

# 西太平洋台风活动对中国西北地区东部夏季降水的影响

王頔<sup>1</sup> 张立凤<sup>1</sup> 王颢<sup>1</sup> 刘洋<sup>2</sup> 谢勇<sup>3</sup>

1 国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410005

2 解放军 75839 部队, 广州 510000

3 江西省气象局, 南昌 330006

**摘要** 基于 1979-2020 年共 42 年资料, 利用常用的统计方法和随机森林方法, 研究了西太平洋台风对我国西北地区东部 (33°N-45°N, 93°E-110°E, ENWC) 降水的影响, 结果发现: 在台风频数和降水量都出现峰值的 7、8、9 月, 出现在西北太平洋的台风对台风期间的 ENWC 平均日降水 (TP) 有影响。7 月份台风的位置和强度影响显著, 8 月份台风的位置、强度和频数都有影响, 9 月份影响较小。台风的影响具有地域选择性, 不同的月份这种选择性不同, 对不同等级降水的影响也不同。其影响主要表现在 EOF 分解的第二模态以及强降水和极强降水等级上, 这说明了台风不是影响 TP 的主要因素, 这种影响是间接的和非线性的, 台风的出现是通过影响东亚地区中高纬度的槽脊系统、西太平洋副热带高压以及低纬度低涡的强度和位置来形成有利于降水的条件, 从而影响降水的分布和强度。相对于多元线性回归方法, 基于随机森林方法建立的降水模型能更好的拟合出降水分布和强度, 这说明台风对 TP 的影响主要是非线性的, 且降水强度越强, 非线性作用越明显。同时, 随机森林模型也显示出台风的位置是影响 ENWC 降水的最关键因素。

**关键字:** 中国西北地区东部; 降水; 西太平洋台风; 随机森林方法

**文章编号:** 2022011A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2205.22011

## Influence of Typhoons in the Western Pacific on Summer Precipitation in the Eastern Part of Northwest China

WANG Xu<sup>1</sup>, ZHANG Lifeng<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, XIE Yong<sup>3</sup>

1 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha, 410005

2 No. 75839 Army of PLA, Guangzhou, 510000

3 Jiangxi Meteorologic Bureau, Nanchang, 330006

**Abstract** Based on the 42 years of data from 1970 to 2020, the traditional statistic methods and random forests have been used to study the influences of the typhoon in the Western Pacific on precipitation in the eastern part of northwest China (33°N-45°N, 93°E-110°E, ENWC). The results are as follows. The peak values of the frequency of typhoon and precipitation are both in July, August, and September. The typhoons in the Western Pacific play an important role in the daily mean precipitation during the period of the typhoons (TP) in that month. The location and intensity of typhoons have the most significant influence on the precipitation in July and the location, intensity, and frequency of typhoons all influence the precipitation in August, while typhoons have little influence on the precipitation in September. The influences of typhoons change with location, time, and the level of precipitation. The influences of typhoons are mainly on the second mode of the EOF analysis, the heavy and extremely heavy precipitation, which shows that the typhoons are not the main factors to influence TP and the influence is indirect and nonlinear. The typhoons influence

收稿日期 2022-01-12; 网络预出版

作者简介 王頔, 男, 1998 年出生, 硕士, 主要研究方向为大气动力学与数值模拟。E-mail: wangxu17d@nudt.edu.cn

通讯作者 张立凤, E-mail: zhanglif\_qxy@sina.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41975066、42005053, 湖南省科技创新计划 2021RC3072, 国防科技大学科研计划项目 ZK21-46

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41975066 and 42005053), Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (Grant 2021RC3072), Research Project of National University of Defense Technology (Grant ZK21-46).

the precipitation by influencing the location and intensity of the ridges and troughs in the mid-latitude, the West Pacific subtropical high, and the vortex in the low-latitude. The model based on the random forests can fit the distribution and intensity better than the linear model, which shows that the influences of typhoons on TP are mainly nonlinear and the nonlinear influence increases with the intensity of the precipitation. The random forests model also shows that the location of the typhoon is the most significant factor to influence the precipitation in ENWC.

**Keywords:** Eastern part of northwest China; Precipitation; Typhoon on the West Pacific; Random forests

## 1. 前言

西北地区毗邻青藏高原、内蒙古高原和黄土高原,大部分区域处于我国地势的第一和第二阶梯。西北地区地形和地貌多样,气候特点复杂,总体降水较少。但是,随着全球气候变暖等影响,研究发现西北地区降水特征也发生了显著的变化,总体上表现出由少转多的特征(施雅风等, 2002, 2003), 同时在 20 世纪 80 年代末发生了降水的突变(于淑秋等, 2003)。Sui et al. (2013) 使用 1961-2009 年降水资料进行分析, 发现冬春季节西北地区降水有所增加。王澄海等(2021) 利用 1961-2018 年西北地区站点降水资料进行了统计分析, 发现西北地区降水总体呈增加趋势, 特别是西北地区的西部降水增加尤为明显。在季节尺度上, 冬季各站点降水都呈增加趋势, 夏季绝大部分站点降水增加, 只有在西北地区东部的少部分站点降水呈减少趋势。西北地区总体降水强度较弱, 几乎很少出现类似于我国东部地区的强降水天气(徐栋等, 2016a, 2016b; Yue et al., 2013)。陈冬冬等(2009a, b) 利用 1958-2005 年西北地区降水资料进行了统计分析, 区别于传统降水强度的划分, 他们将西北地区降水强度分为 6 个等级, 并研究了各强度等级的变化趋势, 发现在 6 个降水等级中, 西北地区降水以短时强降水为主, 且强降水呈上升趋势, 部分地区弱降水呈下降趋势。

水汽含量是影响降水的主要因素, 而海洋是水汽的唯一源地, 由于西北地区处于大陆腹地, 远离海洋, 故水汽的输送通道就显得尤为重要(王咏青等, 1999, 2005)。西北地区的水汽主要是通过大气环流从遥远的洋面输送而来, 环流形势的调整直接影响西北地区的降水(郭江勇等, 2006)。西太平洋上出现的台风不仅可以造成局地降水, 还可以改变环流形势调整水汽输送通道, 完成由海洋向大陆内地的水汽输送, 即便西北地区远离太平洋, 但太平洋上台风系统的影响仍然不能忽视。例如, 卓嘎等(2000) 基于 1951-1994 年全国 160 个台站降水资料和台风资料的研究发现, 台风特多和特少年份年降水量距平差值最大的区域并不在我国东南沿海省份而是在西北地区。黄小莉等(1996) 利用 1980-1990 年降水资料和台风资料的研究发现, 在这十年间发生在西北地区的十次暴雨中, 有七次与西太平洋的台风活动有关。谢金南等(2000) 研究了台风活动对青藏高原东北侧干旱的影响, 分析了西北地区降水、海温和台风三者之间的关系, 发现少台风年对应干旱型环流, 多台风年对应湿润型环流。姚宗国的研究(2005) 指出台风对西北地区降水的影响不是直接的, 而是通过影响副热带高压等大气环流系统, 从而影响西北地区的水汽通道来影响降水。

前人基于传统统计方法的研究已发现西太平洋台风对西北地区降水有影响, 并指出了台风与西北地区降水量存在一定的相关关系。然而, 有关台风对西北地区东部夏季降水时空分布的影响及其与降水非线性关系, 前人的研究较少涉及。为此, 本文利用 42 年的格点降水资料和台风最佳路径数据集, 围绕台风对西北地区东部降水的影响开展研究。在此基础上, 为揭示台风对西北地区东部降水的非线性影响, 本文应用了包含非线性信息的随机森林模型, 探索了机器学习方法在研究非线性关系时的有效作用。上述研究结果, 能为西北地区东部降水的预报提供一定的理论依据和参考。

## 2. 资料和方法

本文研究使用的降水资料为美国国家海洋和大气管理局（NOAA）提供的格点资料（CPC），分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，时间长度为 1979-2020 年共 42 年，下载网址为 <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>[2022-2-20]；研究区域内格点数为  $24 \times 34$ ，格点数超过区域内的站点数。位势高度、风场、相对湿度等其他气象要素使用 NCEP/NCAR 再分析资料，分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，下载网址为 <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>[2022-2-20]。台风资料为中国气象局上海台风研究所提供的 CMA-STI 西北太平洋热带气旋最佳路径数据集（Ying et al., 2014; Lu et al., 2017），下载网址为 <https://tcdata.typhoon.org.cn>[2022-2-20]。

