

霍娟. 2018. 利用辐射数据构建云物理结构 [J]. 大气科学, 42 (5): 1013–1022. Huo Juan. 2018. Constructing cloud physical structure based on radiation data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (5): 1013–1022, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17156.

利用辐射数据构建云物理结构

霍娟

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测开发重点实验室, 北京 100029

摘 要 本文运用 CloudSat 卫星上搭载的雷达探测数据和 AQUA 卫星搭载的辐射光谱仪探测数据, 选择 2007 年 1 月至 2010 年 12 月期间, 地理位置位于 ($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$) 区域内 (远海) 发生的云场数据开展分析, 研究云的物理结构特征与其光谱辐射特性的相互关系。不同光谱波段对云物理结构变化的响应情况各有不同, 首先从 MODIS 光谱仪 22 个云相关光谱波段中分析并选择出与云物理结构特征密切相关的光谱组合 (包含 13 个波段), 而后开展了这些光谱波段的云辐射特性与云物理结构特征的相互变化关系研究。统计分析表明, 在外部大气、地表条件以及太阳入射辐射变化不大情况下, 云的结构变化与其光谱辐射变化之间总体存在单调相关关系, 物理结构变化不大的云廓线之间其光谱辐射的变化也小, 反之也成立, 即光谱辐射变化小的云廓线之间物理结构变化也小。从而, 对于某些内部物理结构特征未知的云, 利用与其光谱辐射特性相近的云结构数据可实现自身垂直结构信息的重建。基于光谱辐射相近则云物理结构很可能相近的特点, 本文对未知云场的物理结构重建开展了模拟试验, 试验结果表明光谱相近原则匹配物理结构的方法一定程度上能够实现云物理结构的构建, 为利用被动遥感数据推测云物理结构特征研究提供参考。

关键词 MODIS 光谱仪 CloudSat 卫星 垂直结构 三维云 辐射

文章编号 1006-9895(2018)05-1013-10

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17156

Constructing Cloud Physical Structure Based on Radiation Data

HUO Juan

Key Laboratory for Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Radars can actively detect cloud internal physical structure while radiometers can passively measure the integral radiation characteristics of clouds. This study uses cloud products from CloudSat (active detection) and AQUA (passive detection) during the period from 1 January 2007 to 31 December 2010 over the area ($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$) to study the relationships between the variations of radiation characteristics and the physical structure characteristics of clouds. MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) uses 22 wavebands that have various sensitivities to cloud physical properties to measure radiation from cloud. Firstly, 13 wavebands demonstrating high correlation with the cloud physical structures are screened out based on correlation analysis. Then, the relationship between the radiation variations of these 13 wavebands and changes in the cloud physical structures are studied. Statistical analysis shows that the variation in cloud radiation illustrates a monotonic change with the variation in cloud physical structures when conditions (e.g., atmospheric environment, surface characteristics) change little. This means two cloud profiles with close radiative properties may also have similar physical structures. For some cloud profiles with unknown internal structures,

收稿日期 2017-04-21; **网络预出版日期** 2018-01-16

作者简介 霍娟, 女, 1977 年出生, 博士、副研究员, 主要从事云相关遥感与辐射研究。E-mail: huojuan@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41275040、41775032

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41275040, 41775032)

their vertical structures can be inferred from other cloud profiles with similar spectral radiative properties. Preliminary tests for reconstructing the cloud vertical structure are performed and it is found that cloud physical structures constructed based on the nearest radiative characteristics principle are close to the structures measured by radars.

Keywords MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer), CloudSat satellite, Cloud structure, 3D cloud, Radiation

1 引言

云覆盖地球一半以上的面积,是影响地气系统辐射能量平衡的重要因子,也是地球水循环中的重要环节(Ramanathan, 1987; Cole et al., 2005)。云的组成和结构分布复杂、多变,一直是大气科学研究的重要分析对象。太阳辐射在大气中传输受云、大气成分和气溶胶等的吸收及散射作用,呈现出不同的光谱辐射特征(Liou, 1992; 盛裴轩等, 2003)。就云的遥感和探测而言,由于这些辐射特性与云物理结构特征分布密切相关,科学家们利用云在不同波长发射或散射辐射信息来提取云的物理或光学分布特征,如云中粒子浓度、大小、云厚等(Pincus et al., 1995; Minnis et al., 1998; 邱金桓等, 2005; Roskovensky and Liou, 2006)。卫星上搭载的光谱仪自上而下,测量来自云、大气、地球表面等对太阳辐射的反射值以及自身在热红外波段的发射值。在相同大气、地表、太阳辐射等外部环境条件下,具有相同物理结构特征的云其光谱辐射特性(卫星遥感或地面观测)一定也是相同的。反之,如果两条有云廓线温度、水汽等分布特征相同,太阳辐射相同,下垫面光学特征相近,并且在大气层顶(或卫星遥感)所测光谱辐射值相同,那么这两条廓线的云物理结构是否也是彼此接近?如果接近,则在一定条件下可以利用被动遥感的光谱辐射信息来推测或重塑云的结构信息。Barker et al. (2011)也正是基于这样的假设,根据 EarthCARE 卫星探测性能和研究目标建立了一个通过匹配相同光谱辐射值来构建三维云场的算法。这是一种新的基于卫星雷达数据和光谱辐射数据构建三维云场的方法,卫星探测范围广,该方法可为更大范围地区特别是地基探测数据稀缺地区云的结构研究提供三维信息。

本文将借助现有的卫星观测数据对上述假设开展分析,研究云的辐射特性与云物理结构之间的相关程度,检验辐射特性相近的云其物理结构也相近这一假设是否成立。AQUA 卫星于 2002 年 5 月 4 日成

