

中国地区地基 GPS 加权平均温度 T_m 统计分析

王晓英^{1,2} 戴仔强³ 曹云昌² 宋连春²

(1 南京信息工程大学遥感学院,南京市宁六路 219 号,210044)

(2 中国气象局气象探测中心,北京市海淀区中关村南大街 46 号,100081)

(3 中国电子科技集团第 28 研究所 2 部,南京市白下区苜蓿园东街 1 号,210007)

摘要:利用香港 Kings Park 探空站(站号 45004)2003~2009 年探空资料回归出了大气加权平均温度 T_m 与地面温度 T_s 、气压 e_s 和水汽压 P_s 的线性公式。通过比较分析发现, T_m-T_s 单因素回归结果和 T_m-T_s, e_s, P_s 多因素回归结果并没有显著差异,但基于本地化探空数据回归公式精度比 Bevis 公式高;通过逐年增加样本数回归分析并不能显著提高公式精度,采用最近一年探空数据回归公式即可很好地由 T_s 预测下年 T_m , 预测均方根误差为 1.913 K;对样本数据按季节分类, T_m-T_s 模型系数 a, b 值春秋季节变化不大,而冬夏季节变化剧烈,但利用无季节区分数据回归公式去拟合分季节数据,精度相当,分季节回归 T_m-T_s 经验公式没有必要。分气候区回归分析发现, T_m-T_s 模型 a, b 系数与气候相关关系明显,同一气候区内探空站数据拟合出的 a, b 系数具有集群性。

关键词: 大气加权平均温度; 地面温度; 地基 GPS 气象学; 湿延迟

中图法分类号: P228.42

水汽的相位变化与降水直接相关,在大气能量传输、天气系统演变、地气系统的辐射收支及全球气候变化中也都有者重要的作用^[1-5]。但常规大气探测手段的时空分辨率限制了对水汽的时变特性和空间分布的认识,使得对全球水汽场和水汽能量循环缺乏详尽的了解,水汽三维分布信息的欠缺影响了数值天气预报模式初始湿度场的精度和数值天气预报的准确度^[6-9]。

当 GPS 卫星信号穿越中性大气时,由于大气成分的折射而产生信号时延。这在测绘学科被视为误差源而设法消除的量,在气象学科中却被作为有用信号而获得了新的广泛应用。地基 GPS 技术为探测大气水汽提供了一种新的手段,它具有实时连续性、不受天气状况影响、精度高等特点,是传统大气观测手段的有力补充^[9-13]。在地基 GPS 气象学中, GPS 定位时可同时解算获得精确对流层天顶总延迟(zenith total delay, ZTD),利用一定的模型根据地面气象参数计算得出对流层天顶干延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD),天顶总延迟减去天顶干延迟可得天顶湿

延迟(zenith wet delay, ZWD)。在由 ZWD 求得对流层中综合水汽含量(precipitable water vapor, PWV)时,转换系数 Π 的精度至关重要:

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (1)$$

式中, $\Pi = \frac{10^6}{\rho_v R_w (k'_2 + k'_3/T_m)}$, 其中 ρ_v 为液态水的密度,其值为 1 g/cm³, $k'_2 = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_w} = 16.581$, k_1, k_2, k_3 为大气折射率试验常数,分别取值为 7.604 K/hPa、64.790 K/hPa 和 $3.776 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$, R_d, R_w 分别为干空气和水汽的气体常数,其值分别为 $0.287 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{K}^{-1}$, $0.462 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{K}^{-1}$, T_m 为大气加权平均温度:

$$T_m = \frac{\int (e/T) dz}{\int (e/T^2) dz} \quad (2)$$

以往的研究证明,大气加权平均温度 T_m 值的相对误差和转换因子 Π 的相对误差是基本相同的。利用 GPS 湿延迟推算大气水汽含量时 T_m 起了重要作用,在由 ZHD 到 PWV 转换过程中,

