

王咏青, 张楠, 刘敏, 等. 2010. 大气模式中云量诊断的系统性误差研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 83–88. Wang Yongqing, Zhang Nan, Liu Min, et al. 2010. A study of systematical error about cloud cover diagnosis scheme in general circulation model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 83–88.

大气模式中云量诊断的系统性误差研究

王咏青¹ 张楠¹ 刘敏^{2,3} 王必正²

¹ 南京信息工程大学大气科学学院气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

³ 江苏省气象局, 南京 210008

摘 要 对云量的诊断方案作了深入的分析, 证明了无论云量与其他变量的关系是离散型还是连续型, 只要云量与其他变量的关系是由凸函数描述的, 则云量会系统性地偏少; 反之, 如果云量与其他变量的关系是由凹函数来描述的, 则云量会系统性地偏大。故 Slingo 型云量方案中, 大尺度云量会系统性偏少, 而积云对流所对应的云量会系统性地偏大。同时还证明了如果其他气象变量是高频振荡型的, 则云量与该气象变量的关系在局地相关较好, 而长期时间平均后则相关程度急剧下降; 如果其他气象变量是稳定型变量, 则云量与该气象变量的关系在局地相关长期平均好, 但就短时间而言相关较差。故云量方案 (含 Slingo 型) 存在系统性误差, 应被新的物理上更合理的方案所代替。

关键词 云量 诊断 系统性误差 高频振荡

文章编号 1006-9585 (2010) 01-0083-06 **中图分类号** P433 **文献标识码** A

A Study of Systematical Error about Cloud Cover Diagnosis Scheme in General Circulation Model

WANG Yongqing¹, ZHANG Nan¹, LIU Min^{2,3}, and WANG Bizheng²

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² International Center for Climate and Environmental Sciences, Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Jiangsu Provincial Meteorological Bureau, Nanjing 210008

Abstract The diagnosis scheme of cloud cover is analyzed deeply. No matter how the relationship between cloud cover and other variables is, the discrete or continuous type, the conclusion is the same, that is, the simulated cloud cover will be systematically less than the actual value if their relationship is described by the convex function, and the simulated cloud cover will be systematically more than the actual value if their relationship is described by the concave function. Therefore, in the case of Slingo cloud cover scheme, large-scale cloud cover will be systematically less than the actual cloud cover, and in the case of cumulus convection, the corresponding cloud cover will be more than the actual cloud cover. It is also showed that the relationship between the cloud cover and this meteorological

收稿日期 2009-03-05 收到, 2009-12-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40875033、中国科学院重大项目 KZCX2-YW-217、中国科学院大气物理研究所创新前沿重点项目 IAP070116 和国家重点基础研究发展计划 2009CB421503

作者简介 王咏青, 女, 1970 年出生, 博士, 主要从事大气动力学、中尺度数值模拟研究。E-mail: yq.wang@163.com

variable has high correlation locally and the degree of correlation declines sharply after long-time average if the other variables are the high frequency oscillation type. And the relationship between the cloud cover and this meteorological variable has high correlation locally after long-time average but low correlation after short-time average if the other variables are the stable type. Thus, there are systematical errors about the cloud cover scheme, including Slingo scheme, and it is expected that the existing schemes should be replaced by a new scheme which is more reasonable on physics.

