

向华,张峰,江静,等. 2014. 利用 CFSR 资料分析近 30 年全球云量分布及变化. 气象, 40(5):555-561.

利用 CFSR 资料分析近 30 年全球云量分布及变化^{*}

向 华^{1,2} 张 峰^{3,4,5} 江 静¹ 彭 杰⁶ 张喜亮² 张春艳⁷

- 1 南京大学大气科学学院,南京 210093
- 2 湖州市气象局,湖州 313000
- 3 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,南京 210044
- 4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081
- 5 中国科学院大学,北京 100049
- 6 上海市气象局上海气象科学研究所,上海 200030
- 7 嵊州市气象局,绍兴 312400

提 要：在利用 MODIS 卫星的云产品资料对 CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)再分析资料云产品质量进行检验评估的基础上,采用 CFSR 资料对 1979—2009 年全球总云量及低、中、高云量的平均分布及其随纬度的变化进行了分析;用经验模态分解(EMD)方法分析了近 30 年全球云量的变化趋势,结果表明:(1)全球近 30 年平均总云量约为 59%,全球总云量及低云量、中云量都有明显的纬向分布特征,全球总云量有 3 个峰值带和 3 个低值带。(2)低云量的海陆分布差异较明显,陆地上的低云量明显低于海洋上的,除了两个极圈附近,南半球各纬度的低云量都比北半球相应纬度上的都要多;高云量的高值、低值中心均集中在赤道附近到南、北半球 30°之间的中低纬度,并且低值中心主要分布在大洋的东部。(3)总云量的总变化趋势为增长,具体表现为随时间呈现先略减少后大幅增加趋势,其突变点大致在 1993 年,在 1993 年之后,总云量显著增多。低云量和高云量均呈现增长趋势,中云量则相反,呈减少趋势。低云量增幅最明显,接近 2%,中、高云量则增减幅度较小。

关键词：CFSR, 云量, 全球, 经验模态分解

中图分类号：P426,P468 **文献标志码：**A **doi：**10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.005

Analysis of Global Cloud Amount over the Past
30 Years Based on CFSR Data

XIANG Hua^{1,2} ZHANG Feng^{3,4,5} JIANG Jing¹ PENG Jie⁶ ZHANG Xiliang² ZHANG Chunyan⁷

- 1 Atmospheric Science College, Nanjing University, Nanjing 210093
- 2 Huzhou Meteorological Office of Zhejiang, Huzhou 313000
- 3 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
- 4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
- 5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 6 Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai Meteorological Science Institute, Shanghai 200030
- 7 Shengzhou Meteorological Station of Zhejiang, Shaoxing 312400

Abstract: Based on the verification and evaluation of the quality of CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) cloud amount reanalysis data by satellite remote sensing data MODIS, we analyze the average distribution of global total and low, middle, high cloud amount from 1979 to 2009 as well as the cloud amount variation along the latitude. Also, by using empirical mode decomposition (EMD) method, we analyze the

^{*} 国家自然科学基金项目(41305004)、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2013LASW-B03)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)共同资助
2013 年 3 月 21 日收稿; 2014 年 1 月 17 日收修定稿
第一作者:向华,主要从事气候变化方面的研究. Email:titan-sword@163.com

change trend of each cloud amount in the recent 30 years. The results show that: (1) the global average total cloud amount in recent 30 years is about 59%, the global total and low, middle, high cloud amounts have obvious zonal distribution characteristics, and there are 3 peak value zones and 3 low value zones for the total cloud amount. (2) The difference of land-sea distribution for low cloud amount is obvious and the amount of low cloud over the land is significantly lower than that over the ocean. Except for the two polar regions, the amount of low cloud in the Southern Hemisphere is more than that of the corresponding latitudes in the Northern Hemisphere; the locations of maximum and minimum of high cloud amount are between the mid-low latitudes (30°) of Southern, and Northern Hemispheres respectively. In addition, the low value center mainly distributes in the eastern ocean. (3) The variation of total cloud amount is in an increasing trend, and it is specifically displayed as skyrocketed after a slightly decrease with the time. Its jump point year is around 1993, after which total cloud amount increases significantly. Low and high cloud amounts show a decreasing trend, in contrast, middle cloud amount is decreasing. Low cloud amount increases the most by nearly 2% while the change of high cloud amount is smaller.