功发射,搭载了一部中分辨率成像光谱仪 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer),共使用 36 个光谱波段分别对陆地地表、海洋以及大气层内气象要素进行光谱辐射观测(<https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/> [2017-06-16])。2006 年 4 月,CloudSat 卫星被送入太空开展对地观测,其上搭载一部 W 波段(94 GHz)毫米波云廓线雷达(CPR, Cloud Profiling Radar),用于观测云的内部结构(<http://cloudsat.atmos.colostate.edu> [2017-06-16])。CloudSat、AQUA 卫星与其他在轨飞行的卫星 CALIPSO、AURA 等组成 A-Train 卫星列队,其中 AQUA 卫星与 CloudSat 卫星飞行间隔约为 1 分钟。MODIS 观测视场完全覆盖 CPR 的视场范围,并且二者观测间隔时间短,在天气状况稳定的条件下,对云的观测可近似为准同时观测。在 MODIS 和 CPR 重叠观测的有云区域中,既可获得云的垂直结构也有云的光谱辐射信息,为研究云的光谱辐射与垂直结构特征关系提供了数据条件。本文选择 2007 年 1 月至 2010 年 12 月共 4 年的 MODIS (AQUA 卫星)和 CPR (CloudSat 卫星)探测数据,并为了降低下垫面影响选择相对简单的深海地区($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$),统计分析云的辐射光谱特征和物理结构关系。论文第二部分简单介绍了相关卫星数据情况,第三部分研究并选择与云物理结构特征密切相关的光谱谱段,第四部分利用多年的探测数据统计分析云的光谱辐射特性与云结构特征的关系,第五部分基于云光谱辐射特征相近而结构特征也相近的统计结果,开展云物理结构重建试验,第六部分是小结与讨论。

2 数据简介

AQUA 卫星上搭载的 MODIS 光谱仪其沿轨观测宽度约为 10 km,跨轨探测宽度约为 2330 km,1~2 天可覆盖地球表面一次,光谱仪在 $0.405\sim 14.385\ \mu\text{m}$ 范围内分为 36 个波段进行探测,共有三种空间分辨率(250 m、500 m 和 1000 m),与云有关的主要探测波段及其用途见表 1。AQUA 卫星上搭载的

MODIS 第 6 波段不能工作，因此实际共有 21 个有效光谱辐射数据，这些谱段包含了可见光、近红外、热红外波段。

表 1 MODIS 光谱仪的 22 个云相关光谱波段宽度、分辨率以及主要用途

Table 1 The bandwidth, data resolution, and primary use of 22 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) wavebands which are related to cloud

波段	波段宽度	数据分辨率/m	主要用途
1	620~670 nm	250	地表/云/气溶胶边界层
2	841~867 nm	250	
3	459~479 nm	500	地表/云/气溶胶特征
4	545~565 nm	500	
5	1230~1250 nm	500	
6	1628~1652 nm	500	
7	2105~2155 nm	500	
17	890~920 nm	1000	云/大气水汽特征
18	931~941 nm	1000	
19	915~965 nm	1000	
20	3.66~3.84 μm	1000	地表/云温度
26	1.36~1.39 μm	1000	卷云/水汽/湿度
27	6.535~6.895 μm	1000	
28	7.175~7.475 μm	1000	
29	8.4~8.7 μm	1000	云属性
30	9.58~9.88 μm	1000	臭氧
31	10.78~11.28 μm	1000	地表/云温度
32	11.77~12.27 μm	1000	
33	13.185~13.485 μm	1000	云高/云量
34	13.485~13.785 μm	1000	
35	13.785~14.085 μm	1000	
36	14.085~14.385 μm	1000	

CloudSat 卫星上搭载的 CPR (Cloud Profiling Radar, 94 GHz 毫米波雷达) 单线扫描尺度约为 1.7 km (沿轨) $\times$ 1.4 km (跨轨)，垂直分辨率约 240 m。CPR 雷达探测范围完全处于 MODIS 的观测视场中，因此 CPR 扫描路径上的光谱辐射信息可全部被 MODIS 观测。为了能与 CPR 扫描廓线位置相匹配，选择分辨率为 1 km 的 MODIS 光谱辐射数据，在 CPR 扫描单线周围的 15 个 MODIS 观测像元中，假设沿轨方向左下角以 1 起编号，第 8 个探测像元与 CPR 的扫描单线位置最为接近，其所观测的光谱辐射值作为该 CPR 探测单廓线的光谱辐射值 (图 1)。本文中所用数据为 2007 年 1 月至 2010 年 12 月期间，地理位置位于 (15°~45°N, 145°~165°E) 范围内的 MODIS 和 CPR 所有有效观测数据，在下文中所有统计分析结果或个例研究均发生于上述时间和地理位置范围内。

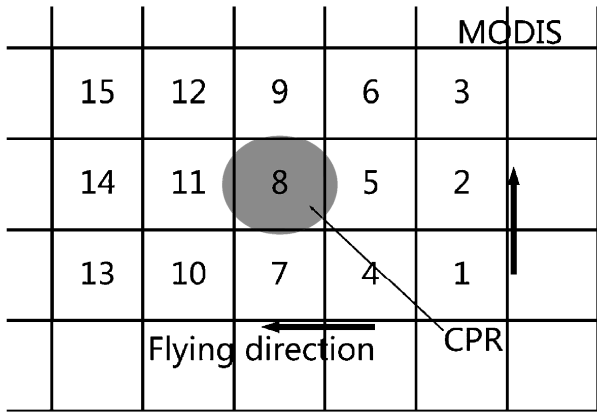


图 1 MODIS 与 CPR 观测视场范围示例。方形格点代表 MODIS 的数据像元，灰色椭圆代表 CPR 的单廓线扫描范围

Fig. 1 Footprints of MODIS and CPR (Cloud Profiling Radar, gray ellipse)

3 光谱波段的选择

MODIS 自上而下所测辐射主要包括：地面、大气分子、气溶胶和云反射的太阳辐射以及地表、大气中吸收气体以及云层发出的红外辐射。云的光学特性与物理结构特征关系密切，在云有关的 22 个光谱辐射波段中，各波段或波段的组合与不同的云物理属性相关程度有所不同，例如红外辐射信息与云顶气压密切相关，可见光波段与近红外波段的组合可估测云光学厚度、云粒子大小等 (参见图 2)。因此，诸多光谱波段对云物理结构特征的表达各不相同，不同波段所占比重也有所不同，例如可能某一个波段对云结构的某一参数比较敏感，也可能存在某几个波段都对某一特征敏感。从而需要对这些波段开展分析，选择出与云物理结构最密切的那些波段，并用于研究光谱辐射特性与物理结构特征的相互关系。

图 2b 为 CPR 观测的发生在 2007 年 8 月 14 日的二维云廓线，图 2a 是相应 21 个光谱谱段辐射值分布情况。为使用相同的色标，图中波段 20, 29~36 被放大 10 倍，波段 26~28 被放大 100 倍。图 2 中 21 个光谱辐射值沿扫描路径上不同结构特征的云或增强或减弱，例如波段 1、3、4 辐射值在厚云廓线上的值明显增强。波段 29、31、32 则与 1、3、4 相反，在厚云廓线的辐射值减小并且它们三个波段的辐射变化特征彼此相近。为了分析 21 个光谱波段随云物理结构变化时彼此的变化情况，我们计算了这 21 个光谱波段彼此之间随图 2 中所有云廓线变化而变化的皮尔逊相关系数，分布情况如图 3

