

吕巧谊, 张玉轩, 李积明, 等. 2020. 单层不同类型云系统的特性及高云重叠的影响 [J]. 大气科学, 44(1): 183–196. LÜ Qiaoyi, ZHANG Yuxuan, LI Jiming, et al. 2020. Characteristics of Various Types of Cloud Systems in Single Layers and the Associated Impacts of the Overlapping High Clouds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(1): 183–196. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18261

单层不同类型云系统的特性及高云重叠的影响

吕巧谊^{1,2} 张玉轩² 李积明¹ 简碧达¹

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 厦门市气象局海峡气象开放实验室, 厦门 361012

摘要 通过时空匹配主动遥感产品 (2B-CLDCLASS-LIDAR) 的云类型参数与被动遥感产品 (Clouds and the Earth's Radiant Energy System-Single Scanner Footprint: CERES-SSF) 的云宏观物理特性和大气层顶处辐射通量参数 (2007/01~2010/12), 本文在全球尺度上统计分析了不同类型单层云以及高云重叠的双层云的云特性和大气层顶云辐射强迫。尽管主动和被动卫星遥感产品相互独立, 但被动遥感反演的云光学厚度和云相态等参数能够合理反映不同类型云之间的差异。不同类型单层云表现出的云特性差异能进一步影响大气层顶的辐射能量收支。本文通过对比不同类型单层云的 Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) 视场样本数量随短波和长波云辐射强迫的分布, 发现它们的高值区形状、位置和面积存在差异, 反映了其各自独特的辐射特性。层积云的 CERES 视场样本数量密集区类似椭球结构, 而其它云类型则趋于指数曲线结构。当进一步考虑高云重叠的影响时, 统计结果表明: 重叠的高云比高云单层状态有更蔽光和更厚的云体; 高云重叠的底层云类型则比其单层状态有更透光和更薄的云体; 高云重叠的双层云 (除了高云重叠积云) 对地气系统的净冷却效应要弱于其低层云类型单层状态。本文研究结果旨在加深理解云辐射反馈机制, 并为改进模式中云重叠参数化方案提供一定观测依据。

关键词 单层云 双层云 云特性 云辐射强迫

文章编号 1006-9895(2020)01-0183-14

中图分类号 P422.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18261

Characteristics of Various Types of Cloud Systems in Single Layers and the Associated Impacts of the Overlapping High Clouds

LÜ Qiaoyi^{1,2}, ZHANG Yuxuan², LI Jiming¹, and JIAN Bida¹

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

Abstract In this study, we temporally and spatially obtain the cloud types from an active sensor product (2B-CLDCLASS-LIDAR) and the cloud properties and the associated radiation fluxes at the top of the atmosphere from a passive sensor product (CERES-SSF) (01/2007–12/2010). Further, we statistically and globally analyze the properties and instantaneous radiative forcings of various types of single- and two-layer clouds overlapping with high clouds located at the top of atmosphere. Although the aforementioned two products are independent, the passive sensor results denote reasonable contrasts between various types of single-layer clouds in terms of their optical depth, phases, and other

收稿日期 2018-09-05; 网络预出版日期 2019-05-14

作者简介 吕巧谊, 男, 1989年出生, 博士, 主要从事云辐射特性研究。E-mail: lvqy12@lzu.edu.cn

通讯作者 李积明, E-mail: lijiming@lzu.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41805028、41575015, 福建省气象局青年科技专项2018Q02

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41805028, 41575015), Youth Science Foundation of Fujian Province (Grant 2018Q02)

parameters. The differences between the cloud properties of various types of single-layer clouds can significantly affect the radiation budget at the top of the atmosphere. By comparing the distributions of the CERES sample numbers with the short- and longwave radiative forcings of clouds, we denote that their high-value regions differ in terms of the shape, location, and area; further, we indicate the particular radiative characteristics of different single-layer cloud types. The dense area of the CERES-footprint sample number in case of the stratocumulus type cloud is shaped somewhat similar to an ellipsoid, whereas those of the remaining single-layer cloud types tend to resemble an exponential curve. Further consideration of the impacts of the overlapping high clouds reveals that the overlying high clouds have more opaque and thicker cloud bodies when compared with those contained in single-layer high clouds, that the underlying cloud types tend to be more transparent and thinner when compared with their corresponding single-layer cloud types, and that the two-layer cloud types overlying high clouds, excluding high clouds that overlap cumulus, exhibit weaker cooling impacts on the Earth's atmosphere when compared with those exhibited by their underlying single-layer cloud types. The study results provide a detailed understanding of the cloud-radiation feedback and an observational basis for improving the cloud parameterization schemes in models.

Keywords Single-layer clouds, Two-layer clouds, Cloud characteristics, Cloud radiative forcing

1 引言

云是地球一大气辐射收支和水循环中重要的调控因子，对其宏观和微观物理特性以及辐射特性的认识不仅直接影响着大气环流模式（GCMs）的模拟结果，也决定着气候变化预测的准确性（汪宏七和赵高祥，1994；赵高祥和汪宏七，1994；汪方和丁一汇，2005；张华和荆现文，2010；Xie et al., 2013）。而云类型之间不同的宏、微观物理特性导致其辐射特性存在显著的差异。譬如：积云表现为对地球一大气系统的显著冷却效应，而光学薄卷云则表现为加热效应（Hartmann et al., 1992；Chen et al., 2000；Sun et al., 2011）。并且不同云类型的全球分布和发生频率随气候变化而产生的变化将改变地气系统辐射能量收支、降水的分布态以及大气环流的强弱等（Sun et al., 2001；Warren et al., 2007；Eastman and Warren, 2010；Choi et al., 2014）。值得注意的是，时间不同云辐射强迫也存在差异，云在夜间为增温效应而在白天则为冷却效应（Garrett and Zhao, 2006；Zhao and Garrett, 2015）。此外，模式模拟不同云类型时产生的误差可能互相抵消，导致云的模拟结果与卫星观测值之间的差异较小，从而造成对模式模拟能力的错误认识（Lin and Zhang, 2004；Zhang et al., 2005；Zhao et al., 2012）。因此，不同类型云的宏、微观物理特性及辐射特性研究具有重要意义。

过去的一些研究基于不同数据集和研究方法讨论了不同云类型在全球或区域尺度上的辐射特性（Futyan et al., 2005；陈勇航等，2008；Eastman

et al., 2011；Morrison et al., 2011；张华等，2013）。其中一个方法是，在辐射传输模式中输入卫星反演的云宏、微观物理特性、气象场资料以及地面观测数据等，然后进行辐射通量计算。该方法的一个优势是能较好区分云的辐射强迫和其他影响因子，从而有效地研究不同云类型的云辐射强迫及其对大气加热率的影响（Chen et al., 2000；Thorsen et al., 2013）。然而，一些研究已经指出输入资料（尤其是云宏观、微观物理特性的资料）的精确度显著影响着大气辐射通量以及云辐射强迫的计算（Yan et al., 2011）。对不同卫星探测的云类型和辐射通量资料进行时空匹配的研究方法则可以避免辐射传输模式输入场以及模式假定条件带来的不确定性。近年来，主动遥感卫星 CloudSat 和 CALIPSO 积累了宝贵云垂直结构资料（Webb et al., 2001；Inoue and Ackerman, 2002；Li et al., 2011；Cho et al., 2008）；而 Aqua 卫星上搭载的 CERES 仪器也已获取了大量全球大气层顶辐射通量信息。并且这三颗卫星同属 A-Train 卫星集群，具有对同一地点的协同观测优势。因此，本文能够利用时空匹配的方法融合它们的观测资料，开展不同类型云尤其是多层云的辐射强迫研究。

由于过去星载探测手段的局限以及站点观测资料的稀缺，在国内外仍较少有研究关注多层云（Chen and Cotton, 1987；Huang et al., 2005, 2006；李积明等，2009；彭杰等，2013；王海波等，2018）。但已有研究表明，在大气中普遍存在着云层相互重叠的情况，并且重叠的云层能够通过改变大气加热率廓线影响云宏、微观物理特性，然

后再反馈到地气系统辐射能量收支中(王帅辉等, 2011; Christensen et al., 2013; Johansson et al., 2015)。基于卫星观测数据和区域大气模式系统RAMS (the Regional Atmospheric Modeling System) 的大涡模拟(LESs), Christensen et al. (2013)指出当自由对流云与层积云垂直重叠时, 自由对流云能够减弱层积云的云顶辐射冷却率。Yuan and Oreopoulos (2013)也发现重叠的高云能够改变大气加热率廓线, 从而使底层低云的云量、液态水路径和降水率等发生显著变化。因此, 重叠云层的云特性与地气系统辐射能量平衡的相互作用研究具有重要意义。