本文研究的西北地区东部区域定义为（ $33^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{N}$ ， $93^{\circ}\text{E}$ - $110^{\circ}\text{E}$ ）（姚宗国，2005），为叙述方便记为 ENWC（The eastern part of Northwest China）。当热带气旋强度大于等于热带风暴时，计为一次台风过程，将台风过程中 ENWC 的平均日降水记为台风日降水（precipitation of typhoon day，记为 TP），当月无台风日的平均日降水记为非台风日降水（precipitation of no typhoon day，记为 NTP），当月所有天数的平均降水记为当月平均日降水（Averaged Precipitation，记为 AP）。为揭示西北地区东部降水与西太平洋台风的相关性，研究使用了相关分析、EOF 分解、合成分析、最小二乘法等常用方法，以及能够较好地揭示两个物理量之间非线性关系的随机森林拟合方法，并进行了显著性检验。随机森林是一种集成学习方法，集成学习是指将多个模型进行组合得到更好的结果，类似于集合预报思想。在随机森林中，集合的成员是决策树。在训练阶段，随机森林从输入训练数据集中采集多个不同的子训练数据集来依次训练出多个不同决策树；在预测阶段，随机森林将多个决策树的结果取平均得到随机森林方法的结果。在训练过程中，随机森林还能检测到不同台风指标之间的互相影响，根据各指标的方差贡献得出每个格点上不同指标对降水拟合的重要性[Liaw and Wiener., 2002; Strobl et al., 2007]。

### 3. 西太平洋台风对 ENWC 降水的影响

#### 3.1 台风和 ENWC 降水的相关性

图 1 给出了 1979-2020 年共 42 年平均每月的 AP 及每月台风个数。由图可见，一年中西北太平洋台风个数呈单峰变化，峰值出现在夏秋季，7-10 月最多（图 1a）；ENWC 的 AP 也呈单峰变化，AP 大值出现在 6-9 月（图 1b）。所以本文选择在降水量和台风数都出现大值的 7、8 和 9 月，研究二者的关系。

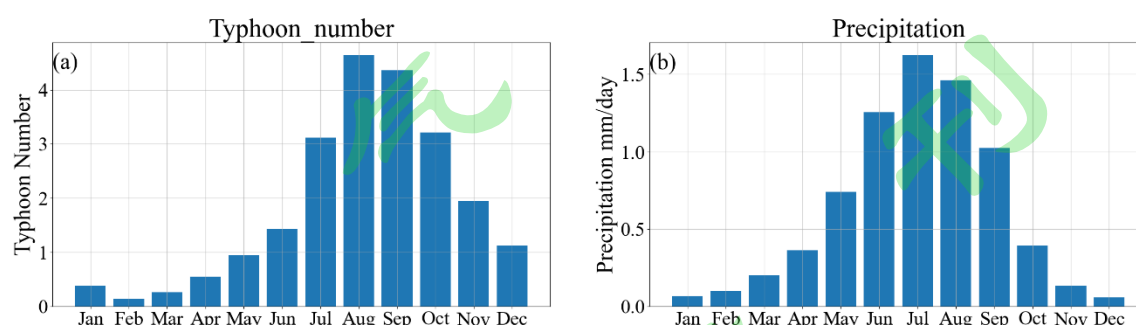


图 1 1979-2020 年西太平洋平均台风个数（a）和 ENWC 的 AP（b）的逐月变化

Fig. 1 The mean numbers of the typhoons in the West Pacific (a) and the AP (b) in ENWC from 1979 to 2020 in every month

发生在西太平洋上的台风，距离我国西北地区十分遥远，但是前人已发现，台风对 ENWC 降水的时空分布均会产生影响，且这种影响随时间变化（姚宗国等，2005）。为研究台风强度、位置等因子与 ENWC 降水之间的关系，下文以每年 7-9 月份各月平均的台风强

度、中心到达的最北纬度和最西经度、当月出现频数作为考察指标，统计其与每年对应月 TP 的相关性。其中，台风经度和纬度指的是当月所有台风中心所能达到的最西经度和最北纬度的平均值。

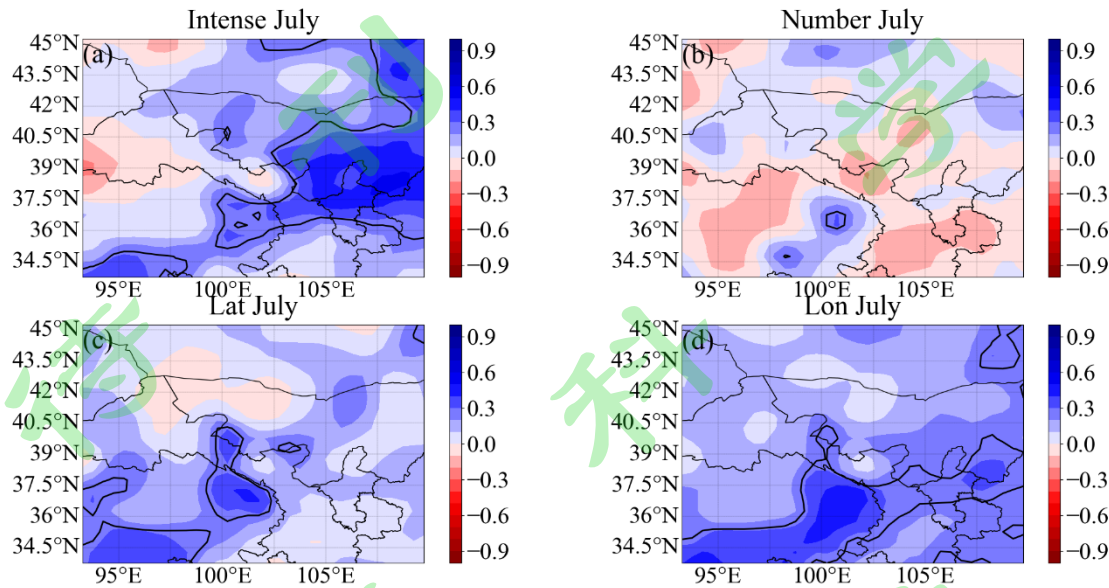


图 2 7 月 ENWC 区域 TP 和台风强度 (a)、频数 (b)、台风中心纬度 (c) 和台风中心经度 (d) 的相关系数，黑色等值线区域通过了 95% 显著性检验。

Fig. 2 The correlation coefficient between TP in ENWC and the intensity of typhoons (a), frequency (b), the center latitude of typhoon (c) and the center longitude of typhoon (d) in July. The black contour in the figure is the area where significant at the 95% level.

图 2 给出了 ENWC 区域 7 月 TP 和台风各项指标的相关系数分布，从图可见，7 月份的 TP 主要与当月台风强度和位置相关最大。台风强度主要和研究区域东部的降水呈正相关（图 2a），台风越强则该区域的降水越大，两者相关系数达 0.8 以上。台风中心纬度和经度与 TP 显著正相关的区域出现在研究区域的西南部（图 2c, d），台风中心位置越偏北和偏东，ENWC 西南地区的降水越多，相关系数达 0.6 以上。这是由于西太平洋台风位置偏西时，会使西太副高 588gpm 线和副高外围 586gpm 线西伸，强大的副热带高压系统将水汽阻拦到 ENWC 以南，没有明显的水汽输送到 ENWC 区域，从而使得 TP 减小；西太平洋台风位置偏东时，会使西太副位置也偏东，从而使得副高西部的偏南气流可以将水汽经 ENWC 区域的南边界输送到 ENWC 区域内（姚宗国, 2005），增强 ENWC 的 TP。相对于其他三个指标，台风频数对 TP 的影响不大（图 2b），只有很小正相关区域通过了显著性检验。总体上看，7 月份 ENWC 的 TP 主要与当月的台风强度和中心位置有关。



