

文章编号: 0253-2239(2010)s100507

依据南海及东海数据分析中国海域近海面 大气湍流时空分布特征

陈 栋^{1,2,3} 饶瑞中^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
²中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
³中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 采用 Bulk 模式, 在 Monin-Obukhov 相似理论的基础上, 利用南海及东海近海面常规气象要素, 对中国海域近海面大气湍流的时空分布特征进行分析。编制了应用程序对输入的南海及东海(北纬 10°~33°, 东经 110°~130°)常规气象要素进行分析(常规气象要素包括海水温度、大气温度、大气湿度、平均风速和大气压力)。从气象要素平均场出发, 先估算出中国近海面大气湍流的整体图像; 然后, 对所测量的常规气象要素依据区域的不同(分为南海和东海)进行月度气海温差统计, 得出南海及东海各 12 组近海面二维空间上(经度和纬度)各观测点的气海温差起伏数据, 对比这两组数据, 分析了在气海温差起伏为指标的中国海域近海面大气湍流季节变化规律; 同时, 对整个研究区域分别在气海温差方差最大值及最小值所对应的月份进行大气湍流强度的空间起伏特性分析, 并刻画滨海环境和公海环境大气湍流的异同, 给出中国海域近海面大气湍流强度的空间变化规律。

关键词 大气光学; 海洋大气湍流; 常规气象要素; 时空分布特征; 中国海域

中图分类号 TN201; P42 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030.s100507

Analysis of Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Atmospheric Turbulence in Marine Surface Layer of China Sea Based on Statistic Data from South and East China Sea

Chen Dong^{1,2,3} Rao Ruizhong^{1,2}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²Key Laboratory of Atmospheric Component and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Utilizing Bulk model based on the Monin-Obukhov similarity (MOS) theory, the spatial and temporal distribution of atmospheric turbulence in marine surface layer of China Sea is analyzed based on the routine meteorologic factors of South and East China Sea. A program is compiled to realize the function in estimating atmospheric turbulence in marine surface layer. The input data is the routine meteorologic factors from the district of 10° to 33° north latitude and 110° to 130° east longitude, based on the data published by China Meteorological Administration. The routine meteorologic factors consist of water temperature, air temperature at height z , water vapor density adjacent to the sea surface, average water vapor density at height z , air pressure and the average wind speed. The panoramic image of atmospheric turbulence in marine surface layer of China Sea (independent to time) is established utilizing the algorithm of estimating refractive index based on the mean field of the several years meteorologic factors. Then by making a statistic on the air-sea temperature difference (ASTD) by month, we can get

收稿日期: 2010-06-01; 收到修改稿日期: 2010-07-04

作者简介: 陈 栋(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: phd.dchen.cn@gmail.com

导师简介: 饶瑞中(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

(中国光学学会会员号: S0404207915)

two sets of fluctuation data of ASTD on 2D spatial various observation points in East China sea and South China Sea, each of which has 12 groups because the data analyzed is from different districts in the South China Sea and East China Sea. The fluctuation of ASTD is deemed as the key index to depict the seasonal rule or temporal distribution of atmospheric turbulence in marine surface layer. The spatial distribution of atmospheric turbulence is also discussed in the month that has the maximum or minimum variance of ASTD, since it is denoted as the dispersion index. The difference of atmospheric turbulence between seacoast and mare liberum is also discussed while the location is taken into account, thus the spatial distribution of atmospheric turbulence in marine surface layer of China Sea is brought forward.

