

中层大气静力稳定性减弱趋势——历史火箭探空数据分析

王丽吉 陈泽宇 凌超 吕达仁

Decreasing trend of the middle atmospheric static stability in historical data from rocketsonde network

Wang Li-Ji Chen Ze-Yu Ling Chao Lü Da-Ren

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 169201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.169201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.169201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地转动量近似下的Q矢量及其在天气图上的应用

Geostrophic momentum approximation Q-vector and its application in synoptic charts

物理学报.2014, 63(6): 069201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.069201>

台风莫拉克(2009)暴雨过程中位势切变形变波作用密度诊断分析和预报应用

Diagnosis and application of potential shear deformation wave-activity density in the torrential rain of Typhoon Morokat (2009)

物理学报.2013, 62(9): 099201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.099201>

斜压二层模式框架下的准地转理论及其应用

Quasi-geostrophic theory and its application based on baroclinic two-layer model

物理学报.2013, 62(2): 029201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.029201>

估算大气重力波参数的垂直扰动廓线获取新方法

A new method of obtaining perturbation vertical profiles in estimating the atmosphere gravity wave parameters

物理学报.2012, 61(18): 189201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.189201>

2011年春夏季长江中下游地区旱涝急转特征分析

Analysis of characteristics of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in spring and summer in 2011

物理学报.2012, 61(10): 109202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.109202>

# 中层大气静力稳定性减弱趋势 ——历史火箭探空数据分析\*

王丽吉<sup>1)2)</sup> 陈泽宇<sup>1)†</sup> 凌超<sup>1)</sup> 吕达仁<sup>1)</sup>

1)(中国科学院大气物理研究所, 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2015年2月11日收到; 2015年3月28日收到修改稿)

大气静力稳定性参数 Brunt-Vaisala 频率反映了以温度垂直梯度为代表的大气整体结构的特征. 全球增暖背景下, 学术界对中层大气静力稳定性的响应形式还相当缺乏了解. 利用历史火箭探空资料, 考察了 1962—1991 年期间从赤道到北半球中纬度地区中层大气静力稳定性 (Brunt-Vaisala 频率的平方,  $N^2$ ) 的长期趋势. 结果表明, 对于选取的 6 个典型站点, 在平流层上部到中间层中部区域 (48—60 km), 所有站点大气静力稳定性一致呈现显著减弱的长期趋势. 48—60 km 整层平均  $N^2$  长期趋势统计结果表明, 在两个热带站点,  $N^2$  长期趋势一致, 每十年减小  $0.11 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ ; 随着纬度增加, 在从  $22^\circ\text{N}$  (Barking Sand 站) 向  $38^\circ\text{N}$  (Wallops Island 站) 过渡的区间内,  $N^2$  趋势从  $-0.16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$  增强到  $-0.22 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$ .

**关键词:** 静力稳定性, 减弱趋势, 中层大气, 火箭探空

**PACS:** 92.60.hc, 92.60.H-, 92.60.-e, 92.60.Ry

**DOI:** 10.7498/aps.64.169201

## 1 引言

Brunt-Vaisala 频率是描述大气静力稳定性的指标, 建立在垂直温度梯度基础之上. Brunt-Vaisala 频率具有刻画和控制大气环流的作用, 例如, 它是判断对流活动发生的指标, 是中纬度斜压系统发展以及对流层顶高度的控制参数<sup>[1]</sup>. 在刻画大气波动性质方面, 它代表浮力控制下大气质点垂直振动的频率<sup>[2]</sup>, 是相关的动力学方程中的环境控制参数, 例如, 它是重力波频散关系和能量估计的尺度因子.

地球大气的整体特征之一是温度随高度变化, 是全球动力学约束的表现形式<sup>[1,3,4]</sup>. Santer 等<sup>[5]</sup> 使用当时多个国际研究机构完成的面向二氧化碳增暖效应的大气环流模式 (GCM) 长期模拟实验结果考察了全球温度结构的变化形式, 同时结合无线

电探空数据开展分析和比较, 结果表明模拟和观测分析之间存在相当好的相似性. 在此基础上, 他们强调在研究人类活动导致全球增暖方面, 应该注重从大气整体特征角度开展考察. 已经有大量研究人员将其研究焦点集中到考察对流层温度垂直结构方面, 其中将 Brunt-Vaisala 频率作为衡量大气整体特征的一个代用指标, 通过数值模拟和观测资料分析考察 Brunt-Vaisala 频率的全球分布控制机理及其对全球增暖的响应形式<sup>[6-9]</sup>. 例如, Juckes<sup>[6]</sup> 考察了伴随气旋过程的对流潜热加热在控制中纬度静力稳定性方面的作用, 进而推测“中纬度对流层增温将伴随大气稳定性增强”. 近年来, 围绕这种观点开展了持续的分析验证工作<sup>[7-9]</sup>.

