

# 基于 CloudSat 资料的东海及周边云层垂直分布特征

安洁

(空军研究院, 北京 100085)

**摘 要:** 利用 2007—2010 年 CloudSat 二级产品中的 2B-GEOPROF 和 2B-GROPROF-Lidar 数据, 分季节、昼夜统计分析东海海区及其周边的云层频率、云层厚度、云层间隙等云垂直参数的时空分布特征, 并利用 EOF 分解给出了云层出现频率的第一、二模态。结果表明: 无论任何季节、昼夜, 云层的数目与其出现的频率均成反比, 即云层数越少出现的频率越高, 出现最多的是单层云, 年平均出现频率在 60% 以上; 其次是双层云, 年平均出现频率在 20%~30% 之间; 出现三层云及以上的情况很少。云层数越多, 底层云底高越低, 顶层云顶高越高, 每层云的厚度越薄, 每层云之间云层间隙也越小。云的垂直结构受季节和地域影响较大。单层云频率月异常的第一、二模态分别反映了海陆下垫面不同的影响以及东亚大槽和西太平洋副高的影响, 并均具有年变化。双层云第一模态则表现为在东海及其周边的绝大部分范围, 春季出现的频率高, 秋冬季出现的频率低, 但也有年变化; 而第二模态则无年变化。

**关键词:** 东海海域; CloudSat 资料; 云层频率; 云层厚度; 云层间隙; EOF 分解

**中图分类号:** P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)05-0060-14

## 1 引言

云是重要的航空气象要素之一, 云量的多少、云层的高低、云层间的晴空间隙、云状及其稳定性, 都直接决定着飞行的时机、飞行高度、航线等因素。云是地气系统的重要组成部分, 对地气系统的辐射收支、天气和气候变化有重要的影响<sup>[1-2]</sup>。云也严重影响和制约精确制导武器的作战使用效能, 云(水)滴的折射、散射和吸收作用, 可使红外线、电磁波或可见光通过云(水)时强度衰减, 直接影响到精确制导武器的目标识别。因此, 准确掌握云的垂直结构特征是提高精细化气象预测水平、提升航空作战能力的先决条件。

目前, 常规的观探测手段仅能提供云顶或云底的信息, 无法提供垂直方向上云的三维结构。2006 年由美国航天航空管理局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)成功发射入太空的太

阳极轨云观测卫星 CloudSat, 由于载有毫米波测云雷达, 首次实现了在全球尺度上对云的垂直探测, 获得许多有关云的最新气象数据。Sassen 等<sup>[3]</sup>利用一年的 CloudSat 资料, 对全球各类云的云量进行了统计, 并与地面以及 ISCCP 的云量进行了比较。Luo 等<sup>[4]</sup>采用 14 个月的 CloudSat 观测资料对比分析了东亚地区和印度季风区的云量和云垂直结构及其季节变化。Welliver<sup>[5]</sup>利用地基雷达观测数据验证了 CloudSat 资料的云底高度数据, 结果表明, 云底高度的准确率达到了 73%。王帅辉等<sup>[6]</sup>利用 CloudSat 和 CALIPSO 联合观测数据与 ISCCP 资料对中国及周边地区的云量分布特征进行了对比分析, 初步验证了 CloudSat 和 CALIPSO 数据的合理性。王帅辉等<sup>[7]</sup>还分析了中国及周边地区上空云的发生频率和垂直结构, 得到中国及周边地区单层云和双层云在总云中所占比重不同。王胜杰等<sup>[8]</sup>利用 Cloudsat 资料统计分析了青藏高原及其南坡、南亚

收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-09-22。

基金项目: 国家“973”项目(2013CB956203)。

作者简介: 安洁(1979-), 女, 工程师, 博士, 主要从事海上航空天气预报研究。E-mail: anjie\_1029@163.com

季风区云高度和云分类特征。Matrosov<sup>[9]</sup>基于CloudSat探测资料研究分析了2008年两个登陆飓风系统Gustav和Ike内云顶高度、冰水路径和降雨率的分布,并将降雨率反演结果与地基天气雷达探测结果进行对比验证等等。汪会等<sup>[10]</sup>采用CloudSat资料进一步对比分析了东亚季风区、印度季风区、西北太平洋季风区和青藏高原地区的云量和云垂直结构及其季节变化特征,还进一步分析了亚洲季风区低云量的分布及其与对流层低层稳定性的相关。钟水新等<sup>[11]</sup>利用CloudSat卫星资料,NCEP再分析资料和FY-2C卫星可见光云图分析了2006年7月20—24日我国东北一次冷涡过程不同时期对流云的垂直结构以及云内中小尺度的结构。尚博等<sup>[12]</sup>利用Cloudsat卫星资料,验证Cloudsat卫星识别降水云方法的合理性,并统计分析华北和江淮地区降水云与非降水云的垂直结构特征。彭杰等<sup>[13]</sup>、张华等<sup>[14]</sup>、张晓等<sup>[15]</sup>还利用CloudSat资料分析了东亚地区、青藏高原地区云的垂直结构特征。

国内外学者利用CloudSat资料做了很多研究,但大多侧重于内陆及沿海地区,针对海上的云特征研究较少。我们利用2007—2010年CloudSat二级产品中的2B-GEOPROF和2B-GROPROF-Lidar数据,分别统计分析了东海海区及周边即(24°~34°N, 120°~129°E)的云量、云高的时空分布特征<sup>[16]</sup>,在此基础上本文对该区域做各种云垂直分布参数(包括云层出现频率、云层厚度、云层间隙等)的特征分析,并采用经验正交函数(EOF)分解和小波分析方法,分别对白天单层云和双层云出现频率月异常的主要模态做了分析。

## 2 资料和方法

本文使用2007—2010年CloudSat二级产品中的2B-GEOPROF和2B-GROPROF-Lidar数据。其中,2B-GEOPROF主要是来源于卫星上搭载的94 GHz毫米波雷达(CPR)的探测信息,2B-GROPROF-Lidar整合了CPR的信息和CALIPO激光雷达(搭载在与CloudSat同轨道的CALIPSO卫星上)的信息,结合两者可同时发挥毫米波雷达和激光雷达的优点。

在研究中首先编程读取CloudSat资料中的相

关信息,包括时间、经纬度、高度、雷达反射率因子、云遮盖、云层数、不同云层的云顶高和云底高、云判别有效值等;其次将CloudSat数据按所研究区域的经纬度划分为1°×1°的网格,对网格内的数据进行整合处理,作为各统计要素的格点值;最后分季节、分时次分别统计东海海区内云的各类垂直参数的时空分布特征。其中,春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月,冬季为12月—次年2月。由于卫星经过研究区域的时次集中在世界时05—06时和17—18时这两个时段,研究中将05—06时代表白天午后,将17—18时代表夜间子夜,以下简称白天、夜间。

本文经验正交函数(EOF)分解的具体做法是:首先将上述处理好的1°×1°的网格资料进行统计,分别得到2007年1月—2010年12月这48个月的各月白天单(双)层云出现频率的空间分布场;其次将这48个月的场进行算术平均,得到一个48个月的平均场;然后将48个月的空间分布场分别减去此平均场,就能得到每个月的月异常场,注意在此月异常场是指对这48个月算术平均场的异常;最终将这48个月异常场进行EOF分解,即可得到单(双)层云出现频率月异常的各空间模态及相应的时间系数。

## 3 云层频率分析

单(多)层云的出现频率的计算公式如下<sup>[10]</sup>:

$$\text{Frequency} = (N_{\text{layer}} / N_{\text{all}}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_{\text{layer}}$ 为研究区域内观测到单(多)层云的廓线数, $N_{\text{all}}$ 代表研究区域内观测到有云的总的廓线数。

研究区域内单层云平均出现的频率在60%以上。白天,海上大部分区域在70%以上,陆上和近海相对较低,为60%~65%(见图1a)。夜间,在长江口以北近海地区出现单层云的频率较高,台湾岛以东至124°E海域出现单层云的频率比白天偏低(见图1e)。双层云平均出现的频率在20%~30%之间,近海沿岸、岛屿出现的频率比远海相对偏高(见图1b、f)。三层云平均出现的频率只有4%上下,白天主要集中在台湾海峡附近(见图1c),夜间高频区向东北方向海上蔓延(见图1g);四层云以上平均出现的频率最低,相对高频的区域也只有1%左右(见图



