第16卷第5期	气 候 与 环 境 研 究	Vol. 16	No. 5
2011 年 9 月	Climatic and Environmental Research	Sept.	2011

汤金平,王普才,夏祥鳌. 2011. 基于地基宽带辐射观测资料的云检测算法改进 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 609-619. Tang Jinping, Wang Pucai, Xia Xiang'ao. 2011. Modification of cloud-screening method using ground-based broadband shortwave irradiance measurements [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 609-619.

基于地基宽带辐射观测资料的云检测算法改进

汤金平 王普才 夏祥鳌

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室,北京 100029

摘 要 利用地表太阳总辐射和散射辐射对 Long and Ackerman (2000) 的云检测算法进行了改进,提高了 云判别的准确率。首先采用比值概率密度峰值法,初步选出晴天时刻。然后根据晴天时刻的地表太阳总辐射和 太阳天顶角余弦值, 拟合得到该日晴天总辐射近似表达式。在此基础上, 计算各时刻实际观测值与用该拟合式 估计的总辐射的比值,并再次利用比值概率密度峰值法,判断该时刻的天空状况。最后利用全天空成像仪观测 资料和站点天气记录结果检验算法,结果表明,在天顶角小于75°条件下,本算法判断准确率平均达90.9%。 改进的云检测算法减少了因水汽柱总量、气溶胶浓度和系统测量偏差的日变化及天顶角变化造成的误差。应用 该检测算法,得到了香河和太湖两地云日发生频率并分析了云地表辐射强迫季节变化特征。两地云出现频率和 云地表短波辐射强迫均夏季最大,春秋次之,冬季最小,太湖站云出现频率的季节变化幅度不及香河。香河云 地表短波辐射强迫年平均为-39.5 W ⋅ m⁻²,春夏秋冬季节平均分别为-25.9 W ⋅ m⁻²、-70.9 W ⋅ m⁻²、 -51.1 W·m⁻²、-10.8 W·m⁻²。太湖云地表短波辐射强迫年平均为-66.2 W·m⁻²,春夏秋冬季节平均分 别为-84.6 W·m⁻²、-89.1 W·m⁻²、-50.2 W·m⁻²、-44.1 W·m⁻²。 辐射 云检测 概率密度峰值 云辐射强迫 关键词 **文章编号** 1006 - 9585 (2011) 05 - 0609 - 11 文献标识码 A **中图分类号** P401

Modification of Cloud-Screening Method Using Ground-Based Broadband Shortwave Irradiance Measurements

TANG Jinping, WANG Pucai, and XIA Xiang'ao

Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A modified automatic cloud-screening method is developed using 1-min measurement of surface downwelling shortwave global and diffuse irradiance. Clear skies are detected firstly by peak frequency density of ratio (PFDR) method. Then the detected clear-sky irradiance measurements are used to fit the expected clear-sky irradiance as the function of the cosine of the solar zenith angle by the least squares fitting method. Afterwards, the PFDR method is applied to the ratio of observed total shortwave irradiance to the predicted values for the cloud-free sky condition with the fitting expression. The clear sky detection method is verified using Total Sky Imager data and observer reports. The result shows that the average accuracy is 90.9% for the solar zenith angle less than 75°. For

收稿日期 2009-11-30 收到, 2011-05-11 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40875084、40775009,国家重点基础研究发展计划项目 2006CB403702,中国科学院知识创新工程 重要方向项目 KZCX2-YW-QN201

作者简介 汤金平,女,1985年出生,硕士研究生,主要从事气溶胶和云的气候效应研究。E-mail: tangjp@mail.iap.ac.cn

the modified cloud-screening method, the uncertainties due to both diurnal changes in such variables as column water vapor, aerosol loading, systematic pyranometer offsets, and solar zenith variables are diminished. Cloud occurring frequency and cloud radiative forcing (CRF) on downward shortwave irradiance at ground are calculated based on the clear sky detection results for Xianghe and Taihu. The cloud occurring frequency and the CRF show a distinct seasonal variation with maximum in summer and minimum in winter. The annual average of CRF is $-39.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in Xianghe and $-66.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in Taihu. The seasonal average of CRF in Xianghe is $-25.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in spring, $-70.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in summer, $-51.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in autumn, and $-10.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in winter. And the seasonal average of CRF in Taihu is $-84.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $-89.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $-50.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, and $-44.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively, from spring to winter.

