

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2024.02.007

登陆我国内陆热带气旋的衰减趋势分析

赵熠轩, 仇 欣, 王其伟*

(中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京, 210023)

摘 要: 全球变暖背景下, 登陆热带气旋(Tropical Cyclone, TC)的衰减速度是否放缓存在争议, 登陆时强度不同的 TC 的衰减趋势是否一致还不清楚. 利用两个描述登陆 TC 衰减的物理量, 即登陆衰减时间尺度 τ 和登陆衰减维持时间 D , 研究了 1980—2021 年登陆我国内陆 TC 的衰减变化趋势, 并探讨了 TC 登陆强度分档对衰减变化趋势的影响. 对于登陆我国内陆的 TC, 无论是 τ 还是 D , 整体来看都没有随时间显著变化的趋势. 进一步将 TC 的登陆强度分为热带风暴(Tropical Storm, TS)、强热带风暴(Severe Tropical Storm, STS)和台风(Typhoon, TY)档, 发现不同强度档的登陆 TC, 其登陆地点以及登陆后的路径体现出不同特征, 使得不同强度档登陆 TC 的衰减趋势存在差异. 从 TS 档到 STS 档再到 TY 档, τ 随时间的变化趋势从增加到减小再到明显减小, 呈连续改变, 而 D 的变化趋势从增加到减小再到增加, 未呈连续改变, 表明登陆 TC 的衰减变化趋势在不同登陆强度条件下存在不一致性. 从显著性上看, 只有 TY 档登陆 TC 的 τ 的变化满足 90% 置信区间显著下降趋势, 表明登陆 TC 衰减趋势在不同登陆强度条件下存在不确定性.

关键词: 热带气旋, 衰减趋势, 登陆强度, 衰减时间尺度, 衰减维持时间

中图分类号: P444

文献标志码: A

Analysis of the decay trend of tropical cyclones landing in China's mainland

Zhao Yixuan, Qiu Xin, Wang Qiwei*

(Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather, Ministry of Education, and School of Atmospheric Sciences,
Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

Abstract: In the context of global warming, it is controversial whether the decay of landfalling tropical cyclone (TC) slows down, and it is unclear whether the trend of decay of landfalling TCs with different landing intensity is consistent. In this paper, two physical quantities describing landfall TC decay, decay time scale τ and decay duration D , are used to study the trend of landfall TC decay for TCs landing in China's mainland from 1980 to 2021, and the influence of different landing intensity on the trend is discussed. For all the TCs landing in China's mainland, the trend over time for τ or D has no significant change. In this paper, the landfalling TCs are further divided into groups of tropical storm (TS), severe tropical storm (STS) and typhoon (TY) according to their landing intensities. It is found that the landing sites and post-landing paths of the different TC groups show different characteristics, resulting in different decay trends. From TS group to STS group and then to TY group, the trend of τ over time changes continuously from increasing to decreasing to obviously decreasing, while the trend of D changes from increasing to decreasing to increasing, and does not change continuously, indicating that the decay trend is inconsistent for TCs with different landing intensity. From the significance point of view, only the trend of τ of TY group meets the significant decline trend of 90% confidence interval, indicating that the decay trend is uncertain for TCs with different landing intensity.

Key words: tropical cyclone, decay trend, landing intensity, decay time scale, decay duration

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2342203), 国家自然科学基金(42175062), 重大研究计划集成项目(91937301)

收稿日期: 2024-02-01

* 通讯联系人, E-mail: qwwang@nju.edu.cn

热带气旋(Tropical Cyclone, TC)是世界上最具破坏性和最致命的自然灾害之一. 随着全球变暖以及气候变化,全球范围内 TC 的强度以及强 TC 的数量都有所增加^[1]. TC 比过去更强的同时,其最大强度点也越来越接近陆地,这种转变可能会增加 TC 对沿海和内陆灾害的影响^[2].

登陆后的 TC 是具有气候意义的重要降水系统,虽然因逐渐失去了与海洋的联系而减弱,但其仍携带具有高水汽含量、近中性层结稳定性和中等强度风场的气流,可以在内陆特定区域造成灾害性强降水^[3]. 例如,2019 年超强 TC“利奇马”在浙江温岭登陆,其带来的风雨突破多地历史记录,诱发了洪涝、山体滑坡等多种次生灾害,造成我国浙江、福建、安徽、上海等省市受灾严重^[4]. 认识登陆 TC 的衰减特征对其灾害预测具有重要意义,然而,相比 TC 登陆前增强的研究^[5-7]和 TC 登陆前后风雨变化的研究^[8-12],人们对 TC 登陆后衰减规律的研究偏少.

登陆 TC 有一个整体衰减时间尺度. 观测表明 TC 登陆后风速衰减率与风速大小近似成正比^[13-14],即 $dV/dt = -kV$, V 为平均近中心最大风速, t 为登陆后时间, k 为比例系数,则 $V(t) = V(0)e^{-kt}$,其中, $\tau = 1/k$,为衰减时间尺度, τ 越大,表示衰减越慢. 此模型为指数衰减模型,虽然只有一个参数 τ ,但可以很好地描述北大西洋 TC 登陆后 24 h 内的衰减特征^[15]. 对于北大西洋登陆 TC 的气候统计研究发现,其衰减时间尺度增大,衰减有减缓的趋势,现在北大西洋典型登陆 TC 的首日风衰减率比 20 世纪 60 年代减少了约 40%^[15-16]. Song et al^[17] 也发现 1966—2018 年,西北太平洋在我国东南沿海登陆的 TC 的衰减时间尺度增大,衰减趋于减缓.

