

北运河武清段旅游通航风灾风险评估与区划研究

吕玉环¹, 王佩菡², 刘畅¹

¹天津市武清区气象局, 天津

²天津市武清区突发公共事件预警发布中心, 天津

收稿日期: 2025年7月30日; 录用日期: 2025年8月29日; 发布日期: 2025年9月8日

摘要

本文利用武清辖区内近15年的33个气象观测站资料, 根据自然灾害风险评估理论构建北运河旅游通航风灾风险评估模型, 计算北运河旅游通航风灾风险指数, 并分别从站点、空间、时间的不同尺度分析了北运河旅游通航风灾风险指数的变化。结果表明: 综合风险指数大于8.0站数占比最低, 超过一半的站综合风灾风险指数低于7.0。较重风灾的风险最高, 其次是轻度风灾风险, 而最低的是重度风灾风险, 这与武清全区各站遭受8级以上大风的日数较少有关。综合风灾风险空间分布情况主要表现为较重风灾风险叠加轻度风灾风险之和, 高风险区主要位于武清中部, 南部和北部风险较低。近9年的综合风险指数表现为2016~2021年缓慢增加趋势, 在2021年达到最高值7.30, 然后在2021~2024年又有缓慢减小趋势。

关键词

旅游通航, 风灾, 风险评估, 北运河

Risk Evaluation and Zoning Study on Wind-Related Disasters for Tourism Navigation in the Wuqing Section of the Grand Canal

Yuhuan Lyu¹, Peihan Wang², Chang Liu¹

¹Wuqing Meteorological Bureau of Tianjin, Tianjin

²Tianjin Wuqing District Emergency Public Event Warning Center, Tianjin

Received: Jul. 30th, 2025; accepted: Aug. 29th, 2025; published: Sep. 8th, 2025

Abstract

This article utilizes data from 33 meteorological observation stations within the jurisdiction of Wuqing spanning over the past 15 years, the wind disaster risk evaluation model for tourism navigation of the North Canal was constructed according to natural disaster risk evaluation theory. The model calculates the risk index of tourism navigation wind disasters in the North Canal and analyzes changes in this index across different scales: station, space, and time. The results indicate that the proportion of stations with a comprehensive risk index exceeding 8.0 is minimal, with over half of the stations exhibiting a comprehensive wind disaster risk index below 7.0. The risk associated with more-severe wind disasters is the highest, followed by mild wind disasters, with the lowest being that of severe wind disasters. This is attributed to the relatively few days during which all stations in Wuqing were affected by winds above level 8. The spatial distribution of comprehensive wind disaster risks predominantly reflects the combination of more-severe and mild wind disaster risks. High-risk areas are primarily situated in the central part of Wuqing, with lower risks observed in the southern and northern regions. Over the past 9 years, the comprehensive risk index has demonstrated a gradual upward trend from 2016 to 2021, peaking at 7.30 in 2021, followed by a gradual downward trend from 2021 to 2024.

Keywords

Tourism Navigation, Wind Disaster, Risk Evaluation, North Canal

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人民生活水平的提高,旅游业已经成为全国经济发展中规模最大的产业之一,旅游活动又与天气、气候紧密相关[1]-[4]。船舶在航道航行情况复杂多样、天气难以预测,也给水上交通安全管理带来了严峻的考验。根据国内重大事件统计:1997年在浙江沿海地区就发生了7次雾航重大事故。事故中沉没了4艘海轮,且死亡和失踪人数高达36人,经济损失十分惨重;而2015年出现的“东方之星”事件,乘载454名乘客的轮船在行驶过程中突遇龙卷风,而后在长江中游沉没,此次事件中导致了442人遇难[5]。从这两个事件中可以看出,造成水上交通事故发生的重要影响因素就是气象因素中的雾和风。针对开展水上交通气象灾害风险评估模型研究,评估出水上船舶航行的风险情况,为预防因气象灾害影响的事故发生,提高水上交通安全保障具有重要意义。气象灾害风险评估模型的研究是国外在20世纪30年代最先开展的一项工作。1933年,美国对田纳西河流域进行开发整治,开始研究灾害风险,同时开启了自然灾害风险评估的先河[6]。20世纪90年代,我国参加了“国际减灾十年”项目,在气象灾害风险评估领域的研究上逐步深入,取得了一定的成果[7]-[9]。郑中义和吴兆麟[10]运用灰色系统理论指标定权聚类方法,在分析主要影响因素的基础上,对船舶航行环境的危险度进行评估。戴厚兴和吴兆麟[11]采用风险分析理论和模糊综合评价方法,建立能见度不良天气下海上交通风险预警系统,能够有效地提供风险预警和操作建议。雷绍权[12]采用模糊数学方法,构建水上船舶航行安全评价模型,对船舶航行安全状况进行评价。

