

黄土高原地区云垂直结构的激光雷达遥感研究

周天,黄忠伟,黄建平,李积明,闭建荣,张武

(兰州大学大气科学学院,半干旱气候变化教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:获知云垂直分布的信息对全球气候变化和人工增雨作业具有重要研究意义。利用兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)地基双波段偏振激光雷达于2009年12月至2011年11月的观测资料统计了云底/云顶高度、云几何厚度和单层云、多层云在不同季节的垂直分布情况,并对所有高度范围云和6 km以上云的色比和退偏比分布进行分析。结果表明,SACOL站地区春夏秋冬季节分布在0~2 km的低云所占比例超过34.9%,不透明云出现的频率高达33.5%以上;而冬季主要以4~6 km的云分布居多(35.1%)且不透明云较少(7.8%);所有高度云的色比呈单峰分布且峰值集中在1.8~2.6范围内;所有高度云的退偏比呈双峰结构,结合6 km以上云退偏比的单峰结构可将0.2~0.25区间的退偏比值作为区分水相云和冰相云的判断依据。此外,边界层的发展对云垂直结构的影响使边界层云的云底高度随边界层高度的升高而升高。

关键词:激光雷达;云的垂直结构;色比;偏振

文章编号:1006-7639(2013)-02-0246-08 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0246

中图分类号:P407.5

文献标识码:A

引言

云在全球气候变化中有着非常重要的作用,并且又是最不确定的影响因子之一。它通过2个方面影响地球气候:一方面能够调控太阳短波辐射加热率、潜热加热率和长波辐射冷却率的垂直及水平分布影响地球的辐射收支平衡;另一方面能够以降水的形式将蒸发的水分返回到地表而改变湿度的传输和分布^[1-4]。云作为当今地球科学领域的一个研究热点,研究其属性的变化特征对更好地理解云如何影响地—气系统是非常必要的。

云垂直结构的变化是通过改变大气加热/冷却率而影响大气环流的一个重要特征^[5]。利用环流模式和卫星数据研究气候变化过程中,云垂直形态及其对辐射收支的影响存在很大的不确定性^[6]。黄建平、Minnis^[6-8]等结合卫星的可见光和红外辐射与地面微波辐射计,发展一套多层云检测系统,并研究表明由于云重叠的存在导致卫星云遥感中云微物理特性(如冰水路径分布、云高、光学厚度、云相及粒径大小)很难确定^[9-10]。李积明、王帅辉^[11-12]

等利用CALIPSO星载激光雷达和云雷达CloudSat统计了云垂直分布在东亚地区典型区域的季节变化特征,同时对单层云和多层云的全球分布及其辐射效应进行了详细的讨论^[13]。目前,尽管卫星遥感可以较准确地获得大气层顶的辐射收支,地表和大气层中的辐射通量,还可以利用大气环流模式研究云的辐射效应,但这些都是基于不同的云重叠假设方案或单层云假设^[14-17]。因此,云垂直分布的真实结构对于模式中云的准确描述和卫星对云的反演非常重要。

作为一种先进的主动遥感仪器,激光雷达具有高时间、空间分辨率和测量精度等优势,已成为探测云光学物理参数时空分布的重要手段^[18]。地基激光雷达的优势还主要体现在能够定点长期的连续观测。在过去的十多年,我国学者在不同地区已开展了利用激光雷达对云和气溶胶的探测实验。邱金桓^[19]等利用多波长激光雷达对北京地区对流层中上部云和气溶胶进行了探测,钟志庆^[20]等利用便携式米散射雷达对卷云进行探测并获得卷云的厚度及

收稿日期:2012-09-11;改回日期:2013-01-05

基金项目:国家自然科学基金(41205014)、国家重大科学研究计划(2012CB955301)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2013-106)共同资助

作者简介:周天(1986-),男,甘肃兰州人,博士研究生,研究方向为激光雷达大气遥感。E-mail:zhoutian0626@gmail.com

其峰值消光系数,刘东等在合肥地区开展了一系列利用激光雷达探测卷云和气溶胶的实验^[21-23],张文煜等对兰州地区的卷云和气溶胶的光学特性和辐射特性进行了研究^[24-27]。

本文利用 SACOL 站地基激光雷达的遥感资料对该地区云的垂直分布和光学统计特征进行分析,以获得对该地区云垂直分布的初步认识,为改进区域气候模式中该地区云的准确描述提供科学依据。

1 站点与观测仪器

兰州大学半干旱气候与环境观测站(Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University, 简称“SACOL”,下同)建成于2006年,位于我国西北部黄土高原(35.946°N, 104.137°E),海拔高度约1965.8 m,下垫面为典型的黄土高原地貌,塬面梁峁基本为原生植被,属温带半干旱气候^[28-29]。

L2S-SM II型偏振激光雷达(如图1所示)于2009年10月开始在SACOL站进行长期的云和气溶胶气候观测。该雷达由激光源、信号接收系统和数据记录装置3部分组成。雷达系统采用闪光灯泵Nd:YAG激光器。2束激光(532 nm和1064 nm)经过光束扩束器校准后被同时向大气中发射,光束与大气中颗粒或大气分子相互作用之后,回波信号由直径为20 cm的卡塞格林望远镜接收,其中532 nm回波信号的垂直分量和水平分量分别被2个探测器接收从而开展偏振探测。后向散射信号的延迟时间确定了粒子的高度,后向散射回波信号的强度与对应高度大气颗粒或大气分子的浓度成正比。该系统的垂直

