

西北太平洋 2001—2014 年热带气旋结构变化的环境垂直风切变和水汽场统计

冯乾[†] 张庆红

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; [†] E-mail: fengqianlinlin@163.com

摘要 利用 Best Track 资料、TRMM 卫星资料和 NCEP 再分析资料中 2001—2014 年西北太平洋海域 385 个热带气旋(TC)的 4967 个观测记录, 将 TC 结构变化分成 9 类, 并分析 TC 结构变化对垂直风切变和水汽场的响应。结果表明, 西北太平洋强度增大的 TC 主要伴随东风切变, 强度减小的 TC 主要伴随西风切变。在较强的垂直风切变($v > 5$ m/s)作用下, TC 的结构变化没有明显的水汽异常; 而在较弱的垂直风切变($v \leq 5$ m/s)作用下, “增强增大”(“缩小减弱”)的 TC 伴随着正(负)水汽异常。

关键词 热带气旋; 结构变化; 环境垂直风切变; 水汽场

中图分类号 P444

Statistics of Environmental Vertical Wind Shear and Water Vapor Field on the Change of Tropical Cyclone Structure in Northwest Pacific Ocean from 2001 to 2014

FENG Qian[†], ZHANG Qinghong

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

[†] E-mail: fengqianlinlin@163.com

Abstract A total of 4967 observations of 385 tropical cyclones (TCs) in the Northwest Pacific Ocean from 2001 to 2014 from the Best Track data, the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite data and the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data were classified to compare and analyze the response of environmental vertical wind shear and water vapor field on TC structural change. The results show that intensify TCs are mainly accompanied by east wind shear, and weaken TCs are mainly accompanied by west wind shear. Under the strong vertical wind shear ($v > 5$ m/s), there is no obvious water vapor anomaly on TC structural change. Under the weak vertical wind shear ($v \leq 5$ m/s), the intensify (weaken) TC is accompanied by positive (negative) water vapor anomaly.

Key words tropical cyclone; structural change; environmental vertical wind shear; water vapor field

Holland 等^[1]将热带气旋(tropical cyclone, TC)的结构变化归为强度变化、内核环流强度变化和尺度变化 3 种。强度表征的是 TC 风场的极大值, 尺度表征的是 TC 风场的水平范围, 一般指 7 级风圈半径, 同时 7 级风圈半径范围内的区域称为内核。

内核环流强度的定义是风场在内核区域的平均角动量, 实际上是风场水平范围的表征, 在这一点上, 内核环流强度与尺度的定义比较接近。因此, 本文主要考虑强度和尺度的变化。

TC 结构变化不仅有季节性和区域性, 而且与

环境因素(地形、海温、垂直风切变、水汽等)、内部因素(涡旋 Rossby 波、眼墙替换等)有一定的关系^[2-6]。Montgomery 等^[7]从浮力和涡流拉伸两个新的角度,对 TC 的流体动力和热力进行解释,认为摩擦边界层在对流组织和尺度动力学中起着至关重要的作用。

环境水汽对 TC 强度和尺度的变化有重要的影响。TC 的破坏力在近 30 年内有增长的趋势,这也许与海表面温度和水汽含量上升趋势有关^[8]。增暖的海表向 TC 提供更多的能量,这种能量以水汽潜热的方式转换为 TC 风场的动能,使得 TC 不断增强^[9]。Houze 等^[10]在研究飓风雨带与强度变化关系的实验中,对飓风 Katrina 和 Rita 的飞机观测资料进行分析后发现, Katrina 与 Rita 的移动路径基本上相同,但结构变化迥异。Derek^[11]发现,水汽场的差异造成 Katrina 与 Rita 外围螺旋雨带的结构不同。Katrina 的外围水汽较多,有更多的螺旋雨带产生; Rita 的外围空气较干燥,并保持稳定,抑制了对流活动。这些观测事实证明,水汽对 TC 外围螺旋雨带的生消和尺度的增长起着重要的作用。Derek^[11]的模拟实验还发现, TC 的尺度对外围螺旋雨带中水汽的潜热释放非常敏感。湿润环境有利于外围对流活动和雨带的产生,而在雨带中的潜热加热作用下, TC 径向的气压梯度会发生变化。由于内核的惯性稳定度较大,因此气压下降明显。然而,在外围,由于惯性稳定度较小,加热造成的扰动以重力波的形式频散,对气压不会造成太大影响。这样,气压梯度较大的区域向外扩张, TC 的尺度随之增大^[12]。TC 的强度变化也受环境水汽相对位置的影响, Wu 等^[13]通过对一个真实 TC 个例(Earl 2010)的模拟研究发现, TC 移动方向前侧增加的水汽会抑制 TC 增强,而在其后侧,增加水汽会使更多的水汽输送至内核区域而增强对流,有利于 TC 增强。