Key words irradiance, cloud detection, peak frequency density, cloud radiative forcing

1 引言

云对地气系统的能量收支和大气环流起着重 要的调节作用。云不但增加行星反照率,还吸收 和发射长波辐射(Ramanathan et al., 1989)。云 对地球的作用平均来看是使地表温度降低。当气 候系统有扰动时,云量会发生变化,导致云辐射 强迫变化,对气候系统形成反馈作用(Potter et al., 1981)。云的气候效应与云高、云水含量、 云的垂直分布及云与气溶胶的光学厚度有关 (Hartmann et al., 1992; Liang and Wang, 1997; 霍娟和吕达仁,2009)。低云对地球能量净收支影 响最大 (Platt, 1989)。此外, 云还影响辐射加热 的水平和垂直分布,进而影响大气环流。低云能 增加大气环流的强度,使对流区域面积显著缩小 (Peters and Bretherton, 2005)。目前, 云与气候 之间的反馈关系的定量表达还有很大的不确定性。 一方面, 云量和云类型的发生频率及分布时空变 化很大。Kaiser (2000) 分析了 1951~1994 年间 中国大部分地区云量的变化,表明中国地区云量 呈下降趋势,中国东部和东北部云量下降显著, 每10年降低1%~3%。1960~2000年,前苏联 地区高云出现频率增加而低云减少;美国高云和 低云出现频率都增加(Sun et al., 2001)。另一方 面,云的高时空分辨率、客观的观测仍需发展。 现阶段,云的识别主要由地面气象站的气象员观 测。这些观测包括云的类型、云量和云底高,但 观测时的主观性很大,在能见度小的情况下观测 误差很大。云物理特性也可以由全天空成像仪 (Total Sky Imager, TSI)、地面激光雷达和星载 激光雷达反演。这些仪器可以自动地检测云,有 很高的时间分辨率,但成本很高,维护也相对比 较复杂。云还可以由观测的地表太阳总辐射反演, 有些反演方法有很高的时空分辨率,可判断每分 钟天空状况,适用于有辐射观测的地面站。自动 的云检测算法为客观、高时空分辨地观测云提供 了有效途径。

目前, 云的自动检测算法主要有 3 种: 一是 利用卫星资料的多通道反射率、亮温和亮温差等 检测云。Ackerman et al. (1998) 利用 MODIS 的 多通道信息区分云天和晴天;二是利用全天空成 像仪图像的红蓝光之比检测云; 三是利用白天地 表观测的太阳总辐射和散射辐射设定阈值检测云: Conant et al. (1997) 提出对于某一特定天顶角, 大气透过率的概率密度在晴天时呈现高而窄的峰 值,在云天无明显的峰值。这种方法减少了气溶 胶和水汽日变化对算法的影响,但未考虑太阳天 顶角变化。在天顶角大于 45°时,单位天顶角内地 表太阳总辐射的变化很大,这种变化与云引起的 地表太阳总辐射的变化接近,使得大气透过率的 概率密度分布因无明显峰值而不能检测出晴天。 若要提高算法的应用范围,必须减小太阳天顶角 的影响。Long and Ackerman (2000) 开发了基于 地表太阳总辐射和散射辐射资料的晴天检测算法。 此方法将观测的地表太阳总辐射乘以一个换算系 数, 使一天内的地表太阳总辐射处在一个值附近, 然后确定换算后的地表太阳总辐射的上下界来判 断天空状况。这种换算方法减小了太阳天顶角的 影响,但换算系数和判别标准是长时间序列统计 资料的平均结果,不能反映气溶胶和水汽的日变 化的影响。Cess et al. (1991)的数据分析表明, 到达地面的晴天小时平均地表太阳总辐射和太阳 天顶角余弦有很好的线性关系。Khatri and Takamura (2009) 提出多项式归一化的判别方法。这 种方法用五次多项式拟合了地表太阳总辐射与太 阳天顶角余弦间的关系。根据实际观测的总辐射 与多项式拟合的总辐射的比值标准差在晴天时较 小来检测云。这种方法也减少了太阳天顶角的影 响,但是五次拟合多项式是长时间干洁晴天资料 的统计结果,未包含气溶胶和水汽变化的信息, 对经常出现污染和水汽变化比较大的地区难以适 用。Duchon and O'Malley (1999) 应用观测的辐 射与模式模拟的晴天辐射判别云的类型。先用模 式模拟的晴天辐射资料乘以换算系数使其等于 1400 $W \cdot m^{-2}$, 然后将每一时刻的换算系数乘以 观测的总辐射,根据21 min 内换算后的总辐射的 标准差和换算后总辐射与模式模拟总辐射之比的 分布确定云的类型。模式中水汽和气溶胶是统计 平均结果。这4种方法都有效地减小了太阳天顶 角的影响,但都未考虑气溶胶和水汽日变化的影 响。当气溶胶或水汽含量较高时,晴天会被误诊 断为云天。云识别算法若要提高识别准确率和扩 大适用范围就必须抓住云、气溶胶和水汽的快速 变化。

本文应用地表观测的太阳总辐射和散射辐射 数据,开发了比值概率密度峰值法,可判断日间 太阳天顶角 80°以内每分钟天空的状况。方法中应 用的动态阈值减少了太阳天顶角、气溶胶和水汽 变化的影响,对大天顶角、气溶胶和水汽浓度高 的情况适用性更好。这种高时间分辨率的云识别 算法可有效地区分云天和晴天,为反演气溶胶光 学特性和计算云在地面的辐射强迫提供了前提 条件。

