

整层大气水汽含量与地面水汽压相关性的统计研究

李超^{1,2} 魏合理¹ 刘厚通^{1,2} 周军¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥市蜀山路 350 号, 230031)

(2 中国科学院研究生院, 北京市玉泉路甲 19 号, 100039)

摘要: 根据合肥站 4 a 的观测资料, 对比分析了整层大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 与地面水汽压 (surface vapor pressure, SVP) 之间的几种经验关系。统计结果表明, PWV 与 SVP 的对数关系、线性关系和二次曲线关系回归方程的年度决定系数普遍大于 0.820; 二次曲线关系的经验系数随年度变化较明显; 线性关系的经验系数则相对具有年度稳定性; 二次曲线关系更符合合肥地区的实际情况。

关键词: 可降水量; 地面水汽压; 经验关系; 经验系数

中图分类号: P237.9

在大气辐射研究、水文循环和遥感探测中, 水汽含量是一个重要参量。整层垂直大气柱中的水汽含量, 通常用可降水量表示, 定义为, 假定大气柱中的水汽全部凝结并沉积在底面上时的液态水深度。利用地面气象参数估算 PWV 的方法, 不仅对天文观测、大气辐射及电磁波传输的研究, 而且对气象学的多个领域都具有重要意义^[1,2]。利用 SVP 估算 PWV 的研究, 可以追溯到 100 a 前。国内外研究者研究发现, PWV 与 SVP 之间存在简单的倍数关系^[3]、对数关系^[2,4,5]、线性关系和二次曲线关系^[6,7]。

合肥地处中国东部的江淮流域, 属于暖温带向亚热带的过渡地带, 为亚热带湿润季风气候。本文目的是, 研究合肥地区 PWV 与 SVP 之间的关系, 建立适合该地区的经验计算模式。

1 观测仪器及资料选取

作为国际大气辐射观测项目的超级观测站^[8], 合肥站 (31.90°N, 117.17°E, 36 m ASL) 部署的地基双频微波辐射计 (WVR-1100) 可以在几乎各种天气条件下 (降雨时段除外) 有效观测, 其主要技术参数如表 1 所示。其中, 23.8 GHz 通道用于整层大气水汽含量的观测, 31.4 GHz 通道用于

云液态水的观测^[9]。利用地面温、湿度传感器 (Vaisala HMP45A) 测得近地面大气的温度 t 和相对湿度 R , 根据 Magnus 经验公式^[10] 得到地面饱和水汽压 e_s , 进而换算得到实际水汽压 SVP:

$$SVP = R \cdot e_s = R \cdot e_{s0} \cdot 10^{\frac{a}{bT}} \quad (1)$$

式中, $e_{s0} = 6.1078$ hPa, 为 0°C 时的饱和水汽压值; a 、 b 为经验系数, 对水面 $a = 7.5$, $b = 237.3$ 。

本文取合肥站 2002 年 9 月 ~ 2006 年 8 月 4 a 期间共 981 d 地基微波辐射计在天顶方向的观测结果 (即 PWV 和地面 SVP 的观测资料), 采用各自的日平均值进行讨论。

表 1 WVR-1100 型微波辐射计的主要技术参数

| Tab. 1 WVR-1100 Specifications | | |
|--------------------------------|-------------------------|----------|
| 频率 | 23.8 GHz | 31.4 GHz |
| 波束宽度 | 5.8° | 4.5° |
| 增益 | 31 dB | 33 dB |
| 采样时间 | < 1 min | |
| 分辨率 | 0.25 K | |
| 精度 | 0.5 K | |
| 角度覆盖范围 | 整个天空 | |
| 扫描速率 | 3°/s, 方位角; > 90°/s, 高度角 | |

2 结果及分析

2.1 PWV 与 SVP 的年相关性

根据 2002 年 9 月 ~ 2006 年 8 月合肥地区

PWV 和 SVP 的观测数据, 得出了 $\ln PWV$ 与 $SVP^{1/2}$ 以及 PWV 与 SVP 之间的散点图和对应的回归曲线(见图 1), 图中每一个点代表 1 d 的情况。其中, $\ln PWV$ 与 $SVP^{1/2}$ 之间的线性拟合曲线(图 1(a)中的实线)以及 PWV 与 SVP 之间的线性拟合曲线(图 1(b)中的实线)和二次多项式拟合曲线(图 1(b)中的虚线)的经验系数如表 2 所示。表 2 同时给出了利用对数关系、线性关系和二次曲线关系(依次简称为对数模式、线性模式和曲线模式)计算 PWV 时, 所得结果的平均相对误差 E 、标准差 S_D 以及对应的决定系数(即线性相关系数的平方) R^2 ; 利用简单的倍数关系(简称倍数模式)计算 PWV 时, 得出的倍数 b 以及计算结果的平均相对误差和标准差也一并给出。

