

王帅辉, 韩志刚, 姚志刚. 2010. 基于 CloudSat 和 ISCCP 资料的中国及周边地区云量分布的对比分析 [J]. 大气科学, 34 (4): 767 - 779.  
Wang Shuaihui, Han Zhigang, Yao Zhigang. 2010. Comparison of cloud amounts from ISCCP and CloudSat over China and its neighborhood [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 767 - 779.

# 基于 CloudSat 和 ISCCP 资料的中国及周边地区 云量分布的对比分析

王帅辉<sup>1, 2</sup> 韩志刚<sup>2</sup> 姚志刚<sup>2</sup>

1 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

2 北京应用气象研究所, 北京 100029

**摘 要** 利用 2006 年 7 月至 2007 年 6 月的 CloudSat 2B-GEOPROF-LIDAR 产品资料和国际卫星云气候计划 (ISCCP) D2 月平均云量数据, 统计分析了中国及周边地区午间、凌晨年平均总云量的分布特征, 并对两种探测手段得到的年平均总云量及其昼夜变化进行了对比分析。结果表明, ISCCP 与 CloudSat 总云量的分布形势在午间和凌晨均具有较好的一致性, 即相对多云与少云中心的位置吻合较好。但是, 两种资料得到的总云量在量值上存在一定差异。对于整个研究区域而言, 午间 ISCCP 较 CloudSat 平均总云量偏低 8.9%, 凌晨偏低 15.1%。除了中国北方少云带和日本岛以北海域等区域 ISCCP 云量高于 CloudSat 云量外, 其他区域 ISCCP 云量普遍低于 CloudSat 云量, 且在青藏高原、帕米尔高原、横断山脉、云贵高原以及印度半岛南端和热带部分岛屿等区域尤其显著。进一步对比表明, ISCCP 与 CloudSat 云量差值总体上随 CloudSat 云量的增大而呈线性变化, 在 CloudSat 少云区 ISCCP 略有偏高, 而在多云区则显著偏低。此外, 对云量昼夜变化的对比分析发现, 青藏高原地区 ISCCP 云量昼夜变化量显著大于 CloudSat。

**关键词** 星载云廓线雷达 国际卫星云气候计划 云量 青藏高原

**文章编号** 1006-9895 (2010) 04-0767-13

**中图分类号** P407

**文献标识码** A

## Comparison of Cloud Amounts from ISCCP and CloudSat over China and Its Neighborhood

WANG Shuaihui<sup>1, 2</sup>, HAN Zhigang<sup>2</sup>, and YAO Zhigang<sup>2</sup>

1 *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*

2 *Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029*

**Abstract** Using the CloudSat 2B-GEOPROF-LIDAR product data and the monthly mean data of ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) D2 from July 2006 to June 2007, the distributions of annual mean total cloud amounts over China and its neighborhood were analyzed and compared at noon and wee hours, respectively. The results show that both the distributive patterns of cloud amounts agree well with each other, and the locations of the maximum and minimum from two kinds of data are close. However, there are some quantitative differences between the two kinds of observations, especially at wee hours. For the whole areas, the difference of mean cloud amounts between ISCCP and CloudSat is respectively  $-8.9\%$  and  $-15.1\%$  at noon and wee hours. The annual mean cloud amounts of ISCCP are generally less than those of CloudSat, except in the northern zones of China and

the sea area lying to the north of Japanese islands. In addition, the differences of cloud amounts between ISCCP and CloudSat over the Tibetan Plateau, the Pamir Plateau, the Hengduan Mountains, the Yungui Plateau, the southern part of India peninsula and some islands in the Tropics are more significant. Furthermore, it is indicated that the difference of cloud amounts between ISCCP and CloudSat changes linearly with CloudSat cloud amounts increasing. The ISCCP cloud amounts are slightly higher in the case of low CloudSat cloud amounts, and remarkably lower in the case of high CloudSat cloud amounts. Finally, by comparing the difference in annual mean cloud amounts from ISCCP between daytime and nighttime with that from CloudSat, it is found that the disagreements are significantly larger over the Tibetan Plateau than the other areas.

**Key words** CPR (Cloud Profiling Radar), ISCCP, cloud amount, the Tibetan Plateau

## 1 引言

云在地球能量和水循环中具有重要的作用。云参数(如云量、云高和云光学厚度等)的任何变化都可能对全球气候产生重大影响(汪宏七和赵高祥, 1994; 赵高祥和汪宏七, 1994; 刘玉芝等, 2007)。研究表明(Harrison et al., 1990), 在众多的云参数中云量是重要的气候因子之一, 其通过改变辐射路径上的吸收/反射截面影响大气中的辐射传输, 从而改变局地辐射收支并导致地表和大气的能量平衡产生相应变化, 这对局地或全球的增暖或降温都将起到决定性的作用。因此, 云量的分布和变化形式历来是云气候学研究中首要考察的因素。

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, 其中最为著名的就是始于 1983 年的国际卫星云气候计划(ISCCP)。ISCCP 整合了覆盖全球的多颗静止卫星和极轨卫星的观测, 是一项专门进行全球性云观测的科学实验计划, 其目标是完善全球云资料、理解云对地气系统辐射平衡的影响, 并在此基础上揭示云与气候的相互作用(Schiffer and Rossow, 1983)。ISCCP 资料是通过卫星上各种传感器的测量再经过云检测、辐射分析和统计处理后得到的, 其反演方法的优劣直接影响到资料的可靠性, 因此有必要使用其他云资料对其进行验证。

长期以来, 对于 ISCCP 资料在中国地区的验证主要是通过与其地面观测资料进行对比分析(魏丽等, 1996; 魏丽和钟强, 1997; 翁笃鸣和韩爱梅, 1998; 刘瑞霞等, 2004; 陈勇航等, 2007)。研究表明, ISCCP 的云量资料与地面观测云资料集吻合比较好, 能够反映中国地区云的真实分布情况(刘洪利等, 2003)。但是, ISCCP 的云量资料与地面观测的云量资料之间存在一定的不一致性, 而且这种

不一致性因区域而异。除了 ISCCP 卫星观测内在的原因之外, 云地面常规观测的局限性也是导致两者差异的原因之一。这些局限性包括: 地面云的观测主要是目测的结果, 受观测者主观因素影响比较大; 对低云的描述更好一些, 但可能低估光学厚度较薄的高云; 站点空间分布不均匀, 在一些偏远、边缘、海上以及地形复杂地区资料难以获取, 有限的站点不能完整地反映区域总云量的分布情况; 夜间云量的地面观测比较困难, 尤其是夜间高云的观测容易被低估(Warren et al., 1986)。显然, 仅仅使用地面云量观测资料难以全面、客观、准确地验证 ISCCP 云量数据的区域有效性。因此, 有必要进一步采用更加客观的观测数据对 ISCCP 云量数据进行对比分析。此外, 由于云量的日变化特征对于验证大气环流模式(General Circulation Models)具有重要的意义(Slingo et al., 1987), 并且云量日循环特征会对气候模拟产生比较大的影响(Wilson and Mitchell, 1986)。因此, 很多学者已经利用不同的数据集分析了云量的日变化特征(Gruber, 1976; Minnis and Harrison, 1984; Salby et al., 1991; Cairns, 1995; Bergman and Salby, 1996)。其中的 ISCCP 数据集由于具有较高的时间和空间分辨率, 因此在研究全球云量的日变化特征中得到了最广泛的使用。然而, 由于 ISCCP 白天和夜间采用的观测通道不同, 使用其得到的云量日变化特征的准确性可能会受到一定程度的影响。Rossow 等(1993)对比了 Nimbus-7 和 ISCCP 的云量昼夜变化发现, 两者的一致性非常差。因此, 这就需要对白天及夜间得到的云量参数采用另外一种不受日夜条件限制的客观观测手段对其进行对比验证, 而目前尚欠缺针对中国及周边地区的分析验证工作。