2 数据来源

本文使用的观测数据来自中国科学院大气物 理研究所香河大气综合观测试验站的云—气溶胶 一辐射观测平台和太湖观测站。香河站(39°47'N, 116°57'E),位于河北省香河县,海拔高度约95 m,距北京市四环路50 km。观测场内地面平坦, 周围没有高大建筑物。香河辐射观测平台是我国 最先进的辐射观测平台,其与美国马里兰大学合 作,装备了全套高标准辐射观测仪器,包括太阳 宽带光谱辐射仪器和TSI。这些仪器的安装高度 超过 6 m,观测数据经过严格质量控制,符合国际基准地面辐射网络(Baseline Surface Radiation Network, BSRN)的质量标准并加入了该网络,实现数据全球共享。太湖站气象观测场(31°25′N, 120°12′E)建于太湖湖泊生态系统站内,位于太湖东岸、无锡市郊区,海拔高度 20 m,辐射观测站场地开阔,周围没有遮蔽物的影响。

611

2.1 太阳宽带辐射资料

太阳宽带总辐射、直接和散射辐射分别由 CM21、直接辐射表(NIP)和散射辐射表(Black & White) 仪器观测。NIP 和 Black&White 都安 装在太阳跟踪器上,分别测量太阳直接和散射辐 射。这些辐射表在安装前都已做过标定,并且还 按观测规范定期进行标定。辐射表热结点通过探 测器和玻璃罩之间的热红外交换损失能量,而使 观测量出现系统偏低,即出现"零漂移"。这部分 漂移可由夜间的测量获得, 夜晚测量的漂移一般 偏低 3 $W \cdot m^{-2}$ 。本文中使用的数据经过较严格的 质量控制和检验,采用了 BSRN 和大气辐射测量 (Atmospheric Radiation Measurement, ARM) 推 荐的质量控制方法,确保每个仪器都能滤去因任 何漂移而产生的偏差。两台总辐射计的测量以及 直接辐射和散射辐射测量之和的关系可用来检测 数据的准确度(Ohmura et al., 1998)。虽然这些 仪器是由不同公司生产的,有不同的灵敏度,但 除了很少的由于水平漂流引起的波动外,它们的 不一致性低于 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.2 全天空成像仪资料

实验站安装的 TSI 每分钟自动记录天空状况 的图像。TSI 的天空观测图像为验证晴天检测的 算法、区分云天和霾天提供了参考标准。TSI 观 测图像以 JPEG 格式存储,可用来分析云量和云 状。因为云的变化比气溶胶的变化要快,这些全 天空的快照可有效地区分云天和霾天。由于分辨 率和周围建筑物的影响,TSI 的有效视角为 160°, 即在天顶角大于 80°时数据不能用,因此本文提出 的算法仅在天顶角小于 80°的范围内进行了验证。

3 云检测算法

云对地表太阳总辐射有两方面作用。一般而 言,云对太阳辐射有遮挡作用,云的散射对地面 太阳辐射的增强不足以抵消云对太阳直接辐射遮 挡造成的减少,再考虑到云的部分吸收作用,总 体上会减少到达地面的太阳短波总辐射, 这称为 云的负效应。但有时候云对到达地表的太阳辐射 也有增强效果。例如云体没有挡住太阳视盘,也 就是太阳直射辐射没有任何减少,而云的散射作 用却会增加到达地表的散射辐射,因而总辐射会 增强,这称为云的正效应,尽管这种情况比较少。 基于此,确定地表太阳总辐射的上下阈值就可以 区分云天和晴天。然而,地面接收的总辐射不仅 受到云、气溶胶和水汽的消光作用的影响,还随 太阳天顶角、日地距离改变。若要根据地表太阳 总辐射区分晴天 (无云,但包括气溶胶在内)和 云天, 必须去除这些因素的影响, 只有这样算法 才能应用到有空气污染和大太阳天顶角观测的情 况。本文采用了比值概率密度峰值法解决了这个 难点。

Conant et al. (1997)指出晴天时大气透过率的概率密度分布会呈现一个峰值,在峰值附近的 大气透过率数据点对应着晴天时刻。因为在晴天, 即使有气溶胶和水汽,相对于云来说,大气透过 率变化幅度比较小并且随时间变化缓慢,大气透

