

基于卫星数据的2012~2022年中国近海低云物理特性的时空特征

张元振^{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1月25日; 录用日期: 2026年2月24日; 发布日期: 2026年3月3日

摘要

本文基于MODIS和CALIPSO卫星遥感资料, 分析了2012~2022年中国近海日间低云(云顶高度低于2 km)的分布特征及其物理特性(云滴有效半径、云水路径以及光学厚度)的时空特征。结果显示: (1) 统计特征上, 云滴有效半径平均值为10.96 μm , 云水路径平均值为74.48 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 云光学厚度COT平均值为11.3, 相比于西北太平洋远海的低云较小。(2) 空间上, 中国近海低云云频最大值出现在南海北部的近岸海区, 在渤海海区最低。云滴有效半径在近岸海域较小, 向远海递增。云光学厚度高值区集中于近岸, 对应云滴有效半径的低值区。(3) 季节上, 低云云频表现为冬季高, 夏季低的特征。云滴有效半径夏季最大, 云水路径与光学厚度冬季最高。(4) 年际变化上, 大部分海区低云云频在2012~2022年间有减少趋势, 云滴有效半径和云水路径有增大趋势, 低云的光学厚度在近岸海区表现为降低趋势。

关键词

低云, 云滴有效半径, 云水路径, 云光学厚度, 中国近海

Spatiotemporal Analysis of Low Cloud Physical Properties over China's Coastal Seas Based on Satellite Data (2012~2022)

Yuanzhen Zhang^{1,2}, Li Yi^{1,2*}

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

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

Received: January 25, 2026; accepted: February 24, 2026; published: March 3, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张元振, 衣立. 基于卫星数据的 2012~2022 年中国近海低云物理特性的时空特征[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 237-250. DOI: 10.12677/ccrl.2026.152029

Abstract

This study investigates daytime low cloud (cloud top height < 2 km) over China's coastal seas from 2012 to 2022, utilizing MODIS and CALIPSO data. We analyse the spatial distribution, seasonal cycle, and interannual variability of low cloud frequency and physical parameters—including cloud effective radius (CER), cloud water path (CWP), and optical thickness (COT). Results indicate that: (1) Statistically, the mean values of CER, CWP, and COT are 10.96 μm , 74.48 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, and 11.3, respectively. These values are generally lower than those reported for low clouds over the open Northwest Pacific. (2) Spatially, the highest frequency of low clouds occurs over the nearshore areas of the northern South China Sea, while the lowest frequency is found in the Bohai Sea. The CER is smaller in coastal waters and increases toward the distant sea. Regions with high COT are concentrated along the coast, corresponding to areas of smaller CER. (3) Seasonally, low cloud frequency is higher in winter and lower in summer. CER peaks in summer, whereas both CWP and COT reach their maxima in winter. (4) Interannually, from 2012 to 2022, low cloud frequency exhibited a decreasing trend over most sea areas, while CER and CWP generally increased. In contrast, COT showed a declining trend in coastal regions.

Keywords

Low Cloud, Cloud Effective Radius, Cloud Water Path, Cloud Optical Thickness, China's Coastal Sea

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

云覆盖了地球表面约三分之二的区域, 其分布范围以及宏观和微观物理性质(如云顶高度、光学厚度和云滴有效半径等)会显著影响地球系统的辐射收支[1]-[4]。云在辐射能量平衡和气候系统中通过复杂的辐射反馈机制调节地气系统的能量平衡。一方面, 云通过反射太阳短波辐射的“反照率效应”减少到达地表的辐射, 对地气系统起冷却作用; 另一方面, 云可以吸收并发射长波辐射产生“温室效应”, 对地气系统起增温作用[5] [6]。这两种效应的相对重要性取决于云的种类、高度和云量等因素[7]。

低云由于云滴尺寸较小且含水量高, 主要通过散射(反射)向下的太阳短波辐射, 减少到达地表的辐射能量, 从而对地球系统起冷却作用[8]-[10], 这一冷却效应的强度与低云的宏观特性(低云量、云顶高度、云几何厚度等)以及云微物理参数(云滴有效半径、云滴数浓度和云液态水含量等)均有关[11] [12]。Hartmann *et al.*发现低云量增加 10%会引起 -6.3 W/m^2 的地表净辐射通量变化[13], Slingo 发现层云滴有效半径从 $20 \mu\text{m}$ 变化到 $16 \mu\text{m}$ 时导致的冷却效应可以抵消大气二氧化碳浓度加倍导致的温室效应[14]。研究表明, 当云凝结核数量增加时, 云滴数量增多而云滴半径减小, 云反射短波辐射的能力会加强, 从而产生更强的冷却效应[15]。随着全球变暖加剧, 低云云量及其物理特性也会随之发生变化[16] [17], 因此, 开展低云及其相关物理特性的研究, 对于量化低云辐射效应以及降低气候模式的不确定性十分重要[18] [19]。

当前研究云物理特性的方法主要分为直接观测和遥感反演两类, 其中直接观测包括地基定点观测以及飞机穿云观测等手段, 是研究云滴谱的长期变化、云的垂直结构及云微物理参数三维分布的重要方法

[20]。遥感反演是获取云物理特性的另一个有效手段, 相关的探测设备包括毫米波云雷达, 星载激光雷达/云雷达(如 CALIPSO, CloudSat, EarthCARE)以及卫星多光谱成像仪(如 Aqua/MODIS, Himawari-8/AHI)。毫米波雷达可主动发射电磁波并接收目标物反射的信号, 能够有效地穿透云层、捕捉云内粒子的运动信息, 提供连续的云内物理特性变化, 是探测云三维特性的重要方式[21]。对于地基雷达和飞机观测等手段, 受到探测范围和站点密度的限制, 其空间代表性有限, 难以捕捉大范围云系的分布与物理特性。与之相比, 卫星遥感反演方法具有观测范围广、不受地表限制等优势, 且目前有运行时间较长的星载探测仪器和较为成熟的云微物理参数反演算法, 为研究更大范围的云物理特性长期变化提供了可能[22]。

中国近海是海-气相互作用最强烈和低云出现频率较高的区域之一[23][24], 同时也是受亚洲大陆气溶胶输出影响显著的海区。低云是对气溶胶间接效应最敏感的云型, 在相同的液态水路径下, 气溶胶浓度增加(如来自中国东部沿海工业区、船舶排放的污染气团)会导致云滴数量增多、有效半径减小, 从而使云光学厚度更大、反照率更高[15], 即 Twomey 效应。研究中国近海多年低云分布和物理特性的时空变化, 有助于更准确地评估和约束区域气候模式及全球气候模式在该区域的云物理参数化方案, 从而减少低云辐射效应的模拟偏差。当前有研究基于再分析数据及卫星数据统计了中国近海液态水云的云量和物理特性的季节分布特征, 并分析了云特性分布与气象条件的关系[25]-[27], 但所用卫星数据空间分辨率较粗, 难以捕捉近海区域云特性的精细梯度变化。在当前基础上, 本文计划使用高分辨率卫星数据开展中国近海低云物理特性空间分布和长期变化特征的研究, 可为改进区域气候模式中的低云参数化方案、降低辐射强迫模拟的不确定性等提供参考。

本文基于 MODIS 及 CALIPSO 卫星遥感资料, 通过主动和被动遥感数据匹配, 首先使用 CALIPSO VFM 数据检验了从 MODIS MYD06 云产品中获取低云样本的准确性, 在此基础上基于长时间序列 MODIS MYD06 云产品统计了 2012~2022 年中国近海的低云样本, 分析了日间低云物理特性空间分布格局和年际变化趋势, 并探讨其与局地气象条件和气溶胶排放变化的可能联系。第 2 节介绍了研究区域, 使用的卫星数据和低云识别方法, 第 3 节展示并讨论了低云云频及物理特性的时空分布特征及年际变化趋势, 第 4 节总结了主要结论。

