

联合测云体制下的光学厚度反演技术研究

张婷^{1*}, 刘磊², 高太长², 胡帅²

¹河北省气象技术装备中心, 河北 石家庄 050021;

²国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101

摘要 为提高地基红外测云系统全天空云检测的准确性,通过辐射传输模式 SBDART 模拟大气向下红外辐射与云光学厚度之间的对应关系,发现利用云的光学厚度拟合曲线反演云的光学厚度具有可行性,然后在此基础上提出了一种利用红外和激光联合反演云光学厚度的方法。通过建立更精确的适用于特定地区和特定季节的大气廓线和水汽含量,利用激光消光廓线较精确地反演气溶胶和云底高,并将以上获取的大气参数代入辐射传输模式 SBDART,模拟得到了云的光学厚度反演曲线,从而反演出全天空云的光学厚度分布。实验结果表明,通过单层云和两层云的光学厚度反演曲线反演得到的全天空光学厚度分布与全天空辐射分布保持一致,能够较清晰地分辨全天空不同高度云层的光学厚度。

关键词 遥感; 光学厚度; 激光; 红外; 联合测云

中图分类号 P412.15

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.192802

Optical Depth Inversion Technique Under Joint Cloud Measurement System

Zhang Ting^{1*}, Liu Lei², Gao Taichang², Hu Shuai²

¹Hebei Provincial Meteorological Technical Equipment Center, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;

²College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China

Abstract To improve the accuracy of all-sky cloud detection of ground-based infrared cloud-measuring system, the corresponding relation between downwelling infrared radiation and optical depth of clouds was simulated by Santa Barbara DISTORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) model. The simulation result shows that it is feasible to invert optical depth by fitting its curve. On this basis, a new method under a combination of infrared and laser technologies was proposed. First, more accurate atmospheric profiles and precipitable water vapor applicable to specific regions and seasons were established. Simultaneously, the aerosol and cloud base height were inverted by laser extinction profiles. Second, the atmospheric parameters obtained above were substituted into SBDART to simulate the cloud optical depth inversion curve at zenith. Finally, the optical depth distribution of the all-sky clouds could be inverted by the curve. The experimental results reveal that the distribution of the all-sky optical depth obtained from the inversion curve of single- and two-layer clouds is consistent with the distribution of the all-sky radiation. Moreover, the optical depth of clouds at different heights in the all-sky is clearly distinguished.

Key words remote sensing; optical depth; laser; infrared; joint cloud measurement

OCIS codes 280.4991; 040.3060; 010.1615

1 引言

云对太阳辐射的反照率效应和对地球辐射的温室效应^[1]是两种相反作用,这两种相反作用的综合

效果对地球辐射收支、天气预报、大气环流和气候变化起着重要作用^[2]。

近年来,利用辐射计进行云光学厚度反演的工作取得了丰硕成果^[3-4],利用全天空测云仪器反演光

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-01-20; 录用日期: 2020-02-14

* E-mail: stereol26@163.com

学厚度的研究工作也相继开展,并取得了很好的效果。Musat 等^[5]利用全天空成像仪(WSI)进行了夜间大气光学厚度的估计,他们根据 WSI 所测星光的辐射通量随气溶胶的变化,反演了夜间气溶胶的光学厚度,并将反演结果与激光雷达测量结果进行了对比,两者具有良好的一致性。Olmo 等^[6]利用迭代算法自动处理全天空数字相机(ASD)获得的全天空图像,反演了气溶胶和云的光学厚度;同时,他们还将 CIMEL-CE318 太阳光度计的同步测量值与反演值进行了比较。Thurairajah 等^[7]和 Nugent 等^[8]利用红外云成像仪(ICD)获得了天空红外图像,然后采用多阈值法判断云的光学厚度及其对光的衰减程度,并据此将云分成非常薄的云(very thin)、薄云(thin)、基本是薄云(mostly thin)、一般的云(medium)等类型。霍娟^[10]利用架设在香河观测场的可见光全天空成像仪数据进行了气溶胶光学厚度的反演工作;她采用数值模拟法和观测资料法建立了反演气溶胶光学厚度的关系式,反演了气溶胶的光学厚度;她指出,利用辐射比反演气溶胶光学厚度具有一定的可行性,为有云大气的气溶胶反演提供了一种途径,但反演精度需要在未来的工作中进一步提高。