基于上述研究背景, 本文通过匹配主动(2B-CLDCLASS-LIDAR)和被动卫星遥感数据产品(CERES-SSF)研究了单层不同类型云的宏、微观物理特性及辐射特性, 并进一步分析在双层云中上层高云的存在对上下云层的宏、微观物理特性及大气层顶辐射通量收支的影响。

2 资料说明和研究方法

2.1 资料说明

Aqua 卫星为本文提供了单次扫描仪瞬时产品(CERES-SSF)。该产品结合分辨率为20 km的瞬时CERES宽频辐射通量、高分辨率成像仪, 比如中尺度分辨率成像光谱仪(MODIS)的云信息和气象场资料构建了一个齐全且高质量的云、气溶胶和辐射收支的数据集。CERES-SSF产品中多样的参数极大推动了云、气溶胶和辐射相互作用的研究(Chen et al., 2008; Su et al., 2008; Huang et al., 2009)。本文使用了该产品的云特性参数, 包括云顶和云底气压、云光学厚度、水粒子有效半径、冰粒子有效直径、液态水路径、冰水路径以及“晴空/层/重叠”。“晴空/层/重叠”参数包含四列数据分别代表了: 晴空的百分比(第一列)、仅低层云存在的百分比(第二列)、仅上层云存在的百分比(第三列)和重叠云层的百分比(第四列)。本文利用该参数确定CERES视场的云量以及云层重叠情况。值得注意的是, 每一个CERES视场的云层数量识别最多仅能到两层。此外, 我们利用云底气压与云顶气压相减得到云层的气压间隔。最后, 本文还使用了该产品的辐射参数, 包括CERES视场大气层顶处的短波和长波向上辐射通量。该数据集可

从 <http://ceres.larc.nasa.gov/> 网站下载获得。

CloudSat 卫星为本文提供云类型分类产品(2B-CLDCLASS-LIDAR)。该产品结合了 CALIOP 激光雷达(搭载于 CALIPSO) 和 CPR 雷达(搭载于 CloudSat) 的观测优势, 提高了云垂直结构观测和云相识别的精度(Wang and Sassen, 2007; Hu et al., 2009; Sassen et al., 2008)。同时, 该产品基于临界值方法和模糊分类理论赋予每个云层一种云类型(Wang and Sassen, 2007)。具体地, 该算法根据云雷达和激光雷达识别的云层的水平和垂直连续性来寻找云团簇。当云团簇被找到, 云团簇平均特性、云顶高度的空间不均一性以及激光雷达和云雷达的最大信号就被送到模糊分类器里进行分类最终确定一种云类型。云类型包括: 高云、高层云、高积云、层积云、层云、积云、雨层云和深对流云。其中, 高云包含卷云、卷积云和卷层云, 而积云包含浓积云和晴天积云。值得说明的是, 该产品难以有效区分云特性相似的层积云和层云, 因此本研究将这两种云类型归为一类统一称为层积云。本文使用了该产品 CloudSat 数据廓线的云层数和云类型参数。CloudSat 数据廓线的水平和空间分辨率分别为1.4 km 和 240 m, 对云层数量的识别上限是10 层。该数据集可从 CloudSat 数据处理中心网站上下载(<http://cloudsat.cira.colostate.edu>[2018-09-05])。

2.2 数据匹配和云辐射强迫计算

本文通过时空匹配的方法在全球尺度上融合了2B-CLDCLASS-LIDAR产品和CERES-SSF产品四年(2007/01至2010/12)的观测资料, 并根据CERES视场中CloudSat数据廓线的云类型信息, 将符合条件的CERES视场确定为某一云类型, 以分析不同类型云系统的宏、微观物理特性及云辐射强迫。值得强调的是, 本文所得研究结果均为针对全球尺度四年的融合观测资料处理得到的。数据匹配的详细流程如图1。首先, 当CloudSat数据廓线和CERES视场的时间差异和位置差异分别小于90 s 和 10 km 时, 每个 CERES 视场可对应多条 CloudSat 数据廓线。由于 CERES 视场水平分辨率与 CloudSat 数据廓线的差异, 每个 CERES 视场有0 到 20 条相应的 CloudSat 数据廓线。为提高 CloudSat 数据廓线决定 CERES 视场的云类型的可信度, 本文仅挑选 CloudSat 数据廓线数大于等于10 的 CERES 视场来确定其云类型。而根据 CERES 视场中 CloudSat 数据廓线判定的云类型, 可以得到

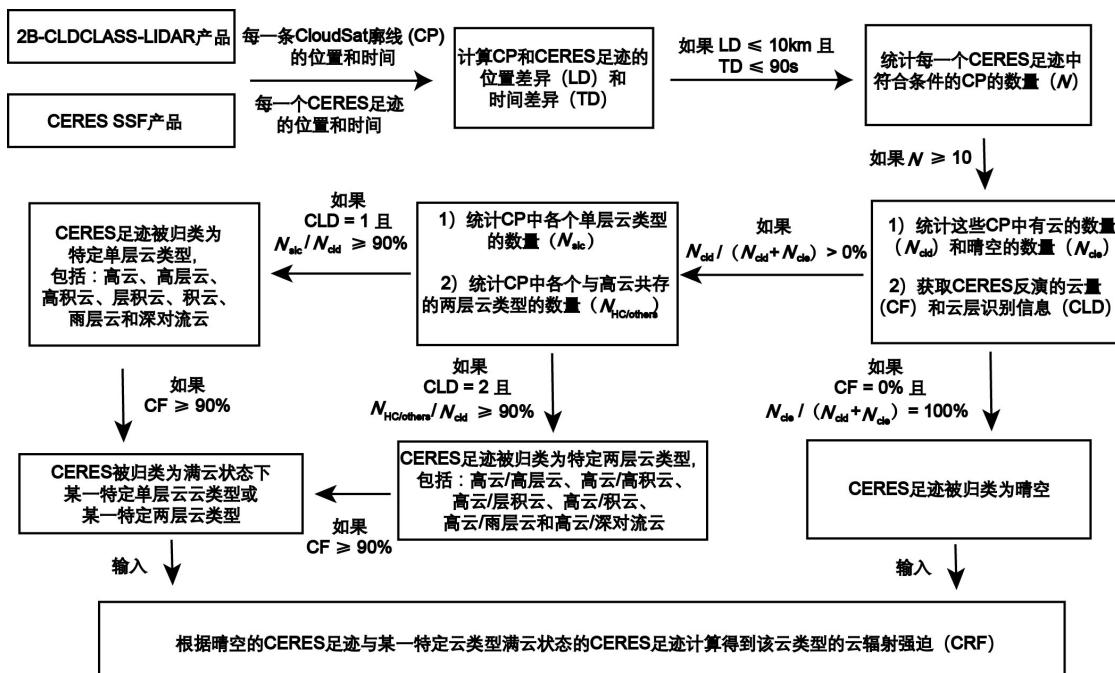


图1 CERES 视场与 CloudSat 数据廓线的匹配流程，并最终确定符合条件的 CERES 视场的云类型

Fig. 1 Schematic of a CERES footprint matched with the CloudSat data profiles and ultimate assignment of the cloud type to the appropriate CERES footprint

不同云类型的分数（或晴空的分数），即其廓线数量占有云出现（或所有的）的廓线数量的比例。当晴空分数达到 100% 且“晴空/层/重叠”参数第一列为 100% 时，确定 CERES 视场为晴空。当某一类型单层云（或高云重叠的双层云）的分数超过 90% 且“晴空/层/重叠”的第三列等于 0%（或 100%），就确定 CERES 视场为该云类型。其它情况的 CERES 视场不在本文的研究范围内。最终，将确定符合条件的 CERES 视场为：晴空、不同类型的单层云或双层云。其中，单层云的类型包括：高云、高层云、高积云、层积云、积云、雨层云和深对流云。而双层云的类型则包括：高云重叠高层云（高云/高层云）、高云重叠高积云（高云/高积云）、高云重叠层积云（高云/层积云）、高云重叠积云（高云/积云）、高云重叠雨层云（高云/雨层云）和高云重叠深对流云（高云/深对流云）。

层积云和高云/层积云分别为单层云和双层云中 CERES 视场样本数量最大的云类型，尤其是层积云样本数量甚至超过两百万（图 2 可见）。许多研究也已经指出层积云在全球范围内出现频繁，尤其是在哈德莱环流下沉支的海洋区域（Hahn 和 Warren, 2007; Li et al., 2015）。在单层云中，深对流云的满云分数最大，高达 99.99%。这表明，

