

关于云和云天大气对太阳辐射的吸收异常*

陈洪滨

(中国科学院大气物理研究所中层大气和地球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘 要 本文是关于云和云天大气对太阳辐射吸收异常问题的一个综述, 总结了到目前为止的对水云异常吸收的一些解释, 指出这些解释的合理性和缺陷。本文的重点在于介绍近年来论争激烈的有云大气的异常吸收问题, 对存在和不存在增强吸收的两种截然相反的观点都做了较详细的评述。

关键词 水云 云天大气 太阳辐射 异常吸收

1 引言

云-辐射相互作用问题已成为当今大气科学中重中之重的研究课题, 这是因为云和辐射在天气和气候及全球变化中都起着十分重要的作用。云对太阳短波辐射的吸收异常又是云-辐射相互作用中一个特别令人感兴趣而又长期悬而未决的问题。尤其是近年来, 随着对云-辐射相互作用问题重视程度的提高以及云参数遥感反演等工作的深入, 云异常吸收成了大气科学中的一个研究热点。1995~1996年, 在美国《Science》和英国《Nature》上有近十篇学术论文或报告讨论这一问题, 在其他大气科学类和地球科学类的学术期刊上涉及这一问题的文章就更多了。1996年8月在美国 Alaska 召开的“国际辐射学大会”(IRS'96)上讨论异常吸收问题的论文有二十多篇。

关于云吸收异常, Stephens 和 Tsay^[1]已作了一个很好的综述, 在汪宏七和赵高祥^[2]的一篇有关“云和辐射”的综述性文章中也有所涉及。但由于这一问题在近二三年中, 由水云异常吸收发展到有云大气的异常吸收, 研究者们得到了一些新结果, 同时又引发了许多新问题, 所以有必要对云和云天吸收异常问题作一新的更为全面的综述。

2 什么是云吸收异常

所谓水云对太阳辐射吸收异常, 是指飞机实测的云吸收率系统性地明显大于辐射传输模式的理论计算值的现象。事实上, 云吸收异常现象早在 1951 年就被 Fritz 和 McDonald^[3]提及, 然后为许多飞机观测与理论计算值的比较研究所揭示, 详细的观测事实参见文献[1]。也有一些飞机观测研究显示无水云异常吸收^[4,5,6]。但就是在说无异常吸收的文献[5]中, 却仍可看到在大多数情况下, 由飞机测量推算的云吸收量均系统性地大于理论模式计算值。所以, 目前倾向性的看法是: 水云吸收异常现象是存在的。仅

1996-11-14 收到, 1997-04-01 收到再改稿

* 本文得到国家自然科学基金的资助

器测量表明其发生在太阳辐射的近红外段, 测量的水云吸收率比模式计算的约大 5%~6%, 对应的辐射能量约为 25~30 W/m²。

与水云吸收异常相关的现象有^[1]: (1) 云顶上测得的太阳短波辐射反射率明显低于理论计算值^[7, 8]; (2) 在近红外波段反演的水云有效半径 r_e 显著地大于云中实测平均值(至少大 50%)^[9]。

3 云吸收异常的一些解释

既然云吸收异常就是实测与理论计算之间显著不一致的现象, 那么这一现象的解释就得从这两个方面去寻找。具体的一些有代表性的解释如下:

(1) 大粒子和溶化冰晶粒子效应 Wiscombe 等^[10]的研究表明, 当云中引入大云滴时(其半径比正常云滴的大许多倍), 计算的云吸收率增大, 反射减少。但飞机穿云观测时, 在非降水云中并未采集到半径大于 100 μm 的大云滴, 这说明如果水云中有大粒子的话, 其数目也是非常之少, 不足以解释吸收异常。一些飞机实测还表明^[11], 就是在刚开始下毛毛雨的云中, 大云滴的数目也很稀少。此外, 大粒子增强吸收效应与云的厚薄有关, 且不能解释吸收异常现象发生在近红外波段的事实。与此相反, 云中可能存在着大量的却未被现有云滴谱仪器检测到的微小云滴, 如果确实存在的话, 它们肯定对云吸收有一定的贡献(汪宏七, 个人交流)。还有, 对混合云中的冰雪粒子尤其是表面溶化粒子的吸收, 缺少专门的研究。这里, 作者认为, 云中零度层上下溶化冰雪粒子既然在微波段产生雷达回波亮带, 那么在近红外将有增强吸收效应。具体增强多少, 有待研究。

