

太湖流域强风、暴雨、高潮、洪水“四碰头”典型台风暴雨洪水过程特性分析

姜悦美^{1**}, 甘月云¹, 郭晨宇², 刘敏¹

(1:太湖流域管理局水文局(信息中心), 上海 200434)

(2:新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:“四碰头”台风对太湖流域的影响已成为防灾减灾体系中关注的热点,但其带来的强风、暴雨、高潮、洪水对流域防洪安全产生的风险影响尚不明晰。开展“四碰头”典型台风的暴雨洪水运动分析对保障流域水安全具有重要意义。本文以1990年以来“菲特”和“烟花”两个“四碰头”典型台风为样本,以其他“二、三碰头”台风为参照,基于水文、工情等实测资料,对比研究“四碰头”台风对流域防洪安全的影响。结果表明:(1)“四碰头”台风均造成极端降雨,总量大、范围广,造成的流域平均降雨量高于二、三碰头台风均值7成以上,高出部分与2009年“莫拉克”台风造成的流域降雨量基本持平。(2)太湖水位涨幅分别位列1949年以来第2、3位,特别是“烟花”台风期间太湖发生编号洪水,太湖湖面最大倾斜1.00 m以上,地区河网33站最高水(潮)位打破历史极值,高水位持续时间长,严重威胁流域区域防洪安全。(3)太湖流域在“菲特”时期以充分调蓄为主,随后流域骨干工程排水能力显著增强,在“烟花”时期洪水运动格局转变为蓄泄兼筹,蓄泄比由1:0.6转变为1:1.1,外排比重提升。(4)在暴雨期间,两场台风流域排水量受天文大潮顶托的制约较为明显,降雨停止并渡过天文大潮后,骨干工程排水量明显增加,以北排长江、东出黄浦江水量增加的更为明显。(5)虽然流域骨干工程排水能力显著加强,但在面对“四碰头”台风以及区域洪涝灾害风险转移的情况下,流域排洪能力仍需进一步提升。研究成果可为今后科学防御太湖流域“四碰头”台风提供参考。

关键词: 菲特; 烟花; “四碰头”; 典型台风; 暴雨; 洪水

Characteristic analysis on rainstorm and flood process during typical typhoons with heavy wind, strong storm, high tide and serious flood colliding in the Taihu Basin

Jiang Yuemei^{1**}, Gan Yueyun¹, Guo Chenyu², Liu Min¹

(1: Bureau of Hydrology (Information Center) of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China)

(2: College of Water Resources and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The impact of “four colliding” typhoons involving a combination of heavy winds, strong storms, high tides and serious flooding has become the focus of attention in the disaster prevention and reduction system in the Taihu basin. However, the impact of the wind, storm, tide and flood on the safety of flood prevention is still unclear. It is important to analyze the rainstorms, floods and their movement caused by the typical “four colliding” typhoons. This study uses the typhoons “Fitow” and “In-Fa” since 1990 as examples and other typhoons with two or three colliding events as references. Based on hydrological and engineering data, the impact of “four colliding” typhoons is compared. The results showed that: (1) All of the “four colliding” typhoons caused extreme rainfall, with a large total amount and wide range. This resulted in rainfall that was more than 70% higher than that caused by two or three colliding typhoons. This was essentially the same as

* 2025-03-26 收稿; 2025-05-27 收修改稿.

国家自然科学基金长江水科学研究联合基金(U2340221)资助.

** 通讯作者; E-mail: jiangyuemei@tba.gov.cn.

the rainfall caused by Typhoon “Morakot” in 2009. (2) The water levels in Lake Taihu have risen by 2nd and 3rd place respectively since 1949. In particular, Typhoon “In-Fa” caused numerous floods, with the maximum water level in Lake Taihu rising by more than 1.00 m. The highest water levels recorded at 33 sites in the river network broke historical records, and the high water levels persisted for an extended period, posing a significant threat to regional flood prevention efforts. (3) Storage dominated during “Fitow”, after which the drainage capacity of the backbone projects was significantly enhanced. During “In-Fa”, the flood movement pattern changed to include both storage and drainage. The storage-to-drainage ratio changed from 1:0.6 to 1:1.1 and the proportion of drainage increased. (4) During the rainstorms caused by the two typhoons, drainage was obviously restricted by the astronomical spring tide. Once the rainfall had stopped and the spring tide had passed, the drainage capacity of the backbone projects increased significantly, particularly in the Yangtze River to the north and the Huangpu River to the east. (5) Although the drainage capacity of the backbone projects has been significantly strengthened, further improvement is needed in the event of a “four colliding” typhoon or the transfer of regional flood disaster risks. These research results could inform the scientific defence against the ‘four colliding’ typhoons in the Taihu Basin in future.

Keywords: “Fitow”; “In-Fa”; “Four Colliding”; typical typhoon; rainstorm; flood

受全球气候变化和人类活动影响,近年来极端天气事件呈现趋多、趋频、趋强、趋广态势,暴雨洪涝灾害的突发性、反常性愈发明显,突破历史记录的台风暴雨洪水事件频繁出现^[1]。据统计,西北太平洋是台风发生频率最高的海区,平均每年约有 3.2 个台风进入东海区域,且影响华东地区的台风数量趋势性增加,影响不断增强^[2-3]。太湖流域位于华东沿海,呈西高东低,以太湖为中心的碟状地形,河湖密布,是典型平原感潮河网地区^[4]。7—10 月流域常受台风袭击,对流域造成影响的台风平均每年 2~3 个,历时一般 1~3 d^[5-6]。1949 年以来,对流域影响较大的有 1962 年“艾美”、2012 年“海葵”、2013 年“菲特”、2019 年“利奇马”、2021 年“烟花”台风等^[6-7]。

