

# 全国大气水汽含量分布\*

钱璇<sup>1†</sup> 姚永强<sup>1</sup> 李俊荣<sup>1</sup> 尹佳<sup>1</sup> 张永婧<sup>2</sup>  
刘立勇<sup>1</sup> 王红帅<sup>1,3</sup> 周云贺<sup>1</sup> 李林<sup>1</sup> 尤显龙<sup>1</sup> 马江龙<sup>1</sup>

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2 济南市气象局 济南 250021)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 根据 1961~2008 年全国 210 个台站的地面气象要素资料, 发现地面水汽压与降水量之间的经验关系, 建立了由降水量估算地面水汽压的经验表达式, 由此进一步求得天文选址所需考察的大气水汽含量。研究结果表明, 不同季节的地面水汽压同降水量之间存在着稳定的函数对应关系, 利用各地区的降水量计算出的水汽压, 符合当地水汽压的实际测量, 所求得的各地区大气水汽含量也均能较好地反映当地长年平均情况。

**关键词** 大气效应, 方法: 统计, 方法: 数据分析

中图分类号: P 128; 文献标识码: A

## 1 引言

大气水汽含量是天文选址考察的关键要素之一, 是衡量红外与亚毫米波天文观测台址的重要指标。在太阳辐射光谱范围内, 水汽有许多重要的吸收带。天文选址中, 优良的天文台址要求水汽积分含量尽可能低, 因为水汽会影响电磁波信号传输。遥感探测中, 在对遥感回波数据进行大气订正时, 必须要考虑水汽对回波强度的影响。利用太阳直射辐射信息反演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。

大气中的水汽集中在对流层, 对流层以下空气柱中的水汽总量称为大气水汽含量。由于大气中的水汽绝大部分集中在对流层下半部, 近地层水汽含量在整层大气水汽含量中占有很大的比重, 所以整层大气水汽含量在很大程度上取决于地面水汽含量的大小, 同地面湿度参量有明显的相关性。

在进行中国天文气象条件时变特征研究过程中, 我们发现地面水汽压与降水量之间存在稳定的相关关系: 降水多的地区, 水汽压一般较大, 在降水较多的季节中, 水汽压一般也较大<sup>[1]</sup>。图 1 给出了全国 21 个台站水汽压与降水量的散点关系图, 明显看出各地区的水汽压与降水量间存在着近似线性的函数关系。为此, 我们对全国范围的地面水汽压与降水量进行系统考察, 发现了其间的经验关系。利用该经验关系式, 可以根据降水

2011-08-23 收到原稿, 2011-11-23 收到修改稿

\* 国家自然科学基金 (11103042, 11073031, 10903014) 和中国科学院国家天文台青年人才基金项目 (0835032002) 资助

† qianxuan@bao.ac.cn

量计算出天文选址必需的大气水汽含量指标。由于大气水汽含量通常是由探空资料计算获得,而在许多地区,尤其是广大边远地区,是缺乏或没有探空资料的。许多优良的天文台址都是在边远的地区,缺乏常规的地面气象观测台站,因此,总结降水量和大气水汽含量之间的经验关系,利用经验关系式考察地区水汽条件,更方便于天文选址的实际工作,同时也会给大气辐射和遥感探测等工作带来方便。

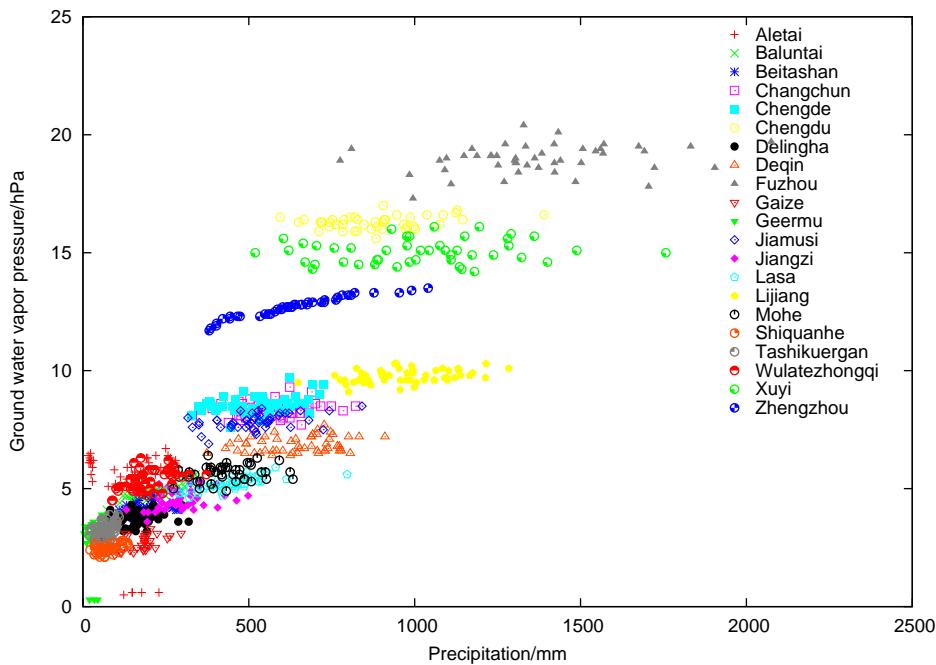


图 1 各地气象站 1961 ~ 2008 年的地面水汽压与降水量间散点关系

Fig. 1 The relation between ground water vapor pressure and precipitation from 1961 to 2008 in each place

目前,我国还没有考察地区实测降水量与地面水汽压关系的系统性工作。而在研究大气水汽含量方面,王继昌等<sup>[2]</sup>利用观测到的地面水汽压数据估算了物玛和卡拉苏候选点的大气水汽含量;杨景梅等<sup>[3~4]</sup>利用 1992 ~ 1993 年全国 20 个台站的地面及高空气象要素资料,拟合出各台站所在地区整层大气水汽含量和有效水汽含量同地面水汽压之间的经验关系式;张学文<sup>[5]</sup>利用 308 组不同地区不同季节的气候数据进行分析,独立证实大气水汽含量与地面水汽压之间存在良好的线性关系;李国翠等<sup>[6]</sup>利用 2004 ~ 2005 年张家口、邢台和北京 3 个探空气象站北京时间 8 时、20 时的资料,计算了各地不同时刻对应的水汽总量,对华北地区水汽总量的特征及其与地面水汽压的关系进行了研究。这些经验关系式在一些具体工作中得到了很好的应用。在天文选址远程研究工作中,利用仪器实地测量可获得该地点的水汽含量,而在考察比较大范围区域的水汽条件时,利用经验关系式计算大气水汽含量,会给实际工作带来很大的便利,可为区域水汽条件评估提供一种有效的科学支持。因此,本文研究指出:经验关系和全国范围的大气水汽含

量, 对天文选址观测、大气辐射与传输、气象学等多个领域都具有重要的实用价值.