地基红外测云仪(Wsircms)所采集到的 8~14 μm 波段的大气向下红外辐射图像中包含全天空的云和大气的辐射信息^[11-13]。激光云高仪是目前公认的反演单点云底高最准确有效的仪器,而且该仪器还能够获得气溶胶消光系数廓线。上述两种设备均能够进行昼夜连续观测,且具有较好的互补性。鉴于此,本文采用 Wsircms 和激光云高仪相结合的方法,对云的光学厚度进行了研究,以期为提高地基测云的准确性提供参考。

2 数据及反演原理

2.1 仪器及数据介绍

本研究中的数据主要取自北京冬季南郊中国气象局大气探测综合实验基地的 Wsircms 和激光云高仪 CYY-2B 联合观测的数据。

Wsircms 由国防科技大学气象海洋学院研制,它采用 320 pixel \times 240 pixel 的非致冷红外焦平面阵列。采用该仪器可以按顺序分别得到天顶及天边 8 个方位的红外辐射信息,经定标、拼图和云识别处理后可以得到全天空红外云分布图像。该设备每隔 15 min 就可以得到一组观测数据。CYY-2B 型激光云高仪由凯迈(洛阳)环测有限公司研制,其工作波段为 910 nm,收发分置,观测方向为天顶方

向,观测时间间隔设置为 1 min,探测高度为 10000 m,高度分辨率为 2.5 m。

此外,本文还使用了北京地区无线电探空仪探测的数据,该探空资料每天只有 0 时和 12 时(世界时)两个时次的的数据,其中包含从地面至高空若干层的高度、气压、温度、露点温度、风速、风向等信息。

2.2 云光学厚度的反演原理

大气向下红外辐射传输理论是云的地基红外遥感的基础^[14-15]。为了提高有云大气辐射传输的精度,Ricchiuzzi 开发了 SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) 模式^[16],它是近年来国际上比较流行的一种计算辐射传输的模式。该模式通过 FORTRAN 程序,采用离散坐标法求解辐射传输方程,从而计算晴空和有云状况下地球大气和表面的平面平行大气辐射传输,模式中考虑了所有影响紫外线、可见光和红外辐射、散射、吸收、下边界双向反射和发射等的重要过程。但该模式是一种大气平行辐射传输模式,未考虑地球曲率的影响,而地球曲率会影响大气分子的分布,从而影响电磁波的散射路径。由于本文主要利用红外长波辐射反演云信息,而长波范围内电磁波的多次散射可以忽略,因此,可以采用平面平行辐射传输模式 SBDART 来反演云信息。

本文选取一系列不同的云底高度(H)和光学厚度,利用 SBDART 计算了天顶方向的向下红外辐射,如图 1 所示。

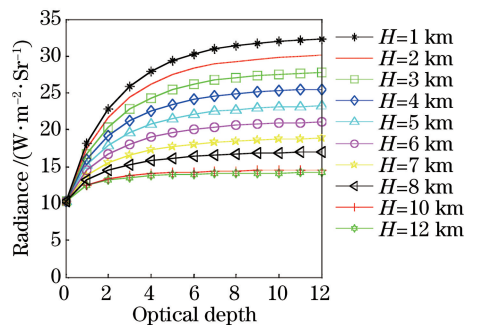


图 1 天顶方向向下红外辐射与云底高度、光学厚度的关系
Fig. 1 Relation between infrared radiance from zenith and the cloud base height and optical depth