2. 数据与方法

2.1. 研究区域

本文研究区域为中国东部、南部近海及毗邻海域(图 1), 包括渤海、黄海、东海和南海北部海域, 地理范围覆盖东经 105°至 130°, 北纬 18°至 42°的区域, 该海域是东亚地区海气相互作用最为活跃和受亚洲大陆气溶胶输出影响最显著的区域之一, 具有较高的低云发生频率[28], 其中低云的形成和演变受到沿岸冷流、东亚季风、复杂海陆地形以及黑潮延伸体的海洋锋等多种因素的共同影响[29]-[31]。这些低云由于云顶高度较低、光学厚度较大, 对太阳短波辐射的反射作用强烈。本文选取并裁剪了 2012~2022 年日间经过该区域的卫星数据以进一步研究低云的物理特性。

2.2. 卫星数据

本文使用了云-气溶胶激光雷达与红外探路者(CALIPSO)卫星 L2 级产品垂直特征掩模(Vertical Feature Mask, VFM)数据。VFM 数据基于 532 nm 总衰减后向散射和退偏比等信号, 对每个垂直剖面上的探测特征进行分类, 标识出清洁大气、气溶胶和云等目标物, 并进一步区分云相态(冰相、水相)。激光雷达可以有效穿透薄云和气溶胶层, 直接、精确地测量云层的垂直分布、顶部高度和底部高度信息[32], 本文使用的 VFM 数据水平分辨率约为 333 m, 在低层(-0.5~8.2 km)垂直分辨率为 30 m, 有助于识别低云以及接地的海雾[33]。CALIPSO 卫星平均每天经过中国近海 2 次, 我们截取了覆盖研究区域(105°E~130°E,

18°N~42°N)的VFM数据,提取VFM数据中分类为水云且云顶高度低于2 km的像元划分为低云像元[34],并剔除了多层云和数据质量较差($\text{Feature Type QA} \leq 1$)的像元。

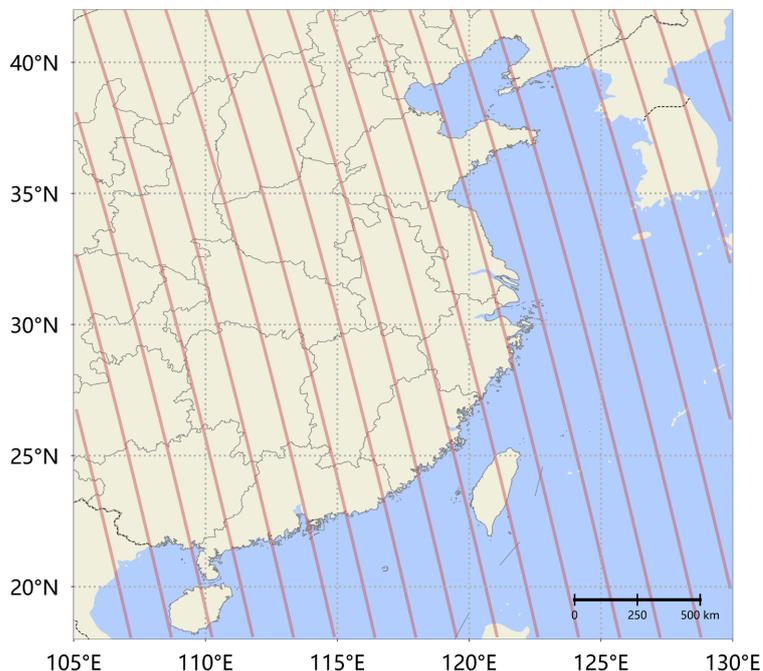


Figure 1. Study area and CALIPSO orbit trajectory (red line) (Approval No. GS(2024)0650)
图 1. 研究区域概况及 CALIPSO 卫星运行轨道(红线) (审图号: GS(2024)0650 号)

本文使用的云物理参数来源于 Aqua 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)二级云产品(MYD06),包含云高、云相态、云光学特性和微物理参数等信息,其中云微物理参数通过 MODIS 的通道 6 ($1.6 \mu\text{m}$)、通道 7 ($2.1 \mu\text{m}$)和通道 20 ($3.7 \mu\text{m}$)的反射率数据反演得到[35]。我们截取了 2012~2022 年日间经过研究区域的 MYD06 数据并提取云光学厚度(COT)、云滴有效半径(CER)、云水路径(CWP)、云顶高度(CTH)和云相态信息,数据的水平分辨率为 1 km,每一景的时间间隔为 5 分钟。

2.3. 低云识别方法

本文以云顶高度低于 2 km 的海上单层水云作为研究对象。对于 CALIPSO VFM 数据,将其中分类为液态水云且顶部高度低与 2 km 的单层云像元划分为低云像元,考虑到仪器噪声的影响,当在 VFM 数据中出现连续 10 个以上被识别为低云的像元时,认为是 1 个低云样本并纳入统计范围[36]。对于 MODIS MOD06 数据,首先使用云顶高度信息获取所有云顶低于 2 km 的像元,再根据云相态和云层数信息筛选出液态水云($\text{Cloud_Phase_Infrared} = 1$)和单层云($\text{Cloud_Multi_Layer_Flag} = 1$)。最后进行质量控制,考虑到云滴有效半径和光学厚度过于小容易引起反演结果出现较大误差[37],我们剔除了光学厚度小于 2 的云像元以及云顶高度信度较低的像元,得到 MODIS 低云样本数据集。

在此基础上,本文利用 2016~2018 年 CALIPSO VFM 数据来检验 MODIS 低云样本数据集的准确性。以 CALIPSO 的星下点坐标为基准点,匹配临近时刻(时间间隔 $< 5 \text{ min}$)空间距离(CALIPSO 星下点与 MODIS 格点的直线距离)最近的 MODIS 格点数据,以 VFM 资料的分类结果为准,按照“低云”和“非低云”两类情况对比了两组数据的识别结果(表 1)。如图 2 所示,MODIS MYD06 数据中云顶高度反演结果相比于 VFM 的结果存在一定的误差,但对低云的分类准确率相对较高,其中低云的检出率(CALIPSO

识别到的低云样本中被 MODIS 正确分类的比例)为 0.991, 识别准确率(MODIS 正确识别的低云样本占 MODIS 识别的所有低云样本的比例)为 0.929, 命中率为 0.949 (MODIS 分类结果正确的比例)。因此, 本文利用 MODIS MYD06 云产品的云顶高度信息识别的低云样本, 并进一步研究中国近海低云的物理特性。

Table 1. Comparison of low cloud identification results based on CALIPSO VFM data and MODIS MYD06 data
表 1. 基于 CALIPSO VFM 数据与 MODIS MYD06 数据的低云识别结果对比

	CALIPSO 低云	CALIPSO 非低云
MODIS 低云	23,036	1756
MODIS 非低云	220	14,047

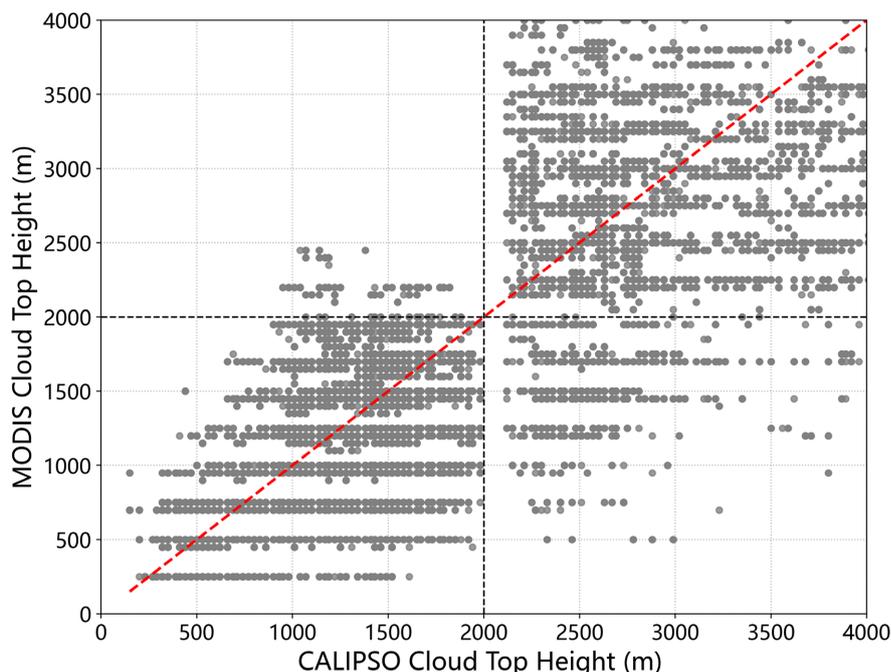


Figure 2. Comparison of cloud top height retrievals from CALIPSO VFM and MODIS MYD06
图 2. CALIPSO VFM 产品云顶高度与 MODIS MYD06 产品云顶高度反演结果对比