本文选取了全国不同区域 210 个地面气象站的气象要素资料进行统计分析, 探讨降水量与地面水汽压之间的关系. 在这项工作中, 我们根据大多数天文选址、大气辐射和遥感探测等工作的需要, 把重点放在了气候比较干燥的我国北方和西部地区, 气候较为湿润的我国南方地区选择的站点较少, 代表性也有限. 但总的来说, 这些台站在地理分布、海拔高度和气候干湿程度上, 都具有一定的代表性. 本项研究为获得全国各地区地面水汽压提供一种可行方案, 可广泛应用于大气水汽含量的相关研究工作.

## 2 气象资料

由中国气象局气象资料室提供的全国 756 个地面观测台站 1961 ~ 2008 年的地面气象观测月均资料和年资料, 挑选出 210 个地区台站进行分析研究, 供挑选的台站范围广、资料年代长, 有利于提高分析结果的可靠性. 所选地区台站在地理分布、海拔高度和气候干湿程度上, 都具有一定的代表性. 图 2 给出了这 210 个台站的分布情况.

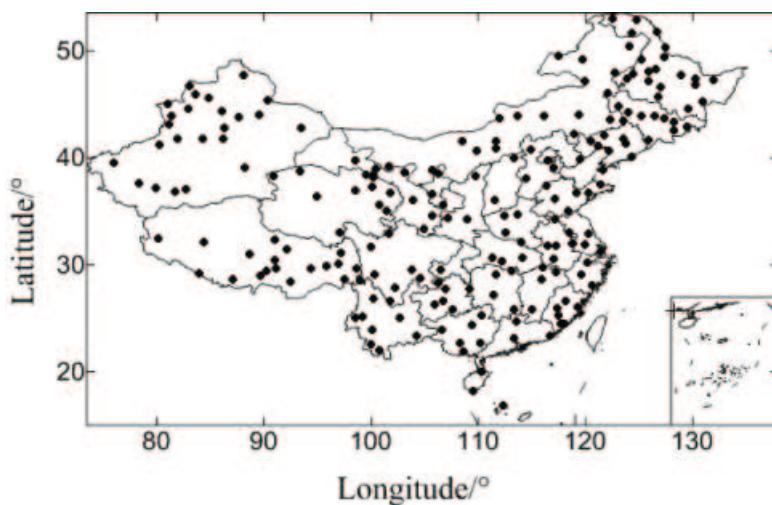


图 2 台站分布

Fig. 2 The distribution of meteorological stations selected in this paper

## 3 地面水汽压与降水量经验关系

我国幅员辽阔, 地形复杂, 各地区降水量分布极不均匀, 有很大的空间变化. 降水量主要受地理位置、大气环流、天气系统和下垫面条件等因素的综合影响, 各地区的这些综合条件不同, 各台站的经验系数存在一定的差异.

我国降水量的分布形势是东南大, 西北少, 从东南沿海向西北内陆减少. 海南岛和东南沿海的广东、广西、福建、浙江南部地区降水较多, 年降水量大致在 2 000 mm 左

右; 其次是长江流域, 1 200 mm 左右; 云贵高原降水量在 1 000 mm 左右; 黄河下游、陕甘南部、华北平原和东北平原地区降水减少, 600 mm 左右; 西北内陆地区在 200 mm 以下, 青藏高原西北部不足 50 mm, 而南疆沙漠地区仅 10 mm.

降水量不仅有着很大的空间变化, 而且还有很大的时间变化, 绝大多数地区雨量都集中在夏季, 有明显的雨季、干季之分。各地雨季起讫时间不一。西部高原地区雨季和干季的相互转化比东部地区更加清楚, 云贵高原雨季平均是从 5 月下旬开始, 10 月下旬结束, 雨季的降水量比干季要大 9 倍之多。青藏高原北部雨季平均从 6 月中旬开始, 10 月下旬结束。就整个高原而言, 东北部比西南、西北部开始早, 结束晚。新疆降水的特点是全年分布比较均匀, 雨季、干季并不明显。我国东部地区雨季一般是南部比北部开始早, 结束晚。华南沿海雨季从 4 月开始, 10 月中旬结束。长江流域从 6 月上旬开始, 9 月初结束, 华北、东北雨季从 7 月中旬开始, 8 月底结束。

雨季中的降水分布也不均匀, 不少地区仍有相对的干期出现。如西北高原相对干期在 7 月中旬至 8 月中旬。长江流域东部相对干期在 7 月中旬至 8 月中旬。华南 ( $27^{\circ}\text{N}$  以南) 大约从 6 月下旬开始, 7 月下旬结束。华北和东北相对干期不明显。相对干期严重的地区, 容易造成伏旱。由上可见, 西北高原、华南、长江流域雨季中的降水量有两个集中期, 从而使得各地雨季分成两个阶段。由此, 根据干、雨季的不同起始时间将全国划分为 6 大区域: 新疆、黄土高原地区, 华北、东北地区, 青藏高原地区, 云贵高原地区, 长江流域和华南地区, 分别对各区域地面水汽压与降水量间的数值关系进行统计分析。由于新疆、黄土高原地区全年降水偏少, 且没有明显的干季、雨季之分, 所以针对该区域使用气象要素年资料进行分析。而对于其他地区, 全年降水存在明显的干季、雨季之分, 使用月资料按照干季、雨季分别进行分析。

根据最小二乘法建立地面水汽压  $E$  与对应的降水量  $P$  之间的经验关系式, 经回归分析, 发现地面水汽压同对应的降水量之间有着相应的函数对应关系, 满足如下经验关系式:

$$E = a \times P + b,$$

其中  $a$ 、 $b$  为经验系数。对于全国大部分干湿季分明的地区,  $E$ 、 $P$  分别为地面水汽压、降水量的干湿季季节均值, 而在我国新疆、黄土高原地区,  $E$ 、 $P$  分别为地面水汽压、降水量的年均值。由于各地气候条件不同, 所以各站的经验系数存在一定的差异。

图 3 给出了北京、西藏芒康、云南丽江、江苏徐州、海南海口和新疆巴伦台 6 个地区台站的地面水汽压与降水量的关系图。图中直线分别代表各季节中地面水汽压与降水量拟合出的相关性。北京、西藏芒康、云南丽江、江苏徐州和海南海口中的每一个点代表一个月的平均情况, 新疆巴伦台中每一个点代表 1 yr 的平均情况, 直线是上述经验关系式的拟合。从图中可以看出, 相应的季节中,  $E$  和  $P$  之间有着相应的函数对应关系, 绝大多数地区经验公式的计算结果与实际情况符合较好, 即  $E$ 、 $P$  之间存在一定的相关性。关于相关性的强弱, 根据皮尔逊相关系数的定义, 相关系数的绝对值越大, 相关性越强, 相关系数越接近于 0, 相关性越弱。通常情况下, 相关系数在 0.8 ~ 1.0 为极强相关, 0.6 ~ 0.8 为强相关, 0.4 ~ 0.6 为中等程度相关, 0.2 ~ 0.4 为弱相关, 0.0 ~ 0.2 为极弱相关或无相关。

