

丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等,2018.云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J].气象,44(12):1604-1611.

云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究^{*}

丁虹鑫^{1,2} 马舒庆² 杨 玲^{1,3} 车云飞⁴

1 成都信息工程大学,成都 610225

2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

3 中国气象局大气探测重点开放实验室,成都 610225

4 中国气象科学研究院,北京 100081

提 要: 利用中国气象局大气探测试验基地的微波辐射计亮温值、对应的云雷达测得的反射率因子和 L 波段探空数据,采用 BP(back propagation)神经网络作为反演工具,反演得到大气垂直湿度廓线。将天气情况分为晴天、低云、中云和高云四种情况,对比不加入反射率因子的反演湿度廓线,分析两种反演方法在各高度层的均方根误差。对比结果表明,加入反射率因子的反演湿度廓线与探空廓线的相关系数平均值为 0.862,均方根误差为 14.9%,而不添加反射率因子的相关系数平均值为 0.763,均方根误差为 19.2%。

关键词: 微波辐射计,雷达反射率因子,大气湿度廓线,BP 神经网络

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.12.010

Retrieval of Humidity Profiles by Using Cloud Radar and Microwave Radiometer

DING Hongxin^{1,2} MA Shuqing² YANG Ling^{1,3} CHE Yunfei⁴

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: By using the brightness temperature value of the microwave radiometer, the corresponding reflectivity factor of the cloud radar and the L-band radiosonde data in the CMA Meteorological Observation Centre, the BP (back propagation) neural network is used as the inversion tool, and the atmospheric humidity profile is retrieved. The weather condition is divided into clear day, low cloud, middle cloud, high cloud as four cases. The inversions of the humidity profiles without reflectivity factor are compared, and the root mean square errors by the two inversion methods in each altitude layer are analyzed. The comparison results show that the correlation coefficient of the inversed humidity profile with the reflectivity factor is 0.862, the root mean square error is 14.9%. On the contrary, the correlation coefficient of the inversed humidity profile without the reflectivity factor is 0.763, and the root mean square error is 19.2%.

Key words: microwave radiometer, reflectivity factor, humidity profile, BP (back propagation) neural network

^{*} 国家重大科研仪器研制项目(31727901)资助

2017 年 8 月 21 日收稿; 2018 年 6 月 3 日收修定稿

第一作者:丁虹鑫,主要从事大气探测方面研究. Email:1581118793@qq.com

引 言

地基微波辐射计具有自动运行、连续观测能力,可以提供不同高度层的温度(姚志刚和陈洪滨,2005)和水汽信息(刘松涛和严卫,2006),通过微波辐射计可以为人工增雨做参考(王黎俊等,2007),计算 K 指数分析降水过程中热力、水汽变化的过程(李睿劼和李宏宇,2008),以及为冰雹等强对流天气的监测预警提供参考(黄治勇等,2014)。近年来,对于微波辐射计关于大气廓线的反演精度也在逐渐提高。常见反演方法有非线性回归法、Bayesian 最大概率估计法(Clough et al,2005)、蒙特卡罗法(刘长盛,1989)、神经网络方法等。通过神经网络方法反演在无云条件下的大气温湿廓线已有较好效果,但在有云存在条件下反演的湿度廓线仍有较大偏差。地基微波辐射计配置的红外传感器可以获得云底的高度,但对云内信息的测量仍然很有限,微波辐射计的测量在于水汽下行辐射强度,而云的存在导致微波辐射的分布存在不确定性(Güldner and Spänkuch,2001;Chan,2009;刘红燕,2011)。

为了提高云天条件下反演大气湿度廓线的效果,许多学者将其他仪器所测得的云信息加入到反演工作中(Frate and Schiavon,1998)。

毫米波云雷达可以对云天里影响辐射传输的云特性进行连续观测(DOE/ER,1990),这些云特性包括云宏观特性,如云层高度、云层厚度、云量和云的范围等。本次试验将毫米波云雷达探测的反射率因子,加入到地基微波辐射计反演中,以探空数据为标准,利用 BP 神经网络为工具做训练,利用训练好后的网络对新样本做反演测试。

1 理论依据

忽略掉大气中的散射,只考虑到平行大气、指向天顶的地基微波辐射计所观测到的下行亮温(王振会等,2014)为下式

$$T_B(0) = T_B(\infty)\tau(0, \infty) + \int_0^\infty k(z)T(z)\tau(0, z)dz \quad (1)$$

式中, $\tau(0, z) = \exp[-\int_0^z k(z')dz']$ 是从高度 z 处到地基微波辐射计天线处的大气层透过率, $T_B(\infty)$ 是

