

张寅, 罗亚丽, 管兆勇. 2012. NCEP 全球预报系统在 ARM SGP 站点预报大气温度、湿度和云量的检验 [J]. 大气科学, 36 (1): 170–184.
Zhang Yin, Luo Yali, Guan Zhaoyong. 2012. Temperature, relative humidity, and cloud fraction predicted by the NCEP global forecast system at the ARM SGP site during 2001–2008: Comparison with ARM observations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 170–184.

NCEP 全球预报系统在 ARM SGP 站点预报 大气温度、湿度和云量的检验

张寅^{1,2} 罗亚丽² 管兆勇¹

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 利用美国大气辐射测量项目 (ARM) 制作的“气候模拟最佳估计” (CMBE) 观测数据集, 检验美国环境预报中心 (NCEP) 全球预报系统 (GFS) 2001~2008 年在 ARM Southern Great Plains (SGP) 站点预报的大气温度、相对湿度和云量的垂直分布, 主要结论如下: (1) NCEP GFS 较好地预报出了温度和相对湿度的季节变化。就各个季节平均而言, NCEP GFS 高估了 1.5~12 km 的大气温度, 同时低估了春冬季 13~16 km 和秋冬季 1.5 km 以下的大气温度, 各高度上温度偏差绝对值小于 1℃; NCEP GFS 预报结果再现了观测到的相对湿度垂直分布的双峰结构, 但是高估了 4~12 km 的相对湿度。模式分辨率提高 (T170L42 更新为 T254L64) 显著改进了 14~18 km 相对湿度的预报。(2) 预报的云量在 10 km 以下小于观测值, 在 10~13 km 则高于观测值, 而且, NCEP GFS 没有预报出非降水性低云的云量, 其预报的降水云的云量在 8 km 以下也低于观测值, 反映出 NCEP GFS 模式中浅对流和深对流活动不够活跃。(3) NCEP GFS 模式用预报的相对湿度和云水/云冰混合比 (q_c) 诊断云量, 采用同样的诊断公式由观测的相对湿度和 NCEP GFS 预报输出的 q_c 计算云量, 得到的云量在 11 km 以下所有高度上都更加显著地小于观测值, 即比 NCEP GFS 对云量的低估更加严重, 说明 NCEP GFS 可能低估了此高度区间的 q_c 。(4) 2001~2008 年间 NCEP GFS 预报的温度、湿度和云量改进不显著, 其预报云量和 q_c 的误差很可能与模式中深对流和浅对流方案、层云微物理方案的不确定性有关。

关键词 NCEP GFS 模式 ARM CMBE 观测数据 模式检验 云量

文章编号 1006-9895 (2012) 01-0170-15

中图分类号 P435

文献标识码 A

Temperature, Relative Humidity, and Cloud Fraction Predicted by the NCEP Global Forecast System at the ARM SGP Site during 2001–2008: Comparison with ARM Observations

ZHANG Yin^{1,2}, LUO Yali², and GUAN Zhaoyong¹

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

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract This study evaluates the performance of the Global Forecast System (GFS) of the U. S. National Centers

收稿日期 2011-01-20, 2011-05-06 收修定稿

资助项目 中国气象科学研究院基本科研业务专项经费 2007R001, 气象行业专项 GYHY200806020

作者简介 张寅, 男, 1986 年出生, 硕士研究生, 研究方向: 数值模拟。E-mail: zhang-yin-@163.com

通讯作者 罗亚丽, E-mail: yali@cma.cma.gov.cn

for Environmental Prediction (NCEP) against the Climate Modeling Best Estimate (CMBE) observational dataset made by the U. S. Department of Energy Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program at the southern Great Plains (SGP) site for the years of 2001 – 2008. The investigation focuses on the vertical distributions of air temperature (T), relative humidity (RH), and cloud fraction. The major findings are as follows:

(1) NCEP GFS was able to largely capture the seasonal variations of T and RH. However, on seasonal average, the model overestimated T at the heights of 1.5 – 12 km, while underestimated T at 13 – 16 km in spring and winter and at 0 – 1.5 km in autumn and winter, by less than 1°C. Both the predicted and observed RH had double peaks located near the surface and around 12 km, respectively. However, the model overestimated RH in the upper and middle troposphere (4 – 12 km). Increase of model resolution from T170L42 to T254L64 significantly improved the prediction of RH at 14 – 18 km. (2) NCEP GFS generally underestimated cloud fraction at heights below 10 km and slightly overestimated cloud fraction at 11 – 13 km. Moreover, the prediction missed the daytime nonprecipitating low-level clouds and underestimated precipitating cloud amounts below 8 km, indicating that activities of shallow convection and deep convection in the model were not active enough. (3) Using the observed RH and the predicted cloud water/ice mixing ratio (q_c) to calculate cloud fraction with the diagnostic method in the NCEP GFS model, the result shows that cloud fraction from this calculation is more significantly underestimated compared to the NCEP GFS predicted cloud fraction, suggesting that the underestimation of cloud cover at heights below 11 km by the NCEP GFS is probably contributed by an underestimate of q_c at these altitudes. (4) Improvements in the prediction of T, RH, and cloud fraction were insignificant during 2001 – 2008. The inaccurate prediction of cloud fraction and q_c is probably related to uncertainties of parameterizations of deep and shallow convection, as well as cloud microphysics, in the NCEP GFS model.

Key words NCEP GFS model, ARM CMBE observational dataset, model evaluation, cloud fraction

1 引言

数值模式是天气预报和气候预测的重要工具, 模式动力框架和物理过程的不足直接影响模式预报和预测结果的准确性。大气数值模式包含多个物理方案(比如深对流方案、浅对流方案、云微物理方案等)来表示云及其相关过程, 正如政府间气候变化专门委员会(IPCC)最近一次评估报告(Randall et al., 2007)所指出的, 这些物理方案的不完美是造成模式预报预测不确定性的主要原因之一。改进数值模式是一项十分复杂的工作, 模式检验(陈海山和孙照渤, 2005; 张贺等, 2009)是其中必不可少的部分, 而模式检验离不开优质的观测资料。以往的模式检验往往侧重于少数极端天气事件或者较短时间段, 由于模式对于不同天气事件的描述能力不尽相同, 采用包含不同天气过程的长期优质的观测资料, 可以更加全面和系统地检验模式。

为获取不同气候背景下云、辐射以及大气动力热力状况的长期观测值, 最终改进模式中云及其相关过程的表示, 美国能源部于1989年启动了大气辐射测量项目(ARM)(Stokes and Schwartz, 1994; U. S. Department of Energy, 1996; Ackerman and

Stokes, 2003), ARM先后建立了6个固定的观测站点, 称为“ARM气候研究观测站”(ARM Climate Research Facility, 简称ACRF), 分别位于热带、中纬度和北极, 包括美国俄克拉何马州的SGP Lamont (36.6°N, 97.5°W) 站点, 阿拉斯加北部的Barrow (71.3°N, 156.6°W) 和Atkasuk (70.5°N, 157.4°W) 站点, 热带西太平洋的Manus (2.0°S, 147.5°E)、Nauru (0.5°S, 166.9°E) 和Darwin (12.4°S, 130.9°E) 站点。其中SGP站点是ARM最早建立的观测站点, 其观测网面积约55000平方英里, 观测网内布设了大量的仪器设备, 比如毫米波雷达、激光雷达、雷射云幕计和无线电探空仪(Clothiaux et al., 2000; Kassianov et al., 2004; Long et al., 2006; Turner et al., 2007)。

Randall and Cripe (1999)、Xie and Zhang (2000)、Lenderink et al. (2004)、Morrison et al. (2009) 利用ARM观测数据检验多个数值模式的模拟和预报性能, 其中包括美国环境预测中心(NCEP)全球预报系统(GFS)模式及其柱模式(SCM)版本。Iacobellis and Somerville (1991a, 1991b) 利用ARM SGP站点2000年6~8月的观测数据检验NCEP SCM的模拟结果, 发现NCEP

SCM 描述云水和云冰的卷出过程以及云冰转化为降水的过程存在不足。Luo et al. (2005) 用 ARM 提供的 1997 年 6~7 月 29 天加密观测期间的强迫数据驱动 NCEP SCM, 分析模拟的次网格尺度卷云特性, 并且与云分辨模式 (CRM) 模拟结果和雷达观测相比较, 发现: NCEP SCM 模拟的薄卷云的冰水路径和冰水含量明显偏高, 而且其光学厚度与物理厚度成反比, 这与雷达反演以及 CRM 模拟结果相反; Yang et al. (2006) 用 ARM 观测数据 (Climate Research Facility Data Archive) 检验 NCEP GFS 在 SGP 站点 2001~2004 年预报结果, 包括地表辐射通量和热通量、地表气温及云量垂直分布, 发现 NCEP GFS 低估了所有季节对流层中低层的云量, 同时略微高估了对流层上层的云量 (春季除外)。

