

不同扰动场对大气重力波参数结果影响的初步探讨

程胡华*

太原卫星发射中心 气象室,山西 岢岚 036301

* 联系人, E-mail: chenghongxi2012@qq.com

2016-05-04 收稿, 2016-10-30 接受

总装青年科技基金项目(2014ZBTY4003);太原卫星发射中心科学基金项目(2015ZBTY4008)

摘要 如何获取大气重力波参数是大气动力学理论研究的重点和难点。本文以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,利用常用的二阶、三阶、四阶曲线拟合和带通滤波方法获取垂直高分辨率探空资料的扰动场,对这些扰动场提取的大气重力波参数进行对比分析。结果表明:不同扰动场(二阶、三阶、四阶曲线拟合以及带通滤波)对所获取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一样。其中,对波固有周期、水平和垂直波长的大小及变化趋势影响很大,而对波传播方向、对地水平群速及固有相速的影响程度则较弱。结合6—8日天气现象的大气动力特征,发现由二阶曲线拟合、带通滤波对应扰动场得到的重力波参数的大小及变化趋势与此吻合,其结果可信度最高;而由四阶曲线拟合扰动场得到重力波参数值的可信度最低。

关键词

重力波参数;
曲线拟合;
滤波;
雷阵雨;
探空资料

重力波虽是大气中存在多种波动的一种,但其与多种不同尺度的天气现象有非常密切的关系(孙继松和王华,2009;朱莉等,2010;王文等,2011;赵玉春等,2011;何洁琳等,2012;孙艳辉等,2015;吴迪等,2016)。因此,为深入研究大气重力波对不同天气系统的影响,需要确定大气重力波参数演变特征。目前国内外广泛使用基于线性重力波理论并结合Stokes参数、主成分分析法来获取大气重力波参数(Thomas et al., 1999; Guest et al., 2000; 卞建春等, 2004; Wang et al., 2005, 2006; Zhang and Yi, 2005, 2007; Hoffmann et al., 2006; 王雪莲等, 2006; Yamamori and Sato, 2006; Ki and Chun, 2010; Zhang et al., 2010; Moffat et al., 2011; 邓少格等, 2012; 白志宣等, 2016; Kumar et al., 2016),利用此方法获取重力波参数时,首先需要获取多种气象要素的垂直扰动廓线。

多阶曲线拟合(Guest et al., 2000; 卞建春等, 2004; Wang et al., 2005; Hoffmann et al., 2006; 王雪

莲等, 2006; Zhang and Yi, 2005, 2007; Ki and Chun, 2010; Moffat et al., 2011; Zhang et al., 2010; 邓少格等, 2012; 白志宣等, 2016)和滤波(Thomas et al., 1999; Wang et al., 2006; Yamamori and Sato, 2006; Kumar et al., 2016)方法是获取扰动场最常用的方法。Wang et al. (2005)利用二阶曲线拟合方法得到5 a(1998—2002)高垂直分辨率探测资料的物理量扰动场,提取对流层(2~8.9 km)和下层平流层(18~24.9 km)中大气重力波参数(如:固有频率、垂直和水平波长、垂直传播方向等);Ki and Chun (2010)通过三阶曲线拟合方法得到2007年6月15日—7月15日(韩国10个台站)高垂直分辨率探测资料的物理量扰动场,提取下层平流层(17~30 km)重力波参数,并对重力波源和特征进行分析;Guest et al. (2000)用四阶曲线拟合方法获取麦夸里岛上空高垂直分辨率探空资料的物理量扰动场,利用该扰动场提取下层平流层(12~30 km)的重力波参数,对该重力波的季节变化、波源进行了研究;Yamamori and

引用格式:程胡华,2017.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,40(3):401-411.

Cheng H H, 2017. A preliminary investigation on the atmospheric gravity wave parameters obtained from different disturbance fields[J]. Trans Atmos Sci, 40(3): 401-411. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160504002. (in Chinese).

Sato(2006)通过滤波方法(0.5~5 km)得到亚热带和温带地区高垂直分辨率探测资料的物理量扰动场,获取对流层上层和平流层下层惯性重力波传播性质及其参数特征。虽然该重力波参数的获取方法被广泛使用,但是,Eckermann and Hocking(1989)提出如果存在多种波,则该重力波参数获取方法将不能得到准确的波参数值;Zhang et al.(2004)指出,由于实际大气是非线性运动并存在多种不同尺度的波运动,因此对基于线性重力波理论而提取大气重力波参数特征的可信度会产生影响;另一方面由于采用多阶曲线拟合和滤波方法获取的扰动场具有随意性,也会对得到的重力波参数结果带来可信度问题。虽然 Zhang et al.(2004)已指出该重力波参数的获取方法存在一些问题,但一方面尚未找到获取大气重力波参数的更好方法,另一方面,在大多数情况下,该方法得到的重力波参数特征仍能够反映出大气运动的总体特征。因此2004年以后,国内外大量气象工作者仍基于线性重力波理论并采用曲线拟合或滤波方法得到垂直扰动廓线来获取大气重力波参数(Wang et al., 2005, 2006; Zhang and Yi, 2005, 2007; Hoffmann et al., 2006; 王雪莲等, 2006; Yamamori and Sato, 2006; Ki and Chun, 2010; Moffat et al., 2011; Zhang et al., 2010; 邓少格等, 2012; 白志宣等, 2016; Kumar et al., 2016)。

本文以晋西北地区2013年8月6—8日出现的一次雷阵雨天气过程为例,该三日天气各具特点,6日前期为晴天,后期出现雷暴和降雨;7日前期为雷暴和降雨,随后转为阴天;8日开始为阴天,后期转为晴天。由于雷阵雨天气与对流层大气对流活动关系紧密,在此选取对流层(2~9 km)作为研究对象,分别利用二阶、三阶、四阶曲线拟合和滤波(0.5~5.0 km)方法获取垂直高分辨率探空资料的扰动场,并提取相应的大气重力波参数;结合该三日天气现象对应的大气动力特征差异,对不同扰动场所得到的大气重力波参数差异进行对比分析,探讨扰动场对大气重力波参数的影响。

1 天气过程简介

晋西北地区于2013年8月6—8日出现一次雷阵雨天气过程,图1a—d简要反映了此次天气过程的特点。其中图1b和图1c中纵坐标值为1时,表示出现该类天气现象;值为0时,即未出现该类天气现象。图1a反映了6—8日天空的总云量、中低云量变化,在6日08时(北京时间,下同)总云量为0,后期总云量和中低云量开始迅速增多,在13时为

10成云,19时出现雷暴并伴有降雨(图1b和图1c),除6日22时、7日02时、03时外,降雨时间持续到7日16时(图1b),雷暴时间到7日09时结束(图1c);在8日09时虽然总云量为10成,但中低云量迅速地从10成减少到2成(图1a),天气开始明显好转。在整个时间段内,6日累计降雨量为10.00 mm,7日累计降雨量为28.23 mm,8日未出现降雨和雷暴天气(图1d),考虑晋西北地区空气干燥,平均年降雨量只有463.11 mm,此次雷阵雨天气过程总降雨量接近其十二分之一,可视为一次非常强的雷阵雨天气过程。

