施红蓉,陈洪滨,夏祥鳌,等. 2018. 基于地面短波辐射观测资料计算淡积云的辐射强迫及水平尺度方法研究 [J]. 大气科学, 42 (2): 292-300. Shi Hongrong, Chen Hongbin, Xia Xiang'ao, et al. 2018. Estimation of radiative forcing and chore length of shallow convective clouds (SCC) based on broadband pyranometer measurements [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 292-300, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17115.

基于地面短波辐射观测资料计算淡积云的辐射 强迫及水平尺度方法研究

施红蓉^{1,2} 陈洪滨^{1,2,3} 夏祥鳌^{1,2,3} 范学花¹ 张金强^{1,2,3} 曹杨^{1,2} 朱彦良¹ 王姝⁴

1 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
2 中国科学院大学,北京 100049
3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044
4 中国电力科学研究院新能源与储能运行控制国家重点实验室,北京 100192

摘 要本文根据不同类型云影响地面短波辐射的差异,提出利用地面短波总辐射变化检测识别淡积云以及计算 淡积云水平尺度的方法,并对该算法进行误差分析,统计内蒙古草原地区夏季淡积云的水平尺度及其辐射强 迫。结果表明:淡积云检测方法能比较好地识别、筛选出淡积云天。淡积云水平尺度和淡积云所在高度的风速成 正比,风速测量的准确性直接影响淡积云水平尺度估算准确性;淡积云水平与垂直尺度比对计算淡积云水平尺度 影响最大;云移动经过遮挡太阳直射辐射的时段内,太阳天顶角变化的影响可以忽略不计。内蒙古草原地区夏季 淡积云短波辐射强迫小时平均为-134.1 Wm⁻²,水平尺度平均值为 1129 m,水平尺度的概率密度呈幂指数分布。 关键词 淡积云 水平尺度 辐射强迫 辐射表

文章编号1006-9895(2018)02-0292-09中图分类号P412文献标识码Adoi:10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17115

Estimation of Radiative Forcing and Chore Length of Shallow Convective Clouds (SCC) Based on Broadband Pyranometer Measurements

SHI Hongrong^{1, 2}, CHEN Hongbin^{1, 2, 3}, XIA Xiang'ao^{1, 2, 3}, FAN Xuehua¹, ZHANG Jinqiang^{1, 2, 3}, CAO Yang^{1, 2}, ZHU Yanliang¹, and WANG Shu⁴

- 1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044
- 4 State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192

Abstract We presented a method to identify and calculate cloud radiative forcing (CRF) and horizontal chore length (L) of shallow convective clouds (SCC) using broadband pyranometer measurements. The data analyzed were collected from

通讯作者 陈洪滨, E-mail: chb@mail.iap.ac.cn

收稿日期 2017-01-24; 网络预出版日期 2017-09-25

作者简介 施红蓉,女,1989年出生,博士研究生,主要从事云一辐射一降水研究。E-mail: shihrong@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金面上基金项目 41775005、41275039、41675034;国家重点研发计划资助 2017YFA0603504;国家电网科技项目资助

Funded by National Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41775005, 41275039, 41675034), National Key R&D Program of China (Grant 2017YFA0603504), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China

the SCC campaign during two summers (2015–2016) at Baiqi site over the Inner Mongolia grassland. The SCC detection method was verified against observations from reports and cameras records. It was found that the results of the detection method and human observations were in agreement by about 75%. The deviation of *L* can be attributed to following factors: 1) the accuracy of wind speed at the height of SCC and the ratio of horizontal to vertical length play a key role in determining the value of *L*; 2) the effect of variance in solar zenith angle can be negligible. The downwelling shortwave CRF of SCC was -134.1 W m^{-2} . The average value of L of SCC was 1129 m. Besides, the distribution of normalized cloud chore length agreed well with a power-law distribution.

