

# 不同途径获得的大气重力波参数扰动场特征对比分析

程胡华<sup>1</sup> 鞠永茂<sup>2</sup> 王益柏<sup>2</sup> 赵亮<sup>3\*</sup>

(1 解放军 63729 部队,太原 030027; 2 解放军 61741 部队,北京 100094; 3 中国科学院大气物理研究所  
大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG),北京 100029)

**摘要** 重力波参数气候特征是确定全球大气模式中重力波参数化方案的一个重要环节,利用高垂直分辨率探空资料扰动场是获取重力波参数气候特征的基础数据和重要手段。目前,通常采用 2~4 阶曲线拟合、带通滤波方法获取高垂直分辨率探空资料扰动场,但针对不同方法之间的扰动场差异特征研究较少,本文利用 2~4 阶曲线拟合、带通滤波方法(0.5~5.0 km)获取 2014—2017 年太原地区(112.55°E,37.78°N)高垂直分辨率探空资料扰动场,采用相关系数、Lomb-Scargle、不同区间范围占有率方法进行研究,结果表明:①不同方法之间的纬向风扰动场、经向风扰动场、温度扰动场均存在较明显差异,且相关性均较弱;②Lomb-Scargle 分析表明,不同方法得到的平均纬向风扰动场、平均经向风扰动场、平均温度扰动场显著含有(通过 90%置信检验)的垂直波长均存在明显差异;③不同方法得到的纬向风扰动场、经向风扰动场、温度扰动场显著含有的垂直波长,在不同区间范围内的占有率均存在明显差异。

**关键词** 大气重力波参数;扰动场;Lomb-Scargle;气候特征

**中图分类号:** P432 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190396 **文献标识码:** A

## 引言

大气重力波是大气的主要波动之一,与多种不同尺度天气现象均有密切联系,其对全球大气的动力、热力结构变化及调整具有重大影响<sup>[1-2]</sup>。国内外研究均表明,大气重力波的发生和传播对台风<sup>[3-5]</sup>、降雨<sup>[6-9]</sup>、冰雹<sup>[10]</sup>等其它天气现象<sup>[11-15]</sup>的产生和发展具有重大影响,因此,为提高大气模式对台风、暴雨、冰雹等天气现象的预报能力,需要在全局大气模式中使用重力波参数化的方法加入重力波影响,通过利用高垂直分辨率探空资料获取全球范围内大气重力波参数气候及其分布特征,已成为研制大气模式中重力波参数化方案的重要前提条件之一<sup>[16-17]</sup>。

20 世纪 80 年代,科学家们使用无线电探空资料中的温度廓线研究重力波能量及谱斜率<sup>[18]</sup>,之后,文献<sup>[19]~[21]</sup>利用风场、温度场廓线计算重力

波参数;经过不断的完善<sup>[22-23]</sup>,形成了依据风场和温度场廓线计算重力波参数的一套完整方法,该方法已被认可并广泛应用<sup>[24-40]</sup>;在利用此方案获取大气重力波参数之前,首先需获取温度扰动场、纬向风扰动场和经向风扰动场,目前,2 阶曲线拟合<sup>[26-27,31,34-36,38-40]</sup>、3 阶曲线拟合<sup>[32]</sup>、4 阶曲线拟合<sup>[25,33]</sup>和带通滤波<sup>[24,28-30,37]</sup>是获取扰动场的常用方法,例如,Guest 等<sup>[25]</sup>利用四阶曲线拟合方法得到的扰动场获取麦夸里岛下层平流层重力波参数,并对重力波参数的季节变化及波源特征进行研究;Yamamori 和 Sato<sup>[30]</sup>利用带通滤波方法(0.5~5 km)得到的扰动场,对亚热带、温带地区对流层上层和下平流层重力波传播性质及其参数特征进行了相关研究;Ki 和 Chun<sup>[32]</sup>基于韩国 10 个台站高垂直分辨率探空资料,通过 3 阶曲线拟合方法扰动场获取下层平流层大气重力波参数,并对重力波源及其特征进行研究;白志宣等<sup>[34]</sup>利用 2 阶曲线拟合方法得

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA17010105)和国家自然科学基金项目(42075040)资助

作者简介:程胡华,男,1983年生,工程师,主要从事天气预报、空间环境研究,Email:397849854@qq.com

收稿日期:2019年9月4日;定稿日期:2020年6月8日

\* 通信作者,Email:zhaol@lasg.iap.ac.cn

到中国地区南北向 8 个站点两年多高垂直分辨率无线电探空资料下平流层扰动场,基于该扰动场获取下平流层惯性重力波,并对该重力波活动的季节变化及其随纬度分布特征进行研究。

目前,未见大量观测资料或实验方法证实哪种方法扰动场获取的重力波参数气候特征与实况基本一致,且针对不同方法(2~4 阶曲线拟合、带通滤波(0.5~5.0 km))获取高垂直分辨率探空资料扰动场之间的差异特征研究较少,程国华<sup>[41]</sup>以 2013 年 8 月 6—8 日晋西北地区出现的一次雷阵雨天气过程为例,利用 2~4 阶曲线拟合、带通滤波(0.5~5.0 km)方法获取高垂直分辨率探空资料扰动场,发现不同方法之间的扰动场垂直廓线存在一定差异,导致不同方法扰动场对所获取大气重力波参数的大小及变化趋势存在影响,但对不同重力波参数的影响程度不同,该研究使用样本数偏少。本文利用 2~4 阶曲线拟合、带通滤波(0.5~5.0 km)方法获取 2014—2017 年太原地区(112.55°E, 37.78°N)高垂直分辨率探空资料扰动场,主要研究:①不同方法之间的平均扰动场垂直廓线差异特征;②不同方法之间的扰动场相关性分布特征;③利用 Lomb-Scargle 对不同方法平均扰动场进行波谱特征分析;④研究不同方法扰动场含有显著垂直波长在不同区间范围内的占有率分布特征。通过本研究,一方面有利于了解不同方法获取的扰动场存在差异,且该差异会对计算得到的重力波参数气候特征具有重大影响,若不能获取准确的重力波参数气候及分布特征,将会影响到大气模式中重力波参数化方案效果,不利于提高大气模式对台风、暴雨等天气现象的模拟、预报能力。

