

夏季副热带涡旋活动的气候学研究^{* 1}

罗哲贤¹ 代 刊²

1 南京信息工程大学遥感学院, 南京, 210044

2 南京信息工程大学, 江苏省气象灾害重点实验室, 南京, 210044

摘 要

引入新的涡旋识别方法, 在全球副热带选取西北太平洋、东北太平洋、西北大西洋、东北大西洋和澳洲及其附近南太平洋 5 个涡旋活动代表性区域, 用 1985—2002 年夏季 ECMWF40 年再分析资料统计, 再用同期 NCEP40 年再分析资料对比, 研究了副热带涡旋的气候学问题。结果表明: (1) 两种再分析资料得到的涡旋空间分布型在 5 个区域都有较好的一致性, 其中西北太平洋区域两种资料的相关性最好。(2) NCEP 再分析资料得到的涡旋频数和强度都明显弱于 ERA40 计算结果, 这主要是由于两种再分析资料的模式分辨率不同而造成的。(3) 5 个区域的涡旋活动主要分布在近海和海陆交界处, 向陆地和内海方向减少。(4) 西北太平洋有两个涡旋活动的高值中心: 一个位于中国南海, 另一个位于菲律宾东侧向北分布至中国黄海的西太平洋近海海域, 为 5 个研究区域中面积最大。(5) 西北大西洋的涡旋活动主要分布在从巴拿马地区向西侧太平洋延伸的纬度带内。(6) 东北太平洋和东北大西洋的涡旋活动分布型相似, 都位于 5°—20°N 的纬度带内, 由海陆交界处伸向海洋。(7) 澳洲及其附近南太平洋区域的涡旋活动不如其余 4 个区域强, 主要分布在赤道一侧的近海区域。(8) 除西北太平洋和西北大西洋区域外, 其余两种再分析资料得到的 3 个区域涡旋活动年际变化有较大差异。(9) 在西北太平洋和西北大西洋区域, 涡旋活动的频繁程度没有表现出长期趋势, 但具有清楚的阶段性特征, 且两个区域的年际变化并不相同。(10) 西北太平洋区域从 20 世纪 80 年代中期以来, 涡旋个体强度呈增强趋势, 这个增强的趋势在全球副热带地区最为明显。西北大西洋在 90 年代中期以前, 涡旋强度有显著增强的趋势, 而之后减弱。

关键词: 副热带, 涡旋气候学, 涡旋强度, 涡旋识别。

1 引 言

涡旋是大气环流系统的一个重要成员。Barry 等^[1]对 20 世纪涡旋气候学的研究做了比较全面的叙述。在文献^[1]中, 主要讨论中高纬和热带区域的涡旋活动, 很少涉及到副热带区域。

21 世纪以来, 对于副热带涡旋活动的关注程度正在增大。秦曾灏等^[2]提出了东海和西太平洋副热带涡旋气候学的若干新结果。吴国雄等^[3]深入分析了副热带高压形成和变异的动力学。Hirsch 等^[4]分析了美国东海岸冬季涡旋的气候特征。在 Kevin^[5]和 Webster 等^[6]的工作中, 也涉及到副热带涡旋频数和强度的问题。这些工作丰富了副热带

涡旋气候学和涡旋动力学的内容, 也是本文的研究基础。

在副热带涡旋气候学方面, 已有研究往往针对某个特定的区域(如东海和西太平洋)、针对某个特定空间尺度或强度的涡旋(如副热带高压和台风), 并往往只应用某一种再分析资料(如 NCEP/NCAR 再分析资料)。为了对全球副热带涡旋气候学有一个更为全面的了解, 本文在全球副热带选取了 5 个代表性区域。涡旋的类别不仅仅限于台风, 还包括强度不等、尺度不等的多种涡旋。同时, 我们先用一套再分析资料(ERA40)求得初步结果, 再用另一套再分析资料(NRA)验证这些初步结果。若两套资料的结果比较一致时, 再进一步分析和讨论, 这样更

* 初稿时间: 2006 年 4 月 10 日; 修改稿时间: 2006 年 8 月 5 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(40333028)。

