

基于 GPS 探空数据的北极大气惯性重力波研究

陈永祺^{1,2} 秦昕^{1,2*} 魏立新^{1,2*} 孙虎林^{1,2} 李方腾^{1,2}

1(国家海洋环境预报中心 北京 100081)

2(国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘要 本文利用 2018、2020 和 2021 年 7~9 月中国北极科学考察期间随船 GPS 探空数据, 研究了北极夏季 15~25 km 低平流层大气惯性重力波 (简称惯性重力波) 参数 (包括波长、本征频率、振幅、能量、传播特性等)。结果表明, 基于温度扰动计算的垂直波长 (均值 3.8 km) 普遍大于基于风速扰动的结果 (均值 2.3 km); 水平波长集中在 600 km 以内, 均值约 400 km, 水平与垂直波长比值达 60~100 倍, 即在下平流层惯性重力波基本沿水平方向传播。温度扰动振幅小于 1 K (均值 0.55 K), 风速扰动振幅基本小于 2 m/s (均值 0.85 m/s), 两者均小于中纬度地区。波动的周期为 5~12 h, 波动能量集中在 5 J/kg 以内且随高度增加而增大。水平传播方向与低平流层背景风及其滤波效应密切相关, 呈明显东传特性, 仅少量西传。

关键词 北极; 大气惯性重力波; 低平流层; GPS 探空观测

中图分类号 P351

Investigation of Arctic Atmospheric Inertial Gravity Waves Using GPS Radiosonde Observations

Chen Yongqi^{1,2} Qin Ting^{1,2*} Wei Lixin^{1,2*} Sun Hulin^{1,2} Li Fangteng^{1,2}

1 (National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

2 (Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center)

* 基金项目: 2023YFC3107901; 42276188; 2023YFC3107805

投稿日期: 2025 年 10 月 15 日

E-mail: 2462365819@qq.com

Abstract Using GPS radiosonde observations collected during Chinese Arctic Research Expeditions in July–September of 2018, 2020, and 2021, this study investigates the characteristics of inertial gravity waves (IGWs) in the lower stratosphere (15–25 km) over the Arctic summer region. Temperature and horizontal wind perturbations are extracted from high-resolution vertical profiles after removing background states via polynomial fitting. A combination of fast Fourier transform (FFT) analysis, sinusoidal fitting, and other processing procedures is applied to identify dominant monochromatic wave components and to derive key parameters, including vertical and horizontal wavelengths, intrinsic period, amplitude, energy, and propagation direction. The results reveal a systematic discrepancy in vertical wavelengths derived from different variables. The mean vertical wavelength estimated from temperature perturbations is approximately 3.8 km, significantly larger than that from wind perturbations, which averages about 2.3 km. Horizontal wavelengths are primarily distributed within 600 km, with a mean value of ~400 km. Consequently, the ratio of horizontal to vertical wavelength ranges from 60 to 100, indicating that IGWs in the Arctic lower stratosphere propagate predominantly in the horizontal direction. Wave amplitudes over the Arctic are notably weaker than those typically observed at mid-latitudes. Temperature perturbation amplitudes are generally below 1 K (mean ~0.55 K), and wind perturbation amplitudes are mostly within 2 m/s (mean ~0.85 m/s). The intrinsic periods of these waves are mainly concentrated between 5 and 12 hours, consistent with IGW characteristics in the stratosphere. Total wave energy is largely confined below 5 J/kg and exhibits an increasing trend with height from 15 to 25 km. Regarding horizontal propagation, a pronounced eastward preference is identified, while westward-propagating waves are relatively fewer. This asymmetry is primarily controlled by the filtering effect of the background wind in the lower stratosphere. These observational results provide empirical support for improving gravity wave parameterization schemes in high-latitude numerical weather prediction models.

Key words Arctic; atmospheric inertial gravitational waves; lower stratosphere; GPS radiosonde observation.

0 引言

大气惯性重力波(简称惯性重力波)作为地球大气运动的关键中小尺度扰动,其传播特

性对大气能量与动量的跨层传输具有重要意义^{[1][2]}。由于地球大气密度随高度递减，导致对流层激发的重力波在向高层大气传播时振幅逐渐增大，最终因饱和效应发生破碎，实现能量在对流层、平流层、中间层及低热层之间的重新分配^{[3][4]}，这一过程不仅直接调控全球大气环流的动力结构，还对中高层大气热平衡产生显著影响^[2]。

不同经纬度区域惯性重力波的主导激发源存在差异，故其活动呈现明显的区域性特征：热带主要受对流活动驱动；中高纬度则更多受到大气动力过程的影响；青藏高原、安第斯山脉等典型地形区则以地形效应为主^{[5][6]}；在极地地区，重力波激发与极地地形也有强烈关系^{[7][8]}，北极地形效应对波能耗散的贡献占主导地位，欧洲大部分山脉上空的强低层西风与极锋急流的近乎纬向排列共同促成了深层传播重力波的形成。惯性重力波这种局地特性表明，若要全面揭示其全球特征及其对大尺度环流的影响机制，需系统性研究不同区域的波动活动规律。因此，开展不同区域惯性重力波时空分布特性及其对比研究，不仅是理解大气波动—环流相互作用的基础，更是提升气候模型预测能力的重要科学前沿。

近几十年来，重力波的研究发展并采用了多种观测手段，包括无线电探空^{[9][10][11][12]}、卫星^[13]、激光雷达^{[14][15]}、飞机^[16]和探空火箭^[17]等。重力波覆盖的波段范围很宽，而不同观测技术特性各异，因此它们能分别探测到重力波的不同波段。常规无线电探空仪在对流层至低平流层范围内具备较高的垂直分辨率、覆盖站点广泛、观测历史悠久等特点，尤其适用于统计分析低平流层重力波的活动特征。利用无线电探空仪探测数据开展大气惯性重力波的研究已覆盖不同纬度和区域。学者们的前期研究表明，下平流层重力波活动在经纬分布^{[18][19]}、季节演变和年际变化呈现规律性特征^{[20][21][22]}。

北极是全球气候变化最敏感的地区且具有极端的天气、气候条件（如大风、低温、极夜等），全球气候变化背景下，北极地区的升温速度是全球平均值的 2 倍（称为“北极放大效应”），这对重力波的生成机制和传播路径带来了深远影响^{[23][24]}。北极平流层极涡的强弱变化对中高纬度天气具有重要影响，而重力波通过波流相互作用调制极涡强度，进而影响大气环流。长期以来，相比其他区域，受观测条件限制，涉及北极重力波的研究较少主要基于北极沿岸地区的探空观测^{[25][26]}，已有的研究表明，北半球高纬地区重力波的活动会对北极平流层涡旋有一个拖曳效应。但北冰洋区域由于观测资料很少，重力波的特性尚未被充分揭示。这种不足直接限制了北极地区大气动力学研究的进展，因此开展北冰洋地区重力波的活动特征研究对理解极地大气的动力学和热力学过程具有重要意义^[27]。

我国在多次北极科学考察期间开展了大气探空的观测实验，获取了覆盖北极太平洋扇

区、中央极区的大气探空数据。本文将利用获取的这些数据，开展对楚科奇海、北极中央区夏季惯性重力波的特征研究，填补该领域的空缺，同时为中高层大气的数值模拟提供参数化的借鉴依据。本文第1节介绍北极惯性重力波研究采用的数据与方法，第2节分析北极惯性重力波的波长、频率、振幅、能量和传播等特性，第3节为文章的总结和待解决的问题。