过率的概率密度呈现狭窄的峰值;在云天,小扰 动也能产生透过率很大的变化,因此大气透过率 的概率密度分布会展宽很多。Conant et al. (1997) 算法未考虑太阳天顶角的影响,在天顶角 大于 45°时不能检测云,因为太阳辐射通量密度的 大气透过率与太阳照射的天顶角有关。本文改进 了该算法,提出了比值概率密度峰值法。比值是 观测的地表太阳总辐射与模式计算的晴天地表太 阳总辐射的比,该比值与 Conant et al. (1997) 采 用的大气透过率有相似性,在晴天时会呈现概率 密度峰值,不同的是比值减少了太阳天顶角的影 响,概率密度的峰值更大,峰值对应的比值更接 近1。图1给出了云检测算法的基本步骤:首先参 考 Long and Ackerman (2000) 的经验公式计算 晴天地表太阳总辐射,初步选出晴天时刻的点。 由于经验公式是长期统计的结果,不能反映气溶 胶和水汽的日变化。因此,集合初步挑选的一天 内所有晴天时刻,应用最小二乘拟合得到该日应 到达地表的晴天太阳总辐射,然后再重新检测。 拟合结果反映了当日气溶胶和水汽变化的影响, 提高了算法云识别的准确率。但这样的检测结果 还会有误判,所以应用统计实验修正结果。最后,



图 1 云检测算法流程图

Fig. 1 The flow chart of the algorithm of cloud detection

应用均方根误差检验拟合结果,并与经验公式的 结果作比较,如果拟合的误差更小,则用拟合的 地表太阳总辐射代替 Long and Ackerman (2000) 经验公式的计算实行循环检测,直到后一次的均 方根误差大于前次的则停止循环检测。

3.1 初步挑选逐日晴天时刻

根据 Long and Ackerman (2000)的经验公 式,晴天条件下,任意时刻地面接收的入射太阳 辐射通量

$$F_1 = \varepsilon \cdot S \cdot \mu^{1.31}, \qquad (1)$$

其中, S 是太阳常数, 本文取 1365 W·m⁻²; μ是 太阳天顶角 θ余弦值; ε 是地球轨道偏心率订正因 子。式中常数 1.31 基于大气辐射观测计划大量晴 天数据拟合得到。实际上,上面的经验公式不能 很好地拟合晴天观测数据,因为气溶胶和水汽的 逐日变化比较大,经验公式中的指数参数应当与 晴天条件下气溶胶和水汽含量有一定关系。

本文计算地面观测的太阳向下短波总辐射值 F_s 与 F_1 的比,记为 T_1 :

$$T_1 = F_{\rm s}/F_1, \qquad (2)$$

T₁与大气透过率类似,在晴天会表现明显陡峭的 峰值(如图2所示)。距离比值的概率密度峰值一 定范围内的时刻记为晴天。有些碎云和卷云可能 被当成晴天资料,在后面的统计检测中可被检测 出来。

3.2 拟合地表总辐射进行二次检测

利用 3.1 节中检测到的全部晴天时刻数据,



图 2 比值概率密度峰值法举例(2006年3月24日)。虚线距 概率密度峰值一倍标准差,用于界定晴天和云天数据集

Fig. 2 An example (24 Mar 2006) of the ratio frequency density peak method. The domain within the dashed lines denotes a standard deviation, which can separate the clear and cloudy data sets 采用最小二乘法拟合得到地面观测的太阳总辐射 与太阳天顶角余弦的关系式。本文进行了一次至 五次多项式拟合试验。然后利用均方根误差检验 拟合结果。结果表明:同样的晴天资料情况下, 除直接用 Long and Ackerman (2000)的方法误 差稍大外,一次至五次多项式拟合的误差相差都 较小,均可应用。但从计算的稳定性来看,多次 拟合结果受晴天时刻点的数量和分布影响很大, 如果某一天天空状况变化较快,由于多次拟合灵 敏度高,尤其是五次拟合,造成地表太阳总辐射 的曲线波动很大,不利于应用比值概率密度峰值 法,也不能应用到云的辐射强迫的计算中。一次 (直线)拟合最稳定,因此本文运用一次拟合进行 分析。

利用一次拟合系数乘以天顶角余弦值得到晴 天各时刻地表太阳总辐射,记为 F₂。然后计算 F_s 与 F₂的比值,计为 T₂。由于 F₂包含了检测当日 的气溶胶和水汽以及太阳天顶角变化的影响,因 此 T₂更好地分离了气溶胶和水汽以及太阳天顶角 变化的影响,使得每一时刻 T₂的变化主要受云的 影响,进而可以用于诊断云天和晴天。

本文阈值的选取借鉴了以往的算法,并基于 实际观测资料的分析做了改进。Conant et al. (1997)的算法中采用了所有挑取的晴天时刻的大 气透过率的标准差平均值作为衡量,阈值区间为 距离概率密度峰值位置一倍标准差范围。但本文 采用的比值经过了换算,它能更好地分离太阳天 顶角、气溶胶和水汽变化的影响。因此,本文的 算法要求有动态的阈值区间。实验结果表明,比 值的概率密度峰值大小和比值的标准差之间存在 着明显的反比关系(如图 3 所示)。二者关系可由 下式表示:

$$Y \propto X^{-1.2}, \qquad (3)$$

其中, *X* 是概率密度峰值的大小, *Y* 是比值的日标准差。

如用每日的比值标准差作为阈值衡量,在概率密度峰值较大或较小时,由于对应的标准差正相反从而误判。通过与TSI的资料对比发现,当概率密度峰值大于0.48时,对应的都是晴天,而此时的标准差最大为0.13,平均为0.02;当概率密度峰值小于0.06时,对应的都是云雨天,此时的标准差最小为0.19,平均为0.26。因此,根据



