

黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 2010. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究 [J]. 大气科学, 34 (3): 548-558. Huang Jianping, He Min, Yan Hongru, et al. 2010. A study of liquid water path and precipitable water vapor in Lanzhou area using ground-based microwave radiometer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 548-558.

利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究

黄建平 何敏 阎虹如 张北斗 闭建荣 靳秦建

兰州大学大气科学学院 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要 液态云水路径 (liquid water path, LWP) 和可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 是描述天气和气候的两个重要物理量。目前, 针对液态云水路径和可降水量的直接观测较少, 特别是在我国干旱半干旱黄土高原地区, 至今没有获得系统的观测值。本文利用兰州大学半干旱气候与环境监测站 (SACOL) 近两年的微波辐射计观测资料, 分析了黄土高原半干旱区液态云水路径和可降水量的变化特征。首先引入 Liljegren et al. (2001) 的反演方法并加以改进, 计算得到适合黄土高原地区的反演参数, 利用改进后的反演方法计算近两年的液态云水路径和可降水量。分析结果显示, 与 TP/WVP-3000 型 12 通道微波辐射计的直接输出结果相比, 本文反演结果与实际情况更加吻合。在 SACOL 代表的黄土高原地区, 95% 的云水路径值都在 150 g/m^2 以下, 95% 的可降水量值都在 3 cm 以下。由于 SACOL 的降水受亚洲季风的影响, 液态云水路径日均值冬季最小, 秋季最大, 其日变化规律显示半干旱区液态云水路径大体上呈双峰分布, 峰值主要出现在日出和日落时分。卫星反演资料的年变化趋势与地基反演结果比较吻合。因此, 运用卫星反演的液态云水路径来分析我国西北地区的空中云水资源是一种比较可信的手段。

关键词 液态云水路径 可降水量 微波辐射计 日变化 云和地球能量辐射系统

文章编号 1006-9895 (2010) 03-0548-11 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

A Study of Liquid Water Path and Precipitable Water Vapor in Lanzhou Area Using Ground-Based Microwave Radiometer

HUANG Jianping, HE Min, YAN Hongru, ZHANG Beidou, BI Jianrong, and JIN Qinjian

Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract Both liquid water path (LWP) and precipitable water vapor (PWV) are two important variables describing water source in the air, which are key elements in the energy budget and the workings of the hydrology. Currently, direct and continuous observations of LWP and PWV are few, especially for the Loess Plateau arid and semi-arid areas. The measurement of microwave radiometer at the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL) is used to analyze the diurnal and annual variations of cloud liquid water path (LWP) in the semi-arid area. Firstly, Liljegren et al. retrieval method (Liljegren et al., 2001) is introduced and improved, and then used to calculate the retrieval coefficients suitable for the Loess Plateau, and LWP and PWV are computed

收稿日期 2009-06-23, 2009-10-29 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40633017、40725015

作者简介 黄建平, 男, 1962 年出生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 大气辐射与气候变化。E-mail: hjp@lzu.edu.cn

using the modified retrieval method in the past two years. Compared with the artificial neural networks retrieval results of TP/WVP-3000, the improved Liljegren et al. retrieval results in this paper have smaller errors from the reality. The results show that 95% of LWP is below 150 g/m², and 95% of PWV is below 3cm at the SACOL. Because of the influence of Asian monsoon on precipitation, the daily average of LWP is the smallest in winter, the largest in autumn. The diurnal variation shows two peaks, which is due to local climate features, such as temperature inversion and thermal convection. Furthermore, the authors compare the annual variations of LWP derived from Terra and Aqua satellite with that from microwave radiometer, respectively. The results indicate that the satellite-derived results are close to the ground-based retrievals. Therefore, using LWP retrieved by satellites data to analyze the water source in the air over Northwest China is a relatively reliable method.

Key words liquid water path, precipitable water vapor, microwave radiometer, diurnal variation, CERES

1 引言

在全球变暖的气候背景下, 半干旱地区的生态系统显得十分脆弱和敏感, 气候变化对于这一地区人类生存及可持续发展具有决定性作用, 近年来引起了人们的广泛关注 (Ma and Fu, 2003; Trenberth et al., 2007; 符淙斌和严中伟, 1999)。黄土高原是我国最大的干旱和半干旱区, 也是我国缺水最严重的地区。空中云水资源是这一地区水资源可持续利用的重要来源, 同时也是影响我国西北地区气候变化的重要因子 (Huang et al., 2008)。因此, 精确观测和合理估算黄土高原的空中云水资源具有重要意义。

水汽作为大气中最为活跃的要素, 在各种时空尺度的大气过程中扮演着非常重要的角色, 全球大气吸收的能量有 3/4 来自水汽凝结的潜热释放 (刘奇和傅云飞, 2007)。水汽同时也是大气中重要的温室气体之一, 与气温变化存在正反馈机制。水汽增加会加剧温室效应, 导致气温升高, 从而使蒸发进入大气的水汽相应增加。研究长期气候变化很重要的一个方面就是要了解大气对于水汽分布状况的影响, 以及水汽对于大气辐射和大气环流的反馈这两者之间的机制。可降水量 (Precipitable Water Vapor, PWV) 是衡量大气中水汽含量的重要物理量, 是指某一时刻假设单位平方米大气柱中的水汽凝结为液态水并以降水的形式落在地面上的液态水厚度。可降水量是评估空中云水资源的重要指标, 在数值天气预报模式中加入可降水量可以改进降水预报和湿度垂直廓线的预测 (Kuo et al., 1993)。

大气中的液态水以云、雾等可见的形式存在。云在气候系统中扮演着重要的角色, 是影响辐射场的最不确定的因素之一, 它能够改变地气系统的辐

射收支平衡, 进而影响大气环流, 调节地球气候。云对辐射收支的影响主要取决于以下因素: 云量、云高、云粒子的尺度和形状、云 (冰) 水含量 (Curry et al., 2000)。云还对地球上水循环过程起着重要的作用。液态云水路径 (Liquid Water Path, LWP) 是用来反映单位面积上垂直大气柱中所含液态水总量的物理量。液态云水路径的变化对地表和大气层顶的短波辐射通量很敏感, 尤其是在液态云水路径较小时, 这种作用将更为明显 (Min and Duan, 2005)。在中尺度模式中, 潜热效应的大小与云水路径密切相关。云水路径也是判断人工增雨条件的重要参量。近年来, 液态水路径也已成为云特性研究中的重要内容, 所以精确的液态云水路径不仅是了解云和降水过程的关键, 而且, 也对我们了解云对辐射传输的影响具有重要意义。