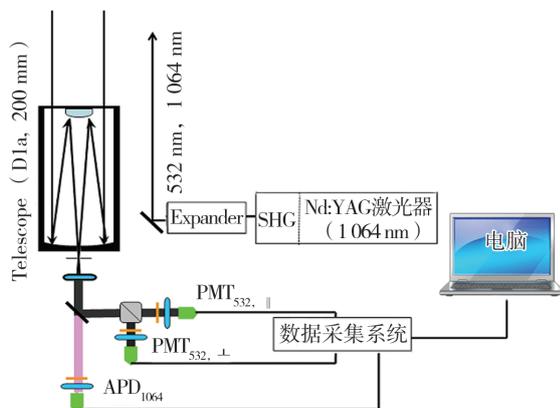


图1 SACOL站L2S-SM-II型双波段偏振激光雷达系统结构

Fig. 1 L2S-SM-II dual-wavelength polarization lidar system at SACOL

分辨率为6 m,时间采样率为15 min。本文利用该雷达系统2009年12月至2011年11月共636 d的有效观测资料。

2 反演方法

目前利用激光雷达资料反演云高度的方法有几种。Klett^[30]方法通过分析气溶胶消光系数的特点确定云层高度,但该方法在计算消光系数时需要预先假设雷达比,不确定性较大;陈臻懿、迟如利和王宏波^[21,31-32]等利用微分法反演云底云顶高度;Pal、Plat和韩道文等^[33-35]采用阈值法得到云底云顶高度;也有的方法是取决于云的类型^[36]。虽然上述方法在信噪比足够高的情况下能得到很好的结果,但是只能用于少量个例研究,无法满足批量自动反演的需求。Brooks、Morille和Baars^[37-39]等利用的连续小波变换方法,具有无需假设激光雷达比、对信噪比没有足够高要求的情况下可批量自动反演等优势。因此,本文基于连续小波变换方法反演云的高度,具体步骤如下:(1)以二阶高斯函数为小波基,选取合适的伸缩比例,确定连续小波变换后每条廓线中的极大值;(2)设定阈值,确定每一条回波信号廓线中特征层底、层顶和峰值的高度;(3)结合色比和退偏比信息,在特征层的基础上区分云和气溶胶层;(4)计算云顶处信噪比判断激光能否穿透。信噪比大于阈值时认为激光束能穿过云层;反之,激光完全衰减。图2为SACOL站2010年1月20日的衰减后向散射系数的时间—高度图,其中红点表示反演得到的云底云顶高度。

3 结果与讨论

3.1 云垂直结构分布特征

根据本文所用的云底云顶高度判别方法,同一条廓线中可能会出现单个或多个云底高度的情况,累积所有的云底高度得到云底高度分布的样点。在激光束无法穿透光学厚云的情况,得不到真实的云顶高度,所以不予考虑这类云的云顶高度和云几何厚度。单层云和多层云的统计与云底、云顶及云几何厚度的统计不同,只考虑每条廓线中判断得到的云层数,同时将激光无法穿透的云视为不确定单层云或多层云的情况。同一季节内不同高度、不同几何厚度或单层多层云所占样点数与该季节总样点数的比值视为出现频率。云底云顶高度、云几何厚度和单层云多层云在不同季节的出现频率详见表1。

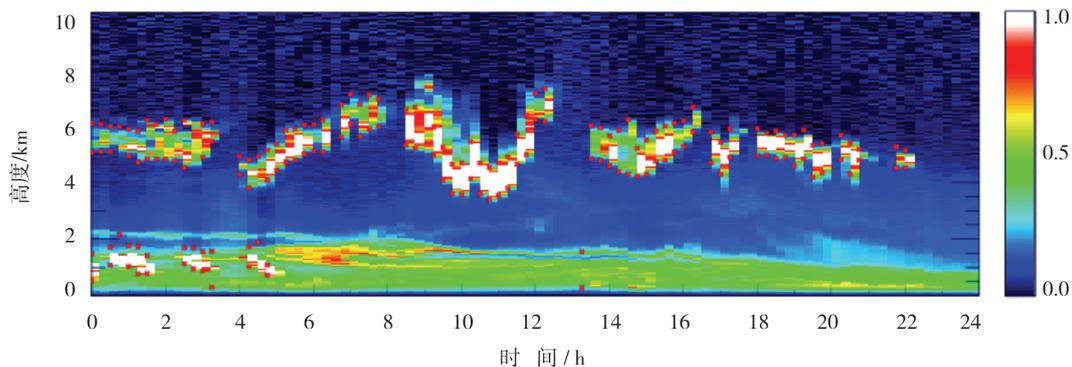


图2 SACOL 站激光雷达衰减后向散射系数的时间—高度图
(其中红点表示云底和云顶高度)

Fig. 2 Time - height plot of attenuated backscattering coefficient derived from lidar at SACOL (The red dots indicate the base and top height of cloud)

表1 2009 年 12 月至 2011 年 11 月 SACOL 站的云底、云顶、
云几何厚度及单层云、多层云分布频率

Tab.1 The frequency of cloud base, cloud top, cloud geometric thickness and single layer cloud, multi-layer cloud at SACOL from Dec. 2009 to Nov. 2011