最大的可能误差是 T_m 的估计上,而只有准确确定 T_m 值,才能确保转换因子 Π 的精度^[10]。

在确定 T_m 方法中,由于气象探空站点分布稀疏,数值预报产品的应用也受到一定的限制,目前一般采用经验方法。Bevis 等^[1]根据美国北纬 $27^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 范围内的 8 718 次探空记录,回归出 $T_m = 70.2 + 0.72T_s$,均方差为 4.74 K。这种方法的最大优点是估算 T_m 简便,只有一个参量 T_s ,且由 T_s 的地理和季节变化反映出了 T_m 的地理和季节变化。我国也陆续开展了对 T_m 与 T_s 及各种气象要素关系的研究^[11-15],李建国等^[11]回归分析出了适合我国东部地区(北纬约 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、东经约 $100^{\circ} \sim 130^{\circ}$)逐月 T_m-T_s 关系式。于胜杰等^[12]发现利用 Bevis 回归公式得到的水汽加权平均温度 T_m 的精度与测站的海拔高度间存在着很强的线性关系。根据这种相关性,对其进行与高度相关的改进,改进后的回归公式可以应用于中国任何地区的水汽加权平均温度的计算。王勇等^[13]建立了适合武汉地区的 T_m-T_s 关系式,李国翠等^[14]建立了华北地区基于地面气象要素的单因子和多因子回归方程;吕弋培等^[15]建立了成都地区的大气加权平均温度模型。

1 香港探空站数据(2003-2009)统计结果分析

1.1 香港加权平均温度回归模型

香港探空数据(站号 45004)层数较多,数据获取充分,一般为 80 层左右,高达 20 km。笔者利用 LINUX 系统 Curl 命令批量下载了该站 2003~2009 年总体探空数据,通过 Matlab 统计分析出了香港本地加权平均温度计算模型,具体

结果见表 1 和表 2。

表 1 香港 2003~2009 探空站数据统计分析结果

Tab. 1 Statistical Analysis Results of Sounding Data from 2003 to 2009 in Hong Kong

项目	回归函数		
	单因素	多因素	Bevis 公式
公式	$T_m = 115.13 + 0.58T_s$	$T_m = 88.85 + 0.49 + 0.10e_s - 0.05P_s$	$T_m = 70.2 + 0.72T_s$
剩余均方差/K	1.914	1.892	3.802
样本数/个	5 055	5 055	5 055

注: T_m 为大气加权平均温度; T_s 为地面大气温度; e_s 为地面水汽压; P_s 为地面气压。

表 2 T_m 与地面温湿压 T_s 、 e_s 和 P_s 相关系数

Tab. 2 Correlation Coefficients Between T_m and Surface Atmospheric Temperature T_s , Vapor Pressure e_s and Pressure P_s

因素	T_m-T_s	T_m-e_s	T_m-P_s
相关系数	0.848	0.809	-0.700

注: p 值均为 0,样本数均为 5 055。

从表 1、表 2 可以看出,适合香港地区的本地化加权平均温度单因素和多因素计算模型回归剩余均方差差值为 0.022 K,不会对由地基 GPS 天顶湿延迟转化为 PW 造成显著差异; T_m 与地面温湿压 T_s 、 e_s 和 P_s 参数相关性均通过显著性检验。基于本地化探空数据求取的经验公式精度比 Bevis 公式高。

1.2 预报结果分析

为了验证加权平均温度本地化计算模型的预报精度,同时讨论在求取本地化 T_m 计算模型时应该选取几年数据最好,笔者分别以逐年增加样本数据方式拟合了香港地区的加权平均温度计算模型,并应用这些模型预测了 2009 年的 T_m ,统计结果见表 3。

