

# 南半球风暴路径的加强与南北扩张\*

张荣望<sup>1</sup>, 黄菲<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266100;

2. 宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 基于 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了近 60 年来南半球 300 hPa 风暴路径的变化趋势。研究发现, 1956—2015 年期间, 南半球风暴路径出现了较为明显的增强趋势, 尤其是在中高纬地区最为显著。通过构造的风暴路径边界指数, 发现南半球风暴路径的北界和南界分别存在向赤道和向极的扩张趋势, 其中以南界向极偏移趋势最为明显, 整个南半球风暴活动带变得更加宽阔和靠近极地。作为风暴路径获取能量的主要来源, 背景场西风急流以及下垫面海表面温度的变化对其强弱和位置变化有显著影响, 南半球西风急流南强北弱和海表面温度南冷北暖的变化趋势, 是南半球风暴路径增强和扩张的重要原因。

**关键词:** 南半球; 风暴活动; 向极偏移; 西风急流

中图分类号: P425.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2018)03-012-08

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20170059

引用格式: 张荣望, 黄菲. 南半球风暴路径的加强与南北扩张[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(3): 12-19.

ZHANG Rong-Wang, HUANG Fei. Intensification and expansion of storm tracks in the Southern Hemisphere [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(3): 12-19.

风暴路径(Storm track)是中纬度天气尺度瞬变扰动的最强信号之一, 通常由位势高度场周期不大于一周的带通滤波方差来表征<sup>[1]</sup>。风暴路径在北半球和南半球均有存在, 反映的是大尺度斜压不稳定波的活动, 对天气和气候系统有着重要影响<sup>[2]</sup>。不同于北半球风暴路径, 南半球风暴路径的下垫面为广阔的南大洋, 在空间分布、时间演变等方面有许多区别于北半球风暴路径的特征。例如, 南半球风暴路径的纬向分布更加均匀对称<sup>[3]</sup>, 具有显著的半年周期循环信号<sup>[4]</sup>, 夏季可能比冬季更强<sup>[5]</sup>等等。近年来, 南半球的气候变化及其对全球变化的响应和影响受到越来越多的关注<sup>[6-7]</sup>。在南半球气候变异因子中已经得到广泛共识的就是南半球环状模<sup>[8]</sup>(Southern Annular Mode, SAM)正处于正位相时期<sup>[9]</sup>。SAM的正位相意味着南极绕极涡旋增强, 同时绕极西风急流也会增强。事实上, 近年来南半球西风带的增强和向极偏移已经得到越来越多的证据支持<sup>[10-13]</sup>。在这样的背景下, 南半球的风暴路径也出现了对背景流场变化的响应。例如, Simmonds 和 Keay<sup>[14]</sup>指出南半球气旋活动越来越多地生成在相对较

高的纬度。Frederiksen and Frederiksen<sup>[15]</sup>系统地分析了南半球冬季风暴路径的年代际变化。Luo 等<sup>[16]</sup>根据理论计算模型确认了 SAM 与风暴路径之间的联系。Yin<sup>[17]</sup>根据 IPCC AR4 多模式的结果, 发现在未来情景下风暴活动出现了持续的向极偏移。

以往对南半球风暴路径强度和位置变化的研究都是较为定性的描述, 并且缺乏对某一层的全面深入分析, 所研究的时间跨度也普遍偏短。本文利用 1956—2015 年共 60 年的数据, 在进一步确认南半球风暴路径具有的基本特征的基础上, 通过定义一种能够反映风暴活动带变化的指数, 定量地分析了南半球 300 hPa 风暴活动在过去 60 年间的趋势变化及其可能原因。

## 1 数据与方法

本文主要用到了美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心的 NCEP/NCAR Reanalysis 1 (NCEP1) 资料集, 包括位势高度场、风场和温度场数据, 水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 垂直方向按等压面共分为 17 层(数据下载地址: <https://www.esrl.noaa.gov/>)

\* 基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2015CB953904); 国家自然科学基金项目(41575067)资助

Supported by the National Key Scientific Research Program of China (2015CB953904); the National Natural Science Foundation of China (41575067)

收稿日期: 2017-02-14; 修订日期: 2017-04-20

作者简介: 张荣望(1989-), 男, 博士生。E-mail: zrw@ouc.edu.cn

\*\* 通讯作者: E-mail: huangf@ouc.edu.cn

psd/data/gridded/data.ncep\_reanalysis.html)。此外, 本文还用到了英国气象局哈得莱中心的 HadISST 海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 数据, 水平分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  (数据下载地址: <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadsst2/data/download.html>)。本文所选取的时间范围为 1956—2015 年。根据所研究问题的时间尺度, 以上变量除了位势高度场选用日平均数据以外, 其他变量均选用月平均数据。

为了得到风暴路径数据, 首先对逐日的位势高度场数据进行了 2~7 d 周期的带通滤波, 然后逐月计算滤波数据在该月的方差 (均方差), 该方差 (均方差) 值一般就作为该月风暴活动的强度值。本文使用均方差来表征风暴活动的强度, 这样可以使以此定义的风暴路径强度和位势高度的单位保持一致, 均为位势米 (gpm)。本文用到的主要分析方法包括趋势分析与回归分析。

