

激光雷达观测北京春季云垂直结构及探空对比研究

王箫鹏^{1,2} 宋小全^{2*} 陈玉宝^{1,3} 吴松华² 邵楠¹

¹ 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

² 中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266003

³ 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘要 2011 年 3~4 月和 2013 年 4~5 月利用车载多普勒激光雷达在北京观象台分别进行了为期约 1 个月的大气综合观测实验。采用改进的微分零交叉法给出激光雷达观测个例并与同步探空数据进行对比, 体现出较好一致性。统计结果表明 167 组天顶方向上的激光雷达廓线中含有云的数据占 62.9%, 其中单层、2 层及 3 层云所占比例分别为 34.1%、16.2% 和 6.6%。所有云层结构中, 低云、中云、高云及直展云的比例分别为 30.2%、51.4%、17.3% 和 1.1%, 平均云底高度、云顶高度及云厚分别为 4.26、4.99、0.73 km。北京春季出现单层云频率最高, 且存在多层云时顶层云最厚, 其云厚与单层云云厚较为接近。与同步探空仪相对比, 共 61 对含云匹配数据, 二者计算的云底、云顶高度的相关系数为 0.86、0.83, 均方根偏差为 1.31、1.74 km, 探空观测的云底较激光雷达偏高。

关键词 遥感; 云垂直结构; 激光雷达; 云底高度; 探空仪

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s201001

Observation and Validation of Cloud Layer Structures from the Mobile Doppler Lidar and Radiosonde during Spring in Beijing

Wang Xiaopeng^{1,2} Song Xiaoquan² Chen Yubao^{1,3} Wu Songhua² Shao Nan¹

¹ Meteorological Observation Center, Chinese Meteorological Academy, Beijing 100081, China

² Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China

³ Beijing Urban Meteorological Institute, Chinese Meteorological Academy, Beijing 100089, China

Abstract The Doppler wind lidar was deployed at Beijing Meteorological Observatory from March to April, 2011 and April to May, 2013, respectively. Laser radar observational case using a modified differential zero crossing method shows a good agreement with radiosonde measurements. The statistic analysis of 167 Zenith-pointing lidar profiles indicates that the averaged frequency of cloud occurrence is 62.9%, which single-layer, two-layer, and three-layer clouds account for 34.1%, 16.2%, and 6.6% of all profiles, respectively. Low, middle, high and deep convective clouds account for 30.2%, 51.4%, 17.3%, and 1.1% of all cloud observations, respectively. The cloud-base height, cloud-top height, and cloud thickness for all clouds are 4.26, 4.99, and 0.73 km, respectively. The occurrence frequency of single-layer cloud is the highest. Among the multi-layer clouds, the thickness of upper level clouds is the thickest, which has same magnitude as the thickness of single-layer clouds during spring in Beijing. Lidar observations are compared with the radiosonde for 61 matched profiles. The validations of the synchronous measurements show that the corresponding correlation coefficients of the cloud-base height and the cloud-top height from the lidar and the radiosonde are 0.86 and 0.83, respectively, and the root mean square deviation are 1.31 km and 1.74 km, respectively. The cloud-base heights from the radiosonde appear systematically higher than those from the lidar.

Key words remote sensing; vertical cloud structures; lidar; cloud-base height; radiosonde

OCIS codes 010.1615; 010.0280; 010.3640; 010.1310

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(41375016)、海洋公益性行业科研专项(201205036-5)、城市气象科学研究基金(IUMKY&UMRF201109)

作者简介: 王箫鹏(1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: wxpdiscovery@163.com

* 通信联系人。E-mail: songxq@ouc.edu.cn

1 引 言

云的垂直结构(包括云底高度、云顶高度、云厚及多层云的层次分布)的准确观测是遥感研究的重要内容,对于研究全球气候变化、气象预报、人工影响天气以及机场保障等诸多领域都十分重要^[1-3]。随着激光技术发展,激光雷达成为实时连续探测大气物理参数、云和气溶胶等空间分布的有效手段,在中低空大气气溶胶和云层的空间分布连续监测中获得了广泛的应用^[4-6]。