2006 年, CloudSat 卫星的发射成功为云的综合分析、三维重建与降水的预测提供了一种基于主

动遥感数据的全新方法。在太阳同步轨道“午后列车 (A-Train)”中同步飞行的 CloudSat 与 CALIPSO 卫星能够协同观测, 得到客观和完整的云分布信息。CloudSat 上搭载的毫米波云廓线雷达 (CPR) 能够从云顶观测到云的垂直结构, 其获得的资料能够改善大气模式中的云量等云参数, 从而有利于改善天气预报和气候预测的准确度。云廓线雷达工作在 94GHz 的高频微波波段, 在这个波段雷达信号几乎没有被云所削弱, 能够探测到 90% 冰云和 80% 水云 (Stephens et al., 2002)。CALIPSO 卫星上的激光雷达则能够探测到低于云雷达探测阈值的微弱水汽凝结层以及光学厚度较薄的冰云的云顶。所以, CloudSat 与 CALIPSO 卫星联合观测能够客观、准确地判别垂直廓线内是否有云, 且其观测产品也可以对其他卫星资料得到的云识别结果进行验证。目前, 国内外已有学者 (Sassen and Wang, 2008; Sassen et al., 2008; 李积明等, 2009) 利用 CloudSat/CALIPSO 统计得到了全球及中国地区各类云量的水平和垂直分布特征, 并与地面和 ISCCP 区域平均云量进行了比较, 初步验证了 CloudSat 云量数据的可靠性。此外, CloudSat 经过中国及周边地区的时间为凌晨 02:00 或者午间 14:00 (当地时间) 左右, 其对中国及周边地区的观测数据包含了云量的昼夜分布信息。因此, 这为我们比较 CloudSat 与 ISCCP 的云量昼夜变化提供了可能。

基于以上分析, 本文首先分别对比了午间、凌晨中国及周边地区 ISCCP 与 CloudSat 年平均云量分布的一致性, 并对午间与凌晨两种云量一致性的差异进行了分析。随后, 对两种数据得到的云量昼夜变化进行比较, 进一步分析了 CloudSat 与 ISCCP 云量参数的异同。最后, 对导致中国及周边地区 ISCCP 与 CloudSat 云量分布差异的原因进行了分析讨论, 从而为 ISCCP 数据集以及 CloudSat 资料在该地区的合理使用提供参考。

## 2 资料和分析方法

### 2.1 ISCCP 与 CloudSat 资料简介

ISCCP 的数据集 (Rossow and Schiffer, 1991) 有很多种, 包括 B、C、D 三个系列, 本文使用的是 D2 月平均数据集。D 系列是在 C 系列基础上通过辐射率再定标、修改云检测阈值和辐射模式算法、

云资料产品进一步网格化、提高分辨率后得到的新版本的云参数数据。产品 C1、D1 统计了空间分辨率为 280 km 等面积投影图上每 3 小时的像素级结果, 将多颗卫星的大气、海/冰资料综合在一起生成同一时间覆盖全球的资料集。产品 C2、D2 是 C1、D1 的月平均, 描述了云的分布及其属性等信息。ISCCP D2 数据集包括 8 个时次 [00、03、06、09、12、15、18、21 时 (协调世界时)] 9 种云的月平均参数信息, 包括总云量 (月平均云量、云出现频率)、边缘云量、云顶气压、云顶温度 (高中低云)、云光学厚度、云水路径以及相关的地表大气平均特性等 130 个云参数信息。为了方便数据存储, D2 数据按等面积投影网格存储, 各网格面积大小等于赤道上  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  的网格单元的面积 (为 77000 km<sup>2</sup>)。每个网格单元包含 20~120 个像素, 其空间采样率为 5%~15%。各网格单元的云量是指网格单元内有云像素与所有像素数目的比值。

CloudSat 数据处理中心 (DPC) 产生两类数据产品: 标准数据产品和辅助数据产品。本文主要用到的是标准数据产品中的 2B-GEOPROF-LIDAR 产品。该产品联合使用云雷达、激光雷达探测数据获得云的层数、各层的顶高和底高等云属性信息, 对 2B-GEOPROF-LIDAR 详细的格式说明可参阅 CloudSat 产品手册 (<http://cloudsat.cira.colostate.edu/>)。当 CloudSat 的廓线观测到云的层数大于 0 时, 我们记该廓线为有云廓线, 并将研究区域内有云廓线数除以总的观测廓线数作为研究区域内 CloudSat 的平均云量。文中所有云量均以百分比表示。

鉴于到目前为止, 只有两年多的 CloudSat 观测数据, 且 ISCCP 数据也只更新至 2007 年 6 月, 故我们选择数据的时间跨度为 2006 年 7 月到 2007 年 6 月, 并将经纬度范围在 ( $0^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $70^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$ ) 的中国及周边地区作为研究区域。

### 2.2 方法

图 1a 所示为利用 ISCCP 资料得到的中国及周边地区年平均云量日较差的分布图, 从图中可以发现, 陆地较洋面有更大的云量日变化幅度。青藏高原地区云量日变化最大, 约为 30%~50%。中国中东部以及南亚各岛云量日变化幅度在 10%~20% 之间, 中国西北部分地区、蒙古以及印度南部和北部约为 20%~30%。洋面云量日变化较小约为 0%~

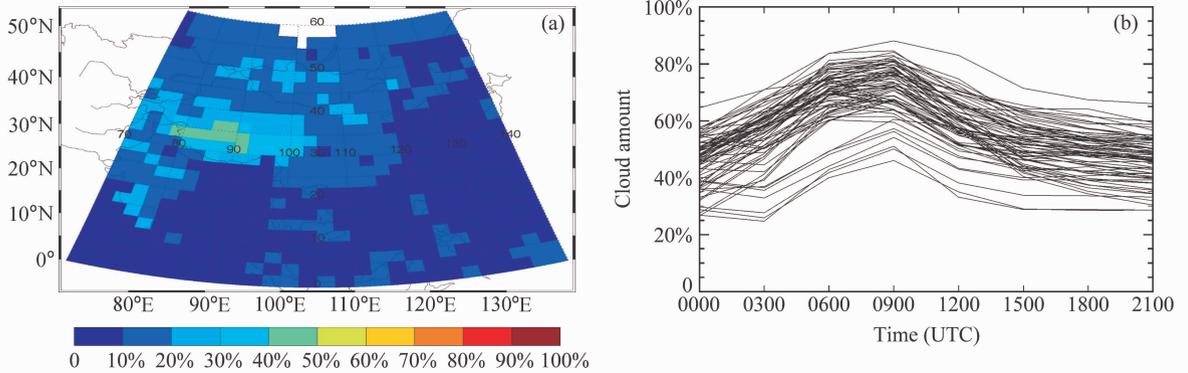


图1 ISCCP 云量日较差分布 (a) 以及云量日较差大于 20% 区域的云量日变化曲线 (b)

Fig. 1 (a) The distribution of diurnal range of cloud amounts from ISCCP and (b) daily variations of cloud amounts over regions with the diurnal range more than 20%

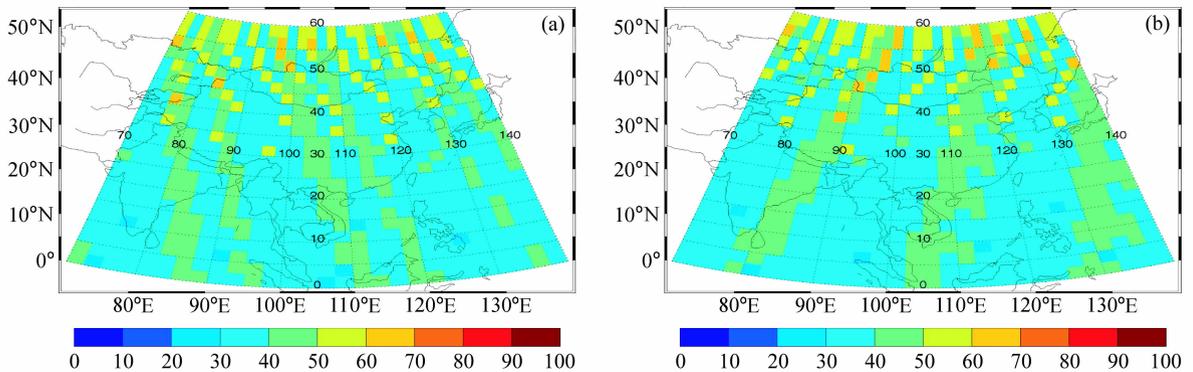


图2 全年 CloudSat 对各网格的观测次数分布: (a) 午间; (b) 凌晨

Fig. 2 Distributions of CloudSat observation times in every grid during one year: (a) Noon; (b) wee hours

10%。刘奇 (2007) 利用多年 ISCCP 资料发现了同样的云量日变化特征: 云量的日变化具有明显的区域特征, 陆面云量日变化幅度高于洋面。此外, Cairns (1995) 利用 ISCCP C2 资料分析了云量的日变化特征: 陆面地区最大云量一般出现在从 09 时至 15 时 (当地时间) 的中午时段, 而且以正午时居多。本文对图 1a 所示云量日变化幅度大于 20% 的区域进行了云量随时间变化的分析 (图 1b), 从图中可以看到, 该区域日最大云量出现在 06 时至 12 时 (协调世界时) 之间, 而其他时刻的云量变化比较平缓。这个结果同 Cairns 的结论, 二者具有较好的一致性。因此, 本文需要对午间和凌晨的云量分别进行对比分析。由于 ISCCP D2 数据集统计的 8 个时次数据均为协调世界时, 而 CloudSat 经过中国及周边地区的时间为基本固定的当地时间 (02 时或者 14 时), 所以为了实现时间匹配, 本文对 ISCCP D2 各时刻数据进行线性插值得到各个经度