上述研究限于水汽场这个单一因素对 TC 结构变化的影响。观测和数值模拟研究表明,较强的环境垂直风切变对 TC 强度具有抑制作用^[14-16]。观测研究表明,使 TC 减弱的垂直风切变的临界值可能在 8~10 m/s 之间^[17-18]。Frank 等^[19]利用数值模式分析 5, 10 和 15 m/s 垂直风切变对 TC 强度的影响,结果表明,加入切变后, 5 m/s 的垂直风切变可以使 TC 在 36 小时内减弱, 10 m/s 的垂直风切变使得 TC 在 24 小时内减弱, 15 m/s 的垂直风切变则使 TC 立

即减弱;他们进一步分析认为, 12.5 m/s 是垂直风切变的临界值。在理想条件下,能抑制甚至减弱 TC 强度的垂直风切变临界值在 8~10 m/s 之间^[20]。由于切变造成涡度平流随高度变化,使得在顺切变前部以及左侧边界层附近产生辐合,伴随着空气的气旋式上升,外流层对应区域产生辐散,使得强对流和强降水发生在顺切变左侧^[20]。西北太平洋对流层中下层环境垂直风切变超过 12 m/s 时,只有 1.2% 的 TC 可以快速增强,且快速增强的 TC 垂直风切变主要在 4~8 m/s 之间^[21]。还有数值模拟结果表明,在一定的垂直切变场(如东风切变)中,有利于 TC 的产生和发展^[19]。这主要是因为当 TC 以整层平均速度移动时,低层的辐合和高层的暖心仍然保持同位相,因此有利于 TC 发展。

前人的研究或者侧重环境垂直风切变,或者侧重水汽场,没有综合考虑这两个因素。本文对西北太平洋 TC 结构变化做分类统计,并研究结构变化对环境垂直风切变和水汽场的响应。

1 数据和研究方法

美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)(<http://www.usno.navy.mil/JTWC/>)提供的 Best Track 资料数据,记录了西北太平洋 TC 全过程的中心位置、强度以及其他结构参数(包括眼墙半径、最大风速半径、最外围闭合等压线半径、34, 50 和 65 节(knot)风圈半径)。从 2001 年开始, JTWC 资料中的结构参数记录比较完善,故本文主要统计 2001—2014 年的 TC。同时,本文将 TC 强度定义为 Best Track 资料中最大持续风速,将 TC 尺度定义为 Best Track 资料中 34 节风圈半径。34 节风圈半径与我国 7 级风圈半径定义(风速达到 17 m/s)一致。

来自 Remote Sensing Systems (2011)的多颗极轨卫星的水汽探测资料主要包括 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 卫星微波成像辐射计 (TMI) 资料和专用微波成像仪 (SSM/I) 资料,资料数据包括降水率(mm/h)、液态云水含量(mm)、水汽柱总量(mm)和海表面风速(m/s),分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。从 1987 年第一颗 SSM/I 卫星升空算起,有 7 颗卫星的资料覆盖 1987 年 7 月至今,其中 4 颗卫星(F13, F14, F15 和 F17)覆盖 2001—2014 年。

Best Track 资料每 6 小时有一次记录,但卫星

每天观测地球上同一点的时间并不是整点。针对这一问题,我们通过类似插值的方法,将多颗卫星观测到的水汽资料统一为与 Best Track 资料相同的每 6 小时一次的记录资料。方法如下: 1) 为得到一个 12 小时的片段,对 Best Track 资料中每一个记录,获取其前后 6 小时的 TC 位置(中心经纬度)、强度和尺度信息; 2) 搜索上述 12 小时片段对应的卫星水汽资料,获取每个水汽资料观测的准确时间(精确到分钟),同时粗略地认为 TC 在 6 小时片段中做匀速直线运动,进一步从 6 小时的经纬度数据线性差分出观测时刻热带气旋的具体位置; 3) 截取上述 TC 中心位置对应的 $30^{\circ} \times 30^{\circ}$ 区域内卫星水汽资料(若缺测 50% 以上,则忽略); 4) 将得到的水汽场加权平均,权重取决于卫星观测与 Best Track 两个资料记录的时间之差值的倒数。经过以上 4 步,得到对应 Best Track 每 6 小时一次记录的水汽场。

