此类极端灾害性天气。

### 3 S 变换小波分析结果

为定量描述重力波的波动特征, 利用 S 变换小波分析的方法定量提取其亮温扰动场跨轨和顺轨方向的扰动振幅和水平波长, 分析结果

如图 3 所示。由图 3 可见, 2010 年 7 月 20 日暴雨重力波扰动经 S 变换小波分析出来的波动振幅与卫星观测结果在水平分布特征上具有较好的一致性, 尤其是在最强振幅位置, 对应相当好。 $41\ \text{km}$  和  $30\sim 40\ \text{km}$  高度的最强振幅分别为  $1.2\ \text{K}$  和  $0.45\ \text{K}$  以上, 与之对应位置的水平波长约为  $1600\sim 1700\ \text{km}$  和  $2400\sim 2600\ \text{km}$ 。要注意的是, 水平波长分析结果表明高层波长小于低层, 利用相同阶数拟合去除背景场的分析结果亦然, 故可排除扰动计算方法的影响。造成这种现象的原因可能是多波长特征波动在上传过程中受垂直风切变和低空急流的作用, 较长波长的波动扩散、破碎, 形成小尺度波动。

### 4 结论与讨论

本文结合 ECMWF ERA-interim 再分析数

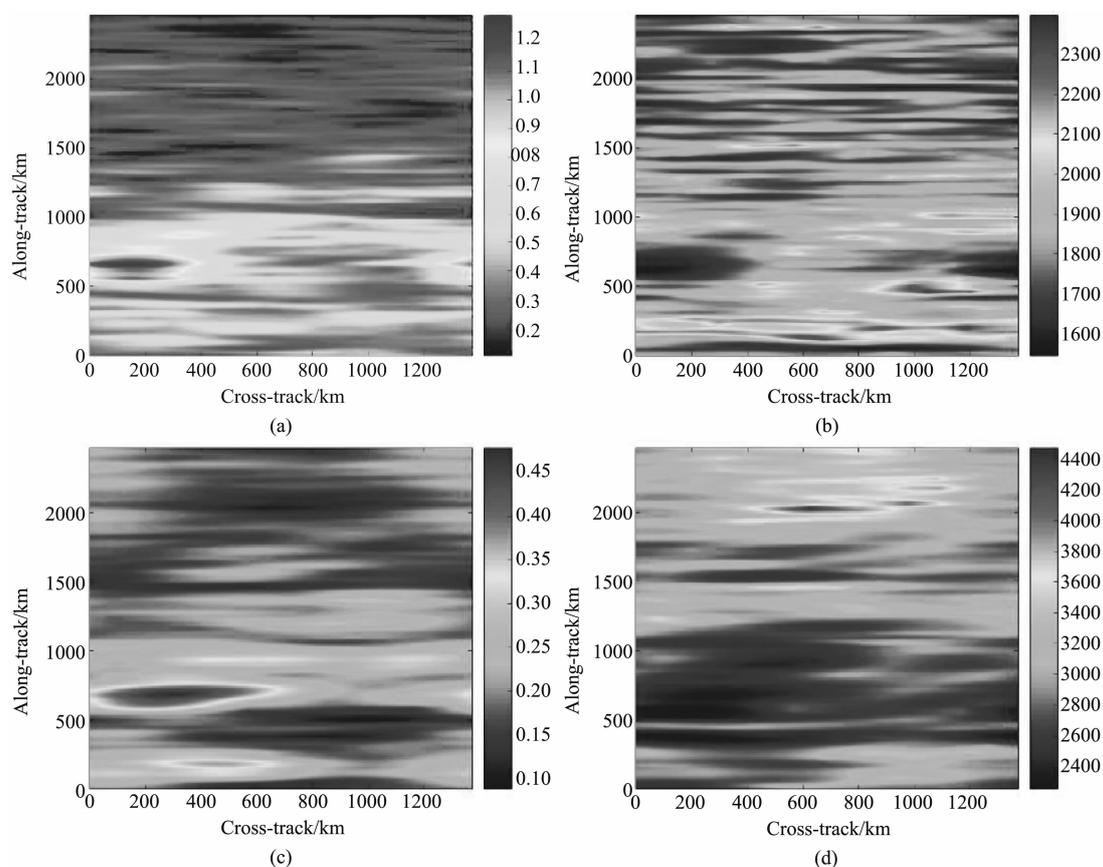


图 3 2010 年 7 月 20 日 05:05 时亮温扰动的 S 变换小波分析结果, 其中 (a)、(b) 分别  $41\ \text{km}$  高度 S 变换小波分析的振幅和波长, (c)、(d) 分别表示  $30\sim 40\ \text{km}$  高度 S 变换小波分析的振幅和波长

据和 AIRS 卫星观测, 利用 S 变换小波分析方法研究了 2010 年 7 月 20 日中国内陆的一次典型暴雨伴随的重力波, 主要结论如下:

(1) AIRS 15  $\mu\text{m}$  和 4  $\mu\text{m}$  通道可用于探测平流层不同高度的重力波扰动, 前者探测的扰动振幅强于后者, 而且还可揭示更加细致的波动结构特征。

(2) S 变换小波分析的扰动振幅与卫星观测亮温扰动的水平分布具有较好的一致性, 说明该方法比较适用于平流层重力波传播特征的定量分析。

(3) 暴雨深对流诱发的平流层重力波主要以弧形波为主, 且具有多尺度的特征, 41 km 高度强扰动的特征波长约为 1600~1700 km, 30~40 km 高度的特征波长约为 2400~2600 km, 波动在上传过程中存在扩散、破碎, 高层波长呈现出小于低层的特征, 但高层扰动振幅强于低层。

尽管利用 AIRS 观测可以分析出暴雨伴随重力波在不同高度的分布和传播特征, 但卫星观测只能提供特定通道特定高度的观测数据。为了解平流层重力波更细致的三维架构(尤其是垂直分布)特征, 下一步将借助中尺度数值预报模式(Weather Research and Forecast, WRF)对其做进一步分析研究。

致谢:感谢 ECMWF 提供的 REA-interim 数据。

### 参考文献

- [1] Fritts D C, Alexander M J. Gravity Wave Dynamics and Effects in the Middle Atmosphere [J]. *Rev. Geophys.*, 2003, **41**(1): 1003.
- [2] Alexander M J, Pfister L. Gravity Wave Momentum Flux in the Lower Stratosphere over Convection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(15): 2029–2032.
- [3] Lane T P, Sharman R D, Clark T L, et al. An Investigation of Turbulence Generation Mechanisms above Deep Convection [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2003, **60**: 1297–1321.