## 1 资料与方法

本研究所用资料为山西省太原气象台(112.55°E, 37.78°N)提供的 2014 年 1 月至 2017 年 12 月高垂直分辨率探空资料,由于原始资料的垂直间隔不等,本文利用 3 次样条插值方法得到垂直分辨率为 50 m 的气象要素值(温度、经向风和纬向风);由于对流层与下平流层之间的大气浮力频率差异较大,并且为了避开对流层顶的极低温度和对流层上部纬向风急流的影响,利用 2~4 阶曲线拟合、带通滤波(0.5~5.0 km)获取下平流层(17~24 km)背景场廓线( $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{T}$ )及其扰动场廓线( $u'$ 、 $v'$ 、 $T'$ )。

在计算不同方法之间的扰动场相关性时,考虑获取大气重力波参数的最近研究成果大多采用 2 阶曲线拟合方法扰动场<sup>[38-40]</sup>,且文献[41]研究发现利用 2 阶曲线拟合方法扰动场获取大气重力波参数演变特征与 2013 年 8 月 6—8 日的大气动力演变特征基本吻合,故以 2 阶曲线拟合方法扰动场为基准,统计 3 阶、4 阶曲线拟合、带通滤波(0.5~5.0 km)方法扰动场与其之间相关系数,并对相关系数值在不同区间范围内的占有率进行分析;Lomb-Scargle 谱方法<sup>[42-43]</sup>分析序列数据中的频谱分布特征具有独特的优势,一方面其可以给出分辨率比  $1/T$  ( $T$  为序列数据的跨度)更精细的功率谱,另一方面可以对不均匀采样数据进行直接处理,最大程度地给出原数据的谱信息,因此该方法的应用十分广泛<sup>[44-45]</sup>,文献[46]利用 Lomb-Scargle 谱方法对探空资料扰动场处理分析,并获取大气重力波垂直波长;本文同样利用 Lomb-Scargle 方法分析不同方法平均扰动场显著含有的垂直波长特征,并统计不同方法扰动场显著含有垂直波长在不同区间范围内的占有率分布特征。

## 2 平均扰动场差异特征

记符号 Rank2、Rank3、Rank4 分别表示利用 2 阶、3 阶、4 阶曲线拟合方法获取扰动场,符号 BF 表示利用带通滤波(Band-pass Filter)(0.5~5.0 km)方法获取扰动场,符号 Upert、Vpert、Tpert 分别表示纬向风扰动场、经向风扰动场、温度扰动场;它们之间的符号组合表示基于某种方法获取某物理量的扰动场,组合符号的意义为自左向右的顺序,例如,Rank2Upert、Rank3Upert、Rank4Upert、BFUpert 分别表示利用 2 阶、3 阶、4 阶曲线拟合、带通滤波方法获取的纬向风扰动场,Rank2Vpert、Rank3Vpert、Rank4Vpert、BFVpert 为相应的经向风扰动场,Rank2Tpert、Rank3Tpert、Rank4Tpert、BFTpert 为相应的温度扰动场。

在 2014—2017 年太原地区下平流层(17~24 km),不同方法得到的平均纬向风扰动场、平均经向风扰动场、平均温度扰动场随高度变化特征如图 1 所示,从该图可看出,不同方法对平均扰动场的值变化特征、及随高度变化趋势均具有较明显影响,虽然 2~4 阶曲线拟合、带通滤波方法的纬向风扰动场随高度变化趋势较一致,随高度增加均呈现正、负交替

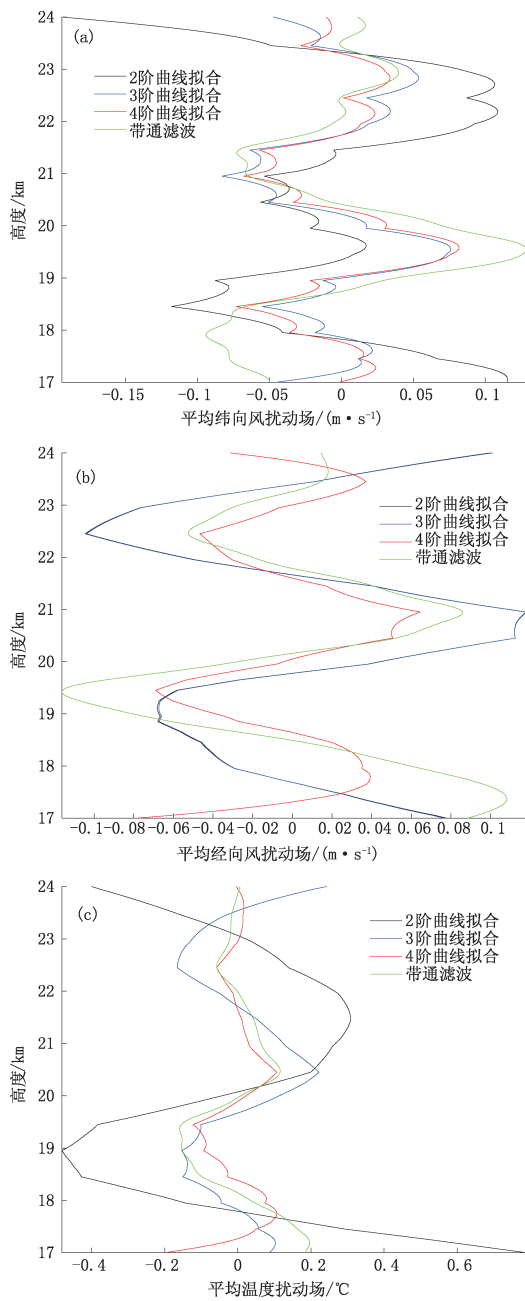


图 1 2014—2017 年太原地区下平流层(17~24 km), 不同方法的平均纬向风扰动场(a)、平均经向风扰动场(b)和平均温度扰动场(c)垂直廓线

变化特征,且极大值、极小值均位于相似的高度层,但它们之间的振幅存在一定差异(图 1a),图 1a 中的 Rank2Upert、Rank3Upert、Rank4Upert、BFUpert 值范围分别为  $-0.1943 \text{ m/s}(24.00 \text{ km}) \sim 0.1157 \text{ m/s}(17.00 \text{ km})$ 、 $-0.0830 \text{ m/s}(20.95 \text{ km}) \sim 0.0762 \text{ m/s}(19.55 \text{ km})$ 、 $-0.0732 \text{ m/s}(18.45 \text{ km}) \sim 0.0818 \text{ m/s}(19.60 \text{ km})$ 、 $-0.0943 \text{ m/s}(17.90 \text{ km}) \sim$

