

机载对空微波辐射计及云液态水含量的测量

雷恒池^① 金德镇^② 魏重^① 沈志来^①

(^①中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; ^②吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062. E-mail: leihe@mail.iap.ac.cn)

摘要 介绍作者研制的单波段(9.5 mm)单天线机载对空微波辐射计, 相应的反演方法及其测量云中液态水和过冷水含量的初步结果. 野外飞行实验表明, 该仪器能够灵敏地测量云中液态水和过冷水含量及其变化, 所得数值合理, 并与地面雷达回波强度变化有较好的对应关系. 表明仪器的技术设计和反演方法是可行的, 具有实用价值, 填补了我国该领域的空白.

关键词 机载微波辐射计 微波遥感 反演方法 标定方法 云液水 过冷水

云中液态水含量是极为重要的大气物理参数, 云中过冷水含量在人工影响天气领域特别受关注. 目前对于这两个量的测量的手段不多. 在已有的探测手段中, 较早发展的是直接探测仪器, 诸如热线含水量仪、PMS公司生产的FSSP-100粒子探测装置、云滴碰撞-复制仪和Rosemount生产的专门用于测量过冷水的结冰探测仪等. 直接测量的局地准确性高, 但是, 它的取样体积十分有限, 取样代表性不太理想. 上世纪60年代起, 被动遥感探测技术引入气象领域, 明显改善了取样代表性. 其中, 地对空微波辐射计以其高时间分辨率、高探测精度和可无人值守连续工作, 可以从混合相态的云中探测出过冷液水的含量等一系列特点, 在中小尺度和人工增雨领域得到应用. 但是, 地基仪器难以快速移动, 限制了它的探测范围. 在上世纪80年代就有作者指出在飞机上安装遥感仪器是研究中小尺度问题的必然发展趋势^[1]. 研制机载对空微波辐射计, 既能继承上述地基微波辐射计的一系列特点, 又可直接进入目标云系非常灵活地进行探测, 有更好的应用前景. 然而, 到目前为止实际研制和应用机载辐射计测云的工作还很少, 我们只看到美国和俄国用机对空方式探测云液水含量的极少量论文^[2-3]. 他们研制的是一种双向天线机载微波辐射计, 两天线前后互相成固定角度, 共用一个接收机交互接收两个方向信号, 根据层析技术原理进行反演^[4], 获得云中液水的二维空间分布. 这种观测方法在探测精度等方面仍面临问题, 尚处于原理验证阶段, 投入应用仍需时日.

在我国, 北方十多个省市每年都有数月进行飞机播撒催化剂的人工增雨催化作业, 以克服干旱气候对农业生产的不利影响. 我们这一特有的国情既对研制测云机载微波辐射计提出了切实的需求, 也

给它的应用提供了广阔的平台. 为此, 中国科学院大气物理研究所和吉林省人工影响天气办公室合作, 委托中国科学院长春地理研究所在我国首次研制成功单波段(9.5 mm)单天线对空机载微波辐射计. 随后研究了相应的反演方法, 并于2001~2002年4~7月人工增雨作业期间, 进行了观测飞行试验. 本文简单介绍仪器的研制、标定、反演方法研究等方面所遇到的问题和解决的办法, 并简单介绍野外测量云液水和过冷水含量的初步结果.

1 仪器及其标定

1.1 预研究

我们选择常用的微波测云水波段 31.65 GHz, 以吉林省长春的7月份历史探空为背景大气样本, 采用国内外通用的构造云样本的方法^[5], 并参考吉林省云中液态水垂直分布的概念模型^[6]构成云天大气的统计样本, 对样本进行云天大气辐射传输模式估算. 计算表明, 整层云中液态含水量 L_{tot} 可以用仪器在地面接收的亮温 Tb_{grd} 的二次函数表示. 除了这个在地基微波辐射计研究中已有的结果^[7]外, 我们还进一步得到了云垂直积分过冷水含量 L_{sup} 和仪器在零度层高度接收的辐射亮温 Tb_{0C} 之间也有较好的二次函数关系这样的新认识. 由此推断, 各个高度上机载探测的垂直积分云液水含量的反演公式可以用亮温的二次关系式表示, 二次式各项系数则是随高度而变化的, 这一推断为后来进行的反演方法研究所证实. 它说明单独用 31.65 GHz 一个波长的辐射计, 采用(飞)机对空方式测层状云系的垂直积分云液水总量或积分过冷水总量从原理上是可行的. 定量估算的结果也找出机载辐射计与地基仪器探测时的信号动态范围的差异. 研制机载辐射计, 要在环境温度剧烈变化