深对流云的水平尺度通常能够超过 CERES 视场的水平分辨率。满云分数较大（>90%）的单层云还有：雨层云（98.82%）、层积云（91.98%）和高层云（91.48%）。而积云的满云分数在单层云中最小，仅为 44.58%。积云 CERES 视场云量小于 25% 的样本频率远大于其他类型的单层云，这可能是因为积云水平尺度往往要低于 CERES 视场的水平分辨率。双层云的满云分数都超过 99%，表明多层云通常有较大的覆盖面积。在本文接下来的研究中，在保证足量样本的前提下仅使用 CERES 视云量超过 90% 的样本，尽可能剔除云量在对比云类型间云特性和辐射特性差异的影响。

云辐射强迫是衡量云与辐射相互作用程度的重要参数。通常，云辐射强迫被定义为晴空条件下和有云条件下向上辐射通量的差值（Ramanathan et al., 1989; Chen et al., 2000; Garrett and Zhao, 2006; Allan, 2011; Li et al., 2011）。根据 Li et al. (2011) 的定义，首先我们计算了全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点上四季平均的晴空大气层顶短波和长波向上辐射通量，其次根据不同云类型样本所在经纬度和季节，将其与云类型样本对应波段的大气层顶向上辐射通量相减，以获得不同云类型样本的短波和长波云辐射强迫。结合主被动遥感来识别云的存在保证了

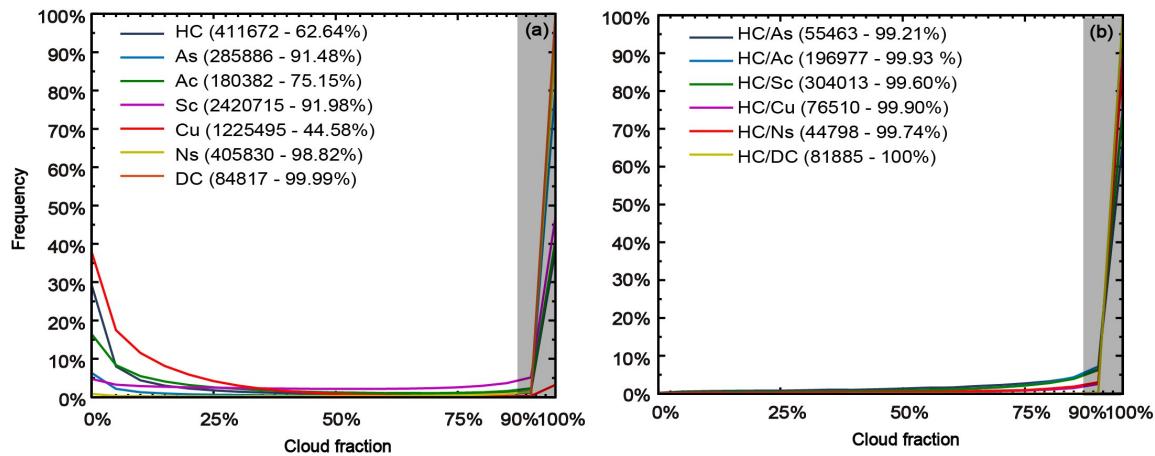


图2 不同类型的(a)单层云和(b)双层云CERES视场云量的样本数量频率分布。高云: HC; 高层云: As; 高积云: Ac; 层积云: Sc; 积云: Cu; 雨层云: Ns; 深对流云: DC。图例中括号列出各云类型CERES视场样本数量和满云分数。满云分数是CERES视场云量大于90%的样本数量(灰色阴影区)占总样本数量的比例

Fig. 2 The frequency distributions of the sample numbers of the cloud fraction in the CERES field (CERES-CF) for various types of (a) single-layer clouds and (b) two-layer clouds. HC: High Cloud; As: Altostratus; Ac: Altocumulus; Sc: Stratocumulus; Cu: Cumulus; Ns: Nimbostratus; DC: Deep convection. In the legend parentheses, the sample number and overcast fraction of the individual cloud type are presented, respectively. The overcast fraction is defined as the ratio between overcast sample numbers with a CERES-CF greater than 90% (marked in the gray shaded area) and the total number of samples

CERES视场为晴空的准确度,能够提高云辐射强迫计算的精度(Ramanathan, 1987)。

3 单层不同类型云的宏观、微观特性及辐射特性

图3给出了不同类型单层云CERES视场云宏观特性的样本频率分布。对于每种云类型的某一云特性而言,其某一固定范围内样本频率定义为该范围内样本数量占总样本数量的比例。尽管云类型参数和云特性参数分别来源于两个独立的产品,但匹配的资料表明CERES视场的云特性能够合理地表征基于CloudSat-CALIPSO联合产品确定的云类型。譬如:在所有云类型中,深对流云的云光学厚度最大(变化范围是20~130),并且其云层气压间隔的样本频率峰值可达235 hPa。由于深对流云的云顶高度较高,大气的高层低温使其云滴相态主要表现为冰相。可以看到,深对流云的冰相样本频率(高达90%)远大于其它云相(图3f)。相反地,由于层积云的云顶高度较低,其水相样本频率在所有云类型中最大(78%)且冰相样本频率极小。

受不同的气象场条件的影响,不同云类型的云特性参数存在明显差异。譬如:高层云的样本频率峰值对应的云层气压间隔和冰粒子有效直径分别约

160 hPa 和 72 μm, 显著大于高积云的95 hPa 和 16 μm。这可能是因为,相比高积云,高层云垂直发展高度能够到达更低的大气温度,使得其云层气压间隔和冰粒子有效直径更大。2B-CLDCLASS-LIDAR产品对云类型的识别方法也表明,高层云的云特征表现为云层厚度中等且以冰相为主,而高积云表现为浅薄或中等的云层厚度且以水相和混合相态为主(Wang and Sassen, 2001; Wang et al., 2013)。统计CERES反演的相态参数也指出,高层云的冰相样本频率可达85%,而高积云的冰相频率仅有13%。由于本文所用CERES反演的云相参数将混合相归类到不确定相态中,而高积云不确定相样本频率可达54%,这与Zhang et al. (2010)的研究结果即全球范围广泛存在着以混合相态为主的高积云相一致。值得说明的是,确定CERES样本为某一云类型时的偏差(即CERES足迹中未被CloudSat扫描的区域存在大量其他类型云),以及CERES反演云特性时存在的不确定性都可能导致部分云类型的云特性及其差异不符合预期。例如,高层云的水粒子有效半径大于雨层云和深对流云。

不同云类型之间云特性的差异显然会进一步影响其辐射特性的差异。本文通过给出各个类型单层云CERES视场样本数量随大气层顶处短波和长波云辐射强迫的概率分布(见图4)来讨论其云辐射

