

基于卫星数据的2009~2023年西北太平洋 多层云时空分布特征

牛汝匀^{1,2}, 衣立^{1,2*}

¹中国海洋大学山东省透明北极重点实验室, 山东 青岛

²中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年4月18日; 录用日期: 2026年5月14日; 发布日期: 2026年5月27日

摘要

本研究基于2009至2023年CALIPSO卫星数据, 分析了西北太平洋中高纬度海域多层云及其下层低云的空间分布与季节变化特征, 并探讨了大气环流、海面温度以及低层对流层稳定度等环境因子的影响。研究表明, 多层云在该区域具有较高的发生频率, 年均云频大部分海域超过0.4, 且远离大陆的洋面上空存在较高比例的厚多层云。多层云下低云的发生频率较低, 主要集中在沿岸海域, 尤其是黄渤海区域, 季节性差异显著。夏季多层云分布广泛且云顶高度增高, 云下低云的多层云类型则主要出现在春夏季。气象分析表明, 大气环流、低空风场及海面温度的季节性变化能够调控多层云及下层低云的分布。低层对流层稳定度(LTS)的季节差异也影响了云顶高度和低云发展。辐射传输模拟结果显示, 多层云中不同光学厚度的上层云能不同程度遮盖下层低云的辐射特性, 体现了多层云垂直结构对辐射传输的影响。

关键词

多层云, 西北太平洋, 云顶高度, 垂直结构

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Multilayer Clouds in the Northwestern Pacific Based on Satellite Data (2009~2023)

Ruyun Niu^{1,2}, Li Yi^{1,2*}

¹Key Laboratory of Transparent Arctic, Shandong, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: April 18, 2026; accepted: May 14, 2026; published: May 27, 2026

*通讯作者。

文章引用: 牛汝匀, 衣立. 基于卫星数据的 2009~2023 年西北太平洋多层云时空分布特征[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(3): 601-615. DOI: 10.12677/ccrl.2026.153066

Abstract

This study analyzes the spatiotemporal distribution and seasonal variation characteristics of multilayer clouds and their lower-level clouds in the mid- to high-latitude regions of the northwestern Pacific, based on CALIPSO satellite data from 2009 to 2023. It also explores the influence of environmental factors such as atmospheric circulation, sea surface temperature, and lower-tropospheric stability. The results show that multilayer clouds occur with high frequency in this region, with the annual mean cloud frequency exceeding 0.4 in most of the sea areas. Additionally, there is a higher proportion of thick multilayer clouds over the open ocean, far from the continents. The occurrence frequency of lower-level clouds beneath multilayer clouds is relatively low, mainly concentrated in the coastal regions, especially in the Yellow and Bohai Seas, with significant seasonal differences. In summer, multilayer clouds are widely distributed, and cloud top heights increase, while lower-level clouds predominantly occur in the spring and summer. Meteorological analysis indicates that seasonal changes in atmospheric circulation, low-level wind fields, and sea surface temperature significantly regulate the distribution of multilayer clouds and lower-level clouds. The seasonal variations in lower-tropospheric stability (LTS) also affect cloud top heights and the development of low clouds. Radiation transfer simulation results show that upper clouds with varying optical thicknesses in multilayer clouds can partially obscure the radiative properties of lower-level clouds, reflecting the impact of the vertical structure of multilayer clouds on radiation transfer.

Keywords

Multilayer Clouds, Northwestern Pacific, Cloud Top Height, Vertical Structure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

云在地球 - 大气系统中起着主导作用, 其分布和性质直接影响地球 - 大气辐射平衡、对流活动及水循环过程。根据国际卫星云气候项目 (ISCCP, International Satellite Cloud Climatology Project) 的统计, 地球平均云量超过 66% [1], 表明大部分地球表面长期被云覆盖。云的存在不仅调节大气对流和降水分布, 还通过改变辐射收支和边界层热力结构影响局地及全球能量平衡[2]-[4]。从天气系统角度来看, 不同类型云对中小尺度对流、降水及边界层热力结构的影响各异。多层云系统尤为复杂, 其上层云和下层云可能同时存在且互相作用, 对垂直大气运动和辐射透射具有显著调节效应[5] [6]。准确掌握多层云的发生频率和空间分布特征, 有助于提高天气模式对中尺度云和降水系统的模拟能力, 同时为边界层水汽和垂直速度等变量的观测同化提供约束[7]。从气候研究角度看, 多层云对地球辐射透射的调节作用直接影响地表能量收支和大气水分循环, 其分布特征的不确定性也是当前气候模式偏差的重要来源之一[8]-[11]。此外, 云的分布与生态系统能量平衡、水循环以及物种栖息地分布密切相关[12], 因此, 对云的发生频率、空间分布及垂直结构进行准确统计, 对于天气预报、气候研究, 乃至生态学和环 境科学领域均具有重要科学价值。

自 1982 年以来, 云检测一直是国际卫星云气候计划的重要组成部分。卫星遥感技术凭借全球覆盖、高时空连续性, 为云研究提供了丰富的数据来源。利用多光谱和红外波段的物理特性, 前人提出了多种

基于单层云假设的云统计方法[13]-[15]。然而, 云廓线雷达(CPR, Cloud Profiling Radar)与云-气溶胶正交偏振激光雷达(CALIOP, Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)等主动遥感仪器的观测表明, 全球多层云现象普遍存在, 且其上层和下层云的叠加效应显著影响地球-大气系统辐射透射。因此, 对于多层云的空间分布与频率进行统计分析, 是理解云对大气系统作用的基础工作。已有研究多集中在全球或区域尺度的多层云频率和分布趋势分析。例如, MODIS 全球月度三级产品显示, 2008 年 10 月多层云在全球范围内呈现明显条带和区域集中分布, 表明多层云在不同海域的发生频率存在显著差异[16]。这些研究为多层云的长期变化、季节性特征及与大气环流的关系提供了基础数据支撑。

近年来, 多层云统计研究也开始关注云类型下的局地特征与气象驱动机制。在多层云系统中, 双层云出现的频率占主导地位, 分布受大气环流、低空风向、水汽输送及海温条件影响[17]。高纬度和沿岸海域由于受西北风和陆地水汽输送限制, 多层云的发生频率和厚度存在季节性差异; 而低纬度和暖湿水域的洋面上, 多层云全年频率较高, 夏季尤为集中[18]。此外, 在水汽条件充足时气溶胶也可能增强多层云的发展[19]。综上所述, 对多层云的系统统计不仅是云气候研究的重要基础, 也是理解云-大气相互作用、改进区域天气和气候模式模拟精度的必要前提。

尽管已有大量遥感数据和统计方法, 但现有研究主要集中在多层云整体频率和空间分布[20][21], 对多层云下低云的统计以及季节变化规律关注不足。这一知识空白限制了对多层云系统辐射和水汽调节作用的全面理解。针对这一问题, 本研究基于 2009~2023 年云-气溶胶激光雷达与红外探测者卫星(CALIPSO, Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)提供的二级产品垂直特征掩膜(VFM, Vertical Feature Mask), 将研究区域网格化为 1° 分辨率, 对多层云及其下低云的发生频率进行统计分析全年及各季节空间分布特征, 并结合高空垂直运动场、低空风场和海温条件探讨形成机制。通过对长期多层云及下层低云的系统统计, 为理解多层云在区域气候和天气系统中的作用提供参考。第 2 节介绍了研究区域、使用的卫星数据及多层云判识标准, 第 3 节展示了多层云和多层云下低云的时空分布特征及其季节变化, 讨论了大气背景场对其的影响, 第 4 节对本研究进行了总结。

2. 数据与方法

2.1. 研究区域

本研究选取东经 120° 至西经 160° , 北纬 30° 至北纬 60° 作为研究区域, 该区域涵盖了西北太平洋中高纬度海域及其邻近边缘海, 是东亚季风系统影响最为显著的海洋区域之一[22][23]。该海域西侧毗邻欧亚大陆及中国沿海, 北部连接鄂霍次克海与白令海, 南部延伸至副热带西北太平洋, 海陆热力差异明显, 季风活动强烈[24], 大气环流具有显著的季节变化特征。此外, 北纬 30° 至北纬 60° 纬度带跨越副热带至中纬度过渡区域, 既包含暖海洋环境, 又受到中纬度天气系统和锋面活动的影响, 是多层云频繁出现的典型海域之一[25]。同时, 该区域海洋面积广阔, 人为影响相对较小, 能够较好反映海洋下垫面上空云的自然分布特征。

2.2. 数据资料

本研究使用的卫星数据来自云-气溶胶激光雷达与红外探测者卫星(CALIPSO)。CALIPSO 卫星可以提供可靠的全球气溶胶和云的垂直剖面结构, 前人结合 CALIPSO 和 CloudSat 卫星的观测资料, 量化了全球单层云和多层云的发生频率[26]; 并通过这些观测数据定义识别了主要云层垂直结构, 并估算了其辐射效应[27]。CALIPSO 上搭载的云-气溶胶正交偏振激光雷达(CALIOP)能够获取大气后向散射信号的垂直分布, 本研究使用了 CALIOP 传感器的二级产品垂直特征掩膜(VFM, Vertical Feature Mask), 该产品利