单位/km	0~2	2~4	4~6	6~8	>8	<0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	>2			
春季	云底	47.2	23.9	13.7	10.6	4.5					单层	63.6	
	云顶	16.7	29.8	23.4	15.7	14.4					多层	2.9	
	云厚						5.1	41.5	49.9	2.8	0.7	不确定	33.5
夏季	云底	34.9	35.2	18.9	7.6	3.3					单层	42.8	
	云顶	10.7	24.0	32.8	17.2	15.3					多层	3.5	
	云厚						11.3	43.3	40.9	2.9	1.5	不确定	53.7
秋季	云底	56.8	20.6	13.4	8.1	1.1					单层	42.7	
	云顶	15.7	27.1	26.6	22.5	8.1					多层	2.8	
	云厚						10.1	43.3	42.4	3.2	1.1	不确定	54.5
冬季	云底	24.5	21.6	35.1	17.5	1.2					单层	87.2	
	云顶	12.2	12.9	35.7	31.9	7.3					多层	4.9	
	云厚						2.0	37.5	55.2	3.5	1.4	不确定	7.8

根据上述统计方法得到云底高度的样点数在春夏秋冬季节分别为 5 636、6 691、6 133 和 5 115。如图 3 所示,SACOL 站在春季和秋季分别有 47.2% 和 56.8% 的云出现在 2 km 范围。夏季的云在 4 km 范围内出现的频率高达 70.2%。春季、夏季和秋季主要以低云分布为主,并且随高度的增加,云层出现的频率逐渐减小。虽然冬季的云层在 0~2 km 和 2~4 km 的分布分别为 24.5% 和 21.6%,甚至在 2~4 km 范围内与秋季和春季很接近,但更为明显的是冬季云层有 35.1% 分布在 4~6 km 范围。4 个季节云底高度分布显示 8 km 以上云的分布都在 5% 以内,这与下文将要讨论的云顶高度和单层云和多层云的分布有一定关系。4 个季节云底高度平均值分别

为:3.0、3.2、2.4 和 4.0 km,说明 SACOL 站地区云底高度主要分布在 4 km 以下。

雷达激光束在穿过光学厚云之前被完全衰减而无法得到准确的云顶信息。当云顶处的信噪比 >0.3 时,激光束可以穿过云层;反之,激光束在穿过云层之前被完全衰减。在云底样点数的基础上判断激光束是否穿透的情况,最终得到春夏秋冬季节云顶的样点数分别为 3 768、3 148、2 852 和 4 720。与相同季节的云底高度样点数对比,春夏秋冬季节云顶样点数减少 33%~54%,而冬季只减少约 7%。从而可以得出春夏秋 3 个季节中激光束无法穿透的云比例很大,这也导致图 3 中 0~2 km 云底高度分布多而图 4 中 0~2 km 云顶高度分布反而少的原因。

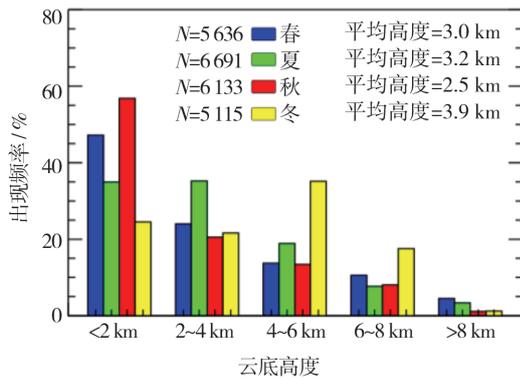


图 3 2009 年 12 月至 2011 年 11 月 SACOL 站的云底高度频率分布

Fig. 3 The frequency of cloud base height at SACOL from Dec. 2009 to Nov. 2011

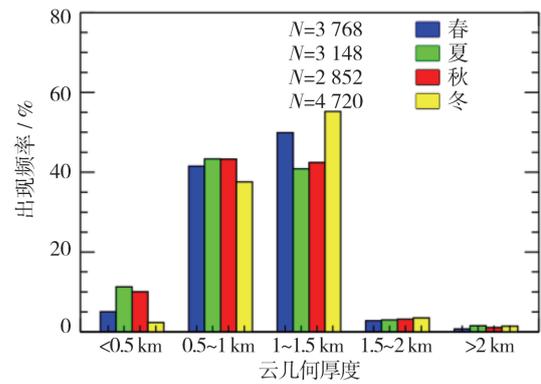


图 5 2009 年 12 月至 2011 年 11 月 SACOL 站的云几何厚度频率分布

Fig. 5 The frequency of cloud geometry thickness at SACOL from Dec. 2009 to Nov. 2011

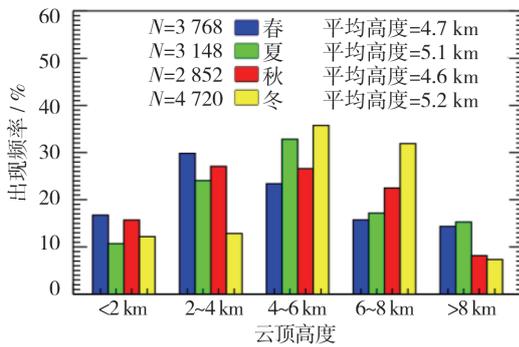


图 4 2009 年 12 月至 2011 年 11 月 SACOL 站的云顶高度频率分布

Fig. 4 The frequency of cloud top height at SACOL from Dec. 2009 to Nov. 2011

如图 4 所示,春季和夏季的云顶高度主要分布在以 2~6 km 范围内;秋季的分布在 8 km 以下相对平缓,尤其在 2~8 km 范围内所占比例相近,各季节的云顶平均高度为:4.7 km、5.1 km、4.6 km 和 5.2 km。从上述结果中可以得到冬季云层分布较高且光学厚云较少,同样其云顶高度分布也主要集中在 4~8 km。

