

孙康远, 阮征, 魏鸣, 等. 风廓线雷达反演大气比湿廓线的初步试验. 应用气象学报, 2013, 24(4): 407-415.

风廓线雷达反演大气比湿廓线的初步试验

孙康远¹⁾²⁾ 阮征^{2)*} 魏鸣¹⁾ 葛润生²⁾ 董保举³⁾

¹⁾(南京信息工程大学, 南京 210044)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

³⁾(云南省大理国家气候观象台, 大理 671003)

摘 要

基于湍流散射理论, 运用边界层风廓线雷达(WPR)联合 RASS(Radio Acoustic Sounding System), GPS/PWV (Global Position System/Precipitable Water Vapor)进行全遥感系统的大气比湿廓线反演试验, 并对影响因子进行分析。利用 2011 年 8—9 月云南大理综合探测试验数据的反演结果与探空数据进行比较分析, 结果表明: WPR 联合探空的温度廓线和起始边界比湿(q_0)反演大气比湿廓线, 与探空大气比湿廓线相比具有相同的变化趋势, 标准差为 $0.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 误差随高度增加呈递增趋势; WPR 联合 RASS, GPS/PWV 数据反演大气比湿廓线, 与探空大气比湿廓线的标准差为 $0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。参加反演的数据中, 折射指数结构常数 C_n^2 与谱宽 σ_{urb}^2 对反演影响最大, 反演算法中大气折射指数梯度 M 符号的判断对反演精度也有较大影响。

关键词: 风廓线雷达; 大气比湿廓线; 大气折射指数梯度; 折射指数结构常数

引 言

在大气要素中, 水汽是最重要的要素之一, 是大气中最活跃的成分。水汽随时间和空间有着比其他气象要素更大的变化, 对水汽的监测更具有重要性。目前已有多种遥感手段获取大气水汽含量, 主要包括拉曼激光雷达、差分吸收激光雷达(DIAL)、GPS、微波辐射计(MWR)以及风廓线雷达^[1-6]。

风廓线雷达(Wind Profile Radar, WPR)是地基主动遥感探测设备, 主要通过探测上空晴空大气湍流进行探测, 获得大气要素随高度的分布。WPR 可以从湍流大气返回信号中提取出速度、速度谱宽、折射指数结构常数等信息, 进而可以获取大气湍流耗散率与风的三维分布, 应用这些能力, WPR 资料可以用于资料同化、云体结构探测、降水预测等诸多方面^[7-10]。

20 世纪 90 年代, 国外开始利用 WPR 进行大气比湿廓线反演研究, Gossard 等^[11-13]应用 WPR 观测

数据和探空温度数据进行反演试验; Tsuda 等^[14]采用 WPR 与 RASS (Radio Acoustic Sounding System)反演大气比湿廓线; Furumoto 等^[15-17]利用边界层 WPR, MU 雷达进行了大气比湿廓线反演试验; Bianco 等^[18]提出了 WPR 协同使用微波辐射计反演大气比湿廓线的方法; Stankov 等^[19]、Imura 等^[20]联合使用 MU 雷达和边界层雷达进行了大气比湿反演研究。国内朱庚华等^[21]利用 P 波段 WPR 结合探空(Radiosonde, RS)数据进行了 3 次大气比湿廓线的反演试验。以上的大气比湿廓线反演试验中, 除了应用 WPR 数据外, 还或多或少依赖于探空提供的温度廓线或大气比湿廓线的起始边界比湿 q_0 , 且对反演大气比湿廓线的精度研究较少。

本文阐述了 WPR 反演大气比湿廓线的理论和方法, 应用 2011 年 8—9 月云南大理综合探测试验数据, 通过 WPR 联合 RASS, GPS/PWV 进行大气比湿廓线的反演试验, 与 WPR 结合探空获取的温度廓线、 q_0 及反演的比湿廓线进行比较, 研究利用全部遥感数据反演大气比湿廓线的可行性。

2012-10-12 收到, 2013-04-22 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41075023), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906039), 中国气象科学研究院基本科研业务项目“大气水凝物微物理参数及风场垂直结构多波长遥感探测和反演方法研究”, “青藏高原观测预试验与资料分析研究”

* 通信作者, email: ruanz@cams.cma.gov.cn

1 大气比湿廓线反演

1.1 大气折射指数梯度 M

Vanzandt 等^[22]、Gage 等^[23]、Cohn^[24] 以及 Clayson 等^[25] 对 WPR 探测大气湍流进行了深入研究,给出 M 绝对值与大气折射指数结构常数之间的关系:

$$|M| = a(C_n^2)^{1/2} N^{2/3} (\sigma_{\text{turb}}^2)^{-1/3}. \quad (1)$$

式(1)中, M 为大气折射指数梯度, C_n^2 为大气折射指数结构常数, a 为系数, N 为布维频率, σ_{turb}^2 为湍流谱宽。由式(1)可看出, C_n^2 和 σ_{turb}^2 可以获得 M 的绝对值,但不能确定 M 的正负。

1.2 M 与大气比湿梯度

折射指数梯度 M 可以表示为如下形式:

$$M = -77.6 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \times \left(\frac{N^2}{g} + 15600 \frac{q}{T} \frac{N^2}{g} - \frac{7800}{T} \frac{dq}{dz} \right). \quad (2)$$