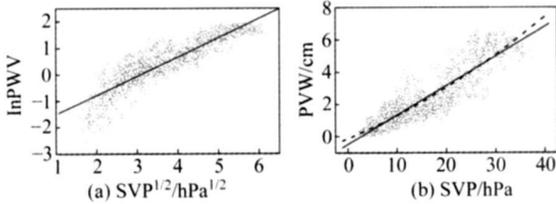


图 1 $\ln PWV$ 与 $SVP^{1/2}$ 之间以及 PWV 与 SVP 之间的关系

Fig. 1 Relationship Between $\ln PWV$ and $SVP^{1/2}$ PWV and SVP

表 2 各种模式的经验系数, 决定系数 R^2 、标准差 S_D 和平均相对误差 E

Tab. 2 Values of a , b , c , R^2 , S_D and E for Various Models

| 样本量 | 模式 | a | b | c | R^2 | S_D/cm | $E/\%$ |
|-----|----|--------|-------|---------|-------|----------|--------|
| 981 | 倍数 | — | 0.139 | — | — | 0.852 | 41.3 |
| | 对数 | -1.510 | 0.573 | — | 0.826 | 0.747 | 45.6 |
| | 线性 | -0.497 | 0.183 | — | 0.832 | 0.734 | 33.1 |
| | 曲线 | -0.143 | 0.129 | 0.001 5 | 0.835 | 0.727 | 33.8 |

结合图 1 和表 2, 可以得出:

1) 利用倍数模式估算 PWV 时, 计算结果的标准差 $S_D=0.852$ cm, 明显大于其他 3 种计算模式, 平均相对误差 $E=41.3\%$ 。利用该关系, 根据 PWV 和 SVP 的观测数据换算得出的经验系数 $b=0.139$ cm/hPa, 与文献[1]给出的值(0.174 cm/hPa)相差 0.035 cm/hPa。因此, 倍数模式并不符合合肥地区的实际情况。

2) $\ln PWV$ 与 $SVP^{1/2}$ 之间的线性拟合方程为:

$$\ln PWV = -1.510 + 0.573 \cdot SVP^{1/2} \quad (2)$$

两者的线性相关系数为 0.909, 回归方程的决定系数 $R^2=0.826$ 。利用该关系计算 PWV 时, 所得结果的平均相对误差 $E=45.6\%$, 在 4 种计算

模式中为最大; 标准差 $S_D=0.747$ cm, 仅小于用倍数模式计算的结果。这说明, 计算日平均 PWV 时, 对数模式并不是理想的计算模式。

3) PWV 与 SVP 之间的线性拟合方程为:

$$PWV = -0.497 + 0.183 \cdot SVP \quad (3)$$

方程的截距 $a=-0.497$ cm, 斜率 $b=0.183$ cm/hPa。两者的线性相关系数高达 0.912, 呈高度正相关; 决定系数 $R^2=0.832$, 即 PWV 83.2% 的变化可以用 SVP 的线性方程来解释; 标准差 $S_D=0.734$ cm。利用线性模式计算 PWV 时, 所得结果的平均相对误差 $E=33.1\%$, 在 4 种计算模式中最小。另外, 根据合肥地区的地理参数, 利用文献[6]关于经验系数的参数化方程, 得到的 $b=0.188$ cm/hPa, 比实际结果大 0.005 cm/hPa; $a=0.040$ cm, 与实际结果相差 0.537 cm, 反映出合肥地区气候条件的特殊性。若取 $a=0.040$ cm, $b=0.188$ cm/hPa, 计算合肥地区的可降水量, 平均相对误差高达 70.6%。可见, 文献[6]的计算模式不适用于合肥地区, 这可能与其在我国东南部地区选择的站点较少、代表性有限有关。

因此, 对任何地区, 为较好地利用 SVP 估算 PWV , 最好根据当地的实际气候状况, 建立起适合于本地区的经验关系式。但在没有直接途径测得可降水量的情况下, 文献[6]的计算模式仍具有重要的参考价值。

4) 利用曲线模式, 拟合得到的 PWV 与 SVP 之间的经验关系式为:

$$PWV = -0.143 + 0.129 \cdot SVP + 0.001 5 \cdot SVP^2 \quad (4)$$

拟合曲线的决定系数 $R^2=0.835$, 为 4 种模式中最大; 标准差为 0.727 cm, 为 4 种模式中最小, 而标准差是回归方程拟合计算结果可靠性的反映^[11]。利用该关系式计算可降水量时, 所得结果的平均相对误差为 33.8%, 仅略大于用线性模式计算的结果。因此, 综合以上 3 点可知, 曲线模式更符合合肥地区 SVP 与 PWV 的实际情况。式(4)中, 经验系数 $c=0.001 5$ cm/(hPa)², 与文献[6]“除华南部分地区以外, 我国大部分地区 $c \approx 0$, PWV 与 SVP 呈线性关系”的研究结果稍有差别。