为了使 ARM ACRF 观测数据更好地为气候研究以及模式发展服务, 从 2008 年 2 月开始, ARM 将 ACRF 多年观测的、经常用于模式评估的数据整理成一个数据集, 称为“气候模拟最佳估计” (CMBE) 数据集 (Xie et al., 2010), 包含每小时平均的地表辐射通量和感热潜热通量、地表 2 m 温度、地面降水, 每小时平均的云量垂直分布, 每 6 小时瞬时的大气温度和相对湿度的垂直分布, 云量、温度和相对湿度的垂直分辨率为 45 m。其中, 地面降水由地面观测站雨量传感器测量得到, 大气温度、相对湿度垂直分布由无线电探空仪测量, 云量由毫米波雷达、激光雷达和雷射云幕计 (每 10 s 测量一次) 观测估算得到。CMBE 资料时间精度

高、跨度久, 对气候研究和模式发展十分有用。

本文利用 ARM 最近提供的 CMBE 观测数据, 检验 NCEP GFS 模式在 ARM SGP 站点 2001~2008 年每日预报结果, 集中研究了云量、大气温度和相对湿度的垂直分布的时间演变、多年季节平均及其日变化, 并且将观测的相对湿度应用于云量的诊断分析, 分别估计了预报的云水/云冰混合比 (q_c) 和相对湿度对预报云量的影响, 同时定性检验了预报的 q_c 。本文目的是: 利用长期优质的 CMBE 数据集, 系统全面地检验 NCEP GFS 的预报性能, 检查这期间模式的各种变化对于预报结果的影响, 为今后改进模式提供一些思路和借鉴。

2 NCEP GFS 模式

NCEP GFS (Sela, 1980) 包含全球资料同化系统 (GDAS) 和模式两部分, 其模式在 1970 年代后期发展成全球模式, 水平方向使用谱三角截断, 垂直方向采用 σ 坐标, 2007 年 5 月 1 日更新为 σ 和气压 p 的混合坐标 (Joseph, 2009)。2001 年 1 月 1 日至 2002 年 10 月 29 日模式版本为 T170L42 (水平分辨率 75 km, 垂直方向分 42 层), 2002 年 10 月 29 日模式版本更新为 T254L64 (水平分辨率 55 km, 垂直方向分 64 层), 2005 年 5 月 31 日模式版本更新为 T382L64 (水平分辨率 35 km, 垂直方向分 64 层)。表 1 列出了 2001~2008 年期间 NCEP GFS 模式经历的更新变化 (http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/STATS/html/model_changes.html [2010-08-02])。目前, NCEP GFS 模式一天

表 1 2001~2008 年 NCEP GFS 模式的更新变化

Table 1 Changes in NCEP GFS model during 2001 - 2008

日期	NCEP GFS 模式的更新变化
2001-05-15	引入了新的预报变量 (云水/云冰质量混合比), 同时将 Zhao and Carr (1997) 的亚物理方案添加到了模式中。
2001-06-27	略微增加了植被覆盖率。
2001-08-15	修改了以下错误: 重力波拖曳、对流云顶随机选择、雪面上的蒸发。
2003-08-28	长波辐射参数化方案由 RRTM 代替了 GFDL 模式中长波方案。
2003-12-09	增加了臭氧的垂直扩散。
2004-02-24	考虑了山脉对气流的阻碍。
2005-05-31	陆面方案由 OSU 转变为 Noah LSM 方案。
2005-06-14	增加了植被的冠层阻力。
2005-07-07	修正了模式顶部温度的错误。
2006-08-22	修正了地表向下长波辐射程序中错误。
2007-05-01	垂直坐标采用 σ 和 p 的混合坐标代替了原先的 σ 坐标。

运行 4 次 (0000 UTC、0600 UTC、1200 UTC、1800 UTC), 最长预报时长可达 16 天。

NCEP GFS 模式中云水/云冰质量混合比 (q_c) 的预报方程可以表示为

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla q_c - \sigma \frac{\partial q_c}{\partial \sigma} + S_c + S_g - P_c - E + F_{q_c}, \quad (1)$$

其中, q_c 代表的相态 (云水或云冰) 取决于局地温度和云顶温度, 方程右边前两项分别代表水平和垂直平流项, S_c 代表对流过程的影响, S_g 代表格点尺度 (层云) 凝结率 (Zhao and Carr, 1997), P_c 代表降水产生率, E 代表云的蒸发率, F_{q_c} 代表水平和垂直的扩散。

NCEP GFS 模式中辐射计算用到的云量 (C) 采用方程 (2) 诊断得到,

$$C = H^{0.25} \{1 - \exp[-\min(\frac{2000q_c}{[(1-H)q^*]^{0.25}}, 50)]\}, \quad (2)$$

其中, H 为相对湿度, q^* 为饱和比湿。此云量诊断方法是 Xu and Randall (1996) 基于 CRM 模拟结果提出的。NCEP GFS 模式中短波辐射参数化方案 (Chou and Suarez, 1999) 考虑了水汽、臭氧、二氧化碳、氧气、云和气溶胶的吸收, 以及云、气溶胶和各种气体的散射作用。长波辐射参数化方案在 2003 年 8 月 28 日之前采用 GFDL 模式中的长波辐射方案 (Miyakoda and Sirutis, 1986), 在此之后采用 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 方案 (Mlawer et al., 1997), 此方案在辐射通量和冷却率计算精度上与逐线模式相当。

NCEP GFS 模式采用 SAS (Simplified Arakawa-Schubert) 方案 (Pan and Wu, 1995) 表示深对流过程, SAS 方案假设“云功函数”准平衡 (Arakawa and Schubert, 1974), 一个网格点在某一积分时次仅考虑一种深对流云, 其云顶位置在相当位温最小的高度和中性浮力层高度之间随机选择。浅对流过程用 Tiedtke (1983) 方案表示, 该方案把浅对流过程作为湍流扩散过程进行处理, 认为浅对流过程的作用是通过湍流垂直扩散效应改变格点气柱内的水热场垂直分布。此方案将云顶高度限制在 700 hPa 以下, 而且浅对流过程中不产生云。云的厚度是区分深对流和浅对流的标准, 如果云的厚度超过 150 hPa 则激发深对流过程, 反之则激发浅对

流过程。

3 分析方法

NCEP GFS 每日有两次预报, 起报时间分别为 0000UTC 和 1200UTC, 预报时长都为 48 小时。2001 年开始, NCEP GFS 在 ARM 各个观测站点的逐日两次起报的预报结果都被保存下来, 保存的变量包括: 每 3 小时平均的地表长短波辐射通量、感热潜热通量, 每 3 小时累积的地表降水和降雪量, 每 3 小时间隔的大气温度、比湿、相对湿度和云量的垂直分布, 垂直方向从地表到 20 km, 垂直分辨率为 250 m。本文选取 NCEP GFS 每日 0000UTC 起报的在 SGP 站点大气温度、相对湿度和云量的 6~30 小时预报, 与 CMBE 资料对比, 主要对比了垂直分布的时间演变以及多年季节平均的日变化, 用 t 检验 (黄嘉佑, 2004) 来判断模式预报与观测之间是否有显著性差异。CMBE 资料的时间间隔 (温度和相对湿度为 6 小时、云量为 1 小时) 和垂直分辨率 (45 m) 与 NCEP GFS 预报输出的 (3 小时和 250 m) 不同, 为了方便对比, 我们将 CMBE 的资料插值到 NCEP GFS 预报输出量的高度上, 并且统一了两种资料的时间间隔 (对温度和相对湿度为 6 小时、对云量为 3 小时)。

相对湿度由水汽压 (e) 除以饱和水汽压 (E_s) 得到, CMBE 提供的相对湿度是相对于液态水的, 即 E_s 是相对于液态水, 而 NCEP GFS 模式计算相对湿度时 E_s 相对于液态还是冰态由大气温度 (T) 决定 (Buck, 1981):

$$E_s = 610.78 (273.16/T)^{-5.07} \exp[14.76 (1 - 273.16/T)] T > 273.16, \quad (3)$$

$$E_s = 610.78 (273.16/T)^{0.56} \exp[23.04 (1 - 273.16/T)] T < 253.16, \quad (4)$$

$$E_s = 12215.6 (273.16/T)^{-5.07} \exp[14.76 (1 - 273.16/T)] / (T - 253.16) + 610.78 (273.16/T)^{0.56} \exp[23.04 (1 - 273.16/T)] [1 - 20/(T - 253.16)] 253.16 \leq T \leq 273.16. \quad (5)$$