作者简介: 罗哲贤, 教授, 从事涡旋动力学和天气气候学研究。Email: luozxma@yeah.net

为客观。

2 资料和分析方法

2.1 资料

本文使用了 ECMWF40 年再分析资料^[7] (ERA40) 和 NCEP/NCAR 再分析资料^[8] (NRA)。分析了 1985—2002 年夏季(北半球为 6、7、8 月; 南半球为 12、1、2 月) 5 个区域的涡旋活动: (1) 东亚及西北太平洋 (NWP, 5° — 40° N, 10° E— 180°); (2) 北美及西北大西洋 (NWA, 5° — 40° N, 95° — 50° W); (3) 北美及东北太平洋 (NEP, 5° — 40° N, 180° — 110° W); (4) 西欧及东北大西洋 (NEA, 5° — 40° N, 50° — 5° W); (5) 澳洲及其附近南太平洋 (ASP, 5° — 40° S, 110° E— 180°)。经初步比较, 涡旋活动在对流层低层较为清楚, 故资料的垂直层次取 850 hPa。变量取相对涡度和水平风向风速。资料时间分辨率为 4 次/d, 水平空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

2.2 分析方法

长期以来, 一般都是通过查找气象要素的极值来确定涡旋的。近来, Hoskins^[9] 指出了这条途径的缺陷。他认为如果使用气压场或位势高度场, 则计算受背景场影响较大, 容易遗漏较弱的涡旋; 若使用涡度场, 虽然能够分辨小尺度涡旋, 但容易引入非涡旋系统(如锋面系统)。这两个缺点在识别副热带涡旋时显得尤为突出。相对而言, Sadarjoen 等^[10] 提出的方法较为合理。他先用涡度场资料初定涡旋, 再用流线的几何特征排除非涡旋系统。这样做可以减少背景流的影响, 对弱涡旋也能够准确识别。本文用文献^[10]的方法。

涡旋活动次数的空间分布是涡旋气候学的主要内容, 一般用涡旋中心坐标代表整个涡旋, 统计频数特征。这样做的缺陷是丢失了涡旋强度和涡旋大小的信息。为了克服这个缺陷, 本文提出了一个新的统计量: 涡旋相对涡度(记为 V_{vor})。与常用的相对涡度有联系也有区别, 具体做法: 先在相对涡度场上识别出涡旋, 确定出涡旋的外缘线($\xi=0$); 再在该外缘线围起区域的所有格点上, 令 $V_{\text{vor}}=\xi$; 在该外缘线之外, ξ 可以不为 0(如锋面系统处), 但令 $V_{\text{vor}}=0$, 在涡旋相对涡度 V_{vor} 场上, 由一组格点值表示该涡旋。这样, 保留了涡旋中心、涡旋强弱和涡旋大小的信息, 更能反映该涡旋的整体特征, 又剔除了非涡旋的信息。计算出每个时刻涡旋相对涡度 V_{vor} 场

后, 再对整个时段(1985—2002 年, 计 18 a), 整个夏季(每年计 92 d), 整个时次(4 次/d) 计 $18 \times 92 \times 4$ 张 V_{vor} 场取平均, 得到时间平均涡旋相对涡度 \bar{V}_{vor} 场。在 \bar{V}_{vor} 场上, \bar{V}_{vor} 的高值区反映了涡旋活动频繁的区域。

为了分析涡旋活动的年际变化, 定义空间平均涡旋相对涡度 \bar{V}_{vor} , 具体做法如下: 对某个区域每个时刻涡旋相对涡度 V_{vor} 场, 求出该区域该时刻 V_{vor} 的区域平均值 V_{mvor} (即该区域所有格点上 V_{vor} 的总和除以区域总格点数), 再对某年整个夏季(计 92 d), 整个时次(4 次/d) 计 92×4 个 V_{mvor} 求平均, 即得到该年该区域的 \bar{V}_{vor} 。分析 $\bar{V}_{\text{vor}}(t)$ 在 1985—2002 年的变化, 即可了解该区域涡旋活动随时间的变化。

最后, 为了分析涡旋个体强度的年际变化, 我们定义: 某年夏季, 所有时次上出现在某区域内的涡旋个数总和为该年的涡旋频数(N_{vor}), 涡旋中心涡度总和为该年夏季该区域涡旋个体总强度 I_{vor} , $I_{\text{vor}}/N_{\text{vor}}$ 为该年夏季该区域平均涡旋个体强度 \bar{I}_{vor} 。

3 夏季副热带区域涡旋活动的空间分布

如上所述, 1985—2002 年夏季平均的涡旋相对涡度 \bar{V}_{vor} 场反映了涡旋活动频数和强度的综合信息。由西北太平洋 (NWP) 区域和西北大西洋 (NWA) 区域夏季(1985—2000 年) \bar{V}_{vor} 值的空间分布(图 1) 可见:

(1) 根据 ERA40 的计算结果, \bar{V}_{vor} 高值区位于近海区。从高值区向内陆方向或向远海方向, \bar{V}_{vor} 值减少(图 1a, 1b)。说明无论是西北太平洋, 还是西北大西洋, 涡旋频繁出现的区域均位于近海区域, 这是北半球副热带这两个区域涡旋活动的一个显著特点。

(2) 西北太平洋区域 \bar{V}_{vor} 高值区(深阴影区) 有两个闭合中心, 一个位于中国南海, 另一个位于西北太平洋海域(图 1a)。与西北大西洋区域相比, 西北太平洋区域 \bar{V}_{vor} 高值区的范围更大(图 1a, 1b)。

(3) 上述 ERA40 的计算结果, 与 NRA 的计算结果基本一致(图 1a—1d)。

其余 3 个区域 \bar{V}_{vor} 的空间分布表明, \bar{V}_{vor} 的高值区出现在近海或海陆交界区, \bar{V}_{vor} 的低值区出现在远海(图 2a—2d) 或内陆(如澳洲内陆, 图略)。这个结果与图 1 类似。

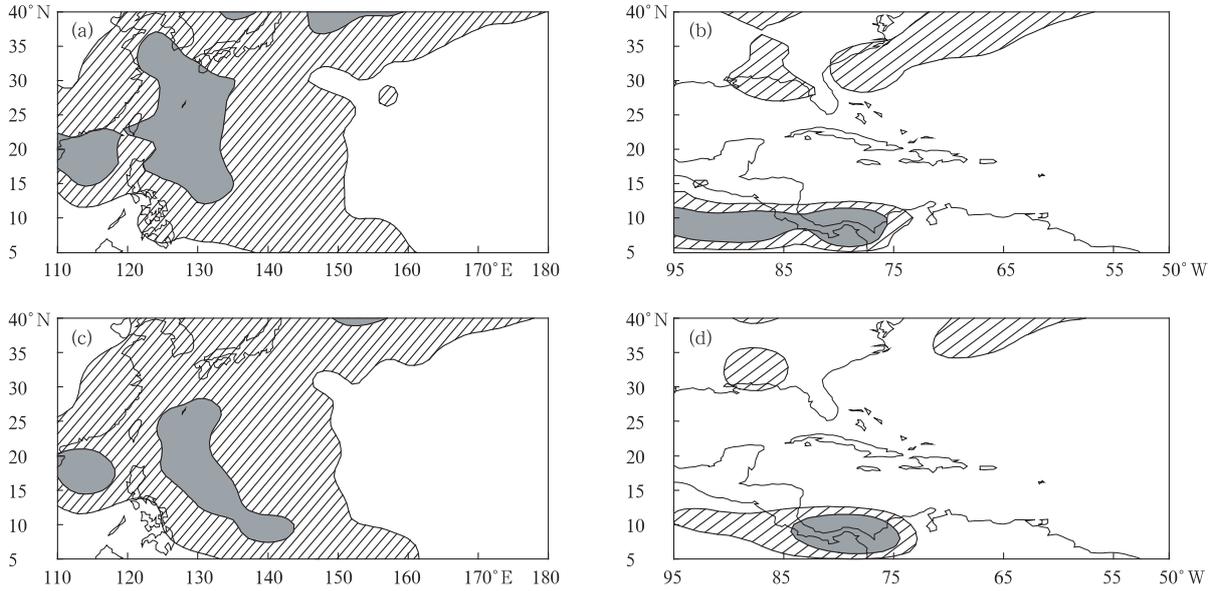


图 1 西北太平洋(NWP)区域(a,c)和西北大西洋(NWA)区域(b,d)夏季(1985—2002年)

平均涡旋相对涡度 \bar{V}_{vor} 的空间分布

(a,b. ERA40 计算结果; c,d. NRA 计算结果; 斜线阴影区代表 $\bar{V}_{vor} \geq 1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 深阴影区域代表 $\bar{V}_{vor} \geq 3.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 1 The summer geographic distribution of vortex relative vorticity \bar{V}_{vor} averaged from 1985 to 2002 in Western North Pacific (NWP; a, c) and Western North Atlantic (NWA; b, d)

((a) and (b) are computed by ERA40; (c) and (d) by NRA. Line-filled areas are $\bar{V}_{vor} \geq 1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, and solid-filled are $\bar{V}_{vor} \geq 3.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)