宇宙背景的辐射亮温,约为 2.7 K, $\tau(0, \infty)$ 是整层大气透过率, $k(z)$ 为大气的体积吸收系数。

在微波频段,对于晴天条件下,吸收系数主要来自于氧气和水汽, $k = k_{O_2} + k_{H_2O}$, 而对于云天条件下,吸收系数来自于氧气、水汽和云中液态水, $k = k_{O_2} + k_{H_2O} + k_{cloud}$ 。其中 k_{cloud} 为云的吸收系数(张培昌和王振会,1995),邢业新等(2010)研究表明,云层对亮温的影响会受到厚度、离地面高度以及云中液态水密度的影响。

云雷达所测量的反射率因子反映了云层内部粒子的尺度和数密度,在垂直廓线上,反映了不同高度上云水含量的变化。微波辐射计的 14 个测量通道,包括 7 个水汽通道和 7 个氧气通道,在 22.24 GHz 附近的水汽通道可以探测在该频率范围内压力增宽所带来的辐射强度和形状信息,通过测量 22.24~31.4 GHz 内的光谱分布,包含了垂直廓线上的大气水汽廓线。在 51.26~60 GHz 附近的氧气吸收谐振带,且在任意高度上,氧气电磁波的发射强度与探测位置的氧气分布和探测位置的大气温度呈一定的比例关系,通过测量该频率范围内的不同辐射强度可以包含垂直廓线上的温度廓线信息。大气湿度廓线的变化受到水汽和温度的影响,而微波辐射计的氧气通道的亮温值可以包含温度的变化信息。

在云天条件下,垂直方向上湿度的变化,受到大气水汽、温度和云水含量的影响,而微波辐射计自身所配置的红外测云仪无法获取较为准确的云参量,这会导致反演信息不足,从而使云天的湿度反演廓线出现较大偏差,反射率因子反映各个高度上的云层状态信息。所以,在反演中加入云雷达的反射率因子,从而达到提高反演精度的目的。

2 资料来源以及质量控制

2.1 资料来源

本文采用的微波辐射计数据来源于中国气象局大气探测试验基地,拥有 14 通道, K 波段为 22.240, 23.040, 23.840, 25.440, 26.240, 27.840, 31.400 GHz, V 波段为 51.260, 52.280, 53.860, 54.940, 56.660, 57.300, 58.000 GHz, 亮温接收灵敏度小于 0.2 K(1 s 积分时间),内置黑体温度均匀性小于 0.5 K。毫米波云雷达来自中国气象局气象探测试验基地的 Ka 波段全固态全相参连续波多普勒雷

达,波长为8.6 mm,峰值功率为4 W,天线采用垂直顶空瞄准式工作方式,测量高度约为15 km,垂直空间分辨率约为30 m,时间分辨率为1~60 s可调,试验中毫米波云雷达时间分辨率设置为60 s,最小探测粒子回波强度为-40 dBz。所用的探空数据来自北京观象台的GTS1型数字探空仪。

由于微波辐射计的测量高度有效信息一般为10 km左右,为了与毫米波云雷达和探空数据高度保持一致,只采用探空仪在0~10 km内的数据。微波辐射计在探测亮温数据时,由于是在天线正上空附近接收到微波信号,所以在垂直分辨率上采取不同的密度,在反演输出廓线上,采取从地面到10 km,采样间隔由密到疏的93个节点,对应探空数据在该层处做插值处理。

微波辐射计在测量亮温上,为天顶角90°固定的频率扫描法,采集亮温数据平均1 s一次,而探空仪每天的施放频率为2~3次,对应的施放时间为11:15和23:15(UTC,下同),为了与探空数据对应,采取与释放时间此刻相对应的14个通道的亮温值。

2.2 质量控制

为了让训练样本集和验证样本集都覆盖整个夏季和冬季,数据训练前期的探空样本来自于2016年5月至2017年1月,以及2017年8、9月,总共11个月累计516条大气湿度廓线以及516组云雷达反射率因子和亮温数据。验证样本来自于2016年2、3、4月以及2017年2—7月总计9个月数据,累计342条大气湿度廓线以及342组反射率因子和亮温数据,但由于一些样本并不能有效反映数据之间的关系,所以在进入神经网络训练之前需要对样本做筛选处理。

2.2.1 探空数据的筛选

从理论上讲,有云形成时,在对应高度上的相对湿度达到100%,但因为凝结核和其他因素的影响,云层的相对湿度会比理论值略低(Poore,1991)。因此在探空廓线上,以相对湿度85%为阈值,将存在相对湿度85%以上的高度层判定为云天,具体判定条件如下:

