

中高层大气风场对地磁活动的响应特征*

刘晋芳^{1,2} 姜国英^{1,3} 徐寄遥^{1,3} 朱亚军^{1,3}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

3(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要 统计研究漠河、北京、武汉流星雷达观测到的 2012–2018 年 80~100 km 高度的风场数据, 比较在地磁平静期 ($Kp \leq 2$) 和地磁扰动期 ($Kp \geq 4$) 的日平均风场数据, 得到在地磁活动期风场的变化特征。研究结果表明, 在地磁扰动时风场变化具有季节差异和纬度差异。地磁扰动期间, 纬向风在较高纬度地区倾向于中间层西风增强, 低热层东风增强, 纬度较低地区倾向于东风增强。春季, 地磁活动对纬向风的影响没有纬度差异, 在夏冬季随着纬度的降低中间层东风增强明显。地磁活动对经向风的影响具有季节差异, 对春冬季的影响强于夏秋季。研究表明, 地磁活动对纬向风的影响可达 $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 对经向风的影响可达 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。地磁活动对中性大气风场的影响可达 80 km。

关键词 中高层大气风场, 地磁活动, 中纬度

中图分类号 P351

Responses of the Middle and Upper Atmospheric Wind to Geomagnetic Activities

LIU Jinfang^{1,2} JIANG Guoying^{1,3} XU Jiyao^{1,3} ZHU Yajun^{1,3}

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Responses of the middle and upper atmospheric (80~100 km height) wind to geomagnetic activities have been investigated using neutral wind data from 2012 to 2018 years, which were observed by Mohe, Beijing and Wuhan Meteor radars. Daily averaged wind data for geomagnetic quiet condition ($Kp \leq 2$) and geomagnetic disturb condition ($Kp \geq 4$) were chosen for comparison, and the variation

* 国家自然科学基金项目 (41831073, 42174212), 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划项目 (YSBR-018), 国家重点研发计划项目 (2021YFE0110200) 和空间天气学国家重点实验室专项基金项目共同资助
2022-04-29 收到原稿, 2022-12-25 收到修定稿

E-mail: liujinfang97@163.com. 通信作者 姜国英, E-mail: gyjiang@swl.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

characteristics of wind during geomagnetic disturbances were obtained. The observations show that the influence of geomagnetic activity on zonal wind varied with seasons and latitudes. For zonal wind, the effect of geomagnetic activity at higher latitudes tended to be more westerly wind in the upper mesosphere and more easterly wind in the lower thermosphere; while for the lower latitudes, it tended to be more easterly wind. In spring, the three stations had similar tendencies, and had no latitude differences. But the easterly wind in the middle atmosphere became stronger with the decrease of latitude in summer/winter. The effect of geomagnetic activities on the meridional wind had seasonal differences. The influence of geomagnetic activities in spring and winter was stronger than that in summer and autumn. According to the calculation results, the influence on zonal wind can be up to about $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and on meridional wind can be up to about $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The impact of geomagnetic activities on MLT wind can penetrate down to about 80 km.

Key words Middle and upper atmospheric wind, Geomagnetic activity, Middle latitude

0 引言

在地磁扰动期间,中高层大气在高纬度极光区域,有增强的极光加热源,包括焦耳加热和高能粒子加热。其中,焦耳加热是主要的极光加热源,高能粒子沉降对中性气体加热的平均每日贡献约为焦耳加热的 $1/3$ ^[1]。此外,研究表明,焦耳加热可以改变电离层、热层的结构和化学性质,甚至可以改变极光椭圆形中的中间层^[2-4]。对中间层和低热层(Mesosphere and Lower Thermosphere, MLT)地区的模式研究表明,亚暴会导致中间层臭氧的减少,这与高能粒子沉降有关^[5]。臭氧的减少会导致中间层的冷却,这已经被研究所证实^[6]。

极光加热是高纬地区能量来源的重要方式,其能量在中高层大气中由高纬向低纬传递耦合。在极区,太阳能通量和极光加热是 80 km 以上大气的主要能源。理论模拟研究表明,极光加热有助于中间层以上大气的能量输入,其在约 100 km 以下急剧下降^[7,8]。

Xu 等^[9]利用 2002—2012 年 TIMED/SABER 仪器和 2008—2009 年的 Envisat/MIPAS 仪器观察到的中性温度数据,研究了低热层温度的纵向结构,发现极光加热会导致中性温度的纵向变化,其对中性大气热力学的影响可达 105 km。

Liu 等^[10]基于 TIMED/SABER 仪器观察到的中性温度数据,根据理论计算表明,地磁活动对大气中性温度可以影响到 100 km 以下的高度。随着纬度和海拔的增加,温度上升的峰值在 $15\sim 30 \text{ K}$ 变化,提出

