

# 三种大气可降水量推算方法结果的比较分析

向玉春<sup>1</sup> 陈正洪<sup>2</sup> 徐桂荣<sup>2</sup> 陈 波<sup>2</sup> 程亚平<sup>3</sup>

- (1. 湖北省人工影响天气办公室, 武汉 430074;
2. 中国气象局武汉暴雨研究所;
3. 湖北省气象信息与技术保障中心)

**提 要:** 以湖北省为例, 分别用气象探空资料累加计算、地面气象资料推算(又有两种)、地基 GPS 探测资料反演等三种方法计算出该省空中水汽资源含量, 并以探空法计算的水汽资源含量为基准来评估其他两种方法计算结果的偏差情况。结果表明: (1)与探空法计算结果相比, 地面法计算结果偏小, 恩施、宜昌、武汉等 3 站年平均空中水汽资源含量分别只偏小 4.7%、2.9%、5.4%, 且两种推算方法计算的月空中水汽资源含量变化趋势一致; (2)宜昌站 GPS 法比探空法计算结果偏大 5.6%, 同期地面法比探空法偏小 3.5%; (3)对于有降水日的有效空中水汽资源, 地面法、GPS 法推算的整层水汽含量与探空法计算结果分别相差 -1.4% 和 8.4%。可见地面法和 GPS 法推算空中水汽资源精度均比较高, 可满足空中水汽资源推算要求, 且站点多, 从而可有效弥补探空站少的不足。总体上 GPS 法推算空中水汽资源精度略低于地面法, 还可在今后应用中进一步订正优化。

**关键词:** 地面水汽压 GPS 气象探空 空中水汽资源 可降水量 计算方法 误差分析

## A Comparison and Analysis of the Results of Three Methods for the Calculation of Water Vapor Resources

Xiang Yuchun<sup>1</sup> Chen Zhenghong<sup>2</sup> Xu Guirong<sup>2</sup> Chen Bo<sup>2</sup> Cheng Yaping<sup>3</sup>

- (1. Weather Modification Office of Hubei Province, Wuhan 430074
2. Wuhan Institute of Heavy Rain of China Meteorological Administration;
3. Meteorological Information and Technology Support Center of Hubei Province)

**Abstract:** Taking Hubei Province for example, based on the surface meteorological data, GPS/Met

资助项目:《空中水汽资源气象评价方法》国家标准资助

收稿日期:2008年12月15日; 修定稿日期:2009年4月2日

data and radiosonde data, the water vapor resources are calculated. Furthermore, the deviation of the first two kinds of methods from the third is evaluated by setting the radiosonde result as standards. The results show that as follows. (1) The values of water vapor resources based on the surface data are slightly smaller than that on the radiosonde data, and the annual average values at Enshi, Yichang and Wuhan Stations are about 4.7%, 2.9% and 5.4% less than those by radiosonde data, respectively. But their monthly change trends are coherent. (2) At Yichang Station the deviation value of the result based on GPS data is a little higher than that on surface data in the same period, and the water vapor content is 5.6% more than that on radiosonde data but the result on the surface data is 3.5% less than that on radiosonde data. (3) About the effective vapor water in precipitation days, the deviation values of the first two methods are respectively only -1.4% and 8.4%. Therefore the precision of the method based on surface data and GPS data are higher and they can make up for the lack of radiosonde stations due to the adequate surface stations. In the mass, the precision of the method based on GPS is slightly less than that on surface data and this inadequacy can be amended.

**Key Words:** surface vapor pressure GPS radiosonde water vapor resources precipitable water vapor calculation method comparison

## 引 言

气候资源主要包括光、温(热)、水等,是人类赖以生存的基础资源,同时具有清洁、可再生、可持续利用等特点。随着社会的发展和科技的进步,如何合理开发、利用、保护气候资源,是当前人类社会可持续发展进程中面临的重大课题。我国是一个淡水资源欠缺的国家,时间、空间上分布不均匀则加重了其危害性,如何科学合理开发水资源,解决生产、生活和建设用水问题,是关系国家安全、发展和人民生活的大事。空中水汽资源是大气降水的主要来源,根据前期研究,空中水资源存量远大于地面得到的降水量,具有极大的开发潜力<sup>[1-4]</sup>,同时由于空中水资源存在较大的时空差异,计算、分析和评价空中水汽资源,对于合理开发空中水资源具有重要意义。

