

文章编号: 1007-5461(2003)03-0375-05

海面上行星边界层微结构的探空测量

吴晓庆, 马成胜, 袁仁民, 曾宗泳, 王英俭

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要 用自行研制的探空仪于 1999 年 6 月在东海进行了探空实验, 得到了海面上大气温度、湿度、气压、 C_n^2 廓线。资料分析表明: 800 m 以下海面上温度的日变化不超过 3°C , 逆温强度较弱。当纬度增加 1°C , 海表面气温减少 1°C 。 C_n^2 随高度迅速下降, 从海表面直至 500 m 达到相对小的区域, 在 500~2000 m 高度内 C_n^2 基本上保持不变。湍流峰值往往出现在位温梯度较大的地方。并对海面上位温廓线日变化进行了数值模拟。

关键词 海面上; 微结构; 探空测量

中图分类号: P412.23 文献标识码: A

1 引言

探空气球测量 C_n^2 自 70 年代被用作天文台选址、为建立大气湍流模式积累数据至今, 探空技术有了很大发展, 其高精度、高空间分辨率等特点是现有的雷达技术和光学测量技术难以实现的。而成本低、操作简单也比万立方米的高空气球更多地用来进行低平流层以下大气湍流结构、湍流场和平均场的关系、小尺度大气动力学过程等研究。90 年代初, Coulman 等^[2] 用探空技术在 Canary 岛、法国、智利获得了 20 km 以下 C_n^2 、温度、湿度、风速等廓线资料。证实了 C_n^2 廓线具有分层特性, 发现湍流薄层几乎成对出现, 与很陡的温度梯度相关。我国自九十年代初开始进行 C_n^2 的探空测量以来, 取得了昆明、兴隆^[3]、合肥等地宝贵的 C_n^2 廓线数据。但由于没有进行气象参数的同时观测, 因而无法进行高空湍流结构的研究。常规气象探空仪, 传感器惯性大、精度低, 可能观测不到大气温度的细致变化。因此, 我们研制了高精度温湿度探空仪^[4], 并在此基础上, 增加了快速反应的金属丝传感器, 因而能同时测量 C_n^2 和气象参数。本文给出了 1999 年 6 月在东海进行的探空实验结果, 并将 C_n^2 廓线与边界层湍流模式进行了比较。

2 测量仪器和实验安排

由一对微温传感器测量温度结构函数 $\overline{(T(x) - T(x+r))^2}$, x 和 r 是位置矢量, T 是气温, 上划线表示系综平均。在均匀各向同性条件的假定下, 由 Kolmogorov 2/3 定律可得到温度结构常数 C_T^2 。使用两个直径为 $10\ \mu\text{m}$ 钨丝作微温传感器, 组成惠斯登电桥的两臂, 由温度变化产生的电桥两臂电压差被一差分放大器放大, 再对电压进行均方根 (rms), 统计平均时间约为 5 s。

探空仪的主要技术特点是:

- 1) C_T^2 统计平均时间为 5 s, 电阻丝响应频率为 0.1~20 Hz, 噪声约 $4 \times 10^{-6} (\text{Km}^{-1/3})^2$ 。
- 2) 气温测量精度为 0.2°C , 惯性时间小于 1 s, 湿度测量精度为 3%, 惯性时间小于 2 s。
- 3) 探空仪循环时间为 8 s, 升速小于 3 m/s, 垂直分辨率约为 20 m。

探空测量主要分二个部分：一是同一经度不同纬度的测量；从 6 月 6 日 10 时开始，船沿东经 123° 附近往北航行，7 日 9 时 25 分到达北纬 37°25'，随即调头往南仍沿 123° 线于 9 日 14 时到达北纬 29°40'。接着向西于 9 月 16 时 30 分在舟山群岛的朱家尖锚地停泊。探空观测大致在航行中的 8 时、12 时、16 时和 20 时进行。除 33° 和 34° 外，我们得到了从北纬 28~37° 各纬度的探空记录。二是在 6 月 12 日 15 时至 13 日 17 时在朱家尖海面上进行日变化测量。此外还在船头甲板上设一固定测量点，遥测气温，并不定时测量水温。

3 模 式

在水平均匀的条件下，一维边界层模式为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(v - v_g) + \frac{\partial}{\partial z}(K_m \frac{\partial u}{\partial z}) - w \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f(u - u_g) + \frac{\partial}{\partial z}(K_m \frac{\partial v}{\partial z}) - w \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}[K_h(\frac{\partial \theta}{\partial z} - \gamma)] - w \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (1c)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(K_h \frac{\partial q}{\partial z}) - w \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (1d)$$

f 是 Coriolis 参数， v_g 和 u_g 是地转风分量。 u 、 v 是风速的水平方向的两个分量， w 是风速的垂直方向分量， q 是绝对湿度。我们采用 Troen 和 Mahrt^[5] 给出的湍流输运系数 K_h 、 K_m 公式。