$0.1286 \text{ m/s}(19.55 \text{ km})$ ;在下平流层(17~24 km),类似平均纬向风扰动场特征,Rank2Vpert、Rank3Vpert、Rank4Vpert 及 BFVpert 随高度变化特征趋势基本一致,同样随高度增加呈现正、负交替变化,且在高度 18.5~23.00 km 范围内的极大值、极小值出现在相似的高度层,但在其它高度范围内则存在差异(图 1b),从图 1b 还可看出,Rank2Vpert 与 Rank3Vpert 基本重合,但在高度 17~18 km、23.00~24.00 km,均与 Rank4Vpert、BFVpert 随高度变化特征存在明显差异,在图 1(b)中,不同方法获取的平均经向风扰动场振幅同样存在差异,其中,Rank2Vpert、Rank3Vpert、Rank4Vpert、BFVpert 值范围分别为  $-0.1040 \text{ m/s}(22.45 \text{ km}) \sim 0.1181 \text{ m/s}(20.95 \text{ km})$ 、 $-0.1046 \text{ m/s}(22.45 \text{ km}) \sim 0.1178 \text{ m/s}(20.95 \text{ km})$ 、 $-0.0782 \text{ m/s}(17.00 \text{ km}) \sim 0.0644 \text{ m/s}(20.95 \text{ km})$ 、 $-0.1163 \text{ m/s}(19.40 \text{ km}) \sim 0.1082 \text{ m/s}(17.35 \text{ km})$ ,与平均经向风扰动场特征不同,虽然 Rank3Tpert、Rank4Tpert 与 BFTpert 随高度变化趋势比较一致,但均与 Rank2Tpert 存在较明显差异(图 1c),在整个高度范围内,Rank2Tpert、Rank3Tpert、Rank4Tpert、BFTpert 的值范围分别为  $-0.4815 \text{ }^\circ\text{C}(18.95 \text{ km}) \sim 0.7896 \text{ }^\circ\text{C}(17.00 \text{ km})$ 、 $-0.1660 \text{ }^\circ\text{C}(22.45 \text{ km}) \sim 0.2428 \text{ }^\circ\text{C}(24.00 \text{ km})$ 、 $-0.2004 \text{ }^\circ\text{C}(17.00 \text{ km}) \sim 0.1070 \text{ }^\circ\text{C}(20.45 \text{ km})$ 、 $-0.1593 \text{ }^\circ\text{C}(19.35 \text{ km}) \sim 0.1965 \text{ }^\circ\text{C}(17.20 \text{ km})$ 。

3~4 阶曲线拟合、带通滤波与 2 阶曲线拟合之间的纬向风扰动场相关系数、经向风扰动场相关系数、温度扰动场相关系数在不同区间范围的占有率分布特征如图 2 所示。3~4 阶曲线拟合、带通滤波方法纬向风扰动场相关系数在不同区间范围内的占有率存在明显差异,且沿横坐标轴方向的变化趋势不同,其占有率最大值也位于不同区间范围(图 2a),分别位于  $(0.9, 1.0]$ 、 $(0.5, 0.6]$ 、 $(0.8, 0.9]$  区间范围,对应的占有率分别为 45.4615%、16.5385%、29.7692%,相关系数值大于 0.8 的占有率分别为 62.5384%、27.3846%、58.6923%,而相关系数值不超过 0.5 的占有率分别为 5.3077%、22.3077%、8.8462%。不同方法经向风扰动场相关系数在不同区间范围内的占有率分布特征,与纬向风扰动场相关系数类似,即不同区间范围内的占有率分布特征、沿横坐标轴方向的变化趋势、以及占有率最大值位于的区间范围均存在较明显差异(图 2b),在图 2b 中,

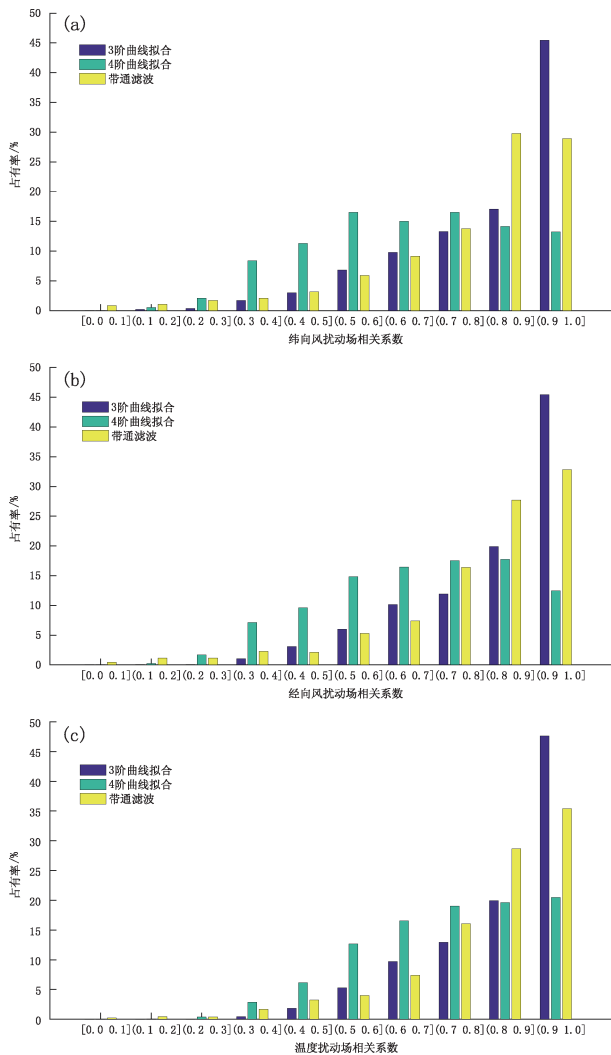


图 2 2014—2017 年太原地区下平流层(17~24 km), 3~4 阶曲线拟合、带通滤波与 2 阶曲线拟合方法之间的纬向风扰动场相关系数(a)、经向风扰动场相关系数(b)和温度扰动场相关系数(c)在不同区间范围内占有率