2 统计学特征

2.1 TC 强度和尺度变率的分布规律

TC 强度(尺度)变率 S (standard, 标准) 用以下公式定义:

$$S = \frac{x_{i+1} - x_i}{x_i},$$

式中, x_i 表示某个时刻的观测记录, x_{i+1} 表示 12 小时后的观测记录。

2001—2014 年,西北太平洋的 TC Best Track 资料中共有 385 个 TC,其中包含强度和尺度观测值的记录共有 4967 个。强度的平均值为 43.1 m/s,尺度的平均值为 210.7 km (图 1(a))。

图 1(b)显示西北太平洋 2001—2014 年 TC 强度-尺度变化率的频数分布,尺度的变率主要在 $-10\% \sim +10\%$ 范围,强度的变率主要在 $-20\% \sim +20\%$ 范围。其中,尺度变率超过 200% 的记录有 12 个,小于 -80% 的记录数有 5 个。通过对比卫星云图,我们发现这些尺度可能受眼墙(台风眼外侧 100 km 左右的狂风暴雨区域)替换过程的影响,因此在后面的分析中将这此记录剔除。根据图 1,定义 S 大于 10% (小于 -10%) 为尺度增大或强度增大(尺度缩小或强度减小),而将 S 在 $-10\% \sim +10\%$ 范围内定义为尺度不变或强度不变。根据这样的标准,将记录分为 9 类,表 1 显示每一类的记录数。从表 1 可

以看出,TC 结构变化中最多的样本记录处于尺度和强度都不变的状态,占 28.5%,其次是“增大增强”的样本记录,说明 TC “增大增强”的速度比“缩小减弱”的速度慢。

2.2 TC 结构变化与环境垂直风切变、水汽场的统计

西北太平洋 2001—2014 年所有记录中平均水汽柱总量的分布如图 2 所示。为了避免过大或过小的热带气旋对统计结果的影响,画图时经过标准化处理,将 34 节(1 节约等于 0.51 m/s)风圈半径统一视为 1。从图 2 可以发现,TC 中心是平均水汽柱总量的高值区,超过 62 mm,TC 环境水汽南多北少,尤其在西北区域,平均水汽柱总量小于 50 mm,而在东南和西南区域平均水汽柱总量较大。后面各类 TC 的水汽场分析都以平均水汽场为标准,考虑每一类记录与平均场的差(即水汽异常)。

对于每个观测记录,环境垂直平均风切变为自 TC 中心起,1~2 倍半径区域内垂直风切变(500~850 hPa)的矢量平均。表 1 中 9 类西北太平洋 TC 环境平均风切变的频率分布如图 3 所示,可以发现,“增强”的 TC 主要伴随东风切变,“减弱”的 TC 主要伴随西风切变。“增大增强”的 TC 东风切变比较大,主要在 5~10 m/s 之间,而“缩小增强”的 TC 东风切变主要在 0~5 m/s 之间。“强度不变”的 TC 也主要体现为较弱的东风切变。然而,不同类的尺度变化并没有体现出统一的环境垂直风切变规律。

根据尺度和强度的变率,我们对西北太平洋 9 类不同的 TC 环境垂直平均风切变进行统计(图 3),可以发现,强度增强(减弱)都体现较强的东风(西风)切变。但是,水汽场对 TC 结构变化是否也有影响? 水汽场或垂直风切变这两个环境因素中,哪一个占主导作用? 为了回答这个问题,我们分类统计不同环境垂直平均风切变作用下的 TC 水汽场。

根据不同的环境平均垂直平均风切变统计的各类 TC 水汽场如图 4~7 所示。当环境场平均风切变为较强的东风切变($v > 5$ m/s)时,TC 主要体现为“增大增强”、“不变增强”和“增大不变”3 类(图 4),并且这 3 类 TC 均没有明显的水汽异常。当环境场平均风切变为较强的西风切变($v > 5$ m/s)时,TC 全部体现为强度减弱的 3 类(图 5)。这些类型的 TC 虽然没有明显的大面积水汽异常,但“缩小减弱”和“不