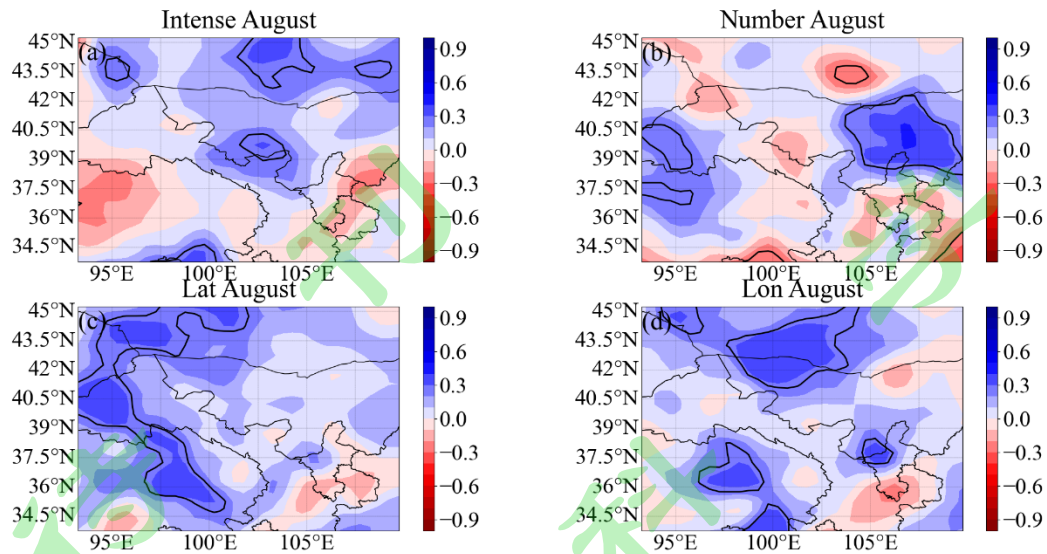


图3 与图2相同，但为8月。

Fig. 3 The same as Fig. 2, but for August.

8月份ENWC区域的TP与各项台风指标也有一定相关性(图3)。台风强度主要与ENWC北部地区TP正相关(图3a)，相关系数达0.6。台风频数与TP的显著正相关区出现在研究区域的东部和西部(图3b)，其中东部的相关系数达到0.6以上，西部的相关性稍弱为0.4左右，这表明在这两个区域西太平洋台风越多，TP越大。台风中心纬度与TP正相关显著区出现在研究区域的西部(图3c)，相关系数可达0.6，而台风中心经度与TP显著相关的区域出现在北部和西南部(图3d)，相关系数可达0.6左右。总体上，8月份ENWC大部分区域的TP与台风的4项指标都有关系，但不同的指标显著影响的区域不同。

图4给出了9月份ENWC降水分布与台风4项指标的相关性，由图可知，9月份ENWC的TP与台风强度、位置和频数的相关性都不大，只有较小区域通过了显著性检验。

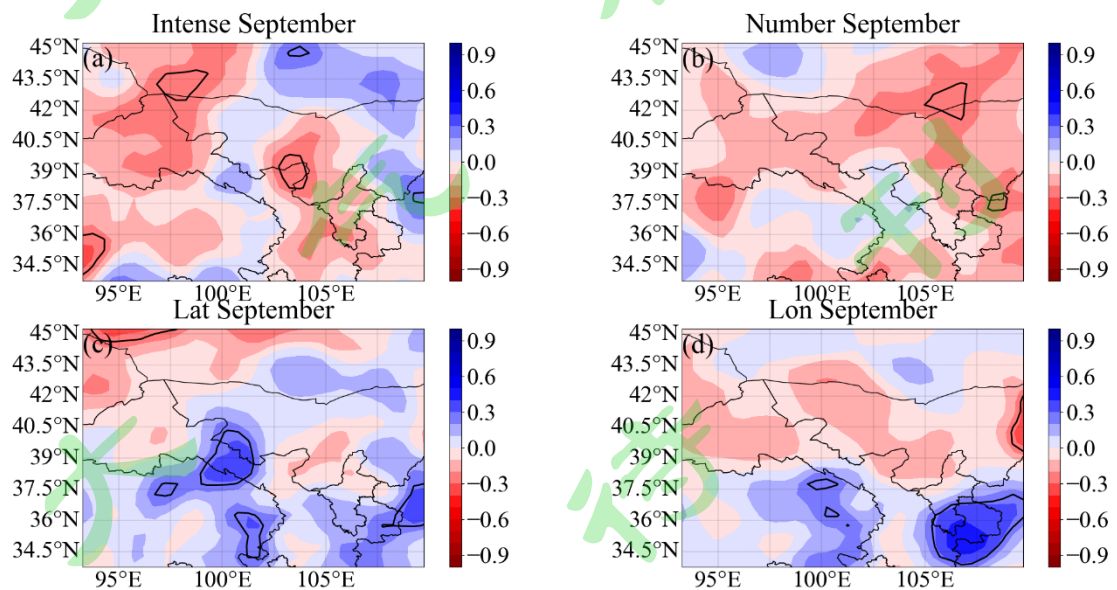


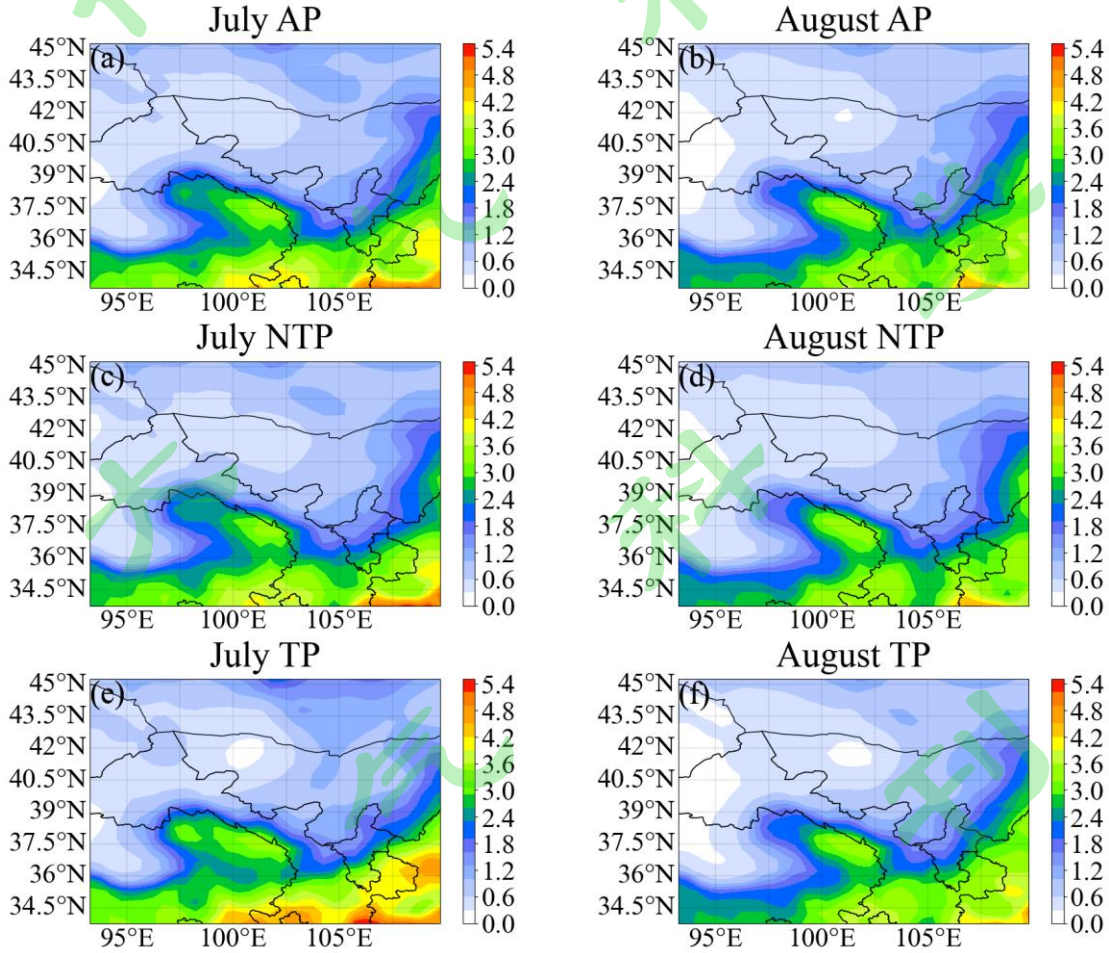
图4 与图2相同，但为9月。

Fig. 4 The same as Fig. 2, but for September.