长久以来, 人们对大气中水汽的认识基本来自于探空测量, 然而探空测量并不总是可靠的, 并且存在着代价昂贵、时间分辨率低以及不能直接得到液态水路径等缺点。利用地基微波辐射仪观测反演云水路径和可降水量已经有近 30 年的历史 (Lin and Rossow, 1996), 且发展了多种反演方法, 是获取空中云水资源的有效手段。我国科学家也早在 1980 年代初期开展这方面的研究 (赵柏林等, 1981; 魏重等, 1984; Wei et al., 1989), 取得了一定的成果。微波辐射仪具有时间分辨率高、精度高和长时间无人值守工作等优点, 能够获取水汽及液态水等信息。另外, 在站点稀疏的中国西北内陆地区, 地基微波遥感探测可以用于合理评估卫星的反演精度。

兰州大学半干旱气候与环境监测站 (Semi-Arid Climate & Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL) 于 2006 年 4 月引进了美国

Radiometrics 公司生产的 TP/WVP-3000 型 12 通道微波辐射计, 为深入研究西北地区空中云水资源提供了有利的观测平台 (Huang et al., 2008)。本文利用 SACOL 站两年 (2006 年 4 月~2008 年 6 月) 的微波辐射仪观测资料, 分析黄土高原半干旱区液态云水路径和可降水量的季节和日变化特征, 探讨这种规律的可能形成原因, 并与卫星观测进行对比。采用的反演方法是依据 Liljegren et al. (2001) 在 2001 年提出的一种独立于观测站点、改进的统计反演方法。相对于 TP/WVP-3000 型 12 通道微波辐射计所提供的神经网络方法, 本文方法对云的存在更加敏感, 并且本文方法得到的云水路径和可降水量值均具有较好的统计特征。同时, 考虑到卫星观测资料是研究站点稀疏的西北地区云性质的重要补充, 本文还利用 SACOL 地基微波反演结果检验了搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的“云与地球辐射能量系统 (CERES, Clouds and the Earth's Radiant Energy System)”和“中分辨率图像光谱仪 (MODIS, MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)”联合反演得到的单次扫描轨迹 (SSF, Single Scanner Footprint) 产品数据集中的液态云水路径精度。

2 仪器与资料简介

兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 位于兰州大学榆中校区海拔 1965 m 的萃英山顶 (35.946°N, 104.137°E)。下垫面属于典型的黄土高原地貌, 塬面梁峁基本为原生植被, 属温带半干旱气候, 年降水量小于 400 mm, 能很好地代表我国西北地区干旱半干旱地区的气候特征。SACOL 进行的观测项目有: (1) 边界层气象要素观测, (2) 地表辐射, (3) 地表通量, (4) 土壤温度和湿度, (5) 环境空气质量, (6) 气溶胶光学性质, (7) 温度和水汽廓线, (8) 天空状况。

SACOL 的 TP/WVP-3000 型微波辐射仪有 12 个通道, 其中, 5 个通道 (22.235、23.035、23.835、26.235、30 GHz) 位于水汽敏感的 K 波段 (20~30 GHz), 7 个通道 (51.25、52.28、53.85、54.94、56.66、57.29、58.8 GHz) 位于对温度敏感的 V 波段 (50~60 GHz)。根据大气微波辐射特性, 22.235 GHz 是水汽对微波的吸收线, 液态水对微波辐射的吸收出现在一个从 10 GHz 到 40 GHz 的连续

频段范围内 (周秀骥等, 1982)。在 22.235 GHz 频段附近, 微波辐射的变化可主要反映大气中水汽含量的变化, 在 22.235 GHz 附近的水汽吸收带和 60 GHz 附近氧气分子强吸收带两者之间是大气窗区, 微波辐射的变化可主要反映云液态水总量的变化 (Mark et al., 1987)。TP/WVP-3000 带有观测地表气象要素的传感器, 可观测到地表的气温、相对湿度和压强。在仪器顶部, 安装有红外辐射接收器和降水感应器, 前者可以探测天空的红外温度, 后者用于观测是否有降水发生。仪器的时间分辨率设置为 1 分钟, 观测模式是向天顶扫描。

根据 Liljeren et al. (2001) 提出的反演方法, 首先需要得到适于黄土高原地区的反演系数。本文使用 2001 年 7 月 13 日至 2008 年 1 月 27 日榆中探空站 (35.87°N, 104.15°E) 共计 4970 次探空资料, 用回归统计的方法得到这些反演系数。榆中探空站与 SACOL 相距 10 km, 地貌和气候均十分相似, 可以较好地代表 SACOL 站的历史信息。

为了与地面资料进行对比分析验证, 本文使用从 2006 年 4 月至 2007 年 12 月美国极轨环境遥感卫星 Terra 和 Aqua 上的 CERES、MODIS 探测器所获取的 FLASHFlux SSF Aqua/Terra MODIS 资料。SSF 是研究云、气溶胶和辐射对气候作用的产品。SSF 中对于云的微物理性质的反演算法主要是采用 VISST (Visible Infrared Solar-Infrared Split-window Technique) 技术, 利用红外辐射确定云的有效温度, 可见光波段的反射率确定云的厚度 (光学厚度 τ), 近红外波段 (3.7 μm) 用来确定云的有效粒子半径 (r_e), 分裂窗 (12 μm) 用来确定云的相位。根据云的液态云水路径 (L)、光学厚度 (τ) 和粒子半径 (r_e) 之间的关系

$$\tau = \frac{3L}{2\rho_l r_e}$$

(ρ_l 为液态水密度) 计算出液态云水路径。

3 反演方法简述

Liljegren et al. (2001) 提出利用两个通道微波辐射仪的观测结果反演云水路径和可降水量。在微波波谱区, 大气中主要的吸收物质为氧气、水汽和液态水。此波段中, 大气的厚度可以表示为: $\tau = \tau_{\text{dry}} + \tau_{\text{liq}} + \tau_{\text{vap}}$, τ_{dry} 、 τ_{liq} 、 τ_{vap} 分别是氧气、液态水、水汽对大气光学厚度的贡献, 其中由于液态水

和水汽吸收造成的大气光学厚度可分别表示为:

$$\tau_{\text{liq}} = \bar{\kappa}_{\text{liq}} \cdot L,$$

$$\tau_{\text{vap}} = \bar{\kappa}_{\text{vap}} \cdot V,$$

$\bar{\kappa}_{\text{liq}}$ 表示路径上的液态水平均吸收系数, $\bar{\kappa}_{\text{vap}}$ 表示路径上的水汽平均吸收系数, L 为液态云水路径, 表示路径上总的液态水含量, V 为可降水量, 表示路径上的总水汽含量。

液态云水路径定义为:

$$L = \frac{1}{\rho_l} \int_0^{\infty} W(z) dz,$$

可降水量定义为:

$$V = \frac{1}{\rho_l} \int_0^{\infty} \rho_v(z) dz,$$

其中, ρ_l 是液态水的密度, $W(z)$ 是液态水含量, 表示某高度上单位体积内含有液态水的质量, $\rho_v(z)$ 是水汽密度, 表示某高度上单位体积内含有的气态水的质量 (单位: kg/m^3)。