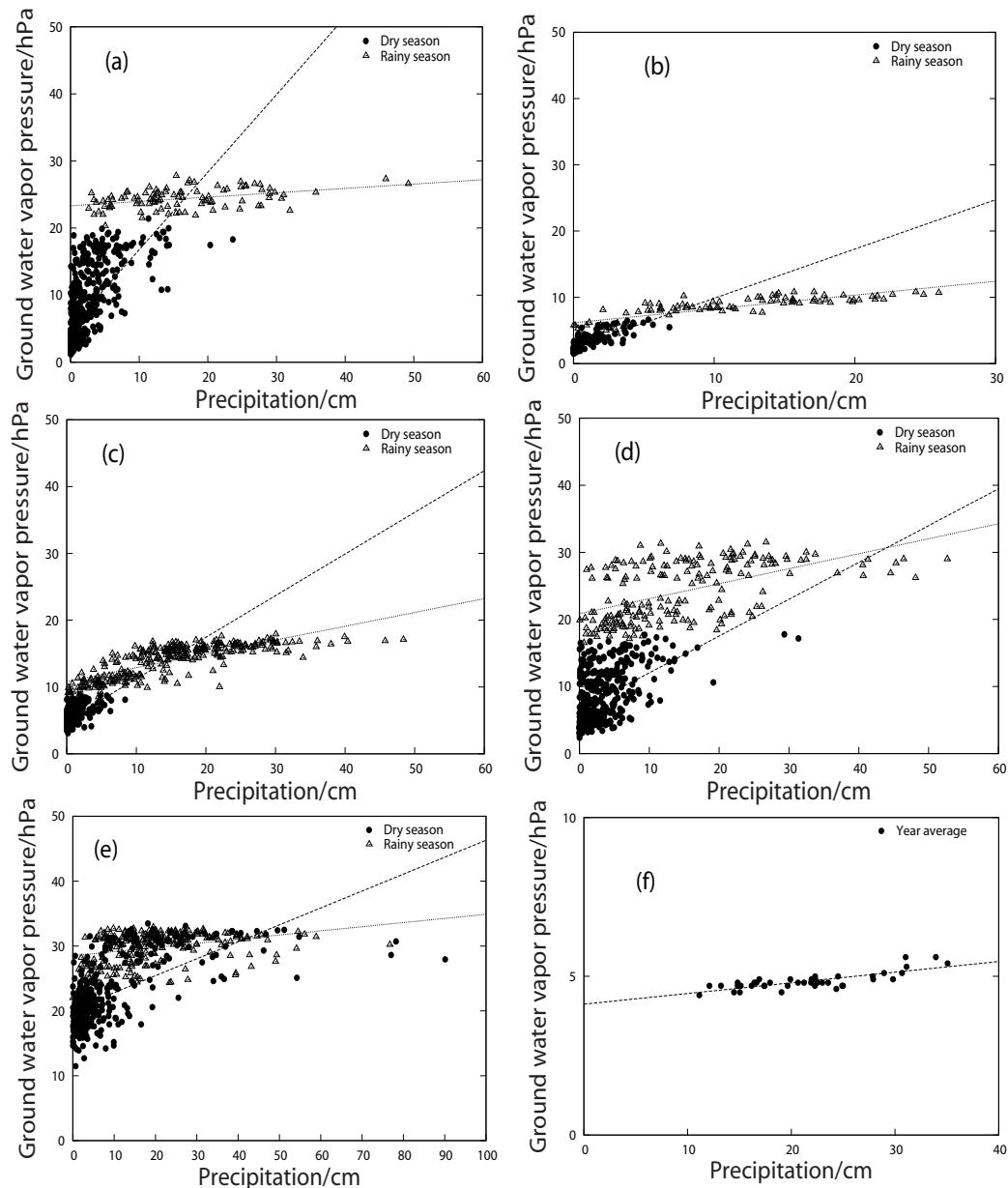


图 3 地面水汽压与降水量的关系. (a) 北京, (b) 芒康, (c) 丽江, (d) 徐州, (e) 海口, (f) 巴伦台.

Fig. 3 The relation between ground water vapor pressure and precipitation. (a) Beijing, (b) Mangkang, (c) Lijiang, (d) Xuzhou, (e) Haikou, (f) Balunhai.

北京地处我国华北平原西北部，背靠燕山山脉，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，该地区 1961~2008 年的年均降水量为 55.46 cm，相应的地面水汽压为 10.6 hPa.

西藏芒康位于青藏高原，属于高原半干旱地区，1961~2008 年间的年均降水量为 51.49 cm，对应地面水汽压为 5.4 hPa，均小于平原地区.

云南丽江位于云贵高原，属高原型西南季风气候，四季分明，气候温和，雨量适中，梅雨显著，夏雨集中，该地区 1961~2008 年的年均降水量为 96.67 cm，相应的地面水汽压为 9.8 hPa.

江苏徐州位于长江流域，属湿润性季风气候，四季分明，夏季炎热多雨，冬季寒冷少雨，1961~2008 年间的年均降水量为 85.01 cm，对应地面水汽压为 13.6 hPa.

海南海口属于我国华南临海地区，地处低纬度热带边缘，属于热带海洋气候，雨量充沛，春季温暖少雨多旱，夏季高温多雨，秋季多台风暴雨，冬季冷气流侵袭时有阵寒，该地区 1961~2008 年的年均降水量为 163.63 cm，相应的地面水汽压为 25.6 hPa.

新疆巴伦台地处我国西北部的准噶尔盆地，该地区身居内陆，且高山环绕，带有丰富水汽的东南和西南季风很难到达，有很强的大陆性气候特征，气候划分上属于温带干旱地区，1961~2008 年年均降水量 18.44 cm，全年降水偏少，相应地面水汽压 4.8 hPa.

尽管上述 6 个地区地理位置差别很大，气候的干湿程度不同，下垫面差异也较大，但是每个地区不同季节中的地面水汽压和降水量之间都有着相应的线性相关性. 如下分 6 大区域给出统计分析结果，我们的经验公式能够较好地反映它们之间的相关关系. 表 1 给出了华北、东北、青藏高原、云贵高原、长江流域和华南地区代表地区台站的地面水汽压与降水量关系式的经验系数和相关情况，其中  $COE$  表示相关系数， $MRE$  表示平均相对误差， $RME$  表示均方根误差，下表同.