- [4] Hung R, Tsao Y, Liu J. Lower Thermospheric Density Fluctuations during the Time Period of Typhoon Dinah [C]. AIAA, Aerospace Sciences Meeting, 27th, 1989.
- [5] 涂剑南. 大气重力波与电子密度扰动的耦合 [J]. *空间科学学报*, 1993, **13**(3): 190–195.
- [6] Mendillo M, Rishbeth H, Roble R G, et al. Modelling F2-layer Seasonal Trends and Day-to-day Variability Driven by Coupling with the Lower Atmosphere [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**: 1911–1931.
- [7] Beres J H, Garcia R R, Boville B A, et al. Implementation of a Gravity Wave Source Spectrum Parameterization Dependent on the Properties of Convection in the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, **110** (D10): 1187–1203.
- [8] 袁洪, 万卫星, 梁君. 中国中部地区 TID 激发源的统计分布 [J]. *地球物理学报*, 1997, **40** (2): 164–169.
- [9] 徐桂荣, 万卫星, 宁百齐. 对流层特大暴雨天气对电离层变化的影响 [J]. *空间科学学报*, 2005, **25**(2): 104–110.
- [10] 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统及其日变化特征 [J]. *科学通报*, 2008, **53**(4): 471–481.
- [11] 姚志刚, 赵增亮, 韩志刚. AIRS 观测的东亚夏季平流层重力波特征 [J]. *地球物理学报*, 2015, **58**(4): 1121–1134.
- [12] Hoffmann L, Xue X, Alexander M J. A Global View of Stratospheric Gravity Wave Hotspots Located with Atmospheric Infrared Sounder Observations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, **118**: 416–434.
- [13] Yue J, Vadas S L, She C Y, et al. Concentric Gravity Waves in Thermosphere Generated by Deep Convective Plumes in the Lower Atmosphere near Fort Collins, Colorado [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**: D06104.
- [14] Miller S D, Mills S P, Elvidge C D, et al. Suomi Satellite Brings to Light a Unique Frontier of Night-time Environmental Sensing Capabilities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of*