表 3 给出了 2003~2005 年, PWV 与 SVP 的线性关系和二次曲线关系的经验系数。可以看出, 两种拟合曲线的决定系数均普遍大于 0.820; 后者的经验系数 a 介于 -0.111~ -0.358 cm 之间, b 介于 0.113~0.173 cm/hPa 之间, 随年度的变化较明显; 前者的经验系数 a, b 则具有相对稳

定性,尤其是方程的斜率,数值基本稳定在0.183左右,说明线性关系可以较好地描述整层大气可降水量与地面水汽压之间的关系。因此,为方便起见,以下仅讨论PWV与SVP之间的线性相关关系。

表3 不同年度线性及二次曲线关系的经验系数和决定系数

Tab. 3 Values of a , b , c and R^2 for Linear and Second-order Relationships in Different Years

| 年度 | 样本量 | 模式 | a | b | c | R^2 |
|------|-----|----|--------|-------|----------|-------|
| 2003 | 342 | 线性 | -0.414 | 0.182 | / | 0.821 |
| | | 曲线 | -0.358 | 0.173 | 0.000 22 | 0.820 |
| 2004 | 191 | 线性 | -0.552 | 0.183 | / | 0.852 |
| | | 曲线 | -0.111 | 0.113 | 0.002 1 | 0.859 |
| 2005 | 238 | 线性 | -0.554 | 0.183 | / | 0.865 |
| | | 曲线 | -0.143 | 0.129 | 0.001 5 | 0.871 |

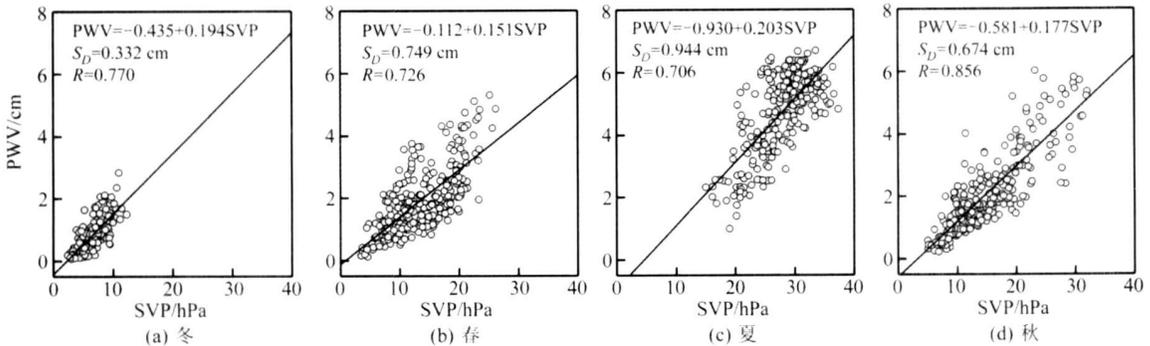


图2 各个季节PWV与SVP之间关系的散点图和对应的回归曲线

Fig. 2 Relationship Between PWV and SVP for Four Seasons

因^[2,11];夏季的弱相关性,可能与江淮地区特殊的夏季风气候有关。

3) 经验系数 a 、 b 的季节变化较之年度变化明显得多。春季,经验关系式的截距(-0.112 cm)最大、斜率(0.151 cm/hPa)最小;夏季,斜率(0.203 cm/hPa)最大、截距(-0.112 cm)最小,这是由不同季节的水汽垂直混合机制以及对应的气候特征和天气状况决定的。因此,在估算不同季节的可降水量时,最好选择与该季节对应的经验系数进行计算。

2.3 PWV与SVP的月相关性

图3给出了根据合肥地区2002年9月~2006年8月观测资料,得出的PWV与SVP的月线性相关系数以及对应的经验系数 a 、 b 的年变化曲线。可以看出:

1) PWV与SVP的月相关性普遍小于两者的年相关性和季节相关性,而且月相关系数的变化范围较大。相关性最好的月份(11月)相关系数为0.811,而相关性最差的月份(7月)相关系数只有0.077,相差10倍左右。

2.2 PWV与SVP的季节相关性

图2给出了合肥地区2002年9月~2006年8月PWV与SVP在春、夏、秋、冬4个季节的散点图和对应的线性回归曲线,各个季节的回归方程以及对应的回归标准差和线性相关系数也同时给出。可以看出:

1) PWV与SVP的季节相关性普遍小于年相关性。

2) 两者在秋季的相关性最好,相关系数高达0.856;冬季次之;夏季的相关系数最小,只有0.706,而且回归标准差最大。这是因为,秋、冬季节(尤其是秋季),合肥地区常以晴好天气为主,太阳辐射对地面的加热作用有利于水汽的垂直混合,而水汽的垂直均匀混合是高相关性的重要原