图 5 给出云几何厚度的分布情况,云几何厚度的样点数与云顶高度的样点数相同。夏季和秋季云几何厚度在不同高度范围表现比较一致。当云几何厚度在 1 km 范围内时,其分布表现为夏季和秋季高于春季和冬季,尤其在 500 m 范围内是春冬季的近 2 倍;反之,厚度在 1~1.5 km 时,春冬季明显高于夏秋季。4 个季节的云几何厚度分布在 >1.5 km 时表现为基本相近。从云几何厚度的分布特征可以说明利用激光雷达探测到 SACOL 站地区云的厚度主要集中在 0.5~1.5 km 范围内,且春冬季云厚分布

在 500 m 范围偏少,随着云厚的增加,春冬季云厚分布逐渐多于夏秋季。当然,由于地基激光雷达的局限性,该结论有可能被高估。

全球云层重叠的发生频率大约为 40%,其范围从沙漠和多山地区的 10% 到热带对流地区的 80%^[40],而云层重叠发生频率的变化在一定程度上能够反映出受复杂区域地形增强的惯性重力波活动对当地云形成的不规则的影响^[41]。如上所述,光学厚度大的云会导致无法对云层上方的大气垂直结构,尤其是上层是否还存在云进行确认,因此在本文中这类云视为不透明云。不透明云的统计有助于更好地理解地面激光雷达云统计结果。一方面有助于认识雷达在探测过程中识别单层云或多层云时导致的不确定性;另一方面,不透明云通常是光学厚云,统计云层的不确定性结果从另一个角度反映出 SACOL 站地区光学厚云的分布情况。

在反演多层云时设置云层出现的数目最多为 3 层,并且将双层云和 3 层云视作多层云情况。

同时,将所有识别出云的廓线数作为样本量,通过单层和多层云的判断分别得到单层云、多层云和不确定层数情况的样本量为 12 839、8 794 和 788。如图 6 所示,4 个季节中确定的单层云和多层云的比例相差悬殊,单层云出现频率都在 40% 以上,而多层云出现频率不到 5%。根据上文所述,因为春夏秋 3 个季节的不透明云多而冬季少,所以导致此处不能确定云层数的比例也高。相比夏季和秋季,冬季中不能确定云层数的频率远远小于单层云出现的频率。

3.2 云光学特性的统计特征

色比对散射层中粒子的形状、方向和大小非常敏感。色比描述的是目标介质散射光学特性的谱变

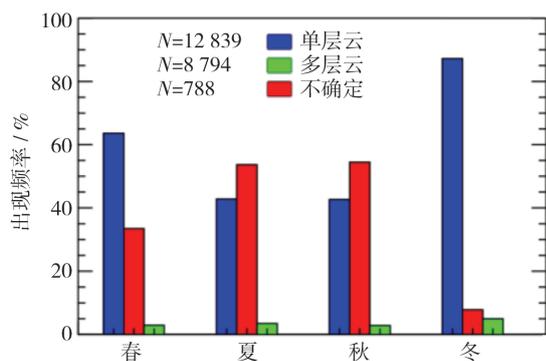


图6 2009年12月至2011年11月
SACOL站的单层云和多层云频率分布

Fig. 6 The frequency of single - and multi - layer
cloud at SACOL from Dec. 2009 to Nov. 2011

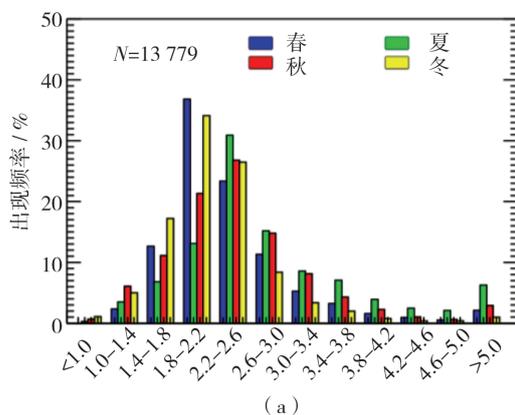
化,可区分不同种类云以及云和气溶胶。同时,色比反映粒子尺度的大小,值越大,对应的粒子越大;反之,粒子越小。

本文将色比定义为 1 064 nm 后向散射强度与 532 nm 后向散射强度的比值,表达如(1)式:

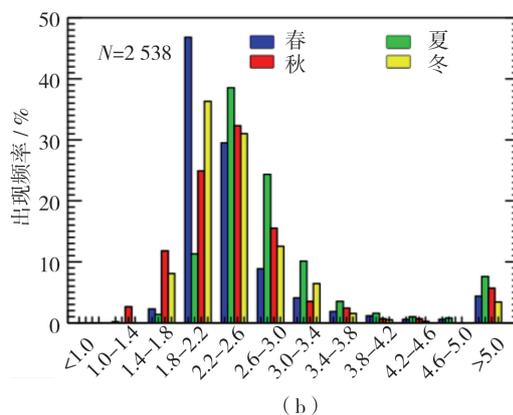
$$\chi(r) = p_{1064\text{nm}}(r)/p_{532\text{nm}}(r) \quad (1)$$

其中后向散射强度表示为:

$$p_{\lambda}(r) = C_{\lambda}\beta_{\lambda}(r)T(r) \quad (2)$$



(a)



(b)