因此, 有

$$\tau = \tau_{\text{dry}} + \bar{\kappa}_{\text{vap}} \cdot V + \bar{\kappa}_{\text{liq}} \cdot L, \tag{1}$$

取用两个通道, 分别用下标 1 和 2 表示,

$$\tau_1 = \tau_{\text{dry}_1} + \bar{\kappa}_{\text{vap}_1} \cdot V + \bar{\kappa}_{\text{liq}_1} \cdot L, \tag{2}$$

$$\tau_2 = \tau_{\text{dry}_2} + \bar{\kappa}_{\text{vap}_2} \cdot V + \bar{\kappa}_{\text{liq}_2} \cdot L. \tag{3}$$

经过变换, 可得到:

$$L = l_1 \tau_1^* + l_2 \tau_2^*, \tag{4}$$

$$V = v_1 \tau_1^* + v_2 \tau_2^*, \tag{5}$$

其中, l 与 v 是吸收系数 $\bar{\kappa}_{\text{liq}}$ 和 $\bar{\kappa}_{\text{vap}}$ 的函数,

$$\tau^* = \tau - \tau_{\text{dry}}, \tag{6}$$

另外,

$$\tau = \ln\left(\frac{T_{\text{mr}} - T_c}{T_{\text{mr}} - T_{\text{sky}}}\right),$$

T_{mr} 是大气平均辐射温度; T_c 是宇宙背景温度, 取为 2.73 K; T_{sky} 是天空辐射亮温。

Liljegren et al. (2001) 分析了 T_{mr} 、 τ_{dry} 、 l 、 v 和地表气象参数 (空气温度 T_{sfc} 、相对湿度 R_{sfc} 、气压 p_{sfc} 、水汽压 e_{sfc}) 之间的关系, 将其参数化得到:

$$T_{\text{mr}} = a + bT_{\text{sfc}} + cR_{\text{sfc}}, \tag{7}$$

$$\tau_{\text{dry}} = a + b(p_{\text{sfc}} - e_{\text{sfc}})^2 / T_{\text{sfc}}, \tag{8}$$

$$v = a + bp_{\text{sfc}} + c_1 T_{\text{sfc}} + c_2 T_{\text{sfc}}^2 + d_1 e_{\text{sfc}} + d_1 e_{\text{sfc}}^2, \tag{9}$$

$$l = a + bp_{\text{sfc}} + cp_{\text{sfc}} e_{\text{sfc}} + de_{\text{sfc}}^2. \tag{10}$$

本文将榆中站的 4970 次探空资料输入到 MONORTM 模式, 可以得到方程 (7)~(10) 中等式左边的参数, 然后通过回归的方法计算得到的系数。表 1 列出了方程的系数, 以及在此系数条件下, 方程中变量和因变量之间的复相关系数。再将方程 (7)~(10) 正算得到的 T_{mr} 、 τ_{dry} 、 l 、 v 带入方程 (4)~(6), 就可以得到所需要的云水路径和可降水量。其中, 在模式中认为当相对湿度超过 95% 时, 有云存在。

表 1 为根据榆中站历史探空资料得出方程 (7)~(10) 的系数。分析方程 (4) 和 (5) 易知, τ^* 是光学厚度, l 和 v 是方程系数。由方程 (7) 和方程 (8) 可得 τ^* , 所以将方程 (7) 和方程 (8) 作为对光学厚度的参数化。由方程 (9) 和方程 (10) 得到 l 和 v , 因此, 方程 (9) 和方程 (10) 可以看成是对方程 (4) 中方程系数的参数化。由表 1 可见, 对于大气光学厚度和氧气造成的光学厚度的参数化效果较好, 复相关系数较高, 而系数 l 、 v 的参数化效果相对较差。由于云水路径和可降水量对光学厚度的敏感程度是对系数的敏感程度的几倍, 所以此方法仍

表 1 方程 (7) ~ (10) 的回归参数

Table 1 Regression parameters in Equations (7) ~ (10)

		a	b	c	d	c_1	c_2	d_1	d_2	复相关系数
方程 (7)	$T_{\text{mr}, 1}$	0.879364	0.928692	0.979210						0.9680
	$T_{\text{mr}, 2}$	-14.819911	0.997754	14.308714						0.9696
方程 (8)	$\tau_{\text{dry}, 1}$	-0.001009	5.259616							0.953549
	$\tau_{\text{dry}, 2}$	-0.001631	7.866806							0.953394
方程 (9)	v_1	64.543777	0.001477			-0.304350	0.000535	-0.010997	0.000531	0.252445
	$-v_2$	-37.416484	-0.007580			0.225362	-0.000452	0.197498	-0.005851	0.641772
方程 (10)	$-l_1$	-0.001894	-0.000170	-0.000009	0.000152					0.540071
	l_2	0.110851	0.004419	0.000036	-0.000585					0.604283

注: 下标 1 和 2 分别表示 23.6 GHz 和 30 GHz 两个通道。方程 (7) 中 T_{mr} 是大气在给定通道下的平均辐射温度, 它受到地表的空气温、湿度影响; τ_{dry} 是大气中除去云和水汽的光学厚度, 在微波波段主要是氧气的光学厚度, 气压、水汽压和温度是主要影响因素。

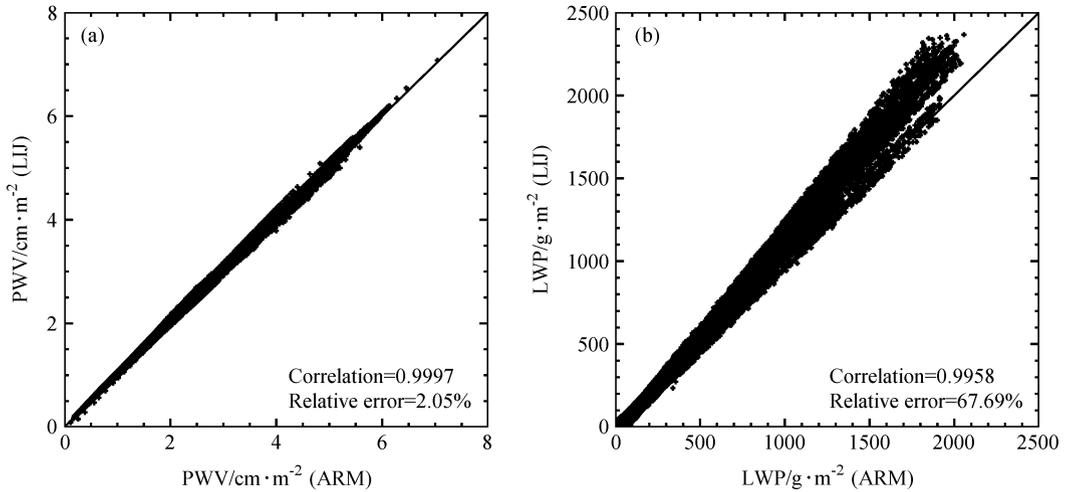


图1 ARM SGP Lamont 观测资料反演对比: (a) 可降水量 (PWV) 的 ARM 发布值与本文 (LIJ) 反演值对比; (b) 液态云水路径 (LWP) 的 ARM 发布值与本文反演值对比