温度变化可能与极光区能量和动量输入导致的全球环流风暴时间变化有关。

Chang 等^[11]利用 TIMED/SABER 仪器探测到的温度数据研究了中间层和低热层(80~120 km)温度 9 天周期性振荡的纬向和垂直结构。其研究表明,2005 年纬向平均 SABER 温度在 110~120 km 存在 9 天的周期性振荡,当两个半球的纬度高于 40° 时,9 天的温度振荡更明显。其研究还表明,在共转相互作用区(Corotating Interaction Regions, CIRs)事件驱动的周期性地磁活动的频谱中,较低热层温度的 9 天振荡与同期地磁活动指数 Kp 的变化具有良好的相关性。

Jiang 等^[12]基于 NCAR-TIME-GCM 数值模拟温度数据与 TIMED/SABER 仪器观察到的中性温度数据,研究了 2002—2007 年低热层(100~120 km)温度与周期性地磁活动的相关性。研究表明,地磁活动的周期性变化是低热层温度 9 天和 13.5 天变化的主要原因。

Balsley 等^[13]分析了阿拉斯加州的中间层—平流层—对流层雷达观测到的极光电极流强度与极光带中间层纬向风之间的相关性。Johnson 等^[14]在此基础上研究了高纬度中间层顶(87 km)中性风与地磁活动的相关性。研究表明极冠吸收(Polar Cap Absorption, PCA)事件和地磁风暴发生之后,中性风与地磁活动会显示出不同程度的互相关,其特征是西风明显增加和 24 h 纬向风振幅增强。Arnold 等^[15]模拟了冬季中间层大气对磁通量增加的响应,并发现极地平

流层的冷却导致了中间层纬向风的增加。

Singer 等^[16]也揭示了地磁对风场影响的纬度差异, Yi 等^[17]报告了地磁活动对南极高纬度纬向平均风的明显影响。有研究表明,在地磁暴期间观测到中高纬度中间层密度下降,并提出这将影响中间层动力学。推测强地磁暴可能会影响 MLT 区域的全球环流,进而影响极光区域外的中间层密度的变化^[18,19]。

磁层来源的能量是中高层大气重要的能量来源,可以影响到中间层—低热层高度,引起中高层大气密度、温度、风场等的改变,然而,由于中高层大气风场的复杂性,对于地磁活动对中高层大气风场影响的研究结果较少,迄今为止,地磁活动对中性大气动力学的确切影响还没有量化。本文利用漠河、北京、武汉站流星雷达观测到的风场数据,对 2012—2018 年的数据进行统计研究,得出在地磁活动期间中纬度地区 MLT 大气风场的变化情况并将其量化,并初步判断其影响深度。

1 数据与方法

1.1 数据来源

使用的中高层大气风场数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心^{*}的流星雷达数据,流星雷达每小时风速的计算采用了全天拟合方法^[20,21]。其数据覆盖当地时间的 24 h,时间分辨率为 1 h,可以探测的高度范围为 70~110 km,步长为 2 km。本文使用的风场数据高度范围为 80~100 km,使用漠河站(53.5°N, 122.3°E, 磁纬 48.3°N)、北京站(40.3°N, 116.2°E, 磁纬 34.9°N)、武汉站(30.5°N, 114.2°E, 磁纬 24.8°N)2012—2018 年来的数据研究地磁活动期纬向风与经向风的变化情况,3 个台站均在 120°E 附近,处于不同的纬度,各个台站的主要参数见表 1。3 h Kp 指数可以用来表示地磁活动的水平^{**}。

1.2 数据处理

中高层大气受到来自低层大气的各种波的能量和动量通量的影响,其中潮汐波是不可忽略的影响因素。在这里,首先对纬向风与经向风数据进行日平均值处理,以去除潮汐、其他短周期的波以及周期小于

一天的湍流的影响^[22]。在得到的日平均数据序列中,如果连续缺省值的天数 ≤ 5 天,则采用线性拟合插值填补;若大于 5 天,则不做任何处理^[23]。

1.3 统计方法

利用 3 个台站 2012—2018 年的风场数据与 3 h 地磁活动指数 Kp ,采用统计法^[24]研究地磁活动对中高层大气的影响特征。

利用 3 h 的 Kp 指数统计 2012—2018 年地磁平静期与扰动期的天数。在这里,认为地磁活动指数 $Kp \leq 2$ 为地磁平静期,这是一个非常严格的条件; $Kp \geq 4$ 为地磁扰动期,其中也包括不稳定的地磁条件。图 1 给出了在 2012—2018 年 Kp 指数的统计结果,其中红色区域表示平静期与扰动期的选择范围。从图 1 可以看到,在 2012—2018 年间 Kp 值大部分集中在 2, 3, 4 左右,这期间没有发生非常大的磁暴事件($Kp \geq 6$)。地磁平静期($Kp \leq 2$)的天数大约有 1600 天,地磁扰动期($Kp \geq 4$)的天数大约有 300 天。

