

# PMP 估算中大气可降水量计算方法的探讨

陈宏<sup>1,2</sup>, 林炳章<sup>1,2</sup>, 张叶晖<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学水文气象学院,江苏 南京 210044;2.南京信息工程大学大气科学学院,江苏 南京 210044)

**摘要:**可降水量是估算可能最大降水(PMP)的一个重要中间量。为验证不同方法推求可降水量的准确性,利用1998~2010年东南沿海五省(自治区)及香港地区共13个探空站和地面露点资料,分别采用3种不同方法(探空法、经验公式法和假绝热法)计算各站的大气可降水量,并对三种估算方法的结果进行比较。结果表明:经验公式法求得可降水量最小,探空法次之,假绝热法求得结果最大,偏差随着纬度变化。纬度越低,假绝热法推求的可降水量相对误差越大,且在有降水日时的偏差更为明显;经验公式法和假绝热法得到的结果均与探空法的可降水量相关性较强;三种求算方法得到的大气可降水量年内变化基本一致。建议在PMP估算中,利用地面最大12h持续露点温度通过假绝热法推求可降水量时,应考虑纬度校正。

**关键词:**大气可降水量;探空法;假绝热;PMP

中图分类号:P339;P426.6

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)03-0001-05

## 1 引言

大气可降水量(Precipitable Water)是指垂直气柱含有的水汽总量,假定这些水汽全部凝结,并积聚在气柱的地面上时所具有的液态水深度<sup>[1]</sup>。在水文气象研究中,可根据暴雨资料推算大型水利工程和核电站工程防洪设计以及沿海大城市防洪规划所要求的可能最大降水(Probable Maximum Precipitation, PMP),进而推求可能最大洪水(Probable Maximum Flood, PMF)。可能最大降水估算常用方法之一的水汽放大(Moisture maximization)的计算,是基于可降水量的计算结果,因此,大气可降水量的推求在水文气象成因分析中至关重要。

目前,常用的可降水量推算方法主要有以下4种:探空资料比湿分层积分法<sup>[2-3]</sup>(简称探空法),地面露点经验公式推算法<sup>[1,4]</sup>(简称经验公式法),GPS数据求算方法<sup>[5]</sup>(简称GPS法),地面露点假绝热查算法<sup>[6]</sup>(简称

假绝热法)。探空法的结果从理论上来说最可靠,常用来判断其余方法估算结果的准确性<sup>[7]</sup>,缺点是探空站分布较为稀疏,需要与地面资料结合来分析更大范围可降水量分布状况。经验公式法和GPS法常用于推算整层大气的水汽含量,假绝热法目前只在可能最大降水估算中被应用。

向玉春<sup>[8]</sup>和卢士庆<sup>[9]</sup>分别对前三种方法进行比较,结果却并不一致。向玉春发现经验公式法得到的大气可降水量比探空法所得的结果小,而卢士庆的结果则相反。为了进一步验证前人的结果以及对我国东南沿海地区和香港地区进行可能最大降水估算,本文应用经验公式法和假绝热法推求可降水量,并与探空法的结果进行比较,分析这两种方法的误差和准确性。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料介绍

本文的数据来源分为三部分:其一是全球综合探

收稿日期:2013-10-15

基金项目:水利部公益性行业专项经费基金资助项目(20111033)

作者简介:陈宏(1988-),女,河北张家口人,南京信息工程大学研究生,研究方向为水文气象。E-mail: chenhongfengye@163.com

空资料中心(Integrated Global Radiosonde Archive, IGRA)的资料,为逐日 08 时和 20 时的探空资料。其二是 MICAPS(Meteorological Information Comprehensive Analysis and Process System)资料中提取的地面露点资料。其三是香港天文台提供的地面露点资料。结合三种资料的时间长度,经过质量控制,选取我国东南沿海五省(自治区)和香港共 13 个站 1998~2010 年的资料来进行分析和计算,图 1 为 13 个站的分布情况(分别标记了站号和各站的站名首字母)。