用 532 nm 波段的后向散射系数提供云和气溶胶在大气层中的垂直高度, 以 5 km 的水平分辨率捕捉云和气溶胶的空间分布, 其高质量的垂直剖面数据已被广泛应用于大气科学、环境监测及气候模型验证中。

本研究使用的再分析数据来源于 ERA5 再分析数据集, 该数据集由欧洲中期天气预报中心(ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)提供, 涵盖了全球范围内的气象变量, 包括温度、湿度、风速、气压等。ERA5 数据具有高时空分辨率, 可以为气象分析提供详细的垂直剖面信息[28]。在本研究中, ERA5 的 500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场、海面温度(SST)以及低层对流层稳定度(LTS, Lower-Tropospheric Stability)等关键气象参数被用于分析多层云及云下低云的分布特征与季节变化。ERA5 数据通过全球气象模型的数值模拟获取, 经过了严谨的数据同化过程, 确保了高准确性和可靠性。

2.3. 多层云判识标准

CALIOP 能够获取大气后向散射信号的垂直分布, 在激光雷达垂直剖面中, 云层所在区间对应散射信号显著增强的高度区间, 而无云区域则以分子散射为主, 信号较弱[29]-[31]。因此, 若垂直方向上存在多个独立云层, 云层之间会存在一段散射信号明显减弱的间隔层, 这种散射信号的间断表明云层在垂向上不连续, 而非单一云体的延伸。本文将多层云定义为: 在同一水平位置的激光垂直廓线中, 后向散射增强区在垂直方向上呈现不连续分布, 即激光雷达自上而下识别出至少两层在高度上彼此分离的云层。在 VFM 产品中, 上述结构可通过云层分类结果直接识别。当某处的激光垂直廓线自上而下探测到前两层独立云层, 对应 VFM 产品分类会呈现“云-非云-云”结构。据此, 将该像元判定为多层云像元。

根据国际民用航空组织(ICAO, International Civil Aviation Organization)对机场净空标准的规定, 机场参考点(ARP, Airport Reference Point)上方需确保不低于 300 m 的垂直净空, 本研究将多层云下层云顶高度低于 300 m 作为判断该下层云为低云的标准[32]。该高度标准既符合国际航空安全规范中对低能见度天气的识别要求, 也为基于卫星遥感数据的多层云下低云检测提供了客观、可量化的判定依据。

3. 研究结果

3.1. 多层云及多层云下低云的时空分布特征

本研究基于 VFM 产品, 将研究海域网格化为 1°的分辨率, 利用 2009~2023 年的云产品数据, 对云像元的频率进行统计分析。研究区域中, 多层云的发生频率最高, 大部分海域云频超过 0.4(图 1(a))。其中激光雷达无法完全穿透的厚多层云占比较高, 年均频率在 0.2~0.3 之间, 远离陆地的洋面上空厚多层云的云频高于靠近陆地的海域。值得注意的是, 在统计厚多层云时, 我们发现其夜间发生频率普遍高于白天, 在频率填色图中表现为夜间 CALIPSO 轨迹的颜色较白天更深, 这可能缘于夜间边界层稳定度增强, 有利于厚多层云在夜间形成和维持(图 1(b))。相比之下, 云下低云的年均频率较低, 大部分海域上空的发生频率在 0.1 左右, 且空间分布情况与后多层云不同, 云下低云的分布主要集中在靠近陆地的黄渤海海域上空, 部分格点可达 0.4 及以上, 大洋上空的云频反而少(图 1(c))。这一分布特点与单层低云类似, 单层低云的分布也主要集中在黄渤海地区, 发生频率略高于云下低云(图 1(d))。将单层低云与多层云下的低云年均空间分布进行比较, 发现多层云下的低云比单层低云更集中于黄渤海区域(图 2)。从整体空间分布来看, 多层云呈现广泛覆盖的特征, 而多层云下的低云则更局限于沿岸海域。

多层云全年发生频率均较高, 但春夏季明显高于秋冬季, 夏季达到全年最高(图 3(a)~(d))。春夏季多层云在整个研究区域近乎均匀分布, 云频随纬度变化不明显; 而秋冬季多层云主要集中在高纬度区域, 冬季在 55°N~60°N 出现明显云频峰值(图 3(e))。无法穿透的厚多层云子类表现与多层云整体一致, 其夏冬季的分布差异更为显著。夏季厚云频率最高, 随纬度升高而增加, 峰值出现在 60°N, 频率约 0.12; 冬

季厚云频率最低, 随纬度升高而略增, 最低点云频不足 0.04。春季与秋季较为相似, 春季厚云分布均匀, 峰值约在 35°N 附近, 频率约 0.08; 秋季厚云云频峰值位于 40°N, 频率约 0.08 (图 3(f))。

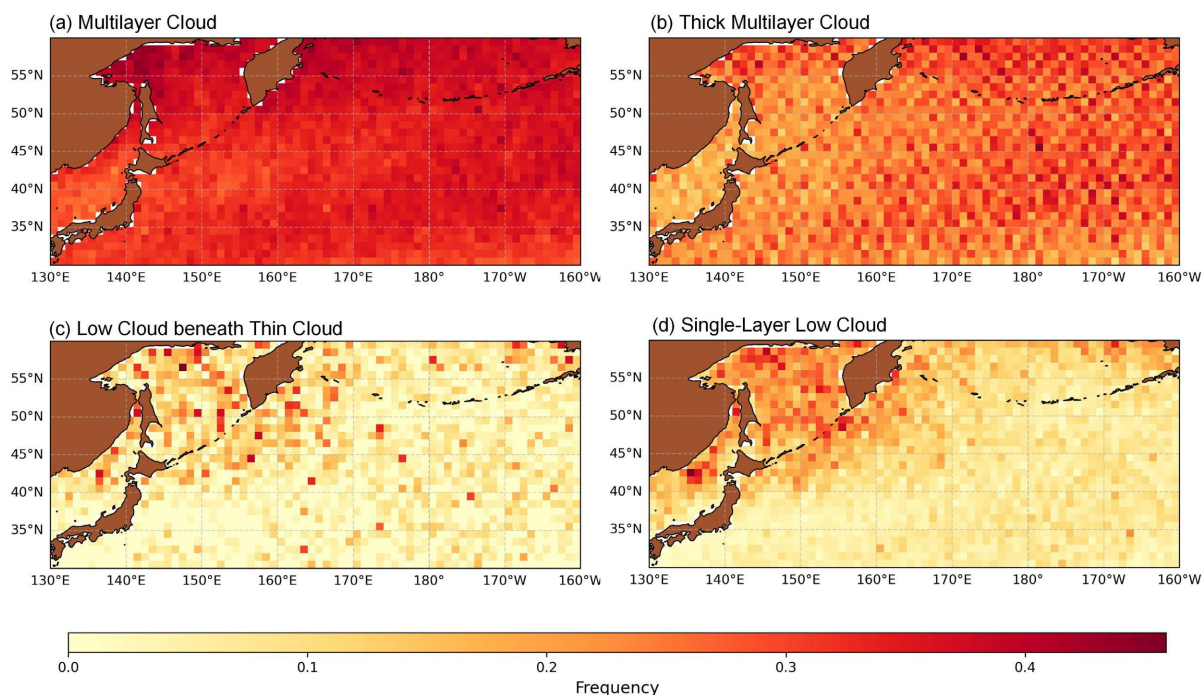


Figure 1. Annual mean spatial distribution of multilayer clouds (a); thick clouds that are not fully penetrable by lidar (b); low clouds under multilayer clouds (c); and single-layer low clouds (d); spatial resolution: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

图 1. 多层云(a); 激光雷达无法完全穿透的厚云(b); 多层云下低云(c); 单层低云(d)的年均云频空间分布, 空间分辨率: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

