

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2011.04.004

基于 Bulk 方法的南海近海面大气湍流特征分析

陈 栋^{1,2}, 饶瑞中¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 大气湍流的复杂性以及利用光学手段测量近海面巨量时空范围内大气湍流的局限性, 使得利用常规气象要素估算近海面大气湍流成为目前描述巨量时空范围内大气湍流的一种可行的方法. 从莫宁·奥布霍夫相似理论出发, 结合 Friehe 等人在分析近海面光学湍流问题上对温度、风速以及湿度脉动的综合考虑, 依据 1965~1997 年, (10°N~21°N, 110°E~120°E) 区域内的常规气象要素, 描述典型海域近海面大气湍流特征. 结果表明, 南海海域近海面大气湍流的平均强度在 $10^{-17} \sim 10^{-14}$ 量级之间, 湍流强度随季节变化较为显著, 总体上说, 冬季南海大气湍流强度要大于夏季, 而空间起伏不显著, 滨海大气湍流略大于公海大气湍流, 但数值比较不显著.

关键词: 海洋大气湍流; 常规气象要素; 南海; 近海面

中图分类号: TN911.4

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2011)04-0268-06

Analysis of the Characteristics of Atmospheric Turbulence in Marine Surface Layer of South China Sea Based on Bulk Model

CHEN Dong^{1,2}, RAO Rui-zhong¹

(1 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Owing to the complexity of atmospheric turbulence and the limitation of direct observation method, it is difficult to obtain the atmospheric turbulence in marine surface layer in large spatial and temporal scale. The indirect way by using meteorology factors to estimate the strength of atmospheric turbulence in marine surface with large spatial and temporal scale is an optional method. The relationship between the strength of surface turbulence and the meteorology factors (fluctuations of temperature, wind speed (vertical) and humidity) are based on the empiristic expression offered by Friehe *et al.* The method is applied to the district of South China Sea(10°N~21°N, 110°E~120°E), based on the data from 1965 to 1997. The data consists of water temperature, air temperature at height, water vapor density adjacent to the sea surface and average

收稿日期: 2010-03-29; 修改日期: 2010-10-12

E-mail: phd.dchen.cn@gmail.com

water vapor density at height, the average wind speed is also included to estimate the atmospheric turbulence in typical marine surface layer. It turns out that the range of mean turbulence is from 10^{-17} to 10^{-14} , there are significant seasonal changes of atmospheric turbulence in marine surface layer of South China Sea, in general turbulence is much stronger in winter than it in summer, and the discrimination of atmospheric turbulence between seacoast and mare liberum seems not significantly.

Key words: marine atmospheric turbulence; routine meteorology factors; South China Sea; marine surface layer

1 引 言

由于测量技术和经费等约束条件, 近海面大气湍流数据的获得受到了极大的限制, 而获取巨量的近海面大气湍流时空数据, 还需要一定时间周期的积累, 这就给系统地分析并刻画典型海域近海面大气湍流统计规律工作带来了困难, 模型预估算法的应用是解决这一难题的手段之一。

Wyngaard 和 Izumi 利用 1968 年 AFCRL 实验数据, 在相似理论的指导下, 获得了基于常规气象参数计算近地面大气湍流的半经验公式^[1], Friche 以 FLIP 和 Salton Sea 的实测数据为依据, 探讨了温度脉动和湿度脉动对近海面光学湍流特性的作用^[2-3], Andreas 分析了冰雪下垫面条件下, 基于气象数据的海洋大气湍流的计算方法, 结合前人工作成果提出了大气湍流与温度、湿度以及温度

湿度相关系数之间的表达式^[4]。

我们利用近地层相似理论以及极端层结下的修正理论模型, 将典型海域观测得到的近海面常规气象参数进行反演, 获得描述研究海域大气光学特性的大气湍流数据, 并应用统计分析方法对巨量时空数据进行月度平均, 找出统计数据的特征, 对该区域的大气湍流做一定时空下的全面描述^[5-6]。