在模式中将大气分成若干个网格。在近地面层，模式的网格具有高空间分辨率且不等间距。随着高度增加网格间距加大，且等间距。网格总数随具体情况可进行选择。

不象在陆地，地表温度变化很大，为获得表面通量，需要解表面能量平衡方程。在海面上，表面温度在预报期间几乎是常数，因此常用廓线方法得到表面通量。

$$u_* = \frac{kU_1}{\ln(\frac{z_1}{z_{0M}}) - \varphi_M(\frac{z_1}{L}) + \varphi_M(\frac{z_{0M}}{L})}, \quad (2a)$$

$$\overline{w\theta_0} = \frac{-k(\theta_1 - \theta_s)u_*}{\ln(\frac{z_1}{z_{0H}}) - \varphi_H(\frac{z_1}{L}) + \varphi_H(\frac{z_{0H}}{L})}, \quad (2b)$$

$$\overline{wq_0} = \frac{-k(q_1 - q_s)u_*}{\ln(\frac{z_1}{z_{0H}}) - \varphi_Q(\frac{z_1}{L}) + \varphi_Q(\frac{z_{0Q}}{L})}, \quad (2c)$$

u_* 是摩擦速度， $\overline{w\theta_0}$ 和 $\overline{wq_0}$ 分别是表面热通量和水汽通量。 K 为 von Karman 常数， U_1 、 θ_1 、 q_1 分别是高度 z_1 处的风速、位温和绝对湿度。 θ_s 和 q_s 分别是表面相对值。 z_{0M} 、 z_{0H} 、 z_{0Q} 是动量、热和湿度、粗糙度、长度。

海面上， z_{0M} 可用 Charnock 方法估算为：

$$z_{0M} = \alpha u_*^2 / g, \quad (3)$$

$\alpha = 0.0144$ ， g 是重力加速度。 z_{0H} 、 z_{0Q} 在不稳定条件下设置为 4.9×10^{-5} m，稳定条件下，其值更小。Obukhov 长度为：

$$L = \frac{-u_*^3}{k \frac{g}{T} (w\theta_0 + 0.61\bar{T}wq_0)}, \quad (4)$$

\bar{T} 是表面层温度。方程 (2) 中 φ_M 、 φ_H 和 φ_Q 分别取自 Dyer^[6] 和 Holtslag^[7] 公式。方程 (1)~(4) 可得到海表面通量和位温廓线。

4 实验结果

4.1 海上温度的日变化及其大气边界层特征

在陆地上，日变化是稳定天气条件下大气温度变化的主要形式，在 2000 m 以下幅度可达 10°C 以上，由于水中热量向下穿透能力大；水的热容量比陆地大；水的溶解和蒸发潜热大等因素，使得海面上温度变化不显著，变化范围小。我们在舟山群岛朱家尖海面上的测量证明了这一点。图 1 是 1999 年 6 月 12 至 13 日 1000 m 以下不同时间实测和模拟的位温廓线。我们发现，800 m 以下温度的变化不超过 3°C。

从图 1 中可以看出逆温在下午已开始形成，在两次下午的探空中，在 200 m 和 60 m 高度上，已有 1.55 K(100 m)⁻¹ 和 1.17 K(100 m)⁻¹ 弱的逆温。到晚上 21 点 18 分，逆温层顶高度降为 24 m，强度减弱到 1 K(100 m)⁻¹。早晨 7 时 34 分，逆温层已经消退，在 100 m 以下，边界层已完全混合。到中午 11 时 48 分，混合层高度达 500 m。基本反映出陆地上对流边界层形成过程中的一些特征。从实测结果看，海表面上逆温，与夜晚陆地表面上空逆温达 8~10 K(100 m)⁻¹ 相比，强度很弱，也没有出现近地面超绝热的温度层结。

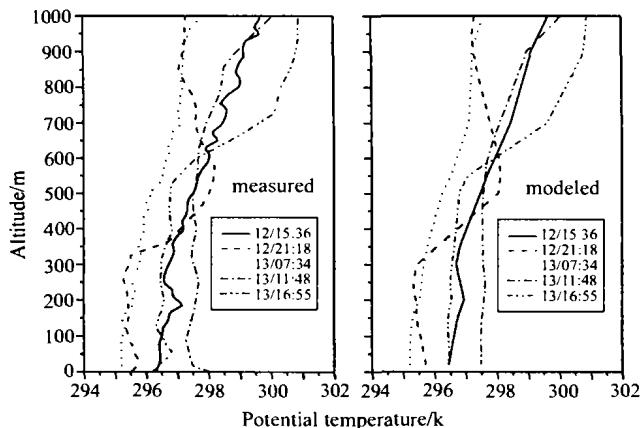


Fig.1 Potential temperature profiles of measurement and simulation at different times on June 12~13, 1999 at Zhujiajian, Zhoushan Island