Keywords Shallow convective clouds, Horizontal chore length, Radiative forcing, Pyranometer

1 引言

云对地球一大气系统的辐射收支平衡起着重 要作用,云吸收、反射、散射太阳短波辐射,减少 到达地面的太阳短波辐射,同时云还会吸收和发射 长波辐射。云的短波和长波辐射效应与云的宏观特 性以及微物理特性密切相关,而云的宏微观特性时 空变化极大,给观测带来很大难度,因此云与辐射 相互作用仍然是气候变化研究中的热点与难点

(Potter et al., 1981; Ramanathan et al., 1989). Ξ 的存在使得辐射收支发生相应变化的辐射值定义 为云的辐射强迫(CRF: cloud radiative forcing)。 大气层顶及地面的云辐射强迫可以分别通过卫星 或者地基辐射观测资料计算得到。研究结果显示, 不同类型云的辐射强迫不同,取决于云的分布、云 粒子有效半径、云滴粒子数浓度等特征。高度低、 光学厚度大及水平覆盖范围广的云,如层积云,会 将大部分向下短波辐射反射回太空,地面接收到的 太阳辐射减小,造成地面的辐射强迫为负值。高度 较高、光学厚度小的高云,如卷云,其地面辐射强 迫一般为正值(Hartmann et al., 1992; Liang and Wang, 1997)。本研究涉及的尺度相对较小的淡积 云 (一般其水平与垂直尺度相当),在海上和陆地 上也经常成簇出现,它们对地面辐射收支的影响不 能忽略。但由于散布的淡积云生命期短、水平尺度 小、时空分布变化大,现有的探测手段(卫星遥感、 地基云雷达、激光雷达和气象探空等)较难对其进 行精细的观测, 而现有的3维辐射传输模式的模拟 计算需要观测的验证,所以其辐射效应还存在很多 不确定性(陈洪滨, 1997; Sengupta et al., 2004; Dupont and Haeffelin, 2008; Ghate et al., 2009).

云的识别与分类是进行云一辐射一气候相互 作用研究的基础。Duchon and O'Malley(1999)基 于模式计算的晴天辐射和地面辐射表观测值进行 比较,判别出卷云、积云、层云、降水等天空状况, 识别结果与人工观测比较正确率为45%。Long and Ackerman (2000)结合地表总辐射和散射辐射资料 判断天空状况,区分出晴天和云天。Long et al. (2006)根据地表散射辐射与云量的线性关系,提 出了利用散射辐射值估算云量的方法。汤金平等 (2011)对Longet al. (2006)的云检测算法进行了 改进,减少了因水汽柱总量、气溶胶浓度和系统测 量偏差等造成的误差。Chen et al. (2000)估算了全 球范围内大气层顶积云引起的年平均辐射效应为 -4.6 Wm⁻²。Berg et al.(2011)基于 Long et al.(2006) 的工作,对 2000年至 2007年美国大平原地区淡积 云短波及长波地表辐射强迫作了计算,分别为-45.5 W m⁻²和 15.9 W m⁻²;同时观测到因为积云的时空 分布非均一性使得辐射表的短波辐射值短时间内 会比晴空短波辐射高 20%。

云水平尺度、云间距等云宏观特征对辐射传输 模式中云的辐射参数化很重要(Lane et al., 2002; Jiang et al., 2008)。近年来国内外学者采用地面遥 感观测、模式模拟及卫星观测等手段对淡积云的水 平尺度进行了一些研究。Sengupta et al. (1990)利 用 Landsat 卫星图像研究发现,淡积云水平尺度分 布满足幂率分布。Lane et al. (2002)分析了美国大 平原地区 16 天的云高仪资料,得出淡积云水平尺 度在 200 m 至 4000 m 之间,尺度分布满足指数分 布规律。Chandra et al. (2013)利用针对美国大平 原地区用 13 年云雷达观测资料,分析得到 60%的 淡积云水平尺度小于 500 m。