1 数据与方法

1.1 探空数据

本文使用的GPS探空数据分别来自中国第9次（2018年）、第11次（2020年）和第12次（2021年）北极科学考察，时间覆盖三个考察航次的7月~9月。探空观测实验沿“雪龙船”的航线展开，覆盖的区域包括北极太平洋扇区和中央区。探空观测时间为每日00、06、12（UTC）时中的2~3个时次，个别时间有数据缺失，但占比较低。三个科考航次共成功获得了184组大气温度、湿度、气压和风的垂向观测数据，探空观测站位分布见图1，探空观测日期及探测最大高度见图2。第9、11次中国北极科考采用的探空设备为Vaisala RS41型探空仪，其温湿度测量范围为-90~60°C和0~100%，风向和风速测量范围分别为0~160 m/s和0°~360°。第12次北极科考期间采用的设备为长峰CF-06-A探空仪，温湿度测量范围为-80~40°C和0~100%，风速和风向测量范围分别为0~100 m/s和0°~360°。探空仪的温度、湿度分辨率均达到0.01°C和0.1%，误差为0.2°C和3%，响应时间0.5 s；风速和风向的分辨率为0.1 m/s和1°，响应时间均为1 s。最大探测高度超过25 km和30 km的数据分别占比70.01%和45.65%，基本覆盖了北极地区的对流层和低平流层。本文采用空间线性插值将风场和温度廓线分辨率调整为25 m。鉴于研究区域纬度跨度较大，不同纬度地区下垫面特征及大尺度环流背景上有差异，70°~80°N纬度带区域更靠近欧亚和北美大陆边缘，夏季海冰覆盖具有明显的时空变化特征，下垫面非均一性较强，易受到陆源天气系统及锋面活动的影响，可能为重力波的激发和传播提供更为复杂的背景条件。相比之下80°N以北区域常年被海冰覆盖，下垫面条件相对均一，地形激发作用较弱，其重力波活动更可能受极区大尺度环流结构及极地气旋等系统的控制。因此，为了更好分析北极不同纬度重力波的特征，将研究区域进一步划分为70°~80°N和80°N以北两个纬度带，分别讨论北极不同纬度带内的重力波活动特性。

文中背景风场、浮力频率的计算还采用了欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的ERA5再分析数据不同高度的纬向风与经向风、温度场等数据，数据的空间分辨率为

0.25°×0.25°，时间分辨率为 1 小时^[28]。

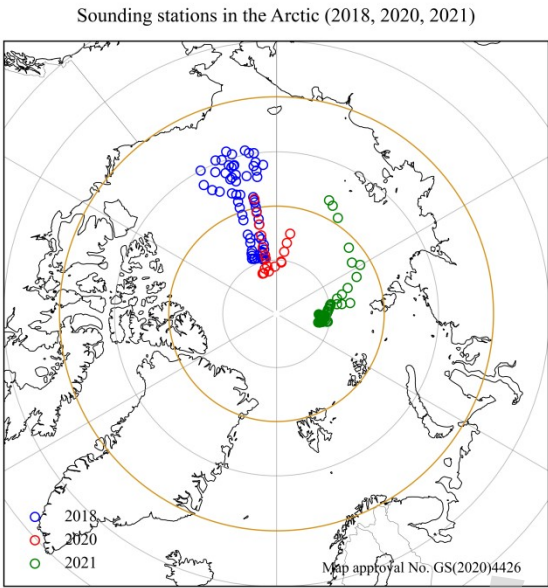


图 1：中国北极科学考察 GPS 探空站点分布。

其中，红色代表 2020 年；绿色代表 2021 年；蓝色代表 2018 年。

Figure 1.GPS radiosonde stations for CHINARE (the Arctic summer campaigns) : red (2020), green (2021), and blue (2018).

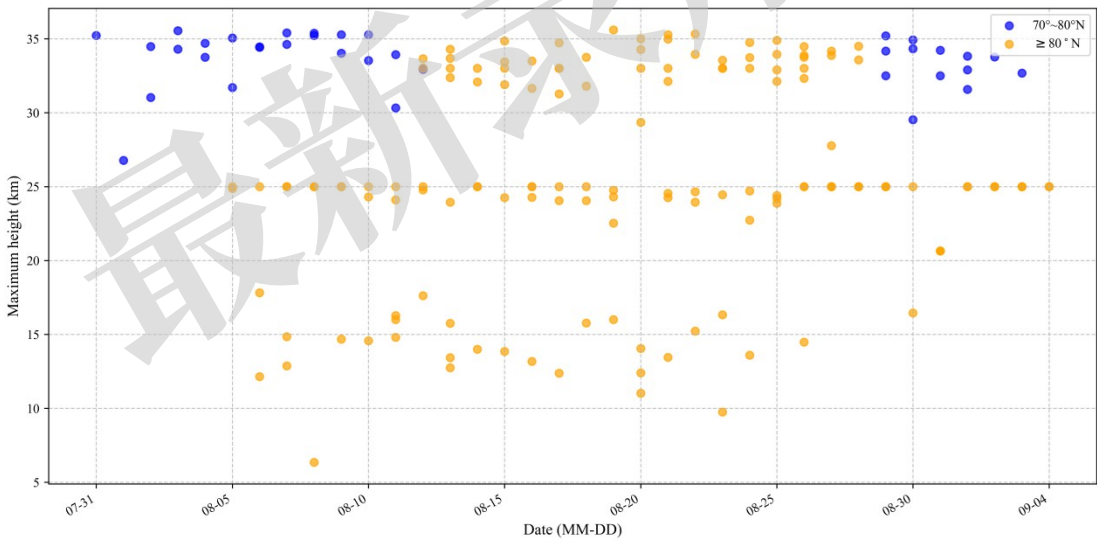


图 2：2018、2020 和 2021 年夏季（7~9 月）中国北极科学考察 GPS 探空观测的日期及高度分布

蓝色点：70°~80°N；黄色点：80°N 以北

Figure 2.Date-Maximum altitude distribution of radiosonde soundings on July-September during CHINARE of 2018, 2020, and

2021: blue dots (70°-80°N) and yellow dots (≥80°N).

1.2 惯性重力波的提取方法

（1）研究高度的选取

首先基于观测数据分析了北极大气分层情况。前人研究表明高纬度地区的对流层顶高度一般平均为 9~10 km[29][30]，图 3 是利用获得的大气探空数据计算得出的平均温度和风速随高度的分布，表明北极上空对流层顶高度约为 10km，其上方为下平流层，在 15 km 以上的高度范围内风速变化较小，而 15 km 以下则易受对流层急流影响，表现为风速随高度急剧变化。

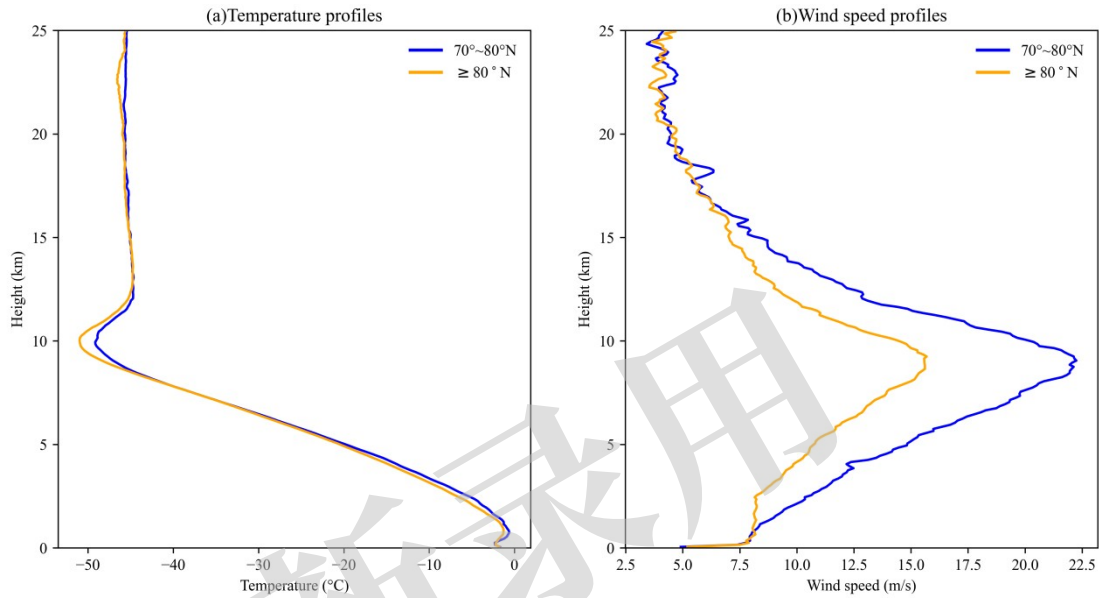


图 3：北极地区不同纬度带平均温度和风速随高度变化的垂直廓线。（a）温度廓线（b）风速廓线。

图中结果为同一纬度带内所有可用探空剖面在相同高度上的算术平均值。其中，
蓝色线：70°~80°N；黄色线：80°N 以北

figure 3. Vertical profiles of mean temperature and wind speed as a function of altitude in the Arctic region for different latitude bands.

(a) Temperature profiles; (b) wind speed profiles.

The profiles represent arithmetic averages of all available radiosonde soundings at each altitude within the same latitude band.

Blue lines (70°-80°N) and yellow lines (≥80°N).

