

可见光/红外联合测云仪的研制及应用

刘磊^{1,2} 赵静³ 刘西川^{1,2} 赵世军^{1,2} 高太长¹

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国气象局高影响天气重点开放实验室(专项), 湖南 长沙 410073; 3. 北京聚恒博联科技有限公司)

摘要: 云是大气中热力过程和动力过程的外部表现, 同时也是水分循环的重要环节。云的形态、分布及其变化反应了局地天气状况和气候变化特征, 对军事活动、国民经济和社会服务等方面具有重要意义。为实现全天时、全天空的云量、云状、云底高等参数测量, 提出并研制了可见光/红外联合测云仪, 发展了相应的定标装置和定标方法, 已在内蒙古呼伦贝尔、湖南长沙、河南洛阳等多地进行应用和试验。

关键词 地基云观测; 红外; 可见光; 全天空成像

中图分类号: P414 **文献标识码:** A

Development and Application of Visible/Infrared All Sky Imager for Cloud

LIU Lei^{1,2}, ZHAO Jing³, LIU Xichuan^{1,2}, ZHAO Shijun^{1,2}, GAO Taichang¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2 Key Laboratory of High Impact Weather(special) of CMA, Changsha 410073, China; 3 Beijing Joinuser Technology Co., Ltd., Beijing, 100097, China)

Abstract : Clouds are the external manifestation of thermal and dynamic processes in the atmosphere, as well as an important link in the water cycle. The form, distribution, and changes of clouds reflect local weather conditions and climate change characteristics, and have significant implications for military activities, national economy, and social services. To achieve the measurement of cloud cover, cloud type, cloud base height and other parameters throughout the day and sky, a visible light/infrared joint cloud measurement instrument has been proposed and developed, and corresponding calibration devices and methods have been developed. It has been applied and tested in many places such as Hulunbuir in Inner Mongolia, Changsha in Hunan, and Luoyang in Henan.

Keywords: Ground-based Cloud Observation; Infrared; Visible; All-sky Imager

1 引言

云的变化决定了地表系统的辐射收支平衡状况, 不同类型的云反映出大气运动中不同形态、云物理结构和天气特征^[1]。在云的宏观参数中, 云量、云高、云状是主要的观测要素, 其中, 云量的多少反映区域天气和气候特征, 云底的高低决定了云的分类以及降水的概率。因此, 云的观测在天气预报、航空、军事保障等领域起着显著的作用和意义。长期以来, 地基云的宏观参数观测依靠人工目测为主, 存在主观性强, 精度不高, 连续性差, 且人工观测

代价大，给云的观测资料应用也带来不变等诸多弊端。近年来，随着成像技术和数字图像处理技术的迅猛发展，地基云的自动化观测技术逐渐成熟，国内涌现出一批典型的自研地基云观测仪器逐渐取代早期的人工观测。如，国防科技大学气象海洋学院发展了非致冷红外焦平面测云技术^[2]，基于旋转扫描方式实现了昼夜连续的云参数测量，但没有可见光通道且扫描观测可能会导致测量的天空中云不连续。江苏省无线电科学研究所有限公司与中国科学院大气物理研究所合作研发的 WUSHSR 型双波段云量观测仪^[3]，基于红外、可见光模组联合观测，通过物理特征统计的方法实现云量的综合识别，但红外通道采用辐射计测量，分辨率很低；中国科学院安徽光学精密机械研究所研发的 ASC200 型地基双波段全天空云量观测仪^[4]结合高动态范围（HDR）图像合成技术实现可见光全天空成像，采用大面阵的红外热像仪在 8um~14um 红外波段成像，但主要进行了云量识别，没有进行图像的像素级融合以及云状和云底高测量。

针对这一现状，本文设计并研制了可见光/红外双通道联合测云仪（Visible/Infrared All Sky Imager for Cloud，以下简称 VIASIC），利用精密曝光控制的可见光面阵 CMOS 图像传感器和氧化钒非制冷红外焦平面探测器对全天空进行实时成像，根据多曝光融合算法获得清晰高动态的天空可见光图像，通过深度学习完成可见光云量检测与云状分类；通过拍摄黑体红外图像和天空红外图像，两者相减获得“纯净”的天空红外图像，然后结合全场定标系数矩阵、黑体实时温度和晴空背景辐射获得红外云量和云底高检测结果。基于此研制了双通道联合测云仪样机，并通过定标试验和外场试验验证了仪器的准确性。

