



华南理工大学
South China University of Technology

本科毕业设计（论文）

永暑礁海区波浪的特征与变化规律分析

学 院	土木与交通学院
专 业	船舶与海洋工程
学生姓名	李世贤
学生学号	201330160178
指导教师	朱良生
提交日期	2017 年 6 月 6 日

摘 要

南海素有“亚洲地中海”之称，是沟通两大洋和联系三大洲的海上枢纽，是我国海上石油和贸易的生命线。同时，当人口不断增长、资源日渐匮乏、环境被污染使人类生存的陆地不堪重荷之时，无数人将目光投向浩瀚无垠的海洋，中国作为世界上人口最多的国家也将不断加大力度开发包括南海在内的广袤海域。近年来，随着南海局势的不断升温，出于领海安全方面考虑，国家对南海海域的研究开发也将更加深入。由于以上种种原因，对南海海域的波浪特征与变化规律分析便显得尤为重要，本文主要对永暑礁海区的波浪特征与变化规律作较为深入的统计分析研究。

本文主要运用 matlab 软件对永暑礁海区 37 年的波浪数据进行归类分析，运用 bar、mesh、plot 等命令进行概率分析并制成图表，以更直观的方式把波浪的各个特征呈现出来，同时结合 Excel 等办公软件，可以更好地完善展示效果。

本文得出以下结论：

永暑礁海区有效波高情况较为复杂，波高年、春季、秋季、冬季平均值呈现整体上升的趋势，夏季呈现整体下降趋势，平均周期年、季均呈现整体上升趋势。而且波高相对较大，出现的范围在0~5m之间，平均周期出现范围为2~11s，联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m，相应的平均周期为4~8s。

强浪和常浪波向分布基本相同，并且强浪与常浪的波高年、季均值变化具有同步性，由此可见二者有明显的相关性。波高、周期、风速逐月时间变化曲线均呈现两边高中间低的态势，具有明显的相关性，而主波向则为夏季主要是西南方向，冬季为东北方向，春秋两季为过渡状态。有效波高与风速无论是分向还是不分向均有较高的相关性，相关系数均在 0.7 以上，相关性极强。而强浪周期和有效波高关系相关性则相对较弱，期中相关性最强的为夏季，最弱为秋季。大浪年波高呈现逐渐微弱增大的趋势。20 年一遇重现有效波高 5.78m，25 年一遇重现波高 5.92m，50 年一遇重现期有效波高 6.351m，100 年一遇重现期有效波高 6.78m。

关键词：周期分布；重现期；特征分析

Abstract

The South China Sea, known as the "Asian Mediterranean", is the maritime hub connecting the two oceans and the three continents. It is the lifeline of China's offshore oil and trade. At the same time, when population growth, scarcity, environmental pollution to human survival land get overwhelmed when countless people set their sights on the vast expanse of the sea, China as the most populous country in the world will continue to intensify the development of the vast sea area including the South China sea. In recent years, with the continuous warming of the situation in the South China Sea, considering the safety of the territorial sea, the state's research and development of the South China Sea will be further developed. Due to the above reasons, wave characteristics and variation analysis of the South China Sea is particularly important. This paper focuses on the wave characteristics at Yongshu Reef and the change rule for statistical analysis and research deeply.

This paper draws the following conclusions:

Effective wave height at Yongshu Reef complex, high wave years, spring, autumn and winter average showed an overall upward trend, showing the overall downward trend in summer, the average period of the year and season showed overall upward trend. Moreover, the wave height is relatively large, and the range of occurrence is between 0~5m. The average period is 2~11s, and the maximum frequency range of joint distribution is 0~2m, and the corresponding average period is 4~8s.

The strong wave and normal wave distribution is basically the same, and the strong wave and wave wave high annual and seasonal mean value change is synchronous, there is a significant correlation between the two. The change curve of wave height, wind speed, cycle time showed a monthly high among low on both sides of the situation, has obvious relevance, while the main wave direction for summer is mainly southwest, northeast winter, spring and autumn two season is over. The effective wave height and wind speed have higher correlation, both in the direction and the direction respectively, and the correlation coefficients are above 0.7. The correlation is very strong. The correlation between the strong wave period and the

effective wave height is relatively weak, the strongest correlation is summer, and the weakest is summer. The wave height has shown a trend of gradually increasing in big wave year. The 20 year return wave height 5.782m, 25 years and 5 in 50 years to reproduce the height of 5.922m, the return period wave height 6.351m, 100 year return period wave height 6.777m.

Keywords: periodic distribution; recurrence period; characteristic analysis

目 录

摘 要.....	II
Abstract	III
目 录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 研究背景	1
1.3 研究现状	3
1.3.1 国内波浪统计分布分析方法.....	3
1.3.2 永暑海区波浪要素变化特征分析	5
1.4 数据来源	7
1.5 本文研究技术路线.....	7
1.6 论文结构.....	8
第二章 基础理论与方法.....	9
2.1 随机波理论简介	9
2.1.1 海洋波浪的随机特征	9
2.2 随机波统计理论基础.....	10
2.2.1 波高、周期的定义.....	10
2.2.2、按部分大波平均值定义的特征波	11
2.3 Matlab 数学分析软件简介.....	13
第三章 波浪的年、季特征分析.....	14
3.1 波高、周期的年、季平均值分布	14
3.2 波高、周期特征分析	18
3.3 波向（来向）特征分析	23
3.4 波高与波向联合分布	27
3.4 波高与周期联合分布	31

3.5 强浪与常浪特征	39
3.6 本章小结	43
第四章 波浪时间（逐月）变化规律	44
4.1 波高、周期、风速、主波向的逐月时间过程	44
4.1.1 波高的逐月时间过程	44
4.1.2 周期的逐月时间过程	44
4.1.3 风速的逐月时间过程	45
4.1.4 主波向的逐月时间过程	46
4.2 波高与风速关系（分向与不分向分析）	47
4.2.1 不分向波高与风速关系	47
4.2.2 分向波高与风速关系	48
4.3 周期与波高关系（强浪）	50
4.4 本章小结	54
第五章 大浪长期特征变化与趋势分析	55
5.1 大浪长期特征变化	55
5.2 大浪重现期分析	62
5.3 本章小结	64
结论	65
1. 论文工作总结	65
2. 工作展望	66
参考文献	67
致谢	68
附录 1	69

第一章 绪论

1.1 引言

中国南海作为我国神圣领土的南大门，其无论在政治还是军事上均具有重要的战略地位。南海海域自然资源丰富，其中具有多种多样的动植物资源以及丰富的油气资源，据新闻媒体报道，我国目前在南海探明的可燃冰藏量相当于 700 亿吨石油，已足够中国使用百年以上，由此可见南海对于我国未来经济发展的重要地位。同时，随着南海局势的进一步升温，在军事上我国也加快对南海各岛礁的建设。因此，有序地开发南海势在必行。

本文主要对南海海域中的永暑礁海区的波浪进行特征分析以及趋势研究，了解永暑礁海区的波浪特点，为南海的开发提供一定的科学依据。

运用数学分析软件 matlab 作为数据统计分析的主要工具，分别对永暑礁海域 37 年的数据进行统计分析，分别运用 matlab 画出波浪的年、季特征、波高与波向联合分布、波高与周期联合分布等图表并分析其特点以及趋势。

1.2 研究背景

南海素有“亚洲地中海”之称，是沟通两大洋和联系三大洲的海上枢纽，是我国海上石油和贸易的生命线；同时，当人口不断增长、资源日渐匮乏、环境被污染使人类生存的陆地不堪重荷之时，无数人将目光投向浩瀚无垠的海洋，中国作为世界上人口最多的国家也将不断加大力度开发包括南海在内的广袤海域；近年来，随着南海局势的不断升温，出于领海安全方面考虑，国家对南海海域的研究开发也将更加深入。由于以上种种原因，对南海海域的波浪特征与变化规律分析便显得尤为重要，本文主要对永暑礁海区的波浪特征与变化规律作较为深入的统计分析研究。

永暑礁位于北纬 $9^{\circ}33'$ ，东经 $112^{\circ}53'$ ，位于南沙群岛海区北部，属于开放型环礁，由一系列适淹或水下小礁组成，外形呈纺锤形，长轴近 25 km、NE-SW 向，短轴宽约 6 km。永暑海区季风尤为显著，处在南亚季风区内，风力一般较大；受亚洲大陆、澳洲大陆以及太平洋和印度洋之间大气环流的影响，成为南沙海区的最强浪区之一，主要是 NE 和 SW 风。SW 风在春季开始，夏季达到最大值，秋季逐渐减弱，NE 风则与

之相反^[1]。永暑礁处于香港-新加坡国际航线的东南侧，与香港的距离为 1400 km，距永兴岛（西沙群岛）800 km，与曾母暗沙的距离为 600km。由此可见，永暑礁海浪资料对研究南沙海区具有较好的代表性和可靠性，研究永暑海区波浪要素的变化规律及其特征，对提高南沙海区波浪预报的准确性，保证在该海区海上作业安全和舰船航行安全具有重要意义，同时，面对变化莫测的南海局势，我国更需要对包括永暑礁在内的南海海域进行深入的研究，以便在军事上获得更大的主动权。

利用百度地图软件得到永暑礁的位置及邻近海域示意图：



图 1-1 永暑礁的位置及邻近海域示意图

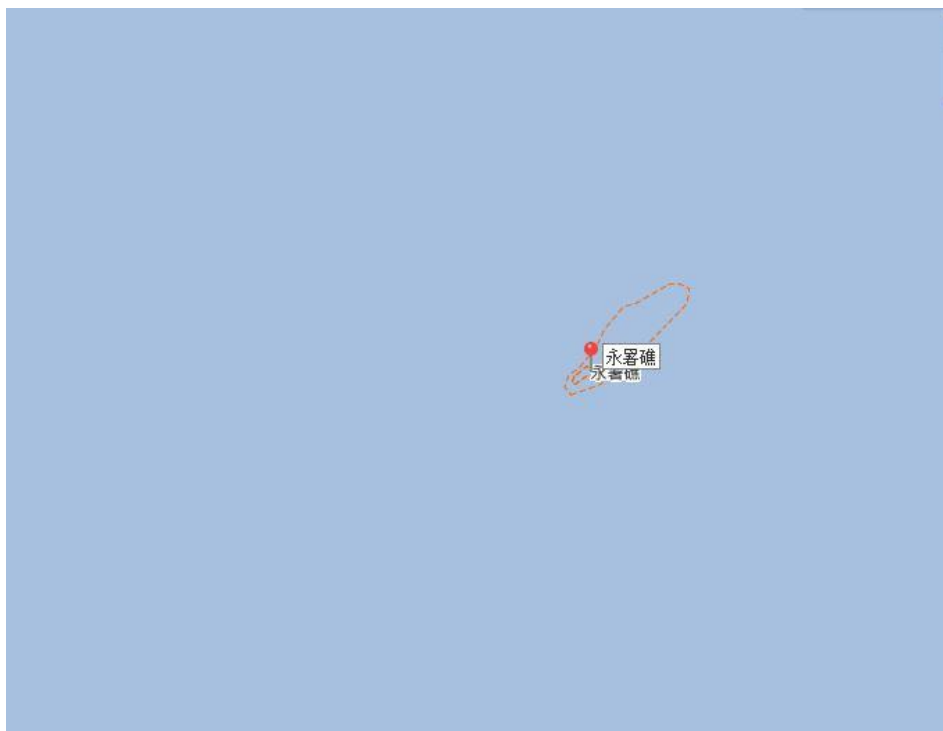


图 1-2 永暑礁海域示意图

由图可知，永暑礁海域附近较为开阔，附近岛礁较少，附近海域开阔，风对波浪影响较大。

1.3 研究现状

1.3.1 国内波浪统计分布分析方法

南京水利科学研究院的杨正己等人^[2]根据南山开发公司提供的赤湾港波高资料对赤湾港波高、波周期等进行统计分析。对波高的分布运用瑞利分布进行描述。其分布函数为

$$F\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right] \quad (1-1)$$

概率密度函数为

$$f\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi}{2}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right] \quad (1-2)$$

实践证明瑞利分布与实测资料符合度良好，同时，采用魏伯尔分布形式进行补充。其分布形式为

$$F\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \exp\left[-A\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^B\right] \quad (1-3)$$

$$f\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = AB \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{B-1} = \exp \left[-A \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^B \right] \quad (1-4)$$

其中 A、B 分别为系数，由实测资料确定。并且两者的关系如下

$$A = \Gamma^B \left(1 + \frac{1}{B}\right) \quad (1-5)$$

Γ 为伽马函数。

瑞利分布是目前对深水情况下研究波浪较为常用的方法，本文下一章将对瑞利分布作一个较为详尽的介绍。

同时利用魏伯尔分布对周期进行分析，步骤与波高分布分析相似，就不作赘述。

根据资料绘制波高与周期的联合概率分布，分别求出波高的上下限以及得出两者的联合分布图，如下

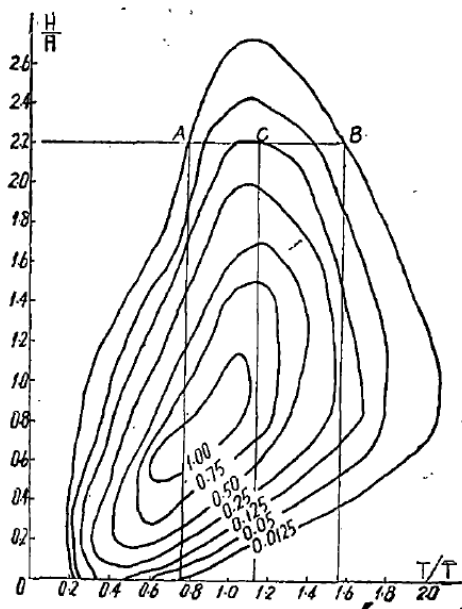


图 1-3 波高——波周期联合概率分布

该课题还对风浪进行风浪谱的分析，由于本文仅介绍目前对波浪、周期等的研究现状，因此不在此赘述。

根据以上研究得出波高、周期各自按照年、季、月的分布概率图以及两者的联合分布图，大波高所对应的周期为 1.15 倍平均周期。本文对波高及周期的研究方法和步骤与该项研究相似，但是会对具体步骤进行一定程度的完善，利用 matlab 数学分析工具可以更加快捷、全面地进行数据的统计分析，提高工作效率。

1.3.2 永暑海区波浪要素变化特征分析

海军南海舰队、海洋水文气象中心的王婷婷等人^[3]利用永暑礁测站 1988-2009 年共 22 年的波浪实测资料，对永暑礁的波浪要素进行统计分析，包括波浪的基本特征、变化规律、风与浪的相关性等。

绘制该海区年、冬季、夏季及转换季节的风向、浪向及强浪向频率玫瑰图，分析风浪向、风向的频率分布情况与两者之间的相关性。累年最大波高月际变化基本特征为冬季最大，春季最小，夏季居中。月平均变化曲线变化明显，两峰两谷型周年变化。

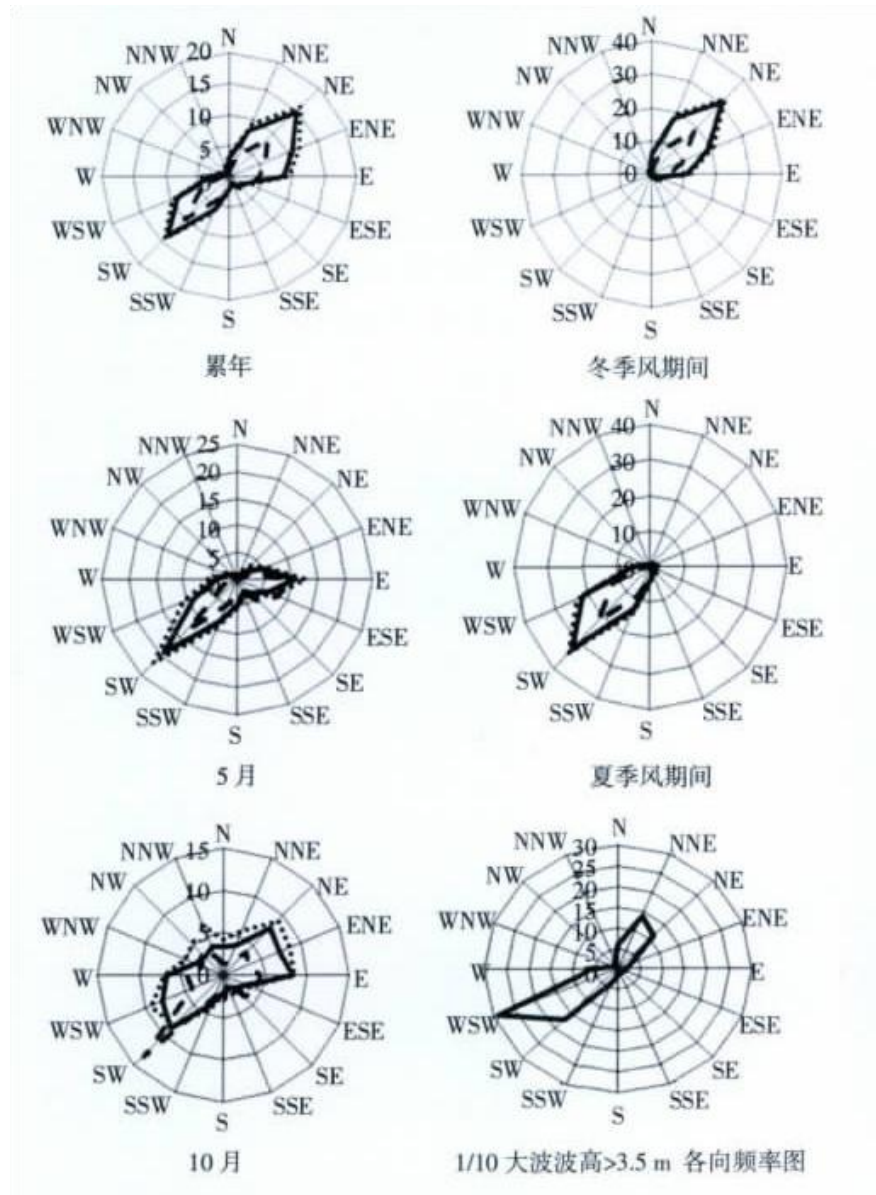


图 1-4 浪向风向及强浪向频率玫瑰图

根据资料统计，累年最大波高峰值是 1997 年的一组数据，为 8m，浪向是 WSW，各向最大波高分布在 4.3m~8m 之间。冬季各向最大波平均波高曲线与累年最大波平均波高曲线相似。

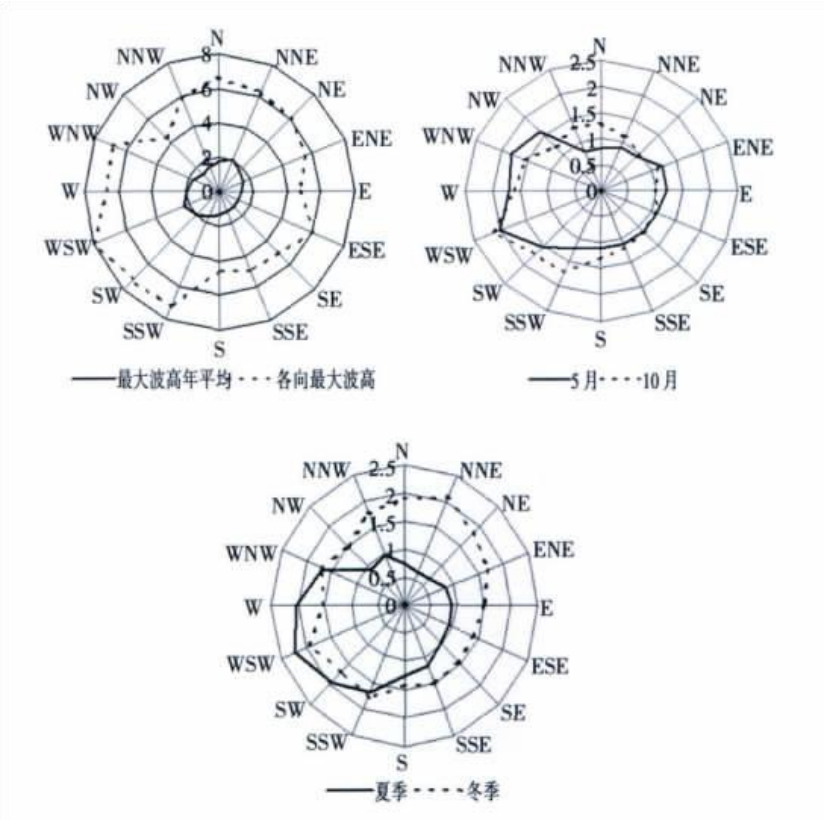


图 1-5 最大波高玫瑰图

通过绘制波高周期的年平均散射图反映实际观测期间海面的平均状态，波高0.5 ~ 1.5 m及其相应4 ~ 5 s周期的海浪出现次数最多，为10.6 %，即波高0.5 ~ 1.5 m，周期4 ~ 5 s 年平均出现38.7天。海浪出现的波陡多数是在0.07 ~ 0.025的范围内。