中国气象局的车载多普勒激光雷达主要用于对流层大气风廓线、云及气溶胶的监测,具有高时空分辨率和晴空探测等优点^[7]。2011年3~4月和2013年4~5月利用该系统在北京观象台(39°48'N, 116°28'E)分别进行了为期约1个月的大气综合观测实验,期间每天2次(7:15, 19:15 BJT)释放GTS1型无线电探空仪,与激光雷达观测时间基本同步且释放地点水平距离约30 m。本文优化了反演云底、云顶位置的算法,通过所有含云激光雷达廓线统计分析了北京春季云垂直结构特性,并对比分析了激光雷达与探空仪同步观测的结果。

2 探测系统简介

2.1 车载多普勒激光雷达

车载多普勒激光雷达系统(参数见表1)主要由激光发射单元、信号接收单元、扫描控制单元、数据采集和信号处理单元等组成,各单元集成在一辆IVECO车中,以实现可移动测量^[7]。发射单元以单纵模532 nm脉冲激光作为探测光源,经大气散射后的回波信号,由包括望远镜、光纤、窄带干涉滤光片等组成的接收单元接收,最后通过数据采集和信号处理单元获得大气探测数据,进而反演得到大气风场、云和气溶胶的时空分布等信息。

表1 车载多普勒激光雷达主要参数指标

Table 1 Main parameters of the mobile Doppler lidar

Transmitting subsystem	Specification
Wavelength/nm	532
Pulse energy/mJ	8
Repetition rate/Hz	500
Divergence full angle/mrad	0.1
Receiving subsystem	Specification
Telescope aperture/cm	28
Field of view/mrad	0.2
Detection range/km	0.3~20
Range resolution/m	10

2.2 无线电探空仪

GTS1型数字式探空仪(参数见表2)与GFE(L)1型二次测风雷达组成L波段雷达探空系统,能够获得地面至高空约30 km范围内整层高精度大气廓线,包括温度、相对湿度、压强、风速、风向等气象要素,是目前国内比较先进的高空气象探测仪器^[8]。

表2 GTS1型探空仪主要参数指标

Table 2 Main parameters of the digital radiosonde GTS1

Parameter	Value	
Temperature	Measurement range/ °C	-90~50
	Permissible error/ °C	0.3
	Measurement range/ hPa	1 060~5
Pressure	Permissible error/ hPa	2(>500 hPa) 1(<500 hPa)
	Measurement range	0~100%
Relative humidity	Permissible error	5%(>-25 °C) 10%(<-25 °C)

3 原理和反演方法

3.1 激光雷达原理

大气激光雷达接收到的大气后向散射强度 $P(r)$ 可由后向散射系数 $\beta(r)$ 、消光系数 $\sigma(r)$ 、探测距离 r 及系统常数 C 等决定,由激光雷达方程给出^[9],即

$$P(r) = C \frac{\beta(r)}{r^2} \exp \left[-2 \int_0^r \sigma(r') dr' \right]. \quad (1)$$

(1)式表明:晴空(无云)时激光雷达后向散射强度主要取决于 Rayleigh 散射,随着探测高度的增加, $P(r)$ 逐渐衰减;而当云层存在时,云层密度比气溶胶大得多,导致 $P(r)$ 在云底位置显示出较为明显的增强,廓线斜率将会由负变正。图 1 是 2013 年 5 月 21 日 08:14~08:46 在天顶方向的大气测量结果,图 1(a)是该时间段内处理后的廓线平均值,对回波信号进行降噪、距离平方校正(RCS, R_{cs})及取对数等处理后得到图 1(b)所示的时间-高度显示(THI)图。可以明显观察到在高 5~6 km 间有一层稳定的强散射粒子存在,根据激光雷达原理、云滴光学特性判定为云层,进而可获得高时空分辨率的云的垂直结构。

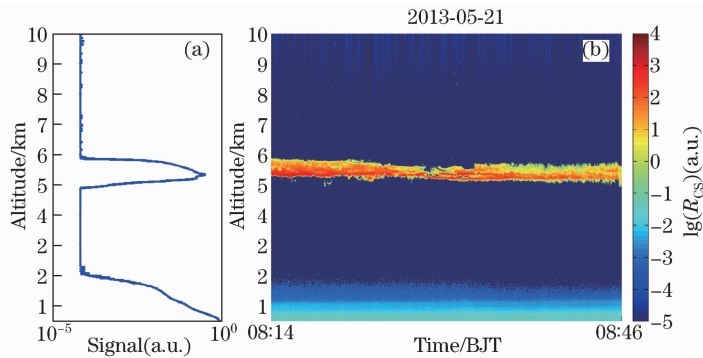


图 1 激光雷达观测个例。(a)平均大气回波信号廓线;(b)大气回波 THI 图

Fig. 1 Case of observation using lidar. (a) Average atmospheric backscattering profile;
(b) THI of atmospheric backscattering signal