158 综上分析可知, 7 月份 TP 与台风强度和位置有显著正相关; 8 月份 TP 与台风的位置、  
159 频数和强度都有正相关; 9 月份 TP 与台风各项指标之间的相关性较低, 故以下主要分析 7、  
160 8 月份的情况。

161 **3.2 台风对 ENWC 平均日降水的影响**

162 图 5 分别给出了 7、8 月份 ENWC 区域 AP、NTP 和 TP 的分布。分析图可知, 7 月份  
163 (图 5a) AP 从西北向东南方向增加, 大值区出现在 ENWC 的东南部, 小值区出现在其西北  
164 部, 8 月也有类似的分布特征 (图 5b)。这与陈冬冬等 (2009) 和王澄海等 (2021) 的结果一  
165 致。这两个月的 NTP 分布 (图 5c, d) 基本与 AP 分布类似。比较 TP (图 5e, f) 与 NTP 可  
166 见: 7 月, 前者在东南部的降水大值范围明显增大, 西北部降水区域减小, 东南-西北向的差  
167 异增大; 8 月, TP 的降水大值中心比 NTP 更偏东。因此, 从降水分布看, 台风对 ENWC 夏  
168 季降水是有影响的, 且这种影响还具有地域的选择性, 即对整个区域的影响并非完全一致,  
169 但图 5 中的 6 张图的降水分布特征大体上一致, 这说明 ENWC 降水的直接影响因子并非是  
170 西北太平洋的台风活动, 台风的影响应该只是间接影响因子。



172 图 5 7 月 (左列) 和 8 月 (右列) ENWC 区域平均日降水分布 (单位: mm/day),  
173 第 1 到 3 行分别为 AP、NTP 和 TP。

174 Fig. 5 The distribution of the daily mean precipitation (units: mm/day) in July (left column)  
175 and August (right column). The rows from the first to the third are AP, NTP, and TP, respectively.

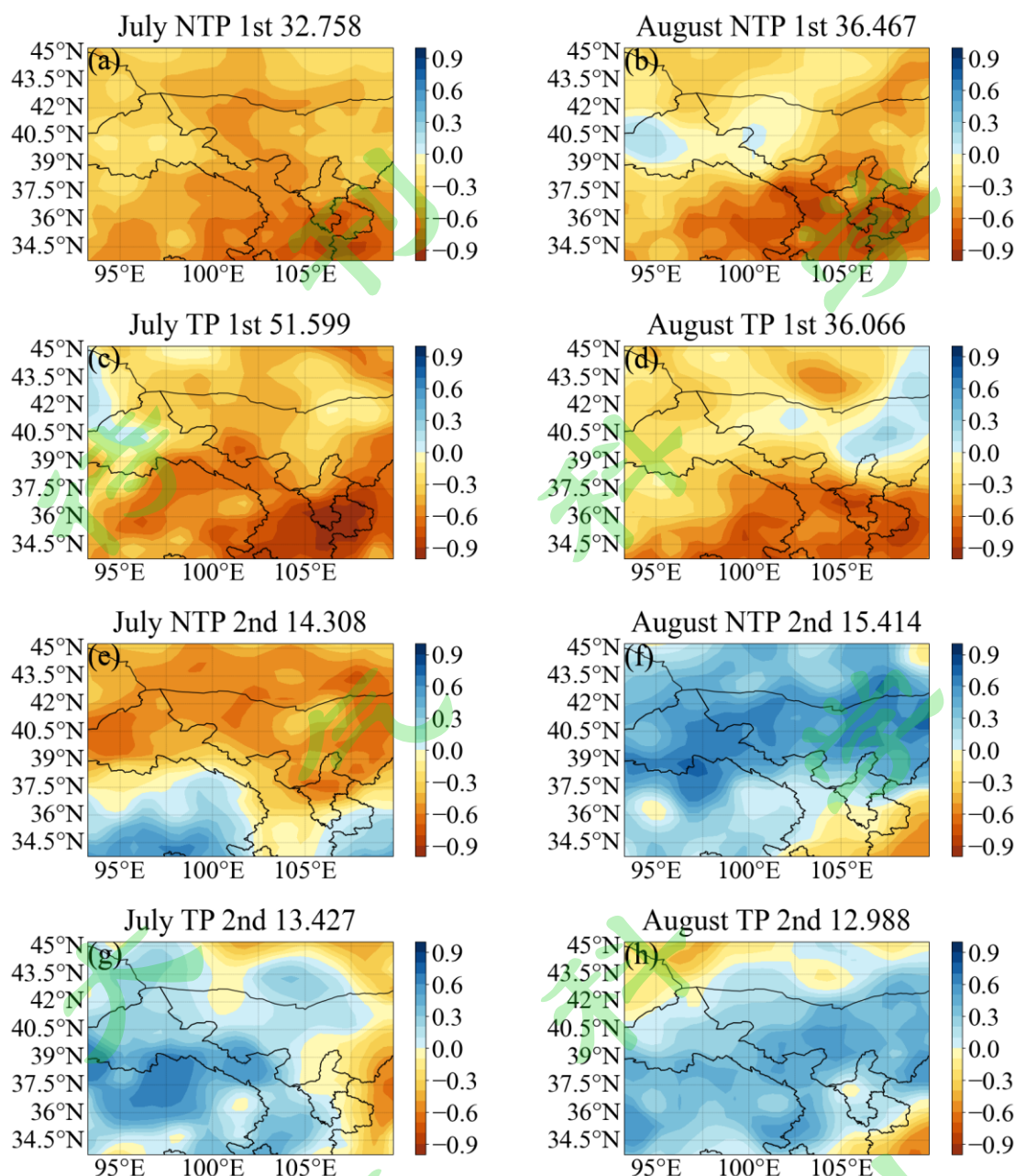


图6 7月（左列）和8月（右列）NTP（第一、三行）和TP（第二、四行）EOF分解的第一模态（第一、二行）和第二模态（第三、四行），标题后数值为该模态的方差贡献。

Fig. 6 The first models (the first and second rows) and the second models (the third and fourth rows) of the EOF analysis in NTP (the first and third rows) and TP (the second and fourth rows) in July (left column) and August (right column). The numbers behind the titles are the variance contributions of the corresponding models.

为了进一步揭示 TP 与 NTP 分布的差异，对 7、8 月的 TP 与 NTP 分别进行了 EOF 分解，图 6 给出了 EOF 分解的第一和第二模态。由图可知，7 月份（图 6a,c,e,g），TP 与 NTP 的第一模态基本类似，整个区域都是负值，只是前者在西北部出现小范围的正值，39°N 以南的负值中心位置略有差异，这说明降水的增加或减少基本上在整个区域是一致的。第二模态分布差异较大，虽然两种情况下都表现出了正负值中心的非均匀分布，但 NTP 表现为南



正北负分布特征，而 TP 表现为西正东负分布特征。8 月份的情况（图 6b,d,f,h）与 7 月份类似，TP 与 NTP 的第一模态在 39°N 以南相似度较高，在 39°N 以北出现了差异；第二模态分布差异较大，NTP 是从西北到东南的正-负两中心分布形态，但是 TP 呈现出从西北到东南的负-正-负三中心的分布形态。

综上发现，台风对 ENWC 降水的影响主要表现在第二模态上，对第一模态影响主要体现在 39°N 以北地区，由于第一模态的方差贡献明显大于第二模态（具体见图 6 标题后数值），因此这也说明，台风不是引起 ENWC 降水的主要因子，但台风的影响却不能忽略。

3.3 台风对不同强度降水的影响

由上文可知，台风对 ENWC 降水分布形态影响不大，但对降水大值区的范围和强度有明显的影响，为揭示台风对 ENWC 降水强度的影响，参照陈冬冬和戴永久（2009）提出的西北地区降水分级标准，将降水分为弱降水、较弱降水、中等降水、较强降水、强降水、极强降水 6 个等级。具体标准如下表 1：

表 1 降水等级表（来自陈冬冬和戴永久（2009））  
（ $R_i$  表示某一格点上的日降水量， $R_{a\%}$  表示第 a 百分数对应的降水量。）  
Table 1 The levels of the precipitation (referred from Chen and Dai (2019))

( $R_i$  shows that precipitation of one grid,  $R_{a\%}$  shows the number a percentile precipitation)

序号	降水范围	等级
0	$R_i \leq R_{25\%}$	弱降水
1	$R_{25\%} < R_i \leq R_{50\%}$	较弱降水
2	$R_{50\%} < R_i \leq R_{75\%}$	中等降水
3	$R_{75\%} < R_i \leq R_{85\%}$	较强降水
4	$R_{85\%} < R_i \leq R_{95\%}$	强降水
5	$R_i > R_{95\%}$	极强降水