2 方 法

2.1 常规气象要素的处理方法

以 Monin-Obukhov 长度 L 为特征尺度, 以 z/L 为无量纲因子, 利用相似理论并结合 AFCRL1968 的观测结果, Wyngaard 给出温度结构常数与观测区域 Monin-Obukhov 长度 L 和特征位温 T_* 之间的关系为

$$C_T^2 = T_*^2 \cdot z^{-2/3} g_3(z/L) = \begin{cases} T_*^2 \cdot z^{-2/3} \cdot 4.9[1 - 7(z/L)]^{-2/3}, & z/L \leq 0 \\ T_*^2 \cdot z^{-2/3} \cdot 4.9[1 + 2.75(z/L)]^{-2/3}, & z/L \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中, T_* 是特征位温, z 是观测高度, L 是 Monin-Obukhov 长度, 表征大气的稳定程度, Friche 在 Wyngaard 的基础上, 考虑近海面环境下湿度对大气折射率的影响, 结合 pro-BOMEX, NORPAX 和 AMTEX 的实验数据, 在 Bulk 模式下, 以 C_D , C_H 和 C_E 为表征气海温差 ΔT , 平均风速 \bar{U} 和湿

度差 ΔQ 与 u_* , $w\theta$ 和 wq 之间的转换因子, C_D 为 drag 系数, 一般取 1.3×10^{-3} , C_H 为感热通量系数, 取 $C_H = 0.9 \times 10^{-3} (-20 < \bar{U}\Delta T < 25)$ 和 $C_H = 1.46 \times 10^{-3} (25 < \bar{U}\Delta T)$, C_E 为水汽通量系数, 取 1.32×10^{-3} 。得到稳定层结和非稳定层结下基于常规气象要素的近海面 C_T^2 的估算公式为

$$C_T^2 = \begin{cases} \frac{z^{-2/3} C_H^2 \Delta T^2}{C_D} \times 4.9 \times \left\{ 1 - 7 \left[\frac{-kgZC_H}{C_D^{3/2}} \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_v \cdot U^2} + \frac{0.61 \bar{T} C_E \Delta Q}{\rho_\alpha T_v C_H U^2} \right) \right] \right\}^{-2/3}, & z/L \leq 0 \\ \frac{z^{-2/3} C_H^2 \Delta T^2}{C_D} \times 4.9 \times \left\{ 1 + 2.75 \left[\frac{-kgZC_H}{C_D^{3/2}} \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_v \cdot U^2} + \frac{0.61 \bar{T} C_E \Delta Q}{\rho_\alpha T_v C_H U^2} \right) \right] \right\}, & z/L \geq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中, k 为 von karman 常数, 其值在 0.35~0.40 之间, g 为重力加速度, \bar{T} 为大气平均温度, $Q = \overline{\theta'w'} = -u_*\theta_*$ 为近地层温度通量, θ' 为温度脉动, w' 为垂直方向风速脉动, θ_* 为特征位温, ρ_α 为大气密度。

2.2 巨量时空数据的处理方法

针对巨量时空数据的特点, 为保证数据处理能够保持问题的原貌, 同时, 还需要保持近海面气象环境的时空连续性, 我们首先将所有观测数据以空间上的观测点为类型, 进行全部 33 年各个时刻的统计平均, 得到整个研究海域逐点的近海面常规气象要素平均值, 应用式 (2) 基于常规气象要素的近海面大气湍流估算算法, 得到所研究海域近海面大气湍流的整体图像 (不依赖时间)。同时, 为了概括地描述所研究海域大气湍流特征, 我们必须在 33 年各观测点数据中选取有代表性的常规气象要素, 从公式 (2) 可以看出, 决定近海面大气湍流强度的最主要的因素是气海温差, 因此, 我们以气海温差为特征量, 计算其数值和方差, 并以此作为评价典型海域近海面大气湍流强度离散度的要素。