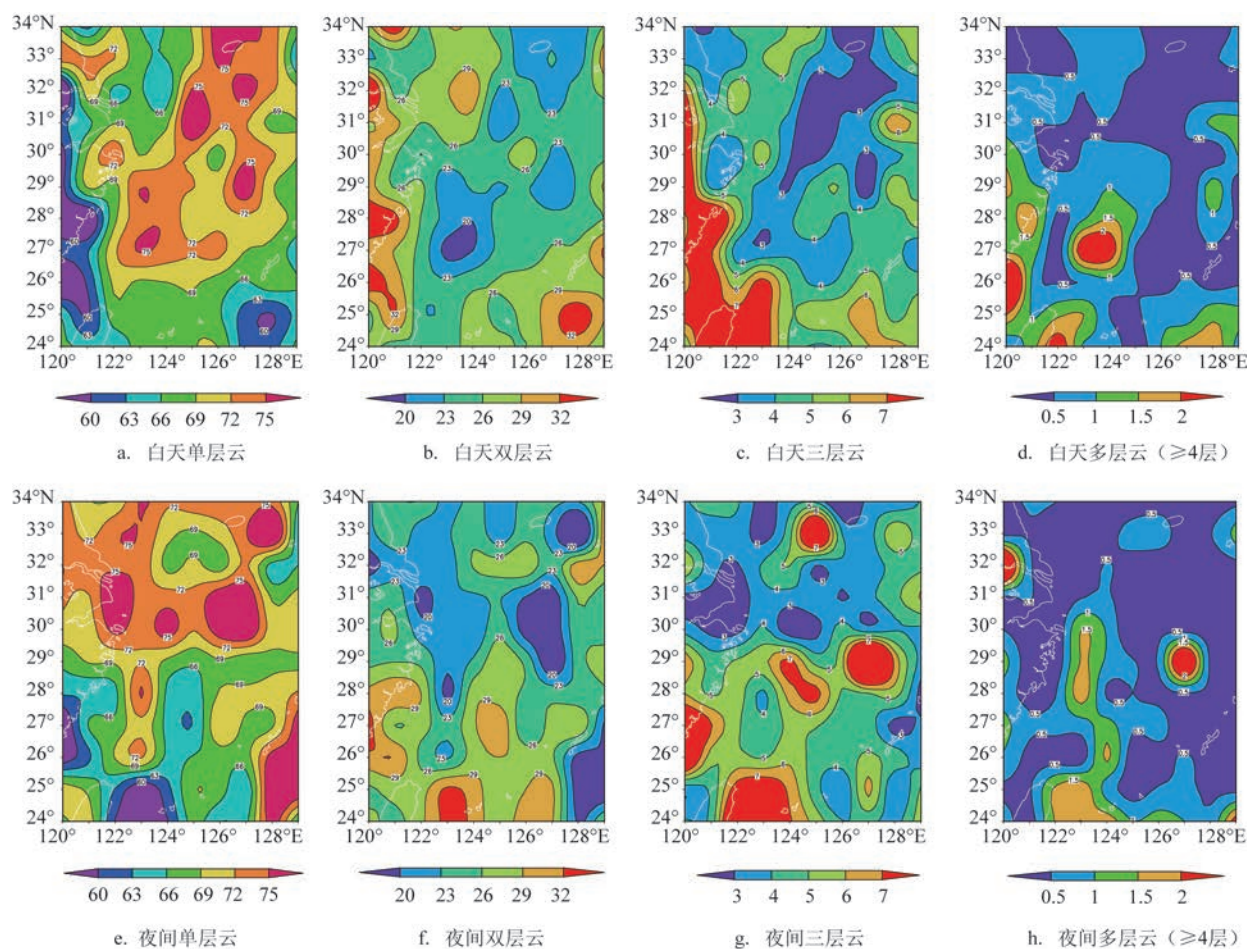


图1 年平均云层频率的时空分布特征(单位:%)

1d、1h)。

不同季节单层云云层地理分布具有明显的季节变化特征(见图2):冬季出现频率最高,春秋季次之,夏季最少。白天,各季节远海出现单层云的频率普遍都比陆地、近海偏高;夜间,夏季海上出现单层云的频率偏低,春秋季近似“北高南低”分布;而冬季整个研究区域内单层云出现的频率都较高,普遍在70%以上,局部地区达到85%以上。出现这样的分布是因冬季层状云多,其大多呈单层,而夏季对流云多,且往往呈两层,下层由云水滴构成,上层由云冰晶组成(如高云或中云之下的积云,积雨云之上的伪卷云等);而春秋季节南方对流云要较北方多。

不同季节双层云云层地理分布的季节性变化也很明显,但变化特征不同于单层云(见图3)。双层云频率最高出现在夏季,尤其在夏季夜间,大部

分区域均在25%以上,沿124°E经度方向双层云出现的频率可达35%以上;冬季则最低,海上大部分区域在20%以下,局部地区在10%以下。出现这样分布的主要原因还是由于冬季多层状云,夏季多对流云,且尤以夏季夜间对流发展旺盛,双层云的出现频率最高。

多层云( $\geq 3$ 层,图略)夏季出现的频率最高,可达10%以上,冬季最低,大部分区域在2%以下。白天,三层云主要出现在近海沿岸、岛屿地区;夜间则主要出现在海上,尤其以夏季夜间居多,海上大部分区域出现频率在6%以上。

综上,无论任何季节、时段,出现最多的是单层云,年平均出现频率在60%以上;其次是双层云,年平均出现频率在20%~30%之间;出现三层云及以上的情况则很少,即有云的层数越少其出现的频率越高,云的层数与其出现的频率成反比。

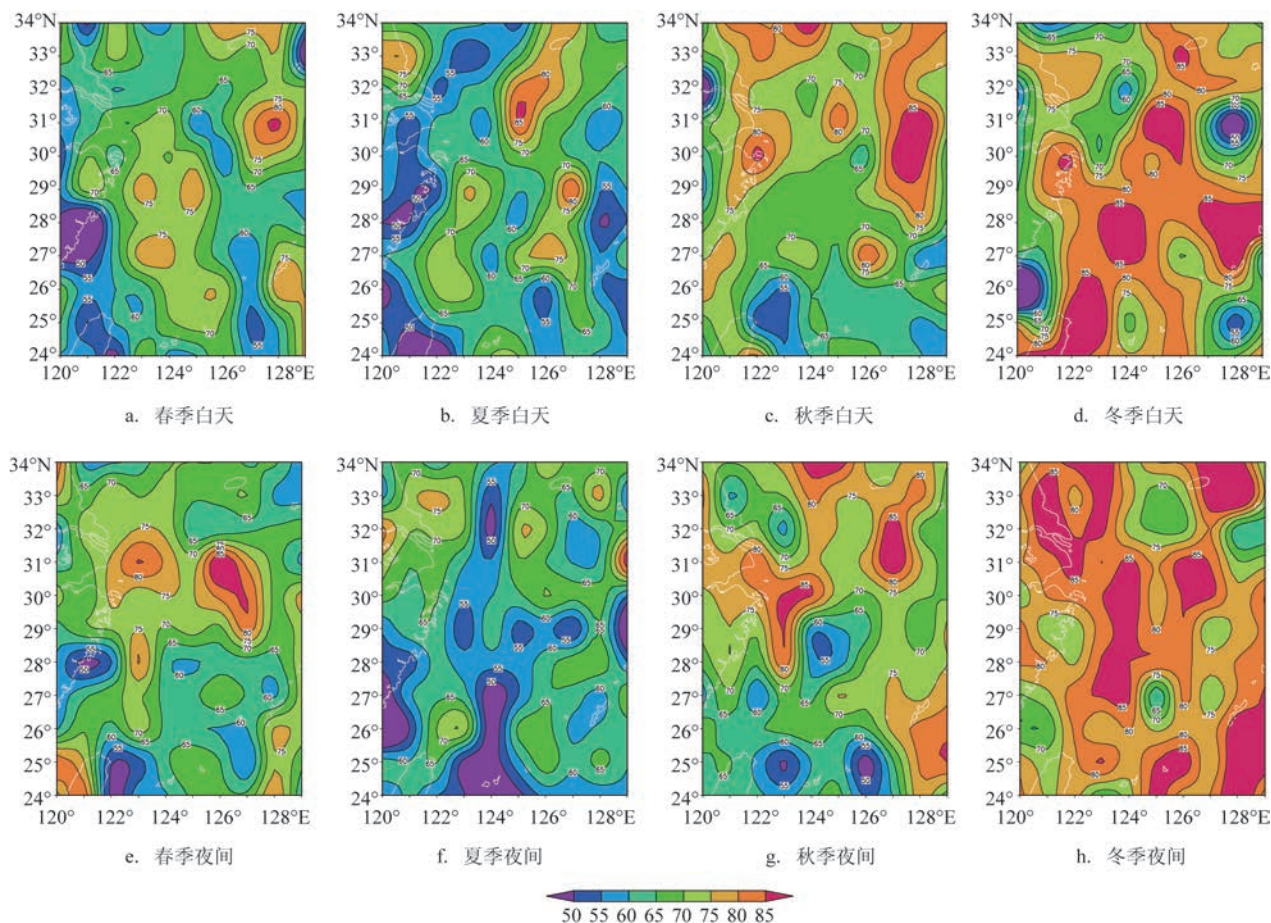


图2 不同季节单层云出现频率的分布特征(单位:%)