上对应的当地时间 02 时和 14 时数据, 即将各网格单元的当地时间 02 时或者 14 时转换为对应的协调世界时, 然后取与之时间最接近的 ISCCP D2 云量数据作为各网格单元凌晨或午间的 ISCCP 云量。

在空间匹配方面, 我们对 CloudSat 数据进行了格点化处理, 网格大小为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。这样的网格化处理首先是为了方便与分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的 ISCCP 资料进行比较。其次是出于 CloudSat 资料代表性的考虑。如果网格太大, 不利于研究云量的区域分布特征; 相反, 如果网格太小, 由于 Cloudsat 重复周期比较长, 各格点内的观测样本数不够。Rossow 等 (1993) 指出云量在空间和时间尺度上的变化与大气运动有关, 其在 500~2000 km 空间尺度和 1~3 天的时间尺度上是相关的, 即一个月内在一个地区只有大约 10~15 个独立的样本。图 2 所示为一年内 CloudSat 午间、凌晨经过中国及周边地区的数据轨数分布。由于极轨卫星运行轨

道的特点, 从图 2 中可以看到高纬地区 CloudSat 观测次数较低纬多。对 CloudSat 过境次数的统计结果表明, 全年 CloudSat 对每个网格单元平均观测约 80 次, 即平均每 4~5 天 CloudSat 经过网格单元一次。因此, 在  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的网格内, 一个月的 CloudSat 探测资料能够捕获到大部分的云系, 由此得到的每个网格单元的年平均云量理论上具有一定的合理性。此外, 采用  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  分辨率的网格化处理也是参考国外学者对 CloudSat 资料处理的做法。Sassen 和 Wang (2008) 利用一年的 CloudSat 资料, 以  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的空间分辨率对全球各类云的云量进行了统计。Sassen 等 (2008) 对 CloudSat/CAIPSO 数据采用了更小分辨率 ( $5^\circ \times 5^\circ$ ) 的处理方法, 统计得到了全球卷云云量的分布特征。出于以上几方面的考虑, 本文对 CloudSat 资料采用分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的网格化处理方式, 并通过与 ISCCP 云量统计结果的比较来验证这种网格化处理方式的合理性。

考虑到云量在某些区域具有较明显的日变化特征, 故只有将相近观测时刻的两种数据进行比较才具有合理性。因此, 本文首先分别对午间和凌晨的 ISCCP 和 CloudSat 云量分布的一致性进行统计分析, 然后对 ISCCP 和 CloudSat 年平均云量昼夜变化进行对比, 分析 ISCCP 与 CloudSat 的一致性。

### 3 ISCCP 与 CloudSat 总云量分布特征对比分析

#### 3.1 午间年平均总云量分布特征比较

图 3 给出了中国及周边地区午间 ISCCP 与 CloudSat 年平均总云量分布形势, 从图中可以看到, 午间 ISCCP 与 CloudSat 总云量分布形势比较一致, 相对多云和少云中心吻合得很好。两种数据得到的云量都具有纬向分布特征, 从赤道到中高纬度存在两条少云带。一条位于北回归线附近, 总云量自东向西逐渐减少, 大陆的东部相对多云而西部少云, 在印度半岛西北部达到最小, 约为 30%~50%。云量的这一分布特征同丁守国等 (2005) 使用多年 ISCCP 数据进行全球气候分析得到的结果相一致。另外, 从中国西北到华北地区也存在一条明显的自塔里木盆地经黄土高原至华北平原的东西向少云带。与少云带相对应, 从赤道到高纬地区间隔分布三条多云带。其中, 总云量高值中心出现在

青藏高原东部、四川盆地、昆仑山西端帕米尔高原一带, 以及赤道附近马来群岛。

统计表明 (图 3d), 尽管 ISCCP 与 CloudSat 的云量差在  $\pm 20\%$  之间的格点达到了 85% 以上, 但云量差值小于  $-20\%$  的格点也超过了 10%, 这说明部分区域 ISCCP 与 CloudSat 的差异比较明显。这些区域位于青藏高原东南、横断山脉、云贵高原以及印度洋和西太平洋部分地区, 云量差值达到了  $-20\% \sim -30\%$ 。此外, 从图 3c 可以看到, ISCCP 的云量整体上偏小。

统计显示, 午间中国及周边地区年平均云量 ISCCP 为 69%, CloudSat 为 78%, ISCCP 与 CloudSat 总云量平均偏差为  $-8.9\%$ , 标准差为 10.1% (表 1)。但是, 不是所有区域 ISCCP 云量均小于 CloudSat, 云量差异具有区域分布特征。ISCCP 云量大于 CloudSat 的区域主要分布在中国西北到华北的少云带、中国东部黄海到东海之间狭长地带、天山山脉与阿尔泰山之间区域以及印度半岛西北部和日本岛以北部分地区。

#### 3.2 凌晨年平均总云量分布特征比较

图 4 所示为凌晨 ISCCP 与 CloudSat 总云量分布形势, 从中可以看到: 凌晨, ISCCP 总云量的高低中心分布同 CloudSat 吻合较好, 中国西北到华北的少云带、印度半岛西北的少云中心清晰可见; 帕米尔高原、四川盆地以及马来群岛的多云中心在 ISCCP 与 CloudSat 云量分布图 (图 4a、b) 上都能看到。

然而, 凌晨 ISCCP 与 CloudSat 云量分布差异也相当明显。除了蒙古高原、阿尔泰山以西部分地区、中国东北和东部沿海地带以及日本岛以北以西海域 ISCCP 云量略大于 CloudSat 之外, 其他地区 ISCCP 几乎均小于 CloudSat, 且部分区域相差比较

表 1 中国及周边地区 ISCCP 和 CloudSat 总云量及其差值昼夜变化统计

Table 1 Statistics of differences between daytime and nighttime cloud amounts, and differences between ISCCP and CloudSat cloud amounts over China and its neighborhood

	最大值	最小值	平均值	标准差
ISCCP 昼夜差	41.3%	-14.6%	7.6%	9.6%
CloudSat 昼夜差	25.0%	-22.0%	1.5%	7.3%
ISCCP-CloudSat (午间)	19.4%	-34.0%	-8.9%	10.1%
ISCCP-CloudSat (凌晨)	22.7%	-43.6%	-15.1%	10.1%

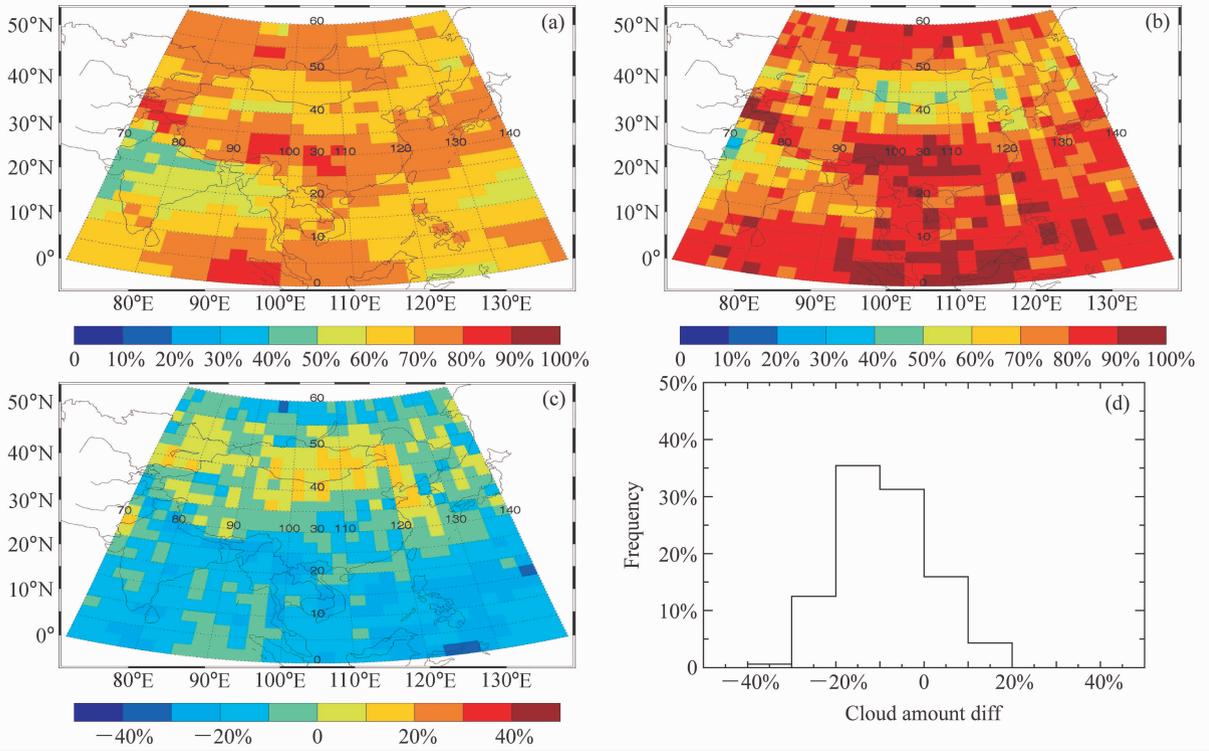


图3 午间 ISCCP (a) 与 CloudSat (b) 总云量分布; 午间 ISCCP 与 CloudSat 云量差的地理分布 (c) 和频率分布 (d)