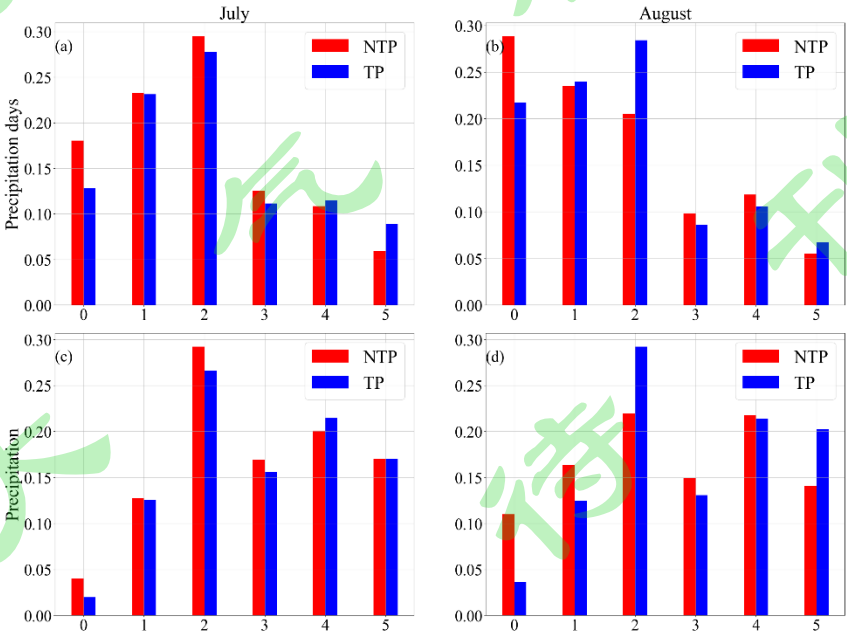


图 7 7 月 (a,c) 和 8 月 (b,d) 不同等级 TP 和 NTP 降水天数 (a,b) 和降水量(c,d)占



TP 和 NTP 总降水天数和降水量的百分比，横轴为降水等级序号，纵轴为对应比例。

Fig. 7 The ratio of the different levels of the TP and NTP precipitation days (a,b) and the amount of the precipitation (c,d) to the total precipitation days and the amount of the precipitation in July (a,c) and August (b,d). The x-axis shows the numbers of the levels of precipitation and y-axis shows the corresponding ratio.

图 7 给出了不同等级 TP 与 NTP 的降水天数和降水量占 TP 与 NTP 总天数和总降水的百分比。在 7、8 两个月，无论是 TP 还是 NTP，极强降水（序号 5）天数占总降水天数的比例都很低，平均只有 5% 左右，但降水量占其总降水量的比例却较大，超过了 15%，8 月份可达 20% 以上。7 月份（图 7a, c），台风能明显地增加极强降水的天数，增幅为 40%，对极强降水量的影响不大。8 月份（图 7b, d），台风主要影响中等强度（序号 2）的降水，不仅增加该等级的降水天数，也增大了降水量，增幅分别为 41% 和 38%。从台风对不同等级降水的影响来看，不同月份影响不同，对不同降水等级的影响也不同，这说明台风日的 ENWC 强降水对其夏季降水是有贡献的。

### 3.4 台风降水日和非台风降水日的环流形势比较

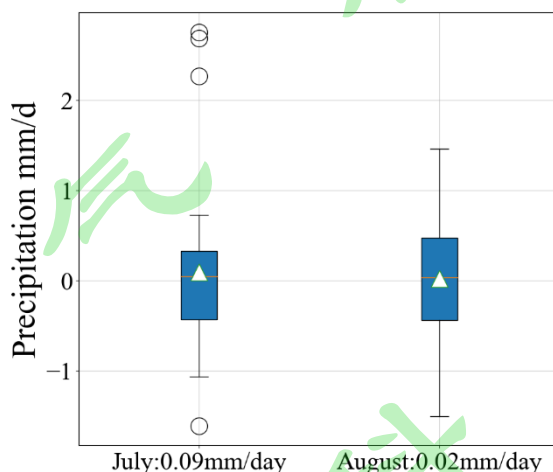


图 8 7 月和 8 月 ENWC 区域年平均 TP 与 NTP 之差的箱线图，月份后面的数字为均值，正数代表 TP 大于 NTP，负数代表 TP 小于 NTP (单位: mm/day)。

Fig. 8 The box plots show the difference between the area mean TP and NTP of ENWC in July and August from 1979 to 2020. The number behind the month is the monthly mean precipitation, the positive means that TP is larger than NTP, and the negative means that TP is smaller than NTP (units: mm/day).

图 8 给出了 7、8 月 ENWC 区域 TP 与 NTP 之差的箱线图。分析图可知，7 月份 TP 总降水量大于 NTP，两者平均差值为 0.09mm/day；8 月 TP 与 NTP 几乎相同，两者平均差值仅为 0.02mm/day。值得注意的是，7 月份的箱线上方有三个圆圈，代表 TP 与 NTP 之差的三个极端年，其分别是 1979、1998 和 2013 年。这三年的 TP 总降水量明显大于 NTP，即台风明显增强了 7 月份降水。

为了更清晰地揭示台风日中出现极端降水的环流条件，以 7 月份三个台风日极端降水年（1979，1998，2013）的合成环流代表台风降水日环流形势，与 NTP 日合成的环流形势进行了对比。由 TP 日和 NTP 日的降水分布可见（图 9a, c），当 7 月份发生极端 TP 时，在研究区域东南部（95°E-105°E，37.5°N）范围内，出现了 10mm/day 以上的降水；而 NTP 在此区域达到 10mm/day 的范围明显小于前者。从平均日降水量来看，ENWC 整个区域平均的 TP 降水量比 NTP 多 94.3%。

由极端 TP 日和 NTP 日合成的环流形势可见（图 9b, d），TP 和 NTP 的环流分布有明

显不同，在 40°N 以北的中高纬度，台风日环流表现为两脊一槽的经向型，100°E-120°E 区域有脊前的强偏北气流，150°E 附近有较强的低压槽南伸，这使得西太副高等值线下弯。同时，由于台风的影响，造成 20°N-30°N 附近的副高南侧等值线向北弯曲。从副高西段的形态看，在 TP 日，副高脊线呈东南-西北向分布，整体位置偏北；而在 NTP 日，副高脊线呈东西走向，位置偏南。TP 日副高的这种显著偏北并向下弯曲的分布形态有利于气流携带更多的水汽从副高东南侧向西北输送；而 NTP 日副高的显著偏南并呈东西分布的形态，则有利于水汽沿副高西侧向北输送至我国东部地区。同时，中高纬度脊前偏北风与副高西侧的偏南暖湿气流相遇，在 ENWC 区域形成强辐合和位势不稳定层结。在低纬度，相比于 NTP 日的环流，在 TP 日的 ENWC 南侧的孟加拉湾低涡位置偏北偏强，且低涡北侧还有明显的低槽存在，ENWC 位于槽前，这都有利于 ENWC 区域水汽输送。综上可知，7 月份台风日 ENWC 降水期间东亚环流形势为：（1）在 40°N 以北的中高纬度环流以两脊一槽的经向型为主；（2）副高西段脊线呈东南-西北向分布，位置偏北；（3）孟加拉湾低涡偏强偏北，低涡北侧出现低槽，ENWC 位于槽前。