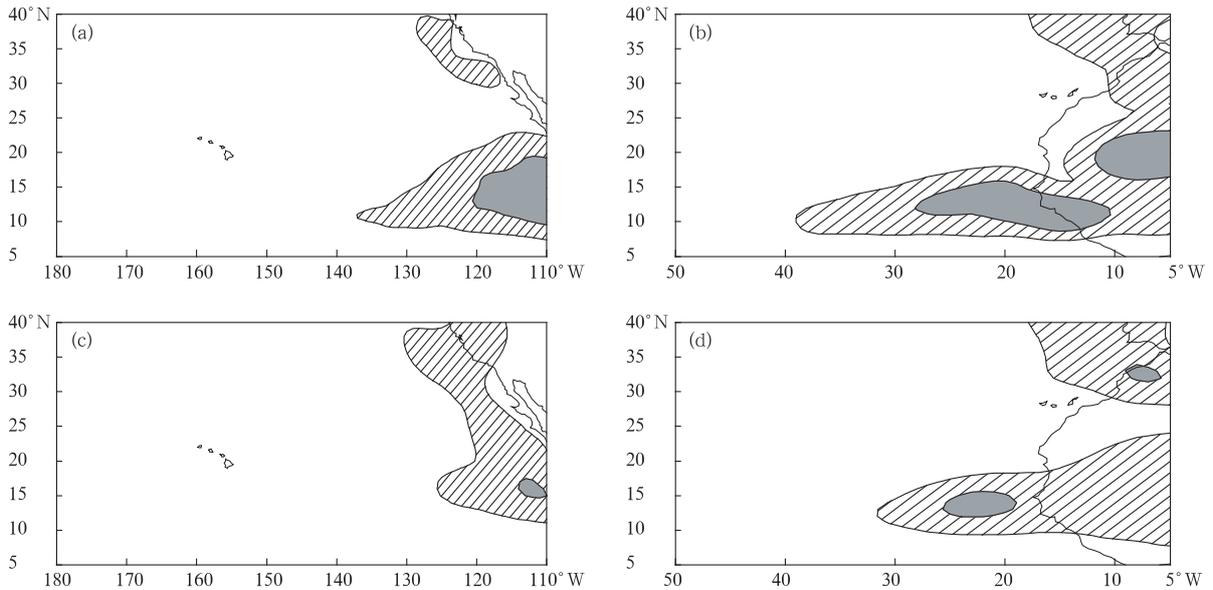


图 2 东北太平洋(NEP)区域(a,c)和东北大西洋(NEA)区域(b,d)夏季(1985—2002年)

平均涡旋相对涡度 \bar{V}_{vor} 的空间分布

(a,b. ERA40 计算结果; c,d. NRA 计算结果。说明同图 1)

Fig. 2 The summer geographic distribution of vortex relative vorticity \bar{V}_{vor} averaged from 1985 to 2002 in Eastern North Pacific (NEP; a, c) and Eastern North Atlantic (NEA; b, d)

((a), (b) are computed by ERA40; (c), (d) by NRA. (a)-(d) are the same as Fig. 1)

根据 5 个区域两组资料的 \bar{V}_{vor} 格点值, 我们计算了 5 个区域两组 \bar{V}_{vor} 场之间的相关系数: 0.94 (NWP)、0.84 (NWA)、0.71 (NEP)、0.83 (NEA) 和 0.76 (ASP), 均通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验。说明上述结果在两类再分析资料中比较一致。

4 夏季副热带涡旋活动年际变化特征

西北太平洋 (NWP) 和西北大西洋 (NWA) 空间平均涡旋相对涡度距平 $\Delta\bar{V}_{\text{vor}}$ 随时间变化的曲线表明, 用 ERA40 和 NRA 两类资料计算结果十分相似 (图 3a 与 3b, 图 3c 与 3d)。图 3a 与 3b (图 3c 与 3d)

两条曲线之间的相关系数为 0.89 (0.83), 均通过了 $\alpha=0.05$ 的检验。

这两个区域涡旋活动的年际变化均具有清楚的阶段性特征。西北太平洋区域: 在 1988 年为活动的低谷; 1988—1991 年为涡旋活动增高阶段; 1993—1999 年为涡旋活动减少阶段; 1999 年—2002 年又进入涡旋活动增多阶段 (图 3a, 3b)。西北大西洋区域: 在 1987 年为涡旋活动的低谷; 1987—1990 年涡旋活动增多; 1991—1993 年减少; 1993—1995 年又增多; 1995—2002 年又减少 (图 3c, 3d)。显然, 这两个区域涡旋活动增高与减少的阶段并不相同。