Fig. 1 Scatter plots of ARM SGP Lamont microwave radiometer products: (a) PWV comparison between ARM standard products and improved Liljegen's (LIJ) retrieval results; (b) LWP comparison between ARM standard products and improved Liljegen's retrieval results

具有较高的反演精度。复相关系数是用于测定两个或多个变量对某一特定变量之间关系的密切程度的指标,其计算公式为:

$$R = \sqrt{\frac{\sum (y_c - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}}$$

复相关系数越大,说明联系越紧密。

4 反演方法的检验

4.1 反演结果与 ARM 观测站标准产品比较

美国大气辐射测量观测计划 (Atmospheric Radiation Measurement, ARM) 旨在提供数据产品,以提高人们对大气中云-辐射反馈过程物理基础的理解。该计划提供了诸多站点长时间的观测数据,目前在北极的阿拉斯加、中纬度的南部大平原 (SGP, South Great Plain)、低纬度的太平洋地区建立了观测站点,分别代表了不同的气候类型。ARM 南部大平原 (SGP) Lamont 观测站是 ARM 观测计划的中心观测站,观测手段齐全,涵盖了各类气象要素的观测。作为一个权威的观测站,该站也发布了云水路径和可降水量的观测值。本文采用了自 2006 年 1 月 1 日至 2008 年 5 月 3 日双波段微波辐射仪 (23.8 GHz 和 31.4 GHz) 的观测亮温、地表气象参数以及 Liljeren et al. (2001) 提供的利

用 23.8 GHz 和 31.4 GHz 进行液态云水路径和可降水量反演的系数,进行液态云水路径和可降水量的反演,并将结果与 ARM SGP Lamont 站所发布的标准产品进行对比。

图 1 比较了用同一时刻观测的亮温、两种不同的反演方法得到的可降水量 (PWV) 和液态云水路径 (LWP) 的散点图,图中的横坐标代表 ARM 观测站提供的标准反演产品,纵坐标代表本文反演算法得到的结果。图 1a 是可降水量 (PWV) 的散点图,散点紧密地分布在对角线上,两种方法的反演结果十分吻合,相关系数达到 0.9997,平均相对误差为 2.05%;图 1b 比较了两种算法得到的液态云水路径 (LWP),两者的相关系数是 0.9958,平均相对误差为 67.69%。可以看到,在云水路径值小于 1000 g/m^2 时,二者吻合较好,当云水路径的值大于 1000 g/m^2 时,本文的反演值略大于 ARM 反演产品。Turner et al. (2007) 将 18 种液态水路径反演算法分别用于反演最简单的全天空为单层层云条件下的液态云水路径,发现各种方法得到的结果差异很大,最大可以达到 60 g/m^2 。基于此,ARM 观测站的反演算法与本文使用反演算法之间差别是可以理解的。另外,当云水路径的值大于 600 g/m^2 时,往往有降水过程发生 (Dong et al., 1998)。降水发生时,水滴粒子的几何尺度显著大于云滴,它的散射效应会对结果造成一定的偏差。总之,可

降水量的反演研究相对于液态云水路径更加成熟,反演结果也比较理想。在液态云水路径较小时,本文的反演算法具有较好的效果;在液态云水路径较大时虽有偏差,但仍具有一定的可信度。

4.2 反演结果与神经网络方法产品比较

Radiometrics 公司生产的 TP/WVP-3000 型微波辐射计本身提供的反演算法是 Solheim et al. (1998) 提出并通过实践不断改进的神经网络方法。神经网络方法是以微波辐射计观测到的 12 个通道亮温以及地面参数(气温、气压和相对湿度)作为神经网络的输入层节点,输出层节点分别是可降水量、液态云水路径和从地表至 10 km 高度的 47 层温湿廓线,0~1 km 分辨率为 0.1 km,1~10 km 分辨率为 0.25 km。神经网络输入层和隐含层各个节点的权重系数是由历史探空资料训练得到。

图 2 是 2006 年 4 月至 2008 年 6 月 SACOL 站 TP/WVP3000 型微波辐射计反演值(使用神经网络方法)和本文的反演方法得到可降水量(PWV)和液态云水路径(LWP)的比较,图中的纵坐标代表神经网络方法的反演产品,横坐标代表本文反演算法得到的结果。图 2a 是两种方法反演可降水量的比较。相关系数为 0.99,平均相对误差为 3.58%,本文的反演结果略偏小于神经网络方法,在可降水量大于 2 cm 时,这种偏差更加明显。图 2b 是 SACOL 站液态云水路径比较,在这里剔除了异常的亮温值(Cimini et al., 2003),且剔除了有降

水发生的例子。两者的相关系数为 0.75,平均相对误差为 -16.12%。二者之间的偏差较大,但趋势一致。在神经网络反演结果为零时,本文方法的反演结果并不为零。这也说明在相当多的情况下,本文方法比神经网络方法对云更为敏感。

微波辐射计顶部的红外辐射接收器(9.6 μm 到 11.5 μm)可以探测天空的红外温度,当天空有云存在时,探测的红外温度是云底温度。由于红外辐射接收器独立于微波接收器,它得到的云底高度信息可以对上述两种反演方法进行简单的检验。水云存在高度一般低于 5 km。因此,当水云云底高度升高时,云水路径应该降低,而当云出现时,云水路径的值应该增加。图 3a 是选取 2007 年 6 月 3 日 SACOL 站微波辐射计的观测结果进行检验,实线代表本文反演方法得到的液态云水路径,点线代表神经网络方法得到的液态云水路径,点划线是云底高度。结合红外探测器得到的云底高度以及微脉冲激光雷达的后向散射强度可以看出,在 10:00 至 17:00 (北京时)测站上空有高度为 2~3 km 的水云存在。神经网络方法反演的云水路径仅在 13:00 时左右有值,而本文的反演结果与激光雷达的观测更加吻合。因此,本文反演方法对于云的出现更加敏感,得到的结果较符合实际情况。此外,00:00 至 10:00 时,从激光雷达的后向散射来看,云底高度高于 5 km,云一般以冰相存在,液态水含量很低,本文的反演结果并不为零,这是因为背景噪音