虽然还存在一定的不确定性<sup>[10]</sup>, 利用卫星数据 (stratospheric sounding unit SSU; microwave sounding unit MSU)<sup>[11-12]</sup>、历史火箭探空数据<sup>[13]</sup> 以及瑞利激光雷达等<sup>[14]</sup> 开展分析, 主要结果显示

\* 中国科学院重点部署项目 (批准号: KZZD-EW-01-1) 和国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 41405042) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: z.chen@mail.iap.ac.cn

平流层/中层大气处在变冷状态. 例如, Dunkerton等<sup>[13]</sup>使用历史火箭探空数据针对上平流层和下中间层区域(30—60 km)温度变化趋势的估计表明,在1962—1991年期间,这个区域的整体趋势为每十年温度降低1.7 K. 近来, Xu等<sup>[15]</sup>给出了从无线电探空数据得到的1979—2005年期间全球纬圈平均温度在对流层下部到30 hPa区间各层的温度变化趋势,其中平流层变冷的趋势在不同研究机构发布的基于无线电探空数据的分析结果中都清晰地表达出来.

当前,从温度垂直结构角度考察中层大气变化趋势的研究仍然非常有限. 无线电探空覆盖年份较长,也具有较好的连续性,但探测高度只能覆盖低平流层<sup>[16]</sup>,不能满足相关研究的需要. 激光雷达探测数据可以覆盖中层大气,但是有关研究主要面向暂态过程,如环境稳定性与波动传播关系等方面. 例如, Sica和Thorsley<sup>[17]</sup>使用12次夜间观测数据考察中间层顶附近出现的超绝热层结现象; Zhao等<sup>[18]</sup>和Liu等<sup>[19]</sup>利用纳荧光激光雷达获取的温度和风廓线数据考察中间层顶附近对流不稳定结构的出现频率和估计与此相关的湍流的混合效应. 虽然有一些利用较长时间序列开展的统计分析工作,但是都仅仅局限在讨论季节变化的特征方面. 例如, Gardner等<sup>[20]</sup>使用为期一年的观测数据考察80—105 km高度范围中大气稳定性的季节变化特征,而常启海等<sup>[21]</sup>使用为期一年的瑞利激光雷达数据考察武汉上空30—60 km高度静力稳定性的特征.

本文使用一个历史火箭探空数据集考察中层大气静力稳定性参数(Brunt-Vaisala频率). 这个数据集是由国际SPARC (Stratosphere-troposphere Processes and their Role in Climate)计划整理形成,并通过其数据中心向学术界发布(<http://www.sparc.sunysb.edu>). 该数据集主要包含1969—1991年期间火箭探空网的历史观测,由NCAR (National Center for Atmospheric Research)和CPC (Climate Prediction Center)收集;也包含一些1969年以前的观测(可以回溯到1957年),在垂直方向被归并到2 km间隔的高度坐标上. 组成火箭探空网的站点主要位于北美,也有一些位于热带. 数据的组织方式是按测站进行打包,而对于每一次探测过程,还将火箭探空数据和与

之配合的无线电探空数据整理在一起. Dunkerton等<sup>[13]</sup>曾经使用这个数据集研究60—80年代中层大气温度的变化趋势,应用结果表明其中的数据具有较好的一致性. 在垂直方向,大部分资料都能够达到60 km以上,同时具有相当高的垂直分辨率(对于1969—1991年期间的数据,垂直分辨率为500 m). 本文基于这些数据首先计算了大气静力稳定性参数,即Brunt-Vaisala频率,进而考察从1960年至1980年期间中层大气中部(20—60 km)静力稳定性的长期变化特征.

## 2 资料和方法

### 2.1 火箭探空数据

该数据集包括全球48个站点,除了位于北美地区,还包括若干热带站点. 在每个站点的观测数据(包括火箭探空和无线电探空)包括大气要素,如温度、气压、风速等;同时提供与探测过程相关的信息,如与探空过程的起始和终止对应的时间/高度.

在这个数据集中,最早的数据记录开始于1957年,站点之间在时间覆盖水平方面有所不同,大部分观测集中在60—80年代. 虽然个别探测过程可以到达100 km高度,这样的情况非常稀少. 通常情况下,火箭探空的覆盖范围在65 km以下. 考虑到这种情况,本文的分析集中在60 km高度以下.

