

江苏沿海台风风暴潮特征分析

刘仕潮^{1,2}, 李明杰^{1,2}, 吴少华^{1,2}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 收集了1950—2022年影响江苏沿海的历史台风风暴潮过程资料, 对引起江苏沿海台风风暴潮的台风路径进行了分类和分析, 开展了江苏沿海台风风暴潮的月际分布和年际变化研究, 提出了不同路径台风风暴潮的预报要点。结果表明: 引起江苏沿海台风风暴潮次数最多的是外海转向型台风, 占比高达44.3%, 而正面登陆型台风最少, 占比只有5.4%, 但引起的增水量值最大; 江苏沿海台风风暴潮在6—10月均有出现, 8月出现次数最多; 风暴潮强度等级为V级(增水50~100 cm)的过程占比最多, 为42.7%, 而高潮位超警戒程度等级为IV级(超警戒30 cm之内或达到黄色警戒潮位值)的占比最多, 为45.0%; 风暴潮发生次数在近几年呈上升趋势, 尤其是增水为50~100 cm的过程, 高潮位超警戒或达到黄色警戒潮位值以上的过程在近20年只出现3次; 在江苏沿海台风风暴潮的预报和应对中, 需要重视可能正面登陆的和9—10月的外海转向型台风; 8月和9月是江苏沿海出现风暴潮灾害可能性较高的月份, 若这两个月的天文高潮与风暴增水叠加合适, 极有可能出现达到黄色警戒潮位以上的高潮位。

关键词: 风暴潮; 江苏沿海; 台风路径; 风暴潮强度; 警戒潮位; 变化趋势

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0001-12

0 引言

风暴潮是指由于强烈的大气扰动(如强风和气压骤变)所导致的海面异常升高的现象。风暴潮结合通常的天文潮, 特别是若恰好赶上了天文高潮阶段, 往往会使其影响所及的海域水位暴涨, 乃至海水浸溢内陆, 酿成巨灾^[1]。我国位于太平洋西北岸, 海岸线跨越了20多个纬度, 每年汛期都会受到台风的袭击, 也是西北太平洋地区受台风袭击最多的国家^[2]。台风的袭击往往会带来明显的风暴潮过程, 因此我国又是受风暴潮灾害影响最为严重的国家之一。

江苏省作为众多沿海省份之一, 风暴潮灾害是其沿海最主要的自然灾害。随着沿海经济的不断发展, 该地区种植业和养殖业的范围不断扩展, 海岸滩涂围垦不断向海延伸, 受到的风暴潮威胁也越来越大, 灾害时有发生^[3]。根据《中国海洋灾害公

报》的统计^[4], 受9711号台风风暴潮灾害影响, 江苏全省共有33人死亡, 300多人受伤, 9人失踪, 因灾直接经济损失约30亿元。

我国的风暴潮研究始于20世纪70年代, 为了满足防灾减灾的需求, 众多学者开始研究风暴潮的预报技术, 并取得了很多重要成果。王喜年等^[5]建立了一个二维风暴潮动力数值模式, 将其应用于覆盖整个中国沿岸海域的5个子区域, 并开展业务化台风风暴潮数值预报; 于福江等^[6]建立了一个覆盖东海的嵌套网格台风风暴潮数值预报模式, 其预报结果令人满意; 随着计算能力的不断提高, 数值预报技术也飞速发展, 刘秋兴等^[7]建立了覆盖整个中国沿海地区的精细化台风风暴潮模型, 在中国沿海的最高分辨率达到了300 m左右, 并投入了业务化应用; 韩雪等^[8]基于ADCIRC(An Advanced Circulation Model For Oceanic, Coastal and Estuarine Waters)水

收稿日期: 2023-04-04。

基金项目: 江苏省自然资源发展专项资金(海洋科技创新)(JSZRHYKJ202102)。

作者简介: 刘仕潮(1984-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事风暴潮预警研究工作。E-mail: liusc@nmefc.cn

动力模型在南黄海海域建立了重点岸段网格分辨率达到100 m的精细化风暴潮数值预报模型。

随着沿海观测资料的不断积累,不少学者开始关注于历史风暴潮过程的研究,通过分析历史资料来了解沿海风暴潮的特征,为沿海的风暴潮灾害防御提供重要参考。杨桂山^[9]基于中国沿海风暴潮灾时间变化和空间分布特点的分析,着重探讨了近50年全国及长江、黄河、珠江三角洲的风暴潮历史记录以及实测风暴潮灾发生频次的变化与气候波动的关系;谢丽等^[10]分析了近20年来我国沿海地区风暴潮灾害的次数和强度、时空分布及其与灾害损失的相关关系,结果表明在全球变暖背景下,我国风暴潮灾害的次数和强度呈增加趋势;董剑希等^[11]分析了20世纪50年代以来福建省7个代表性验潮站近700站次的台风风暴潮过程,对福建省风暴潮的时空分布特征开展研究;在针对江苏沿海风暴潮历史过程特征分析方面,梁晓红等^[12]从影响江苏沿海的台风路径特点和影响岸段等方面,分析了台风对江苏沿海风暴潮的影响特征。

目前对江苏沿海台风风暴潮历史过程的特征研究还不充分。本文收集了1950—2022年影响江苏沿海的131次台风风暴潮过程(最大增水超过50 cm),分析影响江苏沿海的台风路径特点以及不同路径下的风暴增水特征,并探讨该地区台风风暴潮增水的月际和年代际变化趋势,从而较为全面地揭示江苏沿海台风风暴潮特征。本文的观测数据主要来自海洋观测网江苏沿海潮位观测站,包括连云港、燕尾、滨海、响水口、射阳、大丰、新洋港、洋口港、吕四、连兴港潮位站,其中,连云港、吕四等潮位站的观测数据较为完备,但由于江苏沿海水沙条件复杂,潮滩变化较大,因此,部分潮位站会出现因泥沙淤积而无法观测的问题,或因历史原因导致观测数据的连续性不佳,本文已通过收集各方资料,尽力保证资料的完整性。文中的风暴增水数据采用观测潮位减去天文潮位(根据与观测数据年份相近的调和常数进行计算)得到。

1 台风路径对江苏沿海台风风暴潮的影响分析

台风路径是影响台风风暴潮的重要因素之一,

台风的行进方向、是否登陆、与北方的高压系统是否存在配合都直接影响着风暴增水的量值。江苏省位于 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 之间,海岸线的走向呈西北—东南之势,受天气形势影响,影响江苏沿海的台风路径相对比较复杂。本节通过分类整理影响江苏沿海的各种台风路径,分析其月际分布和风暴增水的特征。