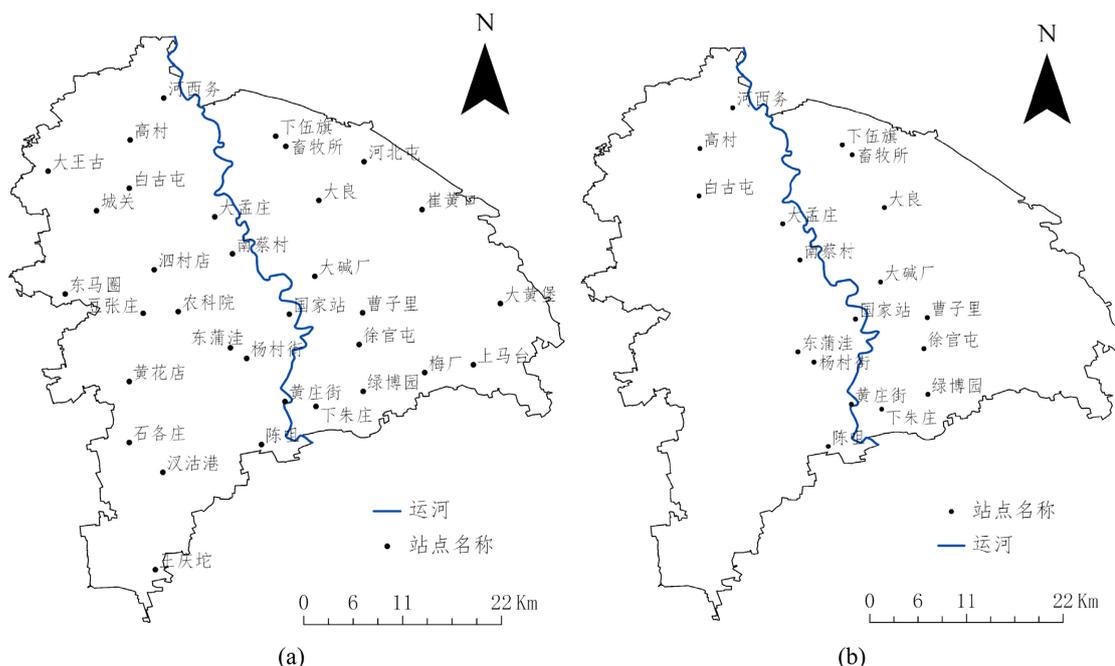
始建于春秋时期的京杭大运河是世界上里程最长、规模最大的运河,通武廊百里大运河经济文化带,

处在京津冀协同发展核心区，其战略意义，与苏伊士运河经济走廊之埃及，异曲同工，也更有创新之处。在 2022 年 6 月 24 日北运河京津冀段已实现旅游通航，为全面学习贯彻党的二十大精神，聚焦武清区“一城、一带、一商圈”建设，2023 年 2 月，武清成立“一城”“一带”“一商圈”专项工作指挥部，逐步分段推进运河通航。因此，为服务于武清大运河文化生态发展带，为北运河武清段旅游通航做好气象保障，本研究基于自然灾害风险评估理论构建北运河旅游通航风灾风险评估模型，对北运河旅游通航风灾风险进行评估和区划，为后续综合评价北运河武清段通航条件、航道规划设计、码头站点设置以及气象观测站点优化布局提供参考。