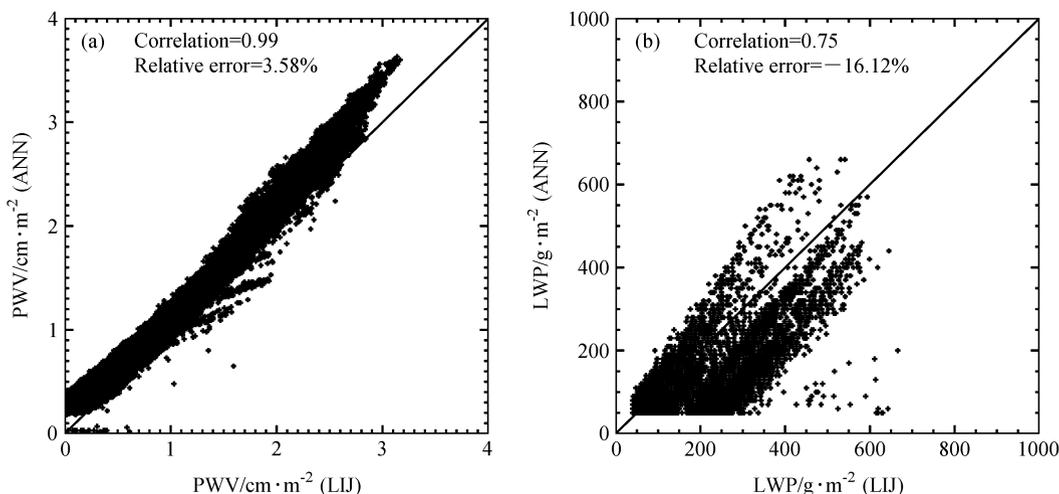


图 2 SACOL 站观测资料反演对比: (a) 可降水量(PWV)的神经网络(ANN)反演值与本文反演值对比; (b) 液态云水路径(LWP)的神经网络反演值与本文反演值对比

Fig. 2 Scatter plots of SACOL microwave radiometer products; (a) PWV comparison between artificial neural networks (ANN) and improved Liljegen's retrieval results; (b) LWP comparison between artificial neural networks and improved Liljegen's retrieval results

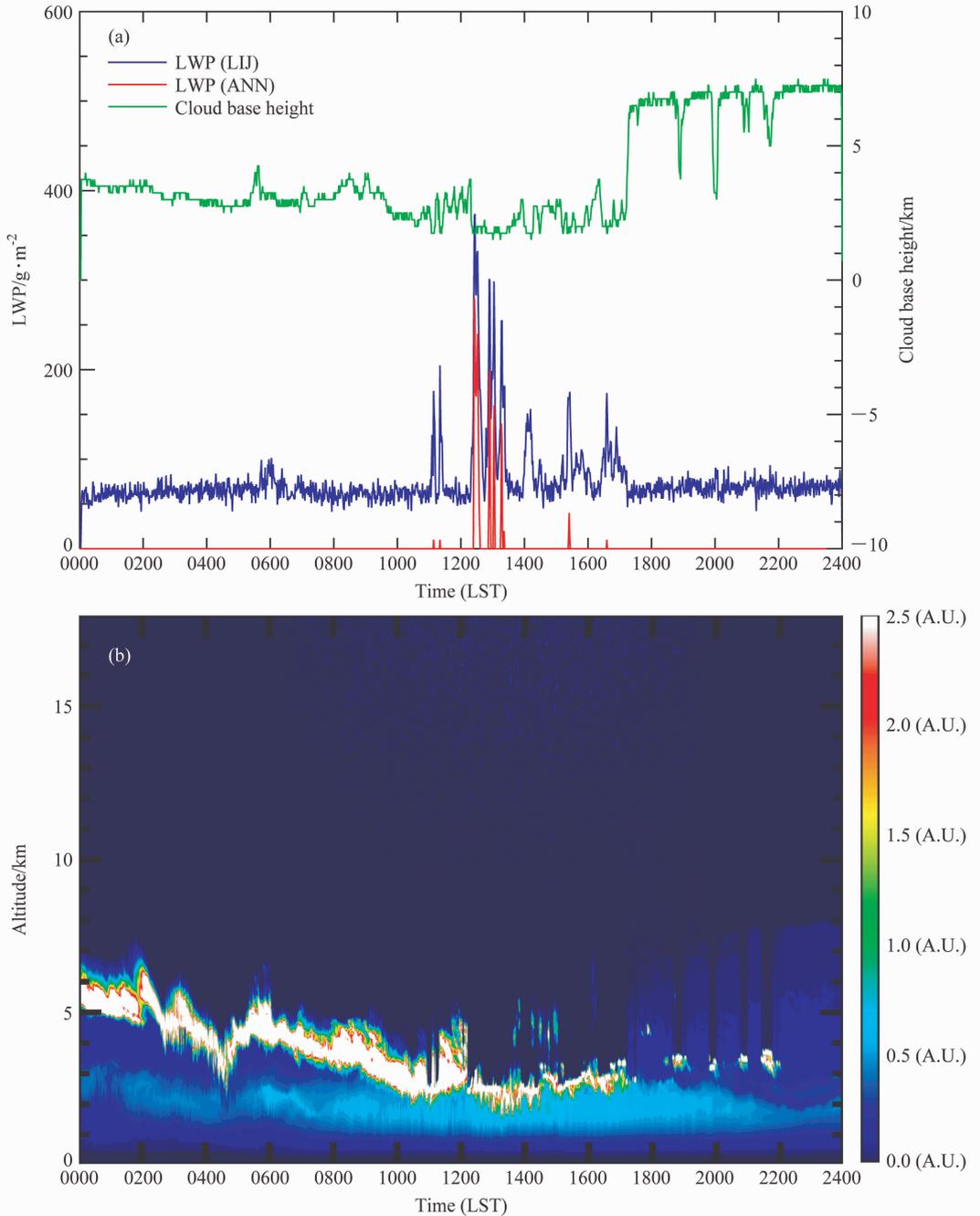


图3 (a) 云水路径的值与云底高度的关系(选取2007年6月3日为例);(b) 微脉冲激光雷达的后向散射强度(标准单位 A. U.)

Fig. 3 (a) LWP and cloud base height at SACOL on 3 Jun 2007; (b) Micro-Pulse Lidar (MPL) normalized relative backscatter (A. U. : Arbitrary Unit)

会对结果造成一定的误差。Lin et al. (1998) 指出, 1 K的亮温噪音会造成大约 0.4 mm 的云水路径误差。

图4统计了云水路径和可降水量的频数分布。图4a是本文方法反演可降水量值与神经网络方法反演值的频数分布对比, 可以看到绝大部分值都在

3 cm 以下, 且二者频数分布相似。图4b可见, 两者云水路径的分布趋势接近, 但是在云水路径小于 150 g/m^2 , 尤其是在 $50 \sim 100 \text{ g/m}^2$ 的范围内, 本文反演结果出现的频数远远高于神经网络反演结果, 这与图3的结论是一致的, 即在有云情况下神经网络反演的云水路径却为零。