所示。图 3 中每一个“方块”颜色值代表了其横坐标所对应波段与纵坐标所对应波段二者之间的相关系数。可以看到, MODIS 所用 21 个有效波段中, 有些波段辐射值之间相关系数较高, 例如波段 1、3、4 之间大于 0.9 甚至接近了 1, 它们随云物理结构变化表现出高度相关的相同变化。在研究与物理结构相关关系时, 对于这些表现相同的波段可以选择其

中的一个作为代表而不必全部使用, 以平衡各波段在表达物理结构属性时所占的权重。

图 3 仅是一个个例的分析结果, 为了获得更有代表性的结果, 需要对更多资料开展分析。我们利用 2007 年 1 月至 2010 年 12 月的 ($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$) 范围内所有云廓线的所有光谱波段的相关程度开展了统计分析。采用两种统计方法: 一是对

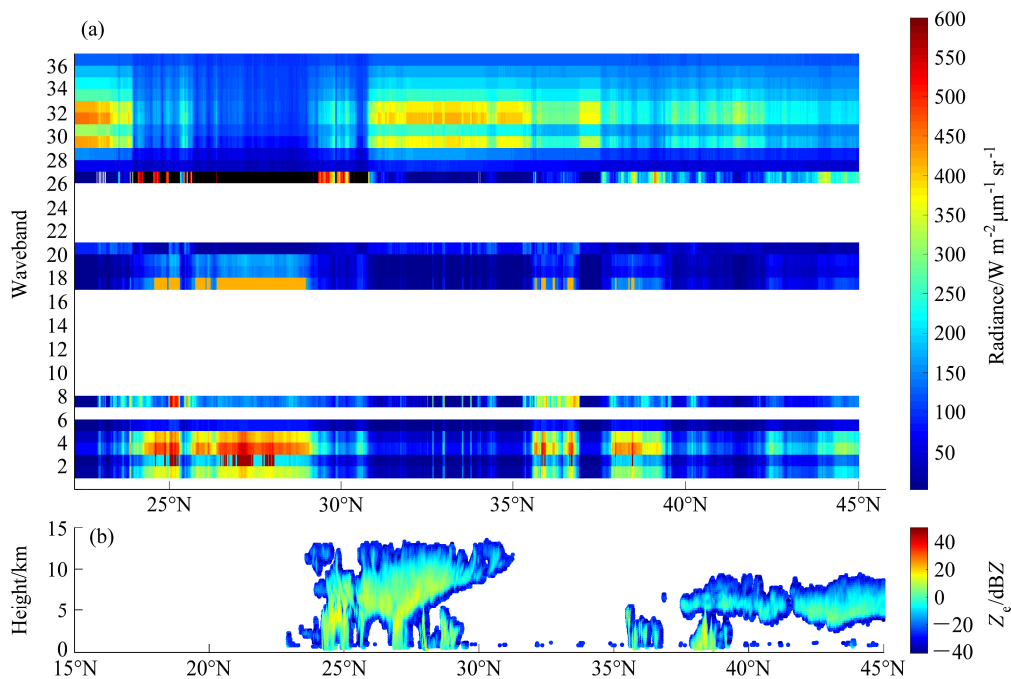


图 2 发生于 2007 年 8 月 14 日位于 ($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$) 区域内的云例: (a) MODIS 所测辐射值 (单位: $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$); (b) CPR 观测雷达反射率值 Z_e (单位: dBZ)

Fig. 2 Clouds occurring on 14 August 2007 over region ($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$): (a) The radiance (units: $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) measured by MODIS; (b) the radar reflectivity factor Z_e (units: dBZ) measured by CPR

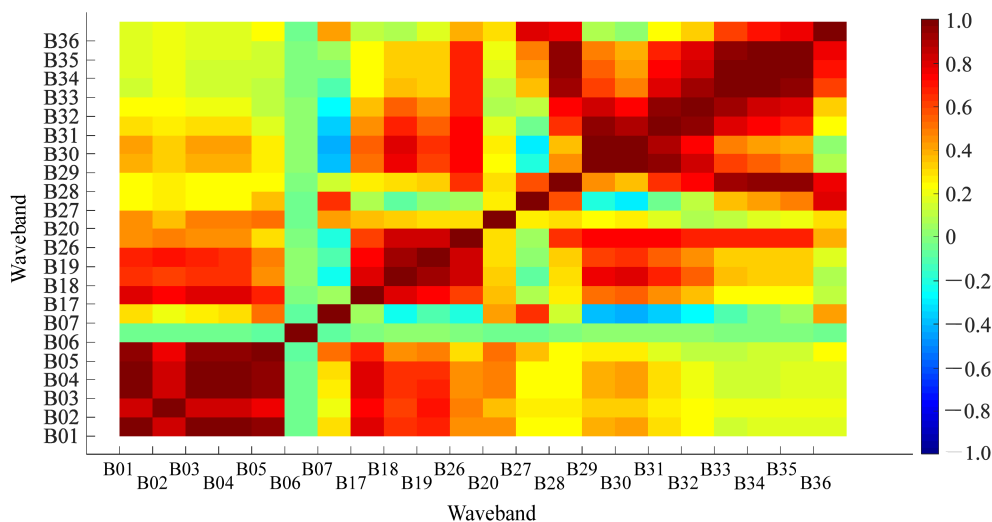


图 3 根据图 2 云场 MODIS 的 22 个波段辐射值计算彼此之间的辐射相关系数。图中横坐标和纵坐标都是波段号, “B” 代表波段

Fig. 3 Correlation coefficients of radiation between 22 MODIS wavebands for cloud case in Fig. 2. The x-axis and y-axis show the numbers of wavebands, letter “B” means waveband

所有云廓线上所有光谱波段统一计算彼此相关系数(图 4a); 二是先对每一天发生的云廓线计算各个光谱波段的相关系数(图 3 是一天的例子), 再对所有天计算得到的所有相关系数计算平均(图 4b)。两种不同的处理方法, 有助于对比分析出真正高度相关的光谱波段。从图 4 中能够发现, 波段 1~4、17 之间彼此高度正相关, 波段 18、19 高度正相关, 波段 29、31~32 之间高度正相关, 而波段 34 和 35 之间也高度正相关, 这些波段随云廓线的变化呈现相类似的变化特征, 说明它们对云结构属性(可能是一种属性, 也可能是某些综合属性)变化具有相一致的敏感特征。因此, 在这些彼此高度正相关的波段中挑选其中的一个为代表用于分