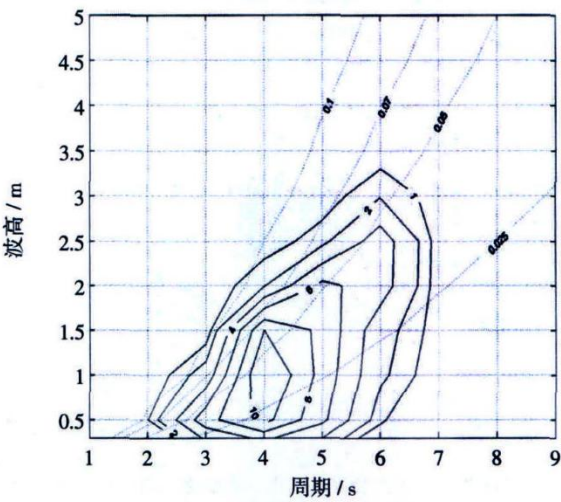


图 1-6 波高周期年平均散射图

得出以下结论：

永暑礁海区主要受季风影响，风浪为主，占 76%，涌浪占 24%；东北季风期浪向主要是 NNE~ENE，西南季风期浪向以 SSW~WSW 为主；5 月和 10 月为季风转换季节，风小浪小，浪向以 EN 和 SW 为主，涌浪频率略有增大。

海区各月的波高以轻浪和中浪为主，年平均波高为 1.2 m，最大波高为 8 m，年平均周期为 4.5 s，最大周期为 8.4 s，各向平均周期变化不大；强浪向主要集中在 WSW、SW 和 NNE、NE 向。

海区的波高具有一年的变化周期，西南季风期的波高具有 3~6 年的周期变化。

1.4 数据来源

本文应用 ECMWF 波浪资料，计算工程附近海域常年波浪。此模型数据 The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 组织 15 国研发得到。后报研究均采用深水的第三代波浪数学模型，精度为 $0.703125^{\circ}\text{N} \times (0.696--0.702)^{\circ}\text{E}$ ，6 小时 1 次。资料为 1979 年~2015 年的永暑礁海区数据。

1.5 本文研究技术路线

对永暑礁 37 年的波浪数据进行分年、季、月的整理，用 matlab 将整理好的数据导入，进行统计分析，具体步骤如下：

(1) 通过公式

$$H_s = 4.0 \times \sqrt{ETOT} \quad (1-6)$$

算出有效波高，并运用 matlab 将数据放在一个表格中。

(2) 通过公式

$$\bar{T} = \frac{T_p}{1.05} / 1.15 \quad (1-7)$$

计算周期，并运用 matlab 将其数据放在一个表格中。

(3) 用 matlab 统计得出各波向的数量，分为 16 个组，每组的间隔为 22.5° ；将数据放在一个表格中。

(4) 运用 matlab 的 plot3 命令建立波高与波向、波高与周期的联合分布，分别绘制年、季的联合分布立体图及平面图。分析强浪与常浪的波高、周期特征。

(5) 运用 matlab 的 bar 命令绘制波高、周期、风速、主波向的逐月时间过程曲线图，分析其曲线特征和趋势。

(6) 建立波高与风速的关系，绘制两者的联合分布图，建立周期与波高的关系，建立周期和波高的联合分布图，分析它们的变化规律。

(7) 运用 matlab 筛选大浪数据，将数据制成表格，按照年、季、月变化绘制曲线图，分析大浪特征以及若干年限的波高重现期，预测其发展趋势。

1.6 论文结构

本文总共分为五章。

第一章主要概述海洋波浪研究的背景和方法，同时简述永暑礁海区波浪的研究现状等。

第二章首先简单介绍本文数据处理软件 matlab，主要包括本文所用到的数据处理功能，其次介绍波高、周期、波向、风速等的定义和分析方法，最后简单介绍瑞丽分布以及魏伯尔分布。

第三章针对永暑礁海区的波浪进行年、季特征分析，包括波高与波向的联合分布、波高与周期的联合分布、强浪与常浪特征。

第四章分析波浪时间（逐月）变化规律，包括

- (1) 波高、周期、风速、主波向的逐月时间过程；
- (2) 波高与风速关系；
- (3) 周期与波高关系；

并绘制相应的联合分布图以分析其特征。

第五章主要对大浪长期变化分析，发现其变化特征与趋势，通过计算若干年重现期波高分析波浪趋势。

本文采用统一单位：

波高——m 风速——m/s

周期——s 波向——°

概率——%

第二章 基础理论与方法

2.1 随机波理论简介

2.1.1 海洋波浪的随机特征

在实际的海洋中，波浪并非确定性意义上的规则波，而是随机的，即在一定时间、地点内，波浪的出现与否以及大小完全是随机的，预先无法准确预知。在数学上，它是属于随机范畴的，应该采用概率统计的方法加以分析。这里以波高为例，通过一段时间的观测，可得到一组确定的数据，然而数据之间各不相同，即每次观测的结果彼此不相同，是随机变化的。这种变化必须用随机函数，也叫随机过程，加以描述。

观测随机过程所得的结果叫做样本函数，它是确定的非随机函数，但各个现实各不相同。因此，为了得到随机过程的统计特征，必须对它作大量的 n 次独立观测。

如图2.1.1，在同一条件的海域，布置 N 个同一类型的波高仪，可同时测得 n 个记录 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ ，得到 n 个现实（或 n 个样本函数），总称为总体[或样集 X

(t)]。在某一时刻 t_1 ，可读得各样本的瞬时波面高度 $x_1(t_1), x_2(t_1), \dots, x_n(t_1)$ 它们是一组随机变量。在时刻 $t_1 + \tau$ ，可得另一组随机变量 $x_1(t_1 + \tau), x_2(t_1 + \tau), \dots, x_n(t_1 + \tau)$ ，以此类推。因此也可以这么来定义随机函数：对自变量的每一个给定值（例如 $t = t_1$ ），函数 $X(t)$ 的值（与 $t = t_1$ 相对应的每一个截面）为随机变量，这样的函数称为自变量 t 的随机函数。也就是说，随机函数是随机变量随时间的变化，是随机变量系的推广，也就是随机过程。

随机过程有各种不同类型，在研究海浪中，应用最广泛的是平稳随机过程，它的特点是过程的统计特征（平均振幅，方差等）不随时间坐标原点的推移而变化，即某时刻 t 的统计特征与时刻 $(t_1 + \tau)$ 相吻合。此外，在一般情况下，海浪作为一个随机过程具有各态历经性，由于各态历经性，过程中每一个变量的期望值，与其沿时间的平均值相等，即一个充分长时段的现实能替代同一时段现实的总体^[4]。

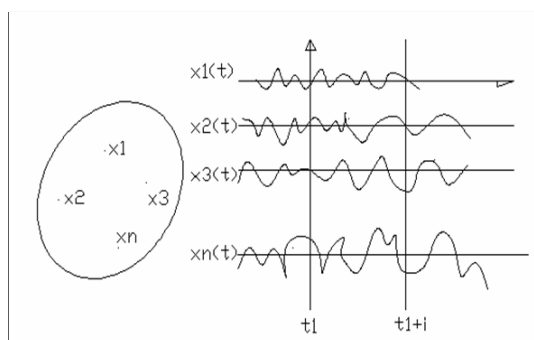


图 2-1 随机海浪

2.2 随机波统计理论基础

2.2.1 波高、周期的定义

波浪的尺度常用波高、周期表示。对于不规则波形，如何定义波高、周期呢？现有多种定义方法。通常采用上跨（或下跨）零点法。以上跨零点法为例，取平均水位为零线，把波面上升与零线相交的点作为一个波的起点。波形不规则地振动降到零线以下，接着又上升再次与零线相交，这一点作为该波的终点（也是下一个波的起点）。如横坐标是时间，则两个连续上跨零点的间距便是这个波的周期；若坐标轴是距离，则次间距是这个波的波长。把这两点间的波峰最高点到波谷最低点的垂直距离定义为波高。对于中间可能存在的小波动，只要不与零线相交即不予考虑。

现按上跨零点法从图2-2的波浪记录上读得各个波高和周期，从图中直观可以看出各波高值相差很大。那么如何描述这个波系的大小呢？一般有两种方法：一是对波高、周期等进行统计分析，采用有某种统计特征值的波作为代表波的特征波法；二是用谱表示。本文采用前一种方法。

对于特征波的定义，欧美国家多采用部分大波的平均值法，俄罗斯等采用超值累积率法，我国则两者兼用。通常采用大约连续观测的100个波作为一个标准段进行统计分析^[4]。

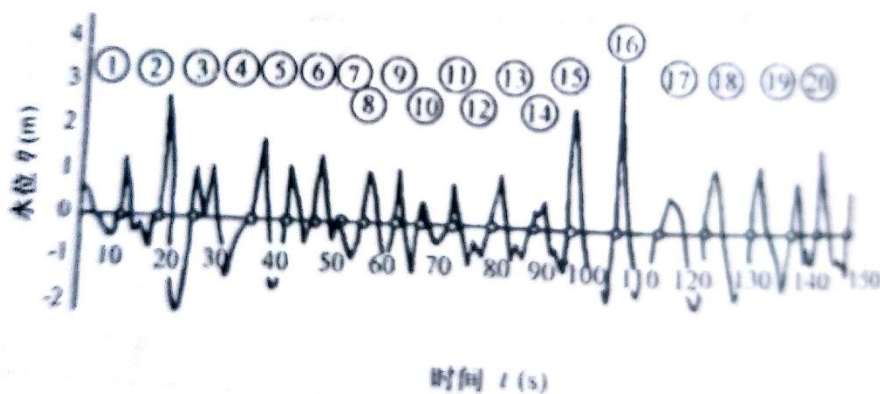


图2-2波浪观测记录实例（按上跨零点法定义波浪）

2.2.2、按部分大波平均值定义的特征波

（1）最大波 H_{max} 、 T_{max} ：波列中最大的波浪。

（2）十分之一大波 $H_{1/10}$ 、 $T_{1/10}$ ：波列中各波浪按波高大小排列后，取前面 $\frac{1}{10}$ 个波的平均波高和平均周期。

（3）有效波（三分之一大波） $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ ：按波高大小次序排列后，取前面 $\frac{1}{3}$ 个波的平均波高和平均周期。

（4）平均波高 H 和平均周期 T 波列中所有波高的平均值和周期的平均值

$$H = \frac{\sum H_i}{N} \quad (2-1)$$

$$T = \frac{\sum T_i}{N} \quad (2-2)$$

（5）均方根波高 H_{rms} ,

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum H_i^2} \quad (2-3)$$

这些特征波中最常用的是有效波，西方文献中泛指海浪的波高、周期时多指 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ 。

国际水利研究协会（IAHR）编写的波浪要素参素表统一了不规则波浪的术语、定义、和符号。例如建议采用 $H_{1/3, u}$ 、 $H_{1/3, d}$ 分别表示按上跨零点法和下跨零点法定义的有效波高、余类推。本文采用上跨零点法。

2.3 波高分布

2.3.1 瑞利分布

Longuet-Higgins 在线性、窄谱的假设下,采用载波方法导出了波高服从瑞利分布。

$$f\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi}{2} \frac{\bar{H}}{H} \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right)$$

其概率密度函数为：：

(2-4)

$$F\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right)$$

将上式积分得其累积分布函数：

(2-5)

此分布适用于深水中海浪,对于风浪与涌浪也符合较好,但当海浪是由两个波系迭加而形成的混合浪时,其波高分布就不服从瑞利分布。另外,浅水区此结果也不能适用。

2.3.2 格鲁霍夫斯基分布

苏联格鲁霍夫斯基根据实测料,在考虑水深因子情况下,提出了如下分布:

$$f\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi}{2(1-H^*)(1-0.4H^*)} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{1+H^*}{1-H^*}} \exp\left(-\frac{\pi}{4(1+0.4H^*)} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{2}{1-H^*}}\right)$$
(2-6)

$$F\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \exp\left(-\frac{\pi}{4\left(1+\frac{H^*}{\sqrt{\pi}}\right)} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{2}{1-H^*}}\right)$$
(2-7)

式中 $H^* = \bar{H}/d$

2.3.3 魏伯尔分布

魏伯尔分布:二参数的魏伯尔分布来逼近,即:

$$f\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = AB \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{B-1} \exp\left(-A\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^B\right)$$
(2-8)

式中:

$F\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)$ 为累积率函数;

$f\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)$ 为概率密度函数;A,B 为两个待定量。

对于深水稳定状态,波浪形态一定的波浪,A、B 可视为常数,在浅水中时其与水深因子 H^* 有关,可由 H^* 分组资料确定。

式(2-8)两边取对数，则有：

$$\ln\left(\ln\frac{1}{F}\right) = \ln A + B \ln\left(\frac{H}{H}\right) \quad (2-9)$$

式中 A, B 为待定系数，可由实测资料的统计量 H^* 及其累积率函数 F 确定。

2.3 Matlab 数学分析软件简介

Matlab 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件，用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境，主要包括 MATLAB 和 Simulink 两大部分。

它将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中，为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案，并在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言（如 C、Fortran）的编辑模式，代表了当今国际科学计算软件的先进水平。

本文主要运用 matlab 软件对永暑礁海区 37 年的模拟数据进行归类分析，运用 bar、mesh、plot 等命令进行概率分析并制成图表，以更直观的方式把波浪的各个特征呈现出来，同时结合 Excel 等办公软件，可以更好地完善展示效果。

第三章 波浪的年、季特征分析

3.1 波高、周期的年、季平均值分布

由表 3-1 和图 3-1 可以看出，年平均有效波高呈现上升的趋势，其中最大值为 1.49m，出现在 2011 年，最小值为 1.12m，出现在 1998 年。春季平均有效波高呈现上升趋势，其中最大值为 1.14m，出现在 2011 年，最小值为 0.68m 出现在 1992 年。夏季平均有效波高呈现下降趋势，其中最大值为 1.51m，出现在 1990 年，最小值为 0.56m，出现在 1998 年。秋季平均有效波高呈现上升趋势，其中最大值为 1.66m，出现在 2007 年，最小值为 1.02m，出现在 1997 年。冬季平均有效波高呈现上升趋势，其中最大值为 2.19m，出现在 2011 年，最小值为 1.40m，出现在 1979 年。

由表 3-2 和图 3-2 可以看出，平均周期年、季分布均呈现上升趋势。年平均最大值为 6.5s，出现在 2011 年，最小值为 5.5s，出现在 1979 年。春季平均最大值为 6.2s，出现在 2011 年，最小值为 4.7s，出现在 1983 年。夏季平均最大值为 5.7s，出现在 2004 年，最小值为 4.3s，出现在 1998 年。秋季平均最大值为 7.3s，出现在 2007 年，最小值为 5.8s，出现在 1982 年。冬季平均最大值为 7.8s，出现在 2011 年，最小值为 5.9s，出现在 1979 年。

表 3-1 有效波高年、季平均值分布

年份	年	春季	夏季	秋季	冬季
1979	1.15	0.76	1.15	1.31	1.40
1980	1.18	0.78	1.06	1.19	1.69
1981	1.27	0.76	1.33	1.13	1.85
1982	1.23	0.74	1.37	1.04	1.79
1983	1.17	0.77	0.96	1.29	1.69
1984	1.29	0.78	1.43	1.15	1.81
1985	1.27	0.88	1.37	1.15	1.68
1986	1.34	0.97	1.26	1.25	1.90
1987	1.22	0.72	1.12	1.11	1.95
1988	1.26	0.91	0.87	1.50	1.77

第三章 波浪的年、季特征分析

1989	1.29	0.83	1.19	1.34	1.80
1990	1.32	0.82	1.51	1.27	1.66
1991	1.30	0.78	1.22	1.50	1.70
1992	1.30	0.68	1.22	1.64	1.68
1993	1.28	0.78	1.09	1.29	1.98
1994	1.28	0.88	1.25	1.47	1.50
1995	1.33	0.90	0.79	1.53	2.10
1996	1.27	0.99	0.87	1.34	1.89
1997	1.19	0.91	1.15	1.02	1.68
1998	1.12	0.95	0.56	1.34	1.63
1999	1.35	0.85	1.31	1.17	2.09
2000	1.31	0.89	1.22	1.38	1.77
2001	1.33	0.88	1.40	1.29	1.74
2002	1.29	0.83	1.47	1.22	1.63
2003	1.31	1.00	0.97	1.32	1.97
2004	1.33	0.96	1.31	1.32	1.73
2005	1.31	0.98	1.21	1.31	1.76
2006	1.35	0.95	1.32	1.21	1.92
2007	1.36	0.90	1.10	1.66	1.80
2008	1.35	1.05	0.95	1.35	2.06
2009	1.45	1.06	1.27	1.65	1.83
2010	1.16	0.99	0.78	1.22	1.65
2011	1.49	1.14	1.12	1.54	2.19
2012	1.30	0.88	1.38	1.26	1.69
2013	1.34	0.78	1.14	1.44	1.99
2014	1.25	0.76	1.13	1.18	1.95
2015	1.24	0.84	1.09	1.16	1.87

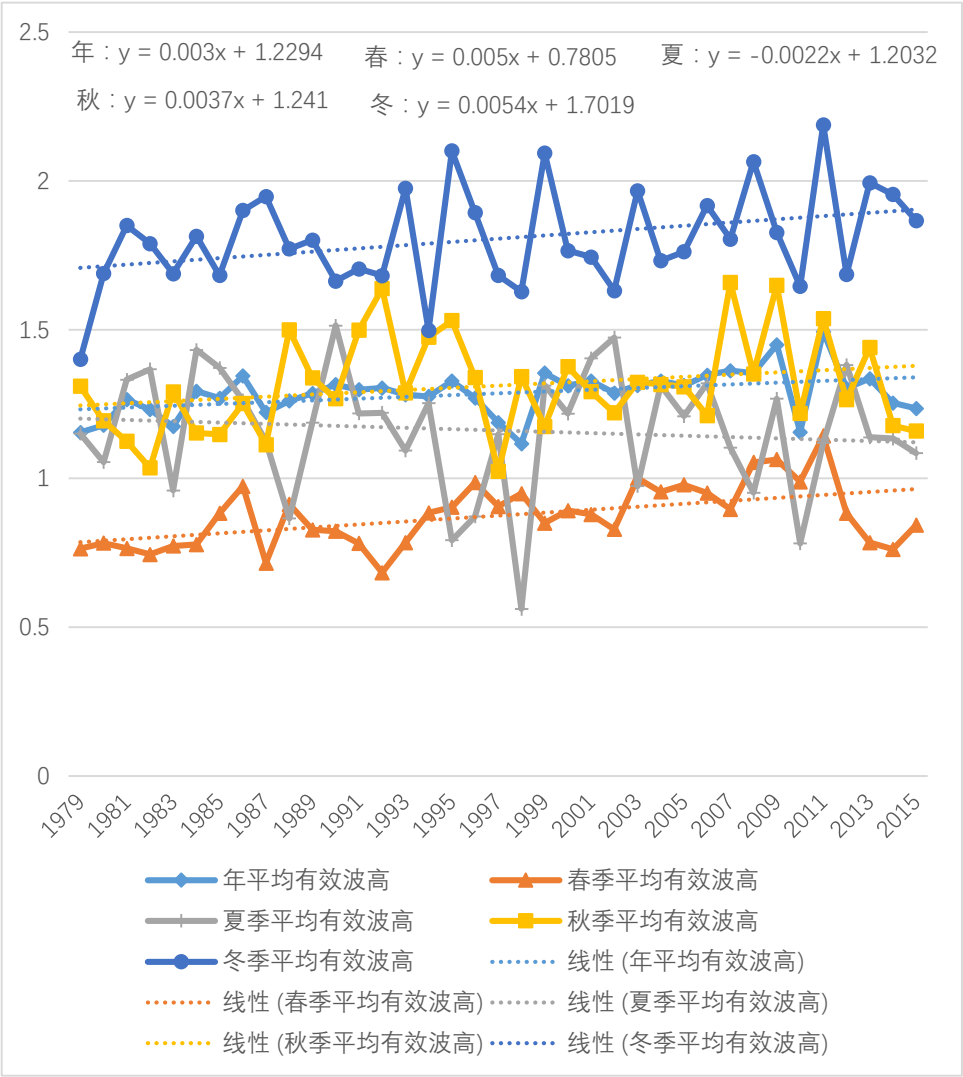


图 3-1 有效波高年、季平均值分布

表 3-2 周期年、季平均值分布

年份	年	春季	夏季	秋季	冬季
1979	5.5	5.0	5.1	6.0	5.9
1980	5.7	5.1	5.0	6.2	6.4
1981	5.7	4.9	5.3	6.2	6.6
1982	5.7	5.0	5.4	5.8	6.6
1983	5.5	4.7	4.8	6.1	6.4
1984	5.8	5.1	5.5	5.9	6.6
1985	5.8	5.4	5.4	6.1	6.4