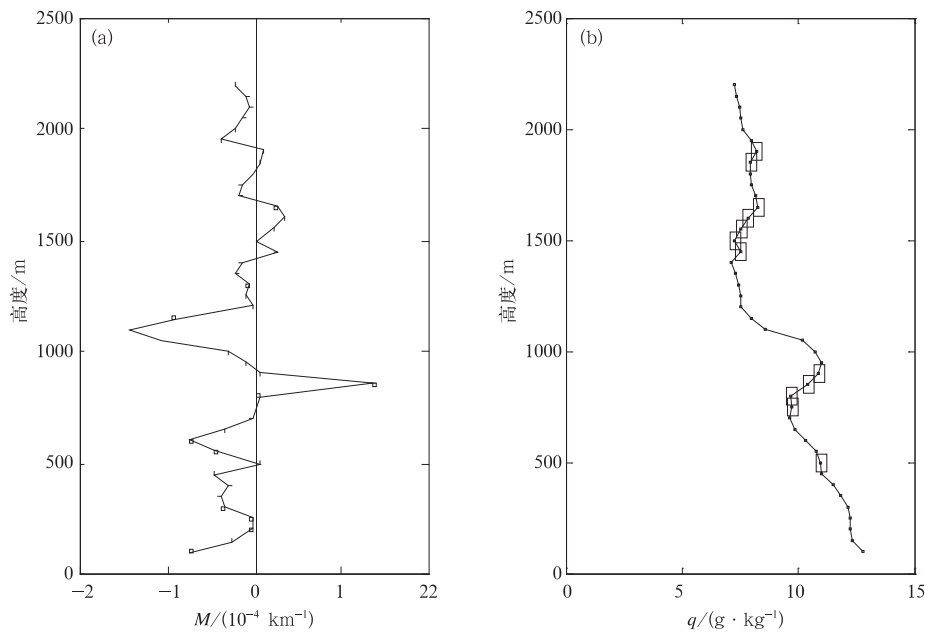


图1 2011年9月2日20:00折射指数梯度 M (a)、比湿 q (b)随高度分布

Fig. 1 The height distribution of refractive index gradient M (a) and specific humidity q (b) at 2000 BT 2 Sep 2011

1.3 大气比湿廓线反演

Tsuda 等^[14] 对式(2)进行了变化,并求解 q :

$$q(z) = \theta^2 \left\{ \int_{z_0}^z B(z) \theta^{-2} dz + \frac{q_0}{\theta_0^2} \right\}. \quad (3)$$

式(3)中, $B(z) = 1.65 \frac{T^2}{P} M + \frac{1}{7800} \left(\frac{dT}{dz} + \Gamma \right)$, Γ 为干绝热温度递减率, θ 为位温, q_0 为起始边界比湿, θ_0

式(2)中, P, g, T, q, N 分别是大气压强(单位: hPa)、重力加速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)、温度(单位: K)、比湿(单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和布维频率(单位: s^{-2}),式(2)等号右边第1项主要受 N 影响,在大气比湿很小时起主要作用;第2项受 N 以及 q 共同影响;第3项受 dq/dz 影响,与大气比湿的垂直分布有关,这3项对 M 的贡献与局地大气环境有关^[26]。利用云南大理综合探测试验期间1个月的探空数据对这3项贡献进行统计,发现低层大气中第3项贡献最大,平均为80.39%;第1项贡献次之,平均为12.75%;第2项贡献最小,平均为6.86%。

图1给出2011年9月2日20:00(北京时,下同)由探空数据计算出的 M 垂直分布及大气比湿廓线,2200 m 高度以下 M 在大部分高度上为负值,只在少数高度上为正值,对应大气比湿廓线可以看出, M 为负值时,比湿随高度升高而减小, M 为正值时,比湿随高度升高而增加。

为起始边界位温。WPR 反演大气比湿廓线过程中由 $C_n^2, \sigma_{\text{turb}}^2$ 确认 M 的绝对值,通过其他手段获取温度廓线和反演起始高度比湿 q_0 。

2 试验设备与数据

2011年8月15日—9月12日在云南大理

(25°42′26″N, 100°10′30″E, 海拔 1900 m) 进行综合探测试验, 并进行了 WPR 反演大气比湿廓线试验, 探测设备包括 CFL-03L 波段风廓线雷达、RASS 和 GPS。同时进行常规探测和地面观测等。

采用信号源对 1320 MHz 风廓线雷达 (CFL-03) 返回信号回波功率进行了定量标校^[27], 数据采集高度区间为 50~2000 m, RASS 数据采集自相同地点日本 1290 MHz 风廓线雷达的附属 RASS 系统, RASS 探测的最大高度约为 1500 m。为了避免地物杂波影响, 进行大气比湿廓线反演试验的高度范围为 300~1500 m, 试验期间 WPR 进行连续探测提供大气返回信号的信噪比、谱宽以及水平风向、风速等数据, 数据间隔为 3 min, RASS 每小时进行 1 次大气虚温探测, GPS 反演单位面积垂直水汽总量 PWV, 时间分辨率为 1 h, 探空每天 08:00, 20:00 进行。

3 数据处理

反演试验中除直接使用探空数据外, WPR, RASS, GPS/PWV 都需要经过预处理, 计算出反演大气比湿廓线所需数据。

3.1 折射指数结构常数

WPR 探测到的大气返回信号回波功率 (P_r) 或信噪比 (R_{SN}) 通过阮征等^[28] 构建的规范化处理方法, 计算折射指数结构常数

$$C_n^2 = \frac{P_r R^2}{7.3 \times 10^{-4} \lambda^{5/3} P_t (h/2) G L^2} \text{ 或}$$

$$C_n^2 = \frac{R_{SN} K T_0 B_0 N_f R^2}{7.3 \times 10^{-4} \lambda^{5/3} P_t (h/2) G L^2} \quad (4)$$