登陆 TC 的衰减也可以用 TC 登陆后的衰减持续时间来衡量,一般定义为 TC 登陆后到低于热带风暴强度所需时间,该参数有助于量化以一定强度向内陆移动的 TC 的寿命. 由于有些 TC 可以在登陆后持续数天,所以持续时间可以在没有固定时间约束的情况下衡量 TC 衰减的时间变化,从而更好地考虑长寿命 TC 的危害. Zhu and Collins^[18] 发现美国大陆登陆 TC 在 1980 年之前寿

命缩短,但在 1980 年之后寿命显著增加. 但是, TC 在陆地上移动的距离没有随着时间的延长而增加. Chen et al^[19] 对 1951—2009 年在北太平洋西部形成并在中国大陆登陆的 TC 进行了分析,发现 1975—2009 年, TC 的平均陆地持续时间显著增加,而年频率没有明显的变化趋势. Liu et al^[20] 调查了 1980—2018 年登陆中国大陆的 TC,发现 TC 的平均持续时间和登陆时的强度都是增加的,两者是导致登陆 TC 破坏潜力增加趋势的主要原因.

用以上两种参数描述登陆 TC 的衰减,相关研究表明登陆 TC 的衰减时间尺度有增加趋势, TC 登陆后的持续时间也存在增加趋势. 但是,所描述的登陆 TC 衰减放缓的显著性存在差异,甚至可信度仍然存疑. 目前,关于 TC 登陆后衰减趋势的研究存在结论不一致的情况, Chan et al^[21] 对此进行了对比分析,发现采用不同海盆、不同时间段、不同数据集或者不同的数据处理方法研究登陆 TC 的衰减变化趋势都会产生不同的结论. 尤其是在登陆 TC 的筛选中,已有研究选取的登陆 TC 多是限定了 TC 登陆强度在一定阈值以上,而忽略了较弱登陆 TC 的衰减趋势,也没有对强弱登陆 TC 衰减趋势的可能变化进行对比分析.

因此,登陆 TC 的衰减趋势是否对 TC 登陆时的强度敏感还不清楚. 另外,对不同登陆强度 TC 的衰减趋势,两个衰减参数的描述是否有一致的结论,哪个参数更有优势或可信度也不清楚. 本文将对这些问题进行探讨.

1 数据与方法

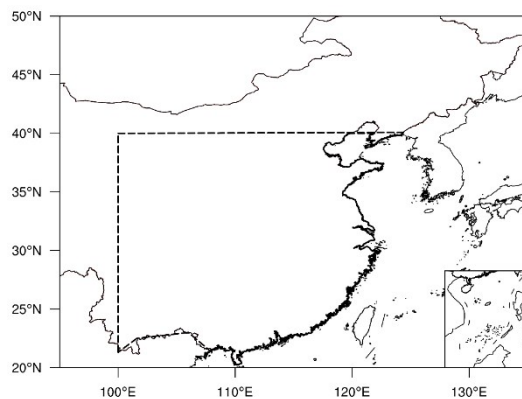
1.1 登陆 TC 的数据集 本文主要使用 1980—2021 年中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)发布的 TC 最佳路径数据集. 对于登陆中国的 TC,和其他机构发布的数据集相比,该数据集使用了更多的观测数据,精度更高,跟踪记录 TC 登陆后的时间也更长,其包含 TC 的中心位置(精度为 0.1°)、2 min 平均最大风速与海平面最低气压. 美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的最佳路径数据集被用来验证结果的一致性. 值得注意的是, JTWC 数据集中的风速记录是 1 min 平均的最大

风速,因此该风速记录普遍比CMA数据集中的风速记录要大,但由于本文主要研究的是变化趋势问题,这两种标准不会对趋势分析产生明显影响,因此本文没有对两种数据集中不同标准的强度数据进行标准化处理.另外,与Song et al^[17]的研究采用的IBTrACS^[22]数据集收录的3 h间隔的CMA最佳路径数据集不同,本文使用上海台风研究所发布的原始6 h间隔西北太平洋TC活动最佳路径数据集(2018年开始加密为登陆后3 h间隔),这是因为IBTrACS数据集中的3 h间隔数据是将CMA原始6 h间隔的数据进行插值得到的,其中强度记录是线性插值,经纬度记录是样条插值,对强度进行线性插值可能会对TC强度衰减指数的拟合结果产生影响.

1.2 登陆TC的时间段 CMA数据集中,近海以及登陆TC的强度数据主要依靠地面观测站和陆基天气雷达.我国地面观测站的数量从1960年开始达到较高水平,但在1980年后增加很少.我国在1970—1980年进入天气雷达数字化阶段,增强了雷达的信息处理能力,另外,还从1984年开始引入卫星观测和德沃夏克方法^[23-24],提高了TC强度反演的精度^[25-26].因此,本文综合考虑登陆TC衰减记录的可靠性,选取1980—2021年作为研究时间段.

1.3 登陆TC的筛选区域和登陆判断条件 已有研究常用Matlab中的矢量海岸线数据来判断TC是否登陆^[16-17],但该海岸线数据分辨率最高为 0.1° ,而选择不同分辨率可能会导致不同的登陆TC样本并影响分析结果^[21].为了更准确地判断TC的登陆,本文使用国家基础地理信息系统网站发布的高精度的中国内陆海岸线数据作为TC是否登陆的判断依据,TC穿过该海岸线进入内陆被视为登陆,该数据集空间精度远高于 0.1° .