(1)晴天条件:相对湿度从地面到任意高度层始终在85%以下。

(2)云天条件:相对湿度于近地面处小于85%,在600 m以上的高度,存在相对湿度大于85%的云

层。

(3)雨天条件:相对湿度从近地面到600 m以上的任意高度层处的相对湿度都一直保持在85%以上。

样本在选取探空数据时,只选用符合以上条件的晴天和云天条件下的样本。

2.2.2 云雷达数据的筛选

在云雷达数据的筛选上,根据(黄兴友等,2013)对毫米波云雷达的回波强度给出分级,划分为5个区间,弱云区(D1): $Z < -20$ dBz,厚云区(D2): -20 dBz $\leq Z < 0$ dBz,云中包含液水(D3): 0 dBz $\leq Z < 15$ dBz,弱降水(D4): 15 dBz $\leq Z < 25$ dBz,显著降水(D5): $Z > 25$ dBz。由于反演只涉及晴天和云天,按照上面的划分,选取最低探测阈值到云中包含液水的上限值,反射率因子为-41~15 dBz范围内的样本。

2.2.3 微波辐射计亮温数据的筛选

在雨天条件下时,微波辐射计天线罩上的雨水可能会使探测到的亮温数据出现异常,剔除掉探空仪和云雷达判断任意一种仪器判定都为雨天时所对应的亮温样本,选取符合云天和晴天的样本。

同时,在微波辐射计亮温数据的质量控制上,遵循时间一致性原则,即亮温值随时间的变化有一定的规律,微波辐射计每个频段通道在3分钟内观测到的变换应该是连续的,在满足上述条件下的微波辐射计亮温样本中,若存在亮温值波动较大的样本,则有可能会存在仪器本身测量时的误差,所以在样本筛选上,也剔除掉亮温变化可能存在有问题的样本。

2.2.4 云雷达和探空样本的对应

在满足2.2.1和2.2.2节条件下的晴天和云天样本上,由于探空仪会随着上升而漂移,会存在探空测得的位置和云雷达测得的云层信息不对应的情形,所以对探空测得有云存在,而云雷达没有表现出来有云的情形,不作为样本。反之,探空没有测得云存在,而云雷达表现出来有云的情形,也不作为样本。挑选出样本必须保证两者云厚度和云底位置基本相同,如图1所示。

可以看到,在被挑选的样本中,如果存在有云情况,反射率因子在对应高度上会有同样的增大;如果为晴天条件下时,反射率因子保持为-41 dBz,探空湿度廓线在廓线上没有存在跳变的情形。

