

西北太平洋迅速加强热带气旋的
统计特征和识别预报试验李勋^{1,2} 赵声蓉³ 王勇⁴ 吴俞^{1,2} 李玉梅^{1,2}

(1 海南省南海气象防灾减灾重点实验室,海口 570203; 2 海南省气象台,海口 570203;

3 国家气象中心,北京 100081; 4 南京信息工程大学世界气象组织南京区域培训中心,南京 210044)

摘要 利用 2000—2014 年热带气旋(TC)最佳路径、最终分析资料和静止卫星红外云顶亮温(TBB)资料,对比分析了西北太平洋(WNP),以及南海(SCS)的迅速加强(RI),与非迅速加强(non-RI)TC 样本的环境背景和 TBB 统计特征,其中 non-RI 样本细分为不同的强度变化率即:缓慢加强(SI),强度稳定、缓慢减弱和迅速减弱等。结果表明,相对于 SI,WNP 海域的 RI 样本处于海表温度较高、海洋上层热容量较大、最大可能强度较大、高层辐散较强、风垂直切变(VWS)较弱和高层纬向风(U200)偏东分量较大等环境背景条件下;SCS 海域的 RI 样本较易发生在 VWS 较弱的环境背景条件下。此外,相对于 non-RI,支持 RI 发展的有利条件还包括中低层相对湿度较大、高层环境温度较低等。RI 样本通常具备的 TBB 特征为 TC 内核的对流云覆盖率较大、TBB 平均值相对较小。采用 K 最近邻分类算法进行 RI 预报试验,交叉检验结果表明,该方法对 RI 样本有一定的识别预报能力,RI 样本概括率达到 74.2%,技巧评分达到 0.717。

关键词 热带气旋;迅速加强;K 最近邻算法;分类预报

引言

热带气旋(以下简称 TC)强度变化预报,尤其是 TC 加强的极端情况:迅速加强(RI)预报不仅是重要的科学议题,且对防灾减灾具有重要意义。

多源观测和数值研究表明,RI 与内核对流爆发有着密切联系,当对流爆发位于最大风圈内侧时,TC 涡旋轴对称化和对流爆发的正反馈作用得以进一步发展,使得 TC 加强并发生 RI^[1-3]。特别是当对流爆发所导致的加热空气集中于 TC 中心上层时,对于 RI 发生更为有利^[4]。也就是说,涡旋对称加热比非对称加热更有利于 TC 加强^[5]。TC 涡旋对称或非对称结构变化,取决于大气环境风垂直切变(VWS)的强迫作用,在 VWS 影响下,TC 涡旋会稳定地向 VWS 下风方向左侧倾斜,TC 表现为非对称结构,较强的 VWS 延缓 TC 涡旋轴对称化过程,不利于 TC 加强^[6]。海表温度越高,TC 强度所能达到的上限值(最大可能强度,MPI)越大^[7-9]。另外,

较高的海洋上层热容量为途经 TC 提供更为有利的边界层湿熵热力条件,有利于 TC 内核对流爆发并发生 RI^[2,10]。中低层丰富的水汽输送也可为 TC 发展提供有利的环境热力条件^[11-14]。双 TC 互旋过程可能会加强低层水汽连体通道^[15]。此外,尽管受到粗糙地表下垫面摩擦影响,TC 登陆以后并非总是迅速消亡,与饱和湿度有关的潜热通量输送有利于 TC 强度维持^[16-17]。近年来,国内外 TC 强度预报客观统计方法相继投入测试,具备了一定的预报技巧^[18-19],但对于 RI 的预报效果依然不甚理想^[18],TC 强度预报进展依然不大^[20-21]。究其原因,主要是不同下垫面以及多种天气系统等因素对 TC 异常变化的影响较为复杂^[22]。尽管如此,统计预报仍然不失为一种相对有效的 TC 强度预报途径^[23]。将 TRMM 卫星观测的对流热塔用于 RI 统计预报,取得了一定的进展,但限于极轨卫星观测局限,样本代表性不足,仍有改进的空间^[24-25]。

K 最近邻(K-Nearest Neighbor,KNN)分类算

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家自然科学基金项目(41365005)、国家科技支撑项目(重大自然灾害预报预警及信息共享关键技术研究及示范 2013BAK05B03)、中国气象局行业专项(201406014,201406006)资助

作者简介:李勋,男,1981 年生,高级工程师,主要从事热带气旋强度和路径变化研究,Email:cyrilpat@sina.com

收稿日期:2015 年 7 月 20 日;定稿日期:2016 年 4 月 6 日

法,是经典的模式识别方法,也是应用最广泛的机器学习方法之一,利用过去的范例来解决当前问题的类比推理,亦称为相似方法^[26]。在处理不平衡数据集的分类问题上,KNN 算法优于朴素贝叶斯分类和支持向量机等分类方法^[27]。我国学者应用该方法制作我国站点日最大风速和短期晴雨预报,已取得了良好的数值预报释用效果^[26-28]。

单一 TC 生命史中往往包含了除 RI 以外的其他不同强度变化率阶段,如缓慢加强、强度稳定、缓慢减弱和迅速减弱等^[29-31]。最近,研究分析了西北太平洋 TC 的时空分布和活动特征^[6,29],以及对比了西北太平洋以及大西洋海域,RI 和其他强度变化率样本的环境背景和卫星观测特征,用于寻找与 RI 有关的关键因子^[24-25]。本文将进一步寻找与 RI 有关的环境背景和卫星观测因子,除了西北太平洋海域以外,还将对比分析南海地区的不同强度变化率 TC 样本统计特征。此外,基于本文的统计分析结果,还将应用距离加权 KNN 算法(Distance-Weighted K-Nearest Neighbor,DWKNN)^[27]进行 RI 预报试验。本文以下内容划分为:第 1 部分为资料、若干定义、计算和方法;第 2 部分为环境背景和静止卫星观测因子的统计结果分析;第 3 部分为 RI 预报试验;第 4 部分为主要结论。

1 资料、若干定义、计算和方法

1.1 资料

(1)TC 的强度和路径取自中国台风网“CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集”,TC 强度由每日世界时的 4 个时次的底层近中心最大风速表示,分别为 00:00、06:00、12:00 和 18:00,选取样本时去除

陆地活动的时次;

(2)日本静止气象卫星红外通道反演的红外云顶亮温(TBB)资料,水平空间分辨率为 0.05° 。

(3)美国国家环境预报中心 FNL 最终分析资料,水平空间分辨率为 1.0° ;

(4)美国国家海洋大气管理局和迈阿密大学提供的 OISST 逐日海温以及海洋上层热容量资料集,水平分辨率 0.25° 。以上资料研究年限均统一取自 2000—2014 年。

1.2 热带气旋强度变化定义

为了分析西北太平洋 TC(包含南海 TC)强度的变化趋势或变化率,用每一初始时刻($t=0$ h)未来 24 h 底层近中心最大风速变化(表示为 ΔV_{24})表示。