Fig. 3 Geographic distributions of annual mean (a) ISCCP and (b) CloudSat cloud amounts at noon and (c) their difference; (d) occurrence frequency of cloud amount difference between ISCCP and CloudSat

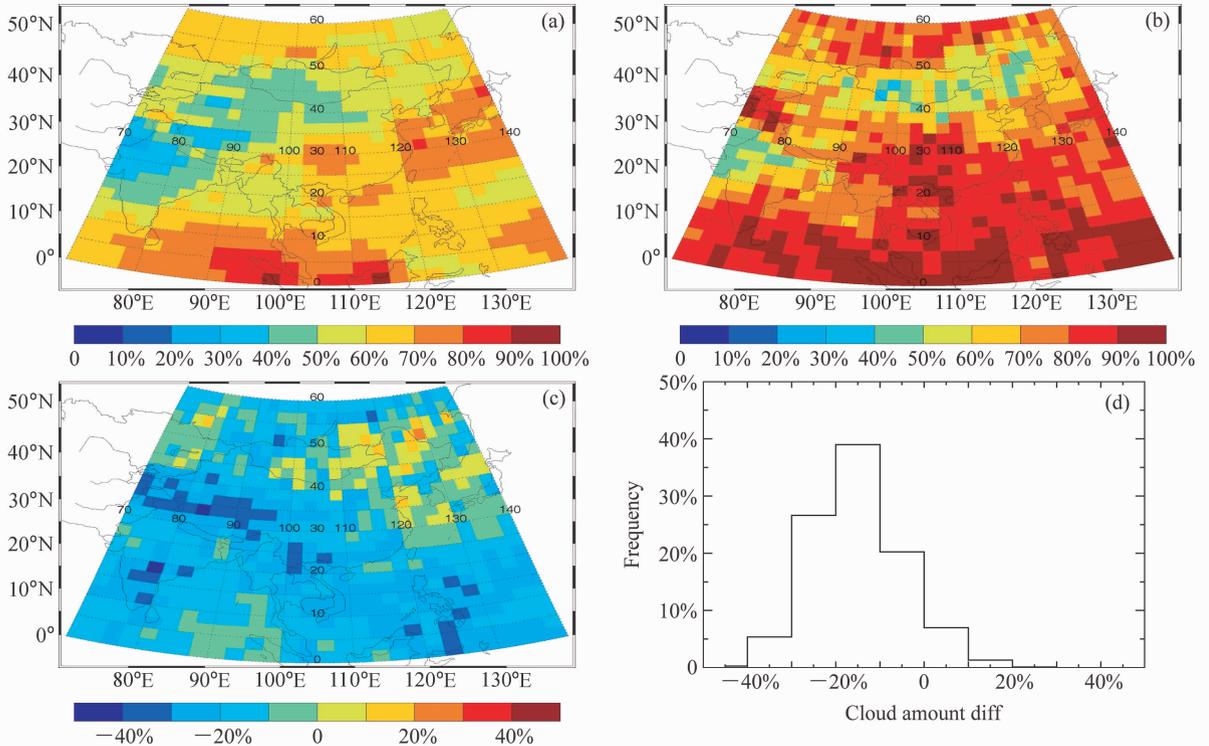


图4 同图3, 但为凌晨

Fig. 4 Same as Fig. 3, but at wee hours

大。从图 4c 可以看到，青藏高原、帕米尔高原、横断山脉、云贵高原以及印度半岛南部和热带部分岛屿 ISCCP 云量较 CloudSat 低 30%~40%。统计发现，凌晨中国及周边地区年平均云量 ISCCP 为 61%，CloudSat 为 76%，云量差在 -10%~-20% 之间的格点几乎达到 40%，ISCCP 与 CloudSat 区域总云量平均偏差为 -15.1%，标准差为 10.1% (表 1)。

### 3.3 午间、凌晨两个时刻总云量分布形势对比

3.1 节和 3.2 节分别从午间、凌晨两个时刻对 ISCCP 与 CloudSat 总云量的分布进行了对比，结果显示，午间、凌晨 ISCCP 与 CloudSat 总云量的分布均比较一致，相对多云与少云中心吻合较好。无论是午间还是凌晨，ISCCP 与 CloudSat 云量差值的负值区域面积均大于正值区域；海洋上出现的正值位置昼夜变化不大，都位于中国黄海至东海沿岸地带以及日本岛北部，差值大小均小于 20%；北回归线以南区域，云量差值昼夜均为负值。但是，午间和凌晨两个时刻 ISCCP 与 CloudSat 总云量分布的一致性存在差异：

(1) 凌晨 ISCCP 和 CloudSat 云量平均偏差大于午间 (表 1)，凌晨云量差值负值区域面积大于午间，且负值最小低于 -40%。比较图 3d 与图 4d 可以看到：午间云量差值在 ±10% 之间的格点超过 40%，而凌晨小于 30%，并且午间云量差值在 -20%~-30% 之间的格点稍多于 10%，凌晨则超过了 25%。

(2) 对 ISCCP 与 CloudSat 云量进行线性回归

分析发现 (图 5)，午间线性相关性较凌晨差，午间线性相关系数为 0.46，凌晨为 0.65。

(3) 比较 ISCCP 与 CloudSat 总云量差值与 CloudSat 总云量的散点图发现 (图 6)，ISCCP 与 CloudSat 云量差值随 CloudSat 云量的增大而呈线性变化，即在 CloudSat 少云区 ISCCP 略有偏高，而在多云区则显著偏低。对比图 6a 和 6b 可以发现：午间，CloudSat 少云区 ISCCP 偏高现象更加明显；凌晨，CloudSat 多云区 ISCCP 偏低现象更加普遍。

### 3.4 ISCCP 与 CloudSat 年平均总云量昼夜变化比较

Rossow 等 (1993)、Cairns (1995) 和刘奇 (2007) 均利用 ISCCP 资料研究了云量的昼夜变化特征，但前文的对比分析表明，在昼夜两个不同时刻，ISCCP 与 CloudSat 两者之间在部分地区差异比较显著。鉴于 CloudSat 不受昼夜条件的限制，而 ISCCP 在夜间云检测中可能存在的各种不足，因此，有必要进一步利用 CloudSat 资料验证 ISCCP 云量的昼夜变化。由于 CloudSat 观测时间的限制，这里仅考虑当地时间 14 时和 02 时两个时刻之间的云量差。

图 7 给出了中国及周边地区 ISCCP 与 CloudSat 年平均总云量的昼夜变化分布特征。从图 7a 可以看出，ISCCP 总云量昼夜变化具有比较明显的区域性。从总体上来看，陆上 ISCCP 总云量昼夜变化明显大于海洋，昼夜云量差值大于 10% 的区域全部分布在陆地上，尤其是青藏高原以及帕米尔高原地区昼夜变化最为明显，昼夜差值最大超过 40%。