由此可见,云的光学厚度与大气向下红外辐射存在一一对应关系。通过模拟云在不同光学厚度 D_{eff} 下的大气向下红外辐射 R^{\downarrow} 可知,红外波段云的光学厚度可表示为

$$D_{\text{eff}} = \alpha \exp(\beta R^{\downarrow}), \quad (1)$$

式中: α 、 β 均为拟合系数。

由于水汽、大气廓线、气溶胶和云分布对大气向下红外辐射的影响最大,且它们在不同时间、空间上的分布差异也比较大,因此,可以通过 SBDART 输

入自定义控制参数的方式来修正这些参数的影响,进而模拟计算得到更精确的云体辐射。具体反演流程如图 2 所示。

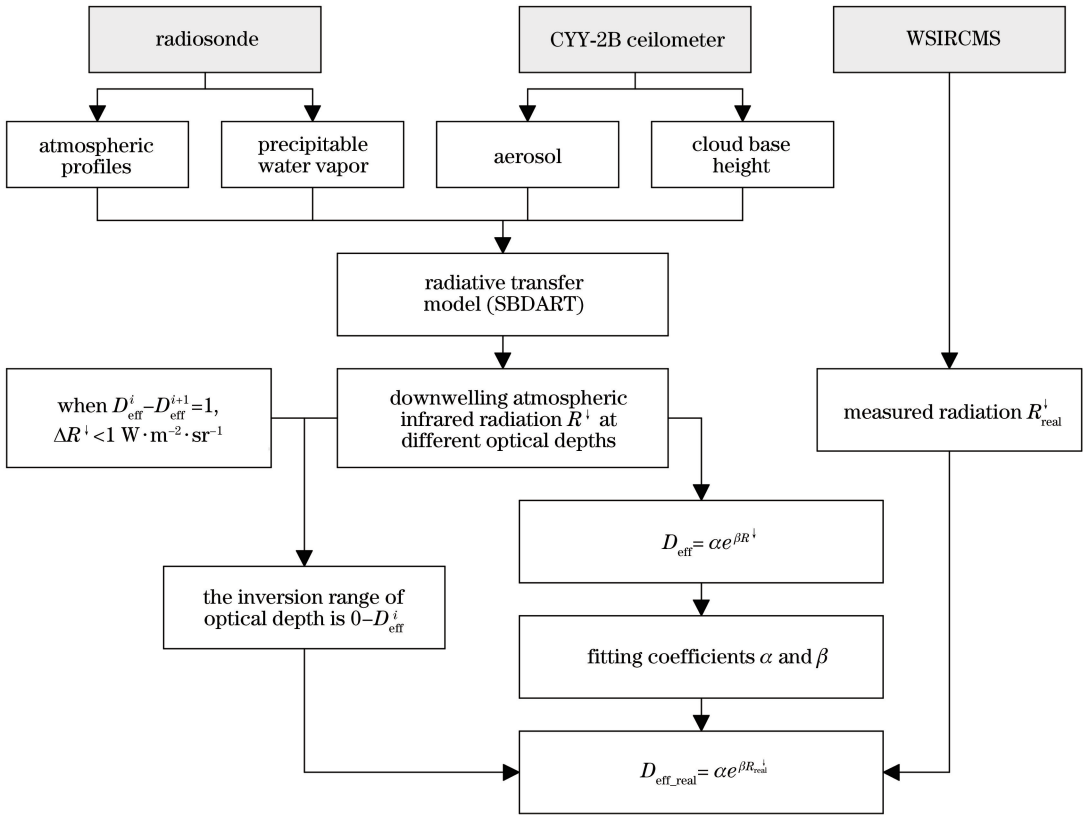


图 2 云光学厚度的反演流程

Fig. 2 Inversion process of cloud optical depth

反演流程如下:

1) 对无线电探空仪探测的 1997—2012 年共 16 年的探空资料进行统计,得到适用于北京地区的大气廓线及水汽含量。其中,湿度廓线及水汽含量利用马格努斯方程和离散化水汽含量计算公式计算得到。

2) 可以通过 SBDART 模式自带的算法根据 550 nm 波长处的气溶胶光学厚度廓线计算得到任意波长处的气溶胶光学厚度廓线,因此,在 SBDART 中代入气溶胶信息时,气溶胶参数 iaer 须为 550 nm 波长处的气溶胶光学厚度廓线。本文首先将 CIMEL 系列太阳光度计测得的 3 个气溶胶波段(440, 870, 1020 nm)的气溶胶光学厚度廓线代入 Ångström 公式;然后采用最小二乘法进行拟合,得到系数;之后对 910 nm 处的激光消光廓线进行积分,得到每层气溶胶的光学厚度,将其代入 Ångström 公式即可得到 550 nm 波长处的光学厚度廓线。在得到气溶胶光学厚度廓线后,可结合辐射传输模式 SBDART 自带的单散射反照率和勒让德矩阵得到适用于北京地区的实时状况下的气溶胶

信息。

3) 利用激光云高仪通过激光云底高可靠性标记方法得到适用于北京地区的实时状况下的云底高。

4) 将以上获取的大气廓线、水汽含量、气溶胶、云底高自定义参数及其他参数代入辐射传输模式 SBDART,模拟得到实时天气状况下云的光学厚度 D_{eff} 与大气向下红外辐射 R^i 之间的对应关系,并采用非线性拟合法求得拟合系数 α 、 β 。其中,其他对大气向下红外辐射影响较小的大气控制参数均采用模式默认值。之后,采用误差分析法确定云的光学厚度反演范围,具体方法见第 3 节。

5) 利用地基红外测云仪 WSIRCMS 实时测得的大气向下红外辐射 R_{real}^i 、云的光学厚度反演范围及(1)式,即可反演云的光学厚度。

3 反演范围的确定

当云底高度相同时,辐射值随光学厚度的增大而增大,但当光学厚度超过一定阈值时,天顶方向的

向下红外辐射不再随光学厚度的增大而变化,此时,云近似为黑体,该阈值即为云近似为黑体时的光学厚度。云底高度越大,云近似为黑体时的光学厚度越小。因此,某一云底高度只能反演一定范围的光学厚度。由于红外测云系统本身的噪声为 $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$,在只考虑仪器误差的前提下,要满足光学厚度的反演误差小于 20%,即满足相邻两光学厚度差 $D_{\text{eff}}^{i+1} - D_{\text{eff}}^i = 1$ 时,对应的辐射值之差须大于 $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$;若对应的辐射值之差小于 $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$,则可确定该云底高度下的光学厚度反演范围为 $0 \sim D_{\text{eff}}^i$ 。

本文以北京冬季的大气状况为例,利用 SBDART 辐射传输模式,选取一系列不同的云底高

度,模拟了天顶方向的向下红外辐射与光学厚度的关系。由表 1 可知:当云底高度 $H = 1 \text{ km}$ 时,云光学厚度 $D = 6$ 和 $D = 7$ 下的辐射值只相差 $0.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$,不足 $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$;当云底高度为 $2 \sim 4 \text{ km}$ 时,云光学厚度 $D = 5$ 和 $D = 6$ 下的辐射值之差小于 $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$;当云底高度为 5 km 时,云光学厚度 $D = 4$ 和 $D = 5$ 下的辐射值相差 $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$ 左右;当云底高度为 $6 \sim 7 \text{ km}$ 时,云光学厚度 $D = 3$ 和 $D = 4$ 下的辐射值相差也不足 $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$;当云底高度不小于 8 km 时,云光学厚度 $D = 2$ 和 $D = 3$ 下的辐射值之差都不足 $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$ 。因此,设置了如表 2 所示的不同高度范围下光学厚度的反演范围。