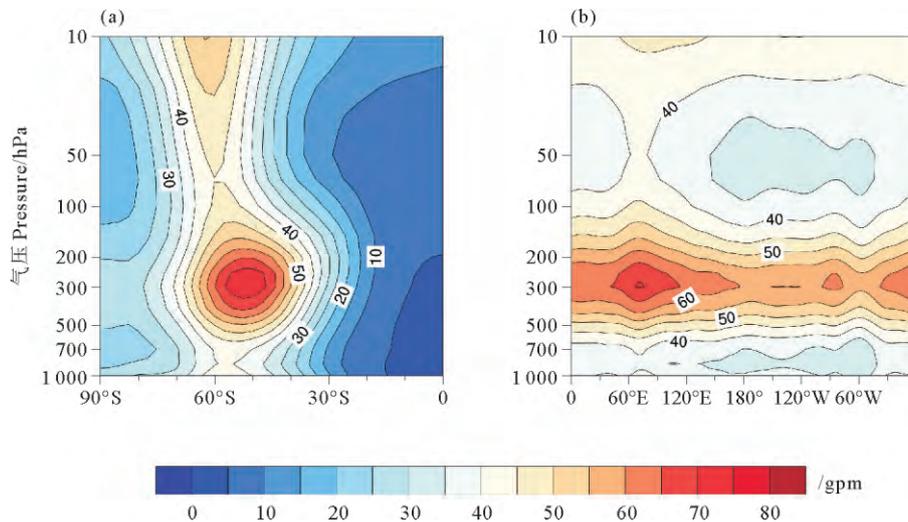
## 2 南半球风暴路径的变化趋势

在分析南半球风暴路径的变化趋势之前, 本文首先给出了 1956—2015 年间气候态的南半球风暴路径

的三维结构特征, 然后从风暴路径的强度和范围两个方面阐述了其过去 60 年来的变化趋势。

### 2.1 三维结构特征

从图 1 可以清楚地看到南半球风暴路径垂向、纬向和经向的三维结构特征。垂向上, 300 hPa 附近的风暴路径信号最强 (见图 1(a), (b))。经向上, 风暴路径呈单峰型变化 (见图 1(a)), 中纬度地区强度最大, 极大值出现在  $50^{\circ}\text{S}$  附近, 然后向赤道和极地两个方向逐渐衰减, 赤道地区最弱。从图 1(a) 还可以看出, 中纬度风暴路径的强信号可以一直从对流层低层延伸到平流层, 表明中纬度地区的风暴活动是一个非常深厚的系统, 最强中心从 300 hPa 随高度向极倾斜。根据图 1(a) 中反映的风暴路径在中纬度最强的特征, 作者选取  $40^{\circ}\text{S} \sim 70^{\circ}\text{S}$  纬度范围进行平均, 得到了风暴路径沿纬向的分布。可以看出, 风暴路径随经度的变化不如随纬度的变化那么剧烈, 纬向分布相对比较均匀 (见图 1(b))。在 300 hPa 附近可以看到风暴路径在南半球三个大洋上存在明显的活动中心, 其中南印度洋的风暴活动中心强度最大, 系统更加深厚, 并且和南大西洋的风暴活动中心连接; 相比之下, 南太平洋的风暴活动最弱, 系统更加浅薄。



(a) 中每个纬度上的数据为整个纬圈平均的结果; (b) 中每个经度上的数据为  $40^{\circ}\text{S} \sim 70^{\circ}\text{S}$  平均的结果。 (a) Data at every latitude is the mean result of the whole circle; (b) It is the mean result of  $40^{\circ}\text{S} \sim 70^{\circ}\text{S}$ .)

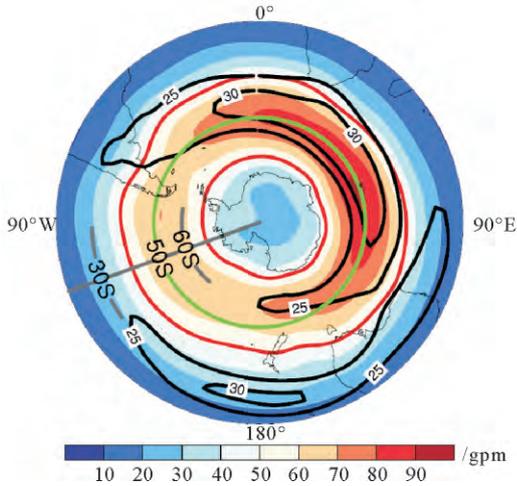
图 1 南半球风暴路径的高度-纬度剖面 (a) 和高度-经度剖面的气候态 (b) 分布图

Fig. 1 Climatology of height-latitude profile (a) and height-longitude profile (b) of the Southern Hemisphere storm track

通过以上分析, 可以明确南半球风暴路径在 300 hPa 信号最强的特点, 为此, 本文选取 300 hPa 风暴路径数据, 进一步分析了南半球风暴路径的空间分布特征。从图 2 可以看出, 南半球风暴路径呈现绕极的带状分布, 中纬度地区的强度最大, 轴线大约在  $50^{\circ}\text{S}$  附近 (见图 2 绿色虚线)。和图 1(b) 的结果类似, 在 300 hPa 高度上, 也能发现在南印度洋上存在着风暴活动最强的中心, 这个中心向西与南大西洋东部的风暴活动中心连接在一起, 向