图 1a 是西北太平洋 TC 样本的 ΔV_{24} 累积频数和变化区间频数。可见,西北太平洋 TC 强度变化主要集中在约 0.0 m/s 至 10.1 m/s 区间内,当 $\Delta V_{24} \geq 15.6$ m/s 区间时,频数为 8.2% ,累积频数达到 91.8% 以上,该数值与研究^[18,24,29]将 30 kt(约 15.4 m/s)作为 TC 发生 RI 的标准接近。

相对于整个西北太平洋海域而言,南海区域地理范围较小。因此,计算南海 TC 强度变化率时,以每一初始时刻未来 12 h 底层近中心最大风速变化(表示为 ΔV_{12})表示。

图 1b 显示,南海 TC 的 ΔV_{12} 主要集中在约 -2.5 m/s 至 5.1 m/s 区间内,当 $\Delta V_{12} \geq 7.2$ m/s 区间时,频数为 8.7% ,累积频数达到 91.3% 以上,该数值与研究^[27]将 7.1 m/s 作为南海 TC 发生 RI 的标准接近。

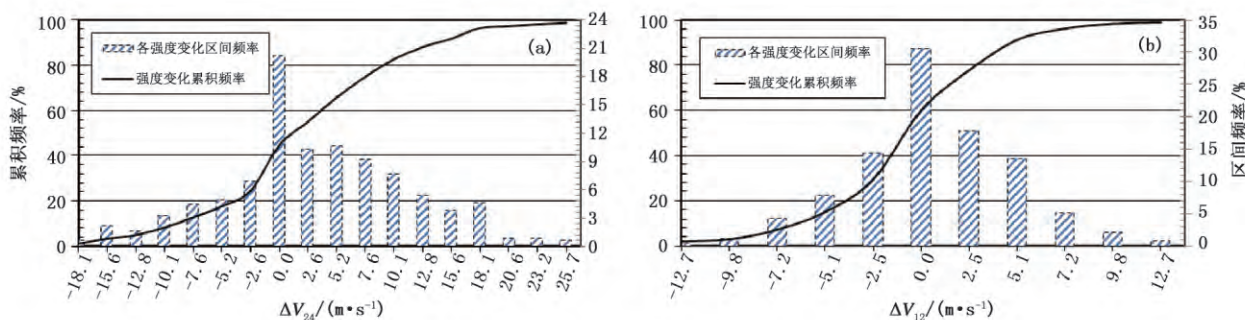


图 1 样本强度变化累积频率和区间频率:
(a)西北太平洋海域,24 h 累积;(b)南海,12 h 累积

本文将 $\Delta V_{24} \geq 15.6$ m/s 作为西北太平洋 TC 的 RI 发生标准,同时,当西北太平洋 TC 的 $\Delta V_{24} < 15.6$ m/s 时,归类为非迅速加强 TC(non-RI)。总的样本数为 4741 个,其中,RI 样本数为 391 个,non-RI 有 4350 个样本。另外,定义南海 TC 的 RI 标准为 $\Delta V_{12} \geq 7.2$ m/s,当 $\Delta V_{12} < 7.1$ m/s 时,归类为 non-RI,RI 样本数为 86 个,non-RI 有 897 个样本,总的样本数为 983 个。并对 non-RI 样本细分为缓慢加强(SI)、强度稳定(IS)、缓慢减弱(SW)和迅速减弱(RW)等强度变化类别(表 1),上述划分与已有研究一致^[29-31],体现了 TC 生命史的 5 种发展类型^[31]。

表 1 强度变化定义

| 类别 | 全部样本 24 h | | 南海区域样本 | |
|--------|--------------------------------|------|---------------------------------------|-----|
| | 强度变化率/ (m·s ⁻¹) | 样本数 | 的 12 h 强度 变化率/(m·s ⁻¹) | 样本数 |
| RW | ≤ -15.6 | 161 | ≤ -7.2 | 29 |
| SW | $-15.5 \sim -5.3$ | 678 | $-7.1 \sim -2.7$ | 118 |
| IS | $-5.2 \sim 5.2$ | 2277 | $-2.6 \sim 2.6$ | 618 |
| SI | $5.3 \sim 15.5$ | 1234 | $2.7 \sim 7.1$ | 132 |
| non-RI | < 15.6 | 4350 | < 7.2 | 897 |
| RI | ≥ 15.6 | 391 | ≥ 7.2 | 86 |

1.3 与 TC 强度变化有关的环境背景因子

为了比较各强度变化类别初始时刻的统计特征,选取表 2 所示的热力、动力环境背景因子,包括海表温度(SST)、海洋上层热容量(OHC)、低层相对湿度(RHLO)、中层相对湿度(RHMD)、200 hPa 高度 TC 中心附近温度(T200)、当前时刻最大可能强度(VMPI)、高层散度(D200)、VWS、和 200 hPa 纬向风(U200)。此外,研究表明^[18],过去 12 h 中心风速变化(PER),代表 TC 强度的持续性变化,也是 RI 的预报较好因子。

研究^[2,7-8,18,23]表明,较高的 SST 和 OHC,可为 TC 发展加强提供有利的下垫面条件,近表层暖湿空气更为充足。

RHLO 和 RHMD,分别反映了 TC 周围的环境场低层和中层水汽含量。

T200 反映了 TC 中心附近的高层出流环境温度,TC 最大可能强度理论^[7]认为,在相同 SST 情况下,T200 越低,TC 所能达到的强度越大,即理想的“卡诺热机”效率越高。在考虑 T_{200} 热效率的情况下,

表 2 样本初始时刻用于统计分析的环境场因子及 TBB 观测因子

| 变量 | 定 义 |
|------|---|
| PER | TC 中心附近最大风速前 12 h 的变化量(南海地区为前 6 h,单位:m/s) |
| SST | TC 中心附近海表温度(单位:℃) |
| OHC | TC 中心附近上层海洋热容量(单位:kJ/cm ²) |
| RHLO | 距中心 2°~8°经纬度圆环平均低层相对湿度(850~700 hPa,单位:%) |
| RHMD | 距中心 2°~8°经纬度圆环平均中层相对湿度(700~500 hPa,单位:%) |
| T200 | 距中心 2°~8°经纬度圆环平均温度(200 hPa,单位:℃) |
| VMPI | 当前时刻最大可能强度(单位:m/s) |
| D200 | 距中心 0°~10°经纬度圆域平均高层散度(200 hPa,单位:10 ⁻⁷ /s) |
| VWS | 距中心 2°~8°经纬度圆环平均风垂直切变(200~850 hPa,单位:m/s) |
| U200 | 距中心 2°~8°经纬度圆环平均纬向风(200 hPa,单位:m/s) |
| PX40 | 距中心 0.5°~2.0°经纬度圆环内的 TBB 小于 -40℃的格点数所占百分率 |
| STPX | 距中心 0.5°~2.0°经纬度圆环内 TBB 标准偏差(单位:℃) |
| AG20 | 距中心 0.5°~2.0°经纬度圆环内的 TBB 平均值(单位:℃) |