Key words: climate forecast system reanalysis (CFSR), cloud amount, global, empirical mode decomposition (EMD)

引 言

气候变化是当前倍受各国政府和科学界关注的重大问题,而云在天气和气候及全球变化中起着十分重要的作用。云能调节地气系统的辐射能量和水分循环的平衡,云特性的任何变化都可能对全球气候造成很大影响,而气候变化反过来又将引起云特性的调整(孙继松,2014)。我们知道,云总是与一定的天气系统联系在一起的,分析卫星云图中云系的移动和变化,有助于我们提高预报天气的能力。正是由于云在地气系统中的重要作用,确定云在全球的分布及变化,对气候监测和气候模式很有必要(Schiffer et al, 1985; Henderson-Sellers, 1992)。长期以来,气象工作者对云量分布气候特征的研究很多,且研究是针对不同区域进行的。这些研究表明:云量虽然都在变化,但不同地区云量的变化趋势存在着差异。例如,20 世纪(大多限定在前 80 年)美国大部分地区云量呈增加趋势;1936—1990 年苏联低云量明显减少(王绍武,2001);1951—1994 年间中国大部分地区白天和夜间总云量减少 1%~2% (徐兴奎,2012;丁守国等,2005),而南极地区在过去 40 年里云量增加很多。

由于目前认知的不足,使得我们无论是对过去气候的模拟还是对未来气候的预测都存在很大的不确定性,其中云是造成误差和不确定的主要来源。如果气候发生变化,那么云也将发生变化,同样与云

相关的各种过程也将随之而变,则这些过程对气候总的影响是加热还是冷却,目前并不清楚(汪宏七等,1994)。例如,由于温室效应,造成地球气候变暖,因而相应的云将发生变化。但是我们并不知道,云的变化结果是抵消这种增温(负反馈)还是使这种增温加剧(正反馈)。我们也不知道,云的这种变化是否会引起降水的增加或减少,以及某些地区水分的供给(孙秀博等,2012)。在气候模拟和预报中,云成了阻碍我们探索气候变化的最大障碍(王帅辉等,2012)。

早期云量等云气候资料主要来源于地面观测,从 20 世纪 60 年代以后才开始有卫星资料,比如国际卫星云气候学计划 (ISCCP) 经过多年的观测建立的云气候资料集。两种资料在探测手段、分辨率以及资料处理方法等方面都存在很大差异。地基观测受局地影响较大,其区域代表性并不是很理想,另外,地基测站在全球的分布不均匀,特别是海洋上的云量资料很少(丁守国等,2004)。而卫星遥感资料因其全球性的探测方式具有探测范围的优势,但由于极轨卫星的观测在时间上是不连续的,可能云量的分布在部分区域也存在着不连续现象,而且按照云顶气压的大小来划分分类,导致某些高海拔地区的低云无法确定,也存在着一定的缺陷。

近年来,数值预报得到大力发展,数值模式通过资料同化技术引进了云相关资料,研究模式中的云相关资料逐渐成为一种趋势(赵天保等,2010;郑晓辉等,2013)。美国环境预报中心(NCEP)在这方面

作了大量工作,虽然在业务上 NCEP 已经对卫星辐射率直接同化实施了多年(张寅等,2012),但直到 2010 年,NCEP 研究的 CFSR 资料才首次将卫星辐射率直接同化进他的全球再分析产品中。通过模式分辨率的提升和同化技术上的改进,CFSR 能够对大气提供更细致且准确的描述。本文利用 NCEP 的 CFSR 资料的全球云气候资料集,给出总云量和不同高度云量多年平均的全球分布,研究近 30 年气候背景下它们的全球分布特征和变化趋势。

