

南海波高熵和风速熵*

郭佩芳 施平[†] 孙孚 戚建华

(青岛海洋大学海洋系, 青岛 266003)

[†](中国科学院南海海洋研究所, 广州 510275)

提要 根据风速的统计分布, 给出了有因次风速熵和无因次风速熵的定义及其计算方法, 使用 GEOSAT 高度计 1986 年 11 月—1989 年 2 月的有效波高和风速的资料, 计算、分析了南海海域上的波高熵、风速熵, 给出它们的时间变化特征和空间变化特征, 并对不同随机量的无因次熵, 即随机度进行了比较。结果表明, 该海域的波高熵除个别外, 整体特征有明显的年变化规律, 波高熵在冬季取得最大值, 在夏季取得最小值; 与波高熵相比, 风速熵的年变化规律不甚明显。研究表明, 波高熵与风速熵有密切的关系。

关键词 南海 波高熵 风速熵

南海中国近海海域, 地处热带, 平均海深较大, 气温和水温较高, 风大浪高, 又常受台风袭扰, 对我国南部地区和东南亚国家的天气和气候有很大影响, 成为海气相互作用研究中的重要海域。海气耦合过程是通过海气界面的动量和能量的交换来完成的, 因此界面的粗糙度在其耦合过程中充当着十分重要的角色。作为随机量海面波高是海面粗糙度的重要标志之一, 而风应力是产生海面粗糙度的动力, 实际上也是一个随机量。研究这两个随机量的随机度对海气相互作用就必然有积极的意义。

熵作为一个随机场的无序程度的量度, 已经成功地被引入到许多学科(张学文, 1978)。最近, 郭佩芳等(1996)首次将熵的概念引入到海浪研究中, 建立了波高熵的概念, 给出了波高熵的计算方法和计算公式, 并计算了西北太平洋的波高熵, 给出了其时间变化特征及近似公式。本文在此工作基础上, 首先由风速的统计分布, 给出了风速熵的一种定义及其计算公式; 探讨了用于在不同随机系统之间进行随机程度比较的量度和方法; 使用 GEOSAT 卫星高度计 1986 年 10 月—1989 年 2 月观测的有效波高和风速资料, 计算南海海域的波高熵和风速熵, 得到该海域波高熵、风速熵的时间变化特征和空间变化特征, 给出了相应的经验公式来描述波高熵和风速熵的时间变化特征; 最后作了大气动力学的简单的解释。这项研究对于南海海域的海气相互作用、通量、气候和波候等方面的研究具有重要的意义。

1 波高熵和风速熵的形式与计算方法

1.1 波高熵的形式与计算方法

根据郭佩芳等(1996), 在给定的时间域和空间域上, 波高场中的波高熵的为:

* “85”南沙科技专项, 国家自然科学基金资助项目, 49276245 号, 49376255 号, 921-2 资助。郭佩芳, 男, 出生于 1955 年, 副教授。

收稿日期: 1995 年 12 月 20 日, 接收日期: 1996 年 4 月 16 日。

$$S = - \int_0^x f(H) \ln f(H) dH \quad (1)$$

或
$$S = \ln \Delta H - \sum p_i \ln p_i \quad (2)$$

式中, H 为随机变量波高; ΔH 为组距; $f(H)$ 为连续型随机量的概率密度; p_i 为离散型随机量的概率密度, 且

$$p_i = f(H) \Delta H \quad (3)$$

1.2 风速熵的定义与计算方法

风应力是使海面粗糙的动力, 在数学上是一个随机量。设在给定的时间域和空间域上, 风速场中的随机变量风速为 U 。如果 U 为连续型随机变量, 其概率密度为 $f(U)$, 则风速熵可定义为:

$$S = - \int_0^x f(U) \ln f(U) dU \quad (4)$$

如果 U 为离散型随机变量, 其概率密度为 p_i , 则风速熵可定义为:

$$S = \ln \Delta U - \sum p_i \ln p_i \quad (5)$$

其中 ΔU 为组距,

$$p_i = f(U) \Delta U \quad (6)$$

风速熵表明了风速场中随机变量 U 的随机程度。

1.3 无因次熵

一个随机量的熵是该随机量的随机度, 它仅对该随机量才具有意义。在不同随机量之间进行有因次熵的比较是没有意义的, 只有进行无因次熵的比较才具有意义。为探讨风速熵和波高熵两者的关系, 由以前的研究工作可知, 无因次随机变量 \tilde{H} 的概率密度为

$$f(\tilde{H}) = \bar{H} f(H) \quad (7)$$

无因次随机变量 \tilde{H} 的无因次熵为:

$$\tilde{S} = - \int_0^x f(\tilde{H}) \ln f(\tilde{H}) d\tilde{H} \quad (8)$$

或
$$\tilde{S} = \ln \Delta \tilde{H} - \sum \tilde{p}_i \ln \tilde{p}_i \quad (9)$$