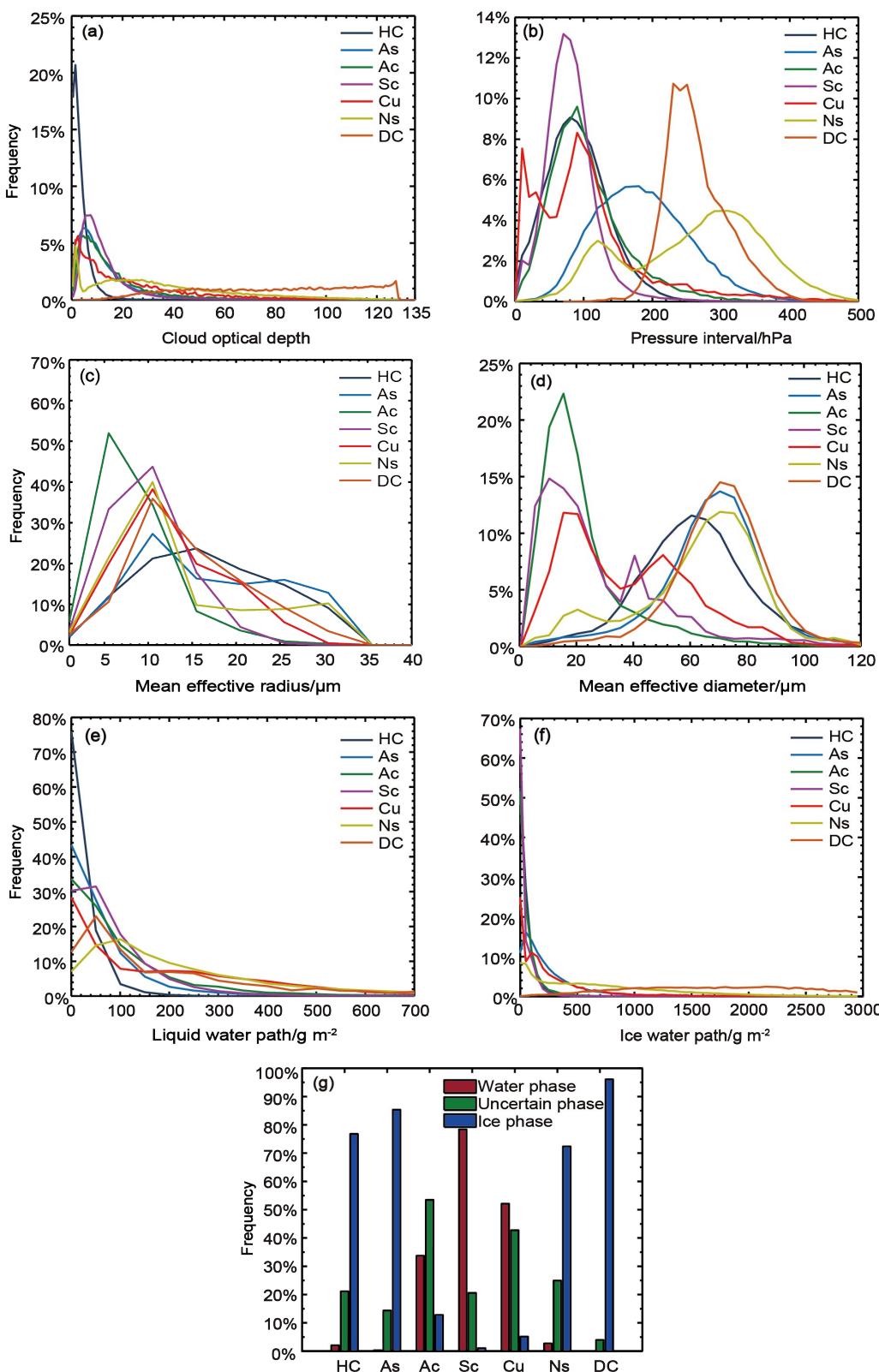


图3 不同类型单层云CERES视场 (CERES视场云量大于90%) 的 (a) 云光学厚度、(b) 云层气压间隔、(c) 水粒子有效半径、(d) 冰粒子有效直径、(e) 液态水路径、(f) 冰水路径以及 (g) 云相的样本频率分布

Fig. 3 The sample frequency distributions of the (a) cloud optical depth, b) pressure interval, (c) mean effective radius of the water particles, (d) mean effective diameter of the ice particles, (e) liquid water path, (f) ice water path, and (g) cloud phases for various types of single-layer clouds (with CERES-CF greater than 90%)

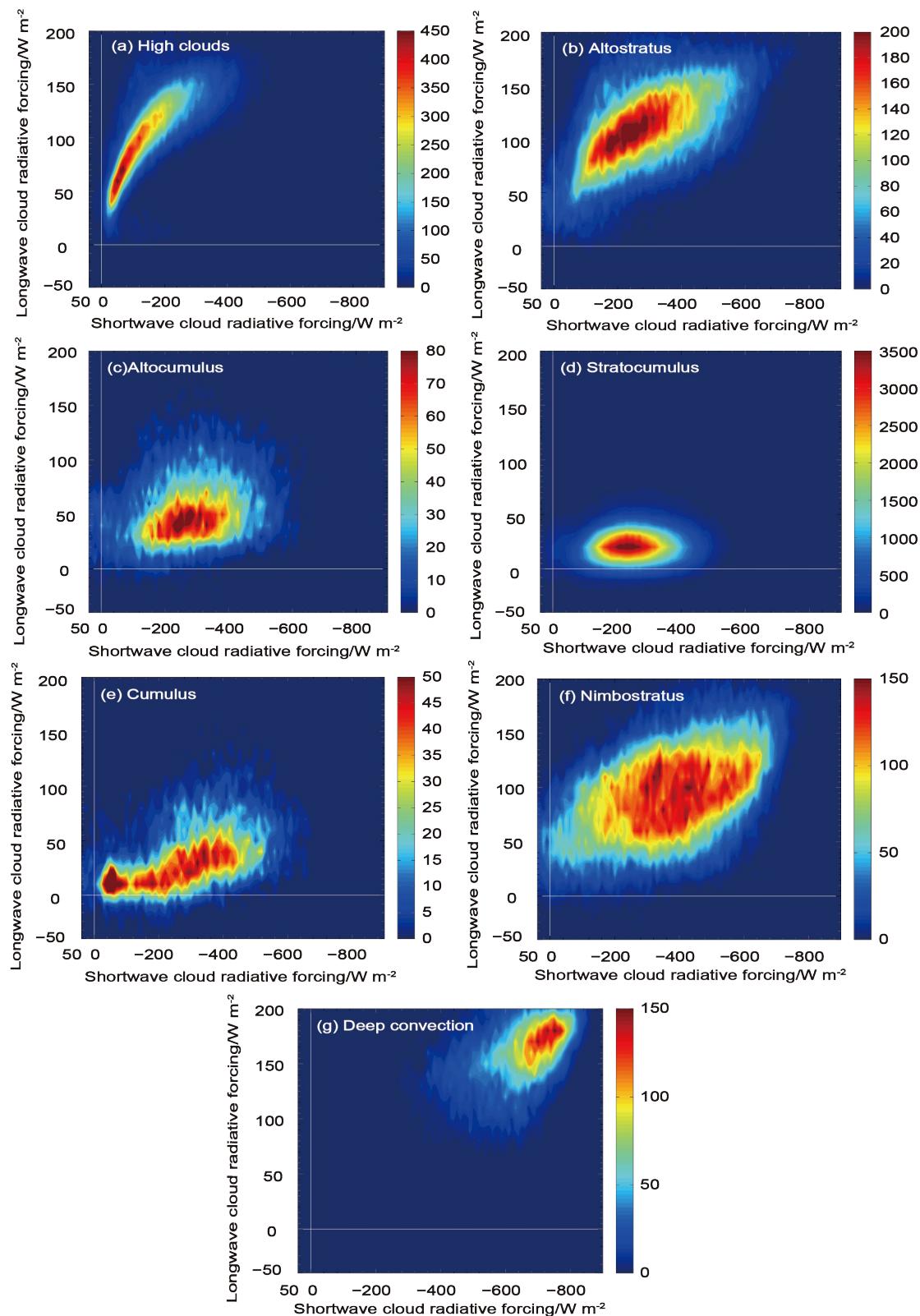


图4 不同类型单层云CERES视场样本数量(阴影)随大气层顶处短波(x轴)和长波(y轴)云辐射强迫的概率密度分布: (a) 高云; (b) 高层云; (c) 高积云; (d) 层积云; (e) 积云; (f) 雨层云; (g) 深对流云

Fig. 4 Probability density plots of shortwave and longwave cloud radiative forcing pairs at the top of the atmosphere for various types of single-layer clouds in terms of the sample number (shaded): (a) High clouds; (b) altostratus; (c) altocumulus; (d) stratocumulus; (e) cumulus; (f) nimbostratus; (g) deep convection

特性。层积云 CERES 视场样本数量密集区类似一个椭球体，其短波云辐射强迫绝对值要显著强于长波云辐射强迫。这主要是因为：(1) 层积云中大量存在的液态水滴使其反照率强于地面导致地气系统的强烈冷却；(2) 层积云的云体温度与地面温度的差异较小导致其抑制云下大气和地面向外发射长波辐射的能力较弱。该研究结果与 Chen et al. (2010) 的结论一致。层积云的这种独特辐射特性将使其在其盛行区（譬如：哈德莱环流下沉支等）的地气系统辐射收支、大气环流以及气候变化中扮演着极为重要的角色 (Stephens and Greenwald, 1991)。

除层积云以外，其它云类型 CERES 视场样本密集区都明显表现出长波云辐射强迫随短波云辐射强迫的绝对值增加。例如，高云样本密集区结构狭窄趋于指数曲线，其长波云辐射强迫在短波云辐射强迫从 0 W m^{-2} 减少到约 -300 W m^{-2} 时由 25 W m^{-2} 显著增加至 150 W m^{-2} 。高云 CERES 视场样本密集区靠左部分的样本其短波与长波云辐射强迫之和大于 0 W m^{-2} ，表现为对地气系统的净温室效应。这可能是因为本文的高云包含薄卷云，而薄卷云表现为对地气系统的温室效应 (Haladay and Stephens, 2009; Su et al., 2009; Sun et al., 2011)。Zhang et al. (2010) 指出高层云的出现往往与天气尺度运动相关并在较强上升气流的带动下云滴主要为冰粒，而高积云主要以液态和过冷水的形式存在。通过对高层云和高积云的辐射特性，研究结果表明其辐射特性存在显著差异。由图 4b 和 c 可以看到，高层云和高积云的 CERES 视场的样本密集区位置分别位于上对角和下对角的区域。这可能与前面提及的高层云和高积云在云层气压间隔和相态频率上存在的差异相关。雨层云样本密集区的面积明显大于其他云类型，这可能与其云特性的变化范围较大紧密相关。例如，其云层气压间隔的样本频率呈双峰型分布，且两峰值对应的云层气压间隔分别为 120 hPa 和 300 hPa 。值得说明的是，因为太阳入射辐射能量和地球向外出射辐射能量存在季节内变化，所以在计算云辐射强迫时把晴空向外出射辐射通量定义为季节平均的定常值会产生一定误差。由于积云存在时大气层顶处向外出射长波辐射通量与晴空的差异可能小于前述误差，可以看到存在小部分积云 CERES 样本的长波云辐射强迫为负值的异常情况。