已有研究表明,从地面总辐射表的测量不仅能 够区分多种天空状况,而且能给出多种类型云的辐 射强迫。除此之外,辐射表还具有精度高、仪器简 单、成本低、维护简便以及使用范围广等优点。其 他学者研究工作是基于人工观测或者其他遥感手 段识别淡积云,利用地面辐射表的测量估算淡积云 的辐射强迫,没有直接采用辐射表资料识别淡积云 并计算其水平尺度的方法。本文针对这一问题,利 用在内蒙古草原获得的地面太阳总辐射观测资料, 研究并检验识别淡积云的方法,进而计算淡积云的 水平尺度及其辐射强迫。以下论文结构为:第二节 详细介绍数据和计算方法;第三节讨论分析内蒙古 草原夏季淡积云的辐射强迫和水平尺度;最后一节 为总结。

2 数据及算法介绍

本文使用的数据来自内蒙古草原地区夏季浅 对流云观测试验获得的短波总辐射数据。观测地点 位于内蒙古白旗(42.23°N, 114.99°E),海拔高度约 1300 m,距离北京市约 300 km。该地属于蒙古高原, 地形略有起伏,开阔平地与山丘高度差小于 50 m, 下垫面多为草地。观测点安装短波总辐射表 (CMP11)开展短波辐射测量,该型总辐射表光谱 波长范围为 285~2800 nm, 辐射表在安装使用前已 完成定标比对工作。该系统采样频率1Hz,数据记 录分辨率为 1min,辐射表记录的变量包括 1 min 内 电压的平均值、最小值、最大值和标准偏差。根据 辐射表的灵敏度系数,将数据采集器输出的辐射要 素电压信号转为辐照度值。总辐射表采集了 2015 (7月15日至8月9日)和2016年(7月9日至 10月10日)夏季的向下短波总辐射数据,观测天 数共118天。

2.1 算法介绍

当淡积云移动经过总辐射表遮挡太阳光的时候,低云移动的速度远大于太阳光束偏移速度,太阳移动速度可以忽略(Duchon and O'Malley, 1999)。晴空无云时,辐射表的辐照度信号主要来自太阳光,在气溶胶浓度较低时散射辐射度约占15%。当天空有云遮挡太阳光时,辐照度随之减小。

图1给出了晴空、阴天、积雨云、淡积云条件 下地表总辐射测量结果,显示不同云况下总辐射有 明显区别。晴天条件下(图 1a),地面接收到的短 波总辐射曲线光滑,随太阳天顶角变化而平滑的变 化。当全天云量为 10 成时,短波总辐射远远小于 晴空总辐射值(图 1b),辐射表接收到的总辐射通 量近似于全天空散射辐射通量。图 1c 为当地时间 下午 15:00(当地时间,下同)经历积雨云天气的 情况,在15:00时刻总辐射减少到 20 W m⁻²,持续 近一个小时。图 1d 为典型淡积云天情况,总辐射 值在 10:30 时刻开始出现上下变动,变化幅度大, 此后有多次变动,15:00 后显著变动消失,期间总 辐射最小值为 200 W m⁻²,这种现象主要是由淡积 云的空间分布不均匀造成的。Berg et al. (2011) 指 出淡积云瞬时短波辐射强迫变化很大,从-565 W m⁻²到 200 W m⁻²,短波辐射强迫小时平均值为 -45 W m⁻²。根据上述特点,本文选取淡积云天的 三个变量:辐射强迫(F_{cloud})、透过率(τ)以及辐 射通量时间变化率(D)进行统计分析,计算公式 如下:

$$F_{\rm cloud} = F_{\rm obs} - F_{\rm clear} \tag{1}$$

$$\tau = F_{\rm obs} / F_{\rm clear} \tag{2}$$

$$D = \Delta F_{\rm obs} | \Delta t \tag{3}$$

其中, F_{obs} 是辐射表观测得到地面短波总辐射通量 (单位: W m⁻²), F_{clear} 是根据 Long and Ackerman (2000)方法拟合的晴空短波总辐射通量, τ 是短 波辐射通量观测值与晴空短波辐射通量拟合值的 比, D 是单位时间内观测的短波辐射通量变化的绝 对值(单位 W m⁻² min⁻¹)。

