



马迹山海域风和波浪特征分析

杨树刚, 刘鹏飞, 马 追, 王付坤, 周同弟

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对马迹山海域风和波浪特征, 利用连续一整年的风和波浪资料进行数学统计相关分析, 得到马迹山海域风和波浪要素分布特征。结果表明, 马迹山海域波浪类型为以风浪为主的混合浪; 观测期间最大波高为 4.59 m, 平均波高在 0.20~0.42 m; 最大波周期为 9.50 s, 平均波周期在 2.66~3.01 s; 马迹山海域全年常风向为 NNW 向, 春、夏季常风向分别为 S、SSW 向, 秋、冬季常风向均为 NNW 向, 马迹山海域全年强风向为 NNW 向; 春、夏季波高与风速的相关性一般, 秋、冬季两者的线性关系明显。

关键词: 马迹山; 波浪; 风; 相关性

中图分类号: U 612.2; U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0027-08

Analysis of wave and wind characteristics of Majishan sea area

YANG Shu-gang, LIU Peng-fei, MA Zhui, WANG Fu-kun, ZHOU Tong-di

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In view of the characteristics of the wind and wave in the Majishan sea area, this study presents a mathematical statistical correlation analysis with the wind and wave data of a whole year and obtains the distribution characteristics of the wind and wave parameters of the Majishan sea area. The results show that the wave type of the Majishan sea area is a mixed wave dominated by the wind wave. During the observation period, the maximum wave height is 4.59 m, and the average wave height is between 0.20 m and 0.42 m. The maximum wave period is 9.50 s, and the average one is between 2.66 s and 3.01 s. The annual normal wind direction of the Majishan sea area is north-northwest(NNW). Specifically, the normal wind directions in spring and summer are respectively south (S) and south-southwest(SSW), while those in autumn and winter are both NNW. The annual strong wind direction of the Majishan sea area is also NNW. The correlation between wave height and wind speed in spring and summer is small, while the linear relationship between the two in autumn and winter is significant.

Keywords: Majishan; wave; wind; correlation

马迹山岛位于浙江省舟山群岛北部、杭州湾外海域, 舟山市嵊泗县嵊泗本岛西南, 东临外海, 西南侧与洋山岛隔水道相望, 南侧为岱衢洋、相隔约 20 km 为黄泽洋和衢山岛, 东侧相隔约 31 km 为嵊山岛。马迹山岛南侧、西侧水域开阔, 深水贴岸, 具备建设大型泊位的水深条件。目前马迹山岛南侧岸段自东向西建设有宝钢一/二期卸船、一/二期装船泊位, 同时马迹山岛的西南侧拟建 1 个矿石中转码头。

波浪是一种重要的海洋动力因素, 波浪要素的

观测和分析对港口码头设计、航道建设、围垦工程都尤为重要^[1-3]。受有限水深的限制, 近海浅水区波浪会发生折射、绕射等效应^[4], 从而导致波浪传播方向发生改变、波高增大、波浪破碎等一系列现象^[5-6], 故近海海域波浪具有一定的局地性和复杂性, 单纯使用数模、物模方法很难保证波浪预报准确性, 因此实测波浪数据对近岸波浪研究必不可少^[7]。

本文利用 2020 年 4 月—2021 年 3 月马迹山海域一整年的风和波浪观测资料, 统计分析该海域

波浪的季节变化特征，并分析不同季节风对波浪的影响，为港口和航道建设提供必要的参考资料。

1 数据来源

本文数据来源于拟建马迹山矿石中转码头前沿海域抛设的 1 个锚定式测波站(W1)以及附近开阔区域长期气象站(W)，风和波浪观测站位置见图 1，其中 W1 测站水深 25 m，W 气象站四周无遮挡。波浪观测仪采用挪威 Nortek 公司生产的 AWAC 浪龙波浪观测仪，波高和波向分辨率分别为 0.01 m 和 1.5°，采样频率为 1 Hz，每次采样数 1 024 个，仪器每 1 h 给出一次统计特征值，观测要素包含最大波高及其周期、有效波高及其周期、平均波高及其周期、波数及波向等。气象观测仪采用 DZZ3 新型自动气象站，风速、风向观测时间分辨率为 1 min，统计要素包含 2 和 10 min 平均风速风向、10 min 最大风速风向和瞬时极大风速风向等。观测时间为 2020-04-01 T00 :00—2021-03-31 T23 :00，共一整年，观测期间海域无台风直接经过，有一次较强的寒潮发生(2020-12-28—2020-12-31)。由于受渔民生产活动的影响，仪器于 2020-06-03—2020-06-18、2020-09-01—2020-09-14、2020-01-19—2020-01-27 被渔船拖动导致数据缺失，整体而言，观测数据完整性良好，春夏秋冬四季数据获取率分别为 100%、78%、84%和 90%，能够反映真实波浪变化规律。本文采用整点时刻的数据对波浪、风的季节变化规律开展相关研究，文中风速数据为海平面 10 m 风速数据，平均速度与最大速度分别为 10 min 平均风速与 10 min 最大风速。