1.1 路径分类

基于中国气象局热带气旋资料中心发布的西北太平洋热带气旋最佳位置资料^[13-14],可将引发江苏沿海台风风暴潮的台风路径划分为5类:外海北上型、正面登陆型、外海转向型、登陆后出海型、登陆后影响型。图1分类别绘制了本文收集的台风风暴潮过程的台风路径图,图2给出了各类路径所占的比例。

从图中可以看出,外海北上型台风由我国东海进入黄海后,基本沿着正北或者与江苏沿海平行方向行进,这类路径占12.2%;正面登陆型台风相对来说比较少,占比只有5.4%,除了1210号台风“达维”外,其余均在长江口—江苏南部一带登陆;外海转向型台风一般是在东海北部或黄海南部转向东北方向行进,逐渐远离江苏沿海,这类路径非常常见,占比高达44.3%;登陆后出海型台风主要在浙江和福建沿海登陆,在陆地转向东北方向行进,从江苏沿海出海,这类占比也较大,达到24.4%;还有一类路径的台风是在浙江或福建登陆后,并未在江苏出海,而其外围环流仍然会给江苏沿海带来明显的风暴潮影响,这类路径的台风较少,占比13.7%。

1.2 不同台风路径类型引起的风暴潮过程的月际分布

从各类路径台风引起的台风风暴潮月际分布可以看出(见图3),江苏沿海受到台风风暴潮影响的时段主要为6—10月,其中7—9月较多,6月和10月相对较少,而不同台风路径类型的风暴潮月际分布也有稍许差异。

外海北上型台风引起的风暴潮出现在6—9月,其中7月和8月最多,6月和9月较少;正面登陆型台风引起的风暴潮出现在7—9月,8月出现的次数多于7月和9月;外海转向型台风和登陆后出海型台

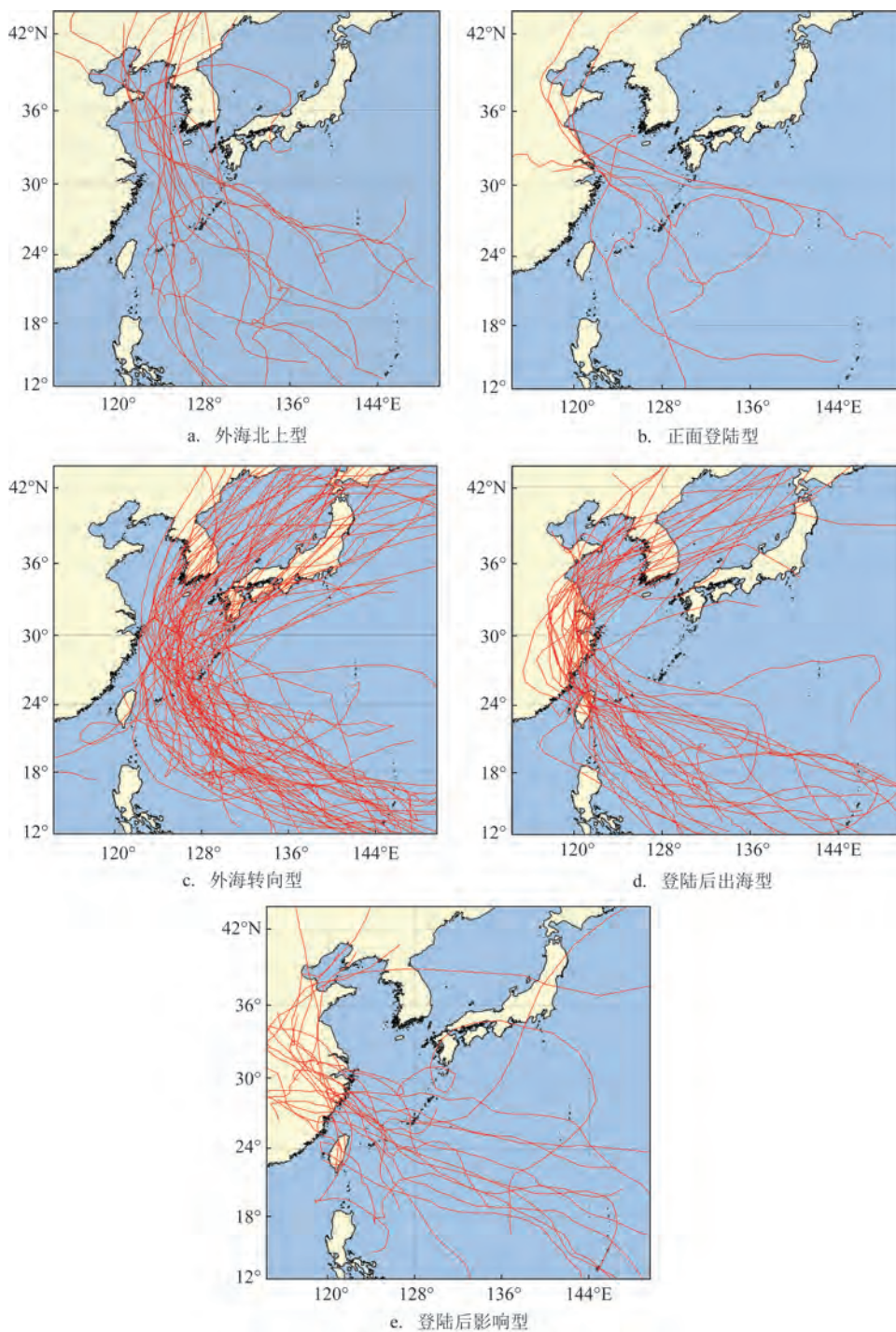


图1 不同类型台风路径图

Fig.1 Types of typhoon track

风引起的风暴潮出现在6—10月,这两者有相似的分布情况,即8月和9月出现次数明显多于其他月份,6月和7月出现较少;登陆后影响型台风风暴潮的出现次数与正面登陆型台风类似,出现在7—9

