

大气温度微结构观测

曾宗泳 马成胜*

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

提 要

1980年5月和9月在天津地区用铂丝电阻温度计测量了3000米高度以下大气的温度起伏。白天的测量结果说明了温度结构常数和谱的一些特征。

证实了结构常数廓线在对流边界层顶的介面层有一个可能由夹卷作用产生的极大值。文章还讨论了界面层 C_T^2 的平均值及其 Wyngaard 的计算方法,给出了界面层的厚度。

谱分析表明,对流边界层、自由大气中的强湍流带有较宽的惯性区。在自由大气中谱分析将受湍流间歇性的影响。在塘沽附近海面上边界层的上半部曾得到幂率为 -2.5 的谱。

一、引 言

大气温度场的微结构对于波传播问题有着重要的意义,它也是大气湍流研究的重要内容之一。

用气球或飞机探测高空温度起伏,从五十年代以来国外做了相当多的工作^[1,2],得到了大量关于温度结构常数 C_T^2 或折射率结构常数 C_n^2 随高度变化的资料。我们在应用这些结果之前需要知道 C_T^2 值可能在多大的范围内变化?它和平均场的关系如何?因此开展直接的观测对我们来说是十分必要的。

此外,在1—2千米以下的对流边界层中温度谱的特征已有较细致的研究^[3], Kaimal等在文献中给出了不同的无量纲高度 Z/Z_i 时的谱形(Z —高度 Z_i —对流边界层顶高度)。在自由大气中经常由于温度起伏信号很弱,连续长时间的观测又很困难,因此要得到一个完整谱颇不容易。不同方式得到的谱可能不一样,如文献[4]和[5]中的温度谱。我们希望直接测量能进一步明确自由大气中温度谱的特征。

1980年5月和9月在天津我们用自制的铂丝电阻温度计在飞机上测量了三千米高度以下的温度脉动值,用以分析 C_T^2 随高度的变化,以及温度谱的基本特征。同时还引用了北京气象塔上的测量结果。

二、仪器和数据处理

自制的铂丝电阻温度计是一个交流电桥,测量的是温度起伏量 T' , $T' = T - \bar{T}(t)$, 式中 T 是空气的瞬时温度, $\bar{T}(t)$ 约等于空气的平均温度。采用这种体制可以消除飞机升

1982年7月1日收到修改稿。

参加工作的还有李健康、赵剑峰、凌惠琴等。

降时随高度的温度变化。飞机测量时用 10 微米的铂丝,当飞机速度 $V = 50$ 米/秒时,铂丝能感应 100 周以下的温度变化。 T' 的频率范围大致是 0.05 周—100 周。测量用的感应头装在飞机的头部以保证在未受扰动的空间测量。

平均温度用半导体温度计测量,感应头放在飞机腹部,飞机颠簸用空盒气压表读数监测。

用一个点的温度脉动值计算 C_T^2 ,其结果和温度谱以及温度计的频率特性有关。如果测量系统总的频率响应为 $H(n)$ (n 为频率),则温度脉动信号经平方平均后的记录值 $\bar{S}^2$ 和功率密度 $\phi_T(n)$ 有如下关系^[6,7]

$$\bar{S}^2 = \int_0^{\infty} \phi_T(n) \cdot H^2(n) dn \quad (1)$$

假定^[8]

$$\phi_T(K_1) = 0.25 C_T^2 K_1^{-5/3} \quad (2)$$

式中 K_1 —波数,我们再假定 $n = K_1 \frac{V}{2\pi}$, V —飞机速度。利用 $\phi_T(K_1) dK_1 = \phi_T(n) dn$ 于是得到

$$C_T^2 = a \bar{S}^2 / (V^{2/3} \cdot b) \quad (3)$$

其中 $a = 13.6$,

$$b = \int_0^{\infty} H^2(n) \cdot n^{-5/3} dn \quad (4)$$

我们测试了整个测量及分析系统总的响应特性,其低频半功率点在 0.2 周。给出 $H(n)$ 后算出 $b = 4.96$ 。为了估计温度谱低频部份不满足关系 (2) 而造成 C_T^2 的误差,我们还用 $n = 1$ 周的窄带滤波器按 (2) 式计算了 200 米高度处飞机平飞时的 C_T^2 值。两种方法的结果大致相同,说明影响不大。