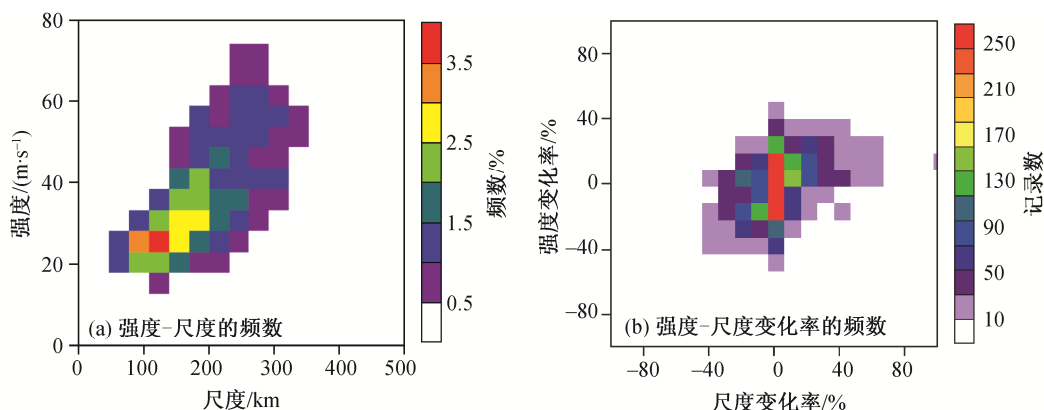


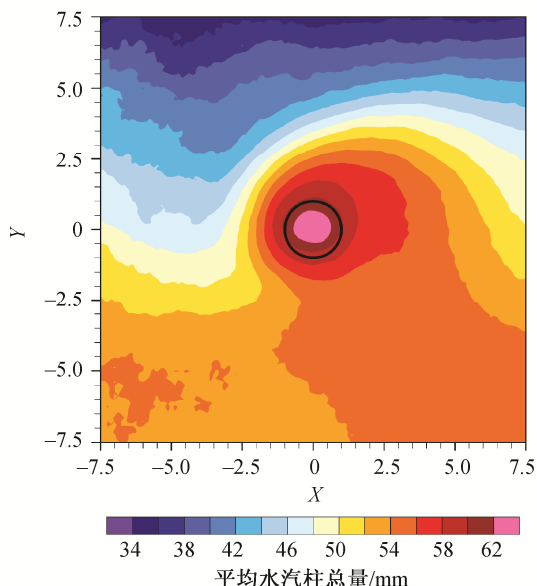
图 1 西北太平洋 2001—2014 年热带气旋结构(a)及其变化(b)

Fig. 1 Tropical cyclone structure (a) and its variation (b) in Northwest Pacific from 2001 to 2014

表 1 西北太平洋 2001—2014 年热带气旋结构变化的记录数
Table 1 Records of tropical cyclone structural change in Northwest Pacific from 2001 to 2014

强度变化	记录数		
	尺度缩小	尺度不变	尺度增大
增强	87 (1.8)	855 (17.2)	871 (17.5)
不变	279 (5.6)	1416 (28.5)	528 (10.6)
减弱	233 (4.7)	547 (11.0)	151 (3.0)

说明: 括号内数字为占总记录数的百分比。



X 轴和 Y 轴表示与 TC 中心的相对距离, 黑色圆圈表示经过标准化处理的风圈半径, 下同

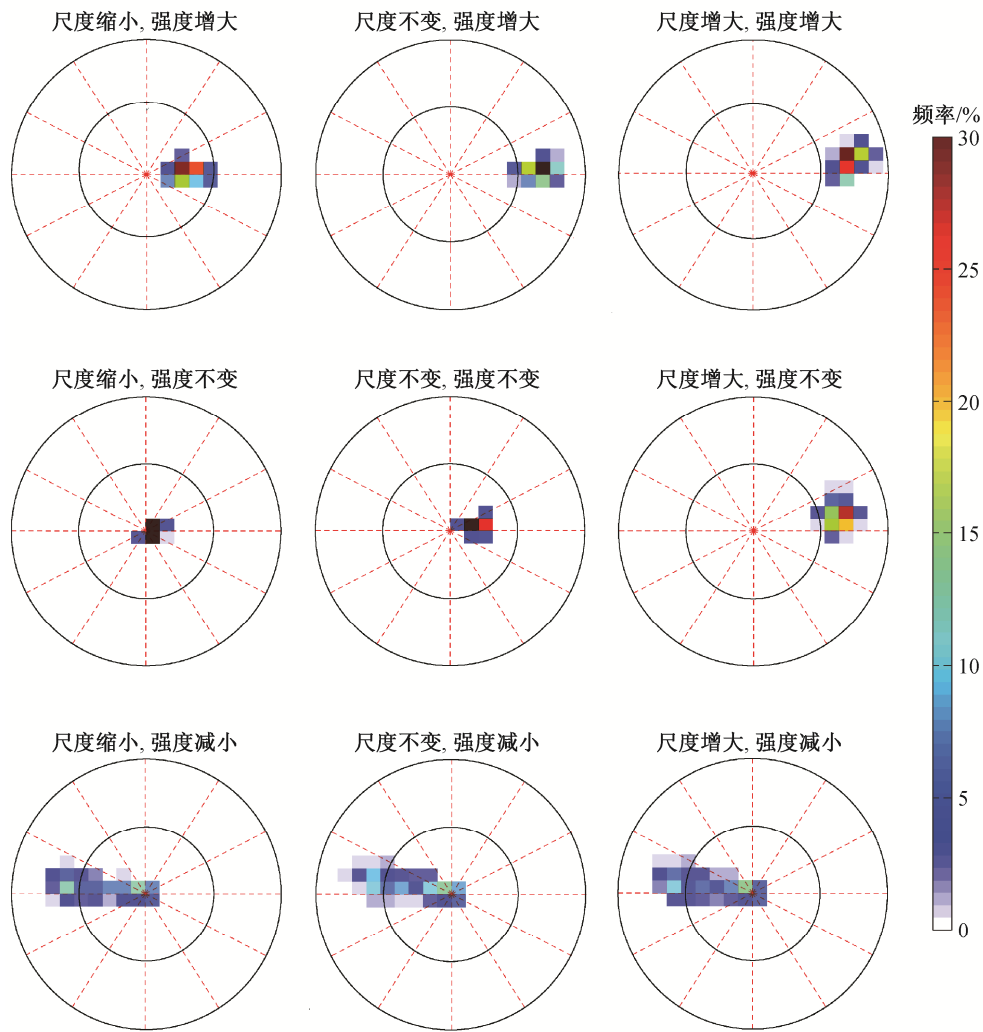
图 2 西北太平洋 2001—2014 年热带气旋的平均水汽柱总量
Fig. 2 Average precipitable water of TCs in Northwest Pacific from 2001 to 2014