浮力频率是描述大气层结稳定性的直接指标，其值反映大气扰动强弱，是研究重力波参数的一个关键背景量，涉及重力波研究高度的选取。计算的方法如下：

分别对再分析数据、观测纬向风 u 、经向风 v 、和温度 T 的剖面进行二阶多项式拟合，以提取背景场，

$$\bar{u} = a_1 z^2 + b_1 z + c_1, \quad \bar{v} = a_2 z^2 + b_2 z + c_2, \quad \bar{T} = a_3 z^2 + b_3 z + c_3$$

MERGEFORMAT (1.)

其中 z 为高度, $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ 为各要素剖面的拟合系数, 通过原始观测

值减去背景场得到扰动场:

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v}, \quad T' = T - \bar{T} \quad 22 \backslash * \text{MERGEFORMAT (1.)}$$

其中对温度扰动廓线进行归一化变换, 它具有速度的量纲:

$$\hat{T} = \frac{g}{N} \frac{T'}{\bar{T}} \quad 33 \backslash * \text{MERGEFORMAT (1.)}$$

浮力频率计算公式为:

$$N = \left[\frac{g}{\bar{T}} \left(\frac{d\bar{T}}{dz} + \frac{g}{C_p} \right) \right]^{1/2} \quad 44 \backslash * \text{MERGEFORMAT (1.)}$$

其中 g 为重力加速度, C_p 为干空气定压比热容。图 4(a)是采用再分析数据计算得到北极浮力频率的高度廓线, 图中浮力频率在 15~25 km 随高度变化较小, 该层大气显示出明显的稳定性。另外, 通过观测数据计算的浮力频率 (图 4(b)) 也表明, 15~25 km 的高度范围内, 浮力频率值主要维持在 0.018~0.023 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 在 16 km 以上, 浮力频率随时间和高度的变化都较小; 而在 15~18 km 附近部分区域, 靠近 8 月底与 9 月初时段, 浮力频率有波动, 这可能与该时段发生的天气过程有关系。

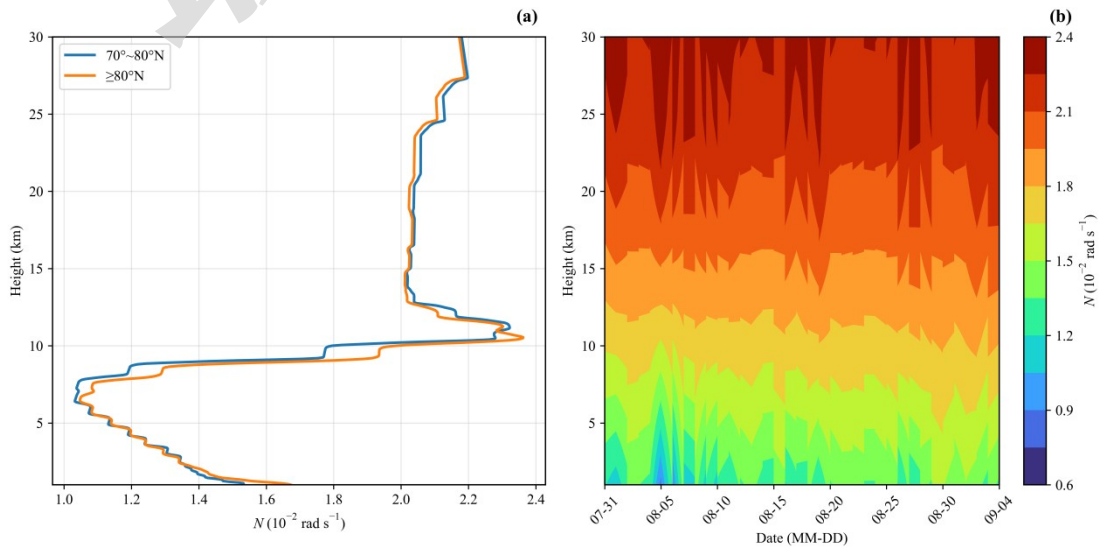


图 4: (a)基于再分析数据的 2012~2021 年平均浮力频率垂直廓线; (b)基于探空观测数据计算的浮力频率的时间 - 高度

分布;

figure 4.(a)Vertical profiles of buoyancy frequency averaged over 2012–2021 from ERA5 reanalysis data; (b) time–height distribution of buoyancy frequency derived from radiosonde observations.

综上, 本文对比分析了基于再分析数据计算的 2012~2021 共 10 年夏季北极上空平均浮力频率垂直廓线与 2018、2020、2021 北极探空观测浮力频率随时间变化的特征, 结合前文计算的北极对流层顶高度以确定本文的重力波研究高度。鉴于对流层顶附近存在温度极低、急流风速强劲、以及上下层浮力频率差异等因素, 为减小误差, 在分析中避开该区域[25][26], 并且考虑到北极探空的最高探测高度超过 25km 的有效数据比例为 70.01%, 本文将 15~25 km 作为研究极区低平流层重力波的高度区间, 该段区域浮力频率相对稳定, 背景风切变较小, 更符合线性重力波假设, 从获取的 184 次探空观测中筛选出符合条件的 130 组廓线, 其中观测点在 70°~80°N 有 37 组, 80°N 以上有 93 组。

(2) 重力波的提取及相关参数的计算

本文采用傅里叶熵谱分析法和矢端曲线法^{[9][18]}提取重力波。基于温度、风速的扰动场进行最大熵谱分析, 计算其垂直波数功率谱分布, 选取扰动场中占支配地位的谱成分, 确定对应的垂直波长。

$$\lambda_z = \frac{2\pi}{m} \quad 55 \setminus * \text{MERGEFORMAT (1.)}$$

由于实际扰动廓线中往往包含多种尺度的波动分量, 本文主要分析提取到的准单色重力波活动参量。通过计算得到垂直波长后, 再对扰动廓线进行谐波拟合, 分析波的扰动分量^{[18][31]}。

$$u' = A_u \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_z} + \phi_u\right), v' = A_v \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_z} + \phi_v\right), T' = A_T \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_z} + \phi_T\right) \quad 66 \setminus *$$

MERGEFORMAT (1.)

已有的理论研究与实测资料表明, 重力波引起的水平风速矢量 u , v 端点轨迹通常呈椭圆形分布。基于重力波扰动分量的偏振关系, 这些矢量端点的连线能够提供关于重力波特征的丰富信息。为了更清晰地表示水平风速矢量 u , v 的变化, 可使用椭圆拟合技术, 使端点轨迹符合椭圆形态。根据主分量分析理论, 该拟合过程可以通过计算主分量实现^{[9][32]}。

设 $A = \overline{u'^2}$, $B = \overline{v'^2}$, $C = \overline{u'v'}$, 上划线表示在 15~25 km 高度范围内对扰动平方的高度平均,

则构造正定矩阵: $\begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$ 该矩阵的两个特征值 λ_1 和 λ_2 (其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0$) 可通过如下

公式计算:

$$\lambda_{1,2} = \frac{A+B \pm \sqrt{(A-B)^2 + 4C^2}}{2} \quad 77 \backslash * \text{MERGEFORMAT (1.)}$$

λ_1 和 λ_2 分别对应椭圆 (u' , v') 的长轴和短轴半径的平方, f 为惯性频率, 可得无

量纲频率比, 由此求得本征频率 $\hat{\omega}$:

$$\frac{\hat{\omega}}{f} = R = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad 88 \backslash * \text{MERGEFORMAT (1.)}$$

在此基础上, 采用波动本征频率与局地惯性频率之比 $\hat{\omega}/f < 10$ 作为筛选标准, 即仅保留本征频率接近惯性频率的波动, 代表惯性重力波特征^[20]。

水平传播方向通常由偏振椭圆 (u' , v') 的长轴方向来确定:

$$\tan \theta = \frac{B-A \pm \sqrt{(A-B)^2 + 4C^2}}{2C} \quad 99 \backslash * \text{MERGEFORMAT (1.)}$$

其中, θ 为从 x 轴开始逆时针旋转至椭圆长轴正方向的夹角, 它表示重力波水平传播方向, 但存在 180° 的不确定性, 这种不确定性可以通过水平风速扰动矢量 (u'_h) 与温度扰动 ($\hat{T}$) 的偏振关系来消除, 其中 $u'_h = (u', v')$ 。在北半球, 若偏振椭圆 (u'_h , $\hat{T}$) 随高度顺转, 则水平传播方向与假设相同, 反之为 $\theta + 180^\circ$ 。垂直传播方向的判断方法与之类似。若偏振椭圆 (u' , v') 随高度顺转, 则能量向上传播, 若随高度逆转, 则能量向下传播^[9]。

惯性重力波的本征频率通过偏振椭圆 (u' , v') 的长短轴比计算得出, 水平波长根据

频散公式可以得到^[2]:

$$k_h^2 = \frac{\hat{\omega}^2 - f^2}{N^2} m^2 \quad 1010 \backslash * \text{MERGEFORMAT (1.)}$$

重力波能量由重力波动能和重力波势能组成, 计算公式为:

$$E_K = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}), \quad E_P = \frac{1}{2} \overline{T^2} \quad 1111 \backslash * \text{MERGEFORMAT}$$

(1.)