东一直延伸到新西兰南部。这个横贯整个东半球的强风暴活动带, 与西风急流的位置有非常好的对应关系 (见图 2 黑色实线)。特别是南印度洋和南大西洋上的强风暴活动中心, 几乎都处于西风急流所控制的区域, 且风暴路径最大中心位于西风急流轴的向极一侧。相比而言, 南太平洋的风暴路径活动和西风急流没有明显的位置上的对应关系, 整个中纬度地区的西风急流都比较弱, 而最强的急流轴出现在靠近赤道的  $30^{\circ}\text{S}$  附

近。这种西风急流轴与风暴活动中心位置的不匹配,可能是造成前面提到的南太平洋风暴活动偏弱的原因之一。关于西风急流与风暴路径之间的关系,将在下一节详细讨论。



(绿线表示 50°S 纬线所在的位置;灰色弧线表示 30°S 和 60°S 纬线所在的位置;红线表示风暴路径强度等于 50 gpm 的等值线,在后文中将用到。Green circle line denotes the latitude line of 50°S; Gray curves denote the latitude of 30°S and 60°S; Respectively; Red line denote the storm track intensity of 50 gpm, which will be used in the following text.)

图 2 300 hPa 风暴路径的气候态(填色)和西风带(黑色等值线)分布图

Fig. 2 Climatology of storm track (shaded) and westerly (black contour) at 300 hPa

## 2.2 强度变化趋势

从上述气候态的角度已经看出,风暴活动的空间分布与西风急流有很好的对应关系。因此,在南半球西风急流出现增强的趋势下,有必要考察风暴活动是否也出现了某种趋势变化。图 3 给出了风暴路径强度在 4 个季节里随时间和纬度变化的异常值。总体而言,无论哪个季节,风暴路径强度都出现了由负异常到正异常的年代际转变。其中,2000 年以来的正异常值变得更加显著,表明过去 60 年来南半球风暴活动出现了增强的趋势,并在近 10 多年变得更加明显。分季节来看,风暴活动在南半球夏季(DJF)的增强幅度略强于其他三个季节,并且集中在 60°S 附近(见图 3(a));秋季(MAM)相对于 DJF,增强的位置集中在 60°S 以北(见图 3(b));冬季(JJA)相对于 DJF,增强的位置集中在 60°S 以南(见图 3(c));春季(SON)的增强趋势则在 30°S 以南的区域都分布得相对较为均匀(见图 3(d))。四个季节组合在一起可以刻画出南半球风暴活动带一致增强的趋势,而这种趋势不仅仅存在于风暴活动最活跃的中纬度,在高纬度地区甚至直到极区,也能发现风暴活动增强的信号,且高纬度极区的风暴活动信号

早在 1990s 初甚至更早就开始出现并向北传播。这种信号反映的是风暴活动的另一种变化趋势,即位置的向南偏移,其具体特征将在下文中进一步分析。

## 2.3 范围变化趋势

为了定量地描述南半球风暴活动带范围的变化,需要确定一个客观标准来表征其位置的变化。本文选取 50 gpm 等值线作为确定风暴活动边界的参考值,定义了风暴路径边界指数(Storm Track Boundary Index, STBI)。选取 50 gpm 的理由是:首先,如果选取的参考值过小,则北边的界线就太靠近热带,南边的界线太靠近极区,失去了考察风暴活动带南北移动的意义;如果选取的值过大,得到的风暴活动范围太窄,甚至会造成某些月份因太平洋上的风暴活动较弱而使得南北两个环状的等值线无法闭合,无法考察风暴活动带的整体移动。其次,两条 50 gpm 等值线的多年平均位置分别位于 40°S 和 65°S 附近(见图 2 红色等值线),这一范围基本包含了整个风暴活动带变化最强的范围。有趣的是,对研究南半球气候具有重要意义的 SAM 指数就是根据 40°S 和 65°S 两条纬度带上的海平面气压来定义的,说明这两条纬度带上的物理量对南半球气候研究具有重要的参考意义。最后,经过敏感性试验,发现选取 45~55 gpm 之间的数,对结果均没有显著影响,得到的变化特征都是相似的。

综上所述,本文以 50 gpm 等值线确定风暴活动带的南北边界,考察其活动范围的变化特征。需要指出的是,这个参考值并不唯一,可能因采用的数据集、滤波方法或选取的时间段不同存在差异。

以下是计算 STBI 的具体步骤:

- (1) 首先检验所有月份经向上的风暴路径强度最大值,发现其最大值均超过 50 gpm。考虑到风暴路径在经向上是单峰型的变化,说明按照 50 gpm 的标准,一定能在经向上找到一南一北两个点的数值等于或最接近 50 gpm,称之为风暴路径的南界和北界;
- (2) 由于 NCEP1 数据经向的间隔为比较粗的 2.5°,不利于更加精确地判断风暴活动带的边界。考虑到风暴活动在经向上呈单峰型变化,适合将其做简单的线性插值以提高分辨率,因此本文将每条经线上的数据都线性插值成 0.1°的间隔,这样更便于判断出 50 gpm 等值线所在的纬度;
- (3) 逐月判断每条经线上数值最接近 50 gpm 的点所对应的 2 个纬度值,靠近极地一侧的为风暴活动带南界,靠近赤道一侧的为北界;
- (4) 计算所有经线上得到的南界和北界的平均值,得到相应的 STBI 时间序列。