最大可能强度 VMPI 的经验公式由下式给出^[8]:

$$I_{VMP} = \epsilon \{A + B \exp[C(T_{SS} - T_{SS0})]\} \quad (1)$$

其中, $\epsilon = \sqrt{(T_{SS} - T_{200})/T_{200}}$, $A = 0.87$ m/s, $B = 140.35$ m/s, $C = 0.1206$ ℃和 $T_{SS0} = 30$ ℃, T_{SS} 为 SST, T_{SS0} 为 SST_0 , T_{200} 为 T200。

D200 代表了 TC 中心附近的高层辐散状况。VWS 值反映了影响 TC 发展的环境风垂直切变大小,通常认为^[6-8]较强 VWS 不利于 TC 发展加强。高层 200 hPa 纬向风(U200)数值可反映高层大气环流影响。

1.4 TC 对流特征

近年来,用于描述 TC 对流特征的 TBB 资料逐步应用于 TC 强度客观预报方法^[18-19,23]。挑选描述 TC 内核对流特征的 TBB 因子时(表 2),主要考虑了已有研究的结果。分析^[18-19]显示,距 TC 中心

$0.5^{\circ} \sim 2.0^{\circ}$ 经纬度圆环内(通常是 TC 眼墙区)的 TBB 值与 TC 强度变化关联度较高,当 TBB 为 -40°C 时,通常视为强对流云带特征^[31,32]。此外,本文还计算了距 TC 中心 $0.5^{\circ} \sim 2.0^{\circ}$ 圆环内的 TBB 标准偏差和平均值。

1.5 方法

采用 t 检验方法^[33] 比较 RI 以及其他强度变化样本的环境背景和 TBB 因子统计结果是否存在显著差异。KNN 分类算法用于 RI 预报试验,将在下文予以介绍。

2 统计结果

本节给出了各强度变化样本对应的环境背景和 TBB 因子统计结果,以及 RI 样本与其他强度变化样本的因子之间是否存在差异(表 3)。与文献^[34] 相似,本文给出各样本变量的主要数值分布特征,以第 1、4 和第 3、4 分位数(简称 Q_1 和 Q_3 ,由小到大排列后第 25% 和 75% 的数值)表示某个因子的典型值范围(图 2)。

表 3 WNP 海域样本初始时刻各环境因子平均值(以及与 RI 均值之差)

| 因子 | 迅速加强 | 非迅速加强 | 缓慢加强 | 强度稳定 | 缓慢减弱 | 迅速减弱 |
|------|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| PER | 6.0 | 1.5(4.5*) | 3.7(2.3*) | 1.4(4.6*) | -0.8(6.8*) | -2.3(8.7*) |
| SST | 29.4 | 28.9(0.5*) | 29.3(0.1#) | 28.9(0.5*) | 28.4(1.0*) | 28.1(1.3*) |
| OHC | 87.6 | 61.8(25.8*) | 79.9(7.7*) | 58.8(28.8*) | 46.5(41.1*) | 37.2(50.4*) |
| RHLO | 78.8 | 77.3(1.5*) | 78.5(0.3) | 77.2(1.6*) | 75.7(3.1*) | 75.7(3.1*) |
| RHMD | 71.1 | 67.5(3.7*) | 70.7(0.4) | 67.3(3.8*) | 63.1(8.0*) | 63.2(7.9*) |
| T200 | -51.0 | -50.5(-0.5*) | -50.9(-0.1) | -50.5(-0.5*) | -49.9(-1.1*) | -49.5(-1.5*) |
| VMPI | 73.2 | 67.7(5.5*) | 72.5(0.6+) | 67.8(5.4*) | 61.4(11.8*) | 56.9(16.3*) |
| D200 | 66.9 | 53.1(13.8*) | 62.4(4.5#) | 50.9(16.0*) | 43.9(23.0*) | 51.0(15.9*) |
| VWS | 5.2 | 7.2(-2.0*) | 6.1(-0.9*) | 7.4(-2.2*) | 8.0(-2.8*) | 9.8(-4.6*) |
| U200 | -2.1 | -1.4(-0.7*) | -2.9(0.8*) | -1.8(-0.3) | 1.5(-3.6*) | 4.4(-6.5*) |

注: t 检验显著性差异水平分别为 $\alpha=0.01$ (*)、 $\alpha=0.05$ (+)和 $\alpha=0.10$ (#),下同。

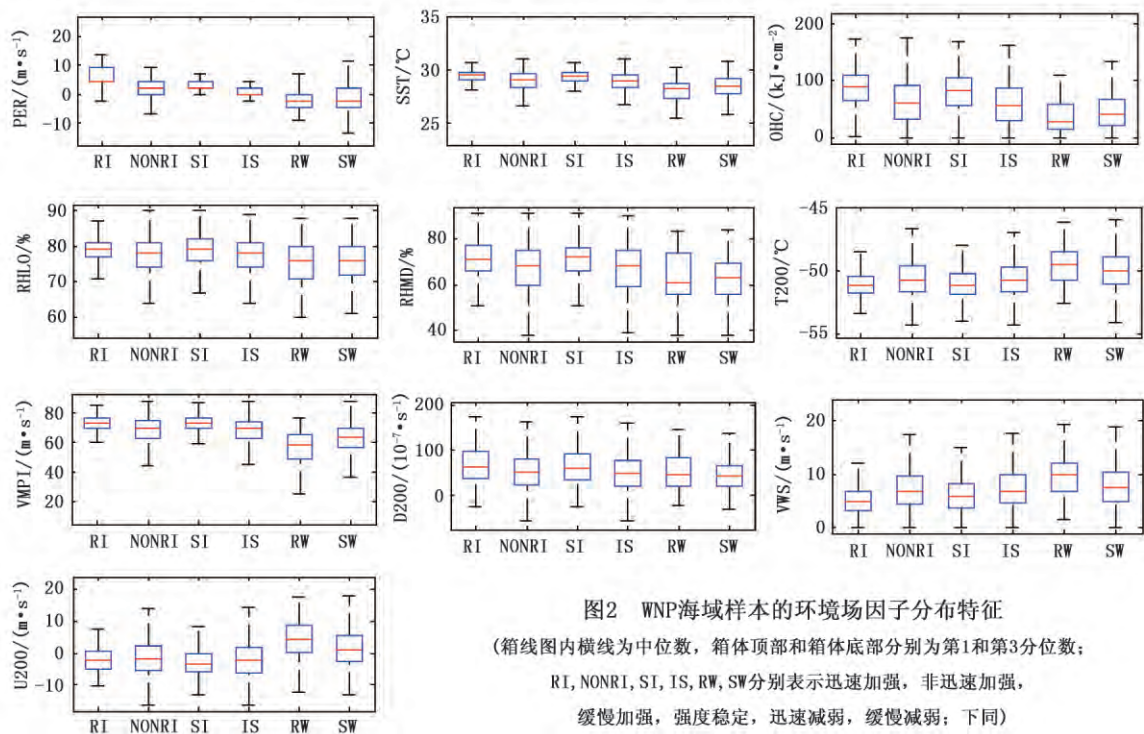


图2 WNP海域样本的环境场因子分布特征
(箱线图内横线为中位数,箱体顶部和箱体底部分别为第1和第3分位数;
RI, NONRI, SI, IS, RW, SW 分别表示迅速加强,非迅速加强,
缓慢加强,强度稳定,迅速减弱,缓慢减弱;下同)