根据人工观测记录,2015 年 8 月 6、8 和 9 日 三天白天出现了典型淡积云。通过统计总辐射观测 值出现的每一次抖动,图 2 给出这三天 F_{cloud} 、 τ 以 及 D 的统计特征分布,给定淡积云对应的三个量的 阈值范围: $F_{cloud} < -45$ W m⁻², $\tau < 0.9$, D > 150 W m⁻² min⁻¹。图 2a 中 F_{cloud} 大于 0、 τ 大于 1 的说明总辐 射观测值与晴空模拟值接近,甚至超过晴空模拟 值,这种波动是由于淡积云侧边散射太阳辐射造成 的地面辐射通量"异常"增加(陈洪滨,1997)。

根据上述淡积云天的地面总辐射值变化特点 以及特征阈值,建立淡积云检测识别算法及淡积云 水平尺度算法。图 3 为淡积云检测识别算法具体流 程。首先参考 Long and Ackerman (2000)、汤金平 等(2011)经验公式基于观测辐射值拟合晴天地表 向下太阳总辐射,当云量为 10 成或者全天下雨时, 经验公式不能正确拟合出晴空地表总辐射(图 3a), 将这种天空状况剔除;对成功拟合出晴空地表总辐 射的情况进行下一步筛选,当出现层积云或者积雨 云时,辐射表接收到总辐射观测值会出现长时间的 辐射减小(如图 3b),抖动时间间隔大于 40 min, 并且 τ 小于 0.5,算法将这种情况剔除;最后进一步 筛选,当太阳天顶角小于 70°时,地表总辐射值抖 动变化满足阈值条件的情况,检定为淡积云天(图 3c)。

当天空有淡积云时,淡积云遮挡太阳辐射将造 成地表太阳总辐射值显著减少,遮挡时间与淡积云



图 1 不同类型(a) 晴空、(b) 阴天、(c) 积雨云及(d) 淡积云天空状况下地面向下短波辐射通量时间序列 Fig. 1 Time series of downwelling shortwave irradiance at the surface under different conditions: (a) Clear sky; (b) overcast; (c) cumulonimbus; (d) shallow convective clouds (SCC)

水平尺度有关;随着淡积云移开,地表太阳总辐射 值随之增加(注:虽然淡积云遮挡太阳与辐射表之 间的光路是随机的,本文假定云块经过太阳辐射光 路的距离就是云的水平尺度)。忽略淡积云垂直尺 度时(图 4a),同样一朵淡积云遮挡辐射表的时间, 在不同太阳天顶角下没有区别;只考虑淡积云垂直 尺度时(图 4b),同样一朵淡积云遮挡辐射表的时 间与太阳天顶角相关,太阳天顶角越小,遮挡时间 越长;研究结果表明淡积云水平尺度和垂直尺度相 当(Stull and Eloranta, 1984)(如图 4c),淡积云的 水平尺度 L(单位:m)计算公式如下:

$$L = U \cdot \Delta t / (1 + \tan(\theta) / A_r) , \qquad (4)$$

其中, *U*为淡积云移动速度, 用淡积云所在高度的 水平风速代替(单位: m s⁻¹); Δt 为总辐射值减 少的时间长度(单位: s); θ 为太阳天顶角(单 位: rad); *A_r* 是水平尺度与垂直尺度(*H*)的比 值,本文设定 *A_r*为1。Chandra et al. (2013)计算 了 *A_r*,得到近 60%的淡积云 *A_r*小于1, *A_r*最大能到 4.8。