图1为登陆TC的筛选区域示意图.当TC中心在其生命史内穿过我国内陆海岸线至少一次,则该TC被判定为登陆(本文不考虑登陆海南岛或台湾岛的情况).在所有登陆TC中,只考虑登陆后24 h内中心位置位于图中黑色虚线与高精度海岸线所围区域内的TC,这样不仅排除了登陆我国不久后移至国外或海上并长时间维持的情况,还排除了TC移至高纬度后与西风带相互作用



Surrounded by dotted lines and high-precision coastlines.

图1 登陆我国内陆TC的筛选区域

Fig. 1 Region for selecting TCs landing in China's mainland

用甚至变性的情况^[27].另外,还排除了登陆后24 h内强度增强或长时段维持不变的TC,若某个TC含有多次登陆过程,从其第一次满足登陆条件开始判定,若有连续出海记录,则将出海后的记录剔除.这些筛选条件提高了登陆TC内陆衰减样本的针对性,在1980—2021年的登陆TC中,共有101个登陆TC满足条件.

为了分析登陆TC强度与衰减的关系,将TC登陆时的强度 V_0 (登陆后的第一个记录点)以 $17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $24.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $32.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为界分四档,即 $V_0 \leq 17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < V_0 \leq 24.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $24.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < V_0 \leq 32.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $V_0 > 32.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,四档样本数量分别为4, 33, 43和21个.由于 $V_0 \leq 17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的热带低压(TD)样本数较少,且此时登陆TC强度较低,衰减趋势的代表性不大,本文只讨论除此之外的其余三档,以下简称为热带风暴(TS)档、强热带风暴(STS)档和台风(TY)档.

1.4 登陆TC衰减参数的计算

1.4.1 衰减时间尺度 TC登陆后的衰减过程,可以用指数衰减模型来描述,即 $V(t) = V(0)e^{-t/\tau}$,衰减时间尺度 τ 的物理意义为登陆TC衰减至其登陆时刻强度的 e^{-1} 倍所花的时间.由于CMA的最佳路径数据集在2018年前(后)以6 h(3 h)间隔记录,本文中 τ 的计算使用TC登陆后的前5(9)个记录点(包含登陆后24 h)的强度值对指数模型进行最小二乘法回归.由于最佳路径数据集中记录时次为世界时00, 06, 12和18时,

很难出现 TC 中心刚好位于海岸线上的记录,因此本文将登陆 TC 在陆地上的第一个记录点视为登陆过程的初始时刻,之后的记录点的时刻分别按时间间隔依次后推,即 $t=6/12/18/24$ (3/6/9/12/15/18/21/24)。

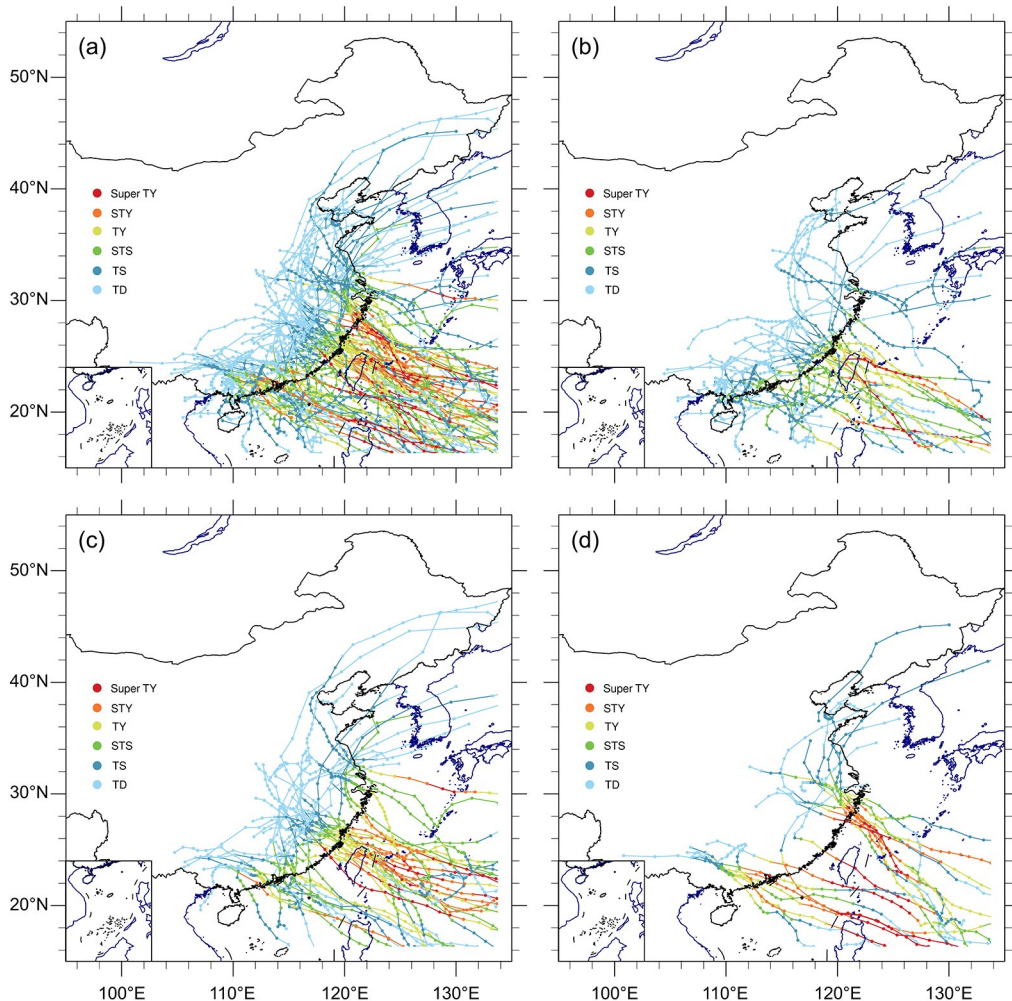
1.4.2 衰减持续时间 本文中衰减持续时间定义为 TC 登陆时(t_0)至衰减到首次小于 $17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($t_{V<17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}$)时经历的时间长度,即衰减持续时间 $D = t_{V<17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}} - t_0$,与一些已有的研究一致^[19-20]。