1 资料及其评估

1.1 资料和方法

Climate Forecast System Reanalysis(CFSR)是由美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)于 2010 年发布的覆盖全球的高分辨率再分析资料,始于 1979 年。CFSR 所使用的大气模式为 T382L64,水平分辨率约 38 km,相比于其他全球再分析资料,如 NCEP/NCAR、NCEP/DOE、ERA-40、JRA-25,CFSR 的空间分辨率有了很大的提高。CFSR 考虑了大气和海洋的耦合、加入了海-冰模式;考虑了 CO_2 、气溶胶及其他痕量气体在 1979—2009 年间的变化;对 Special Sensor Microwave/Imager(SSM/I)反演的海表风场进行了同化;并使用 Grid-point Statistical Interpolation(GSI)方案对卫星观测辐射率(包括 TOVS、MSU、ATOVS 和 GOES)进行了同化,虽然在业务上 NCEP 已经对卫星辐射率直接同化实施了多年,CFSR 是 NCEP 首次将卫星辐射率直接同化进他的全球再分析产品中。通过这些模式分辨率的提升和同化技术上的改进,CFSR 能够对大气进行更细致且更准确的描述。

本文使用的 CFSR 数据是 1979—2009 年这 31 年的全球月平均数据,其水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点,垂直方向分为 37 层,最高可以达到 1 hPa。本文统计近 30 年全球平均总云量及低、中、高云量空间分布特征和变化特点,并采用经验模态分解(EMD)的方法分析云量变化特征。

1.2 资料质量评估

CFSR 因其更高的空间分辨率及同化新技术的引进,可以大大改善提升再分析资料质量,目前很多

国家和地区都在使用该资料从事相关科学研究,并且已有不少成果出新。但毕竟 2010 年 NCEP 才发布 CFSR,是一套全新的资料,因此在使用该资料前,需要对其质量的可靠性进一步评估(王丹等,2012)。目前通用的云量产品有 MODIS 卫星遥感反演的云量产品,MODIS 全称为中分辨率成像光谱仪,是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的一个重要的传感器,是卫星上唯一将实时观测数据通过 X 波段向全世界直接广播,并可以免费接收数据并无偿使用的星载仪器,全球许多国家和地区都在接收和使用 MODIS 数据(葛伟强等,2010;张春桂等,2008)。本文利用目前较为成熟的 MODIS 资料与 CFSR 资料进行对比分析,来验证 CFSR 的可靠性,不失为一种有效的方法。MODIS 产品始于 2002 年,本文分别选取 2002 和 2009 年平均云量对 CFSR 和 MODIS 资料进行对比分析。从图 1a 和 1b 对比来看,两个资料云量除了在北极、南极两个地区有差异外,全球其他大部分地区的云量分布均大体较为相似。图 1c 和 1d 之间的差异同图 1a 和 1b 之间差异也类似,从单独 1—12 月各月对比来看(图略),也同样存在这种差异,因此这种差异是一种系统性误差,这些差异特征可能跟极轨卫星探测的独特方式有关,经过计算得到 2002 年 CFSR 和 MODIS 全球平均云量分别为 59.6% 和 66.7%,2009 年分别为 60.3% 和 66.5%。从这两年的对比结果来看,MODIS 全球平均的年总云量比 CFSR 要多 6% 左右,正如前面所论述,这种差异是一种系统性误差,因此它并不影响我们利用 CFSR 云产品资料分析云量的相对变化特征。

2 全球总云量及不同高度云量的分布特征

2.1 全球总云量的空间分布特征

通过对 CFSR 资料进行统计得到全球近 30 年平均总云量约为 59%。图 2 是 1979 年 1 月至 2009 年 12 月全球月平均总云量的分布图,从中可以看出,全球总云量有很明显的纬向分布特征:北半球和南半球各有一个非常明显的云量高值区,云量基本均高于 80%,沿纬向呈带状分布,其中,北半球的高值带位于高纬地区($60^\circ \sim 90^\circ \text{N}$),并且向南分别伸展到北太平洋和北大西洋及北美洲东北部,南半球的高值带则位于中纬度地区附近($40^\circ \sim 70^\circ \text{S}$)。其次,

云量高值区还分布在赤道附近的大陆区域和亚洲中部地区(Neff, 1999)。云量低值区则相对较为分散,在赤道中太平洋、北非及中东地区,有两个明显的云量小于30%的低值带,此外非洲南部、澳大利亚附近、北美洲和南美洲中南部,也存在部分的低值区,而在北半球低纬地区的洋面上,还有两条云量在30%~40%的次低值带(段皎等, 2011)。