空中水汽资源无法直接测量,但可以进

行推算,目前采用的方法主要有以下三种,即气象探空资料累加计算<sup>[6]</sup>(简称为“探空法”)、地面气象资料推算<sup>[7-8]</sup>(简称为“地面法”)、地基 GPS 探测资料反演<sup>[9-11]</sup>(简称为“GPS法”)。由于探空资料包括大气中不同高度层的湿度参量,在气象部门被广泛用于计算整层水汽含量<sup>[2-5]</sup>,通常以探空资料计算结果作为标准来判断其他计算方法的优劣,不足之处是探空站分布过于稀疏,还需要结合其他分布较为密集的观测资料,才能全面反映一个地区的空中水汽资源状况。地面气象资料具有时间序列长、空间分辨率比较高的特点,而 GPS 是近些年广泛应用的新型探测技术,可全天候监测,监测站点也在逐步增多,这两种资料都可用于推算空中水汽资源<sup>[7-8,12-14]</sup>。本文应用地面气象资料、GPS 资料推算反演了整层水汽含量,并与探空计算结果进行了比较,通过对三类方法的结果进行比较分析,评价其优缺点和推算误差,以寻

求空中水资源推算的最佳方案。

## 1 资料与方法

某个区域的空中水汽资源可用一定时段的整层大气可降水量之和来表征。

### 1.1 资料

包括 2004、2005、2007 年湖北省 77 站地面水汽压资料和降水量资料、3 站探空资料以及 2007 年湖北省 5 站 GPS 资料。探空站位于恩施、宜昌、武汉,其经度、纬度和海拔高度分别为 (30. 28° N、109. 47° E、458m)、(30. 70° N、111. 30° E、134m)、(30. 62° N、114. 13° E、23m)。5 个 GPS 站包括潜江、咸宁、宜昌、钟祥、黄石。其中宜昌站同时具有探空和 GPS 观测资料。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 探空法

应用探空资料计算整层大气水汽含量(简称水汽含量)的公式<sup>[5]</sup>为:

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

式中  $\omega$  表示水汽含量,单位为  $g \cdot cm^{-2}$ ;  $g$  为重力加速度,单位为  $m \cdot s^{-2}$ ;  $q(p)$  为随气压变化的各气压层比湿,单位为  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $p_0$  为地面气压值,单位为 hPa。

$$q = 621.98e/p$$

其中,  $e$  为饱和水汽压,可根据 Tentens 经验公式<sup>[5]</sup>由露点温度计算。

整层大气可降水量为大气气柱的总水汽含量转换成等效液态水柱的高度,则:

$$W_1 = W/\rho \quad (2)$$

式中  $\rho$  为水汽密度,  $W_1$  单位为 cm。

#### 1.2.2 地面法

(1) 地面法一:应用杨景梅等建立的整

层大气可降水量与地面水汽压经验关系式<sup>[7]</sup>:

$$W_{2-1} = \alpha'_0 + \alpha'_1 e \quad (3)$$

其中  $W_{2-1}$  为整层大气可降水量(单位:cm),  $e$  为地面水汽压(hPa),  $\alpha'_0$  和  $\alpha'_1$  为经验系数。青藏高原以外地区的经验系数为:

$$\alpha'_0 = \begin{cases} 0.03 \exp(-1.39H^2 + 2.74H + 0.15) \\ (\varphi \geq 33^\circ) \\ 0.04 \exp(0.6H) - d_1 + d_2 \quad (\varphi < 30) \end{cases}$$

$$\alpha'_1 = \begin{cases} 0.17 + D_3 \quad (\varphi \geq 33^\circ) \\ (0.20 - d_3)d \quad (\varphi < 33^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$d_1 = 0.05 / [(\varphi - 25.0)^2 + 0.25]$$

$$d_2 = \begin{cases} 0 \quad (\varphi > 20^\circ) \\ -0.9 \quad (\varphi \leq 20^\circ) \end{cases}$$

$$d_3 = -0.66 / [(\varphi - 33.0)^2 + 4.41]$$

$$d_4 = 1.0$$

其中,  $\varphi$  为地理纬度,  $H$  为测站海拔高度(km)。

(2) 地面法二:应用张学文建立的整层大气可降水量与地面水汽压的经验关系式<sup>[8]</sup>:

$$W_{2-2} = 1.74e \quad (5)$$

式中  $W_{2-2}$  为整层水汽含量,单位为 cm,  $e$  为地面水汽压。

#### 1.2.3 GPS 法

由于地基 GPS 天顶湿延迟近似正比于大气水汽含量<sup>[9]</sup>,因此可利用地基 GPS 资料来反演整层大气可降水量。利用 GAMIT 软件可解算出 GPS 对流层天顶总延迟  $\Delta L$ ,而对流层天顶静力延迟可利用 GPS 接收机所在点的气压( $p$ , hPa)、海拔高度( $H$ , km)和纬度( $\lambda$ )采用如下公式<sup>[10]</sup>算出:

$$\Delta L_d = 2.2779 \frac{p}{f(\lambda, H)} \quad (6)$$

$$f(\lambda, H) = (1 - 0.0026 \cos 2\lambda - 0.00028H)$$

于是可得到湿延迟:

$$\Delta L_w = \Delta L - \Delta L_d \quad (7)$$

最后大气可降水量可由下式求得:

$$W_3 = \Pi Z_{WD} \quad (8)$$

$W_3$  为大气气柱的总水汽含量转换成等效液态水柱的高度,即整层可降水量; $\Pi$ 为转换系数,是无量纲数,其值与加权平均温度  $T_m$  的大小有关<sup>[14]</sup>,一般常取转换系数  $\Pi = 0.15$ 。计算分析发现取  $\Pi = 0.15$  时计算的整层大气可降水量与探空计算偏差较大,故采用徐桂荣等<sup>[15]</sup>建立的  $T_m$  本地化模型来计算  $\Pi$ 。

### 1.2.4 几个定义

(1) 地面法相对误差 = (地面法推算值 - 探空法计算值) / 探空法计算值  $\times 100\%$

(2) GPS 法相对误差 = (GPS 法反演值 - 探空法计算值) / 探空法计算值  $\times 100\%$

(3) 地面法平均绝对偏差 = (地面法推算值 - 探空法计算值) / 天数

(4) GPS 法平均绝对偏差 = (GPS 法反

演值 - 探空法计算值) / 天数

(5) 有效空中水汽资源:一定时期内所有降水日的整层大气可降水量之和。

## 2 结果分析

### 2.1 地面法与探空法结果的比较

#### 2.1.1 年总量结果比较

表 1 为应用 3 年探空资料和同期地面水汽压资料(地面法一)推算的恩施、宜昌、武汉 3 站年整层大气可降水量及相对误差。可以看出,地面资料计算反演的整层大气可降水量均低于探空资料计算的整层大气可降水量,相差  $-2.3\% \sim -7.0\%$ ,其中宜昌平均相对误差最小,武汉平均相对误差最大。3 年中 3 站平均以 2005 年平均相差最小,平均绝对偏差为 1.5mm、0.9mm、1.8mm。

表 1 探空法、地面法一推算的 3 站年大气可降水量(cm)及其相对误差(%)

站名	2004 年			2005 年			2007 年			年平均		
	$W_1$	$W_{2-1}$	相对误差	$W_1$	$W_{2-1}$	相对误差	$W_1$	$W_{2-1}$	相对误差	$W_1$	$W_{2-1}$	相对误差
恩施	1181	1108	-6.2	1224	1178	-3.8	1097	1051	-4.2	1167	1112	-4.7
宜昌	1201	1175	-2.3	1248	1212	-2.9	1110	1071	-3.5	1186	1152	-2.9
武汉	1254	1184	-5.6	1238	1193	-3.6	1099	1022	-7.0	1197	1133	-5.4

#### 2.1.2 月总量结果比较

如图 1 所示,两种方法计算的月水汽含量年内变化趋势基本一致,均为 1、2 月最小,然后逐渐增多,7、8 月达到最大,然后逐渐减小。两种方法相对误差绝对值最大值出现在 7、8 月,最小值出现在 4、5 月,其中 5—9 月地面法一推算的月水汽含量大于探空法计算的月水汽含量,10—3 月则相反,4 月则时大时小。其中以 12、1、2、3、7 月差值较大,4、5 月差值较小。3 个站中,各月以恩施站两种方法计算的差值绝对值(除 4 月外)最小,可能跟恩施的海拔高度最高,纬度最小有关。

### 2.2 GPS 法与探空法结果的比较

2007 年宜昌有有效 GPS 测量值 309 天,所计算的水汽总量为 10241mm,而相同日数探空法计算的水汽总量为 9695mm,相差 546mm,总的相对误差为 5.6%(表 2)。平均绝对偏差为 1.77mm。