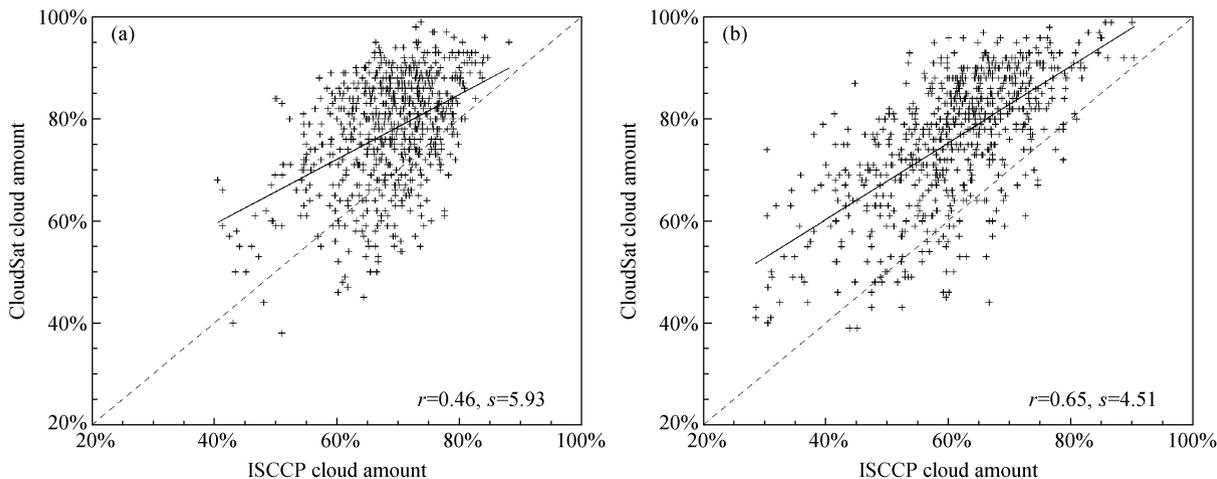


图 5 ISCCP 和 CloudSat 年平均云量线性相关性分析：(a) 午间；(b) 凌晨。 $r$  为相关系数， $s$  为剩余标准差；实线：拟合直线，虚线：1:1 线  
Fig. 5 Analysis of linearity correlations between annual mean ISCCP and CloudSat cloud amounts at (a) noon and (b) wee hours.  $r$  is correlation coefficient,  $s$  is residual standard deviation; the solid and dashed lines are fitting and 1:1 lines, respectively

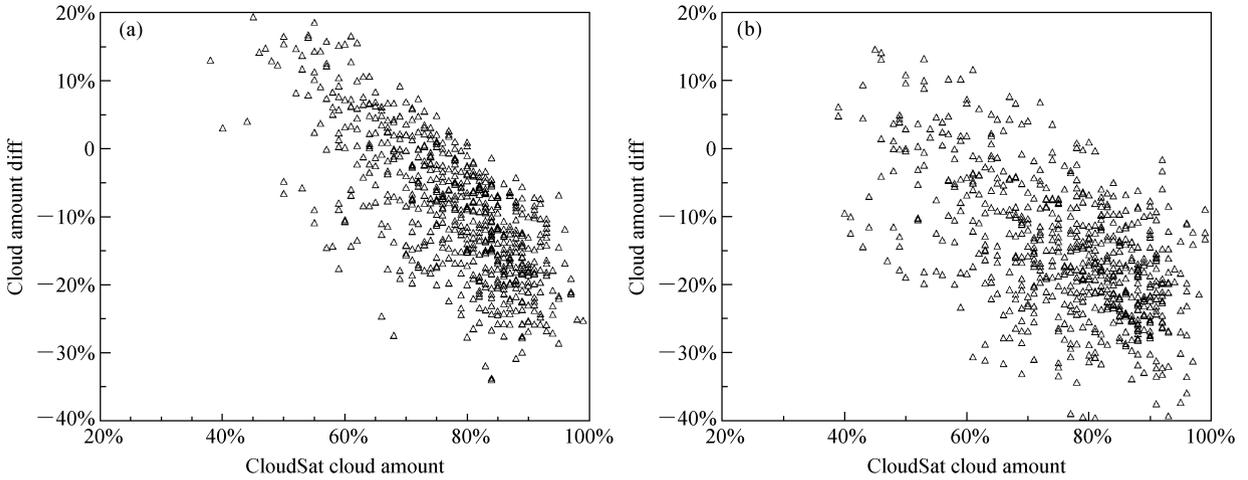


图6 ISCCP 和 CloudSat 总云量差值与 CloudSat 云量散点图: (a) 午间; (b) 凌晨

Fig. 6 Difference of cloud amounts between ISCCP and CloudSat versus cloud amounts from CloudSat over China and its neighborhood at (a) noon and (b) wee hours

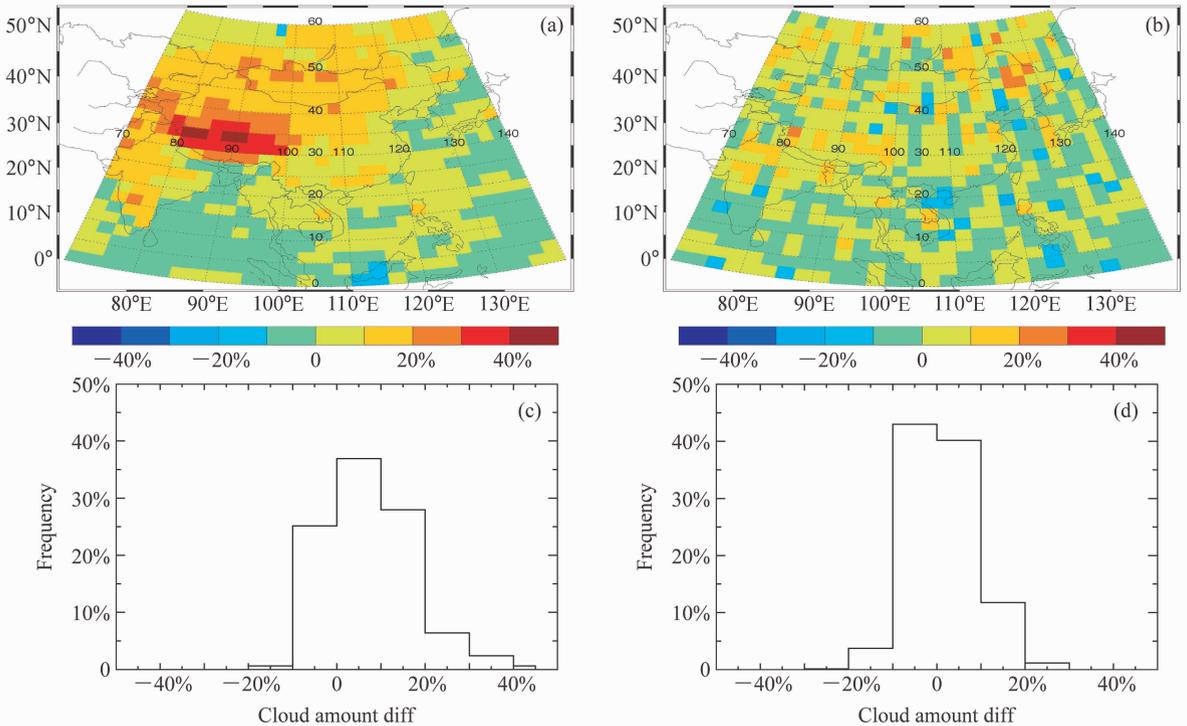


图7 ISCCP (a, c) 与 CloudSat (b, d) 昼夜两个时刻年平均总云量差值地理分布 (a, b) 及频率分布 (c, d)

Fig. 7 (a, b) Geographic and (c, d) frequency distributions of mean cloud amount differences from (a, c) ISCCP and (b, d) CloudSat between day and night

海洋上的云量昼夜变化不明显, 差值均在 $\pm 10\%$ 之间, 且负值多于正值, 即海洋上夜间平均云量大于白天。从图 7c 可以看到, 云量昼夜差值在 $\pm 10\%$ 之间的格点超过了 60%, 另外有超过 30% 的格点昼夜云量差值大于 10%, 这说明整个中国及周边地区 ISCCP 云量白天大于夜间。统计发现, 研究区

域 ISCCP 总云量昼夜平均偏差为 7.6%, 标准差为 9.6% (表 1)。

从图 7b 的昼夜差值图中可以看到 Cloudsat 总云量昼夜变化不明显。总体来看, 海洋上总云量白天少于夜间, 陆上则相反。由图 7d 可以发现, 整个研究区域内昼夜云量差值位于 $\pm 10\%$ 之间的格点

数超过了 80%，昼夜云量差值大于 10% 的格点数较小于 -10% 的格点数多，这使得整个研究区域 CloudSat 平均云量白天稍大于夜间，平均偏差为 1.5%，标准差为 7.3% (表 1)。