2.1 环境背景条件

2.1.1 WNP 海域

总体来看,对于整个 WNP 海域的 RI 和 non-RI 样本而言,所有因子的两者样本差异均通过了 0.01 显著性检验(表 3)。当 non-RI 样本细分至各个强度变化类别时,RI 与 SI 样本的差异最小,只有 7 个因子通过了显著性(至少达到 0.1 水平)检验,而 RI 与非加强(即强度稳定及减弱样本,包括 IS、SW 和 RW)样本的差异通过检验的因子数量与 RI 和 non-RI 样本的对比因子数量几乎一致,且差异逐步增大。

具体而言,RI 和 non-RI 两组样本的 PER、SST、OHC、RHLO、RHMD、T200、VMPI、D200、VWS 和 U200 等因子,平均值分别相差 4.5 m/s、0.5 °C、25.8 kJ/cm²、1.5%、3.7%、-0.5 °C、5.5 m/s、13.8×10⁻⁷/s、-2.0 m/s 和 -0.7 m/s(表 4),且差异往往随着样本的强度减弱变化率增大而扩大(如 RI 与 RW 样本相比较)。另外,RI 的各因子中值分别达到 5.6 m/s、29.5 °C、90.5 kJ/cm²、79.0%、71.0%、-51.1 °C、73.5 m/s、63.0×10⁻⁷/s、4.8 m/s 和 -2.0 m/s(图 2),典型值范围(Q₁ 至 Q₃)分别是 4.4~8.9 m/s、29.1~29.8 °C、67.2~109.6 kJ/cm²、77%~81%、66%~77%、-51.7~-50.4 °C、69.9~76.6 m/s、35.0~95.0×10⁻⁷/s、3.2~6.8 m/s 和 -5.0~0.7 m/s。non-RI 样本过去 12 h 强度增加值较小(PER,0.1~4.1 m/s),主要分布在:相对较冷的下垫面(SST,28.4~29.6 °C;OHC,31.1~90.6 kJ/cm²)、较干的 RHLO(74%~

81%) 和 RHMD(60%~75%)、较暖的 T200(-51.6~-49.6 °C)、较小的 VMPI(62.7~75.0 m/s)、较弱的 D200(23~79×10⁻⁷/s)、较强的 VWS(4.4~9.6 m/s),中值分别为 2.1 m/s、29.1 °C、59.6 kJ/cm²、78.0%、69.0%、-50.7 °C、69.9 m/s、50.0×10⁻⁷/s 和 6.8 m/s(图 2)。

总之,RI 主要发生在:较暖的下垫面(SST 和 OHC)、较高的 RHLO 和 RHMD、较冷的 T200、较大的 VMPI、较强的 D200、较弱的 VWS 和偏东风相对较强等环境背景条件下。较高的 SST 和 OHC,以及较低的 T200,意味着近表层空气更加暖、湿,TC 高层出流空气温度更低,该状态下的理想“卡诺热机”效率更高,TC 内核有组织、旺盛的对流活动发展更为强盛^[2,7,8],表明环境背景热力因子能够支持较大强度的 TC 发展,所对应的 VMPI 更大。较高的 RHLO 和 RHMD,说明 RI 较易发生在大气低层水汽含量较高,且大气湿层更加深厚的情况下^[29]。RI 发生于较弱的 VWS 环境背景中,高层纬向气流以偏东风为主(即 U200 为负值),适当的东风切变往往有利于 TC 发展^[23]。

2.1.2 SCS 海域

在 SCS 海域,由于其地理范围相对较小,地处高温高湿的热带季风区,海气交换显著,总体而言,RI 与其他样本的差异不如 WNP 海域的明显。RI 与 non-RI、SI、IS、SW 和 RW 样本相比较,分别有 6、3、6、8 和全部 10 个因子的样本差异通过了显著性检验(至少达到 0.1 水平,表 4)。

表 4 同表 3,但为 SCS 海域

| 因子 | 迅速加强 | 非迅速加强 | 缓慢加强 | 强度稳定 | 缓慢减弱 | 迅速减弱 |
|------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| PER | 1.8 | 0.2(1.6*) | 1.1(0.5*) | 0.3(1.5*) | -1.3(3.1*) | -2.2(4.0*) |
| SST | 29.1 | 28.9(0.2+) | 29.2(-0.1) | 29.0(0.1#) | 28.6(0.5*) | 28.1(1.0*) |
| OHC | 49.3 | 45.4(3.9#) | 54.5(-5.2#) | 46.4(2.9) | 36.4(12.9*) | 26.9(22.4*) |
| RHLO | 79.0 | 78.7(0.3) | 79.2(-0.2) | 78.8(0.2) | 76.6(2.4*) | 76.3(2.7*) |
| RHMD | 71.4 | 70.0(1.4) | 72.8(-1.4) | 70.9(0.5) | 65.8(5.6*) | 62.4(9.0*) |
| T200 | -50.9 | -50.9(0.0) | -50.8(-0.1) | -50.9(0.0) | -50.9(0.0) | -51.2(0.3#) |
| VMPI | 72.8 | 69.6(3.2*) | 71.8(1.0) | 70.5(2.3+) | 66.1(6.7*) | 61.8(11.0*) |
| D200 | 58.5 | 47.3(11.2*) | 59.8(-1.3) | 47.9(10.6+) | 35.5(23.0*) | 30.8(27.7*) |
| VWS | 6.4 | 8.9(-2.5*) | 7.3(-0.9#) | 9.0(-2.6*) | 9.3(-2.9*) | 11.0(-4.6*) |
| U200 | -3.5 | -4.2(0.7) | -4.3(0.8) | -4.8(1.3#) | -3.1(-0.4) | -0.3(-3.2*) |

相对于 non-RI, RI 样本过去 6 h 强度增加值较大(PER, 0.1~4.1 m/s), 主要活动的环境背景条件是: 相对较暖的下垫面(SST, 28.7~29.6 °C; OHC, 33.6~62.6 kJ/cm²)、较大的 VMPI(67.8~78.1 m/s)、较强的 D200($36\times10^{-7}\sim74\times10^{-7}$ /s)、以及较小的 VWS(4.3~8.7 m/s)(图略)。随着其余样本强度减弱变化率增加, 两者的差异也愈发明显。例如, 相对于 SW 样本, RI 还具有相对较高的 RH-LO(77%~82%)和 RHMD(67%~76%)等特征。RI 和 SI 样本相比, 两者差值相对较小, 除了 VWS 和 OHC 以外(通过 0.1 显著性检验), 其他环境背景因子无显著性差异, SI 途经的海洋下垫面更暖(OHC, 40.3~64.6 kJ/cm²)。