3~4 阶曲线拟合、带通滤波方法经向风扰动场相关系数占有率最大值分别位于(0.9, 1.0]、(0.8, 0.9]、(0.9, 1.0]区间范围, 对应的值分别为 45.4615%、17.7692%、32.8462%, 相关系数值大于 0.8 的占有率分别为 65.3846%、30.2307%、60.5385%, 而相关系数值不超过 0.5 的占有率分别为 4.3077%、18.6923%、7.2308%。类似纬向风扰动场相关系数、经向风扰动场相关系数, 不同方法温度扰动场相关系数之间同样存在较明显差异(图 2c), 3~4 阶曲线拟合、带通滤波方法温度扰动场相关系数的占有率最大值均位于(0.9, 1.0]区间, 分别为 47.6154%、20.4615%、35.3846%, 相关系数值大于

0.8 的占有率分别为 67.5385%、40.0769%、64.0769%, 而相关系数值不超过 0.5 的占有率分别为 2.3077%、9.4615%、6.000%。

### 3 Lomb-Scargle 谱分析

#### 3.1 平均垂直波长特征

对于 2014—2017 年太原地区下平流层(17~24 km), 利用 Lomb-Scargle 方法获取不同方法平均纬向风扰动场、平均经向风扰动场、平均温度扰动场的波谱结果如图 3 所示, 图中的虚线为 90% 置信线, 从该图可看出, 不同方法平均纬向风扰动场、平均经向风扰动场、平均温度扰动场最大功率谱所对应的垂直波数存在较明显差异(即垂直波长不同), 对于平均纬向风扰动场波谱特征(图 3a), 2 阶曲线拟合方法平均纬向风扰动场除了显著含有两个较接近的最大功率谱值外(分别为 35.6053、37.6144  $\text{m}^2/\text{s}$ , 对应的垂直波数分别为 0.1772、0.3901), 还在垂直波数为 0.5674 时显著通过了 90% 置信检验, 因此, 可判断不是单频波, 不满足利用线性重力波理论进行求解相关大气重力波参数的条件, 但其他方法平均纬向风扰动场均为明显的单频波, 可以利用线性重力波理论获取相关的大气重力波参数。在图 3a 中, 2~4 阶曲线拟合、带通滤波方法平均纬向风扰动场的最大功率谱值分别为 37.6144、46.9576、51.2640、56.3693  $\text{m}^2/\text{s}$ , 垂直波数分别为 0.3901、0.3191、0.3546、0.2837, 即垂直波长分别为 2.5636、3.1333、2.8200、3.5250 km。不同方法平均经向风扰动场功率谱均为单频波, 且 2 阶曲线拟合与 3 阶曲线拟合方法平均经向风扰动场功率谱基本重合, 但与 4 阶曲线拟合方法平均经向风扰动场的功率谱特征存在差异(图 3b), 在图 3b 中, 2~4 阶曲线拟合、带通滤波方法平均经向风扰动场的最大功率谱值分别为 61.9035、61.8066、56.5990、60.4540, 垂直波数分别为 0.2837、0.2837、0.3546、0.2837, 即垂直波长分别为 3.5250、3.5250、2.8200、3.5250 km。对于平均温度扰动场功率谱特征, 与 3 阶、4 阶曲线拟合及带通滤波不同, 2 阶曲线拟合方法平均温度扰动场显著含有两个功率谱值(即通过 90% 置信检验)(图 3c), 功率谱值分别为 58.2574、10.4901  $\text{m}^2/\text{s}$ , 垂直波数分别为 0.2128、0.3901, 2~4 阶曲线拟合、带通滤波方法平均温度扰动场最大功率谱值分别为 58.2574、62.6521、42.6758、53.1912  $\text{m}^2/\text{s}$ , 垂直波

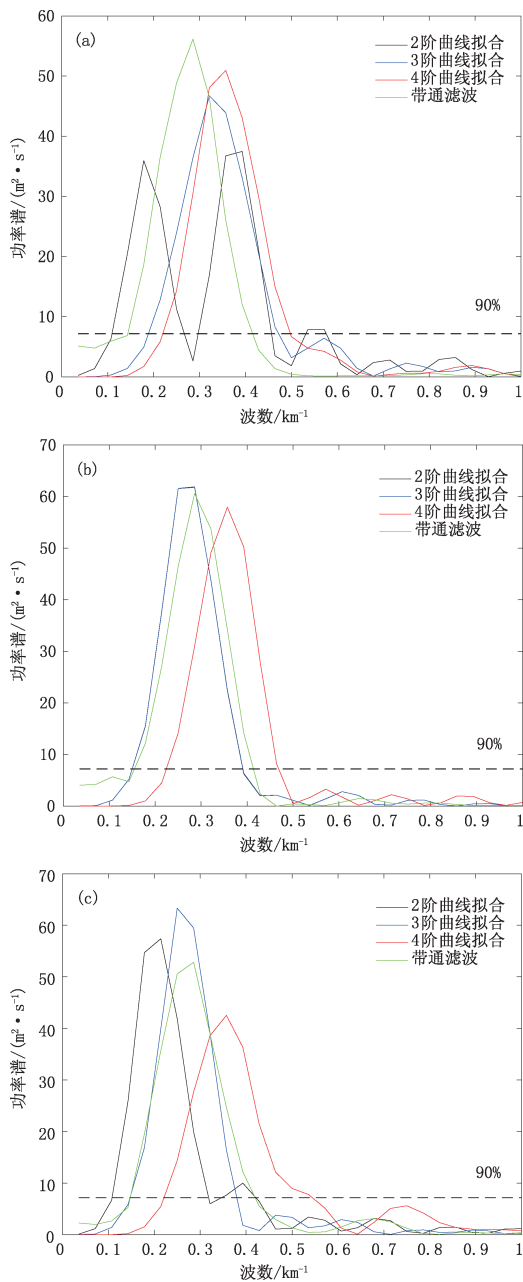


图 3 2014—2017 年太原地区下平流层(17~24 km), 2~4 阶曲线拟合、带通滤波方法平均纬向风扰动场(a), 平均经向风扰动场(b)和平均温度扰动场(c)的 Lomb-Scargle 谱