在对流边界层以上的自由大气中,温度谱常常不是呈 $-5/3$ 幂率。这时算得 C_T^2 就失去了原有的意义,它仅表示温度起伏能量的某种平均值。为和以前的资料比较,我们不算重新定义结构常数,仍使用 C_T^2 。应当注意用双点直接测量的 C_T^2 值可能代表了不同尺度的湍流强度,在不知道温度谱之前是不好比较的。

由于飞机水平飞行层次很少,所以我们使用升降时的测量资料,计算 100 米气层内 C_T^2 的平均值。飞机升降速度约等于 2 米/秒, C_T^2 平均值就代表了 1.8 公里内的水平温度起伏。由于磁带上记录高度的位置不精确,其误差可大到 100 米。这对 C_T^2 变化大的边界层下部及顶部有较大的影响。飞机在着陆前速度降低可能也有影响,因此计算地面热通量时除 5 月 13 日外使用了 200 米高度处水平飞行时的 C_T^2 值。

温度计的噪声为 0.005°C ,在飞行时频率 16 周处出现干扰,因而噪声可大到 0.01°C 。由于颠簸,飞机高度出现随机变化而造成随机的测温误差,可按下式算出温度均方根误差 δ_T 和 C_T 的误差 δ_{C_T} 。

$$\delta_T = \nu_a \cdot \delta p \frac{dz}{dp} \quad (5)$$

$$\delta_{C_T} = \delta_T \cdot (V \Delta t)^{-1/3} \quad (6)$$

式中 ν_a —温度绝热递减率, δ_p —气压起伏均方根值, dz/dp —高度随气压的变化率, Δt —

气压读数间隔时间。表 1 列出了由飞机颠簸算得的温度起伏均方根误差和 C_T 的误差。

最后我们提到,由于 C_T^2 的平均时间较短,因而有较大的统计偏差(参考 [9]),在起飞高度附近尤其是这样。

表 1 由飞机颠簸造成的测温误差

高 度 (米)	200	400	800	1000	2000	3000
$\delta_T(^{\circ}\text{C})$	0.033	0.027	0.026	0.031	0.013	0.0099
$\delta_{C_T}(10^{-1}^{\circ}\text{Cm}^{-1/3})$	0.53	0.43	0.41	0.49	0.21	0.16
$\delta(^{\circ}\text{C})$	0.017			0.0084	0.012	0.018
$\delta_{C_T}(10^{-10}^{\circ}\text{Cm}^{-1/3})$	0.27			0.13	0.19	0.29

不考虑水汽时折射率结构常数 C_n 可写成^[10]

$$C_n = \frac{29 \times 10^{-6} p}{T^2} C_T \quad (7)$$

式中 p —气压 (mb), T —平均温度 ($^{\circ}\text{K}$)

经交流或直流放大的温度脉动信号用模拟磁带记录下来,除送入模拟平方器外还用数字式频率分析器(丹麦 Brüel & Kjær 公司制造 2131 型)处理得到温度谱,温度谱的带宽是 $n_c/3$ (n_c —中心频率)。

三、观测概况

在天津共作七次飞机测量,除去其中有一部份因使用窄带低频放大没有足够的信噪比外,只有三次飞行共六份记录用于分析统计。

虽然观测都是在晴天做的,但天气条件各有不同,飞行路线也不一样。5月8日处在高压边缘,观测时有淡积云出现,飞机下降时直接从云中穿过。5月13日天津处在暖锋前部,在 500—700 米高度附近出现了总位温差 ($\Delta\theta$) 达 11.8°C 的逆温层,这不象一般

表 2 各次观测的边界层参数

序 号	1 A	1 B	2 A	2 B	3 A	3 B
日期	5 月 8 日		5 月 13 日		9 月 8 日	
时间	8:35 9:41	9:48 10:17	10:50 12:20	12:22 12:44	8:56 9:54	10:08 10:42
地面温度($^{\circ}\text{C}$)	17.0	19.5	21.0	23.0	21.8	25.3
$\Delta\theta(^{\circ}\text{C})$		4.4		11.8	4.0	1.2
Z_i (米)	700	700	600	600	600	1300
$Q_0(^{\circ}\text{C 米/秒})$	0.036	0.039		0.027	0.14	0.063
W_0 (米/秒)	0.94	0.97		0.80	1.2	1.2
$\theta_0(^{\circ}\text{C})$	0.038	0.041		0.033	0.10	0.045