2 结果与分析

2.1 不同 V_0 档下 TC 的路径与强度分布 图 2 为 1980—2021 年不同登陆强度下 TC 的路径和强

度分布。其中,图 2a 为登陆时刻强度在 TS 以上的所有 TC 的路径以及强度记录分布。从图中可以看到,登陆地点从我国南部沿海到东南部沿海都有分布,大部分 TC 在登陆后迅速减弱到 TS 强度及以下,之后以 TD 的强度在陆地上维持较长时间。一些持续时间相当长的 TC 往往经历了再度入海以及与高纬度西风带相互作用的过程,路径呈现出典型的转向型特征。整体来看,路径分布特征主要可分为两类,即西行路径和西北路径,其中,西北路径中部分有东北转向特征。

图 2b 为 TS 档的路径分布图,登陆地点分布较为均匀,由于登陆强度较低,大部分未深入内陆就已消亡,也有一部分转向型的个例能维持很长



TC intensity at landing time is (a) above TS, (b) TS, (c) STS and (d) TY.

图 2 1980—2021 年不同登陆强度档下 TC 的路径和强度分布

Fig. 2 The path and intensity distribution of TCs for different landing intensity groups from 1980 to 2021

时间. TS档TC登陆后存在一些不规则路径,与TC登陆强度低,易受其他天气系统的影响有关. 图2c为STS档登陆TC的路径和强度分布,可以看到,此档登陆TC的登陆地点不像TS档那样在我国东南沿海近似均匀分布,而是主要集中在我国广东南部以及福建沿海地区,并且更加深入内陆. 图2d为TY档登陆TC的路径和强度分布,该档样本数量较前两档明显减少,且路径特征中西北向的TC数量显著减少,路径更加平滑,登陆地点更加集中,分为浙江沿海与广东南部沿海两部分. 根据图2b~d分析,随着登陆时刻强度的增加,登陆地点逐渐向广东以及浙江沿海集中,路径特征也逐渐趋向于西行和转向路径. 由此可见,不同登陆强度档TC的路径特征存在差异,登陆强度与登陆地点以及登陆后的路径存在一定联系,登陆地点和路径的不同将使得不同强度档位的登陆TC具有不同的衰减特征.

2.2 不同 V_0 档下TC数量随时间的变化 图3为不同 V_0 档下登陆TC的数量随时间变化的柱状图. 图中将1980—2021年共42年分为六个时间段,每个时间段包含七年,图中横坐标表示每个时间段的中心年份,该点对应纵坐标的值表示包含该点前后三年的TC数量和. 从图中可以看出,除TD档数量太少以外,其余档样本数量随时间各有变化. 对每年不同档位登陆TC的数量进行

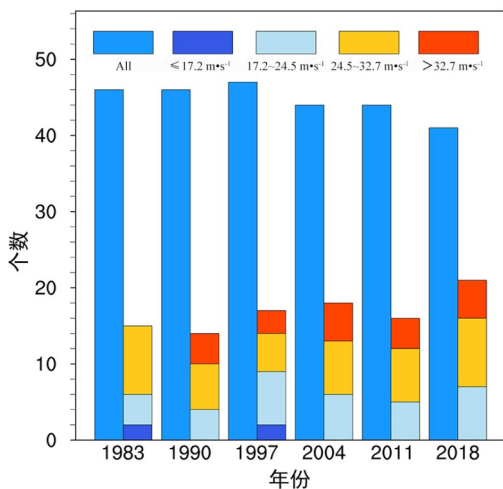
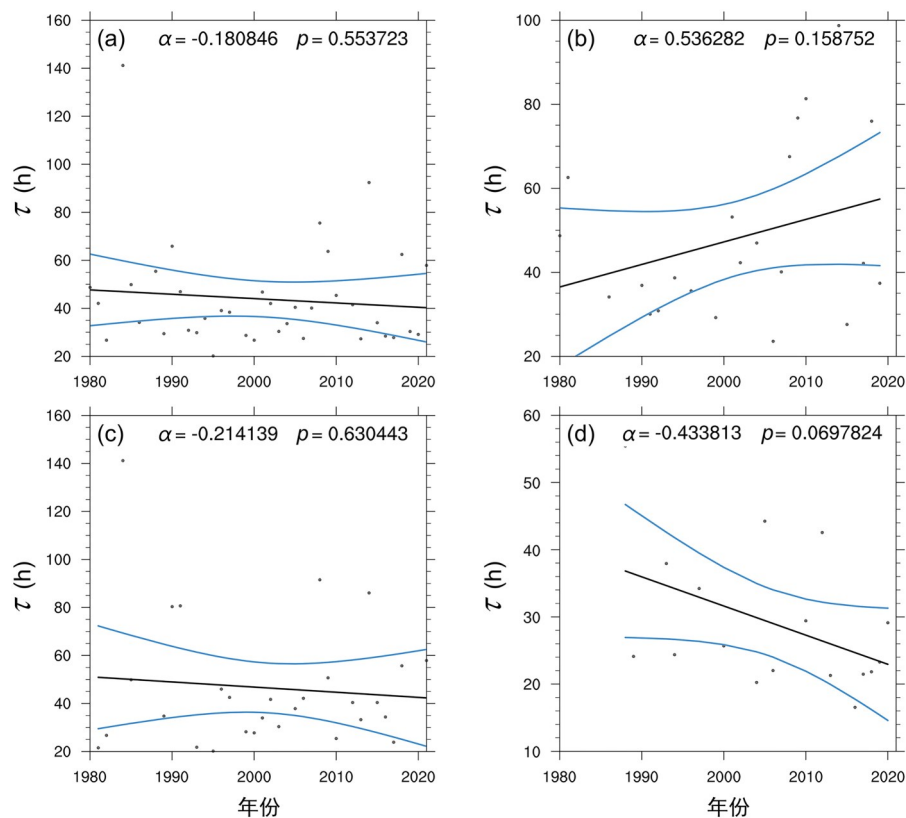