(在十几分钟的时段中经历由地面的 30℃ 到高空的 -20℃) 的条件下, 准确接收高到 200 K 以上低至 10 K 以下的亮温信号。这样大的动态范围, 特别是低亮温端如此弱的信号, 是以前研制地基辐射计时所没有遇到过的。预研究使我们清楚地认识到上述研制机载辐射计的技术难点。国内已有的有关地基辐射计的技术方案不能满足需要, 必须有新的方案。而预研究的结果提供了定量制定仪器指标的依据。

1.2 仪器技术方案、指标和结构

本仪器采用中国科学院长春地理研究所提出的“数字增益波动补偿微波辐射计”的新技术方案。图 1 为该系统的原理框图。利用射频开关周期检测基准源对应的系统输出, 判定系统增益的变化量, 根据该变化量, 由数控单元进行辐射计输出数据修正。接收机采用固态噪声源输出耦合方式, 以适应低辐射亮度温度测量的需要, 提高辐射计进行大气探测的能力, 并解决低辐射亮度温度定标问题。耦合噪声温度约为 350 K。利用固态噪声源的耦合支路构成参考基准源, 稳定度优于 0.1 K。

仪器的工作频率为 31.65 GHz, 中频带宽为 400 MHz; 采用角锥喇叭天线, 口面尺寸 58.2 mm × 79.0 mm, 其 3dB 波束宽度为 7.2°; 积分时间取 1 s; 灵敏度为 0.2 K; 资料获取速率为 2 s 1 次; 功耗 200 W。

角锥型喇叭天线垂直朝天安装在机舱顶部, 并有天线罩保护; 接收机和数据获取系统放在机舱内, 数据可显示并存储在计算机内。

1.3 实用化的标定方法

由于天线不能俯仰及其他条件的限制, 本仪器采用绝对标定和气象标定相结合的两点标定法: 高温端标定的具体做法是: 将微波吸波材料做成帽子形状的罩子, 套在天线上, 同时记录仪器输出码值 T_{c1} 和环境温度。由于材料对微波全吸收, 因而具有黑体辐射特性, 在辐射平衡时它的辐射亮温 T_{b1} 等于其物理温度, 亦即以 K 为单位的环境温度。低温端标定的具体做法是: 在地面停机或空中飞行时, 当天顶方向仪器视野中无云时, 记录仪器输出的码值 T_{c2} 。再根据实时探空计算出地面或相应飞行高度上晴空大气下行辐射亮温 T_{b2} 。在 T_c-T_b 的直角坐标图中, 上述测值对应的两点的坐标 (T_{c1}, T_{b1}) 和 (T_{c2}, T_{b2}) 连线作为仪器的标定曲线, 我们简称为两点标定。

仪器分辨能力的实验室测定结果: 输入为恒温

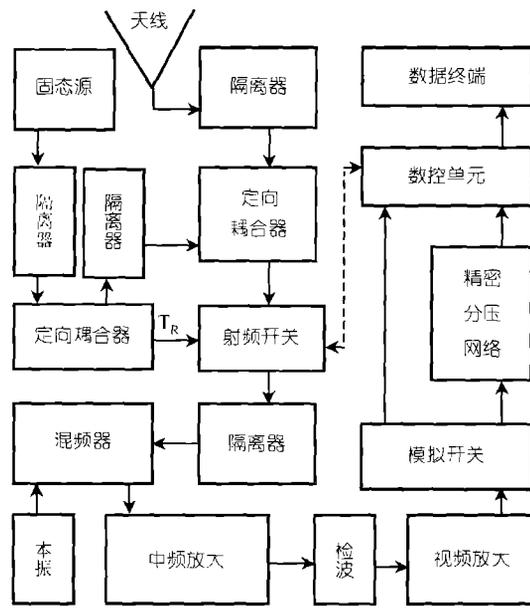


图 1 机载微波辐射计系统框图

黑体辐射信号时, 输出信号均方根脉动为 0.12~0.18K 左右, 这个值可以大致代表仪器灵敏度范围。野外观测测定结果: 晴空飞行所测灵敏度在 0.12~0.65 K 之间。