## 4 云厚度及云层间隙分析

### 4.1 单层云云层厚度

单层云年平均云底高在3 000~4 000 m,云顶高在6 000~8 000 m,云厚约为3 000 m左右,夜间因气温下降,云层比白天稍偏厚;26°N以南因气温较高,云层较薄,在2 400 m以下;极大值区云厚可达4 200 m,主要分布在我国长江口以东、以南海域,呈南北向分布(图略),这是由于该处水气充沛。

单层云平均云厚季节性差异明显(见图4),春、夏因处雨季,水气丰沛,云层较厚,秋、冬季水气明显减少,云层较薄。

春季,云层呈现“南薄北厚”的分布。26°N以南云层较薄,平均厚度在3 000 m以下,这是因此时南

方气温较北方明显要高,故不利于水气凝结;夜间因气温下降,云层比白天偏厚,而白天云层最薄处只有1 500 m;春季沿122°E和127°E经线方向是云厚的高值带,尤其在夜间因气温下降使得此高值带更为明显,平均云层厚度可达5 000 m以上。这两条高值带之间有一条南北向的云厚低值带,注意到该低值带正位于黑潮主流上。春季该处海气温差大,黑潮海区海洋锋区上海温变化会影响大气边界层稳定度,使得海温升高时该稳定性减弱,垂直混合增强,从而造成低云顶高度增高;另一方面,黑潮向大气输运大量热量,使得该处气温较其周围偏高,从而使得水气不易凝结<sup>[17-18]</sup>。此云厚低值带是以上两种作用的综合结果。夏季垂直伸展的对流云多,白天云层厚度普遍在4 000 m以上,中部海区(26°~30°N, 123°~125°E)水气充沛,是云厚的极大值区,平均云层厚度5 000 m;夜间近地层气温较白



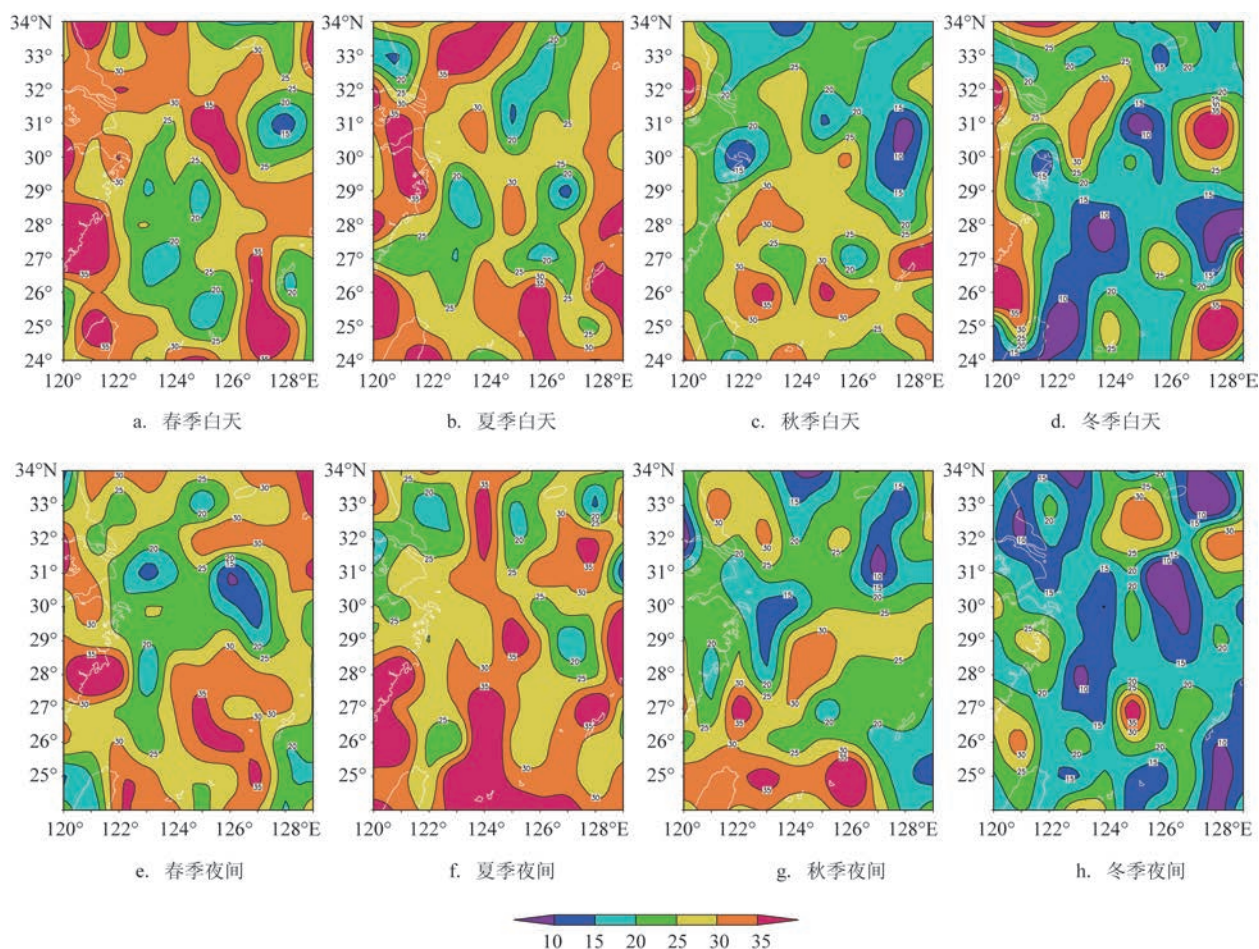


图3 不同季节双层云出现频率的分布特征(单位:%)

天明显要低,不利于低层上升运动,因而云层比白天偏薄,大部分区域3 000 m左右,极大值区的范围也较白天缩小。秋季因秋高气爽,水气偏少,云层明显变薄,大部分区域平均云层厚度在3 000 m以下,极大值区云厚4 000 m;白天主要位于琉球群岛南部,夜间主要位于东北部海区(31°~33°N, 125°~127°E)。冬季黑潮的影响仍存在,但因此时水气总体要少,云层更薄,极小值区云层厚度不足1 500 m。

#### 4.2 双层云云层厚度及云层间隙

从年平均来看(图略):双层云云底高在2 000 m左右,大陆、岛屿平均云底高要比海上相对偏高,这是因陆上低层较海上低层水气含量要少,致使陆上凝结高度较海上要高的缘故。双层云云顶高呈现“南高北低”的分布,南部海区最高处云顶高可达13 000 m,而北部近海区域最低处云顶高只有

9 500 m,这是因南方的对流层顶高度较北方要高的缘故。双层云中的下层云云厚平均在1 500~2 500 m,白天在台湾岛至其以东124°E区域和我国长江入海口以东海域(30°~31°N, 123°~124°E)云层较厚,夜间主要位于东部海域(28°~30°N, 126°~128°E)。双层云中的上层云云厚平均1 800~2 400 m,白天呈现“南薄北厚”的分布特征,27°N以南大部分海域云层厚度在1 800 m以下,北部海域极大值区云厚超过2 400 m,这是因南方白天气温较北方高,故不利于水气凝结;夜间气温下降,云层明显加厚,大部分区域在2 100 m以上。双层云年平均云层间隙厚度呈“南厚北薄”分布,北部区域(27°N以北)云层间隙厚度约4 000~5 000 m,沿海区域最薄处不足3 500 m,南部区域云层间隙约5 000~6 000 m,琉球群岛及以南海域云层间隙最厚,可达6 500 m。