2.2 红外云顶亮温

将 RI 及其他样本的 TBB 因子进行比较(表 5 和表 6, 分别为 WNP 和 SCS 海域), 可见所有因子差异几乎都通过了显著性检验。

整个 WNP 海域(图 3, SCS 海域, 图略), RI 和 non-RI 之间 PX40、STPX 和 AG20 等因子的均值差分别为 15.6(24.2)%、-3.9(-5.1)°C 和 -15.1(-18.8)°C(表 5、6), RI 样本的各因子中值分别为 91(89)%、8.9(10.3)°C 和 -73.1(-68.8)°C, 典型值范围分别是 79.0~97.0(79.0~96.0)%、6.8~11.8(7.7~14.6)°C 和 -76.7~-66.8(-76.2~-61.6)°C。SI 各因子与 RI 的差异有所减小, SI 各因子中值分别为 79.0(78)%、12.0(12.5)°C 和 -66.2(-66.4)°C, 典型值范围是 62.0~94.0(66~95)%、8.5~17.8(8.7~18.4)°C 和 -73.4~-53.9(-72.8~-55.1)°C。

上述结果表明, 相对于 non-RI 样本, RI 通常具备的 TBB 观测特征为: 对流云覆盖率较大、标准偏差相对较小, 说明 RI 过程中眼墙区对流组织较为深厚, 结构较为对称^[23,32]。

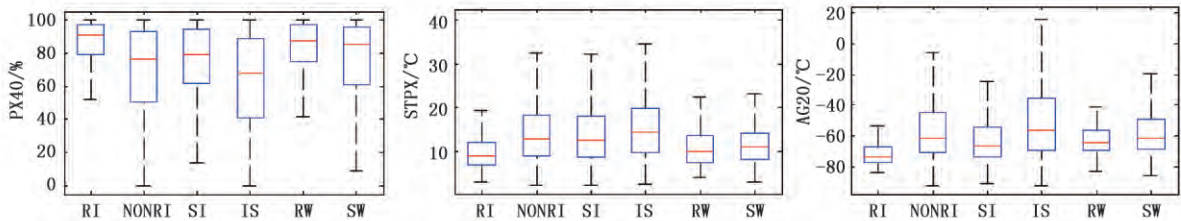


图 3 同图 2, 但为 WNP 海域样本的 TBB 因子分布特征

表 5 WNP 海域样本初始时刻各 TBB 因子平均值以及与 RI 均值之差

| 因子 | 迅速加强 | 非迅速加强 | 缓慢加强 | 强度稳定 | 缓慢减弱 | 迅速减弱 |
|------|-------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| PX40 | 85.2 | 69.6(15.6*) | 75.2(10.0*) | 63.6(21.6*) | 76.2(9.0*) | 83.1(2.1) |
| STPX | 9.9 | 13.8(-3.9*) | 13.5(-3.4*) | 14.9(-5.0*) | 11.8(-1.9*) | 11.0(-1.1+) |
| AG20 | -70.0 | -54.9(-15.1*) | -61.9(-8.1*) | -50.0(-20.0*) | -56.8(-13.2*) | -61.6(-8.4*) |

注: t 检验显著性差异水平分别为 $\alpha=0.01$ (*)、 $\alpha=0.05$ (+)和 $\alpha=0.10$ (#)。

表 6 同表 5, 但为 SCS 海域

| 因子 | 迅速加强 | 非迅速加强 | 缓慢加强 | 强度稳定 | 缓慢减弱 | 迅速减弱 |
|------|-------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| PX40 | 84.8 | 60.6(24.2*) | 74.2(10.6*) | 56.5(28.3*) | 63.8(21.0*) | 67.8(17.0*) |
| STPX | 11.5 | 16.6(-5.1*) | 14.1(-2.6*) | 17.6(-6.1*) | 15.0(-3.5*) | 12.4(-0.9*) |
| AG20 | -67.7 | -48.9(-18.8*) | -62.5(-5.2+) | -44.4(-23.3*) | -52.8(-14.9*) | -58.0(-9.7*) |

3 热带气旋迅速加强预报试验

上文分析表明, RI 和 non-RI 样本的环境背景

因子和 TBB 观测之间具有统计差异。已有研究^[23,29]主要根据 2 类样本之间具有统计差异的环境因子, 建立 RI 发生可能性指标估计事件发生的

概率信息。由于区分 RI 和 non-RI 可视为事件分类,因此,本文尝试采用 KNN 分类算法进行基于交叉检验的 RI 预报试验。

KNN 分类算法可概括为:首先计算待分类样本与已知类别的训练样本之间的相似度,找到相似度与待分类样本数据最近的 K 个邻居;再根据这些邻居进行归属判别,待分类样本也将判别为这个归属。也就是说,依据已有的数据类型,将新数据进行归类识别,识别结果就是天气预报的定性判别,即视相似条件下发生的“行为”会产生相似的结果。

交叉检验是评估某个模型(以统计分析、机器学习算法建立),对随机事件的预报能力或误差的常用方法。具体做法是,将历史资料集分割成 n 个样本,遍历资料集 n 次,直到每个样本均单独作为一次测试集,其余 $n-1$ 个样本用来训练建模,平均 n 次预报正确率作为评估结果。

算法具体步骤如下^[26,28]:

步骤 1、建立历史和测试数据集。

选取 RI 和 non-RI 之间具有统计差异的因子,根据交叉检验方法,设整个资料集中共有 n 个 RI 和 non-RI 样本,取 $n-1$ 个样本建立标准化历史数据集 HistSet: $\{[X, Y]_i, 1 \leq i \leq n-1\}$, 其中, $[X, Y]_i$ 为第 i 个样本(共有 $n-1$ 个样本),该样本的条件属性为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, 即包含着 m 个因子。 Y 为该样本的类别属性,也就是对应 RI 或 non-RI 实况,其值 $\delta(Y_i)$, 分别取为 1(正样本)或 0(负样本),代表着该天气事件发生或不发生。

余下 1 个样本作为待预报数据,也就是待分类对象: ObjSet $\{X'\}$, 其中, $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_m)$ 包含着与 X 对应的 m 个因子,循环交叉更换待预报和历史数据集,直至遍历整个资料集为止(需 n 次)。

步骤 2、遍历历史数据集,确定样本的相似性。

计算 X' 与 HistSet 中第 i 个已知属性历史样本 X 之间的欧氏距离:

$$D(X', X_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x'_j - x_j)^2} \quad (2)$$

其中 $1 \leq i \leq n-1, 1 \leq j \leq m$, 根据式(2), D 值越小,相似性越大,反之亦然。

步骤 3、选取最近邻子集。

由步骤 2 得到 $n-1$ 个距离 D , 数值由小到大升序排列,选取前 k 个样本,即最近邻子集:

$$S = \{[X, Y]_1, [X, Y]_2, \dots, [X, Y]_k\}$$

子集 S 范围大小对于 ObjSet 类别预报效果有直接影响。为取得最优化的最近邻子集,设 k 值范围为 $1 \sim 50$ 。子集 S 中各样本的距离权重由下式给出:

$$\omega_i = \frac{D(X', X_k) - D(X', X_i)}{D(X', X_k) - D(X', X_1)}, 1 \leq i \leq k \quad (3)$$