2 反演方法

2.1 云天大气辐射传输方程与反演方法

在 Rayleigh-Jeans 近似和平面平行大气条件下, 机载对空微波辐射计的遥感方程为:

$$T_b(y) = T_b(\infty) \cdot e^{-\int_y^\infty K_a(h) dh} + \int_y^\infty K_a(h) \cdot T(h) \cdot e^{-\int_y^h K_a(h') dh'} \cdot dh, \quad (1)$$

其中 y 为飞机所在高度, $T_b(y)$ 为辐射计接收到的云天大气向下辐射的亮度温度; $T_b(\infty)$ 表示宇宙背景辐射亮度温度, 为常数 (2.7 K); $T(h)$ 为大气温度廓线; $K_a(h)$ 是 h 处单位体积的物质总吸收系数, 它是水汽吸收系数 $\kappa_{a,v}$ 、氧气吸收系数 $\kappa_{a,o}$ 和云液水吸收系数 $\kappa_{a,c}$ 之和。这些吸收系数除了是波长的函数外, 还与一些大气变量有关。其中氧气和水汽吸收系数是大气压力温度和湿度的函数^[8], 可以根据探空廓线资料计算得到。云液水吸收系数是温度及云液态水含量 $M(h)$ 的函数^[8]。由于探空等常规观测没有云液态水含量的资料, 我们根据研究对象云的特点, 按照一定的规律

来模拟构造它的垂直分布,即所谓的云模型.具体方法见下节.一份探空廓线与模拟产生的云液水分布组合成一份云天大气样本.根据(1)式和下面的(2)式计算出任意探测高度上仪器接收的亮温 $T_b(y)$,及上空单位底面积气柱中的积分液态水含量 $L(y)$:

$$L(y) = \int_y^{\infty} M(h)dh. \quad (2)$$

本文采用统计反演的方法,就是选取大量有吉林省气候代表性的,并具有人工影响作业的季节代表性的历史探空资料,计算出大量的 $T_b(y)$ 和 $L(y)$ 数据对,统计回归得到待求量 $L(y)$ 和已知量 $T_b(y)$ 之间的函数关系,作为反演公式.

2.2 云模型和云天大气样本

采用相对湿度阈值比较的方法确定云液水垂直分布的几何框架.本文引入气象观测的目测最低云底高的信息,以该目测高度作为模式云底的高度.对于云底以上各层作诊断,当某层相对湿度值大于等于云底高度处的相对湿度值时,诊断为有云,反之则无云.相比于以往国内外的的工作,有两点改进:一是引入实测云底高;二是实时云底相对湿度代替人为给定的某一个固定相对湿度作阈值.改进对于提高反演精度的效果是明显的,限于篇幅,不再赘述.在诊断为有云的空间中云液水含量取典型层状云的垂直分布模型.具体说,将云中液态含水量垂直分布的峰值高度 h_p 定在云底之上高度为云厚的四分之一处,峰值处云液水含量的大小 $M_{\max}(g/m^3)$ 与云厚及云底处的相对湿度成正比例.云液水含量由峰值处向云底和云顶随高度变化而线性递减,在云底和云顶处云液水含量为零.温度低于 -20°C 的那些高度处认为无液态过冷水存在,液水含量为零.

本文在下面求取反演公式系数时,选取长春站4~7月4个月份的历史探空资料,每月有100份左右,作为产生云天大气样本集合的基础资料,根据本节的云模型产生云天大气的样本.

2.3 反演公式及其各项的系数

将上述的长春云天大气样本经(1)和(2)式计算的结果进行回归.结果表明,在对流层中下部的各个飞行高度上,其上空的气柱中液态含水总量 $L(h)$ 与模拟的亮温 $T_b(h)$ 都有较好的二次关系,其回归方程可写为如下形式(在这里和以下的各表达式中,表示飞行高度的符号都采用 h 代替(1)和(2)式中的符号 y):

$$L(h) = a_1(h) + a_2(h) \cdot T_b(h) + a_3(h) \cdot T_b(h)^2, \quad (3)$$

式中 $a_1(h)$, $a_2(h)$ 和 $a_3(h)$ 是二次曲线的系数,即我们要求的统计反演系数.