4 高云重叠的双层云

已有研究指出，在全球范围内普遍存在高云与低云重叠的多层云 (Yuan and Oreopoulos, 2013; Christensen et al., 2013)。然而，仍有较少研究关注上层的高云与下层的低云通过改变大气辐射能量分布对上下云层宏、微观物理特性的影响。譬如，当高云重叠时，高云一方面阻挡了部分到达底下云层的短波辐射能量，另一方面其云层底部对大气的长波辐射加热能够减弱底下云层顶的长波辐射冷却率 (Chen and Cotton, 1987; Christensen et al., 2013)。相似地，底下云层通过反射太阳辐射能量增强了上层高云对短波辐射能量的吸收，并且其对云顶处大气的长波辐射冷却也会影响高云的发展。基于此，本研究进一步对比双层云的上下云层的云宏、微观物理特性与其对应单层状态的差异，以加深理解云层间相互作用对云层宏、微观特性的影响。

图 5 分别给出了单层云和双层云的各个云层在不同宏、微观物理特性上的统计值。譬如：高云（单层云）代表单层高云的数据；而高云（高云/高层云）代表高云/高层云的上层高云的数据，高层云（高云/高层云）代表高云/高层云的下层高层云的数据。红色柱状条为不同类型单层云的云层数据，蓝色柱状条为双层云的上下云层数据。通过对比图 5a 的红色与蓝色柱状条标记的红圈，我们发现所有双层云的上层高云都表现出相对单层高云更大的云光学厚度。具体地，由表 1 可发现：高云/深对流云、高云/积云和高云/雨层云的上层高云分别比单层高云的云光学厚度大 40.2、17.0 和 14.1。在其它云特性方面，所有双层云的上层高云表现出相比单层高云更大的云层气压间隔和冰水路径，但较小的冰粒子有效直径。譬如，高云/深对流云、高云/积云和高云/雨层云的高云分别比单层高云的云层气压间隔（或冰水路径）大 115.6 hPa (743.2 g m^{-2})、 61.9 hPa (164.5 g m^{-2}) 和 88.0 hPa (142.2 g m^{-2})。而高云/高积云、高云/层积云和高云/积云的上层高云则明显比单层高云的冰粒子有效直径小 37.2、29.5 和 $24.2 \mu\text{m}$ 。当高云重叠时，下层云类型的云光学厚度大都表现为低于其单层云状态。譬如：高云/深对流云、高云/雨层云和高云/高层云的下层云类型在光学厚度上比其单层云状态小 49.4、10.6 和 5.6。同样地，所有下层云类型的云层气压间隔也都比其单层云状态更小。特别是，高云/深

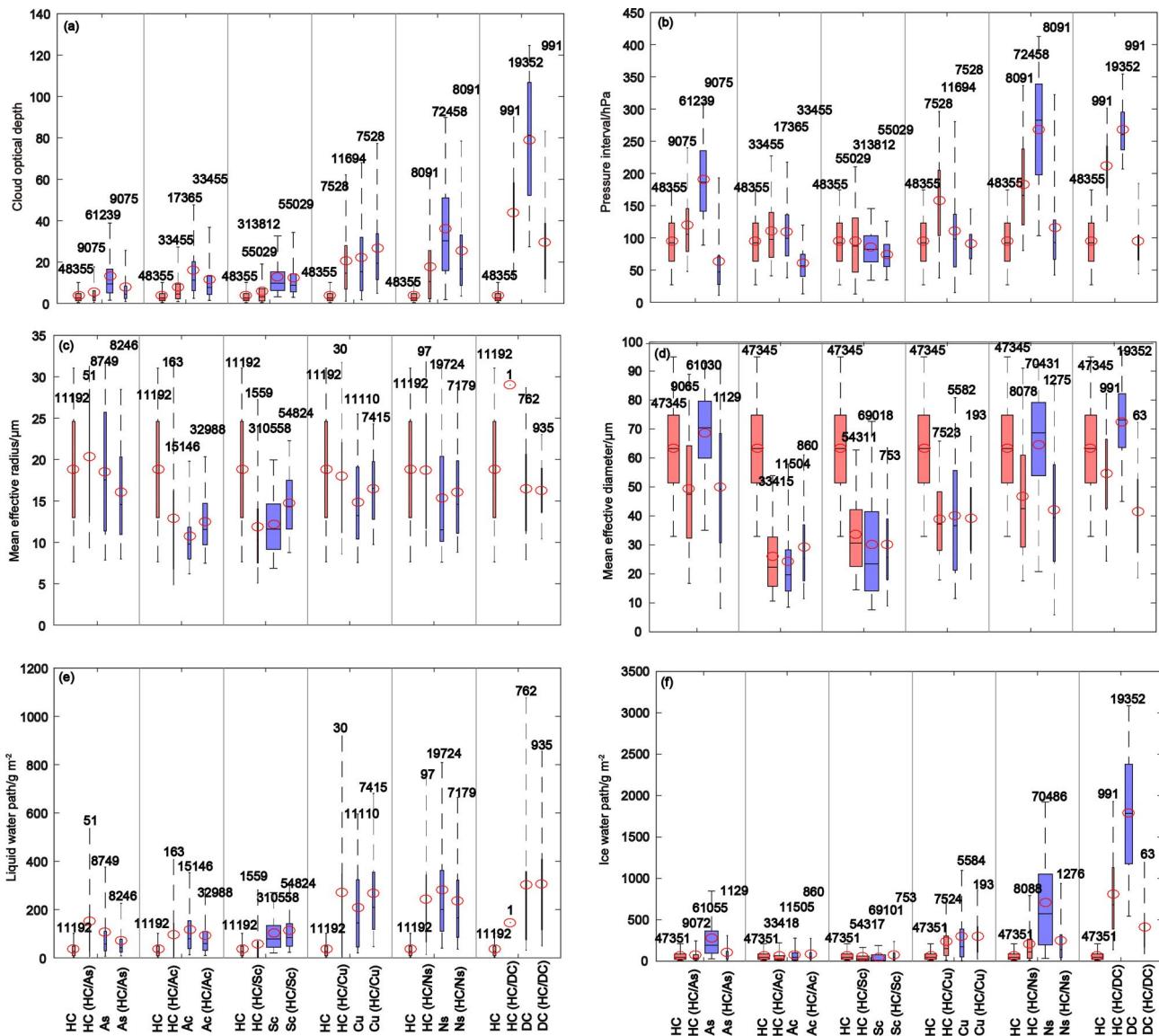


图5 单层云和双层云各个云层的云特性盒子统计图: (a) 云光学厚度; (b) 云层气压间隔; (c) 水粒子有效半径; (d) 冰粒子有效直径; (e) 液态水路径; (f) 冰水路径。盒子的底部和顶部分别代表15分位数和75分位数。盒中黑色线条和红色圆圈分别代表样本的中位数和平均值。虚线分别向上和向下延伸至样本的第95分位数和第5分位数。盒子的宽度表征样本数量大小，并列于盒子上方

Fig. 5 Box plots of the (a) cloud optical depth, (b) pressure interval, (c) mean effective radius of the water particles, (d) mean effective diameter of the ice particles, (e) liquid water path, and (f) ice water path for individual cloud layers for both single- and two-layer clouds. The tops and bottoms of the boxes are the first and third quartiles, respectively. The black line through the middle of each box indicates the median, and the red circle in each box denotes the mean. The whiskers extend to the 5th and 95th percentiles, respectively. The number above each bar denotes the sample number and is indicated by the width of the box

对流云中的深对流云表现出相对其单层状态显著较小的云层气压间隔。这可能是因为，在双层云中，高云的云底长波辐射加热减弱了底层云的云顶长波辐射冷却率，进一步抑制了其垂直向上发展的能力，从而降低了其云光学厚度和云层气压间隔(Christensen et al., 2013)。高云/积云的下层积云的水粒子有效半径和液态水路径比单层积云分别大

1.7 和 56.6 g m⁻²。而对于云体厚度较大的云类型（譬如：雨层云、高层云和高积云）而言，其被高云重叠时液态水路径则明显小于其单层云状态（分别小 45.1、34.9 和 25.0 g m⁻²）。就冰水路径而言，冰相样本频率超过 70% 的单层云类型（譬如：深对流云、高层云和雨层云）在被高云重叠时冰水路径明显较小。这些研究结果表明，双层云上下云层