Key words cloud cover, diagnosis, systematical error, high frequency oscillation

1 引言

在目前的大气模式中,云及相关过程的模拟结果与实际很不相符,原因是多方面的,而根本原因正如 Mason (1971) 在 1957 年指出的,阻碍云物理学进步的原因是由于对小至分子尺度的核化作用,大至几百至几千千米大范围云系动力学之间各种尺度过程相互联系缺乏认识。Pruppacher and Klett (1978) 重申了该观点。云物理学的上述本质困难同样在大气模式中的云及相关过程的处理中体现出来。目前的大气环流模式中,云的处理方案包括云量、云的降水和云的辐射三部分,这三部分的模拟效果与实际都是很不相符的,其中最大的不确定性为云量的模拟。关于云量方面的已有工作,主要有诊断方案、预报方案、统计方案和统计—动力预报方案等。云量诊断方案的代表性工作是 Slingo (1987) 的工作,云量预报方案中的代表性工作是 Tiedtke (1993) 的工作,云量统计方案的代表性工作为 Sommeria and Deardorff (1977),而统计—动力预报方案的代表性工作为 Tompkins (2002)。这些工作对大气模式中的云量问题进行了多方面的探索,就其方法学本质而言,诊断方案和预报方案是一种决定性的方法,而统计方案事实上是概率论方法,统计—动力预报方案是这两种方法的混合方案。由于决定云的过程小至分子尺度的核化作用尺度,大至数千公里的云系系统尺度,故极为复杂,其相应的云量问题同样也是极为复杂的。因此,大气模式中的云量问题是一个没有完全解决的问题(王必正和曾庆存,2001),故目前国际上主要大气科学中心都在研究云量方案。

在目前的大气环流模式中,用其他大气变量来诊断云量的方案是被广泛采用的方案之一,这

种方案最早由 Slingo (1987) 设计并在欧洲中期数值预报中心(ECMWF)的模式中使用,后经 Hack et al. (1993)、Klein et al. (1993)、Kiehl and Hartmann (1998) 和 Rasch and Kristjansson (1998) 等的工作予以进一步的改进,迄今仍被广泛使用。例如,2004 年由 Collins et al. (2004) 设计的美国 NCAR 的 CAM3.0 就使用了该方案。但观测结果表明,这种方案存在着长期相关好、短期相关差的问题。由于在大气环流模式中云是每步计算的,故这种方案存在系统性误差,将严重歪曲模式对云的模拟。例如, Klein (1997) 在研究低云时发现,对不同的时间间隔求平均,低云量与其他气象参数之间的方差分析表明,当取时间尺度为 1 天时,仅能解释方差的 20%,但用月平均时间尺度时,就能解释方差的 50% 以上。因此,如果云量 c 与其他气象参数相关的话,则局地相关时有

$$c = f(\omega, r, \gamma_\theta, T_{ss}, \cdots), \quad (1)$$

其中, T_{ss} 为海表面温度, ω 为垂直速度, r 为相对湿度, $\gamma_\theta = \partial\theta/\partial p$ 为稳定度, θ 为位温。为了下文理论分析方便,大气参变量记为 $(q^1, q^2, \cdots, q^N)$ 。则

$$c = f(q^1, q^2, \cdots, q^N) = f(q^j), 1 \leq j \leq N, \quad (2)$$

对于固定地点,记时间参变量为 i , 则

$$c_i = f(q_i^1, q_i^2, \cdots, q_i^N), 1 \leq i \leq n, \quad (3)$$

Klein (1997) 的观测分析结果实际上是说,如果 $1 \leq i \leq 24$ (日平均),公式 (1)–(3) 不是很好的平均关系,但当 $1 \leq i \leq 720$ 时,上述的关系式就很好了。这也就是目前广为应用的 Slingo (1987) 低云参数化的基本思想。但这也带来一个非常大的质疑之处,即:如果低云是在一定局地气象变量条件下形成的,那么低云应该是与这些变量瞬时相关,才能真正从物理上解释低云的形成。但现在的关系式则恰好相反,这在物理上是很不合理

的。因为根据大数定理, 平均有趋向数学期望的性质, 往往会掩盖物理实质。

本文目的是对云量诊断方案进行深入的分析。在大气环流模式有关云的处理中, 云量的模拟则是目前最困难和最不确定的大气变量, 因此有必要进一步深入研究。

云量模拟的系统性误差会严重影响天气预报水平和气候模拟效果, 这是因为这种系统性误差将直接影响相变潜热和辐射的计算, 从而导致模式对大气热力和动力过程模拟的严重歪曲。因此, 如何在大气模式中有效地减少系统性误差, 对于提高天气预报水平和气候模拟效果, 是十分重要和必要的基础性工作。本文将从理论上分析这种方案产生系统性误差的物理本质, 为大气模式中提高云量模拟的准确性提供合理的基础。