(2) 云中吸收性气溶胶效应 Twomey^[12]和 Grassl 等^[13]认为, 云中如碳黑类吸收性气溶胶可以大大增强吸收。但是观测表明, 在远离大陆空气较洁净的大洋区域, 云同样有异常吸收现象。另外, 就是在大陆上空气污染程度非常不同的地区, 云异常吸收并无显著差别。

(3) 水滴污染效应 有些学者认为^[14, 15], 以碳黑类吸收性很强的气溶胶为云凝结核(CCN)形成的水滴或完全碳水混合水滴, 将增强水云对太阳辐射能量的吸收; Chylek 等^[16]的理论计算和实验室测量都显示, 如果碳黑小粒子散布于水滴表面就能大大增强单个水滴的吸收。可是问题是, 在未受污染的云中没有采集到这样的水滴^[17], 但仍有吸收异常。新近的理论计算表明^[11], 碳水混合水滴中的碳浓度要比云中实测的含量大数个量级才足以解释异常吸收。

(4) 水汽吸收效应 一种解释是, 由于水滴对短波辐射的多重散射作用, 使得云中水汽吸收比仅考虑单程时的吸收有所增加。但这种多重散射造成的水汽吸收增强似乎太小, 远不足以解释异常吸收。有人认为^[18], 云滴多重散射对吸收的作用在理论计算中没有得到特别的处理。另一种解释是^[1], 目前理论模式中水汽近红外段连续(continuum)吸收被低估了。由于水汽连续吸收很弱, 仍需要更多的实验室测量来确定不同水汽密度和温度下的吸收强度。作者这里设想, 还有另外一种可能性是, 在云中高相对湿度情况下, 产生水汽分子聚合物(双分子或分子团), 其近红外吸收行为比起通常水汽分子的有很大差异。这需要实验室的精细测量来验证。

(5) 云边侧或裂云逃逸效应^[19~21] 对于有限云(例如,积云块、孤立的地形云等)和裂云天空(积云群),散射的太阳光子有一部分将从云边侧逃逸出去,那么根据在云顶和云底测得的辐射通量计算吸收率将过高地估计云的吸收量。有人对孤立的地形云作过测量估算,云侧效应不高于5%^[18]。然而,绝大多数的飞机观测是在长几公里、宽几百至近千公里的大面积云系上进行的。研究结果表明^[12],云边侧效应在远离云边3 km处就可忽略。因此,云边效应也不是一个真正完满的解释。

(6) 云顶起伏不均匀性效应 有在云上飞行经历的人都看到,云顶是有起伏的,积云、层积云顶上自不待言,就是在所谓的层状云顶上也不是平坦的。云底也是同样的情形。先前的理论研究中大都没有考虑云顶起伏效应,所以自然有人怀疑这种效应会使实测的云吸收率偏大。Foot^[23]认为,云顶凸起部分有遮挡(成荫)作用,使得云顶观测的反射率减少,进而推算的云吸收就大。实际上,飞机观测是取一定时间的平均,在范围很广相对平坦的云上(下)足以平滑掉云顶云底的不平整效应^[24]。另外,云在垂直方向也是不均匀的,理论研究已经对垂直不均匀性的效应作了估计,结果影响很少。

(7) 平面平行(PP)模式的问题 为了简便起见或由于计算能力的限制,以前关于云吸收的观测与理论模式比较研究中,绝大多数都采用PP模式,而实际云层在水平和垂直方向上都是不均匀的。所以人们要怀疑PP模式计算结果的可信性和精确性。1996年在美国Alaska召开的“国际辐射学大会”(IRS'96)上,有几个研究小组报告了他们使用不同三维辐射传输模式计算云吸收的结果。他们的结果与PP模式的虽稍有差别(最大仅 5 W/m^2),但这远不足以解释云的吸收异常^[25~27],而且,对于大面积较平坦云的三维模式计算反而证实了平面平行模式结果的可靠性。