为了合理地评估 NCEP GFS 预报的相对湿度 (H_{mod}), 我们用 CMBE 提供的 T 和相对湿度 (H) 计算出水汽压 e [方程 (6)], 将 CMBE 的 T 代入方程 (3~5) 计算 E_s , 然后用 e 除以 E_s 得到与 NCEP GFS 模式相同定义的 CMBE 相对湿度 (H_{obs})。

$$e = H 610.78 (273.16/T)^{-5.07} \cdot \exp [14.76(1 - 273.16/T)]. \quad (6)$$

NCEP GFS 模式预报的云量 (C_{mod}) 是 H 、 q_c 和饱和比湿 (q^*) 的函数 [见方程 (2)], 其中 q^* 由水汽压 e 、气压 p 和相对湿度 H 计算得到:

$$q^* = 0.622e / (pH). \quad (7)$$

为了大致排除预报的相对湿度误差对预报云量的影响, 我们将 H_{obs} 和 NCEP GFS 预报输出的 q_c 代入公式 (2)^①, 得到云量 $C_{\text{mod}2}$, 然后对比 GFS 预报的云量 (C_{mod})、 $C_{\text{mod}2}$ 和 CMBE 提供的云量 (C_{obs})。另外, 为了研究 NCEP GFS 模式中深对流和浅对流方案对其预报云量的影响, 将云量 (C_{mod} 和 C_{obs}) 分为有地表降水和无地表降水两类, 分别对比其观测和预报值的多年季节平均的日变化。

4 温度的垂直分布

2001~2008 年 NCEP GFS 大气温度 (T_{mod}) 与 CMBE 大气温度 (T_{obs}) 每 6 小时时间演变对比 [图 1a、b (见文后彩图)] 表明, NCEP GFS 较好地预报出了温度垂直分布的季节变化, 其预报的温度在低层 (0~1.5 km) 和高层 (12~18 km) 偏低 [图 1c (见文后彩图)], 在 1.5~12 km 偏高, 各个高度上偏差绝对值基本不超过 2℃, 而且, 绝大多数时段内温度偏差的大小和垂直分布并不随时间而明显改变。2004 年 3~12 月和 2008 年 1 月偏差较大, 温度偏差绝对值达 4~8℃; 从 2005 年初和 2008 年 2 月开始, NCEP GFS 预报温度的偏差又减小了, 而此时模式并无变更, 因此, 预报偏差的这两次变化难以用已知的 NCEP GFS 模式变更情况来解释。

从 2001~2008 年大气温度季节平均日变化 (图 2a-h) 来看, NCEP GFS 合理地预报出了近地面温度的日变化; 预报与观测的日平均温度在 0~16 km 各个高度上的差别绝对值均小于 1℃ (图 2i-l), 在绝大多数高度上预报的日平均温度高于观测值, 只有春 (MAM)、冬 (DJF) 季 13~16 km 及秋 (SON)、冬季 1.5 km 左右除外。t 显著性检验 (图 2m-p) 表明: 预报和观测的温度日变化差异在夏

季 (JJA) 最显著, 7 km 以下和 11~14 km 高度上各个时间段的温度差异都通过置信水平正 0.01 显著性检验; 秋冬季 9~12 km 高度上预报与观测的温度差异也通过了置信水平正 0.01 显著性检验; 预报显著低估了春季 13~16 km 高度上大气温度, 预报和观测的差异通过置信水平负 0.01 显著性检验。由此可见, NCEP GFS 预报的大气在 12 km 以下绝大多数高度上四季都偏暖。

5 相对湿度的垂直分布

2001~2008 年 NCEP GFS 预报与 CMBE 提供的大气相对湿度每 6 小时时间演变对比 [图 3a、b (见文后彩图)] 显示: 模式预报 (H_{mod}) 和观测 (H_{obs}) 的相对湿度都表现出夏季最大、冬季最小的季节变化, 而且垂直方向均有两个大值区域, 分别位于近地面和 11 km 附近, 但是, 预报值在 6~12 km 高度区间大于观测值, 偏差达到了 20%~50% [图 3c (见文后彩图)]。另外, 预报 H 的偏差在 14 km 以下逐年变化不大, 14 km 以上模式预报的 H 于 2002 年 11 月前后有明显的变化, 预报与观测的偏差由正变负。2002 年 10 月 29 日 NCEP GFS 模式版本由 T170L42 更新为 T254L64, 为了检查此变化对于 NCEP GFS 预报 H 的影响, 我们分别选取此变化前、后各 365 天, 计算了这两段时间内预报 H 的偏差、均方根误差、标准化标准差、与观测的时间相关系数 (图 4), 发现 14~18 km 高度 H 的均方根误差从约 20% 减小到小于 10% (图 4a), 偏差由正的 10% 变为负的 3% (图 4b), 相关系数略有提高 (图 4c), 标准化标准差从约 2.0 变化至 0.8, 说明 H 的时间变化幅度也更接近观测 (图 4d), 这些结果表明 2002 年 10 月 29 日模式分辨率的提高改进了 14~18 km 高度上 H 的预报。

从 2001~2008 年大气 H 季节平均日变化来看 (图 5a-h), 观测各个季节 H 从地面 (65%~70%) 向上逐渐减小, 在 4 km (春冬季节) 或 6 km (夏秋季节) 达到最小值 (约 30%~40%), 然后随高度上升而增大, 在 10~12 km 达到第二个峰值

① 云量的诊断关系 [文中方程 (2)] 决定了云量对饱和比湿 (q^*) 的依赖性不如对 q_c 的依赖性强。为了大致估计 q^* (或大气温度 T) 对云量的影响, 我们用模式输出的 T 计算出 q^* , 进而计算云量, 所得结果与用观测 T 计算出 q^* 再计算云量的结果几乎完全一致, 可见 q^* 或 T 对云量的影响不大。

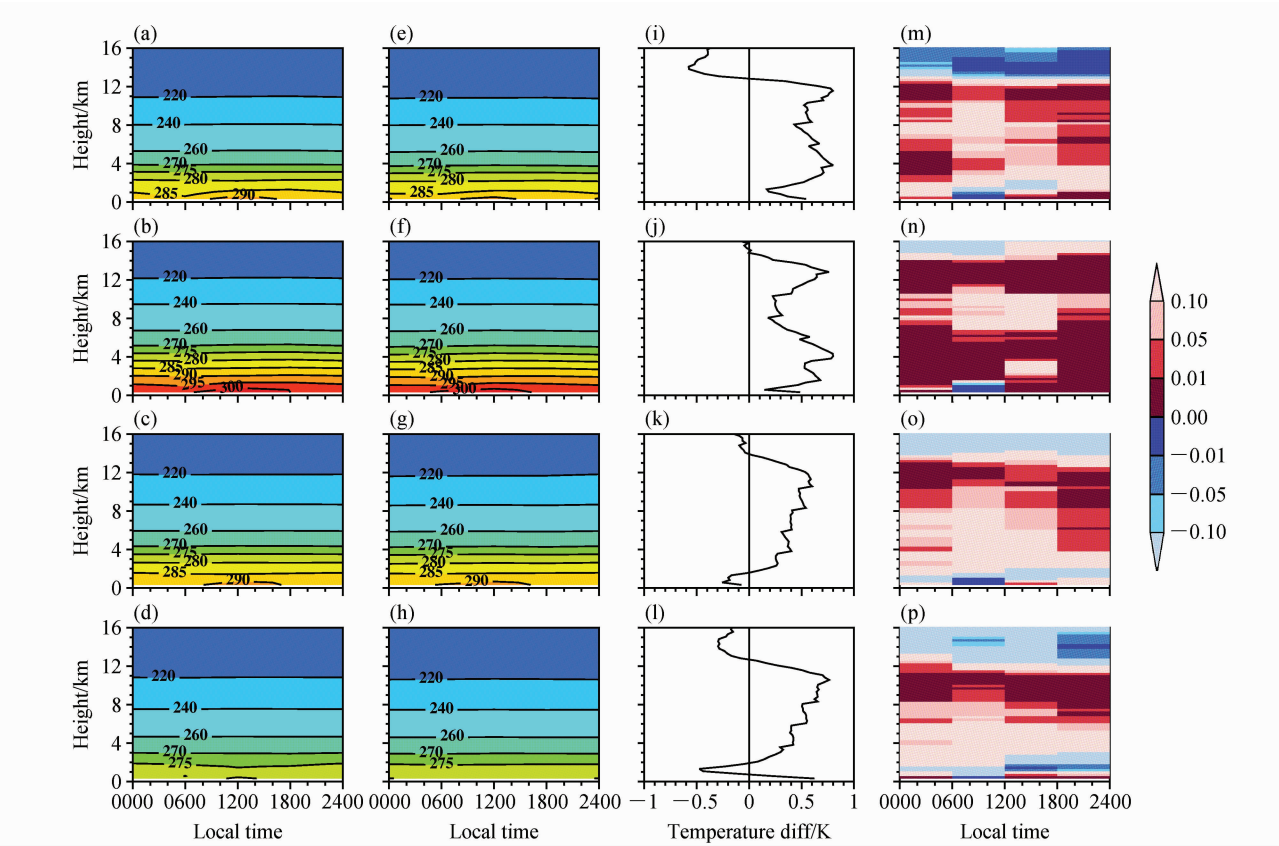


图2 2001~2008年(a~d)NCEP GFS和(e~h)CMBE大气温度垂直分布的多年季节平均日变化、(i~l)多年季节平均的温度差异及(m~p)其 t 显著性检验结果(蓝色为负差异、红色为正差异):(a、e、i、m)春季;(b、f、j、n)夏季;(c、g、k、o)秋季;(d、h、l、p)冬季