### 3.1 华北、东北地区

表 1 中给出的华北、东北地区 10 个地区台站 1961~2008 年  $E-P$  关系的统计结果显示，每年的 7、8 月份是该区域的雨季，其余季节为干季<sup>[7]</sup>. 该区域干季中地面水汽压与降水量间的相关性较强，相关系数均在 0.6 以上，而在雨季中多数地区的相关系数在 0.4 以下，相关性较差.

我国的华北、东北地区，一年中雨季集中在 7、8 月份，降水强度大、持续时间短、局地性强、年际变化大、降水时段集中，且与地形关系密切，暴雨主要出现在山脉的迎风面和山区. 雨季拟合出的直线斜率较小，趋于 0，水汽压趋于饱和，总体来讲这个时候的降水量与地面水汽压间的相关性不好，相关系数多小于 0.4. 其余月份，降水分布均匀，降水量与水汽压之间存在很好的相关性，相关系数普遍大于 0.6，平均相对误差小于 35%.

### 3.2 青藏高原地区

从表 1 中给出的青藏高原地区 10 个地区台站 1961~2008 年  $E-P$  关系的统计计算结果可以看出，该地区雨季集中在每年的 6~10 月份，其余月份为干季，不同季节中的地面水汽压同降水量间的对应关系都较好，相关系数普遍大于 0.5.

表 1 我国部分地区台站地面水汽压和降水量关系式的经验系数和相关情况

Table 1 The empirical coefficients and correlations of the functional relations between ground water vapor pressure and precipitation in most parts of China

Region	Station	Latitude	Longitude	Altitude	Wet season						Dry season					
					N	E	m	a	b	COE	MRE	RMS	a	b	COE	MRE
North and North- east China	Mohe	52° 58'	122° 31'	433		0.005	14.73	0.13	9.4	1.71	0.107	1.236	0.79	23	2.3	
	Daxinganling	50° 24'	124° 07'	371.7		0.139	14.53	0.5	7.4	10.17	0.875	1.999	0.78	23.8	2.35	
	Hailaer	49° 13'	119° 45'	610.2		0.191	13.36	0.48	7.8	1.46	1.225	1.973	0.78	24.3	2.13	
	Aershan	47° 10'	119° 56'	997.2		0.166	12.24	0.55	6.2	1.11	0.947	1.405	0.82	25.8	1.75	
	Yichun	47° 44'	128° 55'	240.9		0.045	17.42	0.22	6.3	1.44	0.995	1.833	0.84	25	2.3	
	Erlianhaote	43° 39'	111° 58'	964.7		0.35	10.94	0.61	7.1	1.09	1.816	2.282	0.7	31.1	1.81	
	Chifeng	42° 16'	118° 56'	568		0.153	16.27	0.58	5.2	1.15	1.179	2.761	0.77	27.8	2.48	
	Fuxin	42° 05'	121° 43'	167.8		0.075	21.05	0.35	5.7	1.54	1.159	2.359	0.77	34.7	3.27	
	Dandong	40° 03'	124° 20'	13.8		0.028	24.07	0.25	25.8	1.46	0.794	4.421	0.7	30.7	4.01	
Qinghai- Tibet plateau	Beijing	39° 48'	116° 28'	31.3		0.065	23.32	0.41	4.5	1.34	1.155	5.217	0.68	28	4.04	
	Shiquanhe	32° 30	80° 05'	4278.6		0.758	3.382	0.66	19.4	1.32	0.941	1.14	0.36	34.1	0.6	
	Gaize	32° 09'	84° 25'	4414.9		0.547	3.061	0.79	18.9	1.24	1.161	0.939	0.68	30.2	0.5	
	Naqu	31° 29'	92° 04'	4507		0.304	3.955	0.8	15	1.01	0.687	1.133	0.79	26.4	0.58	
	Rikaze	29° 15'	88° 53'	3836		0.245	6.409	0.77	17.2	1.51	1.033	1.908	0.71	30.6	0.96	
	Nimu	29° 26'	90° 10'	3809.4		0.332	5.939	0.75	17.3	1.43	0.909	1.954	0.67	29.5	1.11	
	Jiangzi	28° 55'	89° 36'	4040		0.384	5.559	0.74	17.7	1.61	1.045	1.903	0.66	25.1	0.97	
	Changdu	31° 09'	97° 10'	3306		0.334	6.688	0.69	14.3	1.69	0.824	2.301	0.84	21.9	0.86	
	Linzhi	29° 40'	94° 20'	2991.8		0.23	9.035	0.62	12.4	1.813	0.577	3.769	0.88	15.5	1.91	
	Mangkang	29° 41'	98° 36'	3870		0.208	6.159	0.84	10.1	0.926	0.743	2.422	0.88	20.2	0.8	
	Geermu	36° 25'	94° 54'	2807.6		1.39	4.328	0.61	23.5	1.46	2.112	1.505	0.66	28.2	0.66	

表 1 续

Table 1 (continued)