在此天气过程中,山西岢岚地区上空的浮力频率(单位:rad/s)、500 hPa散度场(单位: 10^{-5} s^{-1})随时间演变特征见图2。其中,浮力频率值在整个高度范围变化较小,且均大于0,变化范围在0.005 0~0.017 0 rad/s之间(图2a),其在2~9 km高度范围内的浮力频率平均值位于0.009 9~0.013 5 rad/s范围(图2b);图2c为500 hPa散度沿111.5°E的时间—纬度剖面,图中粗黑线位置为岢岚气象台所在纬度,图2d为气象台上空500 hPa散度的时间演变,可以明显看出此次雷阵雨天气过程中500 hPa散度存在快速、明显的交替变化,表明大气中存在尺度小且传播速度快的波动。因此判断,此次雷阵雨天气过程中对流层存在明显的大气重力波活动。

2 资料及计算原理

本文研究资料为山西岢岚气象台提供的垂直高分辨率探空资料,由于原始资料的垂直间隔不等,为计算方便,采用3次样条插值,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)。

提取重力波参数所用的程序包由澳大利亚 Adelaide 大学的 Vincent 教授提供,依据线性重力波理论(Sawyer, 1961; 卞建春等, 2004)和多种观测探测资料表明,由重力波产生的水平风速矢量($u'(z)$, $v'(z)$)端点的连线,大致表现为椭圆形状,若重力波的水平传播方向为自北顺时针旋转角度 α ,则 α 方向即为水平风扰动矢量偏振椭圆的长轴方向(Hines, 1989; 卞建春等, 2004; 王雪莲等, 2006; 邓少格等, 2012)。通过利用 Stokes 参数(Eckermann, 1996; 卞建春等, 2004; 王雪莲等, 2006; 邓少格等, 2012)和主成分分析法(卞建春等, 2004; 王雪莲等, 2006; 邓少格等, 2012),借助 Hilbert 变换后的归一化温度扰动和速度扰动分量之间的关系(卞建春等, 2004; 王雪莲等, 2006; 邓少格等, 2012),可确定出重力波水平传播方向 φ 、椭圆偏振度 d 和偏振椭

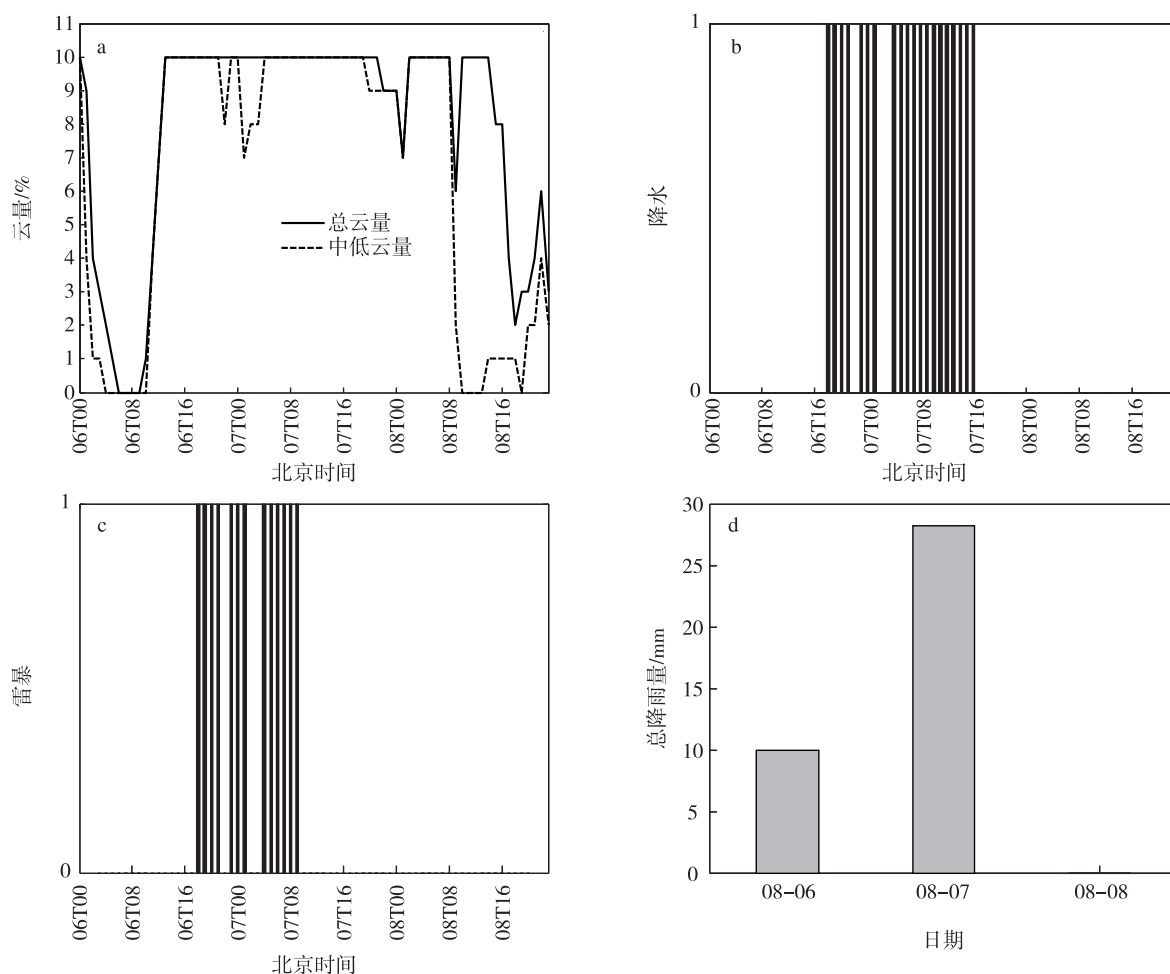


图1 2013年8月6—8日晋西北地区雷阵雨天气过程 a.云量;b.降水时次(1表示出现降水);c.雷暴时次(1表示出现雷暴);d.24 h总降雨量

Fig.1 A thunder storm process in northwest Shanxi on 6—8 August 2013: (a) cloud cover; (b) precipitation times (1 denotes precipitation); (c) thunderstorm times (1 denotes thunderstorm); (d) total rainfall in 24 hours

圆的长短轴,由偏振椭圆长短轴之比 $AXR = \left| \frac{\hat{u}}{\hat{v}} \right| =$

$\left| \frac{\hat{\omega}}{f} \right|$ (卞建春等,2004;王雪莲等,2006;邓少格等,2012),即可求出波固有频率 $\hat{\omega}$ 和固有周期 T ($=\frac{2\pi}{\hat{\omega}}$),通过归一化温度扰动 $\hat{T}'$ 的垂直波数功率谱可以估算出波动的垂直波数 m (Hoffmann et al, 2006; Moffat et al, 2011),依据波数与波长之间关系,可求取垂直波长 λ_z ($\lambda_z = 2\pi/m$),将上述得到的波固有频率 $\hat{\omega}$ 和垂直波数 m 代入由线性重力波理论得到的频散关系式,可得到重力波的水平波长 λ_h 、固有相速 c_i 、对地水平群速 c_g 等一系列的波参数值。关于计算原理的详细介绍,参见文献(卞建春等,2004;王雪莲等,2006;邓少格等,2012),此不赘述。