数分别为 0.2128、0.2482、0.3546、0.2837, 即垂直波长分别为 4.7000、4.0286、2.8200、3.5250 km。

### 3.2 垂直波长统计特征

记符号  $L_z$  表示垂直波长, 通过与其他符号组合表示基于不同方法得到不同物理量扰动场中显著含有的垂直波长, 组合符号的意义为自左向右的顺序, 例如, 符号 Rank2Upert $L_z$ 、Rank3Upert $L_z$ 、Rank4Upert $L_z$ 、BFUpert $L_z$  分别表示基于 2 阶、3

阶、4 阶曲线拟合、带通滤波方法得到纬向风扰动场中显著含有的垂直波长, Rank2Vpert $L_z$ 、Rank3Vpert $L_z$ 、Rank4Vpert $L_z$ 、BFVpert $L_z$  为相应经向风扰动场显著含有的垂直波长, Rank2Tpert $L_z$ 、Rank3Tpert $L_z$ 、Rank4Tpert $L_z$ 、BFTpert $L_z$  为相应温度扰动场显著含有的垂直波长。

利用 Lomb-Scargle 方法对不同方法纬向风扰动场、经向风扰动场、温度扰动场进行分析, 得到最大功率谱对应垂直波长在不同区间范围内的占有率分布特征如图 4 所示, 从该图可看出, 纬向风扰动场、经向风扰动场、温度扰动场显著含有垂直波长特征与所使用方法密切相关, 虽然 2 阶、3 阶曲线拟合方法平均经向风扰动场垂直廓线及 Lomb-Scargle 方法得到的波谱特征均基本一致(图 1b、3b), 但其

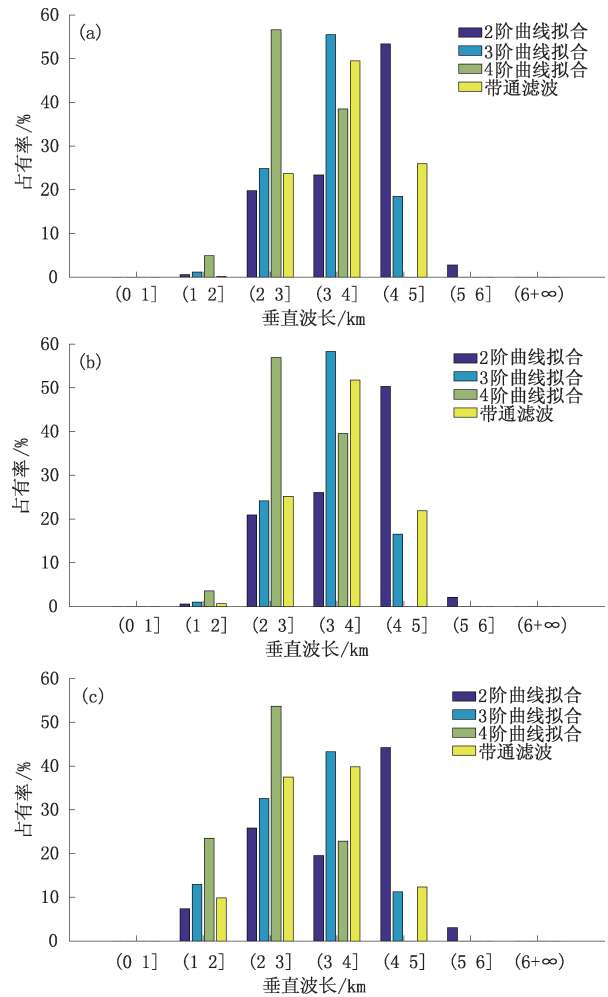


图 4 2014—2017 年太原地区下平流层(17~24 km), 2~4 阶曲线拟合、带通滤波方法纬向风扰动场(a), 经向风扰动场(b)和温度扰动场(c)显著含有垂直波长在不同区间范围内的占有率

间相关系数(图 2b)、及显著含有垂直波长在不同区间范围内的分布特征存在明显差异(图 4b)。Rank2UpertLz、Rank3UpertLz、Rank4UpertLz、BFUpertLz 在不同区间范围内的占有率分布特征存在较明显差异(图 4a),分别在(4,5]、(3,4]、(2,3]、(3,4]区间的占有率最大,占有率分别为 53.3438%、55.4681%、56.5696%、49.8361%;次大值分别位于(3,4]、(2,3]、(3,4]、(4,5]区间,分别为 23.3674%、24.8623%、38.4736%、26.1475%;而在(0,1]、(6,+∞)区间,占有率均为 0;在(5,6]区间,Rank3UpertLz、Rank4UpertLz、BFUpertLz 的占有率均为 0,而对应的 Rank2UpertLz 为 2.8324%;在(4,5]区间,Rank4UpertLz 占有率为 0,而对应的 Rank2UpertLz、Rank3UpertLz、BFUpertLz 分别为 53.3438%、18.4894%、26.1475%。类似不同方法纬向风扰动场显著含有的垂直波长分布特征,Rank2VpertLz、Rank3VpertLz、Rank4VpertLz、BFVpertLz 在不同区间范围内的占有率分布特征同样存在较明显差异(图 4b),类似图 4a,图 4b 中的 Rank2VpertLz、Rank3VpertLz、Rank4VpertLz、BFVpertLz 占有率最大值位于不同区间,分别位于(4,5]、(3,4]、(2,3]、(3,4]区间,占有率分别为 50.3541%、58.3006%、56.8843%、52.0458%;次大值同样位于不同区间,分别位于(3,4]、(2,3]、(3,4]、(2,3],占有率分别为 26.0425%、24.1542%、39.5751%、25.2864%;在(0,1]、(6,+∞)区间,Rank2VpertLz、Rank3VpertLz、Rank4VpertLz、BFVpertLz 占有率均为 0,在(5,6]区间,