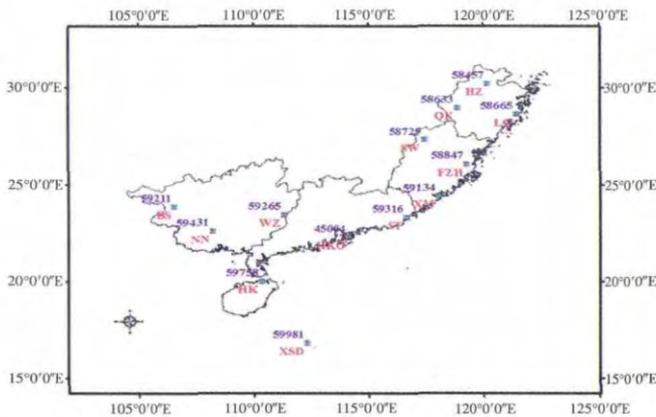


图 1 东南沿海五省(自治区)和香港 13 个探空站分布  
Fig.1 Location of 13 radiosonde stations  
in five provinces (region) of SE China and Hongkong

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 探空法

利用探空资料计算整层大气可降水量的大气静力学公式:

$$W = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q dp \quad (1)$$

式中:  $W$  为可降水量 ( $g/cm^2$ );  $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ );  $q$  为比湿 ( $g/kg$ );  $p_0$  为地面气压 ( $hPa$ )。在计算时,通常采用分层积分到  $300hPa$ <sup>[5]</sup>。公式为:

$$W = \frac{1}{g} \sum_{300}^{p_0} q \Delta p \quad (2)$$

### 2.2.2 经验公式法

2006 年杨景梅等人<sup>[1]</sup>根据我国的地理特点和气候特征建立了整层大气可降水量同地面露点普遍关系的经验计算公式,统计归纳结果如下:

$$W = \exp(b_0 + b_1 t_d) \quad (3)$$

式中:  $W$  为整层大气可降水量 ( $cm$ );  $t_d$  为地面露点 ( $^{\circ}C$ );  $b_0$ 、 $b_1$  为经验系数。公式如下:

$$b_0 = \begin{cases} 0.02r_1 + r_2 - r_3 & (\text{青藏高原以外地区}) \\ \exp(-0.276H^2 + 0.477H - 0.878) & (\text{青藏高原范围内}) \end{cases} \quad (4)$$

$$b_1 = \begin{cases} 0.062 \exp(0.094H^2 - 0.194H + 0.120) & (\text{青藏高原以外}, \varphi \geq 33^{\circ}) \\ 0.062 \exp(0.036H + 0.120) - r_4 & (\text{青藏高原以外}, \varphi < 33^{\circ}) \\ 0.062 \exp(-0.143H^2 + 1.078H - 1.750) & (\text{青藏高原范围内}) \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$r_1 = \begin{cases} \exp(-1.918H^2 + 3.107H + 0.711) & (\varphi \geq 33^{\circ}) \\ \exp(-1.975H^2 + 3.893H + 0.400) & (\varphi < 33^{\circ}) \end{cases}$$

$$r_2 = \frac{0.7}{(\varphi - 25.0)^2 + 1.2} \exp(-1.28H^2 - 0.69H)$$

$$r_3 = \begin{cases} 0.0 & (\varphi > 20^{\circ}) \\ 0.09 & (\varphi \leq 20^{\circ}) \end{cases}$$

$$r_4 = \frac{0.017}{(\varphi - 25.0)^2 + 0.6} \exp(-2.0H)$$

式中:  $\varphi$  为地理纬度 ( $^{\circ}$ );  $H$  为站点海拔高度 ( $km$ )。

### 2.2.3 假绝热法

饱和和假绝热过程是指空气以干绝热状态上升至饱和高度,并在那里变为湿绝热状态,水汽发生凝结后全部降落。将露点按假绝热换算到  $1000hPa$  高度,利用《可能最大降水估算手册》附表 1.1 和 1.2 中露点与可降水量的函数关系,可以直接查算出整个气柱中的可降水量<sup>[5]</sup>。

## 3 结果分析

本文基于东南沿海地区和香港共 13 个站每日两次的探空资料,利用经验公式法、假绝热法和探空法逐次推算可降水量。由于假绝热法的使用需要基于两个假定,且适用于空气中水汽含量非常高的情况,因此本文以探空法求得各月可降水量的最大值为时间点,找出对应时间各月三种方法推算的最大可降水量,对三种方法的月最大值进行多年平均并比较。

