

我国可降水量同地面水汽压 关系的经验表达式*

杨景梅 邱金桓

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 本文根据 1992~1993 年全国 20 个台站地面及高空气象要素资料, 拟合出各个站所在地区整层大气可降水量和有效水汽含量同地面水汽压之间的经验关系式。计算结果表明, 可降水量和相应的地面水汽压之间, 存在着良好的数值对应关系。仅利用地面水汽压计算出的整层大气可降水量和有效水汽含量, 同实际情况符合得很好, 平均相对误差普遍小于 15%。因此, 这些经验关系式具有良好的实际应用价值。

关键词 可降水量 有效水汽含量 地面水汽压

1 引言

大气柱水汽含量是研究大气辐射和吸收及全球热量输送的一个重要参量。水汽还是大气中重要的长波辐射和吸收物质。在空对地遥感中, 对遥感回波数据进行大气订正时, 必须考虑水汽对回波强度的影响。在从地面观测的直接太阳辐射信息确定大气柱气溶胶光学厚度时, 也必须考虑水汽对太阳辐射的吸收^[1]。大气中水汽含量和大气中各种加热过程, 如太阳辐射、感热输送和凝结加热有关, 它对天气系统的辐射收支及气候变化有很大作用。

由于计算整层大气可降水量比较麻烦, 并且需要有探空资料, 为了实际计算的方便, 我们试图建立起可降水量同地面常规气象要素的关系。在这方面国内外已有一些工作。周允华^[2]曾经根据青藏高原及其边缘地区的探空资料, 建立起一个反映该地区月平均水汽有效光学厚度同地面水汽压之间关系的经验方程。Muhammad Iqbal^[3]在他的书中也介绍了几个经验关系式。本文对全国 20 个台站地面及高空气象要素资料进行分析和计算, 统计出各个站所在地区整层大气可降水量及有效水汽含量同地面水汽压之间的经验关系式, 并且把计算结果同国外方法的计算结果进行了比较。结果表明, 我们的经验关系式更适合我国的实际情况。

2 资料和计算方法

我们是利用 1992~1993 年, 全国 20 个地区(见表 1), 定时(08 时), 地面及高空气

1995-07-31 收到, 1995-11-15 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目

象要素资料, 来进行分析和计算的。这些台站在地理位置, 海拔高度和气候干湿程度上, 都有一定的代表性。

整层大气可降水量为

$$W = \frac{1}{g} \int_0^P q dP', \quad (1)$$

其中 g 为重力加速度, q 为比湿, 它和水汽压 e 的关系为

$$q = \frac{\varepsilon e}{P - (1 - \varepsilon)e}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu_v}{\mu_d}.$$

μ_v 和 μ_d 分别为水汽和干空气的平均摩尔质量。

我们利用这 20 个台站的气象资料, 根据(1)、(2)式, 计算出各个站每一天整层大气可降水量 W , 然后用最小二乘法建立可降水量与对应的地面水汽压 e 之间的关系式。回归试验表明, 可降水量与对应的地面水汽压之间有良好的数值对应关系, 满足如下形式的经验关系式

$$W = a + be, \quad (3)$$

其中 a 和 b 为经验系数。

考虑到在一些实际应用中, 需要计算整层大气有效水汽含量。例如, 在由地面太阳辐射信息确定大气柱气溶胶光学厚度的计算中, 不仅需要考虑到水汽对太阳辐射的吸收, 还要考虑温度和压力对水汽吸收系数的影响, 而通常用有效水汽含量代替实际水汽含量来进行计算^[4]。整层大气有效水汽含量为

$$W' = \frac{1}{g} \int_0^P \frac{P'}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T'}} q dP'. \quad (4)$$

其中 P' 和 T' 分别为气压变量和温度变量, P_0 为海平面标准大气压, 取 1013 hPa, T_0 为标准温度, 取 273 K。

利用公式(4)和(2), 用同样的统计计算方法, 得到每一个站有效水汽含量 W' 与地面水汽压 e 之间的经验关系式

$$W' = a' + b'e, \quad (5)$$

其中 a' 和 b' 为经验系数。

3 结果和分析

图(1)~(4)分别是福州、北京、乌鲁木齐和拉萨四个站整层大气可降水量 W 与地面水汽压 e 的关系图。图中每一个点代表一天的情况, 直线是根据经验关系式(3)画出的, 反映了可降水量与地面水汽压之间的经验关系。从图中可以看出, W 和