注：W 气象站 (30°40′47.49″N, 122°24′55.87″E)；W1 波浪站 (30°41′4.78″N, 122°23′44.84″E)。

图 1 波浪站(W1)与气象站(W)位置

2 波浪的统计特征和季节变化

波要素特征值分布见表 1。观测年内最大波高为 4.59 m，出现在 2020-12-30，此时正发生寒潮，最大波高时刻对应最大风速为 21.5 m/s，风向 321°。平均波高在 0.20~0.42 m，其中 6 月份最小、12 月份最大。各月份平均波周期相差不大，在 2.66~3.01 s，其中 10 月份最小、12 月份最大；最大波周期为 9.50 s，对应最大波高 3.03 m、最大风速 17.3 m/s。

表 1 波要素特征值月分布

月份	平均波高/m	最大波高/m	平均波周期/s	最大波周期/s
1	0.37	2.88	2.81	8.50
2	0.33	3.28	2.74	9.50
3	0.27	3.28	2.79	9.00
4	0.25	2.60	2.81	9.50
5	0.22	2.09	2.82	8.50
6	0.20	1.99	2.86	9.50
7	0.20	1.64	2.87	8.50
8	0.28	2.75	2.78	9.50
9	0.27	2.37	2.92	8.50
10	0.33	2.37	2.66	8.50
11	0.35	2.40	2.83	9.00
12	0.42	4.59	3.01	8.50

为更好地了解波浪的季节变化特征，本文规定 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12—次年 2 月为冬季，并将波要素按四季统计，并对各向出现的频率进行计算，得到 16 个波向的季节分布以及四季与全年的强浪向、常浪向，分别见表 2、3。

表 2 波向季节分布

方向	春季/%	夏季/%	秋季/%	冬季/%	全年/%
N	8.8	4.5	7.7	16.9	9.7
NNE	4.0	2.1	2.7	4.4	3.4
NE	1.7	2.3	1.0	1.7	1.7
ENE	1.3	2.2	0.8	0.8	1.2
E	0.6	1.8	0.4	1.0	0.9
ESE	0.9	1.8	1.0	0.9	1.1
SE	1.9	3.3	0.6	2.1	1.9
SSE	6.8	8.1	3.0	3.8	5.4
S	14.5	21.8	7.1	6.7	12.3
SSW	10.3	21.2	7.5	5.5	10.8
SW	6.1	10.2	6.7	3.9	6.6
WSW	4.9	6.0	6.1	3.4	5.0
W	6.1	3.7	6.4	4.2	5.2
WNW	6.8	3.9	9.4	5.8	6.5
NW	12.1	3.8	19.0	15.7	12.9
NNW	13.2	3.3	20.7	23.1	15.4
合计	100	100	100	100	100

表 3 全年及四季强浪向、常浪向

季节	常浪向	常浪向 频率/%	次常浪向	次常浪 向频率/%	强浪向	强浪向 最大波高/m	次强浪向	次强浪向 最大波高/m
春季	S	14.5	NNW	13.2	N	3.11	NNW	2.89
夏季	S	21.8	SSW	21.2	S	2.11	SSW	1.91
秋季	NNW	20.7	NW	19.0	NNW	2.42	NW	2.30
冬季	NNW	23.1	NW	25.7	WNW	4.59	NNW	3.62
全年	NNW	15.4	NW、S	12.9、12.3	WNW	4.59	NNW	3.62

马迹山海域全年常浪向为 NNW 向，频率为 15.4%，其次为 NW 和 S 向，频率为 12.9%、12.3%；常浪向的季节变化规律为：春、夏季常浪向为 S 向，频率各占 14.5%、21.8%，秋、冬季常浪向均为 NNW 向，频率各占 20.7%、23.1%。马迹山海域全年强浪向为 WNW 向，实测最大波高为 4.59 m，次强浪向为 NNW，实测最大波高为 3.62 m；强浪向

的季节变化规律为春、秋、冬季强浪向均为偏 N 向，分别为 N、NNW、WNW 向，最大波高分别为 3.11、2.42 和 4.59 m，夏季强浪向出现在 S 向，最大波高为 2.11 m。综上所述，观测海域全年以偏 N 向浪居多，以 NW 向浪最大，最大浪发生在冬季，可高达 4.59 m。根据实测波浪数据绘制的平均波高、波向玫瑰图见图 2。