图5给出了沿125°E剖线上云层的南北分布特

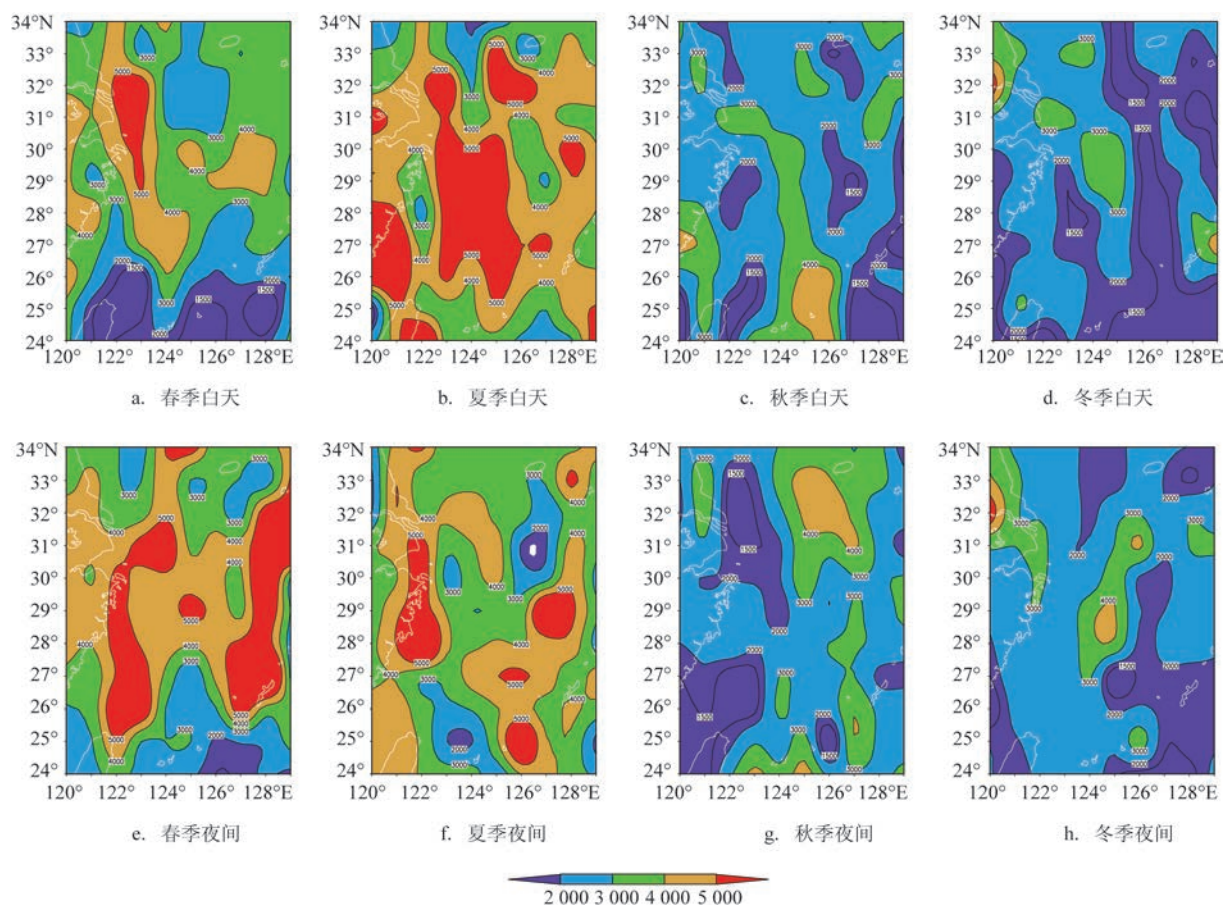


图4 不同季节单层云平均云层厚度分布特征(单位:m)

征。由该图可见,云层的分布具有明显的季节性和地域性差异。春、夏季该处云层最厚,特别是春季夜间,大部分区域在2 000 m以上,最厚可达4 000 m;夏、秋两季上层云云顶最高,且呈现“南高北低”分布。夏季南部区域(27°N以南)平均云顶高在14 000 m以上,部分区域可达15 000 m以上。秋季云层较夏季要薄,但双层云间的间隙达最大,呈现明显的“南厚北薄”分布,27°N以南地区,云层间隙在5 000 m以上。冬季则云层最薄也最低,双层云间的间隙也最小;下层云云顶在3 000 m以下,上层云平均云底高不足7 000 m;大部分区域平均云层厚度都在2 000 m以下;在28°N以南区域,上层云云层厚度不足1 000 m,双层云间的间隙也在4 000 m以下。造成以上分布情况的原因主要与因气温改变而造成凝结高度改变和水气分布情况的变化有关。

### 4.3 多层云云层厚度及云层间隙

从年平均来看(图略):三层云的底层云底高大

多在1 000~2 000 m;云底高值可达2 500 m,主要位于琉球群岛和长江口以南海域(27°~29°N, 122°~124°E);云底低值在1 500 m以下;夜间比白天偏低,平均在1 000 m以下,极值区可低至600 m,主要位于东北部海域(29°~34°N, 120°~124°E)。三层云顶层云顶高呈现“南高北低”的分布,南部区域该云顶最高处可达14 000~15 000 m,而北部区域该云顶最低处只有11 000 m;三层云的单层云厚度约在1 000~1 500 m,顶层云稍偏厚,特别是夜间,顶层云的平均厚度为1 500~2 500 m;三层云云层间隙在2 500~4 000 m,夜间比白天略偏大。

图6给出了沿24°N剖线上的云层南北分布特征。由该图可见,云层的分布具有明显的季节性和地域性差异。夏季底层云底最高,底层平均最低云底高在2 000 m以上,部分地区可达4 000 m;平均顶层最高云顶高在15 000 m以上。冬季底层云底最低,底层平均最低云底高在1 000 m以下,平均顶层最高云顶高只有10 000 m。夏季三层云的云层最



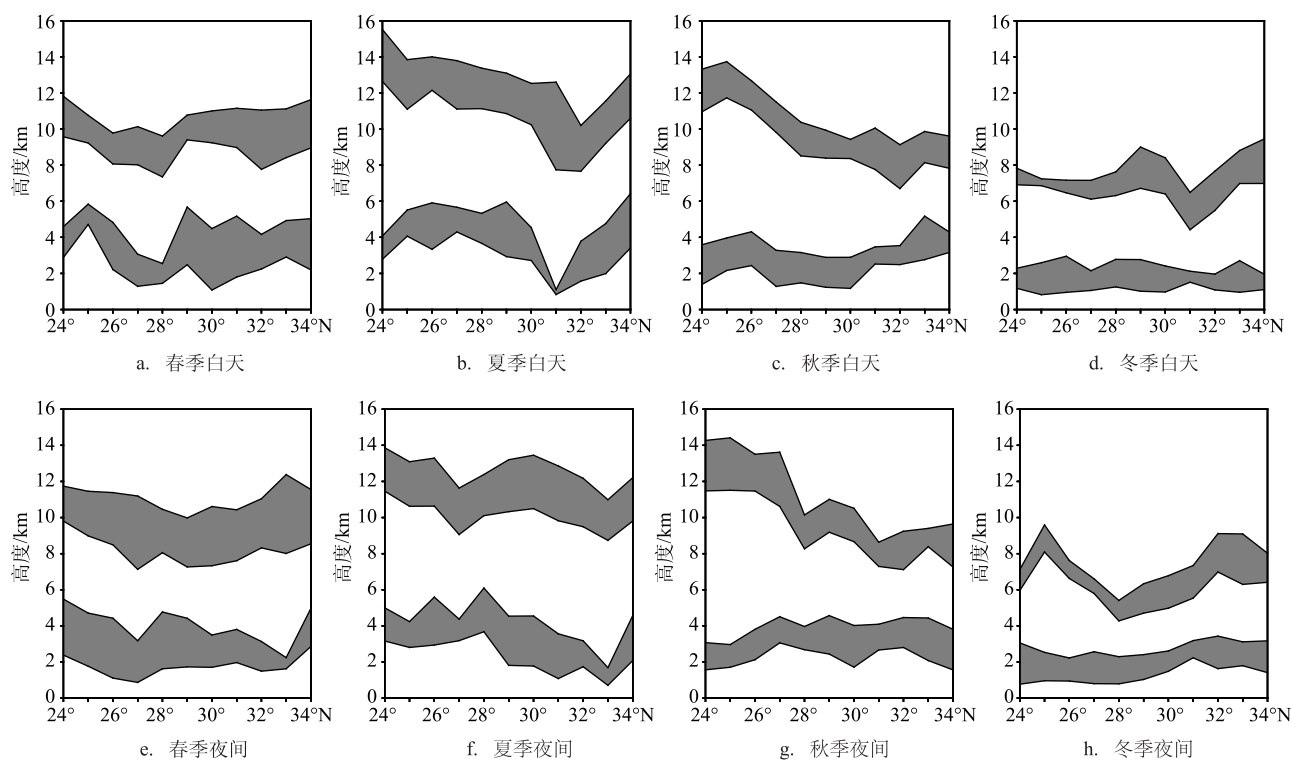


图5 不同季节双层云沿 125°E 云层分布特征(图中阴影代表云层)