析云光谱辐射特性与云物理结构之间的相关关系。一方面, 由于减少了高度相关的光谱波段数量, 在综合讨论和分析多光谱波段辐射与云结构特征关系时, 减少了这些具有相同特征的波段所占权重而提高了其他波段(可能对其他属性敏感)的权重。另一方面, 通过分析我们进一步认识了这些光谱波段随云物理结构特征变化的相关性, 当需要对光谱波段进行选择以应用于云物理属性探测时, 这项工作作为光谱波段选择提供了参考。综合以上分析, 我们从 21 个有效波段中精简并挑选出波段 01、05、07、18、20、26、27、28、30、31、33、34 和 36 这 13 个光谱波段, 在下文中用它们研究云辐射特性与云物理结构的可能关系。

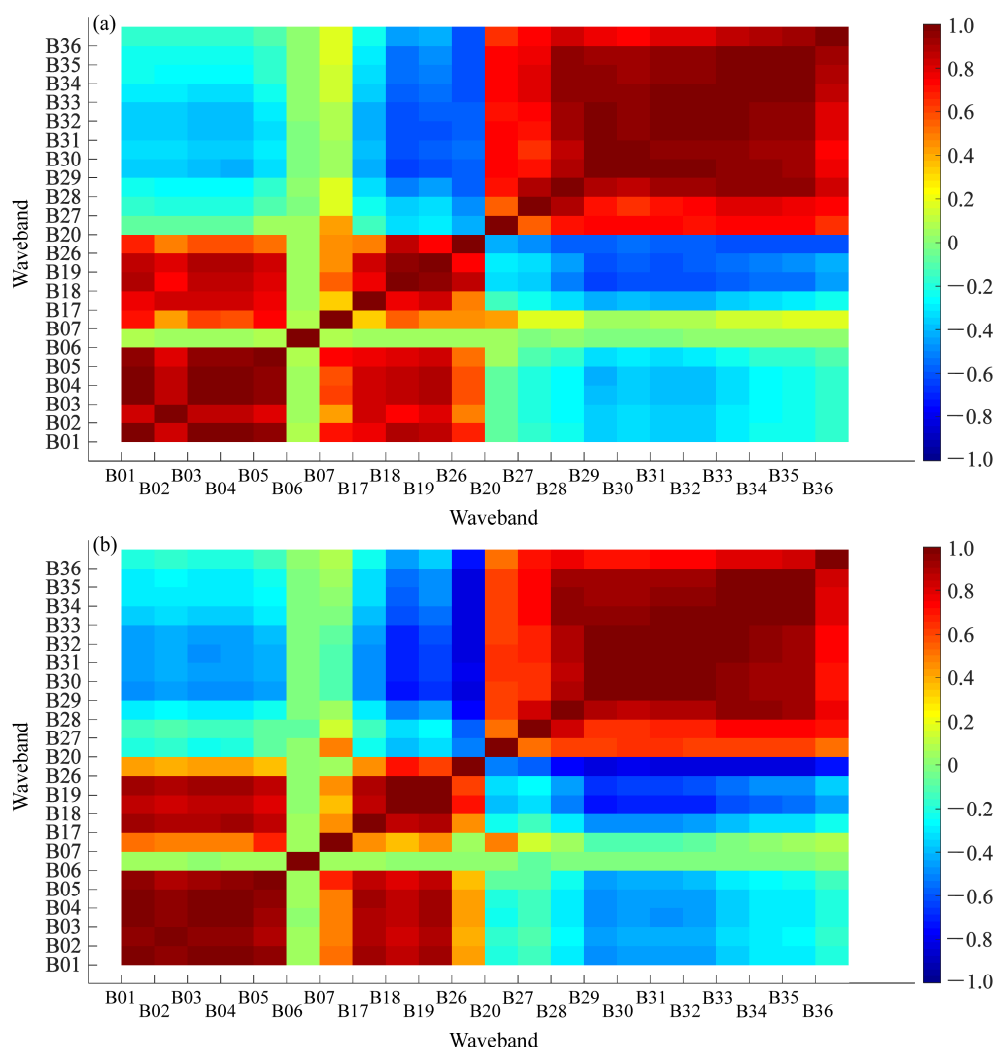


图 4 根据 2007~2010 年区域 ($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$) 内 MODIS 的 22 个光谱通道探测的所有云廓线辐射数据, 计算各通道之间的辐射相关系数: (a) 将所有云廓线集中一起计算辐射相关系数; (b) 针对每天云廓线数据分别计算通道辐射相关系数, 然后求平均

Fig. 4 Correlation coefficients of radiation between 22 MODIS wavebands for all cloudy profiles occurred over the area ($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$) during 2007~2010: (a) Correlation coefficients of radiation calculated from all cloudy profiles; (b) the mean value of those radiation correlation coefficients which are calculated individually from cloudy profiles occurred in the same day.

4 云的光谱辐射与物理结构特征关系

4.1 变化特征

根据已有研究经验,对每一条 CPR 观测的有云廓线,云的物理结构我们选择如下 14 个参数来描述:最高云格点高度、最低云格点高度、所有有云格点的高度平均值、云厚度、最大雷达反射率值 (MaxZe)、MaxZe 所在高度、最小雷达反射率值 (MinZe)、MinZe 所在高度、平均雷达反射率 (MeanZe) 及其方差、最高温度、最低温度、平均温度及其方差。这些参数既包含了云的宏观物理信息(如云高、云厚等),也包含了微物理信息(如粒子相态、粒子大小等),各参数之间随云的生成和发展条件而相互影响和制约。

两条云廓线的辐射或结构之间的差异程度,可通过计算彼此之间的“距离”来定义。本文挑选出的 13 个光谱辐射通道从可见光、近红外到热红外,虽然量纲相同但是不同通道之间辐射值的量级差可达 2~3 个量级,而对结构参数来说,14 个特征参数量纲各异。由此在计算“距离”时,需要对各个具有不同量级和量纲的属性参数进行“处理”来去除量纲及量级差异。通过对现有诸多“距离”计算方法对比分析后发现,标准欧几里德距离 (Standardized Euclidean distance, 也称作标准化欧氏距离) 计算方法,容易实现且能相对理想地满足本文需求。标准化欧氏距离方法是基于传统欧氏距离的一种改进方法,通过对具有不同属性(多量纲)以及不同量级的分量样本原始数据先进行标准化处理再计算彼此之间的距离。