第三章 波浪的年、季特征分析

1986	5.9	5.1	5.3	6.6	6.8
1987	5.6	4.7	5.1	6.0	6.7
1988	5.7	5.1	4.7	6.3	6.7
1989	5.8	5.4	5.2	6.2	6.6
1990	5.7	4.9	5.6	6.1	6.2
1991	5.9	4.8	5.2	7.0	6.4
1992	5.9	4.9	5.3	7.0	6.4
1993	5.9	5.0	5.1	6.6	7.0
1994	5.9	5.3	5.4	6.6	6.4
1995	6.1	5.2	4.8	7.2	7.2
1996	6.3	6.0	4.8	7.0	7.1
1997	5.8	5.2	5.4	6.0	6.6
1998	5.6	4.9	4.3	6.8	6.6
1999	6.4	5.9	5.5	6.6	7.6
2000	6.2	5.8	5.4	6.6	7.1
2001	6.2	5.5	5.5	6.7	7.0
2002	5.9	5.1	5.7	6.6	6.4
2003	6.0	5.6	5.0	6.6	6.9
2004	6.2	5.8	5.7	6.5	6.8
2005	6.3	5.6	5.6	6.9	7.0
2006	6.2	5.6	5.6	6.3	7.2
2007	6.3	5.7	5.5	7.3	6.6
2008	6.3	5.9	5.2	6.7	7.5
2009	6.3	6.0	5.5	6.9	6.7
2010	5.9	5.4	5.0	6.9	6.4
2011	6.5	6.2	5.4	6.7	7.8
2012	6.1	5.6	5.7	6.3	6.9
2013	6.1	5.3	5.4	6.6	7.0

2014	6.1	5.2	5.4	6.7	7.2
2015	5.8	5.2	5.3	6.2	6.7

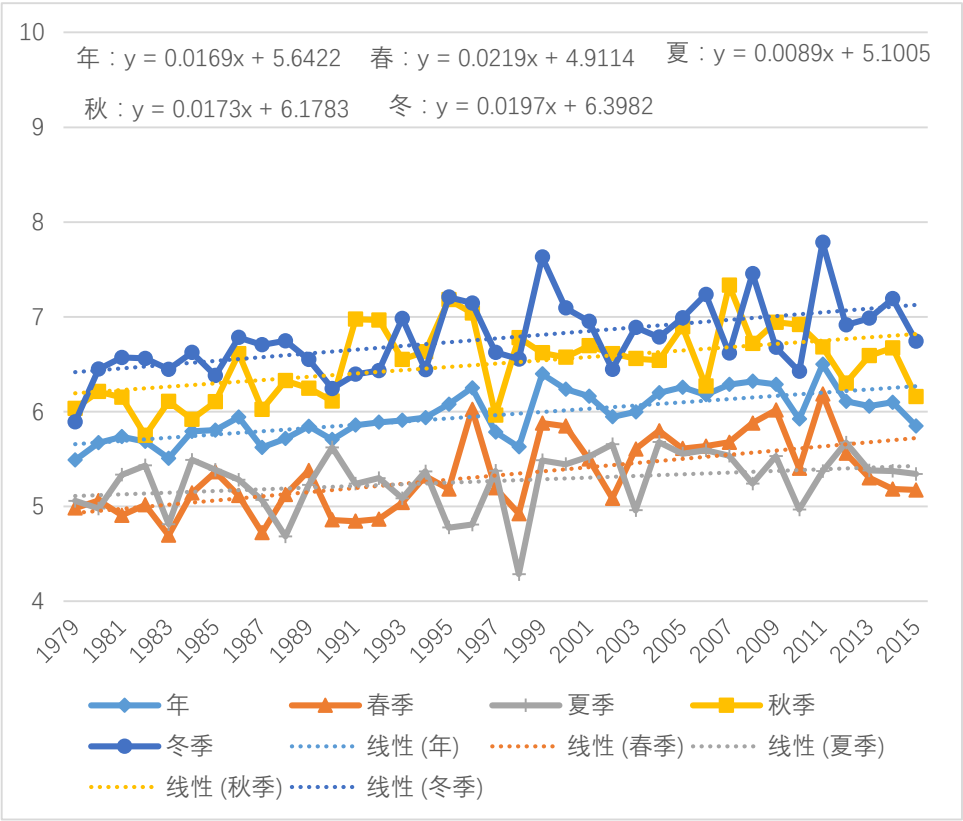


图 3-2 周期年、季平均值分布

3.2 波高、周期特征分析

把永暑礁海区 37 年波浪数据分年、季进行统计。通过 matlab 计算分析。主要方法是把波高从 0 到最大值每隔 0.5m 作为一个波高区间，得到 N 组数据，统计在每个波高区间的波数及其占总波数的比例。利用 matlab 的 hist 命令对波数进行概率统计分析，再利用 bar 命令导出波高概率分布概率图。图中 x 轴为有效波高，y 轴为相应的概率值。本文中春季指 3、4、5 月份，夏季指 6、7、8 月份，秋季指 9、10、11 月份，冬季指 12、1、2 月份。平均周期统计同理。

对比图 3-3~3-7，可以看出永暑礁年有效波高频率随波高的增加而逐渐减小。春季有效波高总体上集中在较小的区间，在 0.25m 处发生突变，0.25m~0.75m 占比最大，达到 50%，说明永暑礁海区春季波高普遍较低，春季有效波高最小值是 0.18m，最大

值为 5.08m。夏季有效波高的概率从小到大逐渐呈减小的趋势，下降较为均匀，波高集中的区间是 0.25m~2.25m，其中最小值为 0.13m，最大值是 5.11m。秋季有效波高最为集中的区间为 0.75m~1.25m，占比为 0.325 左右，相对夏季波高明显增大，其中最小值是 0.18m，最大值为 5.23m。冬季有效波高范围相对较宽，主要集中于 1.25m~1.75m 的区间，在全年中波高较大者居多，因此可以知道永暑礁海区冬季波高相对较大，最小值 0.13m，最大值为 6.39m。全年过程中，有效波高最大为 6.39m，出现在冬季。

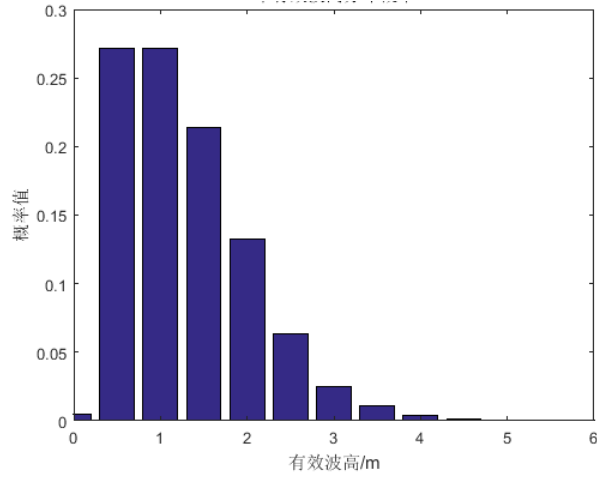


图 3-3 年有效波高概率分布

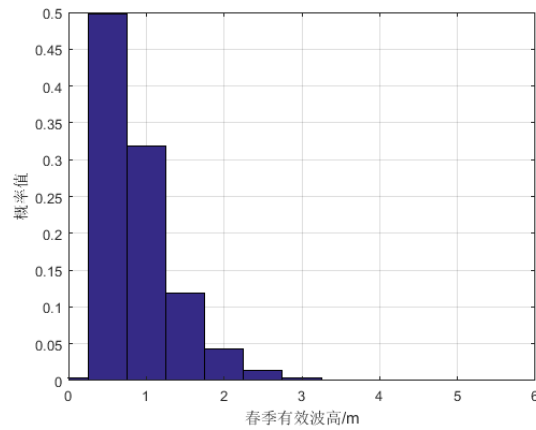


图 3-4 春季有效波高概率分布

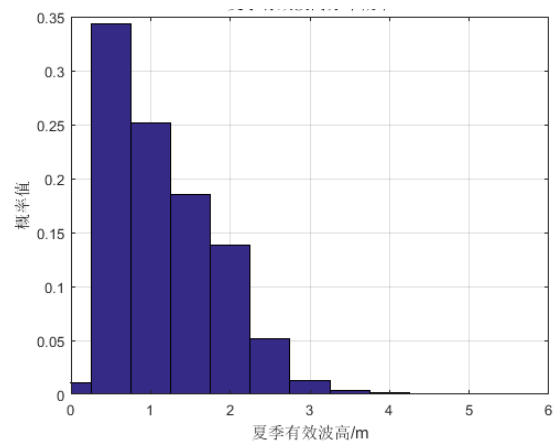


图 3-5 夏季有效波高概率分布

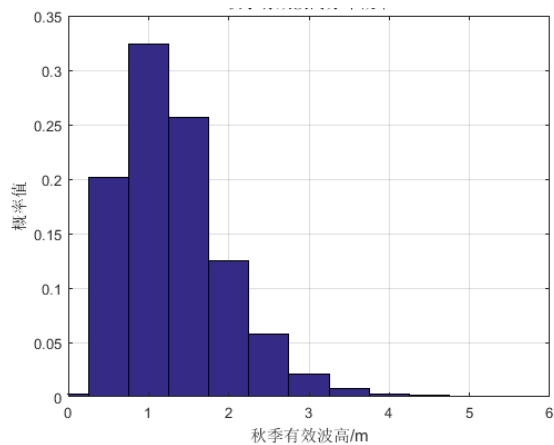


图 3-6 秋季有效波高概率分布

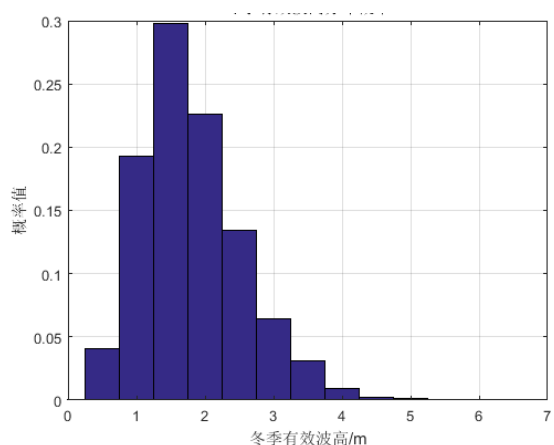


图 3-7 冬季有效波高分布

由图 3-8~3-12 分析可知：永暑礁海区波浪平均周期分布为单峰结构，即中间高两

边低。年平均周期概率峰值在 5.5s 左右，较为集中的区间为 5s~6s，出现概率超过 10% 的 4.5s~6s 的区间（含 5 个小区间），其中最小周期为 2.5s，出现在秋季，最大周期为 12.0s，出现在秋季。春季平均周期概率峰值出现在 4.3s~4.5s 的区间，概率值超过 20%，概率值超过 10% 的区间为 3.8s~6.3s（含 3 个小区间），其中最小值为 2.6s，最大值为 10.8s。夏季平均周期最为集中的区间是 4.8s~5.3s，出现概率超过 10% 区间为 3.8s~6.8s（含 6 个小区间），说明夏季周期概率分布相对其他季节较为分散，其中最小值为 2.7s，最大值为 9.3s。秋季平均周期概率峰值出现在 5.8s~6.3s 的区间，出现概率超过 10% 的区间为 5.3s~7.8s（含 5 个小区间），最小值为 2.5s，最大值为 12.0s。冬季平均周期概率峰值出现在 6.3s~6.8s 的区间，出现概率超过 10% 的区间为 5.3s~7.8s（含 5 个小区间），最小值为 2.6 s，最大值为 11.2 s。

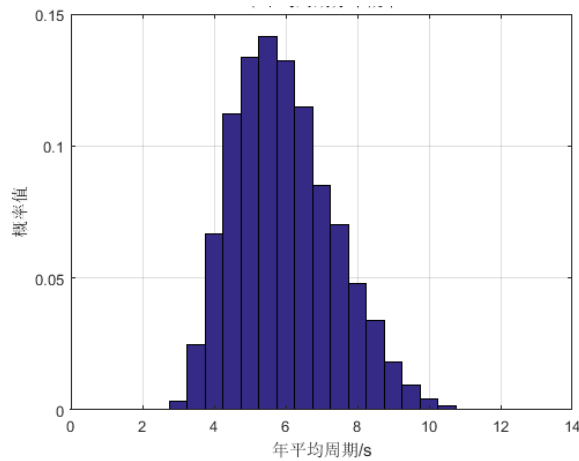


图 3-8 年平均周期分布

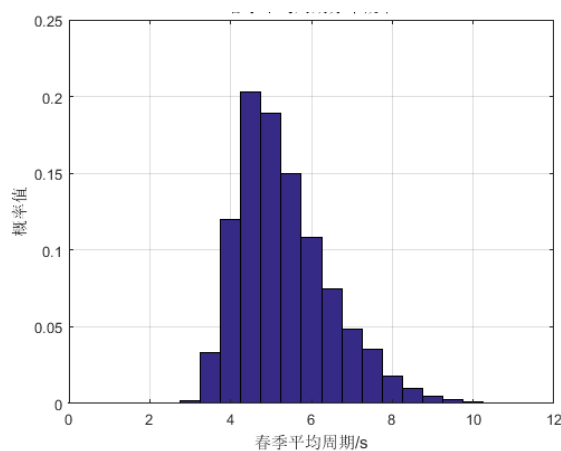


图 3-9 春季平均周期分布

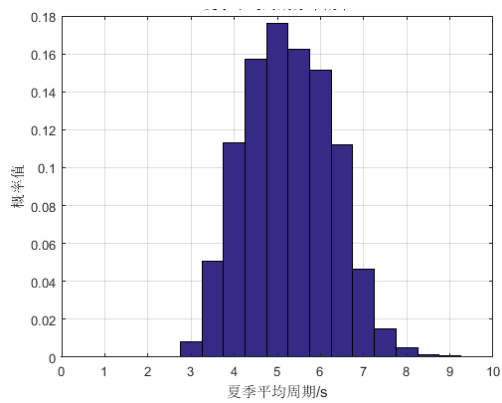


图 3-10 夏季平均周期分布

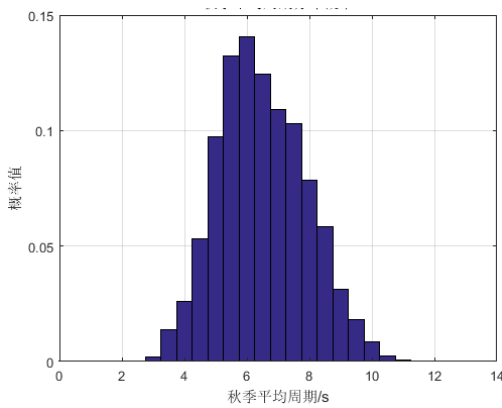


图 3-11 秋季平均周期分布

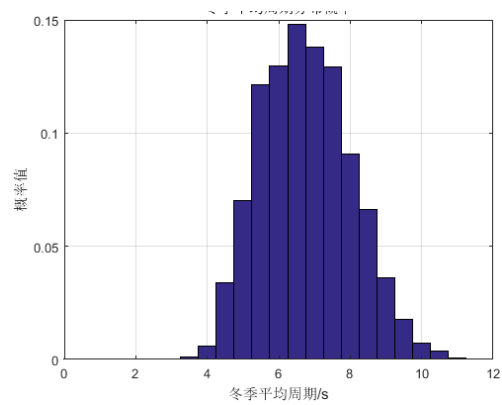


图 3-12 冬季平均周期分布

3.3 波向（来向）特征分析

由于给出资料的波向为波浪去向的数据，因此要对数据进行修整，具体的做法为全部数据减去 180° ；即可得到波浪来向的数据，同时，如果以正北方向为 0° ；那么 N 的方向角度区间为 $-11.25^\circ \sim 11.25^\circ$ ；因此要对大于 348.75° 的波向进行处理，具体方法为将其大于 348.75° 的波向数据减去 360° ；使其成为负值，所在区间为 $-11.25^\circ \sim 0^\circ$ 。将 360° 分为 16 个方向，从正北方向顺时针依次分别为：N、NNE、NE、ENE、E、ESE、SE、SSE、S、SSW、SW、WSW、W、WNW、NW、NNW。运用 matlab 的 rose 工具对数据进行处理，可以得出图 3-14~3-18。

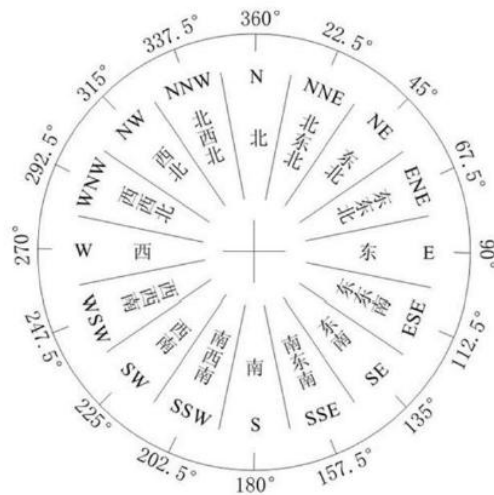


图 3-13 波向方位示意

对比表 3-3 和图 3-14~3-18 可知，年波向波数最高的为 NEN 方向（东北偏北），次之为 WSW 方向（西南偏西），两者总数占比接近 49%，说明永暑礁海区波向主要为东北向以及西南向。春季占比最大的为东北向（NE），其次为东北偏东向（ENE），说明春季波向主要为东北向，同时有少部分的西南方向的波向。夏季的波向分布较为集中，超过 68% 的波向集中于西南偏西向（WSW）少部分分布在西南方向（SW）和正西方向（W）。秋季波向相对分散，占比最大的为东北偏北方向（NNE），西南偏西方向（WSW）次之。冬季波向主要集中于东北偏北（NNE）和东北向（NE），两者占比超过 86%。整体上来看，冬、夏两季的波向分布几乎截然相反，结合周兆黎等人^[5]于 2012 年发表在《广东气候》的论文《南沙永暑礁近海面风的特征分析》一文得到的统计图，如图 3-19，对比发现永暑礁海区的波向跟盛行风向有着极为密切的关系，在冬

季盛行东北风，由于受到风向的影响，波向也为东北向，而夏季盛行风主要为西南风向，因此波向主要为西南方向。春秋两季为过度期，盛行风向不稳定，因此春秋两季的波向波动较大，没有冬夏两季那么集中。

表 3-3 年、季各波向数量统计表

年			春			夏			秋			冬		
波向	波数	概率	波向	波数	概率	波向	波数	概率	波向	波数	概率	波向	波数	概率
N	1596	3	N	172	1	N	32	0	N	1159	9	N	233	2
NNE	13531	25	NNE	1854	14	NNE	45	0	NNE	4639	34	NNE	6993	52
NE	10596	20	NE	3910	29	NE	73	1	NE	1833	14	NE	4780	36
ENE	5445	10	ENE	3612	27	ENE	162	1	ENE	451	3	ENE	1220	9
E	1735	3	E	1290	10	E	246	2	E	103	1	E	96	1
ESE	611	1	ESE	261	2	ESE	270	2	ESE	72	1	ESE	8	0
SE	338	1	SE	105	1	SE	196	1	SE	32	0	SE	5	0
SSE	318	1	SSE	62	0	SSE	202	1	SSE	52	0	SSE	2	0
S	300	1	S	81	1	S	188	1	S	31	0	S	0	0
SSW	540	1	SSW	165	1	SSW	302	2	SSW	72	1	SSW	1	0
SW	2406	4	SW	315	2	SW	1747	13	SW	344	3	SW	0	0
WSW	12807	24	WSW	1029	8	WSW	9270	68	WSW	2507	19	WSW	1	0
W	2188	4	W	408	3	W	761	6	W	1019	8	W	0	0
WNW	534	1	WNW	116	1	WNW	47	0	WNW	371	3	WNW	0	0
NW	500	1	NW	100	1	NW	53	0	NW	343	3	NW	4	0
NNW	611	1	NNW	136	1	NNW	22	0	NNW	440	3	NNW	13	0
total	54056	100	total	13616	100	total	13616	100	total	13468	100	total	13356	100