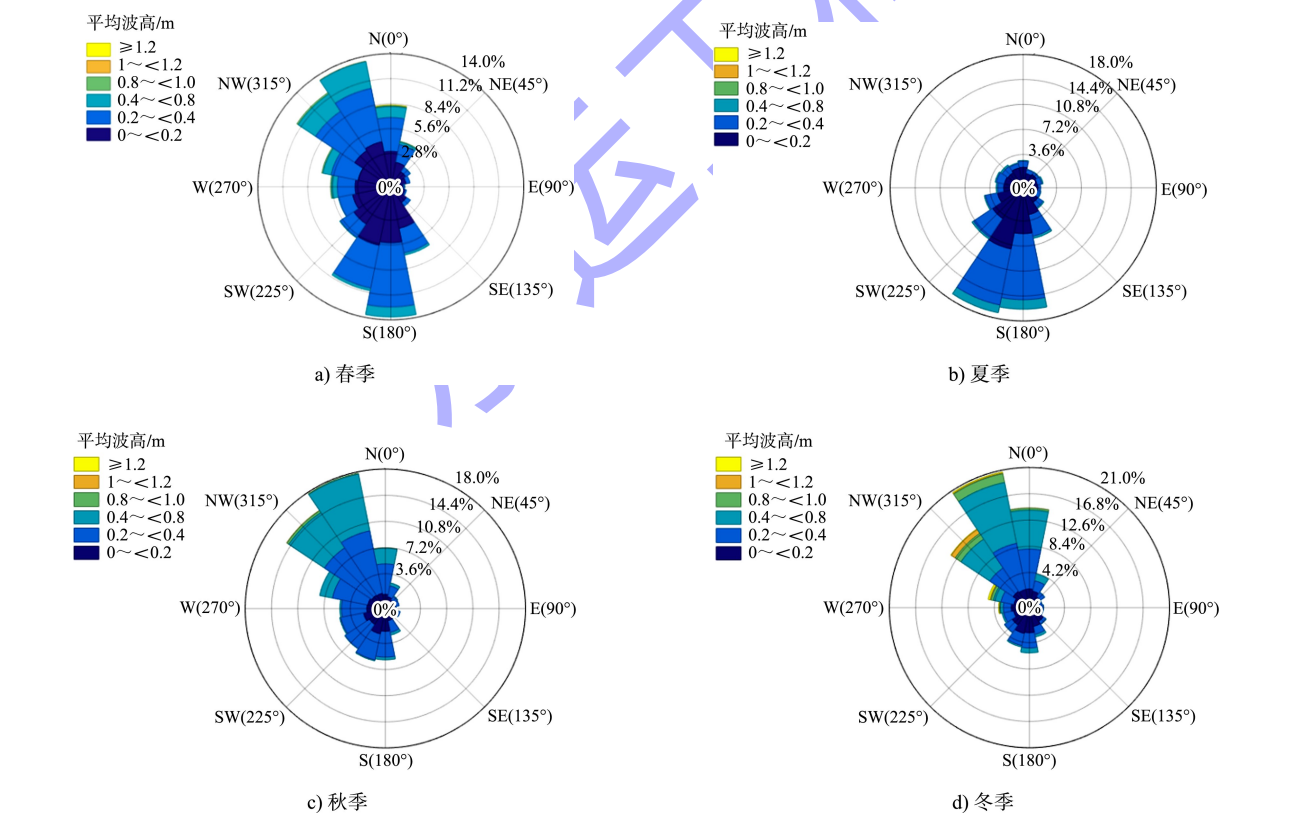
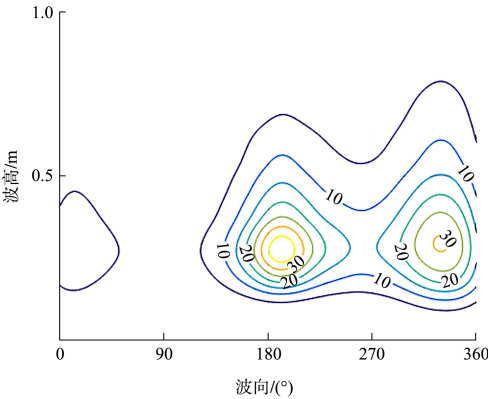