反演系数随高度和季节而变化.以月为单位求反演系数随高度变化的函数结果表明, $a_1(h)$, $a_2(h)$ 和 $a_3(h)$ 都可以用以高度为自变量的多项式函数表示.若取多项式的前4项,拟合精度都在97%以上,拟合关系如下:

$$a_j(h) = \sum_{i=0}^4 b_{ij} * h^i, (j=1,2,3), \quad (4)$$

其中 b_{ij} 为拟合多项式各项的系数,限于篇幅本文没有给出具体数值.已知某高度上机载微波辐射计所测亮温,根据(3)和(4)式就可求得空上的云液水含量.

2.4 反演精度的数值模拟检验

(i) 检验方法和检验样本.采用数值模拟的方法检验反演精度.选取一批长春站4~7月份探空样本,每月大约100份左右,依2.2节的方法构成云天大气样本作为独立检验样本.为保证检验的客观性,这批样本在年份上与2.2节回归计算反演系数时用的样本互不相同.根据(2)式计算出样本的积分云液水含量,作为模拟真值.根据(1)式计算出各样本的亮温作为模拟观测值.用得到的反演系数对模拟观测值做反演,得到积分云液水含量的反演值.统计比较反演值对模拟真值的偏差,就可以对反演精度做出估计.

(ii) 检验结果.在4~7月的范围内,以月为单位作统计.结果表明,反演误差随高度增加呈递减趋势,地面的均方根相对偏差值在15%~25%,6 km高度处为5%~10%.

3 云液态水含量的测量

3.1 观测概况

2001~2002年4~7月在吉林省人工增雨期间,机载微波辐射计进行有效观测10架次(包括两次晴空标定飞行),累计飞行近20 h.多数情况下,探测是随作业航线进行,个别情况下进行过有设计的飞行探测.作业和被探测云多为稳定层状云或镶嵌对流泡的层状云.资料分析表明,各类云之间以至同类云内不同位置处相比,云中积分液态水含量和积分过冷水含量的起伏是很大的,可达2个数量级: $10^1 \sim 10^3 g/m^3$.在所有探测中只有2001年7月8日是在 0°C 层高度以下做水平飞行探测,其余各次飞行观测都是在 0°C 层高度以上进行的.不言而喻,每次起飞和降

落期间的探测是包括了暖层和过冷层两个部分. 值得指出的是, 2001 年 7 月 8 日飞机上实时目测曾出现短时天顶为晴空的情况. 事后资料处理的结果表明, 积分云液水含量在相应时段内几次出现最小值为 0 g/m^3 . 目测出现晴空的时间与资料中出现最小零值时段的时间非常吻合, 表明仪器和反演方法都能客观地反映所测云液水含量的本来面目.

3.2 个例分析

这里给出 2002 年 4 月 22 日一次飞机观测云液水和过冷水的实例.

飞机 08:25 从由长春起飞, 依次经过双辽~四平~辽源~磐石~双阳之后, 11:00 返回长春. 飞行航线上有高层云(As)和层积云(Sc). 雷达观测 As 云的云顶高为 5500 m 左右.

图 2 给出有关各量的时间序列, 图中横坐标为时间, 实线为积分液水含量 $L(\text{g/m}^3)$, 虚线为 GPS 测得的飞机飞行的高度曲线, 细实直线为 0°C 层高度. 图 2 中横坐标上标注 CC, SL, SP, LY, PS 和 SY 处分别代表飞机飞过长春, 双辽, 四平, 辽源, 磐石和双阳等地的时刻. 由图 2 可见, 除了飞机起飞和着陆飞行外, 本次飞行探测大部分时间是在零度层高度(1460 m)以上进行. 这期间大体可分为 3 个时段(在图中时高曲线上依次标注为 a~b, c~d, 和 e~f 段), 各时段内过冷水含量分别在 3 个水平上.