在此基础上, 下面给出无因次风速熵的定义。

如果随机变量风速为 U , 其平均值为 \bar{U} , 则无因次随机变量为: $\tilde{U} = U / \bar{U}$ (10)

无因次随机变量 \tilde{U} 的概率密度为: $f(\tilde{U}) = \bar{U} f(U)$ (11)

无因次随机变量 \tilde{U} 的无因次熵为: $\tilde{S} = - \int_0^x f(\tilde{U}) \ln f(\tilde{U}) d\tilde{U}$ (12)

如果风速 U 为离散随机变量, 无因次随机变量 \tilde{U} 的无因次波高熵为:

$$\tilde{S} = \ln \Delta \tilde{U} - \sum \tilde{p}_i \ln \tilde{p}_i \quad (13)$$

其中,
$$\tilde{p}_i = f(\tilde{U}) \Delta \tilde{U} = \frac{n_i}{N} \quad (14)$$

在有因次随机变量 U 的有因次熵和无因次随机变量 \tilde{U} 的无因次熵之间有关系:

$$\tilde{S} = S - \ln \bar{U} \quad (15)$$

根据(郭佩芳等, 1996)定义的无因次波高熵和本文定义的无因次风速熵, 就可以在此二者之间或不同场的无因次波高熵之间或不同场的无因次风速熵之间进行比较, 以确定不同随机变量的随机程度以及彼此的关系。

2 资料来源及其计算结果

GEOSAT(测地/地球物理)卫星的发射和较长时间的运行,使研究大尺度海浪场特征、风速的特征和波高熵、风速熵成为可能。GEOSAT 卫星高度计(Cheney, 1987)¹⁾可以给出最小分辨海区(半径为 4.7km 的圆形海域)上的平均有效波高(SWH),其精度可达 0.5m 或 10%,风速(U)的精度为 2m/s (Dobson *et al.*, 1987)。可以相信高度计观测的 SWH 和 U 是有效的、可靠的,由其构成的南海波高场和风速场具有真实性和代表性。研究海域的海岸线和 GEOSAT 高度计在南海海面的轨迹如图 1 所示。

根据前阶段的波高熵的研究经验,波高资料的不同截取长度(1个月或卫星观测的重复周期),对波高熵的计算都是稳定的。因此,在计算南海波高熵和风速熵时,将 GEOSAT 高度计(1986年11月8日—1989年3月6日)在该海域观测的波高和风速,按月份分成 28 个统计样本。依照式(2)和式(9)分别计算波高的有因次熵和无因次熵,有因次组矩和无因次组矩均为 0.1, 28 个月的有因次波高熵和无因次波高熵的估计值如图 2 所示。

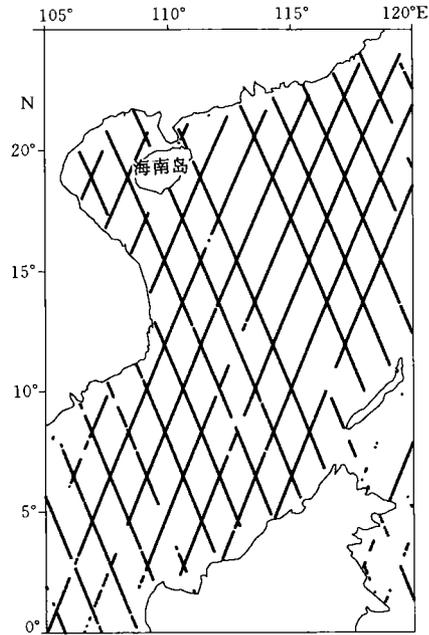


图 1 南海海域地形和 GEOSAT 高度计轨迹
Fig.1 South China Sea and the satellite tracks covering this region