的由湍流混合形成的边界层逆温盖 ($\Delta\theta$ 约为 3°C 左右)。(见 [3], [11])。9 月 8 日天津正好处在高压中心, 5 月 8 日和 13 日飞机在天津市区及郊区飞行, 9 月 8 日飞机在离塘沽海岸 5—20 公里的海上飞, 下降时从海面斜降到陆面。

表 2 中列出的参数中地面气温(高度 1 米处)、边界层顶总位温差 $\Delta\theta$ 为实测值, 其余由 C_T^* 算出。铁塔上的测量也是在晴天做的。

四、结构常数随高度的分布

1. 折射率结构常数 C_n^* 的高度分布 因折射率结构常数对波传播问题有意义, 我们在表 3 列出折射率结构常数 C_n^* 高度分布的平均值并和 Barletti 等的平均分布比较, 总的说来天津测量的 C_n^* 要小一倍。如果考虑到天津观测到的边界层顶高度大部份在 1000 米以下, 而边界层顶高度常常可以扩展到 2000 米左右(见 [3], [11]) 因而这有可能说明天津资料中 1—2000 米 C_n^* 的均值小很多的原因。

表 3 折射率结构常数的高度分布

$C_n^*/\text{高度}$	0—1000 米	1000—2000 米	2000—3000 米
天 津	$5.4(10^{-16} \text{ 米}^{-2})$	0.26	0.31
Barletti	11	1.3	0.61

边界层以下 C_n^* 变化较大, 深入了解是很必要的。

2. 对流边界层中的 C_T^* 对流边界层中, C_T^* 在下半部按 $Z^{-4/3}$ 减少, 上半部经过一段平稳的变化后在边界层顶部附近出现较大的峰值。Kaimal^[3], Caughey^[11], Kuxapeu^[12] 等已观测到这一事实。我们的资料也证实了这一现象的存在。图 1 画出了 C_T^* 归一化后随高度的平均分布, 归一化参数按下述方式确定。

对流层顶高度 Z_i 至今还没有一个公认的定义。Kaimal 把边界层顶部逆温盖的底作为 Z_i , Kuxapeu 则确定 Z_i 为湍能耗散率 ϵ 廓线的折点高度^[12]。从我们的资料出发, 用 0.9 倍 C_T^* 的峰值高度表示 Z_i , 得到的数值一般和边界层逆温盖的底部高度差不到 100 米。速度和温度尺度分别为^[3]

$$W_* = [\theta_0 \cdot Z_i (g/T)]^{1/3} \quad (8)$$

$$\theta_* = Q_0 / W_*$$

式中 g —重力加速度, Q_0 —地面热通量。按下式由地面附近的 C_T 数据算出

$$C_T^* = 2.67 Q_0^{1/3} (T/g)^{2/3} Z^{-4/3} \quad (9)$$

图中 Kaimal 的曲线引自 [3], Kuxapeu 的曲线由下述经验关系给出^[12]

$$\varphi_{C_T^*}(\xi) = K_1 \xi^{-4/3} + K_2 e^{-K_3(\xi-1.1)^2} \quad (10)$$

式中 $\varphi_{C_T^*} = C_T^*(\xi) / C_T^*(0.1)$ $\xi = Z / Z_i$,

$$K_1 = 0.046, \quad K_2 = 0.6, \quad K_3 = 12.$$

首先, 在边界层顶部附近 C_T^* 出现了较大的峰值, 峰值的出现可能与发生在边界层和自由大气之间的界面层 (interfacial layer) 中的“夹卷”过程有关。发生在对流边界层顶的夹卷的物理图象在文献(见 [3, 13, 14]) 中都有较多的描述。由于夹卷作用, 边界层以上

的干热空气被卷入边界层内的冷空气中, 由此而产生强的混合。于是在界面层内出现 C_T^2 的峰值, 夹卷是 C_T^2 值增大的根本原因。在自由大气中有时虽有逆温层存在但并无 C_T^2 峰值出现, 5 月 8 日就观测到这样的情况。