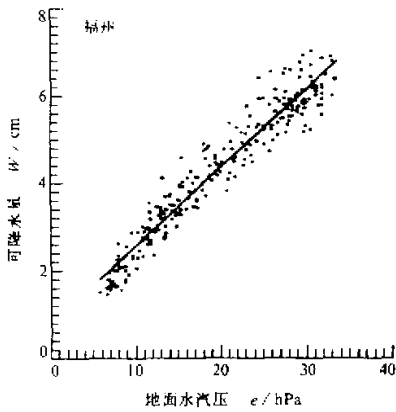


图1 福州整层大气可降水量
与地面水汽压的依赖关系

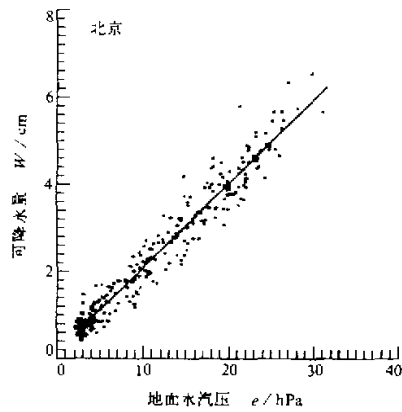


图2 北京整层大气可降水量
与地面水汽压的依赖关系

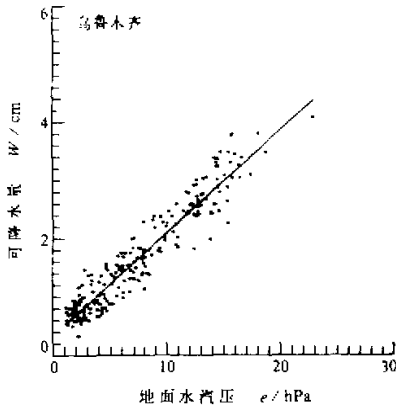


图3 乌鲁木齐整层大气可降水量
与地面水汽压的依赖关系

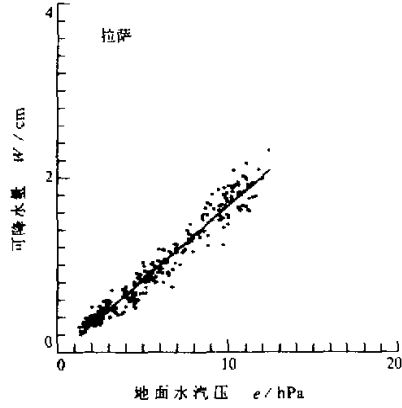


图4 拉萨整层大气可降水量
与地面水汽压的依赖关系

之间,有良好的线性关系,经验公式的计算结果与实际情况吻合得很好。四个站的相关系数分别为 0.965, 0.972, 0.950 和 0.976, 均方根误差分别为 0.388, 0.351, 0.269 和 0.117 cm。

表 1 给出了这 20 个台站 1992 年 $W-e$ 关系的统计计算结果。

从表 1 可以看出,除了西沙站经验关系式的相关系数较低外,其他各站的相关系数均大于 0.93, 平均相对误差普遍小于 15%。虽然西沙 $W-e$ 相关较差,但其均方根误差并不大,平均为 0.307 cm, 平均相对误差只有 4.4%。所以可以说经验关系式(3)可以应用于各个地方,只是由于水汽含量有很大的空间变化,经验系数在不同的地方要分别求得。