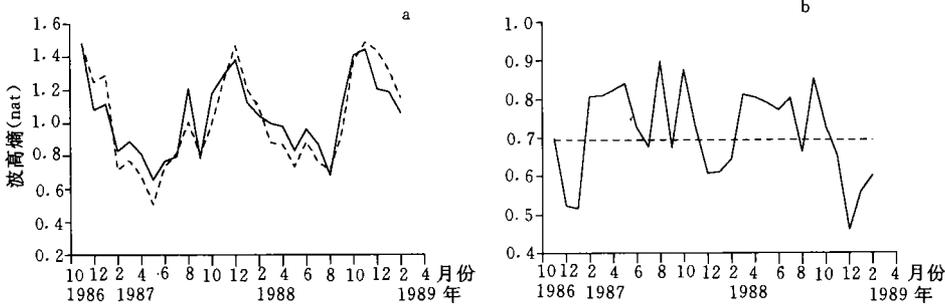


图 2 南海海域波高熵的时间变化

Fig.2 The temporal variation of entropy for sea wave height in the South China Sea

a. 有因次波高熵; b. 无因次波高熵。—— 计算值; - - - - 经验估计。

1) Cheney, R.E. et al., 1987. Geosat Altimeter Geophysical Data Record User Handbook. NOAA Tech. Memo.

National Ocean Service.

依照式(5)和式(13)分别计算风速的有因次熵和无因次熵, 风速的有因次组矩和无因次组矩均为 0.5, 有因次风速熵和无因次风速熵的计算结果如图 3 所示。

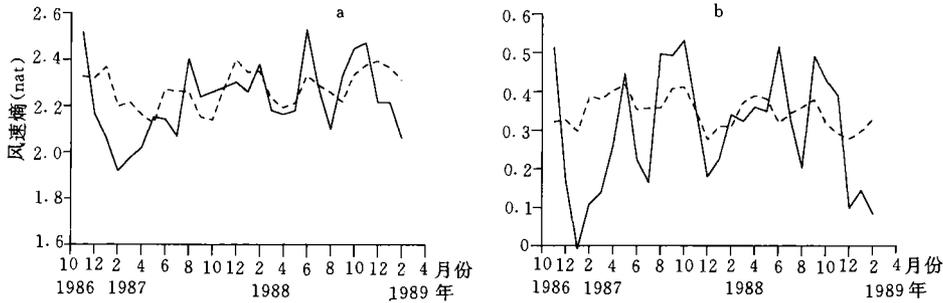


图 3 南海风速熵的时间变化

Fig.3 The temporal variation of entropy for wind speed in the South China Sea

a. 有因次风速熵; b. 无因次风速熵。—— 计算值; ····· 经验估计。

3 波高熵和风速熵的时间特征及其与气候、海域环境的关系

3.1 波高熵的年变化

从图 2 可以看出, 南海有因次波高熵具有比较明显的年变化特征(1987 年 9 月的情况有点特殊, 有待于进一步研究), 它在冬季取得最大值, 在春季逐渐减小, 至夏季降低到最小值, 在秋季又逐步增大, 至冬季增长到最大值; 波高熵的年极值出现在 1986 年 11 月、1987 年 12 月和 1988 年 11 月, 年极小值出现在 1987 年 5 月和 1988 年 8 月; 熵值在一年的变化幅度大约为 0.8nat。南海波高场的无因次熵曲线与有因次熵曲线相比, 可看出明显的差别: (1)南海波高的无因次熵值比有因次熵值小, 二者相差约为 $\ln \bar{H}$; (2)南海波高的无因次熵值没有明显的季节变化特征, 最大值为 0.9, 最小值为 0.5, 平均值为 0.7, 与均匀分布的随机量的无因次熵值 0.6931 几乎相等, 无因次熵值的变化仅与随机系统偏离均匀分布系统的偏离程度有关, 在某种程度上讲, 南海海浪系统是一个无因次等熵系统; (3)南海有因次波高熵可以用下面的公式来描述:

$$S = \ln(2\bar{H}) \quad (16)$$

无因次波高熵为: $\bar{S} = \ln 2 \quad (17)$

从图 2 中可以看出, 式(16)与有因次计算值比较接近, 最大误差 0.2, 最大相对误差为 17%。式(17)与无因次计算值也比较接近, 最大误差 0.22, 最大相对误差为 31%。

