

# 中国东部云-降水对应关系的分析与模式评估<sup>\* 1</sup>

李昀英 寇雄伟 方乐铨 孙国荣  
LI Yunying KOU Xiongwei FANG Lexin SUN Guorong

解放军理工大学气象海洋学院,南京,211101

*School of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*

2014-07-25 收稿,2015-02-09 改回.

李昀英,寇雄伟,方乐铨,孙国荣. 2015. 中国东部云-降水对应关系的分析与模式评估. 气象学报, 73(4):766-777

**Li Yunying, Kou Xiongwei, Fang Lexin, Sun Guorong. 2015. Analysis and model evaluation of the relationship between clouds and precipitation over eastern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(4):766-777**

**Abstract** To evaluate and improve the correlation between the clouds and the precipitation in the models, the relationships of the horizontal distribution and seasonal variation between the various cloud types and the precipitation over eastern China are analyzed, and the model results simulated by T42 and T106 version of BCC\_AGCM are evaluated respectively by using the ISC-CP cloud data and the merged precipitation data from January 1998 to December 2007. It is found that over eastern China, the winter precipitation demonstrates stratiform features, the cloud belt and rain belt stably maintain near 27°N, and the precipitation is mainly resulted from Nimbostratus and Altostratus. On the other hand, the summer precipitation has both convective and stratiform characteristics. The summer convective cloud belt and rain belt move with the summer monsoon consistently. The convective precipitation is mainly resulted from deep convective clouds and Cirrostratus, with their maximum centers matching well with the precipitation regions, but Cirrostratus occurs in the north side of the main body of the deep convection and precipitation. The summer stratiform precipitation is mainly resulted from Altostratus and Stratocumulus. The model simulations show that BCC\_AGCM has good skills on the cloud climate modeling. It can reproduce the correct location and stability of the winter stratiform clouds and precipitation, and also can reproduce the consistent evolution of the summer rain belt with deep convective cloud belts. Compared with the T42 model version, the summer precipitation and deep convective clouds, as well as their relationship simulated by T106 model are well improved. However, the winter stratiform clouds, precipitation and their relationship are worse.

**Key words** Clouds, Precipitation, Relationship, Model evaluation

**摘要** 为评估和改进模式中不同类型云与降水的对应关系,利用1998—2007年卫星-台站融合降水资料和国际卫星云气候计划的卫星观测云资料,采用诊断方法分析了中国东部季风区冬季层云、夏季对流云、层云与降水的水平分布及季节变化对应关系,并评估了BCC\_AGCM模式的T42和T106分辨率版本对云-降水对应关系的模拟能力。观测资料分析结果表明,中国东部冬季云带和雨带都稳定少动,降水主要来自雨层云和高层云,南部沿海层云和层积云也对降水有贡献;夏季,中国东部表现为层积混合云降水特征,对流云带与降水带具有较好的对应关系,并具有一致的移动特征。对流降水主要来自深对流云和卷层云,深对流云云量和降水中心完全吻合,卷层云云带则表现出比深对流云主体和降水带偏北的现象;层云降水主要来自高层云和层积云。模式评估结果表明,中、低分辨率版本的BCC\_AGCM模式均模拟出了冬季层云和稳定少动的降水带、夏季深对流云、卷层云和降水带的对应关系及随季风推进的移动特征。与T42模式版本相比,T106模式版本在夏季对流云云量的模拟及其与降水带的对应关系方面有所改善,说明改进的BCC\_AGCM积云对流参数化方案与高分辨率模式网格更匹

\* 资助课题:财政部/科技部公益类气象行业专项(201306068)、国家自然科学基金(41475069)、国家留学基金。

作者简介:李昀英,主要从事云气候学与云动力学研究。E-mail: liyunying2005@163.com

通讯作者:寇雄伟,主要从事气候学研究。E-mail: xiongwei1908@126.com

配,但冬季层云云量模拟误差变大,与降水带的对应关系变差,其原因值得进一步分析研究。

**关键词** 云, 降水, 对应关系, 模式评估

**中图法分类号** P426.5<sup>+2</sup> P426.61<sup>+4</sup>

## 1 引言

中国东部(20°—45°N, 103°—120°E)地处亚洲季风区,汛期雨带随季风活动而北进南退是典型的气候特征(Ding, 1994)。气候模式能否成功模拟中国东部雨带的季节性进退是判断模式是否有能力模拟东亚气候的重要标志(Zhou, et al, 2009),因此,对中国东部降水的研究和模拟是东亚气候研究的热点问题。引发降水的机制多而复杂,但降水归根结底是由云产生的,云的类型及云含水量影响着降水的强弱和多寡。国际卫星云气候学计划(The International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP)按照云顶高度和光学厚度将云分为9类(表1)(Rossow, et al, 1999)。这9类云的名称与地面人工观测一致,在中国地区部分云类的分布也与人工观测云的气候学分布具有一定的对应关系(Li, et al, 2004)。但因为定义的不同,有些云类如层云、高层云等与地面观测的分布有较大差异。中国东部冷季及暖季的降水主要由哪类云产生的,不同类型云与降水在分布与季节演变上有怎样的对应关系,

模式能否正确模拟这种对应关系等,相关的研究尚少。Luo等(2013)对比研究了东亚季风区中国南部和长江、淮河流域季风爆发前后、季风活跃期和非活跃期的降水特征和对流性质,揭示了强对流特性的地域差异。Tang等(2006)利用6a的MODIS资料研究发现,夏季东亚季风区有云时高云(卷云、卷层云和深对流云)的比例达38.5%。Chen等(2005)用4a的MODIS资料研究发现,亚洲季风区卷云带与季风降水带具有一致的移动特征。胡亮等(2011)利用热带测雨卫星(TRMM)反演降水资料研究了东亚季风区夏季层云降水与对流云降水的比例关系,发现东亚季风爆发后,层云降水和对流云降水均显著增加,中国南海地区对流云降水量占总降水量的比例超过40%,华南、江淮等地区也达30%,东亚季风区层积混合降水特征显著,但模式模拟不出这个特征。本研究拟通过对比分析气候平均状态下卫星观测与气候模式中云与降水的对应关系,提高对中国东部季风区冷季与暖季云和降水相关关系的认识,评估模式降水和云模拟的误差,为改进气候模式对东亚季风区降水模拟效果提供思路。

表1 ISCCP云分类  
Table 1 The ISCCP cloud classification

| 云顶气压 (hPa) | 光学厚度    |         |          |
|------------|---------|---------|----------|
|            | <3.6    | 3.6—23  | >23      |
| <440       | 卷云(Ci)  | 卷层云(Cs) | 深对流云(DC) |
| 680—440    | 高积云(Ac) | 高层云(As) | 雨层云(Ns)  |
| >680       | 积云(Cu)  | 层积云(Sc) | 层云(St)   |