2 仪器组成与测量原理

2.1 VIASIC 仪器构成

VIASIC 由测量分系统、防护分系统和数据处理终端组成，如图 1 所示。其中，测量分系统通过接收数据处理终端发送的命令，控制各功能单元执行相应的动作，实现天空可见光、红外图像和地面环境要素等信息的自动连续采集、测量和传输；防护系统为测量分系统提供安装支撑以及在低温、吹雪、强日照等恶劣环境下的防护；数据处理终端与测量分系统进行命令交互和数据传输，进行图像数据处理、降水信息的提取和存储等，通过终端计算机和应用软件来实现云量和天空类型的反演。

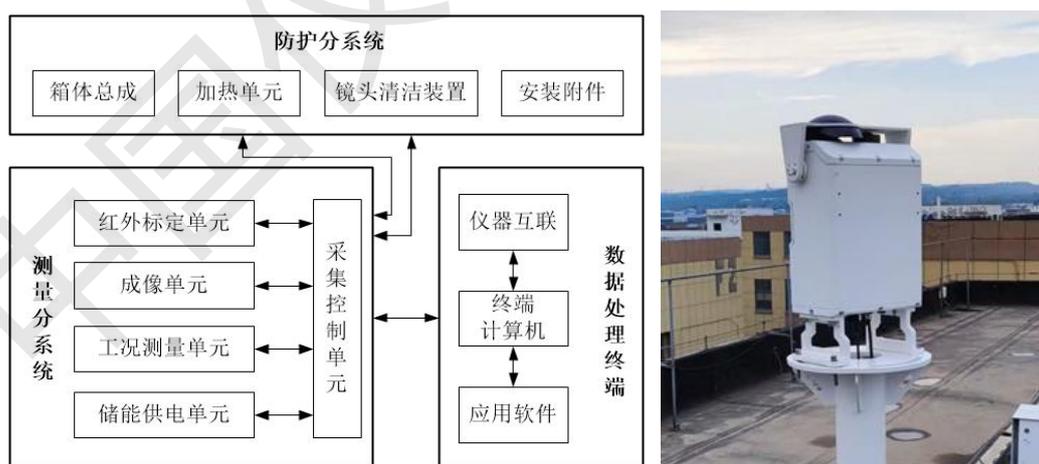


图 1 双通道联合测云仪组成框图及实物图

Fig.1 The Framework and picture of Visible - Infrared All Sky Imager for Cloud (VIASIC)

测量分系统由红外标定单元、成像单元、工况测量单元、储能供电单元、**采集控制单元**组成，其作用是可见光成像提供高动态范围云图、为红外成像提供消噪后的全天空云图、保证整个系统连续、一致和稳定的采集测量。由于常用的红外相机内置挡片的技术体制以及

单曝光时常拍摄技术手段等不能满足本仪器的图像质量要求,本文设计了基于设备外黑体的红外定标装置,通过对电机的控制实现红外相机对黑体和天空的依次成像,并采用外黑体图像与天空云图图像相减的方式,得到消除镜头热噪声辐射后的“纯净”天空图像。成像单元实现可见光和红外波段的天空图像的获取,可见光成像单元视场角达 180° , 配备 4608×3288 分辨率的 CMOS 图像传感器; 红外成像单元视场角 $155^{\circ} \times 122^{\circ}$, 图像分辨率 1280×1024 。工况测量单元采集为云参数的反演计算提供温湿度数据,以及太阳高度角的计算提供授时和方位。储能供电单元由 AC/DC 模块和储能电源板组成,为仪器工作提供所需的二次电源。采集控制单元是测量分系统的核心,由 ZYNQ 模块、可见光/红外采集模块、副板采集控制、以太网通信等配套电路组成,主要实现与数据处理终端的命令和数据交互,协调控制成像单元、红外标定单元和工况测量单元有序工作,实现天空可见光、红外图像和其他测量要素的全天候连续、自动采集和传输。ZYNQ 芯片主要包括 PS 处理部分和 PL 可编程逻辑部分。PL 可编程逻辑部分主要实现数据采集和信号路由功能,PS 处理部分主要实现数据处理、功能控制和以太网通信功能。

防护分系统由箱体总成、加热单元、镜头清洁装置和安装附件组成,实现测量分系统的定位与安装,有足够的强度和可靠的密封性,为测量分系统提供稳定的运行环境。低温环境下实现仪器的内腔加热,开启低温防护功能。清洁毛刷对镜头的尘土、吹雪进行清洁,具备除冰功能。