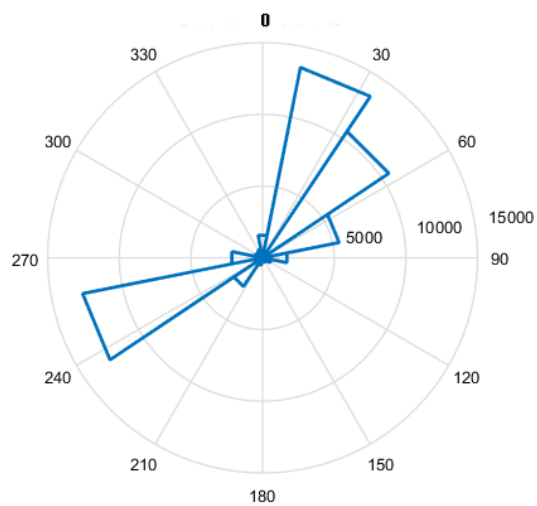


图 3-14 波向（来向）年分布

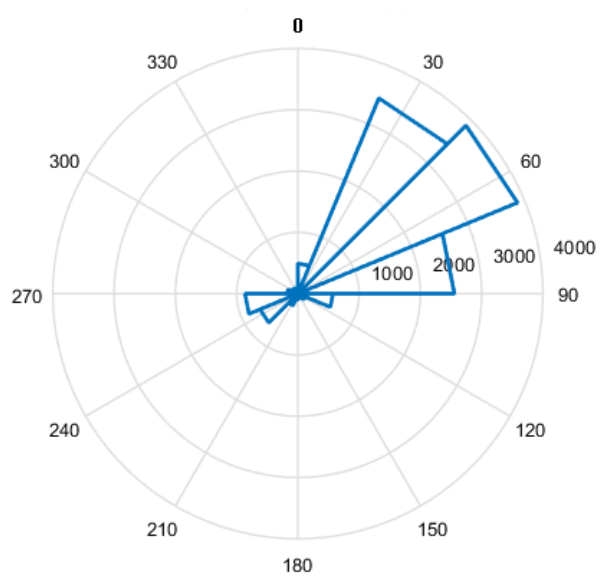


图 3-15 春季波向（来向）分布

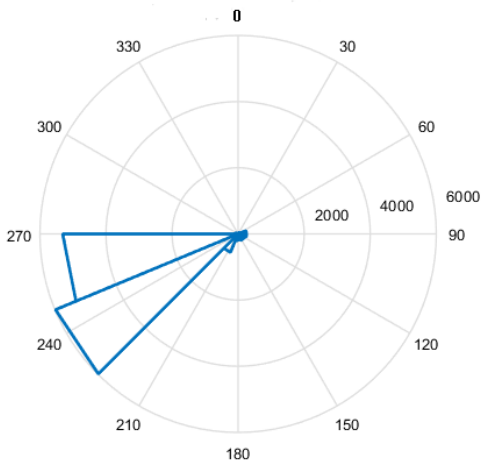


图 3-16 夏季波向（来向）分布

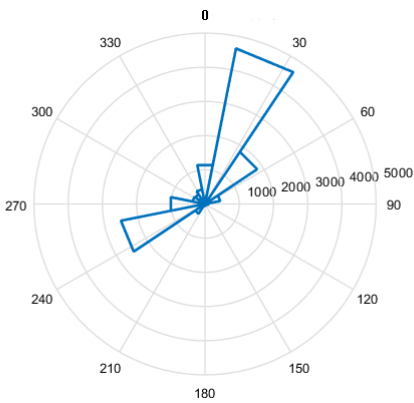


图 3-17 秋季波向（来向）分布

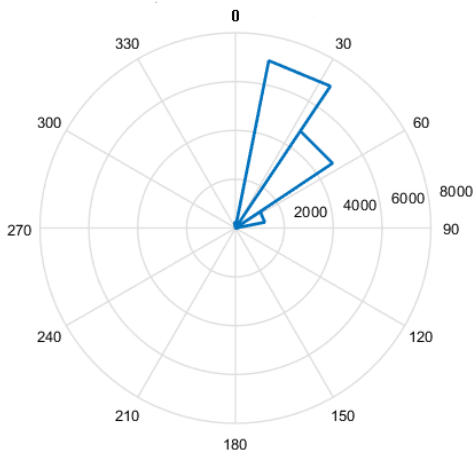


图 3-18 冬季波向（来向）分布

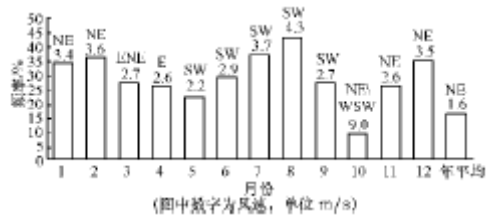


图 3-19 各月盛行风向频率及风速

3.4 波高与波向联合分布

由图 3-20~3-24 以及表 3-4~3-8 分析可知：永暑礁海区年波向出现较为集中的是 NNE、NE、WSW，波高主要是 0~3m。春季波向为 NE、ENE 方向，波高集中在 0~2m 的区间。夏季波向集中在 WSW、SW 方向，波高主要是 0~3m 的区间。秋季波向集中在 NNE、NE 方向，另有 WSW 方向，波高集中在 1~2m 的区间。冬季波向集中在 NNE、NE 方向，波高主要为 1~3m 的区间。

表 3-4 年有效波高和波向（来向）联合概率分布（%）

Hs/dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0~1	1.1	4.2	7.3	6.8	3.1	1.1	0.6	0.6	0.5	0.9	3.2	8.6	1.9	0.6	0.5	0.5
1~2	1.1	11.9	10.7	3.2	0.1	0	0	0	0	0.1	1.1	11.4	1.7	0.4	0.3	0.5
2~3	0.5	7.1	1.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0.1	3.5	0.4	0	0.1	0.1
3~4	0.2	1.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.1	0	0	0
4~5	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5~6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6~7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

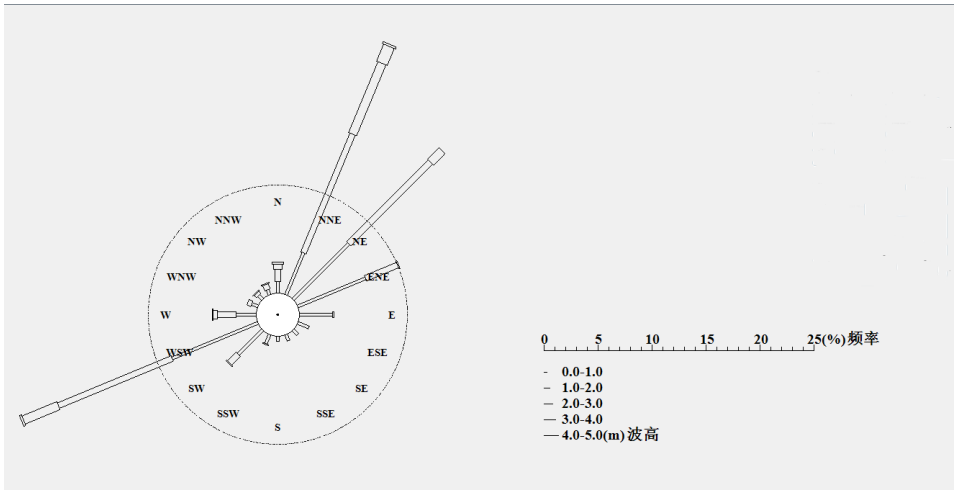


图 3-20 年有效波高和波向联合分布

表 3-5 春季有效波高和波向（来向）联合概率分布（%）

Hs/dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0~1	0.9	5.6	17.3	20.6	9.1	1.9	0.8	0.4	0.6	1.2	2.1	4.8	2.2	0.7	0.6	0.6
1~2	0.3	5.7	10.8	5.9	0.4	0	0	0	0	0	0.2	2.5	0.7	0.1	0.2	0.3
2~3	0	2	0.6	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.1	0	0	0.1
3~4	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4~5	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5~6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6~7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

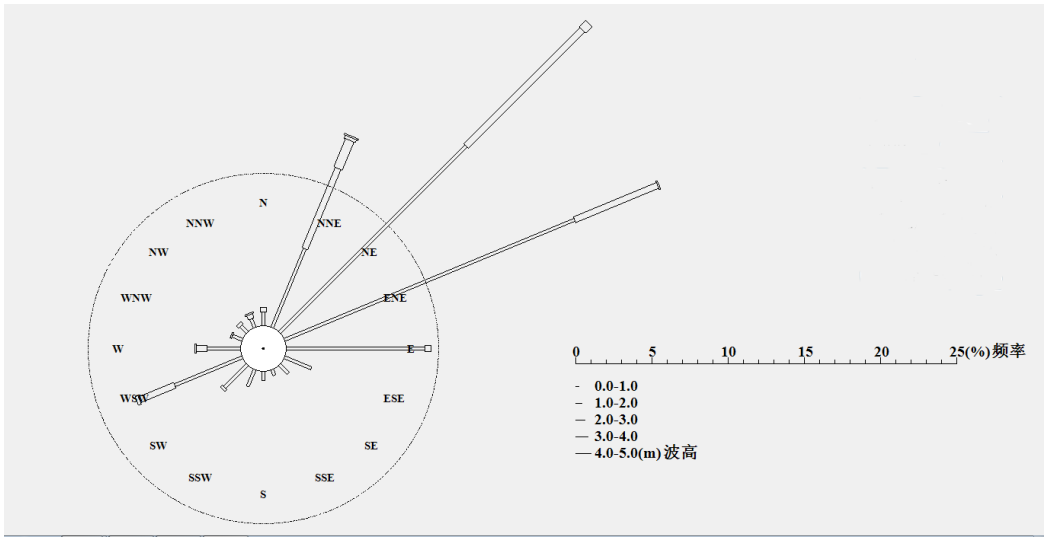


图 3-21 春季有效波高和波向（来向）联合分布

表 3-6 夏季有效波高和波向（来向）联合概率分布（%）

Hs/dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0~1	0.2	0.3	0.5	1.2	1.8	2	1.4	1.5	1.4	2.2	9.3	23.8	2.2	0.3	0.4	0.1
1~2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	3.4	32.6	2.2	0	0	0
2~3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	11	0.7	0	0	0
3~4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0.2	0	0	0
4~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0
5~6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6~7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

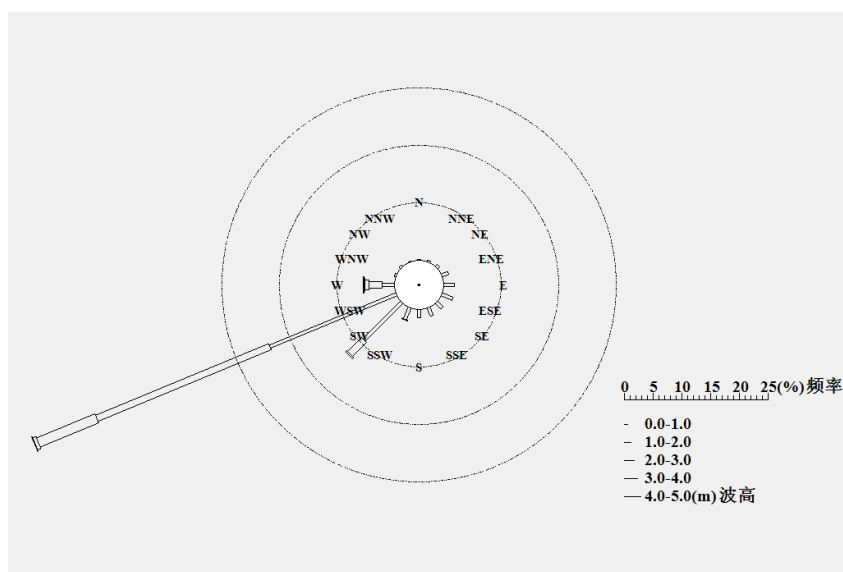


图 3-22 夏季有效波高和波向（来向）联合分布

表 3-7 秋季有效波高和波向（来向）联合概率分布（%）

Hs/dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0~1	3.1	8.9	5.9	2.1	0.7	0.5	0.2	0.3	0.2	0.4	1.2	5.4	2.9	1.3	1.2	1.3
1~2	3.6	19.4	7.2	1.2	0.1	0.1	0	0.1	0	0.1	1	10.1	3.7	1.2	1	1.5
2~3	1.5	5.4	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0.3	2.8	0.8	0.1	0.2	0.4

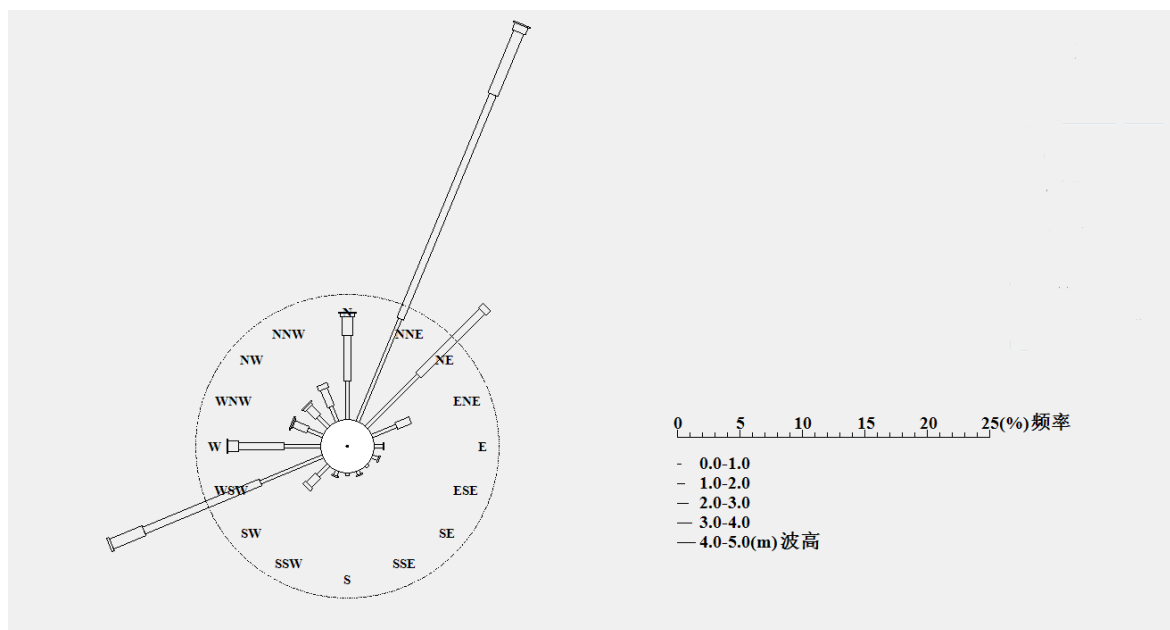


表 3-8 冬季有效波高和波向 (来向) 联合概率分布 (%)

[illegible]

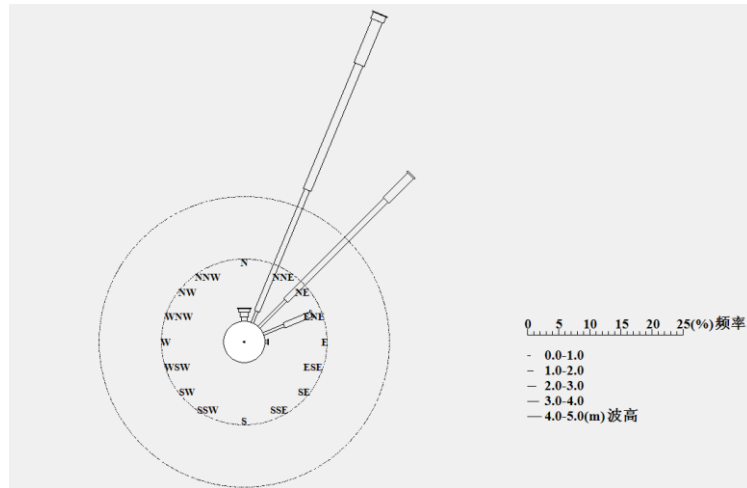


图 3-24 冬季有效波高和波向（来向）联合分布

3.4 波高与周期联合分布

由图 3-25~3-24 和表 3-9~3-13 分析可知：永暑礁海区有效波高出现的范围在 0~5m 之间，平均周期范围为 2~11s，联合分布出现频率最大的波高范围是 0~2m，相应的平均周期为 4~8s。春季有效波高出现的范围是 0~4m，平均周期出现的范围是 3~10s，联合分布出现频率最大的波高范围是 0~1.5m，相应的平均周期出现最高的范围是 4~7s。夏季有效波高出现的范围是 0~4.5m，平均周期出现的范围是 2~9s，联合分布出现频率最大的波高范围是 0~2m，相应的平均周期出现最高的范围是 3~7s。秋季有效波高出现的范围是 0~5m，平均周期出现的范围是 2~11s，联合分布出现频率最大的波高范围是 0~2m，相应的平均周期出现最高的范围是 4~9s。冬季有效波高出现的范围是 0~5m，平均周期出现的范围是 2~11s，联合分布出现频率最大的波高范围是 0~2m，相应的平均周期出现最高的范围是 4~9s。

表 3-9 年有效波高与周期联合概率分布（%）

Hs/Tz	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	total
0~0.5	0	0	0.1	3.9	6	1.7	0.3	0	0	0	0	0	0	12
0.5~1	0	0	0	1.6	13.3	9.8	3.6	1	0.1	0	0	0	0	29.4
1~1.5	0	0	0	0	2.4	12.5	6	3.1	1	0.1	0	0	0	25
1.5~2	0	0	0	0	0	3.7	8.5	3.5	1.5	0.3	0	0	0	17.5

2~2.5	0	0	0	0	0	0	3.8	3.6	1.3	0.6	0.1	0	0	9.4
2.5~3	0	0	0	0	0	0	0.2	2.1	1.3	0.4	0.1	0	0	4.1
3~3.5	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.9	0.3	0.1	0	0	1.6
3.5~4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.2	0	0	0	0.6
4~4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0.2
4.5~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0.1
5~5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5~6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6~6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5~7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	0	0	0.1	5.5	21.7	27.7	22.4	13.7	6.6	2.1	0.3	0	0	99.9

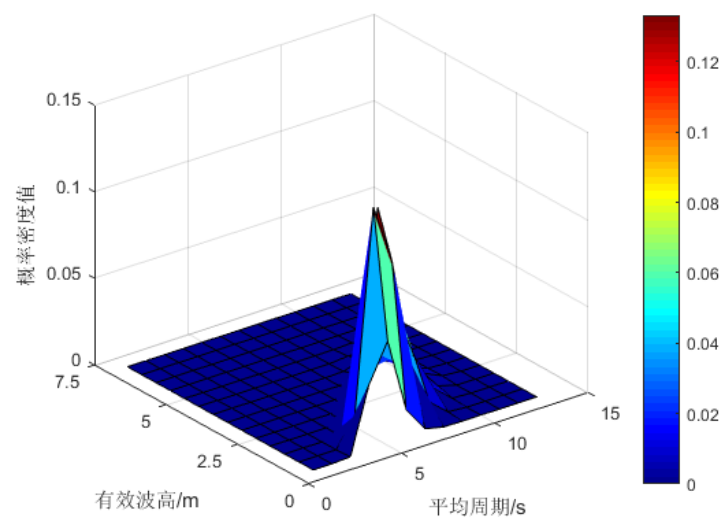


图 3-25 年有效波高与平均周期联合分布立体图

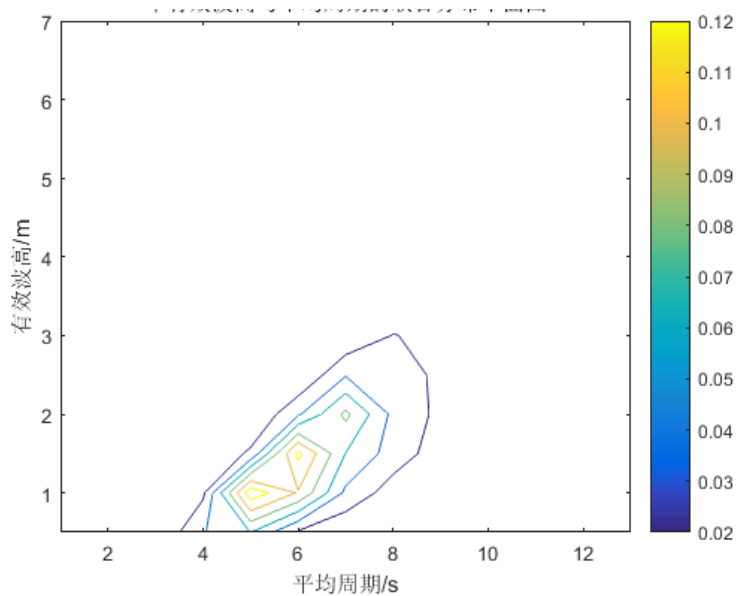


图 3-26 年有效波高与平均周期的联合分布平面图

表 3-10 春季有效波高与周期联合概率分布

Hs/Tz	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	total
0~0.5	0	0	0	5.5	11.7	4.3	0.7	0.1	0	0	0	0	0	22.2
0.5~1	0	0	0	2.9	23.7	14.8	5.1	1.4	0.1	0	0	0	0	47.9
1~1.5	0	0	0	0	2.4	9.9	5.5	1.8	0.5	0	0	0	0	20
1.5~2	0	0	0	0	0	1.4	3.5	1.9	0.6	0.1	0	0	0	7.4
2~2.5	0	0	0	0	0	0	0.6	1.2	0.6	0.2	0	0	0	2.6
2.5~3	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.2	0.1	0	0	0	0.6
3~3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0.2
3.5~4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
4~4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5~5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5~6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6~6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5~7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	0	0	0	8.3	37.8	30.3	15.3	6.7	2.1	0.5	0	0	0	100