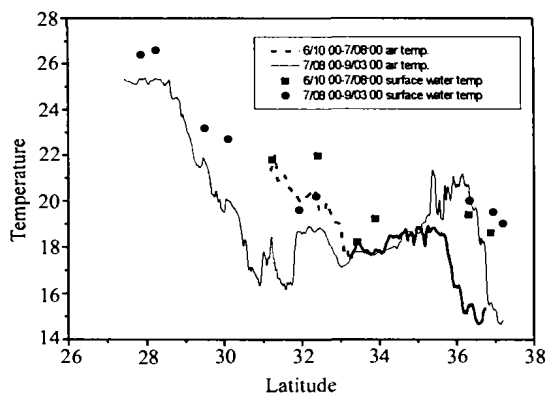


Fig.2 Variation of temperature at atmosphere and sea surface at different latitudes

4.2 海上温度的纬度分布

图 2 给出了不同纬度遥测的气温和水温测量结果，随着纬度的增加，海面气温不断下降，南北温差达到 10°C，没有明显的日变化规律。尽管有些时段气温有一些起伏，这与太阳辐射有关。但纬度增加是气温下降的主要原因。

表 1 北纬 27° 与 34° 逐月海面气温的平均温差

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
温差	8	7.5	7	6.5	6	5.5	2.5	1.5	3	3.5	5.5	6

表 1 给出了气象观测站资料北纬 27° 与北纬 34° 逐月海面气温的平均温差, 纬度增加 1°, 温度平均下降 0.8°C, 比实测的下降 1°C 略小。海面气温降低一月份最大达到 1.1°C, 八月份最小仅 0.2°C。

4.3 海面上行星边界层 C_n^2 廓线

已有许多陆地上 C_n^2 廓线的实验结果。亦已证实^[8], 在白天对流边界层, 最强的光学湍流出现在地表附近, 典型的 C_n^2 值在 10^{-13} 量级 ($\text{m}^{-2/3}$), 并随高度按 $-4/3$ 指数递减, 而且在温度梯度较大的逆温层顶附近可能是强湍流区域。在夜晚, 由于地表辐射冷却, 经常出现数十米至数百米厚的逆温层。从铁塔 C_n^2 数据分析表明, 湍流强弱与风速大小存在一定的关系。与高空大气湍流不同, 在逆温层顶以上几公里范围内的湍流受地形地貌或残留的白天边界层的影响, 表现出复杂的特性。 C_n^2 随高度下降的指数关系不明确, 最显著的特征是分层特性。相比之下, 海面上廓线的实测报道不多。图 3 和图 4 分别是在舟山群岛朱家尖海面上白天和夜晚的探空 C_n^2 廓线和位温廓线。共同特点是 C_n^2 随高度迅速下降, 直至 500 m 达到相对小的区域; 在 500~2000 m 高度内 C_n^2 基本上保持不变。