月,其中8月最多。

1.3 不同台风路径类型下的风暴增水量值分析

台风路径是影响风暴增水量值的重要因素,江

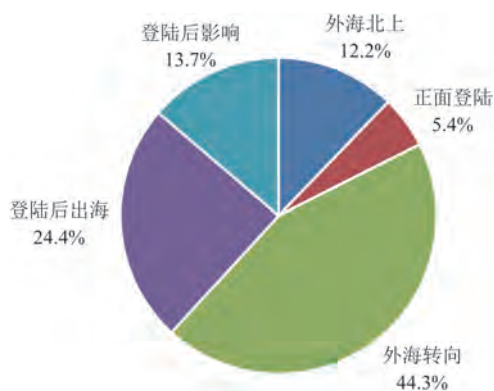


图2 各类台风路径引起的台风风暴潮过程占比

Fig.2 The proportion of typhoon storm surges caused by different types of tracks

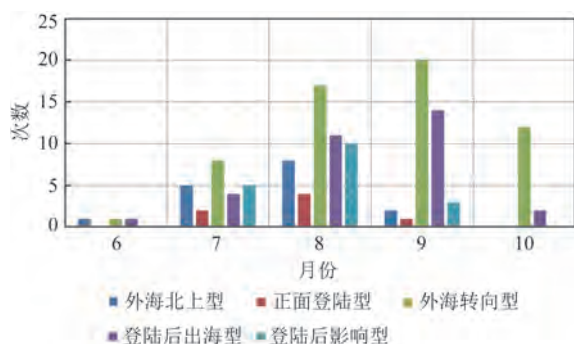


图3 各类台风路径引起的台风风暴潮月际分布

Fig.3 Monthly distribution of typhoon storm surges caused by different types of tracks

苏沿海多变的台风路径所引起的风暴增水量值也存在差异。如图4所示,利用每类路径下的增数值绘制了箱型图,以反映每类路径增水的极值、平均值和大多数增数值范围等特性。

从图中可以看出,正面登陆型台风次数虽然不多,但是风暴增水的平均值、中位数值和最大值都明显高于其他路径,因此仍然需要重点关注可能会正面登陆的台风,其引起的风暴潮强度最高,例如,7708号台风“Babe”在长江口登陆,江苏沿海有4个潮位站的增水超过200 cm^[15];又如,1210号台风“达维”登陆江苏的路径在历史上较为罕见,使连云港潮位站出现了178 cm的风暴增水^[16]。

外海转向型台风通常距离江苏沿海较远,风暴增水的平均值和中位数值与其他路径的差别不是很大,但是增水量值的上边界却仅次于正面登陆型台风,这其中有个不可忽视的因素,在外海转向型路径台风出现频繁的8—10月,冷空气与台风配合的情况时有发生,会在江苏沿海形成较大的气压梯度,结合海岸线的走向,非常有利于形成较大的增水,典型的历史过程如8114号台风“Agnes”风暴潮过程,当台风北上至杭州湾外海时,与北方的大陆高压发生配合,形成西北高东南低的形势^[17],受其影响,江苏沿海有3个站的增水超过200 cm^[15]。

外海北上型台风的影响次数不多,其增水的平均值与外海转向型台风差别不大。江苏沿海增水量值对这类台风路径的远近和台风环流大小较为敏感。历史上引起较大增水的这类路径有6005号台风“Polly”和7303号台风“Billie”,均距离江苏沿海160 km左右,以几乎平行于岸线的方向向北移动,引起的风暴增水超过150 cm。

登陆后出海型和登陆后影响型的两类台风,虽然是在浙江或者福建沿海登陆,台风在影响江苏时强度往往不高,但不可轻视其带来的影响。从图4可以看出,登陆后出海型台风所引起的增水平均值

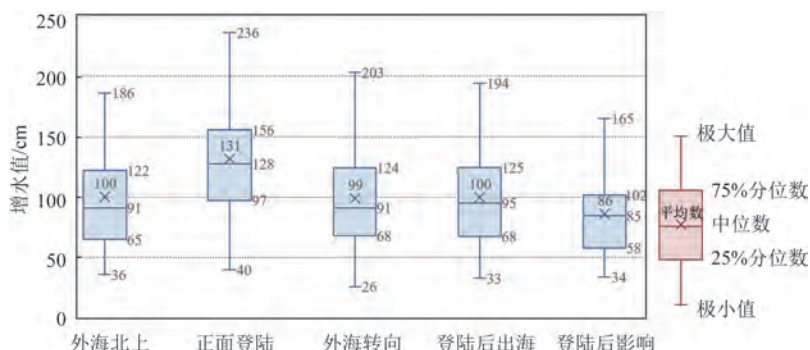
图4 不同路径引起的风暴增水箱型图^[18]

Fig.4 Box plot of storm surge caused by different types of tracks

与外海北上型、外海转向型台风基本一致,因此也会出现相当可观的风暴增水,如9216号台风“Polly”在江苏连云港附近出海,受其影响,江苏沿海有3个潮位站的增水超过100 cm;而登陆后影响型台风所引起的增水平均值和上限值明显小一些,但也要引起足够重视,如9711号台风“Winnie”,虽然在登陆浙江后一路沿西北方向深入内陆,最后转向进入渤海,但仍使江苏北部两个潮位站的增水超过100 cm。

2 江苏沿海台风风暴潮时间分布特征

本节采用统一的数据处理标准,对江苏沿海历史风暴潮过程资料进行筛选和分析,即只选择增水达到或超过50 cm的历史台风风暴潮过程,并采用

历史过程同期的警戒潮位值作为超警戒判断依据,从而揭示江苏沿海风暴潮时间分布特征。

2.1 风暴潮评价指标

根据2020年颁布的《风暴潮等级》(GB/T 39418—2020)标准^[19],将风暴潮强度按照最大风暴增水的大小分为特强、强、较强、中等和一般5个级别,分别对应表1中的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ级;当警戒潮位为单一值时,依据最大高潮位超过当地警戒潮位值的量值将高潮位超警戒程度分为特别严重、严重、较重和一般4个等级,分别对应表2中的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ级;当警戒潮位为四色时,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ级对应关系见表3。下文分析的超警戒情况所涉及的潮位站及其警戒潮位值见表4。

表1 风暴潮强度等级

Tab.1 Levels of storm surge intensity

等级	Ⅰ (特强)	Ⅱ (强)	Ⅲ (较强)	Ⅳ (中等)	Ⅴ (一般)
最大风暴增水 h_s / cm	$h_s > 250$	$200 < h_s \leq 250$	$150 < h_s \leq 200$	$100 < h_s \leq 150$	$50 \leq h_s \leq 100$

表2 警戒潮位值为单一值时高潮位超警戒程度等级

Tab.2 Levels of high tide over warning tidal level when warning tidal level is a single value

等级	Ⅰ (特别严重)	Ⅱ (严重)	Ⅲ (较重)	Ⅳ (一般)
最大高潮位超警戒潮位值 h_w / cm	$h_w \geq 150$	$80 \leq h_w < 150$	$30 \leq h_w < 80$	$0 \leq h_w < 30$