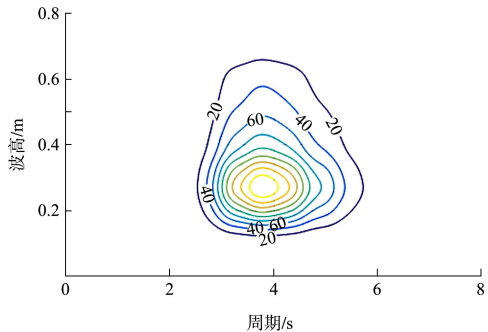
图 2 平均波高、波向玫瑰图

可以发现：春季波向较为分散，夏、秋、冬季波向较为集中，夏季大多为偏 S 向浪，秋冬季多为偏 N 向浪，秋冬季节大浪多发生在 NW 向，夏季大

浪多发生在 SW 向。全年的平均波高、波向联合概率密度分布和全年平均波高周期联合概率密度分布见图 3，四季的平均波高波向联合概率密度见图 4。

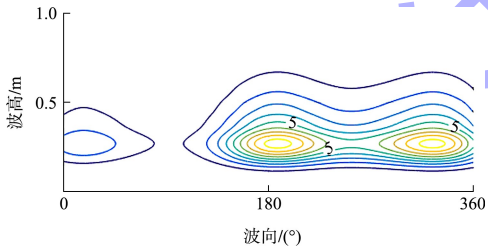


a) 波高与波向联合(单位: $\% \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

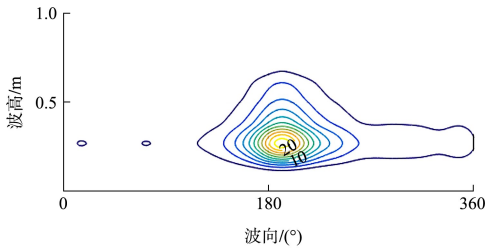


b) 波高与周期联合(单位: $\% \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

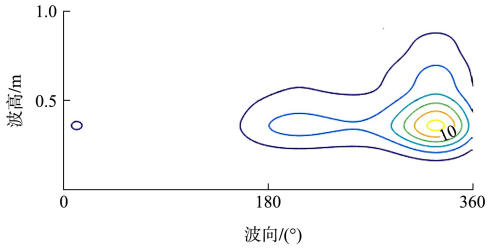
图 3 全年平均概率密度



a) 春季



b) 夏季



c) 秋季

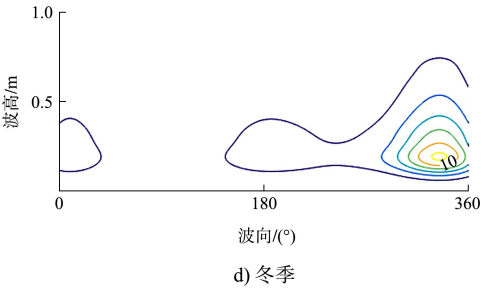


图 4 四季平均概率密度分布变化
(单位: $\% \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

观测海域波浪根据波向可分为两种,波向在 $170^{\circ} \sim 210^{\circ}$ 集中分布的夏季浪和 $320^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 的冬季浪,冬季浪平均波高相对较大。全年平均波高在 $0.2 \sim 0.4 \text{ m}$,平均周期在 $2.5 \sim 4.5 \text{ s}$ 范围内的波浪最为常见。

3 风的统计特征和季节变化

将平均风速、最大风速按四季统计,并对各向出现的频率进行计算,得到了 16 个方向的风向季节分布以及四季与全年的强风向、常风向,见表 4、5。

表 4 风向季节分布

方向	春季/%	夏季/%	秋季/%	冬季/%	全年/%
N	8.5	0.4	7.7	16.7	8.3
NNE	4.2	0.1	2.7	4.3	2.8
NE	2.0	1.3	1.0	1.8	1.5
ENE	1.3	0.4	0.9	0.6	0.8
E	0.6	2.3	0.3	0.7	1.0
ESE	0.7	0.3	1.0	0.9	0.7
SE	1.8	1.9	0.7	2.2	1.6
SSE	5.8	6.1	2.7	3.7	4.59
S	14.2	21.9	7.3	6.6	12.5
SSW	11.6	27.7	7.5	5.8	13.1
SW	7.0	14.0	7.3	4.0	8.1
WSW	5.1	9.6	6.6	3.6	6.2
W	6.2	4.9	6.3	4.3	5.4
WNW	6.5	6.0	9.6	5.8	7.0
NW	11.3	1.4	18.7	15.5	11.7
NNW	13.2	1.6	19.7	23.5	14.5
合计	100	100	100	100	100

表 5 全年及四季强风向、常风向

季节	常风向	常风向 频率/%	次常风向	次常风向 频率/%	强风向	强风向 最大风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	次强风向	次强风向 最大风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
春季	S	14.2	NNW	13.2	W	22.4	S	17.8
夏季	SSW	27.7	S	21.9	S	20.1	SSW	20.0
秋季	NNW	19.7	NW	18.7	NW	21.8	WNNW	21.0
冬季	NNW	23.5	NW	15.5	NNW	29.4	NW	28.9
全年	NNW	14.5	SSW、S	13.1、12.5	NNW	29.4	NW	28.9