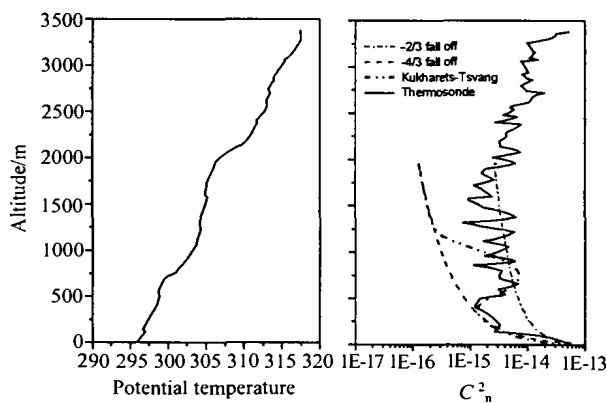


Fig.3 Nighttime profile of C_n^2 with concurrent measurements of temperature

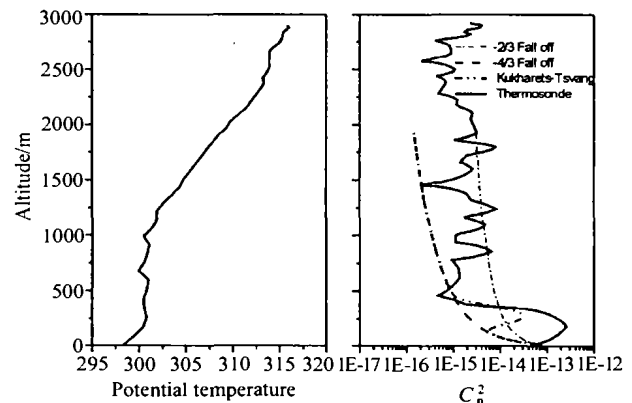


Fig.4 Daytime profile of C_n^2 with concurrent measurements of temperature

一般来说, 大气湍流的形成和发展与大气稳定度有关。大气处于稳定、中性、不稳定状态取决于位温梯度是大于零、等于零还是小于零。图 3 的 700~2000 m, 图 4 的 250~1000 m, 除少数局部起伏外, 几乎是中性的。混合过程形成了近 1000~1500 m 厚的中性层。当然, 一两次探空虽不能给出廓线的演变过程, 但还可以看出湍流峰值往往出现在位温梯度最大的地方。

我们将实测 C_n^2 廓线与高度的 $-4/3$ 、 $-2/3$ 指数曲线进行比较, 发现夜晚 C_n^2 随高度下降与 $-4/3$ 指数曲线符合得很好, 与白天比较, 在 1000 m 以下夜晚廓线基本与 Kukharets-Tsvang 模式一致, Kukharets-Tsvang 模式只适用于充分对流条件下的白天, 模式中的 C_n^2 峰值常出现在逆温层顶。似乎夜晚海表面上大气处于充分对流状态。

5 结 论

用自行研制的探空仪于 1999 年 6 月在东海进行了探空实验, 得到了海面上大气温度、湿度、气压、 C_n^2 廓线。探空仪能观测到大气温度的细致变化。资料分析表明: 海面上 800 m 以下温度的日变化不超过 3°C, 海面上逆温强度较弱; 当纬度增加 1°C, 海表面气温减少 1°C, 与历史记录统计的 0.8°C 相近。 C_n^2 随高度迅速下降, 从海表面直至 500 m 达到相对小的区域, 在 500~2000 m 高度内 C_n^2 基本上保持不变。湍流峰值往往出现在位温梯度较大的地方。

致谢: 张玉祥研究员为实验提供了极大帮助, 深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Barletti R, Ceppatelli G, Righini A *et al.* Mean vertical profile of atmospheric turbulence relevant for astronomical seeing [J]. *Opt.Soc.Am.*, 1976, 66, 12, 1380-1383
- 2 Coulman C E, Vernin J, Fuchs A. Optical seeing-mechanism of formation of thin turbulent laminae in the atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34: 5461-5474
- 3 Wu X Q, Zeng Z Y, Ma C S *et al.* Observation of atmospheric turbulence by ballon-borne instrument at Xinlong station [J]. *Chinese Journal Of Quantum Electronics*(量子电子学报), 1996, 13: 385-390 (in Chinese)
- 4 Wu X Q, Zeng Z Y, Ma C S. A high precise radiosonde measure the structure of low height atmospheric temperature and humidity[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 1999, 16: 380-384 (in Chinese)
- 5 Mahrt L, Pan H L, Ruscher P *et al.* Boundary layer parameterization for a global spectral model [R]. Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, 1987, AFGL-TR-87-0246, 182
- 6 Dyer A J. A review of flux profile relationships [J]. *Bound-Layer Meteor*, 1974, 7: 363-372
- 7 Holtslag A A M, de Bruin H A R. Applied modelling of the nighttime surface energy balance over land [J]. *Appl. Meteor*, 1988, 22: 689-704
- 8 Beland R. Propagation through atmospheric optical turbulence [M]. *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook*. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993

Observation of Atmospheric Microstructural of Planet Boundary Layer by Radiosonde

Wu Xiaoping, Ma Chengsheng, Yuan Renmin, Zeng zongyong, Wang Yingjian
(Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031 China)

Abstract The experiment took place during June 1999 at the East Sea in China using the radiosondes developed by us, which measured vertical profiles of atmospheric pressure, temperature, relative humidity and the refractive index structure parameter C_n^2 . The diurnal variation of temperature is less than 3°C above sea surface up to 800 m, the surface-based nocturnal inversion is weak. The atmosphere temperature on sea surface decreases 1°C when latitudes increase 1 degree. The measured profile shows the rapid falloff of C_n^2 from the surface to the relatively quiet about 500 m height. The C_n^2 appears constant with altitude from 500 m to 2000 m height. The measured and modeled profiles of potential temperature have been compared.

Key words over sea; microstructure; radiosonde

吴晓庆 (1963 -), 男, 博士研究生, 从事大气湍流测量与研究, 发表论文十多篇。