2.2 误差分析

本文利用淡积云检验识别算法对 2015~2016 年夏季内蒙古白旗观测点118天地面短波总辐射数 据进行识别分析。算法识别出淡积云天共 19 天, 人工和摄像观测记录淡积云天共 20 天, 识别结果 与人工观测记录一致的有 15 天,表明该淡积云检 测识别算法能较好地识别出淡积云天。检测识别算 法和人工观测记录存在差异的有5天,主要原因分 别是:(1)人工记录一天观测4次,在没有人工观 测时段内出现降雨等情况没有记录下来;(2)辐射 表观测数据时间分辨率是 1 min,可能不能观测到 尺度较小或很快消散的淡积云;(3)淡积云检测识 别算法阈值相对严格,即使中午出现淡积云,但是 早晨或者傍晚出现下雨的情况,这一天都不算淡积 云天; (4) 当天空既有卷云又有淡积云的时候, 辐 射表不能区分并剔除; (5) 淡积云都出现在天空其 他方向,在太阳视线方向没有形成遮挡。

根据计算淡积云水平尺度公式(4),可知误差 来自云移动速度(U)、淡积云水平垂直尺度比(A_r)



图 2 淡积云天(2015 年 8 月 6、8 及 9 日)辐射强迫、透过率以及辐射通量变化率统计值。黑色实线为淡积云特征阈值(*F*_{cloud}<-45, τ<0.9, *D*>150) Fig. 2 Scatter plots of cloud radiative forcing (*F*_{cloud}), transmittance (*τ*) and gradient of irradiance (*D*) of SCC days (6, 8, and 9 August 2015). Black solid lines show characteristic thresholds of SCC (*F*_{cloud}<-45, τ<0.9, and *D*>150)



图 3 淡积云检测识别算法流程图。(a)、(b)、(c)分别是阴天、积雨云和淡积云天示例

Fig. 3 The flow chart of algorithm of shallow convective clouds (SCC) detection. (a), (b), (c) are the examples of overcast, cumulonimbus, and SCC days, respectively



图 4 计算淡积云水平尺度方法示意图 Fig. 4 Schematic diagram for calculating horizontal length of SCC

以及云移动遮挡辐射表时太阳天顶角变化($\Delta \theta$) 三个部分。公式4中以上三个量需要设定,本文取 A_r 为1, U取4.5 m s⁻¹, $\Delta \theta$ 取0。 $\Delta \theta$ 取0时, 认 为云移动速度远远大于太阳移动的速度, 云移动遮 挡辐射表的过程中,太阳天顶角不发生变化。表 1 给出了这三个影响因素的误差分析结果。当Ar变化 范围在 0.5~1.5 之间时 (Chandra et al., 2013), 淡 积云水平尺度绝对偏差为-31.9±191.5 m, 相对偏 差为-2.1%±14.9%。U值由欧洲数值中心再分析资 料计算得到,本文取 2015~2016 年淡积云天 600~ 700 hPa 高度的水平风速(Shi et al., 2017), 变化 范围在 3.4~5.4 m s⁻¹之间, 对应的水平尺度绝对偏 差为-30±186.1 m,相对偏差为-2.2%±13.8%。不 同太阳天顶角下, 当淡积云遮挡太阳时间在 0~30 min 之间变化时, $\Delta \theta$ 的变化范围为 0~5.5°, 对应 的水平尺度绝对偏差为 0±0.002 m, 相对偏差为 -0.3%±6.9%。综上可见, 云移动遮挡辐射表时, 太 阳天顶角的变化可以忽略;水平垂直尺度比值对计 算淡积云的水平尺度影响最大:估算的淡积云水平

表1 淡积云水平尺度误差统计分析

Table 1Statistics of deviation of horizontal length ofshallow convective clouds

	A_r	U	$\Delta heta$
取值	1	4.5 m s^{-1}	0°
变化范围	0.5~1.5	$3.4 \sim 5.4 \text{ m s}^{-1}$	0~5.5°
绝对偏差/m	-31.9 ± 191.5	-30 ± 186.1	$0\!\pm\!0.002$
相对偏差	$-2.1\% \pm 14.9\%$	$-2.2\% \pm 13.8\%$	$-0.3\% \pm 6.9\%$