图 3 (a) 香河和 (b) 太湖地区比值的标准差和概率密度峰值之间的对应关系。虚线同图 2 Fig. 3 The relationships between the ratio standard deviation and the peak frequency density in (a) Xianghe and (b) Taihu region. The dashed lines are same as Fig. 2

概率密度峰值大小分段设定阈值区间可提高检测 的准确率。经实际观测资料分析发现,以下阈值 选取的方法可有效地检测云:当0.06《概率密度 函数《0.48时,阈值区间取为距离峰值位置一倍 标准差范围,这里的标准差是当日的比值的标准 差;当概率密度函数》0.48时,区间为距离峰值 位置五倍标准差范围;当概率密度函数《0.06 时,区间长度为0。

3.3 利用统计试验进一步修正结果

3.3.1 利用晴天散射辐射最大值进行附加检测

云的散射可显著增加地表散射辐射。因此, 利用观测的散射辐射可以判断云天和晴天。晴天 的散射辐射随太阳天顶角变化,并在某一范围内 波动,如公式(4)所示(Long and Ackerman, 2000)。如果观测的散射辐射超过了阈值 *D*_{lim},就 认为此时为云天,反之为晴天。

$$D_{\rm lim} = D_{\rm max} \mu^{0.5}, \qquad (4)$$

其中, D_{lim}是晴天条件下对应某一太阳天顶角时, 散射辐射的上限值; D_{max}为晴天下最大散射辐射 值, 是一常量。根据香河站和太湖站长期的统计 资料,该站点受城市污染影响, 气溶胶浓度较大, 观测的散射辐射值较大,资料表明散射辐射最大 不超过 700 W·m⁻²,因此取此值作为 D_{max}。

3.3.2 利用比值随时间变化特性进行附加检测

晴天时辐射值在短时间内的变化较有云时小, 对应的观测辐射值与直线拟合关系式计算辐射值 的比值变化也很小,趋近于1。第二步检验比较观 测的太阳总辐射变化和对应时段内晴天时应该到 达地面的总辐射变化,即比值的时间变率。比值 在11 min 内的变率可以有效地区分云天和晴天 (Khatri and Takamura, 2009)。如果11 min 内比 值的标准差与其平均值的商大于阈值(这里阈值 取每分钟比值的标准差,每天有一个阈值),则认 为有云的影响。

3.3.3 量值随时间变化检测

晴天条件下太阳辐射值在短时间内的变化较 云天情况下小。第三步检验即比较地面观测的向 下太阳总辐射变化和对应时段内大气顶入射太阳 总辐射变化。大气顶入射太阳总辐射量 F 可由下 式计算得到:

$$F = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{\mu}. \tag{5}$$

晴天时,地面观测的下行太阳总辐射 F_s 的绝对变 化必定要小于大气顶的入射太阳辐射量 F 的绝对 变化。定义地表总辐射和大气顶总辐射随时间的 变化类别分别为 $\Delta F_s/\Delta t$ 和 $\Delta F/\Delta t$,在考虑了一 些观测不确定因素以及仪器噪声的情况下,设定 $\Delta F_s/\Delta t$ 的上下限分别为 (Long and Ackerman, 2000):

$$M_{\rm ax} = |\Delta F / \Delta t| + C \bullet \mu, \qquad (6)$$

 $M_{\rm in} = \left| \Delta F / \Delta t \right| - \left[R(\mu_{\rm noon} + 0.1) / \mu \right], \quad (7)$

其中, C 为常量,基于晴天下的系统噪声选定; $C \cdot \mu$ 为高出 $|\Delta F / \Delta t|$ 的偏移量; R 是辐射观测数 据的时间分辨率(单位: min); μ_{noon} 为当地太阳 正午时的天顶角余弦值, 0.1 作为R 的增量因子, 经验公式(7) 模拟了日出后至日落前,太阳天顶 角余弦值很小时,总辐射的衰减变化。

3.4 循环检测

对求得的晴天时刻重新用该算法拟合并得到 新的晴天时刻点。如果后一次结果与实际观测的 均方根误差小于前一次的,将继续上述循环检测, 直到均方根误差达到最小。

4 检测算法检验

本文应用上述云检测算法分别对香河站和太 湖站的短波总辐射资料做了逐日判断。经 TSI 和 地面观测资料验证,表明该算法比以往的算法有 改进,云检测的准确率提高了,检测结果可应用 到云和气溶胶辐射强迫的计算中。