3 结果分析

选取2013年晋西北地区一次典型的雷阵雨天气过程(8月6—8日)为研究对象,该过程6日为晴转阴有雷阵雨;7日为阴有雷阵雨,后期转阴;8日为阴转晴。

从大气动力特征角度分析,6日为雷暴生成前期,大气已由准地转平衡转变成非地转平衡状态,并激发出大气重力惯性波,随着非地转特性持续加强,重力波活动会大大增强,意味着重力波出现振幅增大、尺度变小、周期变短、波包(群速)移速加快等特征;7日为雷暴发展期,雷暴活动变得更加活跃;由于重力波是频散波,在传播过程中,所携带的能量会逐渐耗散,大气由非地转平衡逐渐调整为准地转平衡状态,此时为雷阵雨天气消亡阶段(8日),重力波活动大大减弱。

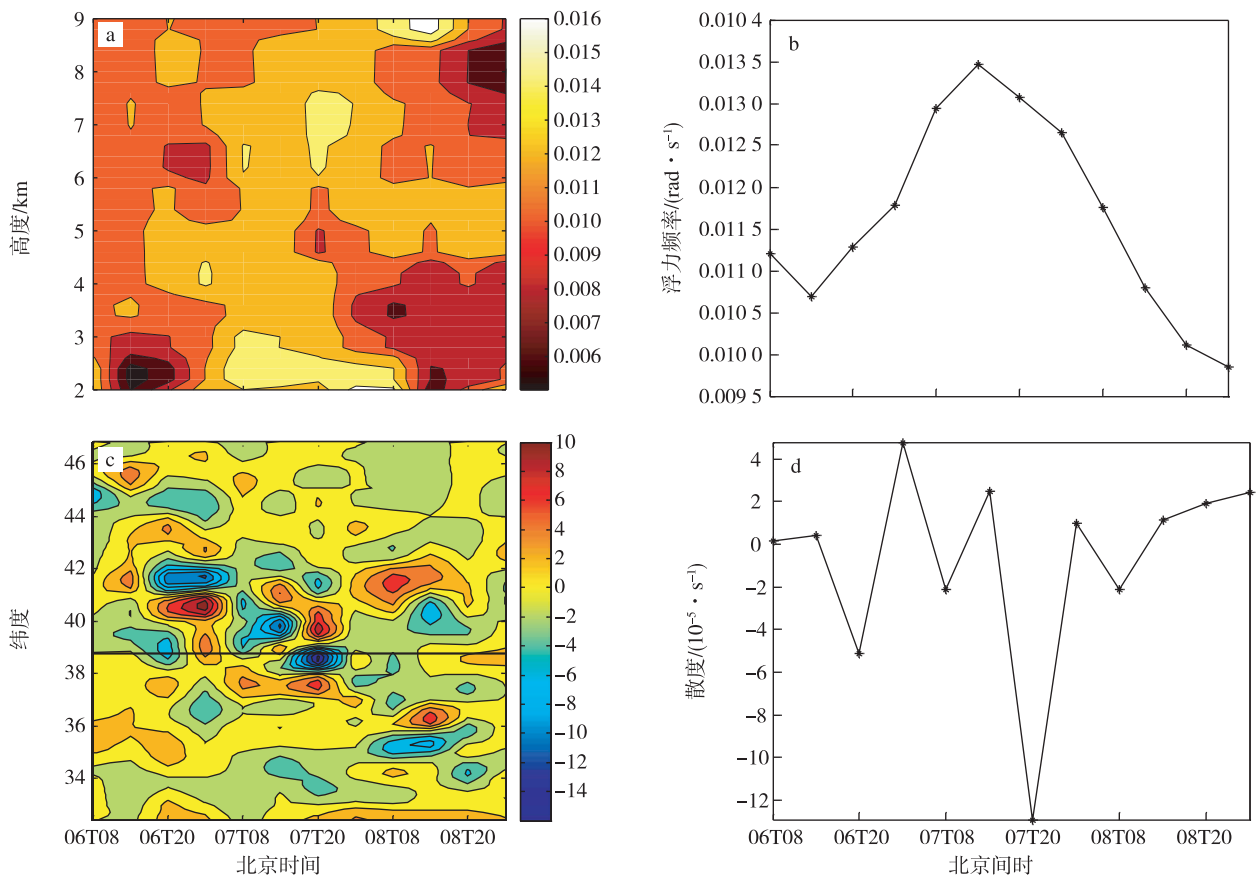


图2 2013年8月6—8日晋西北地区上空浮力频率的时间—高度垂直剖面(a;单位:rad/s)及其平均值的演变(b;单位:rad/s)、500 hPa散度沿111.5°E的时间—纬度剖面(c;单位:10⁻⁵ s⁻¹)及气象台站上空500 hPa散度的演变(d;单位:10⁻⁵ s⁻¹)

Fig.2 Time-altitude cross-section of the Brunt-Väisälä frequency (a; units: rad · s⁻¹), times series of monthly-averaged Brunt-Väisälä frequency (b; units: rad · s⁻¹), the time-latitude cross-section of 500 hPa divergence along 111.5°E (c; units: 10⁻⁵ s⁻¹) and temporal variations of 500 hPa divergence over the station (d; units: 10⁻⁵ s⁻¹) in northwest Shanxi on 6—8 August 2013

下面将利用二阶、三阶、四阶曲线拟合和带通滤波(0.5~5.0 km)方法获取垂直高分辨率探空资料的扰动场,分析这些扰动场所提取的大气重力波参数的差异。

3.1 不同扰动场对比分析

图3为利用带通滤波(0.5~5.0 km)、二阶、三阶和四阶曲线拟合方法获取的8月6—8日08时纬向风、经向风和温度场垂直扰动廓线特征。从中可见,不同方法得到扰动场随高度变化趋势虽然总体一致,但在某些高度范围的变化趋势还是存在较明显差异(图3a和图3e的7~9 km范围和图3f的2~4 km范围等);同样,在某些高度范围内扰动场振幅大小也存在差异(图3a中2 km处,带通滤波及二阶、三阶和四阶曲线拟合得到扰动场的振幅分别为0.51、2.19、-2.52和-3.77 m/s;在图3a的其他高

度,如4.3 km处及5.7~9.0 km范围等),在其他图中同样能够明显看出不同扰动场存在振幅差异,此不详述。

因此,不同方法得到扰动场在某些高度层上存在变化趋势及振幅上的差异,分别用这些扰动场得到的大气重力波参数的差异性有多大?下面将从重力波常用参数(周期、波长、相速和群速)进行对比分析。

3.2 波周期

带通滤波及二阶、三阶、四阶曲线拟合方法得到的扰动场分别以符号BpFp、SeOp、ThOp和FoOp表示(下同),图4为BpFp、SeOp、ThOp和FoOp获取的8月6—8日重力波周期变化特征。从中可见,在同一日,不同扰动场得到重力波周期的大小差异很大:在6日,最大周期为3.67 h(FoOp),是最小周期