3. 研究结果

3.1. 低云物理参数的统计特征

我们对 2012~2022 年期间 MODIS 检测到的所有低云样本物理特征进行了统计, 如图 3 所示, 云滴有效半径(图 3(a))、云水路径(图 3(b))和云光学厚度(图 3(c))的统计结果基本呈现单峰、右偏态的分布特征, 表明研究区域内低云的物理特性受一套相对稳定的主导过程调控, 绝大多数低云样本的物理参数集中在分布峰值附近。少数大粒径、高云水路径和光学厚度的样本可能对应了个别发展更为深厚或处于不同生命阶段的低云云体。统计的 1686 万个低云样本点结果显示: 云滴有效半径平均值为 $10.96 \mu\text{m}$, 云水路径平均值为 74.48 g/m^2 , 云光学厚度 COT 平均值为 11.3, 云顶高度 CTH 存在两个峰值(图 3(d)), 一个是云顶高度为 600 m 左右的海雾/低层云, 另外的是 1500 m 左右的层积云。整体来看, 中国近海低云的有效粒子半径和云水路径平均值小于西北太平洋远海上空的结果[38], 但略大于中国陆地上的低云[25], 这与局地的水汽条件和气溶胶浓度均有关系。

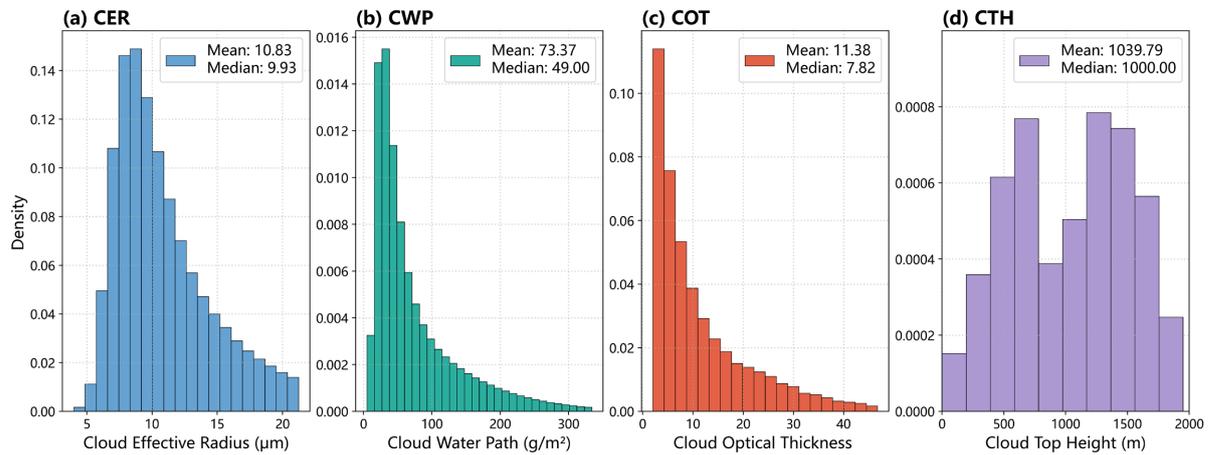


Figure 3. Kernel density distributions of (a) cloud droplet effective radius, (b) cloud water path, (c) cloud optical thickness, and (d) cloud top height

图 3. (a) 云滴有效半径(CER), (b) 云水路径(CWP), (c) 云光学厚度(COT)和(d) 云顶高度(CTH)的核密度分布

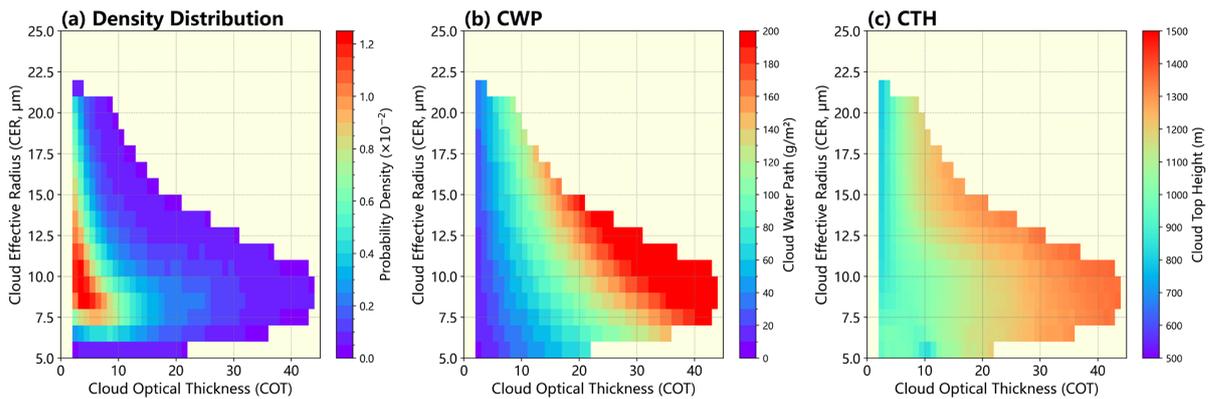


Figure 4. Statistical results of low cloud physical properties as functions of cloud optical thickness and cloud droplet effective radius, with shading representing: (a) probability density distribution, (b) cloud water path, and (c) cloud top height

图 4. 低云物理特性在不同光学厚度和云滴有效半径的统计结果, 其中填色分别为: (a) 密度分布, (b) 云水路径, (c) 云顶高度

此外, 我们统计了各个光学厚度和粒子半径区间内的云物理特性分布, 从密度分布来看(图 4(a)), 中国近海低云大多为有效粒子半径介于 7~16 μm 之间、云水路径小于 100 g/m^2 , 且光学厚度小于 10 的小粒径水云。从云水路径的统计结果来看(图 4(b)), 在相同的云滴有效半径条件下, 云水路径更大的低云有更大的光学厚度, 云水路径相同的情况下, 云滴有效半径较小时光学厚度较大, 这印证了 Twomey 效应在区域尺度上的体现: 在液态水含量相同的条件下, 更小的云滴(通常由气溶胶和云滴数浓度较高导致)能产生更大的光学厚度和反射率。从云顶高度分布来看(图 4(c)), 云顶高度相对较低的低云($\text{CTH} < 1000 \text{ m}$)平均具有更小的云水路径和光学厚度, 但在云滴有效半径变化范围上与云顶较高($\text{CTH} > 1000 \text{ m}$)的低云相差不多。总体来看, 中国近海的低云呈现出云滴有效半径较小, 光学厚度较低的统计特征, 这与东亚沿岸较高的气溶胶背景和活跃的海气相互作用条件相符。

3.2. 低云云频分布特征

基于 2012~2022 年日间 MODIS MYD06 云产品数据, 本文统计了中国近海低云发生频率的空间分布特征。如图 5 所示, 低云云频在各个海区有明显差异, 全年平均低云云频呈现南高北低的分布特征(图 5(a)),