本文选取了6个时间跨度相对较长的站点开展分析,具体信息见表1. 在选择站点时也考虑了它们的纬度代表性,从而使本文结果覆盖从热带到北半球中纬度的区域. 这些站点的数据被不同的研究人员使用过,例如,Ascension站和Kwajalein站数据被用于考察热带中层大气SAO(semi-annual oscillation)<sup>[22–24]</sup>; Hayashi等<sup>[25]</sup>使用Kwajalein站数据考察惯性不稳定条件下的水平风场扰动特征; Dunkerton等<sup>[13]</sup>使用这6个站点的数据考察全球30—60 km范围中层大气的温度趋势.

本文分析工作以月平均估计为基础开展. 对于不同站点,逐月的观测次数不是固定的,这种情况随年代也存在变化. 首先,逐站点对逐月观测次数的分布进行检查. 以Ascension站为例,根据数据集说明文件,该站在1963—1990年期间共有2580次观测;图1给出了1959—1991期间逐年各月观测

表 1 6 个站点的经纬度、观测总次数以及观测年份

Table 1. Information of the geo-location of the six stations, total number of the soundings, and the associating time coverage at the respective stations.

站点	位置	纬度和经度	观测总次数	覆盖年份
Ascension Island (Ascen)	Southern Atlantic Ocean	8°S 14°W	2580	1962—1977, 1979—1990
Kwajalein (Kwaj)	Marshall Islands	8°N 167°E	1861	1963—1966, 1969—1992
Barking Sand (Brksnd)	Hawaii	22°N 159°W	2812	1960, 1962—1990
Cape Kennedy (Capek)	Florida	28°N 80°W	4362	1960—1977, 1979—1990
Pt Mugu	California	34°N 119°W	3785	1960—1990
Wallops Island (Wallops)	Virginia	38°N 75°W	3149	1960—1989

次数. 其中, 一年的 12 个月对应不同颜色的条棒, 条棒长度表示观测次数, 所有条棒累积的总长度表示一年中的测量次数. 图 1 显示从 1985 年开始探测频率明显减少. 在 1985 年以前, 大多数月份有 10 次左右观测, 而从 1985 年开始逐月的月观测通常少于 5 次. 考虑到这样的情况, 我们在针对某月开展月平均统计时要求落在该月的探空次数大于 3 次.

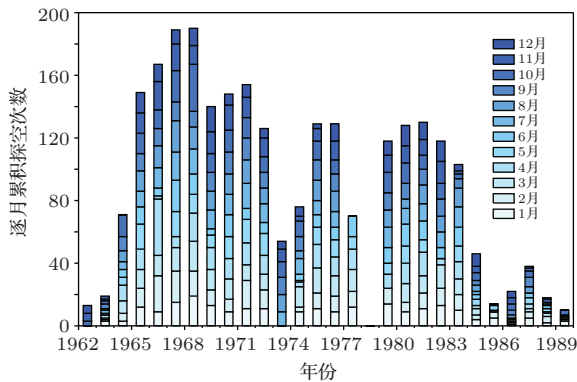


图 1 Ascension 站逐年逐月探空次数, 横坐标为年, 纵坐标为一年中 1—12 月依次累计探测次数, 由 12 个不同颜色的条棒组成, 条棒的长度代表测量次数的多少

Fig. 1. Annual number of soundings at Ascension; for each year, monthly profiles numbers are denoted by the length of a bar of the color designated to calendar month; abscissa is year, ordinate is number of soundings.

## 2.2 处理方法

对于每一次探空廓线提供的温度数据, 按照 (1) 式计算 Brunt-Vaisala 频率 ( $N$ ):

$$N^2 = \frac{g}{T} \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{C_p} \right). \quad (1)$$

在处理 1975 年以前的数据时考虑了有关的数

据订正情况, 应用了数据集提供的温度订正数据, 详情请参见 Dunkerton 等 [13] 对相关情况的介绍.

在计算  $N^2$  之前, 将温度探测数据归并到间隔 2 km 的垂直坐标上. 这样的处理主要用于 1969 年以后的数据, 这些数据的平均垂直分辨率为 500 m, 这种归并过程相当于对数据做平滑处理. 1969 年以前的数据已经被控制数据公司 (Control Data Corporation, CDC) 预处理过, 落在 2 km 间隔的垂直坐标上.

在逐廓线计算结果的基础上, 进一步按照日历年进行统计, 对探测时间属于相同日历月的所有  $N^2$  估计结果进行平均, 形成月平均廓线. 然后再以此为基础计算多年平均廓线. 图 2 给出了 Ascension 站多年平均  $N^2$  随高度的变化结果. 本文主要关注中层大气, 图 2 纵坐标起始高度设置在 20 km.