对流域产生影响的台风基本具备强风、暴雨(“二碰头”)的特点,当台风影响在天文小潮期,沿江沿海站点的风暴潮增水相对较轻,对流域外排水量影响较小。然而,若同时遭遇冷空气或天文大潮,在强风、暴雨的基础上叠加高潮位等^[8],“三碰头”台风易造成流域性或地区河网大范围洪水的发生,下游圩区大量外排区域涝水并迅速归槽入外河,流域洪水与区域涝水均与天文高潮形成顶托^[9],蓄滞 in 流域下游低洼地区,壅积难消,易积涝成灾^[10-11],因此,强风、暴雨、高潮、洪水“四碰头”对流域、区域造成的危害远高于“二、三碰头”台风。“菲特”、“烟花”就是近年来典型的“四碰头”台风,部分学者对此开展了水文分析工作。胡艳等^[12]基于水量平衡及数理统计,推求了“菲特”台风期间太湖流域进入上海地区的水量;徐天奕等^[13]基于“烟花”台风,利用模型计算北排长江、南排杭州湾不同预排情景方案下区域代表站最高水位的削峰情况;林荷娟等^[14]分析了“菲特”台风期间流域洪水运动规律,并与雨型整体相似的 1999 年梅雨型洪水相比较。然而,台风型洪水与梅雨型洪水有本质区别,流域骨干工程的防洪排涝能力是基于典型梅雨洪水确定的,典型台风造成的太湖及河网高水位过程对流域骨干工程具有较强冲击作用。历史上,太湖流域发生的“四碰头”台风较少且研究不足,且当前研究缺乏“四碰头”与其他“二、三碰头”台风在风、暴、潮、洪四方面特性的对比分析,以及在台风生命期的流域洪水运动与蓄泄分析,对于流域防御典型台风、特别是“四碰头”台风的“四预”(预报、预警、预演、预案)工作十分重要。

本文以“四碰头”“菲特”和“烟花”台风作为研究对象,基于多场典型“二、三碰头”台风流域水文、工情等数据资料,对比分析“四碰头”台风特性,研究“四碰头”台风流域洪水运动与蓄泄,并对进一步完善流域防洪工程体系提出建议。

1 数据与方法

1.1 数据资料

降雨数据采用 1951—2021 年太湖流域雨量代表站日降雨量,通过泰森多边形空间插值方法计算得到太湖流域及各水利分区日降雨量,统计 1951—2021 年太湖流域最大 1 d、3 d 降雨量;水位数据采用 1954

—2021 年太湖及部分河网代表站水（潮）位实测数据，统计 1949—2021 年台风影响下太湖水位最大涨幅。浦东浦西区站点水（潮）位为佘山吴淞基面，其他水利分区站点水位为镇江吴淞基面。

1.2 研究方法

1.2.1 “四碰头”特性 梳理 1990—2024 年（共 35 年）对太湖流域产生较大影响的典型台风，根据风、暴、潮、洪四类特性进行统计归类，共有 5 场“二碰头”风暴台风、5 场“三碰头”风暴潮台风、5 场“三碰头”风暴洪台风和 2 场“四碰头”风暴潮洪台风，将“四碰头”台风分别与二、三碰头台风对比，分析其水文特性、极端性与危害性（表 1）。对比分析“四碰头”台风天气系统、移动路径、暴雨、洪水、潮位、强风与倾斜特性。计算“四碰头”台风造成的特征降雨量、太湖及河网水（潮）位涨幅，分析台风暴雨的极端性及其对流域、区域的造峰情况。统计近年来台风影响期太湖湖面倾斜实测资料，分析强风对太湖湖面倾斜的影响。

表 1 1990—2024 年太湖流域典型台风统计

Tab.1 Typical typhoon statistics from 1990 to 2024 in Taihu Basin

碰头情况	造成影响	台风编号名称	影响时段
二碰头	风暴	199015 埃布尔	8.30-9.1
		199903 玛吉	6.7-6.10
		201818 温比亚	8.16-8.17
		201909 利奇马	8.9-8.10
		202413 贝碧嘉	9.15-9.16
三碰头	风暴潮	200102 飞燕	6.21-6.23
		200509 麦莎	8.4-8.7
		201614 莫兰蒂	9.13-9.16
		202212 梅花	9.12-9.14
		202421 康妮	10.31-11.1
三碰头	风暴洪	200716 罗莎	10.7-10.8
		200908 莫拉克	8.7-8.11
		201211 海葵	8.7-8.10
		201617 鲇鱼	9.27-9.30
		201622 海马	10.19-10.2
四碰头	风暴潮洪	201323 菲特	10.6-10.8
		202106 烟花	7.23-7.27

（注：2005 年之前，太湖水位仅有当日 8 时数据，缺少太湖湖面倾斜、河网站点台风过程最高水位数据。当缺少部分年份数据时，取其他典型台风指标均值。）

1.2.2 流域洪水蓄泄 对比分析两场“四碰头”台风流域洪水蓄泄。以流域洪水蓄泄反映洪水运动，体现为台风暴雨形成的径流量中调蓄量和排水量的蓄泄比。文中除流域径流量由太湖流域水文水动力模型计算得到外，其他数据均为水文监测数据。流域调蓄量包括太湖、河网和水库调蓄量，由实测数据统计计算。流域排水量包括北排长江、东出黄浦江、南排杭州湾口门引排水量实测数据。

2 “四碰头”特性

2.1 天气系统与路径

台风的路径与移速直接关系雨强和落区^[15]，两场台风发生时，均结合了特殊的天气系统。

2013 年，秋台风（9—11 月）“菲特”在与“丹娜丝”形成秋季罕见“双台风”效应的影响下迫使路径西折多变，10 月在福建沿海登陆，随后向西偏南方向在福建省内移动。复杂的大气环流为太湖流域台风暴雨提供稳定的降水背景。台风本体水汽主要来自副高与“菲特”间的东南急流，残留低压与“丹娜丝”东侧急流共同输送水汽，形成东南-偏东双通道，西风槽东移受阻于副高，槽底冷空气的渗透，触发对流爆发，加剧降水系统的复杂性^[16-17]。