### 3.1 经验公式法与探空法结果比较

结果表明:经验公式法计算的大气可降水量均低于探空法计算的大气可降水量。图 2 是 13 个站利用这两种计算方法大气可降水量的散点图,从图中可以看出,两种方法具有良好的线性关系,相关系数为 96.15%。如图 2 所示,在 X(分层积分)-Y(经验公式)

关系图中, X-Y 相关点据都落在 45°线的上方, 表明经验公式的结果比分层积分的结果明显偏小; 按以下均方根误差(RMSE)公式(6)计算, 分层积分结果的均方根离差平均比经验公式的结果高 11.21mm。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x-y)^2} \quad (6)$$

式中: x 为经验公式法推求的可降水量; y 为探空法计算的可降水量。

6 个代表站(图 3)的结果进一步说明了以上结论, 分析每个代表站, 杭州、福州的偏离程度最大, 其次是汕头、香港, 偏离程度最小的是海口和南宁, 因此这种偏离程度基本随着纬度变化, 纬度较高的地区偏小越明显, 说明利用经验公式法求算大气可降水量, 纬度越低越精确。这是因为地面露点经验公式由杨景梅<sup>[1]</sup>等人从全国选取了 28 个代表站的气象资料并考虑了站点所处的地理特点总结得出的, 所以将该公式应用于东南沿海地区, 会导致该方法在沿海纬度相对较高的

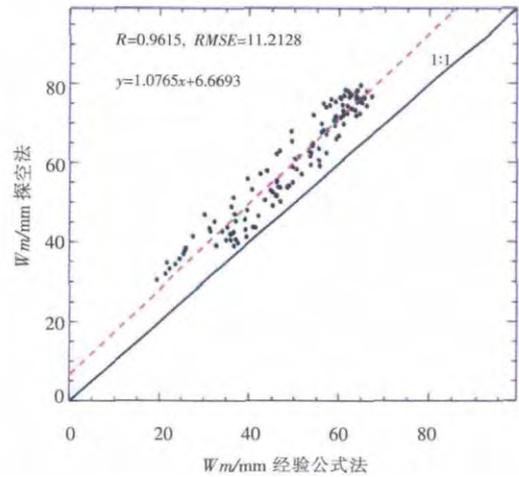


图 2 经验公式法和探空法计算大气可降水量散点图  
Fig.2 Scatter diagram of precipitable water through the empirical formula calculation vs. radiosonde method