3.2 激光雷达数据反演云层结构方法

采用在微分零交叉法^[9]基础上改进的算法来反演云底高度。首先对激光雷达数据进行降噪、滑动平均及微分处理,得到 $dP(r)/dr$ 。计算出回波廓线背景噪声强度 I 、标准差 σ_b 及其斜率 $dP(r)/dr$ 的均值 k 、标准差 σ ,为了剔除部分噪声引起的过 0 点,只有廓线上的 $dP(r)/dr$ 大于 $k + 3\sigma$ 的高度范围才视为候选云层,这样可以排除部分由薄气溶胶层和噪声引起的过零点。为了提高算法的实时自动反演能力,结合 CM Platt 的阈值法^[10],进一步判定时采用如下判据:当候选云底与云峰所对应的回波强度相差大于 $2I$ 或大于 $2\sigma_b$ 时,即可判定为云底位置。地基观测云底高度统计结果显示,低云平均高度为 (512 ± 148) m^[3],考虑到激光雷达几何重叠因子的影响,本文计算与统计时舍去 0.5 km 以下数据。

经过上述判定后的云底、云峰,还需要对其层次进行筛选,若两层云峰之间的云底处所对应的回波强度没有降到洁净大气水平,则表明其为同一层云。此外,如果云层和相邻弱气溶胶层距离在 0.05 km 范围内,则也认为弱气溶胶层为该层云一部分^[11]。判定出云底后,对于激光可穿透云层的情况就可计算出其对应的云顶高度,当廓线上回波强度满足 $r_1^2 P(r_1) \leq r_b^2 P(r_b)$ 的位置即为该层云的云顶高度,其中 r_b 和 r_1 分别为云底位置和其对应的云顶位置^[9]。若判断出的两层云中,下层云的云顶与上层云的云底距离小于 0.05 km,则融合为一层^[11]。激光穿透云层时,云厚则为云顶与其对应云底高度之差。考虑到云的光学特性及相邻廓线在时间上的相关性,最后对连续时间 Δt 内提取的云底高度作平均处理,或者在反演之初将相邻 Δt 时间内的廓线先平均再对其反演, Δt 的具体值与测量时间分辨率及云的稳定性有关。

3.3 探空数据分析云层结构方法

云的垂直结构和探空数据中相对湿度值(RH, H_R)存在直接联系,根据探空仪特点及北京大气状况,本文选取较为常用的相对湿度阈值法(WR95)^[12]来判定云层结构。由于数据距离分辨率约为 5 m 且结合 Zhang 等^[3]对 WR95 的改进,得出由近地面(大于等于 0.5 km)向上提取云层信息具体步骤为首先找出廓线

上 $H_R \geq 84\%$ 的位置为湿度层,若湿度层中最大相对湿度 $H_{R_{\max}} \geq 87\%$ 则定义该湿度层为候选云层。其次为减少误判,在候选云层中设置中低云、高云厚度最小阈值分别为 30.5、61 m,同时廓线上相邻云层距离须不小于 0.3 km,反之为同一层云。最后自廓线 0.5 km 处向上延伸至廓线顶端,在判定出的云层中,每层云 $H_R = 84\%$ 的位置依次为该层云的云底、云顶。需要说明的是,当温度降到 0°C 以下时,需按照冰面饱和和水汽压重新计算相对湿度,如下式所示:

$$H_{R_{\text{new}}} = H_R \times \left(\frac{E_w}{E_i} \right), \quad (2)$$

式中 E_w 、 E_i 分别为水面饱和水汽压、冰面饱和水汽压,计算 E_w 和 E_i 时分别采用的是误差较小的 GG46 和 GG46i 方程^[13]。

4 激光雷达探测云垂直结构结果

4.1 个例的反演及比对分析

图 2 为 2011 年 4 月 2 日 8:55~8:57 激光雷达平均回波廓线和同步探空观测个例。从图 2(a)可以看出该激光雷达回波廓线包含了不同云层信息且 4 km 以下云层垂直结构较复杂,图 2(b)为其变化斜率和反演结果,计算结果为两层云。第 1、2 层云的云底/云顶高度依次为 2.56 km/3.84 km、5.79 km/6.69 km。需要说明的是,在分段查看计算过程时,3.5~4 km 之间的云层最初被判定为独立云层,但其云底高度 3.57 km 与下层云顶高度 3.53 km 距离不满足两层云垂直距离大于 0.05 km 的要求,最终反演结果为一层云。图 2(c)中 RH-Water 和 RH-Ice 分别是探空所获得的相对湿度和温度低于 0°C 时重新计算得到的相对湿度,Min-RH 和 Max-RH 是判定云层结构的阈值,其值分别为 84%、87%,可以看出计算的结果为两层云,其云底/云顶高度分别为 2.86 km/4.44 km、6.37 km/7.16 km。

通过反演同步廓线个例表明,两种系统同时观测到两层云,其中第 1 层和第 2 层云云底/云顶/云厚分别相差为: $-0.30 \text{ km}/-0.60 \text{ km}/-0.30 \text{ km}$ 、 $-0.58 \text{ km}/-0.47 \text{ km}/0.11 \text{ km}$,结果较为一致。

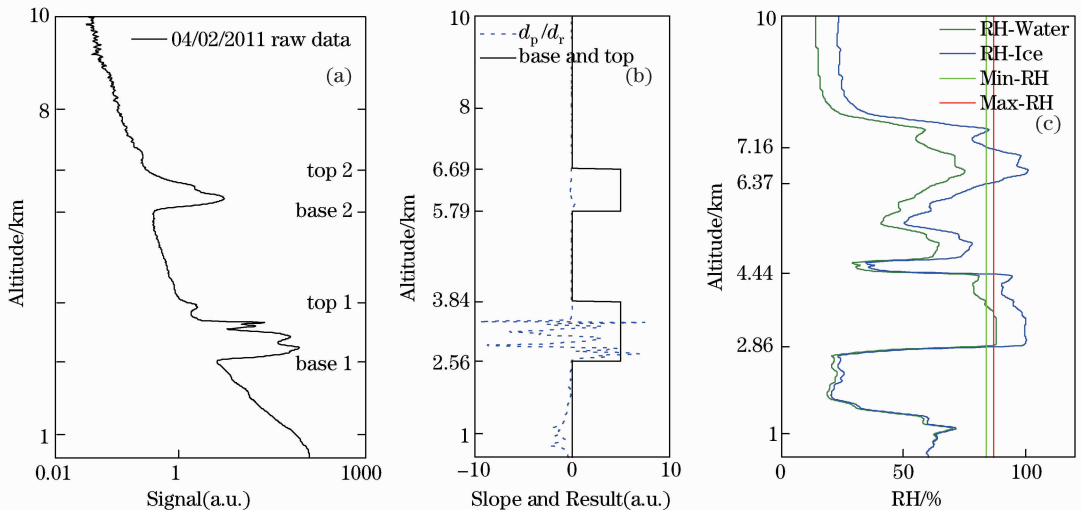


图 2 同步观测个例。(a)激光雷达平均廓线;(b)激光雷达廓线斜率及结果;(c)探空相对湿度廓线及观测结果

Fig. 2 Retrieved case of simultaneous observation. (a) Averaged profile of lidar backscatter signal; (b) slope and result of lidar observation; (c) RH profile and calculation result

4.2 云层的时空分布

2011 年 3~4 月和 2013 年 4~5 月期间除 5 月 3 日停测外,共进行了为期 63 天实验,采集时间主要在 6:30~9:00 和 18:30~21:00 之间,获得 167 组天顶方向的有效数据。车载多普勒激光雷达系统探测距离可至 20 km,但运行中由于激光器发射功率差异、光路偏移以及气象条件等因素导致实际最大探测距离分布如图 3(a)所示,按照云的国际分类^[14],温带地区高云平均云底高度最高至 13 km,而实际探测中系统最大探测距离大于 13 km(含 13 km)和不足 7 km(含 7 km)的概率分别为 56.6%、20.2%,可见该系统性能能够满足