从图 4a 可见,香河站 2005 年 1 月 20 日是一 个典型的晴天。图 4b 中点是第一步中检测出来的 晴天时刻,实线是一次拟合的晴天曲线。从图 4c 可见,比值为 0.992 时,概率密度呈现陡峭的峰 值,峰值处对应的概率密度为 0.506。由图 4d 可 以看出辐射值随时间变化非常快的时刻,即有云 时刻被检测出来。用 TSI 的云观测图像检验上述 方法检测出的晴天,该方法的晴天甄别率达 85.8%。 然而直接应用 Long and Ackerman (2000)的方法

判断,此天整天都为云天。这是因为 Long and Ackerman (2000) 算法是给换算后的地面总辐射 设定阈值判断晴天,阈值的设定是根据其使用的 晴天资料得到的,即上限和下限分别为1250 $W \cdot m^{-2}$ 和 1000 $W \cdot m^{-2}$,对于香河的辐射资料 并不完全适合。算法是基于香河站辐射资料发展 的,它也适用于太湖站。图 5 显示的是太湖站 2005年11月1日有云时的检测。可以看出在晴天 有时有云的情况下,比值的概率密度也可以达到 0.42。由图 5a 的辐射资料可以看出该日有云出 现,整天来看晴空的时刻还是占多数,比值的概率 密度出现峰值,如图 5c 所示。TSI 图像显示 12:29-12:49 有卷云, 14:18-16:18 有高积云出 现。而算法的检测结果如图 5d 所示, 检测的云时 刻为: 12:33-12:42; 13:12-13:36; 14:05-16:18。检测的准确率为 90.3%。

本文验证了 2005 年 10 月的检测情况。由于 TSI 适用于天顶角小于 80°的情况,当天顶角大于 80°时,云检测算法结果的验证无法进行,因此本 文检测算法的适用范围是天顶角小于 80°。从试验 结果可以看出:



(1) 应用本文的算法可以区分晴天和云天。表1

图 4 香河站 2005 年 1 月 20 日观测资料的云检测流程:(a) 地表太阳短波总辐射曲线;(b) 点代表利用 Long and Ackerman (2000) 方法的比值概率密度峰值法挑取的晴空时刻的点,实线是线性拟合的地表总辐射结果;(c)利用一次多项式拟合的 T_2 的概率密度分 布;(d)利用一次多项式拟合的比值概率密度峰值法挑取的晴空时刻的点

Fig. 4 Cloud detection on 20 Jan 2005 at Xianghe station: (a) The surface downwelling shortwave total irradiance; (b) the pots show the clear skies detected by peak frequency density of ratio (PFDR) method from Long and Ackerman (2000) and the line is the surface downwelling shortwave total irradiance derived from least squares fitting; (c) the distribution of ratio probability, of which the ratio is the observed total solar irradiance to the prediction value by linear regression formulum; (d) the clear skies by the PFDR method



图 5 同图 4, 但为太湖站 2005 年 11 月 1 日 Fig. 5 Same as Fig. 4, but for Taihu station on 1 Nov 2005

表 1 香河站云检测准确率评估

Table 1 The accuracy assessments of the cloud detection at Xianghe station

	θ<75°检测准确率	θ<60°检测准确率	上午空判	下午空判	上午漏判	下午漏判
10月1日	100%	100%	0	0	0	0
10月2日	100%	100%	0	0	0	0
10月3日	76%	84%	6.5%	0	4.7%	13.1%
10月4日	76%	87 %	6.4%	0	8.5%	9.0%
10月5日	88%	93%	4.5%	2.1%	0.6%	4.4%
10月6日	100%	100%	0	0	0	0
10月7日	88%	94%	1.0%	3.4%	5.4%	2.7%
10月8日	93%	100%	4.8%	1.0%	0	0
10月9日	91%	96%	4.8%	0	0	4.7%
10月10日	75%	84%	6.0%	2.7%	0	15.8%
10月11日	100%	100%	0	0	0	0
10月12日	100%	100%	0	0	0	0
10月13日	97 %	100%	0	0	0	3.2%
10月14日	86 %	89%	2.4%	2.8%	7.4%	1.8%
10月15日	89%	93%	3.6%	2.0%	0	5.6%
10月16日	80%	87 %	6.3%	0	0	0
10月17日	96 %	100%	2.2%	2.3%	0	0
10月18日	86 %	91%	4.3%	2.4%	0	7.4%
10月19日	85%	91%	2.9%	0	0	0
10月20日	100%	100%	0	0	0	0
10月21日	92%	100%	5.2%	3.0%	0	0
10月22日	83%	98%	0	0	0	10.9%
10月23日	$74\frac{0}{0}$	77 %	7.8%	0	0	18.6%
10月24日	91%	93%	2.3%	0	0	7.0%
10月25日	100%	100%	0	0	0	0
10月26日	100%	100%	0	0	0	0
10月27日	96%	100%	0	0	0	4.0%
10月28日	91%	97 %	5.2%	4.0%	0	0
10月29日	93%	100%	3.5%	3.5%	0	0
10月30日	99%	100%	4.0%	0.9%	0	0