### 2.3 两种地面方法与 GPS 法结果的比较

如表 2 所示,地面法一比地面法二的推算结果大。除咸宁站外,其他 4 站地面法一推算的整层大气可降水量比 GPS 法结果大,

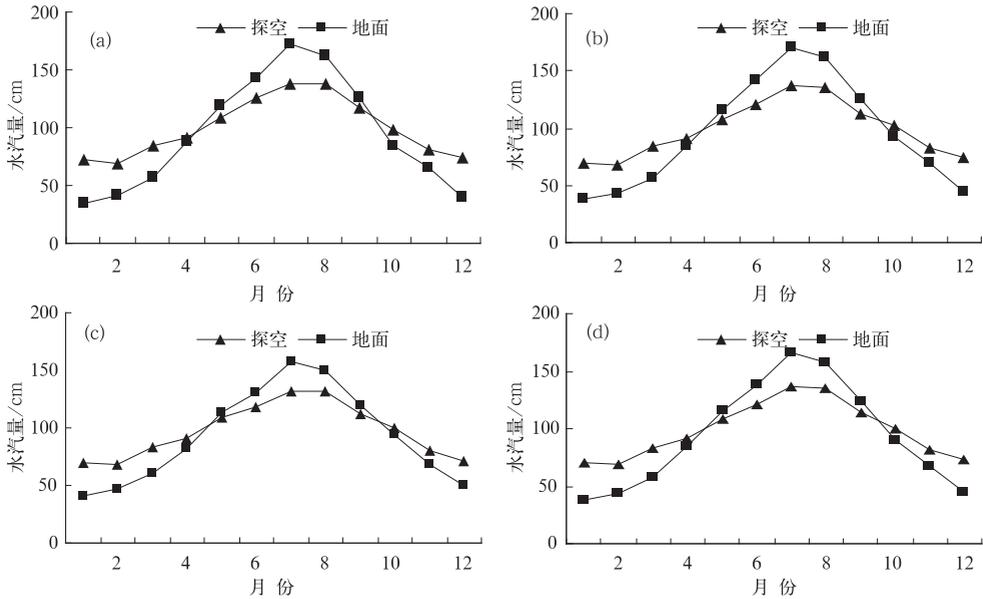


图 1 地面法一与探空法所得月水汽资源变化图

(a)武汉, (b)宜昌, (c)恩施, (d)三站平均

表 2 两种地面方法、GPS 法、探空法结果比较

站名	天数/d	计算的水汽含量/mm				相对误差/%	
		地面法一 $W_{2-1}$	地面法二 $W_{2-2}$	GPS 法 $W_3$	探空法 $W_1$	地面法一与 GPS 法	地面法二与 GPS 法
潜江	242	8095	7159	7960	/	1.7	-10.1
咸宁	285	9727	8539	9906	/	-1.8	-13.8
宜昌	309	10271	9104	10241	9695	0.3	-11.1
钟祥	223	7586	6804	7364	/	3.0	-7.6
黄石	249	9647	8535	9240	/	4.4	-7.6

相对误差在 0.3%~4.4%之间,说明两种方法推算结果非常接近。而地面法二推算结果与 GPS 法相对误差较大,在 -7.6%~-13.8%之间。

#### 2.4 有降水日三类方法结果的比较

应用 2007 年宜昌站有效 GPS 测量值的 309 天中有降水日的资料进行统计,其中 75 天有降水,地面法一、GPS 法、探空法(推)计算的有效空中水汽资源分别为 2745、3017、2783mm, GPS 推算结果偏大,地面法一和 GPS 法与探空法所得有效水汽资源相对误差分别为 -1.4%、8.4%,平均绝对偏差

为 0.51mm 和 3.12mm。

#### 2.5 地面法修订结果分析

两种地面法计算模型均是在全国范围内的资料基础上建立的可供全国采用的通用公式,体现的是所有地区的平均状况,各地根据本地资料对经验系数进行修订,理论上效果应该会更好。因此,针对地面法二进行了试验计算,应用 2007 年宜昌站逐日的探空法计算的大气可降水量和逐日的地面水汽压,基于最小二乘法原理,建立了新的回归方程,即修订的地面法二计算公式:

$$\omega_{2-2r} = 14.232 + 0.999e \quad (9)$$

其中,  $e$  为地面水汽压。

用本地化修订的地面法二计算模型计算宜昌站 2004、2005 年的总可降水量(见表 3), 其与探空计算值的误差百分率为  $-6.9\%$  和  $-6.3\%$ , 而地面法二计算结果与探空计算

值的误差百分率为  $-13.4\%$  和  $-11.4\%$ , 修订后的地面法二与探空计算值的误差百分率减小了  $6.5\%$  和  $5.1\%$ , 说明本地化订正提高了精度。

表 3 宜昌站 2004 年、2005 年地面法二与修订法结果

	地面法二 $W_{2-2}$	修订法 $W_{2-2r}$	探空法 $W_1$	地面法二误差(%)	修订法误差(%)	修订法误差百分率减小量(%)
2004	10403	11182	12010	-13.4	-6.9	6.5
2005	10739	11361	12120	-11.4	-6.3	5.1