Key words atmospheric optics; marine atmospheric turbulence; routine meteorologic factors; spatial and temporal distribution; China Sea

OCIS codes 010.1290; 010.1330

1 引 言

为了从常规气象测量中描述大气光学湍流特征,过去数十年间进行了大量卓有成效的研究工作。由于直接测量表征光波大气传输效应的折射率结构常数 C_n^2 存在各种各样的困难,基于 Bulk 模式的近海面湍流强度预估算法获得了长足的发展。J. C. Wyngaard 和 Y. Izumi 等^[1]利用 1968 年美国空军剑桥研究实验室(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。Carl A. Friehe^[2,3]以前视线外(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。Edgar L. Andreas^[4]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 Paul A. Frederickson 等^[5,6]对 Bulk 模式进行了深入的分析,给出了完整的 Bulk 模式计算表达式,并对该模式的计算精度给出了全面的分析。戴福山等^[7,8]利用气象要素估算海洋大气近地层光学湍流,并利用数值天气预报产品预报海面光学湍流,获得了一定时空范围内海面光学湍流的特性数据。

Bulk 模式应用于包括基于数字气象预报预估近海面大气湍流,基于海洋气象历史数据构造近海面折射率以及基于实时气象观测数据给出以折射率为表征的光电系统辅助决策信息等诸多应用之中。通过与多次实验结果的比对,Bulk 模式在估算近海面大气折射率上具有很高的模型计算精度,能够在一定的海洋环境下得到与实际环境相一致的结论。

选取纬度 $10^\circ \sim 33^\circ$, 经度 $110^\circ \sim 123^\circ$, 包含南中国海及东海,应用 Bulk 模式计算了该区域的大气湍流强度,对该区域大气湍流特性做了一定时空下的全面描述^[9,10]。

2 方 法

表征大气湍流主要依赖大气折射率参数指标,在可见光和近红外区,折射率因子由下式表征:

$$n = 1 + 10^{-6} \left\{ m_1(\lambda) \frac{P}{T} + [m_2(\lambda) - m_1(\lambda)] \frac{qP}{T\epsilon\gamma} \right\}, \quad (1)$$

式中 P 为大气压力(hPa), T 为大气绝对温度(K), q 为特征湿度, ϵ 为理想气体干湿比率(为 0.62197), $\gamma = 1 + 0.6078q$ 。

Monin-Obukhov 相似理论指出^[2],与波长相关的函数 m_1, m_2 在可见光和近红外区分别表示为

$$m_1(\lambda) = 23.7134 + \frac{6839.397}{130 + \lambda^{-2}} + \frac{45.473}{38.9 - \lambda^{-2}}, \quad (2)$$

$$m_2(\lambda) = 64.8731 + 0.58058\lambda^{-2} - 0.0071150\lambda^{-4} + 0.0008851\lambda^{-6}, \quad (3)$$

对于 $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ 的近红外光而言, $m_1 = 77.5, m_2 = 64.9$ 。

E. L. Andreas^[4]指出,由于近地层大气压力保持恒定,因此,可以将大气压力的变化忽略,这样,表征湍流起伏的大气折射率可以用大气温度脉动和大气湿度脉动来表示:

$$n' = A(\lambda, P, T, q)T' + B(\lambda, P, T, q)q', \quad (4)$$

式中 A 和 B 分别是折射率对大气温度和大气湿度的偏导数:

$$A = \frac{\partial n}{\partial T} = -10^{-6} \frac{P}{T^2} \left\{ m_1(\lambda) + [m_2(\lambda) - m_1(\lambda)] \frac{q}{\epsilon\gamma} \right\}, \quad (5)$$

$$B = \frac{\partial n}{\partial q} = 10^{-6} [m_2(\lambda) - m_1(\lambda)] \frac{q}{T\epsilon\gamma^2}, \quad (6)$$

在惯性子区, Kolmogorov 理论认为任何结构参数都符合指数 2/3 定律,即

$$C_x^2 = \frac{\langle [x'(0) - x'(d)]^2 \rangle}{d^{2/3}}, \quad (7)$$

则对于任意两个参量的结构参量协变量,可以写成

如下形式：

$$C_{xy} = \frac{\langle [x'(0) - x'(d)][y'(0) - y'(d)] \rangle^2}{d^{2/3}}, \quad (8)$$