在过去的研究中,虽然南半球风暴路径向极偏移的趋势已经得到确认<sup>[18]</sup>,但从本文的 STBI 指数可以

看出,南半球风暴路径在过去 60 年间并非只是单侧地向极偏移,而南北两侧都在扩张。图 4 展示了根据以上步骤计算得到的风暴路径南界和北界指数在 1956—2015 年期间的距平时间序列,可以看出,北界存在向赤道偏移的趋势(见图 4(a)),南界存在向极地偏移的趋

势(见图 4(b))。两者具体的变化趋势分别为每 10 年  $0.34^{\circ}$ 和  $0.84^{\circ}$ ,表明过去 60 年间南半球风暴活动带正在变得越来越宽阔。同时由于南界向极偏移趋势是北界向赤道偏移趋势的约 2.5 倍,所以南半球风暴路径向极扩张的速度更快,整体的位置变得更加靠近极地。

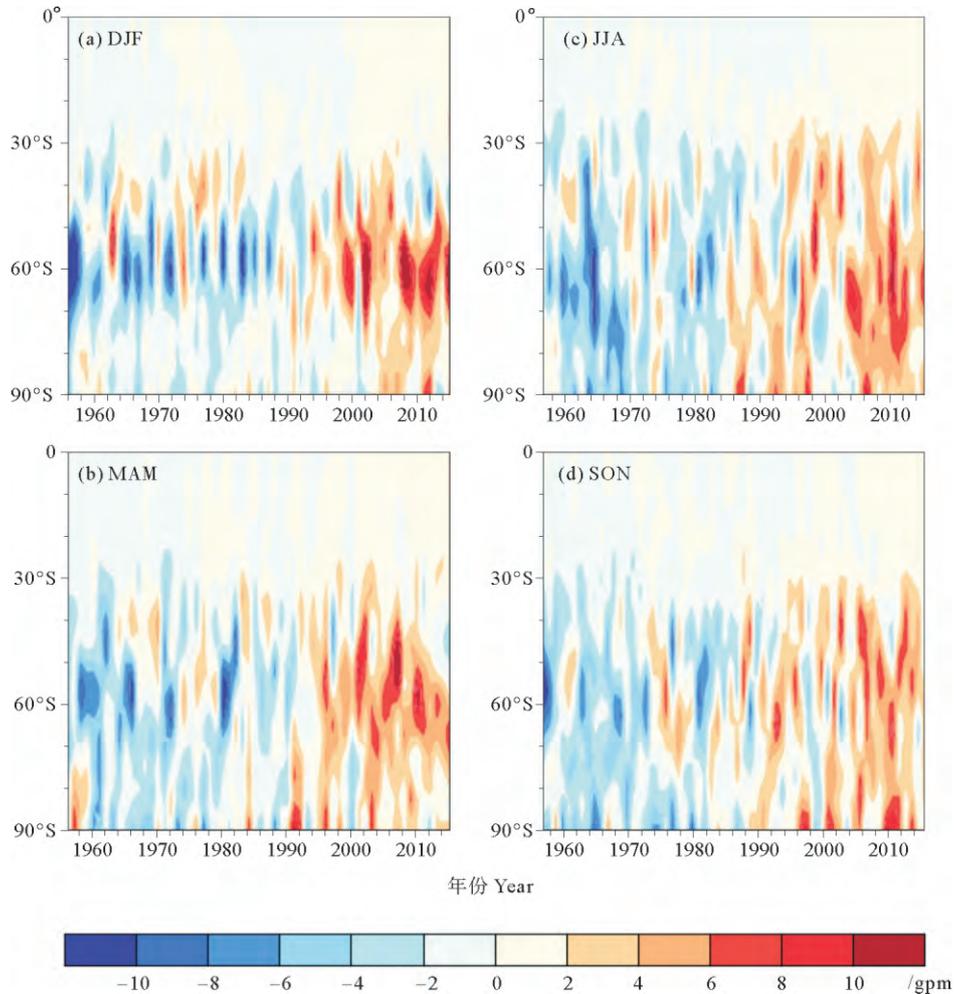


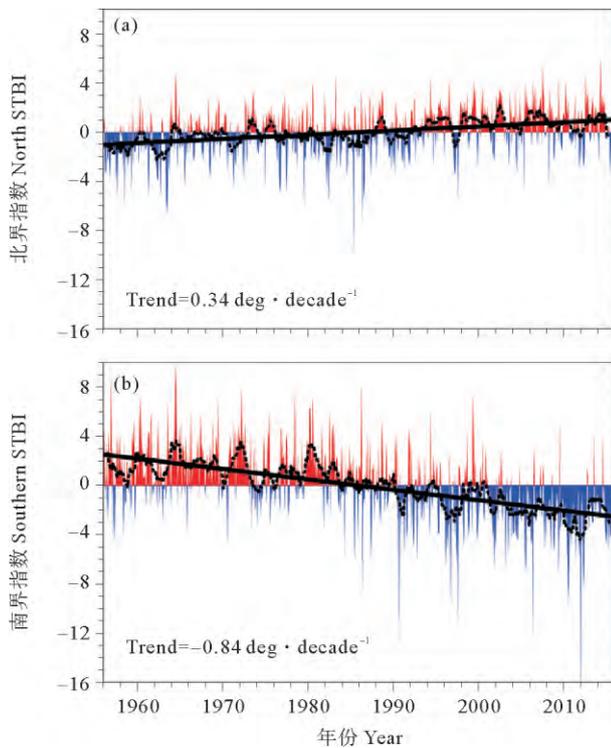
图 3 300 hPa 风暴路径在(a)DJF、(b)MAM、(c)JJA 和(d)SON 四个季节异常值合成的纬度-时间剖面图