按照下式判决最近邻子集 S 相似度最大类的属性,

$$Y' = \arg \max_{i=1}^k \omega_i \delta(Y_i) \quad (4)$$

也就是说,统计 S 中归属于 RI 和 non-RI 类别,所对应的距离权重和类别属性乘积之和,将 ObjSet 归属于乘积之和最大的一类,从而做出预报。

循环使用步骤 1 建立的 HistSet 和 ObjSet 数据集,采用正样本概括率(probability of detection, POD)、空报率(false alarm ratio, FAR)和预报技巧评分(皮尔斯技巧评分, Peirce skill score, PSS, 见表 7 定义)对 RI 预报进行评估。PSS 相当于 POD-FAR, 是评估极端事件预报能力的有效手段,依据定义,取值范围为正负 1 之间,正值时为正预报技巧,正值越大,预报技巧越高,负值时为负预报技巧^[18]。

表 7 预报技巧检验分类

| 类别 | 实况为正样本 | 实况为负样本 | 技巧检验 | 定义 |
|--------|------------|-------------|----------|-----------------------------|
| 预报为正样本 | a : 事件发生 | b : 空报 | 正样本概括率/% | POD: $a/(a+c)$ |
| | | | 空报率/% | FAR: $b/(a+b)$ |
| 预报为负样本 | c : 漏报 | d : 无事件发生 | 预报技巧评分 | PSS: $(ad-bc)/[(a+c)(b+d)]$ |

为了考察不同因子组合对基于 KNN 分类算法 RI 预报效果的影响,本文首先逐一测试了单一因子时的 RI 预报效果。图 4 为使用单一因子进行 RI 预报,按照 POD 从高到低顺序排列的效果(图 4a 为

WNP 海域,图 4b 为 SCS 海域)。从中可以看出,在 WNP 海域,排位最靠前的是因子 PER 和 AG20, POD 分别达到 23.8% 和 19.4% (分别命中 93 个、391 个和 76 个、391 个 RI 事件),排位最后的是 SST,

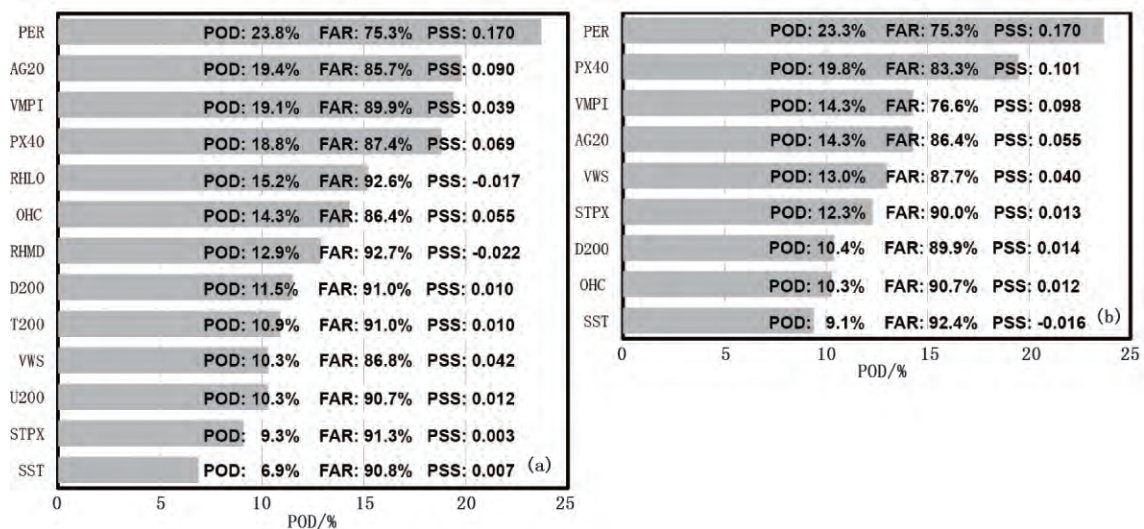


图4 应用单个因子,基于KNN算法进行RI预报的效果:(a)WNP海域,(b)SCS海域

POD为6.9%(命中27个、391个RI事件);在SCS海域,排位最靠前的是因子PER和PX40,POD分别达到23.3%和19.8%(分别命中20个、86个和17个、86个RI事件),排位最后的是SST,POD为9.3%(命中8个、86个RI事件)。总的来说,持续性预报因子PER依据POD排位最为靠前,该结果与大西洋和东太平洋RI预报中该因子所具有的高权重是一致的^[18],原因可能在于RI样本中该因子主要分布区间为较大的强度变化增加率,明显高于其余样本(图2)。TBB因子依据POD排位也较为靠前,其次是VMPI,这也与RI和non-RI两类样本的TBB和VMPI因子数值差异较大有关。另外,基于单一因子RI预报的FAR相对较高,普遍达到80%以上,例如,在WNP海域,RHMD因子的FAR达到92.7%(空报639个、689个RI事件)。空报次数较多,不利于提高预报技巧,PSS评分为负技巧的-0.022。

依次增加因子,进行基于组合方案的RI预报试验,结果表明预报效果有了明显改善(表8、9),基本上,FAR随着因子数量增多而逐渐减小,PSS随着因子数量增多而逐渐增加,说明了TC强度变化不是单一因子造成的结果^[19,29]。在WNP海域,当 $n=2$ 时,所用因子是PER和AG20,命中152例RI,空报230例,漏报240例,计算得POD为38.8%,FAR为60.2%,PSS为0.335;当 $n=13$ 时,预报效果最好,所用因子为全部具有统计差异的环境背景和TBB因子,命中290例RI,空报103

例,漏报101例,计算得到POD为74.2%,FAR为26.2%,PSS为0.717。在SCS海域,当 $n=2$ 时,所用因子是PER和PX40,命中32例RI,空报59例,漏报56例,计算得到POD为37.2%,FAR为64.8%,PSS为0.311;当 $n=9$ 时,预报效果最好,命中43例RI,空报50例,漏报43例,计算得到POD为50.0%,FAR为54.0%,PSS为0.445。

已有研究^[18]结果显示,在大西洋和东太平洋,RI预报试验的POD、FAR和PSS,分别约为75%和45%,73%和61%,0.66和0.33。本文中,WNP和SCS海域的RI预报效果,最佳方案POD、FAR和PSS,分别为74.2%和50.0%,26.2%和54.0%,0.717和0.445。上述对比表明,基于KNN算法的RI预报试验,POD与之接近,但FAR相对较低,PSS评分高于大西洋和东太平洋RI预报试验。

此外,选取了2012年度,强度预报出现较大误差,同时也是当年登陆我国大陆地区的最强台风,强台风“韦森特”(1208)^[35],作为代表个例,进一步描述RI预报效果(事先剔除了“韦森特”样本)。“韦森特”生命史中符合本文个例选取条件的共有7个时刻,涵盖了其南海生成到近海发生RI登陆广东沿海一带地区前的主要时间段(表10)。从表10可见,“韦森特”在盛夏生成及活动,南海下垫面条件十分理想,各时刻的SST都在29.3℃以上,OHC在58 kJ/cm²以上,均高于各类样本平均值,因此,VMPI也相对较大。尽管高层辐散(D200)逐渐增加,但VWS均较为偏大(VWS主要为8.7 m/s以