图3 不同登陆强度档下登陆TC的数量随时间的变化
Fig. 3 Number of TCs over time for different landing intensity groups from 1980 to 2021

回归分析后发现,只有TY档的登陆TC数量满足95%置信度水平下的上升趋势,每年约为0.017个,而每年全部登陆TC以及其余档的样本数量均未呈显著的变化趋势,这与Chen et al^[19]和Liu et al^[20]的结果一致. 总的来看,尽管登陆TC的总数量没有显著增加,但登陆时刻强度达到台风等级的TC数量正在缓慢增加,预示未来将有更多的强TC登陆,引起更大的破坏. 这一结果也是Liu et al^[20]提出的累积功耗指数与平均功耗指数随时间增加的原因之一.

2.3 τ 的回归分析 图4是不同强度档的年平均 τ 随时间的变化趋势图,其中图4a是登陆强度 $V_0 > 17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 τ 随时间的变化趋势图,图中“ α ”为回归直线的斜率,“ p ”为置信度水平,可以看出该条件下 τ 没有显著的变化趋势. 为了与Song et al^[17]的研究结果进行对比,本文将研究时间段放宽至1966—2021年进行回归分析,发现 τ 仍然呈不显著的上升趋势(未展示),这与Song et al^[17]相同时间段下的结论不一致. 原因可能是他们选择了较粗的海岸线分辨率来判断登陆,也没有对 V_0 设置条件,而是选择了生命史最大强度大于 $17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的TC,并且没有剔除强度不变或增加的TC. 这些因素的差别导致了他们得到的样本总数为190个,远多于本文筛选条件下得到的样本数量128个. 需要注意的是,海岸线分辨率选得过粗已被证实会影响回归结果的显著性^[21],另外由于大多数TC达到生命史最大强度时都位于海上且距离陆地仍有一定的距离,之后到登陆前强度开始缓慢下降^[28],因此生命史最大强度这一物理量与TC登陆后的物理过程相关性弱,选择较低的生命史最大强度进行筛选,条件比较宽泛,也会影响回归结果的显著性.

图4b为TS档下年平均 τ 的变化趋势图. 可以看出,虽然回归结果呈比较明显的上升趋势,但显著性水平不够高,这表示该档下的TC登陆后衰减呈不显著的变慢趋势. 图4c显示STS档TC的 τ 呈不显著变快趋势,而图4d显示当 $V_0 > 32.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, τ 满足90%置信区间的显著下降趋势,从1980年至2021年下降了约37%,这表示现在TC登陆后衰减至其登陆时刻强度的 $1/e$ 所花的时间相比1980年缩短了约37%,意味着强TC登



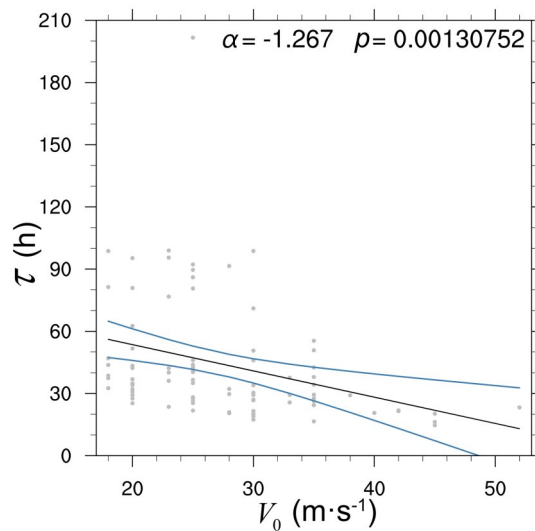
TC intensity at landing time is (a) above TS, (b) TS, (c) STS, and (d) TY. The solid gray dots represent the average sample from year to year, the black line represents the regression line, and the blue curves represent the 95% confidence interval.

图 4 不同登陆强度档下 τ 随时间的变化趋势

Fig. 4 The trend of τ over time for different landing intensity groups from 1980 to 2021

陆后衰减呈显著变快趋势. 该趋势的斜率与 Chan et al^[21] 的结论相近, 但置信度水平略低, 这可能是因为他们的选取的是登陆后 18 h 内满足类似条件的 TC, 而本文选择的是登陆后 24 h 连续衰减的 TC, 样本偏少. 虽然在各档下, 难以得出 95% 置信区间显著下降的变化趋势, 但是结合图 4b~d 来看, 随着 V_0 的增加, τ 随时间变化的斜率逐渐降低, 这表明登陆时刻强度对登陆 TC 的衰减时间尺度存在一定的影响.