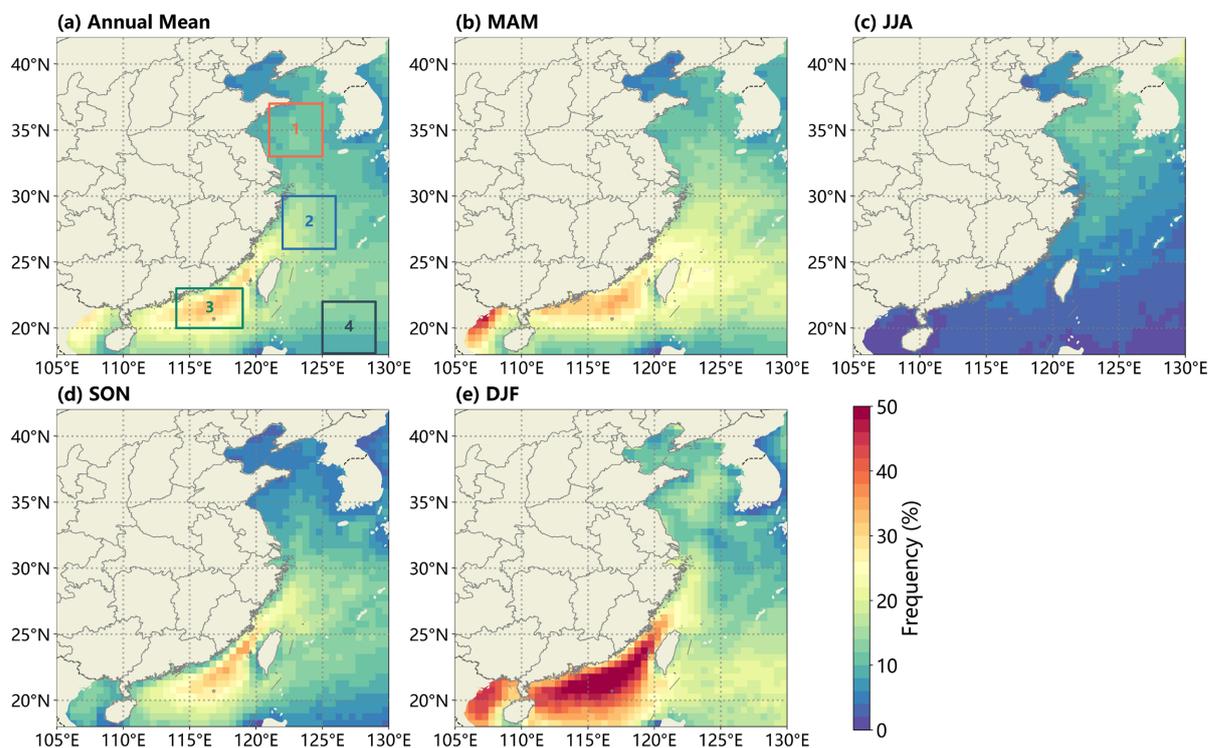


Figure 5. Spatial distribution of the daytime low cloud frequency over the China's coastal seas from 2012 to 2022. (a) annual mean, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter, spatial resolution: $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

图 5. 2012~2022 年中国近海日间平均低云云频的空间分布, 其中(a) 全年平均, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季, (e) 冬季, 空间分辨率: $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

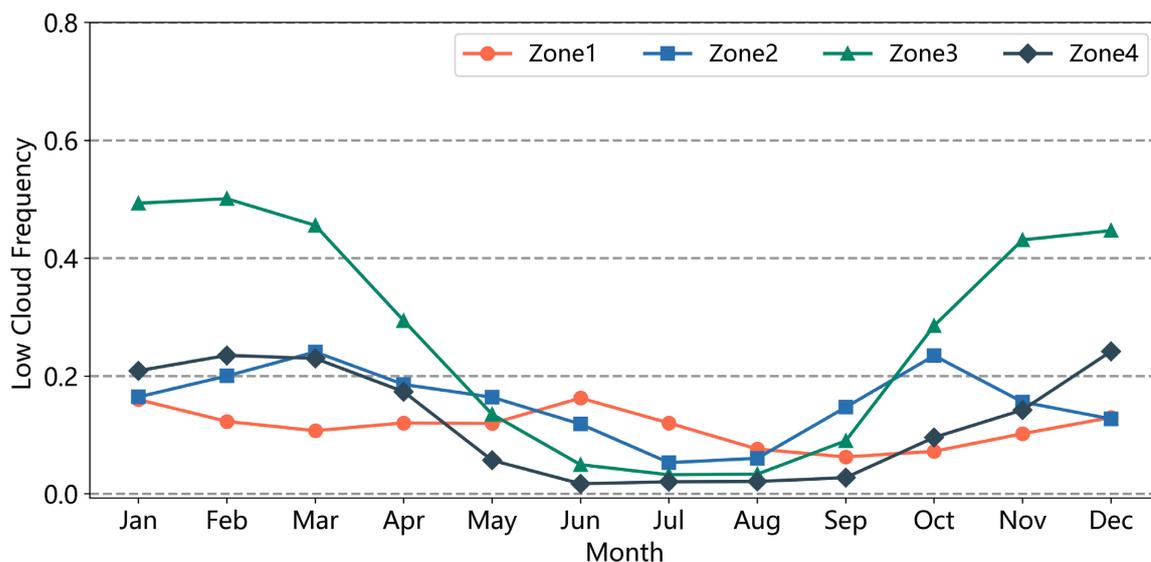


Figure 6. Monthly low cloud frequency for the subregions of China's coastal seas during daytime

图 6. 中国近海各海区日间平均逐月低云云频

云频高值中心(CF > 30%)主要位于广东和福建沿海的南海北部海区, 其次是台湾海峡附近海区。东海南部的低云云频(CF > 15%)略高于北部(CF < 15%), 云频最低值出现在渤海(CF < 10%)。季节变化上, 夏季

低云云频最低(图 5(c)), 且主要集中在黄海海区, 在低纬度海区云频较低。冬季低云云频达到最高(图 5(e)), 云频大值区分布与全年平均的分布格局相似。本文进一步选取了黄海(121°E~125°E, 33°N~37°N, Zone1)、东海(122°E~126°E, 26°N~30°N, Zone2)、南海北部(114°E~119°E, 20°N~23°N, Zone3)以及远离陆地的台湾岛东南部(125°E~129°E, 18°N~22°N, Zone4)海区, 统计了各海区多年平均逐月低云云频(图 6)。其中南海北部至台湾海峡一带(Zone3)的低云云频具有最明显的季节变率, 其余海区云频的季节变化相对较小。除北部的黄海海区(Zone1)外, 各海区的低云云频基本在夏季达到最低值, 在冬季达到最高值。这与气象条件的季节变化有关, 夏季较强的太阳辐射条件下大气层结更加不稳定, 有利于对流的产生和云体垂直发展, 使得云顶高度进一步上升[39], 因此基于云顶高度统计的低云在夏季占比较少。而在冬季风控制下, 低层大气稳定度高, 且边界层存在逆温, 有利于水汽在近海面积聚形成低层云或海雾[40], 导致统计的低云云频较高。黄海海区低云云频的季节变化较小, 在 1 月和 6 月具有两个云频峰值, 其中 6 月的峰值主要由于夏季黄海盛行来自南方的暖湿季风气团, 流经海温较低的黄海中部和北部海区时, 气团底部由于冷却容易形成海雾和低层云[41]。

3.3. 低云物理特性空间分布

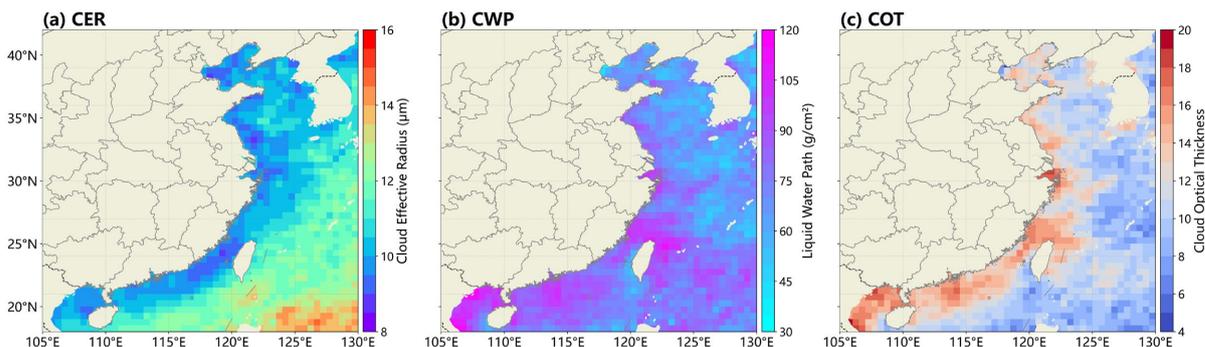


Figure 7. Spatial distribution of daytime cloud physical properties over China's coastal seas. (a) cloud effective radius, (b) cloud liquid water path, and (c) cloud optical thickness, spatial resolution: $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