相互影响的程度与云类型、云层间晴空距离、湿度和垂直上升气流存在联系。总得来说，重叠的高云表现出比单层高云更蔽光和更厚的云体，并伴随着冰水路径的增加和冰粒子有效直径的普遍减小；而底层云类型（除了积云）相比其单层云状态有明显

较小的云光学厚度和云层气压间隔。

由于双层云的上下云层宏观物理特性的变化将进一步影响大气层顶的辐射能量收支，本文定量分析了单层不同云类型以及高云重叠的双层云的云辐射强迫（图6和表2）。值得说明的是，本文仅

表1 2007~2010年单层云和双层云各个云层的云特性全球年平均值。括号的值表示双层云的上层（或下层）云类型与其单层云状态的云特性差值

Table 1 The global annual averaged cloud properties of the individual cloud layers in single- to two-layer cloud types from 2007 to 2010. The values in parentheses are the differences between cloud properties in case of two-layer upper cloud types (or lower cloud types) and associated single-layer cloud types

	各个云层	云特性全球年均值					
		云光学厚度	云层气压间隔/hPa	水粒子有效半径/ μm	冰粒子有效直径/ μm	液态水路径/ g m^{-2}	冰水路径/ g m^{-2}
单层云	高云	3.7	95.6	18.8	63.3	35.9	71.4
	高层云	13.4	191.0	18.6	68.5	108	284.7
	高积云	16.2	109.7	10.7	24.3	116.2	79.9
	层积云	12.8	85.7	12.2	30.2	103.1	50.2
	积云	22.4	111.2	14.8	40.2	209.4	305.5
	雨层云	36.1	268.3	15.3	64.5	280.2	711.4
	深对流云	79.0	268.4	16.4	72.4	304.1	1791.6
双层云	高云/高层云的上层高云	5.5(1.8)	119.5(23.9)	20.3(1.5)	49.4(-13.9)	153.2(117.3)	73.4(2.0)
	高云/高积云的上层高云	8.1(4.4)	111.1(15.5)	12.9(-5.9)	26.1(-37.2)	97.4(61.5)	61.8(-9.6)
	高云/层积云的上层高云	5.9(2.2)	95.5(-0.1)	11.9(-6.9)	33.8(-29.5)	57.9(22.0)	51.2(-20.2)
	高云/积云的上层高云	20.7(17.0)	157.5(61.9)	18.0(-0.8)	39.1(-24.2)	271.8(235.9)	235.9(164.5)
	高云/雨层云的上层高云	17.8(14.1)	183.6(88)	18.7(-0.1)	46.9(-16.4)	244.0(208.1)	213.6(142.2)
	高云/深对流云的上层高云	43.9(40.2)	211.2(115.6)	29.0(10.2)	54.7(-8.6)	146.1(110.2)	814.6(743.2)
	高云/高层云的下层高层云	7.8(-5.6)	63.1(-127.9)	16.0(-2.6)	49.9(-18.6)	73.1(-34.9)	102.2(-182.5)
	高云/高积云的下层高积云	11.8(-4.4)	60.9(-48.8)	12.5(1.8)	29.3(5.0)	91.2(-25.0)	86.7(6.8)
	高云/层积云下层的层积云	12.4(-0.4)	74.7(-11.0)	14.8(2.6)	30.0(-0.2)	113.3(10.2)	79.4(29.2)
	高云/积云的下层积云	26.9(4.5)	90.9(-20.3)	16.5(1.7)	39.1(-1.1)	266.0(56.6)	300.6(-4.9)
	高云/雨层云的下层雨层云	25.5(-10.6)	116.0(-152.3)	16.1(0.8)	42.1(-22.4)	235.1(-45.1)	253.6(-457.8)
	高云/深对流云的下层深对流云	29.6(-49.4)	94.6(-173.8)	16.3(-0.1)	41.5(-30.9)	304.5(0.4)	413.9(-1377.7)

表2 2007~2010年所有云类型的全球年平均的大气层顶处短波、长波和净云辐射强迫（单位： W m^{-2} ）

Table 2 The global annual averaged shortwave, longwave, and net cloud radiative forcings at the top of the atmosphere for all the cloud types from 2007 to 2010 (units: W m^{-2})

	单层云辐射强迫/ W m^{-2}							双层云辐射强迫/ W m^{-2}						
	高云	高层云	高积云	层积云	积云	雨层云	深对流云	高云/高层云	高云/高积云	高云/层积云	高云/积云	高云/雨层云	高云/深对流云	
短波	-146.4	-305.5	-268.6	-233.0	-270.5	-427.1	-535.7	-254.5	-279.5	-240.4	-378.6	-405.4	-459.5	
长波	89.7	111.5	51.1	15.4	28.1	104.9	129.5	97.3	84.8	31.2	90.3	95.9	98.8	
净	-56.8	-194.0	-217.5	-217.6	-242.4	-322.2	-406.2	-157.2	-194.7	-209.2	-288.3	-309.5	-360.7	

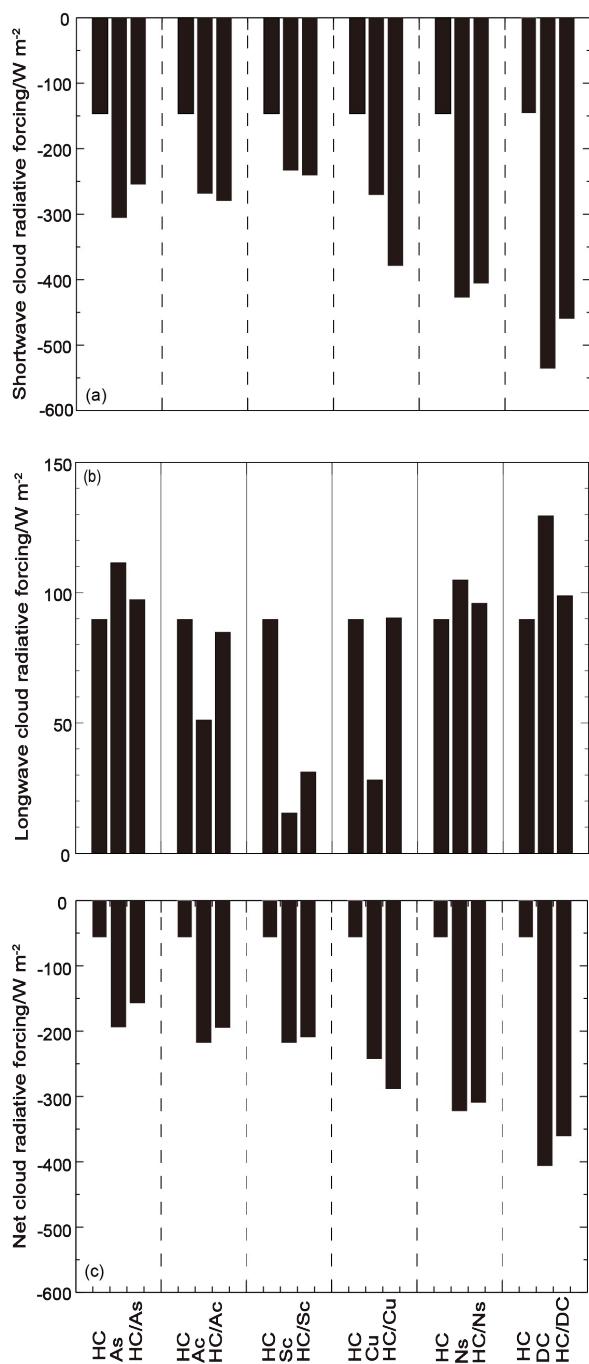


图6 2007~2010年所有云类型全球年平均的大气层顶处的(a)短波云辐射强迫、(b)长波云辐射强迫和(c)净云辐射强迫。单位: W m^{-2}

Fig. 6 The global annual averages of (a) shortwave, (b) longwave, and (c) net cloud radiative forcings (units: W m^{-2}) at the top of atmosphere for all the cloud types from 2007 to 2010

使用白天的辐射资料, 采样时间约为地方时正午 01:30。此时有较强的入射太阳辐射和较暖的地表温度, 因此本文得到的短波和长波云辐射强迫绝对

值相比过去研究 (Chen et al., 2000) 较大。Allan (2011) 也指出云对地气系统辐射能量收支的影响不仅依赖于云类型, 还与云类型出现的时间有很大关系。