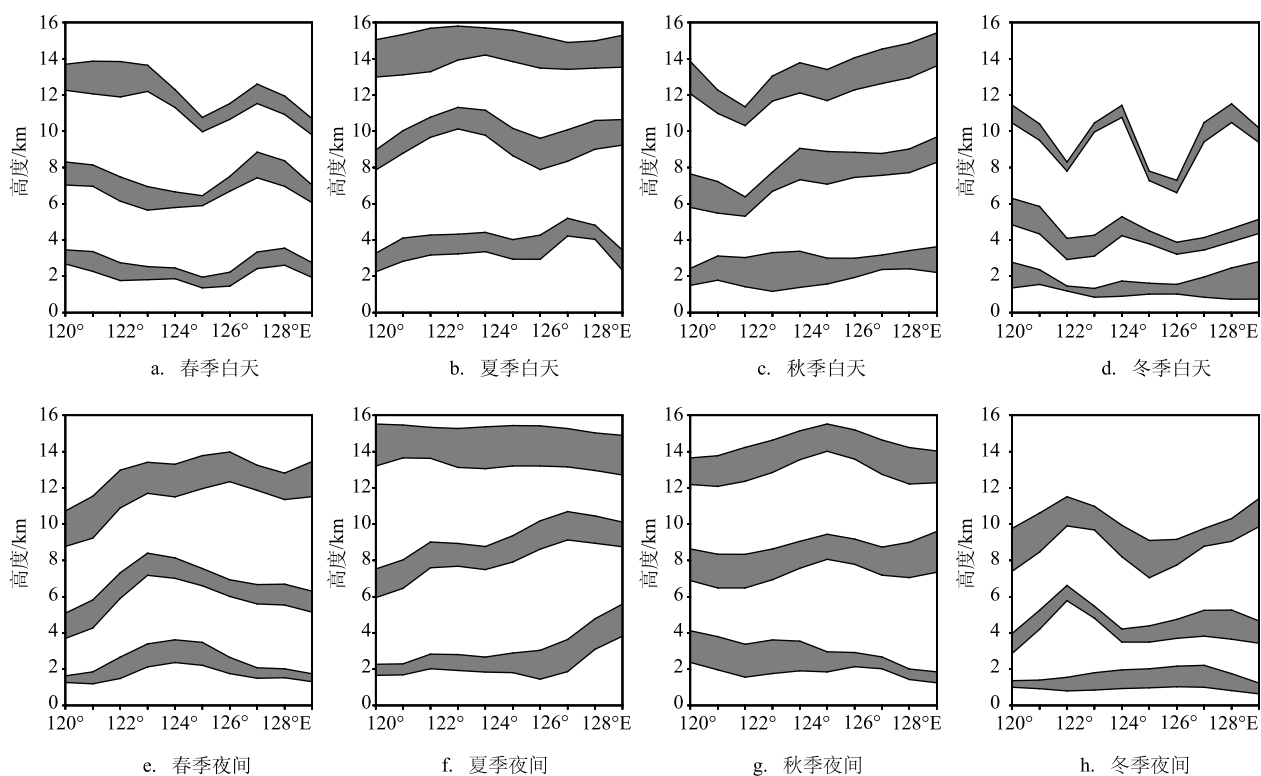


图6 不同季节三层云沿 24°N 云层分布特征(图中阴影代表云层)

厚,平均云层厚度在2 000 m左右,且顶层云比其他两层云偏厚。冬季云层最薄,平均云层厚度1 000 m左右,白天顶层云尤其薄,平均云层厚度只有500 m左右。平均云层间隙约3 000~4 000 m,随季节、地域不尽相同,相同季节里上下两层间隙大小也不相同。冬季下层云层间隙最小,约2 000~3 000 m,夏季下层云层间隙最大,约4 000~5 000 m。

出现四层云(含)以上的频率很低,对其情况进行分析可知,云层数越多,底层云底高越低,顶层云顶高越高,每层云的厚度越薄,但总的云厚(底层云底至顶层云顶距离)略偏厚,云层间隙厚度在2 000~4 000 m。以四层云为例,年平均底层云底高约1 000~1 400 m;年平均顶层云顶高约12 000 m,最高可达16 000 m;底层和次底层平均云厚在600~900 m,顶层和次顶层平均云厚在1 000~1 500 m,顶层平均云厚在1 200~2 000 m;中间的云层间隙在3 000~4 000 m,另两处的云层间隙在2 000~3 000 m。

综合本节分析可知:云层数越多,底层云底高越低,顶层云顶高越高,每层云的厚度越薄,每层云之间的间隙也越薄。云的垂直结构受季节和地域影响较大。单层云主要出现在冬季、海上,春、夏季云层较厚,秋、冬季云层较薄。双层云及多层云则主要出现在夏季、近海沿岸及岛屿地区;春、夏季云层较厚,冬季云层最薄;夏季平均云层之间间隙最大,冬季则最小。

## 5 云层频率月异常模态

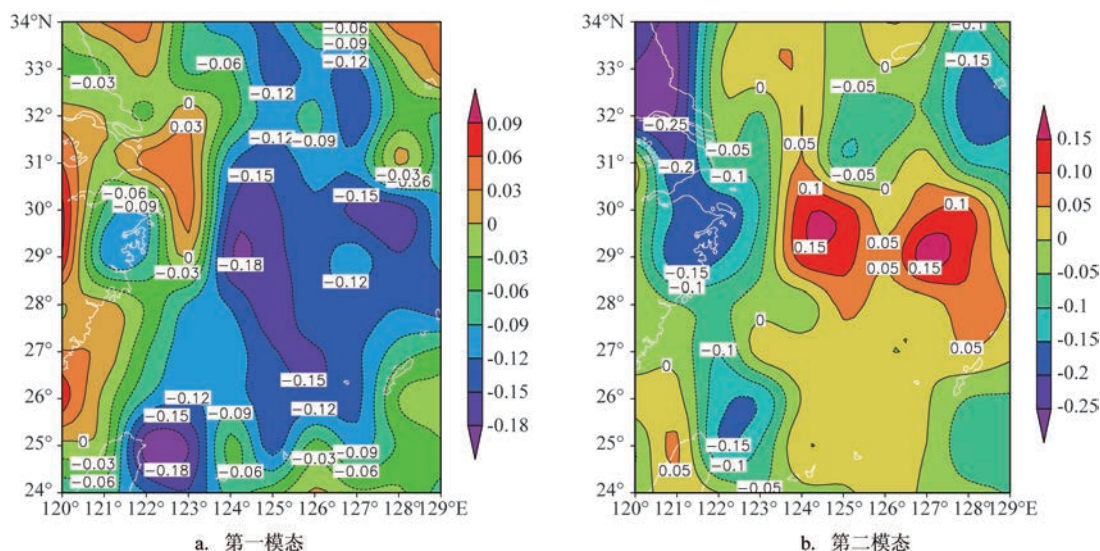
文中对2007—2010年48个月的各月白天单、双层云出现频率的异常场做了EOF分解,给出白天单、双层云出现频率月异常第一、二模态的空间场和相应的时间系数,这两个模态是该月异常的主要、次要模态,能够给出月异常的重要信息。这里之所以仅选白天,是因该节讨论的是云层出现频率月异常的情况,而非云层出现频率的日变化;加之对航空保障而言,白天的情形比夜间更重要(因白天的飞行要较夜间更多);此外也是受到本文篇幅限制所致。

### 5.1 单层云

白天单层云云层出现频率月异常第一、二模态的方差贡献分别为11%和10%,两者累计方差贡献为21%。这里第一、二模态方差贡献都不很大,由于EOF各模态具有正交性,各自独立,这说明造成该月异常的原因不够集中,呈现分散情况,这也表明云层出现频率月异常的复杂性;不过月异常第一、二模态反映了该异常的两种主要情况,故对其进行分析仍有重要意义。

#### 5.1.1 第一模态

图7a为白天单层云出现频率月异常第一模态





的空间场分布,由图可见,其正异常区主要分布在大陆及其近海,在长江口外有一个正异常中心。负异常出现在海上,从我国台湾岛东面经该图中部至(30°N,129°E)有一极值带,该极值带位于黑潮主流上;另一极值带位于该图中部至韩国济州岛的东、西两侧,该极值带位于对马暖流和黄海暖流的源头上。

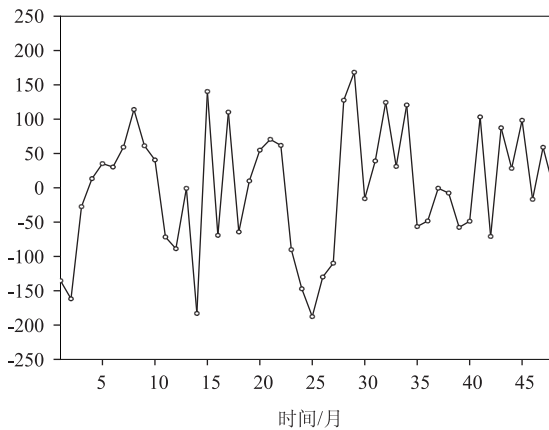
图8a给出了白天单层云月异常第一模态的时间系数,由该图可见,该时间系数有明显的月季变化。表1给出了2007—2010年这4年中各月略去小数部分的第一模态时间系数值,由该表可见,在这4年中,时间系数7、8、9这3个月(盛夏初秋)均为正值,而12、1、2(冬季)这3个月则均为负值;当时间系数为正值时,其月异常的空间分布与空间场相同,为负值时则相反。由此可见,该月异常具有12个月即1a的周期变化。为更清楚的揭示这一点,我们对图8a所示月异常的时间系数序列做了小波分析,其小波全谱图见图8b,该图上只有一个峰,12个月即1a的周期表现明显。