2 常用云量诊断方案的数学特点

Slingo (1987) 的云量诊断方案中, 大尺度云量可表示成

$$c = \begin{cases} \frac{(r-a)^2}{(1-a)^2}, & r > a \\ 0, & 0 \leq r \leq a \end{cases} \quad (4)$$

式中 a 为临界参数, r 为大气中相对湿度 ($r \geq 0$), 则由于

$$\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} = \begin{cases} \frac{2}{(1-a)^2} > 0, & r > a \\ 0, & 0 \leq r \leq a \end{cases} \quad (5)$$

从 Courant and Fritz (1989) 可知 c 为凸函数, 故在 $r > a$ 为严格凸函数, 而在 $0 < r < a$ 为凸函数。

至于对流云则可以写成

$$c = a_1 \ln(1+x), \quad (6)$$

式中 a_1 为正常数, x 为大气中上升质量 ($x \geq 0$), 由于

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = -\frac{a_1}{(1+x)^2} < 0, \quad (7)$$

从 Courant and Fritz (1989) 知对流云云量 c 是上升质量之凸函数。

以上分析表明, 云的诊断方案中云量 c 与其他气象变量的函数或者是凸函数, 或者是凹函数, 这种函数结果对参数化结果的影响正是本文分析

的主要内容之一。

3 离散型理论分析

一般而言, 云与许多因子相关。这些因子中有一些比较稳定, 另一些则出现高频振荡, 前一类如云顶的稳定度, 后一类如云垂直速度 ω 和相对湿度。

3.1 云量与垂直速度相关分析

首先假设云量仅与垂直速度 ω 相关, 即

$$c = f(\omega), \quad (8)$$

则当地点固定时, 每个时次 i 时则为

$$c_i = f(\omega_i), \quad (9)$$

故

$$\frac{c_1 + c_2 + \cdots + c_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N f(\omega_i)}{N}, \quad (10)$$

即

$$\bar{c} = \overline{f(\omega)}. \quad (11)$$

但一般由于 $c_i \geq 0$, 故 $\bar{c} = (c_1 + c_2 + \cdots + c_N)/N$ 中并没有负的项来抵消, 但由于

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i}{N}, \quad (12)$$

对于固定的地点, ω_i 是一个正负相间且高频振荡的物理量, 其长期平均是要相互抵消的, 即对于固定地点而言

$$\bar{\omega} \rightarrow 0. \quad (13)$$

也就是说通常

$$\bar{c} \neq f(\bar{\omega}), f(\bar{\omega}) \neq \overline{f(\omega)}. \quad (14)$$

因此, 即使相关分析表明对于固定地点而言, 垂直速度对云的形成是很重要的, 但长期时间平均以后, 相关程度急剧下降。

3.2 云量与垂直稳定度的相关分析

假设云量与云上面的垂直稳定度相关, 求平均后有如下关系

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^N f\left(\left(\frac{\partial \theta}{\partial p}\right)_i\right)}{N}, \quad (15)$$

由于大气存在着静力平衡及地球对流层和平流层温度的实际分布情况, 可知通常 $(\partial \theta / \partial p)_i > 0$, 只是数值不同而已。如记

$$d_i = \left(\frac{\partial \theta}{\partial p} \right)_i, \quad (16)$$

则一般说来 $d_i > 0$, 从而

$$\frac{d_1 + d_2 + \cdots + d_N}{N} = \bar{d}. \quad (17)$$

这时 $\bar{d}$ 通常能代表平均大气的垂直稳定度状况。那么

$$c = f\left(\frac{\partial \theta}{\partial p}\right) \quad (18)$$

是否成立? 即当地点固定时, 对时次 i 有如下相关关系

$$c_i = f\left(\left(\frac{\partial \theta}{\partial p}\right)_i\right) \quad (19)$$