对比 ISCCP 与 CloudSat 云量昼夜变化可以发现，海洋上两者的一致性相对较好，两种观测手段得到的云量昼夜差值基本上均在 ±10% 之间。而陆上两者的一致性比较差，ISCCP 昼夜云量变化大于 CloudSat。ISCCP 云量昼夜变化具有明显的区域分布特征，而 CloudSat 的分布随机性比较大，其昼夜云量差的频率分布呈近似无偏的正态分布。以上对比表明，利用 ISCCP 资料研究中国及周边地区云量的昼夜变化特征的可信度值得进一步探讨，尤其是青藏高原地区。

## 4 ISCCP 与 CloudSat 总云量分布差异原因分析

前文对比 ISCCP 与 CloudSat 年平均总云量分布的一致性后发现，两者总体分布比较一致，但在某些区域差异比较大。为了有效地利用 ISCCP 和 CloudSat 资料研究中国及周边地区的云气候特征，有必要对造成两者云量差异的原因进行分析和讨论。

Rossow and Garder (1993a) 研究指出，ISCCP 同其他云数据集对比分析表明，云检测误差是 ISCCP 系统误差中最主要的因素。首先，ISCCP 对低云的检测存在偏差，尤其是夜间误差比较大 (Rossow and Garder, 1993b)。ISCCP 使用的各业务卫星资料主要来自可见光 0.6 μm 和红外 11 μm 两个通道，而夜间红外 11 μm 通道是云检测信息的唯一来源，这就造成 ISCCP 夜间对一些低云的识别比较困难。然而，CloudSat 上的云廓线雷达 (CPR) 是主动微波遥感，昼夜变化对于 CPR 的探测能力没有影响。丁守国等 (2004) 统计发现，全球平均总云量约为 67%，其中低云量最多，占总云量的 41%。所以，ISCCP 对低云的漏检测可能是导致凌晨 ISCCP 与 CloudSat 云量平均偏差大于午间 (表 1) 以及 ISCCP 云量昼夜变化幅度偏大 (图 7a) 的原因。

其次，ISCCP 晴空辐射值的确定在某些区域存在不足。ISCCP 云检测算法的核心是假定晴空下垫面的可见光和红外辐射率值比云目标的值少变，其通过空间对比试验、时间对比试验、空间和时间

统计的累计、建立晴空可见光和红外的合成图从而确定合适的云检测阈值。所以，ISCCP 云检测的准确度依赖于晴空合成图 (阈值) 的确定。在常年多云地区，云和晴空的辐射对比较小，ISCCP 确定的晴空辐射值反射率偏高而温度偏低，所以检测到的云量就偏少。从图 3c 可以看到，在昆仑山北坡、云贵地区以及洋面上部分地区 ISCCP 云量较 CloudSat 少 20%~30%，这些地区 ISCCP 云量的偏低很有可能是这些地区常年多云的原因造成的。

再次，Rossow and Garder (1993b) 指出，当光学厚度值低于 0.3~0.5 时，ISCCP 无法区分薄卷云和气溶胶，即 ISCCP 会将对流层和平流层的气溶胶等误判为薄卷云。刘洪利等 (2003) 统计 1983 年 7 月至 1993 年 12 月中国地区的 ISCCP D2 资料发现，北方地区云的光学厚度较小，且云量少。他们的研究表明，北方地区 ISCCP 总云量比地面观测大。在他们的分析中，将 ISCCP 偏大归因于地面观测往往无法识别出薄云。但本文采用能够识别出薄云的激光雷达资料进行对比，同样发现 ISCCP 总云量偏高。因此，图 3c 所示午间中国北方少云带中 ISCCP 云量高于 CloudSat 极有可能是另外一个因素，即 ISCCP 将北方地区的气溶胶误识为薄卷云。此外，冬季积雪也可能导致这一地区 ISCCP 云量较 CloudSat 偏高。

此外，ISCCP 会将某些有云的像元识别为晴空，这也可能导致 ISCCP 云量存在一定的误差。ISCCP 判定云的准则是：当可见光反射率值或红外亮温值与阈值的差超过了一定的不确定度范围，便将该点判定为云；介于晴空与云之间接近于云检测标准的点定义为“边缘云”。魏丽等 (1996) 对中国大陆卫星反演云参数的评估中指出，ISCCP 云识别过程中存在的“边缘云”可能包含一些实际上是云的像元，其对 ISCCP 总云量资料进行“边缘云”订正后发现 ISCCP 卫星观测云量偏低的现象可得到一定程度的纠正。因此，本文也对经过边缘云订正的 ISCCP 资料与 CloudSat 进行了对比。图 8 给出了 ISCCP 与 CloudSat 的云量点聚结果，从图中可以看到 ISCCP 云量偏低的现象得到明显的改善。统计发现，订正之前的平均偏差为 -12%，订正之后减小为 -0.2%，其中 ISCCP 与 Cloudsat 云量之差在 ±10% 之间的格点达到 70% (图 8c)。然而，对 ISCCP 与 Cloudsat 云量差同 Cloudsat 云量之间

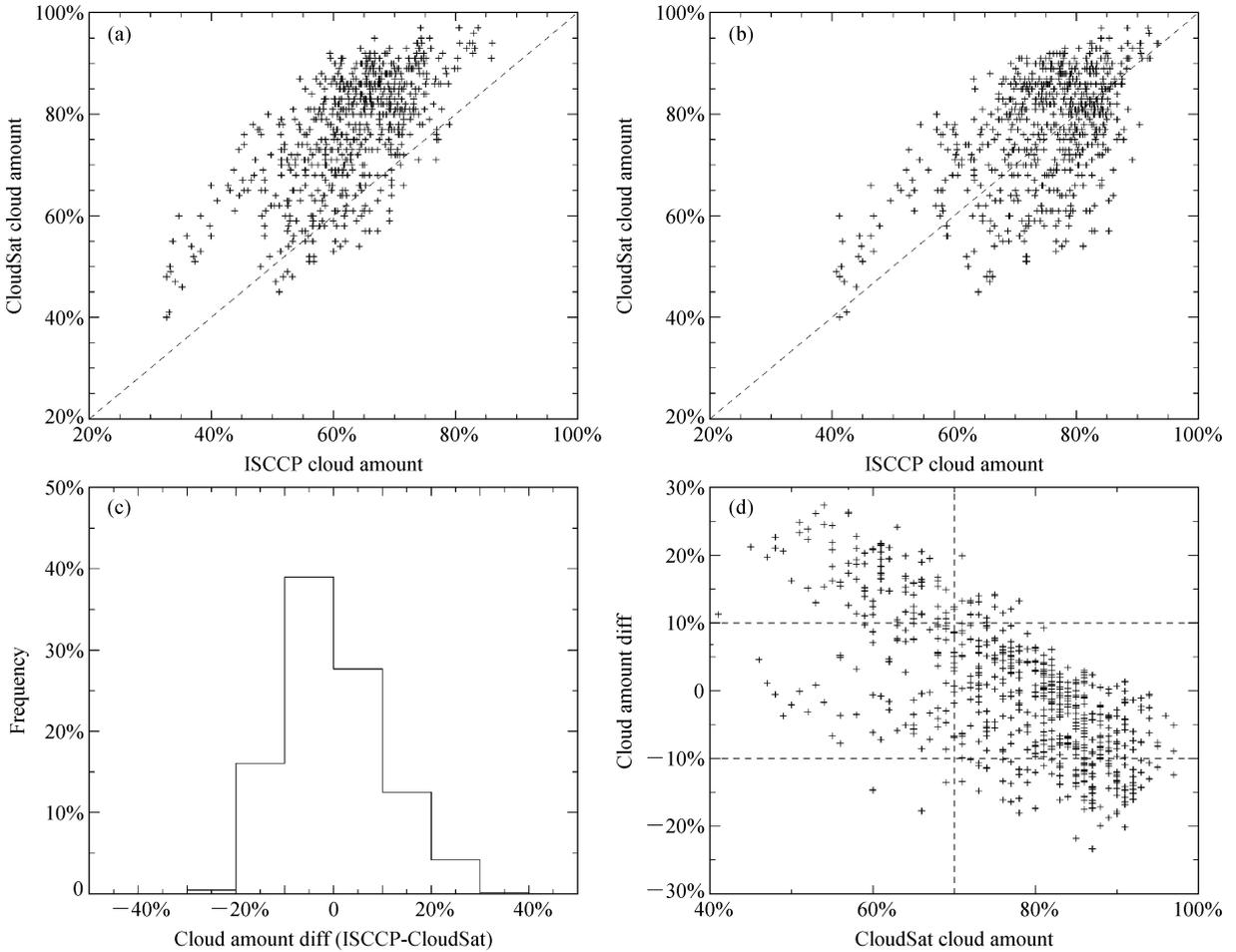


图8 边缘云订正前后 ISCCP 与 CloudSat 云量的比较: (a) 订正前点聚图; (b) 订正后点聚图; (c) 订正后云量差值频率分布; (d) 订正后云量差值与 CloudSat 云量点聚图