2021 年，夏台风（6—8 月）“烟花”7 月分别在浙江舟山和嘉兴平湖两次登陆，为 1949 年有气象记

录以来首个在浙江省内两次登陆的台风，虽没有明显冷空气参与，但副高位置比常年同期异常偏北，导致引导气流很弱，造成台风移速缓慢甚至原地回旋少动，滞留在太湖流域超过 24 h，西南季风持续输送水汽，使台风登陆后维持强度，台风西侧云系受侵入影响减弱，但影响时间长达一般台风的 2 倍^[18-19]。

2.2 暴雨

2.2.1 暴雨过程 2013 年 10 月 6—8 日，受“菲特”台风影响，太湖流域普降暴雨到大暴雨，流域平均累计降雨量 204.7 mm，空间分布总体呈东南向西北递减，暴雨中心位于流域南部，以杭嘉湖区、浙西区降雨量最大，浙西区累计降雨量达 265.0 mm。2021 年 7 月 23—27 日，受“烟花”台风影响，太湖流域普降大到暴雨，局地大暴雨，流域平均累计降雨量 224.5 mm。各水利分区中，除太湖区和武澄锡虞区，其他分区累计降雨量均超过 200 mm。空间分布上，暴雨覆盖流域南部，以浦东浦西区、浙西区降雨量最大，浦东浦西区累计降雨量达 322.7 mm（图 1）。

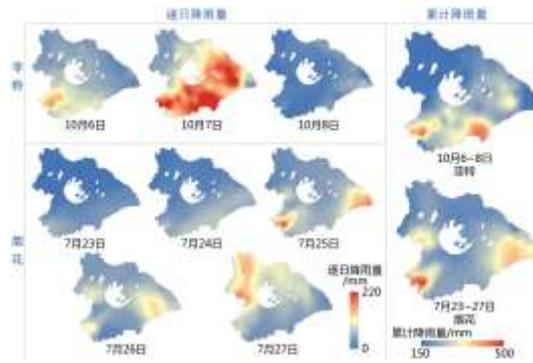


图 1 “四碰头”典型台风降雨量时空分布示意图

Fig.1 Spatial and temporal distribution of rainfall of typical “Four Colliding” typhoons

2.2.2 暴雨特点

(1) “菲特”单日降雨强，“烟花”降雨总量大。“四碰头”台风降雨总量高于二、三碰头台风均值的 7 成以上，高出部分与 2009 年“莫拉克”台风造成的流域降雨量 89.7 mm 基本持平。“菲特”台风移速快、影响时间短，降雨仅持续 3 d，最大单日降雨发生在 10 月 7 日，流域平均降雨量达 131.6 mm，占过程总量的 64%。“烟花”台风移速慢，暴雨历时远高于二、三碰头台风，降雨集中在 5 d，最大单日降雨量仅 75.0 mm，但降雨总量略高于“菲特”。

(2) 影响范围广，暴雨空间分布不均。二、三碰头台风流域平均降雨量在 85.4~175.8 mm，对区域影响较大，但对流域整体影响尚可控制。然而，“四碰头”台风“菲特”期间流域 200 mm 以上降雨笼罩面积占流域总面积的 36%，“烟花”期间达到 56%，暴雨覆盖范围广。“四碰头”台风暴雨空间变差系数^[20]高于二、三碰头台风均值的 55%，在降雨总量大及空间分布极不均衡的情况下，易造成区域内涝。

(3) 对太湖流域均造成了极端降雨事件。“菲特”台风最大 1 d、3 d 流域平均降雨量均位列 1951 年以来历史第 2 位（降雨频率 3%）；流域南部杭嘉湖区、浙西区最大 3 d 降雨量均位列历史第 1 位。“烟花”台风流域最大 1 d 降雨量仅为 75.0 mm（暴雨量级），但最大 3 d 降雨量达 181.3 mm，位列历史第 3 位（降雨频率 4%）；浦东浦西区最大 3 d 降雨量位列历史第 1 位（图 1、表 2）。

表 2 典型台风特征降雨指标统计

Tab.2 Statistical indicators of characteristic rainfalls of typical typhoons

台风名称 /碰头情况	累计降雨 量/mm	日平均降 雨量/mm	最大 1 d 降 雨量/mm	最大 3 d 降 雨量/mm	最大 3 d 降 雨频率/%	暴雨空间 变差系数 ^[20]	暴雨历时 /h
菲特 (1323)	204.7	68.2	131.6 历史第 2 位	204.7 历史第 2 位	3	66.3	57
烟花 (2106)	224.5	44.9	75.0	181.3 历史第 3 位	4	46.8	118
二碰头	137.5	54.9	85.5	131.2	24.3	29.5	40
三碰头	119.2	34.0	71.6	109.8	35.9	40.0	69
四碰头	214.6	56.6	103.3	193.0	3.5	56.6	88

(注：表中“二碰头”为 5 场台风均值，“三碰头”为 5 场风暴潮、5 场风暴洪共计 10 场台风均值。)

2.3 洪水与潮位

2.3.1 洪潮过程

“菲特”台风太湖起涨水位 3.21 m，过程最高水位 3.82 m，略超警（警戒水位 3.80 m），太湖虽未发生编号洪水，但地区河网水位普遍超警戒，部分站点超保证。“烟花”台风发生在汛期，太湖起涨水位较“菲特”偏高 0.26 m，最高水位超警 0.41 m（图 2），太湖发生编号洪水，地区河网水位全面超警戒，大面积超保证，单日最多超警站点数达 93 个，占设有警戒水位站点数的 89%，超保站点数达 49 个，占设有保证水位站点数的 49%。

以常州、无锡（大）、苏州（枫桥）、陈墓、平望、嘉兴站作为河网水位代表站，对比两场台风期间水位变化过程（图 3，“菲特”、“烟花”台风河网站点水位过程线包围区域分别为超警、超保时段）。“菲特”时期上述 6 站除常州、嘉兴站不变外，其他 4 站警戒水位普遍低于“烟花”时期 0.20~0.31 m，保证水位大幅高于“烟花”时期。“菲特”时期除常州站外，各站水位均大幅度超警戒，无锡（大）、苏州（枫桥）站超警历时长，其他站基本在 1~9 d。“烟花”时期上述 6 站过程最高水位普遍高于“菲特”台风，其中平望、陈墓站最高水位创历史新高，各站水位超保历时较短，基本在 1~5 d，超保幅度在 0.28~0.62 m。