分析其原因,由于海陆下垫面性质的不同,冬季白天,海面的海温要明显高于气温,海洋向大气

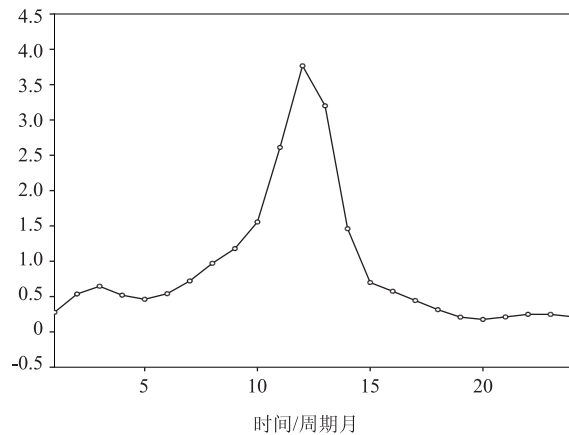
输送热量,在暖流处输送更多,这样在海域有明显上升运动,海上水汽也充沛,故造成海域中云出现频率增加,暖流处增加更多;冬季多层状云,故在海域单层云出现频率高是很自然的。此时在陆地,由于下垫面较海洋要冷,其单层云出现的频率要较海域低。换句话说,此时在海域有该频率的正异常,陆上则是负异常,其异常分布态势与该模态空间场的分布正相反,这表明此时时间系数应是负值,由表1可见,情况正是如此。在盛夏白天,因海温低于海面气温,大气向海洋输送热量;而此时陆上的地温要明显高于海域的海温,故此时陆上的上升运动明显比海上要高,且此时低层风由海洋吹向陆地,使陆上不缺水汽,故单层云的出现频率较海洋要高,其异常分布态势与该模态空间场的分布相同,此时时间系数应为正值,由表1知,情况也正如此。由上可知,白天单层云出现频率月异常的第一模态是年变化模态,其形成原因是因海陆下垫面性质不同,对太阳辐射的响应差异所致。

#### 5.1.2 第二模态

图7b为白天单层云出现频率月异常第二模态的空间场分布,由图可见,正异常区分布在28°~30°N



a. 时间系数(1—48分别代表2007年1月—2010年12月)



b. 该时间系数的小波全谱

图8 白天单层云月异常第一模态的时间系数以及该时间系数的小波全谱

表1 白天单层云月异常第一模态的时间系数

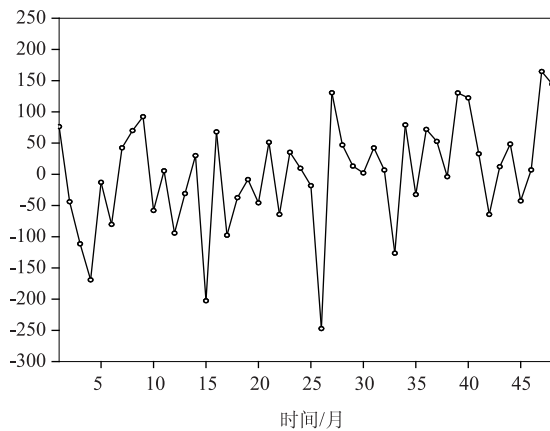
月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2007年	-135	-161	-27	13	35	30	59	114	61	40	-71	-88
2008年	-0	-183	140	-69	110	-64	10	54	70	61	-90	-147
2009年	-187	-129	-109	127	168	-15	39	124	31	120	-56	-48
2010年	-0	-7	-57	-48	103	-70	87	28	98	-16	58	-0

的海域,在此有两个大值中心;负异常区位于正异常区之北以及大陆、大陆近海和台湾岛近海。

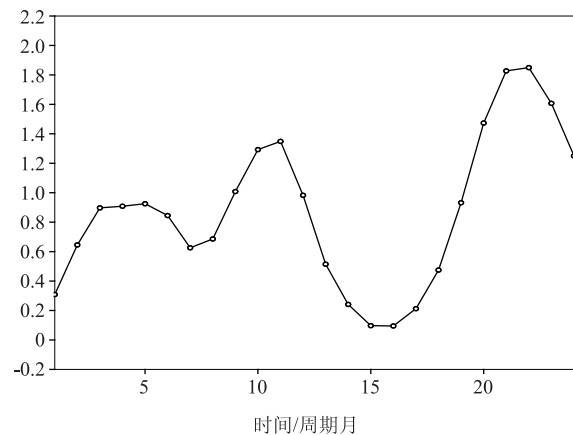
图9给出了白天单层云月异常第二模态的时间系数,由该图可见,该时间系数也有明显的月季变化,此外还有一个较明显的上升线性趋势。表2给出了2007—2010年这4a中各月略去小数部分的第二模态时间系数值。由表可见,在这4a中,时间系数在7—8、11—12月期间(盛夏、秋末冬初)多为正值(比率12/16),而冬季2月则多为负值(比率3/4)。同样当时间系数为正值时,该月异常的空间分布与空间场相同,为负值时则相反。由此可见,该月异常也有约12个月即准1a的周期,此外还有周期更短的变化。为更清楚的揭示该点,对图9月异常的时间系数序列也做了小波分析,其小波全谱图见图9b;在该图上小波全谱曲线呈3峰态势,其中第22个月周期的峰值最高,但其不可信,这是因所用资料只有48个月的缘故;11个月即准1a周期的峰高次之;此外还有峰较平缓而峰高更低的3—5个月的周期。

究其原因,冬季2月,500 hPa东亚大槽槽线位于130°E附近,槽底也最偏南,此时研究区域海域位

于槽后,云层的出现频率低;此时时间系数多为负值,故月异常与该模态的空间场分布相反,即图7b上的正值区单层云的出现频率偏低,负值区偏高。秋末冬初,东亚大槽槽底偏北,故在该海域31°N以南区域位于该槽底之南,西风平直,单层云出现频率也高,此时该月异常的分布与该模态的空间场相同,即在该模态正值区,单层云出现频率高,负值区则频率低。盛夏,500 hPa西太平洋副高很强,其脊线北跳至25°~30°N,7月份500 hPa气候平均图上588线位于长江口至日本四国岛;此时在西太平洋副高西进东退、南压北抬的小波动过程中,在该海域会形成西南季风与副高边缘的辐合带,水汽条件有利于对流云的形成,故云层出现频率高,单层云出现的频率也高,且月异常的分布与该模态的空间场也相同。因此第二模态月异常准一年的变化,反映了东亚大槽和西太平洋副高这两个重要系统对单层云出现频率的影响。由表2还可见,盛夏和秋末冬初两者月异常空间场相同,时间系数也大多为正值,且两者相隔3—5个月,这反映了该月异常有3、4、5个月即90 d、129 d、150 d的周期,而这正是大气低频变化即大气韵律的体现<sup>[19]</sup>。



a. 时间系数 (坐标说明同图8 a)



b. 该时间系数的小波全谱

图9 白天单层云月异常第二模态的时间系数以及该时间系数的小波全谱

表2 白天单层云月异常第二模态的时间系数

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2007年	76	-43	-111	-169	-12	-80	42	70	92	-57	5	-94
2008年	-30	30	-202	68	-97	-37	-8	-45	51	-64	35	9
2009年	-18	-247	130	47	13	2	42	6	-126	79	-32	71
2010年	52	-3	130	122	32	-64	12	48	-42	7	164	144



## 5.2 双层云

白天双层云云层出现频率月异常第一、二模态的方差贡献分别为10%和7%,两者累计方差贡献为17%,两个模态方差贡献也都不很大,其原因同单层云。

### 5.2.1 第一模态

图10a为白天双层云出现频率月异常第一模态的空间场分布,由图可见,其正异常区范围较负异常范围要小很多,仅在台湾岛东北方向的海上有两

块不大的正异常区,此外在济州岛北侧海上还有一小块正异常区;而负异常区则几乎覆盖了整个东海及其周边,强负异常区域位于长江口及其以东海域,并有3个负异常中心配合;另一个强负异常中心则位于该图右下方。