马迹山海域全年常风向为 NNW 向, 频率为 14.5%, 其次为 SSW、S 向, 频率为 13.1%、12.5%; 常风向的季节变化规律为: 春、夏季常风向分别为 S、SSW 向, 频率各占 14.2%、27.2%, 秋、冬季常风向均为 NNW 向, 频率各占 19.7%、23.5%。马迹山海域全年强风向为 NNW 向, 实测最大风速为 29.4 m/s, 次强风向为 NW 向, 实测

最大风速为 28.9 m/s; 强风向的季节变化规律为秋、冬季强风向均为偏 N 向, 分别为 NW、NNW 向, 春、夏季强风向分别出现在 W、S 向。综上所述, 观测海域全年以偏 N 向风居多, 最大风发生在冬季, 最大风速可高达 29.4 m/s。根据实测小时气象数据绘制的平均风速、风向玫瑰图见图 5。

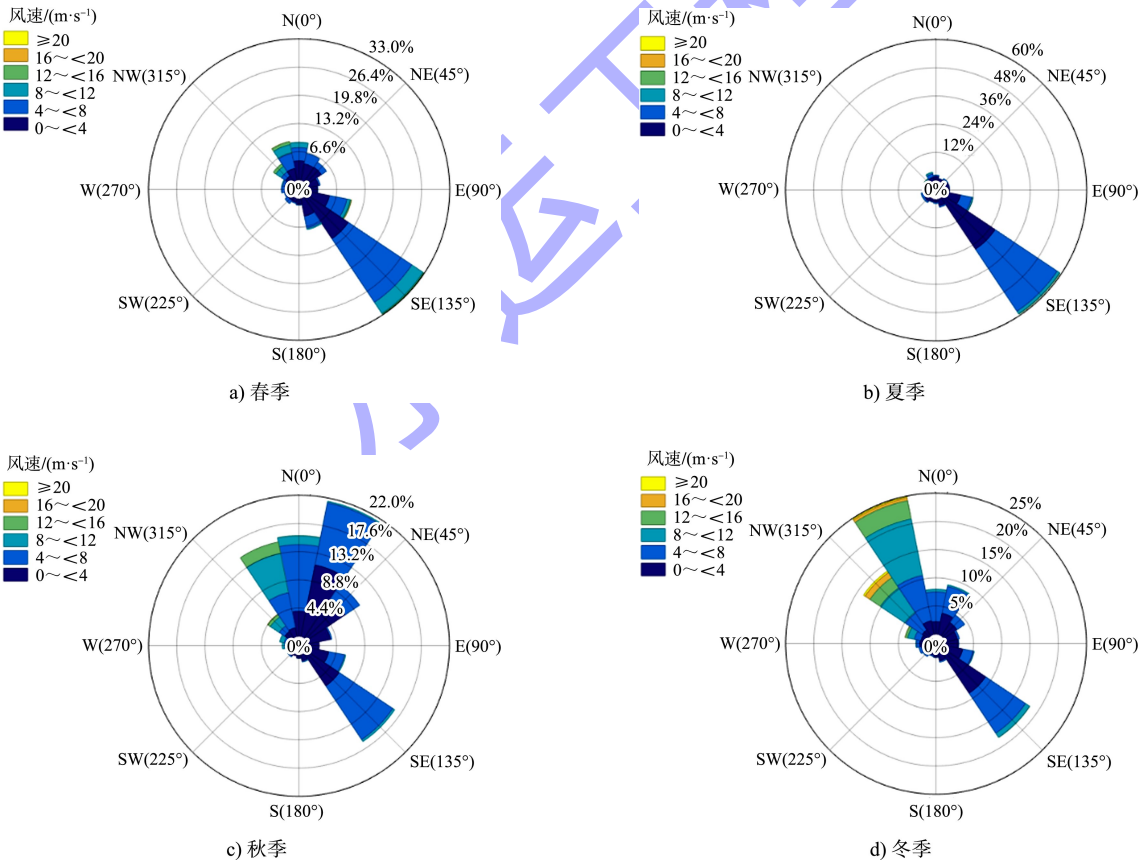


图 5 四季平均风速、风向玫瑰图

4 风与波浪的关系

马迹山海域风速与波高、风向与波向有很大的相似性。为此本文绘制四季平均风速与平均波

高日平均时间序列、最大风速与最大波高的日平均时间序列分别见图 6、7。

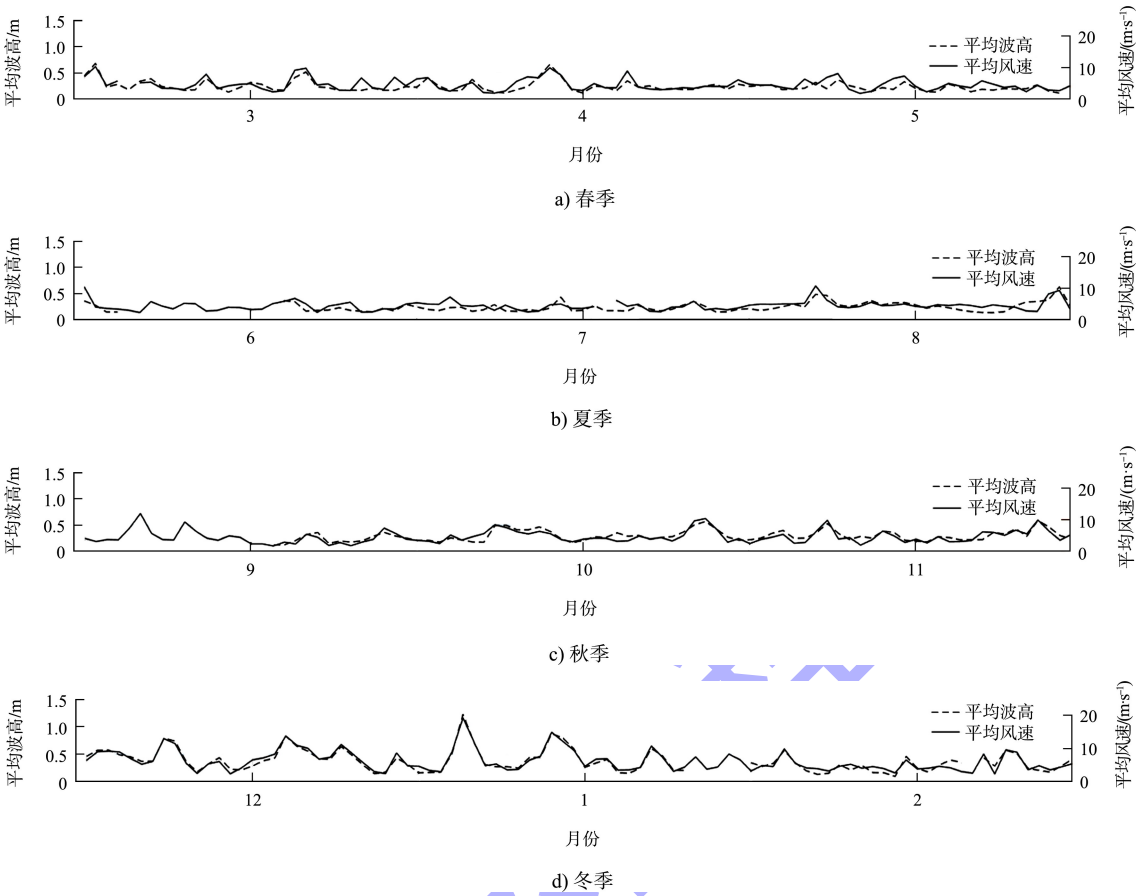


图 6 平均波高与平均风速时间序列

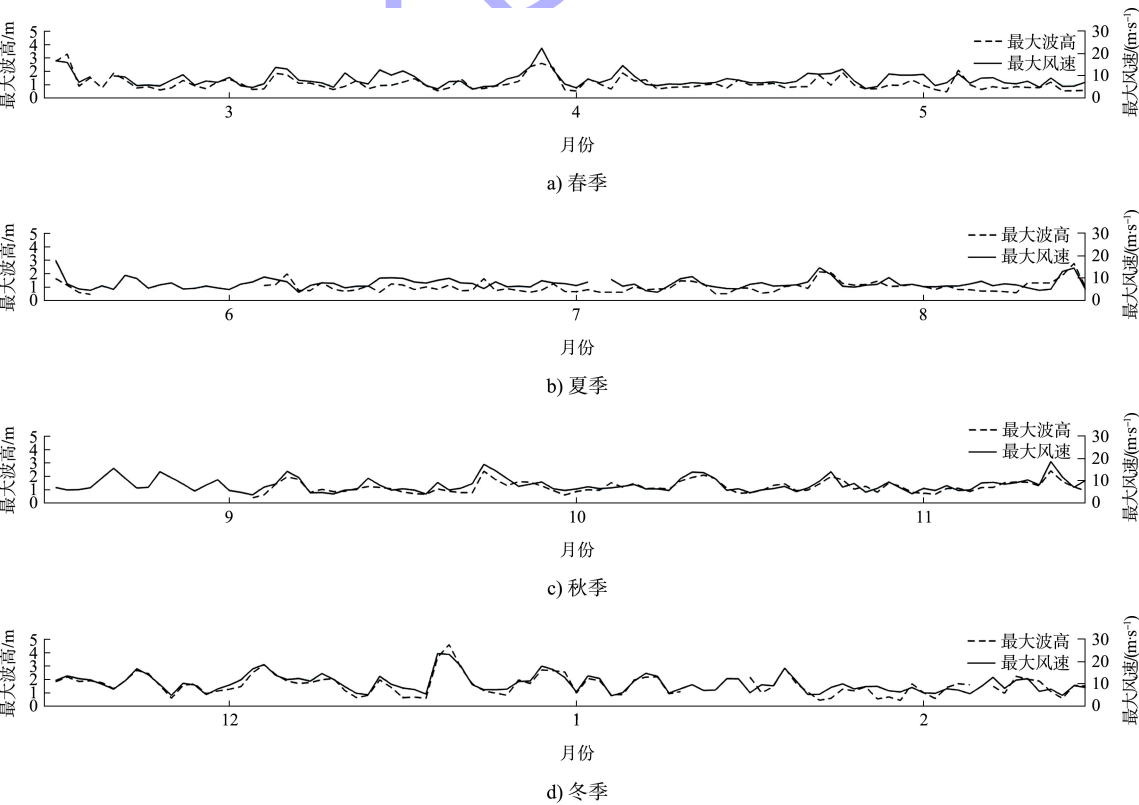


图 7 最大波高与最大风速时间序列