上,大于 RI 和 SI 样本均值),大气环境背景主观上不利于“韦森特”出现 RI^[35]。随着“韦森特”逐渐发展,内核对流组织趋于对称和成熟,PX40、STPX 和 AG20 逐渐接近 RI 样本均值。预报结果显示,几乎

全部成功捕捉到了“韦森特”的 non-RI 平稳发展期,期间出现空报和漏报各一次,最后成功捕捉到了近海登陆前的两次 RI 过程,预报误差小于业务预报结果^[35]。

表 8 WNP 海域,不同数目(*n*)因子组合情况下的 RI 预报效果

| <i>n</i> | 组合方案 | POD | FAR | PSS |
|----------|--|-------|-------|-------|
| 2 | PER, AG20 | 0.388 | 0.602 | 0.335 |
| 3 | PER, AG20, VMPI | 0.471 | 0.548 | 0.419 |
| 4 | PER, AG20, VMPI, PX40, | 0.550 | 0.482 | 0.504 |
| 5 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO | 0.638 | 0.402 | 0.600 |
| 6 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO, OHC | 0.676 | 0.372 | 0.640 |
| 7 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO, OHC, RHMD | 0.697 | 0.325 | 0.667 |
| 8 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO, OHC, RHMD, D200 | 0.706 | 0.316 | 0.676 |
| 9 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO, OHC, RHMD, D200, T200 | 0.712 | 0.326 | 0.681 |
| 10 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO, OHC, RHMD, D200, T200, VWS | 0.718 | 0.284 | 0.692 |
| 11 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO, OHC, RHMD, D200, T200, VWS, U200 | 0.726 | 0.288 | 0.700 |
| 12 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO, OHC, RHMD, D200, T200, VWS, U200, STPX | 0.735 | 0.271 | 0.711 |
| 13 | PER, AG20, VMPI, PX40, RHLO, OHC, RHMD, D200, T200, VWS, U200, STPX, SST | 0.742 | 0.262 | 0.717 |

表 9 同表 8, 但为 SCS 海域

| <i>n</i> | 组合方案 | POD | FAR | PSS |
|----------|--|-------|-------|-------|
| 2 | PER, PX40 | 0.372 | 0.648 | 0.311 |
| 3 | PER, PX40, VMPI | 0.387 | 0.635 | 0.324 |
| 4 | PER, PX40, VMPI, AG20 | 0.400 | 0.595 | 0.345 |
| 5 | PER, PX40, VMPI, AG20, VWS | 0.412 | 0.598 | 0.355 |
| 6 | PER, PX40, VMPI, AG20, VWS, STPX | 0.438 | 0.578 | 0.381 |
| 7 | PER, PX40, VMPI, AG20, VWS, STPX, D200 | 0.450 | 0.571 | 0.394 |
| 8 | PER, PX40, VMPI, AG20, VWS, STPX, D200, OHC | 0.500 | 0.540 | 0.445 |
| 9 | PER, PX40, VMPI, AG20, VWS, STPX, D200, OHC, SST | 0.463 | 0.549 | 0.410 |

表 10 SCS 海域多因子组合情况下的强台风“韦森特”RI 预报结果

| 时刻 (月-日-时) | PER | SST | OHC | VMPI | VWS | D200 | PX40 | STPX | AG20 | 实况 | 预报 |
|---------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|-------|--------|--------|
| 07-21-18 | 2.0 | 29.5 | 77 | 69 | 9.5 | 76 | 45 | 26.3 | -40.7 | non-RI | non-RI |
| 07-22-00 | 3.0 | 29.4 | 68 | 67 | 11.3 | 77 | 46 | 29.7 | -40.6 | non-RI | non-RI |
| 07-22-06 | 0.0 | 29.4 | 62 | 63 | 10.5 | 90 | 50 | 21.8 | -62.5 | non-RI | non-RI |
| 07-22-12 | 2.0 | 29.3 | 60 | 63 | 9.8 | 94 | 61 | 18.7 | -67.9 | non-RI | RI |
| 07-22-18 | 0.0 | 29.3 | 58 | 66 | 10.3 | 100 | 68 | 17.1 | -74.3 | RI | non-RI |
| 07-23-00 | 3.0 | 29.3 | 61 | 65 | 8.7 | 90 | 73 | 13.3 | -68.8 | RI | RI |
| 07-23-06 | 5.0 | 29.3 | 61 | 61 | 5.3 | 104 | 94 | 7.8 | -67.3 | RI | RI |

4 结论

本文利用 2000—2014 年 TC 最佳路径资料, NCEP-FNL 资料, 逐日海温和海洋上层热容量资料, 日本静止卫星云顶亮温(TBB)资料, 对比分析了西北太平洋(WNP), 以及南海(SCS)的迅速加强(RI), 与非迅速加强(non-RI) TC 样本的环境背景

和 TBB 观测特征, 其中 non-RI 样本细分为不同的强度变化率即: 缓慢加强(SI), 强度稳定(IS)、缓慢减弱(SW)和迅速减弱(RW)等。并进行了基于 KNN 分类算法的 RI 预报试验, 主要结果为:

(1) RI 与 non-RI, 以及其中的 IS、SW 和 RW 样本差异较为明显。相对于 SI, WNP 海域的 RI 样本处于海表温度较高、海洋热容量较大、最大可能强度

(VMPI)较大、高层辐散(D200)较强、风垂直切变(VWS)较弱和高层纬向风(U200)偏东分量较大等环境背景条件下,SCS海域的RI样本较易发生在VWS较弱的条件下。除此以外,与non-RI样本相比较而言,支持RI发生的主要有利条件还包括:中低层相对湿度较大、高层环境温度较低等。RI样本通常具备的TBB观测特征为:内核对流云的覆盖率较大、结构较为对称和眼壁的TBB平均值相对较小。

(2)采用KNN分类算法进行RI识别预报,其中,TC过去的强度持续性变化因子(PER)和代表TC内核对流强度特征的PX40、AG20等因子相对贡献最大,其原因在于RI样本的过去强度变化增加率和对流强度明显大于其余样本,说明了充分应用卫星观测资料对于改善TC强度预报的效果具有重要作用^[25]。代表TC发展潜势的因子VMPI相对贡献次之,单纯考虑较暖的海洋下垫面(SST和OHC)因子对于TC强度预报并不理想,这是因为在低纬海域海洋热力条件通常较为充分^[35],但在综合考虑较暖的海洋下垫面和较冷的高层大气温度条件下求得的VMPI因子预报效果相对较好。

(3)交叉检验结果表明,在WNP(SCS)海域,正样本识别率达到74.2%(50.0%),空报率为26.2%(54.0%),预报技巧评分达到0.717(0.445)。识别预报还成功捕捉了疑难强台风“韦森特”近海登陆广东前的两次RI过程,显示KNN分类算法具备了一定的RI识别预报能力。