以黄浦江干流米市渡、入长江口吴淞口站作为潮位代表站，“菲特”台风影响期（10 月 6—10 日）正值天文大潮（农历九月初三前后），黄浦江干流高潮增水 0.87~1.25 m^[21]，米市渡站共 2 个高潮位超过当时保证潮位（4.25 m），最大超保幅度 0.34 m，共计超保 4 h；吴淞口站最高潮位 5.15 m，该站当时没有特征水位，超过 5.00 m 的潮位仅持续 1 h。“烟花”台风影响期（7 月 24—28 日）正值天文大潮（农历六月十八前后），米市渡站连续 4 d 共 5 个高潮位超过保证潮位（4.25 m），最大超保幅度 0.54 m，共计超保 12 h；吴淞口站连续 3 d 共 4 个高潮位超过警戒潮位（4.80 m），最大超警幅度 0.75 m，共计超警 10 h^[22]（图 4）。

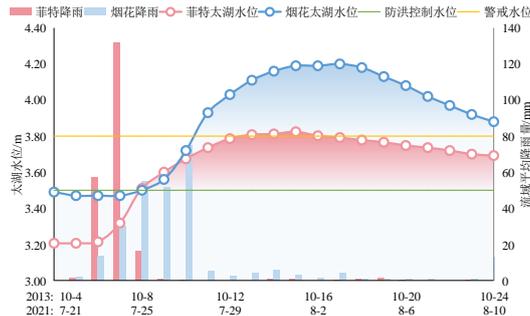
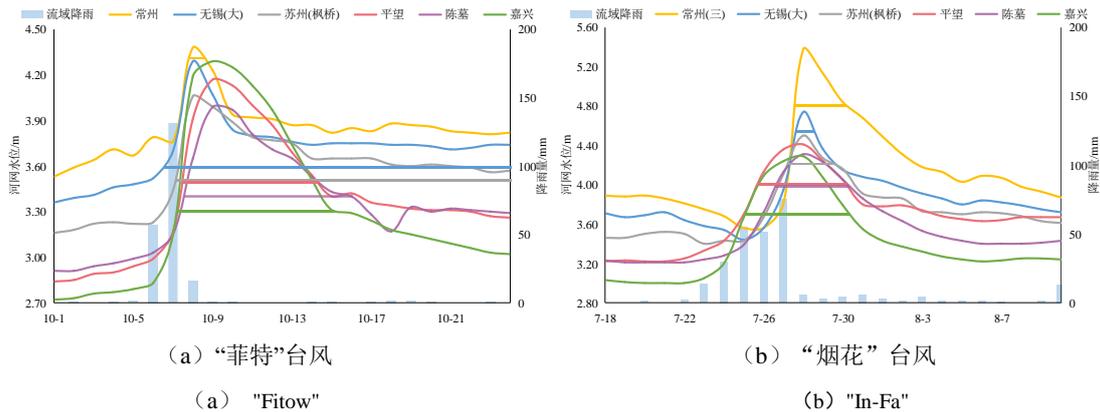


图 2 太湖流域平均降雨量和太湖 8 时水位变化过程

Fig.2 Average precipitation of Taihu Basin and taihu water level process



(a) “菲特”台风

(b) “烟花”台风

(a) "Fitow"

(b) "In-Fa"

图 3 太湖流域降雨量和河网站点 8 时水位变化过程

Fig.3 Precipitation of Taihu Basin and water at river network stations process

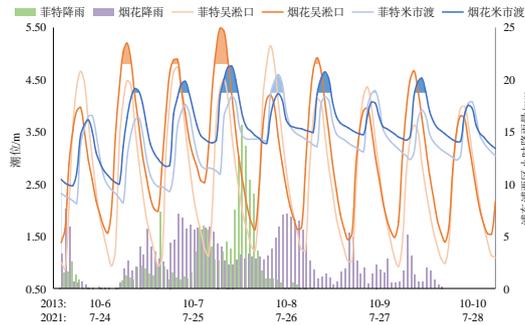


图4 浦东浦西区小时降雨量和潮位变化过程

Fig.4 Hourly variation process of rainfall and tide levels in Pudongpu District

2.3.2 洪潮特点

(1) 太湖及河网站点最高水(潮)位高、涨幅大。“菲特”和“烟花”台风分别造成太湖水位涨幅0.61 m、0.74 m(表3), 在历史上仅次于1962年“艾美”台风的0.75 m。“四碰头”台风平均造成太湖水位涨幅接近于二、三碰头台风均值的2倍, 最大单日涨幅仅次于2012年“海葵”(0.25 m)和1990年“埃布尔”(0.24 m)。

“四碰头”台风站点最高水(潮)位、累计涨幅均值普遍高于二、三碰头台风均值。武澄锡虞区代表站无锡(大)站“烟花”台风最高水位4.81 m, 高于二、三碰头台风均值0.38 m; 累计涨幅1.41 m, 是二、三碰头台风均值的1.5倍。阳澄淀泖区代表站苏州(枫桥)站“烟花”台风最高水位4.59 m, 高于二、三碰头台风均值0.44 m, 位列历史第5位, 在历年台风中仅次于2024年“贝碧嘉”。太浦河干流控制站平望站受强降雨和两岸汇水影响, “烟花”和“菲特”台风最高水位分别位列历史第1、3位, 累计涨幅均高于其他台风, “四碰头”台风最高水位和累计涨幅均值分别高于二、三碰头台风均值0.50 m、0.65 m。杭嘉湖区代表站嘉兴站“菲特”和“烟花”台风最高水位分别位列历史第1、3位, 累计涨幅均高于其他台风, “四碰头”台风最高水位和累计涨幅均值分别高于二、三碰头台风均值0.51 m、0.70 m。在“四碰头”台风发生时, 黄浦江干流米市渡站、入长江口吴淞口站最高潮位均值分别高于二、三碰头台风均值0.58 m、0.88 m(图5)。