表3 警戒潮位值为四色警戒潮位值时高潮位超警戒程度等级

Tab.3 Levels of high tide over warning tidal level when warning tidal level is four values

等级	Ⅰ (特别严重)	Ⅱ (严重)	Ⅲ (较重)	Ⅳ (一般)
最大高潮位值	超过红色警戒潮位值70 cm及以上	达到或超过红色警戒潮位值,且超过值小于70 cm	达到或超过橙色警戒潮位值,未达到红色警戒潮位值	达到或超过黄色警戒潮位值,未达到橙色警戒潮位值

表4 典型潮位站单一值警戒潮位值和四色警戒潮位值

Tab.4 Single-value warning tidal level and four-color warning tidal level at typical tide stations

站位	单一值警戒潮位值/cm	警戒潮位/cm(蓝/黄/橙/红)
连云港	340(310)	300/320/340/365
燕尾	296(286)	330/350/370/390
洋口港	—	440/465/490/525
吕四	401	390/405/430/450

注:警戒潮位值基于国家85高程基面,2000年(含)之前连云港站警戒潮位为310 cm,燕尾站警戒潮位为286 cm,江苏省四色警戒潮位值于2015年启用。

2.2 风暴潮次数月际分布

江苏沿海台风风暴潮发生于6—10月(见图5),其中8月、9月的发生次数最为集中,分别为50次和40次,风暴潮次数占所有过程的68.7%,年平均次数分别为0.68次和0.55次,6月风暴潮发生次数最少,仅为3次,年平均仅为0.04次。

将每次过程按照2.1节中的风暴潮强度等级划分标准进行分类可知(见图6),风暴潮强度为V级的过程最多,占比高达42.7%,IV级过程次之,占比37.4%,这两个强度级别的风暴潮月际分布较为类似,都出现在6—10月,8月、9月最集中,其中8月V级过程为19次,年均0.26次,IV级过程为20次,年均0.27次,9月V级过程为18次,年均0.25次,IV级过程为14次,年均0.19次;风暴潮强度为Ⅲ级的发生次数较上述两级别明显减少,占比为16.0%,发生

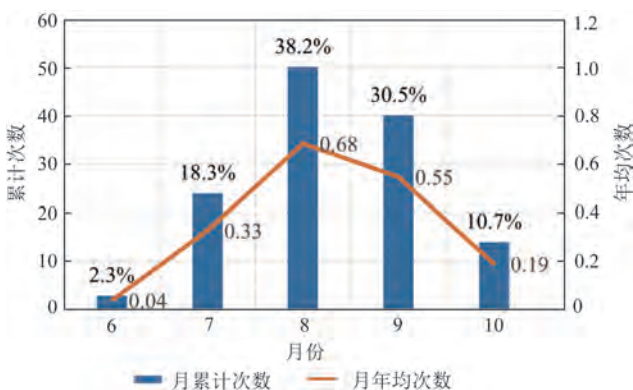


图5 风暴潮累计次数和年均次数月际分布

Fig.5 Monthly distribution of the cumulative and annual average number of storm surges

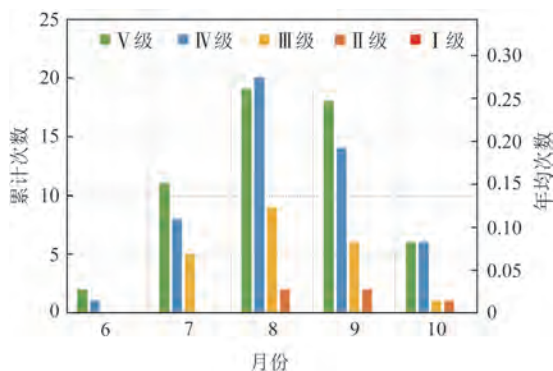


图6 各级强度风暴潮累计次数和年均次数月际分布

Fig.6 Monthly distribution of the cumulative and annual average number of each storm surge intensity levels

在7—10月,其中8月发生次数最多,累计为9次,年均0.12次;风暴潮强度为Ⅱ级的发生次数屈指可数,总计5次,占比3.8%,且只在8—10月出现;江苏沿海没有出现风暴潮强度为Ⅰ级的过程。

2.3 风暴潮超警戒月际分布

江苏沿海高潮位超警戒程度等级在IV级(一般)及以上的台风风暴潮过程出现在6—10月(见图7),总的出现次数为20次。8月出现次数最多,累计出现9次,年均0.12次,9月次之,累计出现6次,年均0.08次,这两个月份的出现次数占总次数的75.0%,明显高于同月份风暴潮过程次数的占比,这与8月、9月较高的天文潮有明显关系。根据计算,江苏沿海的天文潮年极值(以连云港和吕四潮位站为例,详见表5)几乎都出现在8月、9月,而各级别强度的风暴潮在8月、9月的出现次数也最多,因此需要重视这两个月份的风暴增水与天文高潮叠加的情况。

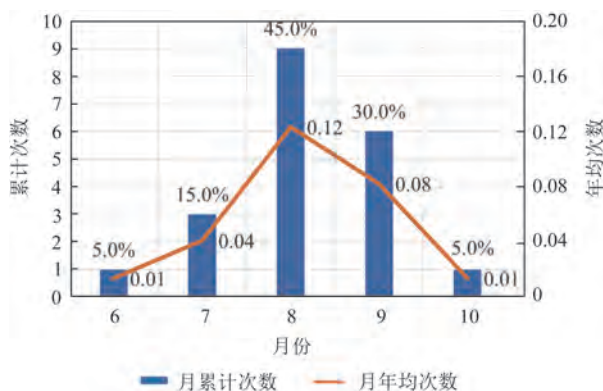


图7 高潮位超警戒等级IV级及以上累计次数和年均次数月际分布

Fig.7 Monthly distribution of cumulative and annual average number of level IV and above of high tide over warning tidal level

将风暴潮过程按照2.1节的高潮位超警戒程度等级标准进行划分(见图8),可以明显看出IV级风暴潮过程出现次数最多,占比55.0%,其中7月、9月最多,7月累计出现3次,年均0.04次,9月累计4次,年均0.06次;Ⅲ级过程次之,占比35.0%,仅在8月和9月出现过,其中8月累计次数最多,为5次,年均0.07次;Ⅱ级过程仅在8月出现过2次,占比10.0%,

表 5 连云港和吕四潮位站近 20 年天文潮年极值计算结果

Tab.5 Annual extreme astronomical tide at Lianyungang and Lusi tide stations in recent 20 years