这里上划线表示在 15~25 km 高度范围内的平均, 由于垂直分量 w 无法观测, 且是相对于水平运动量级小很多, 对 E_K 的贡献不大, 因此, 实际计算 E_K 时, 忽略 w 项。总能量

$$E = E_K + E_P, \text{ 动能与势能比为 } R_E = \frac{E_K}{E_P}。$$

2 结果与分析

2.1 惯性重力波的垂直波长

本文将北极划分为 70°~80°N 和 80°N 以北两个纬度带对比讨论惯性重力波的特性及差异。图 5 是利用温度 (T)、纬向风速 (u 分量) 及经向风速 (v 分量) 扰动计算的重力波波长。结果显示, 北冰洋 70°~80°N 区域的温度扰动计算的波长主要分布在 3~5 km, 均值为 3.89 km; u 风扰动波长分布偏窄, 主要集中在 1~2 km, 平均波长为 2.20 km; v 风扰动波长分布则较为分散, 但峰值同样位于 1~2 km 区间, 均值为 2.30 km。相比之下, 80°N 以上区域波长分布特征整体与 70°~80°N 相似, 温度扰动波长略短, 平均为 3.72 km; u 和 v 风扰动波长同样集中在较窄范围, 平均分别为 2.33 km 和 2.35 km。总体来看, 提取的温度扰动波长普遍大于对应的风速扰动波长, 表明在此区域温度扰动所反映的垂直传播的惯性重力波尺度相对更长, 而风速扰动则可能反映出更小尺度的扰动过程。此外, 利用三个要素所提取的平均波长均集中在 5 km 以内, 与早期相关研究较为一致^[33]
[34]。

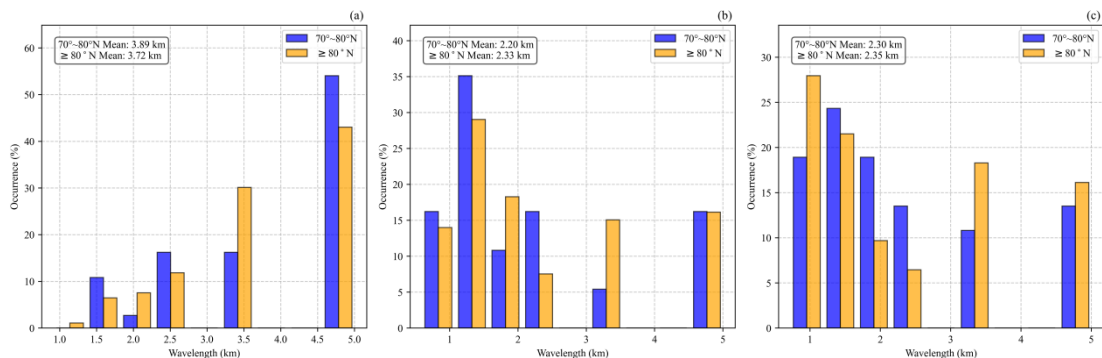


图 5：北极地区不同纬度带的垂直波长分布

蓝色：70°~80°N；黄色：80°N 以北

(a) 温度；(b) 纬向风；(c) 经向风

Figure 5. Vertical wavelength distribution in different latitude bands of the Arctic

blue: 70°-80°N; yellow: ≥80°N

2.2 水平波长

图 6 为不同区域重力波的水平波长分布，结果表明，70°~80°N 区域内平均波长为 402.52 km，80°N 以北区域平均波长为 382.52 km，70°~80°N 区域波长分布较为分散，而 80°N 以北区域波长分布更集中在均值附近。北极的两个纬度带中 70% 以上的重力波的水平波长分布在 500 km 以内。两个纬度带的水平波长都远大于垂直波长，两者之间的比值达 60~100 倍，上述特征表明，下平流层的惯性重力波主要表现为准水平传播，其垂直方向的能通量占比很小。这种近乎水平的传播特性，使得波动能量能够传递至波源远处，这构成了惯性重力波在下平流层中广泛存在的一个重要机制。

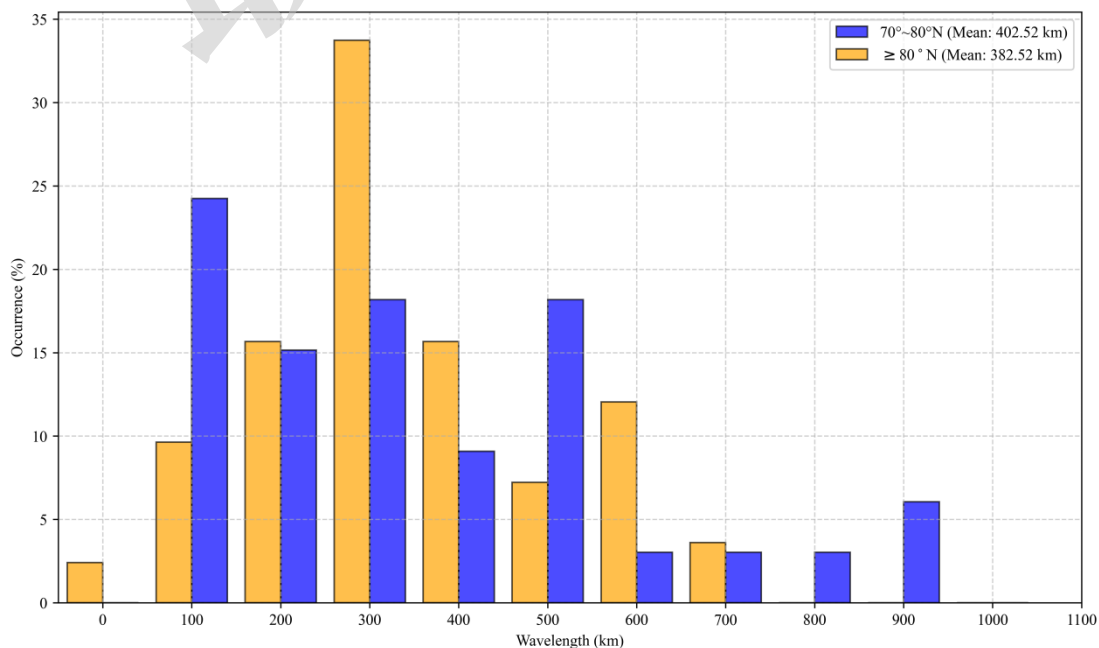


图 6: 北极地区不同纬度带的水平波长分布

蓝色: 70°~80°N; 黄色: 80°N 以北

Figure 6.Horizontal wavelength distribution in different latitude bands of the Arctic

blue: 70°-80°N; yellow: ≥80°N

表 1: 不同纬圈的重力波波长平均值

Table 1.Mean values of gravity wave wavelengths for different latitude bands.