### 3 小结与讨论

(1) 研究表明, 用地面资料推算整层大气水汽含量是可行的。地面法一推算的水汽含量与探空法计算结果的 3 年平均相对误差小于  $5.4\%$ , 二者计算值的月变化趋势基本一致, 虽然月水汽含量有一定偏差, 但是通过比较分析其差值变化规律, 发现这种偏差是有规律的, 属于系统性偏差, 可以进行比值或差值订正。地面法二虽然简单, 但精度上要逊于地面法一。GPS 作为一种新型高科技技术, 具有高时空分辨率监测的特点, 文中所述的 GPS 反演水汽含量方法与探空推算的年总量相对误差为  $5.6\%$ , 在数值上略大于地面法一与探空法的相对误差。

(2) 对于能产生降水的有效空中水汽资源, 地面法一和 GPS 法与探空法所得相对误差分别为  $-1.4\%$  和  $8.4\%$ , 平均绝对偏差分别为  $0.51\text{mm}$  和  $3.12\text{mm}$ 。地面法推算的有效空中水汽资源的相对误差比总的空中水汽资源相对误差要小, 说明降水天气条件下, 地面测得的湿度参量能更好地反映空中水汽状况, 所以推算反演的结果更接近探空法所得结果, 而 GPS 法推算的有效空中水汽资源的相对误差比总的空中水汽资源相对误差要大, 跟国内已有的研究<sup>[16]</sup>在 5—6 月份可降

水量较大(可降水量可达  $65\text{mm}$  以上)时, GPS 法与探空法的平均偏差为  $6.5\text{mm}$ , 而在 2—3 月可降水量较小<sup>[17]</sup>( $PW \leq 35\text{mm}$ )时, GPS 法与探空法的平均偏差为  $0.1\text{mm}$  的结论比较吻合, 湖北夏季降水日多且可降水量大, 故降水日的有效空中水汽资源相对误差要大。

(3) 地面法和 GPS 法应用本地资料进行本地化订正后, 精度均明显提高, 且两种方法各有优点, 应进一步对两类空中水汽资源计算方法进行订正和优化, 尤其是应用本地资料建立本地化模型, 甚至分季节建立模型, 从而使之可以在时间、空间上互为补充, 以便更加全面、合理地分析、评价空中水汽资源。

### 参考文献

- [1] 邵洋, 郑国光. 河南省春季层状云系降水的空中水汽资源特征分析[J]. 气象, 2007, 33(7): 22-32.
- [2] 周德平, 宫福久, 张淑杰, 等. 辽宁云水资源分布特征及开发潜力分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 644-649.
- [3] 唐林, 王治平, 丁岳强, 等. 湖南省柘溪水库流域空中水汽资源特征及人工增雨潜力[J]. 气象, 2006, 32(5): 30-34.
- [4] 杨红梅, 葛润生, 徐宝祥. 用单站探空资料分析对流层水汽柱水汽总量[J]. 气象, 1998, 24(9): 8-11.
- [5] 李武阶, 李俊, 公颖, 等. 2004 年梅雨期武汉上空水汽的演变及其与暴雨的关系[J]. 气象, 2007, 33(2): 3-9.

- [6] 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.
- [7] 杨景梅,邱金恒. 我国可降水量同地面水汽压的经验表达式[J]. 大气科学,1996,20(5):620-626.
- [8] 张学文. 可降水量与地面水汽压力的关系[J]. 气象,2004,30(2):9-11.
- [9] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003.
- [10] Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. Bull Geod, 1973, 107: 13-34.
- [11] Bevis M, Businger S, Herring T, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. J Geophys Res, 1992, 97: 15787-15801.
- [12] 杨红梅,何平,徐宝祥,等. 用 GPS 资料分析华南暴雨的水汽特征[J]. 气象,2002,28(5):17-21.
- [13] 郭洁,李国平. 地基 GPS 探测水汽的发展与气象业务应用[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(专刊):35-42.
- [14] 王勇,柳林涛,郝晓光,等. 区域 GPS 网检测水汽量的应用研究[J]. 煤炭学报,2006,31(6):781-784.
- [15] 徐桂荣,陈波,万蓉,等. 地基 GPS 不同水汽反演方法的误差分析. 暴雨灾害,2008,27(4):346-350.
- [16] 何平,徐宝祥,周秀骥,等. 地基 GPS 反演大气水汽总量的初步试验[J]. 应用气象学报,2002,13(2):179-183.
- [17] 刘焱雄,陈永奇. 地基 GPS 技术遥感香港地区大气水汽含量[J]. 武汉测绘科技大学学报,1999,24(3):245-248.