图7 SACOL站激光雷达探测的云色比分布

(a)为所有高度范围内的云,(b)为云底高度6 km以上的云

Fig. 7 The frequency of cloud color ratio observed by SACOL
lidar for all cloud (a) and only those cloud base above 6 km (b)

退偏比与粒子形状有很密切的关系,粒子形状越接近球形,退偏比越趋近于0,而当退偏比越趋于1说明粒子形状的非球形程度越高。因此,很多研究工作^[43-44]将退偏比的大小作为区分云和气溶胶、水

由于 1 064 nm 和 532 nm 波段的雷达系统常数不同,所以对应色比的分布值大小与一些研究中^[42]的分布不同。

关于云色比的研究相对较少,且主要集中于卷云色比的研究方面。为更好的理解不同高度云色比分布,在云顶高度分布和云几何厚度分布的基础上用对应的云底云顶之间色比的平均值表示该样点处的色比。根据刘瑞金^[26]对 SACOL 站地区卷云的研究,将色比的分布分为 2 部分:所有高度的云和 6 km 以上的云。去除缺省值得到 2 部分样点数为 13 779 和 2 538。图 7a 给出,在不同季节所有高度范围云的色比峰值出现在 1.8 ~ 2.6 之间。随着色比比值的不断增大,夏秋 2 个季节相比春冬季节的分布变的越来越突出。其中春冬 2 个季节的峰值出现在 1.8 ~ 2.2 的范围,而夏秋 2 个季节的峰值出现在 2.2 ~ 2.6 范围。4 个季节的分布在峰值右侧快速减小。图 7b 中给出,6 km 以上云的色比分布和所有高度范围云色比分布相近。秋季在 1.0 ~ 1.4 范围内分布较大,其他 3 个季节色比的分布在该区间几乎为 0。尽管到目前为止,还没有比较好的研究结果能够将色比和粒子谱分布有效的建立关系,如果近似用色比大小来等效衡量云滴粒子谱分布,则本文的统计结果给出了 SACOL 站不同季节不同高度范围云滴粒子谱分布的变化规律。需要说明的是,部分色比 > 5.0 的值,主要原因是由于信噪比较低造成的。

相云与冰相云以及气溶胶组成与类型的判断标准。也有一些研究^[45-46]是关于冰云退偏比和雷达比或退偏比和多次散射之间的关系。退偏比是后向散射信号的垂直分量与水平分量的比值,表达式如下:

$$\delta(r) = p_{532,\perp}(r) / p_{532,\parallel}(r) \quad (3)$$

退偏比是同一波段的不同偏振组分的比值,通过校正确保 2 个偏振组分通道有着相同的校正系数。同样,对相应云底云顶之间的退偏比取平均,除去缺省值后得到所有高度云和云底高度 6 km 以上云的样点数分别为 14 366 和 2 930。图 8a 是所有高度范围的退偏比分布,其中春季和秋季呈明显的双峰结构,且双峰峰值大小相接近。夏季和冬季的双峰结构不够明显,夏季的退偏比峰值主要出现在低退偏比范围,而冬季则出现在高退偏比范围。在低退偏比区间,春季的分布少,夏秋分布多;高退偏比区间,又呈现出相反的分布。结合上文云底云顶高度的分布结果,可以得出由于夏秋 2 个季节的

低云较多,而低云又以液相为主。液相的散射介质接近于球形,故退偏比小。因此,该结果中夏秋 2 个季节云退偏比主要分布在 0 ~ 0.1 区间。冬季由于出现的高云较多,冰云居多,因此该季节退偏比的峰值主要集中在 0.35 ~ 0.45 之间;导致春季云退偏比呈现出双峰分布存在 2 方面的原因:一方面春季出现的低云较多,且以液相为主,导致出现低退偏比峰值;另一方面,除了冰云导致的退偏比较高以外,由于 SACOL 站所处的地理环境属于半干旱地区,该区域在春季受沙尘气溶胶的影响很大,沙尘气溶胶和云混合后使云的光学性质发生变化^[47-48],从而认为这是导致春季退偏比峰值出现在高退偏比区间的一种可能原因。图 8b 给出 6 km 以上云退偏比的分布,其主要表现为冰相云的特征。

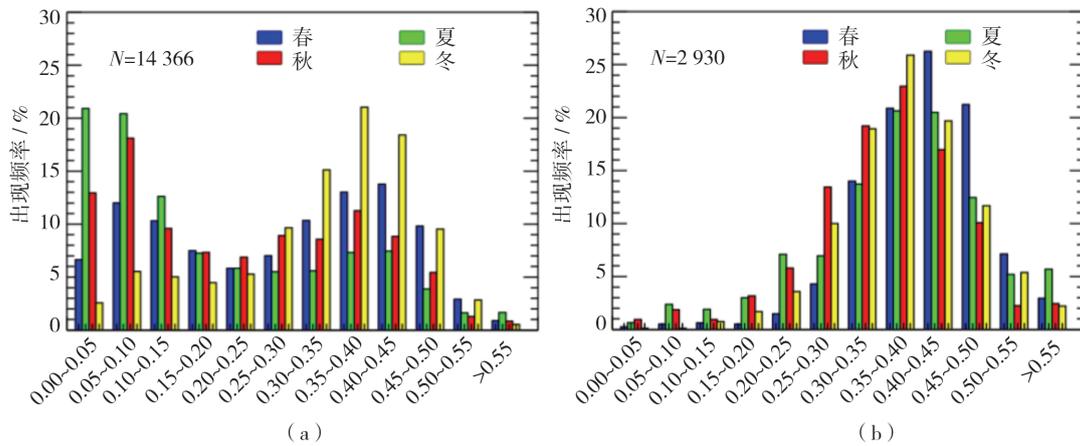


图 8 SACOL 站激光雷达探测的退偏比分布

(a) 所有高度范围内的云, (b) 云底高度 6 km 以上的云

Fig. 8 The frequency of cloud depolarization ratio observed by SACOL lidar for all cloud (a) and only those cloud base above 6 km (b)