为了更清晰地显示全球总云量随纬度分布的特征,图3给出了全球总云量及低、中、高云量随纬度的变化特征。如图所示,全球总云量随纬度变化有3个峰值带,分别是北半球的 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$,南半球的 60°S 附近和赤道附近。南北半球的两个峰值带云量在70%~90%之间,而赤道附近的峰值要小很多,只有60%。相对应的是,全球也存在3个总云量的低值带,分别位于 25°N 、 80°S 附近和 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{S}$,最低云量出现在 25°N 附近,仅40%左右。

全球低云量随纬度的变化特征与总云量非常相似,3个峰值带分别位于 60°N 、 60°S 和 5°N 附近,云量值都比总云量相应减少,最高值出现在 60°S 附近,接近70%,在南极地区低云量最少,几乎为零,次低值带位于 10°N 附近,仅15%左右。从曲线形态可以看出,低云量的变化是决定总云量的变化的主要因素。全球中云量和高云量随纬度的变化相对较为平稳,起伏不如低云量明显。与低云量相反,中、高云量在南极地区达到最高值,在 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间,此外,中云量在 60°N 和 60°S 也出现了高值带,高云量在 10°N 附近有一个明显的峰值带。中云量和高云量的低值区域较为接近,均在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{S}$ 和 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 附近,云量值在10%到20%之间。

2.2 全球总云量的季节分布特征

为更好地讨论全球总云量随季节的变化,本文以北半球为准,将3—5月作为春季,6—8月作为夏季,9—11月作为秋季,12月至次年2月作为冬季,取1979年3月至2009年11月CFSR全球总云量资料,计算云量季节的气候平均态特征。

如图4所示,图4a~4d分别为以北半球为准的春、夏、秋、冬四季的平均全球总云量分布图,可以看出,不同季节总云量在中高纬度的变化不太明显,其变化主要集中在赤道附近的低纬地区。当北半球处于秋、冬季时,其总云量比春、夏季少,反之,在南半球,秋、冬季的云量则比春、夏季节多。可以看出,在北非、阿拉伯半岛至西亚附近一带有一个明显的云

量低值区,有明显的季节性南北摆动,这可能与太阳直射地球纬度的南北摆动有关。

2.3 全球低、中、高云量的分布特征

从图5a看出,低云量的总体分布特征与总云量有些相似,也有较明显的纬向分布特征:南半球的低云量高值中心同样位于 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{S}$,都在60%以上,北半球低云量大值区位于 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$,但分布相对较为分散;赤道到低纬地区、南极洲是低云量的低值带。同时,还看出,低云量的海陆分布差异也较为明显:陆地上的低云量明显低于海洋上的,除了在赤道到低纬度的洋面上低云量较少外,其他地区洋面上的低云量相对陆地都要高,亚欧大陆和非洲的大部分地区、澳洲大陆、北美洲南部都是低云量的低值中心。另外,一个明显的特征:除了两个极圈附近,南半球各纬度的低云量都比北半球相应纬度上的要大。

从图5b看出,中云量的分布依然有明显的纬向性,且南、北半球几乎呈对称分布:南、北半球的中云量高值中心同样都位于 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$,云量为30%以上;而在南、北半球 30° 之间,除了亚洲南部、非洲中部、南美洲北部等陆地上云量较多外,是大范围的中云低值带,特别是洋面上出现中云的低值中心,云量小于10%。从云量值来看,中云的云量相对于低云、高云,要少很多。

从图5c看出,高云的云量高值、低值中心均集中在赤道附近到南、北半球 30° 之间的中低纬度。高值中心主要分布在非洲中部、南美洲北部、东南亚群岛及附近海域,云量在50%以上,低值中心则主要分布在大洋的东部。除了南极洲的部分区域云量较高外,中高纬地区大部分高云量都在30%以下。

3 全球总云量及不同高度云量的变化趋势

由于云量变化是一个非线性非平稳过程,伴有多种尺度的振荡,经典的时间序列分析方法显得力不从心(龚志强等, 2005)。近年来,随着信号检测技术的迅速发展, Huang等(1998; 1999)提出了一种新的时间序列信号处理方法——经验模态分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD),可将不同尺度的波动或趋势从原信号中逐级分离出来,不同特征尺度的波动称为本征模函数(intrinsic mode function, IMF)。其基本思想是:假如一个原始数据序列 $X(t)$ 的极大值或极小值数目比上跨零点(或