表 3 T_m 预报统计结果

Tab. 3 Statistical Results of T_m Prediction

回归使用 年份	样本数 /个	回归函数		预测均方根误差/K		
		单因素	多因素	单因素	多因素	Bevis 公式
2008	727	$T_m = 115.99 + 0.575T_s$	$T_m = 28.65 + 0.54T_s + 0.09e_s + 0.09P_s$	1.913	1.901	3.752
2007~2008	1 446	$T_m = 118.61 + 0.566T_s$	$T_m = 66.08 + 0.50T_s + 0.10e_s + 0.07P_s$	1.915	1.888	
2006~2008	2 160	$T_m = 121.86 + 0.556T_s$	$T_m = 63.88 + 0.50T_s + 0.09e_s + 0.07P_s$	1.919	1.900	
2005~2008	2 865	$T_m = 115.96 + 0.576T_s$	$T_m = 91.32 + 0.46T_s + 0.13e_s + 0.06P_s$	1.913	1.874	
2004~2008	3 595	$T_m = 116.09 + 0.575T_s$	$T_m = 89.81 + 0.47T_s + 0.11e_s + 0.05P_s$	1.913	1.876	
2003~2008	4 325	$T_m = 115.56 + 0.577T_s$	$T_m = 81.14 + 0.50T_s + 0.10e_s + 0.06P_s$	1.913	1.880	

从表 3 可看出,采用一年和多年数据回归加权平均温度计算模型去预测下年 T_m ,预测均方差差异为小于 0.01 K,单因素和多因素拟合经验公式预测均方差差异小于 0.1 K。

1.3 T_m 回归模型分季节统计分析

为了揭示 T_m 回归模型季节变化规律,将香港探空站 2003~2009 年数据按春夏秋冬进行季节分类,分季节回归了春夏秋冬 T_m 计算模型,结果见表 4。

表4 分季节回归经验公式统计结果

Tab. 4 Statistical results of Regression Empirical Formulas by Season

季 节	样本数	回归函数	剩余均	拟合均	拟合均
			方根误差(分季节)	方根误差(全年)	方根误差(Bevis)
春	1 275	$T_m = 118.92 + 0.566T_s$	2.005	2.006	3.808
夏	1 255	$T_m = -10.21 + 0.995T_s$	1.632	1.746	2.792
秋	1 271	$T_m = 126.10 + 0.542T_s$	1.813	1.818	3.562
冬	1 254	$T_m = 45.37 + 0.821T_s$	1.876	2.032	4.781

表5 按年份、季节统计 T_m-T_s 经验公式系数 a, b Tab. 5 Coefficients a, b for T_m from T_s Computed by Year and by Season

时间	全年		春		夏		秋		冬	
	年	季	年	季	年	季	年	季	年	季
2003	113.29	0.586	120.17	0.564	-57.54	1.153	126.86	0.541	50.68	0.803
2004	116.73	0.573	138.96	0.497	0.89	0.957	122.21	0.555	46.68	0.816
2005	100.82	0.627	86.87	0.674	62.50	0.754	111.47	0.592	29.48	0.876
2006	129.17	0.532	137.38	0.503	-20.27	1.028	165.12	0.411	31.57	0.870
2007	122.42	0.554	106.09	0.610	-31.41	1.065	136.31	0.505	44.48	0.823
2008	115.99	0.575	127.22	0.536	-26.42	1.049	112.55	0.588	91.27	0.662
2009	112.62	0.587	145.52	0.474	-39.89	1.093	131.71	0.524	11.91	0.936

注:全年列每年统计样本数为720个左右,春夏秋冬各列每年统计样本数为180个左右。

如图1所示。

2 分气候区 T_m-T_s 模型系数分析

将全国分成5个气候区,分别为亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性气候、青藏高原高寒气候和热带季风气候。气候分区基本示意图

按气候类型分区统计的 a, b 统计特征见表6。从表6可看出 a, b 值具有较好的集群性,即同一气候区内的探空站数据回归出的 a, b 值较为一致。根据83个探空站离散(a, b, B, L, H)数据对生成中国大陆 a, b 等值线图,如图2所示。