图 7. 中国近海日间云物理特性的空间分布, 其中(a) 云滴有效半径, (b) 云液态水路径, (c) 云光学厚度, 空间分辨率: $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

在识别低云像元的基础上, 本文分析了 2012~2022 年气候态平均的低云有效粒子半径 CER, 云水路径 CWP, 云光学厚度 COT 在中国近海的空间分布(图 7), 云滴有效半径的空间分布呈现出清晰的“东南-西北”梯度, 大值区($CER > 14 \mu\text{m}$)集中在台湾岛东南部以及菲律宾以东远离陆地的海区, 而距离陆地较近的海区, 包括渤海, 黄海西部和东部靠近朝鲜半岛的部分、东海西部以及南海北部近岸, 云滴有效半径显著减小($CER < 10 \mu\text{m}$), 且小值区基本与海岸线走向相同(图 7(a))。贾海灵等研究指出近岸海区受到来自大陆的气溶胶输送影响更强, 作为云滴凝结核的气溶胶浓度增大会导致云水分配于更多小云滴上, 使卫星反演的云滴有效半径减小[25]。而在研究区域东南部远海清洁海洋性气团中, 云凝结核数浓度较低, 云水分配在少量大云滴上, 且暖海表促进云滴碰并增长, 使得该区域有较大的云滴有效半径。云光学厚度与有效粒子半径呈现相反的分佈特征, 光学厚度高值区对应云滴有效半径的小值区, 自南海北部经东海延伸至黄渤海在近岸海区构成一个沿海岸线走向的高光学厚度带状区(图 7(c))。这主要是由于在云含水量相同的情况下, 更多的小云滴能提供更大的总散射面积, 使得云的消光能力增强, 光学厚度增大。对于云水路径(图 7(b)), 在空间分布上云水路径的高值区与光学厚度高值区(对应于云滴有效半径的低值区)基本重合, 在近岸海区和低纬度海区有更高的云水路径。整体来看, 靠近陆地的近海区域拥有更高的背景气溶胶浓度, 这使得云滴数浓度增加、云滴有效半径变小, 这种条件下云滴更难增长为雨滴, 因此会

抑制降水, 从而导致云内液态水累积, 增大云水路径。同时低纬度更充沛的大气含水量和低空水汽输送使得南部海区平均云水路径高于北部。对于光学厚度, 根据经验关系, 在其他条件不变的情况下, 光学厚度与云水路径成正比, 而与云滴有效粒子半径成反比[42], 因此在云水路径高值区与云滴有效半径的低值区必然有较高的云光学厚度。

3.4. 低云物理特性季节变化

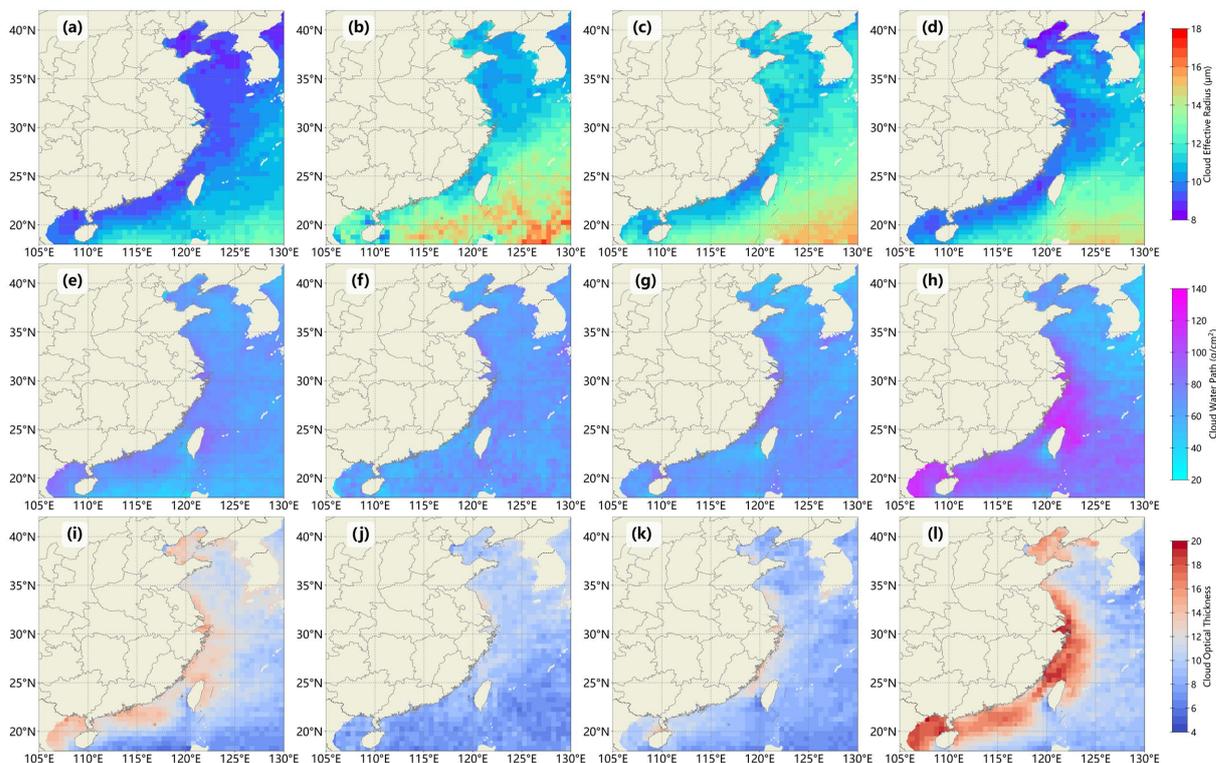


Figure 8. Seasonal distribution of daytime cloud physical properties over China's coastal seas, (a)~(d) cloud effective particle radius, (e)~(h) cloud liquid water path, and (i)~(l) cloud optical thickness, spatial resolution: $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

图 8. 中国近海日间云物理特性各季节的空间分布, 其中(a)~(d) 云滴有效半径, (e)~(h) 云液态水路径, (i)~(l) 云光学厚度, 空间分辨率: $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

我们进一步给出了云滴有效半径, 云水路径和光学厚度不同季节的分布特征(图 8)以及各海区低云物理特性平均值逐月变化(图 9)。云滴有效半径在各个季节的空间分布格局与全年平均情况类似, 低云在近岸具有较小的粒径, 在研究区域东南部的远海云滴较大, 且夏秋季的最大值明显高于冬春季(图 8(a)~(d))。整体上云滴有效半径存在一定的季节变率(图 9(a)), 在夏季达到最大, 春季最小, 差值在 2~6 μm 之间。这可能与夏季大气背景水汽充足且大气层结较不稳定有关, 这种条件下云滴形成后更易凝结和碰并增长至更大尺度。此外, 夏季海上对流降水频繁, 更易消耗凝结核, 导致云滴数浓度减小, 云水集中在更少、更大的云滴上, 使得云滴有效半径相对其他季节较大[43]。云水路径在春季、夏季和秋季的值相对较小(图 8(e)~(g)), 平均值小于 90 g/m^2 (图 9(b)), 且空间变化不明显。在冬季低云云水路径达到最大值(约 120 g/m^2), 总体表现为南高北低的特征, 可能有两点原因: (1) 夏季对流活动频繁, 云滴容易发展至较大尺度产生降水, 导致云水不易维持; 而冬季边界层结构相对比较稳定, 云滴粒径较小, 不易形成降水, 使得云水更多地在低云中维持[25], 且南部海区暖海面的蒸发相对较强, 大气中水汽含量高, 因此有更大的云水路径。(2) 夏季上升运动较强, 云顶容易向上发展, 对于云顶高度超过 2 km 且含水量较高的云本文未进行统计,