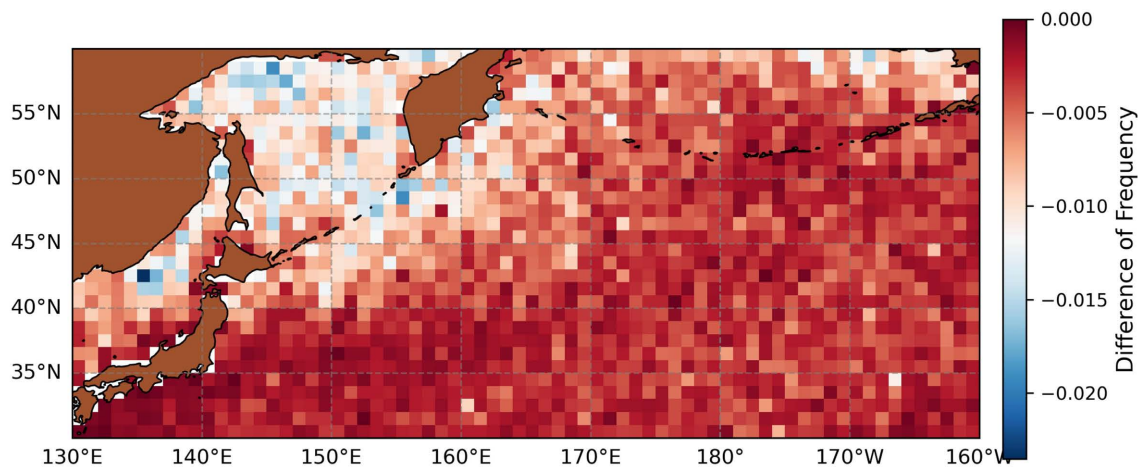


Figure 2. Annual mean spatial distribution differences between single-layer low clouds and low clouds under multilayer clouds, spatial resolution: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

图 2. 单层低云与多层云下的低云年均空间分布差异, 空间分辨率: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

与多层云季节性变化类似, 多层云下低云这一子类也多集中在夏季, 春季次之, 秋冬季最低, 发生频率接近于 0。春季主要出现在黄渤海海域上空, 夏季扩展至洋面上空, 但频率仍远低于多层云(图 4(a)~(d))。频率随纬度的变化方面, 单层低云情况与云下低云情况类似, 但发生频率稍高(图 4(e)~(f))。

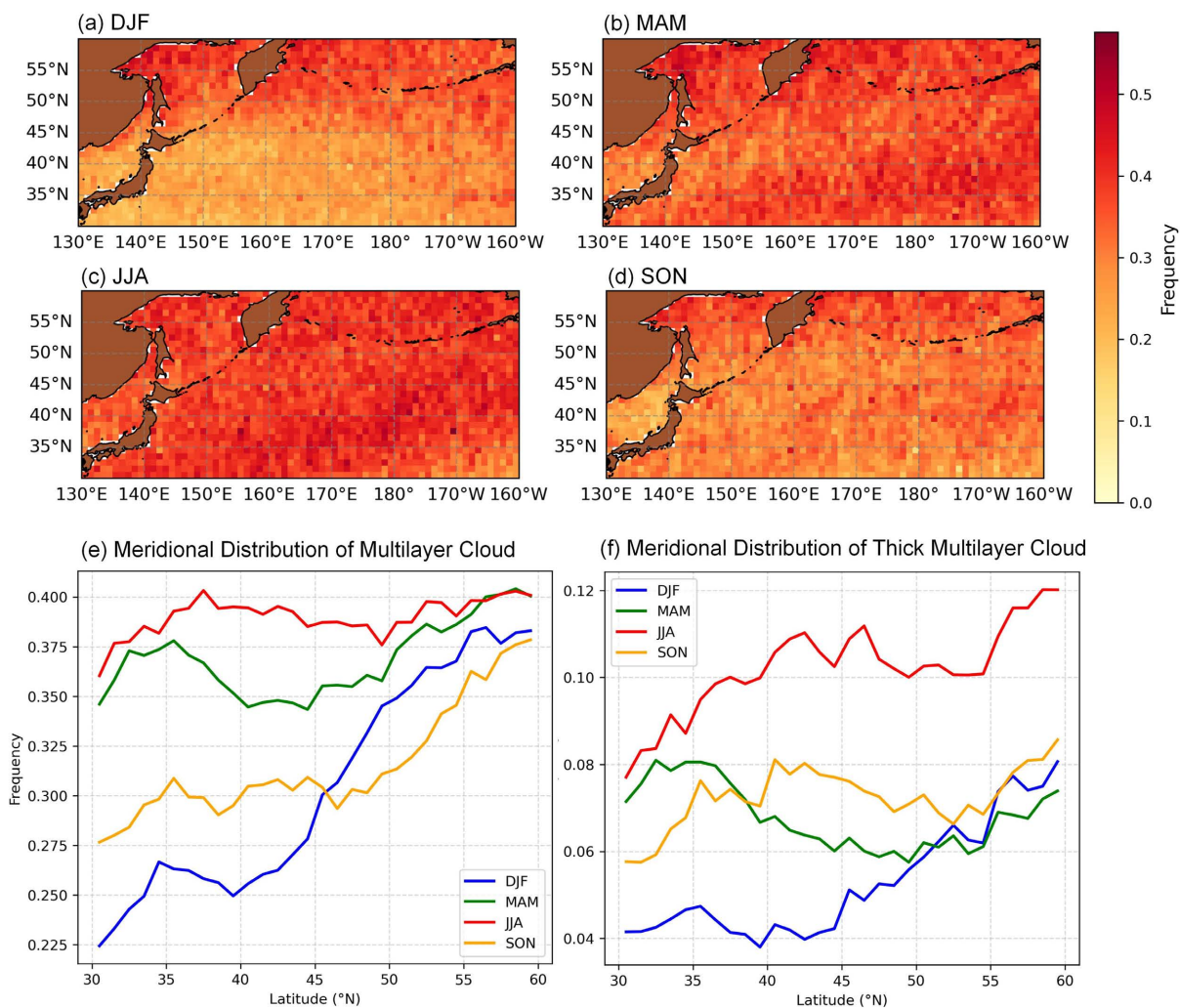
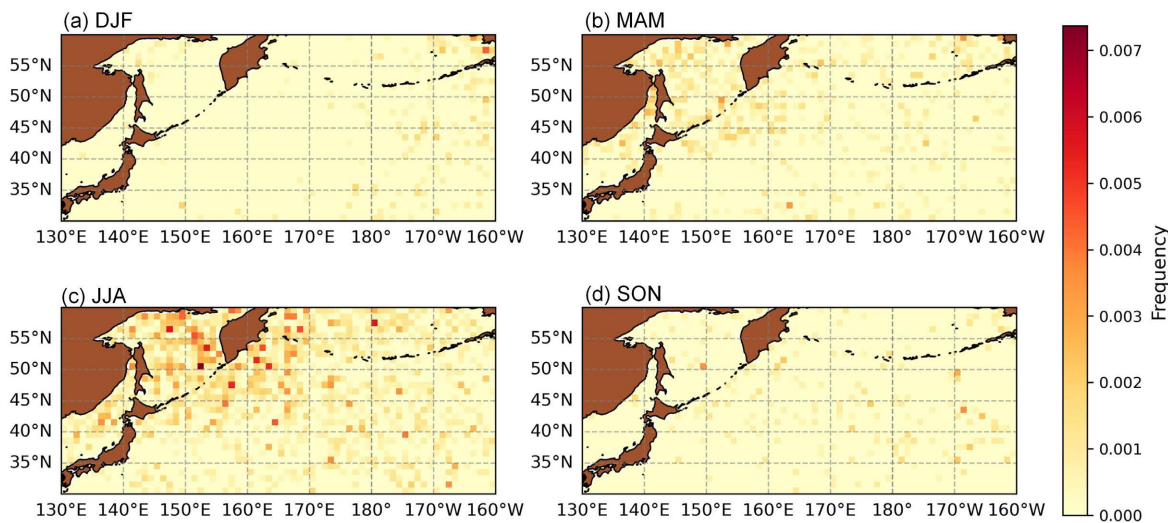


Figure 3. Seasonal spatial distribution characteristics of multilayer cloud frequency (a)~(d), and latitudinal variations of multilayer clouds and thick clouds impenetrable by lidar (e)~(f)

图 3. 多层云的四季云频空间分布特征(a)~(d)及多层云与激光雷达无法穿透的厚云分布随纬度的变化(e)~(f)



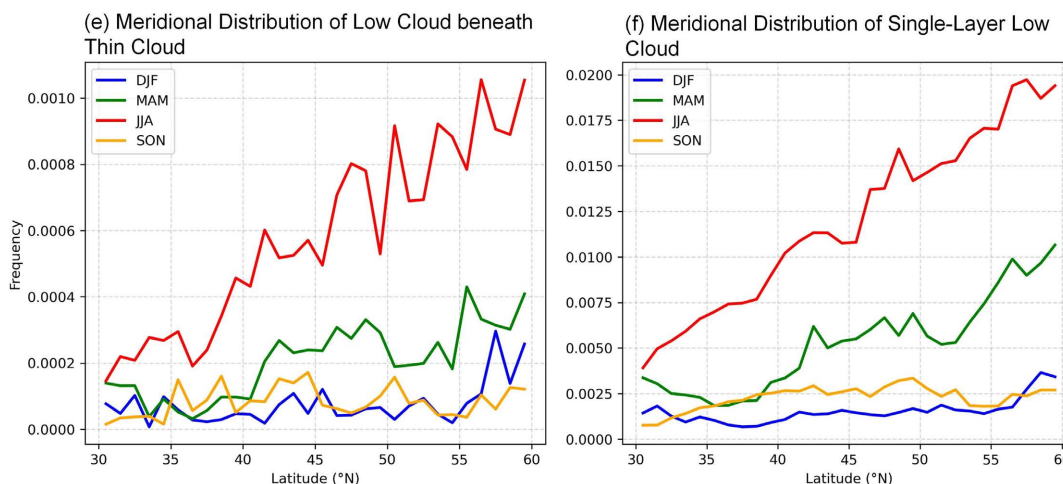


Figure 4. Spatial distribution characteristics of low clouds beneath multilayer clouds across four seasons (a)~(d); and latitudinal variations of low clouds beneath multilayer clouds and single-layer low clouds (f)~(g)