2. 资料与方法

2.1. 研究区域概况

武清古为泉州，别称雍阳。唐天宝元年(公元 742 年)更名武清。区域面积 1574 平方公里，辖 5 个街道、24 个镇，常住人口 120 万，是天津市下辖 16 个区之一，地处京津黄金走廊中间节点，距北京市区 81 公里。武清区位于天津市西北，属暖温带、大陆性、半湿润、季风气候。气候冷热适中、冬寒夏暑、四季分明。冬季受蒙古冷高压的影响，天气寒冷而干燥；春季是冬季风转为夏季风的过渡季节，干旱多风；夏季受西北太平洋副热带高压西北部边缘影响，多偏南风，雨热同季；秋季是一年中最舒适的时节，伴有寒潮、大风。年平均气温 12.9℃，历年极端最高气温 40.6℃，极端最低气温-19.5℃。降雨分布不均匀，年平均降雨量 523.0 毫米，其中 4~10 月份降雨量 494.1 毫米，占全年降雨量的 94.5%。近 30 年极端最大日降水量 257.2 毫米，出现在 2012 年 7 月 22 日。全年日照 2304.3 小时。年平均风速 2.2 米/秒，年平均大风日数 10.7 天，年最大风速 20.0 米/秒。主要气象灾害有大风、雷暴、冰雹、大雾、寒潮、暴雪、高温等。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)1158 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. (a) Schematic diagram of the distribution of 33 meteorological stations within Wuqing District; (b) Schematic diagram of the distribution of meteorological stations within the 10 km range of the Wuqing section of the North Canal
图 1. (a) 武清辖区内 33 个气象站分布示意图；(b) 北运河武清段 10 km 范围内气象站分布示意图

2.2. 数据来源

气象数据有由天津市气象信息中心提供的武清辖区内 1 个国家基本站和 32 个区域自动气象站 2010~2024 年逐日的气象要素数据(由于部分区域自动气象站建站较晚, 数据时间为 2016 年~2024 年), 包括最高气温、最低气温、日最大风速、日极大风速及风向等, 区域内各气象观测站分布示意图如图 1。

2.3. 研究方法

2.3.1. 北运河旅游通航风灾致灾指标

结合《航运气象风险等级划分及应对处理规范》《水上交通气象灾害风险预警等级划分和评判标准》等相关地方标准[13][14], 以及调研近 2 年通州、廊坊已通航段游船运营情况, 采用专家打分法, 综合确定北运河旅游通航风灾致灾指标如表 1 所示, 划分为 5 级, 分别为无、轻、中、较重、重度。

Table 1. Disaster-inducing indicators of wind disasters for tourism navigation on the North Canal

表 1. 北运河旅游通航风灾致灾指标

风灾等级	风力等级(级)	风速(m/s)	影响程度
无	≤4	≤5.4	无
轻度	4~5	5.5~7.9	较轻
中度	5~6	8.0~10.7	一般
较重	6~8	10.8~17.1	较大
重度	≥8	≥17.2	重大

2.3.2. 北运河旅游通航风灾风险评估模型

根据自然灾害风险评估理论, 构建北运河旅游通航风灾风险评估模型, 如公式(1):

$$I_j = \sum_{i=1}^n (\bar{V}_{ij} \times P_{ij}) \quad (1)$$

其中, I_j 为某一区域气象站第 j 年北运河旅游通航风灾风险指数, 为该站第 j 年 i 级风灾成灾日内极大风速的平均值; P_{ij} 为该站第 j 年 i 级风灾一年内出现的概率, $i = 1, 2, 3, 4$, 分别对应较轻、中、较重、重度风灾, $j = 1, \dots, 15$ 分别对应 2010~2024 年中的各年份。

具体计算某一气象站点的北运河旅游通航风灾风险指数应为 2010 年至 2024 年 15 年风灾风险值的平均(部分站为 2016 年至 2024 年 9 年的平均)。以 2024 年武清国家站风灾风险指数为例: 2024 年国家站极大风速达到轻度风灾(即日极大风速在 5.5~7.9 m/s)的天数为 126 天, 该站 2024 年轻度风灾的出现概率为 $P(\text{轻}) = 126/366 = 0.344$, 且该站达到轻度风灾日的日极大风速的平均值 $V(\text{轻}) = 6.701$ m/s, 则国家站 2024 年轻度风灾风险指数为 $0.344 \times 6.701 = 2.305$, 同理, 中度风灾风险指数为 2.303, 较重风灾风险指数为 2.337, 重度风灾风险指数为 0.054, 所以本研究认为 2024 年该站的风灾综合风险指数为轻度、中度、较重、重度风灾风险指数之和, 即为 $2.305 + 2.303 + 2.337 + 0.054 = 6.999$ 。

本文中认为综合风灾指数是一个用于衡量某一地区风灾综合风险程度的量化指标, 通过将轻度、中度、较重、重度风灾风险指数相加得到, 其含义是对该地区面临风灾整体风险水平的综合反映, 考虑了不同程度风灾发生的可能性及其潜在影响。综合风灾指数的值高低也具有指示意义, 指数较高表明该地区风灾风险较大, 综合指数可以帮助快速识别高风险区域。

