

普适静力能的定量分析^{*}

林文实

黄美元

(中山大学大气科学系, 广州 510275) (中国科学院大气物理研究所)

摘 要 引用一个能描述无云和有云天气下, 大气稳定度的能量学物理量——普适静力能和一个二维积云模式的输出结果, 分析计算湿静力能廓线和普适静力能廓线. 结果表明, 在云内和云下降水区, 由于液态水或固态水的存在, 普适静力能与湿静力能相差较大; 在行星边界层, 普适静力能比湿静力能大 13 J/g .

关键词 普适静力能, 大气稳定度, 亲和力

分类号 P 431. 2

在过去几十年中, 出于天气分析预报的需要^[1,2]及其积云参数化的需要^[3,4], 气象学家们已提出数十种用来描述大气稳定度的参数, 其中也包括干静力能和湿静力能等. 但是, 当考虑云的影响即考虑一个包括液态水、固态水和不可逆相变过程的复杂系统时, 采用干静力能和湿静力能的垂直分布描述大气稳定度是不够精确的. 这些早期研究中使用的简化的物理量, 随着计算机的发展和数值方法的改进, 应逐步趋于精确化. 因此, Soriano^[5]从热力学角度定义了普适静力能, 它允许大气系统同时并存水的 3 个相态和处于非平衡状态, 因而用普适静力能这个能量学参数来描述大气中的热力过程将更加接近实况.

因为直接测量积云内的液态水和固态水含水量是非常困难的, 所以过去普适静力能应用较少. 随着积云模式和大气环流模式的发展, 液态水和固态水含水量可以由预报方程或以参数化的形式输出, 根据普适静力能的垂直分布来诊断大气的稳定度已不成问题.

本文借助现代化的分析方法, 定量地分析比较湿静力能 (MSE) 和普适静力能 (GSE) 的差别.

1 普适静力能的定义

考虑一个包含干空气、水汽、液态水和固态水的空气微团. 按气象上通常假设, 微团虽无限小却又足够大, 它满足一些物理学的规律, 并且是干空气和水汽完全混合的理想气体, 液态水和固态水以纯相态形式存在. 液态水和固态水的表面曲率, 它们与周围环境空气的温度差和气压差, 与它们的半径有关的下落末速度等产生的效应都忽略不计.

根据以上假设, 微团的总质量分别由干空气质量 M_a 、水汽质量 M_w 、液态水质量 M_l 和固态水质量 M_s 组成.

* 国家自然科学基金 (49675247) 资助项目

收稿日期: 1998-02-13 林文实, 男, 34 岁, 讲师

$$M = M_d + M_v + M_l + M_s$$

上式两边同除以 M , 则有

$$1 = m_d + m_v + m_l + m_s \quad (1)$$

其中, $m_k = M_k / M$, $k = d, v, l, s$.

若定义水汽混合比 q_v 、液态水含水量 q_l 和固态水含水量 q_s 为: $q_v = m_v / m_d$, $q_l = m_l / m_d$, $q_s = m_s / m_d$, 则式 (1) 可写为 $1 / m_d = 1 + q_v + q_l + q_s$.

因而可给出普适静力能的定义式^[5]

$$GSE = C' T + Q (L_v + A_v) q_v - (L_l + A_l) q_l - X \quad (2)$$

其中, $C' = C_{pd} + C_l (q_v + q_l + q_s)$, $X = \int_{T_0}^T [(L_v + A_v) q_v - (L_l + A_l) q_l] \frac{dT}{T}$, O 为干空气位势高度, 定义为

$$dQ_{gz} = -R_d T d(\ln p_d)$$

其中, $g = 9.781 \text{ m/s}^2$, 为重力加速度; $R_d = 287.04 \text{ J}^\circ \text{ kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 为干空气气体常数; $C_{pd} = 1005 \text{ J}^\circ \text{ kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 为干空气定压比热; $C_l = 4190 \text{ J}^\circ \text{ kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 为液态水比热; $L_v = 2.501 \times 10^6 \text{ J/kg}$, 为蒸发潜热; $L_l = 0.312 \times 10^6 \text{ J/kg}$, 为融化潜热; p_d 为干空气分压, T_0 为参考温度, A_v 和 A_l 分别为蒸发亲和力和融化亲和力^[6,7], 它们的表达式分别为