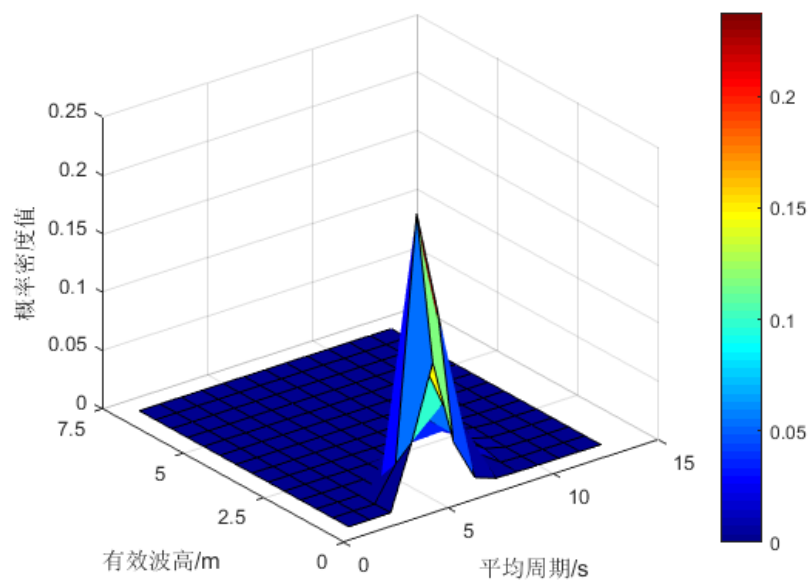


图 3-27 春季有效波高与平均周期的联合分布立体图

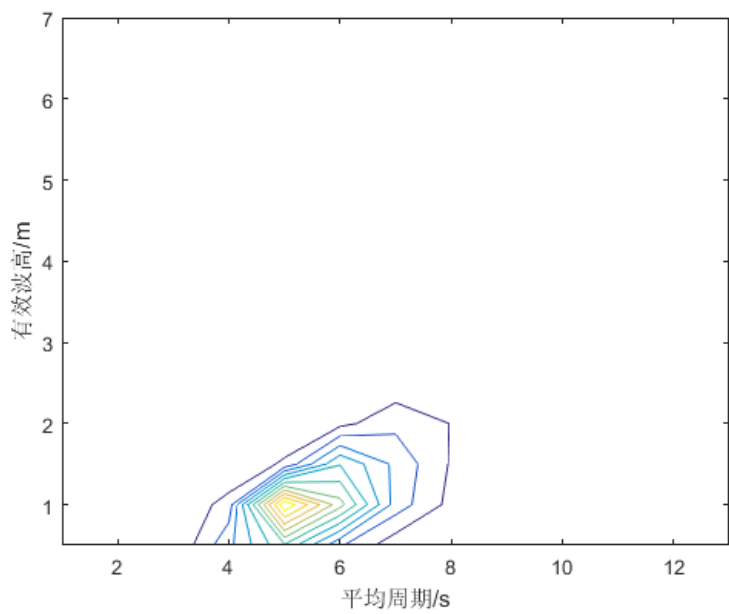


图 3-28 春季有效波高与平均周期的联合分布平面图

表 3-11 夏季有效波高与周期联合概率分布

Hs/Tz	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	total
0~0.5	0	0	0.1	7.8	9.3	0.9	0	0	0	0	0	0	0	18.2
0.5~1	0	0	0	2.9	17.8	9.1	0.6	0	0	0	0	0	0	30.5
1~1.5	0	0	0	0	3.8	15.4	2	0	0	0	0	0	0	21.2

第三章 波浪的年、季特征分析

1.5~2	0	0	0	0	0	7.2	9.8	0.1	0	0	0	0	0	17.1
2~2.5	0	0	0	0	0	0.1	8.3	0.9	0	0	0	0	0	9.3
2.5~3	0	0	0	0	0	0	0.7	2	0	0	0	0	0	2.7
3~3.5	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.1	0	0	0	0	0.6
3.5~4	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0	0	0	0	0.2
4~4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0.1
4.5~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5~5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5~6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6~6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5~7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	0	0	0.1	10.7	31	32.7	21.4	3.6	0.4	0	0	0	0	100

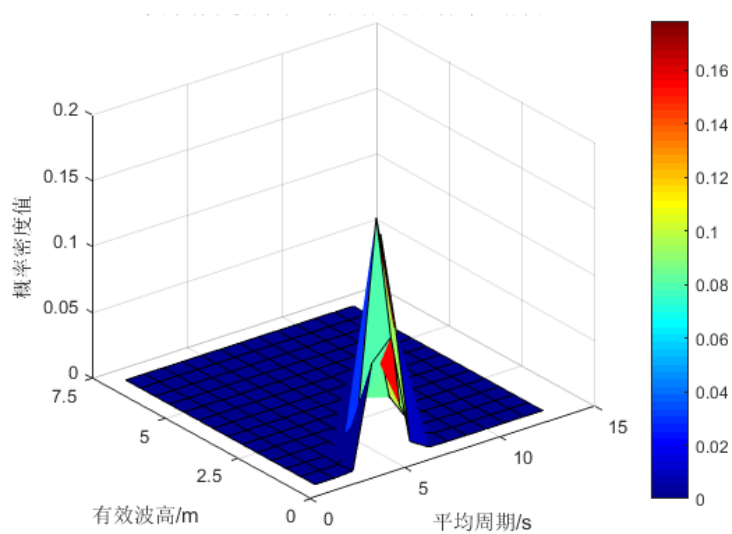


图 3-29 夏季有效波高与平均周期的联合分布立体图

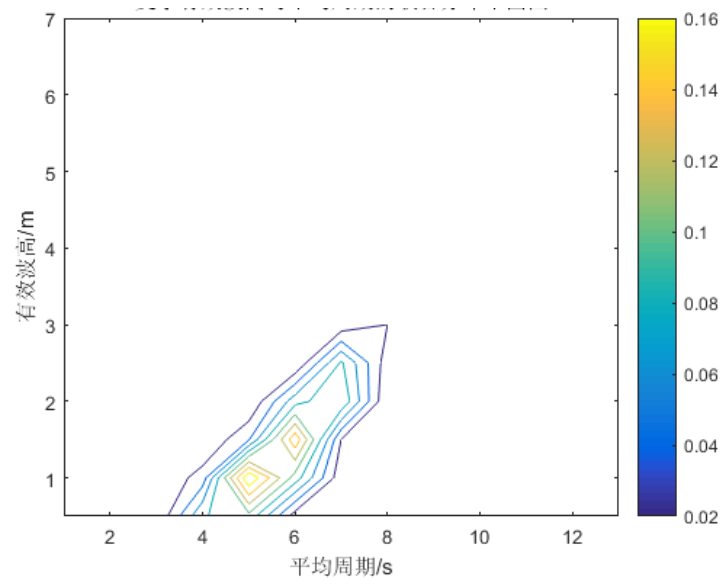


图 3-30 夏季有效波高与平均周期的联合分布平面图

表 3-12 秋季有效波高与周期联合概率分布

Hs/Tz	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	total
0~0.5	0	0	0.1	2	2.8	1.6	0.3	0	0	0	0	0	0	6.9
0.5~1	0	0	0	0.5	7.1	11.7	6.9	2.3	0.3	0	0	0	0	28.8
1~1.5	0	0	0	0	1.4	9.8	8.8	8.5	3	0.2	0	0	0	31.7
1.5~2	0	0	0	0	0	2.6	6.4	5.1	3.8	0.9	0	0	0	18.8
2~2.5	0	0	0	0	0	0	2.4	2.3	1.8	1.4	0.3	0	0	8.1
2.5~3	0	0	0	0	0	0	0.2	1.4	1.4	0.7	0.1	0	0	3.8
3~3.5	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.6	0.3	0.1	0	0	1.2
3.5~4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.1	0	0	0	0.5
4~4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0.2
4.5~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0.1
5~5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5~6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6~6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5~7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	0	0	0.1	2.6	11.3	25.6	25.1	19.8	11.1	3.8	0.5	0	0	100

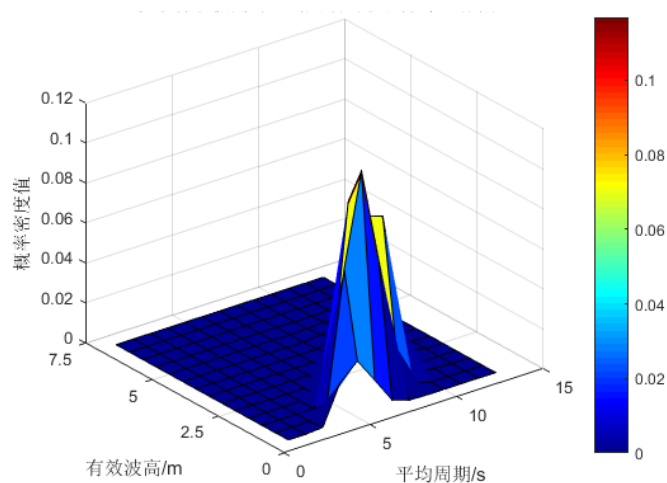


图 3-31 秋季有效波高与平均周期的联合分布立体图

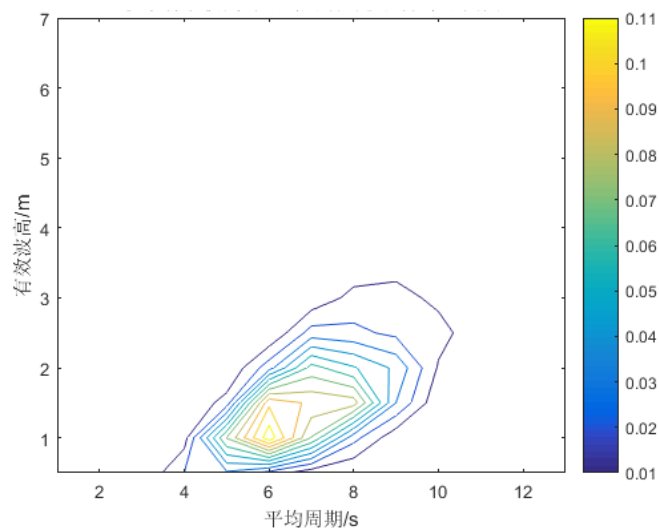


图 3-32 秋季有效波高与平均周期的联合分布平面图

表 3-13 冬季有效波高与周期联合概率分布

Hs/Tz	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	total
0~0.5	0	0	0	0.1	0.3	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.5
0.5~1	0	0	0	0.1	4.7	3.8	1.7	0.3	0	0	0	0	0	10.6
1~1.5	0	0	0	0	1.9	15	7.8	2.2	0.4	0	0	0	0	27.3
1.5~2	0	0	0	0	0	3.7	14.4	6.9	1.8	0.3	0	0	0	27
2~2.5	0	0	0	0	0	0	4	10.1	3	0.8	0.1	0	0	18

2.5~3	0	0	0	0	0	0	0	4.8	3.7	0.9	0.1	0	0	9.5
3~3.5	0	0	0	0	0	0	0	0.7	2.8	0.8	0.2	0	0	4.5
3.5~4	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1	0.6	0.1	0	0	1.8
4~4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0	0	0	0.5
4.5~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0.1
5~5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
5.5~6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6~6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5~7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	0	0	0	0.3	6.8	22.6	27.9	24.9	13	3.8	0.6	0	0	100

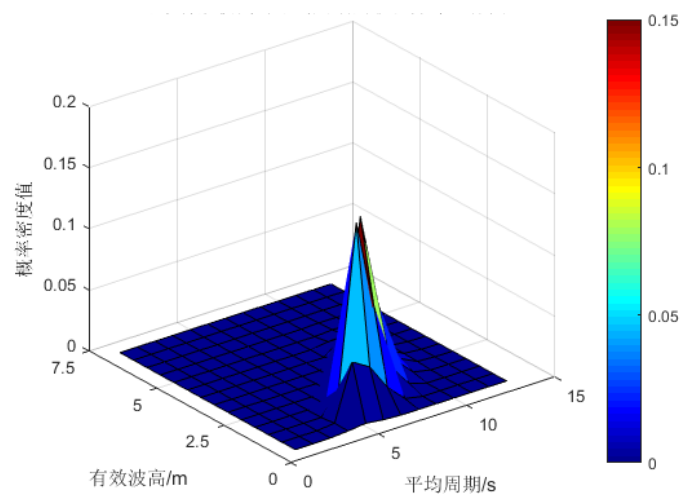


图 3-33 秋季有效波高与平均周期的联合分布立体图

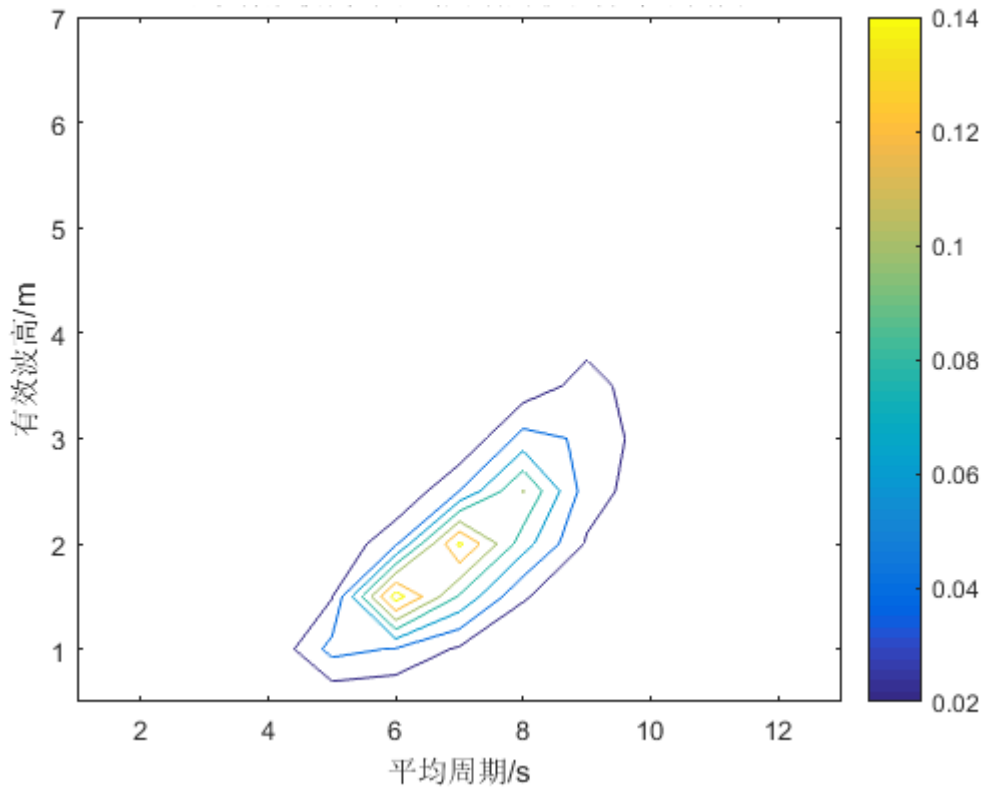


图 3-34 冬季有效波高与平均周期的联合分布平面图

3.5 强浪与常浪特征

强浪为年、季波高前 1/10 的波浪数据，按照由大到小的顺序排序后提取前 1/10 的数据进行统计，进而统计强浪中各个波向的波数，对波数进行统计并求得概率，如表 3-15，由图 3-35~3-39 结合 3.3 节的波向图，发现强浪波向分布与常浪波向分布规律基本相同，而由图 3-40 可以看出，强浪与常浪的波高年、季均值变化具有同步性。

年强浪波向主要是 NNE 方向，WSW 方向有少量分布。春季从 NNE、NE、ENE 方向递减，少量分布于 WSW 方向。夏季强浪波向主要分布在 WSW 方向。秋季强浪波向主要是 NNE 方向，N、WSW 方向有少量分布。冬季强浪波向主要是 NNE 方向。

表 3-15 强浪各波向波数及其概率分布

波向	年	春季	夏季	秋季	冬季
N	283	19	0	189	66
NNE	3419	596	0	608	1224
NE	334	387	0	47	38
ENE	11	106	0	6	1
E	4	0	0	0	1
ESE	1	1	0	0	0

	SE	1	0	0	0	0
	SSE	1	2	0	1	0
	S	0	1	0	0	0
	SSW	6	0	1	5	0
	SW	39	1	33	26	0
	WSW	1014	150	1203	281	0
	W	169	53	125	81	0
	WNW	23	8	0	22	0
	NW	35	8	0	30	3
	NNW	66	30	0	51	3
	total	5406	1362	1362	1347	1336
波向	年	春季	夏季	秋季	冬季	
N	5.3	1.5	0	14.1	5	
NNE	63.2	43.7	0	45.1	91.5	
NE	6.2	28.4	0	3.5	2.8	
ENE	0.2	7.8	0	0.4	0.1	
E	0.1	0	0	0	0.1	
ESE	0	0.1	0	0	0	
SE	0	0	0	0	0	
SSE	0	0.1	0	0.1	0	
S	0	0.1	0	0	0	
SSW	0.1	0	0.1	0.4	0	
SW	0.7	0.1	2.4	1.9	0	
WSW	18.8	11	88.2	20.8	0	
W	3.1	3.9	9.2	6	0	
WNW	0.4	0.6	0	1.6	0	
NW	0.6	0.6	0	2.2	0.2	
NNW	1.2	2.3	0	3.9	0.3	
total	100	100	99.9	100	100	

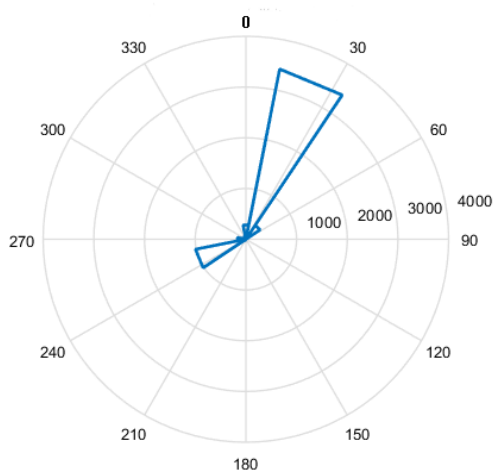


图 3-35 年强浪各向分布

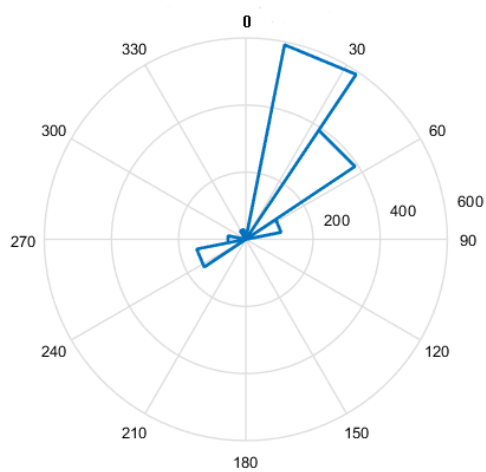


图 3-36 春季强浪各向分布

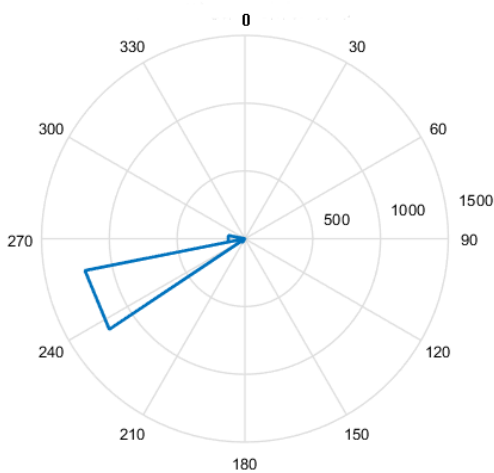


图 3-37 夏季强浪各向分布

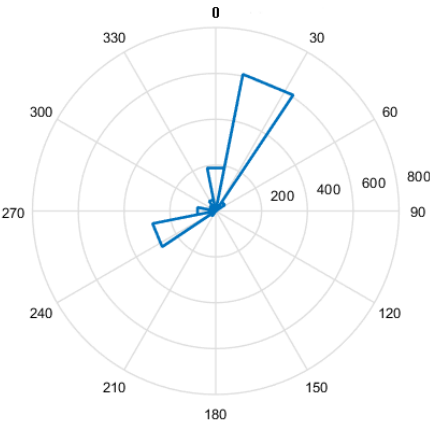


图 3-38 秋季强浪各向分布

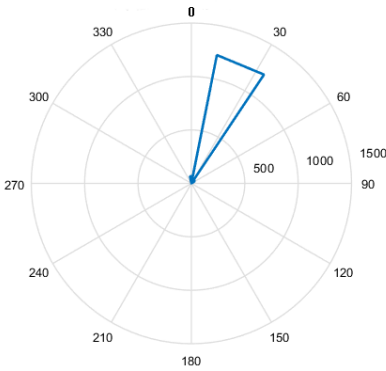


图 3-39 季强浪各向分布

表 3-16 强浪与常浪年、季均值

	强浪波高	常浪波高
年	2.80	1.29
春季	1.97	0.88
夏季	2.51	1.16
秋季	2.70	1.31
冬季	3.30	1.81

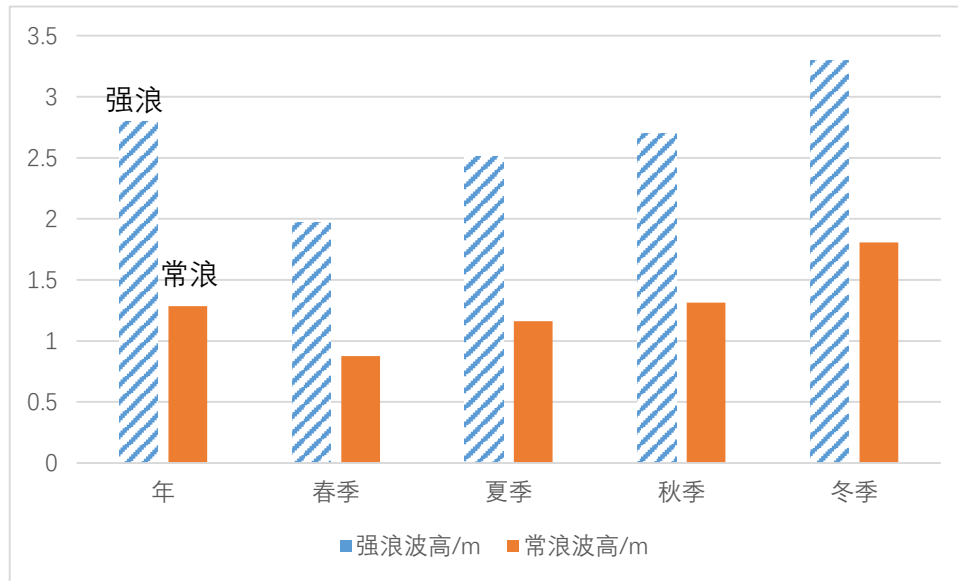


图 3-40 强浪与常浪年、季分布条形图

3.6 本章小结

通过以上统计分析，可知永暑礁海区有效波高情况较为复杂。波高年、春季、秋季、冬季平均值呈现整体上升的趋势，夏季呈现整体下降趋势，平均周期年、季均呈现整体上升趋势。而且波高相对较大，出现的范围在0~5m之间，平均周期出现范围为2~11s，联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m，相应的平均周期为4~8s。春季有效波高出现的范围是0~4m，平均周期出现的范围是3~10s，联合分布出现频率最大的波高范围是0~1.5m，相应的平均周期出现最高的范围是4~7s。夏季有效波高出现的范围是0~4.5m，平均周期出现的范围是2~9s，联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m，相应的平均周期出现最高的范围是3~7s。秋季有效波高出现的范围是0~5m，平均周期出现的范围是2~11s，联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m，相应的平均周期出现最高的范围是4~9s。冬季有效波高出现的范围是0~5m，平均周期出现的范围是2~11s，联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m，相应的平均周期出现最高的范围是4~9s。