云-降水及其对应关系的模拟效果是否随模式水平分辨率的提高而改善也是值得关注的。一些工作致力于改进模式的物理过程参数化方案,也有一些学者认为在模式分辨率较低时,提高模式分辨率是改进降水模拟效果的首要途径,中国国家气候中心(BCC, Beijing Climate Center)模式便是如此。参加CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project,)(Taylor, et al, 2012)的BCC\_AGCM大气模式分量(Beijing Climate Center Atmospheric General Circulation Model)(Wu, et al, 2010)是在CAM3(Community Atmospheric Model)(Collins,

et al, 2006)的基础上建立的,模式发展团队完成了模式框架和系列物理过程的改进(Wu, et al, 2008),包括对积云对流参数化方案的改进(Wu, 2012)。BCC\_AGCM自建立以来,分辨率不断提高,目前水平分辨率已经从T42(约 $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$ )提高至T106(约 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ )(Wang, et al, 2014),进一步提高至T266(约 $0.45^\circ \times 0.45^\circ$ )的工作也正在进行中。不同分辨率模式版本采用完全相同的物理过程,垂直层数均为26层。在中国国家气候中心模式发展过程中,不断有学者对其模拟的云及其辐射强迫进行评估(郭准等, 2011; 张祎

等, 2012; Wang, et al, 2014), 并和其他模式进行比较(吴春强等, 2011), 以期进一步改进。文中拟通过对 BCC\_AGCM 模式的 T42 和 T106 版本, 评估不同分辨率模式模拟的中国东部云与降水的对应关系, 考查全球气候模式水平分辨率与降水模拟效果的联系。

## 2 观测与模式资料简介

采用 ISCCP D1 (<http://isccp.giss.nasa.gov>) 多卫星融合资料进行云分析。该资料时段为 1983 年 7 月—2007 年 12 月, 为与降水资料匹配, 分析时截取了 1998 年 1 月—2007 年 12 月的月平均资料。资料水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ , 与 BCC\_AGCM 的 T42 模式版本水平分辨率相近。ISCCP 按云顶高度和光学厚度将云分为 9 类(表 1), 高云被分为卷云(Ci)卷层云(Cs)和深对流云(DC), 中云包括高积云(Ac)高层云(As)和雨层云(Ns), 低云包括积云(Cu)、层积云(Sc)和层云(St), 分析时采用 9 类云的分云量资料。

观测降水资料采用中国国家气象信息中心融合了卫星与地面台站观测资料的 ( $EQ-60^{\circ}N, 60^{\circ}-160^{\circ}E$ ) 范围的逐日降水资料, 分析时降尺度至月平均。该降水资料在海洋上主要以 CMORPH (CPR MORPHing technique) 卫星反演资料 (Joyce, et al, 2004) 为主, 误差相对较大, 中国陆地上融合了台站观测降水资料, 有效减小了误差 (潘旻等, 2012), 但此处理方法造成了海陆交界处降水的明显不连续 (图 3a), 该问题目前正在解决中, 但资料在中国内陆的准确性已经得到检验和验证 (沈艳等, 2013; Shen, et al, 2014)。降水资料分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。资料本身年限为 1998 年 1 月—2012 年 12 月, 为与 ISCCP 云资料年限匹配, 分析时截取了 1998 年 1 月—2007 年 12 月的资料。

云和降水模拟资料由中国国家气候中心提供, 来自于参加 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 的 BCC\_AGCM 大气模式分量 T42 和 T106 版本的 AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) (Gates, et al, 1998) 试验结果, 分析时截取了 1998 年 1 月—2007 年 12 月 9 类云的云量和降水月平均资料。

BCC\_AGCM 模式中云量的计算分 3 部分。边界层低云量用大气中低层稳定度诊断获得; 对流云

量(浅对流和深对流云量之和)由积云对流参数化方案中浅对流和深对流向质量通量计算得到 (Xu, et al, 1991); 大尺度网格云量用相对湿度诊断获得 (Slingo, 1987), 总云量取三者的最大值。因模式对云量的定义与卫星观测的定义不同, 为与 ISCCP 不同类型的云量进行比较, 模式的云变量输出经过了 CFMIP (Cloud Feedback Model Intercomparison Project) 发展的云模拟器 COSP (CFMIP Observation Simulator Package) (Bodas-Salcedo, et al, 2011) 的转换。COSP 集成了 ISCCP、CloudSat/CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)、MODIS 等多种云模拟器, 旨在将模式输出的云量转化为与卫星观测定义一致的云量, 方便模式与卫星观测资料的比较, 其简介和程序可参考网站 <http://cfmip.metoffice.com/COSP.html>。为与 ISCCP 观测结果进行比较, 文中采用了 COSP 的 ISCCP 云模拟器的输出结果。经 ISCCP 云模拟器转换后的模式云类和云量与 ISCCP 的 9 类云的定义一致, 因此可逐类对应比较。卫星观测时高云可能遮挡中低云, 卫星观测的中云量和低云量均比地面观测值小 (Li, et al, 2004), 转换后的模式云量也具有该特征, 因此, 比较模式模拟与卫星观测的 9 类云的云量绝对值是可行和有意义的。

分析用到的大气环流和湿度资料来自美国国家环境预测中心 (NCEP) 相应年份的月平均再分析资料, 水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

## 3 云与降水的对应关系

### 3.1 不同类型云的水平分布

中国地区不同类型云出现频率和伴随的降水概率是不同的。从地面观测不同类型云单独出现的统计结果来看, 层积云在中国出现的频率最高, 部分台站可达 30%, 其次是雨层云、高积云和积云, 其他云类单独出现的频率较低, 部分类型的云也可相伴出现。从云单独出现时伴随的降水概率看, 以南京站为例, 雨层云伴随的降水概率最大, 可达 68%, 其次是积雨云 (50%)、层积云 (24%) 和层云 (10%) (李昉英等, 2014)。

因 ISCCP 对云类的定义与地面观测的定义方式不同, 所以, 有些云类的分布与地面观测有一定的对应关系, 如卷云、深对流云、高积云等; 也有一些完

全不同,如层云、高层云;ISCCP 定义的雨层云对应于地面观测的雨层云和比较深厚的层积云。分析不同季节云与降水分布的对应关系,发现中国冬季(12、1、2月)主要表现为层云降水,降水主要来源于地面观测的雨层云和层积云,从分布看可对应于ISCCP 定义的雨层云、高层云、层积云和层云

(图1);夏季(6—8月)降水表现为对流和层云混合降水的特征,降水主要来源于地面观测的浓积云、积雨云、雨层云、层积云和层云/碎层云,从分布看可对应于ISCCP 定义的深对流云、卷层云、雨层云、高层云和层积云(图2)。