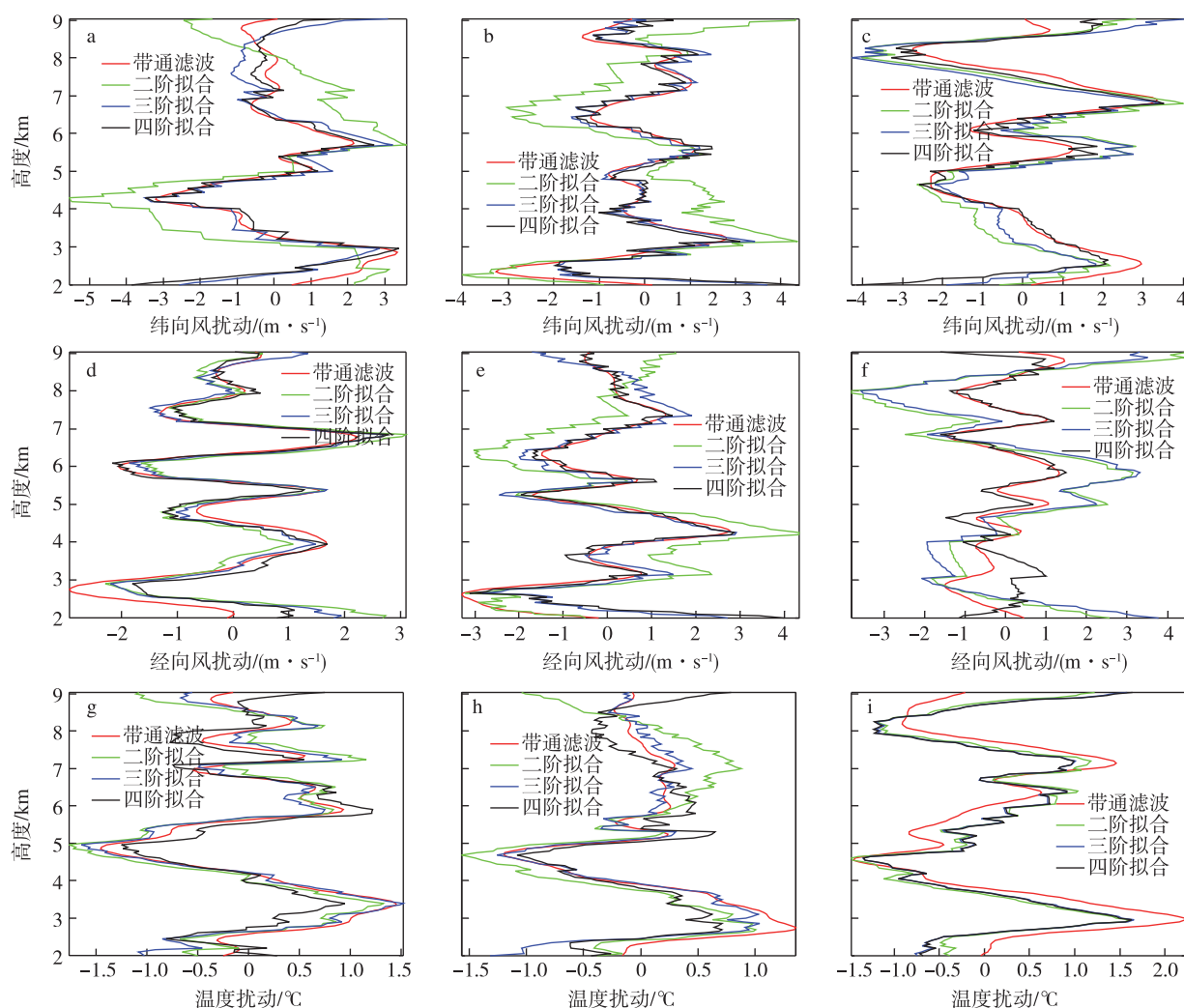


图3 纬向风(a、b、c;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、经向风(d、e、f;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和温度(g、h、i;单位: $^{\circ}\text{C}$)垂直扰动廓线变化

a、d、g.8月6日;b、e、h.8月7日;c、f、i.8月8日

Fig.3 Comparisons of the vertical profiles of zonal wind perturbation (a, b, c; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), meridional wind perturbation (d, e, f; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and temperature perturbation (g, h, i; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a, d, g) August 6; (b, e, h) August 7; (c, f, i) August 8

(1.05 h, BpFp)的3.50倍;7日最大周期为2.06 h (ThOp),是最小周期(0.15 h, SeOp)的13.73倍;8日最大周期为10.01 h (SeOp),为最小周期(1.59 h, FoOp)的6.30倍。同时,不同扰动场对重力波周期大小及变化趋势有明显影响:BpFp和SeOp得到的重力波周期变化趋势一致,均呈“→减小→增大”特征;由ThOp得到重力波周期一致增大;FoOp与ThOp相反,其所得到的波周期为一致减小。结合6—8日天气现象特点,可知7日为雷暴发展期,其非地转活动最强,其次为6日雷暴生成期,而8日大气已调整为准地转平衡状态。据此可判断,7日的重力波周期最短、其次为6日,最长为8日。

综上,发现不同方法获取的扰动场对重力波周

期大小及变化趋势有非常大的影响,考虑6—8日的大气动力特征,由BpFp和SeOp得到的重力波周期变化特征与此吻合。

3.3 波长

图5a、5b反映了不同扰动场得到8月6—8日重力波水平和垂直波长的变化特征。由图5a可见,与图4类似,不同扰动场在同一日获取的水平波长存在较大差异:在6日,最长水平波长为47.79 km (FoOp),为最小水平波长(26.36 km, BpFp)的1.81倍;7日最长的水平波长为36.90 km (ThOp),是最小水平波长(3.80 km, SeOp)的9.71倍;8日最长的水平波长为268.98 km (BpFp),为最小水平波长(25.34 km, FoOp)的10.61倍。水平波长随时间变

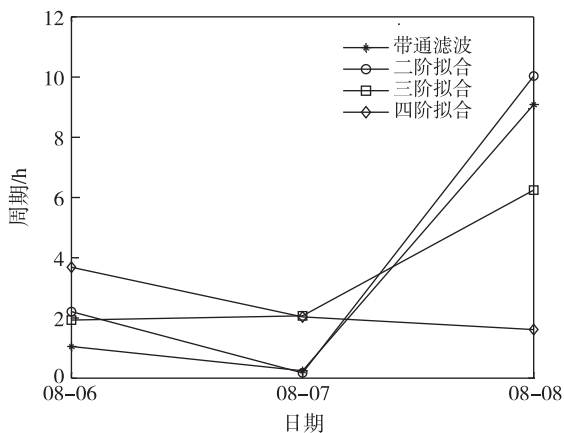


图4 不同扰动场得到的重力波周期(单位:h)

Fig.4 Comparisons of the gravity wave periods(units:h) obtained from different disturbance fields