纬度	垂直波长 (T /km)	垂直波长 (u /km)	垂直波长 (v /km)	水平波长 (km)
70°~80°N	3.89	2.20	2.30	402.52
80°N 以北	3.72	2.33	2.35	382.52

2.3 振幅

波振幅是体现重力波的活动强度的特征之一，图 7 是 2018 年第 9 次北极科考期间计算的重力波过程个例。图 8 给出了不同纬度带的温度、纬向风、经向风扰动振幅的分布。统计表明，北极地区温度扰动幅度小于 2.5 K，纬向风和经向风扰动幅度小于 4 m/s，振幅的平均值分别为：温度为 0.51~0.58 K，纬向风为 0.80~0.86 m/s，经向风为 0.84~0.88 m/s，两个纬度带的振幅差异不明显，这与前人的研究结果是一致的^[35]。前人的研究表明，武汉、宜昌、北京等中纬度站点^{[36][37]}的风速提取的波振幅在 2.5 m/s 左右，温度提取的波振幅在 1 K 左右，与这些中纬度站点相比较，极区的温度与风速提取的波振幅明显偏小，这可能是因为中纬度处于西风带附近，更加靠近急流，易激发较强的重力波，Zhang 和 Yi(2004)^[38]的研究表明，重力波在向上传播过程中，由于非线性曲率项的作用，振幅有增强趋势，且在北半球相同条件下低纬度的振幅增长更强。

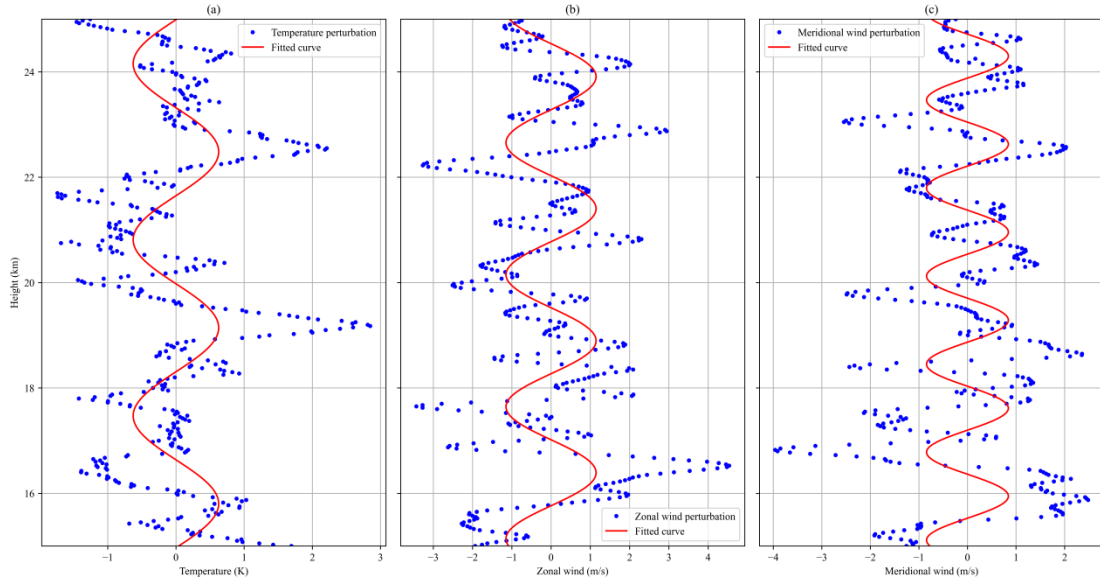


图 7：利用 2018 年 7 月 31 日 12 时的 GPS 探空观测提取的惯性重力波的正弦拟合个例

(a) 温度； (b) 纬向风； (c) 经向风

Figure 7. Example of sinusoidal fitting of gravity wave perturbations extracted from observations at 12:00 UTC on 31 July 2018:

(a) temperature, (b) zonal wind, and (c) meridional wind.

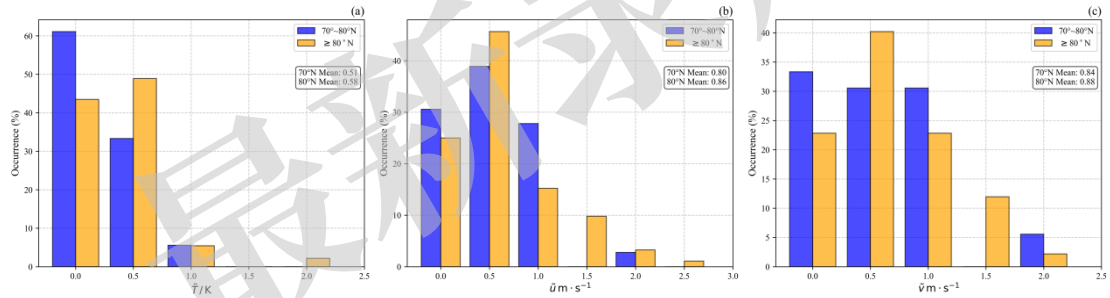


图 8：北极地区不同纬度带的振幅分布

蓝色：70°-80°N；黄色：80°N 以北

(a) 温度； (b) 纬向风； (c) 经向风

Figure 8. Amplitude distribution in different latitude bands of the Arctic

blue: 70°-80°N; yellow: ≥80°N

(a) Temperature; (b) Zonal wind; (c) Meridional wind.

2.4 本征频率和周期

进一步计算了不同纬度重力波的本征频率、本征周期、以及本征频率与惯性频率之比 (R)，结果见图 9 和图 10。北极两个纬度带惯性重力波的本征频率平均值分别为 $1.87 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$ 和 $1.92 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$ 。两个纬度带的平均周期分别为 9.55h 和 9.30 h。本征频率

与惯性频率之比的平均值均为 $1.32f$ ，虽然 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 纬度带与 80°N 以北相比均值差异不明显，但是 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 的本征频率、周期和 R 值都更加发散， 80°N 以北的本征频率更集中。

另外，已有的研究表明中纬度部分站点^{[39][40]}的该比值一般在 $2\sim 3f$ ，与中纬度站点相比，极区的 R 值偏小，这与北极的惯性频率高于中低纬度有关系。可以得出低平流层的 R 值随着纬度升高呈下降趋势，这与前人的研究一致^{[41][42]}。

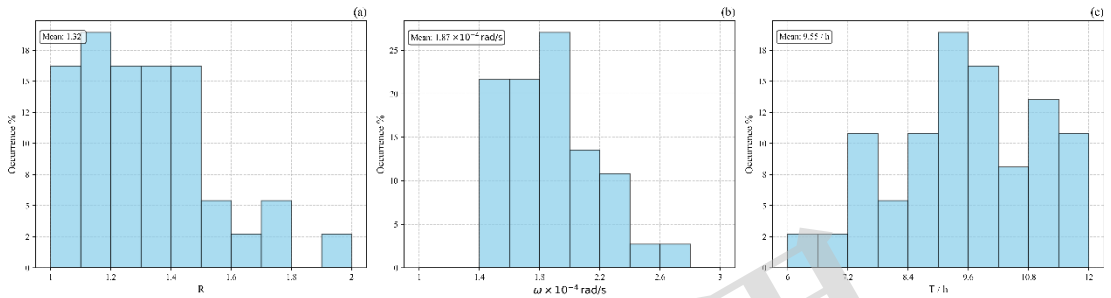


图 9： $70^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 地区本征频率与惯性频率的比值、本征频率和周期分布
(a) 本征频率与惯性频率的比值 (R)； (b) 本征频率； (c) 本征周期

Figure 9. Ratio of intrinsic frequency to inertial frequency, intrinsic frequency, and period distributions of gravity waves in the $70^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$ region.

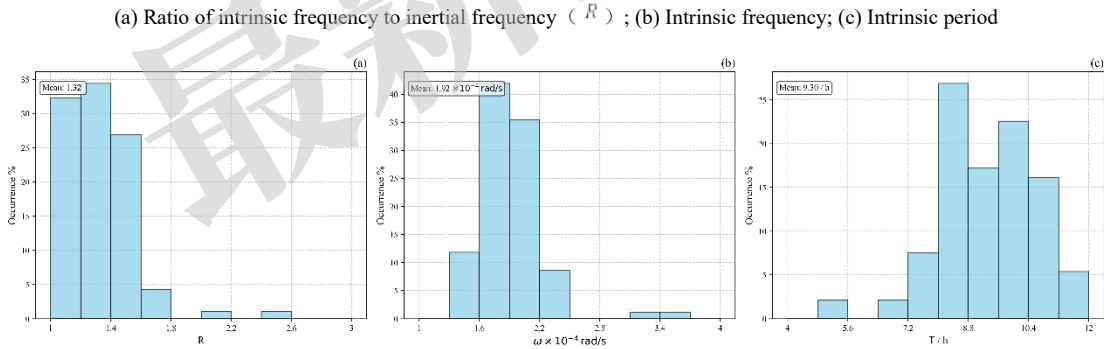


图 10： 80°N 以北地区本征频率与惯性频率的比值、本征频率和周期分布
(a) 本征频率与惯性频率的比值 (R)； (b) 本征频率； (c) 本征周期

Figure 10. Ratio of intrinsic frequency to inertial frequency, intrinsic frequency, and period distributions of gravity waves in the $\geq 80^{\circ}\text{N}$ region

(a) Ratio of intrinsic frequency to inertial frequency (R) ; (b) Intrinsic frequency; (c) Intrinsic period