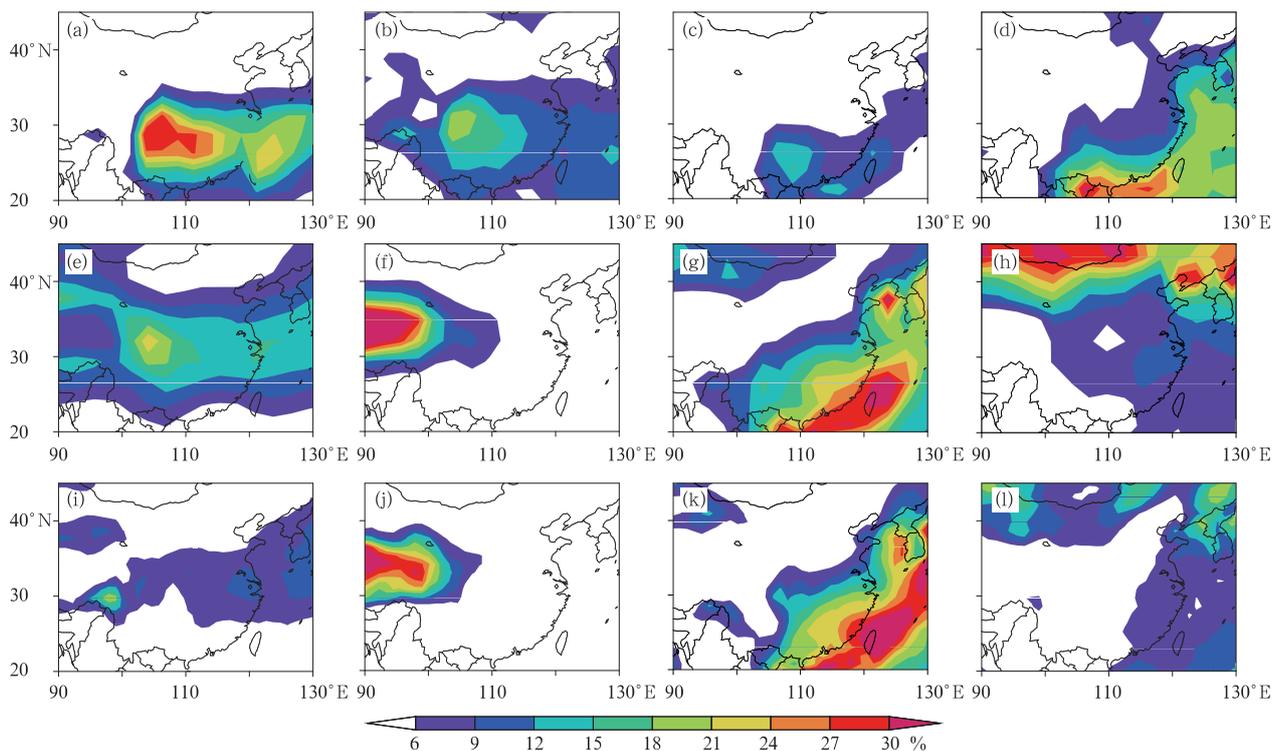


图1 冬季平均观测(a—d)及BCC\_AGCM T42(e—h)、T106(i—l)模拟的雨层云(a、e、i)、高层云(b、f、j)、层云(c、g、k)、层积云(d、h、l)云量

Fig.1 Horizontal distribution of mean cloud fraction of Ns (a, e, i), As (b, f, j), St (c, g, k), and Sc (d, h, l) in DJF derived from the observation (a—d), BCC\_AGCM T42 (e—h) and T106 (i—l) model

中国东部冬季可产生降水的云在ISCCP 云类中主要是雨层云、高层云、层云和层积云,其平均水平分布见图1a—d。其中,雨层云云量(图1a)最大,云量中心主要分布在青藏高原以东的四川地区,并向东部和海上延伸,在陆地和海洋上各有一个大值中心,最大云量超过30%。高层云的分布型(图1b)与雨层云相似,极值中心云量可达18%,陆地上的云量中心比较明显,海洋上较弱。雨层云和高层云同属于中云,差别在于雨层云的光学厚度较高层云大,说明该地区云发生时云顶高度变化不大,但厚度或微物理特性(比如云水含量或粒子半径)有一定变化。关于雨层云和高层云的形成原因,相关研究已较多,主要结论是青藏高原地形强迫造成的绕流辐

合上升运动和稳定的大气层结提供了有利的成云环境(Yu, et al,2001;Li, et al, 2006),云顶被限制在约600 hPa 的逆温层下(Li, et al, 2012)。层云(图1c)主要分布在中国南方广东、广西地区,中心值云量达12%;层积云的出现(图1d)位置更偏南,主要分布在海洋上。BCC\_AGCM 模式 T42 版本模拟出了冬季雨层云的基本分布特征(图1e),陆地中心位置与观测一致,云量较观测小,但 T106 版本(图1i)完全没有模拟出雨层云正确的云量中心。两个模式版本模拟的高层云分布型相似(图1f、j),云量中心位于青藏高原,但与观测不一致。模拟的层云分布(图1g、k)与观测的层积云分布更相似,说明模式高估了云的光学厚度。模拟的层积云(图1h、

l)则完全与观测不符。

中国东部夏季可产生降水的云在 ISCCP 云类中主要是深对流云、卷层云、高层云、雨层云和层积云(图 2a—e)。夏季深对流云(图 2a)分布比较广泛,中国东部云量可达 15%。卷层云(图 2b)主体位于青藏高原,但在中国东部云量分布与深对流云相似,云量值可达 15%。部分卷层云属于深对流云的云砧,但光学厚度较深对流云小。高层云(图 2c)在中国东部云量也可达 15%,分布型与卷层云相似,只是云顶高度不同。雨层云(图 2d)和层积云(图 2e)主要分布在中国东部,但云量较小。BCC\_AGCM 模拟的不同类型云的分布不能与观测完全

对应,但可发现模式模拟的深对流云(图 2f,k)与观测的卷层云的分布型类似,模拟的雨层云(图 2i,n)与观测的高层云和卷层云分布型类似,说明模式高估了云的光学厚度,低估了云顶的高度,导致了模式云分类与观测的差异。模式模拟的卷层云(图 2g,l)、高层云(图 2h,m)和层积云分布(图 2j,o)与观测差异较大,在观测中无相似的云分布型。T106 模拟的所有云类的云量分布型与 T42 类似,增大了卷层云量(图 2l),纠正了 T42 深对流云、雨层云和层积云量中心过于偏北的现象,但对中国东部深对流云、雨层云和层积云的模拟量都较 T42 减少,在量值上与观测更接近。