而对强浪和常浪对比分析，可以发现两者波向分布基本相同，并且强浪与常浪的波高年、季均值变化具有同步性，由此可见二者有明显的相关性，其中各季的强浪分布变化与各季常浪分布变化相同，并且常浪波高大小约为强浪的一半。

第四章 波浪时间（逐月）变化规律

4.1 波高、周期、风速、主波向的逐月时间过程

4.1.1 波高的逐月时间过程

由表 4-1 可以看出，平均有效波高最大的月份为 12 月，为 2.05m，最小的月份为 5 月，为 0.69m。由图 4-1 可以看出整个图形呈现两边高中间低，并且在中间还有个小高峰的态势，说明出现较大波高为 11、12、1 月份，并且在八月份也会出现小峰值，可能跟北半球热带夏季盛行的西风有关。

表 4-1 平均有效波高月份列表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均有效波高	1.87	1.46	1.14	0.79	0.69	1.01	1.16	1.31	1.12	1.21	1.61	2.05

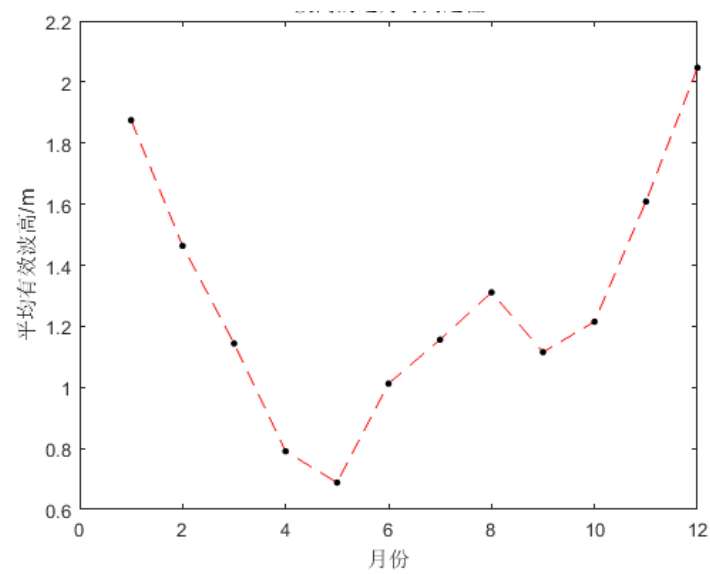


图 4-1 平均有效波高逐月时间过程

4.1.2 周期的逐月时间过程

由表 4-2 可知：最大平均月周期 7.2s，出现在 12 月，最小月均周期为 4.9s，出现在 5 月。由图 4-2 可看出：周期逐月时间过程呈现两边高中间低的形状，中间处较为平缓，两边变化较快，该变化规律与波高逐月时间过程相似，因此两者存在一定的线

性关系，即波高越大周期相应地也越大。

表 4-2 周期逐月时间过程

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
周期	6.8	6.2	5.7	5.3	4.9	5.1	5.2	5.5	5.5	6.8	7.2	7.3

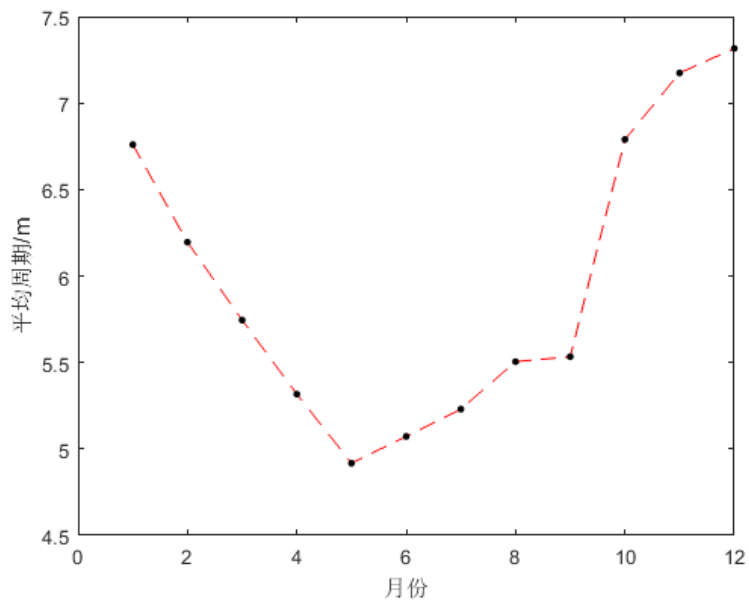


图 4-2 周期的逐月时间过程

4.1.3 风速的逐月时间过程

由表 4-3 可以看出，风速最大均值为 8.27m/s，出现在一月份，最小值月均值为 4.11m/s，出现在五月份。由图 4-3 可以看出，风速月均值折线图呈现 W 形状，即两边和中间均出现峰值，峰值分别出现在 1、8 月份，说明永暑礁海区在 1 月份和 8 月份风力较大，相应的为东北信风和盛行西风。该变化趋势与波高、周期逐月变化过程相似，即 3 者存在一定的线性关系。

表 4-3 风速逐月时间过程

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
风速	8.27	7.16	6.07	4.57	4.11	5.72	6.40	6.97	5.89	4.62	6.04	8.03

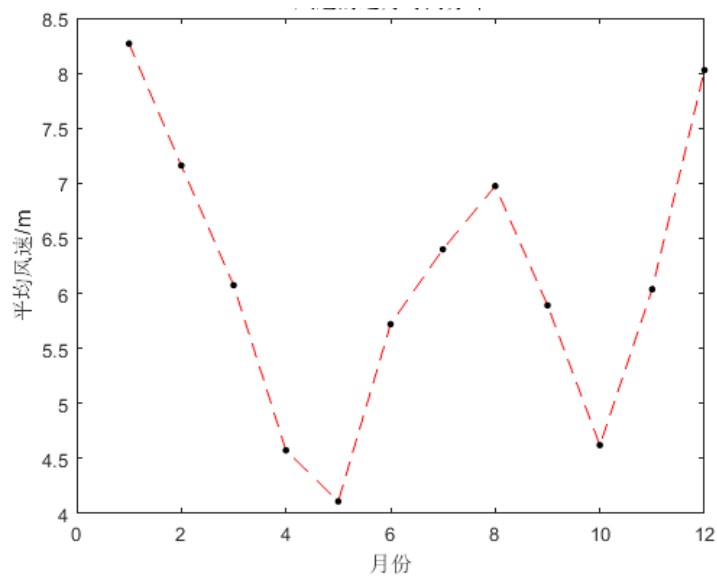


图 4-3 风速逐月时间过程

4.1.4 主波向的逐月时间过程

由表 4-4 可知，全年按月份，主波向分别为：NW、NW、NW、WNW、SSW、SE、SE、SE、ESE、SE、W、NW、NNW。1、2、3、11 月主波向是 NW、6、7、9 月主波向是 SE，全年的主要波向为东北向和西南向，分别出现在冬季和夏季，与北半球热带冬季为东北信风和夏季盛行西风相符。

表 4-4 主波向的逐月时间过程

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
主波向	33.8	41.5	51.9	64.7	152.9	222.5	234.2	237.8	215.1	99.5	44.0	31.5
波向	NW	NW	NW	WNW	SSW	SE	SE	ESE	SE	W	NW	NNW

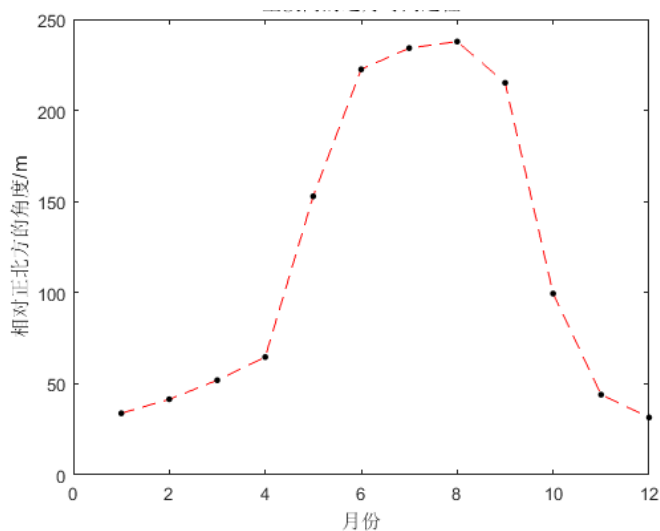


图 4-4 主波向的逐月时间过程

4.2 波高与风速关系（分向与不分向分析）

4.2.1 不分向波高与风速关系

运用 matlab 对年有效波高和风速进行拟合，得出其拟合的关系式和相关系数，由得出的结果可知年有效波高和风速拟合良好，线性相关性强。

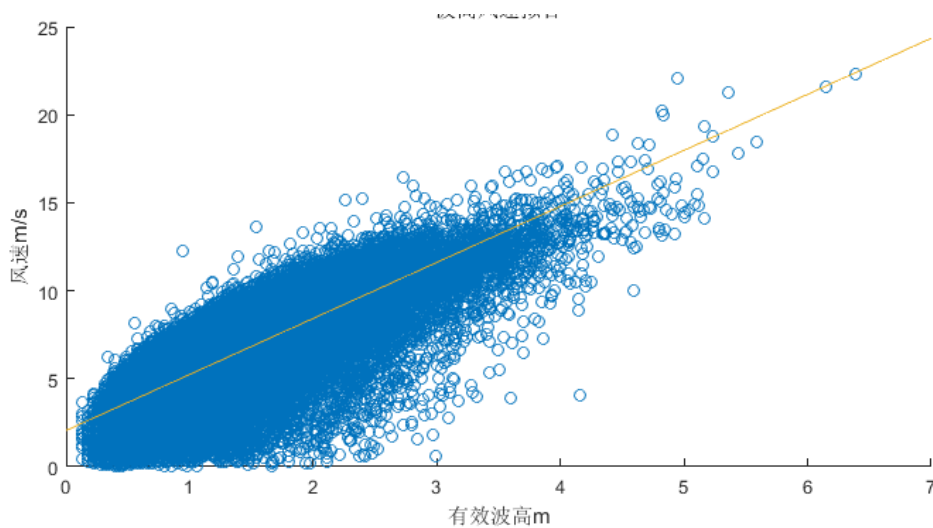


图 4-5 年有效波高和风速拟合

得到的相关关系式为: $y = 3.1837x + 2.0602$

相关系数: $r = 0.8095$

4.2.2 分向波高与风速关系

由图 4-6~4-10 可知春季有效波高和风速相关关系式为 $y=3.6176x+1.7576$ ，相关系数 $r=0.7941$ ，说明波高和风速相关性较强，呈线性相关。夏季有效波高和风速相关关系式为 $y=4.1994x+1.4948$ ，相关系数 $r=0.9242$ ，说明波高和风速具有极强的线性相关性。秋季有效波高和风速相关关系式为 $y=3.0912x+1.4514$ ，相关系数 $r=0.7162$ ，相关性较强，呈线性相关。冬季有效波高和风速关系式为 $2.369x+3.5624$ ，相关系数 $r=0.7483$ 。由图 4-15 可以看出，波高和风速逐月变化相似，两者具有极强的线性相关性。

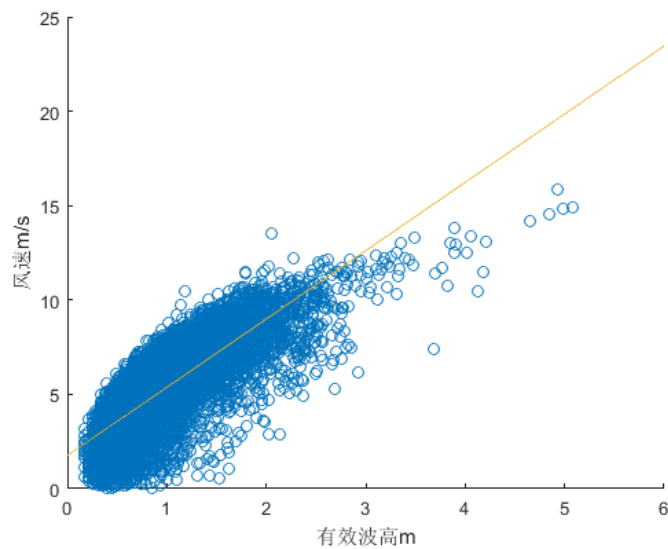


图 4-6 春季有效波高风速拟合

得到的相关关系式为: $y=3.6176x+1.7576$

相关系数 $r=0.7941$

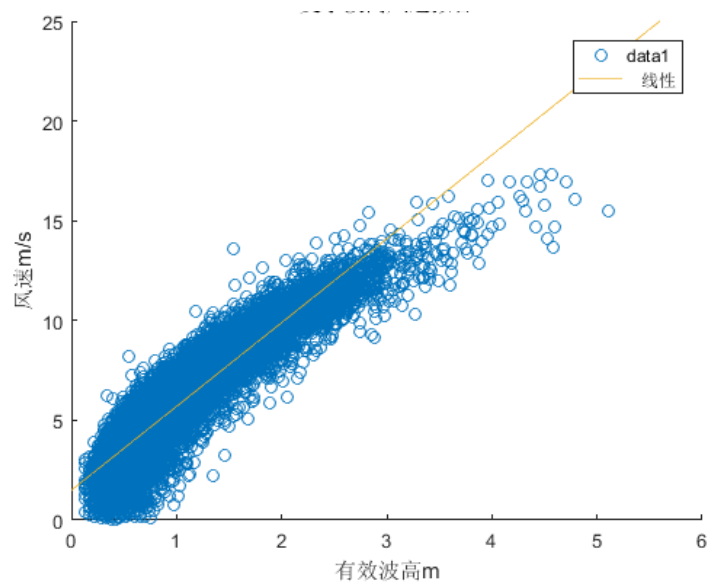


图 4-7 夏季有效波高风速拟合

得到的相关关系式为: $y=4.1994x+1.4948$

相关系数 $r=0.9242$

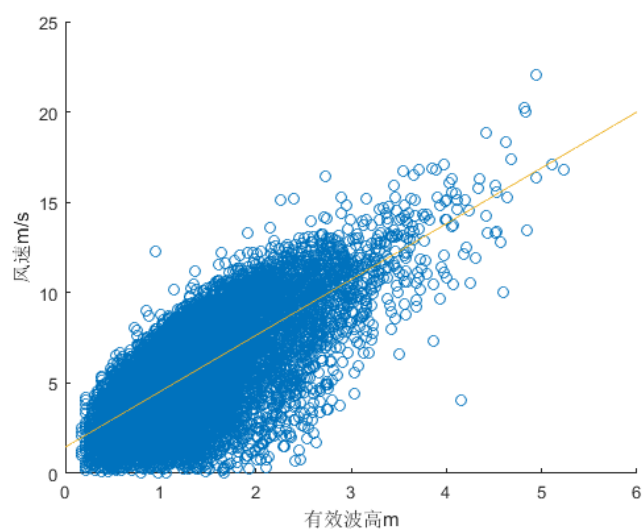


图 4-8 秋季有效波高风速拟合

得到的相关关系式为: $y=3.0912x+1.4514$

相关系数 $r=0.7162$

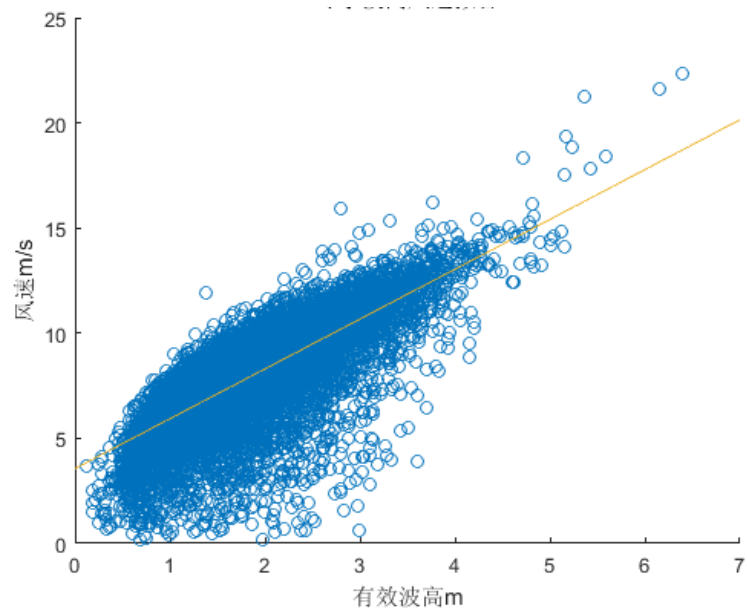


图 4-9 冬季有效波高风速拟合

得到的相关关系式为: $y=2.369x+3.5624$

相关系数 $r=0.7483$

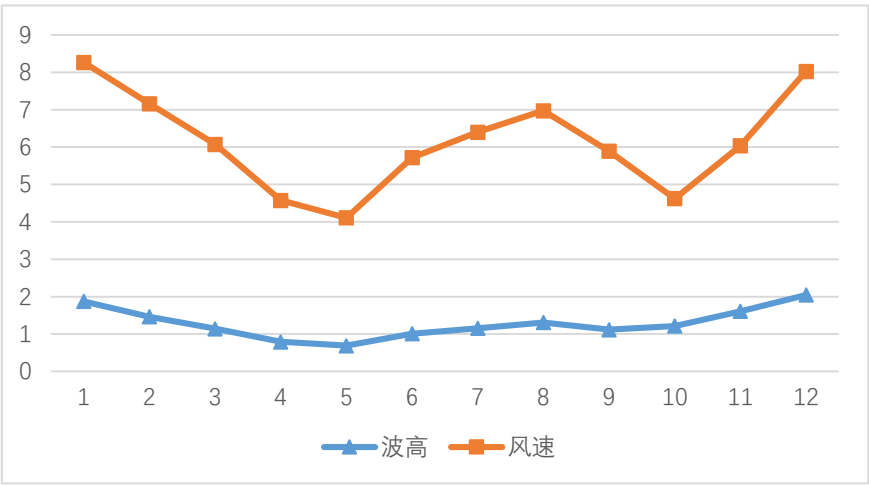


图 4-10 有效波高风速逐月变化折线图

4.3 周期与波高关系（强浪）

由图 4-16~4-21 可以看出，强浪周期年和各季相关系数分别是：0.4930（年）、0.5807（春）、0.8867（夏）、0.2901（秋）、0.4881（冬）。其中相关性最强的是夏季， $r=0.8867$ ，相关性最小的是秋季， $r=0.2901$ 。年相关系数为 0.4930，属于中等相关。因