对云垂直结构统计观测的要求。图 3(b)是实验期间晴空无云、单层云和多层云的出现次数及概率分布,在 167 组数据中含云廓线占 62.9%,共探测到 185 层云,其中单层、2 层及 3 层云所占比例分别为 34.1%、16.2%及 6.6%,4 层及 4 层以上的云约占 6.0%,在有云的情况下北京春季出现单层云的频率最高。探测区域 2013 年 5 月出现云的频率(68.4%)高于 2011 年 3~4 月(58.2%)且云层次信息更加丰富。

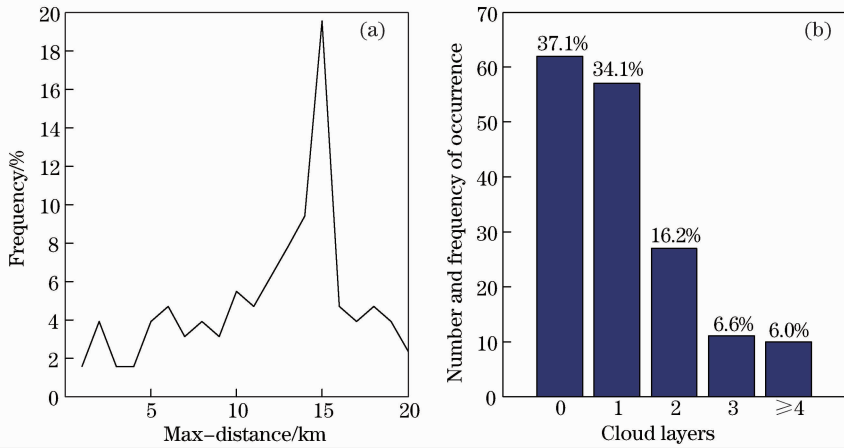


图 3 激光雷达系统探测距离及探测云层统计结果示意图。(a)系统探测最大距离分布;(b)不同云层分布情况

Fig. 3 Statistic of lidar detection range and cloud-layer observation results. (a)Frequency distribution of maximum distance; (b)number of occurrence and percentage of different cloud layers

由于实验期间观测到 4 层以上云的几率极少,对其垂直结构的统计不具代表性,所以只取单层至 4 层云的平均位置和厚度来分析。如图 4 所示, ξ 是指所在云层平均厚度与单层云平均厚度之差,可以看出,单层云最厚,比其他云层厚约 520 m,位置约为多层云的中间;多层云的顶层云往往比下层的云层厚,尤其是 2 层云,其厚度接近于单层云;2 层和 3 层云的空间分布较为相似,而 4 层云平均分布最广(1~10 km);实验期间探测到的最薄云层为 0.06 km(2013 年 5 月 07 日 07:33~07:35),激光雷达在穿透云层情况下,测得的最厚云层为 4.92 km(2013 年 5 月 26 日 00:00~00:28),在所有的云层中,低层云的厚度较为接近,且平均厚度不足 0.6 km 的云出现的几率最大。上述特征应该是由于多层云中低层云云体上部长波辐射冷却较为剧烈,引起顶层云云内温度层结不稳定,进而有利于对流的形成和发展。

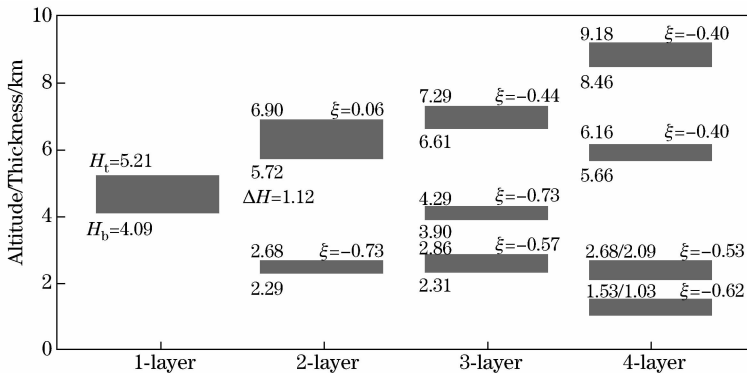


图 4 激光雷达观测单层、2 层、3 层和 4 层云的空间平均分布状况

Fig. 4 Averaged locations of one-, two-, three- and four-layer clouds detected by lidar