表3 典型台风太湖及河网水(潮)位涨幅情况

Tab.3 Water (tide) level rise of Taihu Lake and river network of typical typhoons

单位: m

台风名称 碰头情况	太湖水位				河网最高水(潮)位						
	起涨 水位	最高 水位	累计 涨幅	最大单 日涨幅	无锡 (大)	苏州 (枫桥)	平望	嘉兴	米市渡	吴淞口	
菲特 (1323)	3.21	3.82	0.61	0.23	4.47	4.30	4.30	4.42	4.59	5.15	
烟花 (2106)	3.47	4.21	0.74	0.21	4.81	4.59	4.44	4.35	4.79	5.55	
二碰头	3.25	3.64	0.39	0.20	4.57	4.38	4.00	3.96	4.09	4.53	
三碰头	风暴潮	3.25	3.55	0.30	0.11	4.21	3.97	3.82	3.90	4.35	5.00
	风暴洪	3.61	3.97	0.36	0.15	4.50	4.09	3.80	3.78	3.88	4.48
四碰头	3.34	4.02	0.68	0.22	4.64	4.45	4.37	4.39	4.69	5.35	

(2) 多站最高水(潮)位打破历史极值, 流域局地发生淹涝。“菲特”和“烟花”台风登陆时均恰逢天文大潮, “菲特”台风期间沿江沿海风暴潮增水在0.60~1.25 m, 太湖流域有1个河道站、8个浦东浦西区潮位站超过当时历史最高潮位, 其中黄浦江干流米市渡、松浦大桥站均超当时历史最高潮位^[21], 杭嘉湖区、浦东浦西区沿江沿海地区高水位突出, 在外排不畅的情况下造成局地严重内涝^[12], 太湖流域及东南诸河受灾严重, 直接经济损失大。“烟花”台风期间, 沿江沿海出现0.60~1.70 m的风暴潮增水^[22], 浦东浦西区潮位基本高于“菲特”时期, 黄浦江干流、淀泖片及杭嘉湖运东片等共33站水(潮)位创历史新高^[23], 其中, 吴淞口站最高潮位位列历史第5位, 米市渡站打破“菲特”期间创造的最高记录^[9], 达到历史最高潮位4.79 m, 与“菲特”相比受灾程度较轻, 仅上海金山局地淹涝严重。



图 5 流域下游区最高水位等水位线

Fig.5 Highest water level contours in the downstream area

2.4 强风与倾斜

太湖是大型浅水湖泊，平均水深不到 2 m，水流主要由风力驱动，属于典型的“风生流”主导型湖泊^[24]，风速超过 2~3 m/s 即可引发明显的水体运动。风向变化会形成不同形态的环流模式，如北风可能导致湖面水体向南堆积，形成逆时针环流，东南风可能驱动顺时针环流。因此，当太湖水位较高并遭遇强风时，湖面大、吹程长造成湖面倾斜，环湖局地水位骤增，威胁环太湖大堤及其附近区域防洪安全。据统计，2005 年“麦莎”、2007 年“罗莎”、2024 年“贝碧嘉”台风造成最大湖面倾斜均超过 1.80 m。

“菲特”台风登陆时中心附近最大风力 14 级（强台风级），是当时历史上 10 月以后登陆我国大陆的最强台风。在残留云系风力风向的作用下，太湖湖面呈现南高、北低的倾斜，因移动路径未经过太湖流域，最大湖面倾斜仅 0.63 m。“烟花”台风是 1949 年有气象记录以来首个在浙江省内两次登陆的台风，登陆时中心附近最大风力 13 级（台风级）和 10 级（强热带风暴级）。二次登陆后由东南至西北横穿太湖，太湖同样呈现南高、北低的倾斜，最大湖面倾斜达 1.03 m，远高于“菲特”。“烟花”台风虽然造成的最大湖面倾斜量适中，但体积大、云系广，在湖面发生最大倾斜时刻，与 2012 年“海葵”、2022 年“梅花”台风的风力均位列第 1 位（12 级，台风级），高于二、三碰头台风均值 2.5 级，风速超过二、三碰头台风均值 10 m/s。

3 洪水蓄泄

太湖流域台风暴雨洪水防御工程体系从空间上看，外围以江堤海塘为防洪（潮）屏障，内部以环湖大堤、流域骨干引排通道、上游水库等治太骨干工程为主体，区域骨干引排通道为补充，重点城市包围及平原圩区为单元^[25]。流域防洪骨干工程体系已初步形成洪水北排长江、东出黄浦江、南排杭州湾，充分利用太湖调蓄形成“蓄泄兼筹、以泄为主”的框架。除黄浦江外，长江和杭州湾沿线已建闸或设泵，防御台风暴雨洪水过程受工程排水能力、防御调度、潮汐顶托等影响明显，上下游、区域间的洪、涝水相互影响。

“菲特”台风涨水期（10 月 6—14 日）蓄泄比为 1:0.6，“烟花”台风涨水期（7 月 23 日—8 月 2 日）蓄泄比为 1:1.1（图 6）。与“菲特”相比，“烟花”台风流域北排长江、南排杭州湾工程能力增强，外排水量占径流量的比重明显提升。（注：图中径流量、调蓄量、外排水量均未包括浦东浦西区。因应急监测、模型计算等因素产生的误差约为径流量的 6%。）

3.2.1 流域径流量 “菲特”“烟花”台风太湖涨水期，太湖流域形成径流量分别为 $50.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[14]、 $56.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ （均不含浦东浦西区）。

3.2.2 流域调蓄量 “菲特”台风太湖涨水期，流域调蓄量 $31.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占径流量的 62%，其中太湖调蓄量占径流量的 30%，河网调蓄量占径流量的 29%。“烟花”台风太湖涨水期，流域调蓄量 $25.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占径流量的 46%，其中太湖调蓄量占径流量的 30%，河网调蓄量占径流量的 14%（图 7）。“菲特”台风期间河网调蓄量、河网调蓄量占径流量的比重均明显大于“烟花”时期，流域滞涝水量约占调蓄量的 19%，占径流量的 12%，杭嘉湖区受淹严重^{[12][14]}。