图1 中国气候分区示意图

Fig. 1 Sketch map of Chinese Climatic Classification

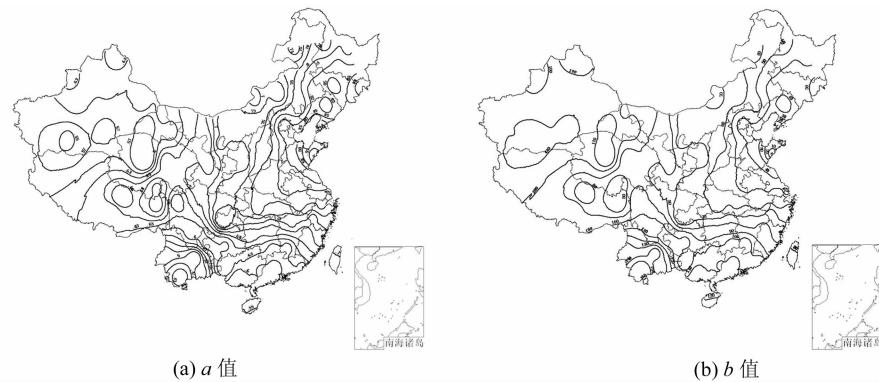
表6 各气候区 a, b 统计特征Tab. 6 Statistical Attribute of a, b by Climatic Classification

气候类型	亚热带季风气候	温带季风气候	温带大陆性气候	青藏高原高寒气候	热带季风气候
探空站数	30	23	19	8	3
$E(a)$	87.50	48.33	94.97	87.48	160.51
$\sigma(a)$	27.76	20.86	17.74	20.36	30.70
$E(b)$	0.67	0.80	0.63	0.65	0.43
$\sigma(b)$	0.095	0.075	0.063	0.074	0.105

3 结语

通过对香港站2003~2009年和中国大陆83个国际交换站2009年探空数据的分析,得出以下基本结论。

1) 得出了香港地区单因素 T_m-T_s 经验公式 $T_m = 115.13 + 0.58T_s$, 均方差为1.914 K; 多因素

图 2 中国大陆地区 T_m-T_s 模型系数等值线图Fig. 2 Contour Map of T_m-T_s Model Coefficient in China

T_m-T_s, e_s, P_s 经验公式为 $T_m = 88.85 + 0.49T_s + 0.10e_s - 0.05P_s$, 均方差为 1.892 K, 精度均优于 Bevis 公式。

2) 香港地区 2003~2009 年单、多因素回归经验公式均方差差值为 0.022 K, 不会对由地基 GPS 天顶湿延迟转化为 PW 造成显著差异。基于简化实用需要, 采取多因素回归 T_m-T_s, e_s, P_s 经验公式没有必要, 可用单因素简化公式 $T_m = 115.13 + 0.58T_s$ 代替多因素公式使用。

3) 采用一年和多年数据回归加权平均温度计算模型去预测下年 T_m 预测均方差差异小于 0.01 K, 因此, 使用多年探空数据回归计算不能显著提高模型精度, 使用最近一年探空数据回归分析本地 T_m-T_s 经验公式即可。

4) T_m-T_s 经验公式中的系数 a, b 春秋与全年差异较小, 而冬夏与全年差异较大, 但用全年数据回归 T_m-T_s 经验公式代替每个季节使用, 模型差异小于 0.01 K, 因此分季节回归 T_m-T_s 经验公式没有必要。

5) T_m-T_s 经验公式中 a, b 值具有较好的气候集群性, 同一气候区内的探空站数据回归出的 a, b 值较为一致。

参 考 文 献

- [1] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(D14): 15 787-15 801
- [2] 毕研盟, 毛节泰, 刘晓阳, 等. 应用地基 GPS 遥感倾斜路径方向大气水汽总量[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 335-342
- [3] 谷晓平, 王长耀, 蒋国华. 地基 GPS 遥感大气水汽含量及在气象上的应用[J]. 气象科学, 2005, 25(5): 543-550
- [4] 梁丰, 李成才, 王迎春, 等. 应用区域地基全球定位系统观测分析北京地区大气总水汽量[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 236-244
- [5] Rocken C, Van H T, Johnson J, et al. GPS/STORM - GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor for Meteorology[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 12: 468-478
- [6] 曹云昌, 陈永奇, 李炳华, 等. 利用地基 GPS 测量大气水汽廓线的方法[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 241-245
- [7] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(1): 54-59
- [8] 曹云昌, 方宗义, 李成才, 等. 利用 GPS 和云图资料监测北京地区中小尺度降水的研究[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 91-96
- [9] 宋淑丽. 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海天文台), 2004
- [10] 刘旭春, 王艳秋, 张正禄, 等. 地基 GPS 遥感大气水汽含量中加权平均温度获取方法的比较分析[J]. 北京建筑工程学院学报, 2006, 22(2): 38-40
- [11] 李建国, 毛节泰, 李成才. 使用全球定位系统遥感水汽分布原理和中国东部地区加权“平均温度”的回归分析[J]. 气象学报, 1999, 57(3): 283-292
- [12] 于胜杰, 柳林涛. 水汽加权平均温度回归公式的验证与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(6): 741-744
- [13] 王勇, 柳林涛, 郝晓光, 等. 武汉地区 GPS 气象网应用研究[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 141-145
- [14] 李国翠, 李国平, 杜成华, 等. 华北地区地基 GPS 水汽反演中加权平均温度模型研究[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(1): 81-86
- [15] 吕弋培, 殷海涛, 黄丁发, 等. 成都地区大气平均温度建模及其在 GPS/PWV 计算中的应用研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(4): 103-105
- [16] 岳迎春, 陈春明, 俞艳. GPS 技术遥感南极大气水含量的研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(5): 81-84
- [17] Cao Yunchang, Chen Yongqi, Li Pinghua. Wet Re-