年份	连云港		吕四	
	出现日期	极值潮位*/cm	出现日期	极值潮位*/cm
2004	8月2日	280	8月31日	324
2005	8月21日	280	8月22日	335
2006	9月9日	292	9月9日	351
2007	9月28日	300	8月31日	350
2008	8月3日	287	9月1日	331
2009	8月22日	270	8月22日	329
2010	9月10日	289	8月12日	354
2011	9月28日	311	8月31日	357
2012	10月16日	308	8月20日	351
2013	7月25日	293	8月23日	328
2014	8月12日	297	8月12日	338
2015	9月1日	306	8月31日	354
2016	10月17日	305	8月21日	354
2017	7月25日	299	7月25日	335
2018	8月13日	293	8月13日	329
2019	9月1日	305	9月1日	348
2020	9月19日	306	9月19日	356
2021	10月8日	298	9月9日	347
2022	8月13日	284	8月14日	332
2023	9月2日	282	9月1日	332

*基于国家 85 高程基面

一次是由 9216 号台风“Polly”所引起,连云港和燕尾潮位站高潮位突破当时的历史极值;另一次是由 0012 号台风“派比安”所引起,燕尾潮位站同样出现

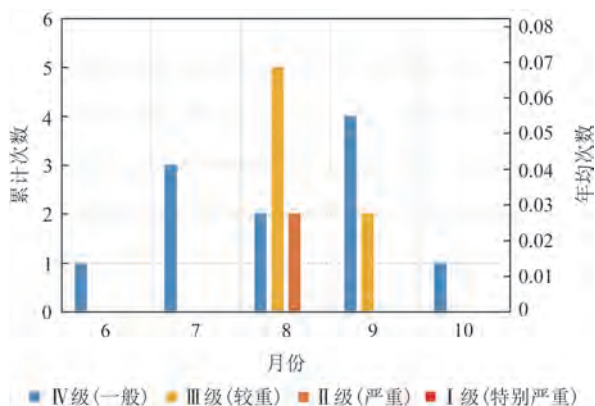


图 8 各级高潮位超警戒累计次数和年均次数月际分布

Fig.8 Monthly distribution of cumulative and average number of each level of high tide over warning tidal level

了突破历史极值的高潮位。江苏沿海没有出现过高潮位超警戒程度 I 级的风暴潮过程。

2.4 风暴潮次数年际变化

1950—2022 年,江苏沿海每年发生台风风暴潮的次数年变化总体相对比较平稳(见图 9),大部分年份为 1~2 次,年均次数为 1.79 次。期间台风风暴潮发生次数出现过几次小高峰,首先是 20 世纪 60 年代初期,5 a 的滑动平均值为 3 次左右,1959 年甚至出现了 5 次;从 20 世纪 70 年代—90 年代初期,滑动平均值都维持在 2 次左右,随后有所下降,紧接着在 2004 年和 2005 年前后,出现一个小高峰;近 10 年的统计结果也出现了明显的上升趋势,2018 年出现了 7 次之多,5 a 的滑动平均值接近 4 次。

将上述风暴潮过程按照不同的强度级别进行

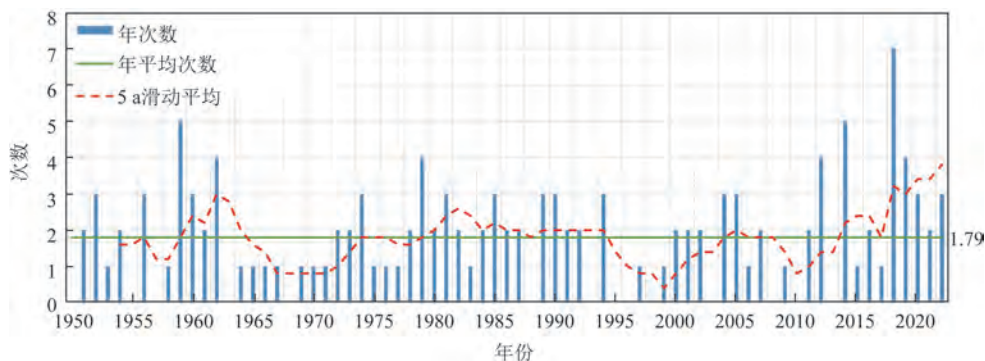


图 9 风暴潮年际变化

Fig.9 Interannual variation of storm surge

分类(见图10 a—d),可以发现不同级别风暴潮的年际变化趋势略有不同。风暴潮强度为V级的年变化趋势与总变化趋势非常相似,在20世纪60年代初期、80年代和2005年前后出现小高峰,而在近10年呈现明显的上升趋势,年平均为0.77次;而IV级的变化趋势则不同,分别在20世纪60年代初、90年代初出现小峰值,尤其是1959年和1990年出现了3次,近5年中,虽然2018年出现了3次,但整体上升趋势不明显,年平均为0.67次;Ⅲ级的出现次数较V级和IV级明显减少,只在个别年份出现1~2次,近5年呈小

幅上升的趋势,年平均只有0.29次;Ⅱ级的出现次数极其稀少,只在1951年、1977年、1981年、1983年和2014年各出现1次,年平均仅为0.07次;江苏沿海没有出现过风暴潮强度为I级的过程。

将各级及以上强度风暴潮的累计次数绘制年际变化图(见图10 e—h)。从结果可以看出,V级及以上强度的风暴潮年变化趋势包含了所有的统计过程,结果与图9一致;IV级及以上过程在20世纪60年代和90年代初期出现小峰值,近几年呈现上升趋势;由于Ⅱ级及以上过程极少,因此Ⅲ级及以上