这样，由温度结构参数和湿度结构参数共同作用下的折射率结构参数可以表示为

$$C_n^2 = A^2 C_T^2 + 2ABC_{Tq} + B^2 C_q^2, \quad (9)$$

式中 C_{Tq} 为温度湿度结构参数协变量，根据 Monin-Obukhov 相似理论，结构参数是对应特征参量、观测高度以及 Monin-Obukhov 长度 (ζ) 的函数，可以表示为^[5]

$$\begin{cases} C_T^2 = T_*^2 z^{-2/3} f_T(\zeta) \\ C_q^2 = q_*^2 z^{-2/3} f_q(\zeta) \\ C_{Tq} = r_{Tq} T_* q_* z^{-2/3} f_{Tq}(\zeta) \end{cases}, \quad (10)$$

式中 T_* 为特征温度， q_* 为特征湿度， r_{Tq} 为温度湿度相关系数，其值在 $-1 \sim 1$ 范围内，E. L. Andreas 认为，在正的 Bowen 比率下，该值可以取 0.8，而对于负的 Bowen 比率，则一般取 0.5，由于海面往往出现逆温层，所以 Bowen 比率时常为负，而当 Bowen 比率为负时， r_{Tq} 显著地影响到大气湍流的估算精度，因此对于近海面大气湍流的估算需要认真考虑该值。 $f_T(\zeta)$ ， $f_q(\zeta)$ ， $f_{Tq}(\zeta)$ 为关于 ζ 的一组无量纲经验关系式。Edson 和 Fairall 于 1998 年通过实验标定了近海面不稳定层结下上述关系式的近似表达，而 J. C. Wyngaard 于 1973 年在 Kansas 所进行的实验则给出了稳定层结下上述函数的经验公式，如下式所示：

$$\begin{cases} f_T(\zeta) = f_q(\zeta) = 5.9(1 - 8\zeta)^{-2/3}, & \zeta \leq 0 \\ f_T(\zeta) = f_q(\zeta) = 5.9(1 + 2.4\zeta^{2/3}), & \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

需要强调指出的是，在稳定层结下，一般而言， $f_T(\zeta)$ ， $f_q(\zeta)$ ， $f_{Tq}(\zeta)$ 表现出更加明显的离散特性，给模型带来一定的不确定性。

Monin-Obukhov 长度 (ζ) 被认为是特征风速，特征温度以及特征湿度(对近海面情况而言)的线性表征，略去一组复杂的描述上述特征尺度的说明，直接给出海面环境下 ζ 的表达式：

$$\zeta = \frac{zkg(T_* + 0.61Tq_*)}{T_* U_*^2}, \quad (12)$$

式中 z 为测量高度， T_* 为潜热， g 为重力加速度， k 为 Karman 常数，这里取 $k = 0.4$ 。为了计算 C_n^2 ，从 (9) ~ (12) 式可知，必须知道 T_* ， q_* ， U_* 。用下面一组公式计算 T_* ， q_* ， U_* ：

$$\begin{cases} U(z) = U_0 + \frac{U_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_{0U}} - \Psi_U(\zeta) \right] \\ T(z) = T_0 + \frac{T_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_{0T}} - \Psi_T(\zeta) \right], \quad (13) \\ q(z) = q_0 + \frac{q_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_{0q}} - \Psi_q(\zeta) \right] \end{cases}$$

式中 $\Psi_U(\zeta)$ ， $\Psi_T(\zeta)$ ， $\Psi_q(\zeta)$ 是有关 ζ 的一组经验公式，P. A. Frederickson^[6] 对此表达式及 z_{0U} ， z_{0T} ， z_{0q} 等粗糙集参数进行了详细的说明。

这样，通过 (12) ~ (13) 式，采用逐次迭代的方法即可以得到 T_* ， q_* ， U_* 和 ζ ，再利用 (9) ~ (12) 式便计算得到 C_n^2 。

3 数 据

3.1 数据来源

数据来源自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^[11]网站。

3.2 数据类型及特征

选取与研究相关的北纬 $10^\circ \sim 33^\circ$ ，东经 $110^\circ \sim 130^\circ$ 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)，对于南海资料，数据时间跨度为 1965 ~ 1997 年，对于东海资料，数据时间跨度为 1953 ~ 1955 年。