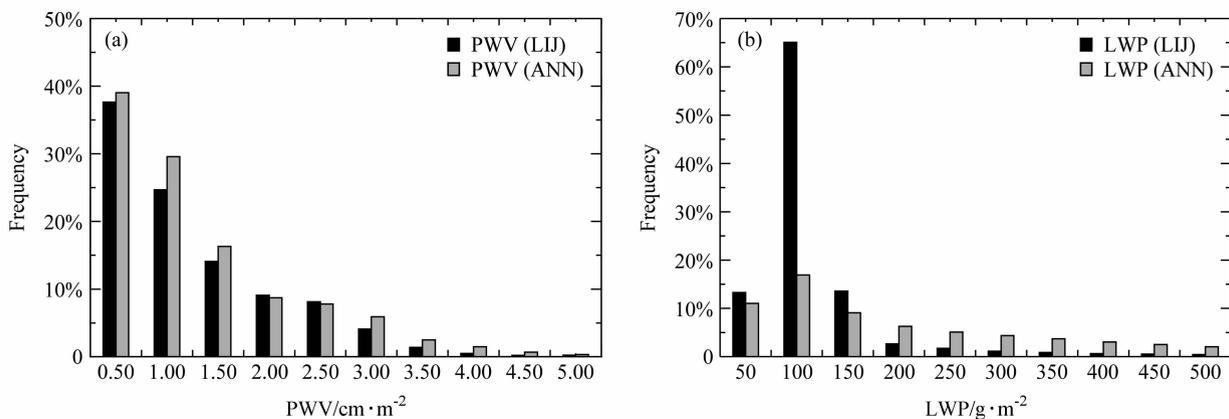


图 4 可降水量 (a) 和云水路径 (b) 的神经网络反演值和本文反演值的频数分布

Fig. 4 Frequency distributions of (a) PWV and (b) LWP retrieved by ANN and improved Liljegren's retrieval method at SACOL.

5 液态云水路径的变化特征

利用 SACOL 两年的地基微波遥感观测亮温资料 (2006 年 5 月~2008 年 5 月), 用本文的方法反演液态云水路径。SACOL 位于中纬度地区, 四季分明, 12 月~2 月为冬季, 3 月~5 月为春季, 6 月~8 月为夏季, 9 月~11 月为秋季, 分别计算出四季液态云水路径的日变化情况。当有降水发生时, 微波观测的亮温会受到空中降水的影响, 反演结果不能准确代表真实的液态云水路径, 所以在计算中剔除了有降水伴随的值。

图 5 为 SACOL 微波辐射计反演的液态云水路径日变化图, 其日平均值为 109.127 g/m², 图中的误差棒代表液态水路径在整点所在的 1 小时内的标准差大小。

由于云瞬息万变, 其日变化趋势也是各种各样的。在不同的天气背景下, 出现云的类型、云量、云的高度和相位都有很大的不同。我们用近两年的液态水路径资料, 统计分析了它的日变化。认为它可以代表云水含量在一日内各个时段的分布状况。可以明显看出, 早上日出之前 (6 时~8 时) 和傍晚日落时分 (18 时~21 时), 分别出现一天中液态水路径的两个峰值。

SACOL 四周地势并不平整, 沟壑纵横。夜间, 由于地表长波辐射比较大, 容易形成逆温层, 这会使近地层的水汽不易向上输送, 在逆温层下汇集, 因此在日出之前出现云水含量的峰值; 随着太阳上升, 地面气温升高, 混合层厚度增加, 对流加强, 水汽不仅仅局限于逆温层下, 可以向更高的地方输

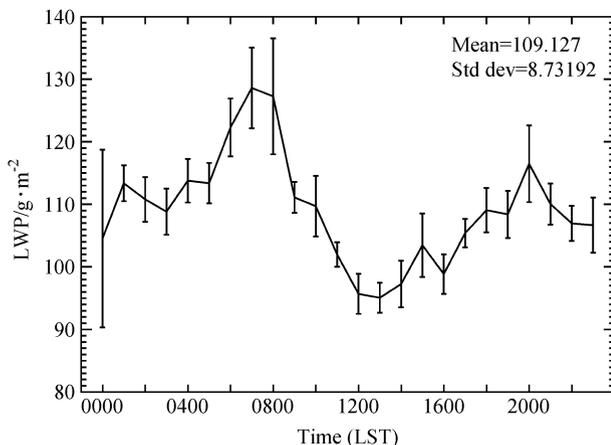


图 5 SACOL 液态云水路径 (LWP) 的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of LWP at SACOL in the whole year

送, 云也随之消散, 在中午形成了大气柱液态水含量的低谷。

傍晚时分, 由于一天太阳照射, 地面温度较高, 空气温热, 而此时太阳已经落山, 空气由干燥的闷热变成了湿热, 常常会有积雨云形成, 夏季傍晚也是雷雨发生频率最高的时段, 深厚的对流云所含的液态水比较大, 使得整个大气柱中的液态水路径出现了一日内的第二个峰值。

标准差可以反映出数据集的离散程度, 衡量数据的变化幅度。从一日内标准差的变化情况来看, 在两个峰值处的标准差是最大的。从液态云水路径的日变化来看, SACOL 站液态云主要出现于早晨和傍晚时分, 但由于季节的变迁、天气系统的随机性等原因, 使得云的液态水含量在每日的两个峰值处都有较大的浮动。