此在此可以推测，永暑礁海区周期除了跟波浪有关，还可能受到其他因素的影响。

由图 4-26 可以看出，波高和周期的变化整体上有第一定的相似性，然而部分月份并没有太高的相似性，因此两者的相关性属于中等水平。

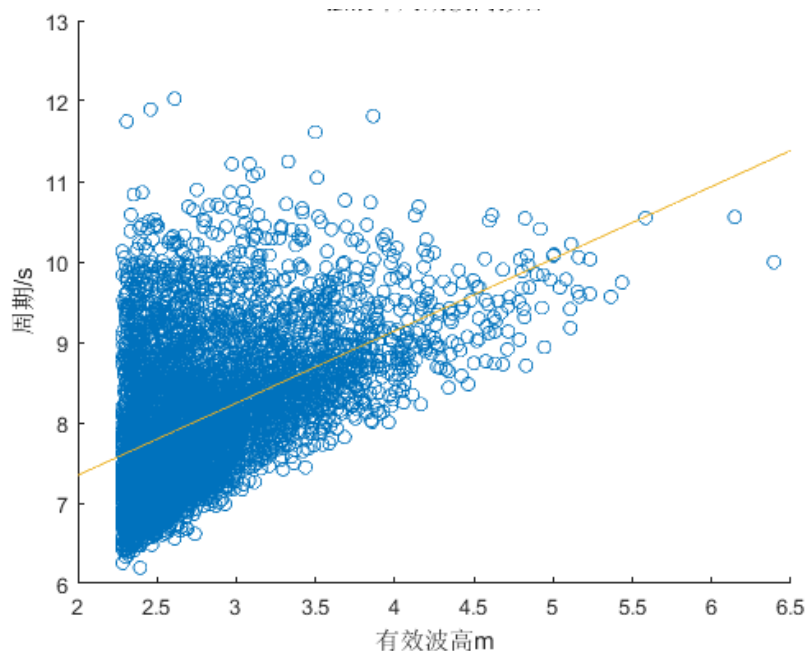


图 4-16 强浪年周期波高拟合

得到的相关关系式为: $y=0.89751x+5.5506$

相关系数 $r=0.4930$

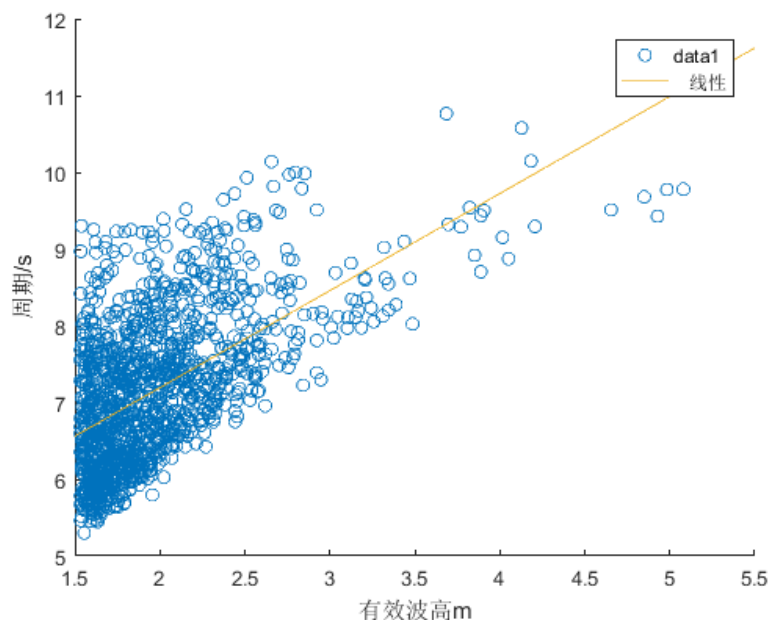


图 4-17 强浪春季周期波高拟合

得出相关关系式为 $y=1.2651x+4.6626$

相关系数 $r=0.5807$

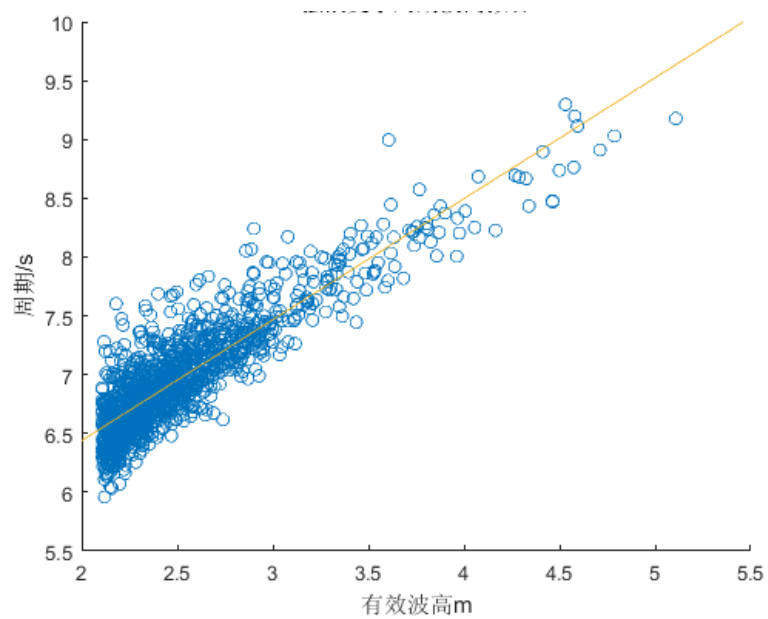


图 4-18 强浪夏季周期波高拟合

得到相关关系式: $y=1.028x+4.343$

相关系数 $r=0.8867$

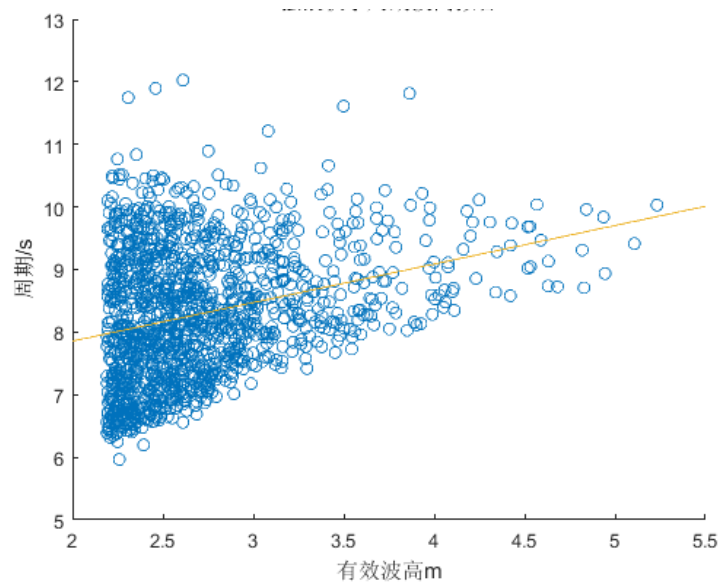


图 4-19 强浪秋季周期波高拟合

得出相关关系式 $y=0.61537x+6.6261$

相关系数 $r=0.2901$

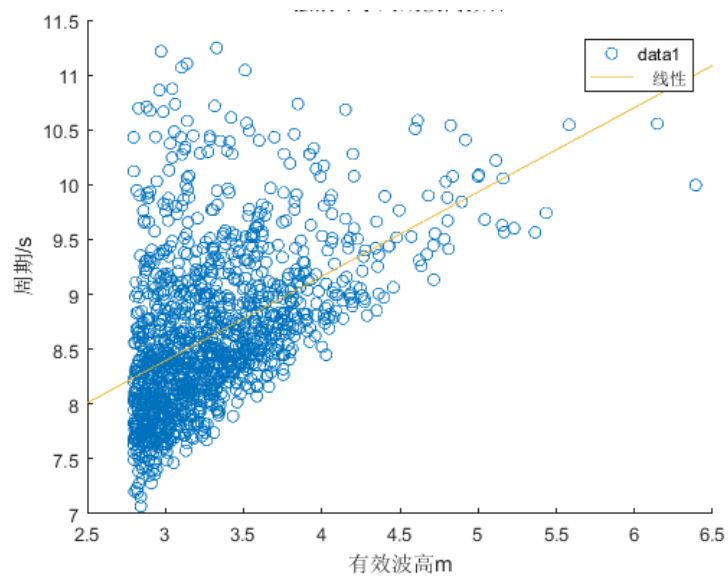


图 4-20 强浪冬季周期波高拟合

得出相关关系式： $y=0.76893x+6.088$

相关系数 $r=0.4881$

表 4-5 波高周期（强浪）逐月分布

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
波高/m	2.81	2.73	2.74	2.47	2.70	2.85	2.55	2.68	2.77	2.75	2.79	2.90
周期/s	8.0	8.0	8.2	8.4	8.1	7.3	7.0	7.2	7.3	8.3	8.6	8.4

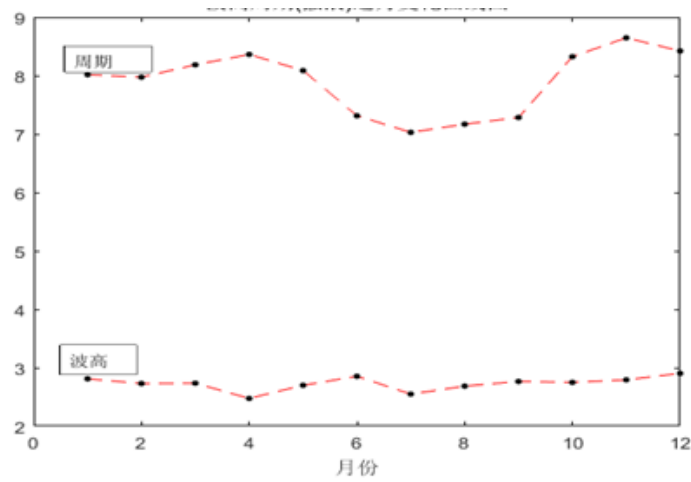


图 4-21 波高周期（强浪）逐月变化曲线

4.4 本章小结

由以上分析，可以得出结论：波高、周期、风速存在明显的线性相关性。波高、周期、风速逐月时间变化曲线均呈现两边高中间低的态势，而主波向则为夏季主要是西南方向，冬季为东北方向，春秋两季为过度状态，这种方向差异与北半球夏季盛行西风以及冬季东北信风有关。

波高与风速无论是分向还是不分向均有较高的相关性，相关系数均在 0.7 以上，相关性极强。而强浪周期和波高关系相关性则相对较弱，期中相关性最强的为夏季，最弱为秋季，年相关系数接近 0.5，属于中等相关水平。

第五章 大浪长期特征变化与趋势分析

5.1 大浪长期特征变化

大浪波高为波高在年分布中分别为 0.5%、1%、2% 处的波高，对给定的 37 年永暑礁模拟数据进行排序，运用 VB 编程以及 Excel 分别提取各年、季 0.5%、1%、2% 处的波高，如下表 5-1~5-5，对该数据进行统计分析。

由图 5-1~5-5 和表 5-1~5-5，可以看出，大浪年波高呈现逐渐微弱增大的趋势，得出相关关系式分别为 $y = 0.0056x + 3.6816$ 、 $y = 0.0027x + 3.3817$ 、 $y = 0.0018x + 3.1063$ 。春季大浪波高呈现逐渐微弱增大的趋势，得出相关关系式分别为 $y = 0.0147x + 2.2766$ 、 $y = 0.0102x + 2.23$ 、 $y = 0.0077x + 2.0868$ ，增速比年平均增速大。夏季大浪波高呈现逐年微弱减小的趋势，得出相关关系式分别为 $y = -0.011x + 3.2142$ 、 $y = -0.0093x + 3.0402$ 、 $y = -0.0061x + 2.8074$ 。秋季大浪波高呈现逐年微弱减小的趋势，得出相关关系式分别为 $y = -0.004x + 3.4171$ 、 $y = -0.0055x + 3.2746$ 、 $y = -0.0038x + 3.01$ 。冬季大浪波高呈现逐年微弱增大的趋势，得出相关关系式分比为 $y = 0.0082x + 3.8242$ 、 $y = 0.0089x + 3.6346$ 、 $y = 0.0079x + 3.4289$ 。

由此可见，夏秋两季大浪逐年减小，夏季变化速度较快，而春冬两季大浪波高逐年增大，春季增大比较明显，总体上呈现逐年增大的趋势。

表 5-1 大浪年波高分布

年份	年 (0.005)	年 (0.01)	年 (0.02)
1979	3.16	3.07	2.89
1980	3.03	2.85	2.70
1981	3.81	3.54	3.28
1982	3.71	3.48	3.06
1983	4.31	3.98	3.59
1984	3.56	3.39	3.18
1985	3.42	3.30	3.02
1986	4.21	3.67	3.38
1987	3.85	3.45	3.19
1988	3.23	2.99	2.84
1989	3.66	3.30	3.12
1990	3.80	3.50	3.26
1991	3.37	3.05	2.76
1992	4.27	3.60	3.31

1993	3.83	3.64	3.41
1994	4.57	3.57	3.04
1995	4.03	3.87	3.62
1996	3.50	3.17	2.83
1997	3.27	3.06	2.80
1998	4.21	3.22	2.90
1999	4.78	4.07	3.75
2000	3.56	3.27	2.98
2001	3.66	3.40	3.08
2002	4.01	3.74	3.03
2003	3.32	3.20	3.00
2004	3.70	3.08	2.83
2005	4.43	4.02	3.34
2006	4.14	3.53	3.11
2007	4.01	3.81	3.58
2008	3.58	3.44	3.17
2009	4.52	4.00	3.66
2010	3.25	3.13	2.94
2011	4.36	3.75	3.53
2012	3.12	2.96	2.77
2013	3.59	3.36	3.09
2014	3.45	3.36	3.26
2015	3.93	3.21	2.88

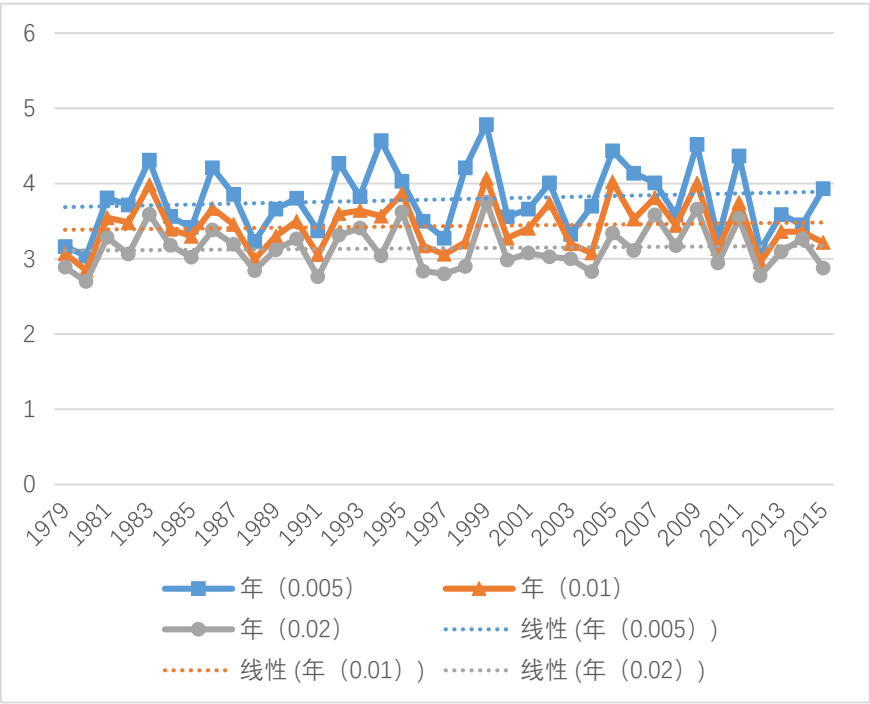


图 5-1 大浪年波高特征及趋势

得出相关关系式分别为

$$y = 0.0056x + 3.6816$$

$$y = 0.0027x + 3.3817$$

$$y = 0.0018x + 3.1063$$

表 5-2 大浪春季波高分布

年份	春季 (0.005)	春季 (0.01)	春季 (0.02)
1979	2.02	1.97	1.87
1980	1.82	1.74	1.72
1981	1.48	1.44	1.41
1982	1.81	1.76	1.71
1983	2.32	2.16	1.85
1984	2.85	2.79	2.70
1985	2.72	2.66	2.48
1986	4.98	4.85	3.89
1987	2.30	2.26	2.15
1988	2.55	2.41	2.17
1989	3.31	3.24	3.11
1990	1.85	1.82	1.68
1991	2.55	2.45	2.28
1992	1.48	1.38	1.33
1993	2.18	2.15	2.11
1994	2.35	2.33	2.27
1995	2.60	2.35	2.22
1996	2.58	2.51	2.48
1997	2.38	2.24	2.06
1998	2.11	2.07	1.99
1999	1.93	1.88	1.85
2000	2.21	2.10	1.93
2001	2.36	2.11	2.08
2002	2.23	2.21	1.91
2003	2.45	2.33	2.26
2004	3.89	3.70	3.12
2005	4.02	3.34	2.74
2006	4.13	3.69	2.83
2007	1.91	1.87	1.82
2008	2.76	2.59	2.53
2009	2.32	2.21	2.08
2010	3.20	2.77	2.55
2011	2.85	2.78	2.75
2012	2.42	2.38	2.33

2013	3.13	2.90	2.35
2014	2.11	2.06	2.03
2015	2.39	2.19	1.96

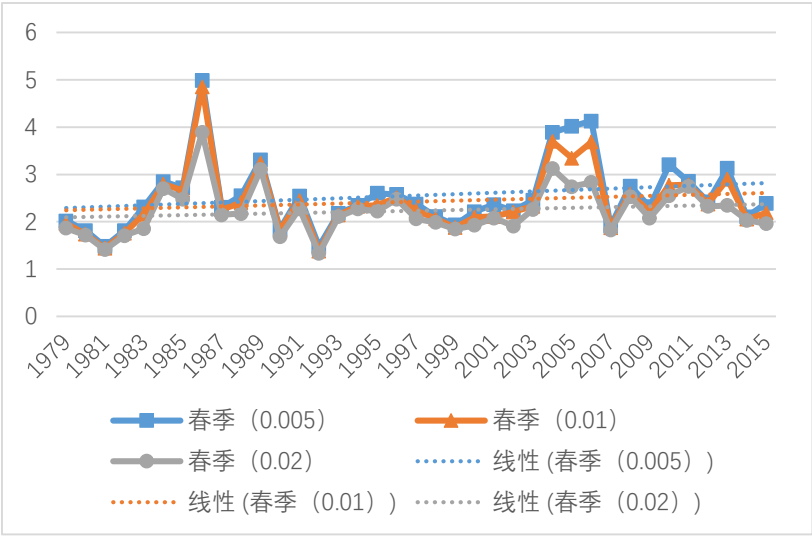


图 5-2 大浪春季波高特征及趋势

得出相关关系式分别为

$$y = 0.0147x + 2.2766$$

$$y = 0.0102x + 2.23$$

$$y = 0.0077x + 2.0868$$

表 5-3 夏季大浪波高分布

年份	夏季 (0.005)	夏季 (0.01)	夏季 (0.02)
1979	2.90	2.78	2.62
1980	2.89	2.77	2.67
1981	2.93	2.83	2.71
1982	3.37	3.30	3.01
1983	2.93	2.62	2.25
1984	3.18	3.01	2.99
1985	3.33	3.28	2.91
1986	2.60	2.45	2.42
1987	2.83	2.68	2.56
1988	2.33	2.28	2.11
1989	2.87	2.68	2.58
1990	4.59	4.46	3.61
1991	3.08	2.85	2.77
1992	4.57	4.34	4.27
1993	2.60	2.55	2.42

1994	3.34	3.04	2.62
1995	2.80	2.46	2.16
1996	2.75	2.72	2.66
1997	2.72	2.66	2.52
1998	1.43	1.36	1.33
1999	3.88	3.59	3.35
2000	3.84	3.41	2.98
2001	3.23	3.08	3.00
2002	4.58	4.41	4.01
2003	2.81	2.75	2.69
2004	2.68	2.49	2.45
2005	2.53	2.52	2.49
2006	3.01	2.84	2.71
2007	3.81	3.49	3.39
2008	2.45	2.44	2.32
2009	3.18	3.01	2.97
2010	2.48	2.40	2.19
2011	2.33	2.20	2.19
2012	2.90	2.90	2.63
2013	2.65	2.55	2.43
2014	2.17	2.16	2.08
2015	2.63	2.59	2.53