Fig. 3 Latitude-time profiles of the anomalies of storm track for (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA and (d) SON at 300 hPa

除了表现出趋势变化以外,南半球风暴路径的南界和北界在过去 60 年间似乎还存在若干次比较明显的突变。图 5 给出的对南界和北界指数滑动 T 检验的结果证实了这一观点。1956 年以来,发生突变最明显的是南界,一共有三次突变超过 99%显著性检验(见图 5(b))。第一次突变发生在 1970s 初,表现为南界偏北的幅度出现较为明显的减弱。到了 1980s 初期,南界出现第二突变,表现为从偏北的位置移动到偏南的位置。随后,南界的位置逐渐向南偏移,大约在 1990s 前后由此前较为一致的正异常转为此后较为一致的负异常。到 2000 年以后,南界又出现第三次突变,表现出一致偏南的特征。相对于南界,北界发生过两次突变(见图 5(a))。第一次突变时间大约在 1960s 初期,表现为北

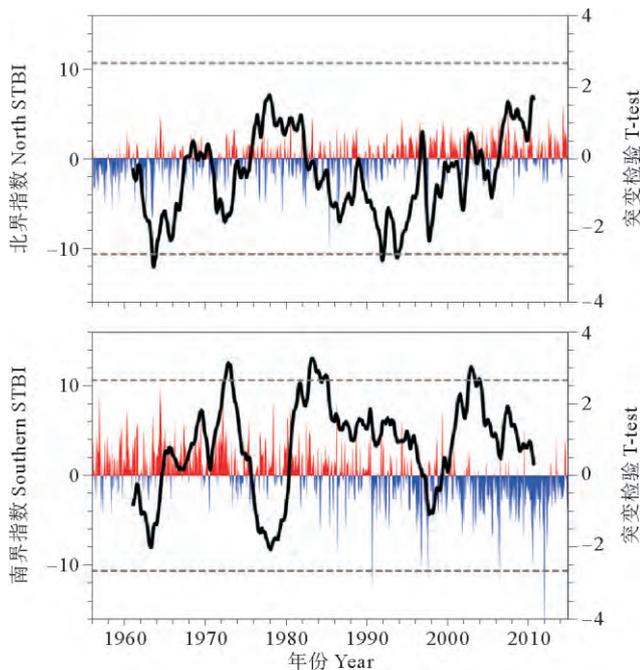
界的位置由偏南转为偏北。但这次突变之后,北界一直维持着在偏南和偏北之间弱幅振荡的状态,直到 1990s 初期,这种南北振荡开始转变为持续的偏北变化,发生第二次突变。

需要注意的是,自南界最后一次突变以来,南界的偏南异常值比之前显著加强,这说明进入 21 世纪以来,南半球风暴路径向极偏移的幅度有增加的趋势。南偏事件正变得越来越频繁,在 2012 年 2 月份甚至发生了一次南界向极异常偏移超过 15 个纬度的极端事件,这势必对南半球中高纬地区的天气和气候变化产生一定影响。例如,已有研究指出,南半球风暴路径的向极偏移,带来了南半球中高纬地区更加频繁的气旋活动和降水发生<sup>[2]</sup>。因此,近年来南半球风暴路径增



(a)北界指数;(b)南界指数;正值代表向北的异常;负值代表向南的异常;图中" Trend"后面的数字代表 STBI 的变化趋势。(a) Northern STBI; (b) Southern STBI; Positive value means northward anomaly; Negative value means southward anomaly; Values behind the string " Trend" denote the variation trend of STBI.)

图 4 风暴路径边界指数距平值时间序列  
Fig. 4 Time series of STBI anomalies



(a)北界指数;(b)南界指数的突变检验;红色和蓝色柱状图代表 STBI 距平值;黑线为 T 检验的检验值;灰色虚线为 99%置信度的临界值。T-test of (a) Northern STBI; (b) southern STBI; Red and blue bars denote the STBI anomalies; Black curves denote the test values of T-test; Gray dashed lines mean the 99% confidence level.)

图 5 风暴路径边界指数的突变检验结果  
Fig. 5 Results of the T-test of STBI

强并向极偏移的趋势,应值得特别关注。

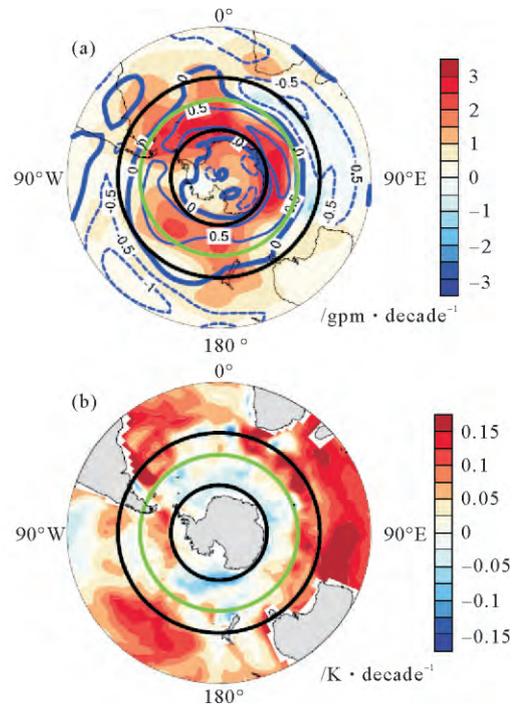
### 3 南半球风暴路径趋势变化的可能原因

鉴于南半球风暴活动是具有显著三维结构的斜压系统,本文从高层的背景西风急流变化和低层的 SST 变化两个方面,分析了南半球风暴路径出现的趋势变化的可能原因。

#### 3.1 西风急流的可能影响

由图 2 已经知道,南半球风暴活动中心和西风急流中心的平均位置十分吻合,表明两者之间可能具有比较密切的联系。事实上,强盛的绕极西风急流是南半球大气运动的显著特征之一,在这样的背景下天气尺度瞬变涡旋活动也更趋于活跃。因此,南半球风暴路径的强度和位置变化可能就是作为背景流的西风急流变化的一种响应。