2.5 波能量

惯性重力波的能量也是度量其强度的重要指标，波的总能量由动能和势能组成：

$E = E_K + E_P$ 。为获取波动能量的分布特征，计算了重力波的能量垂直输送和耗散，分析了

重力波的平均能量廓线，如图 11 为利用探空数据计算的重力波总能量随高度的垂直分布及分布比例，表 2 给出不同纬度带的重力波动能、势能、总能量及动能和势能的均值。北极重力波的总能量集中在 5 J/kg 以内，与中纬度部分测站[36][37] 8~10 J/kg 的重力波能量相比，北极地区的能量明显偏小。前人的研究[43][44]表明重力波能量随纬度增加而减少，本文计算的结论印证了前人的结果，但值得注意的是对比北极内的两个纬度带，70°~80°N 的总能量为 3.1J/kg，80°N 以北为 4.2J/kg，并没出现 80°N 以北的重力波能量比 70°~80°N 偏小的结果，这种随纬度的变化趋势没有在更高的纬度得到体现，这是因为较弱的背景风减弱了临界层效应的作用，有利于部分重力波向上传播并在低平流层保持较高能量^{[11][45]}，本文中 70°~80°N 与 ≥80°N 的平均风速剖面（图 3）显示 ≥80°N 区域背景风整体偏弱，这一差异可以解释为临界层过滤更弱，从而使得 ≥80°N 观测层的波能相对更大。此外，动能与势能的比值在 70°~80°N 为 6.39，在 80°N 以北为 5.30，动能比势能大很多，证明扰动主要是由惯性重力波而不是纯重力波组成[9]。能量的垂直分布结果表明，在 15~25 km 的高度内惯性重力波的总能量是随着高度增加的。

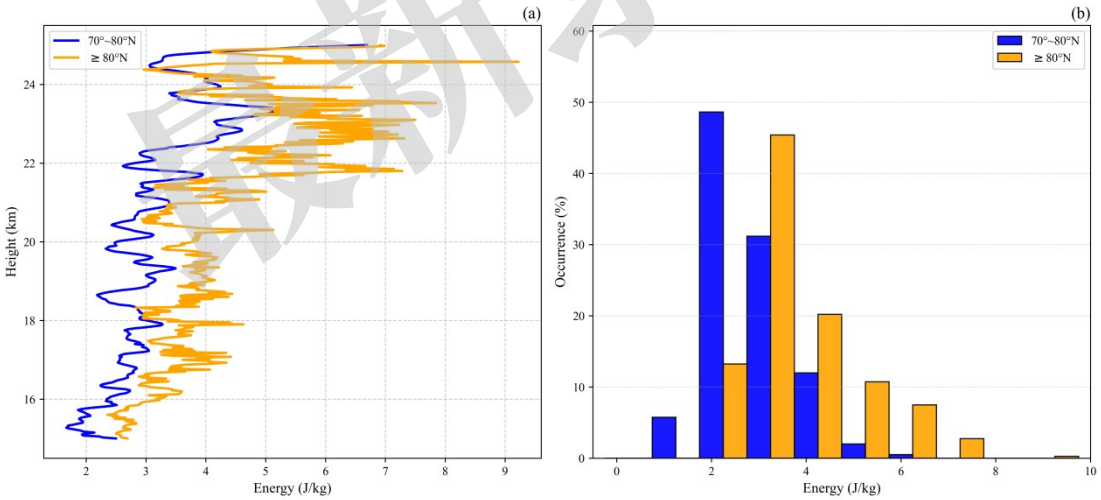


图 11：北极地区不同纬度带的大气重力波能量分布

(a) 平均能量的垂直分布；(b) 总能量比例

蓝色：70°~80°N；黄色：80°N 以北

Figure 11. Atmospheric gravity wave energy distribution in different latitude bands of the Arctic.

(a) Vertical distribution of mean energy; (b) Total energy proportion

blue: 70°-80°N; yellow: ≥80°N

表 2:不同纬圈的重力波能量均值及其比值

Table 2: Mean values of gravity wave energy for different latitude bands.

纬度	动能 (J/kg)	势能 (J/kg)	总能量 (J/kg)	动能/势能
70° ~80° N	2.6	0.5	3.1	6.39
80° N 以北	3.5	0.8	4.3	5.30

2.6 传播方向

为确定惯性重力波的水平传播方位角，采用椭圆拟合技术进行反演分析。首先构建纬向与经向风扰动的偏振椭圆，分析风矢端在不同高度的变化趋势，初步推断垂直传播方向和水平传播方位角。再结合水平风场和温度扰动的偏振关系，修正由 180°相位模糊带来的方向不确定性，从而获得最终的水平传播角。以 2018 年 8 月 16 日的观测为例（图 12），图中不同颜色（蓝、橙、绿）的数据点分别代表了 15 km、15.5 km 及 16 km 高度上的观测值。提取相应的矢端曲线后，可见不同高度处的 (u', v') 偏振椭圆随高度顺转，表明该惯性重力波的垂直传播方向为上行。计算得到 (u', v') 偏振椭圆长轴的方位角 $\theta = -29.5^\circ$ ，但由于 $(u', \hat{T})$ 偏振椭圆随高度逆转，所以波水平传播方向与预设方向相反，最终确定波的水平传播方位角 $\phi = 150.5^\circ$ 。

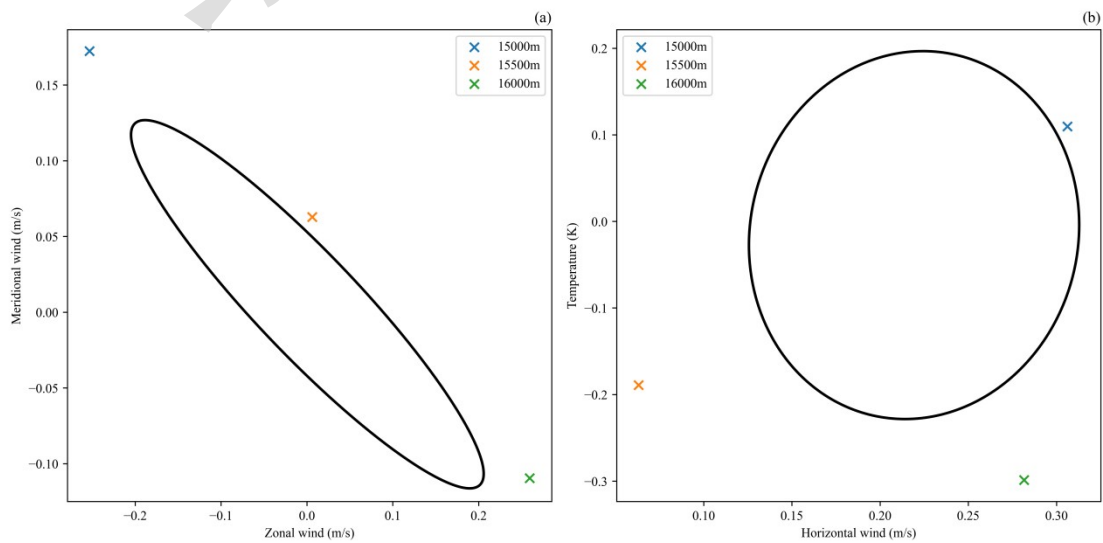


图 12：2018 年 08 月 16 日惯性重力波矢端曲线构成的偏振椭圆

(a) 惯性重力波纬向风和经向风扰动矢端曲线 (b) 水平风与温度扰动矢端曲线

蓝色橙色和绿色分别对应 15 km、15.5 km 和 16 km 高度

Figure 12. Polarization ellipses formed by hodographs of inertial gravity waves on 16 August 2018.

(a) Hodographs of zonal and meridional wind perturbations; (b) Hodographs of horizontal wind and temperature perturbations.

Blue, orange, and green represent altitudes of 15 km, 15.5 km, and 16 km, respectively.