图11a给出了白天双层云月异常第一模态的时间系数,由图可见,该时间系数也有明显的月季变化。表3给出了2007—2010年这4a中各月略去小数部分的第一模态时间系数值。由表可见,在这4a中,时间系数8月、12月(盛夏、初冬)均为正值,而4

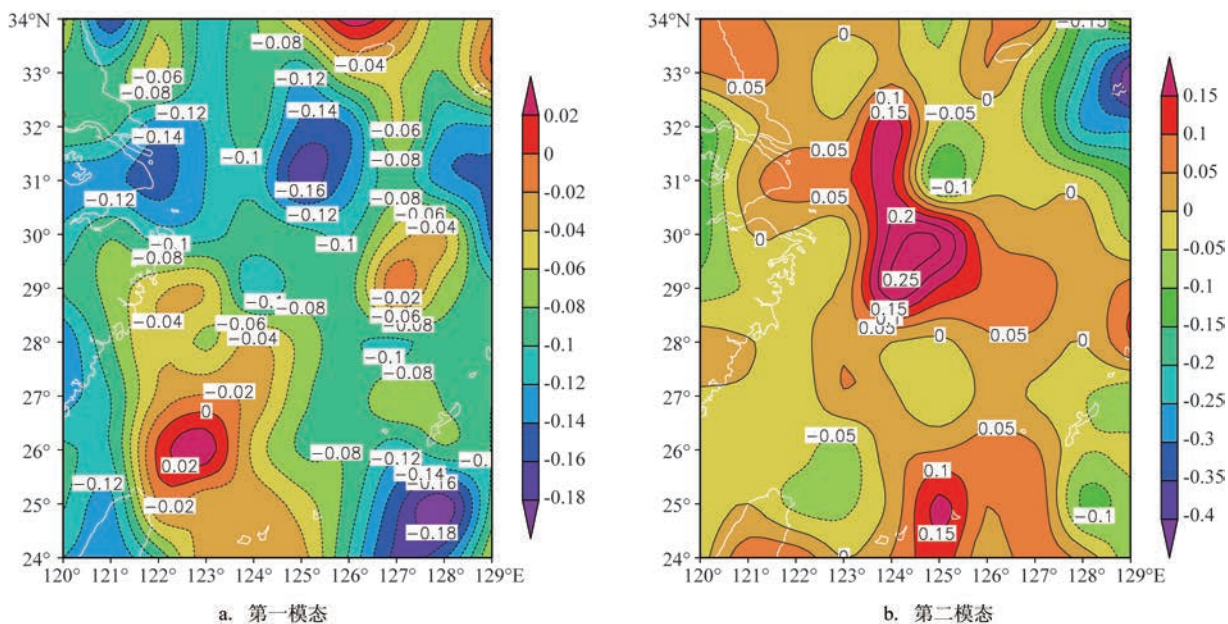


图10 白天双层云月异常空间场的各模态

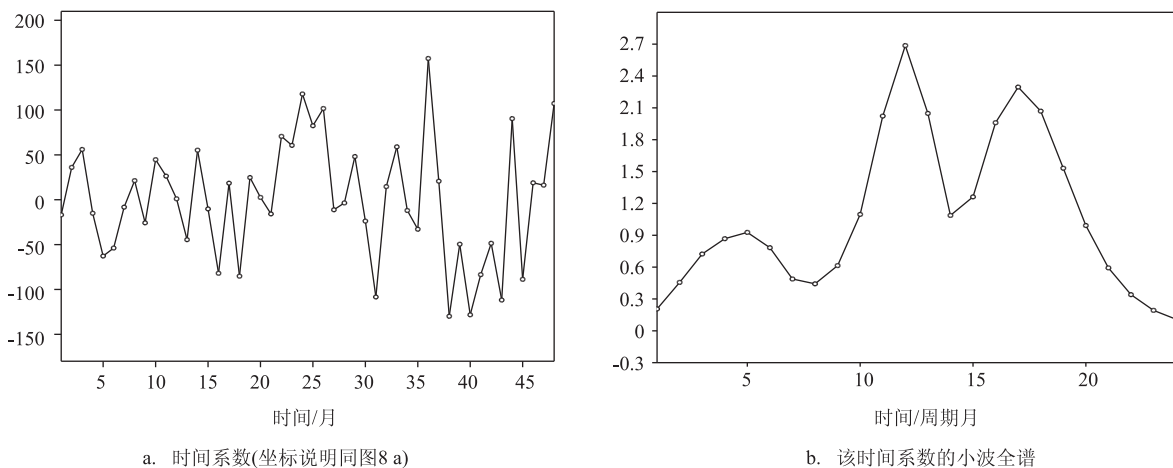


图11 白天双层云月异常第一模态的时间系数以及该时间系数的小波全谱

月、6月(仲春、初夏)则均为负值;当时间系数为正值时,其月异常的空间分布与该模态空间场相同,为负值时则相反。由此可见,该月异常同样具有12个月即1a的周期变化。为更清楚的揭示这一点,对图11a所示月异常的时间系数序列做了小波分析,其小波全谱图见图11b。从图上可以看出,小波全谱曲线呈3峰态势,其中12个月即1a周期的峰值最高;周期17个月的峰值次高,但可信度较低;此外还有峰较平缓峰高更低的约5个月的周期。

春季东海是我国总云量的大值区之一,且以低云为主<sup>[20]</sup>,这样双层云出现的频率也自然较高(因单纯的中云或单纯的高云呈双层云形态的机会不多);此时从双层云出现频率第一模态时间系数在这4年中春季4月份的情况看,其都为负值(见表3),这表明春季4月份异常的空间分布与该模态的空间场相反,即除台湾岛东北两个不大的区域以及济州岛北侧小块区域外,东海及其周边的绝大部分范围,双层云出现频率均偏高,这与文献[20]的结果也相一致。从仲秋到初冬(10—12月),由表3可见,这4a中此时该时间系数绝大多数为正值(比率10/12),此时东海及其周边水气含量少,气温也低,

云量较少,且对流云不宜生成,故除台湾岛东北两个小区域外,双层云出现的频率也低;至于台湾岛东北两个小区域的例外,可能是由于其处黑潮主流上的缘故,尚待进一步研究。而在此约5个月的月异常变化同样是大气低频变化韵律的反映<sup>[19]</sup>

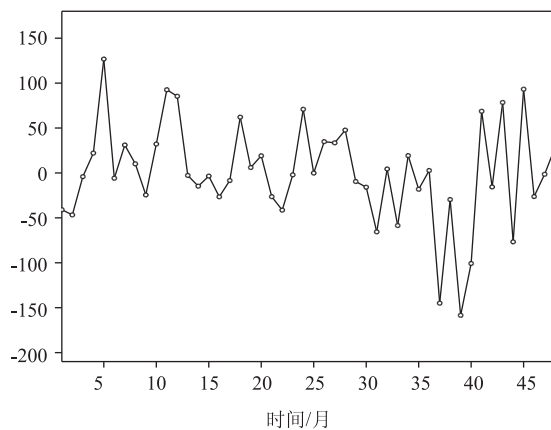
### 5.2.2 第二模态

图10b为白天双层云出现频率月异常第二模态的空间场分布,由图可见,正异常区大致位于黑潮主干以及对马暖流和黄海暖流的源头,总体呈南北带状分布,在该带中部有强正异常中心;负异常区则位于该正异常带的东西两侧,在该图东北角有强负异常中心。

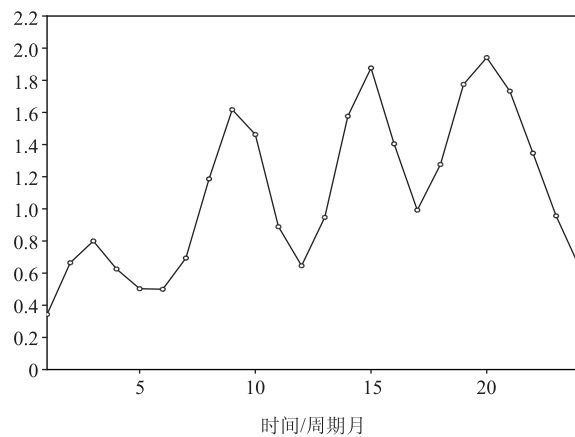
图12a给出了白天双层云月异常第二模态的时间系数,由该图可见,该时间系数同样有明显的月季变化。图12b给出了该模态时间系数序列的小波全谱曲线,图上,该曲线呈4峰态势,其中20个月周期的峰值最高,15个月周期的峰值次高,9个月周期的峰值又次之,此外还有峰值更低的3个月的周期。20个月的周期不可信,15个月的周期可信度较低。注意到12个月即1a的周期在此图上处于该曲线的低谷附近,这说明对此模态,月异常无12个月