图 6(a)给出的是 1956—2015 年期间西风急流和风暴路径的变化趋势图,可以看出风暴路径和西风急流趋势变化明显的区域具有很好的符合关系。对于风暴路径而言,增强趋势几乎都集中在其平均轴线位置 50°S 以南的区域,三个大洋上的增强都比较明显,最显



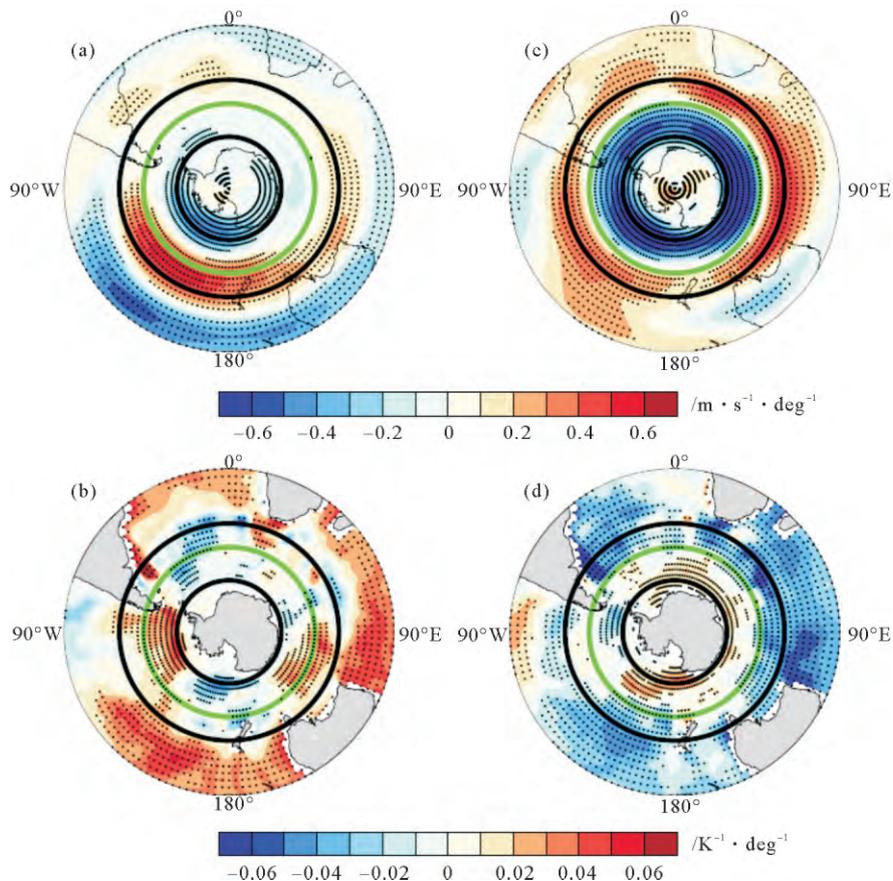
(a)填色为风暴路径,蓝色等值线为西风(单位:  $m \cdot s^{-1} \cdot decade^{-1}$ ); (b)填色为 SST,(a)和(b)中黑线表示风暴路径南界和北界平均位置;绿线表示风暴路径轴线位置。(a) Storm track (shaded) and westerlies (blue contour, unit:  $m \cdot s^{-1} \cdot decade^{-1}$ ); (b) SST (shaded). Black lines in (a) and (b) denote the mean position of northern and southern boundaries; Green line denotes the axis of storm track.)

图 6 1956—2015 年期间风暴路径、西风和 SST 的变化趋势  
Fig. 6 Trends of storm track, westerlies and SST in the period of 1956—2015

著的区域是南印度洋和南大西洋。风暴活动带增强的区域,几乎全部包含在西风急流增强的区域(见图 6(a)中 50°S 附近的 0 等值线)。另一方面,南印度洋和南太平洋风暴路径在靠近赤道一侧都出现了一定程度的减弱,与之对应的则是同位置的西风急流也出现了减弱。由此可见,南半球风暴路径无论增强还是减弱,都与同位置西风急流的变化紧密联系。从本文的分析中可以定量地看到,风暴路径轴线向极一侧即 50°S~65°S 之间,西风急流的增强趋势超过每 10 年 0.5 m · s<sup>-1</sup>,且几乎绕极一周,最大增强趋势出现在南印度洋,超过每 10 年 1 m · s<sup>-1</sup>。风暴路径增强最显著的区域和西风急流是几乎一致的,最大增强趋势出现在南印度洋和南大西洋,超过每 10 年 3 gmp。