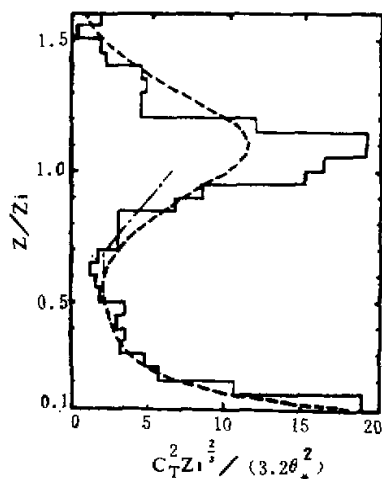


图 1 对流边界层中 C_T^2 的平均分布
点划线为 Kaimal, 点线为 Kuxapen

我们用 C_T^2 的半峰值高度来量度界面层的宽度, 结果列在表 4。相对宽度的范围大致在 0.3—0.4。由于界面层边缘通常很清楚, C_T^2 变化很大, 用 C_T^2 峰值的不同倍数确定的宽度一般相差不会太大。

表 4 界面层宽度
($\Delta h/Z_i$)

序 号	1A	1B	2A	2B	3A	3B	平均曲线	Caughey 等	Кухарен
$\Delta h/Z_i$	0.4	~0.4	~0.4	0.4	0.1	0.3	0.3	0.3	0.48

Wyngaard 等^[15]推导了计算在夹卷影响下界面层内 C_T^2 的平均值(记作 $\langle C_T^2 \rangle$)。忽略水汽时

$$\langle C_T^2 \rangle = \frac{0.5 \Delta \theta \theta_*}{Z_i^{2/3}} \quad (11)$$

$\langle C_T^2 \rangle$ 的数值就可以根据表 2 算出结果列在表 5。

表 5 夹卷影响下界面层中的 $\langle C_T^2 \rangle$

序 号	1B	2B	3A	3B
$\langle C_T^2 \rangle$	11.7(10 ⁻⁴ °C ² m ^{2/3})	31.8	70.3	1.9
实测 C_T^2 峰值	21.0	24.3	2.0	0.4

后三组数符合都不好, 5月13日(2B)顶部强逆温可能和锋面有关, 似乎不宜用(11)式. 9月8日上升时(3A), 低层吹西风, 气流流到海面后在200米高度上测到温度低了 1.5°C , 在海面上可能形成了新的逆温层, C_T^2 值增大一倍左右, 200米到400米随高度变化比 $Z^{-4/3}$ 快了很多(见图2). 这时用海面的 C_T^2 来计算混合层参数是不合适的. 同理, 下降时(3B)的 $\langle C_T^2 \rangle$ 值也会偏大.

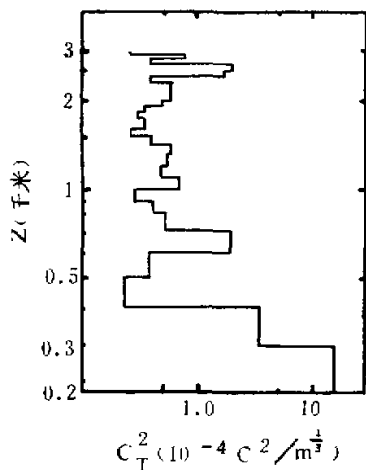


图2 海面上 C_T^2 的廓线, 9月8日上升时(3A)

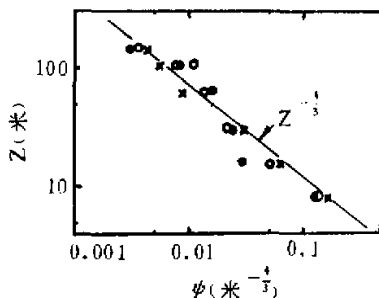


图3 在北京气象塔上测量的 C_T^2 值

实心圆点为5月19日上午, $Q_0 = 0.088$ ($^{\circ}\text{Cm/s}$); 叉点为5月20日上午, $Q_0 = 0.20$; 空心圆为5月20日下午, $Q_0 = 0.076$, $\phi = C_T^2/[Q_0^{-4/3}(g/T)^{-1/3}]$

最后, 为进一步说明对流边界层下半部 $C_T^2 \propto Z^{-4/3}$, 我们这里给出铁塔上的测量结果(见图3), 观测是逐个高度进行的, 每个高度平均时间5分钟, 随机误差影响较小.

五、温度谱

在对流边界层下半部和高空的强湍流带测量到的是 $-5/3$ 幂的谱, 在对流边界层顶的界面层, 虽然可能出现间断性, 但也是 $-5/3$ 幂分布. 图4是一个例子, 但也出现了例外(见图5), 500—800米高度上谱幂率等于 -2.5 .