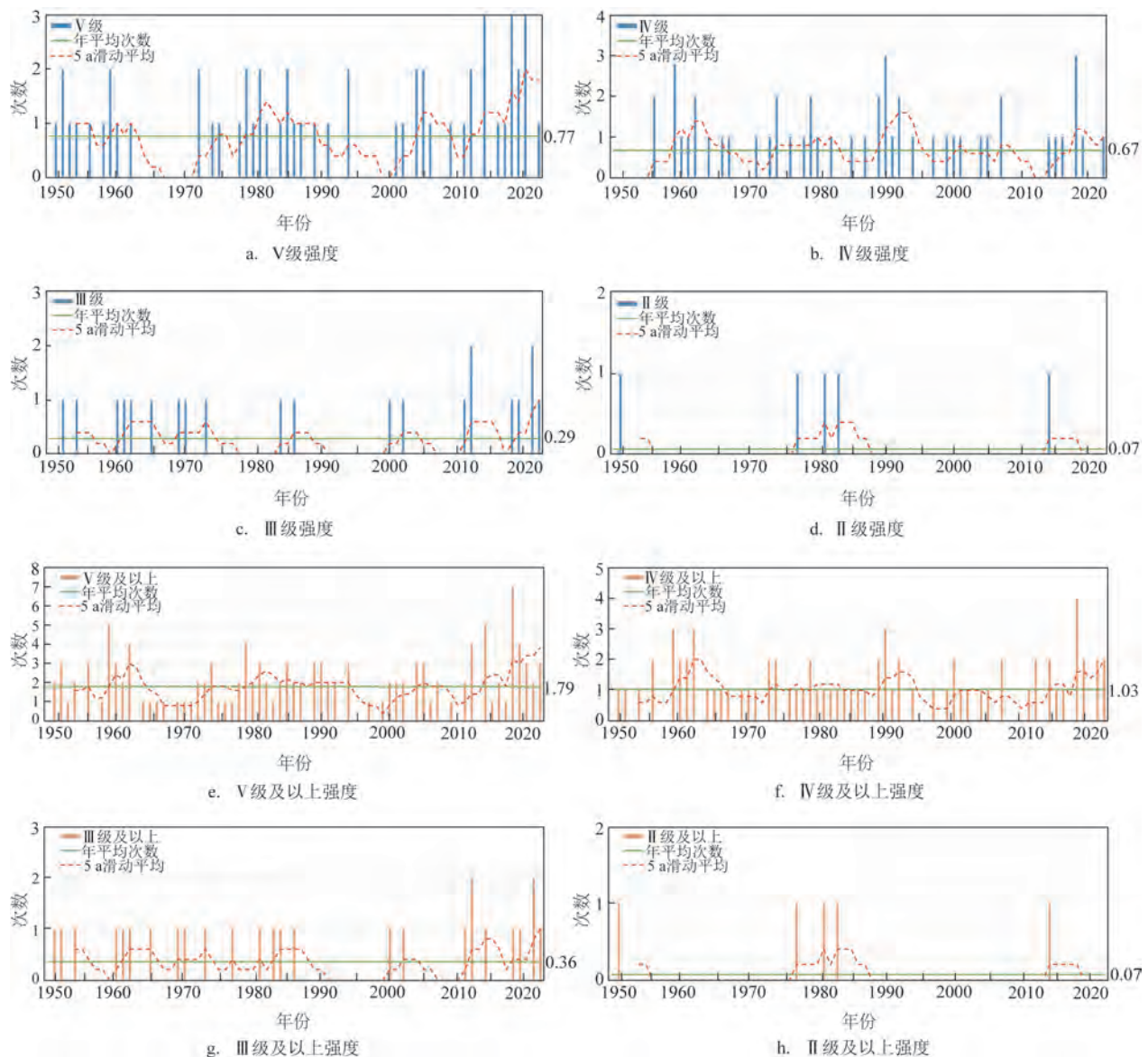


图10 各级和各级及以上风暴潮强度年际变化

Fig.10 Interannual variation of each storm surge intensity levels

过程的年变化趋势与图 10 c 基本一致;由于没有 I 级的过程,Ⅱ级及以上过程的年变化趋势与图 10 d 完全一致。

2.5 高潮位超警戒年际变化

总体来看,江苏沿海高潮位超警戒程度等级在Ⅳ级(一般)及以上的次数并不是很多(见图 11),年均次数为 0.27 次,大部分的超警戒情况出现在 1970

—2000 年,这段时期的次数占比高达 70%,其中 1989—1992 年每年都出现超警戒情况;而近 20 年只出现 3 次,分别是 1210 号台风“达维”、1419 号台风“黄蜂”和 2106 号台风“烟花”的风暴潮过程,其他年份均没有高潮位超警戒或达到黄色警戒潮位值的情况出现。

将所有统计的风暴潮超警戒过程按照级别进行划分(见图 12 a—c),超警戒程度达到Ⅳ级的次数

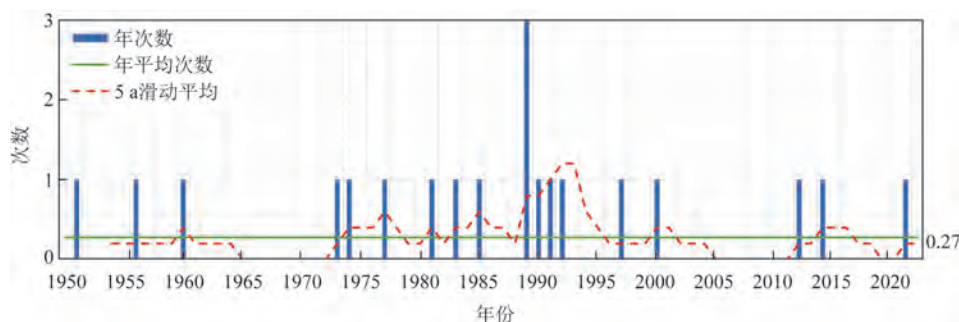


图 11 高潮位超警戒等级Ⅳ级及以上次数年际变化

Fig.11 Interannual variation of level IV and above of high tide over warning tidal level