尺度 L 与所在高度风速 U 成线性正比, 所以 L 估算 精度与 U 的精度直接相关。

3 淡积云辐射强迫及水平尺度分析

图 5 给出了 2015 年 8 月 6 日淡积云的水平尺 度及其辐射强迫。当地时间 11:48 淡积云生成,17:23 后淡积云逐渐消散。图 5a 中用淡积云检测识别算 法给出了遮挡辐射表的淡积云个数,共 11 个。计 算的淡积云水平尺度在 191.3~2779.0 m 之间,平 均值为 1299.9 m; 云间距在 196.2~8639.7 m 之间, 平均值为 3661.8 m (图 5b)。淡积云辐射强迫平均 为~51.6 W m⁻²,透过率为 0.9 (图 5c、d)。此结果 和 Berg et al. (2011)的非常近似,他们同样用地面 总辐射数据,估算的淡积云短波辐射强迫和透过 率,分别为~45.5 W m⁻²和 0.92。Dong et al. (2006) 计算所有低云短波辐射强迫约为~87.6 W m⁻²,长波 辐射强迫为 40.7 W m⁻²。

本工作统计了内蒙古白旗 2015~2016 年夏季 淡积云水平尺度、云间距、辐射强迫和透过率四个 特征量,118 天观测中共有 19 天出现淡积云,图 6 中给出了 147 朵淡积云经过并遮挡地面辐射表时的 统计结果。淡积云水平尺度平均值为 1129 m,近 60%的水平尺度小于 1000 m,最大水平尺度小于 4500 m;云间距平均为 1517.9 m,70%云间距小于 2000 m,最大云间距小于 8000 m (图 6a、b);水 平尺度和云间距都呈现出频率随尺度增加指数下 降趋势。Chandra et al. (2013) 用云雷达观测美国



图 5 2015 年 8 月 6 日淡积云个例:(a)地表短波向下辐射通量观测值(obs)与晴空模拟值(fit),圆圈标记了淡积云遮挡辐射表的起始时间(黑 色圆圈:开始;黑色叉:结束);(b)淡积云水平尺度(蓝色)和淡积云云间距(黄色);(c)云辐射强迫瞬时值(蓝色虚线)和小时平均值(黄色 实线);(d)云透过率瞬时值(蓝色虚线)和小时平均值(黄色实线)

Fig. 5 A sample of SCC day on 6 August 2015: (a) Observed and fitted values of downwelling shortwave irradiance (Black circle and cross are starting and ending time of clouds crossing the solar beam); (b) horizontal length (blue lines) and spacing (yellow lines) of SCC; (c) instantaneous (blue dashed lines) and 1 h average (yellow solid lines) values of F_{cloud} ; (d) instantaneous (blue dash lines) and 1 h average (yellow solid lines) values of τ



图 6 淡积云 (a) 水平尺度、(b) 云间距、(c) 云辐射强迫以及 (d) 透过率频率图 Fig. 6 Histograms of probability density of (a) horizontal length, (b) cloud spacing length, (c) *F*_{cloud}, and (d) *t* of SCCs.



图 7 淡积云水平尺度概率密度分布,满足幂律分布(a=11.8, b=-0.91)。图 b 是图 a 的对数坐标形式,图中圈代表观测值,实线为拟合曲线,SSE 为残差平方和, R_{square}为决定系数

Fig. 7 Plot of normalized length density vs the length of SCC. Circles show observations of irradiance, lines are fitted values of irradiance. The fitted line agrees well with a power-law distribution (a=11.8; b=-0.91). Circles are observational values, solid line is the fitted line, SSE is sum of squares due to error, and R_{source} is coefficient of determination

大平原地区近 13 年淡积云水平尺度和云间距,表明60%水平尺度小于500 m,最大水平尺度近5000 m; 云间距 80%小于 2000 m,最大云间距为 6000 m。从 图 6c、d 看出,淡积云小时平均辐射强迫为-134.1 W m⁻²,透过率平均值为 0.8。本文得到的淡积云短 波辐射强迫绝对值与 Berg et al. (2011)相比偏高 (-45.5 W m⁻²),可能原因是本文中淡积云检测算 法相对严格,可能滤除了一些小的淡积云,此外差 异也可能与太阳天顶角的差异有关。