是否成立? 根据 Hardy et al. (1952) 表明通常并不成立。

这就解释了为什么短时间而言 c 与 d 相关不好, 但长时间相关很好。现有大气模式计算表明这种方案对于云的模拟并不很成功, 由上面的分析可给予明确的物理解释。

3.3 物理分析

上面是从物理上分析了二类量 [即高频振荡型变量如垂直速度 ω 和准定常型变量如稳定度 $(\partial \theta / \partial p)_i$] 与云量相关分析时, 时间平均间隔长短对统计效果的影响程度。下面作一般性的物理分析。

根据 Hardy et al. (1952) 可知:

(1) 如果 f 为严格凸函数, 则有

$$f\left(\frac{c_1 + c_2 + \cdots + c_N}{N}\right) < \frac{f(c_1) + f(c_2) + \cdots + f(c_N)}{N}, \quad (20)$$

即有

$$f(\bar{c}) < \overline{f(c)}, \quad (21)$$

故此时的统计必定有系统性的误差。

(2) 如果 f 为连续和凸函数, 且 $c_i = f(\omega_i, d_i)$ 严格成立, 则 $\bar{c} = f(\bar{\omega}, \bar{d})$ 成立的充分必要条件是 f 为线性函数, 即

$$\bar{c} = a_1 \bar{\omega} + a_2 \bar{d} + a_3, \quad (22)$$

但考虑长时间平均 $\bar{\omega} = 0$, 故一般得到

$$\bar{c} = a_2 \bar{d} + a_3, \quad (23)$$

这表明关系式

$$c = a_1 \omega + a_2 d + a_3 \quad (24)$$

仅对准定常变量 d 成立, 对于振荡型变量 ω 不成立。下面用反证法来证明对于振荡型变量, 公式

(18) 不成立。

假设有

$$c_i = a_1 \omega_i + a_3, \quad (25)$$

则

$$\bar{c} = a_1 \bar{\omega} + a_3 \approx a_1 \times 0 + a_3 = a_3. \quad (26)$$

故长期云量与垂直速度无关, 这与物理实际不相符合。故即使就瞬时而言, 公式 (24) 也不成立, 并且长期气候平均时没有云量与垂直速度相关的结果。从大气动力学和云动力学角度看, 尽管云量并不与垂直速度线性相关, 但它们确实存在着非线性相关, 并且的确代表了云形成的真正物理原因之一。因此, 物理上的结论如表 1 所示。

表 1 云量与不同变量类型之间的相关关系

Table 1 The relationship between the cloud cover and the type of meteorological variables

云量	振荡型变量	稳定型变量
短时期相关	好	差
长期平均相关	差	好

综上所述, 云量问题是真正实质困难的问题, 也从理论上回答了为什么目前在大气模式中云量的不确定性是最大的困难。

4 连续型分布

4.1 云量与其他大气变量关系的分析

如果云量与变量的关系由连续型变量来描写, 即

$$c = f(q_1, q_2, \cdots, q_N), \quad (27)$$

分布函数为 $F(q_1, q_2, \cdots, q_N)$, 则

$$\bar{c} = \int f(q_1, q_2, \cdots, q_N) dF(q_1, q_2, \cdots, q_N), \quad (28)$$

记

$$\bar{c}' = f(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \cdots, \bar{q}_N). \quad (29)$$

现在问题是

$$\bar{c} = \bar{c}' \quad (30)$$

成立否?

(1) 根据 Pólya and Szego (1978), 对于凸函数有

$$\bar{c} < \bar{c}', \quad (31)$$

并且是严格的, 这时就会存在着系统性偏差。

(2) 如果 q_1 有振荡, 记

$$\bar{q}_1 = \int q_1 p(q_1) dq_1. \quad (32)$$

式中 $p(q_1)$ 为概率分布, $p(q_1) \geq 0$.