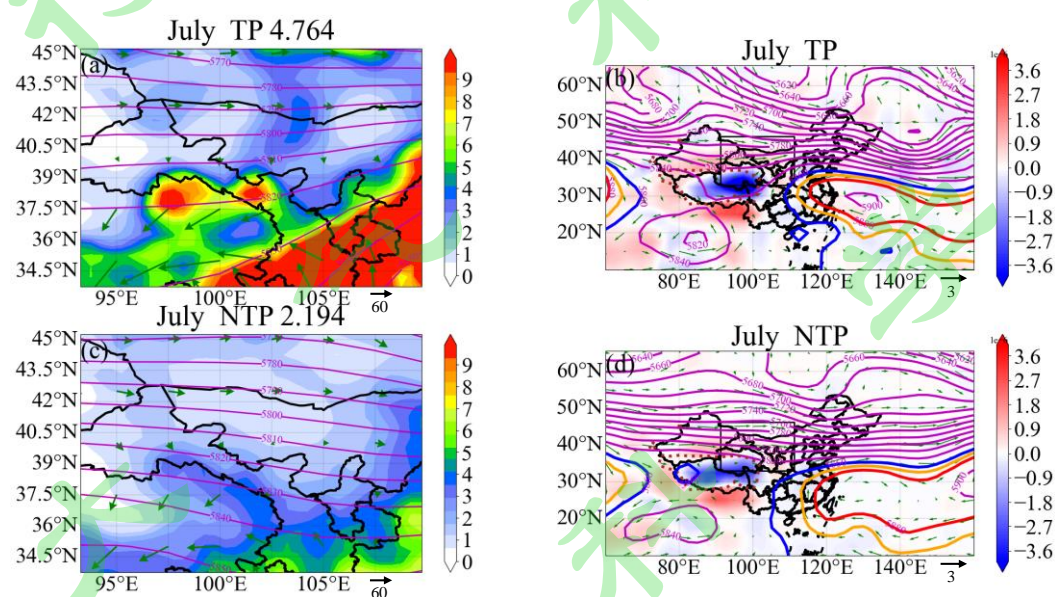


图 9 7 月份极端降水年份的台风日 (a, b) 和非台风日 (c, d) 的平均日降水分布 (a, c) 和合成环流 (b, d)，图 a, c 中填色为 TP 和 NTP，单位 mm/day，箭头为 700hPa 水汽通量，单位为  $\text{gcm}^{-1}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，黑色箭头为数值参考标准，700hPa 水汽通量大小为  $60 \text{ gcm}^{-1}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，等值线为 500hPa 位势高度场，单位 gpm，间隔 10gpm，标题后的数字为 ENWC 区域平均 TP 和 NTP，单位 mm/day；图 b, d 中填色为 700hPa 水汽通量散度，单位  $\text{gcm}^{-2}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，紫色等值线为 500hPa 位势高度场，单位 gpm，间隔 20gpm，红色等值线为 588 线，橙色等值线为 587 线，蓝色等值线为 586 线，绿色箭头为 500hPa 风场，单位 m/s，黑色箭头为数值参考标准，风场大小为 3m/s，虚线为海拔高度大于 3500m 的区域。

Fig. 9 The distribution of the daily mean precipitation (a, c) and composite circulation (b, d) of typhoon days (a, b) and non-typhoon days (c, d) in extreme precipitation years in July, the shade shows TP and NTP in a and c, units: mm/day, and the arrow shows 700hPa vapor flux, units:  $\text{gcm}^{-1}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ . The black arrow shows the referring standard, the magnitude of the 700hPa vapor flux is  $60 \text{ gcm}^{-1}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ . The contour is 500hPa geopotential field, unit: gpm, interval: 10gpm. The number behind the title is area means TP and NTP in ENWC, unit: mm/day. In b and d, the shade is 700hPa vapor flux divergence, unit  $\text{gcm}^{-2}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ , the purple contour is 500hPa

geopotential field, unit: gpm, interval 20gpm, the red contour is 588gpm, the orange contour is 587gpm, the blue contour is 586, the green arrow is wind field, unit m/s. The black arrow shows the referring standard, the magnitude of the 500hPa wind speed is 3m/s. The dotted line indicates the area with an altitude higher than 3,500 m.

#### 4. 台风对 ENWC 降水非线性影响分析

由上文分析知，西太平洋台风对 ENWC 地区降水的影响是间接的和非线性的，使用传统线性相关的统计方法，很难揭示这种非线性的影响。作为一种机器学习算法，随机森林方法是一种非线性模型，明显的优势是其能反映相关因子与目标的非线性关系，特别是在小样本情况下，使用随机森林算法可以有效反映这种非线性作用（方匡南等, 2011）。由上文分析可知，7 月份 TP 与台风强度、中心纬度、经度 3 个指标有关；8 月份 TP 与台风强度、中心纬度、经度和频数 4 个指标有关。这可能是因为 7 月份的台风主要登陆华南一带，北上台风偏少（图略），故对西北地区的降水影响比较小。为此，对 7 月份和 8 月份分别基于前文定义的 3 个和 4 个台风指标，利用随机森林方法和多元线性回归方法分别建立了 ENWC 降水拟合模型。具体做法是，首先对 3 个或 4 个台风指标进行标准化，然后建立 ENWC 降水拟合模型，利用 1979 年到 2019 年的资料作为训练集，2020 年作为测试集。图 10 给出了训练集中两个模型拟合得到 7、8 月份 TP 随时间演变和 41 年平均的 Ts 评分。

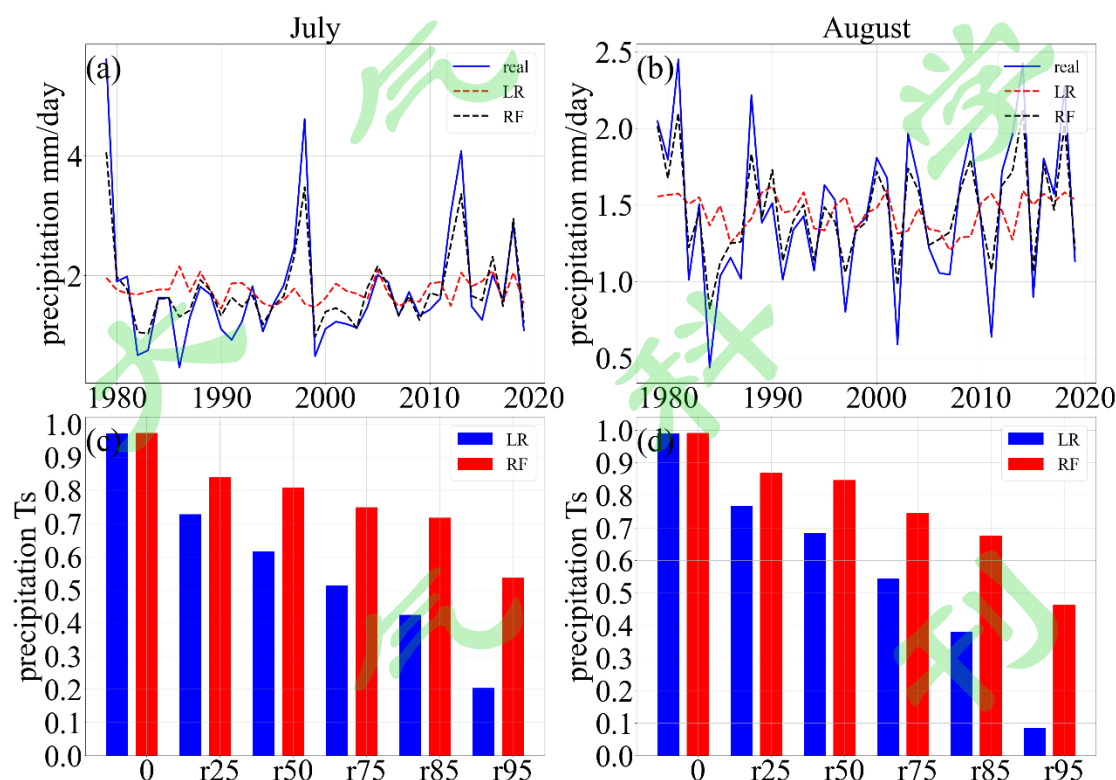


图 10 拟合 TP 与实际 TP 随时间演变 (a,b) 和大于  $r_x$  降水的 Ts 评分 (c,d), a,c 为 7 月, b,d 为 8 月, 0 代表有无降水,  $r_x$  为第  $x$  分位数, “LR” 代表多元线性回归方法, “RF” 代表随机森林方法。

Fig. 10 The temporal changing in the fitting TP and observation TP (a,b) and the Ts scores of the level  $r_x$  precipitation (c,d). a,c are in July, and b,d are in August. The number 0 shows no-precipitation,  $r_x$  shows the number  $x$  percentile, ‘LR’ is linear regression and ‘RF’ is random forests.