为了分析风暴路径位置的变化与西风急流变化之间的联系,本文将南北界指数距平值回归到纬向风距平场。从图 7(a)和图 7(c)中可以看出,风暴路径南界和北界的移动显著地受到西风变化的影响。由于北界指数的变化趋势相对较弱,而南界指数和西风的变化趋势较强,因此北

界指数对西风的回归系数普遍要低于南界。就回归场总体的分布而言,风暴路径对其轴线 50°S 以南和以北西风急流的变化十分敏感,尤其是风暴路径南界。结合西风急流的实际变化(见图 6(a)蓝色等值线),风暴路径轴线以南西风的增强趋势造成了风暴路径向极地偏移,以北西风的减弱趋势造成了风暴路径的向赤道偏移,最终表现为风暴活动带的南北扩张。值得注意的是,西风对风暴路径北界的影响呈现三极型特征(见图 7(a)),尤其在南太平洋区域表现得更为明显。当 40°S~50°S 之间的西风增强(减弱)、30°S 以北和 65°S 以南的西风减弱(增强)时,风暴路径的北界出现向赤道(极地)的变化。由此可见,风暴路径的北界变化较为复杂,同时受副热带、中纬度和副极地地区西风急流的影响,这与 Nakamura and Shimpō<sup>[19]</sup>的结论是一致的。需要特别指出的是,西风急流尽管能造成风暴路径边界南北的移动,但是对风暴路径轴线(50°S)的位置几乎没有影响,这说明风暴路径轴线的位置相对稳定,不随风暴活动带南北的移动而发生明显改变。



(北界指数回归(a)西风和(b)SST,南界指数回归(c)西风和(d)SST,所有数据均为距平值;(a)~(d)中黑线表示风暴路径南界和北界平均位置;绿线表示风暴路径轴线位置;黑点表示过 99%置信度检验的区域。Regression of (a) westerlies and (b) SST with northern STBI, (c) and (d) are the same but for southern STBI. All the data are processed as anomaly values; Black lines in (a)~(d) denote the mean position of northern; Southern boundaries and green line denotes the axis of storm track; Black dots denote areas exceeding the 99% confidence level.)

图 7 风暴路径边界指数与西风和 SST 经向梯度的线性回归图  
Fig. 7 Linear regression of westerlies and SST with STBI

概括而言,无论是从局地还是非局地的角度,无论是强度还是位置的变化,南半球风暴路径的变化都与西风急流的变化紧密联系在一起。

### 3.2 SST的可能影响

前面已经提到,南半球风暴路径的一个显著特点就是下垫面几乎全部为海洋,海洋的加热和冷却对风暴路径的作用不容忽视。已有研究表明,在南半球开阔的大洋上,气旋活动的生成位置与SST经向梯度最大的位置密切相关<sup>[14, 20]</sup>。Inatsu and Hoskins<sup>[21]</sup>用数值试验进一步证实,南半球低层的风暴路径受SST变化的影响。下面将分析SST的变化对300 hPa风暴路径变化的可能影响。

从图6(b)中可以看出,三个大洋上的SST以50°S附近为界,以北的区域以增暖趋势为主,以南的区域以变冷趋势为主。对比图6(a)和6(b)可以看出,风暴路径和SST的变化趋势有较好的空间对应关系:SST变冷的区域对应的是风暴路径的增强趋势,SST增暖的区域对应的是风暴路径变化较小甚至减弱趋势。SST北边暖南边冷的变化趋势,增大了SST经向梯度,有利于风暴路径这样深厚的斜压系统的发展。将风暴路径南北界指数距平值回归到SST距平场。结合SST的变化趋势可以看出,SST增暖的区域(见图6(b)正值区域)几乎都对应对着风暴路径北界的向赤道偏移(见图7(b)正值区域)和南界的向极地偏移(见图7(d)负值区域),而在中高纬SST变冷的区域,风暴路径北界和南界的变化趋势正好相反。这表明,SST的增暖有利于风暴路径变得更宽,而SST变冷则会让风暴路径出现收缩的趋势。由于SST的增暖趋势更强,范围更广,因此风暴路径最终体现的是扩张的趋势。

## 4 结论与讨论

本文通过1956—2015年的位势高度场2~7 d带通滤波数据,首先确认了南半球风暴路径的三维结构特征。纬向上,风暴路径呈单峰型变化,中纬度区域最强,最大值大约在50°S附近,并且该轴线能自下而上一直延伸到平流层;经向上,风暴路径在三个大洋上存在强活动中心,其中南印度洋最强,南太平洋最弱;垂向上,300 hPa附近风暴路径的信号最强,平流层和对流层下层相对较弱。

在此基础上,本文选取300 hPa的风暴路径数据,重点分析了该层南半球风暴活动在过去60年间的变化趋势。结果表明,南半球风暴路径具有显著的增强趋势,增强最明显的区域位于50°S以南,最大中心在南印度洋和南大西洋上,趋势可超过每10年3 gpm。通过构造风暴路径边界指数发现,南半球风暴路径不仅存在向极地的偏移,还存在向赤道的偏移,表明风暴活