表 1 不同云底高度和光学厚度下天顶方向向下红外辐射值的详细情况

Table 1 Downward infrared radiance at zenith under different cloud base heights and optical depths

Cloud base height /km	Radiance /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)										
	$D=0$	$D=1$	$D=2$	$D=3$	$D=4$	$D=5$	$D=6$	$D=7$	$D=8$	$D=9$	$D=10$
1	10.3	18.2	22.9	25.9	28	29.3	30.3	31.0	31.4	31.7	32.0
2	10.3	17.4	21.7	24.4	26.2	27.4	28.3	28.9	29.3	29.6	29.8
3	10.3	16.7	20.4	22.8	24.4	25.4	26.2	26.7	27.1	27.3	27.5
4	10.3	16	19.2	21.2	22.5	23.5	24.1	24.6	24.9	25.1	25.3
5	10.3	15.2	17.9	19.6	20.8	21.5	22.1	22.5	22.7	22.9	23.1
6	10.3	14.5	16.7	18.1	19.0	19.6	20	20.3	20.6	20.7	20.9
7	10.3	13.8	15.5	16.6	17.3	17.7	18.1	18.3	18.5	18.6	18.7
8	10.3	13.2	14.6	15.3	15.8	16.1	16.4	16.6	16.7	16.8	16.9
10	10.3	12.5	13.4	13.8	14	14.2	14.3	14.4	14.4	14.5	14.5
12	10.3	12.4	13.2	13.6	13.8	13.9	14	14	14.1	14.1	14.1

表 2 不同云底高度范围下光学厚度的反演范围

Table 2 Inversion range of optical depth for different cloud base heights

The range of cloud base height /km	≤ 2	2-5	5-6	6-8	> 8
The range of optical depth	0-6	0-5	0-4	0-3	0-2

4 反演结果分析及讨论

考虑到全天空中云分布的复杂性和多样性,而且同一时刻,全天空中可能存在多层云,为简单起见,本文只对单层云和两层云这两种简单情况进行讨论。

4.1 单层云的光学厚度反演

单层云的光学厚度反演以 2011 年 11 月 7 日 6:59 时测得的天空状况为例。由图 3(a)所示的全天空红外辐射分布可知,当前时刻天空中只有一层云。假定全天空的云底高均相等,利用激光云高仪反演该时刻前 5 min 内的云底高度时间序列,求平均后得到全天空的云底高为 1806.5 m,为低云。因此,云底高反演范围在 $0 \sim 6$ 区间内。利用

SBDART 模拟得到实时条件下光学厚度的拟合公式为

$$D_{\text{eff_real}} = 0.0048 \exp(0.2394R_{\text{real}}^{\downarrow}) \quad (2)$$

利用图 3(a)所示的全天空红外辐射分布及(2)式所示的拟合公式反演得到了实时条件下云的光学厚度分布,如图 3(b)所示。从图 3(b)中可以清晰地分辨出云的光学厚度分布,全天空以较厚的云为主,其光学厚度主要在 $5 \sim 6$ 之间。此外,该方法也能检测出大量的薄云,可以有效弥补卫星资料在检测薄云、透明云和反演特性方面的不足,提高薄云、透明云的检测能力。