按照云底高度和厚度可将云分为 4 种^[13]:低云(小于 2 km 且厚度小于 6 km)、中云(2~7 km)、高云(大于 7 km)及直展云(小于 2 km 且厚度大于 6 km),其中低云多以液相为主,而高云多以冰相为主。激光雷达对直展云云顶的观测往往是未达到云顶前回波信号就已衰减至噪声水平,所以直展云的结构分析是激光雷达数据结合同步探空资料共同完成的。统计结果显示,在所有含云的数据中,4 种云的比例分别为 30.2%、51.4%、17.3%及 1.1%,中云出现的频率最高。图 5 所示的是各种云的平均垂直位置及平均云厚,其中 H_b 、 H_t 、 ΔH 和 N 分别是平均云底高度、平均云顶高度、平均云厚及所探测到的每种云出现次数。实验期间探测到的最小云底高度为 0.55 km(2013 年 5 月 19 日 07:03~08:06),测得的最大云底高度为 11.97 km

(2013年5月23日20:27~21:00),从图5可以看出,4种云平均云底、云顶高度及云厚依次为4.26、4.99、0.73 km,其中低云、中云、高云及直展云平均云底高度/云顶高度/平均云厚依次为1.24 km/1.65 km/0.41 km、4.40 km/5.12 km/0.72 km、9.34 km/10.14 km/0.80 km及0.96 km/10.37 km/9.41 km。实验期间,低云的云层较薄(约400 m),而中云和高云云厚较为接近。但总的来说,除直展云外,其他3种云云厚都较小,这可能是因为在整层大气水汽含量中近地层水汽含量占较大比重,而北京春季空气湿度小、近地霾层有时还较严重等,所以出现上述云层结构。

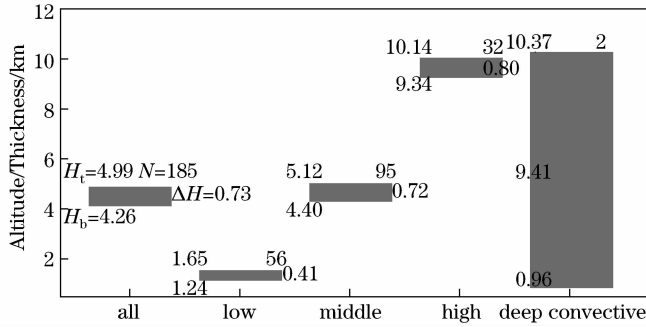


图5 激光雷达观测所有云层和低、中、高、直展云层分布状况

Fig. 5 Averaged locations and thicknesses of all cloud layers, low cloud layers, middle cloud layers, high cloud layers, and deep convective clouds detected by lidar

4.3 激光雷达与探空仪观测对比

为了更好地分析激光雷达与探空仪观测云垂直结构的差异,需要进行比对数据的筛选和匹配。选取探空气球释放前15 min至释放后2 h之间15 km以下的激光雷达数据且每组取平均廓线,同时剔除观测的明显不是同一层云情况。2种情况需要特别说明:1)若通过云底高度和云层次信息判定二者观测到的为同一层云但该层云的云顶被反演的结果差别较大;2)在匹配时间区域内,若激光雷达观测到的层次和探空结果始终一致但云底反演结果差别较大。为了分析激光雷达和探空对云的探测性能差异,对于上述2种情况,比对时仍保留对该层云垂直结构的统计。激光雷达数据为天顶方向上的观测数据,时间分辨率约为10 min,而探空仪从地面上升到10 km约需35 min,所以二者的测量结果很难在时间上严格匹配;探空气球在上升过程中由于风场的作用与释放点会产生水平位置偏移,所以二者的采样点很难在空间上严格匹配。