Fig. 2 Diurnal and vertical distributions of (a~d) NCEP GFS and (e~h) CMBE temperature averaged for each season based on 6-hourly data during 2001–2008; (i~l) differences between vertical distributions of T_{mod} and T_{obs} averaged over each season and (m~p) their results of t -statistic significant test (blue color represents negative difference, red color represents positive difference). (a, e, i, m) Spring; (b, f, j, n) summer; (c, g, k, o) autumn; (d, h, l, p) winter

(约60%); H 的日变化在秋冬季节比较明显, 中高层 H 在夜间大于白天。NCEP GFS 定性地再现了观测到的季节平均 H 垂直分布及其日变化特征, 但是, 预报高估了 H 值, 尤其在 4~12 km 高度区间 (图 5i~l), 各个季节模式预报和观测的 H 差异通过置信水平正 0.01 显著性检验, 另外, 冬季 4 km 以下和春季 12~16 km 模式预报与观测的 H 差异也通过置信水平正 0.01 显著性检验, 虽然差别的绝对值较小 (图 5m~p)。

总之, NCEP GFS 预报的大气在 4~12 km 高度上春夏秋冬各个季节都比观测大气更加暖湿。

6 云量的垂直分布

NCEP GFS 预报的云量 (C_{mod}) 与 CMBE 云量

(C_{obs}) 2001~2008 年每 3 小时时间演变对比 (图 6a、b) 表明: 观测云量季节变化主要表现在高层 (12~15 km), 云量在每年夏季多、冬季少, C_{mod} 也表现出类似的季节变化, 但是, 预报的云量在 10 km 以下偏少, 而在 12 km 附近略偏多; 从 C_{mod} 与 C_{obs} 差异的时间演变 (图 6c) 看, 尽管 2001~2008 年模式历经了多次更新变化 (表 1), 但是云量的预报没有明显改进。

如第 3 节说明, 为了大致排除 NCEP GFS 预报 H 的误差对于其预报云量 (C_{mod}) 的影响, 我们利用 CMBE 相对湿度 (H_{obs}) 取代 NCEP GFS 预报的相对湿度 (H_{mod}), 用 NCEP GFS 模式诊断云量的方法 (方程 2) 计算得到云量 ($C_{\text{mod}2}$), 进而对比 C_{mod} 、 $C_{\text{mod}2}$ 与 C_{obs} 多年季节平均日变化 (图 7), 计

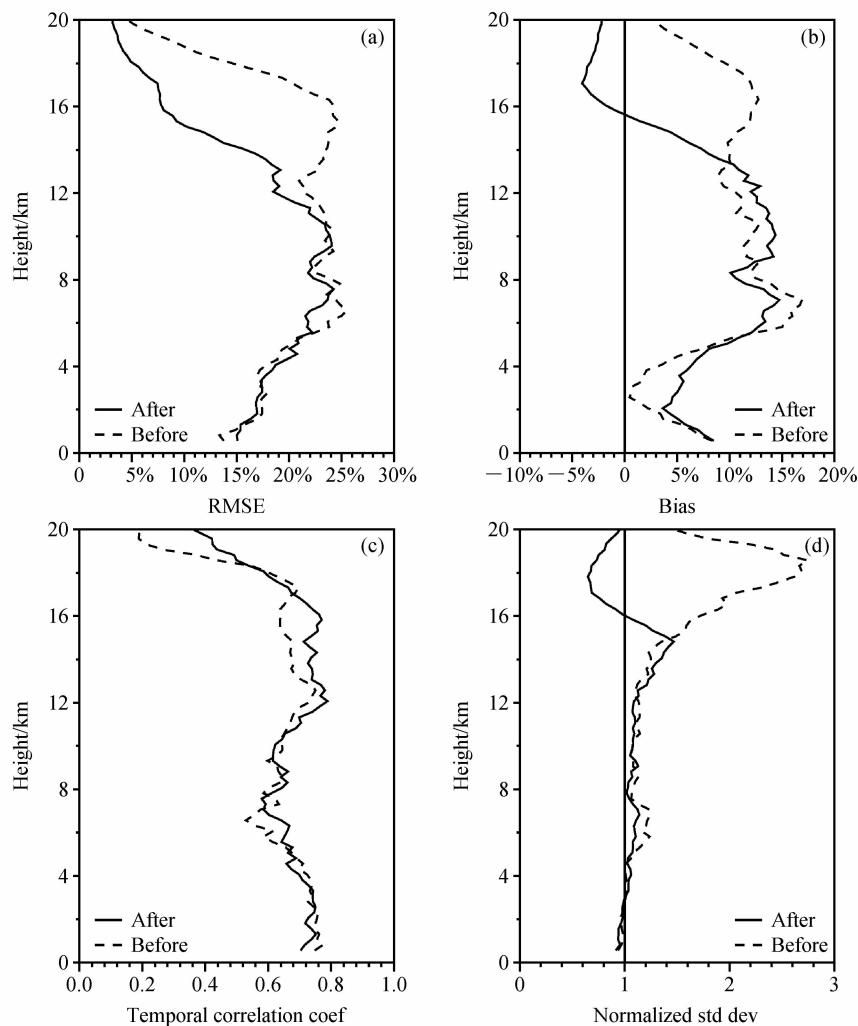


图 4 2002 年 10 月 29 日 GFS 垂直层数改变前后各 365 天的相对湿度的统计量: (a) 均方根误差; (b) 与观测偏差; (c) 时间相关系数; (d) GFS 标准差除以观测标准差。虚线: 前 365 天; 实线: 后 365 天

Fig. 4 Statistics of relative humidity for the 365 days before 29 Oct 2002 (dashed lines) and the 365 days after 29 Oct 2002 (solid lines): (a) RMSE; (b) mean bias; (c) temporal correlation coefficient; (d) normalized standard deviation

算了平均日变化的偏差并做显著性检验 (图 8)。 C_{obs} 有两个大值区分别位于对流层中上层 8~12 km 及对流层低层 2 km 以下, 其日变化主要有两个特点: 春夏两季高云量的峰值出现在夜间, 春夏秋三季低云量在上午大于下午。 C_{mod} 和 $C_{\text{mod}2}$ 也显示出与 C_{obs} 类似的垂直方向双峰结构, 但是 C_{mod} 和 $C_{\text{mod}2}$ 几乎在所有季节、所有高度 (12 km 附近除外) 都小于 C_{obs} , 且没有表现出明显的日变化特征: C_{mod} 在所有季节 10 km 以下各个高度都小于 C_{obs} , 尤其是春夏两季白天对流层低层的云量偏差大, 各个季节 C_{mod} 中午的值最小, $C_{\text{mod}2}$ 大值多出现在早晨。由于 $C_{\text{mod}2}$ 在 4~12 km 高度上比 C_{mod} 小 (这是因为在此

高度区间 H_{mod} 大于 H_{obs} 而且 C_{mod} 与 $H^{0.25}$ 成正比), 10 km 以下各个高度上 $C_{\text{mod}2}$ 与 C_{obs} 之间的偏差更大了, 差别也更加显著, 四季相比冬季的变化最大, 也就是说 $C_{\text{mod}2}$ 更加严重地低估了 10 km 以下各个高度的云量, 另外, 12 km 附近 $C_{\text{mod}2}$ 与 C_{obs} 比较一致。可见, 10 km 以下模式预报的 H 大于观测值会增大模式预报的云量, 但 C_{mod} 却小于 C_{obs} , 如果模式预报的 H 等于 CMBE 提供的观测值 H_{obs} , 则采用方程 (2) 诊断的云量更加偏离 C_{obs} , 这说明模式预报很可能低估了云水/云冰质量混合比 (q_c), 当然云量诊断关系 [方程 (2)] 本身也存在一定的不确定性。尽管缺乏 q_c 的直接观测值, 但