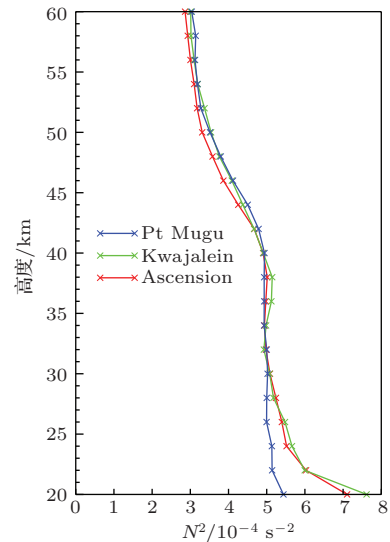


图 2 Ascension, Kwajalein 和 Pt Mugu 三个站点多年平均的  $N^2$  随高度的变化

Fig. 2. Correlation of  $N^2$  with height at Ascension, Kwajalein, and Pt Mugu stations.

参照表 1, Ascension 站位于南半球热带纬度 (8°S); 作为比较, 图 2 同时给出了在北半球热带相同纬度, 即 Kwajalein 站 (8°N) 的分析结果. 在多年平均意义上, 这两个热带站点上的  $N^2$  呈现出几乎相同的随高度变化的特点. 这种一致性在平流层中下层尤其显著, 与北半球中纬度 PtMugu 站 (34°N) 相比, 热带地区静力稳定性显著强于中纬度地区.

### 3 结 果

#### 3.1 月距平和典型周期

对于上述 6 个站点, 我们利用逐月平均估计值, 结合对应的多年平均估计结果, 计算得到了各站点 20—60 km 高度区间内相对于多年平均的  $N^2$  距平结果. 以 Ascension 站为例, 图 3 给出了  $N^2$  距平随时间在 20—60 km 高度区间的分布, 图中的空白区域表示在对应时段缺少有效估计值 (无测量或探空次数少于规定的统计标准 3 次).

图 3 显示, 在考察时段内 (为期 30 年) 大气静力稳定性呈现减弱的趋势, 对于 50 km 以上区域这种

情形更为显著; 在这些高度  $N^2$  距平从 1965—1970 年期间的  $+0.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$  减小到 1974—1980 年期间的  $-0.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ .

$N^2$  距平的长期趋势在平流层中部 (35 km 以下) 不明显. 实际上, 在这些高度, 所有站点上都存在形式不同的盛行 (准) 周期变化信号. 对于热带站点, 以 Ascension 站为例, 一个显著的变化过程是准两年过程, 它们应该是 QBO (Quasi-Biennial Oscillation) 过程控制的结果. 对于时间序列长期趋势估计而言, 这些周期性过程的存在会造成趋势估计结果的混淆, 需要预先剔除. 这样需要对原数据序列中的周期性过程获得定量认识. 为此, 本文使用 Lomb-Scargle 周期图分析方案开展了有关谱分析, 相关程序源代码取自文献 [26]. 图 4 是针对 Ascension 站平流层中下部区域 (35 km 以下) 谱分析的平均结果. 在创建这个分析结果的过程中, 首先将各分析高度的原始  $N^2$  距平信号归一化, 然后在各高度分别开展 Lomb-Scargle 周期图分析获得能量谱, 最后将这些高度上的分析结果进行平均.

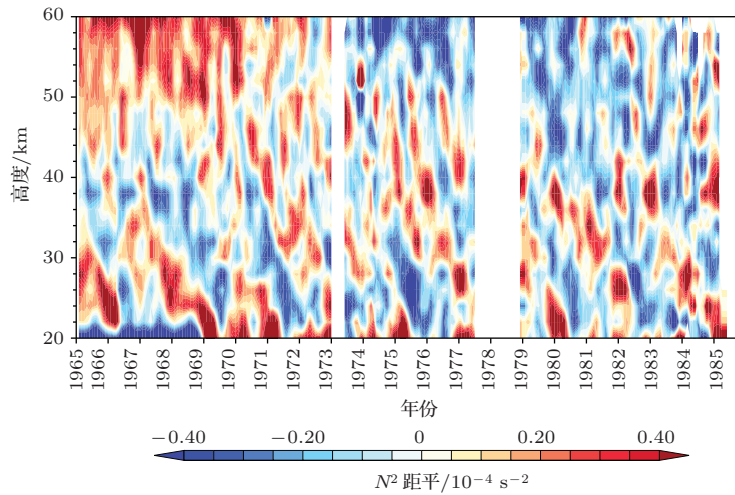


图 3 Ascension 站  $N^2$  距平

Fig. 3. Time height cross-section of the anomaly of  $N^2$  at Ascension station.

图 4 显示, 在低频端存在一个宽频带高能量信号, 它应该与太阳活动周期相关, 虽然它的中心周期略长于典型的 11 年太阳活动周期; 还看到一个中心位于周期约为 3 个月的能谱峰值, 但是强度较小. 此外, 图 4 显示存在三个高能峰值, 从左至右依次对应 QBO 过程、年变化过程和 SAO 过程. 这些都是典型的热带平流层周期信号.