在筛选剔除掉雨天样本,亮温出现异常的样本

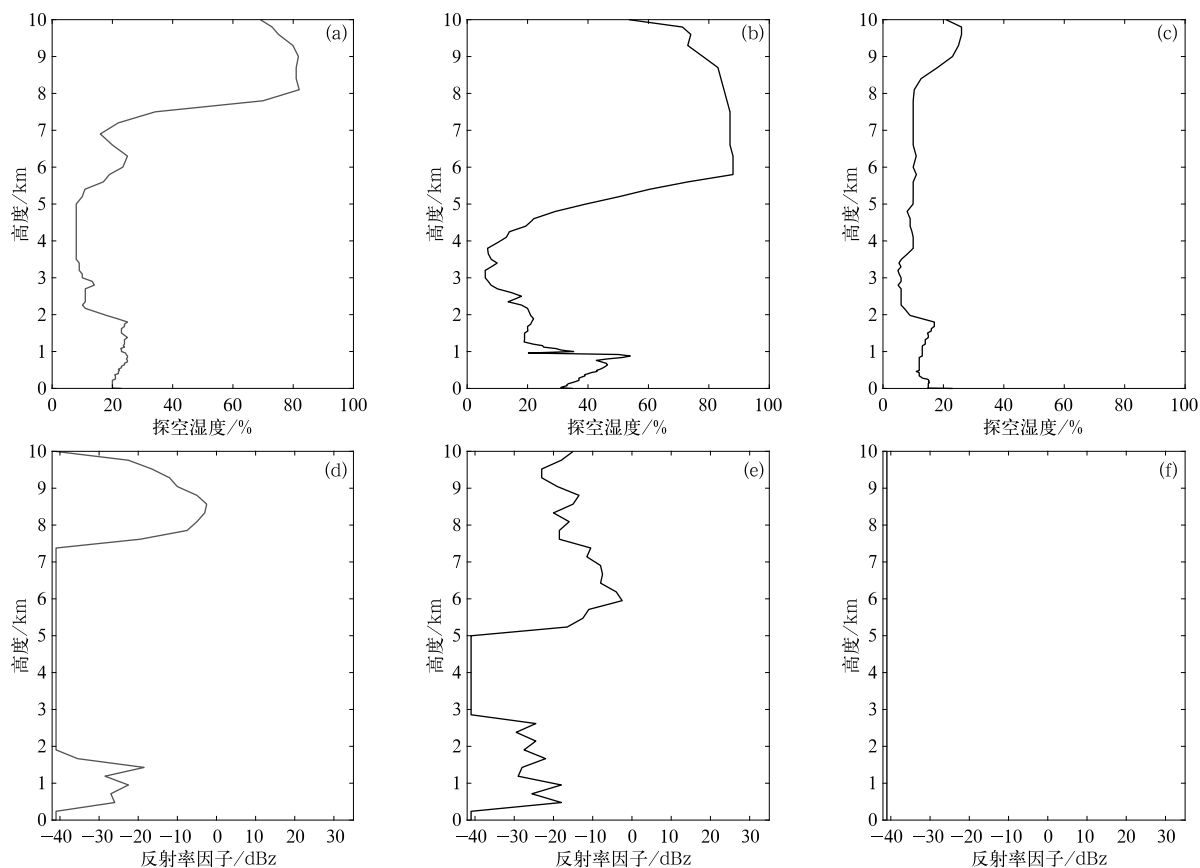


图 1 2016 年 6 月 2 日 11:15(a,d)、3 日 05:15(b,e)和 5 月 6 日 23:15(c,f)

探空湿度廓线(a,b,c)与反射率因子(d,e,f)

Fig. 1 Comparison of radiosonde relative humidity profiles (a,b,c) with reflectivity factor (d,e,f)

(a,d) 1115 UTC 2 June, (b,e) 0515 UTC 3 June, (c,f) 2315 UTC 6 May 2016

以及时空不一致造成的不合理的样本后,516 组原始训练样本只留下 315 组对应较为一致的样本,对这 315 组样本作为神经网络训练使用。利用同样的方法,对另外的 342 组原始验证样本做筛选,剩下 181 组做验证使用。

3 反演方法

本次试验采用 BP 神经网络算法,在输入节点上,分为亮温、地面温湿压值和云雷达反射率因子,选取 14 通道亮温数据与微波辐射计自带的地面传感器所测得的地面温湿压 3 个数据作为神经网络输入的一部分,在反射率因子的节点选择上,原数据为 30 m 一个距离库,考虑到若反射率因子节点选取过多,在做神经网络反演时,隐含层节点数过多,会导致计算量过大,收敛速度过于缓慢,难以达到理想中的值。同时,唐英杰等(2015)在对北京地区的云雷

达和云高仪对云层的厚度统计中发现,地基毫米波云雷达在低云、中云和高云的平均云回波厚度分别为 586、1475、920 m。所以在 0~10 km 输入中,采用 43 个节点,每两个节点之间的距离为 236 m,可以保证如果天空中有云存在时,反射率因子的两点之间的距离基本不会将云层存在的地方遗漏。

确定输入层节点为 60,输出为 93 个湿度廓线节点,对于隐含层节点数的选择,如果隐含层结点数过少,网络不能具有必要的学习能力和信息处理能力。若过多,不仅会大大增加网络结构的复杂性,网络在学习过程中更易陷入局部极小点,而且会使网络的学习速度变得很慢。依据高大启(1998)的研究计算隐含层节点数

$$M = \sqrt{0.42LN + 0.12N^2 + 2.54L + 0.77N + 0.35} + 0.51 \quad (2)$$

式中, M 为隐含层节点, L 为输入层节点数, N 为输

出层节点数,根据计算,选取隐含层节点数为61。整个网络框图如图2所示。

对于不添加反射率因子的神经网络,去掉43个反射率因子的值,输入节点使用14个通道的亮温值和3个地面温湿压测量值,隐含层根据式(2)计算为43个节点,输出节点数保持不变。

经试验,从输入层到隐含层采用tansig函数效果较好,从隐含层到输出层采用purelin线性转移函数。对于学习函数,选用贝叶斯正则化算法trainbr函数作为学习函数。训练样本和测试样本分别为不同时刻的样本。在BP网络做训练时,设定训练次数为1000次,经过多次训练,选取效果最好的网络并保存。

4 反演结果

为了分析亮温反演大气湿度廓线的影响,根据《地面气象观测规范》(中国气象局,2003),对应于云底高度的不同,将324组验证样本分为高云、中云、低云、晴天四类。云底高度大于4500 m的云为高云,云底高度在2500~4500 m(包含4500 m)的云为中云,云底高度小于2500 m(包含2500 m)为低云。其中晴天样本129组,低云样本13组,中云样本15组,高云样本24组。