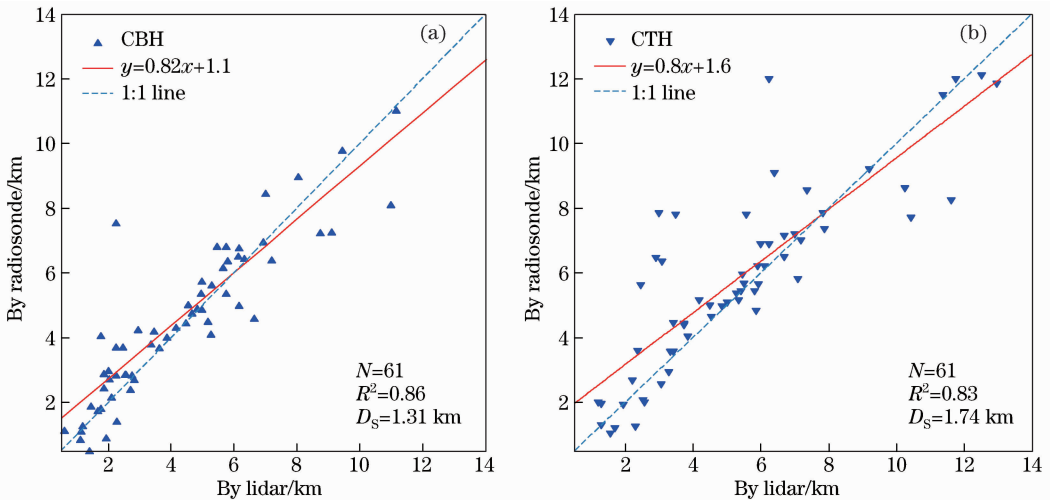


图6 激光雷达与探空气球观测对比。(a)观测云底高度散点图;(b)观测云顶高度散点图

Fig. 6 Comparison of cloud structure observation between lidar and radiosonde. (a) Scatter diagram of cloud-base height measurement; (b) scatter diagram of cloud-top height measurement

在167组激光雷达数据中符合上述匹配条件的共127组,其中二者同时观测到含云和无云的比例分别为48%、30.7%。图6(a)和图6(b)分别是二者观测到的云底及其对应云顶高度的散点图,共61对数据点。

可以看出,两者观测的云底、云顶高度的相关系数分别为 0.86、0.83,且其标准偏差(SD, D_s)分别为 1.31 km 和 1.74 km,大部分观测时次尤其是中云的云底观测较为一致,但 4 km 左右云顶的观测差别偏大且激光雷达观测的云底、云顶往往偏低[如图 6(a)和图 6(b)所示],在筛选数据时也发现两者对云层次的观测差别偏大,探空仪很少能观测到低云,激光雷达观测的层次要丰富一些,很多次激光雷达能够观测到 10~15 km 的云层时,探空数据却显示无云。除了探空仪水平位置飘移、时间不能完全匹配及各自反演算法引起观测结果差异外,还可能因为以下几点:1)GTS1 型探空仪湿度传感器为碳膜湿敏电阻,业务使用中存有低温特性不一致、滞后等现象^[7],尤其是温度在-30℃及以下,湿度变化幅度明显变小,即迟滞增加(此时误差在 10%),而春季的北京高度 7~8 km 时大气温度就基本降到-30℃以下,所以即使有高云存在,探空仪有可能会观测不到;2)激光雷达对大气气溶胶浓度的变化非常敏感,所以其探测的云底可能要比探空仪观测的低,同时北京春季近地面平均湿度较小,因此,激光雷达对低云的观测可能更为有效;3)雾霾较为严重或云层较厚时,激光可能穿不透以致观测不到其云顶及以上云层,但探空仪可以,所以可能造成二者观测的云底较一致时,云顶及云厚却相差偏大。

5 结 论

2011 年和 2013 年春季在北京开展了为期 63 天的车载多普勒激光雷达观测大气实验,共获得了 167 组激光雷达数据利用改进的微分零交叉法反演了含云廓线的云底高度、云层数、云层厚度等物理参数,并且与同步释放的探空仪相对湿度数据相对比,得到以下几点主要结论:

1)根据激光雷达探测最大距离分布情况,该系统在观测实验中近 80%的情况可满足北京上空云垂直结构的实时观测。观测期间云层出现的概率为 62.9%,其中单层云、2 层云、3 层云、4 层及 4 层以上的云分别占 34.1%、16.2%、6.6%、6%,北京春季单层云出现的频率最高;单层云比多层云平均约厚 520 m,平均云底、云顶高度为 4.09 km 和 5.21 km,多层云的顶层云往往比其下层云厚,平均厚度不足 600m 的下层云发生的概率最高;云层越多,空间分布越广。