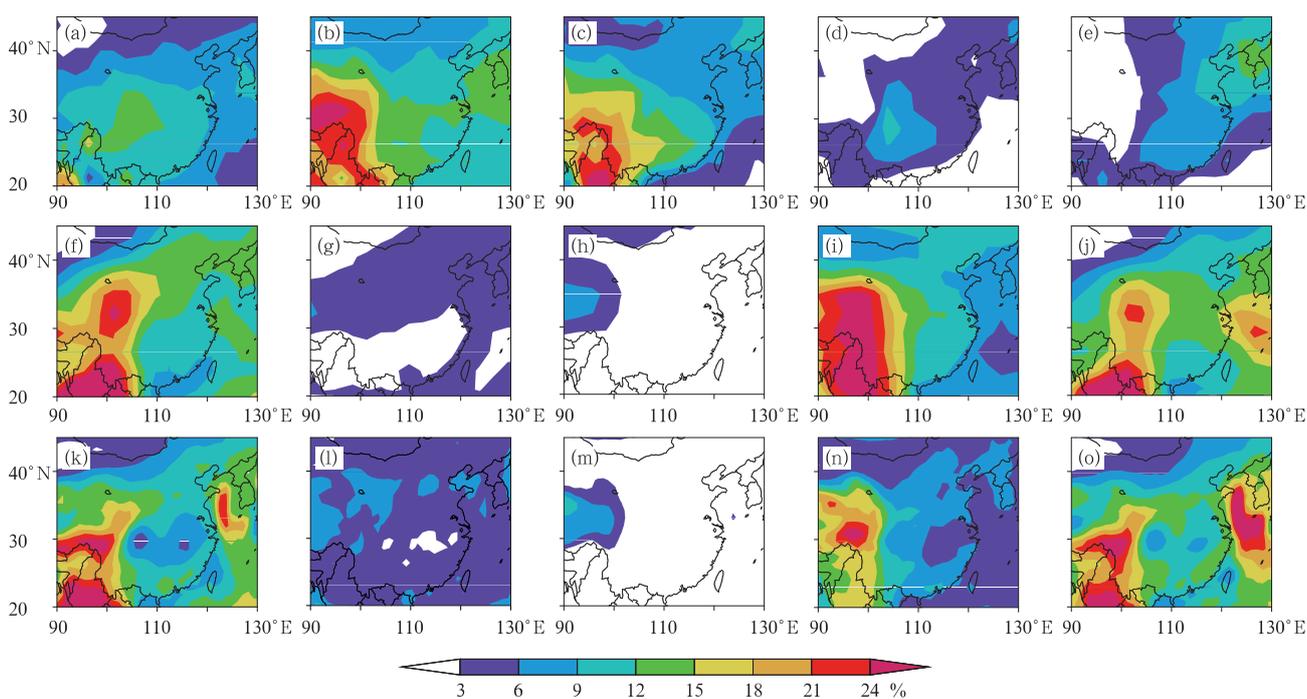


图 2 夏季平均观测(a—e)及 BCC\_AGCM T42(f—j)、T106(k—o)模拟的深对流云(a、f、k)、卷层云(b、g、l)、高层云(c、h、m)、雨层云(d、i、n)、层积云(e、j、o)云量

Fig. 2 Horizontal distribution of mean cloud fraction of DC (a, f, k), Cs (b, g, l), As (c, h, m), Ns (d, i, n), and Sc (e, j, o) in JJA derived from the observation (a—e), BCC\_AGCM T42 (f—j) and T106 (k—o) model

观测资料中,中国东部夏季层云量小于 2%,但模式模拟出的层云量达 12%,其水平分布与观测的层积云类似,说明模式易高估云的光学厚度。观测积云量虽可达 10%,但伴随的降水概率很小。卷云基本上不产生降水,所以不对这几类云做分析。

### 3.2 云-降水水平分布的对应关系分析

从冬季层云的水平分布来看,雨层云和高层云主要对中国东部的降水贡献较大,中国南部沿海的

降水云类更加丰富,还包括层云和层积云。但层积云量中心主要分布于中国南海,对中国陆地降水的贡献略小,因此,下文将雨层云、高层云和层云 3 种云类合成,分析其与降水的对应关系。

观测资料中冬季云量大值中心和降水中心并不完全对应(图 3a)。海洋上的云-降水中心对应较好,陆地上降水量中心位于东部沿海,云量中心则位于青藏高原背风坡的四川、重庆地区。从地面观测记

录看,即使同一云类,在不同地区产生降水的效率也不同。冬季四川地区云覆盖频率很高,云量很大,但记录的降水量一般不大;相反东部地区云覆盖频率相对较小,平均云量较小,但记录的降水量较大,说明云产生降水的效率很高,这可能与大气的稳定性和云的微物理特性有关。青藏高原背风坡大气稳定性强,空气被整层抬升成云,垂直速度较小(Yu, et al, 2004; Zhang, et al, 2013),云的发展被抑制在约 600 hPa 的逆温层下(Li, et al, 2012)。中国东部大气稳定性相对较弱,产生云时垂直运动较强,云发展的高度也相对较高,中云的云顶高度从青藏高

原背风坡至中国东部地区逐步抬升(Li, et al, 2005)。但是,模式模拟的云量中心和降水中心的对应关系较好,T42 模拟出的青藏高原背风坡和海洋上的云量中心各对应一个降水中心(图 3b),T106 亦如此(图 3c)。但与 T42 相比,T106 模拟的陆地云量和降水中心均位于青藏高原上,降水带和云带在中国东部均出现了断裂,与观测的差别更大。中国国家气候中心气候模式中的云量是根据大气稳定性和相对湿度诊断得出的,与云水含量无直接关联,可能未能精确反映实际大气中云的性质及其与降水量的关系。

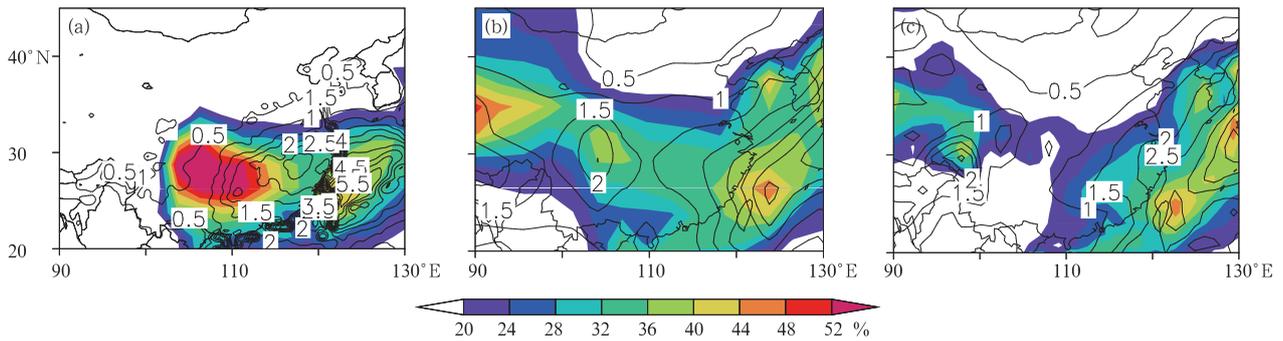


图3 观测(a)及 BCC\_AGCM T42(b)、T106(c)模拟的中国东部冬季平均降水量(mm/d,等值线)与层状云(Ns+As+St)云量(阴影)的分布

Fig. 3 Horizontal distribution of precipitation (mm/d, contour) and stratiform cloud fraction (Ns + As + St, shaded) averaged over DJF derived from the observation (a), BCC\_AGCM T42(b) and T106 (c) model

观测资料中夏季云和降水的对应关系较为复杂,各类云都可能出现,降水带的移动特征也很明显,很难将降水中心与某类云量中心完全对应,下文分别对对流云与层云进行合成分析。虽然卷层云和高层云同属层云,其水平分布型也类似,但季节变化完全不同(图 5a 和 7d),且部分卷层云可能是深对流的云砧,与深对流的季节变化类似,因此,将卷层云与深对流云合成进行分析。从观测结果来看,青藏高原上对流云降水比较显著,对流云云量中心与降水中心有很好的对应关系;中国东部对流云降水和层云降水都比较显著,层云量(图 4d)比对流云量(图 4a)平均多 5%左右。对流云降水主要由深对流云和卷层云产生,而夏季层云状降水主要由高层云、雨层云和层积云产生(图 2)。T42 模拟的中国东部降水型与观测有一定差异,降水主体位置偏北,中国东部降水显著偏少,层云云量(图 4e)比对流云云量(图 4b)显著偏多。T106 模拟的降水量

分布型与 T42 基本一致,但青藏高原上偏北的深对流云云量中心得到纠正。中国东部层云云量(图 4f)与对流云云量值(图 4c)接近,二者比 T42 模拟的更接近观测。