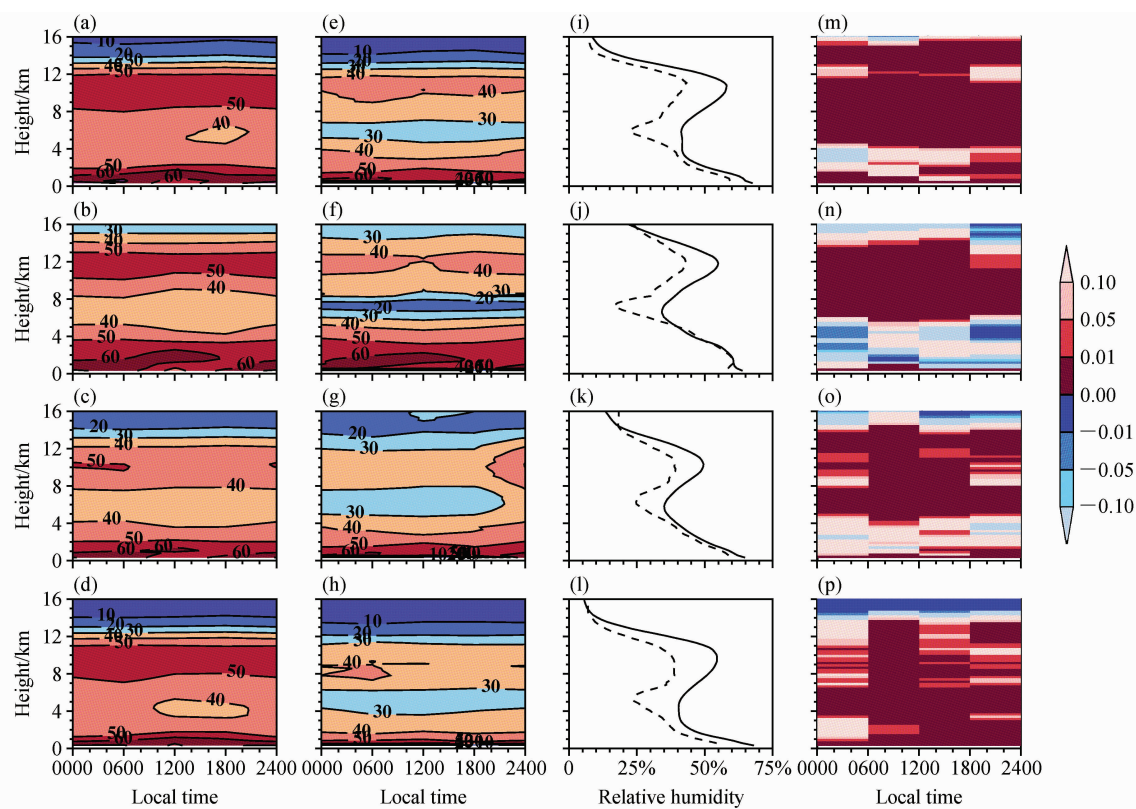


图 5 同图 2，但为相对湿度。(a-h) 等值线间隔为 10%；(i-l) 实线代表 GFS，虚线代表 CMBE
Fig. 5 Same as Fig. 2, but for relative humidity. (i-l) Solid lines are for GFS forecasts and dashed lines are for ARM observations;
(a-h) the contour interval is 10%

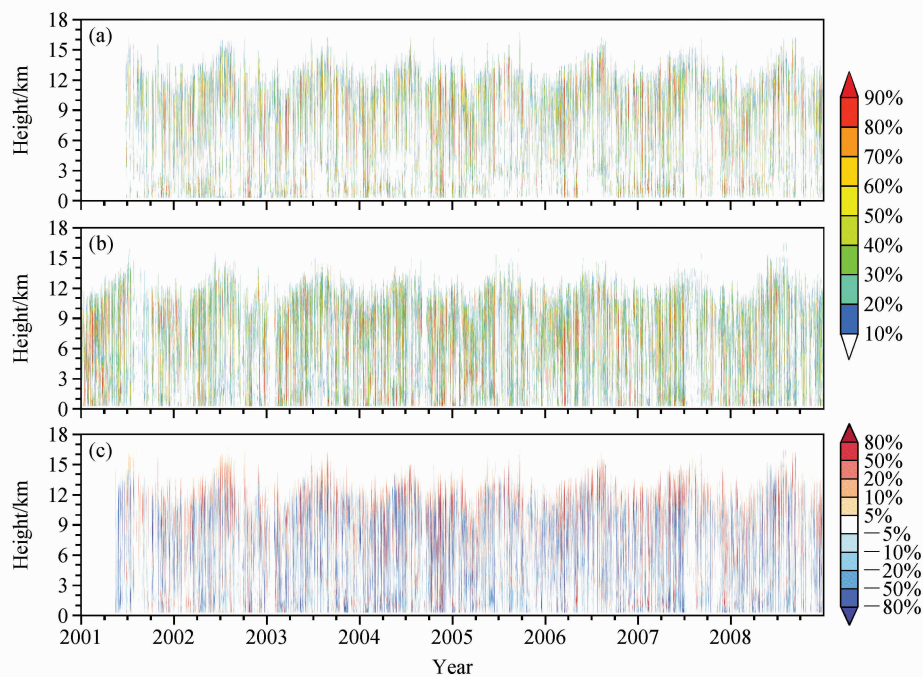


图 6 2001~2008 年云量垂直分布每 3 小时时间演变图：(a) GFS 模式预报的云量 (C_{mod})；(b) CMBE 观测的云量 (C_{obs})；(c) GFS 预报减去 CMBE 观测的差
Fig. 6 Vertical distributions of the 3-hourly cloud fraction from 2001 to 2008: (a) NCEP GFS forecasts (C_{mod})；(b) CMBE observations (C_{obs})；(c) difference between NCEP GFS forecasts and CMBE observations

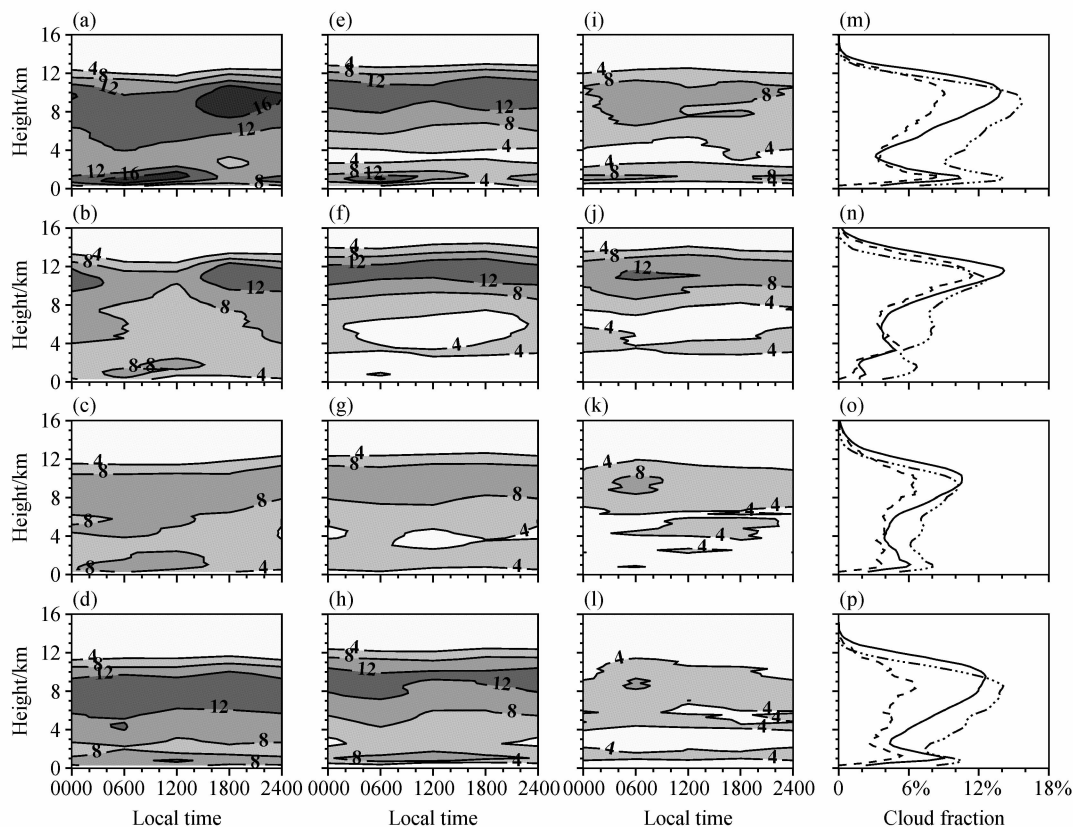


图7 2001~2008年NCEP GFS云量(a-d)、CMBE云量(e-h)、用相对湿度和 q_c 计算得出的云量(i-l)垂直分布的多年季节平均日变化以及多年季节平均的云量高度分布(m-p): (a、e、i、m)春季; (b、f、j、n)夏季; (c、g、k、o)秋季; (d、h、l、p)冬季。(a-l)等值线间隔为4%; (m-p)点虚线为CMBE, 实线为GFS, 虚线为相对湿度和 q_c 计算得出的云量

Fig. 7 Diurnal and vertical distributions of (a-d) NCEP GFS, (e-h) CMBE cloud fraction, (i-l) cloud fraction calculated using the observed H and q_c averaged for each season based on 3-hourly data during 2001-2008; (m-p) vertical distributions of cloud fraction averaged over each season (solid lines are for GFS forecasts, dash-dotted lines are for ARM observations, dashed lines are for cloud fraction calculated using the observed H and q_c). (a, e, i, m) Spring; (b, f, j, n) summer; (c, g, k, o) autumn; (d, h, l, p) winter; (a-l) the contour interval is 4%