数据处理终端由终端计算机和相关应用软件组成,主要实现图像数据的进一步处理、标定参数的进一步运用以及云参数信息的反演计算等功能。包括可见光图像的多曝光融合、可见光云图的预处理以及深度学习 Unet 图像分割模型等处理; 红外图像的预处理(“纯净”天空云图)、晴空及不同云高辐射阈值的实时模拟、云点检测以及红外云量、云高的统计计算等处理。

本仪器具体结构组成如图 2 所示。



图 2 仪器结构组成示意图

Fig.2 The framework of Instrument structure composition

2.2 工作原理

VIASIC 采用红外、可见光双模组的同步测量,根据日出日落时间控制可见光昼夜工作模式交互,进而实现云量、云状和云底高的昼夜连续自动化测量。通过可见光相机对天空成像进行日间的云量和云状检测,采用自动化曝光时长控制,连续拍摄 7 张单曝光云图,结合多曝光融合技术合成高动态范围 HDR 可见光云图,再通过 pytorch 框架运用深度学习 Unet 图像分割模型进行云量、云状的检测与识别。

通过红外相机对天空成像进行全天候的云量和云底高检测,红外图像通过采集的外黑体图像与天空云图图像相减得到“纯净”天空云图,结合实时采集的温湿度及经纬度数据送入到大气辐射传输模式中模拟全天空视场范围内的晴空及不同云高辐射阈值,从而进行云点检测,实现红外云量、云高的检测与计算。

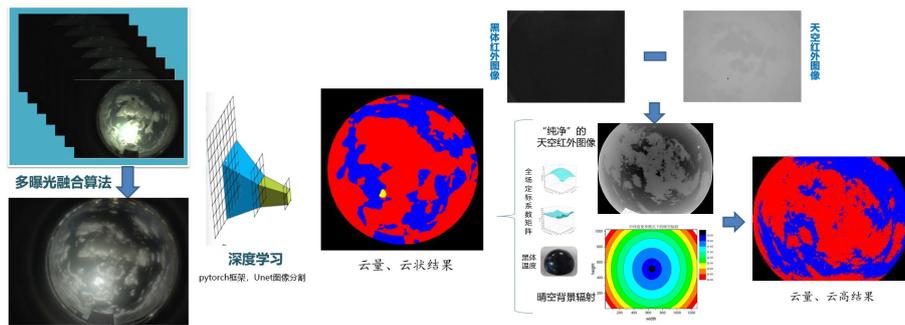


图 3 双通道联合测云仪工作原理示意图

Fig.3 The Framework of Working principle

3 定标设备及方法

3.1 相机标定设备及方法

为确定空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系，必须建立相机成像的几何模型，这些几何模型参数就是相机参数。相机标定即从世界坐标系转换为相机坐标系，再由相机坐标系转换为图像坐标系的过程，从而获得相机内参、外参的投影矩阵。棋盘是一块由黑白方块间隔组成的标定板，通常被用作相机标定的标定物，但对于复杂、高精度的三维物体定标精度差。本文设计了针对 VIASIC 相机的三维标定工装，该工装由三块尺寸相同的铝合金板组成一个空间直角三维坐标系的，且每个角均为 90° 直角，每块铝合金板上有等间距的螺钉孔和螺钉用于标定计算输入的空间坐标。三维标定工装详见图 4。



图 4 三维标定工装示意图

Fig.4 Diagram of 3D calibration tool

在明确物的位置在世界坐标系的表示值到相机坐标系的表示值之间的关系为三维到三维的转换，即通过世界坐标系的旋转 (R)、平移 (C)，获得世界坐标系中物(X_w, Y_w, Z_w)在相机坐标系中的表示值(X_c, Y_c, Z_c)，为相机外参。再根据小孔成像原理，描述物体成像过程模型(从物的位置确定像的位置)，即明确物在相机坐标系的位置表示值(X_c, Y_c, Z_c)到像在图像坐标系的位置表示值(u, v)，即求解相机内参。基于以上原理，通过 Tsai 两步标定法，根据径向排列约束求解大部分模型参数，再通过非线性搜索方法求解光心位置、有效焦距等参数，最后建立图像像素与相机坐标系的空间映射关系，从而得到物体在世界坐标系中的俯仰角与方位角。