图7还给出了淡积云水平尺度概率密度分布拟 合曲线。图中样本数147个,尺度间隔300m。可 见,尺度概率密度分布满足幂律分布,概率密度随 着水平尺度增加快速降低,幂指数b为-0.91。其他 学者的研究结果,也一致认为,淡积云尺度分布满 足幂律分布(Neggers et al., 2003; Jiang et al., 2008; Chandra et al., 2013),但不同观测手段得到的淡积 云水平尺度存在一定差异。Jiang et al. (2008)飞机 观测到淡积云水平尺度分布幂指数b为-2.3; Neggers et al. (2003)用大涡模式(LES)模拟得到 水平尺度幂律分布b为-1.7; Chandra et al. (2013) 云雷达观测结果,b为-1.16。不同的观测手段,采 样方式不同,观测地点不同,观测时气象条件也存 在差异,这些因素都可能造成幂指数存在差异。

4 总结

辐射表具有精度高、仪器简单、成本低、维护 简便以及使用范围广等优点。本文根据辐射表测得 的总辐射值在不同类型云时的差异,提出检测识别 淡积云以及计算淡积云水平尺度的方法,并对该算 法进行了误差分析,进而统计分析了内蒙古草原地 区 2015~2016 年夏季淡积云水平尺度及其辐射强 迫特征值。结果表明:(1)淡积云检测方法能比较 好的识别、筛选出淡积云天,与人工观测比较存在 差异可能是辐射表观测数据时间分辨率是 1 min, 辐射表可能不能观测到尺度较小或很快消散的淡 积云。(2) 淡积云水平尺度与淡积云所在高度风速 成正比,风速设定精度直接影响水平尺度估算的准 确性:水平与垂直尺度比值对计算淡积云水平尺度 影响最大; 云移动经过并遮挡辐射表时段内, 太阳 天顶角的变化对水平尺度影响可以忽略不计。(3) 内蒙古白旗夏季淡积云小时平均短波辐射强迫为 -134.1 W m⁻²,透过率平均值为 0.8,水平尺度平均

值为 1129 m, 云间距平均值为 1517.9 m, 水平尺度 概率密度服从幂指数分布。

检测识别算法及计算水平尺度方法,为观测淡积云提供一种新方法。识别算法和人工观测记录比较吻合,还存在一些问题尚未解决。例如:云块间距很小时候,两块小云可能被误判为一块大云,造成计算水平尺度产生误差;很难区分卷云和淡积云共存的情况;辐射表数据记录分辨率低,可能导致很难观测到小块并且消散很快的淡积云。另外,许多气象观测站中安装了太阳辐射表或者四分量辐射表,并且具有较长的观测历史。下一步工作将分析不同类型云的辐射强迫特征,并利用大量历史总辐射表资料给出淡积云时间演变和空间分布特征等。

参考文献(References)