3.2 风速熵的特征

由图 3a 可以看出, 风速的有因次熵年变化规律不明显, 但由于风速的值比波高大, 故风速熵的有因次值比较大, 最小值为 1.9, 最大值为 2.52。相反, 图 3b 表明风速的无因次熵值却比较小, 最大值仅有 0.52, 最小值为 0, 平均仅有 0.3 左右。这表明该海域的风速分布较大地偏离均匀分布。研究发现, 该海域的有因次风速熵可表示为:

$$S = \ln(2\bar{U}) - 0.5\bar{U} \quad (18)$$

无因次风速熵可表示为:
$$\tilde{S} = \ln 2 - 0.5\bar{U} \quad (19)$$

3.3 波高熵、风速熵与气候、海域环境的关系

波高熵的年变化、风速熵的不规则特征与该海域的环境特征、气候特征密切相关。首先,从9月份开始到次年3月止,几乎整个南海都受东北季风的控制,风大持久,且变化不多,由于风速分布的峰值偏于高端且比较集中,因而与其他时间的相比,风速熵值持平。海上波浪除受风速影响外,还受地形制约,在开阔、深水海面,海浪得到充分成长,波高较大,在近岸、浅水水域波高较小,整个海面布满了大大小小的波浪,表现了较大的无序状态,使得波高分布较宽,有因次熵的值比其他时间的波高熵值大。从4月到8月的夏秋季节,南海为负热带高压所控制,海上多盛行南到西南风,常有台风出现,虽然有时风力较大,但持续时间较短,使得风速分布比较宽,风速的有因次熵也比较大;但受风时短的影响,海上波高较小,波高的分布也比较集中,致使波高的有因次熵值也较小。

从熵的响应角度来说,在冬季波高熵对风速熵的响应较好,海气的相互作用比较充分、强烈。在夏季波高熵对风速熵的响应较差,海气的相互作用不充分、不强烈。尽管从有因次熵的量值上看,波高熵比风速熵小,但并不表明波高的随机性比风速的随机性小,因为不同随机量的有因次熵之间是不能比较的。从波高和风速的无因次熵值的比较(图2b,图3b)可以发现,因为波高受地形影响较大,在整个南海大小各有不同,比较接近均匀分布,故其无因次熵较大;而风速几乎不受地形影响,整个海上比较一致,其分布比较集中,故其无因次熵较小。因此可以说南海海域的波高的随机度大于风速的随机度。

南海气候与波高熵的年变化相比有相似之处,与南海风速熵相比又有不似之处。这种特点构成了南海海气相互作用、海气动量交换的特点。因此,海浪波高熵用来量度海气相互作用的强度,或者作为海气相互作用中海气动量交换的传输因子,期望在海洋大气动力学中得到应用。

4 波高熵和风速熵的空间特征

为了展现南海的波高熵和风速熵的空间特征,将28个月的卫星高度计资料,按 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 的空间尺度,根据波高熵的计算公式(2)和风速熵的计算公式(5),分别计算了有因次波高熵和有因次风速熵,结果如图4所示。

因为受东北季风的影响,在南海的中部和东北部,有大于1.3或1.4的波高熵值出现,大熵值带呈西南-东北走向,向台湾海峡延伸,在东北部的东沙群岛附近取得大于1.4的极大波高熵值。因为陆地的屏障,北部湾的熵值较小,仅有0.7左右,另外两个熵值较小的海区分别在亚南巴斯群岛一带和印度尼西亚北海岸附近。因为波高熵和波高的密切关系,从波高熵的空间分布,也可得到波高的类似分布,这与传统的结论是相一致的。

从风速熵的空间分布图4b上也可以看到,风速熵的值较大,但风速熵的空间分布与波高熵的空间分布几乎是一致的,较大的风速熵值带也分布在南海的西南-东北轴线上,一直延伸到台湾海峡。较小的风速熵值带分布在北部湾、亚南巴斯群岛一带和印度尼西亚北海岸附近。