将统计好的平静期与扰动期的天数按照季节进行分类。3, 4, 5 月(March, April, May, MAM)为春季,6, 7, 8 月(June, July, August, JJA)为夏季,9, 10, 11 月(September, October, November, SON)为秋季,12, 1, 2 月(December, January, February, DJF)为冬季。图 2 给出了 2012—2018 年漠河、北京、武汉在地磁平静期(左)与地磁扰动期(右)的有效数据天数。从图 2 可知,漠河、北京、武汉站在各个季节地磁平静期的有效数据在 180 天左右,且没有明显数据缺失。在地磁扰动期,各个季节的有效数据在

表 1 流星雷达的主要参数

Table 1 Main parameters of meteor radar

Meteor radar	Mohe	Beijing	Wuhan
Latitude/(°)N	53.5	40.3	30.5
Longitude/(°)E	122.3	116.2	114.2
Magnetic latitude/(°)N	48.3	34.9	24.8
Frequency/MHz	38.9	38.9	38.9
Peak power/kW	20	7.5	20
Height range/km	70~110	70~110	70~110
Height resolution/km	2	2	2
Time resolution/h	1	1	1

* <http://www.geodata.cn>

** ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDCES。

50 天左右, 数据质量较好, 不存在明显数据缺失情况。

分别计算每个季节扰动期与平静期纬向风和经向风的平均值, 并将各个季节扰动期与平静期的风场平均值做差值。

2 结果与分析

2.1 纬向风结果分析

通过统计研究计算, 得到 2012—2018 年漠河、北京、武汉站 4 个季节 (春季-MAM、夏季-JJA, 秋季-SON, 冬季-DJF) 纬向风在地磁扰动期与平静期的差值结果 (见 图 3)。图 3 显示了 2012—2018 年漠河

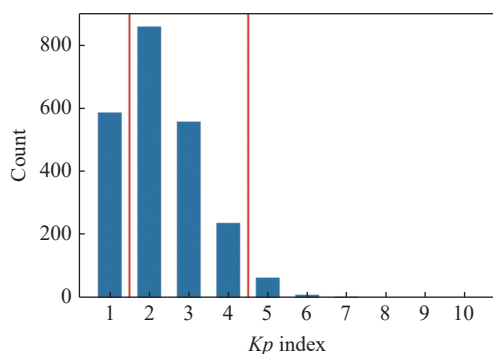


图 1 2012—2018 年 Kp 指数的统计直方图 (红色区域表示扰动期的选择范围)

Fig. 1 Histogram of Kp indices during 2012 and 2018 (The red area indicates the selection range of disturbed conditions)

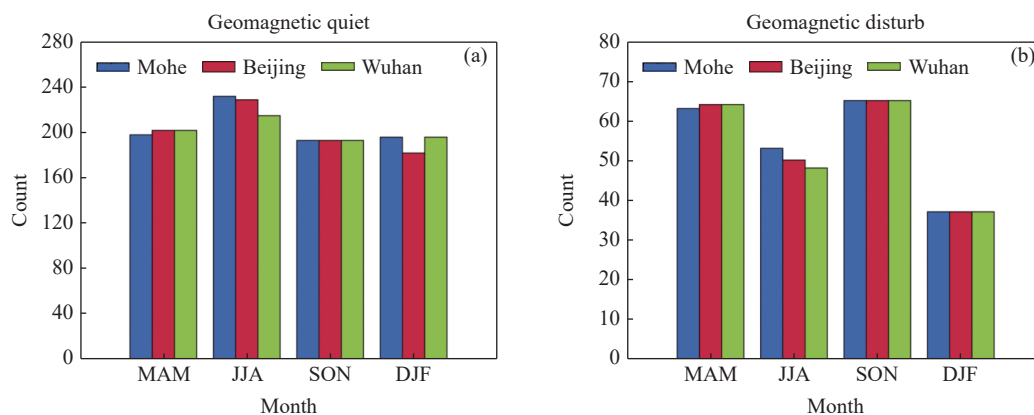


图 2 2012—2018 年漠河、北京、武汉地磁平静期 (a) 与地磁扰动期 (b) 的有效数据天数 (MAM 表示春季, JJA 表示夏季, SON 表示秋季, DJF 表示冬季)

Fig. 2 Effective days of Mohe, Beijing and Wuhan during geomagnetic quiet (a) and geomagnetic disturb (b) from 2012 to 2018 (MAM-spring, JJA-summer, SON-autumn, DJF-winter)

站、北京站、武汉站 4 个季节日平均纬向风的垂直廓线, 误差棒表示标准误差, 每一张图从左到右分别为地磁平静期 (左列)、地磁扰动期 (中列)、扰动期与平静期的差值 (右列), 从上到下分别为春季 (a)、夏季 (b)、秋季 (c) 和冬季 (d) 的情况。