(8) 观测和分析误差的影响 有些学者认为,辐射测量仪器本身的误差较大,尤其是70和80年代的仪器误差很大(有的可能大于 30 W/m^2),而云吸收量值不大,这可能使得“测量”的云吸收偏大。这一笼统的解释也不能令人信服,因为近年来的仪器误差已控制在 10 W/m^2 左右,即使仪器有很大误差,也不可能不同研究小组采用不同的仪器测量都系统性地偏大,总的来说仪器误差应是随机的。关于两架飞机分别在云顶云底观测的时空不一致性等等产生的测量误差,也不应使云吸收测量值系统性地偏大。关于分析方法,倒有可能在观测与理论计算之间比较时产生系统性偏差。例如,在理论计算中输入参数的不确定性,可能使模式计算值偏小。陈洪滨和吕达仁^[28]的研究表明,先前云吸收模式计算中所采用的水折射指数(尤其是虚部)资料有很大问题,从而使得计算的水云吸收值偏小。如果使用较新的水折射指数虚部资料^[29],则在近红外段水云吸收可以有显著增大,从而部分地(至少1/3)解释吸收异常。他们认为,如果进一步考虑温度效应,则理论计算值将会更加接近观测值。此外,如果采用精确的水折射指数资料并考虑温度效应,则可能解决近红外云滴有效半径反演偏大的问题^[9]。

(9) 以上一些效应的合理组合 汪宏七认为¹⁾,以上各种效应单独地都不足以解释吸收异常,但大多是使观测与理论计算靠近,如果根据实际情况,将以上的一些效应作适当的组合及对观测资料作正确的处理分析,则可能很好地解释异常吸收。尽管由于问题的复杂性,目前尚难以用定量研究来证实这一想法,但作者倾向于认同这一解释。象

1) 个人交流

多数云吸收研究者一样, 作者不认为云中存在尚未被我们认识的真正的异常吸收机制。

4 有云大气的吸收异常

以上所述的云吸收异常是对一云层而言的。对于有云整层大气是否有异常吸收则是目前争论十分激烈的问题。当整层大气中有云时, 一方面云对太阳辐射能量有或多或少的吸收, 这是毫无疑问的, 云吸收量多少取决诸多云的宏微观特征参量(相态、液水含量、云厚、云高/云温、滴谱等); 另一方面, 云的反照率较高(尤其是中低云), 云平均来说要反射回 50% 以上的太阳辐射, 减少了云层中及云以下大气的吸收。从全球平均来说, 云减少了整个地气系统的太阳辐射能量吸收, 大气层顶的云短波辐射强迫 C_{ST} 全球年平均约为 $-45 \sim -50 \text{ W/m}^2$ 。

Cess 等^[30, 31]分析了卫星观测资料(ERBE 和 GOES)与 5 个地点的地面观测资料, 结果显示有云大气的全球平均吸收要比理论模式预报的大 25 W/m^2 。他们的研究中采用了两个新的参数。一个参数是地面的云辐射强迫 C_{SS} 与大气顶的 C_{ST} 之比 R , 即

$$R = C_{SS} / C_{ST}, \quad (1)$$

卫星测量与 5 个地点的地面观测所得 R 值约为 1.45, 而由两种大气环流模式计算的 R 都接近 1.0 (文中实为 1.07)。他们使用另一参数是 β , 其定义为

$$\beta = -\frac{d\alpha_T}{d(I_S / I_T)}, \quad (2)$$

对此式积分, 以晴空大气为“边界条件”, 可得

$$R = \frac{C_{SS}}{C_{ST}} = -\frac{1 - \alpha_S}{\beta}, \quad (3)$$

式中 α_T 和 α_S 分别是大气层顶和地表处的反照率。Cess 等人由观测数据推得的 β 平均值约为 0.55, 而由大气环流模式计算的 β 值(约为 0.8)在 5 个地点都明显地高于此数(见文献[30]中图 3)。通过这两个参数的观测值与大气环流模式计算值的比较分析, 他们认为: 大气环流模式低估了云的短波吸收, 意味着有云大气吸收异常。这里要指出的是, 目前大气环流模式中云辐射量计算采用的是非常简化了的参数化算式, 且仅是水云的, 而且在整个太阳辐射波段被划分成几个宽波段, 其计算的云吸收可能偏小。