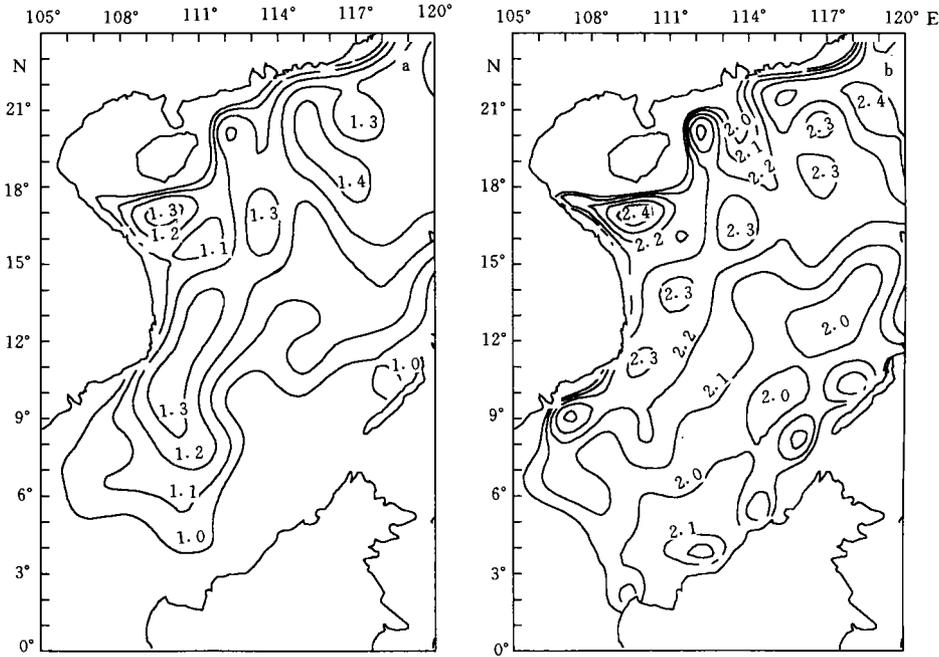


图4 南海波高熵(a)和风速熵(b)的空间分布

Fig.4 The spatial distribution of wave height entropys and wind speed entropy for the South China Sea

5 结论

熵可以用来描述随机量波高和随机量风速的随机度。

随机量的有因次熵表示了该随机量的随机度，不同随机量的有因次熵进行比较是没有意义的。不同随机量的无因次熵可以进行比较，它表示了不同随机量的随机度的大小。

风速的有因次熵可用式(4)来定义，可用式(5)来计算；风速的无因次熵可用式(8)来定义，可用式(9)来计算。

用 GEOSAT 高度计在南海海域所测到的有效波高和风速来计算该海域的波高熵、风速熵是有效的、准确的、稳定的。

南海海域的波高熵有明显的年变化，在冬季取得最大值，在夏季取得最小值。波高的无因次熵相对有因次熵而言，变化幅度小，几乎可以认为波浪过程是一个无因次等熵过程。

南海海域的风速熵没有明显的年变化，相对于波高来说，风速的有因次熵比较大，无因次熵比较小，因此风速的随机度比波高的随机度小。

南海海域的海气相互作用主要发生在以亚南巴斯群岛至台湾海峡的西南—东北轴线上。海气的相互作用和通量交换，在冬季强于夏季。

参 考 文 献

- 张学文, 1986, 气象学报, **44**(2): 214—219.
 郭佩芳、孙 孚, 1996, 海洋学报, **18**(6): 18—25.
 Dobson, E., Manaldo, F., Goldhirsh, J., 1987, *J. Geophys. Res.*, **92**(c10): 10 719—10 731.

WAVE HEIGHT ENTROPY AND WIND SPEED ENTROPY OF THE SOUTH CHINA SEA

Guo Peifang, Shi Ping[†], Sun Fu, Qi Jianhua

(Department of Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

[†](South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510275)

Abstract In the present paper, entropy is used to measure the random-degree (RD) of a random system, such as sea wave height field and wind speed field. First, the definition of wave height entropy (WHE) is described simply, and a kind of wind speed entropy (WSE) is defined as $(S = - \int_0^{\infty} f(U) \ln f(U) dU)$ by the wind speed distribution function $f(U)$. A method for calculation of WSE is defined (as $S = \ln \Delta U - \sum p_i \ln p_i$) by the relative statistical distribution function $p_i = f(U) \Delta U$ of the wind speed. Second, non-dimensional entropy is used as measurement and for comparison of RD in each random system. Third, the range of entropy value of a general distribution is given by the two extreme distribution functions. Fourth, the South China Sea WHE and WSE are calculated from GEOSAT altimeter data. The results show the spatiotemporal distribution characteristics of WHE and WSE, clear WHE annual variation with the peak of its value in winter and the trough in summer, no obvious WSE annual variation. The non-dimensional values of WSE being less than those of WHE means the RD of wind speed is less than that of wave height. In the South China Sea, spatial distribution of WSE is similar to that of WHE, the values of WSE and WHE on the northeast to southwest axis is larger than that on other areas.

Key words South China Sea Wave height entropy Wind speed entropy