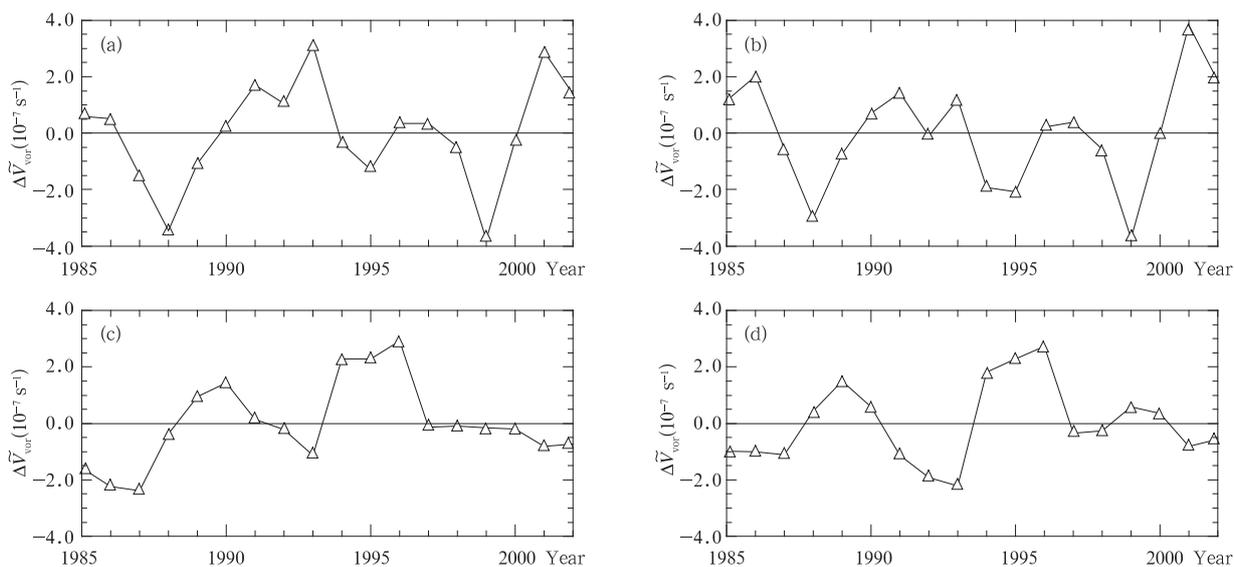


图 3 西北太平洋 (NWP) 区域 (a, b) 和西北大西洋 (NWA) 区域 (c, d) 夏季 (1985—2002 年) 空间平均涡旋相对涡度距平 $\Delta\bar{V}_{\text{vor}}$ (单位为 10^{-7} s^{-1}) 随时间的变化
(a, c. ERA40 计算结果, b, d. NRA 计算结果)

Fig. 3 The 1985—2002 annual variations of summer vortex relative vorticity anomalies $\Delta\bar{V}_{\text{vor}}$ (unit: 10^{-7} s^{-1}) averaged over Western North Pacific (NWP; a, b) and Western North Atlantic (NWA; c, d)
(a), (c) are computed by ERA40; (b) and (d) by NRA)

在其余 3 个区域, 用 ERA40 和 NRA 两类资料计算的结果并不太相同 (图 4)。图 4a 与 4b (图 4c 与 4d, 图 4e 与 4f) 两条曲线之间的相关系数为 0.12 (0.46, 0.41), 均未达到 $\alpha=0.05$ 相关显著的要求。图 3 与 4 的两组资料计算结果对比说明: 不同再分析资料的一致程度随区域的变化而改变。西北太平洋和西北大西洋区域两种资料计算得到的涡旋活动年际变化特点最为相似。

图 5 是西北太平洋 (NWP) 和西北大西洋 (NWA) 夏季 (1985—2002 年) 平均涡旋个体强度距平 $\Delta\bar{I}_{\text{vor}}$ 随时间的变化。显然从 20 世纪 80 年代中期以来, 无论是西北太平洋区域还是西北大西洋区域, 平均涡旋个体强度都有上升的趋势, 在西北太平洋区域上升趋势更加明显, 而西北大西洋在 1997 年左右之后平均涡旋个体强度呈下降趋势。同时, 用 ERA40 和 NRA 两套资料计算的结果相似 (图 5)。