Ramanathan 等^[32]通过 TOGA-TAO 资料的分析, 进一步显示 R 值(原文中记为 f_s)约为 1.5, 而辐射传输模式计算多种云的 R 值不大于 1.2, 他们也给出观测极端值, 则 R 可以为 1.2。其研究结果意味着, 总体来说, 大气环流模式计算的(云天)大气吸收少了约 30 W/m^2 , 而使得到达地球表面的太阳能量多了 30 W/m^2 。这对大气环流和洋流等将有着重大的影响。

Pilewskie 和 Valero^[33]根据 TOGA-COARE 和 CEPEX 高空飞机的观测资料和地面观测资料的分析, 更为直接地显示出云天大气吸收测量与理论计算的差别。要指出的是, 他们也采用了 Cess 等人的分析方法, 得到的 R 值达 1.58。

基于这些工作, Kiehl 等^[34]做了大气环流模式气候模拟对于所谓的增强短波辐射吸

收的灵敏性研究,他们在 NCAR 的气候模式中加入了增强云吸收,这样对流层上部增温了 4 K,而 Hardley 环流减弱了 12%,热带近地(海)而风速减小,进而导致洋面潜热通量减小了 25 W/m^2 。这些结果说明,改进目前气候模式中的辐射参数化方案及弄清云吸收异常问题是十分需要而又迫切的工作。

Chou 等^[35]用辐射传输模式计算了不同云比吸收(即 co-albedo)、太阳天顶角、云不对称因子及地面反照率时的云吸收和地面与大气顶云辐射强迫比值 R 。他们认为 R 为 1.50 是实际云辐射传输模式计算达不到的。但是,他们的云模式中的单次散射反照率 ω_0 取自所谓的云观测资料的反演值,是一些窄波段值;并且由于观测和反演误差, ω_0 明显太大,尤其是在近红外。

李占清等^[36,37]论证了比值 R 和斜率 β 并不与云吸收有直接的联系。他们采用辐射传输模式 LOWTRAN 7,研究了地面与大气顶云辐射强迫比值 R 与云光学厚度、太阳天顶角、云厚、云顶高及地面类型等参数之间的灵敏度关系,结果表明:任何情况下 $R < 1.2$,有时还低于 1.0。也就是说, R 大于 1.50 是模式计算达不到的,即可以指示云吸收异常的存在。进一步,他们使用 ERBE 卫星资料和 WCRP 的地面能量收支资料 GEBA,分析结果表明,在中纬(尤其是在北半球) R 值一般落在 1.0 至 1.2 之间,在极地 R 小于 1.0;在热带某些区域 R 值很高,这些区域对应于林火燃烧地点。他们认为,热带某些高 R 值地区的整层大气增强吸收应与植物燃烧(biomass burning)所产生的气溶胶有关。他们所得结论是,有云大气吸收异常即使存在,也仅是区域性的而非全球性的。可是对于植物燃烧使气溶胶增强吸收这一解释, Wiscombe^[38]也提出了不同的看法,因为植物燃烧仅发生在两个月内,由此产生的气溶胶很快被降水冲刷掉,从而不能解释全年的 R 高值现象。作者这里还要指出的是:(1)李占清等用的资料是月平均的,而 Cess 等用的是小时平均的;(2)LOWTRAN 7 模式中的云光学参数资料点太少,所计算的云对太阳辐射吸收相对于其他理论模式偏高,但仍不足以给出 $R = 1.5$ 。

Arking^[39]采用统计方法,研究了实测的晴天和云天整层大气吸收与云参数(云覆盖率等)和大气柱总水汽量之间的关系,得到了十分简单却令人吃惊的结果,即大气对短波辐射的吸收与云参数无统计意义上的相关,但与大气可降水量有一定的相关。这样,如果目前大气环流模式低估太阳辐射吸收,那么可能是水汽的辐射参数化有问题,例如,不确定的水汽连续吸收。值得指出的是,这种由统计方法得出的结论虽然简单明了,但却缺乏物理机制上的解释,因此还不能令人完全信服。

李占清^[40]比较了几种大气环流模式模式计算的大气吸收与实测值,结果表明,所谓的大气吸收异常更明显地出现在晴天而非云天大气中。这一发现似乎证实了 Arking 的结果,而与 Cess 等人的结果完全相背。李占清也认为,大气环流模式对(晴天)大气吸收的低估是由于水汽连续吸收和气溶胶短波辐射特性参数化方案中还存在着问题。