可能导致云水路径平均值偏小。光学厚度呈现出与云滴有效半径相反的空间分布和季节变化特征(图 8(i)~(l))。夏季由于云滴粒径较大, 数浓度低, 散射截面小, 光学厚度为全年最小值($COT < 10$); 冬季由于云水路径较大, 且云滴有效半径更小, 光学厚度相对其他季节更大($COT > 15$)。

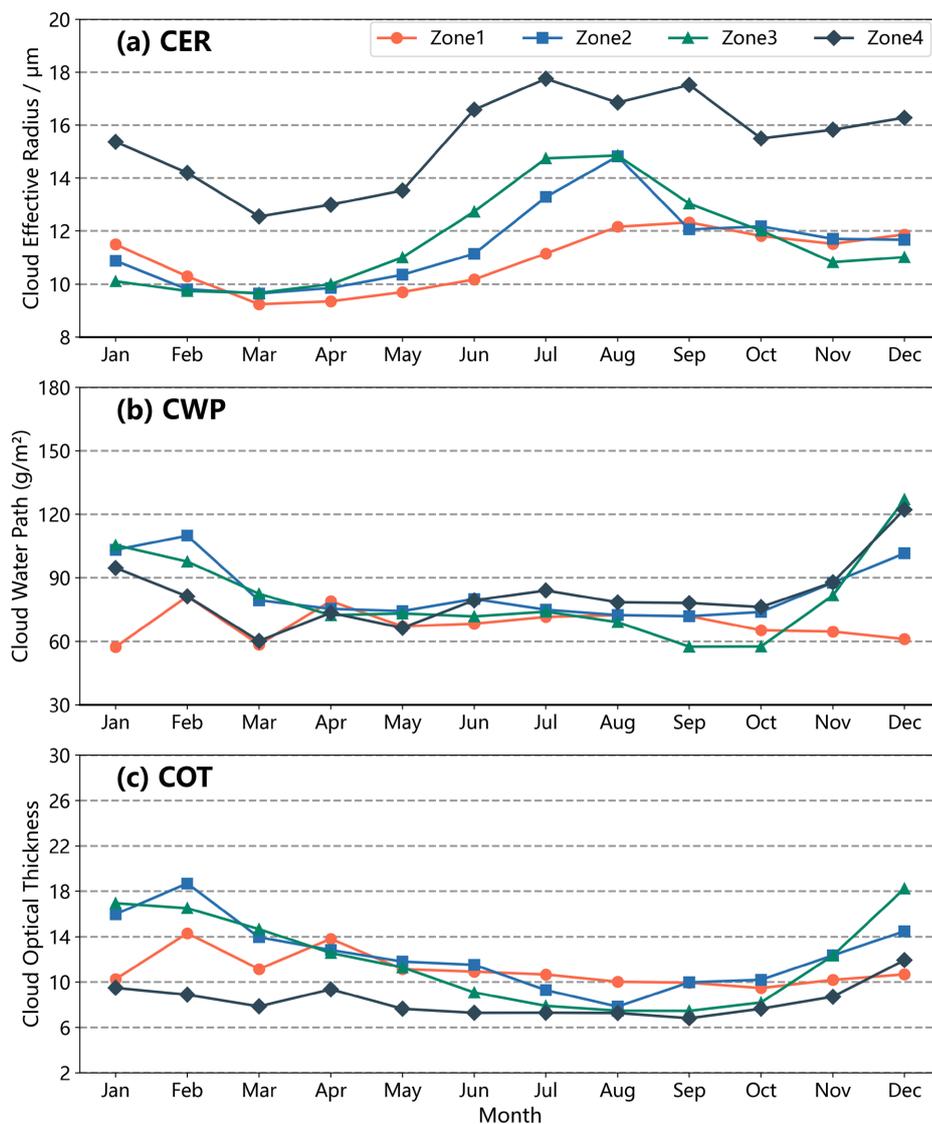


Figure 9. Monthly mean values of cloud physical properties for the subregions of China's coastal seas. (a) cloud effective particle radius, (b) cloud liquid water path, and (c) cloud optical thickness

图 9. 中国近海各海区云物理特性的逐月平均值, 其中(a) 云滴有效半径, (b) 云液态水路径, (c) 云光学厚度

3.5. 低云物理特性年际变化

为了进一步研究中国近海低云特性的年际变化特征, 本文计算了 2012~2022 年期间低云云频及关键物理参数(云滴有效半径、云水路径和光学厚度)的年际变化趋势(去除季节循环)。如图 10 所示, 中国近海低云特性呈现出显著的空间异质性变化, 且不同参数的变化模式存在一定的关联。整体来看, 云滴有效半径主要呈现普遍的增大趋势(图 10(a)), 在台湾岛东南部海区的增加幅度更大, 有效半径变化率约为 $0.2 \mu\text{m}/\text{a}$, 近岸海区增量相对较小。云水路径年际变化趋势大值区与云滴有效半径相似, 在研究区域东南部

海区以及南海北部海区有明显的升高趋势(图 10(b)), 云水路径年际变化率约 $1.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}/\text{a}$, 在黄海南部以及南海北部湾呈现降低趋势, 变化率约为 $-1.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}/\text{a}$ 。光学厚度则是在近岸海区表现为减小趋势, 平均变化率约为 $-0.2/\text{a}$, 在云水路径变化率的大值区(黄海北部、台湾岛东北部海区)对应有微弱的上升趋势(图 10(c))。上述低云特性的变化趋势分布可能是在人为气溶胶排放变化影响下的结果。自 2012 年以来, 中国东部工业区的二氧化硫等气溶胶前体物排放大幅下降, 作为云凝结核的细颗粒物浓度随之降低[44], 这使得云水分配在更少的云滴上, 有利于云滴通过凝结和碰并过程增长, 同时使得近岸海区低云的光学厚度降低。在低纬度海区高海温和大气含水量的条件下云滴有效半径和云水路径的增加更为明显。对于低云云频(图 10(d)), 黄海海区 and 北部湾海区有明显的下降趋势($-0.4\%/a$), 而在台湾海峡附近海域低云云频呈上升趋势($0.3\%/a$), 这可能是由于全球变暖下区域气候调整以及大尺度系统年代际变化共同作用的结果, 通过调控水汽输送, 大气稳定性和下沉运动等过程最终引起云频的改变。