是本研究定性地检验了NCEP GFS预报的 q_c 。NCEP GFS预报 q_c 的误差可能与其模式中深对流方案对于云微物理过程的描述以及层云微物理方案有关。

为了研究NCEP GFS模式中深对流和浅对流方案对其预报云量的影响,我们将云量(C_{obs} 和 C_{mod})分为无地表降水(o/prep)和有地表降水(w/prep)两种情况,从它们多年季节平均日变化(图9、图10)来看,(1)各个季节都观测到非降水的低层云(2 km以下),其峰值主要出现在上午,而NCEP GFS完全没有预报出低层非降水云的云量(图9b、d,图10b、d),这可能与NCEP GFS模式中浅对流方案不产生云量有关;(2)当有地表降水出现时,GFS低估了11 km以下的云量;(3)春秋季节观测到的深对流云出现在中午前后(图9e、

g),夏季出现在午后和傍晚(图10e),冬季出现在夜间(图10g),而NCEP GFS预报没有扑捉到这些特点。这些结果说明NCEP GFS模式中浅对流和深对流活动不够活跃。另外,需要指出的是CMBE观测的云量包含了各种水凝物的影响,包括云滴、云冰粒子、雨和雪,而NCEP GFS模式计算云量时只考虑云滴和云冰粒子,雨和雪不包含在内,这也可以部分解释NCEP GFS预报的降水云量与观测值的差别。Yang et al. (2006)检验了NCEP GFS在ARM SGP站点2002~2004年夏季和冬季季节平均云量的日变化,本研究的时间段(2001~2008年)更长,所得结果与Yang et al. (2006)的定性一致,说明2005~2008年模式的更新变化并没有显著改善其预报的云量,并且我们补充研究了春季和秋季的云量垂直分布。

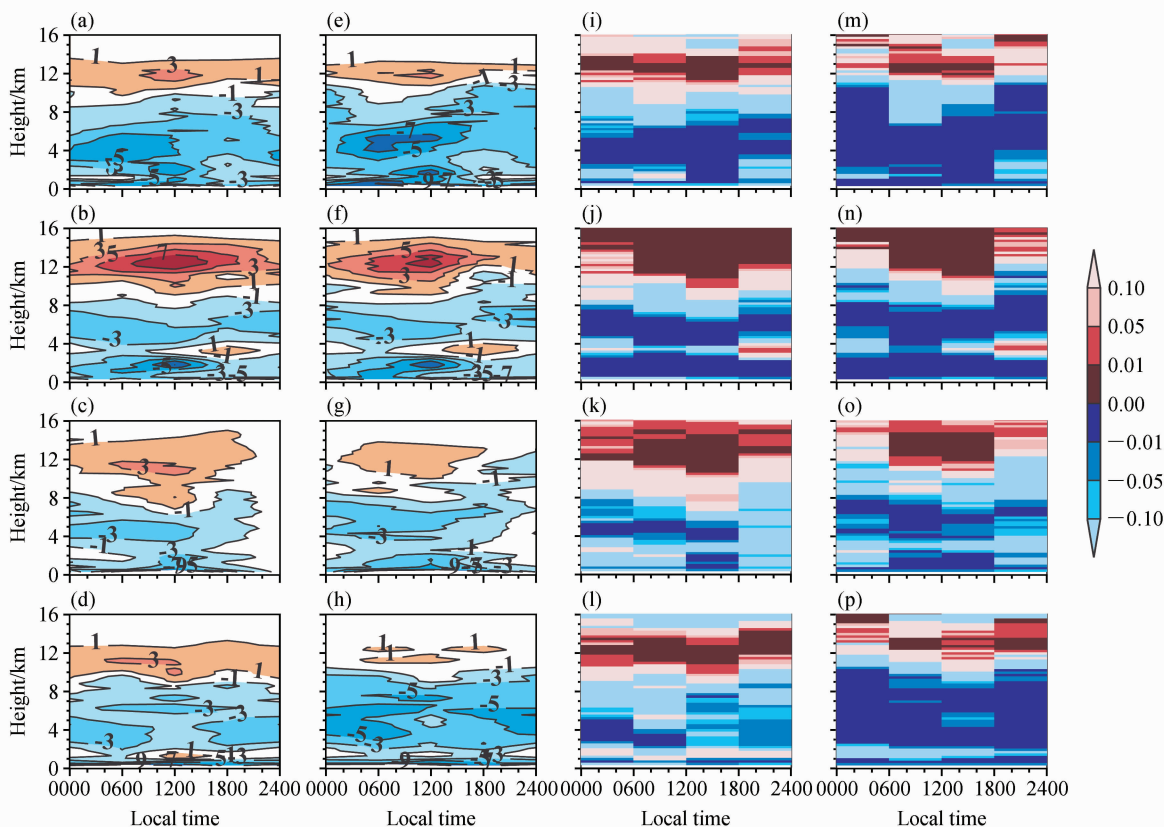


图8 2001~2008年GFS云量(a-d)、用观测的相对湿度和 q_c 计算得出的云量(e-h)与CMBE观测云量多年季节平均日变化差异; GFS云量的 t 显著性检验结果(i-l)和用观测的相对湿度和 q_c 计算得出云量的 t 显著性检验结果(m-p)。(a-h)等值线间隔为2%; (i-p)蓝色为负差异,红色为正差异。其余同图7

Fig. 8 Diurnal and vertical distributions of (a-d) NCEP GFS and CMBE cloud fraction, (e-h) cloud fraction calculated using the observed RH and q_c and CMBE cloud fraction averaged for each season based on 3-hourly data 2001-2008; results of t -statistic significant test for (i-l) GFS cloud fraction and (m-p) cloud fraction calculated using the observed RH and q_c . (a-h) The contour interval is 2%; (i-p) blue color represents negative difference, red color represents positive difference. Others are the same as Fig. 7

7 总结

数值模式是天气预报和气候预测的重要工具,改进数值模式是一项复杂的工作,模式检验是其中的重要部分,而观测资料对于模式检验至关重要。美国能源部于1989年启动了大气辐射测量项目(ARM),ARM建立了6个固定的气候观测站(ACRF),用来提供长时间序列的地表、大气和云的观测数据。2008年ARM专门将ACRF多年优质的观测数据整理成“气候模拟最佳估计”(CMBE)数据集,提供模式评估的常用数据,其中包括每小时云量和每6小时大气温度和湿度的垂直廓线等数据。CMBE观测时间精度高、跨度久,对气候研究和模式发展有较高的价值。

本研究选取NCEP全球预报系统(GFS)2001~2008年每日0000UTC起报的在SGP站点的6~30小时预报结果,与CMBE观测的大气温度、相对湿度和云量对比,检验了这八年间的演变、多年季节平均日变化,并采用 t 检验来检查预报与观测之间差异的显著性,而且,用观测的相对湿度和NCEP GFS预报输出的云水/云冰混合比(q_c)代入NCEP GFS模式诊断云量的经验公式[方程(2)],重新计算云量,借此分离了NCEP GFS预报的相对湿度和 q_c 对其预报云量的影响,还定性检验了NCEP GFS预报的 q_c 。主要结论如下:

(1) 大气温度每6小时时间演变对比表明,NCEP GFS较好地预报出了温度垂直分布的季节变化,但是,NCEP GFS预报的温度在1.5~12 km

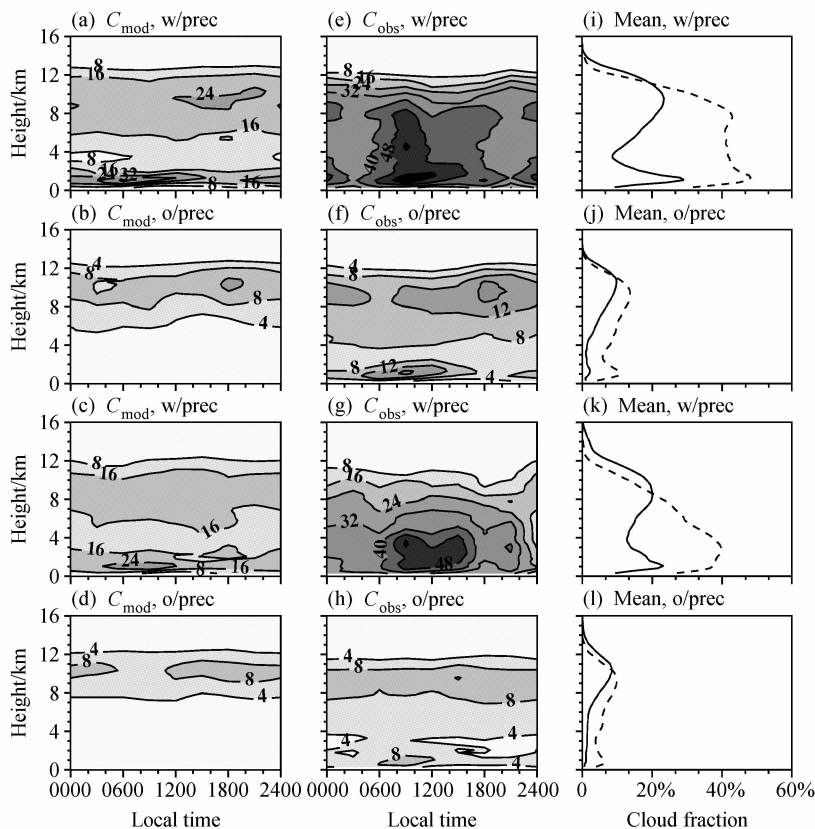


图9 2001~2008年(a、b、e、f、i、j)春季和(c、d、g、h、k、l)秋季NCEP GFS(a-d)与CMBE(e-h)无地表降水(o/prec)和有地表降水(w/prec)时云量垂直分布的日变化以及平均云量的高度分布图(i-l)。(a-h)等值线间隔为4%或8%;(i-l)虚线为CMBE观测,实线为GFS模式预报