同样的分析工作也在其他站点上开展, 结果

表明, 热带站点 (如 Kwajalein) 的情况与 Ascension 站高度一致, 随着站点逐渐离开赤道, 热带信号 (QBO 和 SAO) 逐渐减弱, 进而在中纬度站点 (如 Pt Mugu 和 Wallops Island) 年变化信号几乎成为惟一的盛行扰动.

谱分析结果显示这些盛行扰动在周期方面存在一定的倍数关系 (虽然并非严格满足). 这提示我们选择以上三种周期中数值较大的作为时间滑

动基础, 就能够有效地将高频成分过滤掉. 基于这种思路, 我们对所有站点的各分析高度使用为期 13 个月的时间窗方案执行滑动平均. 另外, 在上述结果的基础上, 我们还针对 Ascension 和 Kwajalein 这两个最靠近赤道的站点再次使用为期 28 个月 (QBO 平均周期) 的滤波窗执行滑动平均计算, 以进一步剔除 QBO 信号.

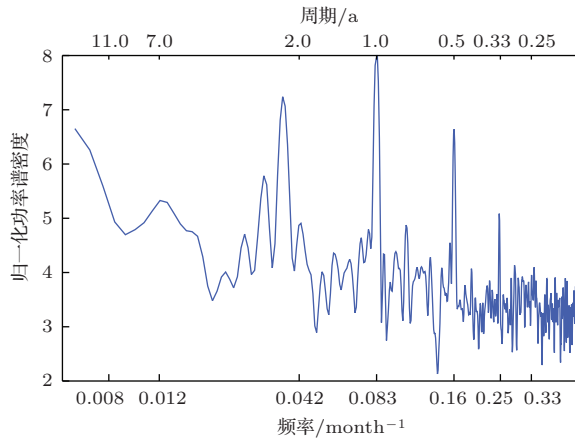


图 4 Ascension 站归一化  $N^2$  距平 Lomb-Scargle 周期图分析结果

Fig. 4. Lomb-Scargle periodogram estimates of the normalized  $N^2$  anomaly at Ascension. Abscissa is frequency (1/month), the corresponding period (year) is labeled at the top; ordinate is power spectral density estimate for normalized  $N^2$  anomaly.

### 3.2 长期变化趋势

利用上述经过滤波的大气静力稳定度时间序列, 经过一元线性回归分析获得了对长期趋势的估计结果. 图 5 给出了所有上述 6 个站点上空各高度趋势估计结果, 单位是  $10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$ . 图 5 表明, 在 40 km 以下高度, 大气静力稳定性呈现相对稳定的状态, 在为期 30 年的时段内没有出现显著的趋势性漂移. 然而值得关注的是, 图 5 还表明显著的稳定性减弱趋势出现在从平流层上部到中间层中部 (40—60 km) 区域中, 其中在高于 48 km 的范围内这种趋势尤其明显. 对于这一结果, 我们根据线性回归参数检验理论<sup>[27]</sup> 对趋势估计结果开展了统计检验, 结果表明图 5 中在 48 km 以上高度得到的趋势估计值的置信度均达到 99% 以上. 在 48 km 高度除了 Capek 站和 Wallops 站外, 其余四站统计结果均通过了 0.01 信度检验. 检验结果还表明从 50 km 开始, 所有六站趋势估计结果均通过了信度 0.01 检验.

本文进一步考察了 48—60 km 区间  $N^2$  趋势的细节. 对于这些高度, 作者将上述经过滤波后得到的  $N^2$  距平分析结果在垂直方向进行平均, 作为 48—60 km 区间大气静力稳定性距平的代表. 图 6 给出了对这 6 个站点的分析结果.