我们统计了边界层以上的准层流区的部份温度谱, 列在表6. 5月8日层结趋于不稳定, 5月13日和9月8日层结稳定. 所有谱斜率 β 的绝对值都比 $|-3|$ 要小. 从表可以说明层结构稳定时常有 $|\beta| > |-5/3|$, 当有淡积云出现, 层结为弱不稳定时在个别波数上出现峰值, 这和文献[4]的结论十分相似. 出现这种谱幂率值分散的现象和在准层流区湍流的间歇性有关. 从图6画的原始温度记录可以清楚地看出, 高波数部份具有明显的间歇性. 在温度平缓变化的地方肯定比有显著高频变化处的谱斜率要陡. 在这种情况下

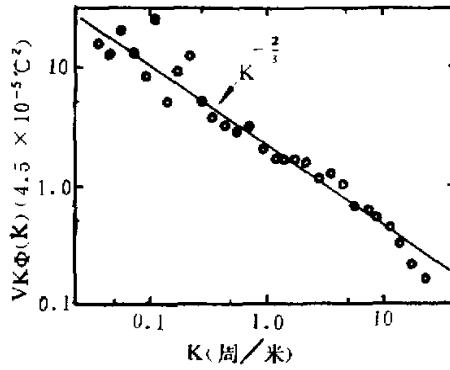


图4 对流边界层顶部的温度谱
5月13日12:39, 高度600—700米, 平均时间80秒。

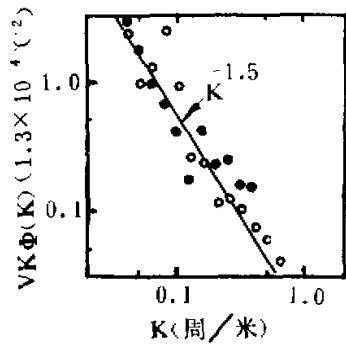


图5 近海面上边界层上半部的温度谱
9月8日9时, 高度实心圆点为500—800(米), 空心圆为800米, 80秒平均

是否加长平均时间就可以得到 $-5/3$ 幂率的谱还不清楚。因为象 Виниценко 所给的谱^[4] 还包括了不同天气条件下的测量值, 它只说明了一个总的趋势。

表6 准层流区各种谱幂率出现次数

$ \beta > -2 $	$ -5/3 < \beta < -2 $	$ \beta < -5/3 $	有峰值型
5月8日 6	2	—	6
5月13日 9	4	—	—
9月8日 10	5	1	1

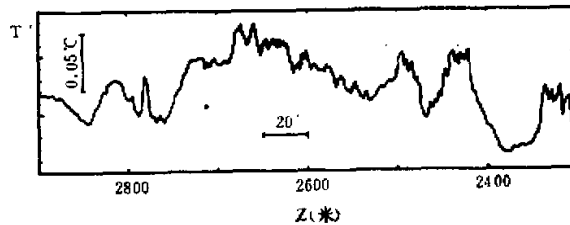


图6 2300—2900 米高度上的温度 T'
5月13日, 12:22—12:26。

六、讨 论

1. 对流边界层的下半部温度结构常数随高度的一 $4/3$ 次幂减少。
2. 在边界层顶的介面层由于夹卷作用 C_T^2 出现一个很大的峰值, 当地表面均匀时, 这个区域的平均 C_T^2 值在对流边界层顶部介面层的情况下可按 Wyngaard 的公式来估算。介面层的厚度一般为 $0.2-0.4Z_0$ 。

3. 对流边界层以上 3 千米以下除了可能出现的强湍流带之外, C_z^2 值一般在 $1-5 \times 10^{-17}(\text{m}^2/\text{s})$ 范围内变化。

4. 对流边界层中即使在逆温层底部温度谱有较宽的部份处于惯性区, 但在近海地区吹陆风时, 在低层层结变稳定的情况下边界层上半部湍流减弱, 谱幂率大于 $-5/3$ 。