式(4)中, K 为玻尔兹曼常数, T_0 为用绝对温度表示的雷达系统噪声温度, B_0 为接收机的带宽, N_f 为噪声系数, R 为目标物距离, λ 是电磁波波长, P_t 是雷达的发射功率, h 为脉冲长度, G 为系统增益, L 为系统馈线损耗。使用的 CFL-03 雷达回波强度的测量精度为 ± 1 dB, 对 C_n^2 的估算精度也在 ± 1 dB 之内。

3.2 湍流谱宽

WPR 探测的信号谱宽 σ_{obs}^2 是湍流谱宽 σ_{turb}^2 受到环境风切变、雷达天线波束展宽后的信号谱宽, 晴空大气湍流谱宽与 WPR 探测信号速度谱宽关系为^[29]

$$\sigma_{turb}^2 = \sigma_{obs}^2 - \sigma_{bs}^2 \quad (5)$$

式(5)中, σ_{bs} 为天线波束和风切变所造成的谱展宽, 使用文献^[30] 的方法, 利用试验期间 1 个月 WPR 获取的数据计算, 结果表明: 低层 σ_{bs}^2 影响较小, 在

1500~2000 m 之间 σ_{bs}^2 约占 5%, 小于 1500 m σ_{bs}^2 约占 2.5%, WPR 从返回信号中提取谱宽还受到雷达系统噪声的影响, 需进行去噪声处理。

3.3 M 值符号确定

通过式(1), 由大气返回信号 C_n^2 和 σ_{turb}^2 仅可得到 M 的绝对值, 而 M 符号影响比湿廓线随高度变化的趋势, 直接影响反演精度。Gossard 等^[13]、Tsuda 等^[14] 研究了 M 符号的判断方法, 提出由 N^2 值来判断 M 的正负。试验中用大理探空观测数据确定 M 符号与 N^2 的关系, 确定 N^2 阈值为 $3.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 当 N^2 小于该阈值, M 为正; 否则, M 为负。

3.4 温度

RASS 通过测量声波在大气中的传播速度得到大气虚温廓线, 大气虚温与大气温度的关系为 $T_v = (1 + 0.608q \times 10^{-3}) T$, 订正值随比湿变化, 低层大气中比湿较大时订正值可达 1~2 K; M 值计算中的布维频率 N 由位温梯度 ($\partial \ln \theta / \partial z$) 直接导出, 用虚温替代温度的最大误差不超过 2 K 时, 计算 $\partial \ln \theta / \partial z$ 造成的相对误差最大不超过 4.3%, 误差较小, 反演试验中用虚温替代了温度。

4 GPS/PWV 与起始边界比湿

WPR 反演大气比湿廓线是通过距离单元内的大气比湿积分得到, 初始边界比湿 q_0 是积分起始值, 多采用探空直接获取 q_0 。本文提出对 GPS 反演的大气柱水汽含量 (PWV) 用总量约束的方法确定起始边界比湿 q_0 。

4.1 GPS/PWV

实际大气比湿廓线反演中, 将反演区间划分为 n 个处理单元, 处理单元的库长为 Δz , 水汽含量之和为

$$W = \sum_{i=0}^{i=n-1} C(Z_i) + \frac{a'}{2} \sum_{i=0}^{i=n-1} (\rho(Z_{i+1}) + \rho(Z_i)) q_0 \Delta z \quad (6)$$

式(6)中, $C(Z_i)$ 是不同高度上由雷达返回信号参数、温度梯度以及大气密度计算出的参量, a' 为一系数, $\rho(z)$ 为大气密度 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 单位气柱中水汽含量 W 可从探空资料中获取, 或由 GPS/PWV 得到, 通过式(6)可以由水汽含量 W 导出 q_0 。

符睿等^[31] 对云南 GPS/PWV 与探空得到的大气水汽含量进行分析, 其相关系数为 0.89。图 2 给出 2011 年 8—9 月云南大理综合探测试验期间 43 次 GPS/PWV 与探空计算水汽含量比对结果,

GPS/PWV 与探空水汽含量的相关系数为 0.93, 平均偏差为 1.3 mm, 标准差为 1.4 mm, 表明 GPS/PWV 可较好地反映大气水汽含量。

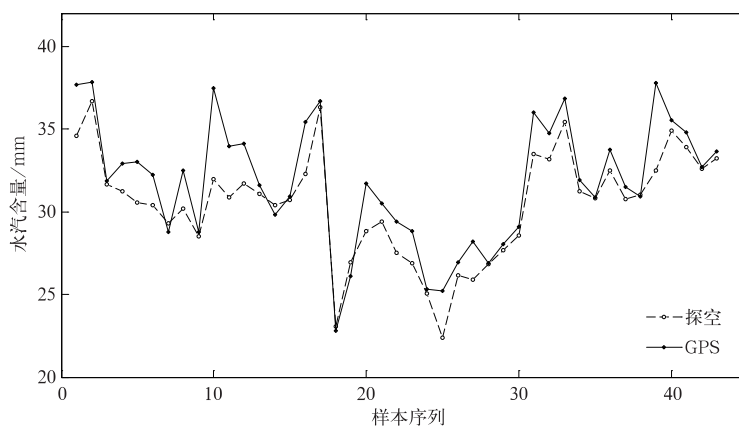


图2 探空与GPS水汽含量比对
Fig. 2 The PWV comparison of RS and GPS

4.2 水汽含量垂直分布

风廓线雷达最大探测高度受到雷达参数制约, 当探测高度较低时, 需要对能否采用GPS/PWV获取 q_0 进行分析。表1给出利用试验期间探空数据统计的不同高度水汽含量占全程水汽总量的平