我们以观测点为类别逐点进行月度平均, 得到研究海域内每一个观测点的累计月度平均气象要素值, 从而得到 12 组基于月度平均的各个观测点常规气象要素统计平均数据, 并以气海温差起伏数据作为衡量二维空间大气湍流强度时间分布特性的指标, 分别找出起伏最大及最小值对应的

月份, 以这两个月的典型海域近海面常规气象要素作为输入参量, 应用基于常规气象要素的近海面大气湍流估算算法, 得到研究海域近海面大气湍流的时间分布特征, 同时, 参考气海温差方差数值, 分析近海面大气湍流的空间分布特征^[5]。

3 数据

3.1 数据来源

数据来源于中国气象局发布的中国各海域气象水文参数信息, 数据下载自中国国家海洋信息中心^[7]。

3.2 数据类型及特征

我们选取与本研究相关的 (10°N~21°N, 110°E~120°E) 区域范围内海水温度, 大气温度 ($z=10$ m), 风速, 海面湿度, 大气湿度 ($z=10$ m), 数据的时间跨度为 1965~1997 年。

4 结果

由于所研究问题的数据本身包含了空间上两个维度的信息, 同时, 结合湍流强度的数值信息, 使得我们无法在描述典型海域近海面大气湍流特性时添加时间轴以表示动态变化情况, 因此, 必须选取能够反映统计特征的、有代表性的时间点, 刻画研究区域的大气湍流特性。

4.1 基本统计分析结果

南海气海温差起伏和方差的月度统计结果如表 1、2 所示, 基于此数据的描点图见图 1、2。

表 1 基于观测点的南海气海温差起伏月度统计结果

Table 1 Fluctuation of ASTD in every observation point by month in South China Sea

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
fluctuation	0.57	0.32	0.02	-0.04	0.18	0.29	0.33	0.28	0.39	0.44	0.52	0.67

表 2 基于观测点的南海气海温差方差月度统计结果

Table 2 Variances of ASTD in every observation point by month in South China Sea

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
variance	8.24	7.31	8.8	8.8	10.71	9.23	7.83	8.54	8.89	7.64	7.82	9.06

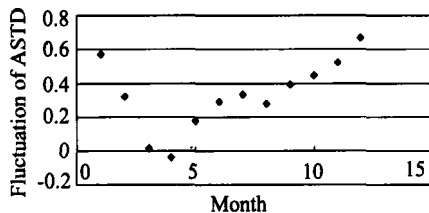


图 1 南海气海温差起伏季节变化规律

Fig.1 Seasonal distribution of fluctuation of ASTD in South China Sea

从表 1 的结果来看, 南海海域近海面气海温差起伏较小, 统计平均值几乎都小于 0.5, 这一方面确实反映出海面环境的特性, 另一方面也体现出统计方法的局限性, 我们是对研究区域各个观测点气海温差的逐点月度统计平均, 而由于海面负的温度梯度的出现, 很可能在统计的时候各点气海温差平均数据相互“抵消”, 造成气海温差起伏值较小。表 2 中数据显示, 以气海温差方差为离散度指标, 南海海域近海面大气湍流强度空间起伏不大。

我们对表 2 中数据进行数值平均, 得到南海海域气海温差方差的统计平均值为 8.57, 因此, 选取 8 月数据 (气海温差方差值为 8.54) 作为分析南海海域近海面大气湍流空间起伏整体特性的基本参量。