变减弱”的 TC 水汽在整体上少于平均水平, 尤其是在北部区域; 而“增大减弱”的 TC 在南部以及中心区域有局部的显著正异常。

在较弱的东风切变($v \leq 5$ m/s)作用下, TC 主要为强度增大和不变的 6 类(图 6)。与平均值相比, 强度增大的 TC 整体上水汽有显著正异常, 强度减小的 TC 对应显著水汽负异常, 而强度不变的 TC 环境水汽异常较小。尺度增大的 TC 外围水汽均显示显著的正异常, 尺度缩小的 TC 外围水汽显示弱的负异常。可见, 在较弱的东风切变作用下, TC 外围水汽的多少与 TC 尺度的大小有关。

在较弱的西风切变($v \leq 5$ m/s)作用下, TC 结构变化主要为强度减小的 3 类(图 7)。强度减小的 TC 均有明显的水汽负异常, 而“增大减弱”的 TC 在南部和中心区域显示较弱的正异常。Ying 等^[22]通过对真实热带气旋(台风 Talim)的模拟研究, 发现环境水汽扰动会激发外围环流, 引起上升运动, 导致水汽凝结, 潜热释放而加热大气, 使次级环流(径向风和垂直运动)发生改变; TC 的增强或减弱是次级环流影响角动量水平和垂直平流的体现。总体上, 环境水汽越多, TC 越有增强和增大的趋势。

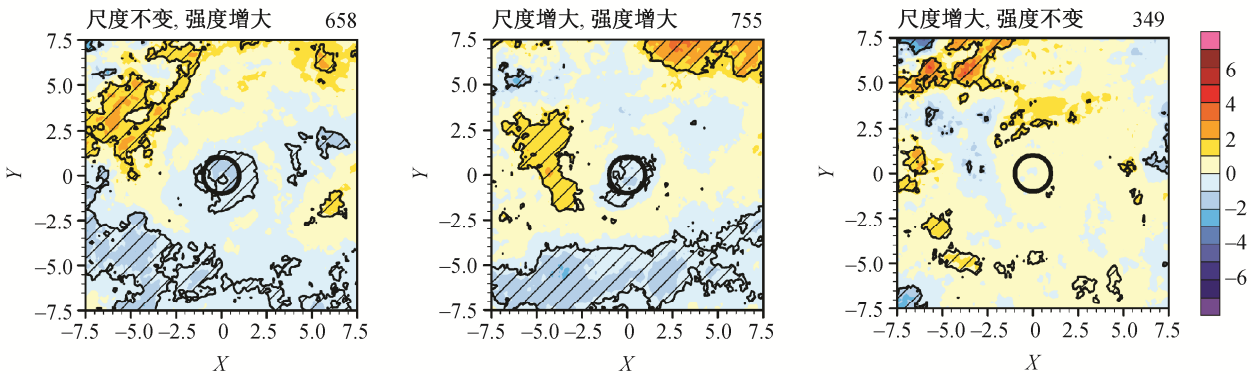
在较强的垂直风切变($v > 5$ m/s)作用下, TC 的结构变化没有明显的水汽异常; 而在较弱的垂直风切变($v \leq 5$ m/s)作用下, 增强(减弱)和增大(缩小)的 TC 伴随着正(负)的水汽异常。这表明, 在较强的垂直风切变作用下, 西北太平洋 TC 结构变化对水汽场的响应可以忽略; 而在较弱的垂直风切变作用下, TC 结构变化对环境水汽的响应明显。