Fig. 8 Comparison of cloud amounts (a) without and (b) with modification of marginal cloud; (c) occurrence frequency of modified cloud amount difference; (d) difference of modified cloud amounts between ISCCP and CloudSat versus cloud amounts from CloudSat

的散点图(图 8d) 分析发现, ISCCP 在 CloudSat 多云区偏低、少云区偏高的现象仍然存在, 且 CloudSat 少云区 ISCCP 偏高更加显著。如图 8d 所示, 除了位于  $\pm 10\%$  之间的点外, Cloudsat 云量低于 70% 的点差值均大于 10%, 而高于 70% 的点差值几乎都小于  $-20\%$ 。由于订正前 ISCCP 观测云量偏高的格点经订正后其值将变得更高, 所以在具体应用 ISCCP 资料时要有针对性的进行订正。

值得注意的是, 对比图 7a 和 7b 可以发现, ISCCP 与 CloudSat 在青藏高原地区观测到的昼夜云量变化差异较其它地区明显偏大。陈文源等(1995) 指出, 西藏地区云量的日变化有两种类型: 第一种称为高原主体型, 低云量占总云量的 80% 以上, 日变化特点是午后多云, 夜间和凌晨相对减

少。另一种是高原亚热带山地型, 总云量与低云量几乎相同, 日变化特点是当地时间 02 时、08 时云量较多, 14 时云量相对较少。两种类型云量日变化幅度均比较小, 小于 20%。这与图 7b 中 CloudSat 的云量昼夜变化特征具有较好的一致性。而图 7a 中所示的青藏高原地区 ISCCP 云量日变化幅度基本上都大于 20%, 最大超过 40%。比较图 3c 与图 4c 可以发现, 午间青藏高原地区 ISCCP 与 CloudSat 云量一致性较好, 而凌晨两者的差异比较大, ISCCP 云量明显低于 CloudSat。这说明夜间 ISCCP 在该地区的云检测可能存在一定问题。由前文分析可知, ISCCP 夜间对于低云和薄云较低的检测能力可能是原因之一。为了验证这个推测, 本文使用 CloudSat 资料统计了夜间单层低云(云顶

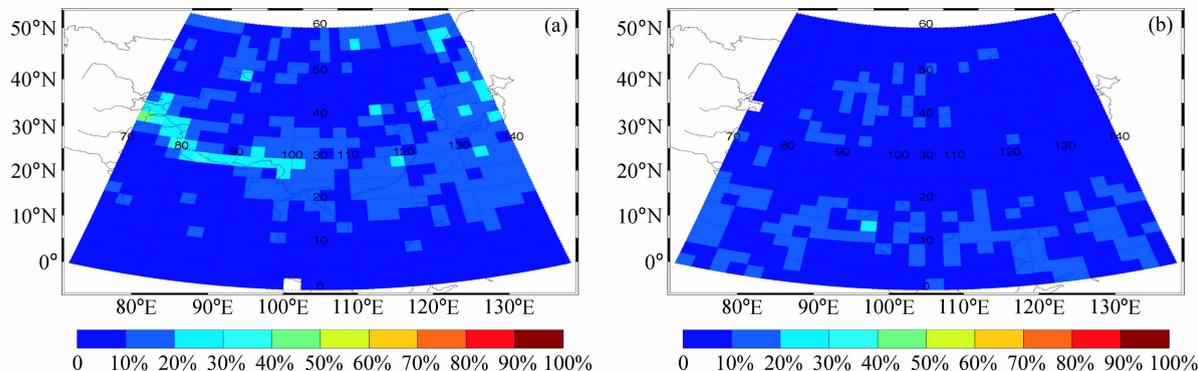


图 9 夜间 (a) 单层低云和 (b) 薄高云 CloudSat 云量分布

Fig. 9 Geographic distributions of cloud amounts from CloudSat at night; (a) Low single layer cloud; (b) high thin cloud

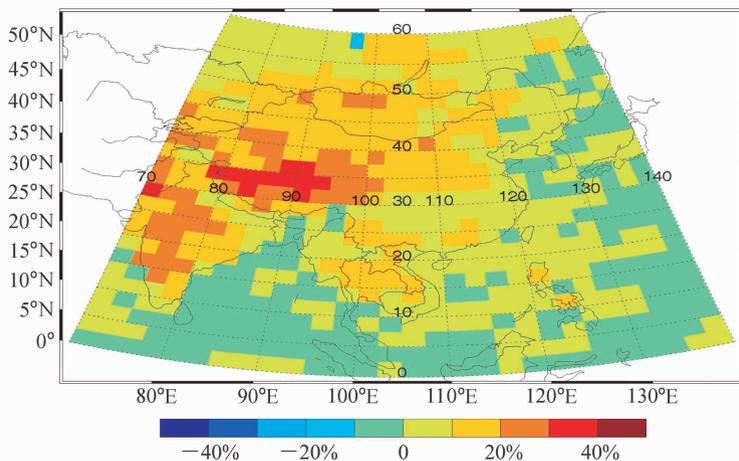


图 10 边缘云订正后的 ISCCP 云量昼夜差分布

Fig. 10 Geographic distribution of mean ISCCP cloud amount differences between day and night with modification of marginal cloud

高度低于 2 km) 和单层薄高云 (云底高度高于 7 km, 云厚小于 2 km) 的云量分布 (图 9)。从图 9 中可以看到, 青藏高原主体上单层低云和薄高云的云量并不比其他地区多, 所以 ISCCP 对夜间低云和薄高云较弱的检测能力并不是造成该地区 ISCCP 夜间云量偏少的主要原因。

前文提到边缘云对 ISCCP 云量存在一定的影响, 所以这里对 ISCCP 白天和夜间的云量分别进行边缘云订正 (图 10) 以确定其是否为青藏高原昼夜云量差偏大的原因之一。从图 10 可以看到, ISCCP 云量经过边缘云订正后, 青藏高原地区的云量昼夜变化有所减少, 所以我们推断 ISCCP 边缘云的存在可能是青藏高原昼夜云量变化偏大的原因之一。此外, Rossow 等 (1989) 指出 ISCCP 对于冰雪下垫面上空的云检测存在一定的偏差, 因此, 这也可能是青藏高原 ISCCP 云量昼夜差偏大的原

因, 具体情况有待进一步研究。

## 5 结论与讨论

通过利用 2006 年 7 月至 2007 年 6 月的 CloudSat 和 ISCCP 产品数据, 我们分别对比分析了凌晨和午间中国及周边地区 CloudSat 和 ISCCP 年平均云量的分布特征, 并比较了两者昼夜变化的差异, 得到以下结论:

(1) 中国及周边地区 ISCCP 与 CloudSat 年平均总云量在区域分布形式上, 午间与凌晨总体上均比较一致, 即相对多云与少云中心吻合较好。

(2) 研究区域内 ISCCP 与 CloudSat 年平均总云量在量值上均存在一定差异。午间, 中国及周边地区年平均云量 ISCCP 为 69%, CloudSat 为 78%; 凌晨, ISCCP 为 61%, CloudSat 为 76%。总体上, ISCCP 云量低于 CloudSat 云量, 青藏高原、帕米尔

高原、横断山脉、云贵高原以及印度半岛南端和热带部分岛屿偏差最大，夜间比白天差异更明显。

(3) 无论午间、凌晨，中国及周边地区 ISCCP 与 CloudSat 云量差值均随 CloudSat 云量的增大而呈线性变化，即在 CloudSat 少云区 ISCCP 略有偏高，而在多云区则显著偏低。

(4) 在海洋上，ISCCP 年平均云量的昼夜变化与 CloudSat 云量昼夜变化比较一致，而在陆地上，ISCCP 云量昼夜变化大于 CloudSat，青藏高原地区最显著。