从图 10a 和 b 可知，在降水量较小时，线性回归方法基本上能够拟合出 ENWC 的 TP，但在降水量较大或降水变化较大时，线性回归方法的拟合效果较差，基本上不能重现降水的



大小和演变特征。而使用随机森林方法拟合出的降水量和演变趋势都与实际吻合较好，特别是对降水峰值的出现时间基本与实际一致，这说明 ENWC 区域的 TP 与台风的关系较大，即强降水出现的时间和峰值大小都受台风活动的影响。从图 10c 和 d 可知，采用台风指标作为影响因子对 ENWC 区域有无 TP 拟合的准确率较高，Ts 评分均可达 0.9 以上。随着降水等级的提高，Ts 评分逐渐降低，但随机森林法拟合降水的 Ts 评分都比线性回归方法高，其大致保持在 0.5 以上，特别是对强降水随机森林法拟合准确率提高的更多。

图 11 为 2020 年 7 月和 8 月 ENWC 降水实况、两种方法的拟合结果及 Ts 评分，图 11a, b 为 7 月和 8 月的实况，图 11c-f 为两种方法的拟合结果。由图可见，基于 4 种台风指标建立的模型都可以在一定程度上反映出 ENWC 区域降水分布。这说明台风活动确实对 ENWC 降水有影响。比较 7 月份的结果（图 11a、c、e）可知，对于降水分布，随机森林法得到的结果要明显好于多元线性回归法，特别是对降水大值中心，随机森林方法的拟合结果更接近于实况。Ts 评分（图 11g）也表明，在降水有无拟合上多元线性回归和随机森林效果相似，对其它不同等级降水拟合都是随机森林方法的 Ts 评分明显高于线性回归法，两种方法的差异随降水等级的增大而增大，该差异从 r25 等级的 0.1 增加到 r95 等级的 0.38。为定量比较两种方法拟合效果的差异，对各等级的 Ts 评分结果又进行了平均，其中多元线性回归方法的平均 Ts 评分是 0.51，随机森林方法的 Ts 评分是 0.76，使用非线性的随机森林方法，相对于多元线性回归方法，Ts 评分能提高 49%。对比 8 月份情况（图 11b、d、f）也发现类似的结果，对于极强降水拟合，多元线性回归方法的 Ts 评分为 0，而随机森林方法可达到 0.4 以上。对于各等级的平均 Ts 评分，也是随机森林方法大于线性回归方法，二者分别为 0.72 和 0.62，随机森林方法可使得 Ts 评分提高 16.1%。

从两种方法建立的模型结果看，ENWC 降水与台风有关系，由于随机森林方法得到的降水分布与实况较接近，特别是对强降水的拟合结果明显好于多元线性回归方法，这说明这种关系是非线性的，随着降水强度的提高，这种非线性关系更显著。虽然台风对 ENWC 降水的影响是间接的和非线性的，但是利用台风信息依然可以较好的拟合出降水分布，这说明台风对 ENWC 降水具有不可忽视的作用。

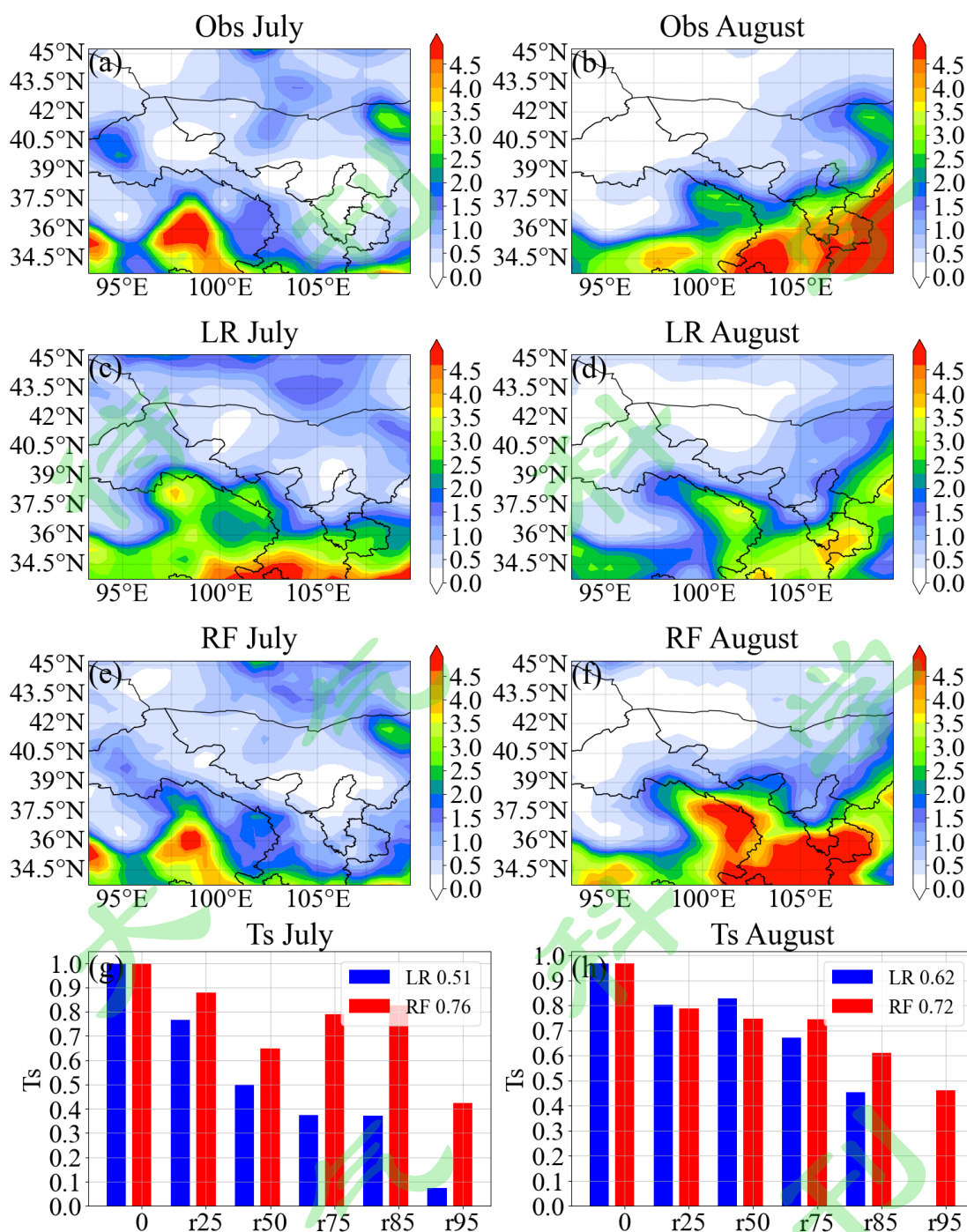


图 11 2020 年 ENWC 地区 7 月 (a,c,e,g) 和 8 月 (b,d,f,h) 的降水实况 (a,b)、线性回归方法 (c,d)、随机森林方法 (e,f) 的拟合的降水分布和 Ts 评分 (g,h)。

Fig. 11 The observation (a,b), results of the linear regression (c,d), and results of the random forests (e,f) of the precipitation and their Ts scores in ENWC in July 2020.

对于随机森林方法,随机森林模型的一个优点是能够定量给出模型输入变量对模型结果的方差贡献,在基于 3 或 4 个台风指标建立拟合模型中,以方差大小将每个格点上贡献最大的指标作为关键特征量,贡献第二大的作为次关键特征量,图 12 给出了在 ENWC 区域各个格点上,随机森林拟合降水模型的前两个贡献最大的台风指标,贡献最大的称为最关键特征量,贡献第二大的称为次关键特征量,图中点的颜色代表不同台风指标。