- Berg L K, Kassianov E I, Long C N, et al. 2011. Surface summertime radiative forcing by shallow cumuli at the Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains site [J]. J. Geophys. Res., 116 (D1): D01202, doi:10.1029/2010JD014593.
- Chandra A S, Kollias P, Albrecht B A. 2013. Multiyear summertime observations of daytime fair-weather cumuli at the ARM Southern Great Plains facility [J]. J. Climate, 26 (24): 10031–10050, doi:10.1175/JCLI-D-12-00223.1.
- 陈洪滨. 1997. 关于云和云天大气对太阳辐射的吸收异常 [J]. 大气科学, 21 (6): 750–757. Chen Hongbin. 1997. On the anomalous absorption of solar radiation by water clouds and by the cloudy atmosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospheric Sinica) (in Chinese), 21 (6): 750–757, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.06.13.
- Chen T, Rossow W B, Zhang Y C. 2000. Radiative effects of cloud-type variations [J]. J. Climate, 13 (1): 264–286, doi:10.1175/1520-0442 (2000)013<0264:REOCTV>2.0.CO;2.
- Dong X Q, Xi B K, Minnis P. 2006. A climatology of midlatitude continental clouds from the ARM SGP central facility. Part II: Cloud fraction and surface radiative forcing [J]. J. Climate, 19 (9): 1765–1783, doi:10.1175/JCL13710.1.
- Duchon C E, O'Malley M S. 1999. Estimating cloud type from pyranometer observations [J]. J. Appl. Meteor., 38 (1): 132–141, doi:10.1175/1520-0450(1999)038<0132:ECTFPO>2.0.CO;2.
- Dupont J C, Haeffelin M. 2008. Observed instantaneous cirrus radiative effect on surface-level shortwave and longwave irradiances [J]. J. Geophys. Res., 113(D21): D21202, doi:10.1029/2008JD009838.
- Ghate V P, Albrecht B A, Fairall C W, et al. 2009. Climatology of surface meteorology, surface fluxes, cloud fraction, and radiative forcing over the southeast Pacific from buoy observations [J]. J. Climate, 22 (20): 5527–5540, doi:10.1175/2009JCLI2961.1.
- 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, doi:10.1175/1520-0442(1992)005<1281:TEOCTO>2.0.CO; 2.

- Jiang H L, Feingold G, Jonsson H H, et al. 2008. Statistical comparison of properties of simulated and observed cumulus clouds in the vicinity of Houston during the Gulf of Mexico Atmospheric Composition and Climate Study (GoMACCS) [J]. J. Geophys. Res., 113 (D13): D13205, doi:10.1029/2007JD009304.
- Lane D E, Goris K, Somerville R C J. 2002. Radiative transfer through broken clouds: Observations and model validation [J]. J. Climate, 15 (20): 2921–2933, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<2921:RTTBCO>2.0.CO;2.
- Liang X Z, Wang W C. 1997. Cloud overlap effects on general circulation model climate simulations [J]. J. Geophys. Res., 102 (D10): 11039–11047, doi:10.1029/97JD00630.
- 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, doi:10. 1029/2000JD900077.
- Long C N, Ackerman T P, Gaustad K L, et al. 2006. Estimation of fractional sky cover from broadband shortwave radiometer measurements [J]. J. Geophys. Res., 111 (D11): D11204, doi:10.1029/2005JD006475.
- Neggers R A J, Jonker H J J, Siebesma A P. 2003. Size statistics of cumulus cloud populations in large-eddy simulations [J]. J. Atmos. Sci., 60 (8): 1060–1074, doi:10.1175/1520-0469(2003)60<1060:SSOCCP>2.0.CO;2.
- 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, doi:10.1175/1520-0469(1981)038<0489:CCACFT>2.0.CO;2.
- 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, doi:10.1126/science.243.4887.57.
- Sengupta M, Clothiaux E E, Ackerman T P. 2004. Climatology of warm boundary layer clouds at the ARM SGP site and their comparison to models [J]. J. Climate, 17 (24): 4760–4782, doi:10.1175/JCLI-3231.1.
- Sengupta S K, Welch R M, Navar M S, et al. 1990. Cumulus cloud field morphology and spatial patterns derived from high spatial resolution Landsat imagery [J]. J. Appl. Meteor, 29 (12): 1245–1267, doi:10.1175/ 1520-0450(1990)029<1245:CCFMAS>2.0.CO;2.
- Shi H R, Chen H B, Xia X A, et al. 2017. Intensive radiosonde measurements of summertime convection over the Inner Mongolia grassland in 2014: Difference between shallow cumulus and other conditions [J]. Adv. Atmos. Sci., 34 (6): 783–790, doi:10.1007/s00376-017-6284-2.
- Stull R B, Eloranta E W. 1984. Boundary layer experiment—1983 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 65 (5): 450–456, doi:10.1175/1520-0477(1984)065< 0450:BLE>2.0.CO;2.
- 汤金平,王普才,夏祥鳌,等. 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, et al. 2011. Modification of cloud-screening method using ground-based broadband shortwave irradiance measurements [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 609–619, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.07.