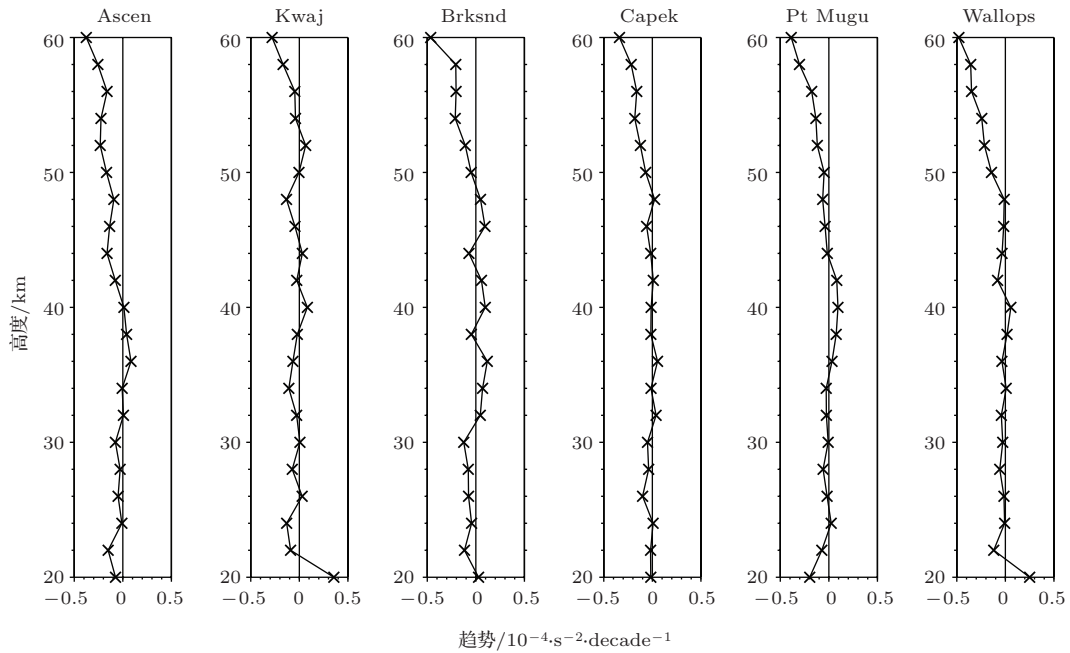


图 5 分析站点上空  $N^2$  距平长期趋势拟合结果

Fig. 5. Trend estimates for the six stations, Abscissa is trends ( $10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$ ), ordinate is height (km).

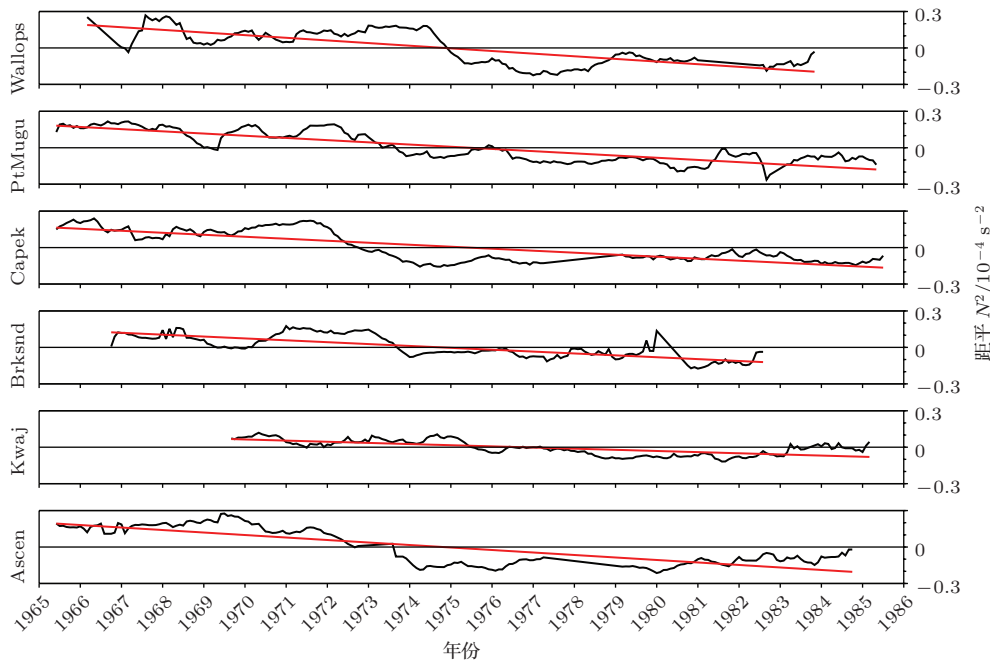


图6 分析站点 48—60 km 范围平均  $N^2$  距平随时间的变化趋势 (红色实线为线性拟合趋势)

Fig. 6.  $N^2$  anomaly averaged over 48–60 km and smoothed by 13-month running window, solid red line in each Panel represents the linear fit for trend estimates for the respective station.

与图5进行比较可以发现,在当前关注的48—60 km高度范围中,图6所给出的整层平均 $N^2$ 长期变化趋势与图5中给出的逐层统计结果是一致的.对图6中各站点的数据进一步开展线性拟合,图6中红色实线表示相应的拟合结果.表2列出了与上述各站点红色趋势线对应的斜率,代表这些站点 $N^2$ 减小的速度.表2显示,静力稳定性减弱是这些站点的主要特征,同时还表明这种趋势的强度依站点而不同,在表现上呈现随纬度增大而增强的特点.例如,在两个热带站点, $N^2$ 长期趋势基本一致;随着纬度增加,在从22°N (Barking Sand站)向38°N过渡的区间内, $N^2$ 减小的趋势从 $-0.16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$ 增强到 $-0.22 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$ .