两个 n 维向量(n 个属性) $\mathbf{A}(a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1n})$ 与 $\mathbf{B}(a_{21}, a_{22}, a_{23}, \dots, a_{2n})$ 之间的标准化欧氏距离定义为

$$D_{ab} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_{1k} - a_{2k}}{s_k} \right)^2}, \quad (1)$$

其中, s_k 是基于多组样本计算出的分量标准差。 s_k 的倒数亦可看作是第 k 维向量(分量)的权重函数。标准欧氏距离法通过对各维向量(也就是各属性)设置不同的加权函数,一方面可去除量纲,另一方面分量标准差反映的是分量离散程度,用其倒数将自身值的绝对变化加权后,更加合理地体现出分量变化对总体变化的实际贡献程度,从而有助于相对平等地体现各分量变化在整体差异中所起的作用。

本文中将计算 13 个辐射分量的标准欧氏距离[简称为辐射距离 (Drd)], 计算 14 个结构分量的标准欧氏距离[简称为结构距离 (Dst)]。从定义可知,属性距离值越大说明样本间的属性差异越大,值为 0 则表示属性完全相同。

不难理解,大气、地表等外部条件相同时,两条云廓线如果物理结构越相近,即结构距离值越小,那么它们彼此的辐射特征也越相近,即二者辐射距离值越小。反之,是否也能成立呢?我们先任意选择一个观测个例,分别计算廓线之间的结构距离 (Dst) 和辐射距离 (Drd) 分布情况。图 5a 为 2008 年 12 月 15 日 CPR 所经区域扫描的云廓线 Z_c 随高度分布情况。该图所展示的云场分布比较丰富,既有两层云,也有单层云,有的云顶高度达 11.3 km,也有云顶高度仅为 1.2 km,有的云厚达 10 km,有的云厚仅为几百米,云廓线之间物理结构变化显著。图 5a 中有多个观测廓线,根据标准化欧氏距离计算公式可对其中任意一条廓线计算出与其他廓线的距离值,从而有多组距离分布图。为了方便说明,我们任意选择图中红色线所在的廓线为代表,来计算其他云廓线与该廓线之间的结构距离和辐射距离,结果显示在图 5b 中。从结构距离值分布情况看,其值的大小能够反映出廓线结构的差异程度,例如红色线周围 (31°N 左右) 的云廓线物理结构较近,它们彼此之间的结构距离确实较小,而在 40°~42°N 之间的云,云层高度、厚度、反射率因子等与红色廓线显著不同,它们之间的结构距离值比较大。说明,通过计算标准欧氏距离的办法可以对具有不同属性特征的云物理结构差异程度进行量化,这一方法同样适用于对辐射特征差异的量化。图 5c 给出了辐射距离随结构距离的变化分布情况。不难看出,辐射距离小的点其结构距离值也小,辐射距离值大的点其结构距离值也大。总体而言,辐射距离变化与结构距离变化之间呈现单调线性关系,结构距离随辐射距离增大而增大,随辐射距离减小而减小。

需要说明的是,为了方便起见,图 5b、c 计算两两云廓线的辐射距离值时是直接使用 MODIS 的辐射产品数据,其前提条件是假设各廓线所处的外在环境条件(如大气状况、地表特征)和观测条件(如太阳位置)是相同的。严格来讲,在分析两个廓线的辐射差异时,应先排除外在环境条件(有云存在条件下,影响反射辐射值的主要因素来自大气

成分、地表特征差异)和观测条件不同(影响辐射值的主要因素是探测角度和太阳入射角度差异)对辐射值的作用,再进行真正意义上的辐射差异研究。受现有能力限制,我们目前对这些外在条件的差异无法进行定量计算,但是对外在因素产生差异和影响的程度是可以估计的。首先是为了减少地表的影响,文章中选择了分布相对平坦的深海区域,尽可能减少了地表特征的差异;其次,所分析的云廓线对两个卫星而言可近似认为处于星下点位置,所以观测角度可认为近似相同;再次,根据卫星的运行速度(即 420 km/min)推算,从起始纬度 30°N 到 45°N 结束前后观测间隔不足 4 分钟,太阳入射角度的变化所生成的影响也有限。因此,尽管由于条件有限在辐射距离值信息中包含了外场环境变化的差异(例如,目前无法准确掌握背景大气变化情况),使得排除这些因素的作用无法完成,但这些差异在云反射辐射中所占的比例很小,所起的作用也小。根据图 5 所示诸多云廓线(约 1500 条)的计算结果来看,即使在這些外在因素差异存在的情况下,廓线辐射距离变化与结构距离变化之间仍然呈现明显的单调线性关系,即辐射距离大,则结构距离大;反之辐射距离小,结构距离也小。

更多的统计分析结果表明,辐射距离与云结构距离之间确实存在明显的单调相关关系,在大气状况相对稳定以及观测条件基本相同情况下,总体来说辐射距离大,结构距离值也大;辐射距离值小,则结构距离值也小。这也从一定程度说明, Barker et al. (2011) 的假设在统计意义上是成立的,特别对于有显著结构差异的云廓线,辐射距离越小,结构距离总体上也越接近。但是,我们也能看到,虽然图 5 中辐射距离和结构距离之间能够线性拟合,但二者存在一定程度的离散情况,例如在固定的辐射距离上,结构距离还有一个变化范围,说明云的结构存在一个变化范围;再如,图上还存在某些辐射距离值大但结构距离值却小的情况。造成此情况的可能原因有:(1)可使用波段具有局限性,即现有条件下所用波段通道对云的所有物理结构参数变化可能不能完全响应;(2)CPR 的云廓线数据与 MODIS 的云辐射数据中心位置不是严格重叠,而且 CPR 数据的空间分辨率略大于 MODIS 的格点分辨率;(3)CPR 发布的云物理参数反演产品以及 MODIS 发布的辐射数据存在误差;(4)外场环境

变化也夹杂其中。这些因素的共同作用,造成了辐射距离与结构距离之间的分布存在一定程度的离散性。即便如此,从对诸多个例分析的总体情况来看,这些因素对二者之间单调的线性变化关系的定性结论不影响。在大气状况相对稳定以及观测条件基本相同情况下,云廓线辐射距离变化与结构距离变化之间呈现明显的单调线性关系,即辐射距离大,则结构距离大;反之辐射距离小,结构距离也小。