4 个季节云退偏比的整体分布表现为双峰结构,其中对应退偏比小的峰代表液相云退偏比的分布,而退偏比大的峰代表冰相云的退偏比分布。因此,0.2 ~ 0.25 范围内的退偏比值可以近似视为识别液相云和冰相云的判断依据,而该结果与路小梅等^[49]研究结果一致。由于本文所用的地基激光雷达的望远镜观测视场小且对云的穿透能力有限,因此,本文对多次散射影响不做考虑。

3.3 边界层云云底高度与边界层高度的关系

为更好地理解边界层云在云垂直分布中的变化特征,研究晴空积云的云底高度与对流边界层高度之间的关系。根据 Stull^[50]对边界层云产生机制和形态学分类的描述挑选出 12 个晴空积云个例共 35 个样点。利用连续小波变换方法得到对流边界层的高度。图 9 所示,云底高度和边界层高度都集中在

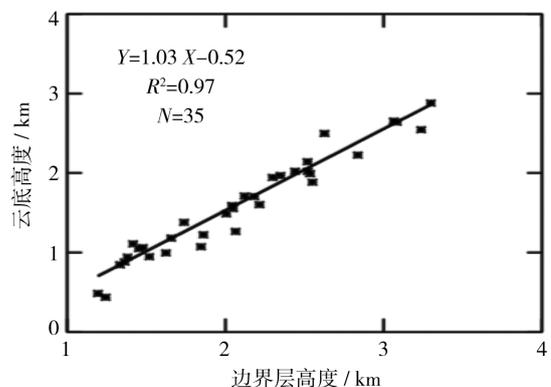


图 9 边界层高度与云底高度之间的关系

Fig. 9 Relationship between boundary layer height and cloud base height

4 km 范围,二者相关性达到 0.97,从而得出边界层云底高度随对流边界层高度的升高而升高。此外,图中样点分布较散的部分原因在于:一是云底高度与形成云的空气团的性质有关,因而云底高度会随着空气团性质的变化而变化;二是非均匀下垫面和复杂下垫面会造成大气边界层结构和运动状态在时空分布的重大差异^[51]。

4 结 论

(1) SACOL 站地区春夏秋冬季节分布在 0~2 km 的低云所占比例大,该高度范围的云以液相为主,大量的不透明云使激光束穿透云层前被完全衰减;由于冬季的云主要分布在 4 km 以上且出现的不透明云少,使得对冬季单层云和多层云的理解更加准确。利用地基激光雷达手段统计得到该地区云的几何厚度主要集中在 0.5~1.5 km。

(2) 虽然不同季节中所有高度范围云和云底高度 6 km 以上云的色比分布相似,但是云粒子谱在不同季节的变化使色比峰值的分布不同。尽管还没有很好的方法能够直接将云粒子谱与色比分布建立关系,但是从色比依然能够反映出一定的谱分布规律。所有高度范围云的退偏比都呈现双峰分布,除春季的双峰峰值较接近外,其他 3 个季节的双峰都呈现出一大一小的分布。春季是沙尘天气多发季节, SACOL 站地区的云受沙尘影响后其光学特性发生变化是可能导致春季退偏比在高值区出现峰值的原因;夏秋季低云多且呈液相,所以该季节的退偏比在低值区出现峰值;冬季主要以较高的云为主,尽管有混合相的云存在,但主要以冰相为主,所以退偏比在高值区出现峰值。结合云底高度 6 km 以上云退偏比的分布,可以将 0.2~0.25 范围内的退偏比值作为地基激光雷达识别冰相云和水相云的判据。

(3) SACOL 站地区边界层云的云底高度和边界层高度存在很强的线性相关,相关系数达 0.97。边界层云的云底高度随着边界层高度的增加而增加,说明对流边界层的发展对于云垂直分布结构也有非常重要的影响。

参考文献:

[1] 黄建平,何敏,阎红如,等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. 大气科学,2010,34(3):548-558.

[2] 陈勇航,黄建平,王天河,等. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系[J]. 应用气象学报,2005,16(6):717-727.

[3] 张逸轩,庞朝云,李照荣,等. 祁连山区一次非降水层状云的微物理结构探测分析[J]. 干旱气象,2008,26(4):41-45.

[4] 张强,王胜. 关于干旱和半干旱区路面水分过程的研究[J]. 干旱气象,2007,25(2):1-4.

[5] Randall D A, Harshvardhan, Dalich D A. Interactions Among Radiation, Convection, and Large-Scale Dynamics in A General Circulation Model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989,46:1943-1970.

[6] Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. Advanced Retrievals of Multi-layered Cloud Properties using Multispectral Measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110, D15S18, doi: 10.1029/2004JD005101.

[7] Minnis P, Sunny S M, Chen Y, et al. Detection and Retrieval of Multi-Layered Cloud Properties using Satellite Data. SPIE Europe International Symposium on Remote Sensing, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere X [C]. Bruges, Belgium, 2005. 19-22.