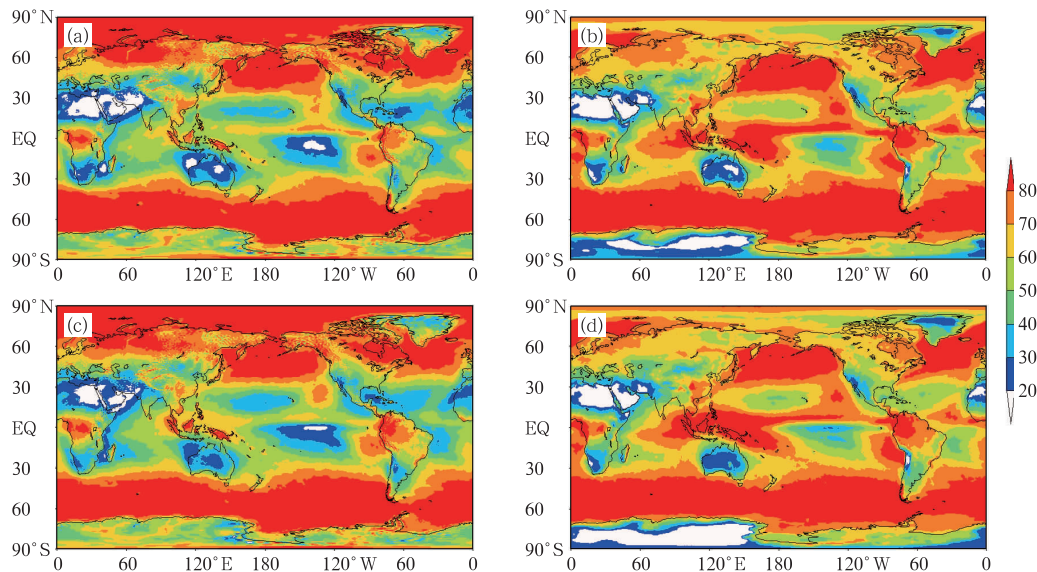


图 1 CFSR(a,c)、MODIS(b,d)全球年平均云量分布对比(单位: %)

(a) 2002 年 CFSR, (b) 2002 年 MODIS, (c) 2009 年 CFSR, (d) 2009 年 MODIS

Fig. 1 Comparison of global annual mean cloud amount from CFSR and MODIS (unit: %)

(a) 2002 dataset from CFSR, (b) 2002 dataset from MODIS,

(c) 2009 dataset from CFSR, (d) 2009 dataset from MODIS

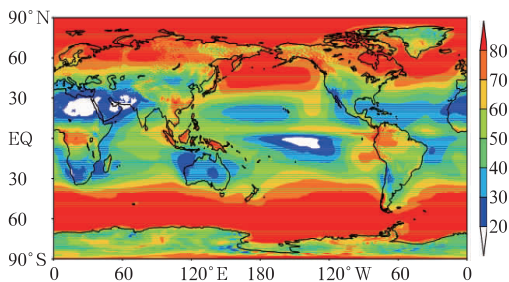


图 2 1979 年 1 月至 2009 年 12 月
全球平均总云量分布

Fig. 2 Global pattern of the total cloud amount
averaged from January 1979 to December 2009

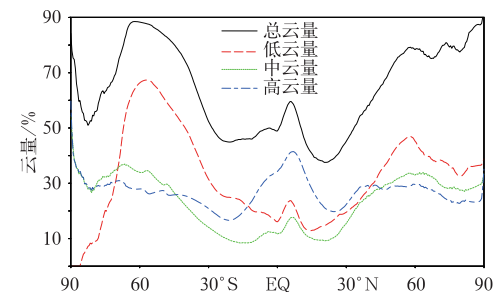


图 3 1979 年 1 月至 2009 年 12 月全球总云量
及低、中、高云量纬向平均分布

Fig. 3 Latitudinal distribution of the total, low,
middle and high cloud amounts averaged
from January 1979 to December 2009

下跨零点)的数目多 2 个(或 2 个以上),则该数据序列就需要进行平稳化处理,直至不可分为止。EMD 是自适应的,具有更强的局地特性,适合于非平稳、非线性信号。测试结果表明,EMD 方法是当前提取数据序列趋势的最好方法(毕硕本等, 2012;梁萍等,2012)。