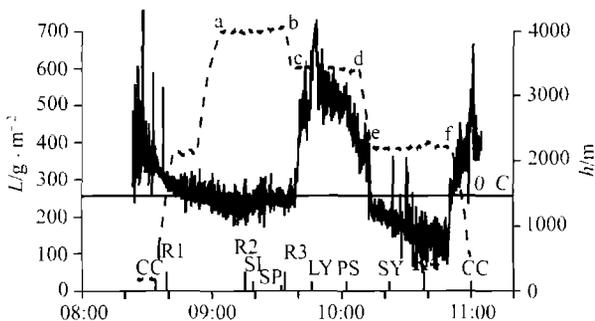


图 2 云液水含量时间序列

资料分析表明, 云液水(过冷水)含量与地面雷达回波强度变化有较好的呼应关系. 飞行期间地面雷达共取得 4 次 PPI 回波图(在图 2 的横坐标上分别以 R1, R2, R3, R4 标注出相应的雷达扫描时刻). 图 3 给出 R3(09:33)时刻的回波图, 雷达观测时对应飞机所在水平位置在图中以“■”符号标出. 由图 2 可见, a~b 飞行段(09:02~09:34)云液水含量起伏较小, 平均在

250 g/m^3 左右, 这时段航线处于长春~双辽~四平之间. 这一段飞行路线处于较弱回波区域, 强度在 20 dBz 以下. 图 2 中 c~d 飞行段(9:38~10:08)中液水含量值在 $300\sim700\text{g/m}^3$ 之间, 明显比另两个时间段的值高. 同时可以看到时间尺度在 2~4 min(对应空间尺度在 8~16 km)的波动, 很可能是对流产生的不均匀结构. 这时段内, 飞机过四平经辽源向磐石一线飞行. 由图 3 可见, 在四平和辽源之间确实存在最大值超过 30 dBz 的强回波区, 辽源和磐石之间也被较强回波区覆盖, 最大值可达 25 dBz. 图 2 中 e~f 飞行段(10:14~10:50)云液水含量最低, 在 $200\sim100 \text{ g/m}^3$ 之间. 在这时段内飞机经双阳向长春飞行, 其间飞机已进入弱回波区域, 强度在 5 dBz 以下. 上面分析再次表明, 云中垂直积分过冷水的多少与雷达 PPI 回波的强度有较好的正相关关系.

用雷达观测的云顶高度和飞机测量高度, 推算 3 个时段中有效的(飞行高度以上的)云厚分别为 1500, 2080 和 3300 m. 将 3 个时间段的积分过冷水含量的平均值分别除以相应的有效云厚, 即得到 3 个时段云中过冷水含量的平均值, 它们分别为 0.14, 0.22 和 0.05 g/m^3 . 这是一个合理的结果.

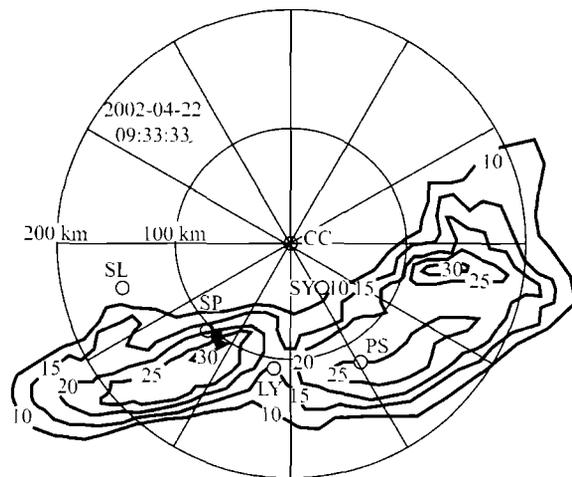


图 3 地面雷达回波强度分布

上述分析可见, 现有的观测结果已经表明, 我们研制的机载微波辐射计可以客观地反映不同系统中液态水(过冷水)含量的大小和变化, 测量结果已有实用价值.

3.3 液态含水量垂直廓线

由于仪器的探测灵敏度和取样的时间分辨率都

较高,使我们有条件利用辐射计上升(或下降)过程的测值来求取云液水含量垂直分布廓线。取仪器在上升(或下降)过程中观测的 L 值序列,逐次计算系列中适当高度间隔上的 L 值之差(dL)与相应的高度差(dh)之比,就得到云液态含水量(W)的垂直廓线:

$$W = -dL/dh.$$

公式右边的负号表明,积分云液水的增减变化总是和高度的增减变化呈相反趋势的。

图4给出2001年7月8日上午一次飞行爬升过程中得到的云液水垂直分布廓线,其高度间隔 dh 为200 m,该次作业航线上为大面积层状云系,下部为Sc云上部为As云。该廓线表明,云底在800 m左右,在云底之上约700 m处出现液态水含量的峰值 0.42 g/m^3 ,峰值之上,云液水含量随高度增加而减小,在高度1700~2000 m(云底之上900~1200 m)处云液水含量较小只有 0.05 g/m^3 左右,2000 m以上云液水含量又有增加。这个结果与一般层积云中云液水的垂直分布情况比较一致,使我们看到机载微波辐射计测云水廓线的潜在能力,如果进一步改善升空的飞行方式,它将成为很有发展前途的测云液水廓线的工具。