4.2 两层云的光学厚度反演

两层云光学厚度的反演以 2011 年 11 月 7 日 2:44 时测得的天空状况为例。由图 4(a)所示的

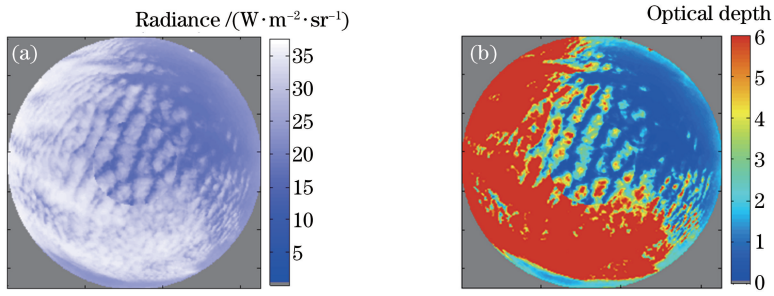


图3 单层云情况下的全天空红外辐射分布和全天空光学厚度分布。(a)全天空红外辐射分布;(b)全天空光学厚度分布

Fig. 3 All-sky infrared radiation distribution and all-sky optical depth distribution in the case of single-layer cloud. (a) All-sky infrared radiation distribution; (b) all-sky optical depth distribution

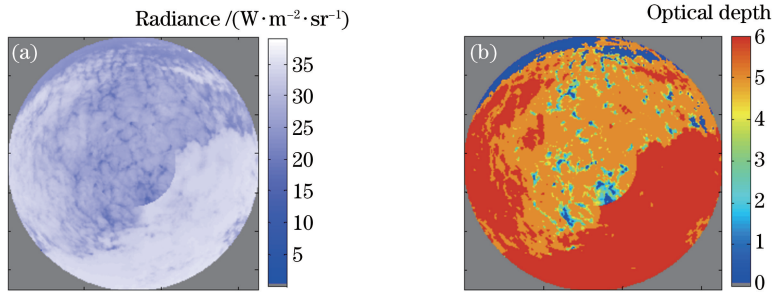


图4 两层云情况下的全天空红外辐射分布和全天空光学厚度分布。(a)全天空红外辐射分布;(b)全天空光学厚度分布

Fig. 4 All-sky infrared radiation distribution and all-sky optical depth distribution in the case of two-layer cloud.

(a) All-sky infrared radiation distribution; (b) all-sky optical depth distribution

全天空红外辐射分布可以明显看出,天空中存在两层云,假定全天空较低层云的云底高相等,较高层云的云底高相等,则由激光云高仪反演的两层云的云底高分别为 1178.5 m 和 3256 m,分别为低云和中云,它们对应的云底高反演范围分别为 0~6 和 0~5 内。因此得到的光学厚度拟合公式分别为

$$D_{\text{eff_real}}^{\text{low}} = 0.0029 \exp(0.2960 R_{\text{real}}^{\text{low}}), \quad (3)$$

$$D_{\text{eff_real}}^{\text{med}} = 0.0052 \exp(0.2369 R_{\text{real}}^{\text{med}}). \quad (4)$$

对于天空中有两层以上云的情况,首先利用辐射阈值法将全天空有云像素点的辐射值进行分类。本文以 2.5 km 云底高处的辐射作为阈值,将全天空云辐射分为中云辐射和低云辐射,并通过低云和中云的光学厚度拟合公式(即(3)式和(4)式)反演得到两层云的光学厚度,结果如图 4(b)所示。与全天空红外辐射分布一样,在图 4(b)中也能很明显地区分中云和低云,中云的光学厚度为 5,低云为 6 左右,且在中云中存在云的边缘和缝隙,光学厚度在 2~4 范围内。可见,利用所提方法反演得到的全天空云的光学厚度分布与实际全天空云的红外辐射分布具有良好的一致性。