3.2.3 流域排水量 “菲特”台风太湖涨水期，流域排水量 $19.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占径流量的 38%，其中北排长江水量（净排水量，下同）占径流量的 12%，南排杭州湾占比 7%，东出黄浦江占比 19%。“烟花”台风太湖涨水期，太湖流域排水量 $27.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占径流量的 48%，其中北排长江水量占径流量的 24%，南排杭州湾占比 11%，东出黄浦江占比 13%（图 7）。“烟花”期间流域排水量占径流量的比重较“菲特”期

间有所增加，其中北排长江、南排杭州湾占径流量的比重增加，东出黄浦江占径流量的比重减小。



图 6 流域洪水蓄泄示意图 (单位: 10^8 m^3)

Fig.6 Schematic diagram of flood regulation and drainage in Taihu basin

两场“四碰头”台风在遭遇暴雨时均恰逢天文大潮顶托，北排长江、南排杭州湾虽都全力排水，但外排受阻水量较少，东出黄浦江水量更少。降雨减弱或停止时刚过天文大潮，“菲特”北排长江单日水量增加 55%，南排杭州湾单日水量小幅增加，东出黄浦江单日水量增加 2 倍以上；“烟花”北排长江单日水量倍增，南排杭州湾和东出黄浦江单日水量基本不变或小幅增加 (图 8)。

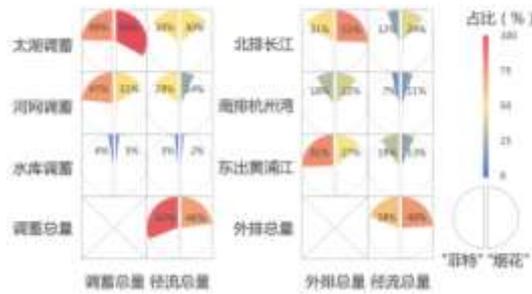
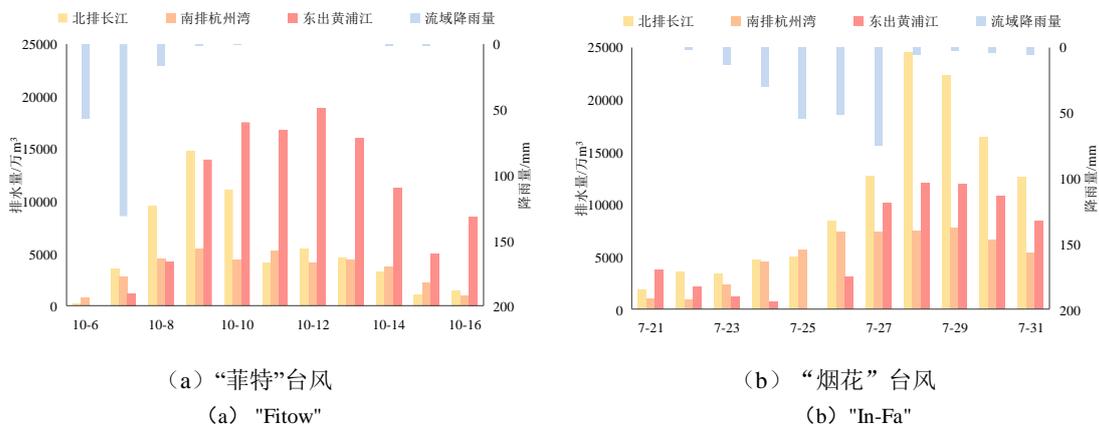


图 7 流域蓄泄成分比重对比

Fig.7 Comparison in proportion of regulation and drainage components



(a) “菲特”台风

(a) "Fitow"

(b) “烟花”台风

(b) "In-Fa"

图 8 太湖流域降雨量和骨干工程逐日排水过程

Fig.8 Precipitation of Taihu Basin and daily drainage process of key projects

3.2.4 工程能力变化 流域骨干工程能力变化主要考虑环太湖的太浦河、望虞河及流域外边界北排长江、南排杭州湾。太浦河、望虞河是太湖骨干排洪通道，“菲特”期间两河总设计流量 980 m³/s，2012—2014 年太浦闸除险加固后，“烟花”期间增至 1184 m³/s。然而，台风暴雨期间上游集中强降雨造成单日内湖水量较大，“菲特”期间上游最大单日内湖流量 2953 m³/s，“烟花”期间达 4163 m³/s，太湖水位易涨难消^[26]，且“烟花”较“菲特”时期太湖水位上涨速度更快。

两场台风影响期间，虽然流域外排骨干工程均实施全力排水的调度指令，但“烟花”较“菲特”台风时期工程排水能力明显提升。“烟花”时期流域北排长江的闸排、泵排总设计流量较“菲特”时期分别增加约 1800 m³/s、900 m³/s，南排杭州湾的闸排、泵排总设计流量较“菲特”期间分别增加约 500 m³/s、560 m³/s。

3.2.5 洪水运动与风险变化 “菲特”时期流域排洪能力有限，以充分调蓄为主，“烟花”时期因工程能力整体提升，流域洪水运动格局转变为蓄泄兼筹。与“菲特”相比，“烟花”时期，在确保工程安全的前提下，提前调度启用刚完成试运行的新孟河界牌水利枢纽预降太湖及地区河网水位；台风影响期间，启用北排长江新沟河、新夏港、定波、白屈港和南排杭州湾盐官枢纽、长山河、南台头泵站（抽水站），全力降低区域河网最高水位；待风雨影响结束后，协商开启环太湖瓜泾口、胥口及上海市蕴藻浜西闸、淀浦河西闸等协助排泄太湖洪水及区域洪涝水，有效缩短了高水位持续时间^[27]。