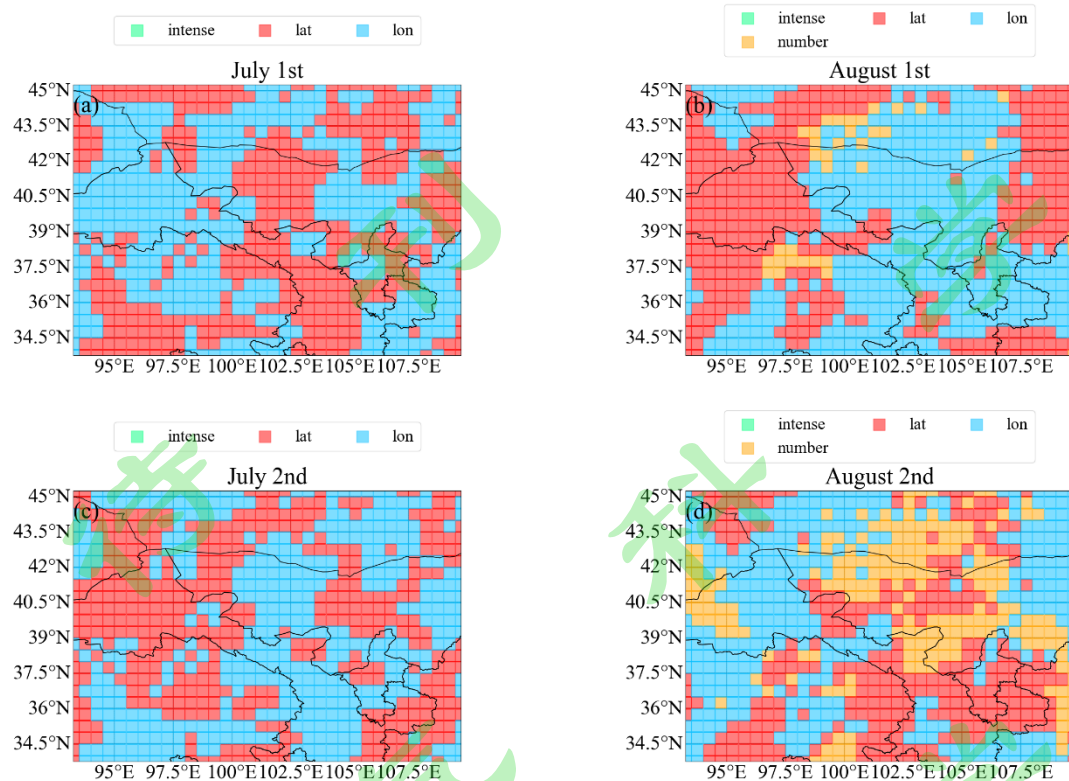


图 12 7 月 (a,c) 和 8 月 (b,d) 随机森林方法拟合 ENWC 区域 TP 的最关键特征量 (a,b) 和次关键特征量 (c,d) 的分布

Fig. 12 The distribution of the most significant features (a,b) and the second significant features (c,d) in July (a,c) and August (b,d) gotten from the fitting of the TP in ENWC by random forests.

由图 12 可见, 在 ENWC 区域, 台风对降水影响的关键 (次关键) 特征量是不一致的, 4 个台风指标对各格点降水的影响是有选择性的, 这反映了在考虑台风活动对 TP 影响时, 台风指标对不同区域影响的重要程度不同。7 月份 (图 12a、c) 影响 ENWC 区域 TP 的最关键特征量是台风中心的位置 (包括经度和纬度)。8 月份 (图 12b、d) 的关键特征量与 7 月份不同, 如在 96°E, 40°N 区域内, 7 月份最关键特征量是台风的東西位置, 而 8 月份是台风的南北位置, 且 8 月份台风频数也在一定程度上影响了 TP, 但是这个因素在大部分区域都是次关键特征量。影响 ENWC 最关键特征量依旧是台风的位置, 而不是台风强度。

## 5. 总结

本文基于 1979-2020 年的 42 年资料, 分析了 7、8 月份西太平洋台风活动对 ENWC 降水的影响, 首先对比 TP 与 NTP, 揭示了台风对 ENWC 分布的影响; 然后对环流形势进行了合成分析, 揭示了 TP 日的环流特征; 最后基于台风强度、位置和频数指标, 利用多元线性回归和随机森林方法建立了降水拟合模型, 通过分析其结果, 进一步揭示了台风和 ENWC 降水的非线性关系和不同台风指标的重要性在 ENWC 上的非一致性。主要结论如下:

(1) 西太平洋台风对我国 ENWC 降水有影响, 但影响的大小既有地区的选择性, 又有时间的差异性。7 月份 TP 分布与台风位置和强度相关较大, 且台风位置影响最大; 8 月份与台风位置、强度和频数都有关系, 其中台风位置影响依旧最大。

(2) 台风对 ENWC 降水的影响, 主要表现在 EOF 分解的第二模态和强降水、极强降水等级上, 对于第一模态和其他等级降水影响较小。这说明台风对于 ENWC 的 TP 影响是间接和非线性的。

(3) 台风对于 ENWC 降水的影响主要是通过调整中高纬槽脊系统、副热带高压以及低



361 纬低涡和低槽的强度和位置来影响水汽输送,进而影响 TP。7 月份 TP 日出现极端降水的环  
362 流形势为:中高纬度环流为两脊一槽的经向型;副高西段呈东南西北向分布,脊线偏北,  
363 588gpm 线脊点偏西;孟加拉湾低涡偏强偏北,低涡北部有低压槽,ENWC 位于槽前。

364 (4) 基于台风强度、位置和频数指标,可以得到较好的降水拟合结果,随机森林方法  
365 得到的结果好于多元线性回归方法,且随着降水等级的提高,该方法的优势更明显,这说明  
366 台风的确对 ENWC 降水有影响,且这种影响是非线性的,非线性影响随降水强度的增加越  
367 来越明显,在随机森林模型中台风位置是影响拟合结果的最关键特征量。

#### 参考文献:

- 369 陈冬冬,戴永久. 2009a. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 33 (5): 923  
370 - 935.  
371 陈冬冬,戴永久. 2009b. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析[J]. 大  
372 气科学, 33(6): 1247-1258.  
373 方匡南,吴见彬,朱建平,等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(003):32-  
374 38.  
375 郭江勇,李耀辉,吴红. 西北地区春季多雨与少雨年的高空环流特征[J]. 中国沙漠,  
376 2006.26(1):60-64.  
377 Strobl, C. , Boulesteix, A. L. , & Zeileis, A. . 2007. Hothorn T, Bias in Random Forest Variable  
378 Importance Measures: Illustrations.  
379 Sui Y, Jiang D B, Tian Z P. 2013. Latest update of the climatology and changes in the seasonal  
380 distribution of precipitation over China [J]. Theor. Appl. Climatol., 113(3): 599-610.  
381 doi:10.1007/s00704-012-0810-z  
382 施雅风,沈永平,胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨  
383 [J]. 冰川冻土, 24(3): 219-226.  
384 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].  
385 第四纪研究,  
386 黄小莉. 不同区域大尺度涡旋系统相互影响的初步研究 (M). 85~906~07 课题组 台风科  
387 学、业务试验和动力学理论的研究. 第二分册. 北京: 气象出版社 1996. 105~109  
388 Liaw, A. , & Wiener, M. . (2002). Classification and regression by randomforest. [J]. R News, 23(23).  
389 Lu, X. Q., H. Yu, et al., 2021: Western North Pacific tropical cyclone database created by the China  
390 Meteorological Administration. [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(4), 690-699. doi: 10.1007/s00376-  
391 020-0211-7  
392 王澄海,张晟宁,李课臣,等. 2021. 1961~2018 年西北地区降水的变化特征 [J]. 大气科学,  
393 45(4): 713-724.  
394 王咏青,罗哲贤,郭建侠. 2005. 西北地区东部干旱化与天气体系演变的关系[J].南京气象学  
395 院学报, 28(1) :28- 35.  
396 王咏青,卓嘎. 1999. 青藏高原东北侧干旱的数值实验[J]. 南京气象学院学报, 22(2): 149-  
397 153.  
398 谢金南,卓嘎. 2000. 台风活动对青藏高原东北侧干旱的影响[J]. 高原气象,19(2):244-252.  
399 徐栋,孔莹,王澄海. 2016. 西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系[J].干旱气象, 34(3):  
400 431-439.  
401 徐栋,李若麟,王澄海. 2016. 全球变暖背景下亚非典型干旱区降水变化及其与水汽输送的  
402 关系研究[J].气候与环境研究, 21(6):737-748.  
403 Ying, M., W. Zhang, H. Yu, et al., 2014: An overview of the China Meteorological Administration

405 tropical cyclone database[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31, 287-301. doi: 10.1175/JTECH-  
406 D-12-00119.1  
407 Yue S, Jiang D, Tian Z . 2013. Latest update of the climatology and changes in the seasonal  
408 distribution of precipitation over China[J]. Theoretical and applied climatology, 113(3-4):599-  
409 610.  
410 姚宗国. 西北太平洋台风对西北地区东部降水的影响分析[D]. 南京信息工程大学, 2005.  
411 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 2003. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化[J]. 气候与环境研  
412 究, 8(1): 9-18.  
413 Xiaoqin Lu, Hui Yu, Xiaoming et al., 2017: Estimating Tropical Cyclone Size in the Northwestern  
414 Pacific from Geostationary Satellite Infrared Images. [J]. Remote Sens. 9(07): 728.  
415 doi:10.3390/rs907072  
416 卓嘎, 谢金南, 马镜娴. 2000. 登陆台风与我国降水的统计关系[J]. 高原气象, 9(02):133-137.  
417