纬向风垂直廓线显示了已知的纬向平均风的季节循环^[25-28]。首先来观察各个季节的情况, 如图 3(a) 所示, 从地磁平静期 (左列) 中可以看出, 在春季漠河站、北京站、武汉站中间层盛行东风 (Easterly Wind), 在低热层风向逆转为西风 (Westerly Wind), 且风向出现逆转的高度与纬度有关。在地磁扰动期 (中列), 3 个台站均受到地磁活动的影响。从地磁扰动期与平静期差值图 (右列) 可以得到, 春季地磁活动对 3 个台站的影响效果是相同的: 在中间层差值为正, 即在地磁扰动期, 西风增强, 在低热层差值为负, 即在地磁扰动期东风增强。在较高纬度漠河站, 在 80 km 处地磁活动导致的西风增强的效果最强, 约为 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 随着高度的增加其影响效果逐渐减弱; 在 86 km 以上区域地磁活动对纬向风的影响表现为东风增强, 随着高度的增加影响增强; 在 96 km 处达到最大值为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 之后随高度增加影响效果略微减弱。对于武汉站, 地磁活动对纬向风的影响在 84 km 以下区域表现为西风增强; 在 80 km 影响效果最强为 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 84 km 以上区域表现为东风增强, 随着高度的增加效果增强; 在 94 km 处达到最大值 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 之后随着高度的增加影响效果略微减弱。对于北京站而言, 地磁活动对纬向风的影响在 87 km 以

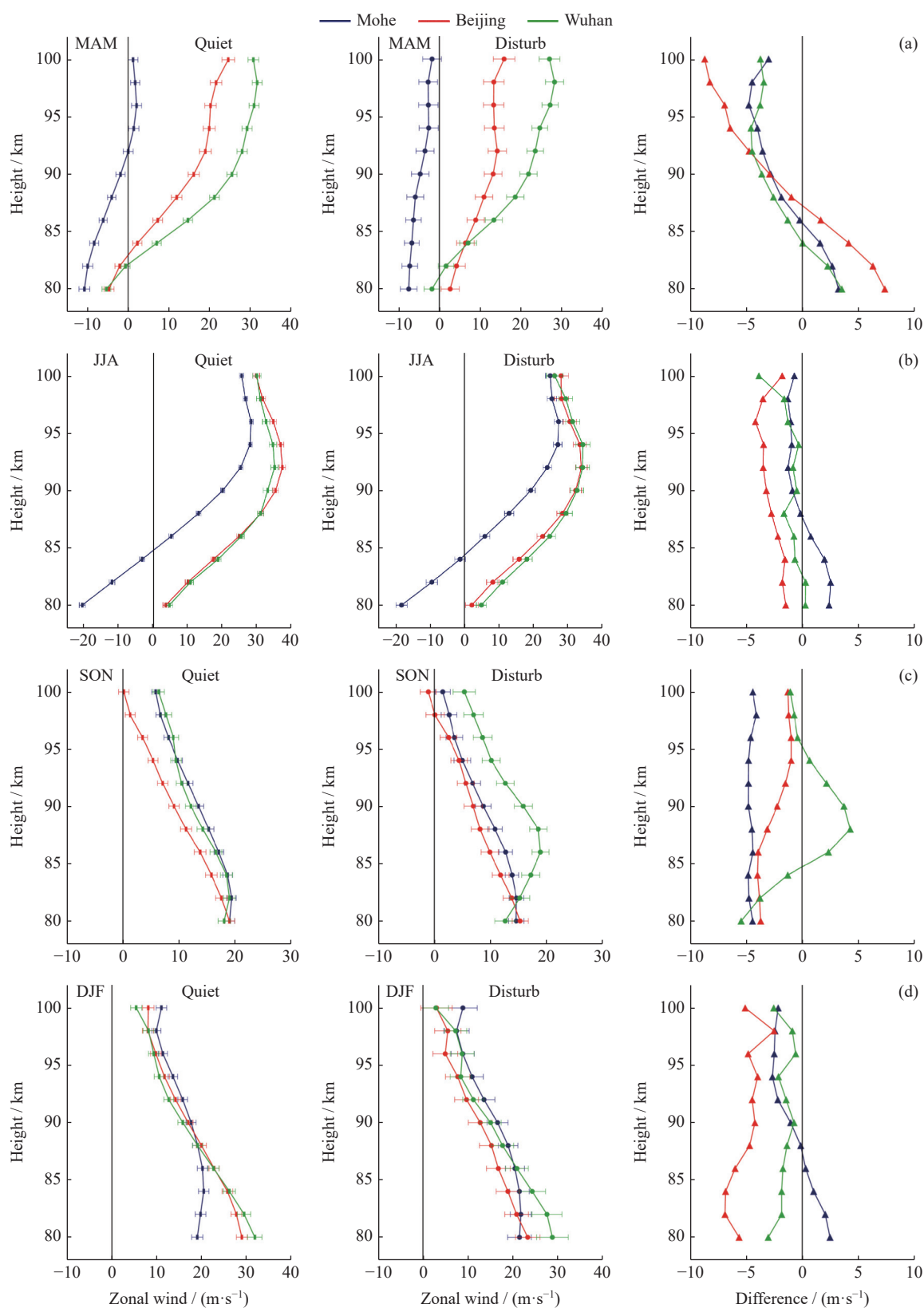


图3 2012—2018年漠河站、北京站、武汉站4个季节日平均纬向风垂直廓线(误差棒表示标准误差)