2)所有含云廓线中,低云、中云、高云及直展云(深对流云)的比例依次为 30.2%、51.4%、17.3%及 1.1%,北京春季中低云系较为常见。4 种云云底高度分布在 0.55~11.97 km 范围内,厚度从 0.06~4.92 km 不等;平均云底高度为 1.24、4.40、9.34、0.96 km,平均云顶高度为 1.65、5.12、10.14、10.37 km;低云的云层较薄(0.41 km),而中云和高云云厚较为接近,平均云厚为 0.73 km,这符合中纬度地区云厚约 0.5~1 km 的气象记录。

3)激光雷达和无线电探空仪观测的云底、云顶高度的相关系数均在 0.8 以上,标准偏差依次为 1.31 km 和 1.74 km,大部分观测时次两者较为一致,但也存在激光雷达云高观测偏低、层次观测差异等。

4)激光雷达能够实现对目标区域的连续实时观测,获得整层大气的云层垂直结构,时间与空间分辨率较高。但受限于信噪比及大气衰减,对不可穿透云层或近地有重雾霾层时探测能力受限。探空仪对云层也是廓线形式的观测,能够实现地面至 30 km 云层观测且几乎不受云层厚度、雾霾层等影响,但完成整个廓线观测的时间相对较长,相对于释放点的水平方向漂移亦具有不确定性,故其云观测精度、实时性等都有待提高,未来研究中若与偏振激光雷达、毫米波云雷达相结合,将会很大程度上提高对北京上空云层结构的观测能力。

参 考 文 献

- 1 Dong X, Xi B, Minnis P. A climatology of midlatitude continental clouds from the ARM SGP Central Facility. Part II: Cloud fraction and surface radiative forcing[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(9): 1765-1783.
- 2 Martucci G, Milroy C, O'Dowd CD. Detection of Cloud-Base Height Using Jenoptik CHM15K and Vaisala CL31 Ceilometers[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2010, 27(2): 305-318.
- 3 Zhang Jianqiang, Chen Hongbin, Li Zhangqing *et al.*. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115, D00K30
- 4 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud [J]. *Chinese J Lasers*. 2013, 39(10): 1014002.
伯广宇,刘东,王邦新,等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. *中国激光*, 2013, 39(10): 1014002.
- 5 Yan Baodong, Song Xiaoquan, Chen Chao, *et al.*. Beijing atmospheric boundary layer observation with lidar in 2011 spring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s128001.

- 闫宝东,宋小全,陈超,等. 2011 春季北京大气边界层的激光雷达观测研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s128001.
- 6 Yu Haili, Hu Shunxing, Wu Xiaoqing. Measurement of CO₂ concentration profile of lower-troposphere with Raman lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012,32(8):0801003.
- 于海利,胡顺星,吴晓庆. 拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布[J]. 光学学报, 2012,32(8):0801003.
- 7 Liu Zhishen, Liu Bingyi, Wu Songhua, *et al.*. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements[J]. Optics letters, 2008,33(13):1485-1487.
- 8 Guo Qiyun, Li Wei, Zhang Yucun, *et al.*. Performance test and comparative analysis of GTS1, GTS-1, and GTS1-2 radiosondes[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2012,29(1):5-10.
- 郭启云,李伟,张玉存,等. GTS1 型, GTS1-1 型, GTS1-2 型探空仪性能试验与对比分析[J]. 气象水文海洋仪器. 2012,29(1): 5-10.
- 9 Pal S R, Steinbrecht W, Carswell A I. Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent[J]. Applied Optics, 1992,31(10):1488-1494.
- 10 Platt C, Young S, Carswell A, *et al.*. The experimental cloud lidar pilot study (ECLIPS) for cloud-radiation research[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1994,75(9):1635-1654.
- 11 Wang Zhien, Sassen K. Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2001,40(10):1665-1682.
- 12 Wang J, Rossow W B. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations[J]. Journal of Applied Meteorology. 1995, 34(10):2243-2258.
- 13 Alduchov OA, Eskridge RE. Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996,35(4):601-609.
- 14 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. Atmospheric Physics[M]. Beijing:Beijing University Press, 2003:290.
- 盛裴宣,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 2003: 290.

栏目编辑: 史敏