对181组验证样本的统计,利用加反射率因子和不加反射率因子所得到的两种反演结果与探空所测得的湿度相对比,统计四种不同情形下93层高度上的均方根误差。

在晴天、低云、中云、高云情况下,添加反射率因子反演湿度廓线、未添加反射率因子反演湿度廓线

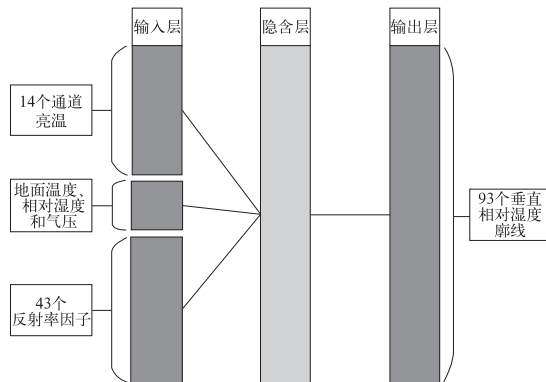


图2 BP神经网络结构框图

Fig. 2 The structure diagram of BPNN

和探空廓线的对比分别如图3、图4、图5、图6所示。

根据四种云分类画出加云和不加云两种反演方法所对应的均方根误差(图7)。

由图7可知,在对比均方根误差时,当前天气条件为晴天时,加云和不加云两种神经网络的反演效果都比较接近,在0~5 km,两者的反演效果的均方根误差平均在10%左右,在5~10 km,加入反射率因子的反演效果略微好于不加入反射率因子的效果,但都不超过10%,从整体上来看,在晴天条件下两种反演效果非常接近,添加反射率因子对于神经网络的反演并未造成冗余。

当天气状况为低云时,考虑到本次训练和测试的样本集都包括了夏季和冬季,在夏季时,地面附近的湿度较大,且云雷达会探测到晴空回波,所以会有一些样本较难以区分是低云或者晴空回波,在筛选样本时,通过全天空成像仪,判断当前上空是否有云,以尽可能避免晴空对低云情况的判断,通过筛选后,低云的样本量比较少,在0~1.8 km,加入反射率因子的效果和不加入的效果比较接近,均方根误差平均在11.8%,在2~4 km,加入反射率因子的效果要优于不加入反射率因子,在4 km左右达到最大,加入反射率因子的均方根误差为17%,不加入反射率因子的均方根误差为37%,两者均方根之差20%。从4~10 km,加入反射率因子的效果一直优于不加入反射率因子的反演,在10 km处,两者之差为6.4%。

当天气状况为中云时,在0~2 km,加入反射率因子和不加入反射率因子的反演效果比较接近,平均为22%,在2~10 km,加入反射率因子的均方根误差一直保持在20%附近,而不加入反射率因子的均方根误差在4.5 km达到最大,在4.5~10 km,不加入反射率因子的均方根误差开始减小,但要差于加入反射率因子的反演效果。

当天气状况为高云时,从0~4 km,随着高度的升高,均方根误差也在增大,但加入反射率因子和不加入反射率因子两种情况效果都比较接近,在5~10 km的高云范围时,加入反射率因子的均方根误差要优于不加入反射率因子的均方根误差,最大差值可达到30%,从整体来看,高云条件时,加入反射率因子的反演均方根误差平均在25%以下,效果明显好于不加入反射率因子的反演情况。从验证反映的情况来看,四种天气条件下,当前天气状况为晴天

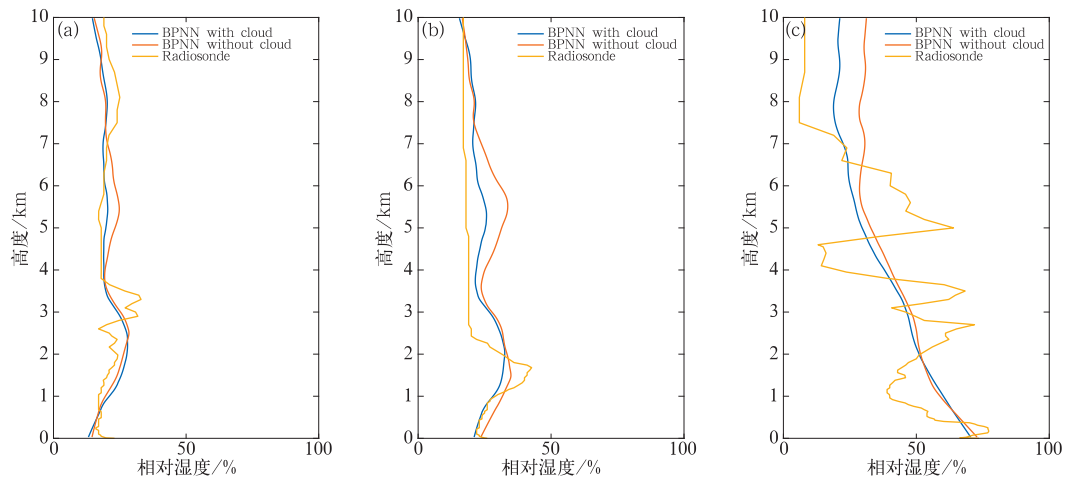


图 3 2016 年 2 月 3 日 11:15(a)、22 日 23:15(b)和 2017 年 6 月 24 日 23:15(c)
晴天情况下,添加反射率因子、未添加反射率因子与探空廓线对比