化趋势也存在很大的不同:与波周期变化趋势相同,BpFp和SeOp均呈现“→减小→增大”特征变化;ThOp为一致增大;FoOp为一致减小。

在图5b中同样可发现扰动场对重力波垂直波长具有较大影响。首先同一日的垂直波长同样存在较大差异:在6日,最大垂直波长(3.28 km,BpFp)为最小垂直波长(1.85 km,FoOp)的1.77倍,7日和8日分别为1.55倍、1.56倍。图5b中不同扰动场得到的垂直波长随时间变化趋势各异,其中,BpFp为“→减小→增大”特征;SeOp为“→增大→减小”特征;ThOp为一致减小;FoOp呈增大趋势。

由上可知,扰动场同样对重力波水平、垂直波长具有较大影响,且其对重力波水平波长的影响与对波周期的影响相似。

3.4 波传播方向

不同扰动场得到8月6日重力波传播方向如图6所示。可见,扰动场对波传播方向也存在较大影响

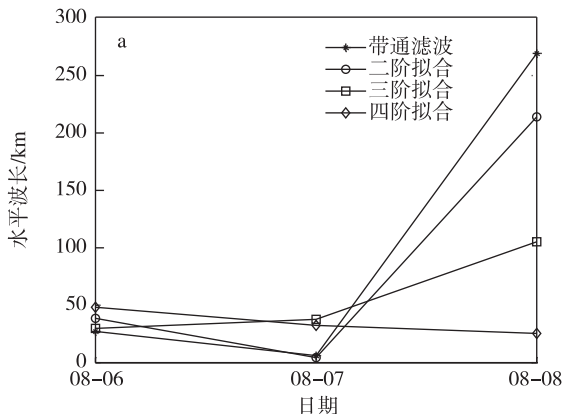


图5 不同扰动场得到的重力波水平(a)和垂直(b)波长(单位:km)

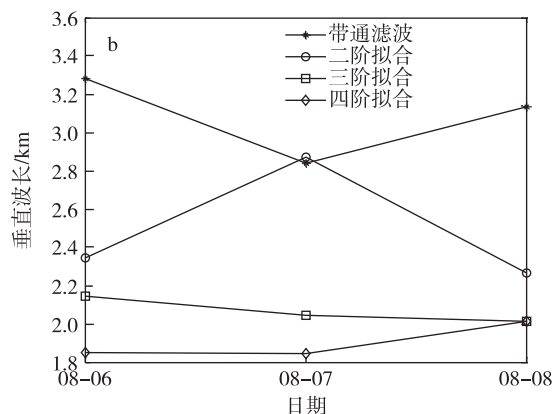
Fig.5 Comparisons of the gravity wave (a)horizontal wavelength and (b)vertical wavelength obtained from different disturbance fields(units:km)

响:通过BpFp得到的波传播方向为西南向,与正北方向夹角为 -93.51° ;由SeOp、ThOp和FoOp得到的波传播方向皆为西北向,其与正北方向夹角分别为 -85.87° 、 -70.14° 和 -62.42° ;7日,由BpFp、SeOp、ThOp和FoOp得到的波传播方向皆为东北向,与正北方向夹角分别为 35.05° 、 37.54° 、 27.19° 和 30.35° (图略);8日波传播方向皆为西南向,其夹角分别为 -140.10° 、 -144.43° 、 -140.84° 和 -116.92° (图略)。因此扰动场对波传播方向存在影响,但不如其对重力波周期、水平波长和垂直波长的影响大。

3.5 波群速

图7为不同扰动场得到的8月6日波群速特征。对照图6,发现6日波群速方向与波传播方向相反。由图7同样可看到扰动场对重力波群速的大小和方向存在影响:BpFp得到的波群速值最小(5.30 m/s),方向为东北向;SeOp、ThOp和FoOp得到的波群速大小分别为 7.55 、 7.99 和 8.31 m/s (最大),方向均为东南向;7日重力波群速方向与波传播方向相同,均为东北向,由BpFp、SeOp、ThOp和FoOp得到的波群速大小分别为 18.69 、 18.75 (最大)、 16.23 和 16.01 m/s (最小)(图略);8日波群速方向与7日相同,同样皆为东北向,但群速大小明显减小,由BpFp、SeOp、ThOp和FoOp得到的波群速大小分别为 2.60 (最小)、 3.53 、 4.08 和 6.04 m/s (最大)(图略)。从6—8日波群速大小变化趋势来看,都是7日群速最大、8日群速最小,即变化趋势都呈“→增大→减小”特征,与6—8日天气的大气动力特征吻合。