- the United States of America*, 2012, **109**: 39.
- [15] Smith S M, Mendillo M, Baumgardner J, et al. Mesospheric Gravity Wave Imaging at a Subauroral Site: First Results from Millstone Hill [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 27119–27130.
- [16] Azeem I, Yue J, Hoffmann L, et al. Multisensor Profiling of a Concentric Gravity Wave Event Propagating from the Troposphere to the Ionosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, **42** (19): 7874–7880.
- [17] Xu J Y, Li Q Z, Yue J, et al. Concentric Gravity Waves over Northern China Observed by an Airglow Imager Network and Satellites [J]. *J. Geophys. Res.*, 2015, **120**: 11058–11078.
- [18] Gong J, Wu D L, Eckermann S D. Gravity Waves Variances and Propagation Derived from AIRS Radiances [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, **12**: 1701–1720.
- [19] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 253–264.
- [20] Riwal P, Zhang F. Internal Gravity Waves from Atmospheric Jets and Fronts [J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, **52**(1): 33–76.
- [21] 徐凯, 姚志刚, 韩志刚, 等. 临近空间重力波强扰动的卫星观测研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2017, **32**(1): 66–74.
- [22] 郑蕾, 郭维, 邹雨霏. 2010 年 7 月 20 日吉林省暴雨天气分析 [C]. *沈阳雨雪冰冻*, 2012.

(上接第 35 页)

- [16] 田璐, 周庆莉, 金彬, 等. 润滑油的太赫兹波段光学与光谱特性研究 [J]. *中国科学(G 辑: 物理学 力学 天文学)*, 2009(11): 1589–1593.
- [17] Gorenflo S, Tauer U, Hinkov I, I Hinkov, e al. Dielectric Properties of Oil-Water Complexes Using Terahertz Transmission Spectroscopy [J]. *Chem Phys Lett*, 2006, **421**(4-6): 494–498.
- [18] 高磊, 于宪书, 赵丽君, 等. 太赫兹光谱测量中用于放置温度可控液体样品的装置: 中国, CN204269534U [P]. 2015-04-15.
- [19] 牧凯军, 张振伟, 张存林. 太赫兹科学与技术 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2009, **4**(03): 221–230.
- [20] 宝日玛, 赵昆, 田璐, 等. 汽油的太赫兹时域光谱特性研究 [J]. *中国科学(G 辑: 物理学)*, 2010(08): 950–954.
- [21] Ikeda T, Matsushita A, Tatsuno M, et al. Investigation of Inflammable Liquids by Terahertz Spectroscopy [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **87**(3): 1034–1053.
- [22] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用 [J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2010, **22**(06): 703–707.
- [23] 张兴宁, 陈稷, 周泽魁. 太赫兹时域光谱技术 [J]. *激光与光电子学进展*. 2005, **42**(07): 35–38.
- [24] 刘畅, 王新柯, 孙文峰, 等. 非极性有机溶剂光学参数的太赫兹波精确测量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(11): 2886–2890.
- [25] Pearce J, Mittleman D M. Propagation of Single-cycle Terahertz Pulses in Random Media [J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(24): 2002–2004.