例如垂直速度正负相间, 则

$$\begin{aligned} \bar{q}_1 &= \int q_1 p(q_1) dq_1 = \int_{q_1 > 0} q_1 p(q_1) dq_1 + \\ &\int_{q_1 < 0} q_1 p(q_1) dq_1 \approx 0, \end{aligned} \quad (33)$$

这是因为此时分布函数满足近似关系式

$$\int_{q_1 > 0} p(q_1) dq_1 \approx - \int_{q_1 < 0} p(q_1) dq_1, \quad (34)$$

可近似地认为 $p(q_1)$ 为正的偶函数。此时 $(q_1 - \bar{q}_1)$ 较大, 故方差

$$D = \int (q_1 - \bar{q}_1)^2 F(q_1) dq_1 \quad (35)$$

相当大, 从而公式 (26) 不成立。这解释了短时间平均相关程度较好, 而长期时间平均以后相关程度急剧下降的原因。

(3) 如果 q_2 为某种稳定型变量, 则

$$\bar{q}_2 = \int q_2 p(q_2) dq_2. \quad (36)$$

记

$$E = E_1 \{q_2 > 0\} + E_2 \{q_2 = 0\} + E_3 \{q_2 < 0\}, \quad (37)$$

有

$$m[E] = m[E_1] + m[E_2] + m[E_3], \quad (38)$$

故

$$\bar{q}_2 = \int_{E_1} + \int_{E_3}. \quad (39)$$

如果一般不出现 $q_2 < 0$, 则 $m[E_3]$ 相对较小, 从而

$$\bar{q}_2 = \int_{E_1} = \int_{E_1} q_2 F(q_2) dq_2. \quad (40)$$

这样的 $\bar{q}_2$ 比较好地代表了 q_2 的实际状况, 即 $D(q_2)$ 相对较小, 因为此时 $(q_2 - \bar{q}_2)$ 较小, 这就解释了为什么短时间而言 c 与 d 相关不好, 但长时间相关很好。

4.2 物理分析

连续型变量情况与离散型一样, 2.3 节的结论同样成立, 故从略。

5 产生云量系统性误差的 4 种原因

综上所述, 大气模式中产生云量系统性误差的原因有如下 4 种:

(1) 在云量方案中, 如果云量与其他变量的关系为连续和凸的函数, 这时如果大气模式中云的计算步长 ΔT_c 与动力框架的计算步长 ΔT_d 不一样, 一般为

$$\Delta T_c = n \Delta T_d, \quad (41)$$

式中 n 一般为 10 的量级。此时由于大气模式中云的计算步长内, 动力框架的计算要进行 n 步, 故其他动力和热力变量需求其平均才能计算云量, 故计算时就会产生云量系统性误差。但如果 n 取 1 的量级, 不仅计算不经济, 更重要的是会产生虚假的快波。

(2) 在云量方案中, 如果云量与其他变量的关系为连续和凸的函数, 这时如果大气模式中云的计算为不足 1 的云量, 此时由于大气模式的网格中要计算各块云量的平均, 故计算时就会产生云量系统性误差。由于云的不规则和不光滑, 取很小的网格距也是不能解决该问题的。

(3) 检验大气模式时, 一般进行月平均或多年平均, 这时在云量方案中, 如果其他变量为高频振荡型变量, 则该云量方案由于没有通过长期检验而被忽略。但在短期时该云量方案却是很有效的方案, 这时的系统性误差是由于不合理的检验方案所导致的没有采用该云量方案而引起的。

(4) 检验大气模式时, 一般进行月平均或多年平均, 这时在云量方案中, 如果其他变量为准定常型变量, 则该云量方案由于通过了长期检验而被采用。但在短期时该云量方案却是很差的方案, 这时的系统性误差是由于不合理的检验方案所导致的采用该云量方案而引起的。

上述原因 (1) 和 (2) 证明了无论云量与其他变量的关系是离散型或连续型, 如果云量与其他变量的关系是由凸函数描述的, 则云量会系统性地偏少; 反之, 如果云量与其他变量的关系由凹函数来描写, 则云量会系统性地偏大。故 Slingo 型云量方案中, 大尺度云量会系统性地偏少, 而积云对流所对应的云量会系统性地偏大。

上述原因 (3) 和 (4) 还证明了如果其他气象变量是高频振荡型的, 则云量与该气象变量的关系在局地相关较好; 而长期时间平均后则相关程度急剧下降; 而如果其他气象变量是稳定性变量, 则云量与该气象变量的关系在局地相关长期平均好, 但就短时间而言相关较差。