与中心的距离表示环境垂直平均风切变的大小(内圈表示 5 m/s, 外圈表示 10 m/s), 颜色表示风切变出现的频率(占各类记录总数的百分比)

图 3 西北太平洋 2001—2014 年热带气旋结构变化的环境垂直平均风切变频率统计

Fig. 3 Environmental vertical wind shear of tropical cyclone structural change in Northwest Pacific from 2001 to 2014



斜线区域通过平均值差异显著性检验($p < 0.05$); 右上角为记录数, 下同

图 4 环境垂直平均风切变为 $v > 5$ m/s 的东风切变时各类热带气旋水汽柱总量集合平均的距平

Fig. 4 Average anomaly of the precipitable water on the different types TCs for the east wind shear ($v > 5$ m/s)

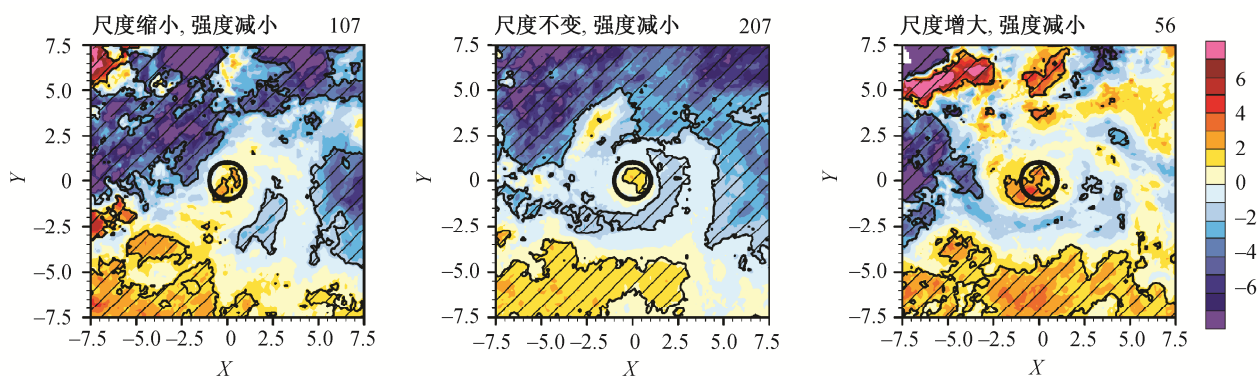


图 5 环境垂直平均风切变为 $v > 5 \text{ m/s}$ 的西风切变时各类热带气旋水汽柱总量集合平均的距平
Fig. 5 Average anomaly of the precipitable water on the different types TCs for the west wind shear ($v > 5 \text{ m/s}$)