Region	Station	Latitude	Longitude	Altitude	Wet season						Dry season					
					N	E	m	a	b	COE	MRE	RMS	a	b	COE	MRE
Yunnan-Guizhou plateau	Lijiang	26° 52'	100° 13'	2392.4	0.206	10.81	0.79	9.3	0.08	0.623	4.977	0.58	17.8	0.82		
	Tengchong	25° 01'	98° 30'	1654.6	0.121	15.91	0.58	8	1.68	0.278	8.081	0.59	13.7	1.5		
	Baoshan	25° 07'	99° 11'	1652.2	0.147	16.21	0.46	9.7	1.98	0.254	8.386	0.46	14.5	1.56		
	Kunming	25° 00'	102° 39'	1886.5	0.153	14.31	0.62	8.7	1.66	0.295	7.847	0.45	13.6	0.95		
	Lincang	23° 53'	100° 05'	1502.4	0.185	15.98	0.69	6.8	1.53	0.362	8.995	0.59	12.1	1.47		
	Lancang	22° 34'	99° 56'	1054.8	0.119	19.28	0.66	5.7	1.47	0.365	11.45	0.65	10.5	1.63		
	Guiyang	26° 35'	106° 44'	1223.8	0.121	17.18	0.35	13	2.76	0.455	7.606	0.69	16	1.78		
	Zunyi	27° 42'	106° 53'	843.9	0.071	20.92	0.28	8.1	0.59	0.559	7.843	0.8	17.9	3.03		
	Anshun	26° 15'	105° 54'	1431.1	0.06	18.28	0.39	7.1	0.67	0.32	8.617	0.78	17.7	2.64		
	Dushan	25° 50'	107° 33'	113.3	0.087	20.52	0.43	7.2	0.86	0.407	8.533	0.75	20.6	3.03		
Yangtze river basin	Chongqing	29° 31'	106° 29'	3511	0.232	19.26	0.38	13.3	4.25	0.596	9.235	0.81	15.6	2.41		
	Yichang	30° 42'	111° 18'	133.1	0.157	23.26	0.43	10.8	3.16	0.613	7.632	0.71	24.8	3.16		
	Jingzhou	30° 21'	112° 09'	32.2	0.102	25.72	0.24	12.1	3.64	0.604	7.686	0.66	27.9	4.16		
	Wuhan	30° 37'	114° 08'	23.1	0.069	26.11	0.24	11.9	3.54	0.443	7.78	0.6	29.8	0.03		
	Changde	29° 03'	111° 41'	35	0.067	26.4	0.2	11.2	3.35	0.375	8.433	0.57	28.1	3.93		
	Xuzhou	34° 17'	117° 09'	41.2	0.223	20.85	0.54	13.7	2.67	0.548	6.547	0.52	34.9	1		
	Xuyi	32° 59'	118° 31'	40.8	0.138	23.84	0.42	13.1	3.77	0.464	7.336	0.44	35.7	3.84		
	Nanjing	32° 00'	118° 48'	7.1	0.096	24.95	0.27	13.1	3.73	0.436	7.603	0.45	33.8	3.88		
	Hefei	31° 47'	117° 18'	27	0.15	24.69	0.32	2	3.7	0.264	8.83	0.24	13.7	0.02		
	Nanchang	28° 36'	115° 55'	46.9	0.021	27.61	0.09	9.9	3.09	0.274	9.086	0.53	31.6	0.03		

表1 续

Table 1 (continued)

Region	Station	Latitude	Longitude	Altitude	Wet season						Dry season						
					N	E	m	a	b	COE	MRE	RMS	a	b	COE	MRE	RMS
South China	Guilin	25° 19'	110° 18'	164.4	0.07	22.42	0.22	19	4.76	0.173	8.612	0.45	18	2.05			
	Liuzhou	24° 21'	109° 24'	96.8	0.136	22.8	0.38	15.2	4.06	0.187	10.73	0.35	17.4	2.31			
	Shaoguan	24° 41'	113° 36'	61	0.066	24.2	0.17	15.5	4.18	0.116	10.79	0.36	17.9	2.33			
	Zhangzhou	24° 30'	117° 39'	28.9	0.134	23.37	0.38	14.1	4.11	0.074	13.02	0.19	14.2	2.32			
	Baise	23° 54'	106° 36'	173.5	0.24	22.77	0.6	10.2	3.01	0.397	12.95	0.42	14.4	2.28			
	Guangzhou	23° 10'	113° 20'	41	0.12	24.91	0.4	12.3	3.72	0.17	12.98	0.31	17.3	2.79			
	Nanning	22° 38'	108° 13'	121.6	0.212	23.71	0.58	10.2	3.15	0.184	13.4	0.24	15.8	0.03			
	Yulin	22° 39'	110° 10'	81.8	0.118	25.22	0.41	10.8	3.26	0.127	13.85	0.21	16.3	2.73			
	Qinzhou	21° 57'	108° 37'	4.5	0.122	25.19	0.63	9.7	3.13	0.186	13.96	0.29	16.5	2.82			
	Haikou	20° 00'	110° 15'	63.5	0.055	28.62	0.32	6.5	2.26	0.155	19.09	0.33	11.1	2.59			

总体来看, 青藏高原地区降水量由东南向西北递减。东南部降水多, 主要是受来自印度洋的西南季风的影响较大。西北部主要是温带大陆性气候, 因为其深居内陆, 季风气候很难影响到, 所以比较干旱。雨季集中在一年中的 6~10 月份, 该时期降水量与地面水汽压之间的相关系数普遍大于 0.6, 东南部的云南德钦地区相关系数较小, 0.5 左右, 平均相对误差均小于 25%。其余季节中, 降水量与地面水汽压之间的相关系数普遍大于 0.6, 平均相对误差都小于 35%, 狮泉河地区相关性较差, 相关系数在 0.36 左右。

### 3.3 云贵高原地区

表 1 中给出的云贵高原地区 10 个地区台站 1961~2008 年  $E-P$  关系的统计计算结果显示, 该地区全年不同季节中降水量与地面水汽压间的相关系数普遍大于 0.45, 贵阳在雨季中的相关系数偏小, 约 0.35。

云贵高原地区雨季集中在每年的 6~9 月份, 该地区属亚热带湿润区, 在地形上虽说是一个高原, 但由于其海拔高度、大气环流条件不同, 气候差别显著。例如, 云南昆明海拔约 1900 m, 但其纬度较低 ( $25^{\circ}$  N), 冬季一般不受寒潮影响, 而且经常在西南暖流控制下, 多晴天, 冬春季节相当干而温暖; 夏半年主要受西南季风影响, 降水丰富, 雨日多, 加以海拔高, 所以夏季温度偏低, 一年中干湿两季分明。云南地区雨季中降水量与地面水汽压之间的相关系数大于 0.4, 平均相对误差小于 10%。而贵州境内海拔一般在 1000 m 左右, 冬半年经常受到北方冷空气影响, 冷空气与暖空气相接触, 形成气候上有名的“昆明准静止锋”。贵州冬半年经常在静止锋笼罩之下, 阴雨天气特别多, 夏半年受到东南季风影响, 降水较多, 该地区雨季中的降水量与水汽压间的相关性较差, 小于 0.4 但大于 0.2, 平均相对误差小于 20%。其余季节中, 云贵高原地区的降水量与地面水汽压之间的线性相关性较强, 相关系数普遍大于 0.45, 平均相对误差小于 25%。

### 3.4 长江流域地区

表 1 中给出的长江流域地区 10 个地区台站 1961~2008 年  $E-P$  关系的统计计算结果给出, 该区域一年中的 6~9 月为雨季, 其余季节为干季。干季中大部分地区地面水汽压同降水量间的相关系数在 0.4 以上, 江西、浙江北部地区偏小, 介于 0.3~0.4 之间, 雨季中相关系数大都小于 0.4, 相关性较差。

长江流域地区近海沿江, 属亚热带气候区, 全年降水偏多。每年夏初会出现梅雨天气, 在湖北宜昌以东  $28\sim34^{\circ}$  N 之间的江淮流域出现连阴雨天气, 雨量充沛, 相对湿度很大, 降水一般为连续性, 常间有阵雨或雷雨, 有时可达暴雨程度, 梅雨结束后雨量显著减小, 相对湿度降低。每年梅雨的起讫时间、长度、降水量等相差很大, 年际变化也很大, 每年梅雨雨量的多少和地区分布均有显著差异。