表1 我国20个台站1992年整层大气可降水量和地面水汽压关系式的经验系数, 误差情况和相关情况

站名	纬度/ °N	经度/ °E	海拔高度/ m	<i>a</i>	<i>b</i>	均方根 误差/cm	平均相对 误差/%	相关系数
沈阳	41.46	123.26	41.6	0.227	0.181	0.341	16.7	0.972
北京	39.48	116.28	54.7	0.156	0.193	0.351	15.0	0.972
大连	38.54	121.38	97.3	0.118	0.187	0.401	13.7	0.962
太原	37.47	112.33	779.4	0.291	0.183	0.276	12.6	0.971
郑州	34.43	113.39	111.4	0.422	0.195	0.448	13.3	0.963
西安	34.18	108.56	398.0	0.294	0.202	0.324	10.9	0.975
上海	31.07	121.23	8.2	0.283	0.189	0.378	10.2	0.973
宜昌	30.42	111.05	134.3	0.314	0.198	0.396	10.2	0.970
福州	26.05	119.17	85.4	0.763	0.181	0.388	8.1	0.965
桂林	25.20	110.18	165.9	1.052	0.172	0.399	8.4	0.956
西沙	16.50	112.20	5.4	0.995	0.151	0.307	4.4	0.916
额济纳旗	42.13	101.22	936.3	0.334	0.194	0.291	15.0	0.964
敦煌	40.09	94.41	1139.6	0.413	0.204	0.375	18.1	0.926
民勤	38.38	103.05	1368.5	0.289	0.185	0.222	17.0	0.972
乌鲁木齐	43.47	87.37	918.7	0.339	0.177	0.269	16.9	0.950
喀什	39.28	75.59	1290.7	0.336	0.185	0.353	16.6	0.933
格尔木	36.25	94.54	2809.2	0.097	0.182	0.147	12.2	0.964
那曲	31.29	92.03	4508.5	0.055	0.162	0.094	14.2	0.972
拉萨	29.40	91.08	3650.1	-0.024	0.170	0.117	10.8	0.976
腾冲	25.07	98.29	1648.7	0.143	0.190	0.203	6.8	0.978

水汽的分布有很大的空间变化, 它主要受地理纬度, 海拔高度和气候干湿程度的影响, 而气候的干湿程度与大气的环流特征和季风的进退密切相关。由于各地的气候条件不同, 所以各个站的经验系数存在着一定的差异(见表1)。我国平均水汽压的分布形势是东南大, 西北小, 从东南沿海向西北内陆递减。新疆是我国平原地区年平均水汽压最小的地方。青藏高原海拔高度大, 年平均水汽压更小。从图1到图4可以看出这个分布规律。

福州位于我国东南部闽江下游的河谷平原上, 东临东海, 海洋性气候较为明显, 雨量充沛。在气候划分上属于亚热带湿润地区。该地区1992年平均水汽压为19.1 hPa, 相应的平均可降水量为4.2 cm。

北京地处华北平原西北部, 北靠燕山山脉, 西部是太行山脉北段, 东南为平原, 具有较强的大陆性气候特征。在气候划分上属于暖温带半湿润地区。1992年平均水汽压和可降水量分别为11.8 hPa和2.4 cm, 均小于福州。

乌鲁木齐地处我国西北部新疆的准噶尔盆地, 该地区深居内陆, 且有高山环绕, 若有丰富水汽的东南和西南季风很难到达, 气候具有很强的大陆性特征。在气候划分上属于温带干旱地区。1992年平均水汽压和可降水量分别为6.9 hPa和1.5 cm, 远小于北京地区。

拉萨位于青藏高原雅鲁藏布江谷地, 属高原半干旱地区。1992年平均水汽压和可降水量分别只有5.9 hPa和1.0 cm, 均小于平原地区。

尽管这四个地方地理位置差别很大, 气候的干湿程度也不同, 但是每个地方可降水

量和地面水汽压之间都有很好的线性相关, 我们的经验公式能够很好地反映它们的线性关系。

虽然水汽的分布有很大的空间变化, 但是可降水量和地面水汽压之间的线性关系, 却具有一定的普遍性和稳定性。从表 1 可以看出, 这 20 个台站可降水量和地面水汽压之间的线性相关系数, 普遍大于 0.95。可降水量与水汽压的比值, 即经验关系式的斜率, 除青藏高原地区和水汽含量很大的西沙, 桂林以外, 均在 0.185 左右。

从表 1 还可以看出, 在有些区域范围内, 各个台站具有相似的 $W-e$ 相关情况。例如, 地处我国黄河下游和长江中下游之间的五个台站: 太原、西安、郑州、宜昌和上海, 它们的经验系数比较相近。若计算出这些经验系数的平均值, 便可以得到一个反映该地区 $W-e$ 普遍关系的经验表达式。用这个关系式, 就可以近似地计算出这五个台站整层大气可降水量。计算结果的误差情况见表 2。从表 2 可以看出, 计算结果还是比较准确的, 平均相对误差小于 15%。