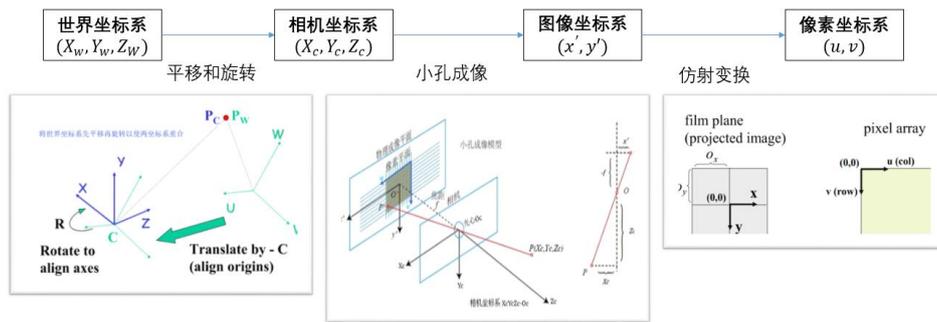


图 5 相机标定原理示意图

Fig.5 Diagram of Camera calibration principle

3.2 辐射响应标定设备及方法

为实现云的定量观测，特别是云底高的反演，必须对非制冷红外焦平面阵列进行定标，以便准确测量天空向下红外辐射。非均匀性问题是制约红外成像单元性能的最主要原因，引起红外成像非均匀性的原因有探测器各像元响应不一致、 $1/f$ 噪声等。为提高成像质量和探测性能，必须进行非均匀性校正。本文设计了半球型红外成像辐射响应标定工装，模拟红外成像模块真实视场的均匀辐射，在实验室实现红外成像模块全场标定。半球型红外成像辐射响应标定工装由黑体半球、搅拌电机、测温探头、加热管和温控箱组成，能够完成测温、加热、搅拌混合操作。同时配备外置制冷机组，通过制冷机组进行制冷，利用循环液态水的方式对黑体半球内部的水进行循环降温，以达到降温效果。

红外成像单元工作时，成像质量会不可避免的受到镜头热辐射的影响，从而降低测量精度。为此，VIASIC 设计均温黑体面源模组作为红外实时标定单元，配套实验室全场标定参数，对天空红外图像进行实时定标。



图 6 半球型红外成像辐射响应标定工装示意图

Fig.6 Diagram of Hemispherical infrared imaging radiation response calibration tool

根据斯特潘-波尔兹曼定律，黑体辐照度(单位: W/m^2)可表示为:

$$F = \sigma T^4$$

σ 为斯特潘-波尔兹曼常数，通常记作: $5.671 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$ ，根据辐射强度定义从而得到黑体辐射强度；由基尔霍夫定理可知，物体（表面）实际发射的辐照度 F 实际小于黑体的辐照度 F 理论，定义物体在温度 $T(K)$ 、波长 λ 处的辐照度与同温、同波长下的黑体辐照度的比值为发射率，即：

$$\epsilon' = \frac{F_{\text{实际}}}{F_{\text{理论}}}$$

结合半球型标定工装和均温黑体面源的发射率，确定其对应的实际出射辐射，利用最小二乘法建立图像灰度像素值与辐射强度的响应关系，从而得到全场定标系数矩阵。

4 实验结果分析

利用该仪器在多地进行了外场观测实验，采用 Reda 和 Andreas 算法^[5]以 VIASIC 相机的成像时间和设备安装地经纬度信息作为输入，计算太阳天顶角和方位角。以 2023 年 10 月 25 日内采集到不同时次的云图为例，计算当天 06:00~18:00 每一秒的太阳天顶角和方位角，并通过相机标定得到的空间映射关系，得到太阳在图像中的位置，合成一天的太阳运动轨迹曲线。为了清楚地显示合成太阳轨迹和观测太阳位置之间的差异，将合成太阳曲线绘制到当天捕获的历史查询软件中，通过查询历史数据滚动查看合成太阳轨迹与观测太阳的准确性。如图 7 所示，以下时间分别为 9:20、12:10、16:50 的可见光、红外图像与太阳运动轨迹合成图，由图可知，上排为可见光图像观测到的太阳位置基本在绘制的太阳运动曲线上移动，下排为红外图像观测到的太阳位置与太阳运动曲线存在一个系统固定偏差，后通过三维标定工装重新标定选点减小误差。总体而言，通过上述试验证明了合成太阳轨迹的准确性，相应的表明相机标定参数是准确的，所提出的自研设计的三维标定工装建立空间映射关系的方法对可见光和红外相机都是有效的。