2.3.3. 数据质量控制方法

对数据进行质量控制, 去掉仪器故障, 仪器标定等情况下造成的不合理数据, 保证数据的可靠性和

有效性。当个别站点存在数据缺测以及出现异常数据时,当相邻站点空间直线距离在 10 km 以内,数据差异超过 3 倍标准差以上,则认为是异常数据,数据出现异常时,可使用相邻站的数据插值来代替补齐,如没有替换数据,则直接剔除掉。

对个别站点出现的异常数据采用差值法进行筛选订正:假设被检测站数据为 T_1 , 同一天相邻站数据为 T_2 , 当 $\Delta T = |T_1 - T_2| \geq 3SD$ 时, SD 为周边站数据的标准差,认为被检测站数据可疑,并对该站本日的逐小时数据进行检查,如判定为非真实值,则采用相邻站的数据插值代替订正补齐。

2.3.4. 统计插值方法

克里金插值法(Kriging)是一种基于地统计学的空间插值方法,基于变异函数分析相邻点的空间自相关性,利用加权平均进行插值,该方法不仅能够提供未知点的估计值,还能给出估计值的误差,该方法的优点是能够反映各点的空间自相关性,插值精度高,因此在气象、地质、环境科学等领域广泛应用。

半变异函数是克里金插值法的核心工具,用于量化区域化变量的空间相关性。其定义为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

其中: $\gamma(h)$ 是变异函数值, h 是站点之间的距离(滞后距离), $N(h)$ 是距离为 h 的站点对数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是站点 x_i 和 $x_i + h$ 的观测值。通过计算不同距离 h 的变异函数值,绘制变异函数图,并拟合理论模型(如球状模型、指数模型、高斯模型等)。

本研究基于各站极大风速数据分别构建逐年的不同等级风灾致灾指标序列,计算逐年不同等级风灾的概率,在此基础上,利用公式(1)计算各站逐年不同等级风灾风险指数,并利用克里金插值法(Kriging)对 33 个气象站近 15 年风灾风险指数平均值进行插值。

3. 结果与分析

3.1. 北运河旅游通航风灾风险站点统计结果

根据武清辖区内 1 个国家站和 32 个区域自动气象站,共 33 个气象站点的数据计算的北运河旅游通航风灾风险指数结果如表 2 所示,将 33 个站点的综合风灾风险指数按照由高到低分为 4 级:I 级(8.0~9.0),II 级(7.0~8.0),III 级(6.0~7.0),IV 级(4.0~6.0)。统计结果显示,有 3 个站归为 I 级(黄庄、曹子里、豆张庄),有 11 个站为 II 级(绿博园、河北屯、崔黄口、白古屯、大良、东蒲洼、大孟庄、下朱庄、大碱厂、大王古、梅厂),有 14 个站为 III 级(国家站、畜牧所、东马圈、石各庄、杨村、河西务、农科院、陈咀、泗村店、大黄堡、王庆坨、高村、徐官屯、上马台),有 5 个站为 IV 级(黄花店、汉沽港、南蔡村、城关、下伍旗)。综合风灾风险指数达到 I 级,II 级,III 级,IV 级,出现的概率分别为 9.1%,33.3%,42.4%,15.2%。

Table 2. Wind disaster risk index for tourism navigation on the North Canal based on meteorological stations

表 2. 基于气象站点的北运河旅游通航风灾风险指数

站名	轻度风灾 风灾指数	中度风灾 风灾指数	较重风灾 风灾指数	重度风灾 风灾指数	综合风灾 风灾指数
黄庄	1.77	2.46	3.44	0.88	8.55
曹子里	2.07	2.35	3.04	0.78	8.24
豆张庄	1.81	2.19	2.97	1.1	8.06
绿博园	2.08	2.26	2.88	0.66	7.88