由上可知,扰动场对波群速的大小和方向有影响,影响程度与扰动场对波传播方向的相当,远不如



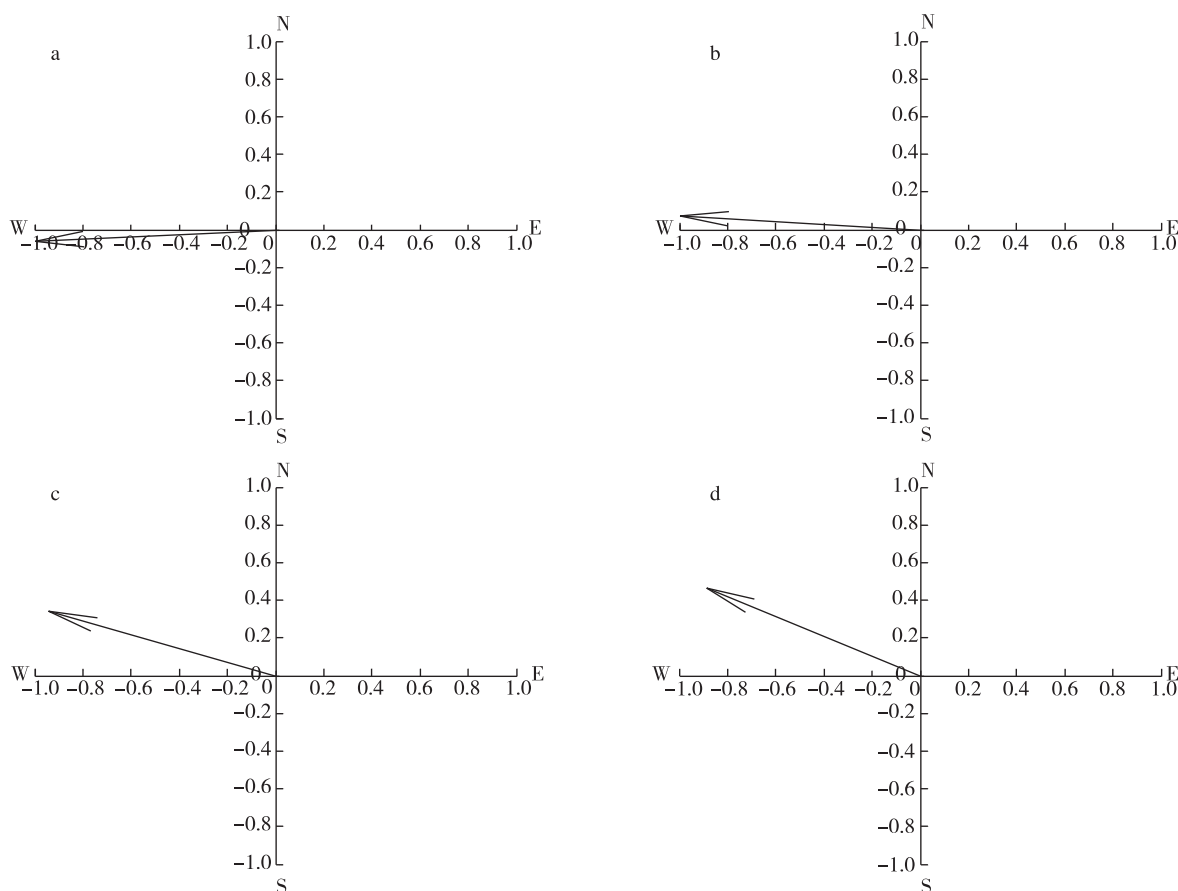


图6 8月6日带通滤波(a)、二阶(b)、三阶(c)、四阶(d)拟合得到扰动场对应的重力波水平传播方向(单位:°)

Fig.6 The horizontal propagation direction from perturbation fields obtained from (a) Band-pass filter; (b) Second-order polynomial fitting; (c) Third-order polynomial fitting and (d) Forth-order polynomial fitting on August 6(units:°)

其对波周期、水平波长和垂直波长的影响大。

本文同样分析了波固有相速(图略),发现扰动场对其大小和方向存在影响,但影响程度与扰动场对波传播方向的影响程度相当。实际上从固有相速计算表达式也可以得出这一结论,在线性重力波理论中(Sawyer, 1961),可得到固有相速 c_i 计算表达式如下:

$$c_i = \frac{\omega}{k_h} (\sin\phi, \cos\phi) = \frac{\lambda_h}{T} (\sin\phi, \cos\phi)。 \quad (1)$$

其中: ω 为波固有频率; k_h 为水平波数; λ_h 为水平波长; T 为波固有周期; ϕ 为波传播方向。从图4和图5可看出,扰动场对8月6—8日波周期、水平波长大小及变化趋势的影响相似。结合式(1),可得出扰动场对波相速与波传播方向的影响程度差不多这一结论。

通过上述分析,得到了不同扰动场对大气重力波参数影响的定性评估,定量的评估统计结果参见附表1和附表2。

4 结论和讨论

目前,国内外广泛使用多阶曲线拟合和滤波方法获取的扰动场来计算大气重力波参数,本文以晋西北地区2013年8月6—8日出现的一次雷阵雨天气过程为例,以常用的带通滤波(0.5~5.0 km)及二阶、三阶和四阶曲线拟合方法得到垂直高分辨率探空资料的大气物理量垂直扰动廓线,并对这些扰动场获取的大气重力波参数进行对比分析,结果发现:

1) 扰动场对波周期大小及变化趋势有非常大的影响。在8月6—8日中,不同扰动场得到的最大与最小周期的比值分别为3.50、13.73和6.30; BpFp和SeOp得到的重力波周期变化趋势一致,均是“→减小→增大”特征;由ThOp得到重力波周期一致增大, FoOp与ThOp相反,为一致减小。

2) 扰动场对重力波水平和垂直波长同样具有较大影响。对于水平波长,在8月6—8日,不同扰动场得到的水平波长最大值与最小值之比分别为1.81、9.71和10.61,水平波长随时间变化趋势与波

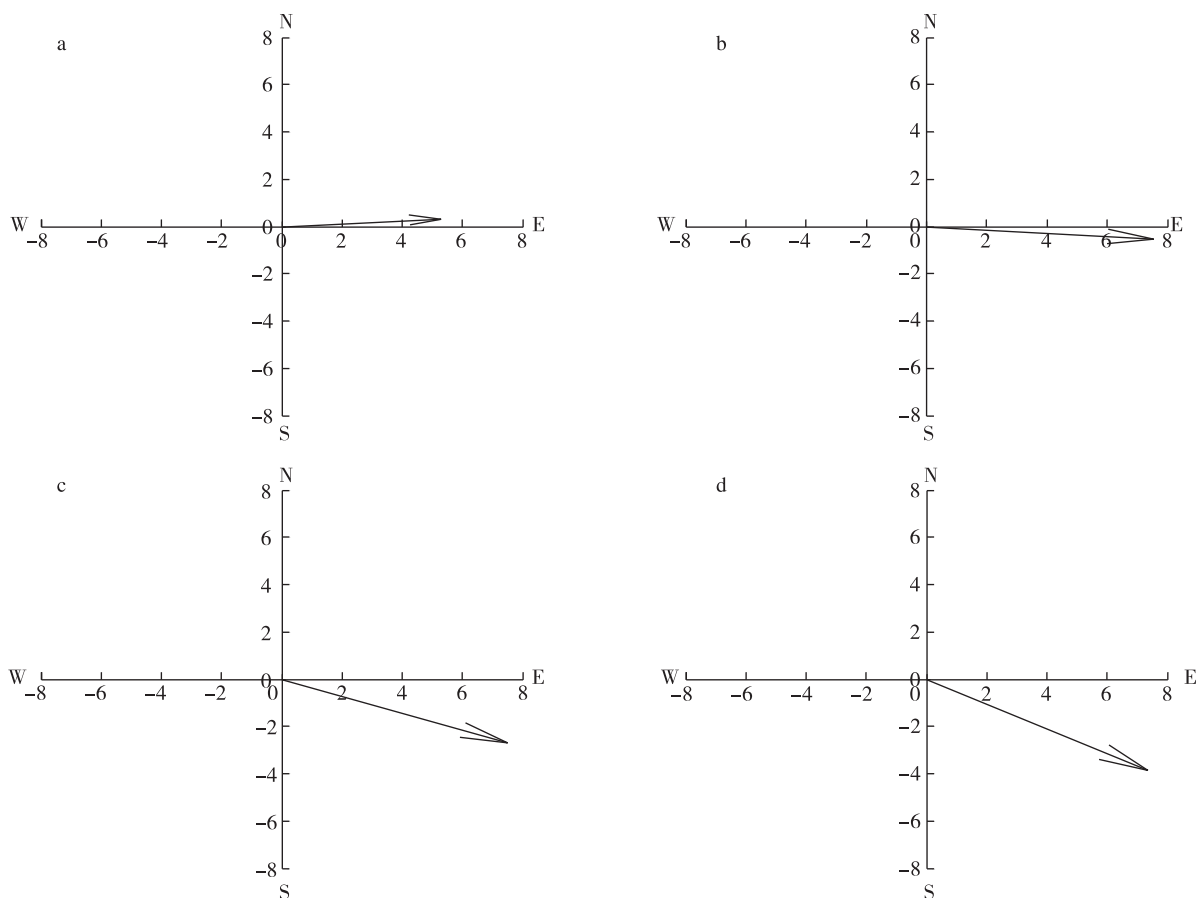


图 7 8 月 6 日带通滤波(a)、二阶(b)、三阶(c)、四阶(d)拟合得到扰动场对应的波群速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.7 The gravity wave group velocity (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of perturbation fields obtained from (a) Band-pass filter; (b) Second-order polynomial fitting; (c) Third-order polynomial fitting and (d) Forth-order polynomial fitting on August 6 (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