4 结 果

从数据特征上来看，近海面常规气象要素数据体现出如下特点：1) 测量在时间上是相对连续的，从而产生了巨量的观测数据；2) 测量在空间上是离散的，使得描述研究海域近海面大气湍流特征的数据空间分布不足。必须对时间维度和空间维度上的数据进行统计处理，使之在时间上“离散”，能够为分析问题勾勒出应用区域典型的常规气象要素图像；同时，又在空间上具有一定的连续分布特征，保证典型海域常规气象要素数据能够提供较为细致的分析资源^[11]。

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性的，有代表性的时间点，刻画研究区域的大气湍流特性。

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,由于决定近海面大气湍流强度的主要因子是气海温差(ASTD),因此,以整个研究区域内的气海温差起伏为指标,衡量近海面大气湍流强度的时间/季节变化规律,同时,以月度气海温差方差为离散度评价指标,分析近海面大气湍流的空间分布规律。分别找出气海温差起伏和气海温

差方差的极值,以此两个月份的常规气象要素作为输入,计算并分析中国海域近海面大气湍流的时空变化规律^[9]。

4.1 基本统计分析结果

南海及东海气海温差起伏的月度统计结果如表 1,2 所示,以此数据进行的描点图如图 1,2 所示。

表 1 基于观测点的气海温差起伏月度统计结果(南海)

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

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

表 2 基于观测点的气海温差起伏月度统计结果(东海)

Table 2 Fluctuation of ASTD in every observation point by month (East China Sea)

Month	1	2	3	4	5	6
Fluctuation	4.65	3.51	1.64	0.76	0.50	-0.27
Month	7	8	9	10	11	12
fluctuation	-0.48	-0.17	0.63	1.29	2.72	3.76

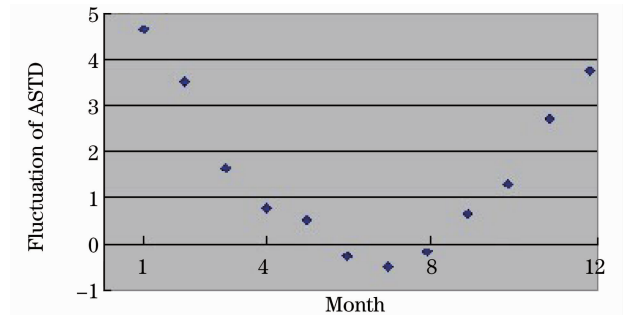
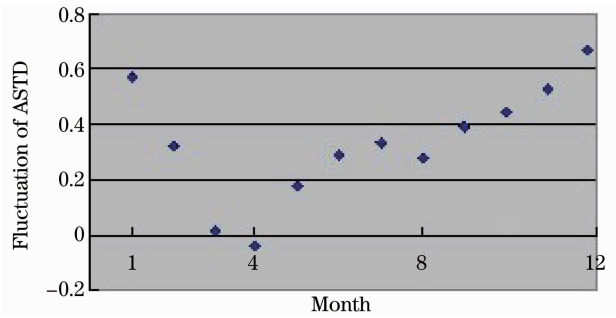


图 1 气海温差起伏季节变化规律(南海)

图 2 气海温差起伏季节变化规律(东海)

Fig.1 Seasonal distribution of fluctuation of ASTD (South China Sea)

Fig.2 Seasonal distribution of fluctuation of ASTD (East China Sea)

图 1,2 分别显示的是南海海域及东海海域气海温差起伏的季节变化规律,两幅图都清晰的显示出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,东海则分别出现在1月

和8月。

表 3,4 分别列出南海及东海海域气海温差方差的月度统计结果。图 3,4 分别是基于表 3,4 中数据刻画的南海及东海海域气海温差方差季节变化规律。

表 3 基于观测点的气海温差方差月度统计结果(南海)

Table 3 Variances of ASTD in every observation point by month (South China Sea)

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

表 4 基于观测点的气海温差方差月度统计结果(东海)