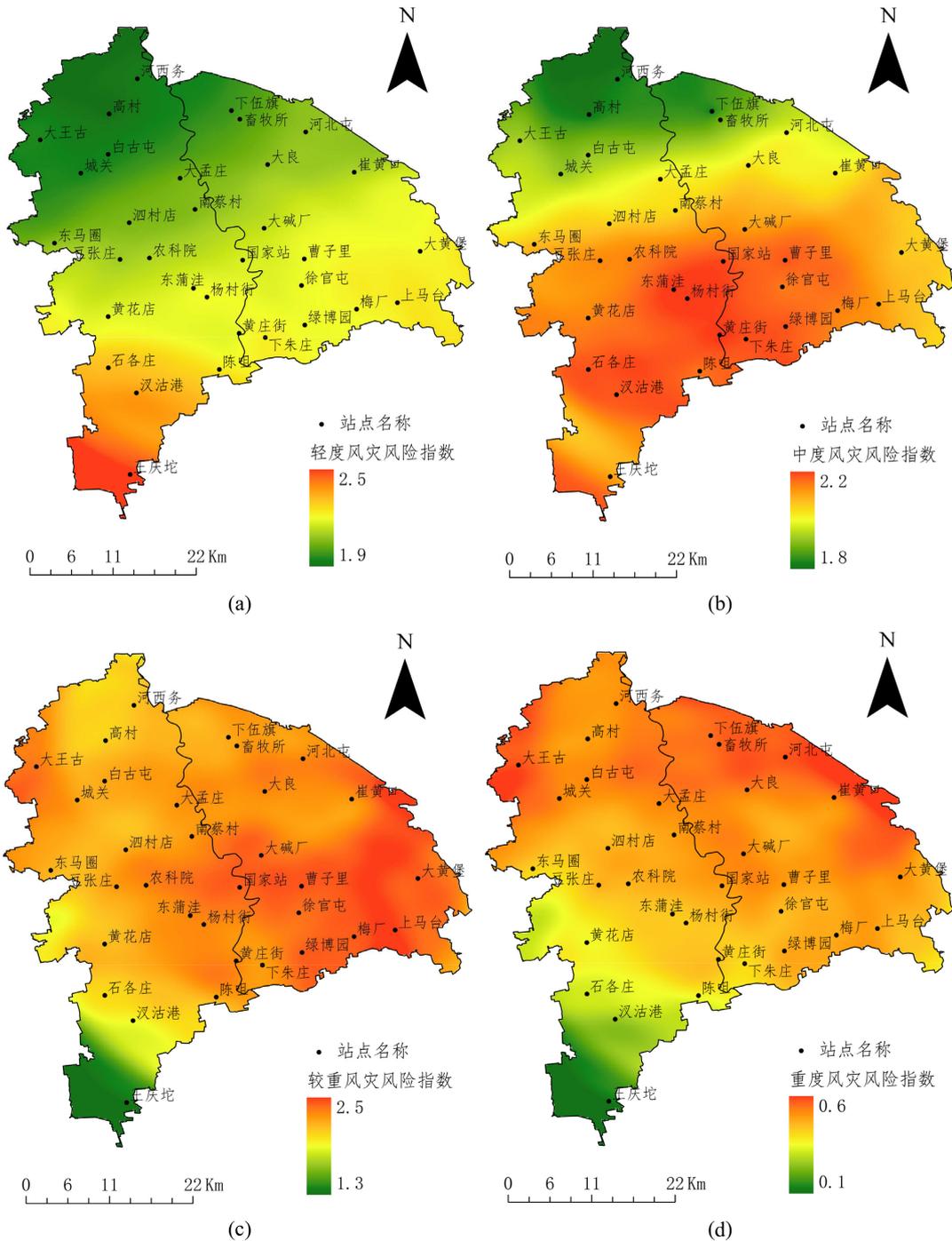
续表

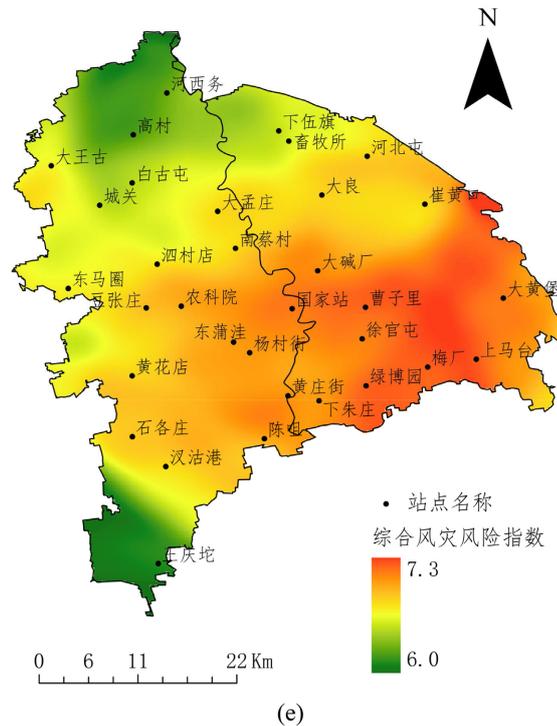
河北屯	2.05	2	2.72	0.88	7.65
崔黄口	2.24	2.18	2.54	0.53	7.49
白古屯	2	2.1	2.69	0.66	7.45
大良	2.11	2.27	2.53	0.52	7.44
东蒲洼	2.26	2.52	2.24	0.25	7.28
大孟庄	2.15	2.12	2.42	0.54	7.23
下朱庄	2.36	2.11	2.28	0.36	7.11
大碱厂	2.11	2.01	2.27	0.71	7.1
大王古	2.07	2.08	2.46	0.46	7.07
梅厂	2.19	2.1	2.41	0.36	7.05
国家站	2.22	2.33	2.12	0.29	6.97
畜牧所	2.12	2.11	2.3	0.39	6.93
东马圈	2.16	2.14	2.25	0.35	6.9
石各庄	2.3	2.15	2.18	0.27	6.9
杨村街	2.63	2.51	1.56	0.11	6.81
河西务	2.09	1.88	2.25	0.56	6.78
农科院	2.14	2.16	2.1	0.21	6.61
陈咀	1.84	1.74	2.33	0.66	6.57
泗村店	1.95	1.82	2.21	0.57	6.55
大黄堡	1.99	1.82	2.23	0.51	6.55
王庆坨	2.62	2.23	1.27	0.08	6.19
高村	1.67	1.55	2.28	0.68	6.17
徐官屯	2.1	1.84	1.91	0.27	6.12
上马台	2.45	2.08	1.36	0.15	6.04
黄花店	2.14	1.94	1.64	0.17	5.89
汉沽港	2.35	2.05	1.35	0.09	5.83
南蔡村	1.97	1.83	1.69	0.19	5.67
城关	1.91	1.75	1.61	0.31	5.58
下伍旗	1.78	1.15	0.97	0.14	4.04

3.2. 北运河旅游通航风灾风险区划