均值和标准差, 其中, 1500 m 水汽含量所占比例平均值为 50.1%, 标准差为 4.78%, 通过探空获得距离单元内水汽含量占水汽总量比例, 再结合PWV, 即可获得反演区间水汽含量, 从而计算得到 q_0 。对其进行检验, 图3给出23次GPS/PWV与同时刻探

表1 不同高度水汽含量占全程水汽总量比例
Table 1 The ratio of vapor accounting for the total below different height

距离地面的高度/m	距地高度单位气柱平均水汽总量/mm	距地高度占全程水汽总量比例/%	距地高度占全程水汽总量比例离差/%
300	3.55	12.46	1.34
1000	10.62	36.17	3.53
1500	14.70	50.08	4.78
2000	18.09	61.63	5.40
3000	23.11	78.67	5.48
4000	26.23	89.20	3.91
5000	28.03	95.25	2.39
6000	28.89	98.10	1.30
7000	29.25	99.29	0.61

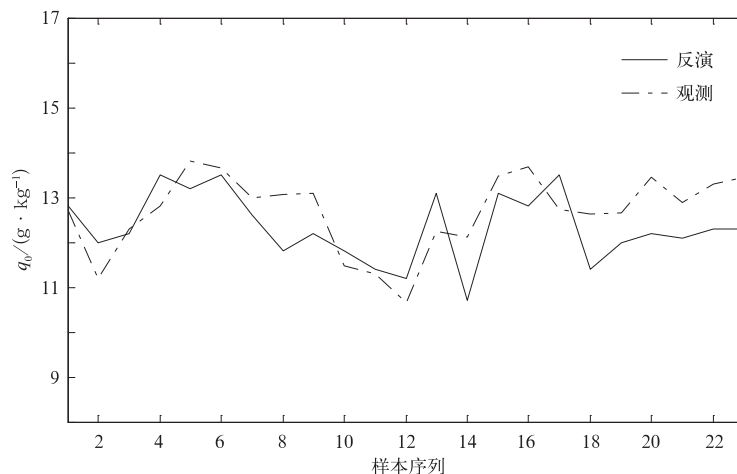


图3 GPS/PWV反演与探空观测 q_0 比对
Fig. 3 The comparison of retrieved q_0 and observed q_0

空数据计算 q_0 的比对, 两者的平均差为 $0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 标准差为 $0.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 一致性较好。由于低层大气水汽含量占全程水汽总量的比例随季节会有较大变化, 使用中应采用相同季节的资料来求取水汽含量的比例关系。

5 WPR 反演大气比湿试验

应用试验期间获取的数据进行了两项 WPR 反演大气比湿廓线试验: ① WPR 与探空联合, 由探空数据提供温度廓线和起始高度比湿 q_0 , 与探空大气比湿廓线进行比对分析; ② WPR 联合 RASS 和 GPW/PWV 遥感数据反演大气比湿廓线, 与探空大气比湿廓线比对, 研究其可行性。为便于比对, 采用相同时刻无降水的 WPR 数据及 GPS/PWV 有效数据, 共进行 17 次 221 组完整数据反演比对。

5.1 WPR 联合探空试验

图 4a 是 WPR 反演比湿与探空比湿的散点图, 300~1500 m 之间平均偏差为 $0.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 标准差为 $0.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 图 4b、图 4c 分别为 WPR 反演比湿与探空比湿的平均偏差、标准差随高度的变化。随着反演高度的增加, 误差增大。反演比湿的平均偏差与标准差随高度增加的原因由式(3)可知, 反演比湿是大气折射指数梯度、温度梯度随高度的积分, C_n^2 与 σ_{turb}^2 的测量误差随高度的积累造成反演比湿标准差的增加。

反演过程中的误差主要来自于 C_n^2 与 σ_{turb}^2 测量误差、 M 符号误判造成的误差。对 WPR 探测参数 C_n^2 与 σ_{turb}^2 进行敏感性试验, 分析 C_n^2 与 σ_{turb}^2 的变化对反演比湿梯度的影响。比湿梯度越大, 对探测参数越敏感。由图 5 可知, 比湿梯度与 σ_{turb}^2 成反比, σ_{turb}^2 越小, 比湿梯度越大; 比湿梯度与 C_n^2 成正比, C_n^2 越

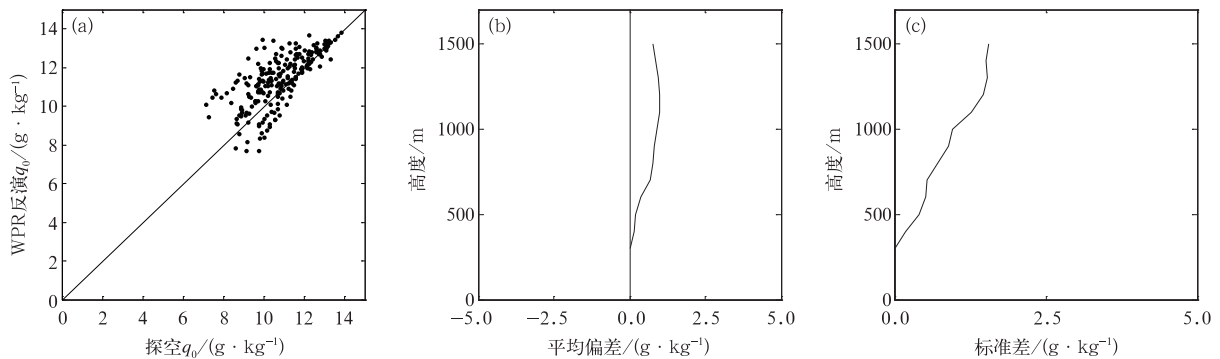


图 4 WPR 反演比湿与探空比湿廓线比对

(a) WPR 反演与探空散点图, (b) 平均偏差随高度变化, (c) 标准差随高度变化

Fig. 4 The comparison of specific humidity between the retrieved from WPR and RS (a) the scatter diagram of humidity from WPR and RS, (b) the mean deviation between WPR and RS, (c) the standard deviation between WPR and RS