Fig. 3 Profile of the average daily zonal wind of Mohe, Beijing and Wuhan from 2012 to 2018 (The error bar represents the standard error)

下区域表现为西风增强; 在 80 km 影响效果最强为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 87 km 以上区域表现为东风增强, 随着高度的增加影响逐渐变强; 在 100 km 处达到最大值 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

如图 3(b)所示, 观察地磁平静期(左列)与地磁扰动期(中列), 在夏季较高纬度的漠河站与中低纬度的北京站和武汉站大体上变化趋势相同, 但存在一定的差异。漠河站在夏季中间层盛行东风, 在低热层风向逆转为西风, 而北京站与武汉站在 80~100 km 区域西风盛行。从扰动期与平静期差值图(右列)可以得到, 在夏季较高纬度的漠河站与春季表现相同, 87 km 以下区域在地磁扰动期西风增强; 87 km 以上区域东风增强, 地磁扰动对纬向风影响在 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。较低纬度的北京站和武汉站在 80~100 km 在地磁扰动的影响下东风增强, 并且对于纬度较高的北京站的影响强于纬度较低的武汉站。对于北京站, 其影响在 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级。从整体上来看, 在夏季地磁扰动对纬向风的影响量级没有春季大, 最高在 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级左右, 且与纬度有关, 高纬地区比低纬地区所受影响更大。

如图 3(c)所示, 从地磁平静期(左列)与地磁扰动期(中列)可以得出, 在秋季中间层与低热层大气盛行西风。从扰动期与平静期差值图(右列)可以得到较高纬度的漠河站在地磁扰动时东风增强, 在 80~100 km 影响效果大致相同, 约为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对于北京站, 在 80~100 km 区域地磁扰动时东风增强, 并且随着高度的增加影响效果逐渐减弱, 影响强度在 $1\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而在较低纬度的武汉站出现了不同的情况, 在 85 km 以下, 扰动期与平静期差值图(右列)为负, 即在扰动期东风增强; 在 85~95 km 区域差值图(右列)为正, 在扰动条件下西风增强; 在 95 km 以上区域差值图(右列)为负, 即在扰动条件下东风增强。武汉站与漠河站和北京站情况不同的原因可能与低层大气的重力波和行星波的扰动有关。整体而言, 在秋季地磁扰动的影响下纬向风的变化在 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级左右。

如图 3(d)所示, 从地磁平静期(左列)与地磁扰动期(中列)可以得出, 在冬季中间层与低热层纬向西风盛行。观察地磁扰动期与平静期差值图(右列), 地磁活动在不同的纬度影响不同, 较高纬度的漠河站在地磁活动影响下中间层西风增强, 在 80 km 处西风影响效果最强为 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 并且随着高度的增加影响减弱;

在 87 km 以上区域影响效果相反, 东风增强; 在 93 km 处影响最强为 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其后随着高度的增加影响略微减弱; 在中低纬度的北京和武汉站在中高层区域东风增强, 地磁扰动对较高纬度北京站的影响($5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)强于较低纬度的武汉站($3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

整体而言, 地磁活动对中高层大气纬向风的影响可以达到 80 km, 其对纬向风的影响在 $5\sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级, 且呈现季节差异。春季 3 个台站呈现出来的效果相同, 在地磁扰动条件下, 中间层西风增强, 低热层东风增强。夏季与冬季情况类似, 但漠河站与北京站、武汉站情况不同: 对于较高纬度的漠河站在地磁扰动期中间层西风增强, 低热层东风增强, 中低纬度的北京站与武汉站在中高层区域地磁扰动时东风增强。至于秋季, 漠河站与北京站在地磁扰动时东风增强, 与较低纬度的武汉站情况不同, 还需要进一步的研究才能确定。

此外, 还可以看出地磁活动对纬向风的影响也与纬度有关。一般而言, 对于较高纬度的漠河站的影响效果与较低纬度的北京站和武汉站的影响效果不同, 这也与地磁暴期间能量的传输机制有关。在地磁扰动时, 来自行星际的能量进入地球的两极, 并从高纬向低纬传输。