给出了天顶角小于 75°和天顶角小于 60°情况下的 判断准确率。结果表明: 75°以下的判断准确率平 均值为 90.9%,日最低准确率为 74%,最高为 100%;60°以下的判断准确率平均值为 95.1%, 日最低准确率为 77%,最高为 100%。后者比前 者的准确率月平均偏高 4.2%,日检测准确率最高 超过 11%。在天顶角大时,算法误差较大。其中 60°~75°之间的平均错误率占总体错误率的 58.6%。这是因为当太阳天顶角大时,太阳辐射 的路径散射辐射很大,使地表接收的太阳总辐射 随时间变化与云对辐射的改变相近,在 3.3.2小 节中的比值随时间变化的检测中有可能将晴天误 判为云天。

(2)本文的算法会出现空判和漏判两种错判 情况。空判是指晴天时刻被判为云天,而漏判是 指云天时刻被诊断为晴天。全天无云时,空判的 机率大;但在有云的情况下,漏判机率都比空判 的大。在 2005 年 10 月的检测中,漏判的机率比 空判平均大 94%。

(3)对于均匀分布且变化缓慢的薄卷云和薄卷层云,或在太阳天顶角很大时出现的碎云,该算法识别能力较低,导致漏判概率较大。

5 云出现频率及云地面短波辐射强 迫的月季变化

基于云检测算法,得到了太湖站 2005 年 9 月 1 日至 2006 年 8 月 31 日和香河站 2005 年间云日 出现频率和云地表短波辐射强迫。云出现频率是 云出现的频数占白天观测总数的比例(只考虑太阳天顶角小于 80°的观测资料)。云地面短波辐射强迫定义为有云时地面接收的辐射与无云时地面 应接收到的短波总辐射之差。云地表短波辐射强 迫的日平均值是一天内(含黑夜)所有有云时刻 云辐射强迫之和除以全天时间的结果。地面应接 收的辐射可由 3.2 节中的直线拟合经验公式计算 得到。如某一整天都有云,则用临近的晴天拟合 系数插值作为当日的拟合系数,再乘以太阳天顶 角的余弦值得到该日晴空地表太阳总辐射。云出 现频率和云地面短波辐射强迫有很大的相关性, 二者日变化的标准差都很大,月季变化显著。

5.1 云出现频率月季变化

利用香河和太湖站的较长时间的太阳辐射观 测资料,应用本文发展的比值概率密度峰值法检 测云,然后根据云检测结果分析了云出现频率和 云地表短波辐射强迫的变化特点。从图 6 中可以 看出,香河站和太湖站云出现频率呈现明显的季 节变化。逐月来看,两地云出现频率在7月最大, 在12月最小;按季节来看,两地云出现频率都在 夏季最大,春、秋季次之,冬季最小。香河云出 现频率的季节平均为:春季 0.40、夏季 0.54、秋 季 0.48、冬季 0.28。太湖云出现频率的季节平均 为: 春季 0.58、夏季 0.63、秋季 0.57、冬季 0.50。太湖站云出现频率的季节平均都比香河大, 但季节差异比香河小。这是因为香河站位于华北, 受季风气候影响显著,冬季干旱云量少,夏季湿 润云量多,季节差异显著。太湖位于长江三角洲 地区,常年温暖潮湿云量多,春夏受梅雨季节的



图 6 (a) 香河和 (b) 太湖地区云的发生频率的月平均值。实线表示云发生频率,点线是云对地表太阳总辐射起负效应的比例 Fig. 6 The monthly averaged cloud occurrence frequency at (a) Xianghe and (b) Taihu. The solid lines present cloud occurrence frequency, and the dash lines present the negative effect on the surface global solar radiation

影响, 空气潮湿云量比其他季节偏多, 尤其是 6 月中旬至 7 月上旬, 秋季相对干燥。

从图 6 中还可以看出,两观测站云起负效应 的比例(云天与晴天到达地面的太阳总辐射之比) 和云的出现频率呈很强的正相关,太湖站云的负 效应比例比香河高。这说明云对地面太阳总辐射 主要起负效应(削弱到达地面的太阳总辐射)。

5.2 云地表辐射强迫的月季变化

根据以上观测资料及云检测资料,本文还得 到了香河及太湖地区云地表短波辐射强迫。云的 瞬时辐射强迫与总辐射的变化有很高的相关性, 月平均强迫呈明显的季节变化,年平均辐射强迫 香河为-35 W·m⁻²,太湖为-46 W·m⁻²。太 湖地区的辐射强迫绝对值在 8 月小于香河的,其 他月份都大于香河(见图 7a 和图 7b)。