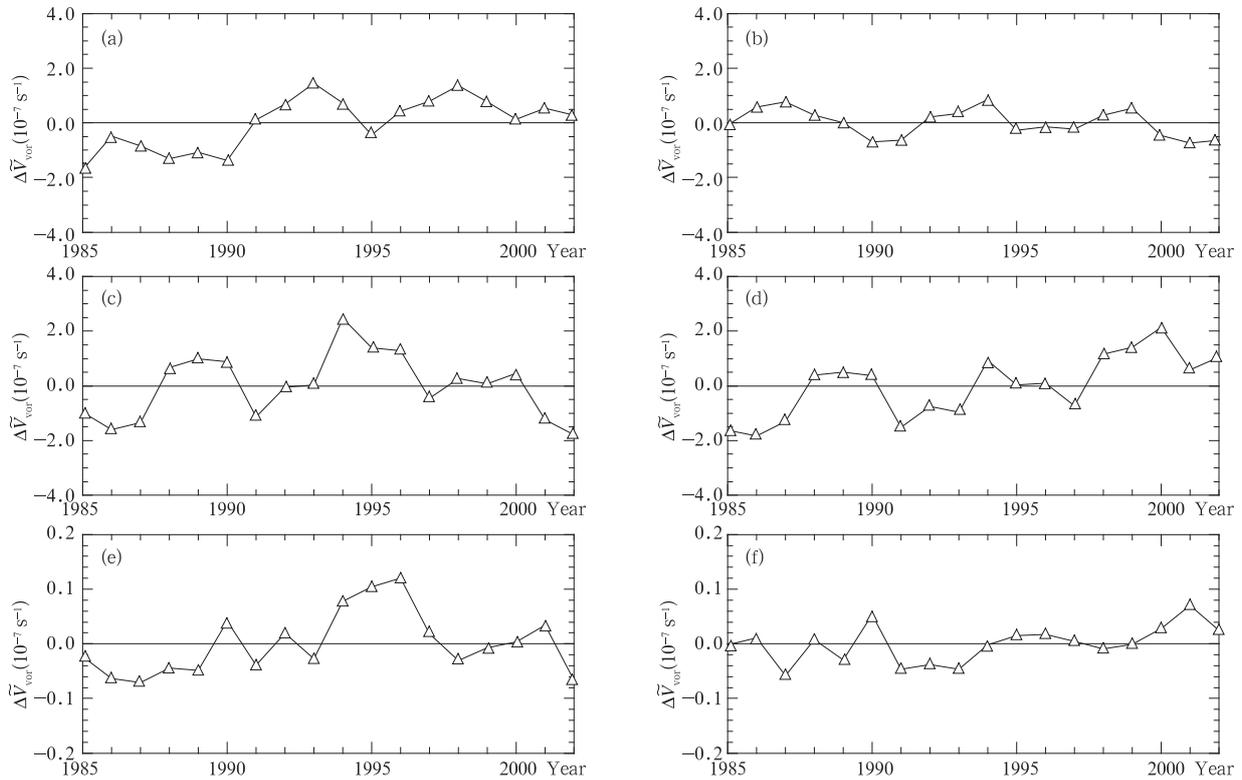


图4 东北太平洋(NEP)区域(a,b),东北大西洋(NEA)区域(c,d)和澳洲及南太平洋(ASP)区域(e,f)夏季(1985—2002年)空间平均涡旋相对涡度距平 \bar{V}_{vor} 随时间的变化
(a,c,e. ERA40 计算结果, b,d,f. NRA 计算结果)

Fig. 4 The 1985—2002 annual variations of summer vortex relative vorticity anomalies \bar{V}_{vor} averaged over Eastern North Pacific (NEP; a,b), Eastern North Atlantic (NEA; c,d) and Southern Pacific Ocean including Australia (ASP; e,f) ((a), (c) and (e) are computed by ERA40; (b), (d) and (f) by NRA)