[8] Minnis P, Huang J P, Lin B, et al. Ice Cloud Properties in Ice-over-Water Cloud Aystems using Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Visible and Infrared Scanner and TRMM Microwave Imager Data [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112, D06206, doi: 10.1019/2006JD007626.

[9] Huang J P. Analysis of Ice Water Path Retrieval Errors over Tropical Ocean [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006,23(2):165-180.

[10] Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. Determination of Ice Water Path in Ice-over-Water Cloud System using Combined MODIS and AMSR-E Measurements [J]. Geophysical Research Letters, 2006(33):L21801, doi:10.1029/2006GL027038,2006.

[11] 李积明,黄建平,衣育红,等. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征 [J]. 大气科学,2009,33(4):698-707.

[12] 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.

[13] Li J M, Yi Y H, Minnis P, et al. Radiative Eeffect Ddifferences Between Multi-Layered and Single-Layer Clouds Derived from CERES, CALIPSO, and CloudSat Data [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2011. Doi:10.1016/j.jqsrt.2010.10.006.

[14] Wu X Q, Mitchell W M, Liang X Z. Radiative Effects of Cloud Horizontal Inhomogeneity and Vertical Overlap Identified from a Month Long Cloud-Resolving Model Simulation [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2005,62:4105-12.

[15] Chen T, Zhang Y C. Sensitivity of Atmospheric Radiative Heating Rate Profiles to Variations of Cloud Layer Overlap [J]. Journal of Climate, 2000(13):2941-59.

[16] Stephens G L, Wood N B, Gabriel PM. An Assessment of the Parameterization of Subgrid-Scale Cloud Effects on Radiative Transfer. Part I: Vertical Overlap [J]. Journal of Climate Science, 2004, 61:715-32.

[17] 叶晶,严卫,曹魏. 基于 MODIS 数据的白天多层云检测算法 [J]. 遥感技术与应用, 2007,22(4):570-574.

[18] 宋薇,张镭. 大气气溶胶光学厚度遥感研究概况 [J]. 干旱气象,2007,25(3):76-81.

- [19] 邱金桓,郑斯平,黄其荣,等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测[J]. 大气科学,2003,27(1):1-7.
- [20] 钟志庆,周军,戚福弟,等. 探测大气气溶胶消光系数的便携式米散射激光雷达[J]. 强激光与粒子束,2003,15(12):1146-1147.
- [21] 陈臻懿,张玉钧,刘文清,等. 激光雷达探测合肥云层高度方法研究及分析[J]. 激光技术,2010,34(6):733-815.
- [22] 刘东,戚福弟,金传佳,等. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测[J]. 大气科学,2003,27(6):1093-1100.
- [23] 薛新莲,戚福弟,范爱媛,等. 合肥地区卷云的激光雷达探测[J]. 量子电子学报,2006,23(4):527-532.
- [24] 张文煜,宋嘉尧,胡文超,等. 激光雷达对半干旱地区云层的观测[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2009,45(5):53-56. doi:0455-2059(2009)05-0053-04.
- [25] 邓涛,张镭,吴兑. 兰州地区高云和气溶胶光学特性及其辐射效应[J]. 高原气象,2010,29(1):230-235.
- [26] 刘瑞金,张镭,王宏斌,等. 半干旱地区卷云特征的激光雷达探测[J]. 大气科学,2011,35(5):863-870.
- [27] 夏俊荣,张镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J]. 干旱气象,2006,24(4):68-81.
- [28] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. An Overview of the Semi-Arid Climate and Environment Research Observatory Over the Loess Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(6):906-921.
- [29] 王瑾,张镭,王腾蛟,等. 兰州附近山谷典型日环流特征对比分析[J]. 干旱气象,2012,30(2):169-177.
- [30] Klett J D. Stable Analytical Inversion Processing Lidar Returns [J]. Applied Optics, 1981,20(2):211-220.
- [31] 迟如利,刘厚通,王珍珠,等. 偏振-米散射激光雷达对卷云的探测[J]. 强激光与粒子束,2009,21(9):1295-1300.
- [32] 王宏波,王治华,何捷,等. 成都地区中低云层的激光雷达探测[J]. 光子学报,2007,36(2):350-354.
- [33] Pal S R, Steinbrecht W, Carswell A I. Automated Method for Lidar Determination of Cloud Base Height and Vertical Extent [J]. Applied Optics, 1992,34:2388-2399.
- [34] Platt C M, Young S A, Carswell A I, et al. The Experimental Cloud Lidar Pilot Study (ECLIPS) for Cloud-Radiation Research [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1994,75:1635-1654.
- [35] 韩道文,刘文清,张玉钧,等. 用于反演云层高度的记忆式滑动窗口积分算法[J]. 强激光与粒子束,2008,20(1):1-5. doi:1001-4322(2008)01-0001-05.
- [36] Chazette P, Pelon J, Megie G. Determination by Spaceborne Backscatter Lidar of the Structural Parameters of Atmospheric Scattering Layers [J]. Applied Optics, 2001(40):3428-3440.
- [37] Brooks I M. Finding Boundary Layer Top; Application of a Wavelet Covariance Transform to Lidar Backscatter Profiles [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003,20:1092-1105.
- [38] Morille Y, Haeffelin M, Drobinski P, et al. STRAT: An Automated Algorithm to Retrieve the Vertical Structure of the Atmosphere from Single-Channel Lidar Data [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007,24:761-775.
- [39] Baars H, Ansmann A, and Engelmann R, et al. Continuous Monitoring of the Boundary-Layer Top with Lidar [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008(8):7281-7296.
- [40] Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. The Cloudsat Mission and the A-train: A New Dimension of Space-Based Observations of Clouds and Precipitation [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002,83:1771-1790.
- [41] Lynch D K, Sassen K, Starr D O C, et al. cirrus history and definition, in: cirrus [M]. Oxford University press, 2002.
- [42] Tao Z M, Patrick M M, Wu D, et al. Measurements of Cirrus Cloud Backscatter Color Ratio with a Two-wavelength Lidar [J]. Applied Optics, 2008,47(10):1478-1485.
- [43] Yoshida R, Okamoto H, Hagihara Y, et al. Global Analysis of Cloud Phase and Ice Crystal Orientation from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using Attenuated Backscattering and Depolarization Ratio [J]. Journal of Geophysical Research, 2010,115:D00H32, doi:10.1029/2009JD012334.
- [44] Cho H M, Yang P, Kattawar G W, et al. Depolarization Ratio and Attenuated Backscattering for Nine Cloud Types: Analyses Based on Collocated CALIPSO Lidar and MODIS Measurements [J]. Optical express, 2008, 16(6):3931-3948.
- [45] Hu Y. Depolarization Ratio-effective Lidar Ratio Relation: Theoretical Basis for Space Lidar Cloud Phase Discrimination [J]. Geophysical Research Letters, 2007, doi:10.1029/2007GL029584.
- [46] Chen W N, Chiang C W, Nee J B. The Lidar Ratio and Depolarization Ratio for Cirrus Clouds [J]. Applied Optics, 2002,30(41):6470-6497.
- [47] Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. Possible Influences of Asian Dust Aerosols on Cloud Properties and Radiative Forcing Observed from MODIS and CERES [J]. Geophysical Research Letters, 2006,33:L06824, doi:10.1029/2005GL024724.
- [48] Huang J P, Lin B, Minnis P, et al. Satellite-Based Assessment of Possible Dust Aerosols Semi-direct Effect on Cloud Water Path over East Asia [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L19802, doi:10.1029/2006GL026561.
- [49] 路小梅,江月松. 偏振激光雷达探测的北京地区云的统计特征分析[J]. 地球物理学报, 2011,54(10):2487-2494.
- [50] Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht/Boston/Lond; Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [51] 张强. 大气边界层气象学研究综述 [J]. 干旱气象, 2003,21(3):74-78.