Ackerman 和 Toon^[41]采用一个一维海洋层积云模式,考虑了气溶胶和云微物理过程以及海洋边界层中的湍流混合。他们通过增加水折射指数虚部 n_i 来增强云的短波吸收。当 R 值增大时,层积云在中午将变薄甚至消散,而实际云没有这种变化。因此他们得出结论:云增强吸收不可能发生在海洋层积云中,或者说, Cess 等人大大地过高估计了云的增强吸收。要指出的是,这种结论是非常间接的,而且有人观测到云在中午有消弱现象(burning up)。另外,该文中说 n_i 资料中 10% 的系统误差不足以解

释增强吸收, 但他们没有看到 n_i 中存在的问题全部; 他们在整个可见和近红外段设一个水折射指数虚部值是有问题的。

Lubin 等^[42]用一个二维热带积雨云模式的输出, 作为一个平面平行辐射传输模式的云参数输入, 计算了云四个不同部分的辐射强迫比值 R , 研究了 R 与太阳天顶角、云微物理参数 (即质点相态和等效半径) 以及气溶胶的关系。结果表明: 平均 R 值不大于 1.2; 气溶胶不是云增强吸收的一种可能的解释。

Imre 等^[43]详细研究了 Cess 等所采用的分析方法后指出: 从公式 (2) 推到公式 (3) 所需的条件一般得不到满足; 晴天的区分对结果有重大影响, 而 Cess 等所用的晴天筛选方法有问题, R 随太阳天顶角 (可等价于纬度) 的增大而减小。他们工作中的一个问题是: 未确定从 GEOS 卫星测得的窄谱可见光辐射反演全谱太阳辐射量的误差。

Arking 等^[44]研究了天空不均匀性对确定 R 以及反射透射率比的影响, 从而认为 Cess 等采用的分析方法将导致有云大气对太阳辐射吸收的过高估计。Stephens^[45]也认为 Cess 等及 Pilewskie 和 Valero 采用的资料分析方法有问题。但这些否定有云大气增强吸收的论点也不是最终确定性的。

5 结语

本文对当前大气科学中的一个热点问题——太阳辐射吸收异常的研究进行了综述, 分别介绍了云层异常吸收的一些解释和论证整层大气吸收异常是否存在的一些代表性工作。要注意的是, 云层和整层大气吸收异常是有联系但却有一定区别的问题, 有人将它们完全混为一谈。

目前英美等国已组织或正在组织一些外场辐射观测试验, 例如, FIRE, ARM, BSRN 等 (GEWEX 计划中云辐射观测是一个重点), 以期加强对云-辐射相互作用的了解, 帮助大气环流模式中云短波辐射参数化方案的改进。随着高质量云辐射资料的积累及理论研究的深入, 水云异常吸收问题有望在二三年中有所突破。例如, 可以确定水云吸收异常究竟发生在哪些波段, 建立起精确的云辐射量计算模式等。

关于 (有云) 大气异常吸收问题也有望在近期有所突破, 例如, 可以澄清“有无异常吸收现象”、“是云天还是晴天有”等问题。当然, 这需要收集更多的卫星和地面观测资料, 并对资料作精确分析, 同时还要加强相关基础性理论研究和实验测量工作。

致谢: 作者与许丽生教授、汪宏七和吕达仁研究员进行了多次有益的讨论, 尤其是吕达仁研究员的鼓励和支持, 对本文的完成帮助很大; 李占清 (Z. Q. Li) 博士和 S.-C. Tsay 博士及 M. D. Chou 教授给予了很有价值的建设性意见; 李放博士帮助查找部分文献; 陈英女士打印初稿; 两位审稿人对本文修改提出了一些非常宝贵的意见。作者向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Stephens, G. L. and S. C. Tsay, 1990, On the cloud absorption anomaly. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **116**, 671~704.
- 2 汪宏七、赵高祥, 1994, 云和辐射, I: 云气候学和云的辐射作用, *大气科学*, **18** (增刊), 910~932.
- 3 Fritz, S. and T. H. McDonald, 1951, Measurements of absorption of solar radiation by clouds. *Bull. Amer. Me-*