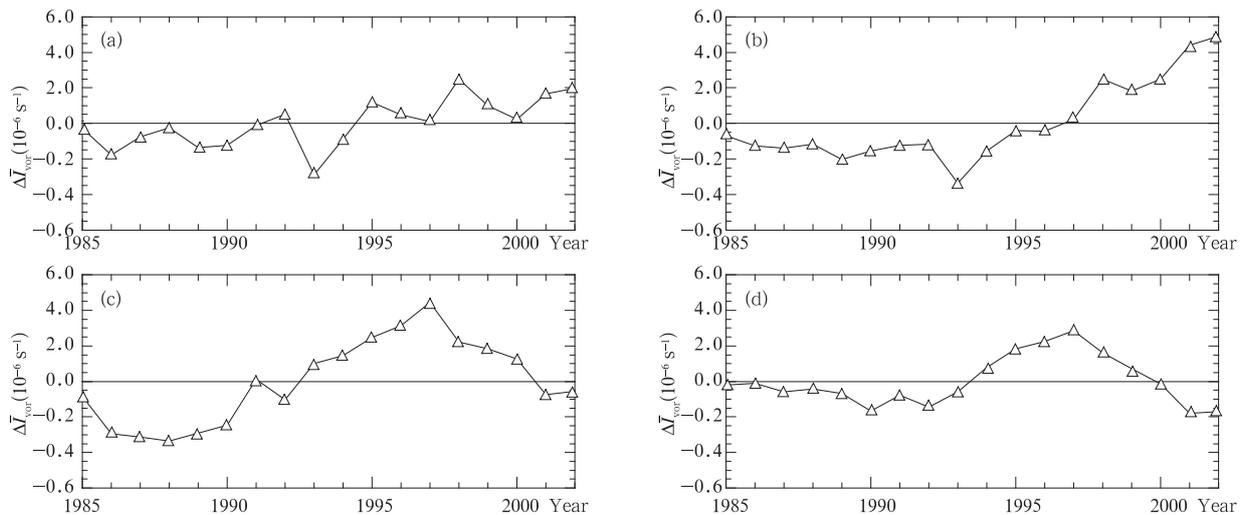


图5 西北太平洋(NWP)区域(a,b)和西北大西洋(NWA)区域(c,d)夏季(1985—2002年)平均涡旋个体强度距平 $\Delta\bar{I}_{\text{vor}}$ 随时间的变化
(a,c. ERA40 计算结果, b,d. NRA 计算结果)

Fig. 5 The annual variations of summer mean vortex intensity anomalies $\Delta\bar{I}_{\text{vor}}$ over Western North Pacific (NWP; a,b) and Western North Atlantic (NWA; c,d) from 1985 to 2002 ((a) and (c) are computed by ERA40, (b) and (d) by NRA)

图 6 是西北太平洋(NWP)区域和西北大西洋(NWA)区域夏季(1985—2002 年)区域平均洋面温度距平 SSTA 的 5 a 滑动平均值随时间的变化。洋面温度资料说明见文献[11]。可见在这两个区域,洋面温度都存在上升趋势,在西北太平洋区域,这个上升趋势更加清楚(图 6)。

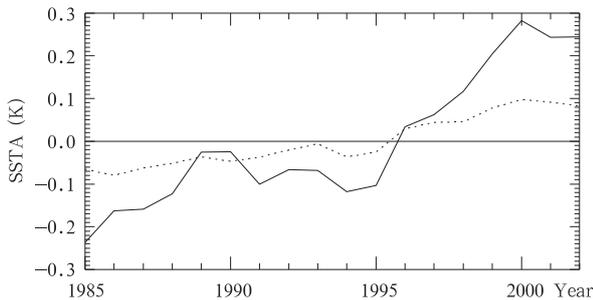


图 6 西北太平洋(NWP,实线)区域和西北大西洋(NWA,虚线)区域夏季(1985—2002 年)区域平均洋面温度距平 SSTA(单位为 K)的 5 a 滑动平均随时间的变化

Fig. 6 The trend of 5-years running mean of summer SST anomalies (SSTA; unit:K) averaged over Western North Pacific (NWP, solid line) and Western North Atlantic (NWA, dot line) from 1985 to 2002

5 结论和讨论

涡旋是地球大气环流系统的一个重要成员,强涡旋如台风又往往带来灾害性天气。以往对副热带涡旋气候学的研究往往限于某个具体的区域(如西北太平洋区域)。本文在全球副热带选择了 5 个代表性的区域,即西北太平洋(NWP),西北大西洋(NWA),东北太平洋(NEP),东北大西洋(NEA)和澳洲附近南太平洋(ASP),用 1985—2002 年夏季 ERA40 再分析资料计算,再用同期 NRA 再分析资料验证,得到如下结果:

(1) 西北太平洋区域是全球副热带涡旋活动相对频繁的区域。其中,最频繁的区域有两个:一个位于中国南海,一个位于中国东南地区沿岸附近西北太平洋区域。

(2) 在上述 5 个区域中,涡旋活动频繁区都位

于近海或海陆交界处。向远海方向或向内陆方向,涡旋活动明显减少。这是副热带涡旋气候学的一个基本事实。

(3) 在西北太平洋区域和西北大西洋区域,涡旋活动的频繁程度具有清楚的年际变化和阶段性特征。

(4) 在西北太平洋区域,从 20 世纪 80 年代中期以来,涡旋强度呈上升的趋势。这个上升趋势在西北太平洋区域更为清楚。这意味着全球变暖的背景下,该区域强涡旋的活动可能增加。

副热带涡旋气候学的问题十分复杂,许多问题有待进一步研究。如本文只用了 850 hPa 一层的资料,对涡旋三维结构缺乏认识,需要继续研究。

参考文献

- [1] Barry R G, Carleton A M. Synoptic and Dynamic Climatology. New York: Routledge, 2001:611pp
- [2] 秦曾灏,李永平,黄立文. 中国近海和西太平洋温带气旋的气候学研究. 海洋学报, 2002, 24 (增刊): 105-111
- [3] 吴国雄,丑纪范,刘屹岷等. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京: 科学出版社, 2000:314 pp
- [4] Hirsch M E, Degaetano A T, Colucci S J. An east coast winter storm climatology. J Climate, 2001, 14(5): 882-899
- [5] Kevin T. Uncertainty in hurricanes and global warming. Science, 2005, 308(5729): 1753-1754
- [6] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. Science, 2005, 309(5742): 1844-1846
- [7] Simmons A J, Gibson J. The ERA-40 project plan. ERA-40 Project Report Series No. 1, 2000: 63pp
- [8] Kalnay E. The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project. Bull Am Meteor Soc, 1996, 77(3): 437-471
- [9] Hoskins B J, Hodges K I. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks. J Atmos Sci, 2002, 59(6): 1041-1061
- [10] Sadarjoen I A, Post F H. Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry. Computers & Graphics, 2000, 24(3): 333-341
- [11] Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. J Climate, 2002, 15(13): 1609-1625

A CLIMATOLOGICAL INVESTIGATION OF THE ACTIVITY OF SUMMER SUBTROPICAL VORTICES

Luo Zhexian¹ Dai Kan²

1 School of Remote Sensing, NUIST, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044

Abstract

By utilizing a new vortex detection method and the ECMWF 40 years re-analysis data from 1985 to 2002, the climatology of summer vortices is investigated in five subtropical regions, which are the western North Pacific, the eastern North Pacific, the western North Atlantic, the eastern North Atlantic and the Australia near ocean. After that, results are validated by NCEP/NCAR re-analysis data. It was shown that: (1) The spatial distributions of ERA40 vortices activities (VAC) were well consistent with those of NCEP re-analysis (NRA) vortex activity in all regions, especially in the western North Pacific. (2) Because of different model resolution, the NRA vortices' number (intensity) were clearly less (weaker) than ERA40 vortices'. (3) Vortices mainly cruised in coasts and the adjacent seas, from where to the land or to the open sea vortex activities are decreased gradually. (4) There were two active centers in the western North Pacific; one was located in South China Sea; and the other, as the largest area of five regions, spread from the east side of Philippines to Japan. (5) Over the western North Atlantic, most vortices occurred in the Panama area and its west-side offshore. (6) The vortex distributions were similar between the eastern North Pacific and the eastern North Atlantic, both spreading from the coast to the west-side sea in 5°—20°N zone. (7) In the Australia near ocean, vortices are not as active as those in the other four regions, and mostly take place in the equator-side of near ocean areas. (8) Aside from the western North Pacific and the western North Atlantic, the VAC annual variations in other three regions were different between ERA40 and NRA. (9) The VAC annual variation could be separated into several distinct stages in the western North Pacific and the western North Atlantic. (10) Since the mid 1980's, the mean vortex intensity was getting increased in the western North Pacific, which was most significant in the subtropical areas on a global basis. In the western North Atlantic, there was a decreasing (increasing) trend of the mean vortex intensity before (after) the mid 1990's.

Key words: Subtropics, Vortices climatology, Vortex intensity, Vortex detectionology, Vortex intensity, Vortex detection.