图 5 为 τ 与 V_0 的回归关系图. 如图所示, τ 与 V_0 呈显著的反相关关系, V_0 越大, τ 越小, 表示登陆时刻强度越高, 登陆 TC 指数衰减速度越快. 该结论与 Phillipson and Toumi^[29] 的结果相同, 且与实际观测结果相符. 而 Song et al^[17] 的研究表示 τ 与 V_0 无显著关系, 这可能是因为他们对登陆 TC 样本的筛选太宽松而导致其中衰减过程包含了过多海洋的影响.



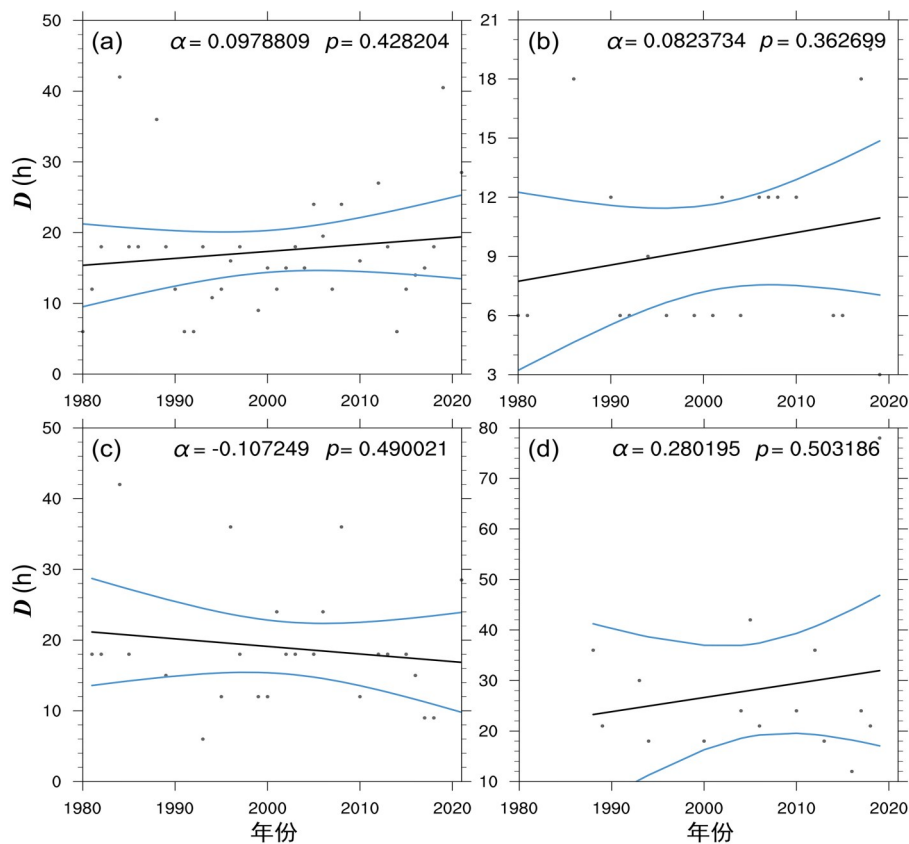
The blue curves represent the 95% confidence interval.

图 5 τ 与 V_0 的回归关系

Fig. 5 Regression relationship between τ and V_0

2.4 D 的回归分析 图6为衰减持续时间 D 随年份的变化趋势图,其中,图6a为 $V_0 > 17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的TC的 D 随时间变化趋势,该条件下 D 随时间趋于增加,但增加趋势不显著.该结果与Chen et al^[19]和Liu et al^[20]的结论不同,这与本文中样本时段与筛选条件不同导致的样本差异有关,Chen et al^[19]和Liu et al^[20]的研究中没有把强度首次低于 $17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时位于国外或海上的样本去除,这样会导致 D 同时包含了陆地与海洋因素的影响,尤其是对于转向路径的登陆TC,其往往

能移动到高纬度从西风带中获得动量使得 D 相比其他大多数TC都大.图6b为TS档TC的情况,可以看到回归曲线斜率与图6a相近但仍然不显著.图6c为STS档TC的情况,如图所示,回归结果转为不显著的反相关关系.图6d为TY档TC的情况,回归结果又转为不显著的正相关关系.综上,不论哪种登陆强度条件, D 都没有随时间显著变化的趋势,但 D 的变化倾向随强度分档仍然有所改变,体现了TC登陆强度与衰减维持时间也存在一定的联系.



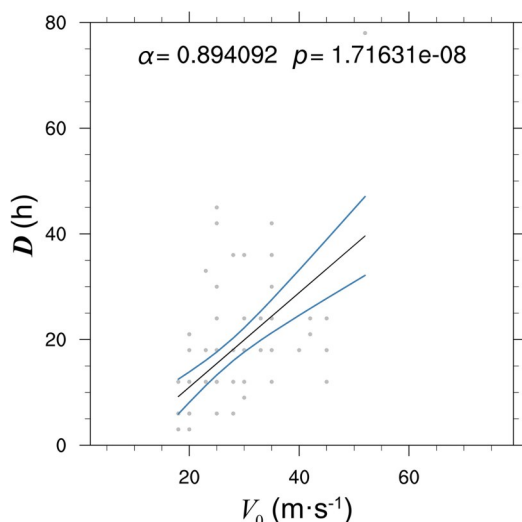
TC intensity at landing time is (a) above TS, (b) TS, (c) STS, and (d) TY. The solid gray dots represent the average sample from year to year, the black line represents the regression line, and the blue curves represent the 95% confidence interval

图6 不同登陆强度档下 D 随时间的变化趋势

Fig. 6 The trend of D over time for different landing intensity groups from 1980 to 2021

图7为 $V_0 > 17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下 D 与 V_0 的回归分析.回归结果显示 D 随 V_0 的增加而增加,即登陆时刻强度越大,TC的衰减持续时间越长,这是比较容易理解的,登陆时较强的TC伴有较大的能量,而衰减耗散较大的能量需要更长的时间,这一特征符合观测结果.