### 3.3 云带与降水带的季节演变特征

#### 3.3.1 雨带的季节演变

从 110°—120°E 平均降水带的纬度-时间分布(图 5a 等值线)可以看出,沿纬度方向的降水可明显划分为 3 个区域:22°N 以南的低纬度海洋降水区,22°—43°N 的东亚季风降水区及 43°N 以北的北方陆地降水区,只有东亚季风雨带具有显著的季节性进退特征。中国东部冬季亦维持一定的降水量,与中国北方地区冬季降水极少、热带地区冬夏降水无显著差异的特点有很大不同。10 月至次年 4 月东亚季风区雨带维持在 23°—30°N,稳定少动,降水量 3 月可达 4 mm/d。5 月夏季风爆发后,雨带由华南缓慢向北推进,推进过程中在 23°、27°及 33°N 分别

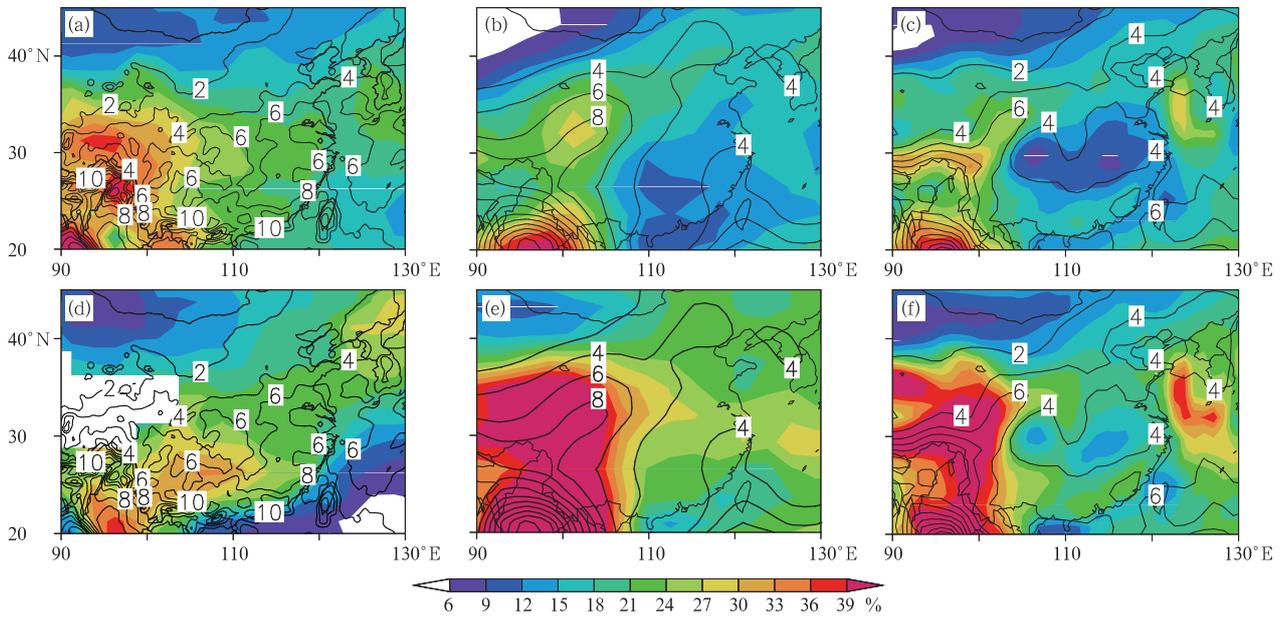


图4 观测(a,d)及BCC-AGCM T42(b,e)、T106(c,f)模拟的中国东部夏季平均降水强度(mm/d,等值线)与深对流云和卷层云之和(a—c)、层云(Ns+As+Sc)(d—f)(阴影)的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of precipitation (mm/d, contour) and cloud fraction (shaded) of DC+Cs (a—c), Ns+As+Sc (d—f) averaged over JJA derived from the observation(a,d), BCC-AGCM T42 (b,e) and T106 model (c,f)

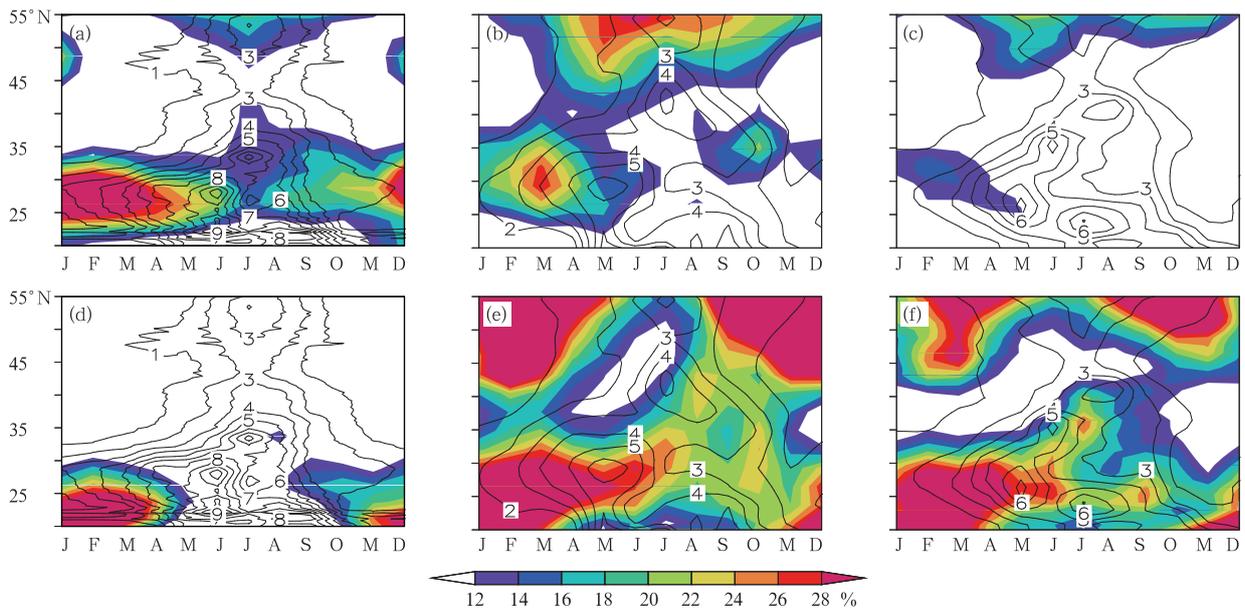


图5 观测(a,d)及BCC-AGCM T42(b,e)、T106(c,f)模拟的110°—120°E平均降水强度(mm/d,等值线)与雨层云和高层云之和(a—c)、层云和层积云之和(d—f)云量(阴影)的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of the precipitation (mm/d, contour) and cloud fraction (shaded) of Ns+As (a—c), St+Sc (d—f) averaged over 110°—120°E derived from the observation (a,d), BCC-AGCM T42 (b,e) and T106 (c,f) model

出现3个降水中心,对应着雨带两次明显的北跳。汛期最大降水强度可达10 mm/d,出现在6月江浙

地区。8月季风雨带达到最北缘43°N左右,8月中旬后雨带迅速南撤,9月撤回到华南。

对比观测降水的分布发现,BCC\_AGCM T42(图 5b 等值线)和 T106 模式(图 5c 等值线)均成功模拟出了降水带随季风推进的基本特征。冬、春季降水的稳定少动特征与观测一致,降水带位置也与观测接近。汛期季风雨带的北进南撤特征也很明显,但降水量比观测显著偏小。T42 模拟出了两个降水中心,33°N 的降水中心未模拟出来,在 42°N 出现了虚假的降水中心,说明季风推进比观测偏北,但雨带南撤速度却过缓。T106 模拟出了 3 个降水中心,虽然位置均比观测偏北,雨带推进较快,但至少反映出了雨带的两次北跳过程,雨带的迅速南撤特征也与观测一致。从汛期雨带北进南撤的过程看,T106 的模拟效果比 T42 有显著改善。