就短波云辐射强迫绝对值而言, 深对流云 (-535.7 W m^{-2}) 明显大于其他云类型。这与其云光学厚度、云层气压间隔以及液态水路径等较大有关。由于高层云相比高积云和积云有较大的云层气压间隔、冰粒子有效直径和水粒子有效半径, 高层云的短波云辐射强迫绝对值大于高积云和积云。当聚焦双层云时, 可以看到高云/积云的短波云辐射强迫绝对值显著大于单层高云和单层积云, 这可能是因为上层高云和下层积云的云光学厚度都明显大于其单层云状态。就长波云辐射强迫而言, 低云 (譬如: 层积云和积云) 与高云重叠的双层云相比其底层云类型单层状态对地气系统有更强的长波加热效应; 而垂直发展旺盛的云类型 (譬如: 深对流云、雨层云和高层云) 与高云重叠时比其单层状态则表现为弱的长波加热效应。综合考虑短波和长波云辐射强迫, 所有云类型的净云辐射强迫均为负值, 表明其对地气系统的冷却作用。本文中的高云类型包含了对地气系统有较强净冷却效应的卷层云, 因此其净云辐射强迫也表现为负值 (-56.8 W m^{-2})。对比不同类型单层云与其被高云重叠的双层云之间的净云辐射强迫, 结果表明: 除单层的积云外, 所有类型单层云对地气系统的冷却效应强于其被高云重叠的双层云。

5 结论和讨论

本文结合主、被动遥感产品统计分析了单层不同云类型的云宏、微观物理特性以及大气层顶处云辐射强迫, 并进一步关注高云重叠的双层云与对应云类型单层状态的差异。研究的重要结论和讨论如下:

(1) CERES 视场反演的云宏、微观特性能够合理反映基于主动遥感确定的 CERES 视场的云类型。就云相样本频率而言, 单层的高云和单层的深对流云的冰相样本频率最大, 分别高达 74% 和 90%; 而单层的层积云的水相样本频率最大 (78%)。另外, 不同类型单层云在宏、微观物理特性也表现出明显的差异。譬如: 单层的高层云与单层的高积云在云层气压间隔、水粒子有效半径、冰

粒子有效直径以及云相频率上明显不同。而单层不同类型云间云特性的差异将导致其明显不同的辐射特性。通过分析单层云的 CERES 视场样本数量随大气层顶处短波和长波云辐射强迫的概率分布，我们发现层积云的 CERES 视场样本数量密集区类似一个椭球结构，而其它云类型的 CERES 视场样本密集区则趋于指数上升的结构。就 CERES 视场样本密集区的位置而言，单层的高层云与单层的高积云存在明显相互对称，表明其显著的辐射特性差异。

(2) 本文进一步分析了高云重叠的双层云之间相互作用对上下云层宏微观特性以及大气层顶辐射通量收支的影响。研究结果指出，重叠的高云受底层云类型的影响表现为比其单层状态更蔽光和更厚的云体，并通常伴随着冰水路径的增加和冰粒子有效直径的减小；而底层云类型受高云重叠的影响表现为比单层状态更透光和更薄的云体，并通常伴随着冰水路径和冰粒子有效直径的减小。在 Christensen et al. (2013) 的研究中也有相似的结论。他们指出上层高云的云底长波辐射加热率能够通过减弱底层云类型的云顶辐射冷却率来抑制下层云类型的垂直发展，从而导致云光学厚度和云层气压间隔减小。双层云上下云层宏、微观物理特性的变化将进一步影响大气层顶的辐射能量收支。我们发现，对于大部分双层云云类型的净云辐射强迫绝对值要小于其底层云类型单层状态。这表明，当高云出现在大部分云类型的上层大气时，地气系统将获得更多的辐射能量。

总得来说，本文对不同类型单层云和高云重叠的双层云在云宏、微观特性和辐射特性方面的分析和比较，旨在帮助理解气候变化中云的反馈以及改进气候模式中的云参数化方案。并且这些研究结果还可用于评估主动遥感卫星辐射产品（2B-FLXHR-LIDAR）计算的不同云类型大气层顶的云辐射强迫，加深对该数据集可适用性的理解 (L'Ecuyer et al., 2008; Henderson et al., 2011; Johansson et al., 2015; van Tricht et al., 2016)。

致谢 特别感谢 CALIPSO、CloudSat 以及 CERES 科学团队提供数据产品。

参考文献 (References)

Allan R P. 2011. Combining satellite data and models to estimate cloud

- radiative effect at the surface and in the atmosphere [J]. Meteorological Applications, 18(3): 324–333. doi:10.1002/met.285
- Barja B, Antuña J C. 2011. The effect of optically thin cirrus clouds on solar radiation in Camagüey, Cuba [J]. Atmos. Chem. Phys., 11(16): 8625–8634. doi:10.5194/acp-11-8625-2011
- 陈勇航, 白鸿涛, 黄建平, 等. 2008. 西北典型地域云对地气系统的辐射强迫研究 [J]. 中国环境科学, 28(2): 97–101. Chen Yonghang, Bai Hongtao, Huang Jianping, et al. 2008. Comparison of cloud radiative forcing on the atmosphere–earth system over northwestern China with respect to typical geo-topographic regions [J]. China Environmental Science (in Chinese), 28(2): 97–101. doi: 10.3321/j.issn:1000-6923.2008.02.001
- Chen C, Cotton W R. 1987. The physics of the marine stratocumulus-capped mixed layer [J]. J. Atmos. Sci., 44(20): 2951–2977. doi:10.1175/1520-0469(1987)044<2951:tpotms>2.0.co;2
- Chen T, Rossow W B, Zhang Y C. 2000. Radiative effects of cloud-type variations [J]. J. Climate, 13(1): 264–286. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<0264:reocvt>2.0.co;2
- Chen Y H, Bai H T, Huang J P, et al. 2008. Seasonal variability of cloud optical depth over northwestern China derived from CERES/MODIS satellite measurements [J]. Chin. Opt. Lett. 6(6): 454–457. doi:10.3788/col20080606.0454
- Cho H M, Yang P, Kattawar G W, et al. 2008. Depolarization ratio and attenuated backscatter for nine cloud types: Analyses based on collocated CALIPSO lidar and MODIS measurements [J]. Opt. Express, 16(6): 3931–3948. doi:10.1364/oe.16.003931
- Choi Y S, Ho C H, Park C E, et al. 2014. Influence of cloud phase composition on climate feedbacks [J]. J. Geophys. Res., 119(7): 3687–3700. doi:10.1002/2013jd020582
- Christensen M W, Carrión G G, Stephens G L, et al. 2013. Radiative impacts of free-tropospheric clouds on the properties of marine stratocumulus [J]. J. Atmos. Sci., 70(10): 3102–3118. doi: 10.1175/jas-d-12-0287.1
- Eastman R, Warren S G. 2010. Interannual variations of Arctic cloud types in relation to sea ice [J]. J. Climate, 23(15): 4216–4232. doi:10.1175/2010jcli3492.1
- Eastman R, Warren S G, Hahn C J. 2011. Variations in cloud cover and cloud types over the ocean from surface observations, 1954–2008 [J]. J. Climate, 24(22): 5914–5934. doi:10.1175/2011jcli3972.1
- Futyan J M, Russell J E, Harries J E. 2005. Determining cloud forcing by cloud type from geostationary satellite data [J]. Geophys. Res. Lett. 32(8): 93–114. doi:10.1029/2004gl022275
- Garrett T J, Zhao C F. 2006. Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes [J]. Nature, 440: 787–789. doi:10.1038/nature04636
- Haladay T, Stephens G. 2009. Characteristics of tropical thin cirrus clouds deduced from joint CloudSat and CALIPSO observations [J]. J. Geophys. Res., 114: D00A25. doi:10.1029/2008jd010675
- Hahn, C J, Warren S G. 2007. A gridded climatology of clouds over land (1971–1996) and ocean (1954–1997) from surface observations worldwide [M]. Oak Ridge National Laboratory, Carbon Dioxide