云瞬时地表短波辐射强迫与总辐射变化趋势 类似,是因为云吸收和散射太阳短波总辐射在地 面产生辐射强迫。云地表短波辐射强迫的月平均 呈明显的季节变化,香河、太湖云地表短波辐射 强迫在夏季绝对值最大,春秋次之,冬季最小。 香河云地表辐射强迫从春季至冬季平均分别为 $-25.9 ~ Wm^2$ 、 $-70.9 ~ Wm^2$ 、 $-51.1 ~ Wm^2$ 、 $-10.8 ~ Wm^2$,而在太湖分别为 $-84.6 ~ Wm^2$ 、 $-89.1 ~ Wm^2$ 、 $-50.2 ~ Wm^2$ 、 $-44.1 ~ Wm^2$ 。这一方面与两站点 的气候类型有关;另一方面还与当地云的出现频 率和云类型有关。比较图 6 和图 7 可以发现,香



图 7 香河和太湖云辐射强迫的月平均值及其标准偏差(竖线) Fig. 7 Monthly means of cloud radiative forcing and their standard deviations (bars) at Xianghe and Taihu

河云的辐射强迫与云的发生频数趋势非常相似。

6 结论

本文基于宽带地表太阳总辐射和散射辐射观 测资料,提出了比值概率密度峰值法区分晴天和 云天。经与地面全天空成像仪的观测数据对比, 该算法可有效地判断天空状况。在太阳天顶角小 于 60°的情况下,算法的判断准确率很高,最低可 达 77%,最高可达 100%,平均准确率为 95.1%, 可以应用于实际的云检测。

与以往的云检测算法相比,该算法具有以下 优点:1)该算法可以每隔一分钟判别天空是否有 云,高时间分辨率的判别为区分气溶胶和云、研 究气溶胶和云的光学特性及气候效应奠定了基础。 2)该算法只应用了总辐射和散射辐射资料,对有 辐射观测的地面无人区的自动探测站也适用,大 大扩展了云的观测。3)该算法计算量很小。另 外,该算法也存在不足,不能很好地识别形体均 匀变化、缓慢的薄卷云。如能结合地面的太阳光 度计资料或卫星传感器的多通道光谱信息,则可 进一步提高云检测的准确率。

基于此算法得到的云发生频率和云地表辐射 强迫之间存在很强的正相关,云地表辐射强迫的 瞬时变化与地表太阳总辐射的变化一致,月季变 化和年变化有明显的区域差异。

参考文献 (References)

- Ackerman S A, Strabala K I, Menzel W P, et al. 1998. Discriminating clear sky from clouds with MODIS [J]. J. Geophys. Res., 103 (D24): 32141-32157.
- Cess R D, Dutton E G, Deluisi J J, et al. 1991. Determining surface solar absorption from broad-band satellite measurements for clear skies—Comparison with surface measurements [J]. J. Climate, 4 (2): 236-247.
- Conant W C, Ramanathan V, Valero F P J, et al. 1997. An examination of the clear-sky solar absorption over the Central Equatorial Pacific: Observations versus models [J]. J. Climate, 10 (8): 1874-1884.
- Duchon C E, O'Malley M S. 1999. Estimating cloud type from pyranometer observations [J]. J. Appl. Meteor., 38 (1): 132 -141.
- 霍娟, 吕达仁. 2009. 三维辐射传输模式分析非均匀云对天空辐射

场影响 [J]. 大气科学, 33 (1): 168 – 178. Huo Juan, Lü Daren. 2009. Simulations of inhomogeneous cloud and its effects on radiative distribution of atmosphere with a 3D radiative transfer model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 168–178.

- Hartmann D L, Ockert-Bell M E, Michelsen M L. 1992. The effect of cloud type on earth's energy balance: Global analysis [J]. J. Climate, 5 (11): 1281-1304.
- Kaiser D P. 2000. Decreasing cloudiness over China: An updated analysis examining additional variables [J]. Geophys. Res. Lett., 27 (15): 2193-2196.
- Khatri P, Takamura T. 2009. An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analysis [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 87 (1): 189-204.
- Liang X Z, Wang W C. 1997. Cloud overlap effects on general circulation model climate simulations [J]. J. Geophys. Res., 102 (D10): 11039-11047.
- Long C N, Ackerman T P. 2000. Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects [J]. J. Geophys. Res., 105 (D12): 15609-15626.
- Ohmura A, Dutton E G, Forgan B, et al. 1998. Baseline surface

radiation network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79 (10): 2115 – 2136.

- Peters M E, Bretherton C S. 2005. A simplified model of the Walker circulation with an interactive ocean mixed layer and cloud-radiative feedbacks [J]. J. Climate, 18 (20): 4216 4234.
- Platt C M R. 1989. The role of cloud microphysics in high-cloud feedback effects on climate change [J]. Nature, 341 (6241): 428-429.
- Potter G L, Ellsaesser H W, Maccracken M C, et al. 1981. Climate change and cloud feedback: The possible radiative effects of latitudinal redistribution [J]. J. Atmos. Sci., 38 (3): 489 - 493.
- Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. 1989. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment [J]. Science, 243 (4887): 57-63.
- Sun B, Groisman P Y, Mokhov I I. 2001. Recent changes in cloudtype frequency and inferred increases in convection over the United States and the former USSR [J]. J. Climate, 14 (8): 1864– 1880.