### 3.3.2 层云与雨带季节演变的匹配关系

中国东部地区冬春季覆盖着深厚的层云,造成了该地区显著的短波云辐射强迫(Yu, et al, 2001)。由于云对太阳短波辐射的强烈反射作用,中国东部与同纬度世界其他地区相比,冬春季温度显著偏低(Li, et al, 2004)。在季节变化上雨层云和高层云出现的纬度(图 5a 阴影)与冷季降水位置(图 5a 等值线)非常吻合,云的位置以 27°N 为中心稳定少动,月平均云量超过 40%,云量极大值出现在 3 月。层云和层积云(图 5d 阴影)出现位置比雨层云和高层云偏南约 5 个纬度,但云量中心区降水量却不太大。统计可知,雨层云和高层云是典型的层云,出现时常伴随连续性降水,因此,可以推断中国东部冷季较大的降水量主要是雨层云和高层云产生的,层云和层积云对中国南部沿海地区降水也有一定的贡献。

中国东部夏季降水量比冬季显著增大,但层云云量却比冬季显著减少,无论是雨层云和高层云云量,还是层云和层积云云量,都没有表现出与夏季降水中心的对应关系。

BCC\_AGCM 模拟出了中国东部云与降水的基本对应关系,T42 模拟的雨层云和高层云云量(图 5b 阴影)与观测相比,虽然中国南部云量整体偏小,但极大值也出现在 3 月,位置比观测略偏北。10 月模式模拟出了虚假的云量中心,这与模式模拟出的 10 月相对湿度的大值中心是一致的(图略)。T106 模拟的雨层云和高层云云量的基本分布特征与 T42 一致,但云量比 T42 显著偏少(图 5c 阴影),说明模式分辨率提高后中国东部雨层云和高层云的模拟效果反而变差。两个模式版本模拟的层云和层积云(图 5e、f)均比观测略偏北,北方的冬季和南方的夏季云量比观测显著偏大,夏季云量中心和降水中心虽然不重合,但云带也具有与降水带类似的移动特征。

观测资料中夏季层云中心与降水中心无明显的对应关系,模式模拟的结果也如此,但模拟的层云和层积云量比观测明显偏大,雨层云和高层云云量比观测偏小,T106 对雨层云和高层云云量的模拟比 T42 偏小更多。

为探寻模式分辨率提高后中国东部雨层云和高层云模拟误差增大的原因,以 700 hPa 为例,分析了冬季(以 1 月为代表)青藏高原东部的相对湿度场和散度场(图 6a),发现观测资料中相对湿度的大值带分布在青藏高原下游北侧的辐合区和南侧的辐散区

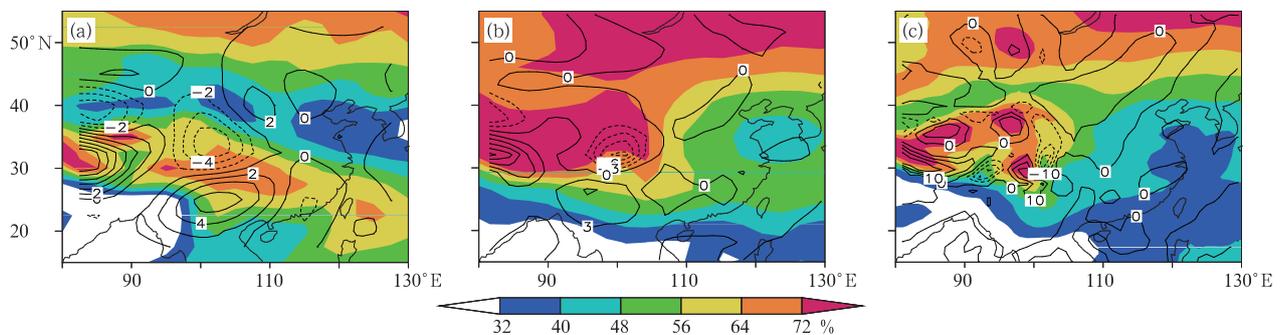


图 6 观测(a)及 BCC\_AGCM T42(b)、T106(c)模拟的 1 月 700 hPa 相对湿度(阴影)

和散度(等值线,  $\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , 实线正值代表辐散, 虚线负值代表辐合)的分布

Fig. 6 Relative humidity (shaded) and divergence (contour,  $\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , solid lines denote positive values and divergence, dashed lines denote negative values and convergence) at 700 hPa in January from the observation (a), BCC\_AGCM T42 (b) and T106 (c) model

之间,一直延伸至长江中下游地区,该地区正是层状云云量的大值地带。T42 模式模拟出了散度的基本分布特征,1 月中国东部的相对湿度大值带走向与观测一致,但数值偏小(图 6b)。相对湿度的大值区位于青藏高原东部和中国北方,导致青藏高原东部至淮河以北地区相应出现云量大值带(图 4b)。T106 模式无论对相对湿度还是散度的模拟都与观测相差甚远(图 6c)。与 T42 相比,T106 没能很好地体现高大地形造成的对流层中低层西风绕流青藏高原现象,没能模拟出青藏高原下游南部辐散北部辐合的基本环流特征。中国东部散度和环流模拟偏差应该是分辨率提高后模式对高大地形效应处理不当造成的,相对湿度的模拟偏差则还可能来源于物理过程参数化方案的偏差,对应着增大的云量模拟误差。该结论说明分辨率的提高必须配合物理过程的改进,否则可能导致模拟效果变差。

### 3.3.3 对流云与雨带季节演变的匹配关系

与冷季降水带相比,中国东部地区暖季降水带具有显著的移动特征,深对流云和卷层云的季节变化与降水演变特征具有高度的一致性(图 7a),云量中心和 6 月 27°N 及 7 月 33°N 的两个降水中心完全

吻合,9% 的云量等值线与 5 mm/d 的等雨量线走向几乎一致,由此说明中国东部夏季深对流云对降水量的贡献较大。地面台站逐时云观测资料的统计结果也表明,中国东部夏季积雨云发生的最大频率可达 20%,积雨云单独出现时伴随降水的概率可达 50%(李昉英等,2014),降水的类型多为阵性降水。当积雨云发展到成熟阶段,其云砧可以发展成卷层云,因此卷层云的季节演变也与降水带的移动有一定的对应关系(图 7d),但这种对应关系不如深对流云显著。观测中深对流云带比降水带略偏北,卷层云带比降水带偏北更明显。

BCC\_AGCM 的两个版本都模拟出了暖季深对流云带与降水带的对应关系特征,深对流云云量的大小也与观测较接近(图 7b、c),T106 模拟的深对流云量中心与降水中心吻合得更好。T42 模拟的卷层云云量(图 7e)比观测偏小 10% 左右,T106 模拟(图 7f)略有改善。分析发现 T106 在对流云及对流降水的模拟方面比 T42 有一定优势,可能说明模式的积云对流参数化方案与高分辨率的水平网格更匹配。