- Information Analysis Center.
- Hartmann D L, Ockert-Bell M E, Michelsen M L. 1992. The effect of cloud type on Earth's energy balance: Global analysis [J]. *J. Climate*, 5(11): 1281–1304. doi:10.1175/1520-0442(1992)005<1281:teocto>2.0.co;2
- Henderson D, L'Ecuyer T, Vane D, et al. 2011. Level 2B Fluxes and Heating Rates and 2B Fluxes and Heating Rates w/Lidar Process Description and Interface Control Document [R]. JPL Tech . Doc. NASA.
- Hu Y X, Winker D, Vaughan M, et al. 2009. CALIPSO/CALIOP cloud phase discrimination algorithm [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26 (11): 2293–2309. doi:10.1175/2009jtecha1280.1
- Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. 2005. Advanced retrievals of multilayered cloud properties using multispectral measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D15S18. doi:10.1029/2004jd005101
- Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. 2006. Determination of ice water path in ice-over-water cloud systems using combined MODIS and AMSR-E measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L21801. doi: 10.1029/2006gl027038
- Huang J, Fu Q, Su J, et al. 2009. Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 4011–4021. doi:10.5194/acp-9-4011-2009
- Inoue T, Ackerman S A. 2002. Radiative effects of various cloud types as classified by the split window technique over the eastern subtropical Pacific derived from collocated ERBE and AVHRR data [J]. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 80(6): 1383–1394. doi: 10.2151/jmsj.80.1383
- Johansson E, Devasthale A, L'Ecuyer T, et al. 2015. The vertical structure of cloud radiative heating over the Indian subcontinent during summer monsoon [J]. *Atmos. Chem. Phys.* 15(20): 11557–11570. doi:10.5194/acp-15-11557-2015
- 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.04
- L'Ecuyer T S, Wood N B, Haladay T, et al. 2008. Impact of clouds on atmospheric heating based on the R04 CloudSat fluxes and heating rates data set [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D8): D00A15. doi:10.1029/2008jd009951
- Li J, Huang J, Stamnes K, et al. 2015. A global survey of cloud overlap based on CALIPSO and CloudSat measurements [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 15(1): 519–536. doi:10.5194/acp-15-519-2015
- Li J M, Yi Y H, Minnis P, et al. 2011. Radiative effect differences between multi-layered and single-layer clouds derived from CERES, CALIPSO, and CloudSat data [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112(2): 361–375. doi:10.1016/j.jqsrt.2010.10.006
- Lin W Y, Zhang M H. 2004. Evaluation of clouds and their radiative effects simulated by the NCAR community atmospheric model against satellite observations [J]. *J. Climate*, 17(17): 3302–3318. doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<3302:ecat>2.0.co;2
- Morrison A E, Siems S T, Manton M J. 2011. A three-year climatology of cloud-top phase over the Southern Ocean and North Pacific [J]. *J. Climate*, 24(9): 2405–2418. doi:10.1175/2010jcli3842.1
- 彭杰, 张华, 沈新勇. 2013. 东亚地区云垂直结构的CloudSat卫星观测研究 [J]. 大气科学, 37(1): 91–100. Peng Jie, Zhang Hua, Shen Xinyong. 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 37(1): 91–100. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11188
- Ramanathan V. 1987. The role of earth radiation budget studies in climate and general circulation research [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 92(D4): 4075–4095. doi:10.1029/jd092id04p04075
- Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. 1989. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment [J]. *Science*, 243: 57–63. doi: 10.1126/science. 243. 4887.57
- 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 (D8): D00A12, doi:10.1029/2008jd009972
- Stephens G L, Greenwald T J. 1991. The Earth's radiation budget and its relation to atmospheric hydrology: 2. Observations of cloud effects[J]. *J. Geophys. Res.*, 96(D8): 15325–15340. doi: 10.1029/91jd00972
- Su H, Jiang J H, Stephens G L, et al. 2009. Radiative effects of upper tropospheric clouds observed by Aura MLS and CloudSat [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36(9): L09815, doi:10.1029/2009gl037173
- Su J, Huang J P, Fu Q, et al. 2008. Estimation of Asian dust aerosol effect on cloud radiation forcing using Fu-Liou radiative model and CERES measurements [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8(10): 2763–2771. doi:10.5194/acp-8-2763-2008
- Sun B, Groisman P Y, Mokhov I I. 2001. Recent changes in cloud-type frequency and inferred increases in convection over the United States and the former USSR [J]. *J. Climate*, 14(8): 1864–1880. doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<1864:rcictf>2.0.co;2
- Sun W B, Videen G, Kato S, et al. 2011. A study of subvisual clouds and their radiation effect with a synergy of CERES, MODIS, CALIPSO, and AIRS data [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D22207. doi: 10.1029/2011jd016422
- Thorsen T J, Fu Q, Comstock J M. 2013. Cloud effects on radiative heating rate profiles over Darwin using ARM and A-train radar/lidar observations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(11): 5637–5654. doi: 10.1002/jgrd.50476
- van Tricht K, Lhermitte S, Lenaerts J T M, et al. 2016. Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff [J]. *Nature communications*, 7: 10266. doi:10.1038/ncomms10266
- 汪方, 丁一汇. 2005. 气候模式中云辐射反馈过程机理的评述 [J]. 地球科学进展, 20(2): 207–215. Wang Fang, Ding Yihui. 2005. An evaluation of cloud radiative feedback mechanisms in climate

- models [J]. Advance in Earth Science (in Chinese), 20(2): 207–215. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2005.02.011
- 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, (SI): 910–921. 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(SI): 910–921. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.z1.15
- 王海波, 张华, 荆现文, 等. 2018. 不同云重叠参数对全球和东亚地区模拟总云量的影响 [J]. 气象学报, 76(5): 767–778. Wang Haibo, Zhang Hua, Jing Xianwen, et al. 2018. Effects of different cloud overlapping parameters on simulated total cloud fraction over the globe and East Asian region [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(5): 767–778. doi:10.11676/qxb2018.027
- 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚, 等. 2011. 基于 CloudSat 资料的中国及周边地区云垂直结构统计分析 [J]. 高原气象, 30(1): 38–52. Wang Shuaihui, Han Zhigang, Yao Zhigang, et al. 2011. Analysis on cloud vertical structure over China and its neighborhood based on CloudSat data [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(1): 38–52.
- Wang Z, Sassen K. 2001. Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors. J. Appl. Meteor., 40: 1665–1682. doi:10.1175/1520-0450(2001)040<1665:ctampr>2.0.co;2
- Wang Z, Sassen K. 2007. Level 2 cloud scenario classification product process description and interface control document [R]. Version, 5, 50.
- Wang Z, Vane D, Stephens G, et al. 2013. Level 2 combined radar and lidar cloud scenario classification product process description and interface control document [R]. JPL/CalTech, NASA, Pasadena, USA, 61pp.
- Warren S G, Eastman R M, Hahn C J. 2007. A survey of changes in cloud cover and cloud types over land from surface observations, 1971–96 [J]. J. Climate, 20(4): 717–738. doi:10.1175/jcli4031.1
- Webb M, Senior C, Bony S. 2001. Combining ERBE and ISCCP data to assess clouds in the Hadley Centre, ECMWF and LMD atmospheric climate models [J]. Clim. Dyn., 17(12): 905–922. doi:10.1007/s003820100157
- Xie Shaocheng, Liu Xiaohong, Zhao Chuanfeng, et al. 2013. Sensitivity of CAM5-simulated Arctic clouds and radiation to ice nucleation parameterization [J]. J. Climate, 26(16): 5981–5999. doi:10.1175/jcli-d-12-00517.1
- Yan Hongru, Huang Jianping, Minnis P, et al. 2011. Comparison of CERES surface radiation fluxes with surface observations over Loess Plateau [J]. Remote Sensing of Environment, 115(6): 1489–1500. doi:10.1016/j.rse.2011.02.008
- Yuan Tianle, Oreopoulos L. 2013. On the global character of overlap between low and high clouds [J]. Geophys. Res. Lett., 40(19): 5320–5326. doi:10.1002/grl.50871
- 张华, 荆现文. 2010. 气候模式中云的垂直重叠假定对模拟的地—气辐射的影响研究 [J]. 大气科学, 34(3): 520–532. Zhang Hua, Jing Xianwen. 2010. Effect of cloud overlap assumptions in climate models on modeled earth-atmosphere radiative fields [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(3): 520–532. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.06
- 张华, 彭杰, 荆现文, 等. 2013. 东亚地区云的垂直重叠特性及其对云辐射强迫的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 43: 523–535. Zhang Hua, Peng Jie, Jing Xianwen, et al. 2013. The features of cloud overlapping in eastern Asia and their effect on cloud radiative forcing [J]. Science China: Earth Science, 56: 737–747. doi:10.1007/s11430-012-4489-x
- 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(SI): 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 Science (in Chinese), 18(SI): 933–958. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.z1.16
- Zhang Damiao, Wang Zhien, Liu Dong. 2010. A global view of midlevel liquid-layer topped stratiform cloud distribution and phase partition from CALIPSO and CloudSat measurements [J]. J. Geophys. Res., 115: D00H13. doi:10.1029/2009jd012143
- Zhang M H, Lin W Y, Klein S A, et al. 2005. Comparing clouds and their seasonal variations in 10 atmospheric general circulation models with satellite measurements [J]. J. Geophys. Res., 110(15): 1637–1639. doi:10.1029/2004jd005021
- Zhao Chuanfeng, Garrett T J. 2015. Effects of Arctic haze on surface cloud radiative forcing [J]. Geophys. Res. Lett., 42(2): 557–564. doi:10.1002/2014gl062015
- Zhao Chuanfeng, Xie Shaocheng, Klein S A, et al. 2012. Toward understanding of differences in current cloud retrievals of ARM ground-based measurements [J]. J. Geophys. Res., 117: D10206. doi:10.1029/2011jd016792