表2 1962—1991年间北半球中层大气静力稳定性长期变化趋势

Table 2. Long-term trend of the static stability in the northern hemispheric middle atmosphere over 1962–1991.

站点	纬度	线性趋势/ $10^{-4} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{decade}^{-1}$
Ascension Island	8°S	-0.12
Kwajalein	8°N	-0.11
Barking Sand	22°N	-0.16
Cape Kennedy	28°N	-0.19
Pt Mugu	34°N	-0.20
Wallops Island	38°N	-0.22

## 4 结 论

利用1962—1991年期间高分辨火箭探空资料考察了北半球中层大气20—60 km区间静力稳定性(Brunt-Vaisala频率的平方,  $N^2$ )的长期变化特征.基于6个典型站点开展分析的结果表明,在这个为期30年的观察时段内,从赤道到北半球中纬度,平流层上部直到中间层中部区域(48—60 km)整层大气静力稳定性一致呈现显著减弱的长期趋势.整层平均 $N^2$ 长期趋势统计结果表明,在两个热带站点, $N^2$ 长期趋势一致,每10年减小 $0.11 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ ;随着纬度增加,在从22°N (Barking Sand站)向38°N过渡的区间内, $N^2$ 趋势从 $-0.16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$ 增强到 $-0.22 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$ .

考虑到参数 $N^2$ 的背景数值为 $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ (图2),这种稳定性减弱趋势是相当可观的,因此需要就当前估计结果中的不确定性开展讨论.受观测序列时间覆盖长度的限制,趋势估计结果中可能混淆了一些自然过程的影响.例如,典型的11年太阳周期过程无法有效从序列中剔除.另外数据集自身的不足(例如缺测和1985年后测量频次降低等)也可能引入一定的不确定性.

虽然存在上述问题,这个数据集的数据支持

当前的趋势拟合结果. 例如, 图3的确显示48 km以上1965—1985期间内 $N^2$ 呈显著减小趋势, 这与图6结果是一致的. 另外, 我们也注意到, 实际上在大部分台站, 1980年代后期开始 $N^2$ 距平都高于趋势线(图6). 因此, 如果时间序列进一步扩充, 会对当前估计结果有一定的修正作用.

最后就40 km以下高度得到的趋势分析结果开展讨论. 图5显示在为期30年的分析时段内, 在所分析的高度上,  $N^2$ 呈现相对稳定的状态. 针对这种情况, 我们首先从统计角度开展了验证工作, 结果表明在这些高度上得到的趋势估计值都落在合理的置信区间以外. 除了这些来自统计检验理论的支持外, 近年来Grise等<sup>[28]</sup>针对全球平流层 $N^2$ 多年平均分布的分析结果也为本文结果的可靠性提供了支持.

Grise等<sup>[28]</sup>使用2002—2008期间CHAMP卫星获取的GPS温度数据考察了5—30 km高度范围中 $N^2$ 全球分布. 该文图1显示, 在平流层中 $N^2$ 高值中心出现在20 km高度并对称地分布在两半球的热带纬度, 中心数值为 $7-8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ ; 而在 $30^\circ\text{N}$ 附近, 20 km高度纬圈平均 $N^2$ 数值约为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ . 本文中, 在热带站点(Kwajalen站和Ascension站)以及在位于北纬 $34^\circ\text{N}$ 的Pt Mugu站得到的 $N^2$ 多年平均估计结果与Grise等<sup>[28]</sup>的结果之间在 $N^2$ 纬度分布和数值大小两方面都表现出相当好的一致性.

特别值得强调的是, 在 $N^2$ 数值估计方面的一致性表明, 从上述火箭探空数据集包含的时段(1960—1980)直到Grise等<sup>[28]</sup>分析数据包含的时段(2002—2008), 平流层中下部大气静力稳定性参数 $N^2$ 平均值处于相当平稳的状态中, 这从侧面支持了本文的结果.

本文使用的历史火箭探空数据集下载自SPARC资料中心, 其数据地址为<http://www.sparc.sunysb.edu>.