地处我国西北干旱地区的额济纳旗、敦煌、民勤、乌鲁木齐和喀什, 也具有相似的 $W-e$ 相关情况。用同样的方法, 计算出反映该地区 $W-e$ 普遍关系的经验表达式, 并由此算出这 5 个台站整层大气可降水量。计算结果的误差情况见表 3。从表 3 同样可以看出, 计算结果是准确可行的。

表 2 我国中原及东部部分地区 $W-e$ 经验关系及误差情况

$W-e$ 经验关系式	$W = 0.321 + 0.193e$				
站 名	太 原	西 安	郑 州	宜 昌	上 海
均方根误差/cm	0.314	0.339	0.466	0.404	0.394
平均相对误差/%	15.0	10.8	12.5	10.0	11.3

表 3 我国西北部分地区 $W-e$ 经验关系及误差情况

$W-e$ 经验关系式	$W = 0.342 + 0.189e$				
站 名	额济纳旗	敦 煌	民 勤	乌 鲁 木 齐	喀 什
均方根误差/cm	0.293	0.420	0.239	0.288	0.356
平均相对误差/%	14.8	16.3	14.1	18.5	17.1

在地理位置, 气候条件和大气环流的共同作用下, 有些台站, 可降水量和地面水汽压具有相近的对应关系, 表现在它们的经验方程具有非常相近的回归系数。例如, 西安和郑州、乌鲁木齐和喀什。在这种条件下, 我们可以用一个站的 $W-e$ 经验关系式来计算另一个站的可降水量。这个方法, 对于研究那些缺乏探空资料台站的可降水量, 特别是研究那些缺乏探空条件的广大边远地区和高原地区的水汽分布情况, 是非常有实际应用价值的。

水汽含量不仅有很大的空间变化, 而且还有很大的时间变化。但是, 从这 20 个站的统计资料可以看出, 可降水量与水汽压的关系比较稳定, 不随季节的变化而改变。以北京地区为例, 北京冬春季干旱, 特别是春季, 风沙天气很多, 可降雨量很小, 相应的地面水汽压也很小; 夏季, 特别是雨季(7月中旬~8月中旬), 空气湿度大, 可降水量大, 对应的地面水汽压也较大。可降水量与地面水汽压的比值(经验方程直线的斜率), 是比较稳定的。

另外, 我们还统计出了这 20 个台站 1993 年的计算结果。通过同 1992 年的结果相比较, 可以看出, 每一个站的经验系数 a 和 b 的变化量都很小。这说明可降水量和地面水汽压之间的经验关系具有一定的时间稳定性。

在研究地面水汽压或露点温度同可降水量关系方面, 国外已有许多工作。Muhammad Iqbal^[3]在他的书中, 曾介绍过几种。其中有 Atwater 和 Ball^[5]根据 Smith^[6]算法和美国可降水量数据得到的, 有关可降水量同地面露点温度之间的关系式; Won^[7]根据加拿大数据得到的相应关系式; Cole^[8]根据世界可降水量图得到的, 反映全球平均可降水量同平均地面水汽压之间的关系式。应用他们的关系式和我们的地面露点温度和水汽压数据, 我们计算了我国这 20 个台站的可降水量。计算结果为: Atwater 和 Ball 的关系式计算结果的相对误差较小, 其中西北地区为 30%, 其他地区为 20% 左右。这可能是由于美国同我国纬度相近, 气候条件相似。Won 和 Cole 的关系式计算结果的相对误差较大, 分别为 35% 和 90% 左右。虽然 Atwater 和 Ball 关系式的计算结果比较好, 但通过比较可以看出, 其相对误差在各个站均大于我们经验关系式的计算结果。这说明我们的经验关系式更适合我国的实际情况。