利用克里金插值法(Kriging)对 33 个气象站近 15 年风灾风险指数平均值(部分站为 2016 年至 2024 年 9 年的平均)进行插值可得到北运河旅游通航风灾风险区划结果如图 2 所示。可以看出,北运河旅游通航较重风灾风险指数最高(平均值 2.20),其风险指数范围为 0.97~3.44,其风险指数较高区域主要位于武清中部地区(以黄庄、曹子里、豆张庄为代表),风险指数较低的区域主要位于武清南部,以王庆坨为代表,但北部个别点也较低,如下伍旗;其次是轻度风灾风险指数(平均值为 2.11),其风险指数范围为 1.67~2.63,

其风险指数分布较高区域主要位于武清南部和中部地区(分别以王庆坨、杨村为代表); 再次是轻度风灾风险指数(平均值为 2.06), 其风险指数范围为 1.15~2.52; 北运河旅游通航遭受重度风灾风险最低(平均值为 0.45), 其风险指数范围为 0.09~1.10, 其风险指数较高区域主要位于武清中部和北部地区, 分别以黄庄和河北屯为代表。因为综合风灾风险指数为轻、中、较重、重度风灾风险之和, 则综合风灾风险空间分布情况主要表现为较重风灾风险叠加轻度风灾风险之和, 如图 2(e)所示, 即高风险区主要位于武清中部, 南部和北部风险较低。





注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)1158 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. Wind disaster risk zoning maps for tourism navigation on the North Canal (a) Mild wind disaster risk, (b) Moderate wind disaster risk, (c) Relatively severe wind disaster risk, (d) Severe wind disaster risk, (e) Comprehensive wind disaster risk
图 2. 北运河旅游通航各级风灾风险区划图(a) 轻度风灾, (b) 中度风灾, (c) 较重风灾, (d) 重度风灾, (e) 综合风灾