图 4. 多层云下低云的四季云频空间分布特征(a)~(d)及多层云下低云与单层低云随纬度的变化(f)~(g)

3.2. 气象条件对多层云分布的影响

结合 500 hPa 位势高度场与 850 hPa 风场分析, 可以得出不同季节大气环流对云分布的调控作用。冬季, 高空位势高度普遍偏低, 且随着纬度降低而逐渐下降, 表明中低纬度海域上空受冷空气控制更为明显; 特别是在靠近大陆的沿海及近岸海域, 上空位势进一步降低, 高压脊发展, 使空气稳定性增强。在这种背景下, 低空风主要从陆地吹向海洋, 空气干燥且水汽输送有限, 因而多层云往往形成在远离大陆的洋面上, 呈现分散、孤立的空间格局, 云量总体偏少, 且厚度有限(图 5(a))。随着季节向春夏过渡, 500 hPa 位势高度逐渐升高, 冬季的低位势态势逐渐被温暖高位势取代, 夏季大部分海域上空位势可达 5600 m 以上, 大气上层稳定性减弱。与此同时, 低空风场发生显著变化, 由冬季的陆向洋北风转为南风, 带来充足的暖湿气流(图 5(b)~(c))。这种暖湿气流在海洋表面辐合上升, 显著增加了空气中的水汽含量和对流不稳定性, 为云的形成提供了有利条件。受此影响, 多层云在夏季呈现分布广泛、厚度增加、覆盖范围扩大的特征。

结合海面温度(SST)与低空风场, 可以更清晰地解释多层云结构中下层低云的形成和分布特征。冬季, 由于海面温度普遍偏低, 海洋向大气的热量供应有限, 低层空气相对干燥且稳定; 同时盛行西北风和北风, 将干冷空气从陆地输送至海面, 使低层大气水汽条件不利于低云生成[33]。在这种背景下, 多层云结构中的下层低云数量偏少, 零散分布于水汽条件相对丰富的远洋区域, 而靠近大陆的海域则因低空干燥而难以形成明显低云层(图 6(a))。进入夏季, 海面温度升高, 为低层大气提供充足热量和水汽蒸发来源。此时, 低空风由冬季的北风转为西南风, 携带暖湿气流向北输送, 为西北太平洋及邻近海域提供成云条件。在多层云结构中, 低层空气的湿度增加和不稳定性增强, 使得下层低云更容易生成和维持, 从而在多层云中表现为明显的低云层。夏季多层云下低云覆盖范围增大, 在多层云中的占比增高。此外, 局地风场特征对下层低云分布起到调控作用。例如, 黄渤海地区夏季低空风速接近零, 水平输送微弱, 空气滞留在海面上方, 稳定层结容易保持。这种环境有利于低层空气冷却和湿度累积, 从而促使多层云下层低云在该区域形成集中分布的格局[34]。低空风减弱和海面水汽蒸发共同作用, 使得黄渤海成为夏季多层云下低云的局地高发区(图 6(c))。

进一步分析多层云的上层云顶高度与 500 hPa 垂直速度场的关系, 在研究区域内, 冬季 500 hPa 高度场对应的垂直速度(w)多呈微弱负值, 仅存在轻微的辐合上升, 空气整体较为稳定。这种背景下, 多层云

的上层发展受限, 云顶高度普遍较低, 形成的多层云上层云高有限(图 7(a))。进入夏季, 由于高空位势升高和 low 空暖湿气流的输送, 500 hPa 附近的垂直速度场显示南部海域存在微弱上升运动, 特别是在低纬度海域。对流上升为多层云的垂直发展提供了动力[35], 使云顶高度增加, 部分海域云顶高度超过 7 km。空间分布上, 夏季多层云顶高度呈东西向条带状排列, 这与前述多层云在整个研究海域的均匀分布结合, 显示夏季多层云在低纬度海域具有更强的垂直发展能力。这种上层云顶高度的增强与前述低层水汽输送和暖湿气流汇聚的条件相结合, 使得夏季多层云在低纬度海域呈现垂直发展能力强、上层云顶高度更高的特点(图 7(c))。总体来看, 研究区域多层云全年频率高, 分布存在明显季节和纬度差异; 多层云下低云主要集中于沿岸区域, 频率低于单层低云; 多层云的空间分布和季节变化与高空位势高度、低空风向及海温有关。

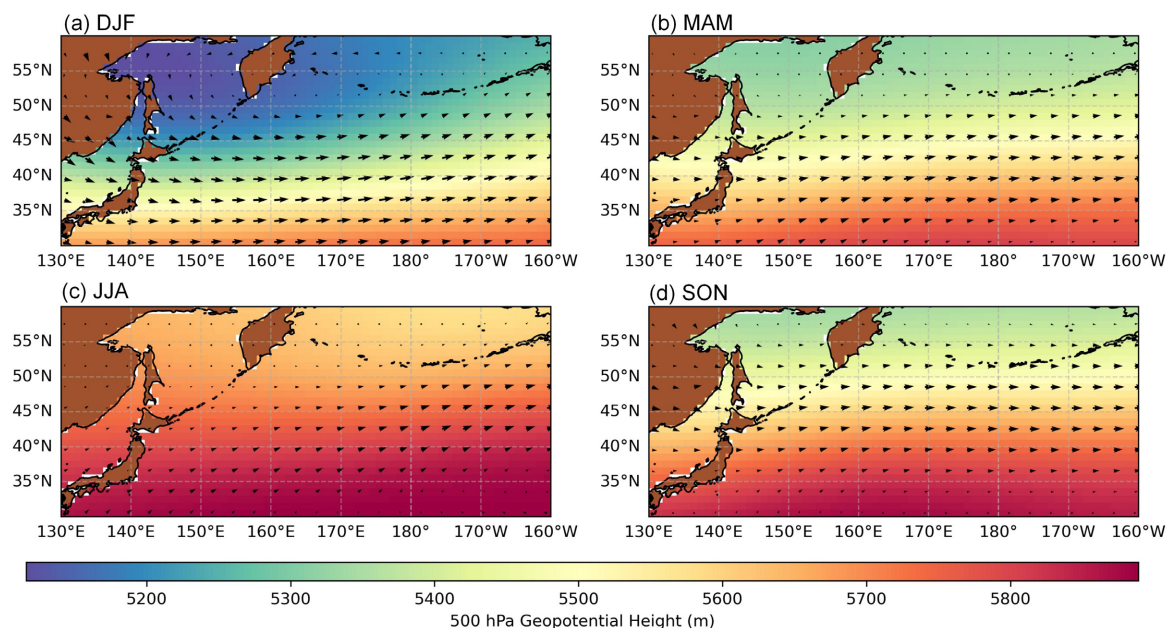


Figure 5. Overlay plot of the seasonal average 500 hPa geopotential height field and the 850 hPa wind field
图 5. 四季平均 500 hPa 位势高度场与 850 hPa 风场的叠加场图

低层对流层稳定度(LTS, Lower Tropospheric Stability)是表征海洋边界层热力稳定性的重要指标, 定义为 700 hPa 位势温度与地表位势温度之差[36]。较高的 LTS 对应较强的稳定层结, 使得边界层顶的湍流混合受到抑制, 从而限制了云层的垂直发展高度。在这种情况下, 低云云顶通常被限制在较低高度附近, 例如典型的海洋层云或层积云云顶高度往往位于边界层顶附近[37]。相反, 当 LTS 较低时, 大气稳定度减弱, 边界层更容易发生垂直混合和湍流输送, 从而促进云层向更高高度发展。沿经向剖面计算云下低云云顶高度与 LTS 的平均值, 结果表明, 两者在纬向上的变化幅度整体较小, 即无论是 LTS 还是云下低云的云顶高度, 都没有随纬度呈现出显著的单调变化趋势, 说明在研究海域内, 经向热力结构相对均一, 低云云顶高度并不主要受纬度梯度控制。然而, 从季节尺度来看, LTS 表现出明显的季节差异: 夏季 LTS 值普遍在 15~20 K 之间, 而冬季主要处于 10~15 K 范围, 整体上夏季明显高于冬季(图 8)。这种季节差异反映了夏季海洋上空低层暖湿空气与较冷自由大气之间温度梯度更强, 从而形成更稳定的低层层结。从空间分布特征来看, 多层云下低云云顶高度与 LTS 的分布格局具有较好的一致性。夏季在广阔洋面上可以观察到闭合的 20 K LTS 等值线区域, 该区域低层稳定度较强, 有利于抑制深对流的发展, 同时为层状低云的形成和维持提供稳定环境。在这种条件下, 多层云结构中的下层低云发展较为旺盛,