地区得到的可降水量偏小程度增大。

### 3.2 假绝热法与探空法结果比较

图 3 反映出假绝热法和探空法计算的可降水量年

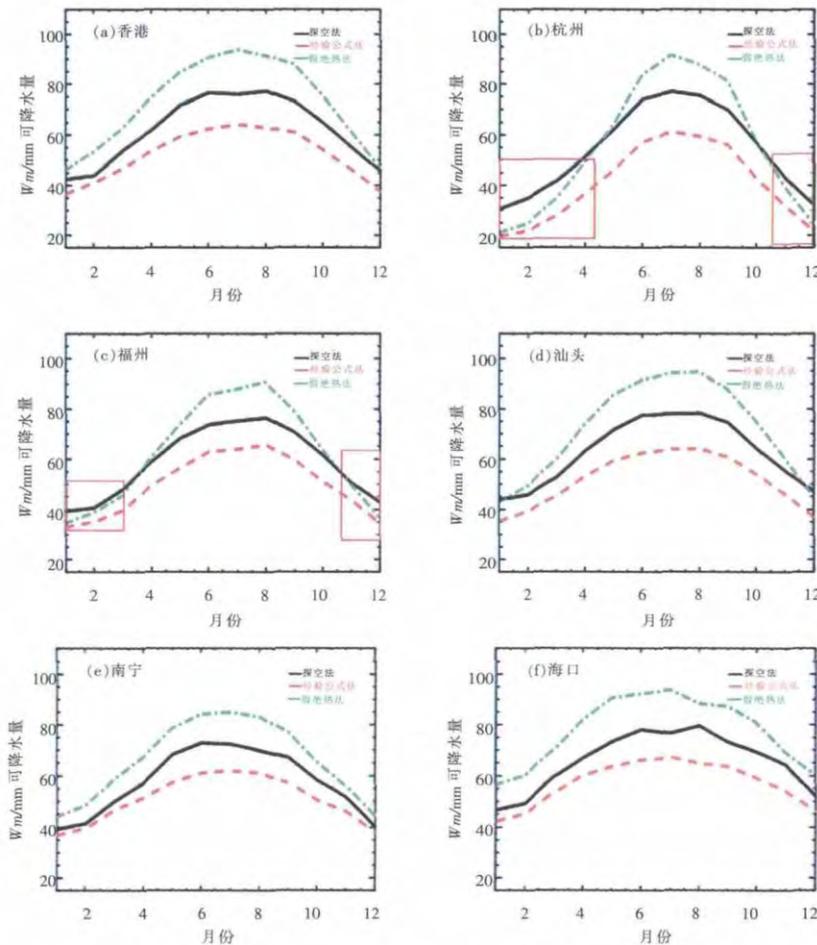


图 3 1998~2010 年月最大可降水量变化图

(a)香港(b)杭州(c)福州(d)汕头(e)南宁(f)海口

Fig.3 Monthly mean variations of maximum precipitable water during 1998-2010  
(a)Hong Kong (b)Hang Zhou (c)Fu Zhou (d)Shan Tou (e)Nan Ning (f)Hai Kou

内变化基本一致,其月平均值分布形态接近正态分布,表现为先升后降的趋势,6个代表站均为1、2月最小,之后逐渐增多,6~8月达到最大;季节变化明显,冬季最小,春、秋季次之,夏季最大。只有杭州和福州的冬季假绝热法推求的结果相对较小,大多数站的结果都表明假绝热法推算的可降水量相对较大,且这种偏大程度在夏、秋季节最为明显,即量值越大的月份越显著。

表1为应用假绝热法和探空法推算的杭州、福州、汕头、南宁、香港、海口6个站大气可降水量年平均的相对误差。杭州的相对误差为-3.80%,福州平均相对误差为3.22%,海口的相对误差最大,为18.81%,相对误差随着纬度变化,纬度越低,假绝热法推求的可降水量相对误差越大(图4)。图5是13个站利用这两种计算方法大气降水量的散点图,相关系数为96.77%,说明两种方法具有良好的线性关系,且在大气可降水量在40mm以下时,分层积分结果比假绝热法结果略为偏大,而在40mm以上时,假绝热法结果偏大,但是总的来说,假绝热法结果偏大,其均方误差平均偏大11.48mm。

表1 假绝热法和探空法计算大气可降水量相对误差

Table1 The relative error of calculation of precipitable water by using pseudo adiabatic method vs. radiosonde method

| 站名     | 杭州     | 福州    | 汕头     | 南宁     | 香港     | 海口     |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 纬度(°N) | 30.23  | 26.08 | 23.35  | 22.63  | 22.32  | 20.03  |
| 相对误差   | -3.80% | 3.22% | 12.71% | 14.73% | 16.16% | 18.81% |

假绝热法和探空法的相对误差=(假绝热法推算可降水量-探空法推算可降水量)/探空法推算可降水量×100%

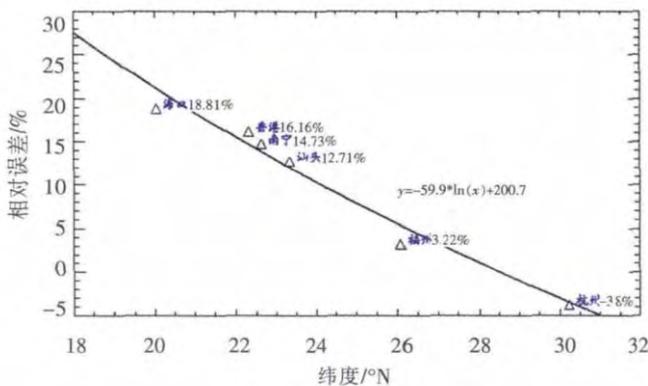


图4 假绝热法和探空法计算大气可降水量相对误差纬度变化图

Fig.4 Variation of latitude of the relative error of calculation of precipitable water by using pseudo adiabatic method vs. radiosonde method