风速与波高规律具有一致性，在日平均的时间尺度下相位差基本为 0，此规律在秋、冬季尤为明显。平均波高-平均风速散点图、最大波高-最大风速散点图分别见图 8、9，并计算出四季两者的相关系数见表 6。

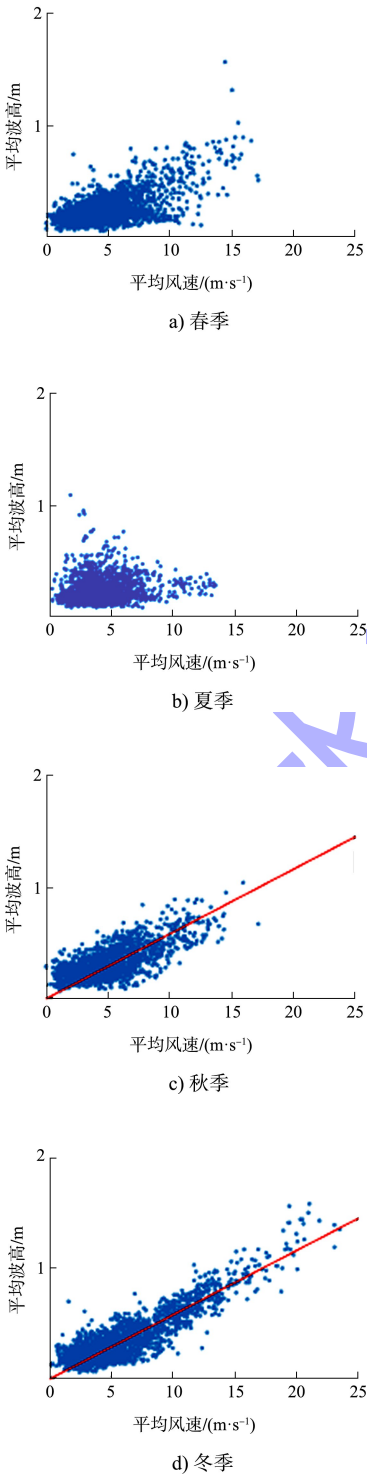


图 8 平均波高-平均风速散点图

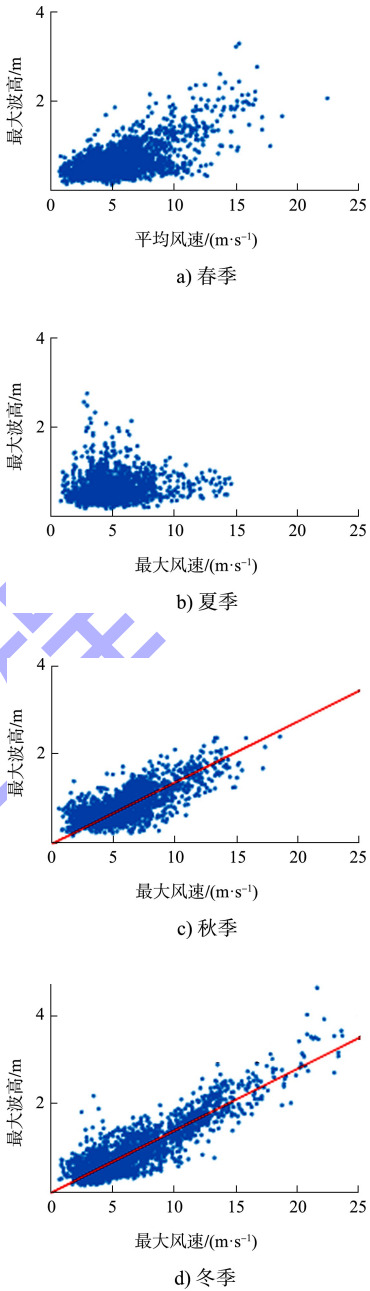


图 9 最大波高-最大风速散点图

表 6 风速-波高相关系数					
相关系数	春季	夏季	秋季	冬季	全年
平均风速-平均波高	0.78	0.55	0.86	0.95	0.87
最大风速-最大波高	0.80	0.50	0.85	0.88	0.82