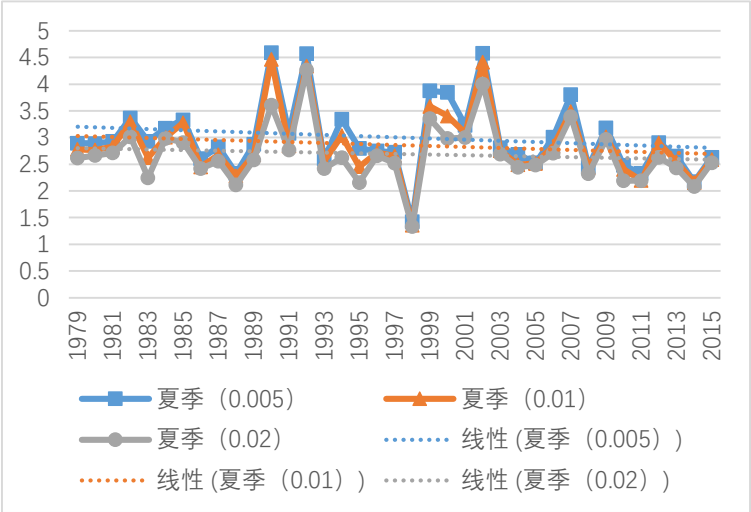


图 5-3 大浪夏季波高特征及趋势

得出相关关系式分别为

$$y = -0.011x + 3.2142$$

$$y = -0.0093x + 3.0402$$

$$y = -0.0061x + 2.8074$$

表 5-4 秋季大浪波高分布

年份	秋季 (0.005)	秋季 (0.01)	秋季 (0.02)
1979	3.26	3.18	3.08
1980	2.74	2.72	2.32
1981	3.16	2.99	2.76
1982	3.38	3.29	2.89
1983	4.53	4.43	4.31
1984	2.75	2.71	2.60
1985	2.61	2.26	2.21
1986	3.13	2.97	2.76
1987	3.57	3.16	2.44
1988	3.40	3.11	3.00
1989	3.70	3.56	3.25
1990	3.34	3.26	3.06
1991	3.50	3.41	3.05
1992	3.79	3.68	3.48
1993	3.14	3.09	3.03
1994	4.94	4.83	4.57
1995	3.68	3.47	3.09
1996	3.50	3.22	2.73
1997	2.90	2.75	2.67
1998	3.45	3.15	2.85
1999	2.83	2.68	2.57
2000	2.79	2.75	2.69
2001	4.18	3.74	3.25
2002	2.54	2.51	2.44
2003	2.98	2.86	2.51
2004	3.01	2.83	2.69
2005	3.48	3.30	3.14
2006	2.74	2.57	2.38
2007	4.94	4.35	4.01
2008	3.55	3.44	3.17
2009	4.53	4.34	4.00
2010	2.81	2.69	2.62
2011	3.47	3.39	3.12
2012	2.65	2.52	2.33
2013	3.28	3.02	2.86
2014	2.87	2.63	2.38
2015	2.49	2.44	2.40

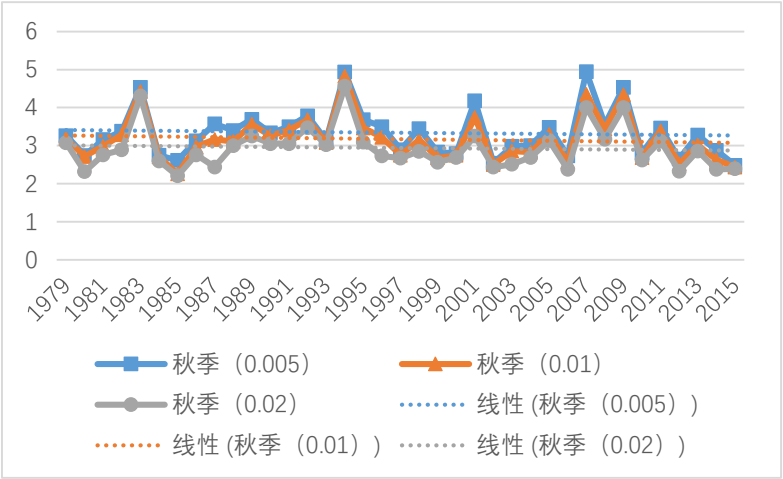


图 5-4 大浪秋季波高特征及趋势

得出相关关系式分别为

$$y = -0.004x + 3.4171$$

$$y = -0.0055x + 3.2746$$

$$y = -0.0038x + 3.01$$

表 5-5 大浪冬季波高分布

年份	冬季 (0.005)	冬季 (0.01)	冬季 (0.02)
1979	3.16	3.15	3.11
1980	3.55	3.49	3.03
1981	4.22	4.02	3.81
1982	4.05	3.79	3.71
1983	4.10	3.96	3.84
1984	3.71	3.58	3.56
1985	3.90	3.63	3.42
1986	4.20	3.90	3.67
1987	4.64	4.43	3.85
1988	3.57	3.30	3.02
1989	3.76	3.68	3.50
1990	3.81	3.58	3.48
1991	3.55	3.30	3.01
1992	3.59	3.27	3.17
1993	4.15	4.01	3.83
1994	3.48	3.38	3.16
1995	4.27	4.09	4.00
1996	3.51	3.51	3.37
1997	3.45	3.39	3.27
1998	6.15	5.23	4.21
1999	5.11	4.90	4.78

2000	3.57	3.56	3.37
2001	3.66	3.60	3.42
2002	3.06	3.01	2.97
2003	3.38	3.38	3.32
2004	3.78	3.48	3.21
2005	5.36	5.15	4.43
2006	4.26	4.16	4.02
2007	3.86	3.76	3.59
2008	3.64	3.61	3.57
2009	4.81	4.57	4.04
2010	3.83	3.43	3.25
2011	4.84	4.61	4.36
2012	3.35	3.22	3.12
2013	3.75	3.68	3.59
2014	3.68	3.55	3.45
2015	4.48	4.35	3.93

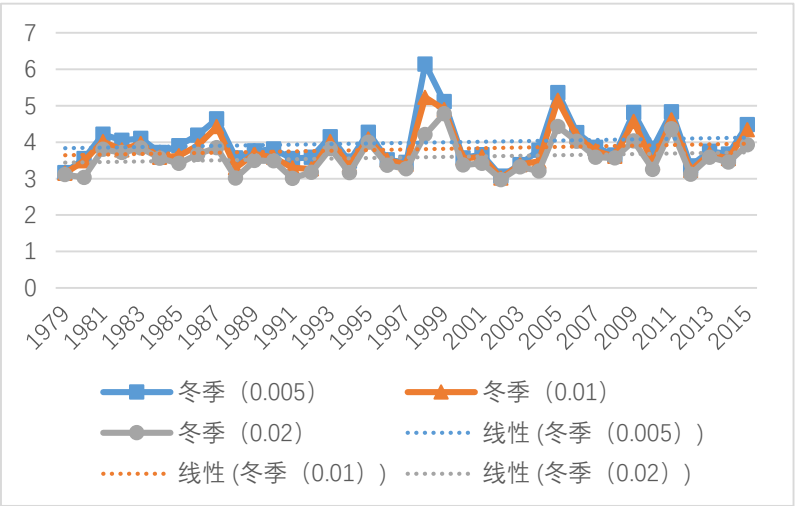


图 5-5 大浪冬季波高特征及趋势

得出相关关系式分别为

$$y = 0.0082x + 3.8242$$

$$y = 0.0089x + 3.6346$$

$$y = 0.0079x + 3.4289$$

5.2 大浪重现期分析

本文采用一般常用方法——直接求极大值分布计算波高多年分布^[7]，并对这种方

作了简化，并给出了计算用表（附表一）。

该方法具体做法是求出年最大波高并求均值

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum (x_i) \tag{5-1}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i^2) - \bar{x}^2} \tag{5-2}$$

利用最大波高对比附表找出参数 25 年一遇、50 年一遇、100 年一遇相应的均离系数 λ 。则可以通过以下公式求出相应的重现波高

$$x = \bar{x} + \lambda \times s \tag{5-3}$$

由表 5-7 可以看出，20 年重现期有效波高为 5.78m，25 年重现期有效波高为 5.92m，50 年重现期有效波高为 6.35m，100 年重现期有效波高为 6.78m，该数据结果与实际结果相比偏小，主要原因是网格划分较粗，时间间隔较长，台风波浪不能很好地体现，因此，对于重现期波高的研究还有待更进一步的探讨，由于本文篇幅和数据有限以及本人能力的局限性，在此不再作进一步的展开，重现期有效波高以本文计算结果为准。

表 5-6 年相应最大波高计算表

年份	最大波高	年份	最大波高	年份	最大波高	年份	最大波高
1979	3.26	1990	4.79	2001	4.21	2012	3.39
1980	3.60	1991	3.86	2002	5.11	2013	3.80
1981	4.26	1992	4.71	2003	3.51	2014	3.70
1982	4.08	1993	4.21	2004	3.91	2015	4.50
1983	4.63	1994	5.11	2005	5.43	\bar{x}	4.30
1984	3.73	1995	4.35	2006	4.27	s	0.69
1985	3.92	1996	3.62	2007	5.23	$\lambda_{35,0.95}$	2.153
1986	5.08	1997	3.68	2008	3.75	$\lambda_{35,0.96}$	2.356
1987	4.67	1998	6.39	2009	5.04	$\lambda_{35,0.98}$	2.979
1988	3.58	1999	5.16	2010	3.88	$\lambda_{35,0.99}$	3.598
1989	3.89	2000	3.86	2011	4.92		

表 5-7 永暑礁若干年重现期有效波高

年	重现期有效波高
20	5.78
25	5.92
50	6.35
100	6.78

5.3 本章小结

大浪年波高呈现逐渐微弱增大的趋势。春季大浪波高呈现逐渐微弱增大的趋势，增速比年平均增速大。夏季大浪波高呈现逐年微弱减小的趋势。秋季大浪波高呈现逐年微弱减小的趋势。冬季大浪波高呈现逐年微弱增大的趋势，夏秋两季大浪逐年减小，夏季变化速度较快，而春冬两季大浪波高逐年增大，春季增大比较明显，总体上呈现逐年增大的趋势。

20 年一遇重现有效波高 5.78m，25 年一遇 5 重现波高 5.92m，50 年一遇重现期有效波高 6.35m，100 年一遇重现期有效波高 6.78m。

结论

1. 论文工作总结

永暑礁海区有效波高情况较为复杂,而且波高相对较大,出现的范围在0~5m之间,平均周期出现范围为2~11s,联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m,相应的平均周期为4~8s。春季有效波高出现的范围是0~4m,平均周期出现的范围是3~10s,联合分布出现频率最大的波高范围是0~1.5m,相应的平均周期出现最高的范围是4~7s。夏季有效波高出现的范围是0~4.5m,平均周期出现的范围是2~9s,联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m,相应的平均周期出现最高的范围是3~7s。秋季有效波高出现的范围是0~5m,平均周期出现的范围是2~11s,联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m,相应的平均周期出现最高的范围是4~9s。冬季有效波高出现的范围是0~5m,平均周期出现的范围是2~11s,联合分布出现频率最大的波高范围是0~2m,相应的平均周期出现最高的范围是4~9s。

强浪和常浪波向分布基本相同,并且强浪与常浪的波高年、季均值变化具有同步性,由此可见二者有明显的相关性,其中各季的强浪分布变化与各季常浪分布变化相同,并且常浪大小约为强浪的一半。

波高、周期、风速存在明显的线性相关性。波高、周期、风速逐月时间变化曲线均呈现两边高中间低的态势,而主波向则为夏季主要是西南方向,冬季为东北方向,春秋两季为过度状态,这种方向差异与北半球夏季盛行西风以及冬季东北信风有关。波高与风速无论是分向还是不分向均有较高的相关性,相关系数均在0.7以上,相关性极强。而强浪周期和波高关系相关性则相对较弱,期中相关性最强的为夏季,最弱为秋季,年相关系数接近0.5,属于中等相关水平。

大浪年波高呈现逐渐微弱增大的趋势。春季大浪波高呈现逐渐微弱增大的趋势,增速比年平均增速大。夏季大浪波高呈现逐年微弱减小的趋势。秋季大浪波高呈现逐年微弱减小的趋势。冬季大浪波高呈现逐年微弱增大的趋势,夏秋两季大浪逐年减小,夏季变化速度较快,而春冬两季大浪波高逐年增大,春季增大比较明显,总体上呈现逐年增大的趋势。

20年一遇重现有效波高5.78m,25年一遇5重现波高5.92m,50年一遇重现期有

效波高 6.35m, 100 年一遇重现期有效波高 6.78m。

与王婷婷等人^[3]的论文结果对比, 本文中观测资料北向浪受到永暑礁北岛屿阻挡, 只反映观测点位置的波浪特征, 不能反映整个永暑礁海区的整体特征。

2. 工作展望

从课题立项到数据处理及至最后的论文定稿, 整个过程虽然辛苦, 但是在论文逐步完成的过程中却是满满的收获。同时这篇论文通过对 1979 年~2015 年永暑礁海区波浪进行处理, 可以非常直观而全面地呈现永暑礁海区波浪的各种特征, 相信可以为永暑礁海区的进一步开发提供一定的依据。中国南海是一个巨大的宝藏, 通过对南海的一步步探索, 可以更加全面地了解南海, 加强对南海海域的管理和开发, 永暑礁作为中国在南海开发的一个重点, 自然要十分重视的, 这篇论文正是在一定程度上满足永暑礁附近海区的管理开发需求, 对其海区分析。在未来, 中国开发海洋资源的脚步将更加坚定, 而永暑礁也将发挥更加重要的战略性作用。

参考文献

- [1]朱良生, 陈秀华, 邱章, 永暑礁海区潮汐海流特征分析, 海洋通报, Vol.24, No.4.Aug, 2005。
- [2] 杨正己, 贺辉华, 高正荣, 赤湾港波浪的统计分布及谱分析, 南京水利科学研究院, 1986.12.002。
- [3]王婷婷, 梁广建, 周兆黎, 崔德杰,文爱平, 永暑海区波浪要素变化特征分析, 海洋通报,Vol.31, No.3.Jun, 2012。
- [4]《波浪理论》教材。
- [5] 周兆黎, 李淑君, 梁广建, 南沙永暑礁近海面风的特征分析, 广东气象, Vol.34, No.4.August 2012。
- [6]周明华, MATLAB实用教程, 浙江大学出版社, 2013年12月, 62~74。
- [7] 刘德辅,马逢时,极值分布理论在计算波高多年分布中的应用,应用数学报, 1976年8月第一期。
- [8]俞慕耕, 南海潮汐特征的初步探讨, 海洋学报, vol.6,NO.3,May,1994。
- [9] 李维锋, 梁广健,徐刚, 南沙永暑海区潮汐特征分析, 海洋技术学报, Vol. 33, No.5, Oct, 2014。
- [10]吴宋仁编著, 《海岸动力学》, 人民交通出版社, 2000 年。
- [11]竺艳蓉编著, 《海洋工程波浪力学》, 天津大学出版社, 1991 年。

致谢

从课题立项到数据处理及至最后的论文定稿，一路走来真可谓不容易。在这期间，我最想要感谢的是我的指导老师，朱良生老师，正是在他的热情指导和鼓励下我才能一步步完成毕业设计和论文撰写。其中有多许许多多的疑问，老师都能及时给予启发，让我能够把问题一步步解决，在此郑重向朱老师致谢。

我也要感谢进行毕业设计期间跟我一起讨论和解决问题的伙伴们，谢俊勋给我解答了许多 MATLAB 软件学习过程中的疑惑，施鸿宇在处理数据的方法上给我许多建议，张子胜在我进行大浪特征分析一章的数据处理时，写了个小程序帮助我更加高效地完成数据的处理。

同时，感谢本专业的各位老师，正是在老师们的辛勤教诲下，我才能顺利完成四年学业，在此向各位老师一一致谢。还要感谢班级里的同学们，同窗四年，正是有同学们的陪伴让我的大学多姿多彩。

大学时光匆匆而过，来到大学的末尾，回想四年时光，一路走来，得到过太多人的帮助，在这里想要感谢的人还有许多，可惜不能在此一一表达谢意，感恩千句留于心间。

附录 1

附表 2. 岡貝尔模值分布 $\lambda_{M,p}$ 数值表

$\frac{T}{P}$ λ N	p																γ_M	σ_N
	0.999	0.998	0.995	0.99	100	50	25	20	10	4	0.50	0.25	0.10	0.05	0.03	0.01	0.001	
8	7.103	6.336	5.321	4.551	3.779	3.081	2.749	2.493	1.953	0.842	-0.130	-0.897	-1.458	-1.749	-1.923	-2.224	-2.673	0.4843
9	6.909	6.162	5.174	4.425	3.673	2.916	2.616	2.360	1.895	0.814	-0.133	-0.879	-1.426	-1.709	-1.879	-2.172	-2.609	0.5288
10	6.752	6.021	5.055	4.322	3.587	2.847	2.606	2.350	1.848	0.790	-0.136	-0.865	-1.400	-1.677	-1.843	-2.129	-2.556	0.5497
11	6.622	5.905	4.957	4.238	3.516	2.789	2.553	2.307	1.809	0.771	-0.138	-0.854	-1.378	-1.650	-1.813	-2.095	-2.514	0.4996
12	6.513	5.807	4.874	4.166	3.456	2.741	2.509	2.263	1.777	0.755	-0.139	-0.844	-1.360	-1.628	-1.788	-2.065	-2.478	0.5035
13	6.418	5.723	4.802	4.105	3.404	2.699	2.470	2.224	1.748	0.741	-0.141	-0.836	-1.345	-1.609	-1.767	-2.040	-2.446	0.5070
14	6.337	5.650	4.741	4.052	3.360	2.683	2.457	2.214	1.734	0.729	-0.142	-0.829	-1.331	-1.592	-1.748	-2.018	-2.420	0.5100
15	6.266	5.586	4.687	4.005	3.321	2.672	2.446	2.203	1.723	0.718	-0.143	-0.823	-1.320	-1.578	-1.732	-1.999	-2.396	0.5128
16	6.196	5.523	4.634	3.959	3.283	2.661	2.437	2.192	1.712	0.708	-0.145	-0.817	-1.308	-1.563	-1.716	-1.980	-2.373	0.5157
17	6.137	5.471	4.589	3.921	3.250	2.652	2.428	2.181	1.701	0.699	-0.146	-0.811	-1.299	-1.552	-1.703	-1.965	-2.354	0.5181
18	6.087	5.428	4.551	3.888	3.223	2.643	2.419	2.170	1.689	0.692	-0.146	-0.807	-1.291	-1.541	-1.691	-1.951	-2.338	0.5202
19	6.043	5.387	4.518	3.860	3.199	2.633	2.410	2.160	1.678	0.685	-0.147	-0.803	-1.283	-1.532	-1.681	-1.939	-2.323	0.5220
20	6.006	5.354	4.490	3.836	3.179	2.625	2.402	2.151	1.666	0.680	-0.148	-0.800	-1.277	-1.525	-1.673	-1.930	-2.311	0.5236
22	5.933	5.288	4.435	3.788	3.138	2.614	2.392	2.142	1.653	0.669	-0.149	-0.794	-1.265	-1.510	-1.657	-1.910	-2.287	0.5268
24	5.870	5.232	4.387	3.747	3.104	2.604	2.383	2.133	1.641	0.659	-0.150	-0.788	-1.255	-1.497	-1.642	-1.893	-2.266	0.5296
26	5.816	5.183	4.346	3.711	3.074	2.594	2.374	2.124	1.628	0.651	-0.151	-0.783	-1.246	-1.486	-1.630	-1.879	-2.249	0.5320
28	5.769	5.141	4.310	3.681	3.048	2.584	2.365	2.115	1.615	0.644	-0.152	-0.779	-1.239	-1.477	-1.619	-1.866	-2.233	0.5343
30	5.727	5.104	4.279	3.653	3.026	2.575	2.356	2.106	1.603	0.638	-0.153	-0.776	-1.232	-1.468	-1.610	-1.855	-2.219	0.5362
35	5.642	5.027	4.214	3.598	2.979	2.556	2.336	2.133	1.515	0.625	-0.154	-0.768	-1.218	-1.451	-1.591	-1.832	-2.191	0.5403
40	5.576	4.968	4.164	3.554	2.942	2.536	2.326	2.126	1.495	0.615	-0.155	-0.762	-1.208	-1.438	-1.576	-1.814	-2.170	0.5436
45	5.522	4.920	4.123	3.519	2.913	2.517	2.307	2.104	1.479	0.607	-0.156	-0.758	-1.198	-1.427	-1.564	-1.800	-2.152	0.5463
50	5.479	4.881	4.090	3.491	2.889	2.503	2.293	2.096	1.466	0.601	-0.157	-0.754	-1.191	-1.418	-1.553	-1.788	-2.138	0.5485
60	5.410	4.820	4.038	3.446	2.852	2.485	2.275	2.079	1.446	0.594	-0.158	-0.748	-1.180	-1.404	-1.538	-1.770	-2.115	0.5521
70	5.359	4.774	4.000	3.413	2.824	2.470	2.260	2.063	1.430	0.585	-0.159	-0.744	-1.172	-1.394	-1.526	-1.756	-2.098	0.5548
80	5.319	4.738	3.970	3.387	2.802	2.458	2.248	2.052	1.419	0.577	-0.159	-0.740	-1.165	-1.386	-1.517	-1.746	-2.085	0.5569
90	5.287	4.709	3.945	3.366	2.784	2.449	2.239	2.043	1.409	0.572	-0.160	-0.737	-1.160	-1.379	-1.510	-1.737	-2.075	0.5586
100	5.261	4.686	3.925	3.349	2.770	2.441	2.231	2.037	1.401	0.568	-0.160	-0.735	-1.155	-1.374	-1.504	-1.730	-2.066	0.5600
200	5.190	4.568	3.826	3.263	2.698	2.429	2.219	1.944	1.362	0.549	-0.162	-0.723	-1.134	-1.347	-1.474	-1.694	-2.023	0.5672
500	5.052	4.481	3.753	3.200	2.643	2.406	2.205	1.905	1.333	0.533	-0.164	-0.714	-1.117	-1.326	-1.451	-1.668	-1.990	0.5724
1000	4.992	4.443	3.722	3.174	2.623	2.400	2.200	1.889	1.321	0.529	-0.164	-0.710	-1.110	-1.318	-1.442	-1.657	-1.976	0.5745
∞	4.936	4.395	3.679	3.137	2.592	2.394	2.194	1.866	1.305	0.521	-0.164	-0.705	-1.100	-1.306	-1.428	-1.641	-1.957	0.5772