Fig. 3 Comparison of inversion profiles with reflectivity factor, inversion profiles without reflectivity factor and sounding profiles in the case of clear cloud

(a) 1115 UTC 3 February 2016, (b) 2315 UTC 22 February 2016, (c) 2315 UTC 24 June 2017

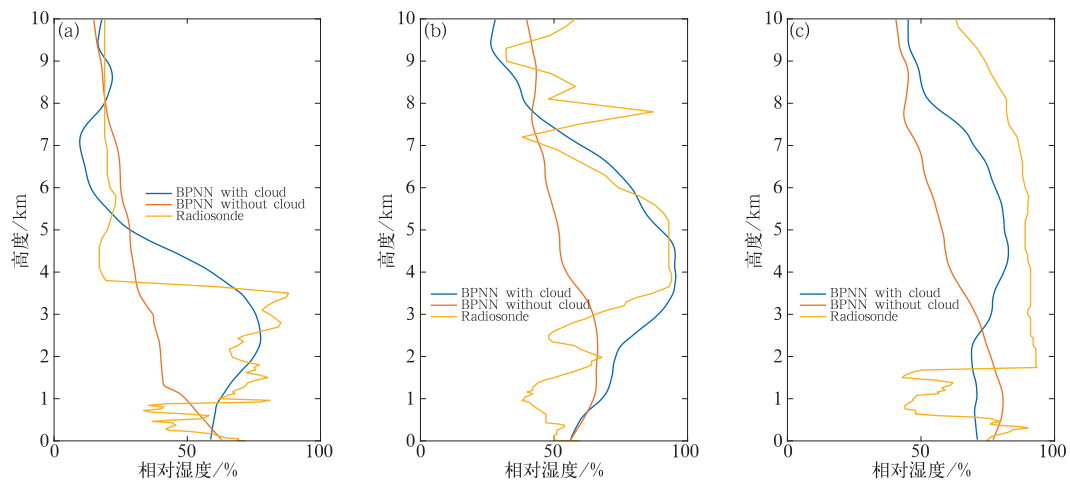


图 4 同图 3,但为低云情况下,(a)2017 年 2 月 3 日 23:15,(b)6 月 18 日 11:15,(c)7 月 25 日 23:15

Fig. 4 Same as Fig. 3, but in the case of low cloud

(a) 2315 UTC 3 February, (b) 1115 UTC 18 June, (c) 2315 UTC 25 July 2017

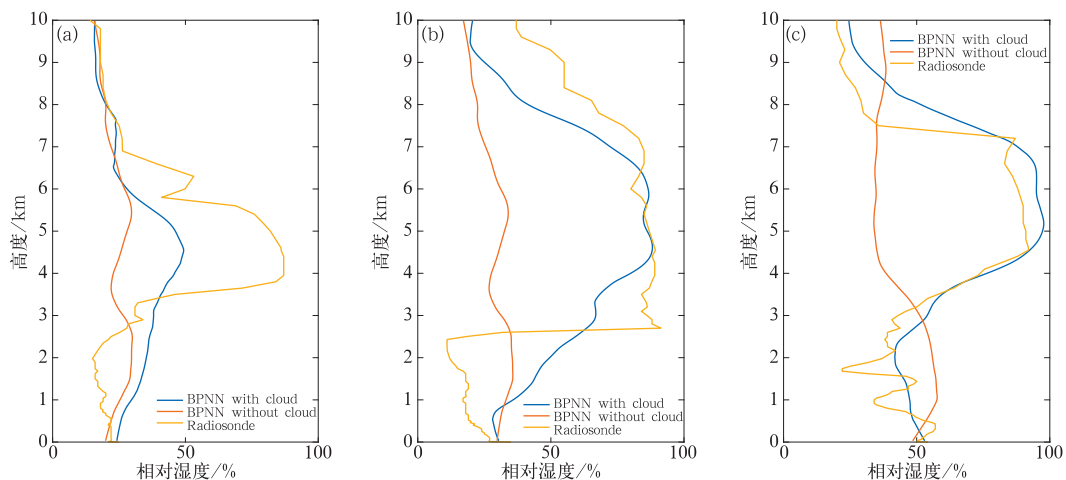


图 5 同图 3,但为中云情况下,(a)2016 年 2 月 3 日 23:15,(b)2017 年 2 月 20 日 23:15,(c)6 月 28 日 05:15