由图 8、9 可看出，春夏两季波高与风速的线性相关性一般，秋、冬季两者的线性关系明显。秋冬季平均波高、平均风速的相关系数分别为 0.86、0.95，置信度超过 99%，最大波高、最大风速的相关系数分别为 0.88、0.82，置信度超过 99%。

分析认为：春、夏季东南风多发(图 5)，马迹山工程海域东南侧有陆地遮挡，风对波浪的影响减弱；冬季盛行北风、西北风，风从海洋吹向陆地，此时波向和风向基本一致，波高与风速呈线性相关。

5 结 论

1) 马迹山海域波浪类型为以风浪为主的混合浪。最大波高为 4.59 m，出现在 12 月；平均波高在 0.20~0.42 m，6 月份最小、12 月份最大。平均波周期在 2.66~3.01 s，10 月份最小、12 月份最大，最大波周期为 9.50 s。全年平均波高集中分布在 0.2~0.4 m、平均周期 2.5~4.5 s。

2) 马迹山海域波浪可根据波向分为两种：波向在 170°~210°集中分布的夏季浪和 320°~360°集中分布的冬季浪。全年常浪向为 NNW 向，强浪向为 WNW 向，春季波向较为分散，夏、秋、冬季波向较为集中，夏季大多为偏 S 向浪，秋、冬季多为偏 N 向浪，秋、冬季大浪多发生在偏 N 向，夏季大浪多发生在偏 S 向。

3) 马迹山海域全年常风向为 NNW 向，最大风发生在冬季，最大风速可高达 29.4 m/s。春、夏季常风向分别为 S、SSW 向，秋、冬季常风向均为 NNW 向，马迹山海域全年强风向为 NNW 向，强风向的季节变化规律为秋、冬季强风向均为偏 N 向，分别为 NW、NNW 向，春夏季强风向

分别出现在 W、S 向。

4) 马迹山海域春、夏季波高与风速的相关性一般，秋、冬季两者的线性关系极为明显，秋冬季平均波高平均风速的相关系数分别为 0.86、0.95；秋、冬季最大波高最大风速的相关系数分别为 0.88、0.82。

5) 根据本文中提出的秋、冬季波高与风速的线性关系，利用天气预报的风速资料可预测马迹山码头附近海域的波高情况。

参考文献：

[1] 唐东跃, 张沈阳, 王璟, 等. 台州湾近海海域波浪要素特征分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(1): 71-75, 135.

[2] 李淑江, 李泽文, 范斌, 等. 海南岛东南近岸海浪观测及统计特征[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(1): 1-9.

[3] 陈宜展, 曹永港, 黄艳松, 等. 海口湾海域波浪特征分析[J]. 海洋工程, 2019, 37(2): 96-103.

[4] 左其华, 姚国权, 丁炳灿. 摩阻地形上的波浪折射和绕射[J]. 港口工程, 1993(1): 35-40.

[5] 王维利, 王绿卿. 浅水区波浪特征的变化[J]. 山东交通科技, 2013(3): 75-79, 81.

[6] 邹国良. 基于非静压方程的近岸波浪变形数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.

[7] 周阳, 叶钦, 杨斌, 等. 基于 AWAC 的三门湾海域波浪分布特征分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 387-393.

(本文编辑 王璁)

(上接第 26 页)

参考文献：

[1] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.

[2] 史才军, 何稳, 吴泽媚, 等. 纤维对 UHPC 力学性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2227-2236, 2247.

[3] 赵一鹤, 孙振平, 穆帆远, 等. 钢纤维对 UHPC 拉伸性能及其拔出行为的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 276-282.

[4] 常亚峰, 师俊平, 侯亚鹏. 端钩型钢纤维 UHPC 抗压强度的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(10): 3385-3395.

[5] 苏家战, 林毅竣, 陈宝春, 等. 不同形状钢纤维对 UHPC 受拉性能影响的试验研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 246-251, 261.

[6] 邓宗才, 冯琦, 曲玖龄, 等. 活性粉末混凝土弯曲韧性评价方法与试验研究[J]. 混凝土, 2014(2): 45-49.

[7] 陈宝春, 林毅竣, 杨简, 等. 超高性能纤维增强混凝土中纤维作用综述[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 58-68.

[8] BOULEKBACHE B, HAMRAT M, AMZIANE S. Flowability of fibre reinforced concrete and its effect on the mechanical properties[J]. Construction and building materials, 2010, 24(9): 1664-1671.

(本文编辑 王璁)