其云顶高度也相对较高, 并在空间上与高 LTS 区域基本对应(图 9(c))。相比之下, 在秋季和冬季, 大部分海域的 LTS 值集中在 10~15 K 范围内, 整体稳定度较夏季偏弱, 但仍存在局地较高的 LTS 区域(图 9(a), 图 9(d))。在这些稳定度相对较高的区域, 低层逆温结构更容易维持, 从而使云下低云能够发展到相对更高的云顶高度。因此, 从物理机制上看, LTS 通过层结的稳定度, 影响多层云下低云的生成概率, 控制了低云的发展高度。

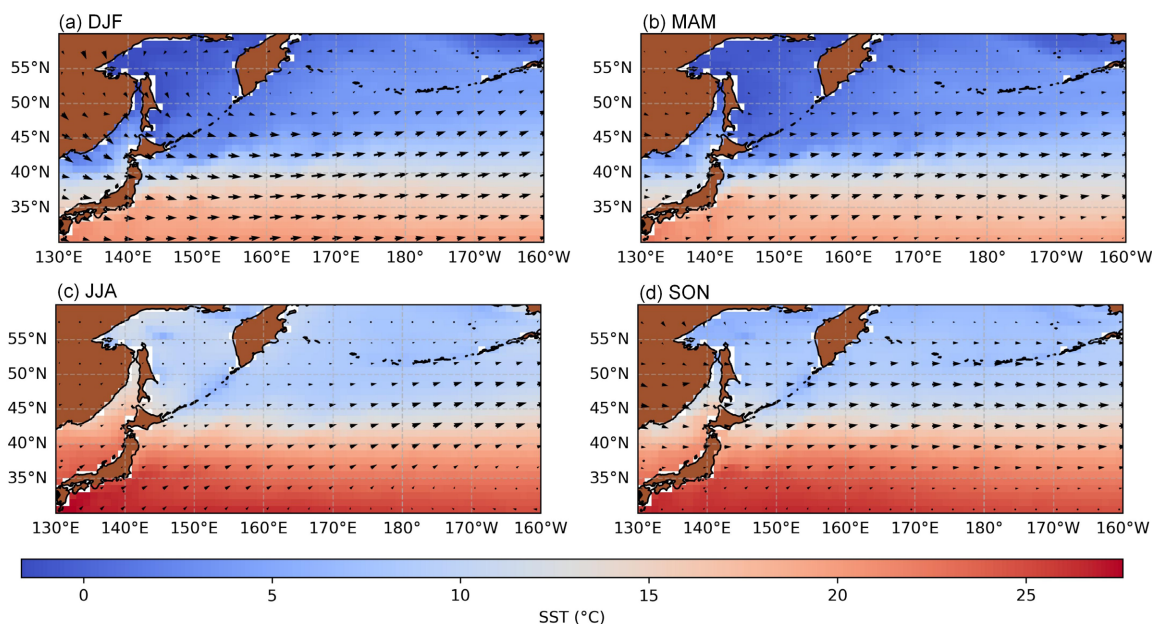


Figure 6. Overlay plot of the seasonal average SST field and the 850 hPa wind field

图 6. 四季平均 SST 场与 850 hPa 风场的叠加场图

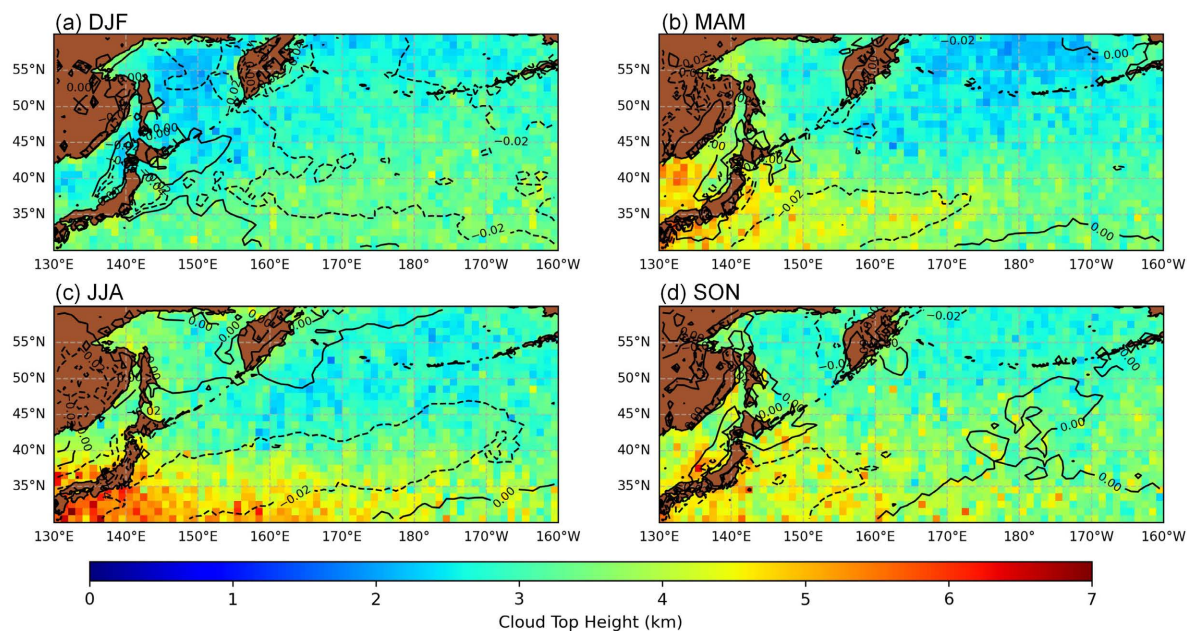


Figure 7. Overlay plot of the seasonal average upper cloud top height of multilayer clouds and the vertical velocity at 500 hPa, spatial resolution: $1^\circ \times 1^\circ$

图 7. 四季平均多层云上层云顶高度与 500 hPa 垂直速度的叠加场图, 空间分辨率: $1^\circ \times 1^\circ$

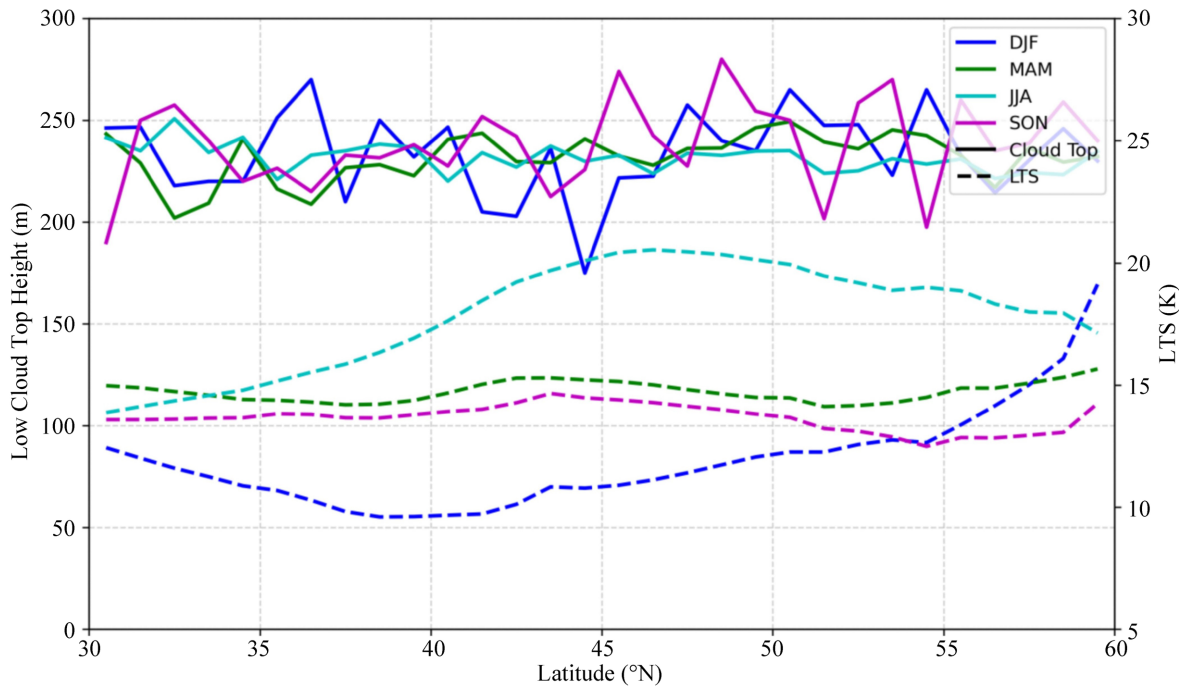


Figure 8. Latitudinal variations of cloud top height of low clouds beneath multilayer clouds and LTS across four seasons
图 8. 四季多层云下低云云顶高度与 LTS 随纬度的变化情况