通过对 CloudSat 与 ISCCP 年平均云量的比较分析，我们发现两者白天的一致性好于夜间，这就使得两者的云量昼夜变化存在一定的差异。在海洋上以及中国大陆东南和东北部分地区，CloudSat 与 ISCCP 云量昼夜变化比较一致，而在研究区域西北部以及印度半岛地区，两者云量昼夜变化存在非常大的差异，尤其以青藏高原地区最为明显。从 3.1~3.3 节的分析可知，导致 CloudSat 与 ISCCP 云量昼夜变化分布的差异主要是由于两者夜间云量分布差异造成的，而造成两者夜间云量分布差异的原因，上文中我们主要归结于夜间 ISCCP 对云探测存在的各种问题，而认为 CloudSat 的统计结果是可靠的。现将原因分析如下，其一，影响 CloudSat 云量可靠性的因素主要在于本文对 CloudSat 资料格点化处理的准确性，即格点内的样本是否具有足够的代表性。按照本文对 CloudSat 的格点化处理方式，假如一年的样本数没有足够的代表性，那么 CloudSat 云量的大小分布应该是随机的（例如，我们得到的 CloudSat 月平均云量分布）。然而，云量年平均的统计结果表明，CloudSat 云量的分布具有明显的区域性特点，且与 ISCCP 云量的相对多云与少云中心吻合较好。因此，我们认为对 CloudSat 资料的格点化处理是合理的。其二，白天 CloudSat 与 ISCCP 的云量分布以及海上两者云量昼夜变化分布都比较一致，由于 CloudSat 不受时间和地理环境的限制和影响，那么夜间 CloudSat 云量以及陆上 CloudSat 的云量昼夜变化也应该是合理的，所以，我们将夜间 CloudSat 和 ISCCP 云量分布的差异以及两者陆上较大的云量昼夜变化差异归因于 ISCCP 的误差。综上所述，我们认为青藏高原地区夜间的 ISCCP 云量资料可能存在一定的问题，故在使用该地区夜间的 ISCCP 云量资料时应该尤其

慎重。

此外，需要注意的是，虽然总体上相对于 ISCCP 而言，CloudSat/CALIPSO 资料是比较准确的，但是 CloudSat/CALIPSO 本身对云的观测也存在一定的不确定性，例如，可能会将气溶胶误识为云等。因此，在下一步的工作中，我们会考虑利用与 CloudSat 几乎同步观测的 Aqua 卫星上的 MODIS 数据进行进一步的对比验证。

**致射** 感谢美国 NASA Langley Distributed Active Archive Center 为本工作提供了 ISCCP D2 数据，以及美国 NASA CloudSat Data Processing Center 提供了 CloudSat 数据。

### 参考文献 (References)

- Bergman J W, Salby M L. 1996. Diurnal variations of cloud cover and their relationship to climatological conditions [J]. *J. Climate*, 9: 2802–2820.
- Cairns B. 1995. Diurnal variation of cloud from ISCCP data [J]. *Atmospheric Research*, 37: 133–146.
- 陈勇航, 陈艳, 黄建平, 等. 2007. 中国西北地区云的分布及其变化趋势 [J]. *高原气象*, 26 (4): 741–748. Chen Yonghang, Chen Yan, Huang Jianping, et al. 2007. Distribution and variation trend of cloud over northwestern China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (4): 741–748.
- 陈文源, 马金福, 孟彬, 等. 1995. 西藏气候与军事 [M]. 北京: 解放军出版社, 67–72. Chen Wenyuan, Ma Jinfu, Meng Bin, et al. 1995. *The Climate and Military of Tibet (in Chinese)* [M]. Beijing: PLA Press, 67–72.
- 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 [J]. *科学通报*, 49 (11): 1105–1111. Ding Shouguo, Shi Guangyu, Zhao Chunsheng. 2004. Analyzing global trends of different cloud types and their potential impacts on climate by using the ISCCP D2 dataset [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 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 [J]. *应用气象学报*, 16 (5): 670–677. Ding Shouguo, Zhao Chunsheng, Shi Guangyu, et al. 2005. Analysis of global total cloud amount variation over the past 20 years [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 16 (5): 670–677.
- Gruber A. 1976. An estimate of the daily variation of cloudiness over the GATE A/B area [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 104: 1036–1039.
- Harrison E F, Minnis P, Barkstrom B R, et al. 1990. Seasonal-variation of cloud radiative forcing derived from the earth radiation budget experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 95 (D11): 18687–18703.
- 李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征 [J]. *大气科学*, 33 (4): 698–

707. Li Jiming, Huang Jianping, Yi Yuhong, et al. 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based lidar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 698-707.
- 刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 2003. 中国地区云的气候特征分析 [J]. 气象学报, 61 (4): 466-473. Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua, et al. 2003. Climatic analysis of the cloud over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (4): 466-473.
- 刘奇. 2007. 基于 ISCCP 及 TRMM 观测的热带降水云与非降水云差异的研究 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文. Liu Qi. 2007. The property differences between precipitating clouds and non-precipitating clouds over global tropics based on ISCCP& TRMM measurements [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China.
- 刘瑞霞, 刘玉洁, 杜秉玉. 2004. 中国云气候特征的分析 [J]. 应用气象学报, 15 (4): 468-476. Liu Ruixia, Liu Yujie, Du Bingyu. 2004. Cloud climatology characteristics of China from ISCCP data [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 15 (4): 468-476.
- 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 2007. 一维辐射对流模式对云-辐射强迫的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 31 (3): 486-494. Liu Yuzhi, Shi Guangyu, Zhao Jianqi. 2007. A study of the radiative forcing of clouds by using a one-dimensional radiative convective model [J]. Chinese Journals of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 486-494.
- Minnis P, Harrison E F. 1984. Diurnal variability of regional cloud and clear-sky radiative parameters derived from GOES data. Part II: November 1978 cloud distributions [J]. J. Climate Appl. Meteor., 23: 1032-1051.
- Rossow W B, Garder L C, Laci A A. 1989. Global, seasonal cloud variations from satellite radiance measurements. Part I: Sensitivity of analysis [J]. J. Climate, 2: 419-458.
- Rossow W B, Garder L C. 1993a. Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible radiances for ISCCP [J]. J. Climate, 6: 2341-2369.
- Rossow W B, Garder L C. 1993b. Validation of ISCCP cloud detections [J]. J. Climate, 6: 2370-2393.
- Rossow W B, Schiffer R A. 1991. ISCCP cloud data products [J]. Bull. Amer. Meteor. Sci., 72: 2-20.
- Rossow W B, Walker A W, Garder L C. 1993. Comparison of ISCCP and other cloud amounts [J]. J. Climate, 6: 2394-2418.
- Salby M L, Hendon H H, Woodberry K, et al. 1991. Analysis of global cloud imagery from multiple satellites [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 72: 467-480.
- Sassen K, Wang Z, Liu D. 2008. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) measurements [J]. J. Geophys. Res., 113, D00A12, doi: 10.1029/2008JD009972.
- Sassen K, Wang Z. 2008. Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of results [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L04805, doi: 10.1029/2007GL032591.
- Schiffer R A, Rossow W B. 1983. The international Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The first project of the World Climate Research Program [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 64: 779-784.
- Slingo A, Wilderspin R C, Brentnall S J. 1987. Simulation of the diurnal cycle of outgoing longwave radiation with an atmospheric GCM [J]. Mon. Wea. Rev., 115: 1451-1457.
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83: 1771-1790.
- Warren S G, Hahn C J, London J, et al. 1986. Global distribution of total cloud and cloud type amounts over land [R]. NCAR Tech. Note TN-273+STR/DOE Tech. Rep. ER/60085-HI, 29pp. +200 maps. [NTIS number DE87-00-6903].
- 汪宏七, 赵高祥. 1994. 云和辐射 (I): 云气候学和云的辐射作用 [J]. 大气科学, 18 (增刊): 910-932. Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. 1994. Cloud and radiation. I: Cloud climatology and radiative effects of clouds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (Suppl.): 910-932.
- 魏丽, 钟强, 侯萍. 1996. 中国大陆卫星反演云参数的评估 [J]. 高原气象, 15 (2): 147-156. Wei Li, Zhong Qiang, Hou Ping. 1996. Evaluation on cloud variables from ISCCP data over Chinese continent [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 15 (2): 147-156.
- 魏丽, 钟强. 1997. 青藏高原上的气候学特征 [J]. 高原气象, 16 (1): 10-15. Wei Li, Zhong Qiang. 1997. Characteristics of cloud climatology over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 16 (1): 10-15.
- Wilson C A, Mitchell J F B. 1986. Diurnal variation and cloud in a general circulation model [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112: 347-369.
- 翁笃鸣, 韩爱梅. 1998. 我国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析. 应用气象学报 [J], 9 (1): 32-37. Weng Duming, Han Aimei. 1998. Comparison between total cloudiness from satellite cloud pictures and ground observations over China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (1): 32-37.
- 赵高祥, 汪宏七. 1994. 云和辐射 (II) 环流模式中的云和云辐射参数化 [J]. 大气科学, 18 (增刊): 933-958. Zhao Gaoxiang, Wang Hongqi. 1994. Cloud and radiation. II: Cloud and cloud radiation parameterizations in general circulation models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (Suppl.): 933-958.