Rank3VpertLz、Rank4VpertLz、BFVpertLz 占有率为 0,而相应的 Rank2VpertLz 为 2.1243%;在(4,5]区间,Rank4VpertLz 占有率为 0,而相应的 Rank2VpertLz、Rank3VpertLz、BFVpertLz 分别为 50.3541%、16.5224%、22.0131%。类似不同方法纬向风扰动场、经向风扰动场显著含有的垂直波长分布特征,Rank2TpertLz、Rank3TpertLz、Rank4TpertLz、BFTpertLz 在不同区间内的占有率分布特征同样存在较明显差异(图 4c),且其占有率最大值位于不同区间,分别位于(4,5]、(3,4]、(2,3]、(3,4]区间,占有率分别为 44.2172%、43.2730%、53.6585%、40.0164%;次大值同样位于不同区间范围,分别位于(2,3]、(2,3]、(1,2]、(2,3]区间,占有率分别为 25.8065%、32.5728%、23.5248%、37.6432%;类似图 4a、4b,Rank2TpertLz、Rank3TpertLz、Rank4TpertLz、BFTpertLz 在(0,1]、(6,+∞)区间的占有率值均为 0,在(5,6]区间,Rank3TpertLz、Rank4TpertLz、BFTpertLz 占有率均为 0,相应的 Rank2TpertLz 为 3.0685%;在(4,5]区间,Rank4TpertLz 占有率 0,相应的 Rank2TpertLz、Rank3TpertLz、BFTpertLz 分别为 44.2172%、11.2510%、12.4386%。

在 2014—2017 年太原地区下平流层(17~24 km),3~4 阶曲线拟合、带通滤波方法扰动场与 2 阶曲线拟合方法扰动场显著含有垂直波长的统计特征结果参见表 1,从该表可明显看出,不同方法扰动场显著含有的垂直波长存在较明显差异、且相关性较弱。

表 1 3~4 阶曲线拟合、带通滤波方法扰动场与 2 阶曲线拟合方法扰动场显著含有垂直波长的统计特征

|         | 温度扰动场   |          |        | 纬向风扰动场                  |                          |        | 经向风扰动场                  |                          |        |
|---------|---------|----------|--------|-------------------------|--------------------------|--------|-------------------------|--------------------------|--------|
|         | 偏差<br>℃ | 绝对差<br>℃ | 相关系数   | 偏差<br>m·s <sup>-1</sup> | 绝对差<br>m·s <sup>-1</sup> | 相关系数   | 偏差<br>m·s <sup>-1</sup> | 绝对差<br>m·s <sup>-1</sup> | 相关系数   |
| 3 阶曲线拟合 | -0.6482 | 0.7178   | 0.3835 | -0.5529                 | 0.6183                   | 0.3148 | -0.5183                 | 0.6024                   | 0.3097 |
| 4 阶曲线拟合 | -1.0894 | 1.1421   | 0.1199 | -1.0083                 | 1.0498                   | 0.0318 | -0.9504                 | 0.9993                   | 0.0441 |
| 带通滤波    | -0.5928 | 0.8374   | 0.2511 | -0.3832                 | 0.6587                   | 0.2652 | -0.4036                 | 0.6286                   | 0.2838 |

#### 4 结论与讨论

大气重力波对全球大气的动力、热力等变化具有重要影响,并与多种不同尺度天气现象密切相关,为使大气模式的预报能力更强,需通过重力波参数

化方案引入重力波的影响;确定重力波参数气候特征是研制全球大气环流模式中重力波参数化的一个重要前提条件,这些参数的选取需要根据观测资料来确定。目前,国内外常采用 2~4 阶、带通滤波方法获取高垂直分辨率探空资料扰动场来计算得到大

气重力波参数,并分析大气重力波参数的气候统计特征,因此,扰动场是影响大气重力波参数气候特征的基础数据及重要因素。本文利用2~4阶曲线拟合、带通滤波方法获取2014—2017年太原地区高垂直分辨率探空资料的纬向风扰动场、经向风扰动场、温度扰动场,针对不同方法扰动场之间存在的差异特征,以及扰动场中显著含有的垂直波长分布特征进行了统计研究,得到的主要结论如下:

(1)2~4阶曲线拟合、带通滤波方法对高垂直分辨率探空资料扰动场的值变化范围、及随高度变化趋势均具有明显影响;其中,2~4阶曲线拟合、带通滤波方法平均纬向风扰动场值范围分别为 $-0.1943\text{ m/s}(24.00\text{ km})\sim 0.1157\text{ m/s}(17.00\text{ km})$ 、 $-0.0830\text{ m/s}(20.95\text{ km})\sim 0.0762\text{ m/s}(19.55\text{ km})$ 、 $-0.0732\text{ m/s}(18.45\text{ km})\sim 0.0818\text{ m/s}(19.60\text{ km})$ 、 $-0.0943\text{ m/s}(17.90\text{ km})\sim 0.1286\text{ m/s}(19.55\text{ km})$ ,相应的平均经向风扰动场值范围分别为 $-0.1040\text{ m/s}(22.45\text{ km})\sim 0.1181\text{ m/s}(20.95\text{ km})$ 、 $-0.1046\text{ m/s}(22.45\text{ km})\sim 0.1178\text{ m/s}(20.95\text{ km})$ 、 $-0.0782\text{ m/s}(17.00\text{ km})\sim 0.0644\text{ m/s}(20.95\text{ km})$ 、 $-0.1163\text{ m/s}(19.40\text{ km})\sim 0.1082\text{ m/s}(17.35\text{ km})$ ,相应的平均温度扰动场值范围分别为 $-0.4815\text{ }^\circ\text{C}(18.95\text{ km})\sim 0.7896\text{ }^\circ\text{C}(17.00\text{ km})$ 、 $-0.1660\text{ }^\circ\text{C}(22.45\text{ km})\sim 0.2428\text{ }^\circ\text{C}(24.00\text{ km})$ 、 $-0.2004\text{ }^\circ\text{C}(17.00\text{ km})\sim 0.1070\text{ }^\circ\text{C}(20.45\text{ km})$ 、 $-0.1593\text{ }^\circ\text{C}(19.35\text{ km})\sim 0.1965\text{ }^\circ\text{C}(17.20\text{ km})$ 。