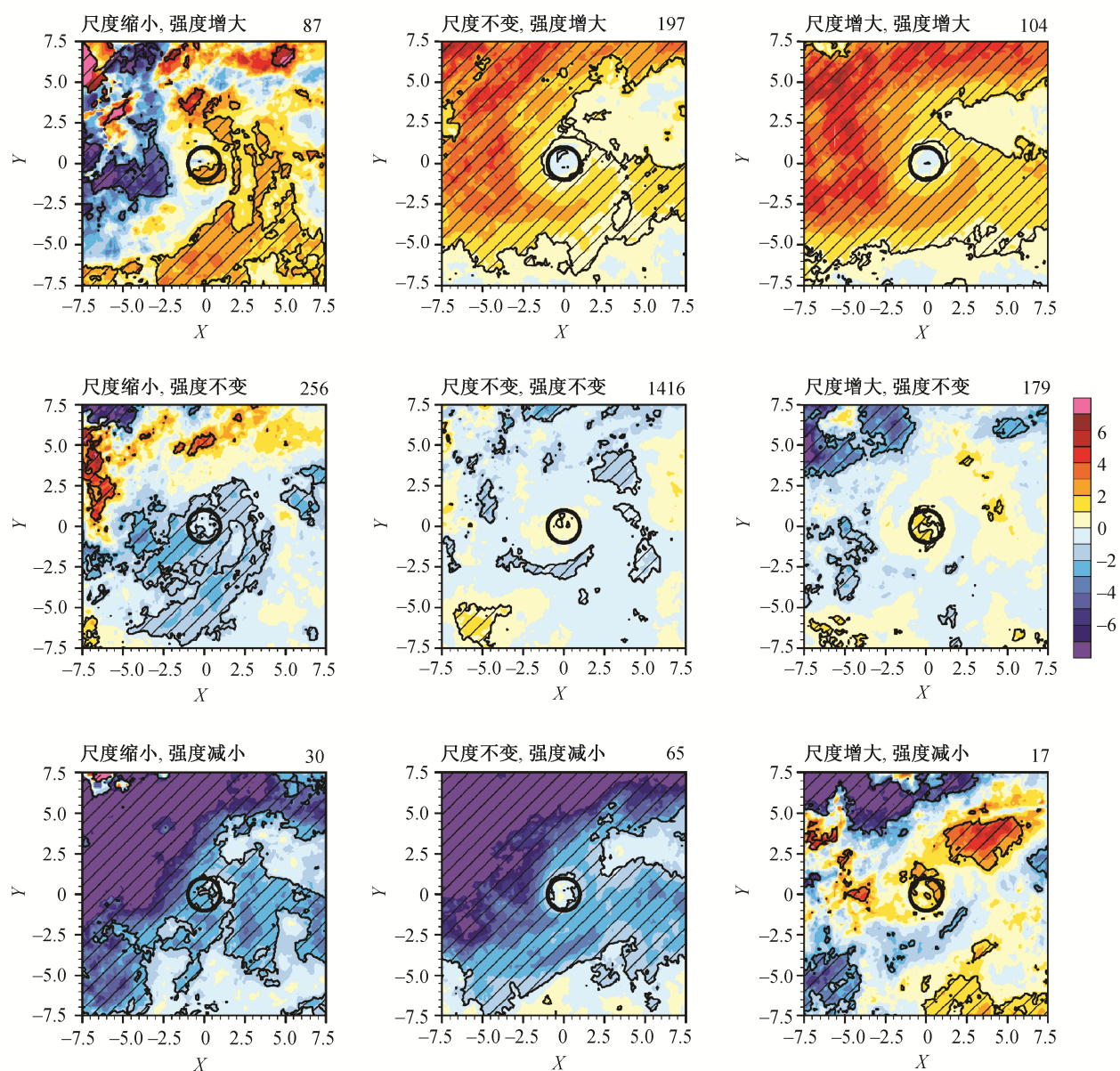


图 6 环境垂直平均风切变为 $v \leq 5 \text{ m/s}$ 的东风切变时各类热带气旋水汽柱总量集合平均的距平
Fig. 6 Average anomaly of the precipitable water on the different types TCs for the east wind shear ($v \leq 5 \text{ m/s}$)

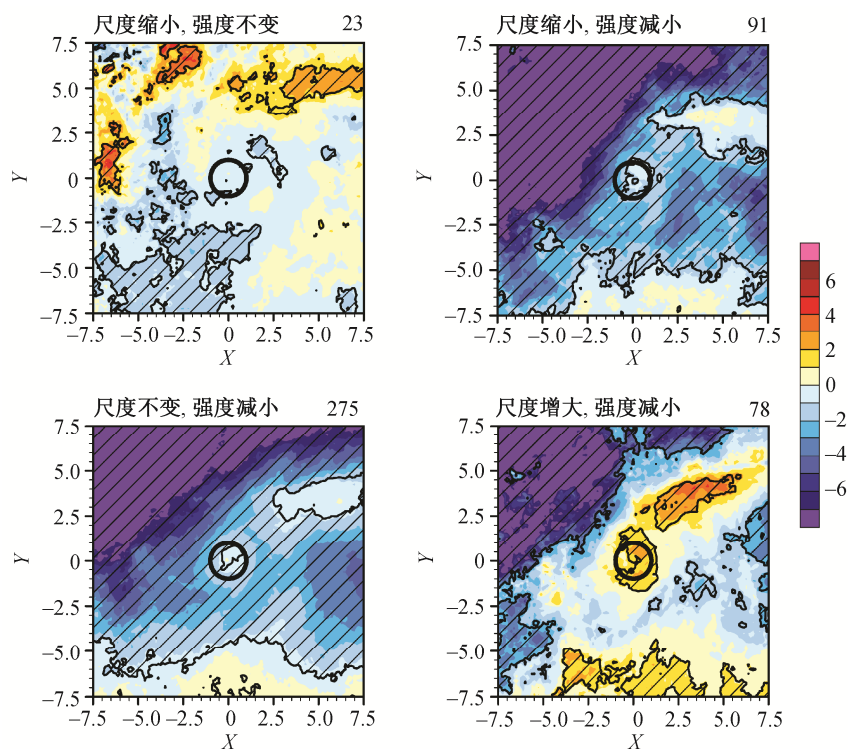


图 7 环境垂直平均风切变为 $v \leq 5 \text{ m/s}$ 的西风切变时各类热带气旋水汽柱总量集合平均的距平
Fig. 7 Average anomaly of the precipitable water on the different types TCs for the west wind shear ($v \leq 5 \text{ m/s}$)