Table 4 Variances of ASTD in every observation point by month (East China Sea)

Month	1	2	3	4	5	6
Variance	9.99	12.51	8.28	6.87	4.59	3.82
Month	7	8	9	10	11	12
Variance	1.992	1.994	2.383	2.89	6.78	9.99

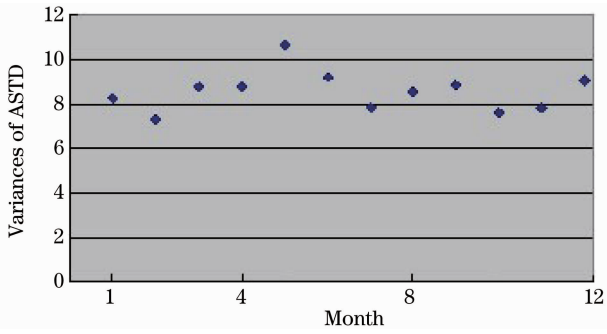


图 3 气海温差方差季节变化规律(南海)

Fig. 3 Seasonal distribution of variances of ASTD (South China Sea)

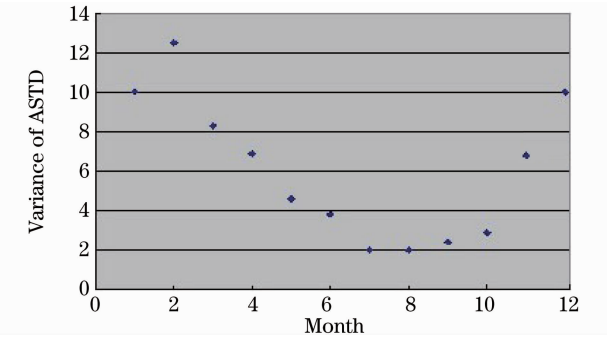


图 4 气海温差方差季节变化规律(东海)

Fig. 4 Seasonal distribution of variance of ASTD (East China Sea)

从图 3,4 中可见,东海海域气海温差方差的季节变化规律显著,而南海海域整体上看气海温差方差变化平缓,说明从空间起伏上看,东海海域近海面大气湍流具有显著的时间变化特征,而从表 3,4 中数据来看,南海海域近海面大气湍流的空间起伏整体要大于东海。由于南海气海温差方差季节变化不明显,对表 3 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,同时,从表 4 中找出气海温差方差最大值及最小值所对应的月份(分别是 2 月和 7 月),以此两个月数据作为分析东海海域近海面大气湍流空间起伏特征的基本参量,分析南海及东海海域近海面大气湍流的空间起伏特征。

4.2 南海及东海气象平均场

图 5,6 给出了南海及东海近海面风速平均场,比较两幅图可知,东海近海面风速要显著地大于南海,其值一般为 12 m/s,个别距离陆地较近的区域平均风速甚至达到 20 m/s 以上,而南海近海面风速平均值为 6 m/s 左右,且空间起伏不大。

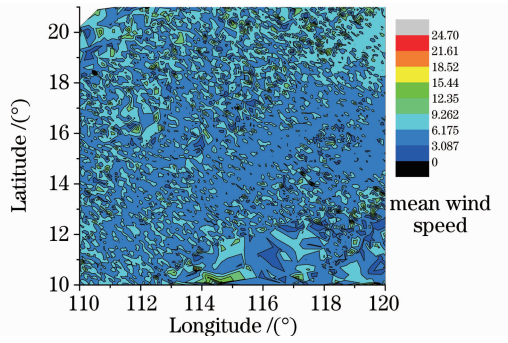


图 5 南海海域近海面平均风速统计全貌

Fig. 5 Panoramic image of average wind speed near sea surface (South China Sea)