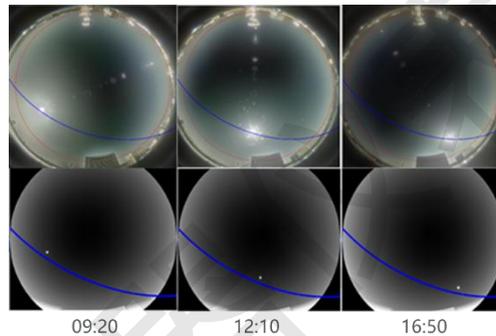


图 7 2023 年 10 月 25 日拍摄的可见光和红外全天空图像上的合成太阳轨迹(蓝线)

Fig.7 Synthetic sun trajectory (blue line) on visible and infrared all-sky images captured on 25th October 2023

根据以往研究^[6,7]，晴空辐射强度随天顶角增加而增加。在相机标定参数正确的基础上计算得到全天空红外图像的逐点天顶角角度，将其运用到 SBDART 大气辐射传输模式中实时模拟全天空晴空辐射，结合辐射响应全场标定系数计算实时采集的天空云图辐射，通过实测的天空云图辐射减去模拟的晴空辐射即可确定云点像素。进一步，通过模拟的不同高度下的云高辐射阈值确定云底高度。红外云量、云高结果分布如图 8 所示，a 为云外云图原始图像，b 为云检测结果（红色代表云点像素，蓝色代表天空像素），c 为云高计算结果（蓝色代表天空像素，白色代表云像素，颜色越白云层越高）。由图可知，对晴空辐射的实时模拟能够有效的从红外天空云图中去除，精细化的识别云像素，大部分云点能够正确被分类。当然了，对于一些卷云、云发射率较小的天空和云之间过渡区域的一些像素存在不能被正确分类的情况^[8-10]，但这些像素所占比例较小，对云量统计结果影响较小。同样的，对低云、中云、高云不同云底高度的辐射阈值的实时模拟能准确有效的对全天空云层高度进行有效划分，计算云底高度会存在误差，这是由云辐射强度、大气路径长度、水汽含量等因素综合导致。总的来说，辐射响应定标方法对从红外天空图像中进行有效的云检测是科学可行的。

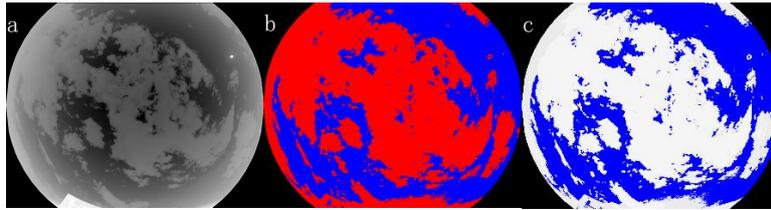


图 8 红外云图云量、云高检测结果(a 红外云图, b 云检测结果, c 云高计算结果)

Fig.8 The results of cloud amount and cloud height detection (a- Infrared cloud image, b- cloud amount detection, c- cloud height detection)

基于 Unet 在图形学的分割处理能力^[11-12], 对不同天气、不同时间下的 VIASIC 可见光云图数据进行人工标注, 标注类别按照晴空、积状云、波状云、层状云、卷云以及其它复杂天空共 6 类进行, 构建地基云图数据集共 1283 张。训练集采用在图里河试验观测站 2023 年 12 月 20 日~2024 年 2 月 20 日共 63 天连续观测的可见光图像数据, 共 11070 张。云状分布结果如图 9 所示, 其中不同颜色代表不同云状[RGB(0,0,255)-晴空, RGB(200,200,200)-积状云, RGB(150,200,200)-波状云, RGB(200,200,150)-层状云, RGB(100,200,100)-卷云], 其它复杂天空通过云图中多种混合云状占比综合识别。云状准确性统计结果如表 1 所示, 由图表可知, Unet 模型可以给出云状分布范围及各云状的占比, 能够同时兼容云点检测与云状分类功能, 大大提高了本设备的运行时效。在定量分析中, 常规 5 大类的云状分类准确率除卷云准确率略低外, 其余准确率均在 80%以上, 达到理想效果, 同时还对混合云复杂天空的进行了检测延拓, 分析设备云识别的适应性得到初步效果, 后续对其继续优化。总体上分类准确率高 83%, 充分展现了分类准确性。