$$A_v = -R_v T \ln [e / e_s(T)], \quad A_l = R_v T \ln [e(T) / e_s(T)]$$

式中, $R_v = 461.50 \text{ J}^\circ \text{ kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为水汽气体常数, e_v 为水汽分压, $e_s(T)$ 为对液水面的饱和水汽压, $e_i(T)$ 为对冰面的饱和水汽压. A_v 和 A_l 反映大气系统中各相的不平衡状态或饱和度. 当大气系统达到平衡状态时, $A_v = 0$ 或 $A_l = 0$. 然而, 在深厚积云对流系统中, 蒸发亲和力和力占蒸发潜热的百分之几, 融化亲和力和力约占融化潜热的 20%^[7], 因而 A_v 和 A_l 是不能忽略的.

对 $e_s(T)$ 和 $e_i(T)$ 的计算采用 Tetten 的形式^[8]

$$e_s(T) = E_0 \exp [17.27(T - 273) / (T - 36)]$$

$$e_i(T) = E_0 \exp [21.87(T - 273) / (T - 7.66)]$$

其中, $E_0 = 611 \text{ Pa}$, 为绝对温度等于 273.15 K 的饱和水汽压.

当 T , $L_v + A_v$ 和 $L_l + A_l$ 的变化比 q_l 和 q_s 的变化小时, X 近似为 0. 本文也忽略了 (2) 式右端的最后一项, 并且 L_v 和 L_l 取为常数.

GSE 适用于无云大气和有云大气, 具有普遍性的意义. 当只考虑干空气时, $q_v = q_l = q_s = 0$, 则式 (2) 简化为 $E_d = C_{pd} T + gz$, 此即干静力能的定义.

若不考虑液态水和固态水的影响, 则 $q_v = q_l = q_s = A_v = A_l$ 全为 0, (2) 式则简化为

$$MSE = C_{pd} T + gz + L_v q_v \quad (3)$$

如果只忽略蒸发亲和力 A_v 和融化亲和力 A_l , 则 (2) 式可简化为忽略亲和力静力能 (GSE1)

$$GSE1 = C' T + gz + L_v q_v - L_l q_l \quad (4)$$

2 计算方案

在以下的计算中, 先运行一个二维积云数值模式, 由该模式输出温度、气压、水汽混合比、液态水含水量、固态水含水量等物理量, 然后将这些模式输出结果代入 (2)~(4) 式,

分别计算出 MSE, GSE1和 GSE, 最后对其进行比较分析.

所用模式是文献 [9] 中所介绍的积云模式的二维版本. 模式中考虑了云水、雨水、云冰和霰等云内水成物, 因而

$$q_l = q_l^+ + q_l^-, \quad q_s = q_s^+ + q_s^-$$

式中, q_s^+ , q_s^- , q_l^+ 和 q_l^- 分别为云水、雨水、云冰和霰的含水量.

3 计算结果

图 1为该积云模式在模拟时间为 100 min的时刻输出的液态水含水量和固态水含水量的分布图. 图中显示区域内有 2块积云, 左右 2云体相隔约 20 km, 云砧部分已经连通起来, 云顶高 8.5 km. 这时的 2块积云正处于发展阶段, 地面上有降水, 也有固态水降至地面 (主要是霰).

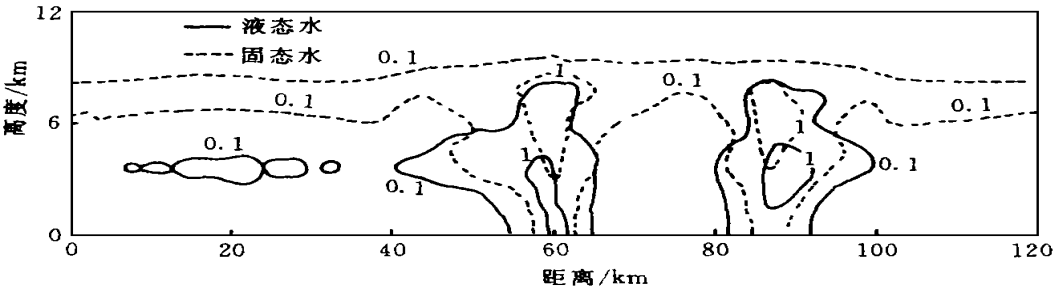


图 1 100 min时液态水与固态水含水量 (g/kg) 的水平—垂直剖面图

Fig. 1 $x-z$ cross section of liquid water content and solid water content at 100 min