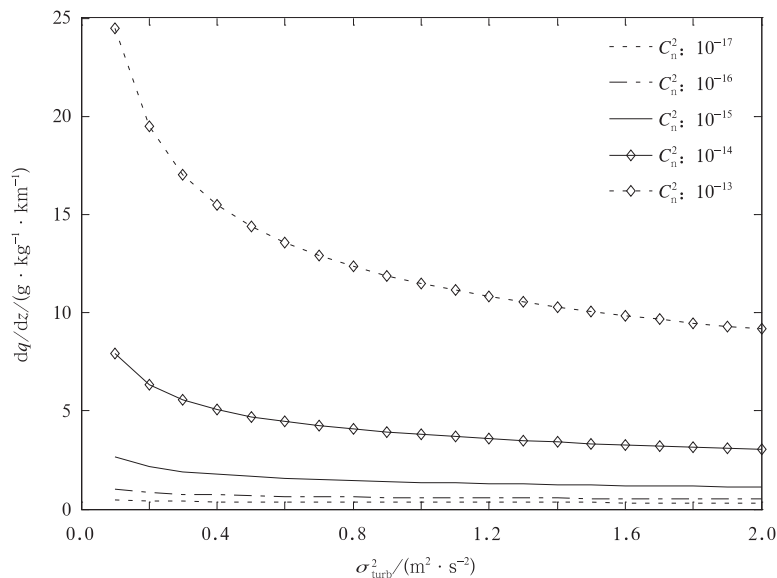


图 5 折射指数结构常数 C_n^2 与谱宽 σ_{turb}^2 对反演比湿精度的影响

Fig. 5 The specific humidity retrieving accuracy effect of refractive index structure constant C_n^2 and spectral width σ_{turb}^2

大,比湿梯度越大。在实际大气环境中的 C_n^2 变化幅度较大,有时可以达到4个量级,因此反演精度对 C_n^2 非常敏感。CFL-03 雷达测量 C_n^2 的精度约为1 dB,在低空大气中 C_n^2 约为 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, σ_{turb}^2 为 $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。即 C_n^2 测量误差造成大气比湿梯度的误差不超过 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,高度为1.5 km 处的反演比湿累积误差最大不超过 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

图6给出2011年8月18日20:00反演比湿廓

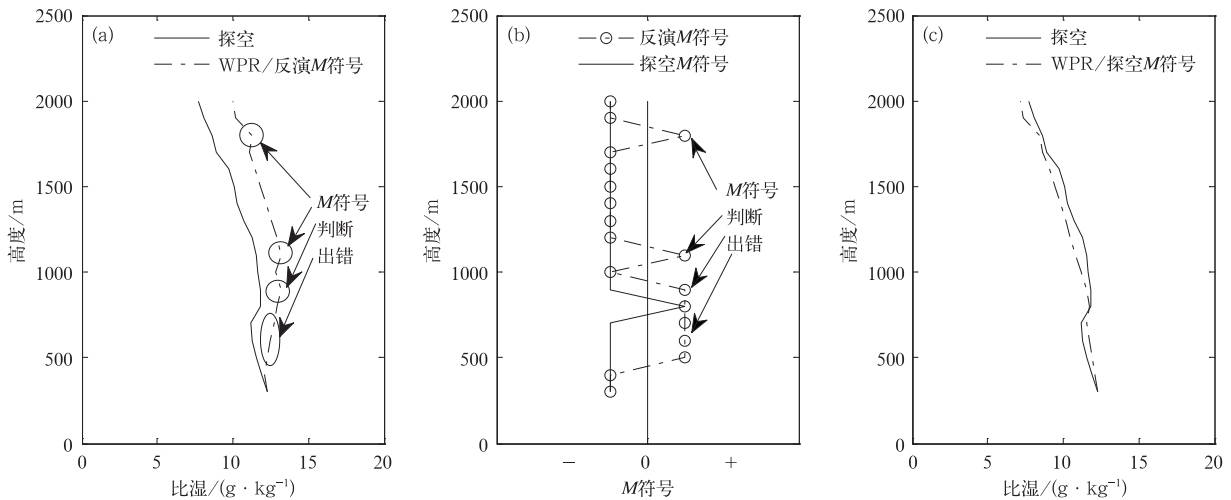


图6 WPR联合探空反演比湿与探空比湿比对 (a)探空与WPR确定M符号反演比湿廓线, (b)探空M与WPR确定M符号, (c)探空与探空确定M符号反演比湿廓线

Fig. 6 The comparison of specific humidity between the retrieved from WPR and RS

(a)specific humidity profiles retrieved by sign of M from WPR and RS, (b)the sign of M from WPR and RS, (c)specific humidity profiles retrieved by sign of M from RS and observed

5.2 WPR/RASS联合GPS反演

进行WPR及RASS联合GPS/PWV反演大气比湿试验前,分别进行了RASS虚温廓线替换探空温度廓线以及GPS获取 q_0 替换探空 q_0 的比较试验,表2给出17次替换试验的比较结果,可以看出平均差很小、标准差较大,尤其是GPS/PWV的标准差较大,其原因可能是表1中距地高度占全程水汽总量比例离差较大,接近5%。