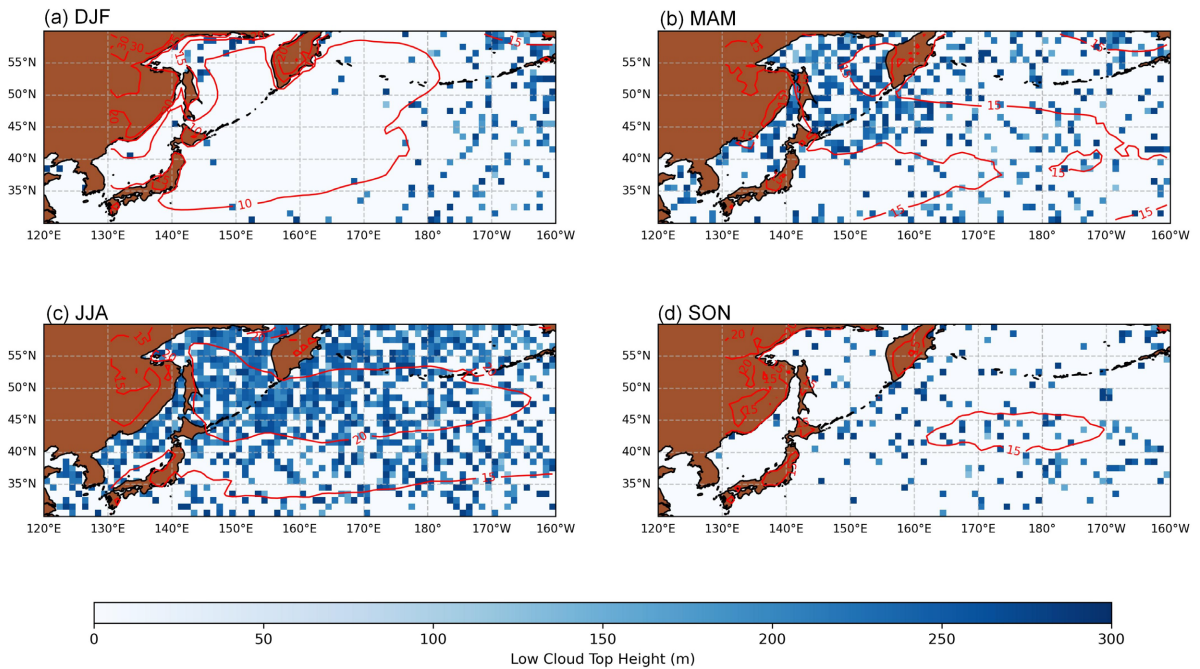


Figure 9. The spatial distribution of the cloud top height of lower clouds under multilayer clouds and LTS across the four seasons, spatial resolution: $1^\circ \times 1^\circ$
图 9. 四季多层云下低云云顶高度与 LTS 的空间分布, 空间分辨率: $1^\circ \times 1^\circ$

3.3. 多层云辐射传输特性模拟

虽然本文利用激光雷达产品对多层云垂直结构进行了统计, 但多层云系统的辐射特性也是理解其气

候效应的重要方面[38]。为进一步分析多层云中上下层云对辐射传输的影响, 本研究利用辐射传输模式对统计的典型两层云结构进行了数值模拟。本研究模拟了多层云中下层低云信号穿透上层云的情况, 大气廓线选择模型内置中纬度夏季大气温湿度分布廓线, 不考虑气体吸收和海洋边界层气溶胶背景。设置下层云顶高度 1.0 km, 云有效粒子半径 $8.0 \mu\text{m}$, 云液态水含量 0.10 g/m^3 , 设置高层云顶高度 5.0 km, 几何厚度为 1 km, 云顶温度设置为自适应廓线云顶高度处对应的气温。对于红外通道, 云顶温度设置为 $280\sim 290 \text{ K}$, 以修改云本身出射的红外辐射; 对于可见光通道, 云光学厚度变化范围设置为 $5\sim 25$, 以修改云顶反射的太阳辐射。光学厚度设置变化范围为 $0\sim 8$; 卫星观测高度角设置为 180° (垂直向下观测) $\sim 150^\circ$; 模拟红外波段为夜间(太阳天顶角 $\text{SZA} > 90^\circ$), 可见光-近红外波段为日间($\text{SZA} < 90^\circ$)。

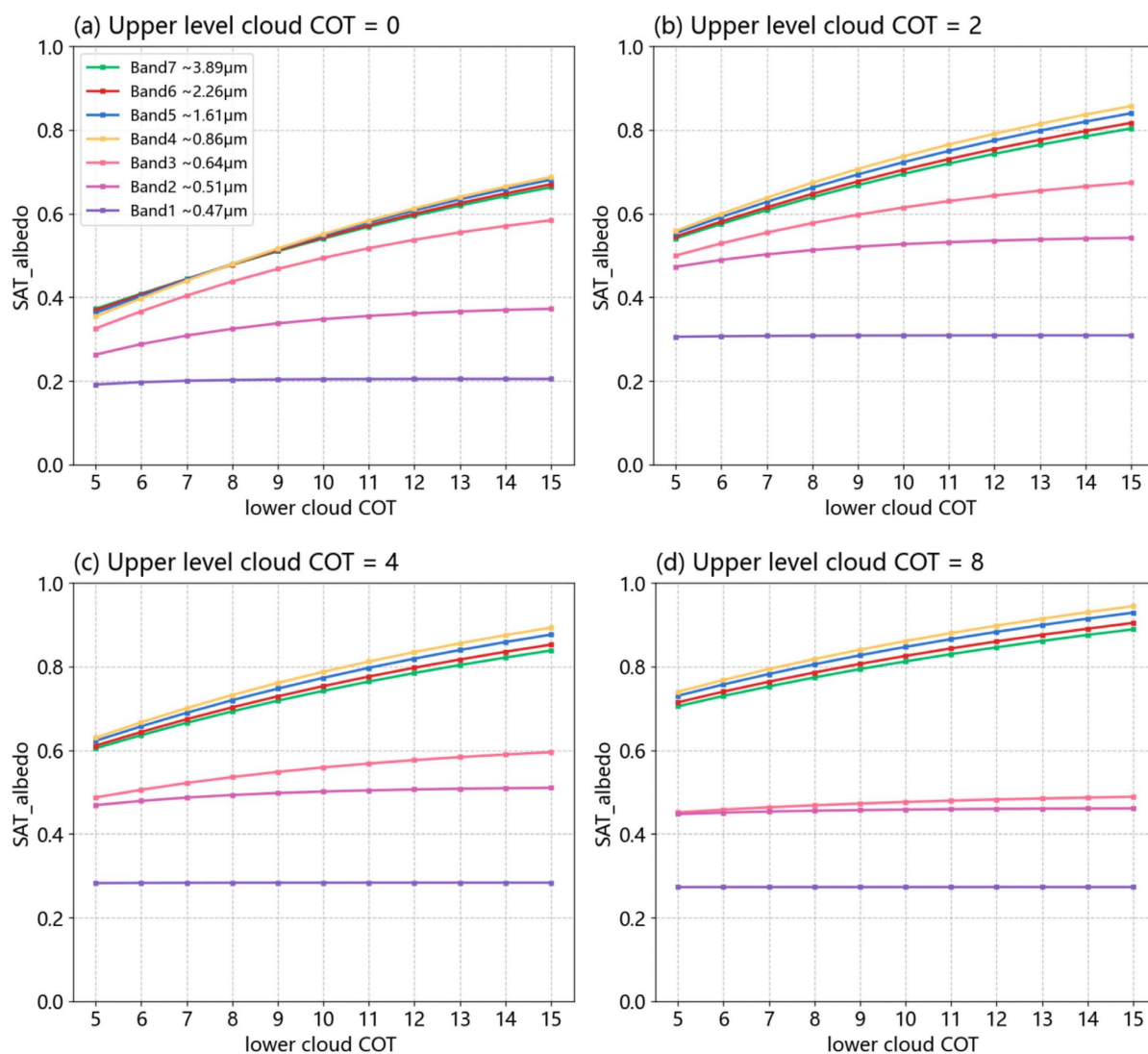


Figure 10. Upper cloud conditions with different optical thicknesses, and the variation of shortwave albedo with the change in lower cloud optical thickness

图 10. 不同光学厚度的上层云遮盖条件下, 短波反照率随低层云光学厚度的变化

下层云反射的近红外($0.86 \mu\text{m}\sim 3.89 \mu\text{m}$)辐射在上层云内有一定的穿透性, 反射率随下层云光学厚度的增加而增加(图 10); 红外波段, 固定下层云光学厚度, 分别修改下层云顶温度和上层云光学厚度, 模