长江流域地区雨季主要集中在 6~9 月份, 降水量与地面水汽压之间相关性差, 大多小于 0.4, 其余季节其相关系数多大于 0.4, 平均相对误差小于 30%, 具有一定的相关性。

### 3.5 华南地区

从表 1 中给出的华南地区 10 个地区台站 1961~2008 年  $E-P$  关系的统计计算结果可以看出, 该区域全年地面水汽压同降水量间的相关系数大多小于 0.4, 相关性较差。

华南地区地处低纬, 濒临太平洋和南海, 当东亚西南季风加强时, 有利于将海上的

水汽向陆地输送, 从而产生丰沛的降水。另一方面, 华南沿海海陆风效应显著, 在某些特殊的海岸地区可以形成辐合中心, 从而使降水加强产生局地暴雨, 并可产生沿海降水的日变化, 4~6月由于陆风所形成的辐合中心正好与沿海的暴雨中心相吻合, 说明陆风可以使降水加强产生暴雨, 并可形成夜雨, 海风所形成的辐合中心都在内陆, 从而产生内陆白天的暴雨。

华南地区属热带气候区, 全年降水较多。雨季集中在4~10月, 其中4~6月为华南前汛期, 4月初降水量开始缓慢增大, 5月中旬雨量迅速增大进入华南前汛期盛期, 5月中旬前大雨带位于华南北部, 主要是北方冷空气侵入形成的锋面降水, 5月中旬后受东亚季风影响, 大雨带移至华南沿海, 降水量增大。夏季在西北太平洋热带洋面形成的台风向西北方向移动, 袭击我国东南沿海, 使得降水明显增多。全年降水量与水汽压之间的相关性较为不好, 大多小于0.4, 平均相对误差小于25%。

### 3.6 新疆、黄土高原地区

表2给出了新疆、黄土高原地区10个地区台站1961~2008年E-P关系的统计计算结果。该地区由于全年降水偏少, 没有明显的干、湿季之分, 故用年均资料值分析, 全年的地面水汽压同降水量间的相关系数均大于0.5, 相关性较好。

新疆、黄土高原地区气候干旱, 全年降水较少, 且一年中无明显的干湿季之分, 利用其年资料得出的降水量与地面水汽压之间的相关系数均大于0.53, 平均相对误差小于10%。

**表2 新疆、黄土高原地区台站地面水汽压和降水量关系式的经验系数和相关情况**

**Table 2 The empirical coefficients and correlations of the functional relations between ground water vapor pressure and precipitation in Xinjiang and Loess**

Station	Plateau							
	Latitude N	Longitude E	Altitude (m)	a	b	COE	MRE (%)	RMS (hPa)
Aletai	47° 44'	88° 05'	735.3	0.044	5.036	0.61	4.6	0.23
Beitashan	45° 22'	90° 23'	1218.2	0.033	3.5	0.56	5	0.16
Shihezi	44° 19'	86° 03'	442.9	0.048	6.618	0.73	2.4	0.25
Yining	43° 57'	81° 20'	662.5	0.027	7.536	0.67	2.3	0.25
Baluntai	42° 44'	86° 18'	1739	0.033	4.121	0.79	2.6	0.2
Yinchuan	38° 29'	106° 13'	1111.4	0.028	7.535	0.56	3.6	0.26
Yulin	38° 16'	109° 47'	1157	0.025	6.506	0.56	4.3	0.27
Haiyuan	36° 34'	105° 39'	1854.2	0.022	5.467	0.64	3.4	0.22
Tianshui	34° 35'	105° 45'	1141.7	0.017	9.033	0.68	2	0.28
Lanzhou	36° 03'	103° 53'	1517.2	0.027	6.908	0.6	2.7	0.25

## 4 讨论

### 4.1 地面水汽压与降水量的普遍关系

从表1~2中可以看出, 在有些区域范围内, 各个台站具有相似的E-P相关情况。

例如, 地处我国华北、东北地区的绥化、佳木斯、鸡西、呼和浩特和锡林浩特, 它们的经验系数比较相近, 计算出这些系数的平均值, 便可以得到一个反映该地区  $E-P$  普遍关系的经验表达式. 利用这个关系式, 就可以近似计算出这几个地区的地面水汽压, 计算结果的误差情况见表 3, 从中可以看出, 计算结果比较准确, 平均相对误差小于 35%.

表 3 我国华北、东北部分地区  $E-P$  经验关系及误差情况

Table 3 The empirical relations and the errors of  $E-P$  in the north and northeast parts of China

Dry season												Rainy season											
$E=1.1P+2.436$												$E=0.081P+19.255$											
Sui hua	Jia musi	Ji xi	Chang chun	Haer bin	Fu xin	Sui hua	Jia musi	Ji xi	Chang chun	Haer bin	Fu xin	Sui hua	Jia musi	Ji xi	Chang chun	Haer bin	Fu xin	Sui hua	Jia musi	Ji xi	Chang chun	Haer bin	Fu xin
RMS(hPa)	2.5	2.92	2.77	2.79	2.56	3.29	1.55	1.53	1.7	1.6	1.48	2.32											
MRE(%)	24.7	26.6	28.6	32.3	28.9	34.4	6.5	6.5	7.4	5.9	5.8	8.5											

地处我国西北干旱地区的塔城、伊宁、银川、榆林和兰州, 也具有相似的  $E-P$  相关情况, 用同样的方法, 计算出反映该地区的  $E-P$  普遍关系的经验表达式, 并计算出这几个地区的地面水汽压, 计算结果的误差情况见表 4, 从中可以看出, 计算结果是准确可行的.

表 4 我国西北部分地区  $E-P$  经验关系及误差情况

Table 4 The empirical relations and the errors of  $E-P$  in the northwest of China

$E=0.026P+6.907$				
	Tacheng	Yining	Yinchuan	Yulin
RMS(hPa)	0.94	0.72	0.78	0.59
MRE(%)	13.3	8.1	8.4	6.7

在地理位置、气候条件和大气环流共同作用下, 有些地区台站的地面水汽压和降水量之间具有相近的对应关系, 它们的经验方程具有相近的回归系数. 这种情况下, 我们可以用一个站的  $E-P$  经验关系式来计算另一个站的地面水汽压, 这对于研究那些缺乏观测的边远地区和高原地区的水汽分布情况, 有实际应用价值.

#### 4.2 降水量 - 地面水汽压 - 大气水汽含量的计算模式

杨景梅等<sup>[3-4]</sup>根据水汽分布规律和我国西高东低的地理特点, 将地理纬度和海拔高度两个参量引入经验系数的参数化方程, 已归纳出对应于每一个地区台站的地面水汽压与大气水汽含量间的关系式. 进一步拟合给出这些经验系数同地理纬度和海拔高度间的经验关系, 即可得到一个反映普遍关系的经验计算模式. 由此将各地区台站由降水量  $P$  计算出的地面水汽压  $E$  代入杨景梅等<sup>[3-4]</sup> 的经验公式中, 将可求出对应各地区的大气水汽含量  $W$ .