3 结论

为了探讨西北太平洋热带气旋结构变化与环境垂直风切变和水汽场的关系, 本文对 2001—2014 年西北太平洋的 TC Best Track 资料中 385 个 TC (包含强度和尺度观测值的记录 4967 个) 进行了统计分析, 结果如下。

1) 西北太平洋 TC 强度的平均值为 43.1 m/s , 尺度的平均值为 210.7 km 。尺度的变率主要介于 $-10\% \sim +10\%$ 之间, 而强度的变率主要在 $-20\% \sim +20\%$ 范围。

2) 强度增大的 TC 主要体现为东风切变, 强度减小的 TC 主要体现为西风切变。

3) 在较强的垂直风切变 ($v > 5 \text{ m/s}$) 作用下, TC 的结构变化没有明显的水汽扰动; 而在较弱的垂直风切变 ($v \leq 5 \text{ m/s}$) 作用下, 增强(减弱)的 TC 伴随着正(负)的水汽扰动。

本文研究结果表明, 在强的环境垂直风切变作用下, 西北太平洋 TC 的结构变化仅对环境垂直风切变有响应; 而在弱的环境垂直风切变作用下, TC

的结构变化对环境水汽场也是敏感的, 且环境水汽场占主导作用。本研究结果可以为未来 TC 结构变化的预报提供统计学依据, 但需要进一步的理论分析来验证。

参考文献

- [1] Holland G J, Merrill R T. On the dynamics of tropical cyclone structural changes. *Q J R Meteor Soc*, 1984, 110: 723–745
- [2] Merrill R T. Environmental influences on hurricane intensification. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 1678–1687
- [3] Gray M W. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon Wea Rev*, 1968, 96: 669–700
- [4] Riemer M, Montgomery M T. Simple kinematic models for the environmental interaction of tropical cyclones in vertical wind shear. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 9395–9414
- [5] Willoughby H E. Forecasting hurricane intensity and impacts. *Science*, 2007, 315: 1232–1233
- [6] 陈联寿, 刘式适. 关于热带气旋尺度变化机制的初

- 步分析. 热带气象学报, 1997, 13(2): 105–111
- [7] Montgomery M T, Smith R K. Recent developments in the fluid dynamics of tropical cyclones. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2017, 49(1): 541–574
- [8] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 2005, 436: 686–688
- [9] Elsner J B, Kossin J P, Jagger T H. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 2008, 455: 92–95
- [10] Houze R A, Chen S S, Smull B F, et al. Hurricane intensity and eyewall replacement. *Science*, 2007, 315: 1235–1239
- [11] Derek O. Effects of environmental water vapor on tropical cyclone structure and intensity [D]. Miami: University of Miami, 2007
- [12] Wang Y. How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity?. *J Atmos Sci*, 2008, 66: 1250–1273
- [13] Wu L, Su H. Impact of environmental moisture on tropical cyclone intensification. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(24): 16111–16139
- [14] Ramage C S. Hurricane development. *Meteorology*, 1959, 16: 227–237
- [15] Gray W M. Global view of origin of tropical disturbances and storms. *Mon Wea Rev*, 1968, 96: 669–700
- [16] Merrill R T. Environmental influences on hurricane intensification. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 1678–1687
- [17] Zehr R M. Tropical cyclogenesis in the western North Pacific. *NOAA Tech Rep*, 1992, 53(9): 4723–4740
- [18] Frank W M, Ritchie E A. Effects of environmental flow on tropical cyclone structure. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 2044–2061
- [19] Frank W M, Ritchie E A. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2249–2269
- [20] 陈国民, 沈新勇, 刘佳. 垂直风切变对热带气旋强度和结构的影响. *气象研究与应用*, 2010, 28(1): 19–24
- [21] 谢礼江, 邱新法, 王伟. 西北太平洋热带气旋快速增强与环境垂直风切变. *热带地理*, 2013, 33(3): 242–249
- [22] Ying Y, Zhang Q. A modeling study of tropical cyclones structural changes in response to ambient moisture variations. *J Meteor Soc Japan*, 2012, 90(5): 755–770