表 3 和图 13 分别展现了计算得到的两个纬度带重力波垂直与水平传播方向的分布情况，图中径向刻度对应各圈内的波统计数量。绝大部分的重力波都是向上传播，只有少数向下传播，这和早期研究结果相似^{[19][25][26]}，表明惯性重力波由平流层以下的大气活动激发。在图 13(a)和(b)中，将整体的水平角 360°分成了 8 份，间隔 45°。0°、90°、180°和 270°的方位角分别对应着北、东、南和西四个方向，分析表明向东传播的波占比更多。受夏季北极中高层大气的背景风场影响，如图 14，2018、2020 与 2021 年 7~9 月风场三年平均表明，每年的 8 月份纬向东风都较为明显，而经向分量在南北方向上无明显差异，我们获得的探空观测数据样本也主要集中在 8 月份，因此能够较好反映该时段的局地背景流场。重力波的观测传播方向与相速度和背景风的差值有关，当二者接近时，波容易被耗散或吸收。这也是计算得到的传播方向在东西向上多为东向，而南北向差异不大的原因，这种背景风滤波效应导致观测到重力波传播方向的各向异性^[46]。

表 3：不同纬圈重力波垂直传播方向的个数统计

Table 3: Counts of upward and downward propagating gravity waves in different latitude bands

纬度	上传个数	下传个数
70° ~80° N	37	0
80° N 以北	88	5

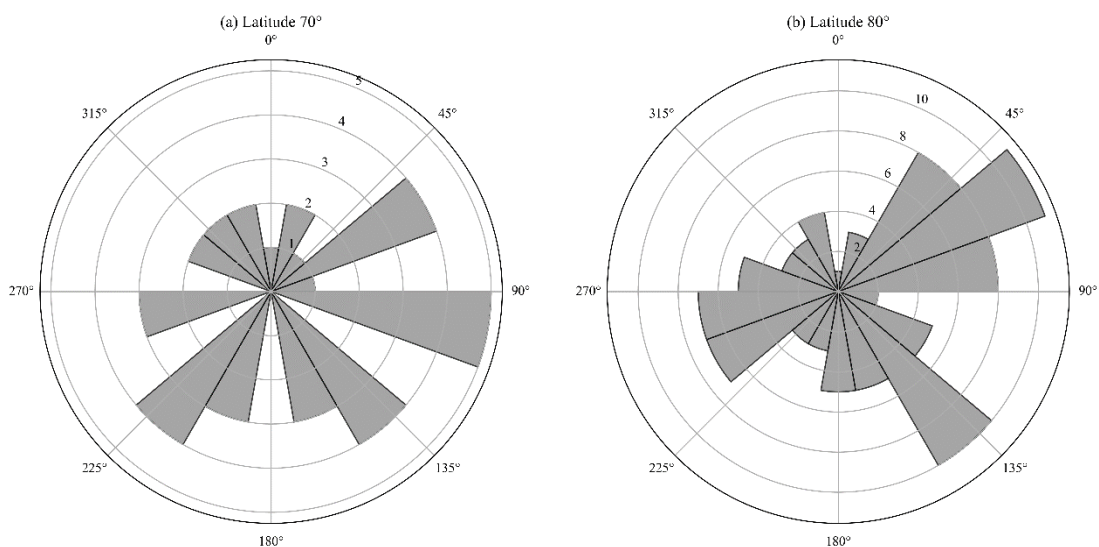


图 13: 北极地区不同纬度带的水平传播方向分布

(a) 70°~80°N; (b) 80°N 以北

Figure 13. Horizontal propagation direction distribution in different latitude bands of the Arctic.

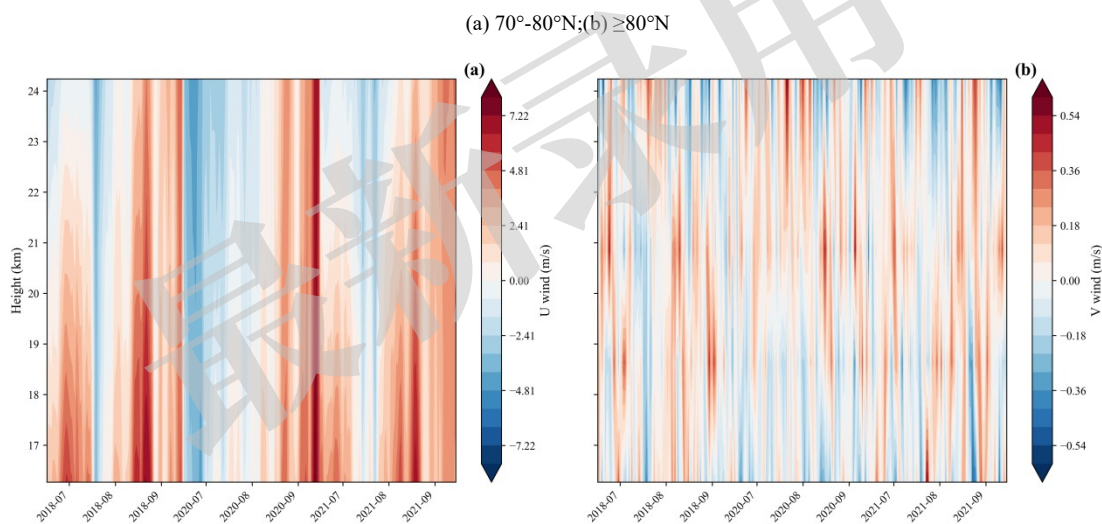


图 14: ERA5 风场三年月平均值在 70°~90°N 纬度带随时间和高度的变化 (2018、2020 与 2021 年 7~9 月)。

(a) 纬向风速; (b) 经向风速。

Figure 14. Time-height variations of the three-year monthly mean ERA5 wind fields in the 70°–90°N latitude band (July–September of 2018, 2020, and 2021).

(a) Zonal wind speed; (b) Meridional wind speed.

3 主要结果和讨论

本文利用 2018~2022 年期间的中国第 9、11 和 12 次北极科考 GPS 无线电探空仪的观测数据，研究了北极夏季上空低平流层背景大气惯性重力波的特征。分析了重力波的垂直、

水平波长、重力波的周期、本征频率、波能量及波传播等特征。北极重力波特征分析结果表明：

(1) 由温度、纬向风速和经向风速廓线确定极地重力波的垂直波长集中在 5km 以内。北极 70°~80°N 与 80°N 以上区域的温度扰动计算的波长普遍大于风速扰动计算的波长。温度扰动与风速扰动计算的垂直波长的平均值分别约为 3.8 km 和 2.3 km。

(2) 北极惯性重力波平均水平波长约为 400 km，水平波长与垂直波长比值达 60~100 倍，显示出显著的水平传播特性，表明重力波可在离开波源很远的区域被观测到。

(3) 北极地区风速与温度扰动振幅均明显小于中纬度地区，平均温度扰动幅度为 0.5~0.6 K，风速扰动幅度在 1m/s 左右，反映出相比中纬度区域极地大气重力波活动相对偏弱。

(4) 北极重力波的本征频率平均约为惯性频率的 1.3 倍，周期主要分布在 5~12 h，与中纬度地区相比，北极的两个纬度带的频率差异较小，符合惯性重力波频率随纬度增加而减小的分布规律。

(5) 北极地区重力波总能量集中在 5 J/kg 以内，整体呈现随高度增加而增大的趋势，80°N 以北的重力波能量比 70°~80°N 略偏大，这可能与更高纬区域背景风整体偏弱、临界层过滤作用相对减弱有关，从而有利于部分重力波传播并在低平流层保持较高能量。

(6) 北极重力波垂向以向上传播为主，水平方向以东传为主，这受北极极区的背景风影响，符合夏季背景风滤波效应。

需要指出的是，本文从背景风场临界层效应解释了 80°N 以北重力波能量偏高的异常特征，但仍存局限。北极重力波的产生与传播受到多种因素共同影响，包括背景风垂直切变、极锋急流变率、极地气旋活动、海冰分布以及地形强迫等，本文仅分析临界层过滤作用，未定量区分其他因子的贡献；且北极极区低平流层观测数据时空分辨率有限，单点探空观测可能对小尺度重力波的捕捉存在偏差，从而影响波能量的精确估计及区域对比。未来研究可结合多站点协同探空观测、卫星遥感资料以及高分辨率数值模式，系统评估不同波源对重力波能量分布的影响，并进一步量化背景风结构对重力波传播与耗散的作用，以更全面地理解北极重力波能量的分布特征。