表 4 给出了根据(2), (4)式归纳出的这 20 个台站 1992~1993 年有效水汽含量 W' 同地面水汽压 e 之间关系的统计计算结果。

表 4 我国 20 个台站 1992~1993 年整层大气有效水汽含量和地面水汽压关系式的经验系数, 误差情况和相关情况

站名	a'	b'	均方根误差/cm	平均相对误差/%	相关系数
沈阳	0.213	0.137	0.216	15.0	0.980
北京	0.185	0.144	0.231	13.8	0.979
大连	0.141	0.139	0.258	12.6	0.971
太原	0.241	0.129	0.186	12.9	0.975
郑州	0.380	0.143	0.296	11.8	0.970
西安	0.276	0.144	0.226	10.7	0.976
上海	0.303	0.140	0.279	9.7	0.975
宜昌	0.321	0.146	0.269	9.1	0.975
福州	0.707	0.129	0.248	6.9	0.974
桂林	0.887	0.124	0.272	7.9	0.966
西沙	0.874	0.112	0.232	4.2	0.911
额济纳旗	0.274	0.135	0.213	16.8	0.960
敦煌	0.319	0.140	0.257	18.8	0.929
民勤	0.236	0.122	0.150	13.7	0.971
乌鲁木齐	0.247	0.125	0.175	15.0	0.961
喀什	0.239	0.127	0.248	16.5	0.929
格尔木	0.090	0.105	0.091	12.9	0.960
那曲	0.033	0.078	0.046	13.3	0.974
拉萨	0.003	0.091	0.058	9.4	0.980
腾冲	0.143	0.122	0.120	5.8	0.981

从表 4 可以看出, 有效水汽含量同地面水汽压之间, 仍存在着良好的线性对应关系。相关系数普遍大于 0.96。这说明根据我们的经验关系式, 仅利用地面气象要素资料, 计算出的有效水汽含量值, 具有足够的精确度, 可以满足实际应用的需要。

4 结论

(1) 整层大气可降水量和有效水汽含量同地面水汽压之间,存在着很好的数值对应关系。

(2) 尽管水汽分布的时空变化很大,但整层大气可降水量和地面水汽压之间的对应关系,是有一定规律性的。我们的经验公式能够很好地反映这个规律,使经验计算结果与实际情况相符合。

(3) 在整层大气可降水量和地面水汽压数值对应关系相近的条件下,可以用一个地区平均的 $W-e$ 经验关系式来计算该地区台站的可降水量,也可以用一个站的经验关系式来计算另一个站的可降水量。这个方法,对于确定那些缺乏探空资料台站上空的可降水量,具有良好的实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 邱金桓, 1994, 从全波段太阳直接辐射确定大气气溶胶光学厚度 I: 理论, *大气科学*, 19(4), 385~394.
- 2 周允华, 1984, 青藏高原地面长波辐射经验计算方法, *地理学报*, 39, 148~161.
- 3 Muhammad Iqbal, 1983, An introduction to solar radiation. Academic Press, 90~95.
- 4 邱金桓、杨景梅、潘继东, 1995, 从全波段太阳直接辐射确定大气气溶胶光学厚度 II: 实验研究, 19(5), 586~596.
- 5 Atwater, M.A. and J.T.Ball, 1976, Comparisons of radiation computations using observed and estimated precipitable water. *Appl. Meteorol.*, 15, 1319~1320.
- 6 Smith, W., 1966, Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point, *J. Appl. Meteorol.*, 5, 726~727.
- 7 Won, T., 1977, The simulation of hourly global radiation from hourly reported meteorological parameters - Canadian Prairie Area., Conference, 3rd, Canadian Solar Energy Society Inc., Edmonton, Alberta.
- 8 Cole, R.J., 1976, Direct Solar radiation data as input into mathematical models describing the thermal performance of buildings II. Development of relationships, *Build. Environ.*, 11, 181~186.

The Empirical Expressions of the Relation between Precipitable Water and Ground Water Vapor Pressure for Some Areas in China

Yang Jingmei and Qiu Jinhuan

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Based on the ground and radiosonde data at 20 stations in China from 1992~1993, we have derived the empirical expressions of the relation between the precipitable water and ground water vapor pressure. The calculating results show that the precipitable water is well related with the ground water vapor pressure. The calculating results of precipitable water by using our empirical expressions agree well with the actual ones. The mean relative errors are less than 15%.

Key words precipitable water effective water vapor content ground water vapor pressure