4.2 物理结构“相近”的辐射距离阈值选择

连续云场中云廓线之间,一般而言空间距离越近其廓线结构相近可能性越大,而空间距离越大则结构有较大差异的可能性越大。分别计算这些廓线之间的辐射距离和结构距离并进行对比,特别是空间距离较近的廓线之间其结构距离,可获得“相近”云廓线的距离分布特征,也为云结构廓线的匹配阈值选择提供依据。为了使距离计算结果具有可对比性,在计算标准欧氏距离时,各属性参量必须使用相同的权重函数。为此,我们选择出近万条具有不同物理结构的云廓线来计算它们各辐射参数分量以及结构参数分量的标准差,其目的是在尽可能多地条件下充分获得各参量值的离散分布程度。计算后获得的辐射距离各波段标准差分别为: 6.09、101.53、21.47、1.77、38.09、33.03、7.16、0.17、0.38、0.74、1.72、1.54、0.60; 14 个结构距离参量标准差分别为: 3.61、2.44、2.59、13.26、11.78、2.76、4.87、3.55、8.93、3.38、13.16、20.60、13.17、6.81。

图 6 展示了一组具有不同结构特征的云廓线情况,图 6a 中不同颜色点线表示具有不同垂直特征的廓线对,图 6b 则给出了所有廓线与黑色方形点线云廓线的辐射距离以及结构距离。从图上看,结构距离小于 1.5 时的廓线之间垂直结构“看上去”比较相近。基于 CPR 的数据分辨率,在大尺度连续云场中距离约 1 km 的云廓线之间,出现彼此垂直结构接近的可能性较大。根据近万对空间距离约 1 km 以内的云廓线对的统计分析发现,其平均辐射距离为 0.32,标准差为 0.38。其中约 69.4%的廓线对辐射距离小于 0.32,约 80%的廓线对辐射距离小于 0.45,约 90%的廓线对辐射距离小于 0.70,约 95%辐射距离值小于 1.0;结构距离方面,平均结构距离为 0.51,标准差为 0.49,其中约 67.4%的廓线对辐射距离小于 0.51,约 80%的廓线对辐射距离小于

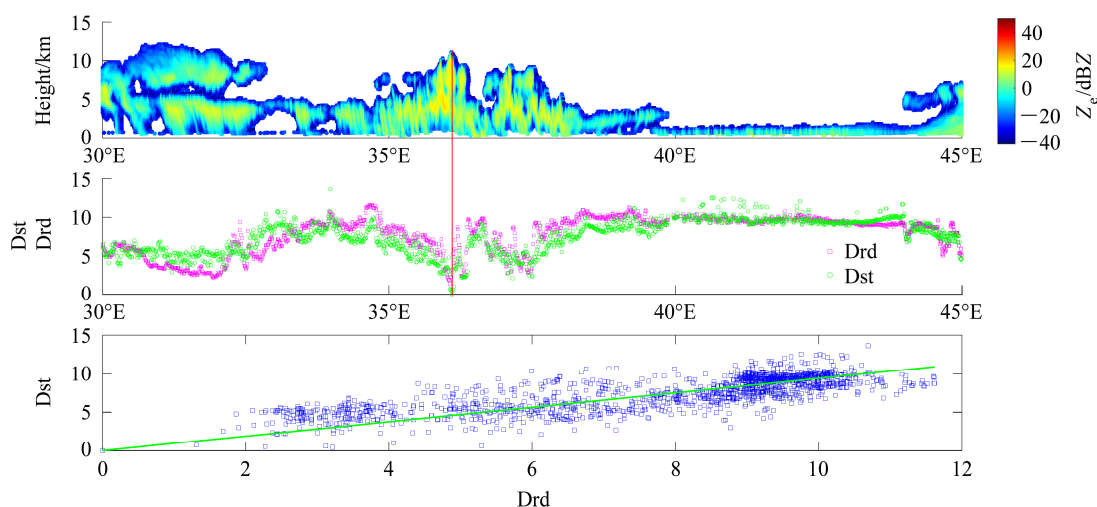


图5 一个结构距离和辐射距离分析示例：(a) 2008年12月15日所选区域内CPR观测雷达反射率因子 Z_e ；(b)以图a中红色线所在云廓线为参照计算的各廓线与其之间的辐射距离和结构距离；(c)辐射距离随结构距离单调变化

Fig. 5 A cloud case showing the distribution of Dst (Standardized Euclidean distance of structure) and Drd (Standardized Euclidean distance of radiation): (a) Z_e measured by CPR on 15 December 2008 in the selected area; (b) Dst and Drd between the red profile in Fig. a and other profiles; (c) the monotonic relation between Dst and Drd

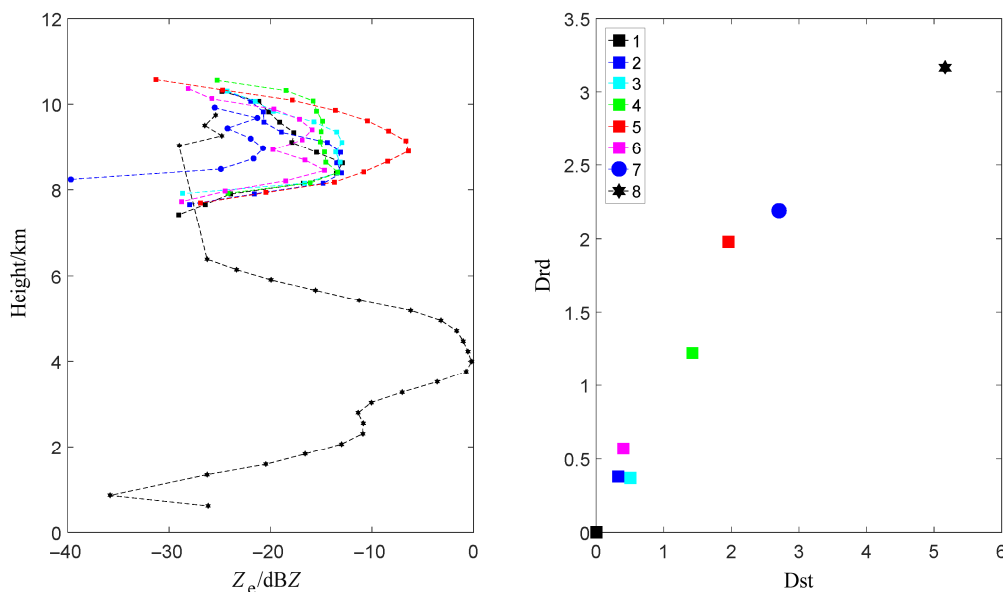


图6 不同结构云廓线的辐射距离和结构距离对比分析：(a) 8条云廓线的 Z_e 垂直结构；(b) 黑色方点廓线与其他廓线的辐射距离以及结构距离

Fig. 6 Contrast of the Drds and Dsts between cloud profiles with different vertical structures: (a) Vertical structures of eight cloud profiles; (b) Drds and Dsts of the black square profile with other profiles