(2)2~4阶曲线拟合、带通滤波方法获得的高垂直分辨率探空资料扰动场之间相关性较弱;3~4阶曲线拟合、带通滤波与2阶曲线拟合方法之间纬向风扰动场相关系数值大于0.8的占有率分别为62.5384%、27.3846%、58.6923%,经向风扰动场相关系数值大于0.8的占有率分别为65.3846%、30.2307%、60.5385%,温度扰动场相关系数值大于0.8的占有率分别为67.5385%、40.0769%、64.0769%。

(3)Lomb-Scargle谱分析结果表明,2~4阶曲线拟合、带通滤波方法获得的高垂直分辨率探空资料扰动场,其平均扰动场显著含有的垂直波长存在明显差异;其中,2~4阶曲线拟合、带通滤波方法平均纬向风扰动场显著含有最大功率谱值对应的垂直波长分别为3.5250 km、3.5250 km、2.8200 km、3.5250 km,相应的平均经向风扰动场分别为

2.5636 km、3.1333 km、2.8200 km、3.5250 km,相应的平均温度扰动场分别为2.5636 km、3.1333 km、2.8200 km、3.5250 km。

(4)Lomb-Scargle谱分析结果表明,2~4阶曲线拟合、带通滤波方法获得的高垂直分辨率探空资料扰动场,其显著含有垂直波长在不同区间范围内的占有率存在明显差异;其中,Rank2UpertLz、Rank3UpertLz、Rank4UpertLz、BFUpertLz分别在(4,5]、(3,4]、(2,3]、(3,4]区间范围内占有率最高,分别为53.3438%、55.4681%、56.5696%、49.8361%;Rank2VpertLz、Rank3VpertLz、Rank4VpertLz、BFVpertLz分别在(4,5]、(3,4]、(2,3]、(3,4]区间范围内占有率最高,分别为50.3541%、58.3006%、56.8843%、52.0458%;Rank2TpertLz、Rank3TpertLz、Rank4TpertLz、BFTpertLz分别在(4,5]、(3,4]、(2,3]、(3,4]区间范围内的占有率最高,分别为44.2172%、43.2730%、53.6585%、40.0164%。

通过上述分析可知,不同方法对扰动场值范围、随高度变化趋势以及显著含有的垂直波长均具有明显影响;Huang等<sup>[46]</sup>利用Lomb-Scargle谱方法对探空资料扰动场处理分析,并获取大气重力波垂直波长,再结合参考文献[26],[27],[31],[34]获取大气重力波参数的计算方法,可得到大气重力波其它参数值;由于不同方法获取高垂直分辨率探空资料扰动场存在差异,该差异会影响到大气重力波参数气候特征;而目前未见有大量观测资料或试验方法证实哪种方法扰动场获取的重力波参数气候特征与实况基本一致,因此,下一步拟在已有研究基础上,利用近几年高垂直分辨率探空资料,研究并统计不同方法扰动场对大气重力波参数的气候特征影响。

## 参考文献

- [1] Holton J R. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(10): 2497-2507.
- [2] Fritts D C, Alexander M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere [J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(1): 1003, doi:10.1029/2001RG000106.
- [3] 洪军,姚志刚,韩志刚,等. 台风“梅花”诱发平流层重力波的数值模拟与AIRS观测[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(7): 2283-2293.
- [4] 陈丹,陈泽宇,吕达仁. 台风“麦莎”(Matsa)诱发平流层重力波的数值模拟[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(12): 1786-1794.