Study on Spatial Calculating Model of Surface Pressure

DENG Yanjun, ZHAO Zhuoxun, FU Xiaoping, LU Libing, TAN Jianghong

(Jingzhou Meteorological Bureau of Hubei Province, Jingzhou 434020, China)

Abstract: Considering the effects of dominant factors including the altitude and temperature on the earth surface air pressure, a distribution model of earth surface air pressure is established based on the pressure – height equation in this paper. The coefficients of this model are calibrated by using the measurement data from the ground meteorological stations and re – analyzed sea level air pressure datasets of NCEP. The spatial distributions of monthly and daily average surface pressure on complicated terrain are simulated under this model. A minor fitting error is obtained in this model with the empirical coefficients which are consistent with the theoretical value. The measurement data from the ground meteorological stations are used to validate the simulation result. The validation absolute mean error is about 1 hPa, which indicates the distribution model has good simulation performance. The spatial distributions of monthly and daily average surface pressure in 2001, and 30 – year – mean monthly and daily average surface pressure from 1981 to 2010 in China are mapped with the resolution of 1 km × 1 km under this model. The analysis of those distributions shows that the surface pressure of China has a gradient of low to high from west to east. Through the whole year, the lowest pressure appears on the Qinghai – Tibet Plateau in the winter while the highest appears in the eastern coastal areas in winter. The distribution gradient shows the combined effects of the altitude and temperature upon the earth surface air pressure.

Key words: surface pressure; pressure – height equation; re – analyzed datasets of NCEP; distributed model



(上接第 253 页)

Study of Vertical Distribution of Cloud over Loess Plateau Based on a Ground – based Lidar System

ZHOU Tian, HUANG Zhongwei, HUANG Jianping, LI Jiming, BI Jianrong, ZHANG Wu

(Key Laboratory for Semi – Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Knowledge of vertical structure of cloud is very important for studying globe climate change and rainfall enhancement. Seasonal variation of vertical distribution of cloud geometrical properties, such as cloud base and cloud top height, cloud geometrical thickness, single – layer and multi – layer, color ratio and depolarization ratio of cloud were analyzed based on continuous lidar measurements from December 2009 to November 2011 at the Semi – Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL). The results show that the cloud appears more than 34.9% below 2 km in spring, summer and autumn, and the frequency of the opaque cloud is up to above 33.5%, but there is more cloud (35.1%) above 4 – 6 km in winter with a small amount of opaque cloud (7.8%). Unimodal distribution was found for color ratio and the peak value concentrated at the range of 1.8 – 2.6 for all cloud. But the depolarization ratio showed a bimodal distribution, furthermore, the depolarization ratio between 0.2 and 0.25 can be used to distinguish ice cloud from water cloud for ground – based lidar in similar field of view. The height of convective boundary layer has an impact on the vertical structure of cloud, the base height of boundary cloud increases with the height of boundary layer.

Key words: dual – wavelength polarization lidar; cloud vertical structure; color ratio; depolarization