5. 自由大气中, 层结稳定时谱幂率多数大于 $-5/3$, 小于 -3 , 层结稍不稳定则出现多峰值的温度谱, 温度起伏的间歇性很清楚。

由于缺少平均场和风的资料, 边界层中的物理过程以及自由大气中湍流的间歇性需要进一步研究, 理论上关于浮力子区间的谱也需证实。

陈家宜同志对本文的分析给予了指导和建议, 安光所二室 202 组提供了平均温度资料, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Barletti, R. Ceppatelli, G., Paterno L., Righini, A. and Spero, N., *J. Opt. S. A.*, **66**(12), p. 1380, 1976.
- [2] Tsvang, L. R., *Radio Science*, **4**, p. 1175, 1969.
- [3] Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Haugen, D. A., Coté O. R. and Izumi, Y., Caughey S. J. and Reading, C. J., *J. Atmos. Sci.*, **33**(11), p. 2152, 1976.
- [4] Вязиценко, Н. К., Пярус, Н. Э., Шметер, С. М., Шур, Г. Н., *Турбулентность в свободной Атмосфере*, Гидрометеонадат, 1976.
- [5] Vinnichenko N. K., *Radio Science*, **4**, p. 1115, 1969.
- [6] J. S. 贝达特, A. G. 皮尔索, *随机数据分析方法*, 国防工业出版社, 1976.
- [7] 郑治真, *波谱分析基础*, 地震出版社, 1979.
- [8] Wyngaard J. C. and Izumi, *J. Opt. S. A.*, **61**(12), 1646, 1971.
- [9] Lumley, John L. and Panofsky, H. A., *The Structure of Atmospheric Turbulence*, John Wiley & Sons, Inc, 1964.
- [10] В. И. 塔塔尔斯基, *湍流大气中波的传播理论*, 科学出版社, 1978.
- [11] Caughey, S. J., *Q. J. R. M. S.*, p. 811, 1979.
- [12] Кухарев, В. П., Цванг, Л. Р., *Физика Атмос. Океана*, **16** (2), p. 116, 1980.
- [13] Deardorff, J. W., Willis G. E. and Stockton, B. H., *J. Fluid Mech.*, **100** (part 1, 11), 41, 1980.
- [14] Deardorff, J. W., *J. Atmos. Sci.*, **36**, p. 424, 1979.
- [15] Wyngaard J. C. and Lemone, M. A., *J. Atmos. Sci.*, **37**(7), p. 1573, 1980.

OBSERVATION OF THE TEMPERATURE MICROSTRUCTURE IN THE ATMOSPHERE

Zeng Zongyong Ma Chengsheng

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

Fluctuations of atmospheric temperature below the height of 3000 m were measured by platinum wire thermometer in Tianjin in May and September, 1980. Results measured in daytime reveal some properties of the temperature structure constant

and spectrum.

A maximum in the profile of the structure constant produced probably by entrainment which occurred in the interfacial layer at the top of convective boundary layer has been confirmed. The average of C_z^2 in the interfacial layer and its Wyngaard calculating method are discussed, and the thickness of the interfacial layer is obtained.

It is shown by spectrum analysis that a wide inertial subrange exists in the convective boundary layer and the strong turbulent zone in the free atmosphere.

The results of spectrum analysis would be affected by turbulent intermittence in the free atmosphere. The spectral law with the power of -2.5 was measured within the upper half of boundary layer over the sea in the vicinity of Tanggu.

英文版大气科学综合性学术理论刊物《大气科学进展》
(ADVANCES IN ATMOSPHERIC SCIENCES)

将于 1984 年创刊

AAS 是中国气象和大气物理委员会与中国科学院大气物理研究所联合创办的英文版学术性季刊,旨在及时反映我国在大气科学方面较优秀的研究成果,促进国际学术交流,提高我国大气科学工作的学术地位。该刊由陶诗言任主编,巢纪平和周秀骥任副主编,并聘请各有关单位的专家组成编委会。

AAS 主要刊载大气科学领域中各个学科(如动力气象学、气候学、大气物理、大气化学、大气污染、人工影响和大气探测等)以及海洋气象、海洋动力学和海洋物理学等方面具有创造性的、代表我国新水平的学术论文、研究报道以及具有指导意义的评述性文章。

来稿必须是未以外文公开发表过的文章。作者可以先投送中文稿,对于已用中文发表过的文章,作者可以先投送中文抽印本(2份),经审查决定刊用后,再由编辑部通知作者投寄英文稿。

AAS 欢迎广大气象科学工作者踊跃来稿。来稿请寄:北京德胜门外大气物理研究所《大气科学进展》编辑部。