周期一致;对于垂直波长,虽然在 6—8 日中不同扰动场得到的垂直波长最大值与最小值之比较小,分别为 1.77、1.55 和 1.56,但垂直波长随时间变化趋势差异很大。其中, BpFp 的垂直波长变化趋势为“→减小→增大”的特征, SeOp 为“→增大→减小”, ThOp 为一致减小, FoOp 则呈增大的趋势特征。

3) 相比波周期、水平波长和垂直波长,不同扰动场对波传播方向的影响程度较弱。除 8 月 6 日获取的重力波传播方向存在差异外(由 BpFp 获取的波传播方向为西南向,而由 SeOp、ThOp 和 FoOp 获取的重力波传播方向均为西北向), 7 日和 8 日由 BpFp、SeOp、ThOp 和 FoOp 获取的重力波传播方向相同。

4) 不同扰动场对重力波群速的影响较弱。对于重力波群速方向,除 8 月 6 日由 BpFp 得到的群速方向为东北向,而由 SeOp、ThOp 和 FoOp 获取的群速方向都为东南向,在 7 日和 8 日,由 BpFp、SeOp、ThOp 和 FoOp 获取的重力波群速方向都为东

北向;从 6—8 日波群速大小变化趋势来看,都是 7 日群速最大、8 日群速最小,即都呈“→增大→减小”的特征。

5) 考虑 8 月 6—8 日天气的大气动力特点,在所有扰动场中(BpFp、SeOp、ThOp 和 FoOp),由 BpFp、SeOp 得到重力波参数值大小及变化趋势与此次天气的动力特征吻合,其结果可信度最高。由 FoOp 得到重力波参数值的可信度最低。

通过上述分析可知,针对该研究个例,发现由 BpFp、SeOp 得到重力波参数值大小及变化趋势较为可信,这可能是目前该类相关研究大多采用 BpFp (Thomas et al., 1999; Wang et al., 2006; Yamamori and Sato, 2006; Kumar et al., 2016) 和 SeOp (卞建春等, 2004; Wang et al., 2005; Zhang and Yi, 2005, 2007; Zhang et al., 2010; Moffat et al., 2011; 白志宣等, 2016), 而较少采用 ThOp (Ki and Chun, 2010) 和 FoOp (Guest et al., 2000; Hoffmann et al., 2006) 来获取大气重力波参数的原因之一。

致谢:感谢澳大利亚 Adelaide 大学 Vincent 教授提 对本研究提出的建设性修改意见。
供有关分析程序;感谢两位匿名审稿专家及编辑部

附表:

表 1 BpFp、SeOp、ThOp 和 FoOp 对应的重力波参数标准差和平均值

Table 1 The standard deviation and the mean value of the gravity wave parameters from BpFp, SeOp, ThOp and FoOp

	T/h		λ_h/km		λ_z/km		$\phi/(\text{ }^\circ)$		$c_g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		$c_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean
BpFp	4.88	3.45	146.41	100.34	0.23	3.08	90.72	-66.18	8.61	8.86	0.62	6.29
SeOp	5.20	4.12	112.43	85.18	0.33	2.49	92.89	-64.25	7.89	9.95	1.00	5.07
ThOp	2.45	3.39	41.48	57.00	0.07	2.07	84.36	-61.26	6.20	9.43	0.29	3.95
FoOp	1.10	2.42	11.51	35.09	0.10	1.90	74.46	-49.66	5.23	10.12	0.40	3.54

注:Std 和 Mean 分别代表标准差、平均值.

表 2 SeOp、ThOp、FoOp 与 BpFp 之间对应的重力波参数平均偏差、绝对差和相对误差

Table 2 The mean deviation, the mean absolute difference and relative error of the gravity wave parameters between SeOp, ThOp, FoOp and BpFp

	T/h			λ_h/km			λ_z/km		
	Mdev	Mabs	Rerr/%	Mdev	Mabs	Rerr/%	Mdev	Mabs	Rerr/%
SeOp	0.68	0.73	28.59	-15.16	23.10	-2.81	-0.59	0.61	-18.37
ThOp	-0.05	1.85	289.33	-43.34	66.18	166.99	-1.02	1.02	-32.78
FoOp	-1.02	3.96	320.90	-65.25	97.18	152.49	-1.18	1.18	-38.11

	$\phi/(\text{ }^\circ)$			$c_g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			$c_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
	Mdev	Mabs	Rerr/%	Mdev	Mabs	Rerr/%	Mdev	Mabs	Rerr/%
SeOp	1.93	4.82	0.67	1.09	1.09	26.27	-1.22	1.31	-18.91
ThOp	4.92	10.66	-15.63	0.57	2.21	31.46	-2.35	2.35	-36.93
FoOp	16.52	19.66	-21.07	1.26	3.04	58.22	-2.76	2.76	-43.67

注:Mdev、Mabs 和 Rerr 分别代表平均偏差、平均绝对差、相对误差.

参考文献(References)

白志宣,卞建春,陈洪滨,等,2016.中国地区下平流层惯性重力波参数分析特征的资料分析[J].中国科学:地球科学,46(12):1645-1657. Bai Z X, Bian J C, Chen H B, et al., 2016. Inertial gravity wave parameters for the lower stratosphere from radiosonde data over China[J]. Science China: Earth Sciences, 60(2):328-340. (in Chinese).

卞建春,陈洪滨,吕达仁,2004.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:地球科学,34(8):748-756. Bian J C, Chen H B, Lyu D R, 2004. Characteristics of gravity waves in the lower stratosphere revealed by radiosonde observations in Beijing[J]. Science China: Earth Sciences, 34(8):748-756. (in Chinese).

邓少格,钟中,程胡华,2012.一次暴雨过程中重力波参数演变特征的模拟结果[J].地球物理学报,55(6):1831-1843. Deng S G, Zhong Z, Cheng H H, 2012. Evolution characteristics of gravity-wave parameters in a simulated rainstorm process[J]. Chinese J Geophys, 55(6):1831-1843. (in Chinese).

Eckermann S D, 1996. Hodographic analysis of gravity waves: Relationships among stokes parameters, rotary spectra and cross-spectral methods[J]. J Geophys Res Atmos, 101(D14):19169-19174.

Eckermann S D, Hocking W, 1989. The effect of superposition on measurements of atmospheric gravity waves: A cautionary note and some re-interpretations[J]. J Geophys Res Atmos, 94(D5):6333-6339.

Guest F M, Reeder M J, Marks C J, et al., 2000. Inertia-gravity waves observed in the lower stratosphere over Macquarie Island[J]. J Atmos Sci, 57(5):737-752.