- teor. Soc., **32**, 205~209.
- 4 Bonnel, B., Y. Fouquart, J. C. Vanhouette, C. Fravallo and R. Rosset, 1983, Radiative properties of some African and mid-latitude stratocumulus clouds, *Contrib. Atmos. Phys.*, **56**, 409~428.
 - 5 Slingo, A., 1989, A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds, *J. Atmos. Phys.*, **46**, 1419~1427.
 - 6 Hayasaka, T., N. Kikuchi and M. Tanaka, 1995, Absorption of solar radiation by stratocumulus clouds: aircraft measurements and theoretical calculations, *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1047~1055.
 - 7 Highett, P., 1987, A study of the short-wave radiative properties of marine stratus: aircraft measurements and model comparisons, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **113**, 1011~1024.
 - 8 Stephens, G. L. and C. M. R. Platt, 1987, Aircraft observations of the radiative and microphysical properties of stratocumulus and cumulus cloud fields, *J. Climatol. Appl. Meteor.*, **26**, 1243~1269.
 - 9 Nakajima, T. and M. D. King, 1990, Determination of the optical thickness and effective radius of clouds from reflected solar radiation measurements, Part I: Theory, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1878~1893.
 - 10 Wiscombe, W. J., R. M. Welch and W. D. Hall, 1984, The effects of very large drops on cloud absorption, Part I: Parcel models, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 642~650.
 - 11 King, M., L. F. Radke and P. V. Hobbs, 1990, Determination of the spectral absorption of solar radiation by marine stratocumulus clouds from airborne measurements within clouds, *J. Atmos. Sci.*, **47**(7), 894~907.
 - 12 Twomey, S., 1972, The effect of cloud scattering on the absorption of solar radiation by atmospheric dust, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1156~1159.
 - 13 Grassl, H., 1975, Albedo reduction and radiative heating of clouds by absorbing aerosol particles, *Beitr. Z. Phys. Atmos.*, **48**, 199~210.
 - 14 Twomey, S., 1977, The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149~1152.
 - 15 Chylek, P., V. Ramaswamy and R. J. Cheng, 1984, Effect of graphitic carbon on albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3076~3084.
 - 16 Chylek, P. and J. Hallett, 1992, Enhanced absorption of solar radiation by cloud droplets containing soot particles in their surface, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **118**, 167~172.
 - 17 Twohy, C. H., A. D. Clarke, S. G. Warren, L. F. Radke and R. J. Charlson, 1989, Light-absorbing material extracted from cloud droplets and its effect on cloud albedo, *J. Geophys. Res.*, **49**, 8623~8631.
 - 18 Scorer, R. S., 1996, Viewpoint: the cloud absorption anomaly, *Weather*, **51**, 288~290.
 - 19 Rawlins, F., 1989, Aircraft measurements of the solar absorption by broken cloud fields: a case study, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **115**, 365~382.
 - 20 Dore, A. J. et al., 1993, Shortwave radiative transfer through a hill cap cloud, IRS'92: Current Problems in Atmospheric Radiation, Ed. by S. Keenlynn and O. Kamer, A. Deepak Publ., Hampton, 104~107.
 - 21 Byrne, R. N., R. J. C. Somerville and B. Subasilar, 1996, Broken-cloud enhancement of solar absorption, *J. Atmos. Sci.*, **53**(6), 878~887.
 - 22 Ackerman, S. A. and S. K. Cox, 1981, Aircraft observations of shortwave fractional absorption of non-homogeneous clouds, *J. Appl. Meteor.*, **20**, 1510~1515.
 - 23 Foot, J. S., 1988, Some observations of the optical properties of clouds, Part I: Stratocumulus, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **114**, 129~144.
 - 24 Rawlins, F. and J. S. Foot, 1990, Remotely sensed measurements of stratocumulus properties during FIRE using the C130 aircraft multi-channel radiometer, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2488~2503.
 - 25 Francis, J. P. et al., 1996, On the question of enhanced absorption of solar radiation by clouds, IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation, University of Alaska Fairbanks, Alaska, U.S., Aug. 19~24.
 - 26 Crisp, D. and C. Zuffada, 1996, Enhanced water vapor absorption within tropospheric clouds: a partial explanation for anomalous absorption, IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation, held in University of Alaska Fairbanks, Alaska, U.S., Aug. 19~24.
 - 27 Varnia, T. and R. Davies, 1996, Quantitative analysis of radiative inhomogeneity effects, IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation, held in University of Alaska Fairbanks, Alaska, U.S., Aug. 19~24.
 - 28 Chen Hongbin and Lu Daren, 1996, An explanation for the anomalous absorption of solar radiation by water clouds, IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation, held in University of Alaska Fairbanks, Alaska, U.S., Aug. 19~24.