2.2 经向风结果分析

用同样的方法计算经向风, 结果如图 4 所示。图 4 显示了 2012—2018 年漠河站、北京站、武汉站 4 个季节(春季-MAM; 夏季-JJA; 秋季-SON; 冬季-DJF)日平均经向风的垂直廓线, 误差棒表示标准误差, 每一张图从左到右分别为地磁平静期(左列)、地磁扰动期(中列)、扰动期与平静期的差值(右列), 从上到下分别为春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)的情况。

首先观察各季节的情况。如图 4(a)所示, 从地磁平静期(左列)与地磁扰动期(中列)可以得出, 在春季, 经向风在中间层与低热层为负值, 主要为北风。从地磁扰动期与平静期差值图(右列)中可以看出地磁活动对经向风的影响呈现纬度差异: 对于较高纬度的漠河站, 在地磁扰动下 80~100 km 区域表现为南风增强, 在 80 km 影响效果最弱, 随着高度的增加影响逐渐变强, 总体而言, 地磁活动对漠河站经向风影响量级在 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。对于中纬度的北京站, 地磁活动对其经向风的影响在 94 km 以下区域表现为南

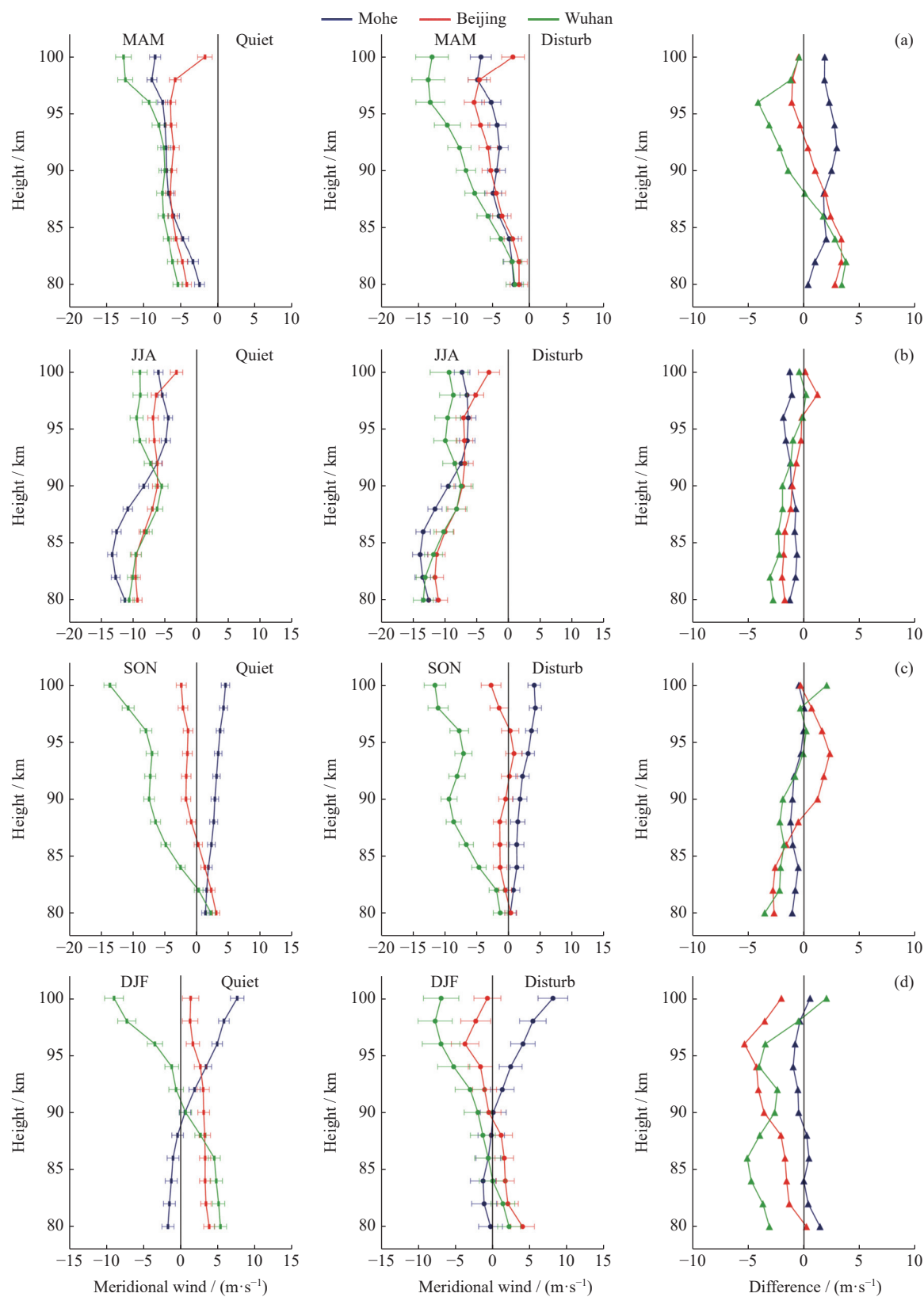


图4 2012—2018年漠河站、北京站、武汉站4个季节日平均经向风垂直廓线(误差棒表示标准误差)