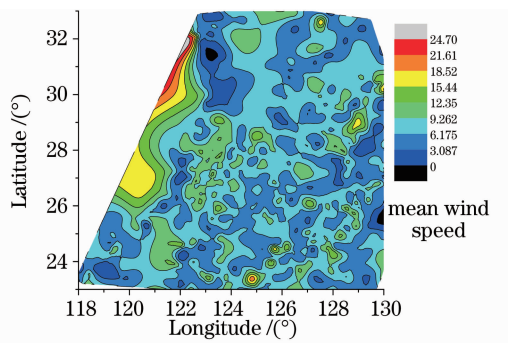


图 6 东海海域近海面平均风速统计全貌

Fig. 6 Panoramic image of average wind speed near sea surface (East China Sea)

图 7,8 则给出了南海及东海海域近海面气海绝对湿度起伏的平均场分布特征,从图中可以看出,无论是南海还是东海,气海绝对湿度起伏整体上都保持在 $6 \sim 7 \text{ g/m}^3$ 之间,而从空间分布来看,在整个南海海域绝对湿度都保持相对平均,而东海滨海区域绝对湿度要明显小于公海区域,显示出典型的区域分布特性。需要注意的是,图 8 和图 6 在空间起伏特性上表现的较为一致,说明近海面绝对湿度起伏与风速之间存在一定的相关性。

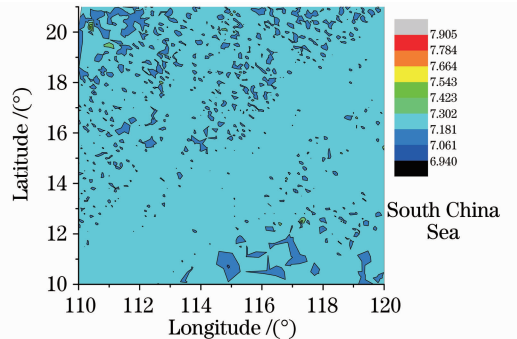


图 7 南海海域近海面气海绝对湿度起伏统计全貌

Fig. 7 Panoramic image of fluctuation of air sea humidity near sea surface (South China Sea)

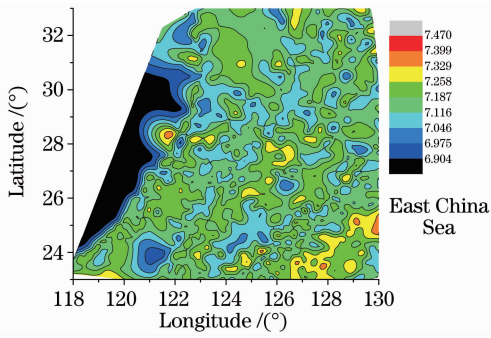


图 8 东海海域近海面气海绝对湿度起伏统计全貌

Fig. 8 Panoramic image of fluctuation of air sea humidity near sea surface (East China Sea)

4.3 近海面光学湍流时间分布规律

图 9~12 分别对南海和东海最大及最小光学湍流进行了描述,从上述各幅图中可以看出,无论是南海还是东海,冬季大气湍流都要显著的大于夏季大气湍流,一般要高出两个数量级左右,其中,南海冬季大气湍流保持在 $10^{-16} \sim 10^{-15}$ 数量级,夏季大气

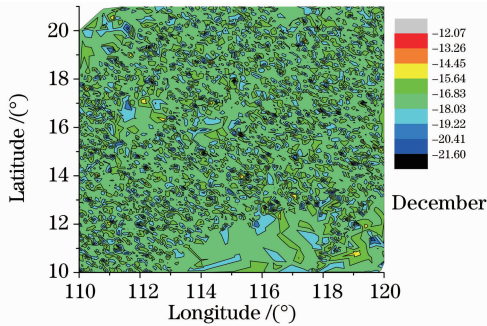


图 9 南海气海温差起伏最大值月(12月)近海面光学湍流强度

Fig. 9 Intensity of optical turbulence in South China Sea while the maximum fluctuation of ASTD is obtained (December)