本文首先分别建立近 30 年全球总云量和低、中、高云量的时间序列,然后采用经验模态分解(EMD)方法求出其趋势项,分析其变化特征(孙娴等,2007;刘莉红等,2008)。图 6a~6d 分别是全球总云量、低、中、高云量近 30 年变化趋势特征。

图 6a 中显示结果表明,总云量变化的总趋势为增长趋势,具体表现为随时间呈现先略减后猛增趋势,其拐点大致在 1993 年,在 1993 年之前,总云量逐渐减少,但减少幅度不明显,仅在 0.5%之内,最低出现在 1993 年前后,为 58.1%,在 1993 年之后,总云量显著增多,最高出现在 2009 年,达 60.2%,涨幅约达 2%。

从不同高度云量来看,变化趋势又不尽相同,其中低云量和高云量均呈现增长趋势,中云量则相反,呈减少趋势。低云量的变化曲线与总云量相似,特别是 1993 年之后增长线与总云量几乎一致,1993 年前则基本为水平线,即低云量无变化,总的增长幅度也接近 2%。中云量与高云量变化趋势几乎完全

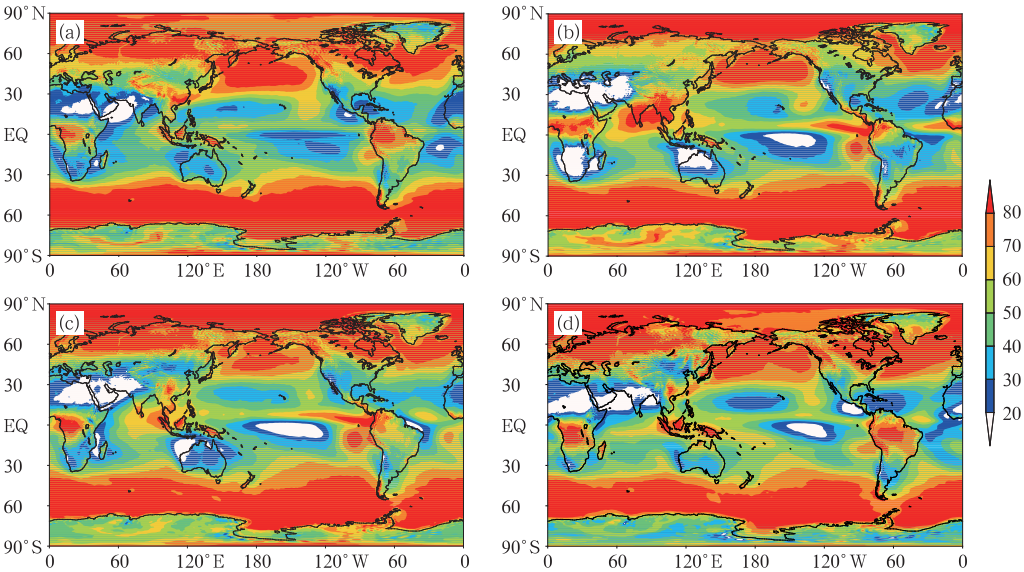


图 4 1979 年 3 月至 2009 年 11 月全球总云量季节平均分布 (单位: %)

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Seasonal spatial patterns of global total cloud averaged from March 1979 to November 2009(unit: %)