动带的范围正在变得越来越宽。但是,南界的偏移速度更快,大约是北界的2.5倍。

分析表明,南半球风暴路径与背景场西风急流和下垫面SST的变化存在密切关系。中高纬地区的西风急流增强,使得斜压不稳定波从背景流获取到更多的扰动能量,风暴路径因此强度变得更大,南界更加靠近极地。强盛的绕极西风还加剧了下垫面海水的抽吸和混合,表现为中高纬地区SST的变冷趋势。在中低纬地区,西风是减弱的趋势,缺少能量来源的风暴活动变化很小甚至出现了减弱的趋势,而西风减弱也意味着风暴路径会有一定程度的向赤道偏移。另外,中低纬地区的SST具有明显的增暖趋势,这种加热作用有利于风暴路径的“受热膨胀”,使得风暴活动范围变宽。与此同时,SST南冷北暖的变化趋势也使得SST的经向梯度增加,有利于斜压系统的维持和发展,对风暴活动的发展也有促进作用。

综上所述,西风急流南强北弱和SST南冷北暖的变化趋势是南半球风暴路径增强和南北扩张的重要原因,其中以西风急流的影响最为显著。受西风急流明显向极偏移趋势的影响,南半球风暴路径也主要表现为向极地的偏移。

需要特别注意的是,进入21世纪以来,南半球风暴活动带的南界向极地偏移的幅度有增大的趋势,极端南偏的事件变得更为频繁,可以预见这将对南半球中高纬地区的极端天气和气候变化产生较大影响,应值得关注。

### 参考文献:

- [1] Blackmon M L. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere [J]. *J Atmos Sci*, 1976, 33(33): 1607-1623.
- [2] Chang E K M, Lee S, Swanson K L. Storm track dynamics [J]. *J Climate*, 2002, 15(15): 2163-2183.
- [3] Trenberth K E. Storm tracks in the Southern Hemisphere [J]. *J Atmos Sci*, 1991, 48(19): 2159-2178.
- [4] Meehl G A, Hurrell J W, Loon H van. A modulation of the mechanism of the semiannual oscillation in the Southern Hemisphere [J]. *Tellus*, 1998, 50(4): 442-450.
- [5] Hoskins B J, Hodges K I. A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks [J]. *J Climate*, 2005, 18(20): 4108-4129.
- [6] Kushner P J, Held I M, Delworth T L. Southern Hemisphere atmospheric circulation response to global warming [J]. *J Climate*, 2001, 14(10): 2238-2249.
- [7] Gillett N P, Thompson D W J. Simulation of recent Southern Hemisphere climate change [J]. *Science*, 2003, 302(5643): 273-275.
- [8] Limpasuvan V, Hartmann D L. Eddies and the annular modes of climate variability [J]. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(20): 3133-3136.
- [9] Hall A, Visbeck M. Synchronous variability in the Southern

- Hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode [J]. *J Climate*, 2002, 15(21): 3043-3057.
- [10] Thompson D W J, Solomon S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change [J]. *Science*, 2002, 296(5569): 895-899.
- [11] Marshall G J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses[J]. *J Climate*, 2003, 16(16): 4134-4143.
- [12] Arblaster J M, Meehl G A. Contributions of external forcings to Southern Annular Mode trends [J]. *J Climate*, 2006, 19(12): 2896-2905.
- [13] Spence P, Griffies S M, England M H, et al. Rapid subsurface warming and circulation changes of Antarctic coastal waters by poleward shifting winds [J]. *Geophys Res Lett*, 2014, 41(13): 4601-4610.
- [14] Simmonds I, Keay K. Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP – NCAR reanalysis [J]. *J Climate*, 2000, 13(5): 873-885.
- [15] Frederiksen J, Frederiksen C. Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes [J]. *Tellus*, 2007, 59(5): 599-617.
- [16] Luo D, Gong T, Diao Y, et al. Storm tracks and annular modes [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(17): L17701.
- [17] Yin J H. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate [J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(18): L18701.
- [18] Son S W, Tandon N F, Polvani L M, et al. Ozone hole and Southern Hemisphere climate change [J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(15): L15705.
- [19] Nakamura H, Shimpo A. Seasonal variations in the Southern Hemisphere storm tracks and jet streams in a reanalysis dataset [J]. *J Climate*, 2004, 17(9): 1828-1844.
- [20] Sinclair M R. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere [J]. *Mon Wea Rev*, 1995, 123(6): 1601-1619.
- [21] Inatsu M, Hoskins B J. The zonal asymmetry of the Southern Hemisphere winter storm track [J]. *J Climate*, 2004, 17(17): 4882-4892.

## Intensification and Expansion of Storm Tracks in the Southern Hemisphere

ZHANG Rong-Wang<sup>1</sup>, HUANG Fei<sup>1, 2</sup>

(1. Physical Oceanography Laboratory, CIMST, Ocean University of China, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China; 2. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** Trends of storm tracks in the Southern Hemisphere during the recent 60 years are analyzed by using the NCEP/NCAR Reanalysis data. It is found that storm tracks in the Southern Hemisphere intensified obviously during 1956—2015, especially for mid-high latitude regions. Indicated by the defined storm track boundary index, storm tracks at 300 hPa in the Southern Hemisphere showed a slightly equatorward shift in its northern boundary and a significantly poleward shift in its southern boundary, meaning storm tracks in the Southern Hemisphere were getting broader and closer to the pole. As the primary energy sources of storm tracks, variations of its intensity and position were closely related to the westerly jet and sea surface temperature (SST). Enhancement of the circumpolar westerlies and the SST meridional gradient are the main reasons for the intensification and expansion of storm tracks in the Southern Hemisphere.

**Key words:** Southern Hemisphere; storm track; poleward shift; westerly jet

责任编辑 庞 旻