2.5 τ 与 D 的比较分析 由以上分析可知, τ 和 D 都能描述TC登陆后的衰减快慢, τ 越大(小)衰减越慢(快), D 越大(小)也表示衰减越慢(快),两者呈显著的正相关关系(图8),从回归斜率上看, τ 在一定范围变化时,对应 D 在更大的范围变化,即 D 对衰减的描述较 τ 更为敏感.如前所述,两者



The blue curves represent the 95% confidence interval.

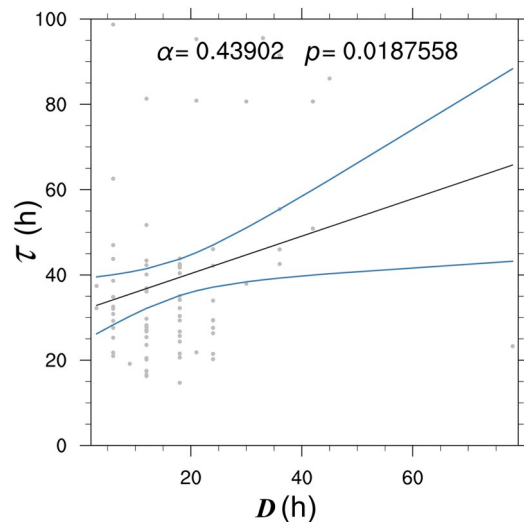
图 7 D 与 V_0 的回归关系

Fig. 7 Regression relationship between D and V_0 .

都与登陆时刻强度 V_0 有显著的相关关系, 其中 τ 随 V_0 增加而减小, D 则随 V_0 增加而增加. 观测表明, 登陆 TC 的衰减一般具有先快后慢的变化特征, 登陆后环境条件的显著差异使得登陆 TC 一般在前 12 h 衰减率大, 此时, V_0 越大衰减越快, τ 越小; 之后登陆 TC 逐渐适应内陆环境, 可以维持一定时间的缓慢衰减, 此时, V_0 越大, 该过程越长, D 越大. 这样, 从与 V_0 关系的角度看, τ 对 TC 登陆后前期的衰减有更好的描述, D 则能较好地描述登陆 TC 后期的衰减. 从 τ 和 D 随时间的变化趋势上看, τ 的变化趋势对 V_0 变化的响应更加显著 (对比图 4 和图 6).

3 总结与讨论

本文利用两个描述登陆 TC 衰减的物理量, 即登陆衰减时间尺度 τ 和登陆衰减维持时间 D , 研究 1980—2021 年登陆我国内陆 TC 的衰减变化趋势, 并探讨了 TC 登陆强度分档对衰减变化趋势的影响. 本文研究样本的选取针对登陆我国内陆的 TC 及其在内陆的衰减, 较已有研究中的筛选条件更为严格, 并进一步对筛选条件进行优化, 排除了登陆后受海洋影响较大的样本, 使分析结果更为可靠. 研究发现, 虽然总样本数量和 TD, TS, STS 档的样本数量都没有显著的随时间变化趋势, 但 TY 档 ($V_0 > 32.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的登陆 TC 数量



The blue curves represent the 95% confidence interval.

图 8 τ 与 D 的回归关系

Fig. 8 Regression relationship between τ and D

随时间呈缓慢增加趋势. 而不同强度档的登陆 TC, 其登陆地点以及登陆后的路径体现出不同特征, 登陆强度越高, 登陆地点越向浙江沿海与广东南部沿海地区集中, 路径特征向西行路径与西北路径转向型集中. 登陆地点和路径的不同将使得不同强度档位的登陆 TC 具有不同的衰减特征.

由于筛选条件和样本的差异, 本文中登陆内陆 TC 的衰减变化趋势与已有研究略有不同, 无论是 τ 还是 D , 整体来看都没有随时间显著变化的趋势. 进一步按不同登陆强度分档进行回归分析发现, 对于 τ 而言, TY 档登陆 TC 满足 90% 置信区间的随时间显著下降趋势, 这表示登陆时刻达到台风及以上强度的 TC 衰减变得越来越快了, 该结果与 Chan et al.^[21] 的结果相符, 回归显著性略低. 对于 D , 无论是从整体还是不同强度档位来看都没有随时间显著变化的趋势, 与 Chen et al.^[19] 和 Liu et al.^[20] 的结论不同.

τ 和 D 都能描述登陆 TC 的衰减快慢, 两者呈正相关关系, 值越大 (小) 表示衰减越慢 (快). 两者都与 TC 的登陆强度 V_0 有显著的相关关系, 相对而言, D 只是 TC 登陆至衰减到一定强度时的时长, 而 τ 则基于指数衰减模型, 包含登陆 TC 衰减先快后慢的变化特征, 物理意义比 D 具体. 从随时间的变化趋势上看, τ 的变化趋势对 V_0 变化的响应更显著, V_0 从 TS 档到 STS 档再到 TY 档,

τ 随时间的变化趋势从增加到减小再到明显减小,呈连续变化,而 D 的变化趋势从增加到减小再到增加,没有明显的连续的改变。

本文筛选登陆我国内陆 TC 的条件更为具体,使得获得的样本偏少,而为了比较 τ 和 D ,两者采用了同样时段的样本。本文所得结果与已有研究存在一定差异,这些与样本的差异有关,也体现了登陆 TC 的 τ 和 D 的变化趋势对样本选取的依赖性及其显著性的不确定性。