Fig. 9 Diurnal and vertical distributions of (a-d) NCEP GFS and (e-h) CMBE cloud amount averaged over (a, b, e, f, i, j) spring and (c, d, g, h, k, l) autumn based on 3-hourly data during 2001-2008; vertical distributions of cloud amount averaged over (i, j) spring and (k, l) autumn. The cases with (w/prec) and without (o/prec) precipitation on the ground are separated; (a-h) the contour intervals are 4% for the cases without precipitation and 8% for the cases with precipitation; (i-l) solid lines are for the GFS forecasts and dashed lines are for CMBE observations

偏高、在低层(0~1.5 km)和高层(12~18 km)偏低,各个高度上温度偏差的绝对值基本不超过2℃。从季节平均日变化来看,NCEP GFS合理地预报出近地面温度的日变化,预报与观测的日平均温度在0~16 km各个高度上差别的绝对值均小于1℃,在绝大多数高度上预报的日平均温度高于观测值,只有春、冬季14~16 km及秋、冬季1 km左右除外。 t 显著性检验表明:夏季7 km以下和11~14 km、秋、冬季9~12 km高度上预报与观测的温度差异通过了置信水平正0.01显著性检验,春季13~16 km高度上预报和观测的温度差异通过置信水平负0.01显著性检验。

(2) 相对湿度每6小时时间演变对比显示,预

报和观测的相对湿度都表现出夏季最大、冬季最小的季节变化,而且垂直方向均有两个大值区域,分别位于近地面和11 km附近,但是,预报值在6~12 km高度区间大于观测值(偏差达到了20%~50%)。另外,预报的相对湿度于2002年11月前在14~18 km有改进,原因是2002年10月29日NCEP GFS模式分辨率提高了(版本由T170L42更新为T254L64)。从季节平均日变化来看,观测各个季节相对湿度从近地面(65%~70%)向上逐渐减小,在4 km(春、冬季节)或6 km(夏、秋季节)达到最小值(约30%~40%),然后随高度上升而增大,在10~12 km达到第二个峰值(约60%);相对湿度的日变化在秋冬季节比

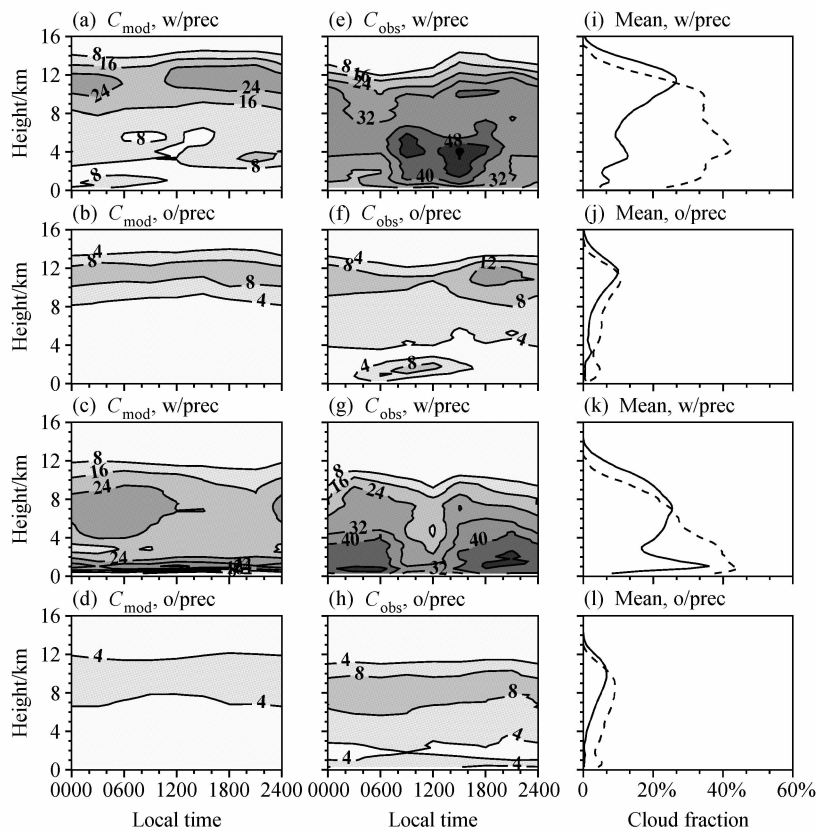


图 10 同图 9，但为 (a、b、e、f、i、j) 夏季和 (c、d、g、h、k、l) 冬季
Fig. 10 Same as Fig. 9, but for (a, b, e, f, i, j) summer and (c, d, g, h, k, l) winter

较明显，中高层相对湿度在夜间大于白天。预报定性地再现了观测到的季节平均相对湿度垂直分布及其日变化特征，但是高估了相对湿度的值，尤其在 4~12 km 高度区间，各个季节预报和观测在 4~12 km 的差异通过置信水平正 0.01 显著性检验。

(3) 云量每 3 小时时间演变对比表明，观测云量季节变化主要表现在高层 (12~15 km)，云量在每年夏季多、冬季少，NCEP GFS 预报出了类似的季节变化，但是预报的云量在 10 km 以下偏少，而在 12 km 附近略偏多。从多年季节平均日变化看，观测云量有两个大值区，分别位于对流层中上层 8~12 km 及对流层低层 2 km 以下，NCEP GFS 预报云量也显示出与观测类似的垂直方向双峰结构，但是所有季节 10 km 以下各个高度预报值都小于观测值，尤其是春夏两季白天对流层低层的云量。用观测相对湿度和模式预报 q_c 代入 NCEP GFS 模式诊断云量的公式 [方程 (2)]，计算得到的云量更加严重地低估了 10 km 以下各个高度的云量。可见，在模式高估 10 km 以下相对湿度的情况下，其

预报的云量仍然小于观测，如果模式预报的相对湿度等于 CMBE 提供的观测值，则采用方程 (2) 诊断的云量更加偏离观测，这说明模式预报很可能低估了 q_c ，而这可能与模式中物理方案 (如：深对流方案、层云微物理方案) 不准确有关，当然 NCEP GFS 模式采用的云量诊断关系本身也存在一定的不确定性。

(4) 将云量分为无地表降水和有地表降水的两种情况分别检验，发现 NCEP GFS 完全没有预报出低层非降水云的云量，当有地表降水出现时，NCEP GFS 低估了 11 km 以下的云量，这些结果表明 NCEP GFS 模式中浅对流和深对流活动不够活跃。

Yang et al. (2006) 对比了 2001~2004 年 ARM 观测与 NCEP GFS 预报在 SGP 站点的地表通量、地表 2 m 温度和 2002~2004 年云量的垂直分布，本文运用 ARM 提供的更新的观测数据集，检验了更长时间段 (2001~2008 年) 的云量、温度和湿度垂直分布的预报，其中云量的分析结果与

Yang et al. (2006) 的定性一致。并且, 本研究大致分离了 NCEP GFS 预报的相对湿度和 q_c 对其预报云量的影响, 发现 NCEP GFS 很可能低估了网格平均的 q_c , 进而造成其预报的云量偏低。另外, 我们的研究表明, 尽管 NCEP GFS 模式在 2001~2008 年经历了一系列的更新变化, 其大气温度和湿度及云量的预报并没有得到明显的改进, 其预报云量和 q_c 的误差很可能与模式中深对流和浅对流方案、层云微物理方案密切相关, 这些研究结果对于改进其他模式具有借鉴意义。

致谢 本文所用资料来自美国能源部大气辐射测量项目 (ARM) 网站 <http://www.arm.gov/> [2011-04-06]。

参考文献 (References)