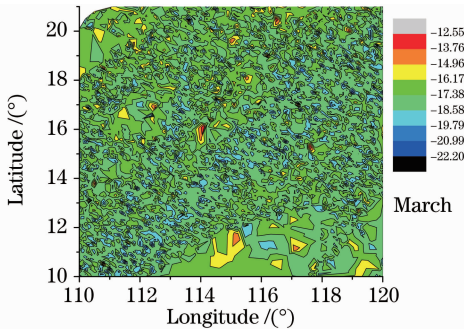


图 10 东海气海温差起伏最小值月(3月)近海面光学湍流强度

Fig. 10 Intensity of optical turbulence in South China Sea while the minimum fluctuation of ASTD is obtained (March)

湍流在 10^{-17} 左右,而东海大气湍流总体上要大于南海,其中冬季大气湍流保持在 10^{-16} 以上,个别区域甚至达到 10^{-14} ,而夏季光学湍流基本上都在 $10^{-16.6} \sim 10^{-18.28}$ 数量级。

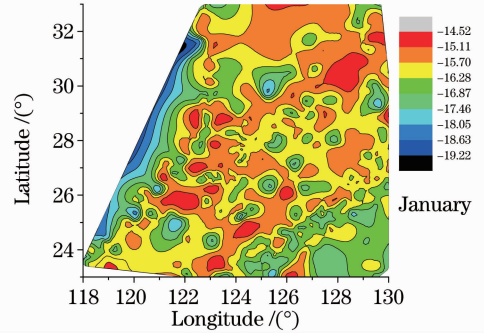


图 11 东海气海温差起伏最大值月(1月)近海面光学湍流强度

Fig. 11 Intensity of optical turbulence in East China Sea while the maximum fluctuation of ASTD is obtained (January)

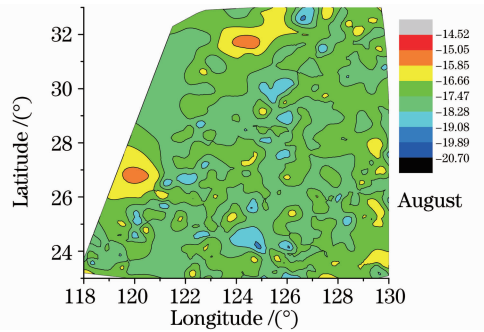


图 12 东海气海温差起伏最小值月(8月)近海面光学湍流强度

Fig. 12 Intensity of optical turbulence in East China Sea while the minimum fluctuation of ASTD is obtained (August)

4.4 近海面光学湍流空间分布规律

图 13~15 分别对南海和东海的近海面大气湍流空间起伏进行了描述。图 13 给出的是南海近海面大气湍流空间起伏平均场,所用数据为 8 月份数据,从图中可以看出,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 14,15 则表现出显著的空间起伏特性,说明东海近海面大气湍流更为复杂,比较而言,2 月东海近海面大气湍流空间起伏要大于 7 月,湍流强度跨越了 $10^{-14} \sim 10^{-17}$ 数量级,且空间变化规律明显,7 月东海近海面大气湍流强度则主要集中在 $10^{-16} \sim 10^{-17}$ 数量级。

从空间分布规律上看,东海大气湍流强度与距离陆地的远近相关,总体上说,滨海大气湍流比公海大气湍流要强,这可能是由于陆地边界对风速的影

响造成的,这点从图 6 中可以看出。而南海大气湍流强度并没有体现出上述空间分布特性。

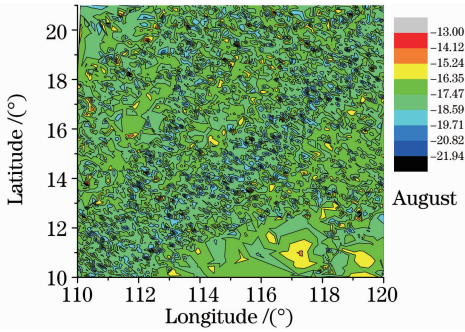


图 13 南海平均近海面大气湍流空间分布(8月)
Fig. 13 Mean spatial distribution of atmospheric turbulence in South China Sea (August)