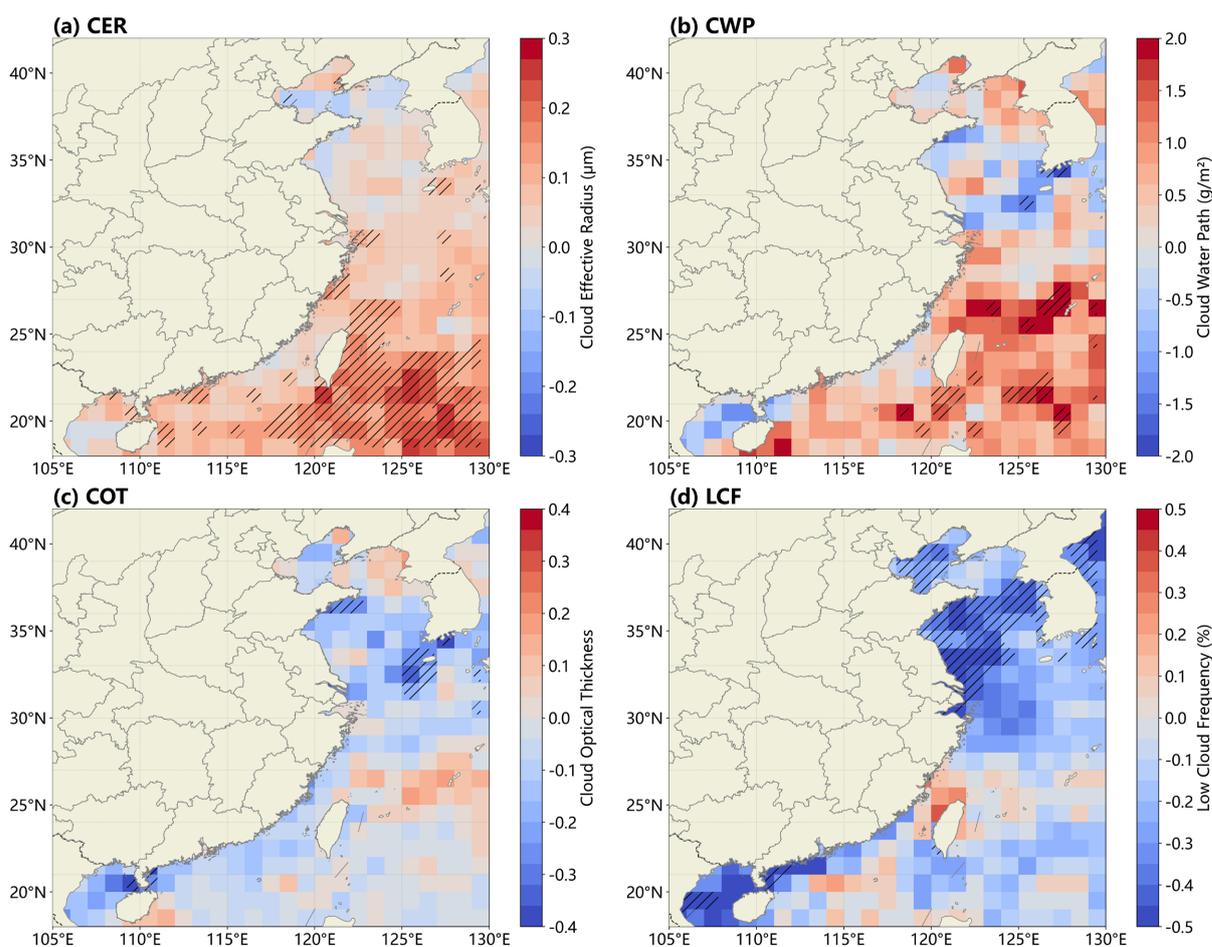


Figure 10. Interannual trends of low cloud physical properties and frequency over the China's coastal seas. (a) cloud droplet effective radius, (b) cloud water path, (c) cloud optical thickness, and (d) low cloud frequency. The spatial resolution is $1.0^\circ \times 1.0^\circ$, shading indicates the variation rate, with hatched areas denoting trends that are statistically significant ($p < 0.05$)

图 10. 中国近海低云物理特性及云频的年际变化趋势, 其中(a) 云滴有效粒子半径, (b) 云水路径, (c) 云光学厚度, (d)低云云频。空间分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$, 填色表示变化率, 阴影区域表示趋势显著($p < 0.05$)

4. 结论与讨论

本研究基于 Aqua/MODIS MYD06 数据, 结合 CALIPSO 主动遥感资料进行低云识别验证, 系统分析

了 2012~2022 年间中国近海日间低云物理特性的时空分布特征。通过构建长时间序列的低云样本数据集, 揭示了该区域低云云频、云滴有效半径(CER)、云水路径(CWP)及云光学厚度(COT)的空间分布格局、季节变化与年际趋势, 并探讨了其与气溶胶-云-气候相互作用的可能联系。主要结论如下:

低云总体呈现小粒径、中等光学厚度的统计特征, CER 平均值为 $10.96 \mu\text{m}$, CWP 平均值为 74.48 g/m^2 , COT 平均值为 11.3。云顶高度呈双峰分布, 分别对应海雾/低层云(约 600 m)和层积云(约 1500 m)。与西北太平洋远海相比, 中国近海低云具有更小的云滴有效半径和较高的光学厚度。

中国近海低云云频在空间上整体呈“南高北低”分布, 高值区位于南海北部近岸、北部湾及台湾海峡。季节上, 冬季云频最高, 夏季最低, 黄海区域在夏季受冷海面与暖湿气流影响出现云频次高峰。云频的季节变化与边界层稳定度、海温梯度及季风环流密切相关。

低云物理特性空间分布受气溶胶与海气过程共同调控, CER 在近岸海域显著减小, 在远海区域增大, 呈现自西北向东南递增的梯度分布。CWP 表现为南高北低的空间分布特征。COT 的高值区集中在近岸海域, 在空间上与 CER 低值区基本重合。该分布模式反映了气溶胶间接效应(Twomey 效应)的影响: 近岸高气溶胶浓度促进云滴数浓度增加、粒径减小, 在相同液态水含量下导致 COT 增大、反照率增强。

低云物理特性具有明显季节循环, CER 在夏季最大、春季最小, CWP 和 COT 均在冬季达到峰值。这与不同季节的边界层结构、水汽输送条件以及气溶胶浓度有关。夏季对流活动频繁, 降水较多, 作为云凝结核的气溶胶浓度较低, 对应较大的 CER 和较小的 COT; 冬季边界层较稳定, 有利于云水积累, 对应较小的 CER 和较大的 CWP。

低云特性在年际尺度上呈现变化趋势: 2012~2022 年间, CER 在大部分海域呈增大趋势, 尤其在低纬度区域增幅显著。CWP 在研究区域东南部远海有明显的增加趋势, COT 在近岸海区呈降低趋势。低云云频在黄海区域显著减少。这些变化可能与中国东部自 2013 年以来气溶胶排放减少、区域气候变暖及海洋-大气环流调整有关。

本研究基于卫星资料揭示了中国近海低云物理特性的时空分布规律, 并讨论了其与气溶胶浓度、边界层结构和大气要素的关系, 为改进该区域气候模式中的低云参数化方案、降低辐射强迫模拟不确定性提供了依据。目前基于 11 年卫星资料统计得到的年际变化趋势可能受到气候自然变率的影响, 未来可结合高分辨率气溶胶资料、再分析数据及数值模拟, 进一步验证并量化气溶胶与气象因子对低云特性的相对贡献, 并关注云-降水-辐射反馈在气候变化背景下的长期演变。

基金项目

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

参考文献

- [1] Fouquart, Y., Buriez, J.C., Herman, M. and Kandel, R.S. (1990) The Influence of Clouds on Radiation: A Climate-modeling Perspective. *Reviews of Geophysics*, **28**, 145-166. <https://doi.org/10.1029/rg028i002p00145>
- [2] 汪宏七, 赵高祥. 云和辐射——(I)云气候学和云的辐射作用[J]. *大气科学*, 1994(S1): 910-921.
- [3] Wielicki, B.A., Harrison, E.F., Cess, R.D., King, M.D. and Randall, D.A. (1995) Mission to Planet Earth: Role of Clouds and Radiation in Climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **76**, 2125-2153. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<2125:mtpero>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<2125:mtpero>2.0.co;2)
- [4] Allan, R.P. (2011) Combining Satellite Data and Models to Estimate Cloud Radiative Effect at the Surface and in the Atmosphere. *Meteorological Applications*, **18**, 324-333. <https://doi.org/10.1002/met.285>
- [5] Tao, W., Lang, S., Simpson, J., Sui, C., Ferrier, B. and Chou, M. (1996) Mechanisms of Cloud-Radiation Interaction in the Tropics and Midlatitudes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **53**, 2624-2651. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<2624:mocrii>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<2624:mocrii>2.0.co;2)
- [6] 刘屹岷, 燕亚菲, 吕建华, 刘肖林. 基于 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的青藏高原云辐射及降水的研究进展[J].