Fig. 4 Profile of the average daily meridional wind of Mohe, Beijing and Wuhan from 2012 to 2018 (The error bar represents the standard error)

风增强,在 84 km 处南风增强效果最强为 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在 94 km 以上区域表现为北风增强,并且随着高度的增加影响效果先增强后减弱,在 96 km 高度影响效果最强,约为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对于较低纬度的武汉站,地磁活动对经向风的影响在 88 km 以下区域表现为南风增强,在 82 km 处南风增强最强为 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在 88 km 以上区域为北风增强,在 96 km 处北风增强效果最强为 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整体看来,地磁扰动对经向风的影响在 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级左右。

如图 4(b)所示,观察地磁平静期(左列)与地磁扰动期(中列),在夏季经向风在中间层与低热层为经向北风。从地磁扰动期与平静期差值图(右列)来看,在地磁活动的影响下,3 个台站均表现为北风增强。随着高度的增加,地磁活动对漠河站的影响基本不变,为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,对北京站和武汉站的影响逐渐减弱,在 95 km 以上区域接近 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。总体而言,在夏季地磁扰动对经向风的影响较小,最高在 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级左右。

如图 4(c)所示,从地磁平静期(左列)与地磁扰动期(中列)中可知,在秋季,较高纬度的漠河站以南风为主,中纬度的北京站在中间层为南风,到低热层风向逆转,较低纬度的武汉站则以北风为主。观察地磁扰动期与平静期差值图(右列)发现,对于漠河站和武汉站而言,地磁活动对经向风的影响不大,具体表现为北风增强,并且随着高度的增加影响减弱,在 95 km 以上区域接近为 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对于北京站而言,在 88 km 以下区域表现为北风增强,在 88 km 以上区域为南风增强,在 94 km 处南风增强效果达到最大值 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,之后随着高度的增加慢慢减弱。

如图 4(d)所示,从地磁平静期(左列)与地磁扰动期(中列)中可知,在冬季,经向风在 3 个台站的综合表现不同,对于较高纬度的漠河站,中间层经向风为北风,低热层为南风;而对于北京站与武汉站,一般表现为中间层为南风,低热层为北风。从地磁扰动期与平静期差值图(右列)来看,有地磁扰动时,中低纬度的北京站与武汉站所受影响较大,表现为北风增强,量级在 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右;而对漠河站的影响很小,量级在 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。

地磁活动对经向风的影响没有纬向风强,呈现季节差异性,在夏季与秋季影响较小,在春冬季节影响较大,并且在不同纬度表现不同,地磁活动对经向风

的影响在 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,最高可以达到 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3 结论

利用漠河站、北京站和武汉站的风场数据,结合地磁活动指数 K_p 统计研究了 2012—2018 年 80~100 km 大气风场对地磁活动的影响特征,主要分析了在地磁扰动期风场变化的季节特征与纬度特征,具体表现如下。

地磁活动对中高层大气的影响可以达到 80 km,其对纬向风的影响呈现季节差异。春季地磁活动的影响没有纬度差异,在地磁扰动条件下,中间层西风增强,低热层东风增强。夏季与冬季情况类似,漠河站与北京站、武汉站情况不同:对于高纬度的漠河站在地磁扰动期中间层西风增强,低热层东风增强;中低纬度的北京站与武汉站在中高层区域地磁扰动时东风增强。至于秋季,漠河站与北京站在地磁扰动时东风增强,与较低纬度的武汉站情况不同,还需要进一步研究才能确定。地磁活动对纬向风的影响也与纬度有关。一般而言,对于较高纬度的漠河站的影响效果与较低纬度的北京站和武汉站的影响效果不同。从计算结果来看,地磁活动对纬向风的影响可以达到 $5\sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级。

地磁活动对经向风的影响也呈现季节差异,在各个季节表现不同,对春冬季节的影响强于夏秋季节。在冬季,对中低纬地区经向风的影响强于高纬地区,从计算结果来看对经向风的影响大约在 $3\sim 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级。

致谢 本文使用的漠河、北京、武汉站流星雷达数据是中国科学院地质与地球物理研究所北京空间环境国家野外科学观测研究站观测所得,由国家地球系统科学数据中心—地球物理分中心提供(<http://wdc.geophys.ac.cn>)。

参考文献

- [1] KNIPP D J, TOBISKA W K, EMERY B A. Direct and indirect thermospheric heating sources for solar cycles 21-23[J]. *Solar Physics*, 2004, **224**(1/2): 495-505
- [2] BANKS P M. Joule heating in the high-latitude mesosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1979, **84**(A11): 6709-6712
- [3] REES M H, EMERY B A, ROBLE R G, et al. Neutral and ion gas heating by auroral electron precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1983,