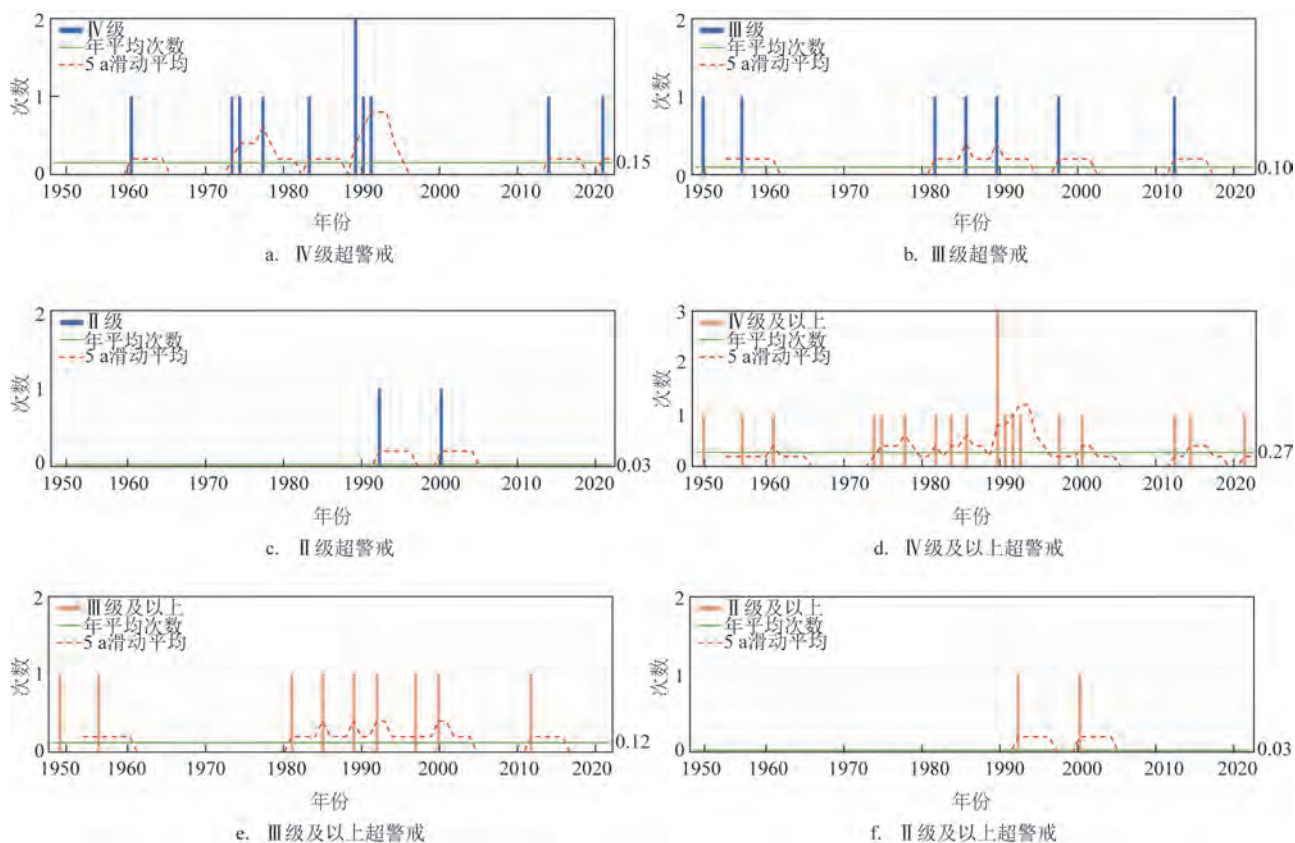


图 12 各级和各级及以上高潮位超警戒次数年际变化

Fig.12 Interannual variation of each level of high tide over warning tidal level

主要集中在20世纪70—90年代,其中1989—1991年连续出现,而1992—2013年均未出现,年平均次数为0.15次;超警戒程度Ⅲ级的次数较Ⅳ级明显减少,只在1951年、1956年、1981年、1985年、1989年、1997年和2012年出现过,年平均次数为0.10次,近10年不曾出现;超警戒程度达到Ⅱ级的过程仅有1992年的9216号台风“Polly”和2000年的0012号台风“派比安”风暴潮过程,其他年份都没有出现过;没有出现超警戒程度达到Ⅰ级的过程。

将各级及以上风暴潮超警戒累计次数绘制年际变化图(如图12 d—f)。从图中可以看出,由于包含所有统计过程,超警戒程度达到Ⅳ级及以上的变化趋势与图11完全一致;Ⅲ级及以上的次数明显减少,集中出现在1980—2000年,近10年则没有出现;由于没有超警戒程度达到Ⅰ级的过程,因此Ⅱ级及以上过程的变化趋势与图12 c完全一致。

3 结论与讨论

本文基于江苏沿海1950—2022年历史台风风暴潮过程数据和中国气象局热带气旋资料中的西北太平洋热带气旋最佳路径数据集,对江苏沿海台风风暴潮台风路径的特点及风暴潮的月际分布和年际变化进行分析。结论如下:

①引起江苏沿海风暴潮的台风路径较为多样,大致可以分为外海北上型、正面登陆型、外海转向型、登陆后出海型和登陆后影响型5类,其中外海转向型的占比最高,达44.3%,出现时间主要是6—10月,而正面登陆型的占比最少,只有5.4%,出现时间是7—9月。

②不同路径引起的增水量值各具特点,正面登陆型台风所引起的风暴增水的最大值和平均值都大于其他路径;而外海转向型的增水最大值仅次于正面登陆型,但均值明显降低;外海北上型、外海转向型和登陆后出海型路径的增水平均值较为接近;登陆后影响型路径的增水平均值最小。

③江苏沿海台风风暴潮发生在6—10月,其中8月最多,占比38.2%;按级别划分后,风暴潮强度等级为Ⅴ级(增水50~100 cm)的发生次数最多,占比42.7%,其他级别从Ⅳ到Ⅱ级依次减少,没有出现过风暴潮强度为Ⅰ级(增水大于250 cm)的过程;高潮

位超警戒的过程出现在6—10月,其中8月最多,占比45.0%;各级别高潮位超警戒次数从Ⅳ级到Ⅱ级依次减少,没有出现过高潮位超警戒程度Ⅰ级的风暴潮过程。

④江苏沿海风暴潮发生次数的年际变化总体相对比较平稳,年均均为1.8次,在20世纪60年代初、70—90年代初和2005年前后出现过小高峰,近几年则出现了明显上升的趋势;高潮位超警戒程度等级在Ⅳ级(一般)及以上的过程年均均为0.28次,大部分集中在1970—2000年,最近20年只出现了3次。

⑤在江苏沿海台风风暴潮过程的预报和应对中,首要关注的仍然是正面登陆的台风,尤其是可能登陆上海或穿过杭州湾的台风,路径稍微北抬,便可能登陆江苏南通地区,给江苏沿海带来十分可观的风暴增水;其次要重视每年9月、10月的外海转向型台风,其可能与夏末秋初开始活动的冷空气发生配合,在江苏沿海形成较大的气压梯度,出现较大增水,再加上这几个月较高的天文潮,成灾的可能性大大增加;对于外海北上型台风,则要注意其路径与江苏沿海的距离,200 km之内的台风都需要引起重视;而对于登陆后出海型和登陆后影响型台风,需要关注路径深入内陆的深度和台风的环流尺度。

⑥江苏沿海高潮位超警戒程度等级在Ⅳ级(一般)及以上的台风风暴潮过程在8月的占比明显高于同月份风暴潮过程次数的占比,这与江苏沿海8月、9月较高的天文潮有着明显的关系;根据计算,江苏沿海的天文潮年极值几乎都出现在8月、9月,本文的分析结果也表明各级别强度的风暴潮在8月、9月的出现次数最多,尤其是Ⅴ级(50~100 cm)和Ⅳ级(100~150 cm)两个级别,这两个级别的风暴潮在8月、9月的年均次数之和为0.97次,即每年8月、9月都可能出现一次由台风引起的50~150 cm增水,若与天文高潮位叠加合适,达到黄色及以上警戒潮位的可能性极高,需要引起高度重视。