图 1 清晰的显示出南海气海温差起伏的季节变化特征, 即冬季气海温差起伏要显著大于夏季。

南海气海温差起伏最大和最小值分别出现在 12 月和 3 月, 而图 2 则表明南海海域气海温差变化较为平缓, 没有显示出显著的季节变化特征。

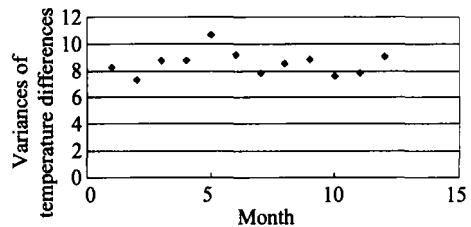


图 2 南海气海温差方差季节变化规律

Fig.2 Seasonal distribution of variances of ASTD in South China Sea

4.2 气象平均场

图 3、4 给出了南海近海面风速平均场和绝对湿度起伏平均场。

从图 3 中可知, 南海近海面风速平均值在 6 m/s 左右, 且空间起伏不大。图 4 给出的气海绝对湿度起伏显示, 南海海域气海绝对湿度起伏整体上保持在 6~7 g/m³ 之间, 从空间分布来看, 在整个南海海域绝对湿度都保持相对平均, 距离陆地较远处绝对湿度起伏相对较小。

4.3 南海近海面大气湍流时空分布规律

图 5、6 分别对南海最大及最小大气湍流进行了描述, 比较而言, 冬季大气湍流要显著地大于夏季大气湍流, 南海冬季大气湍流保持在 10⁻¹⁶ ~ 10⁻¹⁵, 夏季大气湍流在 10⁻¹⁷ 左右。图

7 给出基于 8 月份数据的南海近海面大气湍流空间起伏平均场, 从图 8 中可以看出, 南海海域近海面大气湍流空间起伏不大, 整体保持较为平稳。

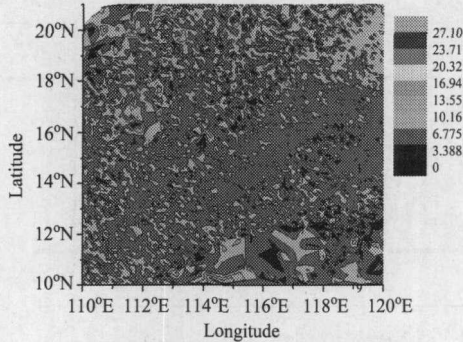


图 3 南海海域近海面平均风速统计全貌

Fig.3 Overall image of average wind speed in South China Sea

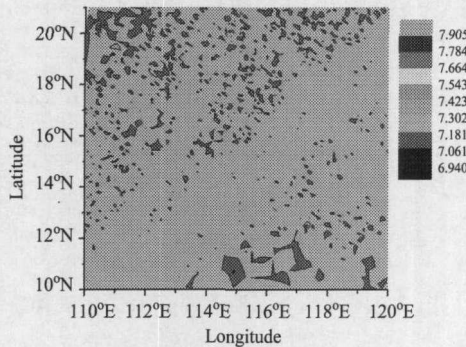


图 4 南海海域近海面气海绝对湿度起伏统计全貌

Fig.4 Overall image of fluctuation of air sea humidity differences in South China Sea

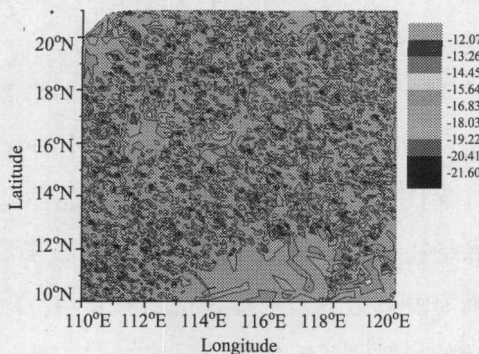


图 5 南海气海温差起伏最大值月 (12 月) 近海面光学湍流强度

Fig.5 Intensity of optical turbulence in South China Sea while the maximum fluctuation of ASTD is obtained (December)