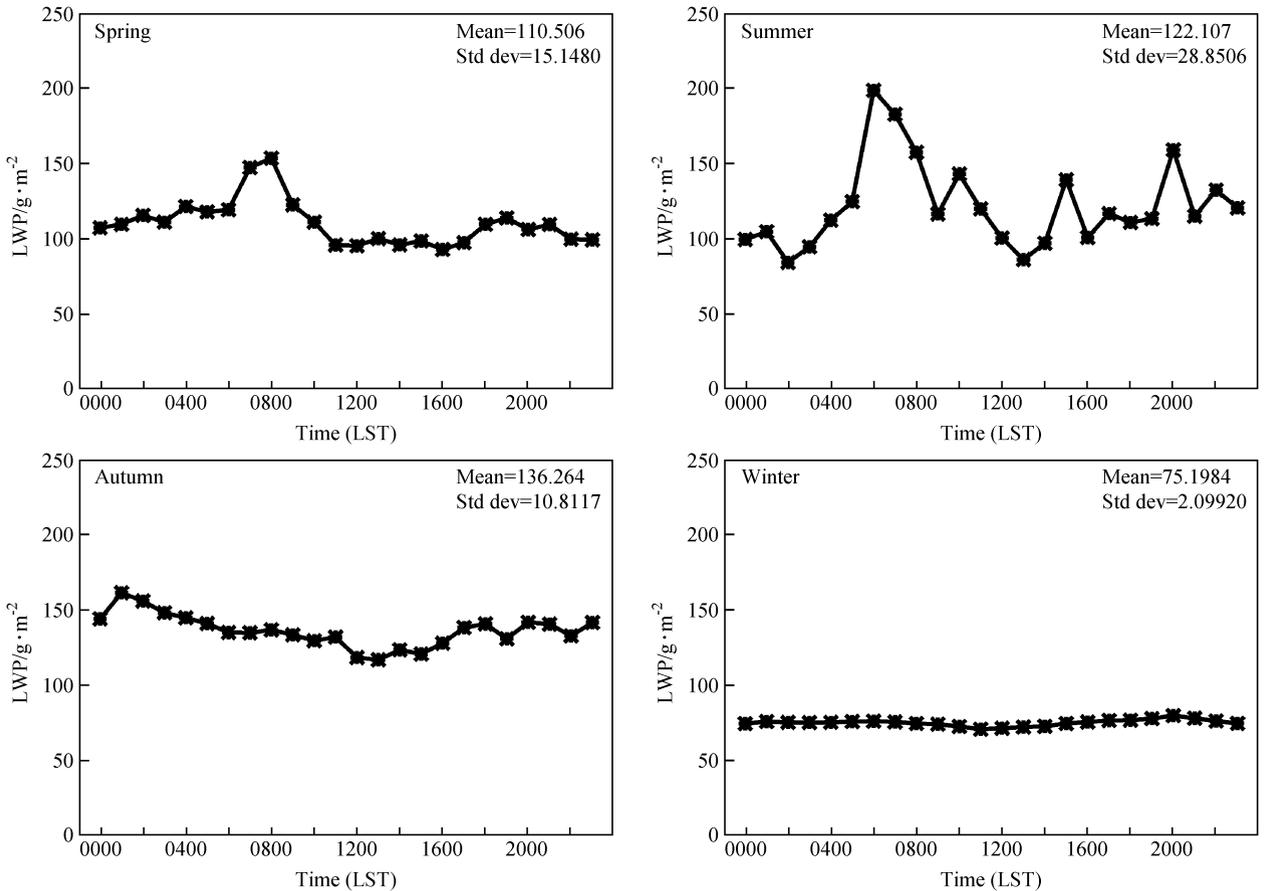


图6 SACOL不同季节液态水路径的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of LWP at SACOL in different seasons

图6分别给出了四个季节中液态水路径的日变化情况。秋季的液态水含量均值是 136.264 g/m^2 ，为四季中最大，夏季和春季次之，分别是 122.107 g/m^2 和 110.506 g/m^2 ，冬季的液态水含量是 75.198 g/m^2 ，显著低于其他季节。夏季的液态水含量标准差是四季中最大的，春、秋两季次之，冬季最小。

SACOL 站位于亚洲季风区的边缘，夏季日照强烈，冬季寒冷干燥。夏、秋季节，我国西南以及东南沿海的水汽能一直输送到内陆地区，SACOL 站受到夏季风的影响，液态云水路径达到全年的峰值。且夏季的大气层结是四季中最不稳定的，容易形成午后热对流等天气现象，日变化的幅度也相应较大，液态云水路径的日变化标准差是四季中最大的。冬季空气中水汽含量少，形成云的可能性较小，所以日平均液态云水路径是四季中最小的；而且在冬季，SACOL 站长期处于北方冷高压的控制之下，大气层结稳定，静风频率较高，日变化的振幅也最小。

6 地基与卫星反演的比较

评估站点稀疏的西北地区的云水资源，卫星观测给我们提供了最有效的手段，但是卫星观测结果准确性是前提，这就需要我们用地基探测的结果来评判。

卫星观测和地面观测的时间、空间分辨率有很大的差异。根据各态历经性假设，我们知道采样样本的时间平均和空间平均是可以等价的。在 Dong et al. (2002) 比较 GOES 静止卫星资料和美国大气辐射测量站 (ARM) 的云参数时发现，以地面站为中心， $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 方格中的卫星资料取空间平均，和以卫星过境时刻为中心，取 1 小时平均的地面资料有很好的对应关系。由于 SACOL 站探空资料的不足，本文也采用和 Dong et al. (2002) 相同的时、空平均方法。

图7比较了用 VISST 算法反演得到的 CERES SSF 数据集中的液态水路径和 SACOL 站微波辐射

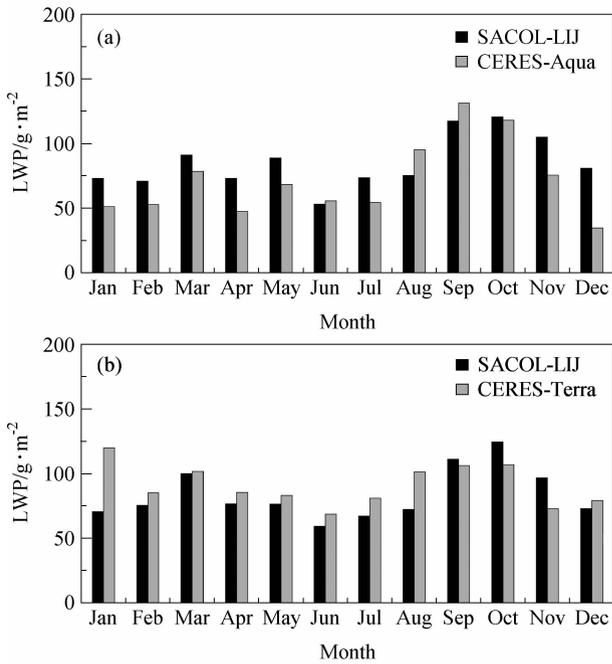


图7 SACOL站地面微波(黑色)与CERES SSF反演的液态水路径(灰色)的年变化趋势分析:(a)与Aqua卫星反演结果比较;(b)与Terra卫星反演结果比较
Fig. 7 Comparison of LWP annual variations between improved Liljegren's retrieval results (black) and CERES SSF products (gray) at SACOL: (a) Compared with Aqua CERES SSF retrievals; (b) compared with Terra CERES SSF retrievals

计反演的液态水路径的月平均值。卫星观测的液态云水路径与地基反演结果有细微差异,Aqua与地基反演结果的最大差异出现在12月,约是 -46.0 g/m^2 ,Terra卫星的最大绝对误差出现在1月,约是 49.6 g/m^2 。其他月份的绝对误差都小于 40 g/m^2 。

微波辐射计的反演精度主要受以下因素的影响:(1)微波观测本身的不确定性;(2)大气(包括水汽和氧气)光谱的不确定性和微波吸收模式中的液态水的介电常数的不确定性;(3)反演方法的不确定性。近年来,很多研究发现微波反演液态水路径反演的误差较大(Marchand et al., 2003),特别当液态水路径很小时($<100 \text{ g/m}^2$),反演误差一般都在 40 g/m^2 (Turner et al., 2007)。由于SACOL站位于我国半干旱地区,常年气候干燥、少雨,云的含水量较小,液态水路径在多数情况下都很小,其统计频数也随着液态水路径值的增大而减小,小于 150 g/m^2 的出现频率接近95%。而对于云含水量较低的云(液态云水路径 $<100 \text{ g/m}^2$),其液态水路径的准确反演是我们目前亟待解决的一