## 参考文献

- [1] Held I M 1982 *J. Atmos. Sci.* **39** 412
- [2] Nappo C J 2012 *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves* (2nd ed.) (Waltham: Academic Press) p24
- [3] Stone P H 1978 *J. Atmos. Sci.* **35** 561
- [4] Emanuel K A 1988 *Mon. Wea. Rev.* **116** 1805
- [5] Santer B D, Taylor K E, Wigley T M L, Johns T C, Jones P D, Karoly D J, Mitchell J F B, Oort A H, Penner J E, Ramaswamy V, Schwarzkopf D, Stouffer R J, Tett S 1996 *Nature* **382** 39
- [6] Juckes M N 2000 *J. Atmos. Sci.* **57** 3050
- [7] Trenberth K E, Stepaniak D P 2003 *J. Climate* **16** 3706
- [8] Frierson D M W 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L24816
- [9] Frierson D M W, Davis N A 2011 *Geophys. Res. Lett.* **38** L13803
- [10] Thompson D W J, Seidel D J, Randel W J, Zou C Z, Butler A H, Mears C, Osso A, Long C, Lin R 2012 *Nature* **491** 692
- [11] Nash J, Edge P R 1989 *Adv. Space Res.* **9** 333
- [12] Randel W J, Shine K P, Austin J, Barnett J, Claud C, Gillett N P, Keckhut P, Langematz U, Lin R, Long C, Mears C, Miller A, Nash J, Seidel D J, Thompson D W J, Wu F, Yoden S 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D02107
- [13] Dunkerton T J, Delisi D P, Baldwin M P 1998 *Geophys. Res. Lett.* **25** 3371
- [14] Keckhut P, Hauchecorne A, Chanin M L 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 18887
- [15] Xu J, Powell Jr A M, Zhao L 2013 *Geosci. Model. Dev.* **6** 1705
- [16] Gates W L 1961 *J. Meteor.* **18** 526
- [17] Sica R J, Thorsley M D 1996 *Geophys. Res. Lett.* **23** 2791
- [18] Zhao Y, Liu A Z, Gardner C S 2003 *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* **65** 219
- [19] Liu A Z, Roble R G, Hecht J H, Larsen M F, Gardner C S 2004 *J. Geophys. Res.* **109** D02S02
- [20] Gardner C S, Zhao Y, Liu A Z 2002 *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* **64** 923
- [21] Chang Q H, Yang G T, Song J, Gong S S 2005 *Chin. Sci. Bull.* **250** 2786 (in Chinese) [常启海, 杨国韬, 宋娟, 龚顺生 2005 科学通报 **250** 2786]
- [22] Hirota I 1978 *J. Atmos. Sci.* **35** 714
- [23] Hamilton K 1982 *Atmos. Ocean* **20** 281
- [24] Garcia R R, Dunkerton T J, Lieberman R S, Vincent R A 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 26019
- [25] Hayashi H, Shiotani M, Gille J C 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 4288
- [26] Press W H, Saul A T, William T V, Flannery B P 1992 *Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing* (2nd ed.) (New York: Cambridge University Press) pp569-577
- [27] Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y 2001 *Probability Theory and Mathematical Statistics: Zhejiang University 3rd Version* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) p303 [盛骤, 谢氏千, 潘承毅 2001 概率论与数理统计: 浙江大学第三版 (北京: 高等教育出版社) 第303页]
- [28] Grise K M, Thompson D W J, Birner T 2010 *J. Climate.* **23** 2275



# Decreasing trend of the middle atmospheric static stability in historical data from rocketsonde network\*

Wang Li-Ji<sup>1)2)</sup> Chen Ze-Yu<sup>1)†</sup> Ling Chao<sup>1)</sup> Lü Da-Ren<sup>1)</sup>

1) (*Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 11 February 2015; revised manuscript received 28 March 2015 )

## Abstract

Brunt-Vaisala frequency squared ( $N^2$ ) measures the static stability of the atmosphere, and reflects the general structure of the atmosphere in term of vertical temperature gradient. For middle atmosphere the response of the middle atmospheric structure to the global warming still lacks investigation currently. The historical data from rocket sounding network in 1962–1991 are used to investigate the long-term trend of  $N^2$  in the middle atmosphere. For six stations spanning from the tropical latitudes to the northern mid-latitudes, our estimates show that, in the upper stratosphere and middle mesosphere, i. e., 48–60 km high, the significant decreasing of static stability is observed in an  $N^2$  anomalies averaged over 48–60 km range. For two tropical stations, long-term trend in  $N^2$  exhibits a similar magnitude, i.e.,  $-0.11 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$ ; it is also observed that the trend increases with latitude, with trend estimates from  $-0.16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$  at  $22^\circ\text{N}$  (Barking Sand station) to  $-0.22 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}/\text{decade}$  at  $38^\circ\text{N}$  (Wallops Island station).

**Keywords:** static stability, decreasing trend, middle atmosphere, rocketsonde

**PACS:** 92.60.hc, 92.60.H-, 92.60.-e, 92.60.Ry

**DOI:** [10.7498/aps.64.169201](https://doi.org/10.7498/aps.64.169201)

---

\* Project supported by the Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KZZD-EW-01-1) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41405042).

† Corresponding author. E-mail: [z.chen@mail.iap.ac.cn](mailto:z.chen@mail.iap.ac.cn)