表 5 中列出了西北地区代表台站 1961 ~ 2008 年的年均降水量  $P$ 、根据本文经验关系计算出的地面水汽压  $E$ 、将  $E$  代入杨景梅等<sup>[3-4]</sup> 公式求得的大气水汽含量  $W$  及其相对误差, 由于该地区的全年降水偏少, 且无干湿季之分, 故使用年资料进行分析.

表 5 西北地区水汽相关量统计

Table 5 The statistics of precipitation and precipitable water vapor in the northwest of China

Station	P(cm)	E(hPa)	W(cm)	MRE(%)
Aletai	1.42	0.43	1.1	4.1
Beitashan	1.46	0.34	0.81	4.2
Shihezi	1.74	0.64	1.39	2.2
Yining	2.05	0.69	1.51	2.1
Baluntai	1.8	0.4	0.88	2.4
Yinchuan	1.41	0.67	1.49	3.3
Yulin	3.3	0.62	1.4	3.9
Haiyuan	3.14	0.53	1.12	3.2
Tianshui	4.31	0.83	1.91	1.9
Lanzhou	2.69	0.65	1.41	2.5

表 6 中列出了全国其他各地区代表台站水汽相关量的统计, 这些地区全年降水有明显的干湿季之分, 故使用月资料进行分析.

表 6 全国大部分地区水汽相关量统计

Table 6 The statistics of precipitation and precipitable water vapor over China

Station	Dry season				Wet season			
	P (cm)	E (hPa)	W (cm)	MRE (%)	P (cm)	E (hPa)	W (cm)	MRE (%)
Mohe	2.38	3.71	0.72	29.09	9.88	15.23	2.68	9.11
Daxinganling	2.47	4.16	0.79	29.28	13.28	6.38	1.16	59.21
Hailaer	1.63	3.98	0.79	27.56	9.19	15.12	2.68	7.51
Aershan	2.36	3.64	0.75	32.11	9.95	13.89	2.49	5.88
Yichun	3.15	4.97	0.91	27.9	15.37	17.81	3.09	6.22
Erlianhaote	0.64	3.44	0.72	15.39	3.58	12.19	2.2	0.69
Chifeng	1.79	4.87	0.94	33.6	9.19	17.68	3.12	4.98
Fuxin	2.42	5.16	0.93	34.11	12.65	22	3.79	5.59
Dandong	4.61	8.08	1.41	31.36	25.26	24.78	4.25	4.78
Beijing	2.25	7.82	1.37	29.12	16.31	24.38	4.19	4.42
Shiquanhe	0.14	1.27	0.2	32.87	1.2	4.29	0.71	18.71
Gaize	0.19	1.16	0.18	29.29	3.22	4.82	0.8	19.56
Naqu	0.83	1.7	0.27	25.72	7.62	6.27	1.05	15.43
Rikaze	0.33	2.25	0.36	29.28	8.34	8.45	1.42	17.52
Nimu	0.48	2.39	0.39	27.33	6.34	8.04	1.35	17.63
Jiangzi	0.33	2.25	0.36	23.66	5.29	7.59	1.27	17.71
Changdu	1.15	3.25	0.6	22.93	8.03	9.37	1.76	14.53
Linzhi	2.15	5.01	1.03	15.84	10.56	11.46	2.39	12.47
Mangkang	1.12	3.25	0.53	21.18	10.79	8.4	1.41	10.26
Geermu	0.13	1.79	0.37	30.28	0.65	5.24	1.13	22.79
Lijiang	0.99	5.59	1.27	15.5	15.27	13.96	2.94	8.77
Tengchong	3.84	9.15	1.73	14.51	21.08	18.46	3.6	8.19
Baoshan	2.93	9.13	1.75	15.21	13.52	18.2	3.56	9.96

表 6 续  
Table 6 (continued)

Station	Dry season				Wet season			
	P (cm)	E (hPa)	PWV (cm)	MRE (%)	P (cm)	E (hPa)	PWV (cm)	MRE (%)
Kunming	2.05	8.45	1.61	14.29	14.84	16.58	3.24	8.9
Lincang	2.44	9.88	2.05	11.71	16.98	19.12	3.89	6.67
Lancang	3.15	12.6	2.59	10.19	23.64	22.09	4.85	5.57
Guizhou	4.01	9.43	1.96	15.37	14.59	18.95	3.86	12.71
Zunyi	6.22	11.32	2.3	17.53	14.51	21.95	4.41	7.94
Anshun	6.97	10.85	2.22	17.23	20.4	19.5	3.94	6.94
Dushan	7.92	11.76	2.35	20.57	17.39	22.03	4.4	7.12
Chongqing	6.45	13.08	2.95	13.58	15.23	24.5	5.23	8
Yichang	6.05	11.34	2.2	24.17	16.58	25.86	4.95	10.7
Jingzhou	7.24	12.06	2.33	27.23	12.84	27.03	5.18	12.02
Wuhan	8.18	11.4	2.21	29.82	14.84	27.04	5.18	11.81
Changde	9.8	12.11	2.46	27.51	14.02	27.34	5.51	11.08
Xuzhou	3.37	8.39	1.64	34.44	14.51	24.09	4.62	13.6
Xuyi	4.77	9.55	1.85	35.69	16.06	26.06	5	12.98
Nanjing	5.95	10.2	1.98	32.89	14.44	26.34	5.04	13.02
Hefei	6.07	10.43	2.02	34.9	12.32	26.54	5.08	12.64
Nanchang	11.96	12.36	2.51	30.88	15.48	27.93	5.63	9.85
Guilin	8.18	10.03	1.91	19.08	21.13	23.9	4.68	19.51
Liuzhou	5.71	11.8	2.76	15.89	16.62	25.06	5.22	11.73
Shaoguan	8.26	11.75	2.68	16.77	16.36	25.28	5.19	12.12
Zhangzhou	5.9	13.45	3.13	12.61	18.26	25.82	5.37	10.71
Baise	2.5	13.94	3.25	15.96	13.95	26.12	5.41	11.92
Guangzhou	5.01	13.83	3.24	15.06	21.31	27.47	5.66	9.04
Nanning	4.06	14.15	3.31	14.1	15.78	27.06	5.59	7.52
Yulin	5.44	14.54	3.39	14.12	18.85	27.44	5.66	7.92
Qinzhou	5.02	14.89	3.46	14.21	27.37	28.53	5.81	6.99
Haikou	4.38	19.77	3.09	14.19	20.25	29.73	5.09	7.7