5 结 论

本文提出一种利用地基红外测云仪 WSIRCMS 和激光云高仪 CY-2B 相结合反演云光学厚度的

方法。由反演原理可知,云的光学厚度与大气向下红外辐射存在一一对应关系。反演误差主要来源于地基红外测云仪实测辐射、SBDART 模拟的拟合系数误差。其中,拟合系数误差与 SBDART 模式拟合反演曲线时采用的大气廓线、水汽、气溶胶、云底高等大气参数有关。本研究通过建立更精确的适用于特定地区和特定季节的大气廓线和水汽含量,利用激光消光廓线较精确地反演了气溶胶和云底高,减小了大气参数引起的辐射误差。由于仪器噪声能够引起辐射误差,因此本文针对不同高度的云确定了光学厚度反演范围:2 km 以下为 6,2~5 km 为 5,5~6 km 为 4,6~8 km 为 3,8 km 以上为 2。最后,本文对单层云和两层云这两种天空状况进行了讨论,认为利用云的光学厚度拟合曲线反演云的光学厚度具有可行性,反演得到的云的全天空光学厚度分布与全天空辐射分布具有较好的一致性,能够较清晰地分辨全天空不同高度云层的光学厚度。然而,光学厚度的反演目前暂局限于对薄云及简单云层的反演,对于较厚和复杂云层还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Zhang W X, Lü D R, Chang Y L. A feasibility study of cloud base height remote sensing by simulating

- ground-based thermal infrared brightness temperature measurements [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2): 354-363.
- 章文星, 吕达仁, 常有礼. 地基热红外亮温遥感云底高度可行性的模拟研究 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 354-363.
- [2] Sun X J, Wang X L, Li H. Atmospheric detection [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009.
- 孙学金, 王晓蕾, 李浩. 大气探测学 [M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [3] Boers R. Simultaneous retrievals of cloud optical depth and droplet concentration from solar irradiance and microwave liquid water path [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102 (D25): 29881-29891.
- [4] Leontyeva E, Stamnes K. Estimations of cloud optical thickness from ground-based measurements of incoming solar radiation in the arctic [J]. Journal of Climate, 1994, 7(4): 566-578.
- [5] Musat I C, Ellingson R G. The use of the ARM WSI to estimate the atmospheric optical depth at night [Z/OL]. [2020-01-02]. <https://metosrv2.umd.edu/~bobe/downloads/musat.pdf>.
- [6] Olmo F J, Cazorla A, Alados-Arboledas L, et al. Retrieval of the optical depth using an all-sky CCD camera [J]. Applied Optics, 2008, 47(34): 182-189.
- [7] Thurairajah B. Thermal infrared imaging of the atmosphere: the infrared cloud imager [Z/OL]. [2020-01-02]. <https://scholarworks.montana.edu/xmlui/bitstream/handle/1/2427/ThurairajahB04.pdf?sequence=1>.
- [8] Nugent P W, Shaw J A, Piazzolla S. Wide angle infrared cloud imaging for measuring cloud statistics in support of earth space optical communication [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6709: 67090F.
- [9] Nugent P W, Shaw J A, Piazzolla S. Infrared cloud imaging in support of Earth-space optical communication [J]. Optics Express, 2009, 17(10): 7862-7872.
- [10] Huo J. Inversion of cloud and aerosol parameters in ground-based all-sky imaging system and its application [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 2007.
- 霍娟. 地基全天空成像系统云与气溶胶参数反演及其应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007.
- [11] Sun X J, Gao T C, Zhai D L, et al. Whole sky infrared cloud measuring system based on the uncooled infrared focal plane array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 761-764.
- 孙学金, 高太长, 翟东力, 等. 基于非制冷红外焦平面阵列的全天空红外测云系统 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 761-764.
- [12] Sun X J, Chen F, Liu L, et al. Cloud identification combining threshold with texture [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(4): 397-402.
- 孙学金, 陈峰, 刘磊, 等. 阈值与纹理相结合的云识别方法 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(4): 397-402.
- [13] Liu L, Sun X J, Gao T C, et al. Comparison of cloud properties from ground-based infrared cloud measurement and visual observations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(6): 1171-1179.
- [14] Yin H. Atmospheric radiation foundation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993.
- 尹宏. 大气辐射学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [15] Liao G N. An introduction to atmospheric radiation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- 廖国男. 大气辐射学导论 [M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [16] Qin C. Study on infrared remote sensing method of cloud base height [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2010.
- 秦超. 云底高的地基红外遥感方法研究 [D]. 南京: 中国人民解放军理工大学, 2010.