0.71, 约90%的廓线对辐射距离小于1.04, 结构距离小于1.5的廓线对约占95%。据此, 如果设定辐射距离阈值为1.0作为寻找匹配云廓线的条件, 则廓线间结构距离小于1.5的概率大于90%。

5 辐射特征相近的云廓线匹配

利用两条云廓线的辐射距离越近, 云的物理结构可能也相近这个特点, 对于结构特征未知的云廓

线, 寻找与其辐射特征相近的匹配廓线, 进而借助匹配廓线的云结构信息来描述自身结构特征。为了能寻找到最佳和符合实际的匹配廓线, 还应尽可能减少其他因素的影响。首先, 降低大气条件因素的影响。如上所述, 卫星测量到的辐射值主要来自大气、气溶胶、地表和云的共同作用, 在短波辐射波段云所起的作用最大。为了减少来自大气、气溶胶和地表变化所产生的影响, 获得最佳的匹配结果,

选择天气条件相对稳定、下垫面为洋面的探测数据可降低大气、气溶胶和地表辐射差异的影响。其次,为减少太阳辐射和仪器观测角度差异的影响,廓线之间的观测时间间隔越短越好。CloudSat 卫星与AQUA 卫星飞行间隔约 1 分钟,此观测间隔时间内,可近似认为太阳位置和卫星探测角度基本不变。CloudSat 卫星的运行速度约为 7 km/s,备选廓线的范围如果定为前后 200 km 内,能够保证 MODIS 与 CloudSat 卫星的观测间隔在 1 分钟之内。再次,辐射距离与结构距离虽然高度单调相关,但是也存在某些廓线之间辐射距离小,但是结构距离值大的一些特殊点,虽然这些点不多,但如果仅根据最小辐射距离来选择时,可能会出现与实际偏离较多的匹配结果,为了避免这种情况的出现,需要对这些结

构距离异常点进行排除。处理时可从辐射距离较小的几个廓线中挑选,两两结构距离值最小且位置距离最近的廓线为候选云廓线。另外,为了减少空间距离增加而造成太阳辐射以及观测角度差异的影响,应将计算而得的辐射距离值根据空间位置距离进行适当修正。目前,我们通过选择结构相对均匀的层云场分析辐射距离对位置距离的变化来获得简单的修正经验,而基于模式模拟并结合仪器飞行和观测特征分析,可能会获得更好的修正经验。

经过如上步骤,我们为云物理结构的重建开展模拟试验(图 7)。根据上节统计结果,将 $\text{Drd} < 1.0$ 在云场匹配中作为首要条件。以平行于 CPR 观测的某条云廓线所在位置为研究对象(图 7a),根据其相应位置的 MODIS 辐射观测值,在 CPR 所经路径上

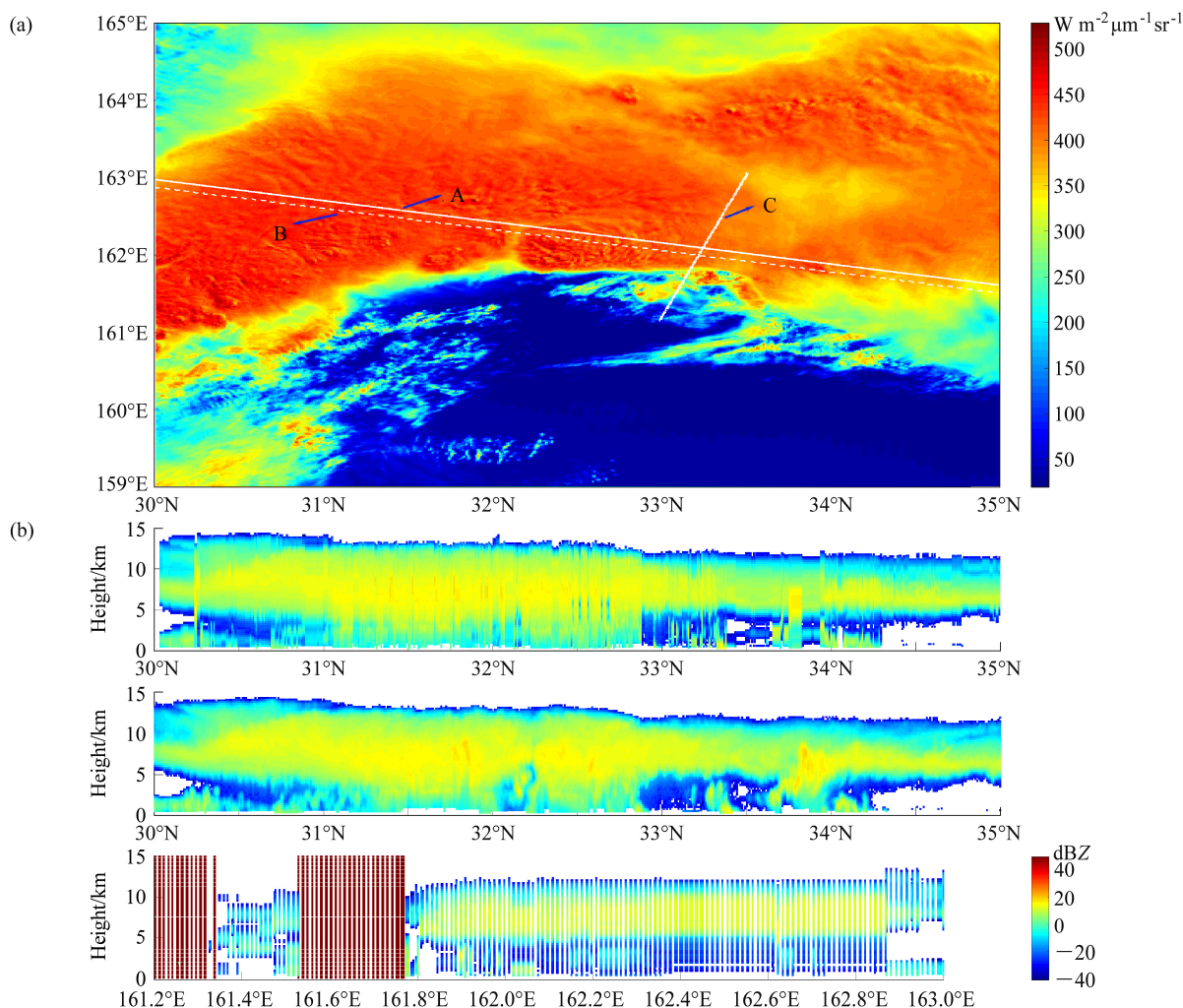


图 7 (a) MODIS 通道一的辐亮度(单位: $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)分布,图上白色实线 A 为 CPR 扫描路径,白色虚线 B 距离白色实线 A 大约 10 km。