然而，尽管流域北排、南排等工程能力较大提升，尽力削峰太湖及河网最高水位，但流域外排能力仅达到圩区总排涝动力（“菲特”期间 12000 m³/s、“烟花”期间 15000 m³/s）的 25%，现状圩区总排涝动力更达 22348 m³/s。圩区大规模防洪工程建设提高了区域及低洼地区自保能力，但也减少了洪水调蓄空间。同时，流域土地利用等下垫面变化剧烈，2020 年建设用地面积较 2000 年增幅达 88%，而水田面积减少了 50%，流域产汇流特性发生变化，洪水归槽速度加快，圩外地区河网站点水位峰值增加，峰现时间提前，洪水风险由圩内向圩外转移^{[5][25][27]}。

4 讨论

4.1 “四碰头”叠加风险

在狂风、暴雨、高潮位和洪水的叠加作用下，四种因素相互叠加、放大，极易形成复合灾害。狂风持续推动海水堆积，形成的巨浪不断冲击堤防、海岸结构，在天文大潮的背景下，进一步抬高沿江沿海高潮位；狂风区常与暴雨区重叠，易扩大暴雨影响范围。极端暴雨强度超出流域区域排水能力，在河网等调蓄能力有限的情况下，加剧地表径流，发生区域内涝，在高潮位顶托的影响下，区域排水受阻，大量涝水滞留，重要堤防长时间浸泡可能发生管涌等，易加重内涝并发生洪水风险^[28-29]。

“四碰头”台风多灾害叠加分析对流域防灾减灾至关重要，需通过耦合气象-水文-海洋等方面开展数值模拟评估风险与危害，支撑预报调度工作，这也是下一步研究的重点。

4.2 “四碰头”遭遇的可能性

根据气象部门统计数据，西北太平洋（含南海）平均每年生成 26 个热带气旋，其中 7 个登陆或影响太湖流域及东南沿海^[23]。太湖流域受台风的直接影响频率低于东南沿海，但流域东部靠近东海，若台风路径偏西，流域下游易受风暴潮影响。根据气象数据推求 1990—2024 年共有 245 场台风登陆或影响太湖流域及东南沿海，但“四碰头”台风仅有“菲特”和“烟花”2 场，35 年平均发生概率仅为 0.82%。

太湖流域遭遇“四碰头”台风的可能性虽然相对较低，但 2 场台风均发生在近 12 年。随着气候变暖和海平面上升，尤其在极端天气事件频发的趋势下，“四碰头”台风再次发生仍有较大的可能性，甚至多发频发。

5 结论与建议

1) “四碰头”台风对流域及区域均造成了极端降雨，降雨总量高于二、三碰头均值的 7 成以上高出部分与 2009 年“莫拉克”台风造成的流域降雨量 89.7 mm 基本持平。流域 200 mm 以上降雨笼罩面积占流域总面积的 36%~56%，空间分布不均匀。其中“菲特”台风路径多变、移速快、单日降雨量大，流域平均最大 1 d、3 d 降雨量均位列近 70 a 第 2 位，高于二、三碰头台风均值 7 成以上，杭嘉湖区洪涝严重。

“烟花”台风横穿太湖流域，移速慢、降雨总量大，流域平均最大 3 d 降雨量位列近 70 a 第 3 位。

2) 太湖及河网站点最高水（潮）位普遍高于二、三碰头台风均值，太湖水位涨幅分别位列 1949 年以来第 2、3 位。特别是在“烟花”台风期间，33 站最高水（潮）位打破历史极值，其中多站刷新“菲特”时期所创记录，台风横穿太湖流域时风力风速较强，超过二、三碰头均值，造成太湖湖面最大倾斜 1.00 m 以上。

3)太湖流域在“菲特”时期充分调蓄,在“烟花”时期蓄泄兼筹,两场台风流域蓄泄比分别为1:0.6和1:1.1。流域骨干工程排水能力增强,使外排比重明显提升,缩短了高水位持续时间,减轻流域区域防洪压力,但排水能力仍需进一步提升。

4)“四碰头”台风携带的大量降雨造成太湖及河网水位上涨幅度大,威胁流域区域防洪安全。建议加快实施吴淞江工程、太浦河后续工程、望虞河拓浚工程等流域骨干工程,提升环太湖和流域外边界的排洪能力,对太湖及区域河网最高水位削峰有重要作用,并快速排泄流域区域洪涝水。为减轻天文大潮、沿江沿海风暴潮对流域排洪的顶托影响,建议推进黄浦江河口挡潮闸建设,在黄浦江低潮位期间开闸趁潮排水,高潮位期间关闸阻止海水上溯,实现沿长江、沿杭州湾口门全线封闭,增强“四碰头”台风洪涝灾害防御体系韧性。