fractivity Tomography with an Improved Kalman-Filter Method[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(5): 694-699

14-16

[18] 周国君,潘雄. GPS 水汽遥感中加权平均温度获取方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(4):

第一作者简介:王晓英,博士生,讲师,主要从事 GPS 气象学、计算机地图制图等研究。
E-mail:wyzhwxl@163.com

Weighted Mean Temperature T_m Statistical Analysis in Ground-based GPS in China

WANG Xiaoying^{1,2} DAI Ziqiang³ CAO Yunchang² SONG Lianchun²

(1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology,
219 Ningliu Road, Nanjing 210044, China)

(2 Meteorological Observation Centre of CMA, 46 Nandajie, Zhongguancun, Beijing 100081, China)

(3 The 2th Department of 28th Research Institute, China Electronics Technology Group
Corporation, 1 Muxuyuan Dongjie, Nanjing 210007, China)

Abstract: We made linear regression to get the empirical formula of $T_m - T_s$ and $T_m - T_s, e_s, P_s$ using Hong Kong Kings Park sounding station (number 45004) data from 2003 to 2009, in which T_m means atmospheric weighting mean temperature, T_s means surface temperature, e_s means surface water vapour pressure and P_s means surface atmospheric pressure. It concludes that there is no significant difference between one-factor and multi-factor results, but the precision of regression formula based on local sounding data is higher than Bevis formula; The precision of regression formula can't be significantly increased by annually adding sample number, so it is sufficient to forecast T_m by T_s using sounding data of last year and the root mean square of estimation is 4.913 K; By classifying sounding sample data according seasons, $T_m - T_s$ model coefficients a and b value vary little in spring and autumn, whereas they vary obviously in summer and winter; Comparing the accuracy of regression formula using data by season and no season classification, it is almost quite the same, so there is no need to regress the $T_m - T_s$ model using different season data. It can be found that a and b value relatively uniform in one same climatic region and are correlative with climatic type

Key words: atmospheric weighting mean temperature; surface temperature; ground-based GPS meteorology; wet delay

About the first author: WANG Xiaoying, Ph.D candidate, lecturer, majors in GPS meteorology, etc.

E-mail: wyzhwxl@163.com

下期主要内容预告

- | | |
|----------------------------------|-------|
| ▶ 城市规划三维决策支持系统设计与实现 | 李德仁,等 |
| ▶ 基于 MDA 的空间信息服务组合建模方法研究 | 王艳东,等 |
| ▶ 一种面向大区域不规则河道的水流仿真方法 | 王伟,等 |
| ▶ 关于遥感影像处理智能系统的若干问题 | 舒宁 |
| ▶ 多尺度分割优化的 SAR 变化检测 | 尤红建 |
| ▶ 结构保持的图像序列自适应超分辨率重建 | 郭琳,等 |
| ▶ 基于交叉点不符值的 GOCE 卫星重力梯度数据的精度评定方法 | 徐天河,等 |
| ▶ 应用 GPS 水准与重力数据联合解算大地水准面 | 郭东美,等 |