表2 引入RASS数据与GPS数据的误差影响

Table 2 The effect of taking RASS data and GPS data into account on errors

引入数据	平均偏差 /(g · kg⁻¹)	标准差 /(g · kg⁻¹)
RASS	0.06	0.32
GPS	-0.06	0.85

使用GPS/PWV来约束获得起始边界比湿 q_0 ,并应用RASS虚温廓线参与WPR的大气比湿廓线反演结果如图7所示。图7a为WPR,RASS,GPS

线与探空比湿廓线的比较分析图,图6a为由WPR确定M符号反演大气比湿廓线与探空比湿廓线比较,图6b为WPR确定M符号与探空计算M符号随高度分布的比对,图6c为由探空确定M符号后反演比湿与探空比湿比较图。由图6可以看出,当M符号判断正确时,反演的比湿廓线与探空比湿廓线较为一致。

与探空比湿廓线的散点图,图7b、图7c为比湿平均差、标准差分布图,平均偏差为 $0.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,变化范围为 $0.01 \sim 0.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;标准差平均为 $0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,变化范围为 $0.65 \sim 1.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图7可以看出,平均差随高度略有增加;标准差随高度先减小再增加,但幅度不大。

图8给出其中3次的WPR,RASS,GPS与探空比湿廓线比对。图8a、图8b中,WPR,RASS,GPS反演比湿廓线与探空观测基本一致,误差较小;图8c中,800 m以下低层存在一定误差,但在800~1500 m,误差降低,两者基本一致。

WPR,RASS,GPS反演大气比湿廓线,不依赖于探空获取的 q_0 数据,得到的结果与WPR联合探空数据进行的反演相比,平均差略有减小,标准差略有增加,反映出RASS,GPS的参加并未过多降低WPR反演大气比湿廓线的精度。其原因是在低层大气中,温度和湿度对M值的影响比WPR对M值的影响偏小,这一点从1.2节影响M值的分析中也可看到。

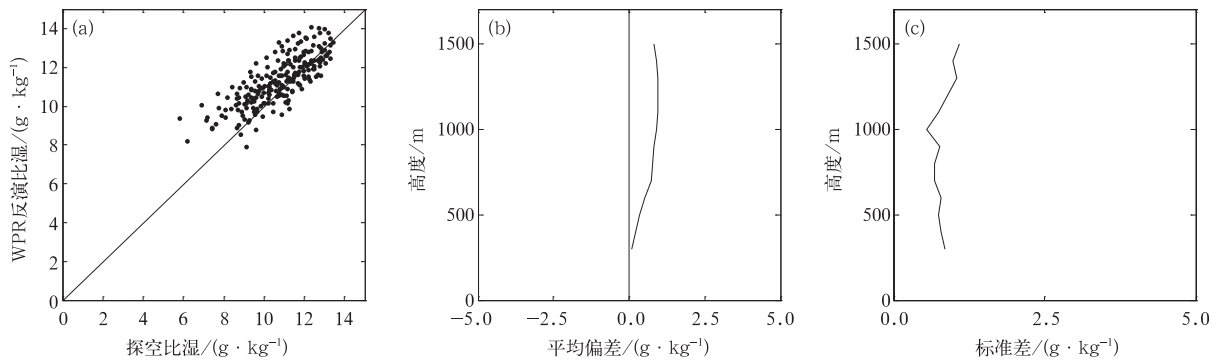


图 7 WPR,RASS 和 GPS 反演比湿与探空比湿廓线比对
 (a)WPR,RASS 和 GPS 反演与探空比湿散点图,(b)平均偏差随高度变化
 Fig. 7 The comparison of specific humidity between the retrieved and RS
 (a)the scatter diagram of specific humidity from WPR,RASS,GPS and RS,(b)the mean deviation between WPR,RASS,GPS and RS,(c)the standard deviation between WPR,RASS,GPS and RS

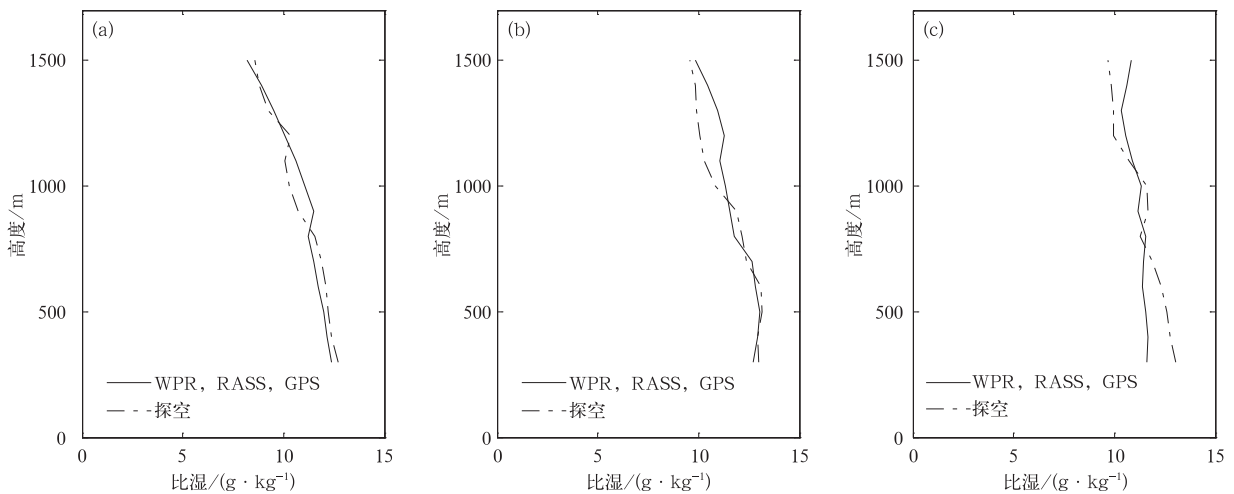


图 8 WPR,RASS,GPS 反演与探空比湿廓线比对
 (a)2011 年 8 月 16 日 08:00,(b) 2011 年 8 月 21 日 08:00,(c)2011 年 8 月 21 日 20:00
 Fig. 8 The comparison of specific humidity profilers among the retrieved from WPR,RASS,GPS and RS,respectively
 (a)0800 BT 16 Aug 2011,(b)0800 BT 21 Aug 2011,(c)2000 BT 21 Aug 2011