6 参考文献

- [1] 周鹏飞, 戚宇瑶, 宋源等. 气候变化挑战下太湖流域水安全治理思考. 水利发展研究, 2023, **23** (09): 8-13. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2023.09.002.
- [2] 李超, 江崑, 周凯等. 进入杭州湾的两个台风降水特征及成因分析. 气象科学, 2023, **43** (04): 495-504. DOI:10.12306/2022jms.0013.
- [3] 李真真, 吴立广, 刘青元. 近 20a 影响我国台风活动变化趋势. 气象科学, 2016, **36** (06): 752-759. DOI: 10.3969/2015jms.0089.
- [4] Wu HY, Lu ZH. Review and thinking of water management practice in Taihu Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52** (03): 277-290. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20200728. [吴浩云, 陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考. 水利学报, 2021, **52** (03): 277-290.]
- [5] Liu KQ, Cai WT. Review and consideration of flood control and management practice in Taihu Lake Basin. *Yangtze River*, 2024, **55** (02): 1-12. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.02.002. [刘克强, 何爽. 太湖流域防洪治理实践与思考. 人民长江, 2024, **55** (02): 1-12.]
- [6] Liu M, Jiang GH, Song Y *et al.* Statistics analysis on impact from tropical cyclones in the Northwest Pacific on the Taihu Basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, **53** (S1): 208-216. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.S1.033. [刘敏, 姜桂花, 宋昱等. 影响太湖流域的热带气旋特征统计分析. 水利水电技术(中英文), 2022, **53** (S1): 208-216.]
- [7] 水利部信息中心(水文水资源监测预报中心),太湖流域管理局水文局(信息中心). 2016年太湖暴雨洪水. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [8] 万晖. 上海市防御风暴潮洪“四碰头”极端灾害对策思考. 中国防汛抗旱, 2024, **34** (01): 78-82. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023312.
- [9] 易文林, 俞汇, 韦浩等. 台风“烟花”期间黄浦江上游洪水过程及高水位分析. 水利水电快报, 2023, **44** (05): 18-22. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2023.05.003.
- [10] Xu TY. Influence of spatio-temporal distribution of design storm on Lake Taihu flood level. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34** (04): 1308-1318. DOI: 10.18307/2022.0422. [徐天奕. 太湖流域设计暴雨时空分布对太湖洪水水位影响分析. 湖泊科学, 2022, **34** (04): 1308-1318.]
- [11] Zhang HH, Liu SG, Ji TD. Analysis on the Relationship between Rainfall of Taihu Basin and Water Level of Taihu Lake. *Journal of China Hydrology*, 2021, **41** (01): 85-89+41. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190422. [章杭惠, 刘曙光, 季同德. 太湖流域降雨与太湖水位关系分析. 水文, 2021, **41**(01): 85-89+41.]
- [12] Hu Y, Lin HJ, Gan YY *et al.* Inflow from Taihu Basin to Shanghai during Typhoon Fitou. *Journal of China Hydrology*, 2014, **34** (06): 93-95. [胡艳, 林荷娟, 甘月云等. “菲特”台风期间上海地区上游来水量分析. 水文, 2014, **34** (06): 93-95.]
- [13] 徐天奕, 何爽, 刘克强. 极端台风暴雨情况下太湖流域预排调度效益分析. 郑州: 2023 中国水利学术大会, 2023. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.087866.

- [14] Lin HJ, Gan YY, Hu Y *et al.* Flood movement in Lake Taihu basin during Typhoon Fitow influence period in 2013. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27** (03): 548-552. [林荷娟, 甘月云, 胡艳等. 2013 年第 23 号“菲特”台风期间太湖流域洪水运动分析. 湖泊科学, 2015, **27** (03): 548-552.]
- [15] 刘开源, 戴竹君, 姜有山等. 台风“烟花”缓慢移动的机理研究:远距离双台风相互作用. 气象科学, 2024, (02): 308-316. DOI: 10.12306/2024jms.0008.
- [16] 刘建勇, 周冠博, 顾思南等. 台风菲特暴雨诊断分析. 气象科技, 2014, **42** (06): 1047-1056. DOI: 10.19517/j.1671-6345.2014.06.018.
- [17] 曹楚, 王忠东, 林念萍等. 2013 年“菲特”台风暴雨水汽和螺旋度分析. 北京: 第 31 届中国气象学会年会, 2014.
- [18] Xiang SQ, Han X, Fang HM, *et al.* The path and precipitation characteristics of “In-Fa” in typhoon 2106. *Marine Forecasts*, 2023, **40** (03): 75-84. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2023.03.009. [项素清, 韩兴, 方鹤鸣等. 2106 号台风“烟花”的路径及降水特点分析. 海洋预报, 2023, **40** (03): 75-84.]
- [19] Tang F, Chen FJ, ZhuGe XY *et al.* Analysis of influence process of Typhoon In-fa(202106)based on satellite remote sensing data. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, **44** (05): 703-716. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210812001. [唐飞, 陈凤娇, 诸葛小勇等. 利用卫星遥感资料分析台风“烟花”(202106)的影响过程. 大气科学学报, 2021, **44** (05): 703-716.]
- [20] Chen LH, Chen YY, Teng X. Characteristics and Genesis Analysis of Disastrous Rainstorm Flood in Xijiang River Basin. *Journal of China Hydrology*, 2020, **40** (05): 71-77+84. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190128. [陈立华, 陈云瑶, 滕翔. 西江流域灾害性暴雨洪水特征及成因分析. 水文, 2020, **40** (05): 71-77+84.]
- [21] 太湖流域管理局水文局(信息中心). 太湖流域片水情年报 2013. 2014.
- [22] 沙治银. 上海市防御 202106 号台风“烟花”的过程及思考. 中国防汛抗旱, 2022, **32** (04): 52-54. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2022069.
- [23] 太湖流域防汛抗旱总指挥部办公室. 2021 太湖流域及东南诸河防汛防台年报. 2022.
- [24] Wang Y, Wang H, Ji W *et al.* Experimental study on hydrodynamic characteristics of wind-driven flow. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, **16**(01): 122-126. DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.20180019. [王勇, 王华, 纪伟等. 风生流水力特性试验研究. 南水北调与水利科技(中英文), 2018, **16**(01): 122-126.]
- [25] 徐家贵, 戴晶晶, 李琛等. 太湖流域防洪新形势及治理对策. 中国水利, 2024, (12): 63-68.
- [26] 金科, 钱傲然, 张昊. 2021 年太湖流域洪水调度实践与思考. 中国水利, 2022, (09): 11-12+29.
- [27] 水利部太湖流域管理局. 防御“烟花”台风暴雨洪水方案. 2021.
- [28] Zhu FW, Lu ZH. Study on impact of storm surge on flood control of Taihu Lake watershed. *Yangtze River*, 2016, **47** (12): 6-9+27. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.12.002. [诸发文, 陆志华. 风暴潮对太湖流域防洪影响及对策研究. 人民长江, 2016, **47** (12): 6-9+27.]
- [29] Song CC, Li MY, Wang J *et al.* Simulation of typhoon storm surge impacts in Shanghai based on storm surge scenarios and disaster prevention measures. *Progress in Geography*, 2014, **33** (12): 1692-1703. DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.12.013. [宋城城, 李梦雅, 王军等. 基于复合情景的上海台风风暴潮灾害危险性模拟及其空间应对. 地理科学进展, 2014, **33** (12): 1692-1703.]