表3 白天双层云月异常第一模态的时间系数

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2007年	-16	36	56	-15	-62	-53	-8	21	-25	44	26	1
2008年	-44	55	-10	-81	18	-85	24	2	-15	70	60	117
2009年	82	101	-11	-3	48	-23	-108	14	58	-11	-32	157
2010年	20	-129	-49	-128	-83	-48	-111	90	-88	18	16	107



a. 时间系数(坐标说明同图8a)



b. 该时间系数的小波全谱

图12 白天双层云月异常第二模态的时间系数以及该时间系数的小波全谱



的月季变化即年变化,这也是其与双层云第一模态以及前面单层云第一、二模态的不同之处。对该模态月异常9个月的周期变化,从空间场的分布看,可能与黑潮的相应变化有关,值得研究。

综合本节分析可知:云层频率月异常是明显和复杂的。单层云第一模态反映了海陆下垫面性质不同对太阳辐射响应的差异,且具有明显的年变化。单层云第二模态反映了东亚大槽和西太平洋副高的影响,而且也有准1 a的变化和3—5个月的月季变化,后者体现了大气低频变化韵律。双层云的第一模态表现为,在东海及其周边的绝大部分范围,春季双层云出现频率高,秋冬季则低;该频率也有明显的年变化以及5个月的月季变化,后者也体现了大气低频变化韵律。双层云第二模态空间场分布与黑潮有关,其月异常无年变化。

## 6 结语

本文利用2007—2010年CloudSat二级产品中的2B-GEOPROF和2B-GROPROF-Lidar数据,统计分析了东海海区及其周边范围内,分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的云垂直结构时空分布特征,并利用EOF和小波方法,分别对白天单层云和双层云出现频率月异常的主要模态做了分析,结果表明:

(1)无论任何季节、时次,云层的数目与云层出现的频率均成反比,即云层数越少则云层其出现频率越大;出现最多的是单层云,年平均出现频率在60%以上;其次是双层云,年平均出现频率在20%~30%之间;而出现三层云及以上的情况则很少;

(2)单层云主要出现在冬季,春秋季次之,夏季最少,白天各季节单层云主要出现在远海,夜间则以陆上偏多;双层云在夏季夜间出现频率高,在远海则最高,冬季反之;多层云主要出现在夏季,白天各季节主要出现在近海沿岸和岛屿地区,夜间则主要出现在海上,尤其以夏季夜间居多;

(3)单层云云层春、夏季较厚,秋、冬季较薄,双层云及多层云春、夏季云层较厚,冬季最薄;云层数越多,底层云底高越低,顶层云顶高越高,每层云的厚度越薄,每层云之间的间隙也越薄;

(4)年平均云底高单层云为3 000~4 000 m,云顶高为6 000~8 000 m,云厚约3 000 m,夜间比白

天稍厚;双层云为2 000 m左右,大陆、岛屿比海上偏厚,云顶高呈“南高北低”分布,南部海区可达13 000 m,北部仅9 500 m;三层云为1 000~2 000 m,夜间比白天偏薄,云顶高也呈“南高北低”分布,南部达14 000~15 000 m,而北部仅11 000 m;

(5)夏季双层云及多层云平均云层之间间隙最大,冬季则最小;双层云年平均云层间隙厚度呈“南厚北薄”分布,北部最薄处不足3 500 m,南部可达6 500 m;三层云云层间隙为2 500~4 000 m,夜间比白天略偏大;

(6)单层云出现频率月异常的第一模态反映了海陆下垫面性质不同对太阳辐射响应的差异,其具有非常明显的年变化;第二模态反映了东亚大槽和西太平洋副高的影响,其有准1 a的变化和3—5个月的月季变化,后者体现了大气低频变化韵律;

(7)双层云出现频率月异常的第一模态表现为,在东海及其周边的绝大部分范围,春季双层云出现频率高,秋冬季则低;该频率也有明显年变化,还有以及5个月的月季变化,后者也体现了大气低频变化韵律变化;第二模态空间场分布与黑潮有关,其月异常无年变化,但有9、15个月的韵律。

本文主要揭示了东海海区及其周边云层垂直分布的特征,对造成这些特征的物理原因,虽然做了一些解释和说明,但由于该问题的复杂性,所做仍有所欠缺,这也有待今后更深入的工作。

## 参考文献:

- [1] 刘瑞霞,刘玉洁,杜秉玉.中国气候特征的分析[J].应用气象学报,2004,15(4):468-476.
- [2] 陈超,郭晓军,邱晓斌,等.中国华北地区云垂直结构及云水含量卫星遥感研究[J].气象与环境学报,2015,31(5):159-164.
- [3] Sassen K, Wang Z E. Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of result[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(4): L04805, doi: 10.1029/2007GL032591.
- [4] Luo Y L, Zhang R H, Wang H. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between Eastern China and the Indian monsoon region using CloudSat/CALIPSO data[J]. Journal of Climate, 2009, 22(4): 1052-1064.
- [5] Welliver E A. Remote detection of cloud base heights using CloudSat and CALIPSO[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2009.
- [6] 王帅辉,韩志刚,姚志刚.基于CloudSat和ISCCP资料的中国及周边地区云量分布的对比分析[J].大气科学,2010,34(4):767-779.

- [7] 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚, 等. 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, 2010, 30(1): 38-52.
- [8] 王胜杰, 何文英, 陈洪滨, 等. 利用CloudSat资料分析青藏高原、高原南坡及南亚季风区云高度的统计特征量[J]. 高原气象, 2010, 29(1): 1-9.
- [9] Matrosov S Y. CloudSat measurements of landfalling hurricanes Gustav and Ike (2008) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D1): D01203, doi: 10.1029/2010JD014506.
- [10] 汪会, 罗亚丽, 张人禾. 用CloudSat/CALIPSO资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征[J]. 大气科学, 2011, 35(6): 1117-1131.
- [11] 钟水新, 王东海, 张人禾, 等. 基于CloudSat资料的冷涡对流云带垂直结构特征[J]. 应用气象学报, 2011, 22(3): 257-264.
- [12] 尚博, 周毓荃, 刘建朝, 等. 基于Cloudsat的降水云和非降水云垂直特征[J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 1-9.
- [13] 彭杰, 张华, 沈新勇. 东亚地区云垂直结构的CloudSat卫星观测研究[J]. 大气科学, 2013, 37(1): 91-100.
- [14] 张华, 彭杰, 荆现文, 等. 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, 2013, 43(4): 523-535.
- [15] 张晓, 段克勤, 石培宏. 基于CloudSat卫星资料分析青藏高原东部夏季云的垂直结构[J]. 大气科学, 2015, 39(6): 1073-1080.
- [16] 安洁. 东海海区各季节昼夜云的特征分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(4): 76-83.
- [17] 杨爽. 低云在不同季节对东海黑潮海洋锋的响应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [18] 张苏平, 王媛, 衣立, 等. 一次层积云发展过程对黑潮延伸体海洋锋强迫的响应研究——观测与机制分析[J]. 大气科学, 2017, 41(2): 227-235.
- [19] 赵俊虎, 杨杰, 龚志强, 等. 欧亚中高纬阻塞高压关键区高度场动力-统计跨季度预测实验[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 565-573.
- [20] 段皎, 刘煜. 近20年中国地区云量变化趋势[J]. 气象科技, 2011, 39(3): 280-288.

## Characteristics of cloud stucture based on CloudSat data in the East China Sea area

AN Jie

(Air Force Academy, Beijing 100085 China)

**Abstract:** Based on 2B-GEOPROF and 2B-GROPROF-Lidar data of CloudSat from 2007 to 2010, the spatial and temporal distribution characteristics of cloud layers frequency, thickness and rifts in clouds in the East China Sea Area under daily and seasonal time scale are analyzed using the EOF decomposition method. The results show that the numbers of clouds are inversely proportional to the clouds occurrence frequency at both seasonal and daily scale. The highest frequency of occurrence is a single layer cloud, followed by double layer cloud and four layer clouds. The more cloud numbers, the lower cloud base height. The higher cloud top height, the thinner the thickness of each cloud layer and layer of cloud gap. The vertical structure of cloud has an obvious seasonal and spatial features. The first and second mode of single layer cloud occurrence frequency reveals the different impacts of land and sea underlying surface, and the influence of East Asia major trough and west pacific subtropical high with annual variation features, respectively. The first mode of double layer of cloud occurrence frequency indicates the highest frequency of occurrence in spring and the lowest frequency in autumn and winter with annual variation features.

**Key words:** the East China Sea Aera; CloudSat data; cloud layers frequency; cloud thickness; rifts in clouds; EOF decomposition