Fig. 5 Same as Fig. 3, but in the case of middle cloud

(a) 2315 UTC 3 February 2016, (b) 2315 UTC 20 February 2017, (c) 0515 UTC 28 June 2017

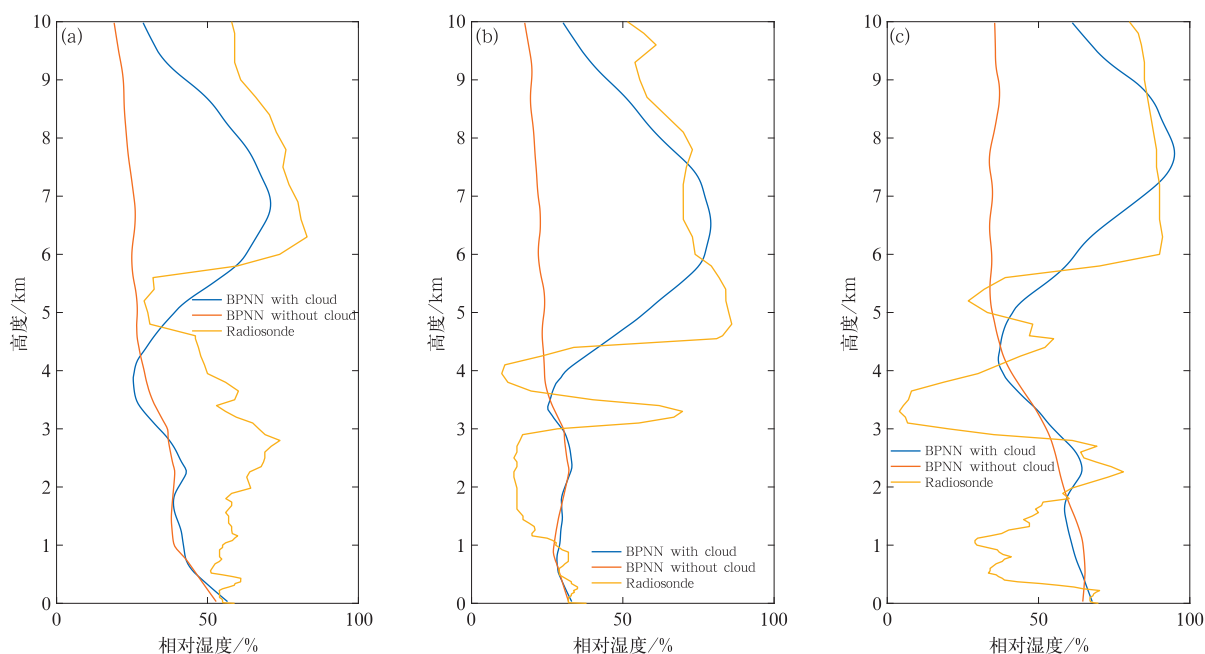


图 6 同图 3, 但为高云情况下, (a) 2016 年 3 月 4 日 11:15, (b) 14 日 23:15, (c) 2017 年 7 月 27 日 11:15