- 29 Kou, L. H., D. Labrie and P. Chylek, 1993, Refractive indices of water and ice in the 0.65- to 2.5 μm spectral range, *Appl. Opt.*, **32**(19), 3531 ~ 3540.
- 30 Cess, R. D. et al., 1995, Absorption of solar radiation by clouds: Observation versus models, *Science*, **267**, 496 ~ 499.
- 31 Cess, R. D., M. H. Zhang and Y. Zhou et al., 1996, Absorption of solar radiation by clouds: Interpretations of satellite, surface and aircraft measurements, *J. Geophys. Res.*, **101**(D18), 23299 ~ 23309.
- 32 Ramanathan, V. et al., 1995, *Warm pool heat budget and shortwave cloud forcing: A missing physics?* *Science*, **267**, 499 ~ 503.
- 33 Pilewskie, P. and F. P. J. Valero, 1995, Direct observations of excess solar absorption by clouds, *Science*, **267**, 1626 ~ 1629.
- 34 Kiehl, J. T., J. J. Hack, M. H. Zhang and R. D. Cess, 1995, Sensitivity of a GCM climate to enhanced shortwave cloud absorption, *J. Climate*, **8**, 2200 ~ 2212.
- 35 Chou, M.-D. et al., 1995, The effect of clouds on atmospheric absorption of solar radiation, *Geophys. Res. Lett.*, **22**(14), 1885 ~ 1888.
- 36 Li, Z. Q., H. W. Barker and L. Moreau, 1995, The variable effect of clouds on atmospheric absorption of solar radiation, *Nature*, **376**, 486 ~ 490.
- 37 Li, Z. Q. and L. Moreau, 1996, Alteration of atmospheric solar absorption by clouds: simulation and observation, *J. Appl. Meteor.*, **35**, 653 ~ 670.
- 38 Wiscombe, W. J., 1995, An absorbing mystery, *Nature*, **376**, 466 ~ 467.
- 39 Arking, A., 1996, Absorption of solar energy in the atmosphere: discrepancy between model and observations, *Science*, **273**, 779 ~ 782.
- 40 Li, Z. Q., 1996, Systematic errors in the earth's solar radiation budget simulated by GCMs, *IRS'96 Current Problems in Atmospheric Radiation*, held in University of Alaska Fairbanks, Alaska, U. S., Aug., 19 ~ 24.
- 41 Ackerman, A. S. and O. B. Toon, 1996, Unrealistic desiccation of marine stratocumulus clouds by enhanced solar absorption, *Nature*, **380**, 512 ~ 515.
- 42 Lubin, D. et al., 1996, Microphysical examination of excess cloud absorption in the tropical atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **101**(D12), 16961 ~ 16972.
- 43 Imre, D. G., E. H. Abramson and P. H. Daum, 1996, Quantifying cloud-induced shortwave absorption: An examination of uncertainties and of recent arguments for large excess absorption, *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1991 ~ 2010.
- 44 Arking, A., M.-D. Chou and W. L. Ridgway, 1996, On estimating the effect of clouds on atmospheric absorption based on flux observations above and below cloud level, *Geophys. Res. Lett.*, **23**(8), 829 ~ 832.
- 45 Stephens, G. L., 1996, How much solar radiation do clouds absorb? -Correspondence by R. D. Cess, M. H. Zhang, P. Pilewskie and F. P. J. Valero, *Science*, **271**, 1131 ~ 1136.

On the Anomalous Absorption of Solar Radiation by Water Clouds and by the Cloudy Atmosphere

Chen Hongbin

(LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A review of the investigations is given on the problem of the anomalous absorption of solar radiative energy by water clouds and for the cloudy atmosphere. All currently existing representative explanations are summarized and their reasons and shortcomings are pointed out. The emphasis of this paper is on the recent debate about the enhanced absorption in the cloudy atmosphere. Two opposite points of view addressing whether the enhanced absorption exists are synthetically presented.

Key words water cloud cloudy atmosphere solar radiation anomalous absorption