- 88(A8): 6289-6300
- [4] ROBLE R G, EMERY B A, KILLEEN T L, *et al.* Joule heating in the mesosphere and thermosphere during the July 13, 1982, solar proton event[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1987, **92**(A6): 6083-6090
 - [5] SEPPÄLÄ A, CLILVERD M A, BEHARRELL M J, *et al.* Substorm-induced energetic electron precipitation: impact on atmospheric chemistry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(19): 8172-8176
 - [6] PANCHEVA D, SINGER W, MUKHTAROV P. Regional response of the mesosphere-lower thermosphere dynamics over Scandinavia to solar proton events and geomagnetic storms in late October 2003[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(9): 1075-1094
 - [7] THAYER J P, SEMETER J. The convergence of magnetospheric energy flux in the polar atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**(10): 807-824
 - [8] JEE G, BURNS A G, WANG W, *et al.* Driving the TING model with GAIM electron densities: ionospheric effects on the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A3): A03305
 - [9] XU J Y, SMITH A K, WANG W B, *et al.* An observational and theoretical study of the longitudinal variation in neutral temperature induced by aurora heating in the lower thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(11): 7410-7425
 - [10] LIU X, YUE J, WANG W B, *et al.* Responses of lower thermospheric temperature to the 2013 St. Patrick's Day geomagnetic storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(10): 4656-4664
 - [11] CHANG L C, THAYER J P, LEI J H, *et al.* Isolation of the global MLT thermal response to recurrent geomagnetic activity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(15): L15813
 - [12] JIANG G Y, WANG W B, XU J Y, *et al.* Responses of the lower thermospheric temperature to the 9 day and 13.5 day oscillations of recurrent geomagnetic activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4841-4859
 - [13] BALSLEY B B, CARTER D A, ECKLUND W L. On the relationship between auroral electrojet intensity fluctuations and the wind field near the mesopause[J]. *Geophysical Research Letters*, 1982, **9**(3): 219-222
 - [14] JOHNSON R M, LUHMANN J G. High-latitude mesopause neutral winds and geomagnetic activity: a cross-correlation analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1985, **90**(A9): 8501-8506
 - [15] ARNOLD N F, ROBINSON T R. Solar magnetic flux influences on the dynamics of the winter middle atmosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(12): 2381-2384
 - [16] SINGER W, BREMER J, HOFFMANN P, *et al.* Geomagnetic influences upon tides—winds from MLT radars[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1994, **56**(10): 1301-1311
 - [17] YI W, REID I M, XUE X H, *et al.* First observations of Antarctic mesospheric tidal wind responses to recurrent geomagnetic activity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(4): e2020GL089957
 - [18] YI W, REID I M, XUE X H, *et al.* Response of neutral mesospheric density to geomagnetic forcing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(16): 8647-8655
 - [19] YI W, REID I M, XUE X H, *et al.* First observation of mesosphere response to the solar wind high-speed streams[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(8): 9080-9088
 - [20] HOCKING W K, FULLER B, VANDEPEER B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(2/3): 155-169
 - [21] STÖBER G, CHAU J L, VIERINEN J, *et al.* Retrieving horizontally resolved wind fields using multi-static meteor radar observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(8): 4891-4907
 - [22] LUO Y, MANSON A H, MEEK C E, *et al.* The quasi 16-day oscillations in the mesosphere and lower thermosphere at Saskatoon (52°N, 107°W), 1980-1996[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D2): 2125-2138
 - [23] JIANG Guoying, XU Jiyao, SHI Jiankui, *et al.* The first observation of the atmospheric tides in the mesosphere and lower thermosphere over Hainan, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(11): 1059-1066
 - [24] JACOBI C, LILIENTHAL F, KOROTYSHKIN D, *et al.* Influence of Geomagnetic Disturbances on Midlatitude Mesosphere/Lower Thermosphere Mean Winds and Tides [EB/OL]. [2021-04-19]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-31632021-5-6>
 - [25] MANSON A H, MEEK C E. Winds and tidal oscillations in the upper middle atmosphere at Saskatoon (52°N, 107°W, $L=4.3$) during the year June 1982–May 1983[J]. *Planetary and Space Science*, 1984, **32**(9): 1087-1099
 - [26] SCHMINDER R, KÜRSCHNER D, SINGER W, *et al.* Representative height-time cross-sections of the upper atmosphere wind field over Central Europe 1990-1996[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, **59**(17): 2177-2184
 - [27] JACOBI C. 6 year mean prevailing winds and tides measured by VHF meteor radar over Collm (51.3°N, 13.0°E)[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, **78-79**: 8-18
 - [28] KOROTYSHKIN D, MERZLYAKOV E, JACOBI C, *et al.* Longitudinal MLT wind structure at higher mid-latitudes as seen by meteor radars at Central and Eastern Europe (13°E/49°E)[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **63**(10): 3154-3166