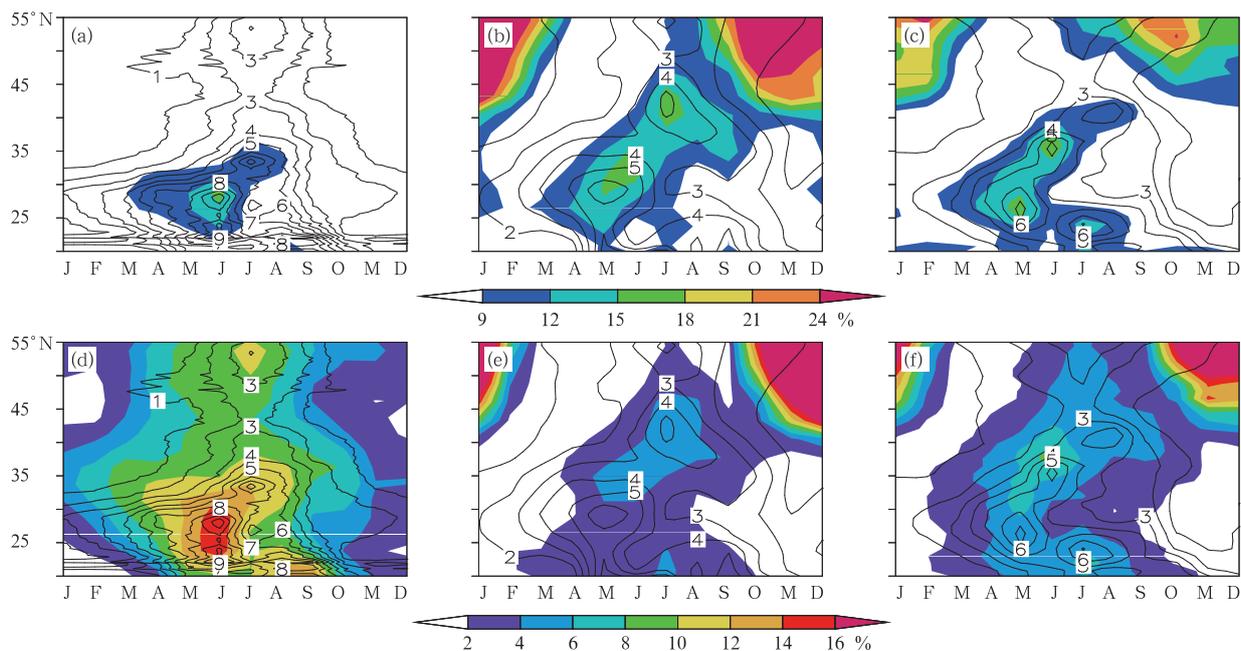


图 7 观测(a、d)及 BCC\_AGCM T42(b、e)、T106(c、f)模拟的 110°—120°E 平均降水强度(mm/d,等值线)与深对流云(a—c)、卷层云(d—f)云量(阴影)的季节变化

Fig. 7 Seasonal variation of the precipitation (mm/d, contour) and cloud fraction (shaded) of DC (a—c), and Cs (d—f) averaged over 110°—120°E from the observation (a,d), BCC\_AGCM T42 (b,e) and T106 (c,f) model

两个模式版本都在冷季对中国东部卷层云云量模拟偏小,对北方深对流云和卷层云模拟偏多,与T42相比,T106对深对流云和卷层云的模拟效果在南、北方都有改善。

图8为1998—2007年逐年7月长江中下游地区(25°—30°N,110°—117°E)观测和两个模式版本模拟的深对流云云量及雨层云、高层云、层积云云量之和与降水量的年际变化。观测的降水量年际变化(图8a实线)和深对流云云量(图8a点线)的变化高度相关,雨层云、高层云、层积云云量之和(图8a断线)的年际变化也是基本一致的,说明长江中下游地

区降水增多时对流云和层云是一致增加的,二者对降水都有贡献。两个版本模式模拟的降水量年际变化和观测不一致,但都和深对流云云量的变化高度相关,雨层云、高层云、层积云云量之和的变化相关性较差,尤其是T106版本(图8c)比T42版本(图8b)的相关性更差,部分年份降水量和层云云量甚至成反相变化。该结论说明T42版本在一定程度上模拟出了中国东部夏季降水的层积混合特征,但T106模拟的对流云降水特征较显著,层云降水特征却不如T42显著。

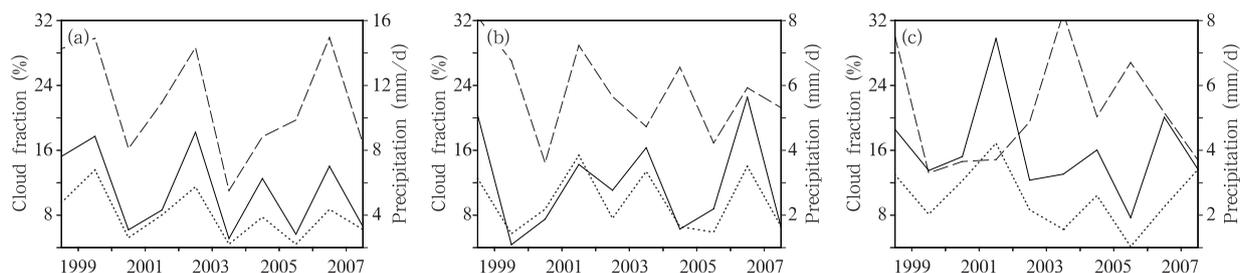


图8 观测(a)及BCC\_AGCM T42(b)、T106(c)模拟的逐年7月(25°—30°N,110°—117°E)区域平均降水量(实线),深对流云(点线)及雨层云、高层云、层积云之和(断线)的年际变化

Fig. 8 Precipitation (solid line), cloud fraction of DC (dotted line) and Ns + As + Sc (dashed line) averaged over the (25° - 30°N, 110° - 117°E) region in every July derived from the observation (a), BCC\_AGCM T42 (b) and T106 (c) model

#### 4 结论与讨论

中国东部冬季表现为层云降水特征,降水与雨层云、高层云的对应关系较好,云带与降水带维持在27°N附近,稳定少动;南部沿海可产生降水的云类相对丰富,层云和层积云对降水量都有贡献。夏季降水表现为层积混合云降水特征,对流云带和降水带随季风移动一致推进,对流云云量和降水量的年际变化高度相关;层云的移动特征不显著,但对降水量也有一定的贡献,云量与降水量在年际尺度上也具有同位相变化特征。

BCC\_AGCM模式模拟出了中国东部云、降水的基本分布和季节变化特征,较好地反映了冬季雨层云和高层云、夏季深对流云、卷层云和降水的对应关系,说明模式对中国东部云、降水气候特征具有一定的模拟能力,模式中云相关的物理过程参数化方案是基本合理的。但是,模式模拟的降水中心偏移到了青藏高原和海洋上,中国东部陆地降水量显

著偏小,相应地云量中心也发生了偏移。模式高估了云的光学厚度,低估了云顶高度,导致部分云类的分布与观测不一致。模式云量是通过相对湿度、水汽含量等大尺度变量诊断获得的,云量与降水量中心对应较好,但实际观测中降水量的大小不仅与云量多少有关,还与云的微物理特性有关,BCC\_AGCM模式中云-降水相互转化的物理过程可能不能真实再现冬季四川盆地云量(相对湿度)很大但降水量不大的特征。