- [5] Chen D, Chen Z Y, Lü D R. Spatiotemporal spectrum and momentum flux of the stratospheric gravity waves generated by a typhoon [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56: 54-62.
- [6] 刘蕾, 丁治英, 常赵, 等. WRF 中地形重力波参数化方案在一次华南暖区暴雨形成机制中的应用[J]. *气象科技*, 2012, 40(2): 232-240.
- [7] 程胡华. 晋西北地区一次雷阵雨天气过程中重力波参数演变特征[J]. *干旱气象*, 2016, 34(5): 811-819.
- [8] 王凌梓, 苗峻峰, 韩芙蓉. 近 10 年中国地区地形对降水影响研究进展[J]. *气象科技*, 2018, 46(1): 64-75.
- [9] 刘佳, 周秀美, 叶文群, 等. 溃变理论在滇东南暴雨预报中的应用[J]. *气象科技*, 2018, 46(4): 729-737.
- [10] 覃卫坚, 寿绍文, 高守亭, 等. 一次冰雹过程的惯性重力波观测及数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(5): 1039-1049.
- [11] Thomas L, Worthington R M, McDonald A J. Inertia-gravity waves in the troposphere and lower stratosphere associated with a jet stream exit region [J]. *Ann Geophysicae*, 1999, 17: 115-121.
- [12] 陈丹, 陈泽宇, 吕达仁. 与东北冷涡相伴的高空急流诱发平流层重力波的数值模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(1): 10-20.
- [13] Plougonven R W, Zhang F Q. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts [J]. *Rev Geophys*, 2014, 52: 33-76.
- [14] 周林, 黄超凡. 近 10 年晴空湍流的研究进展[J]. *气象科技*, 2015, 43(1): 91-96.
- [15] Kramer R, Wüst S, Schmidt C, et al. Gravity wave characteristics in the middle atmosphere during the CESAR campaign at Palma de Mallorca in 2011/2012: Impact of extratropical cyclones and cold fronts [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, 128: 8-23.
- [16] Yamamori M, Sato K. Characteristics of inertia gravity waves over the South Pacific as revealed by radiosonde observations [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111: D16110.
- [17] Zhang S D, Yi F, Huang C M, et al. Latitudinal and seasonal variations of lower atmospheric inertial gravity wave energy revealed by US radiosonde data [J]. *Ann Geophys*, 2010, 28: 1065-1074.
- [18] VanZandt T E. A universal spectrum of buoyancy waves in the atmosphere [J]. *Geophys Res Lett*, 1982, 9: 575-578.
- [19] Kitamura Y, Hirota I. Small-scale disturbances in the lower stratosphere revealed by daily rawinsonde observation [J]. *J Meteorol Soc Jpn*, 1989, 67: 817-831.
- [20] Hamilton K. Climatological statistics of stratospheric inertia-gravity waves deduced from historical rocketsonde wind and temperature data [J]. *J Geophys Res*, 1991, 96: 20831-20839.
- [21] Allen S J, Vincent R A. Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100: 1327-1350.
- [22] Eckermann S D. Hodographic analysis of gravity waves: Relationships among Stokes parameters, rotary spectra and cross-spectral methods [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101: 19169-19174.
- [23] Eckermann S D, Preusse P. Global measurements of stratospheric mountain waves from space [J]. *Science*, 1999, 286: 1534-1537.
- [24] Thomas L, Worthington R M, McDonald A J. Inertia-gravity waves in the troposphere and lower stratosphere associated with a jet stream exit region [J]. *Ann Geophysicae*, 1999, 17: 115-121.
- [25] Guest F M, Reeder M J, Marks C J, et al. Inertia-gravity waves observed in the lower stratosphere over Macquarie Island [J]. *J Atmos Sci*, 2000, 57: 737-752.
- [26] 卞建春, 陈洪滨, 吕达仁. 用垂直高分辨率探空资料分析北京上空下平流层重力波的统计特性[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(8): 748-756.
- [27] Zhang S D, Yi F. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30°N, 114°E) China [J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23: 665-673.
- [28] Hoffmann P, Serafimovich A, Peters D, et al. Inertia gravity waves in the upper troposphere during the MacWAVE winter campaign-Part I: Observations with collocated radars [J]. *Ann Geophys*, 2006, 24: 2851-2862.
- [29] Wang L, Fritts C, Williams B P, et al. Gravity waves in the middle atmosphere during the MacWAVE winter campaign: evidence of mountain wave critical level encounters [J]. *Ann Geophys*, 2006, 24: 1209-1226.
- [30] Yamamori M, Sato K. Characteristics of inertia gravity waves over the South Pacific as revealed by radiosonde observations [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111: D16110.
- [31] Zhang S D, Yi F. Latitudinal and seasonal variations of inertial gravity wave activity in the lower atmosphere over central China [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: D05109.
- [32] Ki M O, Chun H Y. Characteristics and sources of inertia-gravity waves revealed in the KEOP-2007 radiosonde data [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 46(3): 261-277.
- [33] 张灵杰, 林永辉. 青藏高原红原站平流层下部重力波观测特征分析[J]. *气象科技*, 2011, 39(6): 768-771.
- [34] 白志宣, 卞建春, 陈洪滨, 等. 中国地区下平流层惯性重力波参数分布特征的资料分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46: 1645-1657.
- [35] Kafando P, Chane-Ming F, Petitdidier M. Stratospheric variability of wave activity and parameters in equatorial coastal and tropical sites during the West African monsoon [J]. *Clim Dyn*, 2016, 47: 3433-3456.
- [36] Marlton G J, Williams P D, Nicoll K A. On the detection and attribution of gravity waves generated by the 20 March 2015 solar eclipse [J]. *Phil Trans R Soc*, 2016, A374: 20150222.
- [37] 程胡华. 晋西北地区一次雷阵雨天气过程中重力波参数演变特征[J]. *干旱气象*, 2016, 34(5): 811-819.
- [38] Bai Z X, Bian J C, Chen H B, et al. Inertial gravity wave parameters for the lower stratosphere from radiosonde data over China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60: 328-340.
- [39] Chen L, Bian J C, Liu Y, et al. Statistical analysis of inertial gravity wave parameters in the lower stratosphere over Northern China [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(1): 563-575.
- [40] Jackson D R, Gadian A, Hindley N P, et al. A means for im-



- proved analysis of gravity waves and low-level wind impacts generated from mountainous islands [J]. *American Meteorological Society*, 2018, 99: 1027-1049.
- [41] 程胡华. 不同扰动场对大气重力波参数结果影响的初步探讨[J]. *大气科学学报*, 2017, 40(3): 401-411.
- [42] Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data [J]. *AP Space Sci*, 1976, 39(2): 447-462.
- [43] Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data [J]. *Astrophys J*, 1982, 263(2): 835-853.
- [44] Yi F. Short-term variability and temporary structures of tides and mean wind in the polar summer mesosphere [J]. *J Atmos Solar Terr Phys*, 2001, 63: 749-757.
- [45] 丁楠,张皓晶,张雄. 蝎虎天体 OJ287 中等时标光变的周期性研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(13): 139801.
- [46] Huang K M, Yang Z X, Wang R, et al. A statistical study of inertia gravity waves in the lower stratosphere over the arctic region based on radiosonde observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(10): 4958-4976.

## Characteristic Comparison of Perturbation Fields with Different Methods for Obtaining Atmospheric Gravity Wave Parameters

CHENG Huhua<sup>1</sup> JU Yongmao<sup>2</sup> WANG Yibai<sup>2</sup> ZHAO Liang<sup>3</sup>

(1 Unit 63729 of PLA, Taiyuan 030027; 2 Unit 61741 of PLA, Beijing 100094;

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmosphere Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract:** Studying the climatic characteristics of gravity wave parameters constitutes an important part of the parameterization of gravity waves in the development of a global atmospheric model. The disturbance fields obtained by using the high-resolution radiosonde data are the basic data and important means to obtain the climate characteristics of gravity wave parameters. At present, the 2 to 4 order curve fitting and band-pass filtering methods are used to obtain the disturbance fields of high vertical resolution radiosonde data. However, there are few studies on the differences in the characteristics of disturbance fields resulted from different methods. In the paper, the disturbance fields of the high vertical resolution radiosonde data in Taiyuan (112.55°E, 37.78°N) from 2014 to 2017 are obtained by the 2 to 4 order curve fitting and bandpass filtering methods (0.5 to 5.0 km), subsequently, studied by correlation coefficient, Lomb-Scargle, and different interval range occupancy methods. The results show: (1) the disturbance fields from different-order curve fitting methods show different amplitudes, different trends with height, and weak correlation; (2) the Lomb-Scargle analysis shows that the significant vertical wavelengths (passed the 90% confidence test) are contained in the average zonal wind disturbance fields, the average meridional wind disturbance fields and the average temperature disturbance fields from different methods, and there are significant differences; (3) the significant vertical wavelengths are contained in the zonal wind disturbance fields, meridional wind disturbance fields and temperature disturbance fields from different methods, and there are significant differences in their occupancy rate within different intervals.

**Keywords:** atmospheric gravity wave parameter; disturbance field; Lomb-Scargle method; climate characteristic