参考文献:

- [1] 冯士筭. 风暴潮的研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 1998, 20(4): 44-47.
FENG S Z. The advance of researches on storm surges[J]. World Sci-Tech R & D, 1998, 20(4): 44-47.
- [2] 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 热带气旋动力学引论[M]. 北京: 气

- 象出版社, 2002.
- CHEN L S, XU X D, LUO Z X, et al. Introduction to tropical cyclone dynamics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.
- [3] 陈才俊. 江苏沿海特大风暴潮灾研究[J]. 海洋通报, 1991, 10(6): 19-24.
- CHEN C J. On disastrous storm surges upon coast of Jiangsu province[J]. Marine Science Bulletin, 1991, 10(6): 19-24.
- [4] 中华人民共和国自然资源部. 1997年《中国海洋灾害公报》[EB/OL]. (1997-11-26). http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798000.html.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China marine disaster bulletin 1997[EB/OL]. (1997-11-26). http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798000.html.
- [5] 王喜年, 尹庆江, 张保明. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用[J]. 水科学进展, 1991, 2(1): 1-10.
- WANG X N, YIN Q J, ZHANG B M. Research and applications of a forecasting model of typhoon surges in China seas[J]. Advances in Water Science, 1991, 2(1): 1-10.
- [6] 于福江, 张占海. 一个东海嵌套网格台风风暴潮数值预报模式的研制与应用[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 23-33.
- YU F J, ZHANG Z H. Implementation and application of a nested numerical typhoon storm surge forecast model in the East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(4): 23-33.
- [7] 刘秋兴, 董剑希, 于福江, 等. 覆盖中国沿海地区的精细化台风风暴潮模型的研究及适用[J]. 海洋学报, 2014, 36(11): 30-37.
- LIU Q X, DONG J X, YU F J, et al. A high-resolution typhoon storm surge forecast model covering the whole China's coastal areas and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(11): 30-37.
- [8] 韩雪, 盛建明, 潘锡山, 等. 南黄海海域风暴潮精细化数值模式研究[J]. 海洋预报, 2019, 36(1): 52-58.
- HAN X, SHENG J M, PAN X S, et al. Study on the refined storm surge numerical model in the Southern Yellow Sea[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(1): 52-58.
- [9] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 23-30.
- YANG G S. Historical change and future trends of storm surge disaster in China's coastal area[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(3): 23-30.
- [10] 谢丽, 张振克. 近20年中国沿海风暴潮强度、时空分布与灾害损失[J]. 海洋通报, 2010, 29(6): 690-696.
- XIE L, ZHANG Z K. Study on the relationship between intensity, spatial-temporal distribution of storm surges and disaster losses along the coast of China in past 20 years[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(6): 690-696.
- [11] 董剑希, 李涛, 侯京明. 福建省风暴潮时空分布特征分析[J]. 海洋通报, 2016, 35(3): 331-339.
- DONG J X, LI T, HOU J M. Analysis on the spatial and temporal distribution characteristics of the storm surge of Fujian Province [J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(3): 331-339.
- [12] 梁晓红, 彭模, 赵爱博, 等. 江苏海域台风风暴潮灾害特征及影响分析[J]. 江苏科技信息, 2016(17): 37-39.
- LIANG X H, PENG M, ZHAO A B, et al. Analysis on characteristics and impacts of typhoons storm surge disasters of Jiangsu province[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2016(17): 37-39.
- [13] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [14] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690-699.
- [15] 于福江, 董剑希, 叶琳. 中国风暴潮灾害史料集: 1949-2009[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- YU F J, DONG J X, YE L. Collection of storm surge disasters historical data in China 1949-2009[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [16] 韩雪, 盛建明, 罗锋, 等. 1210号台风“达维”风暴潮分析与数值模拟[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(27): 9448-9451.
- HAN X, SHENG J M, LUO F, et al. Analysis and numerical simulation of the storm surge caused by Typhoon No. 1210 "Damrey" [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(27): 9448-9451.
- [17] 滕学水. 8114号台风风暴潮对山东沿海影响的分析[J]. 海洋预报, 1993, 10(3): 59-65.
- TENG X S. Analysis of the impact of Typhoon 8114 storm surge on the Shandong coast[J]. Marine Forecasts, 1993, 10(3): 59-65.
- [18] TUKEY J W. Exploratory Data Analysis[M]. Boston: Pearson, 1977: 39-56.
- [19] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 39418—2020 风暴潮等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- The State Administration for Market Regulation, The National Standardization Administration, GB/T 39418—2020 Grades of storm surge[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

Analysis of typhoon storm surge characteristics in the Jiangsu coast

LIU Shichao^{1,2}, LI Mingjie^{1,2}, WU Shaohua^{1,2}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the historical typhoon storm surge data affecting Jiangsu coast from 1950 to 2022 was collected. The tracks of typhoon which causing the typhoon storm surge along the Jiangsu coast were classified and analyzed. A study on the monthly distribution and interannual variation of the typhoon storm surge along the Jiangsu coast was carried out, and key points of forecasting for typhoon storm surge in different tracks were proposed. The results show that the most frequent typhoon storm surge along the Jiangsu coast was the offshore turning track of typhoon, accounting for 44.3%, while the least number of storm surge was caused by the landfall track, accounting for only 5.4%, but causing the largest surge. Typhoon storm surge affects the Jiangsu coast in June to October, with the most frequent in August. The intensity of storm surge level V (50~100 cm surge) was the most frequent, accounting for 42.7%, while the high tide level over the warning tidal level IV (within 30 cm above or reaching the yellow warning tidal level) was the most frequent, accounting for 45.0%. The number of storm surge has shown an increasing trend in recent years, especially the process of surge of 50~100 cm, and the process of high tidal level over the warning tidal level or reaching the yellow warning tidal level has only appeared 3 times in the past 20 years. Emphasis should be paid to the possible landfall or offshore turning typhoons in September and October in the forecast and response to typhoon storm surges in Jiangsu. August and September are the months with high probability of storm surge disaster in Jiangsu coast every year. If the astronomical high tide and storm surge in these two months are superimposed appropriately, there is a high probability that the high tidal level will reach above the yellow warning tidal level.

Key words: storm surge; Jiangsu coast; typhoon track; intensity of storm surge; warning tidal level; variation trend