拟的通道亮温会随下层云云顶温度而变化, 在上层云光学厚度增加到 10 左右时, 下层云的红外辐射被完全屏蔽(图 11)。综合上述实验, 多层云系统中上层云光学厚度对辐射传输具有显著调节作用。当上层云较薄时, 下层低云的辐射信息仍能对整体辐射信号产生影响, 而当上层云较厚时, 下层云辐射将被显著削弱甚至完全遮蔽。这一结果说明, 多层云的垂直结构能对区域辐射收支产生重要影响。

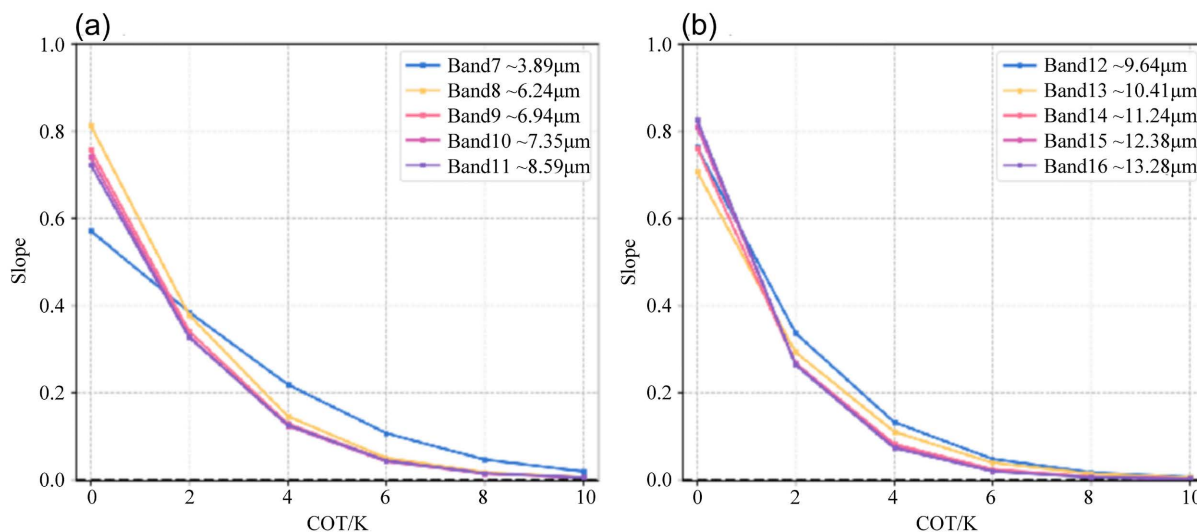


Figure 11. Fixing the lower cloud parameters, simulating the relationship between the change rate of satellite-observed brightness temperature across different bands and the upper cloud optical thickness, with respect to the lower cloud top temperature
图 11. 固定下层云参数, 模拟卫星观测不同波段亮温随下层云云顶温度的变化率与上层云光学厚度的关系

4. 结论与讨论

本文基于 CALIPSO 卫星提供的 Vertical Feature Mask 产品, 利用 2009~2023 年长期观测资料, 对 $120^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 范围内的西北太平洋海域多层云及多层云下低云的空间分布与季节变化进行了统计分析, 并结合大气环流、海面温度以及低层对流层稳定度等环境因子探讨其形成机制。结果表明, 多层云在研究区域内具有较高发生频率, 而多层云结构中的下层低云则呈现明显的区域集中和季节差异, 其形成条件与大尺度环流和局地海气相互作用有关。

从整体分布来看, 多层云在研究区域普遍存在, 年均发生频率普遍超过 0.4, 并在远离大陆的洋面上空表现出较高比例的厚多层云结构。相比之下, 多层云下低云的发生频率明显较低, 大部分海域约为 0.1 左右, 但其空间分布呈现明显的沿岸集中特征, 尤其是在黄渤海海域, 部分格点频率可达到 0.4 以上。与单层低云相比, 多层云下低云的分布更加局地化, 其高值区主要集中在近岸海域。这表明, 多层云的形成主要受大尺度环流和水汽输送控制, 而多层云结构中下层低云的出现则更依赖于局地海气条件和边界层环境。从季节变化特征来看, 多层云在全年均有较高发生频率, 但春夏季明显高于秋冬季, 其中夏季达到最大值, 并在整个研究区域呈现较为均匀的分布特征; 秋冬季多层云则更多集中在高纬度海域。相比之下, 多层云下低云的季节变化更为明显, 主要集中在春夏季, 夏季发生频率最高, 而秋冬季几乎很少出现。空间上看, 春季低云主要分布在黄渤海海域, 夏季略向外海扩展, 但总体分布范围仍明显小于多层云。

气象环境分析表明, 大气环流、低空风场及海面温度对多层云及其下层低云分布具有重要调控作用。冬季高空位势高度较低, 低空盛行西北风和北风, 干冷空气从大陆输送至海洋, 低层水汽条件较差, 使多层云主要分布在远离大陆的洋面区域, 而下层低云难以形成。进入夏季后, 低空风场转为南风或西南

风, 暖湿气流向北输送, 同时海面温度升高增强海气之间的水汽交换, 为云的形成提供有利条件。此外, 黄渤海地区夏季低空风速较弱, 空气水平输送有限, 水汽容易在海面上方累积并维持稳定层结, 从而有利于低云在该区域形成并集中分布。从垂直结构特征来看, 多层云上层云顶高度与中层大气垂直运动之间存在一定对应关系。冬季 500 hPa 附近上升运动较弱, 大气稳定性较强, 使多层云垂直发展受限, 云顶高度普遍较低; 而夏季研究区域南部海域存在微弱上升运动, 使多层云云顶高度明显增加, 部分区域平均云顶高度可超过 7 km。同时, 低层对流层稳定度分析表明, 夏季 LTS 值普遍高于冬季, 稳定的边界层环境有利于低云在边界层顶部附近形成并维持。

此外, 辐射传输模拟结果表明, 多层云系统中上层云光学厚度对辐射传输具有重要调节作用。当上层云较薄时, 下层低云的近红外反射信号仍可部分穿透上层云层, 而当上层云光学厚度增加时, 下层云辐射逐渐被削弱甚至完全屏蔽。这说明多层云垂直结构不仅影响云的空间分布, 也会改变卫星观测到的辐射特征。

总体而言, 本研究统计了西北太平洋中高纬度海域多层云及多层云下低云的空间分布并分析其环境控制因素。结果表明, 多层云在研究区域全年普遍存在且频率较高, 而多层云下低云的发生则更具有明显的季节性变化, 春夏季频率较高, 且空间分布集中于沿岸区域, 特别是黄渤海海域。多层云受大尺度环流和水汽输送影响, 而多层云结构中的下层低云则更多依赖于局地海气相互作用和边界层的稳定性。辐射传输模式表明, 上层云的光学厚度会削弱下层低云的辐射信号, 体现了多层云垂直结构对区域辐射收支的影响。未来可通过进一步结合高分辨率的模拟数据和长期观测, 探索气候变化背景下多层云及下层低云的时空演变趋势, 以及其对区域辐射传输和气候系统反馈的潜在影响。

基金项目

山东省自然科学基金(ZR2025LQX003, ZR2024LQX004), 国家自然科学基金(42475099, 42276188)。

参考文献

- [1] Rossow, W.B. and Schiffer, R.A. (1999) Advances in Understanding Clouds from ISCCP. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **80**, 2261-2287. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<2261:aiucfi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<2261:aiucfi>2.0.co;2)
- [2] Ma, N., Sun, L., Zhou, C. and He, Y. (2021) Cloud Detection Algorithm for Multi-Satellite Remote Sensing Imagery Based on a Spectral Library and 1D Convolutional Neural Network. *Remote Sensing*, **13**, Article 3319. <https://doi.org/10.3390/rs13163319>
- [3] Girard, E. and Blanchet, J. (2001) Microphysical Parameterization of Arctic Diamond Dust, Ice Fog, and Thin Stratus for Climate Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 1181-1198. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1181:mpoadd>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1181:mpoadd>2.0.co;2)
- [4] Sui, C.H., Lau, K.M., Tao, W.K. and Simpson, J. (1994) The Tropical Water and Energy Cycles in a Cumulus Ensemble Model. Part I: Equilibrium Climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **51**, 711-728. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<0711:ttwaec>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<0711:ttwaec>2.0.co;2)
- [5] Cheng, Y., He, H., Xue, Q., Yang, J., Zhong, W., Zhu, X., *et al.* (2024) Remote Sensing Retrieval of Cloud Top Height Using Neural Networks and Data from Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization. *Sensors*, **24**, Article 541. <https://doi.org/10.3390/s24020541>
- [6] González, A., Wendling, P., Mayer, B., Gayet, J. and Rother, T. (2002) Remote Sensing of Cirrus Cloud Properties in the Presence of Lower Clouds: An ATSR-2 Case Study during the Interhemispheric Differences in Cirrus Properties from Anthropogenic Emissions (INCA) Experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**, AAC 8-1-AAC 8-15. <https://doi.org/10.1029/2002jd002535>
- [7] Kugler, L., Serafin, S. and Weissmann, M. (2025) Dealing with Unresolved Scales of Motion and Systematic Errors in the Assimilation of Cloud-Affected Satellite Radiances (Nos. EGU25-10275). 2025 *Copernicus Meetings*, Vienna, 27 April-2 May 2025.
- [8] Henderson, D.S. and L'Ecuyer, T.S. (2024) Cloud Types Leading to Variability in Cloud Radiative Effects and the Top-of-Atmosphere Radiative Budget. 2024 *104th Annual AMS Meeting*, Baltimore, 28 January-1 February 2024.