综上所述,云量诊断方案(含 Slingo 型)存在系统性误差,应被新的物理上更合理的方案所代替。如何解决以上 4 个方面的问题将在另文讨论。

6 结语

本文对云量诊断方案存在的根本缺陷作了深入的物理和数学分析,主要结论是:

(1) 通过具体分析 Slingo (1987) 的云量诊断方程,证明了这些诊断方案中云量是其他气象变量的凸函数或凹函数。

(2) 无论云量与其他变量的关系是离散型或连续性,如果其他气象变量是高频振荡型的,则云量与该气象变量的关系在局地相关较好,而长期时间平均后则相关程度急剧下降;而如果其他气象变量是稳定型变量,则云量与该气象变量的关系在局地相关长期平均好,但就短时间而言相关较差。

(3) 同样,无论云量与其他变量的关系是离散型或连续型,如果云量与其他变量的关系是由凸函数描述的,则云量会系统性地偏少,反之,如果云量与其他变量的关系由凹函数来描写,则云量会系统性地偏大。因此,目前大气模式中的 Slingo 型云量方案,大尺度云量会系统性偏少,而积云对流所对应的云量会系统性地偏大。

(4) 大气模式中产生云量系统性误差的原因有如下几种:云的计算步长比其他过程的计算步长要大很多倍,云的空间的不规则性和不合理的检验方案所导致的错误结果。

(5) 综上所述,云量诊断方案(含 Slingo 型)存在系统性误差,应被新的物理上更合理的方案所代替。

参考文献 (References)

- Courant R, Fritz J. 1989. Introduction to Calculus and Analysis [M]. New York: Springer-Verlag New York Inc, 653.
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR Community Climate (CAM3.0) [R]. Technical Report NCAR/TN 464 + STR, National Center for Atmospheric Research, 226.
- Hack J J, Boville B A, Briegleb B P, et al. 1993. Description of the NCAR Community Climate (CCM2) [R]. Technical Report NCAR/TN 382 + STR, National Center for Atmospheric Research, 108.
- Hardy G H, Littlewood J E, Pólya G. 1952. Inequalities (2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 324.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G, et al. 1998. The National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: CCM3 [J]. J. Climate, 11: 1131 - 1149.
- Klein S A, Hartmann D L. 1993. The seasonal cycle of low stratiform clouds [J]. J. Climate, 6: 1587 - 1606.
- Klein S A. 1997. Synoptic variability of low-cloud properties and meteorological parameters in the subtropical trade wind boundary layer [J]. J. Climate, 10: 2018 - 2039.
- Mason B J. 1971. The Physics of Clouds (2nd ed.) [M]. Oxford: Clarendon Press, 671.
- Pólya G, Szegő G. 1978. Problems and Theorems in Analysis I. Series, Integral Calculus, Theory of Functions [M]. Berlin: Springer, 389.
- Pruppacher H R, Klett J D. 1978. Microphysics of Clouds and Precipitation (2nd ed.) [M]. Dordrecht (NL): Reidel Publishing Company, 954.
- Rasch P J, Kristjánsson J E. 1998. A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations [J]. J. Climate, 11: 1587 - 1614.
- Slingo J M. 1987. The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 113: 899 - 927.
- Sommeria G, Deardorff J W. 1977. Subgrid-scale condensation in models of nonprecipitating clouds [J]. J. Atmos. Sci., 34: 344 - 355.
- Tiedtke M. 1993. Representation of cloud in large scale models [J]. Mon. Wea. Rev., 121: 3040 - 3061.
- Tompkins A N. 2002. A prognostic parameterization for the sub-grid-scale variability of water vapour and clouds in large scale models and its use to diagnose cloud cover [J]. J. Atmos. Sci., 59: 1917 - 1942.
- 王必正, 曾庆存. 2001. 非对流云的观测事实及其对大气环流模式设计的意义 [J]. 气候与环境研究, 6 (1): 33 - 41.
- Wang Bi-zheng, Zeng Qing-cun. 2001. Observational fact of non-convective clouds and its significance on the design of atmospheric general circulation model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (1): 33 - 41.