3.3. 北运河旅游通航风灾风险指数随时间变化

为了解北运河旅游通航风灾风险指数年度变化情况,选取北运河武清段周边 10 km 范围内的 18 个区域气象站,如图 1(b)中所示各站点进行逐年各类风灾风险指数分别统计如表 3,得到 2016~2024 年北运河旅游通航各级风灾风险指数逐年变化情况(图 3)。由图 3 可以看出,近 9 年来重度风灾风险指数最低(平均值 0.50),其风险指数范围为 0.36~0.85,这说明 8 级以上大风在武清全区域内发生概率较小,除重度风灾风险指数最高年份 2021 年外,其他年份基本持平;轻度风险指数和中度风险指数年度变化接近,变化幅度均不明显,平均值接近 2.10,年度风险指数基本在 2.10 上下波动;较重度风险指数略高于轻度和中度风险指数,平均值为 2.34,其风险指数范围为 2.11~2.58,除在 2017 年和 2021 年较高外,其他年份基本持平;近 9 年的综合风险指数表现为 2016~2021 年缓慢增加趋势,在 2021 年达到最高值 7.30,然后在 2021~2024 年又有缓慢减小趋势。

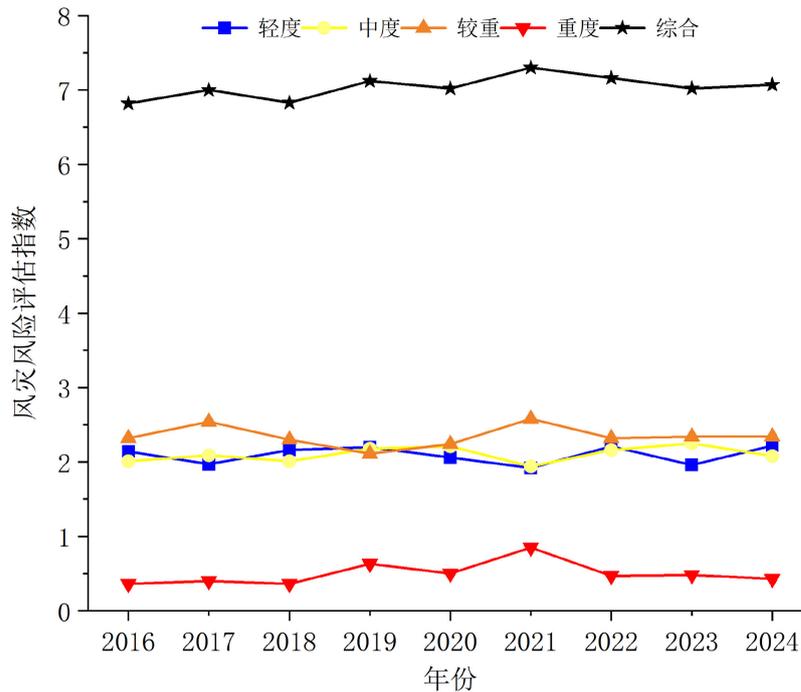
Table 3. Statistical table of wind disaster risk indices of each station in the Wuqing section of the North Canal from 2016 to 2024

表 3. 2016~2024 年北运河武清段各站风灾风险指数统计表

年份	轻度风灾 风灾指数	中度风灾 风灾指数	较重风灾 风灾指数	重度风灾 风灾指数	综合风灾 风灾指数
2016 年	2.14	2.01	2.32	0.36	6.82
2017 年	1.97	2.09	2.54	0.40	7.00
2018 年	2.16	2.01	2.30	0.36	6.83

续表

2019年	2.20	2.18	2.11	0.63	7.12
2020年	2.06	2.21	2.24	0.50	7.02
2021年	1.92	1.94	2.58	0.85	7.30
2022年	2.21	2.16	2.32	0.47	7.16
2023年	1.96	2.25	2.34	0.48	7.02
2024年	2.22	2.08	2.34	0.43	7.07



注：该图为作者自绘。

Figure 3. Annual changes in wind disaster risk indices at all levels for tourism navigation on the North Canal from 2016 to 2024

图 3. 2016~2024 年北运河旅游通航各级风灾风险指数逐年变化

4. 结论与讨论

本研究基于自然灾害风险评估理论构建北运河旅游通航风灾风险评估模型，计算北运河旅游通航风灾风险指数，并分别从站点、空间、时间的不同尺度分析了北运河旅游通航风灾风险指数的变化。结果显示：

1) 基于站点统计北运河旅游通航综合风灾风险指数由高到低达到 I 级，II 级，III 级，IV 级，出现的概率分别为 9.1%，33.3%，42.4%，15.2%，说明风险指数大于 8.0 站数占比最低，超过一半的站综合风灾风险指数低于 7.0。