- [9] Shonk, J.K.P., Hogan, R.J., Edwards, J.M. and Mace, G.G. (2010) Effect of Improving Representation of Horizontal and Vertical Cloud Structure on the Earth's Global Radiation Budget. Part I: Review and Parametrization. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **136**, 1191-1204. <https://doi.org/10.1002/qj.647>
- [10] Smith, D.K.E., Renfrew, I.A., van den Heuvel, F., Lachlan-Cope, T., Crawford, I., Bower, K., *et al.* (2025) The Impact of Mixed-Phase Cloud Processes on Simulating Southern Ocean Clouds and Their Radiative Effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **130**, e2025JD044452. <https://doi.org/10.1029/2025jd044452>
- [11] Stephens, G.L. (1984) The Parameterization of Radiation for Numerical Weather Prediction and Climate Models. *Monthly Weather Review*, **112**, 826-867. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0826:tporfn>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0826:tporfn>2.0.co;2)
- [12] Wilson, A.M. and Jetz, W. (2016) Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. *PLOS Biology*, **14**, e1002415. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002415>
- [13] Kawamoto, K., Minnis, P., Smith Jr, W.L. and Rapp, A.D. (2002) Detecting Multilayer Clouds Using Satellite Solar and IR Channels. 2002 11th *Conference on Cloud Physics*, Ogden, 3-7 June 2002, 1-4.
- [14] Minnis, P., Sun-Mack, S., Young, D.F., Heck, P.W., Garber, D.P., Chen, Y., *et al.* (2011) CERES Edition-2 Cloud Property Retrievals Using TRMM VIRS and Terra and Aqua MODIS Data—Part I: Algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **49**, 4374-4400. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2011.2144601>
- [15] Rozanov, V.V. and Kokhanovsky, A.A. (2004) Semianalytical Cloud Retrieval Algorithm as Applied to the Cloud Top Altitude and the Cloud Geometrical Thickness Determination from Top-of-Atmosphere Reflectance Measurements in the Oxygen a Band. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109**, D05202. <https://doi.org/10.1029/2003jd004104>
- [16] Pavlonis, M.J. (2010) Advances in Extracting Cloud Composition Information from Spaceborne Infrared Radiances—A Robust Alternative to Brightness Temperatures. Part I: Theory. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **49**, 1992-2012. <https://doi.org/10.1175/2010jamec2433.1>
- [17] Xue, J., Yuan, C., Qu, Y. and Huang, Y. (2025) Observation of Multilayer Clouds and Their Climate Effects: A Review. *Atmosphere*, **16**, Article 692. <https://doi.org/10.3390/atmos16060692>
- [18] Painemal, D., Corral, A.F., Sorooshian, A., Brunke, M.A., Chellappan, S., Afzali Goroooh, V., *et al.* (2021) An Overview of Atmospheric Features over the Western North Atlantic Ocean and North American East Coast—Part 2: Circulation, Boundary Layer, and Clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **126**, e2020JD033423. <https://doi.org/10.1029/2020jd033423>
- [19] Sharma, S., Dass, A., Mishra, A.K., Singh, S. and Kumar, K. (2022) A Decadal Climatology of Cloud Vertical Structure over the Indo-Gangetic Plain Using Radiosonde and Radar Observations. *Atmospheric Research*, **266**, Article 105949. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105949>
- [20] Li, J., Huang, J., Stamnes, K., Wang, T., Lv, Q. and Jin, H. (2015) A Global Survey of Cloud Overlap Based on CALIPSO and Cloudsat Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 519-536. <https://doi.org/10.5194/acp-15-519-2015>
- [21] Tan, R.T., Xian, T. and Fu, Y.F. (2018). Structures of Multilayer Clouds in Boreal Summer Based on CPR Radar Measurements. *Climatic and Environmental Research*, **23**, 124-138.
- [22] Li, J., Zheng, F., Sun, C., Feng, J. and Wang, J. (2019) Pathways of Influence of the Northern Hemisphere Mid-High Latitudes on East Asian Climate: A Review. *Advances in Atmospheric Sciences*, **36**, 902-921. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8236-5>
- [23] Wang, Y., Qiu, Z., Zhao, D., Ali, M.A., Hu, C., Zhang, Y., *et al.* (2023) Automatic Detection of Daytime Sea Fog Based on Supervised Classification Techniques for FY-3D Satellite. *Remote Sensing*, **15**, Article 2283. <https://doi.org/10.3390/rs15092283>
- [24] Wang, L., Wang, Z., Cao, J., Liu, Y., Wang, D. and Leung, M.Y. (2024) Impact of the Thermal Contrast between the Arabian Sea and the Iranian Plateau on the Interannual Variability of the East Asian Summer Monsoon. *Environmental Research Letters*, **19**, Article 094017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad6780>
- [25] Tokinaga, H., Tanimoto, Y., Xie, S., Sampe, T., Tomita, H. and Ichikawa, H. (2009) Ocean Frontal Effects on the Vertical Development of Clouds over the Western North Pacific: *In Situ* and Satellite Observations. *Journal of Climate*, **22**, 4241-4260. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2763.1>
- [26] Subrahmanyam, K.V. and Kumar, K.K. (2017) CloudSat Observations of Multi Layered Clouds across the Globe. *Climate Dynamics*, **49**, 327-341. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3345-7>
- [27] Oreopoulos, L., Cho, N. and Lee, D. (2017) New Insights about Cloud Vertical Structure from CloudSat and CALIPSO Observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **122**, 9280-9300. <https://doi.org/10.1002/2017jd026629>
- [28] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., *et al.* (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

-
- [29] Avery, M.A., Ryan, R.A., Getzewich, B.J., Vaughan, M.A., Winker, D.M., Hu, Y., *et al.* (2020) CALIOP V4 Cloud Thermodynamic Phase Assignment and the Impact of Near-Nadir Viewing Angles. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 4539-4563. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4539-2020>
- [30] Qiao, N., Wang, L., Marais, E. and Li, F. (2022) Fog Detection and Estimation Using CALIPSO Lidar Observations. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL101375. <https://doi.org/10.1029/2022gl101375>
- [31] Wu, D.L., Chae, J.H., Lambert, A. and Zhang, F.F. (2011) Characteristics of CALIOP Attenuated Backscatter Noise: Implication for Cloud/Aerosol Detection. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 2641-2654. <https://doi.org/10.5194/acp-11-2641-2011>
- [32] International Civil Aviation Organization (2018) Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation: Meteorological Service for International Air Navigation. 20th Edition, ICAO.
- [33] Iwabuchi, H., Putri, N.S., Saito, M., Tokoro, Y., Sekiguchi, M., Yang, P., *et al.* (2018) Cloud Property Retrieval from Multiband Infrared Measurements by Himawari-8. *Journal of the Meteorological Society of Japan Series II*, **96**, 27-42. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-001>
- [34] 黄翊, 彭新东. 边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响[J]. 大气科学, 2017, 41(3): 533-543.
- [35] Tian, R., Ma, Y., Ma, W., Zhao, X. and Zha, D. (2021) Longer Time-Scale Variability of Atmospheric Vertical Motion over the Tibetan Plateau and North Pacific and the Climate in East Asia. *Atmosphere*, **12**, Article 630. <https://doi.org/10.3390/atmos12050630>
- [36] Klein, S.A. and Hartmann, D.L. (1993) The Seasonal Cycle of Low Stratiform Clouds. *Journal of Climate*, **6**, 1587-1606. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1587:tscols>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1587:tscols>2.0.co;2)
- [37] Wood, R. (2012) Stratocumulus Clouds. *Monthly Weather Review*, **140**, 2373-2423. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-11-00121.1>
- [38] Yi, Y., Minnis, P., Huang, J., Sun-Mack, S., Chen, Y. and Ayers, K. (2008) Validation of Multilayered Cloud Properties Using A-Train Satellite Measurements. 2008 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, 7-11 July 2008, 574-577. <https://doi.org/10.1109/igarss.2008.4780157>