本文分析表明,不同强度档位登陆 TC 的登陆地点和路径具有不同特征,这些特征差异对 τ 和 D 的影响还需要进一步研究,比如,从不同纬度的温热属性角度,分析登陆地点偏南和偏北的登陆 TC 的衰减差异,或者从不同下垫面的动力和热力影响角度,分析西行和西北行登陆 TC 的衰减差异等。本文结论中,只有 TY 档登陆 TC 的 τ 的变化满足 90% 置信区间显著下降趋势,从一定程度说明 τ 的变化趋势与登陆 TC 的路径和登陆的位置有关。另外,登陆内陆时为 TY 的 TC,大部分都绕过了台湾岛,说明经台湾岛二次登陆内陆的 TC,其登陆强度大部分低于 TY 强度,二次登陆对 τ 和 D 变化趋势的影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Wang S, Toumi R. Recent migration of tropical cyclones toward coasts. *Science*, 2021, 371(6528): 514—517.
- [3] Houze Jr R A. Cloud dynamics. The 2nd Edition. Amsterdam: Academic Press, 2014, 399—402.
- [4] 陈佩燕,陆逸. 浙江超强台风“利奇马”灾害事件回顾及部门调查情况介绍. *中国减灾*, 2022(11): 36—39.
- [5] Emanuel K. Self-stratification of tropical cyclone outflow. Part II: Implications for storm intensification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69(3): 988—996.
- [6] Montgomery M T, Smith R K. Paradigms for tropical cyclone intensification. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 2013, 64(1): 37—66.
- [7] Wang Y Q, Li Y L, Xu J. A new time-dependent theory of tropical cyclone intensification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021, 78(12): 3855—3865.
- [8] 董美莹,陈联寿,郑沛群,等. 登陆热带气旋暴雨突然增幅和特大暴雨之研究进展. *热带气象学报*, 2009, 25(4): 495—502. (Dong M Y, Chen L S, Zheng P Q, et al. Research progress on abrupt intensification of heavy rainfall and super heavy rainfall associated with landfalling tropical cyclones. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 25(4): 495—502.)
- [9] 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. *气象学报*, 2014, 72(5): 969—986. (Duan Y H, Chen L S, Liang J Y, et al. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 969—986.)
- [10] 陈联寿,许映龙. 中国台风特大暴雨综述. *气象与环境科学*, 2017, 40(1): 3—10. (Chen L S, Xu Y L. Review of typhoon very heavy rainfall in China. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2017, 40(1): 3—10.)
- [11] 陈联寿,孟智勇,丛春华. 台风暴雨落区研究综述. *海洋气象学报*, 2017, 37(4): 1—7. (Chen L S, Meng Z Y, Cong C H. An overview on the research of typhoon rainfall distribution. *Journal of Marine Meteorology*, 2017, 37(4): 1—7.)
- [12] 任福民,杨慧. 1949年以来我国台风暴雨及其预报研究回顾与展望. *暴雨灾害*, 2019, 38(5): 526—540. (Ren F M, Yang H. An overview of advances in typhoon rainfall and its forecasting researches in China during the past 70 years and future prospects. *Torrential Rain and Disasters*, 2019, 38(5): 526—540.)
- [13] Kaplan J, DeMaria M. A simple empirical model for predicting the decay of tropical cyclone winds after landfall. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1995, 34(11): 2499—2512.
- [14] Kaplan J, DeMaria M. On the decay of tropical cyclone winds after landfall in the new England area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2001, 40(2): 280—286.
- [15] Li L, Chakraborty P. Slower decay of landfalling hurricanes in a warming world. *Nature*, 2020, 587(7833): 230—234.

- [16] Chan K T F, Zhang K L, Wu Y, et al. Landfalling hurricane track modes and decay. *Nature*, 2022, 606 (7915): E7—E11.
- [17] Song J J, Klotzbach P J, Zhao H K, et al. Slowdown in the decay of western North Pacific tropical cyclones making landfall on the Asian continent. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 749287.
- [18] Zhu Y J, Collins J M. Recent rebounding of the post-landfall hurricane wind decay period over the continental United States. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): e2020GL092072.
- [19] Chen X Y, Wu L G, Zhang J Y. Increasing duration of tropical cyclones over China. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(2): L02708.
- [20] Liu L, Wang Y Q, Zhan R F, et al. Increasing destructive potential of landfalling tropical cyclones over China. *Journal of Climate*, 2020, 33(9): 3731—3743.
- [21] Chan K T F, Chan J C L, Zhang K L, et al. Uncertainties in tropical cyclone landfall decay. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2022, 5(1): 93.
- [22] Knapp K R, Kruk M C, Levinson D H, et al. The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(3): 363—376.
- [23] Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery. *Monthly Weather Review*, 1975, 103(5): 420—430.
- [24] Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. Washington, D C. National Oceanic and Atmospheric Administration, 1984.
- [25] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287—301.
- [26] Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. Western north pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690—699.
- [27] 宋金杰, 王元. 西北太平洋变性热带气旋的若干特征. *南京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 328—336. (Song J J, Wang Y. Some characteristics on extratropical transition of tropical cyclones over the Western North Pacific. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2010, 46(3): 328—336.)
- [28] Wang S, Toumi R. On the intensity decay of tropical cyclones before landfall. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 3288.
- [29] Phillipson L M, Toumi R. A physical interpretation of recent tropical cyclone post - landfall decay. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(18): e2021GL094105.

(责任编辑 杨贞)