致谢：本文的大气探空数据采集自中国北极科学考察，感谢国家海洋环境预报中心、中国气象科学研究院、中国极地中心雪龙船提供的数据支撑。

参考文献

- [1] HINES C O. The Upper Atmosphere in Motion[M]. Washington: American Geophysical Union, 1974: 1-328
- [2] FRITTS D C, ALEXANDER M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, **41**(1): 1003
- [3] MCLANDRESS C. On the importance of gravity waves in the middle atmosphere and their parameterization in general circulation models[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, **60**(14): 1357-1383
- [4] TRINH Q T, ERN M, DOORNBOS E, *et al.* Satellite observations of middle atmosphere–thermosphere vertical coupling by gravity waves[J]. *Annales Geophysicae*, 2018, **36**(2): 425-444
- [5] ZENG X Y, XUE X H, DOU X K, *et al.* COSMIC GPS observations of topographic gravity waves in the stratosphere around the Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, **60**(1): 188-197
- [6] PERRETT J A, WRIGHT C J, HINDLEY N P, *et al.* Determining gravity wave sources and propagation in the Southern Hemisphere by ray-tracing AIRS measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(2): e2020GL088621
- [7] DÖRNBRACK A, LEUTBECHER M, REICHARDT J, *et al.* Relevance of mountain wave cooling for the formation of polar stratospheric clouds over Scandinavia: Mesoscale dynamics and observations for January 1997[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D2): 1569-1581
- [8] DÖRNBRACK A. Stratospheric mountain waves trailing across northern Europe[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021, **78**(9): 2835-2857
- [9] BIAN J C, CHEN H B, LÜ D R. Statistical characteristics of gravity waves in the lower stratosphere over Beijing observed by high vertical resolution radiosonde data[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, **34**(8): 748-756, doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2004.08.007 (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, doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2004.08.007)
- [10] ALEXANDER M J, GELLER M, MCLANDRESS C, *et al.* Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, **136**(650): 1103-1124
- [11] DÖRNBRACK A, GISINGER S, KAIFLER N, *et al.* Gravity waves excited during a minor sudden stratospheric warming[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(17): 12915-12931
- [12] HIERRO R, STEINER A K, DE LA TORRE A, *et al.* Orographic and convective gravity waves above the Alps and Andes Mountains during GPS radio occultation events – a case study[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(6): 3523-3539
- [13] ERN M, TRINH Q T, PREUSSE P, *et al.* GRACILE: a comprehensive climatology of atmospheric gravity wave parameters based on satellite limb soundings[J]. *Earth System Science Data*, 2018, **10**(2): 857-892
- [14] DÖRNBRACK A, GISINGER S, KAIFLER B. On the interpretation of gravity wave measurements by ground-based lidars[J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(3): 49

- [15] GUO Wenjie, YAN Zhaoai, HU Xiong, *et al.* Seasonal variation of atmospheric temperature and gravity wave activity over Beijing area[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(2): 177-184 (郭文杰, 闫召爱, 胡雄, 等. 北京地区大气温度及重力波活动的季节变化[J]. *空间科学学报*, 2017, **37**(2): 177-184)
- [16] ALEXANDER M J, BERES J H, PFISTER L. Tropical stratospheric gravity wave activity and relationships to clouds[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D17): 22299-22309
- [17] HAMILTON K. Climatological statistics of stratospheric inertia-gravity waves deduced from historical rocketsonde wind and temperature data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, **96**(D11): 20831-20839
- [18] 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**(3): 665-673
- [19] WANG Xuelian. Gravity Wave Activity in the Tropical Lower Stratosphere with High Vertical Resolution Radiosonde Data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2006 (王雪莲. 利用高分辨探空资料分析热带下平流层重力波活动[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006)
- [20] VINCENT R A, JOAN ALEXANDER M. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: An observational study of seasonal and interannual variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D14): 17971-17982
- [21] MOFFAT-GRIFFIN T, HIBBINS R E, JARVIS M J, *et al.* Seasonal variations of gravity wave activity in the lower stratosphere over an Antarctic Peninsula station[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D14): D14111
- [22] ZHANG J, GUO J P, XUE H L, *et al.* Tropospheric gravity waves as observed by the high-resolution China Radiosonde Network and their potential sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(23): e2022JD037174
- [23] SCREEN J A, SIMMONDS I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. *Nature*, 2010, **464**(7293): 1334-1337
- [24] SCREEN J A, SIMMONDS I. Increasing fall-winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(16): L16707
- [25] YANG Zunxun, HUANG Kaiming, WANG Rui, *et al.* An observational study of inertia gravity waves in the lower stratosphere over the Arctic[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, **62**(8): 2793-2805 (杨遵勋, 黄开明, 王睿, 等. 北极地区低平流层惯性重力波的观测研究[J]. *地球物理学报*, 2019, **62**(8): 2793-2805)
- [26] SONG Yanglizi, HUANG Kaiming. A radiosonde observation study of inertia gravity waves over the high latitudes[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2020, **66**(6): 541-551 (宋杨力子, 黄开明. 高纬地区惯性重力波的无线电探空仪观测研究[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2020, **66**(6): 541-551)
- [27] DAMMANN D O, JOHNSON M A, MAHONEY A R, *et al.* First observations of sea ice flexural-gravity waves with ground-based radar interferometry in Utqiagvik, Alaska[J]. *The Cryosphere*, 2023, **17**(4): 1609-1622

- [28]HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, *et al.* The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, **146**(730): 1999-2049
- [29]ZÄNGL G, HOINKA K P. The tropopause in the polar regions[J]. *Journal of Climate*, 2001, **14**(14): 3117-3139
- [30]MATEUS P, MENDES V B, PIRES C A L. Global empirical models for tropopause height determination[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(17): 4303
- [31]WANG Bo, HU Xiong, XIAO Cunying, *et al.* Gravity wave characteristics in the lower stratosphere over Korla, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(9): 3560-3566 (王博, 胡雄, 肖存英, 等. 新疆库尔勒地区秋季下平流层重力波特性[J]. *地球物理学报*, 2018, **61**(9): 3560-3566)
- [32]YANG Z X. Radiosonde Observational Study of Inertia Gravity Waves in the Lower Stratosphere[D]. Wuhan: Wuhan University, 2025 (杨遵勋. 低平流层惯性重力波的无线电探空仪观测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2025)
- [33]YOSHIKI M, SATO K. A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D14): 17995-18011
- [34]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
- [35]LEENA P P, RATNAM M V, MURTHY B V K. Inertia gravity wave characteristics and associated fluxes observed using five years of radiosonde measurements over a tropical station[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, **84-85**: 37-44
- [36]ZHANG S D, YI F. Latitudinal and seasonal variations of inertial gravity wave activity in the lower atmosphere over central China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D5): D05109
- [37]ZHANG S D, YI F, HUANG C M, *et al.* High vertical resolution analyses of gravity waves and turbulence at a midlatitude station[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D2): D02103
- [38]ZHANG S D, YI F. A numerical study on global propagations and amplitude growths of large-scale gravity wave packets[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D7): D07106
- [39]ZINK F, VINCENT R A. Wavelet analysis of stratospheric gravity wave packets over Macquarie Island: 1. Wave parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D10): 10275-10288
- [40]YAMAMORI M, SATO K. Characteristics of inertia gravity waves over the South Pacific as revealed by radiosonde observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**(D16): D16110
- [41]ZHANG S D, YI F, HUANG C M, *et al.* Latitudinal and altitudinal variability of lower atmospheric inertial gravity waves revealed by U.S. radiosonde data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(14): 7750-7764

- [42]ZHANG S D, HUANG C M, HUANG K M, *et al.* Spatial and seasonal variability of medium- and high-frequency gravity waves in the lower atmosphere revealed by US radiosonde data[J]. *Annales Geophysicae*, 2014, **32**(9): 1129-1143
- [43]LUO J, HOU J L, XU X H. Variations in stratospheric gravity waves derived from temperature observations of multi-GNSS radio occultation missions[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(23): 4835
- [44]STRELNIKOVA I, ALMOWAFY M, BAUMGARTEN G, *et al.* Seasonal cycle of gravity wave potential energy densities from lidar and satellite observations at 54° and 69°N[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021, **78**(4): 1359-1386
- [45]RHODE S, PREUSSE P, UNGERMANN J, *et al.* Global-scale gravity wave analysis methodology for the ESA Earth Explorer 11 candidate CAIRT[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, **17**(19): 5785-5819
- [46]MEDEIROS A F, TAYLOR M J, TAKAHASHI H, *et al.* An investigation of gravity wave activity in the low-latitude upper mesosphere: propagation direction and wind filtering[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D14): 4411

陈永祺 女，2000年7月出生于湖北省咸宁市，现为国家海洋环境预报中心在读硕士研究生，专业气象学，主要研究方向为北极大气惯性重力波。

秦昕，女，1988年11月出生于广西省桂林市，现为国家海洋环境预报中心，高级工程师，主要研究方向为极地天气与气候变化研究、极地气象观测分析、南北极科考气象保障等。

魏立新 女，1973年1月出生于黑龙江省双城市，现为国家海洋环境预报中心研究员，硕士生导师，主要研究方向为海洋天气预报技术、极区天气与气候变化研究等。