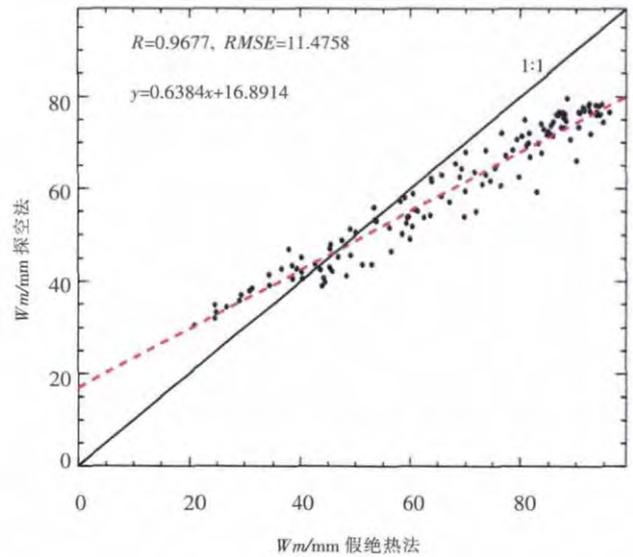


图5 假绝热法和探空法计算大气可降水量相关关系散点图

Fig.5 Scatter diagram of precipitable water through pseudo-adiabatic calculation vs. radiosonde method

### 3.3 降水期间可降水量结果比较

根据1998~2010年香港天文台每年各月天气摘要,统计出这13年每年6月的有降水日,共计177天,并分析三种方法推求降水量的差别。如图6所示,假绝热法推算结果偏大,经验公式法计算的可降水量偏小。假绝热法推算,经验公式法与探空法得到的大气可降水量相对误差为20.00%、-14.67%,平均绝对偏大12.26mm,10.20mm。相较于年平均相对误差,有降水日时,采用假绝热法的计算结果偏大程度增强,而经验公式法的偏离程度减小,这可能是由于有降水日探空气球得到资料的层次会减少,导致采用探空法推算的可降水量偏小,进而对相对误差产生了一定的影响。

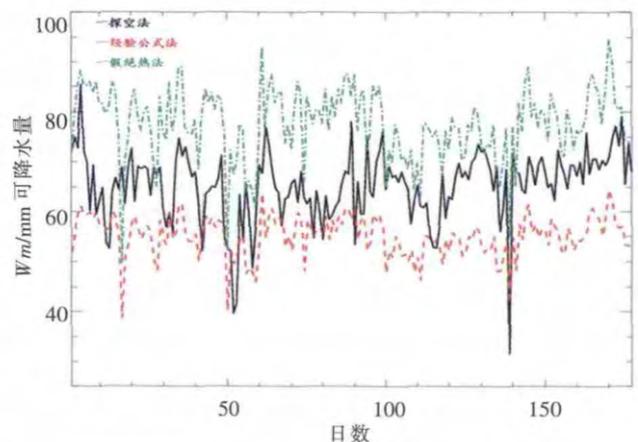


图6 1998~2010年香港6月

有降水日的三种方法估算大气可降水量对比

Fig.6 Comparison of estimation of Atmospheric Precipitable Water by three methods in Hong Kong during precipitation days in June from 1998 to 2010

## 4 结论

通过上面的分析,得到如下主要结论:

(1)利用经验公式法、假绝热法与探空法求得的大气可降水量具有较好的相关性,都可用于实际工作。

(2)利用经验公式法的结果偏小;而利用假绝热法推求的大气可降水量偏大,且偏差随着纬度变化而变化,纬度越低,假绝热法推求的可降水量相对误差越大。但是由于分辨率较高的地面露点观测数据相对比较容易获得,因此,方法简单的经验公式法,对于探空站稀少的区域的一般估算应用,具有普遍适用性;而物理概念比较严格的假绝热法,可用于重大防洪工程中可能最大降水估算的推求。