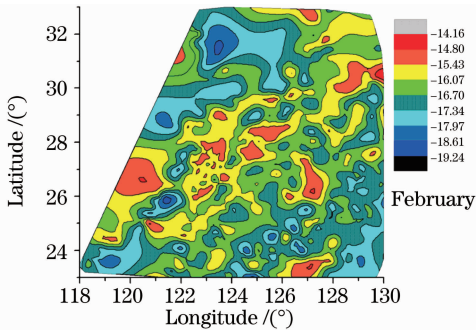


图 14 东海气海温差方差最大值月近海面大气湍流空间分布(2月)

Fig. 14 Spatial distribution of atmospheric turbulence in East China Sea while the maximum variance of ASTD is obtained (February)

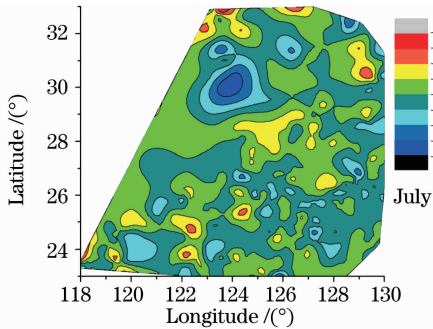


图 15 东海气海温差方差最小值月近海面大气湍流空间分布(7月)

Fig. 15 Spatial distribution of atmospheric turbulence in East China Sea while the minimum variance of ASTD is obtained (July)

5 结 论

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

分析结果表明:1)近海面条件下,无论是南海还是东海,气海温差起伏都很小,显现出海洋下垫面对垂直方向上的湍流形成起到了显著的抑制作用,直接限制了近海面光学湍流强度;2)近海面平均风速较大,特别是东海,统计平均风速达到 12 m/s,个别距离陆地较近的区域平均风速甚至达到 20m/s 以上;3)从时间分布规律上看,近海面大气湍流呈现出显著的季节变化规律,冬季大于夏季;4)从空间分布规律上看,近海面大气湍流强度随着距离陆地的距离增大而减小,南海海域空间分布规律不显著;5)从大气湍流强度来看,近海面大气湍流整体上较小,主要集中在 10^{-17} 的量级上,冬季的东海近海面大气湍流强度能够达到 10^{-15} 量级,但是与陆地大气湍流相比,整体上湍流强度还相差一个甚至两个数量级。

参 考 文 献

- 1 J. C. Wyngaard, Y. Izumi, S. A. Collins. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(12): 1646~1650
- 2 C. A. Friehe, J. C. La Rue, F. H. Champagne *et al.*. Effects of temperature and humidity fluctuations on the optical refractive index in the marine boundary layer[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**(12): 1502~1511
- 3 C. A. Friehe. Estimation of the refractive-index temperature structure parameter over the ocean[J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(2): 334~340
- 4 E. L. Andreas. Estimating C_n^2 over snow and sea ice from meteorological data[J]. *J. Opt. Soc. Am. A, S. Harmel, D. Tsintikidis*, 1988, **5**(4): 481~495
- 5 P. A. Frederickson, S. Harmel, D. Tsintikidis *et al.*. Measurements and modeling of optical turbulence in a maritime environment[C]. *SPIE*, 2006, **6303**: 630307
- 6 P. A. Frederickson *et al.*. Estimating the refractive index structure parameter over the ocean using Bulk methods[J]. *J. Appl. Meteor.*, 2008, **39**(10): 1770~1783
- 7 Dai Fushan, Li Youkuan. Estimation of the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer based on meteorological data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 191~196
- 8 Dai Fushan, Li Youkuan, Hu Jiangkai. Forecast of optical turbulence in marine surface layer using numerical weather prediction products [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(3): 161~172
- 9 戴福山, 李有宽, 胡江凯. 利用数值天气预报产品预报海面光学湍流[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(3): 161~172
- 9 Rao Ruizhong. Probability analysis of effects of optical properties of atmosphere on laser engineering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5): 583~587
- 10 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): 161~172
- 10 Rao Ruizhong, Qiao Yanli *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
- 11 饶瑞中, 乔近利, 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
- 11 <http://mds.coi.gov.cn>