个难题。因此,反演方法的不确定性是SACOL站卫星与地基液态云水路径存在差异的主要原因。

虽然,Aqua和Terra得到的液态水路径与地基存在差异,但它们的年变化趋势还是比较吻合。运用卫星反演的液态水路径来分析我国西北地区的空中云水资源虽然存在一定的误差,但是探讨其变化趋势仍然比较可信。

7 结论

本文利用SACOL近两年的微波辐射仪观测资料,分析了黄土高原地区液态云水路径和可降水量的变化特征,主要结论如下:

(1)根据ARM SGP资料的验证,利用Liljegren et al. (2001)提出的参数所计算出的云水路径反演值与观测较为接近,当云水路径的值小于 1000 g/m^2 时,二者吻合较好,但当云水路径的值大于 1000 g/m^2 时,部分反演值有较大的偏差。这是因为当云水路径过大时,往往会有降水发生,水滴粒子的半径较大,对微波有散射作用。为简化计算,本文所采用的方法只考虑了水滴、水汽以及氧气的吸收和发射作用,因此该方法适用于没有降水发生的情况。可降水量的对比情况相对于云水路径的对比效果要好,这也显示出由于水汽的观测研究较多,反演技术相对于云水路径要成熟。

(2)通过本文反演结果与TP/WVP-3000直接得到的值相比较,本文所用方法要优于仪器公司采用的神经网络方法。本文的反演结果比仪器输出值对云更加敏感。在某些个例当中,当天空有云出现时,本文反演结果能够得到云水路径的值,而仪器附带的神经网络算法的结果是0。

(3)在黄土高原地区,95%的云水路径值都在 150 g/m^2 以下,95%的可降水量值都在 3 cm 以下。本文反演结果和仪器输出值都揭示了这一结论。

(4)液态云水路径在早晨日出之前(8时)和傍晚日落之后(20时),分别出现两个峰值。分析认为日出之前的峰值主要是由于局部的逆温层引起的,傍晚的峰值主要与春、夏、秋三季的热对流有关。四季液态水路径日均值从大到小依次为:秋、夏、春、冬,这与SACOL站位于亚洲季风区边缘有关。

(5)比较了地面微波反演和CERES的液态云水路径的季节变化趋势。两者的年变化趋势比较吻

合,最大差异出现在冬季。目前,液态云水路径反演方法的不确定性是它们存在较大差异的主要原因。

参考文献 (References)

- Cimini C, Westwater E R, Keihm S J, et al. 2003. Empirical Evaluation of Four Microwave Radiative Forward Models Based on Ground-Based Radiometer Data Near 20 and 30 GHz [C]. Thirteenth ARM Science Team Meeting Proceedings, Broomfield, Colorado, March 31 – April 4.
- Curry J A, Hobbs P V, King M D, et al. 2000. FIRE Arctic Cloud Experiment [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81: 5 – 29.
- Dong X, Ackerman T P, Clothiaux E E. 1998. Parameterizations of microphysical and shortwave radiative properties of boundary layer stratus from ground-based measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D24): 31681 – 31693.
- Dong X, Minnis P, Mace G G, et al. 2002. Comparison of stratus cloud properties deduced from surface, GOES, and aircraft data during the March 2000 ARM cloud IOP [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59: 3265 – 3284.
- 符淙斌, 严中伟. 1999. 全球变化与我国未来的生存环境 [M]. 北京: 气象出版社. Fu Congbin, Yan Zhongwei. 1999. Globalization and the Future Survive Environment in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Huang J, Zhang W, Zuo J, et al. 2008. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 25 (6): 906 – 921.
- Kuo Y H, Guo Y R, Westwater E R. 1993. Assimilation of precipitable water measurements into a mesoscale numerical model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 1215 – 1238.
- Liljegren J C, Clothiaux E E, Mace G G, et al. 2001. A new retrieval for cloud liquid water path using a ground-based microwave radiometer and measurements of cloud temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 14485 – 14500.
- Lin B, Rossow W B. 1996. Seasonal variation of liquid and ice water path in nonprecipitating clouds over oceans [J]. *J. Climate*, 9: 2890 – 2902.
- Lin B, Wielicki B, Minnis P, et al. 1998. Estimation of water cloud properties from satellite microwave, infrared and visible measurements in oceanic environments. I: Microwave brightness temperature simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D4): 3873 – 3886.
- 刘奇, 傅云飞. 2007. 基于 TRMM/TMI 的亚洲夏季降水研究 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 37 (1): 111 – 122. Liu Qi, Fu Yunfei. 2007. Study of rainfall of summer in Asia based on TRMM/TMI [J]. *Science in China (Series D)*, 37 (1): 111 – 122.
- Ma, Z G, Fu C B. 2003. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China [J]. *Global Planet. Change*, 37: 189 – 200.
- Marchand R, Ackerman T, Westwater E R, et al. 2003. An assessment of microwave absorption models and retrievals of cloud liquid water using clear-sky data [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D24): 4773, doi: 10.1029/2003JD003843.
- Mark H, Robert M, Snider J B. 1987. Field evaluation of a dual-channel microwave radiometer designed for measurements of integrated water vapor and cloud liquid water in the atmosphere [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4 (1): 204 – 213.
- Min Q, Duan M. 2005. Simultaneously retrieving cloud optical depth and effective radius for optically thin clouds [J]. *J. Geophys. Res.*, (110): D21201, doi: 10.1029/2005JD006136.
- Solheim F, Godwin J R, Westwater E R, et al. 1998. Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods [J]. *Radio Science*, 33: 393 – 404.
- Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. 2007. Observations: surface and atmospheric climate change [M]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Turner D D, Vogelmann A M, Austin R T, et al. 2007. Thin liquid water clouds: Their importance and our challenge [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 177 – 190.
- 魏重, 薛永康, 朱晓明, 等. 1984. 用 1.35 厘米波长地面微波辐射计探测大气中水汽总量及分布 [J]. *大气科学*, 8 (4): 418 – 426.
- Wei Zhong, Xue Yongkang, Zhu Xiaoming, et al. 1984. Sound of the total water vapor and its distribution using ground-based microwave radiometer with 1.35 cm wavelength [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 8 (4): 418 – 426.
- Wei C, Leighton H, Rogers R. 1989. A comparison of several radiometric methods of deducing path-integrated cloud liquid water [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 6: 1001 – 1012.
- 周秀骥, 吕达仁, 黄润恒, 等. 1982. 大气微波辐射及遥感原理 [M]. 北京: 科学出版社. Zhou Xiuji, Lü Daren, Huang Runheng, et al. 1982. *The Theory of Atmospheric Microwave Radiation and Remote Sensing (in Chinese) [M]*. Beijing: Science Press.
- 赵柏林, 尹宏, 李慧心, 等. 1981. 微波遥感大气湿度层结的研究 [J]. *气象学报*, 39 (2): 217 – 225. Zhao Bolin, Yin Hong, Li Huixin, et al. 1981. Studies on the ground-based microwave radiometry and its measurements of the atmospheric humidity profile and total water vapour content [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 39 (2): 217 – 225.