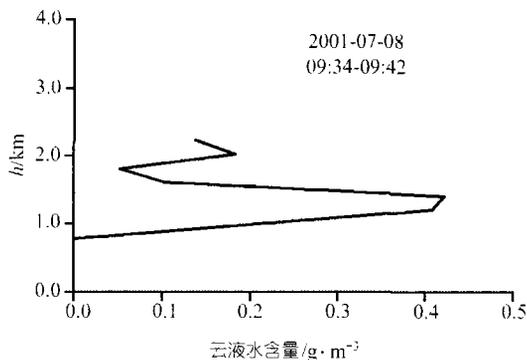


图4 云中液态含水量垂直廓线

4 小结

(i) 本文介绍了与研制垂直对空测云机载微波辐射计有关内容,用数值模拟的方法进行预研究,证实了单波段垂直对天探测的可行性,并确定了仪器研制的技术难点,文中简介了“数字增益波动补偿微波辐射计”的新技术方案,以及仪器的主要指标,给出了实验室内和野外飞行时对研制成的仪器的灵敏度的测定结果,表明该项指标已基本达到设计要求,本文还介绍了适合野外飞行的实用化的标定辐射计

的方法。

(ii) 本文介绍了探测器的高度实时可变的平面平行云天大气微波辐射传输模式,以及根据探空廓线构造云天大气样本时所取的云液水垂直分布模型,根据吉林省长春市4~7月逐月的反演系数,对独立样本做数值模拟检验,结果表明反演误差随高度增加呈递减趋势,地面的均方根相对误差在15%~25%,6 km高度处为5%~10%,反演公式和系数已达到该地区人工增雨时期实用的可接受精度。

(iii) 观测资料分析表明,研制的辐射计能够客观地反映云中液态水(过冷水)含量及其变化,对比分析表明,高空云液水含量与地面雷达的回波强度有较好的正相关关系,观测结果已有实用价值。

(iv) 作为一个新型仪器,本文的观测分析工作仅仅是初步的,主要侧重在验证仪器,特别是考验其探测过冷水的能力,所介绍的标定方法和反演方法中都还存在一定的不确定性,需要不断研究改进。

致谢 本工作受国家自然科学基金(批准号:40275002)和吉林省人工影响天气开放试验室的资助。

参 考 文 献

- 1 Serafin R J, Szejwach G, Phillips B B. Applications of airborne remote sensing in atmospheric sciences research. *J G R*, 1986, 91(C2): 2510~2516
- 2 Warner J, Drake J F. Field tests of an airborne remote sensing technique for measuring the distribution of liquid water in convective cloud. *J Atmos Oceanic Tech*, 1988, 5: 833~843
- 3 Koldaev A V, Melnichuk Yu V, Mironov A F. Remote sensing investigation of cloud liquid water space distribution. *Proceedings in 11th International Conference on Cloud and Precipitation*, Vol 1. Montreal: Elsevier Science Publishers, 1992. 573~575
- 4 Drake J F, Warner J. A theoretical study of the accuracy of tomographic retrieval of cloud liquid with an airborne radiometer. *J Atmos Oceanic Tech*, 1988, 5: 844~857
- 5 Decker M T, Westwater E R, Guiraud F O. Experimental evaluation of ground-based microwave radiometric sensing of atmospheric temperature and water vapor profiles. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 1788~1795
- 6 汪学林, 金德镇. 云雨物理论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1987. 39~53
- 7 黄润恒, 邹寿祥. 两波段微波辐射计遥感大气的可降水和液态水. *大气科学*, 1987, 11(4): 397~403
- 8 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理. 北京: 科学出版社, 1982. 46~58, 71~77

(2003-08-22 收稿, 2003-12-20 收修改稿)