6 小 结

利用 2011 年 8—9 月云南大理综合探测试验数据,应用 WPR 联合 RASS,GPS/PWV 对大气比湿廓线反演进行了有意义的尝试,试验结果如下:

1) 使用风廓线雷达反演大气比湿廓线方法可行,但存在一定的反演误差。参与反演的参数中, C_n^2 与 σ_{turb}^2 对反演精度有一定影响,其中 C_n^2 影响最大,风廓线雷达探测 C_n^2 的精度为 1 dB,对低层大气比湿廓线的反演误差小于 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2) 反演算法中误差的主要来源是 M 符号的确定。 M 符号的连续判断失误会造成较大误差,单个 M 符号判断失误造成的误差则较小。本文利用 N^2 确定 M 的符号,通过对云南大理 1 个月探空数据的

统计分析结果,确定 N^2 的阈值,如何提高 M 符号的判断准确率,并有必要做进一步的研究。

3) 应用 WPR,RASS,GPS 联合反演大气比湿廓线,全遥感反演与探空比湿廓线平均偏差和标准差分别为 $0.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明完全应用遥感方法是可取的。采用 GPS/PWV 约束全程水汽含量对低层大气比湿廓线反演精度有一定影响;使用 RASS 探测的大气虚温廓线参与反演限制了反演高度;大气低层水汽含量比例离差大,在高层离差减小,使用探测高度更高的 WPR 结合 GPS/PWV 进行总量约束能够减小误差。

本文主要使用云南大理 1 个月的观测数据,对风廓线雷达等遥感系统进行了反演大气比湿廓线初步研究,今后将进一步联合微波辐射计,对 WPR 反演大气比湿廓线的精度以及业务应用的可行性进行

更细致探讨。

参考文献

- [1] Gossard E E, Chadwick R, Neff W D, et al. The use of ground based Doppler radars to measure gradients, fluxes and structure parameters in elevated layers. *Appl Meteor*, 1982, 21: 211-226.
- [2] Stankov B B, Martner B E, Politovich M K. Moisture profiling of the cloudy winter atmosphere using combined remote sensors. *Atmos Oceanic Technol*, 1995, 12: 488-510.
- [3] Stankov B B, Westwater E R, Gossard E E. Use of wind profiler estimates of significant moisture gradients to improve humidity profile retrieval. *Atmos Oceanic Technol*, 1996, 13: 1285-1290.
- [4] Solheim F, Godwin J R. Passive ground-based remote sensing of atmospheric temperature, water vapor, and cloud liquid water profiles by a frequency synthesized microwave radiometer. *Meteor Zeitschrift*, 1998, 7: 370-376.
- [5] MacDonald A, Xie Y, Ware R. Diagnosis of three dimensional water vapor using slant observations from a GPS network. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 386-397.
- [6] Ware R, Carpenter R, Guldner J, et al. A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. *Radio Sci*, 2003, 38: 1-13.
- [7] 李宏华, 薛纪善, 王曼, 等. 多普勒雷达风廓线的反演及边锋同化实验. *应用气象学报*, 2007, 28(1): 50-57.
- [8] 王令, 郑国光, 康玉霞, 等. 多普勒雷达天气雷达径向速度图上的雹云特征. *应用气象学报*, 2006, 17(3): 281-287.
- [9] 阮征, 葛润生, 吴志根, 等. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. *应用气象学报*, 2002, 13(3): 330-338.
- [10] 邓闯, 阮征, 魏鸣, 等. 风廓线雷达测风精度评估. *应用气象学报*, 2012, 23(5): 523-532.
- [11] Gossard E E, Sengupta N. Measuring gradients of meteorological properties in elevated layers with a surface-based Doppler radar. *Radio Sci*, 1988, 23: 625-639.
- [12] Gossard E E, Wolfe D E, Moran K P, et al. Measurements of clear-air gradients and turbulence properties with radar wind profilers. *Atmos Oceanic Technol*, 1998, 15: 321-342.
- [13] Gossard E E, Gutman S, Stankov B B, et al. Profile of radio refractive index and humidity derived from radar wind profilers and the Global Positioning System. *Radio Sci*, 1999, 34: 371-383.
- [14] Tsuda T, Miyamoto M, Furumoto J. Estimation of a humidity profile using turbulence echo characteristics. *Atmos Oceanic Technol*, 2001, 18: 1214-1222.
- [15] Furumoto J, Kurimoto K, Tsuda T. Continuous observations of humidity profiles with the MU radar-RASS combined with GPS and radiosonde measurements. *Atmos Oceanic Technol*, 2003, 20: 23-41.
- [16] Furumoto J, Iwai H, Fujii, Tsuda T, et al. Estimation of humidity profiles with the L-band boundary layer radar-RASS measurements. *J Meteor Soc Japan*, 2005, 83: 895-908.
- [17] Furumoto J, Shingo Imura, Tsuda T, et al. The variational assimilation method for the retrieval of humidity profiles with the wind-profiling radar. *Atmos Oceanic Technol*, 2007, 24: 1525-1545.
- [18] Bianco L, Cimini D, Frank S, et al. Combining microwave radiometer and wind profiler radar measurements for high-resolution atmospheric humidity profiling. *Atmos Oceanic Technol*, 2005, 22: 949-965.
- [19] Stankov B B, Gossard E E, Weber B L, et al. Humidity gradient profiles from wind profiling radars using the NOAA/ETL advanced Signal Processing System (SPS). *Atmos Oceanic Technol*, 2003, 20: 3-22.
- [20] Imura S, Furumoto J, Tsuda T, et al. Estimation of humidity profiles by combining co-located VHF and UHF wind-profiling radar observation. *Meteor Soc Japan*, 2007, 85: 301-319.
- [21] 朱庚华, 张彩云, 翁宁泉, 等. 利用风廓线雷达测量数据反演大气湿度廓线. *大气与环境光学学报*, 2011, 6(5): 336-341.
- [22] VanZandt T E, Green J L, Gage K S, et al. Vertical profiles of refractivity structure constant; Comparison of observations by the Sunset radar with a new theoretical model. *Radio Sci*, 1978, 13: 819-829.
- [23] Gage K S, Green J L, VanZandt T E. Use of Doppler radar for the measurement of atmospheric turbulence parameters from the intensity of clear-air echoes. *Radio Sci*, 1980, 15: 407-416.
- [24] Cohn S. Radar measurements of turbulence eddy dissipation rate in the troposphere comparison of techniques. *Atmos Oceanic Technol*, 1995, 12: 85-95.
- [25] Clayson C A, Lakshmi K. On turbulence and mixing in the free atmosphere inferred from high-resolution soundings. *Atmos Oceanic Technol*, 2008, 25: 833-852.
- [26] Ottersten H. Mean vertical gradient of potential refractive index in turbulent mixing and radar detection of CAT. *Radio Sci*, 1969, 4: 1247-1249.
- [27] 钟刘军, 阮征, 葛润生, 等. 风廓线雷达回波信号强度定标方法. *应用气象学报*, 2010, 21(5): 598-605.
- [28] 阮征, 何平, 葛润生. 风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究. *大气科学*, 2008, 32(1): 133-140.
- [29] Nastrom G D. Doppler radar apectral width broadening due to beamwidth and wind shear. *Ann Geophys*, 1997, 15: 786-796.
- [30] 王莎, 阮征, 葛润生. 风廓线雷达探测大气返回信号谱的仿真模拟. *应用气象学报*, 2012, 23(1): 20-29.
- [31] 符睿, 段旭, 刘建宇, 等. 云南地基 GPS 观测大气可降水量变化特征. *气象科技*, 2010, 38(4): 457-462.