现在考虑图 1左边的云块. 将云模式输出的该云中心处的温度、气压、水汽混合比、液态水含水量和固态水含水量分别代入 (2)~ (4)式, 就可得到 GSE、GSE1和 MSE随高度的分布廓线 (图 2). 由图可以看出, 云内各静力能在高度为 8.5 km即云顶处出现拐点. 在云顶以上高度, 因为没有液态水和固态水, 故 GSE、GSE1和 MSE廓线基本重合. 从云顶往下, 由于存在液态水和固态水, 三者的差别越往下越大. 在行星边界层, GSE比 GSE1大 7 J/g, 比湿静力能 MSE大 13 J/g. 由于亲和力是不饱和度的量度, 这表明积云内存在着夹卷, 云下降水区大气是不饱和的.

另外, 在模拟时间为 100 min的时刻, 积云还处在发展阶段, 而云内湿静力能 MSE在 2~ 8.5 km高度范围内随高度增加而增大, 说明如果用湿静力能来度量大气稳定度时, 云内层结已经是稳定层结. 这时采用湿静力能 MSE来分析

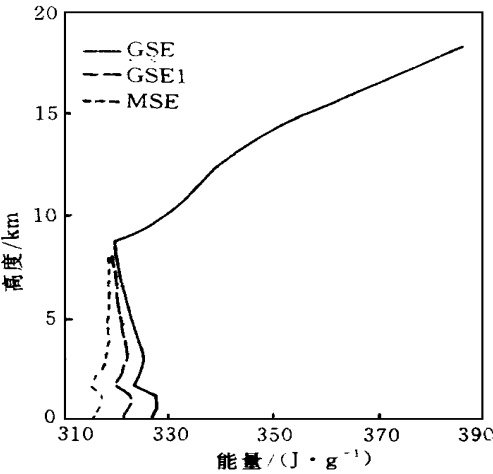


图 2 100 min时云内的 MSE, GSE1和 GSE的垂直分布廓线

Fig. 2 The vertical profiles of MSE, GSE1 and GSE in cloud at 100 min

大气稳定度是不适宜的.

4 小 结

- (1) 在云顶以上高度, 由于没有液态水和固态水, GSE和 MSE的差别可以忽略不计.
- (2) 在云内和云下降水区, 必须考虑液态水和固态水的影响, 因为 GSE和 MSE的差别较大, 这时用 GSE来量度大气稳定度较接近实况.
- (3) 在行星边界层, GSE比 MSE大 13 J/g .
- (4) 在云下, 忽略蒸发亲和力和融化亲和力会造成可观的误差.

参 考 文 献

- 1 雷雨顺. 能量天气学. 北京: 气象出版社, 1986. 159
- 2 曾庆存. 我国大气动力学和数值天气预报研究工作的进展. 大气科学, 1979, 3 256~ 269
- 3 Arakawa A, Schubert W H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. J Atmos Sci, 1974, 31 674~ 701
- 4 哈廷纳 G J. 数值天气预报. 北京: 科学出版社, 1975. 152~ 165
- 5 Soriano L I R, Diez E L G, Davila F D P. Generalized static energy and its conversation. J Atmos Sci, 1994, 51 3281~ 3285
- 6 Tripoli G J, Cotton W R. The use of ice-liquid water potential temperature as a thermodynamic variable in deep atmospheric models. Mon Wea Rev, 1981, 109 1094~ 1102
- 7 Pointin Y. Wet equivalent potential temperature and enthalpy as prognostic variables in cloud modeling. J Atmos Sci, 1984, 15 651~ 660
- 8 王名才. 大气科学常用公式. 北京: 气象出版社, 1994. 662
- 9 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值模拟. 大气科学, 1990, 14 441~ 453

A Quantitative Analysis of a Generalized Static Energy

Lin Wenshi^{*} Huang Meiyuan

Abstract In this paper, a energetic physical variable—the generalized static energy is chosen, and the outputs of a two-dimensional cloud model are utilized to the study of the atmospheric stability under conditions with and without cloud. The profiles of the generalized static energy and moist static energy are compared. The results show that the moist static energy is very different from the generalized static energy within clouds or in precipitation areas under cloud with the presence of liquid water and solid water. The generalized static energy is 13 J/g larger than the moist static energy in the planetary boundary layer.

Keywords generalized static energy, atmospheric stability, affinity

^{*} Department of Atmospheric Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China