BCC\_AGCM两个模式版本模拟的降水和云分布型基本一致。模式分辨率从T42提高至T106后,夏季降水、对流云模拟误差减小,二者的对应关系也更好,说明改进后的积云对流参数化方案(Wu, 2012)与高分辨率模式网格更匹配,这与Wang等(2014)的结论具有一致性。但冬季层云分布模拟误差变大,季节变化和年际变化的误差也都增大,分析发现其误差与模拟的环流和湿度误差相关,这与张祎等(2012)的结论一致,说明模式分辨率提高后精

细地形效应的处理、大尺度凝结降水参数化方案等也需相应更新,使之与模式分辨率匹配。

采用的卫星观测云资料和卫星-台站融合降水资料的分辨率相差 10 倍,且来源完全不同,但夏季对流云量中心和相应的降水中心却能很好地对应。这一方面证明了两类观测资料的可靠性,另一方面也说明中国东部季风区夏季云与降水基本对应关系对资料分辨率的弱敏感性。但该结论是在现有资料分辨率的基础上获得的,是否具有普适性,还需进一步验证。另外,卷层云带比深对流云带和降水带偏北的现象也值得进一步研究。

致谢:中国国家气候中心辛晓歌博士提供了 BCC\_AGCM 模拟资料。

## 参考文献

- 郭准, 吴春强, 周天军等. 2011. LASG/IAP 和 BCC 大气环流模式模拟的云辐射强迫之比较. 大气科学, 35(4): 739-752. Guo Z, Wu C Q, Zhou T J, et al. 2011. A comparison of cloud radiative forcings simulated by LASG/IAP and BCC atmospheric general circulation models. Chinese J Atmos Sci, 35(4): 739-752 (in Chinese)
- 胡亮, 李耀东, 杨松等. 2011. 东亚热带与副热带季风区对流降水和层云降水季节变化特征对比分析研究. 中国科学: 地球科学, 41(8): 1182-1191. Hu L, Li Y D, Yang S, et al. 2011. Seasonal variability in tropical and subtropical convective and stratiform precipitation of the East Asian monsoon. Sci China Earth Sci, 54(10): 1595-1603
- 李昉英, 方乐铤, 寇雄伟. 2014. 卫星-地基-模式统一的自动观测云分类原则和标准的研究. 地球物理学报, 57(8): 2433-2441. Li Y Y, Fang L X, Kou X W. 2014. Principle and standard of auto-observation cloud classification for satellite, ground measurement and model. Chinese J Geophys, 57(8): 2433-2441 (in Chinese)
- 潘昶, 沈艳, 宇婧婧等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验. 气象学报, 70(6): 1381-1389. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique. Acta Meteor Sinica, 70(6): 1381-1389 (in Chinese)
- 沈艳, 潘昶, 宇婧婧等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估. 大气科学学报, 36(1): 37-46. Shen Y, Pan Y, Yu J J, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China. Trans Atmos Sci, 36(1): 37-46 (in Chinese)
- 吴春强, 周天军. 2011. CFMIP 大气环流模式模拟的东亚云辐射强迫特征. 气象学报, 69(3): 381-399. Wu C Q, Zhou T J. 2011. Characteristics of cloud radiative forcings over East Asia as simulated by the AGCMs in the CFMIP. Acta Meteor Sinica, 69(3): 381-399 (in Chinese)
- 张祎, 王在志, 宇如聪. 2012. BCC\_AGCM2.1 对中国东部地区云辐射特征模拟的偏差分析. 气象学报, 70(6): 1260-1275. Zhang Y, Wang Z Z, Yu R C. 2012. Analysis of the biases in the cloud radiative feature simulations over eastern China as done by the BCC\_AGCM2.1. Acta Meteor Sinica, 70(6): 1260-1275 (in Chinese)
- Bodas-Salcedo A, Webb M J, Bony S, et al. 2011. COSP: Satellite simulation software for model assessment. Bull Amer Meteor Soc, 92(8): 1023-1043
- Chen B D, Liu X D. 2005. Seasonal migration of cirrus clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau measured from MODIS/Terra. Geophys Res Lett, 32(1): L01804, doi: 10.1029/2004GL020868
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2006. The formulation and atmospheric simulation of the community atmosphere model version 3 (CAM3). J Climate, 19(11): 2144-2161
- Ding Y H. 1994. Monsoons over China. Berlin: Kluwer Academic Publishers, 420pp
- Gates W L, Boyle J S, Covey C, et al. 1998. An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). Bull Amer Meteor Soc, 80(1): 29-55
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. J Hydrometeor, 5(3): 487-503
- Li Y Y, Yu Y C, Xu Y P, et al. 2004. Spatial distribution and seasonal variation of cloud over China based on ISCCP data and surface observations. J Meteor Soc Jpn, 82(2): 761-773
- Li Y Y, Yu Y C, Xu Y P, et al. 2005. AREM simulations of cloud features over eastern China in February 2001. Adv Atmos Sci, 22(2): 260-270
- Li Y Y, Gu H. 2006. Relationship between middle stratiform clouds and large scale circulation over eastern China. Geophys Res Lett, 33(9): L09706, doi:10.1029/2005GL025615
- Li Y Y, Yan J P, Sui X B. 2012. Tropospheric temperature inversion over central China. Atmos Res, 116: 105-115
- Luo Y L, Wang H, Zhang R H, et al. 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over south China and the Yangtze and Huai River Basin. J Climate, 26(1): 110-132
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP. Bull Amer Meteor Soc, 80(11): 2261-2287
- Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China. J Geophys Res, 119(6): 3063-3075, doi: 10.1002/2013JD020686
- Slingo J M. 1987. The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model. Quart J Roy Meteor Soc, 113(477): 899-927

- Tang X, Chen B D. 2006. Cloud types associated with the Asian summer monsoons as determined from MODIS/TERRA measurements and a comparison with surface observations. *Geophys Res Lett*, 33(7): L07814, doi: 10.1029/2006 GL026004
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(4): 485-498
- Wang F, Xin X G, Wang Z Z, et al. 2014. Evaluation of cloud vertical structure simulated by recent BCC AGCM versions through comparison with CALIPSO-GOCCP data. *Adv Atmos Sci*, 31(3): 721-733, doi: 10.1007/s00376-013-3099-7
- Wu T W, Yu R C, Zhang F. 2008. A modified dynamic framework for the atmospheric spectral model and its application. *J Atmos Sci*, 65(7): 2235-2253
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. 2010. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate. *Climate Dyn*, 34(1): 123-147
- Wu T W. 2012. A mass-flux cumulus parameterization scheme for large-scale models: Description and test with observations. *Climate Dyn*, 38(3-4): 725-744
- Xu K M, Krueger S K. 1991. Evaluation of cloudiness parameterizations using a cumulus ensemble model. *Mon Wea Rev*, 119(2): 342-367
- Yu R C, Yu Y Q, Zhang M H. 2001. Comparing cloud radiative properties between the eastern China and the Indian monsoon region. *Adv Atmos Sci*, 18(6): 1090-1102
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau. *J Climate*, 17(13): 2702-2713
- Zhang Y, Yu R C, Li J, et al. 2013. Dynamic and thermodynamic relations of distinctive stratus clouds on the lee side of the Tibetan Plateau in the cold season. *J Climate*, 26(21): 8378-8391
- Zhou T J, Wu B, Wang B. 2009. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian-Australian monsoon?. *J Climate*, 22(5): 1159-1173