(b) 从上到下分别对应图 a 中线段 B、线段 A 和线段 C 的垂直结构分布。线段 B 和 C 的云结构构建是基于最近辐射特征原则匹配而成

Fig. 7 (a) Radiance (units: $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) of waveband 1 from MODIS, line A (white solid line) is the scan path of CPR, line B (white dashed line) is about 10 km from line A. (b) The panel from top to bottom shows the cloud vertical structures of line B, Line A, and Line C. Vertical structures of line B and line C are constructed based on the nearest radiative characteristics principle

且小于 200 km 距离范围内,结合如上所述匹配条件,搜索并选择与该条廓线的辐射距离小 (<1.0) 且空间距离近的云廓线(称之为匹配廓线),将匹配廓线的物理结构数据作为该研究对象的物理结构数据。

从线段 B 的构建效果情况看,云垂直结构分布体现了云场连续变化,总体而言是合理的。线段 C 的构建图中红色线条表示未能找到符合条件的匹配廓线。云场重建需要对诸多候选廓线进行筛选和匹配,如果供选择的廓线多,则获得理想匹配廓线的概率就增加,另外,对于具有高度复杂结构分布的云廓线而言,由于其自身分布特征高度复杂和特殊性,会增加寻找到匹配廓线的难度,因此对于分布连续且水平尺度范围大的云场,利用最小辐射距离方法匹配而成的云场结构与实测云场结构非常接近,而对于分布相对离散、水平尺度小以及特征特殊的云所构建的云场结构则与实际云场的差距会扩大。因此,最小辐射匹配法重建云物理结构更加适用于分布连续且水平尺度范围大的云场。

6 小结与讨论

云的多光谱辐射被动遥感测量的是云的辐射特征,不同波段的辐射特性与云的物理结构特征密切相关。测云雷达则通过主动遥感,深入云体内部,探测云内物理结构分布特征。云的分布千变万化且丰富复杂,但其并非随意而生随意而长,其发展和演变总要受外场环境的影响和限制,并遵循一定的规律而进行。因此,虽然被动遥感测量的是云的整体特征,不同波段组合使用也能从一定程度上反映云的物理结构特征。通过开展各波段与云物理结构相关性分析,我们从 22 个谱段中对比并挑选出 13 个更有代表性并能够高效体现物理结构特征的波段,用于分析云光谱辐射特性与云物理结构之间的相关关系。运用 4 年时间的卫星雷达探测数据和光谱辐射数据,经统计分析表明,被动遥感的多光谱辐射特性与云物理结构之间存在显著的线性关系。总体而言,云物理结构距离的变化随辐射距离的增大而增加,随辐射距离的减小而减小。进一步的定量分析结果表明,云廓线之间当 D_{st} 小于 1.5 时,可认为其物理结构非常接近;以 $D_{rd} < 1.0$ 为阈值条件时,结构相近廓线(即 $D_{st} < 1.5$)的个例大约为 95%。辐射距离值没有结构距离值变化灵敏,这说明辐射特征变化没有能够显著表达出云结构特征上的变化,也就是当云廓线物理结构有相对小的变化时,

所选用的可见、红外和近红外波段的辐射信息体现不出这小量级的变化,在未来随着技术的进步,其他谱段(例如微波波段数据)的加入将能进一步增强使用被动遥感手段来认识云物理结构的能力。

云物理结构的主动遥感相比被动遥感需要花费更多。目前的卫星主动遥感探测也局限为扫描路径上星下点的雷达探测,观测的是沿飞行方向和垂直方向的二维数据云结构数据,被动遥感的多光谱辐射数据在跨轨方向有较宽的延伸。借助多光谱辐射数据,基于上述统计分析结果,为主动探测的二维云场数据在跨轨方向的延展提供了可能。初步的试验也表明,使用相近辐射匹配的方法能够在一定条件下,例如背景大气状况稳定、地表特征变化不大等,可完成云物理结构的重建。

参考文献 (References)

- Barker H W, Jerg M P, Wehr T, et al. 2011. A 3D cloud-construction algorithm for the EarthCARE satellite mission [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137: 1042–1058, doi:10.1002/qj.824.
- Cole J N S, Barker H W, Randall D A, et al. 2005. Global consequences of interactions between clouds and radiation at scales unresolved by global climate models [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L06703, doi:10.1029/2004GL020945.
- Liou K N. 1992. *Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere: Theory, Observation and Modeling* [M]. Oxford: Oxford University Press, 487pp.
- Minnis P, Garber D P, Young D F, et al. 1998. Parameterizations of reflectance and effective emittance for satellite remote sensing of cloud properties [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 3313–3339, doi:10.1175/1520-0469(1998)055<3313:PORAE>2.0.CO;2.
- Pincus R, Szczodrak M, Gu J J, et al. 1995. Uncertainty in cloud optical depth estimates made from satellite radiance measurements [J]. *J. Climate*, 8: 1453–1462, doi:10.1175/1520-0442(1995)008<1453:UICODE>2.0.CO;2.
- 邱金桓, 陈洪滨, 王普才, 等. 2005. 大气遥感研究展望 [J]. *大气科学*, 29: 131–136. Qiu Jinhuan, Chen Hongbin, Wang Pucai, et al. 2005. A prospect on future atmospheric remote sensing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29: 131–136, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.15.
- Ramanathan V. 1987. The role of earth radiation budget studies in climate and general circulation research [J]. *J. Geophys. Res.*, 92: 4075–4095, doi:10.1029/JD092iD04p04075.
- Roskovensky J K, Liou K N. 2006. Simultaneous determination of aerosol and thin cirrus optical depths over oceans from MODIS data: Some case studies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 2307–2323, doi:10.1175/JAS3747.1.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. *大气物理学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 521pp. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. *Atmospheric Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Peking University Press, 521pp.