Fig. 6 Same as Fig. 3, but in the case of high cloud

(a) 1115 UTC 4 March 2016, (b) 2315 UTC 14 March 2016, (c) 1115 UTC 27 July 2017

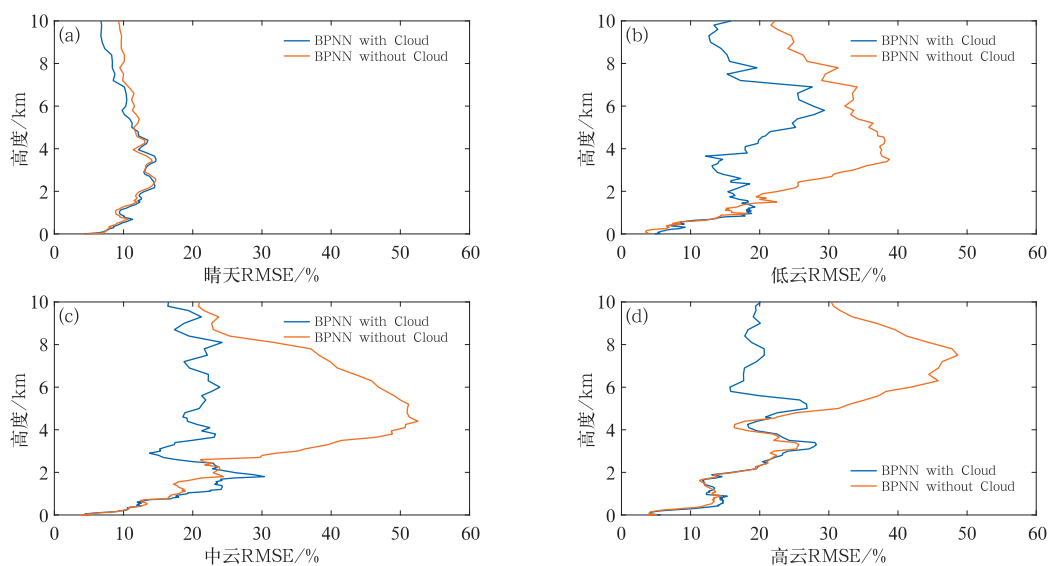


图 7 晴天(a), 低云(b), 中云(c), 高云(d)条件下

添加反射率因子和未添加反射率因子的反演廓线与探空湿度廓线对比的均方根误差

Fig. 7 Root mean square error (RMSE) contrast between inversion profiles with reflectivity factor and inversion profiles without reflectivity factor using sounding profiles as the standard

(a) clear day, (b) low cloud, (c) medium cloud, (d) high cloud

时, 两者之间比较接近。在有云存在时, 在低云、中云、高云条件下时, 添加反射率因子的反演效果更好。

5 结论与展望

本文采用微波辐射计实测得到的 14 通道亮温

数据与云雷达反射率因子数据, 通过 BP 神经网络的方法反演大气湿度廓线, 反演所得的结果与不添加反射率因子的反演效果与探空数据作为对比。分析数据和结果可以发现, 在晴天条件下时, 两种情况都能较好地反演大气湿度廓线, 而在低云、中云和高云条件下, 云雷达的反射率因子都能给神经网络提

供了当前廓线上对应位置的云水信息,加入到亮温数据的反演结果能提高反演精度。

在反演大气湿度廓线上,可以看到比较好的效果,但受限制于样本数据量,微波辐射计自身亮温数据的稳定性以及云雷达的衰减,夏季晴空回波对近地面的影响,联合反演的精度还有待提高,同时在后期工作中会加入对温度的反演,接下来将要做的是积累前期样本量,对神经网络参数的优化、晴空回波的处理以及微波辐射计亮温质量的严格控制,希望能进一步提高联合反演的精度。

参考文献

- 高大启,1998. 有教师的线性基本函数前向三层神经网络结构研究[J]. 计算机学报,21(1):80-86.
- 黄兴友,樊雅文,李峰,等,2013. 地基 35 GHz 测云雷达回波强度的衰减订正研究[J]. 红外与毫米波学报,32(4):325-330.
- 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等,2014. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J]. 气象,40(2):216-222.
- 李睿劼,李宏宇,2008. 微波辐射计计算准 K 指数对降水的反应[J]. 气象,34(S1):185-190.
- 刘长盛,1989. 用蒙特卡洛方法求取云层的反射率与透过率[J]. 气象科学,9(4):378-384.
- 刘红燕,2011. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析[J]. 气象学报,69(4):719-728.
- 刘松涛,严卫,2006. 星载微波辐射计反演洋面非降水云区云水总量的研究[J]. 气象科学,26(3):301-306.
- 唐英杰,马舒庆,杨玲,等,2015. 云底高度的地基毫米波云雷达观测及其对比[J]. 应用气象学报,26(6):680-687.
- 王黎俊,孙安平,刘彩红,等,2007. 地基微波辐射计探测在黄河上游人工增雨中的应用[J]. 气象,33(11):28-33.
- 王振会,李青,楚艳丽,等,2014. 地基微波辐射计工作环境对 K 波段亮温观测影响[J]. 应用气象学报,25(6):711-721.
- 邢业新,娄国伟,李兴国,等,2010. 云、雨天气对 3 mm 波段天空亮温的影响[J]. 现代防御技术,38(5):82-85.
- 姚志刚,陈洪滨,2005. 七通道微波辐射计遥感大气温度廓线的性能分析[J]. 气象科学,25(2):133-141.
- 张培昌,王振会,1995. 大气微波遥感基础. 北京:气象出版社:346-384.
- 中国气象局,2003. 地面气象观测规范. 北京:气象出版社:11-16.
- Chan P W,2009. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. Meteorol Z,18(3):253-265.
- Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al,2005. Atmospheric radiative transfer modeling;a summary of the AER codes[J]. J Quant Spectrosc Radiat Transf,91(2):233-244.
- DOE/ER,1990. Atmospheric Radiation Measurement Program Plan [Z].
- Frate F D, Schiavon G,1998. A combined natural orthogonal functions/neural network technique for the radiometric estimation of atmospheric profiles[J]. Radio Sci,33(2):405-410.
- Guldner J, Spänkuch D,2001. Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry[J]. J Atmos Oceanic Technol,18(6):925-933.
- Poore K D,1991. Cloud base, top and thickness climatology from RAOB and surface data[R]. California:Cloud Impacts on DOD Operations and Systems 1991 Conference.