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

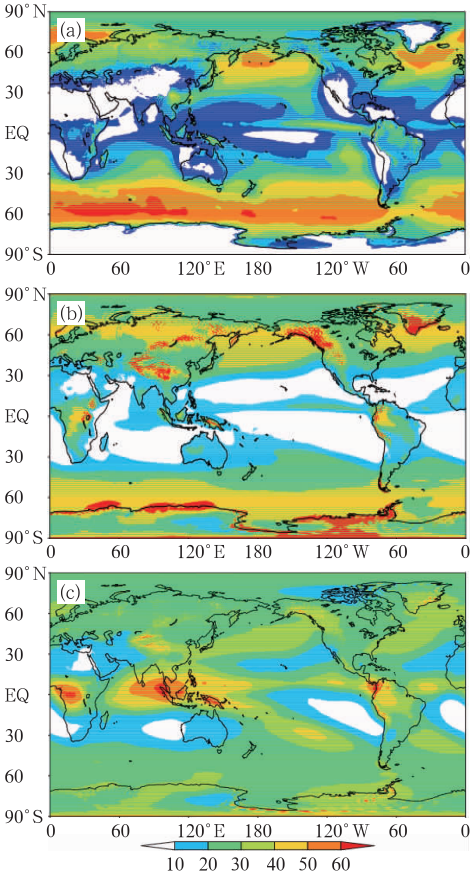


图 5 1979 年 1 月至 2009 年 12 月全球平均云量分布

(单位: %)(a) 低云量, (b) 中云量, (c) 高云量

Fig. 5 Global pattern of the cloud amount averaged from

January 1979 to December 2009(unit: %) (a) low cloud

amount, (b) middle cloud amount, (c) high cloud amount

相反,前者随时间减少,减少幅度小于 0.1% ,后者则随时间呈几乎直线上升趋势,增长幅度约在 0.4% 。

4 结 论

本文首先利用 MODIS 卫星的云产品资料对 CFSR 再分析资料云产品质量进行检验评估,并在此基础上,对近 30 年的 CFSR 的云量变化特征进行分析:

(1) 全球近 30 年(1979—2009 年)(下略)平均总云量约为 59% 。全球总云量有很明显的纬向分布特征,南、北半球各有一个云量高值中心,其中北半球主要位于高纬地区($60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$),南半球则位于中纬度地区附近($40^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{S}$),云量低值区则相对较为分散。

(2) 全球总云量随纬度变化非常明显:有 3 个峰值带,位于北半球的 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$,南半球的 60°S 附近,还有一个在赤道附近;有 3 个低值带,分别位于 25°N 、 80°S 附近和 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{S}$ 之间。全球低云量随纬度的变化特征与总云量非常相似,最高值出现在 60°S 附近,其值接近 70% ,在南极地区低云量最少,几乎为零。与低云量相反,中、高云量在南极地区达到最高值,在 $50\%\sim 60\%$ 。

(3) 低云量、中云量的分布都具有较明显的纬向性,并具有以下特征:低云量的海陆分布差异较明显,陆地上的低云量明显低于海洋上的,除了两个极圈附近,南半球各纬度的低云量都比北半球相应纬

度上的都要大;高云的云量高值、低值中心均集中在赤道附近到南、北半球 30°之间的中低纬度,其中低

值中心则主要分布在大洋的东部。从云量值来看,中云的云量相对于低云、高云,要少很多。

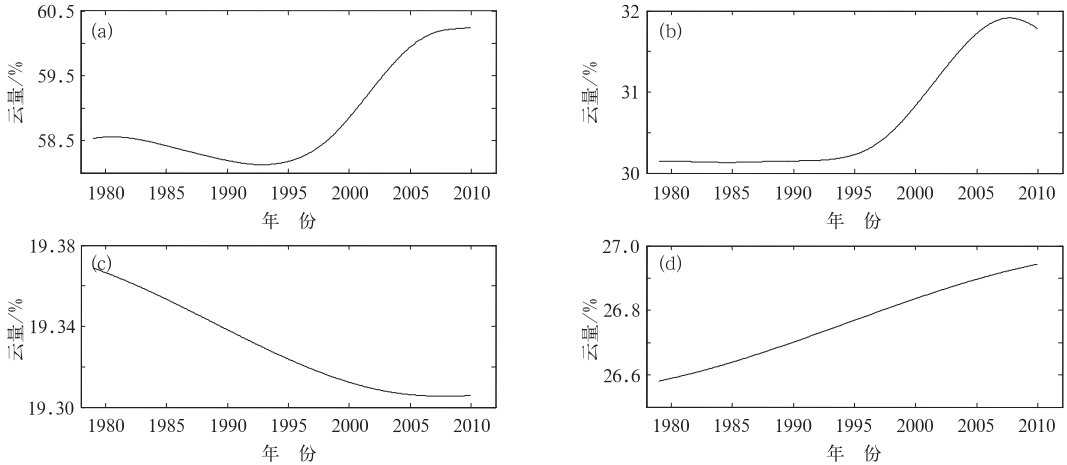


图 6 1979—2009 年全球平均云量变化趋势 (a) 总云量, (b) 低云量, (c) 中云量, (d) 高云量
Fig. 6 The trend of global cloud amount averaged from January 1979 to December 2009
(a) total cloud amount, (b) low cloud amount, (c) middle cloud amount, (d) high cloud amount