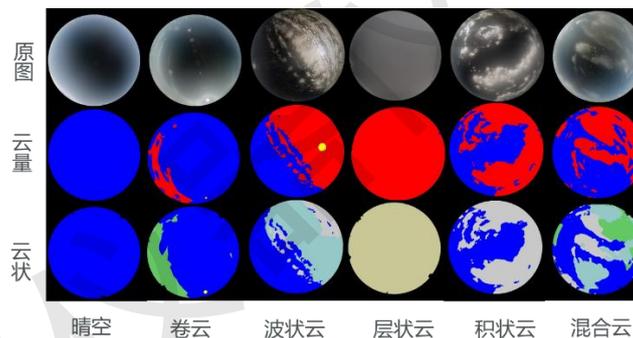


图 9 云状分布结果

Fig.9 The results of Cloud distribution

表 1 云状分类准确率统计

Tab.1 Accuracy statistics of cloud classification

分类类别	人工识别	算法识别	准确率%
积状云	415	372	89.63855
波状云	2276	1825	80.18453
层状云	356	322	90.44944
卷云	2764	1759	63.63965
晴空	4954	4936	99.63666
混合云	305	51	16.72131
总计	11070	9265	83.69467

综上所述, VIASIC 展现了昼夜全天空观测云量、云状、云底高的能力, 且从定性和定量分析的角度分别验证了红外、可见光云检测的准确性, 从而验证了本仪器在云宏观参数特征测量方面的有效性和准确性。

5 结论

本文针对人工影响天气、数值天气预报等对云宏观特征参量的测量要求,提出了一种基于宽视场面阵列非制冷红外焦平面测云技术和多曝光融合可见光图像处理技术对云的量、状、高等物理特征测量新方法,研制了具有自主知识产权的可见光/红外联合测云仪(VIASIC)。外场实验结果表明,VIASIC可以有效观测云量、云状和云高特征,太阳轨迹验证了本系统所提相机标定方法的可行性;红外云图的精细化检测验证了自研红外辐射响应标定工装及标定方法的可行性;云状分类与人工观测具有良好的一致性,云状分类总体准确率高达83%,验证了Unet图像分割模型的高效性与准确性。综上所述,各方面的试验结果很好的验证了VIASIC在地基云宏观观测方面的有效性和准确性,在人工影响天气、航空、航船气象研究等领域等方面有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 高太长,刘磊,赵世军,等.全天空测云技术现状及进展[J].应用气象学报,2010,21(1):101-109.
- [2] Liu, L., X.J. Sun, T.C. Gao, 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. 10.1175/jtech-d-12-00157.1.
- [3] 温强,陶法,刘达新,等.ASC200型地基双波段全天空云量自动观测仪云量对比分析[J].气象科技,2022,50(2):161-170.
- [4] 王依人,杨明,刘达新,等.双波段全天空云量观测系统研制及数据分析[J].光学学报,2023,43(6):0612001.
- [5] Reda, I.; Andreas, A. Solar position algorithm for solar radiation applications. Solar Energy 2004, 76, 577 - 589, doi:10.1016/j.solener.2003.12.003.
- [6] Aebi, C.; Gröbner, J.; Kämpfer, N. Cloud fraction determined by thermal infrared and visible all-sky cameras. Atmos. Meas. Tech. 2018, 11, 5549 - 5563.
- [7] Smith, S.; Toumi, R. Measuring Cloud Cover and Brightness Temperature with a Ground-Based Thermal Infrared Camera. J.Appl. Meteorol. Climatol. 2008, 47, 683 - 693.
- [8] Shaw, J.A.; Nugent, P.W. Physics principles in radiometric infrared imaging of clouds in the atmosphere. Eur. J. Phys. 2013, 34, S111 - S121.
- [9] Sun, X.; Qin, C.; Qin, J.; Liu, L.; Hu, Y. Ground-based infrared remote sensing based on the height of middle and low cloud. J.Remote Sens. 2012, 16, 166 - 173.
- [10] Wang, Y.; Liu, D.; Xie, W.; Yang, M.; Gao, Z.; Ling, X.; Huang, Y.; Li, C.; Liu, Y.; Xia, Y. Day and Night Clouds Detection Using a Thermal-Infrared All-Sky-View Camera. Remote Sens. 2021, 13, 1852.
- [11] 徐成鹏,曹勇,张恒德,等.U-Net模型在京津冀临近降水预报中的应用和检验评估.气象科学,2022,42(6):781-792.
- [12] 张延彪,陈明轩,韩雷,等.数值天气预报多要素深度学习融合订正方法.气象学报,2022,80(1):153-167.