2) 北运河旅游通航遭受较重风灾的风险最高，其次是轻度风灾风险，而最低的是重度风灾风险，这与武清全区各站遭受 8 级以上大风的日数较少有关。

3) 风险指数空间分布结果显示，较重风险指数较高区域主要位于武清中部地区，综合风灾风险空间分布情况主要表现为较重风灾风险叠加轻度风灾风险之和，高风险区主要位于武清中部，南部和北部风

险较低。

4) 北运河旅游通航风灾风险随时间变化表明, 重度风灾风险指数最低, 轻度风险指数和中度风险指数年度变化接近, 变化幅度均不明显, 近 9 年的综合风险指数表现为 2016~2021 年缓慢增加趋势, 在 2021 年达到最高值 7.30, 然后在 2021~2024 年又有缓慢减小趋势。

通过对北运河旅游通航风灾风险进行评估和区划, 可以为后续综合评价北运河武清段通航条件、航道规划设计、码头站点设置以及气象观测站点优化布局提供参考依据。本研究中认为: 轻度风灾会对游船航行有一些影响, 对于航行安全影响程度较小; 中度风灾对游船航行有一定影响, 对于航行安全影响程度为一般; 较重风灾对游船航行有较大影响, 对于航行安全影响程度更大; 重度风灾对游船航行有严重影响, 对于航行安全游船航行影响程度为重大。北运河旅游通航风灾风险评估的难点在于, 风灾影响的复杂性, 不仅与风速有关, 还受风向、持续时间、河道地形等多因素影响, 是多因素耦合的结果, 难以量化。鉴于数据获取的限制, 本研究仅通过调研近 2 年通州、廊坊已通航段游船运营情况, 采用专家打分法, 仅依赖阵风风速来确定北运河旅游通航风灾致灾指标。未来将结合风向、持续时间、地理环境、船舶特性等多方面因素开展深入研究, 构建综合致灾指标, 才能更科学、准确地评估风灾风险, 为北运河旅游通航的安全管理提供可靠依据。

基金项目

天津市气象局科研项目(202414qxzx03)、天津市武清区科技计划项目(WQKJ202124)、武清区劳模和工匠人才创新工作室补助资金。

参考文献

- [1] 张晶, 陈田, 王晓峰. 气候变化对中国旅游业的影响及应对策略研究[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 65-74.
- [2] 侯亚红, 息涛, 徐方妹, 等. 辽宁避暑旅游气候条件分析和气象指数研究[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(4): 34-40.
- [3] 白婷, 祝小梅, 刘金丽. 基于 ArcGIS 伊犁河谷旅游气候舒适度研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 127-131.
- [4] 李丽, 王建. 气象因素对我国主要旅游城市游客量的影响分析[J]. 旅游学刊, 2016, 31(5): 45-52.
- [5] 罗红梅, 向毅, 李学敏. 湖南省水上交通主要航道气象灾害风险普查技术研究[J]. 科技创新导报, 2018, 15(9): 133-136.
- [6] 罗培. 区域气象灾害风险评估[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南师范大学, 2005.
- [7] 王望珍, 李玉刚, 周又又. 基于 GIS 和模糊数学的神农架村镇山洪风险评价[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(9): 37-42.
- [8] 吴松, 赵强. 极端天气事件预测方法及其对航线影响综述[J]. 自然灾害, 2018, 92(2): 673-690.
- [9] 张洋, 王静. 天气条件对海上交通安全的影响——以长江口为例[J]. 航海学报, 2020, 73(4): 789-805.
- [10] 郑中义, 吴兆麟. 港口船舶航行环境危险度的灰色评估数学模型[C]//中国国际贸易促进委员会大连分会, 大连船舶工业公司集团, 辽宁省造船工程学会, 中国船舶工业行业协会. 1998 大连国际海事技术交流会论文集(第一卷). 大连: 大连海事大学, 1998: 324-327.
- [11] 戴厚兴, 吴兆麟. 能见度不良天气下海上交通安全风险预警系统[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(5): 195-206.
- [12] 雷绍权. 福州港闽江通海航道船舶交通安全评价[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 集美大学, 2018.
- [13] 天津市气象局. DB12/T1130-2022 航运气象风险等级划分及应对处理规范[S]. 天津: 天津市市场监督管理委员会, 2022.
- [14] 湖南省气象局. DB43/T2055-2021 水上交通气象灾害风险预警等级划分预评标准[S]. 长沙: 湖南省气象标准化技术委员会, 2021.