(4) 总云量变化总的趋势为增长趋势,具体表现为随时间呈现先略减后猛增趋势,其拐点大致在 1993 年,在 1993 年之后,总云量显著增多。不同高度云量变化趋势不尽相同,其中低云量和高云量均呈现增长趋势,中云量则相反,呈减少趋势。低云量增幅最明显,接近 2%,中、高云量则减、增幅度较小,分别为-0.1%和+0.4%。

致谢:本文所用的 CFSR 再分析资料由 NCEP 提供,下载自 NOAA 国家业务模式归档和发布中心(NOAA National Operational Model Archive & Distribution System <http://nomads.ncdc.noaa.gov>)。MODIS 资料由 NASA 提供,下载自 <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>。

参考文献

毕硕本,陈譞,覃志年,等. 2012. 基于 EMD 和集合预报技术的气候预测方法. 热带气象学报,28(2):283-288.
段皎,刘煜. 2011. 近 20 年中国地区云量变化趋势. 气象科技,39(3):280-288.
丁守国,石广玉,赵春生. 2004. 利用 ISCCP D2 资料分析近 20 年全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响. 科学通报,49(11):1105-1111.
丁守国,赵春生,石广玉,等. 2005. 近 20 年全球总云量变化趋势分析. 应用气象学报,16(5):670-678.
葛伟强,周红妹,杨何群,等. 2010. 基于 MODIS 数据的近 8 年长三角城市群热岛特征及演变分析. 气象,36(11):77-81.
龚志强,邹明玮,高新全,等. 2005. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究. 物理学报,54(8):3947-3957.
刘莉红,翟盘茂,郑祖光. 2008. 中国北方夏半年最长连续无降水日数的变化特征. 气象学报,66(3):474-477.
梁萍,丁一汇. 2012. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征. 气象学报,70(3):418-435.
孙继松. 2014. 从天气动力学角度看云物理过程在降水预报中的作

用. 气象,40(1):1-6.
孙炯,林振山. 2007. 经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征. 地理学报,62(11):1132-1141.
孙秀博,李清泉,魏敏. 2012. 1960—2009 年中国年降水量的年际及年代际变化特征. 气象,38(12):1464-1472.
王丹,盛立芳,石广玉,等. 2012. 中国地表太阳辐射再分析数据与观测的比较. 应用气象学报,23(6):729-738.
汪宏七,赵高祥. 1994. 云和辐射(I):云气候学和云的辐射作用. 大气科学,18(增刊):910-932.
王帅辉,姚志刚,韩志刚,等. 2012. CloudSat 云底高度外推估计的可行性分析. 气象,38(2):210-219.
王绍武. 2001. 现代气候学研究进展. 北京:气象出版社,82-83.
徐兴奎. 2012. 中国区域总云量和低云量分布变化. 气象,38(1):90-95.
张春桂,陈家金,谢怡芳,等. 2008. 利用 MODIS 多通道数据反演近海海面温度. 气象,34(3):30-36.
赵天保,符淙斌,柯宗建,等. 2010. 全球大气再分析资料的研究现状与进展. 地球科学进展,25(3):241-254.
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. 大气科学,36(1):170-184.
郑晓辉,徐国强,魏荣庆. 2013. GRAPES 新云量计算方案的引进和影响试验. 气象,1(1):57-66.
Henderson-Sellers A. 1992. Continental cloudiness changes this century. Geo J,27(3):255-262.
Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc R Soc Land A,454: 899-955.
Huang N E, Shen Z, Long S R. 1999. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum. Ann Rev Fluid Mech,31: 417-457.
Neff W D. 1999. Decadal time scale trends and variability in the tropospheric circulation over the South Pole. J Geophy Res Atmos, 104(D22):27217-27251.
Schiffer R A, Rossow W B. 1985. ISCCP global radiance data set: A new resource for climate research. Bull Amer Meteor Soc, 66(12):1498-1505.