(3)有降水日的研究表明,采用假绝热法推求的可降水量,比探空法的结果偏大更多,建议在PMP估算中采用假绝热法推求可降水量时,不论是当地暴雨放大或是暴雨移置改正,应该考虑如图4所示的纬度差别的校正。

由于本文选择的站点在空间上具有一定的局限性,具体的校正量,还需要进一步研究和验证。

参考文献:

- [1] 杨景梅,邱金桓.用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J].大气科学,2002,26(1):9-22.(YANG Jingmei,QIU Jinluan.Calculate the atmospheric precipitable water in our country by using ground humidity parameter and do the research on effective moisture content method[J].Atmospheric Sciences,2002,26(1):9-22.(in Chinese))
- [2] 刘国纬.中国大陆上空可降水的时空分布[J].水利学报,1984,(5):1-9.(LIU Guowei. Temporal and spatial distribution of precipitation over China mainland [J].Journal of Hydraulic Engineering, 1984,(5):1-9.(in Chinese))
- [3] 刘建文,郭虎,李耀东,等.天气分析预报与物理量计算基础[M].北京:气象出版社,2005.(LIU Jianwen, GUO Hu, LI Yaodong, et al. Weather Analysis and Prediction and the Physical Basis for Calculation [M].Beijing: China Meteorological Press, 2005. (in Chinese))
- [4] 杨景梅,邱金桓.我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式[J].大气科学,1996,20(5):620-626.(YANG Jingmei,QIU Jinluan.Empirical expressions of relationship between precipitable water vapor and water vapor pressure in our country [J].Atmospheric Sciences, 1996,20(5):620-626.(in Chinese))
- [5] 盛裴轩.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003.(SHENG Peixuan. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003. (in Chinese))
- [6] World Meteorological Organization (WMO). Manual on estimation of probable maximum precipitation, operational hydrology[R]. Geneva: WMO No.1045, 2009.
- [7] Lichuan Chen, A. Allen Bradley.Adequacy of using surface humidity to estimate atmospheric moisture availability for probable maximum precipitation[J].Water Resources Research, 42.W09410.doi: 10.1029/2005WR004496.
- [8] 向玉春,陈正洪,徐桂荣,等.三种大气可降水量推算方法结果的分析[J].气象,35(11):48-54.(XIANG Yuchun,CHEN Zhenghong, Xu Guioong, et al. Comparative analysis of the results using the three methods of calculating precipitable water[J].Meteorology, 35(11):48-54.(in Chinese))
- [9] 卢士庆,闫宾,刘晓东.几种求算大气可降水量方法比较[J].内蒙古气象,2009,1:15-17.(LU Shiqing, YAN Bin, LIU Xiaodong.Comparison of several calculation of atmospheric precipitation method [J].Inner Mongolia Meteorology, 2009:1:15-17.(in Chinese))

## Comparison of Calculation Methods for Estimating Atmospheric Precipitable Water in Estimation of PMP

CHEN Hong<sup>1,2</sup>, LIN Bingzhang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yehui<sup>1</sup>

(1. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Precipitable water is an important intermediate parameter to estimate the probable maximum precipitation. In order to verify the accuracy of different methods for precipitable water estimation, radiosonde data and ground dew point temperature data at 13 stations in SE China coast region during 1998-2010 have been used to compare the precipitable water estimated by 3 methods, which are the specific humidity stratification integral, the surface dew point empirical formula method and the pseudo adiabatic calculation method, respectively. These stations are located in the five coastal provinces (region) of SE China and Hong Kong. The results show that the precipitable water calculated through the surface dew point method is the smallest, while the estimation through pseudo adiabatic method is the largest. The bias varies with latitude, the latitude is lower, the larger relative error. This bias is more obvious in the rainy days. The results of precipitable water by using ground method and pseudo adiabatic method both have strong correlations with the one based on specific humidity stratification integral method. The temporal variations of the atmospheric precipitation estimated by the three methods are consistent. This paper suggests that, in estimation of PMP in terms of moisture maximization, when the atmospheric precipitable water is calculated via pseudo adiabatic method based on the maximum 12-hour persisting surface dew point, a correction of latitude-induced difference should be taken into account.

**Key words:** atmospheric precipitable water; radiosonde data; pseudo adiabatic method; PMP