参考文献

- [1] Sanger N T, Montgomery M T, Smith R K, et al. An observational study of tropical cyclone spinup in Supertyphoon Jangmi (2008) from 24 to 27 september [J]. *Mon Wea Rev*, 2014, 142(1): 3-28.
- [2] Wang H, Wang Y. A numerical study of Typhoon Megi (2010). Part I: Rapid intensification [J]. *Mon Wea Rev*, 2014, 142(1): 29-48.
- [3] Rogers R F, Reasor P D, Zhang J. Multiscale structure and evolution of Hurricane Earl (2010) during rapid intensification [J]. *Mon Wea Rev*, 2015, 143(2): 536-562.
- [4] Chen H, Zhang D L. On the rapid intensification of Hurricane Wilma (2005). Part II: Convective bursts and the upper-level warm core [J]. *J Atmos Sci*, 2013, 70(1): 146-162.
- [5] Kieper M, Jiang H. Predicting tropical cyclone rapid intensification using the 37 GHz ring pattern identified from passive microwave measurements [J]. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L13804.
- [6] Wang Y, Rao Y, Tan Z M, et al. A statistical analysis of the effects of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change over the Western North Pacific [J]. *Mon Wea Rev*, 2015, 143(12): 3434-3453.
- [7] Emanuel K A. A statistical analysis of tropical cyclone intensity [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(4): 1139-1152.
- [8] Zeng Z, Wang Y, Wu C C. Environmental dynamical control of tropical cyclone intensity—an observational study [J]. *Mon Wea Rev*, 2007, 135(1): 38-59.
- [9] 曾智华,陈联寿,王玉清,等. 2006年超级台风“桑美”强度与结构变化的数值模拟研究[J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 750-763.
- [10] Duan Y, Wu R, Yu R, et al. Numerical simulation of changes in tropical cyclone intensity using a coupled air-sea model [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2013, 27(5): 658-672.
- [11] 郑峰,张灵杰. 台风“天鹅”对“莫拉克”强度维持影响的模拟分析[J]. *气象科技*, 2013, 41(4): 664-669.
- [12] 官晓军. 台风“达维”迅速加强数值模拟研究[J]. *气象科技*, 2012, 40(2): 241-248.
- [13] 李传祥. 台风“卡努”登陆前强度突增天气成因分析[J]. *气象科技*, 2007, 35(2): 213-216.
- [14] 陈丽芳. 相似台风“泰利”和“桑美”的数值模拟和对比分析[J]. *气象科技*, 2008, 36(3): 262-267.
- [15] 徐洪雄,徐祥德. 双热带气旋合并过程涡旋强度与吸引效应相关特征数值模拟[J]. *气象科技*, 2014, 42(3): 434-442.
- [16] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 672-681.
- [17] 李英,陈联寿. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验[J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 683-693.
- [18] Kaplan J, DeMaria M, Knaff J A. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins [J]. *Wea Forecasting*, 2010, 25(1): 220-241.
- [19] 陈佩燕,端义宏,余晖,等. 红外云顶亮温在西北太平洋热带气旋强度预报中的应用[J]. *气象学报*, 2006, 64(4): 474-484.
- [20] 许映龙,张玲,高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. *气象*, 2010, 36(7): 43-49.
- [21] 占瑞芬,汤杰,余晖. 2009年西北太平洋热带气旋定位和业务预报精度评定[J]. *气象*, 2010, 36(10): 114-121.
- [22] 端义宏,陈联寿,梁建茵,等. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 969-986.
- [23] Kaplan J, Rozoff C M, DeMaria M, et al. Evaluating environmental impacts on tropical cyclone rapid intensification predictability utilizing statistical model [J]. *Wea Forecasting*, 2015, 30(5): 1374-1396.
- [24] Jiang H. The relationship between tropical cyclone intensity change and the strength of inner-core convection [J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(4): 1164-1176.
- [25] Zhuge X Y, Ming J, Wang Y. Reassessing the use of inner-

- core hot towers to predict tropical cyclone rapid intensification [J]. *Wea Forecasting*, 2015, 30(5): 1265-1279.
- [26] 曾晓青, 邵明轩, 王式功, 等. 基于交叉验证技术的 KNN 方法在降水预报中的试验 [J]. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 471-478.
- [27] Guo J, Du L, Zhang Y, et al. A New distance-weighted k-nearest neighbor classifier [J]. *J Infor Comp. Sci*, 2012, 9: 1429-1436.
- [28] 陈豫英, 刘还珠, 陈楠, 等. 基于聚类天气分型的 KNN 方法在风预报中的应用 [J]. *应用气象学报*, 2008, 19(5): 564-572.
- [29] 梅双丽, 江静. 西北太平洋热带气旋迅速增强特征及其影响因素 [J]. *热带气象学报*, 2012, 28(1): 1-11.
- [30] 余晖, 端义宏. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征 [J]. *气象学报*, 2002, 60(6): 680-687.
- [31] 于玉斌, 姚秀萍. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征 [J]. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 521-526.
- [32] Mapes B E, Houze R A Jr. Cloud clusters and superclusters over the oceanic warm pool [J]. *Mon Wea Rev*, 1993, 121(5): 1398-1416.
- [33] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007: 63-65.
- [34] Vigh J L, Knaff J A, Schubert W H. A climatology of Hurricane eye formation [J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(4): 1405-1426.
- [35] Shieh O H, Fiorino M, Kucas M E, et al. Extreme rapid intensification of Typhoon Vicente (2012) in the South China Sea [J]. *Wea Forecasting*, 2013, 28(6): 1578-1587.

Characteristics and Identification of Rapidly Intensifying Tropical Cyclones in Western North Pacific Basin

Li Xun^{1, 2} Zhao Shengrong³ Wang Yong⁴ Wu Yu^{1, 2} Li Yumei^{1, 2}

(1 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan, Haikou 570203 ;

2 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203; 3 National Meteorological Center, Beijing 100081; 4 WMO Regional Training Centre, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract : The best tracks and satellites-borne infrared cloud top temperatures (TBB) observations of the National Centers for Environmental Prediction Final Analysis are employed to examine the large-scale and inner-core convection and characteristics of tropical cyclones (TCs) undergoing different intensity changes in the western North Pacific (WNP) and South China Sea (SCS) ocean basins from 2000 to 2014. The mean conditions of TCs cases that undergo rapid intensification (RI) are compared to those of the non-RI cases. In addition, the non-RI cases are defined in four other intensity change bins: slow intensification (SI), intensification stable (IS), slow weakness (SW) and rapid weakness (RW). For the environmental variables, statistically significant differences are found between RI cases and non-RI samples, especially in IS, SW and RW groups. In both basins, RI events tend to form in environments with weaker environmental vertical wind shear than SI cases. In the WNP, RI events occurred in high maximum potential intensity environments characterized by warmer sea surface temperature, greater upper-oceanic heat content, and stronger upper-level divergence. RI events tend to occur in favorable environments with higher lower-level relative humidity, and cooler upper-level temperatures than non-RI cases. For TBB observations, RI cases have larger cold TBB covering areas in the inner-core regions, and lower average symmetry TBB within the eyewalls of the storms. The K-Nearest Neighbor (KNN) rule is employed to identify the RI cases using leave-one-out cross validation. The results show that the verification of forecasts is generally skillful.

Keywords : tropical cyclone; rapid intensification; K-Nearest Neighbor rule; classification forecast