何洁琳,管兆勇,万齐林,等,2012.冬季西北太平洋热带气旋的生成与热带东风扰动的关系[J].大气科学学报,35(2):163-174. He J L, Guan Z Y, Wan Q L, et al., 2012. Relationship between the formation of tropical cyclone and tropical easterly disturbances in the western North Pacific in

- boreal winter[J]. *Trans Atmos Sci*, 35(2): 163-174. (in Chinese).
- Hines C O, 1989. Tropopausal mountain waves over Arecibo: A case study[J]. *J Atmos Sci*, 46(4): 476-488.
- Hoffmann P, Serafimovich A, Peters D, et al., 2006. Inertia gravity waves in the upper troposphere during the MaCWAVE winter campaign-Part I: Observations with collocated radars[J]. *Ann Geophys*, 24(11): 2851-2862.
- Ki M O, Chun H Y, 2010. Characteristics and sources of inertia-gravity waves revealed in the KEOP-2007 radiosonde data[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 46(3): 261-277.
- Kumar P V, Dutta G, Ratnam M V, et al., 2016. Impact of cyclone Nilam on tropical lower atmospheric dynamics[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(8): 955-968.
- Moffat-Griffin T, Hibbins R E, Jarvis M J, et al., 2011. Seasonal variations of gravity wave activity in the lower stratosphere over an Antarctic Peninsula station[J]. *J Geophys Res Atmos*, 116(D14): 811-840.
- Sawyer J S, 1961. Quasi-periodic wind variations with height in the lower stratosphere[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 87(371): 24-33.
- 孙继松, 王华, 2009. 重力波对一次雹暴天气过程演变的影响[J]. *高原气象*, 28(1): 165-172. Sun J S, Wang H, 2009. The impact of gravity wave on a hailstorm weather process evolution[J]. *Plateau Meteor*, 28(1): 165-172. (in Chinese).
- 孙艳辉, 李泽椿, 寿绍文, 2015. 一次暴风雪过程中的中尺度重力波特征及影响[J]. *气象学报*, 73(4): 697-710. Sun Y H, Li Z C, Shou S W, 2015. An investigation into the features and effects of the mesoscale gravity waves as in a snowstorm event[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(4): 697-710. (in Chinese).
- Thomas L, Worthington R M, McDonald A J, 1999. Inertia-gravity waves in the troposphere and lower stratosphere associated with a jet stream exit region[J]. *Ann Geophysicae*, 17(1): 115-121.
- Wang L, Greller M A, Alexander M J, 2005. Spatial and temporal variations of gravity wave parameters. Part I: Intrinsic frequency, wavelength, and vertical propagation direction[J]. *J Atmos Sci*, 62(1): 125-142.
- Wang L, Fritts C, Williams B P, et al., 2006. Gravity waves in the middle atmosphere during the MaCWAVE winter campaign: Evidence of mountain wave critical level encounters[J]. *Ann Geophys*, 24(4): 1209-1226.
- 王文, 刘佳, 蔡晓军, 2011. 重力波对青藏高原东侧省一次暴雨过程的影响[J]. *大气科学学报*, 34(6): 737-747. Wang W, Liu J, Cai X J, 2011. Impact of mesoscale gravity waves on a heavy rainfall event in the east side of the Tibetan Plateau[J]. *Trans Atmos Sci*, 34(6): 737-737. (in Chinese).
- 王雪莲, 陈泽宇, 吕达仁, 等, 2006. 热带下平流层重力波的季节和年际变化特征[J]. *自然科学进展*, 16(12): 1583-1590. Wang X L, Chen Z Y, Lry D R, et al., 2006. Seasonal variations of gravity wave activity in the lower stratosphere over tropical regions[J]. *Progress in Natural Science*, 16(12): 1583-1590. (in Chinese).
- 吴迪, 王澄海, 何光碧, 2016. 青藏高原地区夏季两次强降水过程中重力波特征分析[J]. *高原气象*, 35(4): 854-864. Wu D, Wang C H, He G B, 2016. Gravity wave characteristics in two summer heavy rainfall in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteor*, 35(4): 854-864. (in Chinese).
- Yamamori M, Sato K, 2006. Characteristics of inertia gravity waves over the South Pacific as revealed by radiosonde observations[J]. *J Geophys Res*, 111(D16): 275-275.
- Zhang F Q, Wang S Q, Plougonven R, 2004. Uncertainties in using the hodograph method to retrieve gravity wave characteristics from individual soundings[J]. *Geophys Res Lett*, 31(11): 373-374.
- Zhang S D, Yi F, 2005. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30°N, 114°E)[J]. *China Annales Geographicae*, 23(3): 665-673.
- Zhang S D, Yi F, 2007. Latitudinal and seasonal variations of inertial gravity wave activity in the lower atmosphere over central China[J]. *J Geophys Res*, 112, D05109.
- Zhang S D, Yi F, Huang C M, et al., 2010. Latitudinal and seasonal variations of lower atmospheric inertial gravity wave energy revealed by US radiosonde data[J]. *Ann Geophys*, 28(5): 1065-1074.
- 赵玉春, 王叶红, 崔春光, 2011. 一次典型梅雨锋暴雨过程的多尺度结构特征[J]. *大气科学学报*, 34(1): 14-27. Zhao Y C, Wang Y H, Cui C G, 2011. Multi-scale structure features of a typical Meiyu frontal rainstorm process[J]. *Trans Atmos Sci*, 34(1): 14-27. (in Chinese).
- 朱莉, 丁治英, 张腾飞, 等, 2010. 重力波与低纬高原地区 M_β CSs 地域特征的关系[J]. *大气科学学报*, 33(5): 561-568. Zhu L, Ding Z Y, Zhang T F, et al., 2010. Relationship between gravity wave and M_β CSs's local features on low latitude plateau[J]. *Trans Atmos Sci*, 33(5): 561-568. (in Chinese).

A preliminary investigation on the atmospheric gravity wave parameters obtained from different disturbance fields

CHENG Huhua

The Met Office of Taiyuan Satellite Launch Center, Kelan 036301, China

How to obtain the atmospheric gravity wave parameters is one of the most important topics in atmospheric dynamic theory. By taking a thunder storm process on 6—8 August 2013 in northwest Shanxi province as an example in the paper and by using the commonly used second-order polynomial fitting, third-order polynomial fitting, fourth-order polynomial fitting and Bandpass filtering methods to obtain disturbance fields (denoted as SeOp, ThOp, FoOp and BpFp, respectively) from sounding data with high resolution, the paper conducted comparative analysis on the atmospheric gravity wave parameters obtained from those disturbance fields by using different methods. The results showed that different disturbance fields (second-order curve fitting, third-order curve fitting, fourth-order curve fitting and Bandpass filtering) exerted certain influence on the value and trend of the gravity wave parameters to different degrees. They exerted obvious effect on the value and trend of wave period, horizontal and vertical wavelength while posed little influence on the propagation direction, group velocity and phase velocity. By considering the dynamic characteristics of the thunder storm process during 6—8 August 2013, the gravity wave parameters obtained from SeOp and BpFp showed the highest reliability while the gravity wave parameter obtained from FoOp showed the lowest reliability.

Gravity wave parameters; polynomial fitting; Bandpass filtering; thunder storm; sounding data

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160504002

(责任编辑:孙宁)