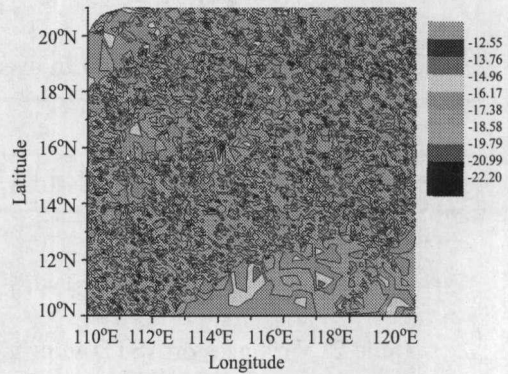


图 6 南海气海温差起伏最小值月 (3 月) 近海面光学湍流强度

Fig.6 Intensity of optical turbulence in South China Sea while the minimum fluctuation of ASTD is obtained (March)

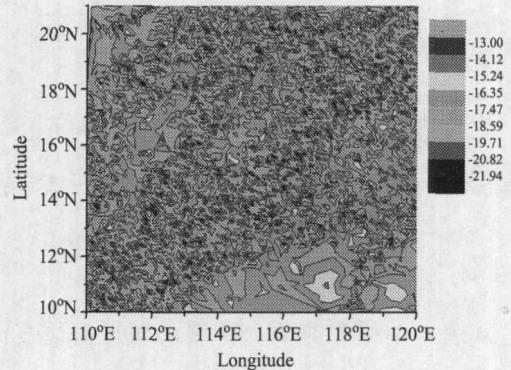


图 7 南海近海面大气湍流平均空间分布 (8 月)

Fig.7 Means spatial distribution of atmospheric turbulence in South China Sea (August)

5 结 论

我们采用 Bulk 模式计算基于常规气象要素的近海面大气湍流, 完整地给出了南海海域近海面大气湍流的时空统计分布图像。

南海近海面温度脉动、湿度脉动以及平均风速的绝对值都不大, 特别是温度脉动, 由于逆温层的出现, 在某些特定的时段和位置上, 常规气象要素的脉动值十分小, 显现出海洋下底面对垂直方向上的湍流形成起到了显著的抑制作用 [8]。整个海域大气湍流强度保持在 $10^{-17} \sim 10^{-14}$ 范围内, 属于中等强度偏弱湍流。且呈现出显著的

季节变化规律, 冬季显著大于夏季; 从空间起伏上看, 南海海域近海面大气湍流空间变化规律不显著, 距离陆地较近的滨海大气湍流略大于公海大气湍流。从图 4 可知, 随着距离大陆的距离增大, 绝对湿度起伏逐渐增大, 这可能是造成滨海大气湍流大于公海大气湍流的原因之一^[4]。

参考文献:

- [1] Wyngaard J C, Izumi Y, Collins S A, Jr. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(12): 1646-1650.
- [2] Friehe C A, La Rue J C, Champagne F H, et al. Effects of temperature and humidity fluctuations on the optical refractive index in the marine boundary layer [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**(12): 1502-1511.
- [3] Friehe C A. Estimation of the refractive-index temperature structure parameter over the ocean [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(2): 334-340.
- [4] Andreas E L. Estimating over snow and sea ice from meteorological data [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(4): 481-495.
- [5] Rao Ruizhong. Probability analysis of effects of optical properties of atmosphere on laser engineering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5): 583-587(in Chinese).
饶瑞中. 大气光学特性对激光工程影响的概率分析 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(5): 583-587.
- [6] Rao Ruizhong, Qiao Yanli, Wei Heli, et al. Research and application on optical properties of atmosphere in typical regions of China [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(6): 401-408(in Chinese).
饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 等. 中国典型地区大气光学特性及其应用 [J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(6): 401-408.
- [7] <http://mds.coi.gov.cn> [OL].
- [8] Mooradian G C, Geller M, Levine P H, et al. Over the horizon optical propagation in a maritime environment [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(1): 11-30.

作者简介: 陈 栋 (1979-), 男, 辽宁丹东人, 博士研究生, 研究方向为激光大气传输。