- 大气科学, 2018, 42(4): 847-858.
- [7] Zelinka, M.D., Klein, S.A., Taylor, K.E., Andrews, T., Webb, M.J., Gregory, J.M., *et al.* (2013) Contributions of Different Cloud Types to Feedbacks and Rapid Adjustments in CMIP5. *Journal of Climate*, **26**, 5007-5027. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00555.1>
- [8] Chen, Y., Christensen, M.W., Stephens, G.L. and Seinfeld, J.H. (2014) Satellite-Based Estimate of Global Aerosol-Cloud Radiative Forcing by Marine Warm Clouds. *Nature Geoscience*, **7**, 643-646. <https://doi.org/10.1038/ngeo2214>
- [9] Zhou, C., Zelinka, M.D., Dessler, A.E. and Klein, S.A. (2015) The Relationship between Interannual and Long-Term Cloud Feedbacks. *Geophysical Research Letters*, **42**, 10463-10469. <https://doi.org/10.1002/2015gl066698>
- [10] Mace, G.G., Benson, S. and Kato, S. (2006) Cloud Radiative Forcing at the Atmospheric Radiation Measurement Program Climate Research Facility: 2. Vertical Redistribution of Radiant Energy by Clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **111**, D11S91. <https://doi.org/10.1029/2005jd005922>
- [11] Twomey, S. (1974) Pollution and the Planetary Albedo. *Atmospheric Environment* (1967), **8**, 1251-1256. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(74\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0004-6981(74)90004-3)
- [12] 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 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, 2007, 31(3): 486-494.
- [13] Hartmann, D.L., Ockert-Bell, M.E. and Michelsen, M.L. (1992) The Effect of Cloud Type on Earth's Energy Balance: Global Analysis. *Journal of Climate*, **5**, 1281-1304. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<1281:teocto>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<1281:teocto>2.0.co;2)
- [14] Slingo, A. (1990) Sensitivity of the Earth's Radiation Budget to Changes in Low Clouds. *Nature*, **343**, 49-51. <https://doi.org/10.1038/343049a0>
- [15] Twomey, S. (1977) The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **34**, 1149-1152. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1149:tiopot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1149:tiopot>2.0.co;2)
- [16] Brient, F. and Bony, S. (2012) Interpretation of the Positive Low-Cloud Feedback Predicted by a Climate Model under Global Warming. *Climate Dynamics*, **40**, 2415-2431. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1279-7>
- [17] Storelvmo, T., Tan, I. and Korolev, A.V. (2015) Cloud Phase Changes Induced by CO₂ Warming—A Powerful Yet Poorly Constrained Cloud-Climate Feedback. *Current Climate Change Reports*, **1**, 288-296. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0026-2>
- [18] 丁守国, 石广玉, 赵春生. 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, 2004(11): 1105-1111.
- [19] Zelinka, M.D., Myers, T.A., McCoy, D.T., Po-Chedley, S., Caldwell, P.M., Ceppi, P., *et al.* (2020) Causes of Higher Climate Sensitivity in CMIP6 Models. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019gl085782>
- [20] 孙鸿娉, 李培仁, 闫世明, 晋立军, 申东东, 封秋娟, 李义宇. 山西省 2008-2010 年 64 架次飞机云物理观测结果分析[J]. 气象科技, 2014, 42(4): 682-689.
- [21] Miao, H., Wang, X., Liu, Y. and Wu, G. (2021) Characterization of Cloud Microphysical Properties in Different Cloud Types over East Asia Based on CloudSat/CALIPSO Satellite Products. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **14**, Article ID: 100050. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100050>
- [22] 窦芳丽, 商建, 吴琼, 谷松岩. 风云三号卫星被动微波反演海洋上空云液态水含量[J]. 遥感学报, 2021, 24(6): 766-775.
- [23] Tao, Y., Cao, J., Lan, G. and Su, Q. (2015) The Zonal Movement of the Indian-East Asian Summer Monsoon Interface in Relation to the Land-Sea Thermal Contrast Anomaly over East Asia. *Climate Dynamics*, **46**, 2759-2771. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2729-4>
- [24] Cai, H., Feng, X., Chen, Q., Sun, Y., Wu, Z. and Tie, X. (2017) Spatial and Temporal Features of the Frequency of Cloud Occurrence over China Based on CALIOP. *Advances in Meteorology*, **2017**, Article ID: 4548357. <https://doi.org/10.1155/2017/4548357>
- [25] 贾海灵, 马晓燕, 熊飞麟. 中国东部大陆和邻近海域暖云特性时空分布及其与气象条件的关系[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(6): 737-748.
- [26] 司钰文, 郑宁, 杨洪海, 陈勇航, 刘琼, 夏俊荣, 张华. 东亚单层低云特性及其短波辐射强迫的季节变化[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 37-45.
- [27] 龙景超, 冯梓雅, 王云. 南海低层季风环流对低云时空分布的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(4): 23-30.
- [28] Dye, A.W., Rastogi, B., Clemesha, R.E.S., Kim, J.B., Samelson, R.M., Still, C.J., *et al.* (2020) Spatial Patterns and Trends of Summertime Low Cloudiness for the Pacific Northwest, 1996-2017. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL088121. <https://doi.org/10.1029/2020gl088121>
- [29] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2008, 38(3): 359-366.

- [30] 王亚男, 李永平. 冷空气影响下的黄东海海雾特征分析[J]. 热带气象学报, 2009(2): 216-221.
- [31] Liu, J., Xie, S., Yang, S. and Zhang, S. (2016) Low-Cloud Transitions across the Kuroshio Front in the East China Sea. *Journal of Climate*, **29**, 4429-4443. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0589.1>
- [32] Winker, D.M., Pelon, J., Coakley, J.A., Ackerman, S.A., Charlson, R.J., Colarco, P.R., *et al.* (2010) The CALIPSO Mission: A Global 3D View of Aerosols and Clouds. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **91**, 1211-1230. <https://doi.org/10.1175/2010bams3009.1>
- [33] Wu, D., Lu, B., Zhang, T. and Yan, F. (2015) A Method of Detecting Sea Fogs Using CALIOP Data and Its Application to Improve MODIS-Based Sea Fog Detection. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **153**, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.09.021>
- [34] World Meteorological Organization (1975) International Cloud Atlas, Volume I: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors (WMO-No. 407).
- [35] King, M.D., Tsay, S.C., Platnick, S.E., Wang, M. and Liou, K.N. (1997) Cloud Retrieval Algorithms for MODIS: Optical Thickness, Effective Particle Radius, and Thermodynamic Phase. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document, 440.
- [36] 黎梦雅, 时晓曦, 吴晓京, 衣立. 基于卷积神经网络的西北太平洋夜间海雾/低云卫星检测方法研究[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(1): 1-11.
- [37] Cho, H., Zhang, Z., Meyer, K., Lebsock, M., Platnick, S., Ackerman, A.S., *et al.* (2015) Frequency and Causes of Failed MODIS Cloud Property Retrievals for Liquid Phase Clouds over Global Oceans. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120**, 4132-4154. <https://doi.org/10.1002/2015jd023161>
- [38] Zhao, M., Zhang, H., Wang, H., Zhou, X., Zhu, L., An, Q., *et al.* (2020) The Change of Cloud Top Height over East Asia during 2000-2018. *Advances in Climate Change Research*, **11**, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.05.004>
- [39] Kawamoto, K. and Suzuki, K. (2013) Comparison of Water Cloud Microphysics over Mid-Latitude Land and Ocean Using Cloudsat and MODIS Observations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **122**, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.12.013>
- [40] 杨爽, 刘敬武, 张苏平. 低云在不同季节对东海黑潮海洋锋响应的个例研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015(10): 7-17.
- [41] 孟宪贵, 张苏平. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 16-23.
- [42] Hu, Y.X. and Stamnes, K. (1993) An Accurate Parameterization of the Radiative Properties of Water Clouds Suitable for Use in Climate Models. *Journal of Climate*, **6**, 728-742. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0728:aapotr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0728:aapotr>2.0.co;2)
- [43] 杨大生, 王普才. 中国地区夏季云粒子尺寸的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(4): 11.
- [44] Sun, L., Cui, W., Ma, N., Hong, J., Zhu, Y., Gao, Y., *et al.* (2024) Variations in Cloud Concentration Nuclei Related to Continental Air Pollution Control and Maritime Fuel Regulation over the Northwest Pacific Ocean. *Atmosphere*, **15**, Article No. 972. <https://doi.org/10.3390/atmos15080972>