Preliminary Estimation of Specific Humidity Profiles with Wind Profile Radar

Sun Kangyuan¹⁾²⁾ Ruan Zheng²⁾ Wei Ming¹⁾ Ge Runsheng²⁾ Dong Baoju³⁾

¹⁾ (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (Dali National Climate Observatory of Yunnan Province, Dali 671003)

Abstract

As a new type of detection instrument, wind profile radar (WPR) can detect meteorological factors such as wind profiles, spectral width, and refractive index structure constant and so on. The special detecting ability of WPR decides its broad application in atmospheric science research, meteorological operation application, climate research, aviation security and many other areas. With the advances of detection, a new specific humidity profiles retrieving method with WPR is proposed.

Based on the turbulent backscattering theory, the method of estimating specific humidity profiles using boundary layer wind profile radar characteristics of clear-air echoes is devised. A retrieving test of specific humidity profiles are carried out with the data of observational campaign conducted from 15 Aug to 10 Sep in 2011 at a meteorological station of Dali, Yunnan Province, analyzing the main factors of retrieving accuracy. In the low atmosphere the refractive index gradient (M) is mainly influenced by three factors: dq/dz by 80.39%, the atmospheric temperature (T) by 12.75%, and the specific humidity q by 6.86% on average, respectively. Obviously, the dq/dz item is the most important factor, namely, there is a close relationship between the refractive index gradient and specific humidity.

It is the measurement of refractive index gradient that turns out to retrieve specific humidity profiles with the help of WPR. The volume reflectivity (η) of turbulence echoes can indicate the fluctuation of atmosphere specific humidity due to the good correlation with M . Another factor that matters is the atmospheric turbulence dissipation rate which is under the influence of the signal spectral width observed by WPR. Radio Acoustic Sounding System (RASS) provides virtual temperature in retrieving of specific humidity profiles with the measurement of acoustic speed; PWV from GPS provides a method to obtain the initial boundary specific humidity; estimation of specific humidity profiles comparing with radiosonde data at the same time is conducted with WPR, RASS and GPS data.

Results show that WPR can successfully retrieve specific humidity profiles with a certain degree of error. Among many factors that affect the retrieving accuracy, the determining of the sign of M , the refractive index structure constant and turbulence spectral width plays the key role, while the temperature and pressure are not so important. This new method can retrieve specific humidity profiles simply with the remote sensing instruments. The specific humidity retrieving from WPR, temperature profilers and initial boundary specific humidity from radiosonde shows the same trend comparing with which observed by radiosonde. The mean deviation and standard deviation turns out to be $0.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively, both showing an increasing trend with height. With the assistance of WPR, GPS/PWV and RASS data, the retrieving mean deviation and standard deviation of specific humidity is $0.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ comparing with the observation of radiosonde.

Key words: wind profile radar; specific humidity profiles; refractive index gradient; refractive index structure constant