- Ackerman T P, Stokes G M. 2003. The atmospheric radiation measurement program [J]. *Phys. Today*, 56, 38-45.
- Arakawa A, Schubert W H. 1974. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I [J]. *J. Atmos. Sci.*, 31: 674-701.
- Buck A L. 1981. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor [J]. *J. Appl. Meteor.*, 20: 1527-1532.
- 陈海山, 孙照渤. 2005. 陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 II. 模式检验 [J]. *大气科学*, 29 (2): 272-282. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2005. Design of a comprehensive land surface model and its validation. Part II: Model validation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (2): 272-282.
- Chou M D, Suarez M J. 1999. A solar radiation parameterization (CLIR-AD-SW) for atmospheric studies [R]. NASA/TM-1999-104606, 15, 48 pp.
- Clothiaux E E, Ackerman T P, Mace G G, et al. 2000. Objective determination of cloud heights and radar reflectivities using a combination of active remote sensors at the ARM CART sites [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39: 645-665.
- 黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 19. Huang Jiayou. 2004. *Statistic Analysis and Forecast Methods in Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 19.
- Iacobellis S F, Somerville R C J. 1991. Diagnostic modeling of the Indian monsoon onset. Part I: Model description and validation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48: 1948-1959.
- Iacobellis S, Somerville R C J. 1991. Diagnostic modeling of the Indian monsoon onset. Part II: Budget and sensitivity studies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48: 1960-1971.
- Joseph. 2009. The implementation of the sigma pressure hybrid coordinate into the GFS [R]. 461, Office of Meteorology, National Weather Service, 25pp.
- Lenderink G, Siebesma A P, Cheinet S, et al. 2004. The diurnal cycle of shallow cumulus clouds over land: A single-column model intercomparison study [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130: 3339-3364.
- Long C N, Sabburg J M, Calbó J, et al. 2006. Retrieving cloud characteristics from ground-based daytime color all-sky images [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23 (5): 633-652.
- Luo Y, Krueger S K, Moorthi S. 2005. Cloud properties simulated by a single-column model. Part I: Comparison to cloud radar observations of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62: 1428-1445.
- Kassianov E, Long C N, Ovtchinnikov M. 2004. Cloud sky cover versus cloud fraction: Whole-sky simulations and observations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 44: 86-98.
- Miyakoda K, Sirutis J. 1986. Manual of the E-Physics [M]. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton University, Princeton, NJ, 57pp.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 16663-16682.
- Morrison H, McCoy R B, Klein S A. 2009. Intercomparison of model simulations of mixed-phase clouds observed during the ARM mixed-phase arctic cloud experiment. I: Single-layer cloud [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135 (641): 979.
- Pan H L, Wu W S. 1995. Implementing a mass flux convection parameterization package for the NMC Medium-Range Forecast model [R]. NMC Office Note 409, 40 pp.
- Randall D A, Cripe D G. 1999. Alternative methods for specification of observed forcing in single-column models and cloud system models [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 24527-24545.
- Randall D A, Wood R A, Bony S, et al. 2007. Climate models and their evaluation [M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Sela J G. 1980. Spectral modeling at the national meteorological center [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108: 1279-1292.
- Stokes G M, Schwartz S E. 1994. The atmospheric radiation measurement (ARM) program: Programmatic background and design of the cloud and radiation test bed [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75: 1201-1221.
- Tiedtke M. 1983. The sensitivity of the time-mean large-scale flow to cumulus convection in the ECMWF model [R]. Proc. ECMWF workshop on convection in large-scale models, Reading, United Kingdom, ECMWF, 297-316.
- Turner D D, Clough S A, Liljegren J C. 2007. Retrieving liquid water path and precipitable water vapor from Atmospheric Radiation Measurement (ARM) microwave radiometers [J]. *IEEE Trans. Remote Sens.*, 45, 3680-3690, doi: 10.1109/TGRS.2007.903703.
- U. S. Department of Energy. 1996. Science plan for the atmospheric

- radiation measurement (ARM) program [R]. DOE/ER -0670T, Washington D C; U. S. Dept. of Energy, Office of Energy Research, Office of Health and Environmental Research, Environmental Sciences Division.
- Xie S C, Zhang M H. 2000. Impact of the convection triggering function on single-column model simulations [J]. J. Geophys. Res., 105: 14983–14996.
- Xie S C, McCoy R B, Klein S A, et al. 2010. Clouds and more: ARM climate modeling best estimate data [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91: 13–20.
- Xu K M, Randall D A. 1996. A semiempirical cloudiness parameterization for use in climate models [J]. J. Atmos. Sci., 53: 3084–3102.
- Yang F L, Pan H L, Krueger S K, et al. 2006. Evaluation of the NCEP global forecast system at the ARM SGP site [J]. Mon. Wea. Rev., 134: 3668–3690.
- 张贺, 林朝晖, 曾庆存. 2009. IAP AGCM-4 动力框架的积分方案及模式检验 [J]. 大气科学, 33 (6): 1267–1285. Zhang He, Lin Zhaohui, Zeng Qingcun. 2009. The computational scheme and the test for dynamical framework of IAP AGCM-4 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1267–1285.
- Zhao Q Y, Carr F H. 1997. A prognostic cloud scheme for operational NWP models [J]. J. Atmos. Sci., 125: 1931–1953.

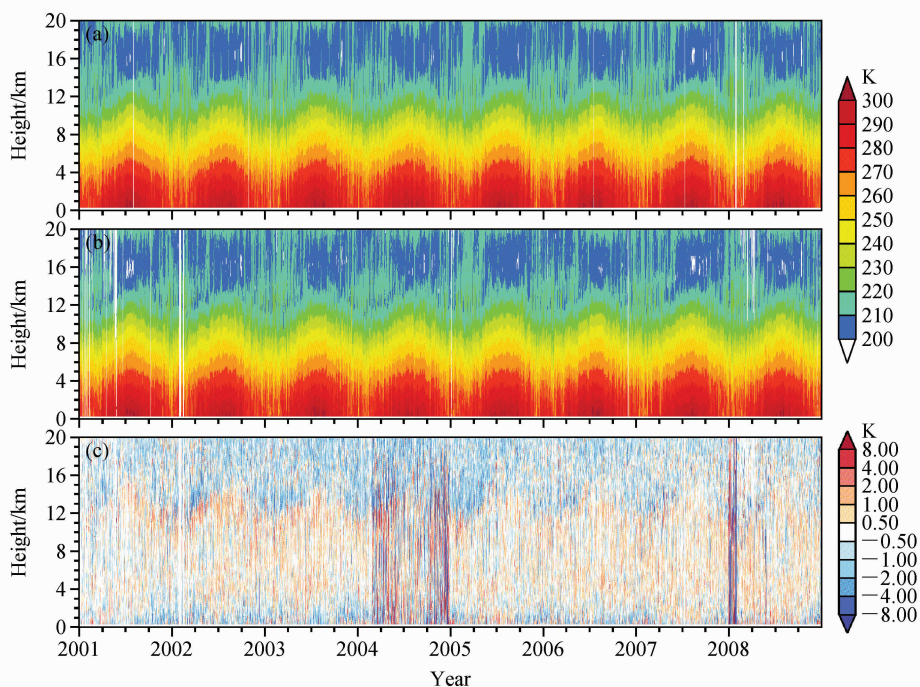


图1 2001~2008年大气温度垂直分布每6小时演变图(单位: K): (a) NCEP GFS 预报的温度 (T_{mod}); (b) CMBE 提供的观测温度 (T_{obs}); (c) NCEP GFS 预报减去 CMBE 观测的差

Fig. 1 Vertical distributions of the 6-hourly temperature from 2001 to 2008: (a) NCEP GFS forecasts (T_{mod}); (b) CMBE observations (T_{obs}); (c) difference between NCEP GFS forecasts and CMBE observations

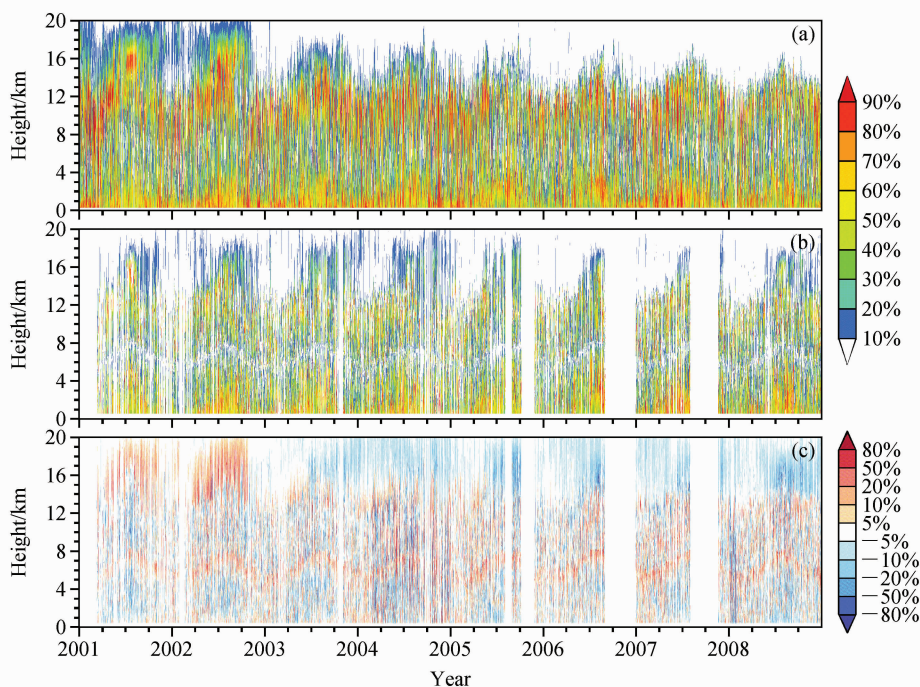


图3 同图1, 但为相对湿度

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for relative humidity