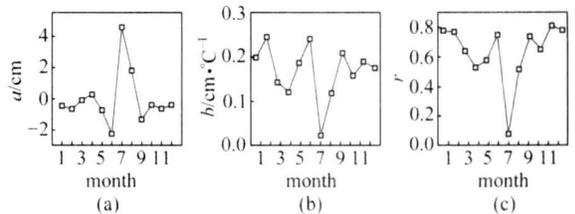


图3 月经验系数 a 、 b 以及相关系数 R 的年变化

Fig. 3 Annual Variations of Intercept a , Slope b , and Monthly Correlation Coefficient R

2) 总体来说,秋季和冬季各月,PWV与SVP的相关性较好,相关系数普遍大于0.65;晚春和夏季月份,PWV与SVP的相关性较差,全年仅有的相关系数小于0.6的4个月全部出现在晚春和夏季,尤其是7、8月份。这是因为,7、8月份合肥地区常以闷热、阴雨天气为主,缺乏水汽垂直混合的机制;有时天气变化比较剧烈,上层大气水平对流较旺盛,使低层水汽含量的日平均值对PWV日平均值的代表性有限。

3) 经验系数 a 的年变化范围为-2.24~4.59 cm。除4月份外,在春、秋、冬三季 a 均为负

值, 而且变化比较平缓, 但在夏季却出现剧烈变动, 6月份的 a 值为全年最小, 7月份为全年最大。

4) PWV与SVP相关性较好的月份, a 值较小; 相反, 相关性较差的月份, a 值较大。月相关系数的年变化与截距 a 近似呈反向、与斜率 b 近似呈同向变化。

参 考 文 献

- [1] Tomasi C. Determination of the Total Precipitable Water by Varying the Intercept in Reitan's Relationship[J]. J Appl Meteorol, 1981, 20: 1 058-1 069
- [2] Karalis J D. Precipitable Water and Its Relationship to Surface Dew Point and Vapor Pressure in Athens [J]. J Appl Meteorol, 1974, 13(1): 760-766
- [3] Reber E E, Swope J R. On the Correlation of the Total Precipitable Water in a Vertical Column and Absolute Humidity at the Surface [J]. J Appl Meteorol, 1972, 11(2): 1 322-1 325
- [4] Monteith J L. An Empirical Method for Estimating Longwave Radiation Exchanges in the British Isles [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1961, 87: 191-179
- [5] Idso S B. Atmospheric Attenuation of Solar Radiation [J]. J Atmos Sci, 1969, 26(12): 1 088-1 095
- [6] 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
- [7] 张学文. 可降水量与地面水汽压的关系 [J]. 气象, 2004, 30(2): 9-11
- [8] 李超, 刘东, 范爱媛, 等. 合肥地区无云晴天地表太阳短波辐射特征 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 44-49
- [9] Liljgren J C. Two-Channel Microwave Radiometer for Observations of Total Column Precipitable Water Vapor and Cloud Liquid Water Path [C]. The Fifth Symposium on Global Change Studies, 1994, Nashville, TN
- [10] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学 [J]. 北京: 北京大学出版社, 2003
- [11] Bolsenga S U. The Relationship Between Total Atmospheric Water Vapor and Surface Dew-point on a Mean Daily and Hourly Basis [J]. J Appl Meteorol, 1965, 4: 430-432

第一作者简介: 李超, 讲师, 博士生。主要从事大气辐射特性及云辐射传输的研究。

E-mail: chaoli@aiofm.ac.cn

Statistics of Correlation of Integrated Water Vapor and Surface Vapor Pressure

LI Chao^{1,2} WEI Heli¹ LIU Houtong^{1,2} ZHOU Jun¹

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 350 Shushanhu Road, Hefei 230031, China)

(2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 19A Yuquan Road, Beijing 100039, China)

Abstract: On the basis of 981 d observations at Hefei Site during 4 a period, various empirical expressions showing the relationship between precipitable water vapor (PWV) and surface vapor pressure (SVP) based on mean daily values are analyzed. The calculating results show that coefficients of determination for natural logarithm regression, linear regression and second-order polynomial regression are all larger than 0.820; and the yearly variations of the empirical coefficients for linear regression are rather smaller than for second-order polynomial regression. Second-order polynomial relation between PWV and SVP accords with the real condition better than other relations in Hefei region.

Key words: PWV; SVP; correlation coefficient; empirical coefficient

About the first author: LI Chao, lecturer, Ph. D candidate. His main research orientations are features of atmospheric radiation and cloud radiative transfer.

E-mail: chaoli@aiofm.ac.cn