图 4 给出了全国 1961~2008 年干季、雨季中大气水汽含量  $W$  的分布情况。干季，我国华南地区大气水汽含量偏多，季节均值大都在 2.5 cm 以上，青藏高原南部和西部水汽含量较少，季节均值大都在 0.5 cm 以下，35°N 以北地区水汽含量也较少，水汽含量的季节均值在 1.5 cm 以下。雨季，我国华南、华东地区大气水汽含量偏多，均值基本在 4 cm 以上，其次是东北南部地区，为 3~4 cm，水汽含量也较多，新疆西部及其中部有小范围地区水汽含量较多，季节均值在 3~3.5 cm，其余地区水汽含量均较少，尤其是青藏高原西南部及新疆中部部分地区水汽含量最少，季节均值在 1 cm 以下。全国大部分区域中，不论是干季还是雨季，利用降水量求出的大气水汽含量同杨景梅等<sup>[3~4]</sup> 利用地面水汽压求出的大气水汽含量符合很好。

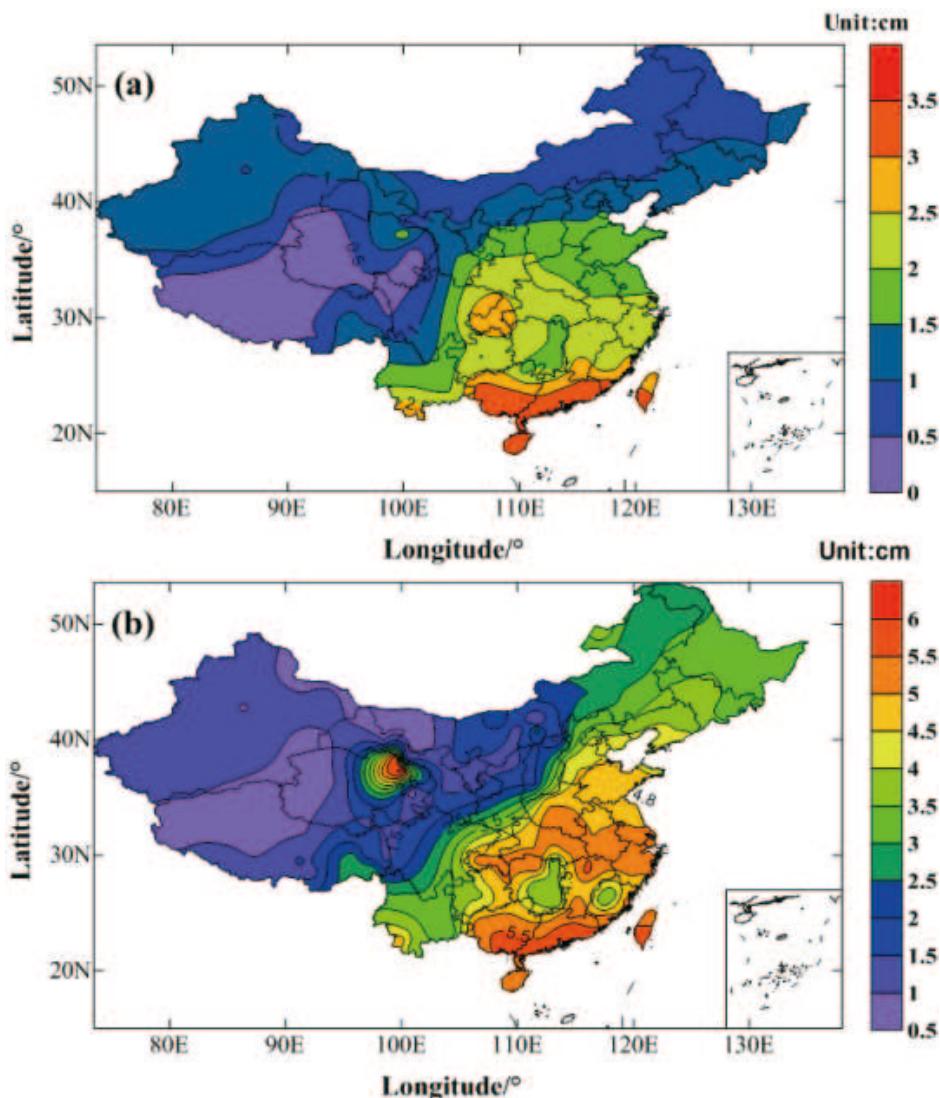


图 4 全国大气水汽含量分布. (a) 干季, (b) 雨季

Fig. 4 The distribution of precipitable water vapor over China in dry season (a) and rainy season (b)

## 5 结论

本文利用我国 210 个台站的气象要素资料, 建立了  $E-P$  的经验关系式来计算地面水汽压。通过检验比较, 证实该计算方法具有较好的精度和实际应用价值。本文研究结论总结如下:

(1) 地面水汽压和降水量之间存在着相应的线性相关关系, 降水量的大小在很大程度上影响着当地的地面水汽压大小。虽然降水量的时空变化很大, 但地面水汽压同降水量

之间的对应关系具有大规律性和稳定性.

华北、东北地区雨季水汽压趋于饱和状态, 降水量与水汽压间的线性相关性不好, 相关系数多小于 0.4, 干季中的相关系数普遍大于 0.6, 具有强相关性, 平均相对误差小于 35%.

青藏高原地区降水量由东南向西北递减, 雨季中降水量同地面水汽压间的相关系数普遍大于 0.6, 平均相对误差均小于 25%, 其余季节普遍大于 0.6, 具有强相关性, 平均相对误差都小于 35%.

云贵高原地区由于其海拔高度、大气环流条件不同, 气候差别显著. 云南地区雨季中降水量与地面水汽压之间相关系数大于 0.4, 平均相对误差小于 10%, 贵州地区的相关性较差, 相关系数介于 0.2~0.4, 平均相对误差小于 20%; 在其余季节, 云贵高原地区的降水量与地面水汽压之间的线性相关性较强, 相关系数大于 0.45, 平均相对误差小于 25%.

长江流域雨季中降水量与地面水汽压之间相关性弱, 大多小于 0.4, 其余季节其相关系数多大于 0.4, 平均相对误差小于 30%, 具有一定的相关性.

华南地区全年降水量与水汽压之间的相关性较弱, 大多小于 0.4, 平均相对误差小于 25%.

新疆、黄土高原地区气候干旱, 全年降水较少, 一年中无明显的干湿季之分. 利用其年资料获得的降水量与地面水汽压之间的相关系数均大于 0.53, 平均相对误差小于 10%.

(2) 地水面水汽压和降水量间的函数对应关系在某些地区台站很相近, 可以用平均的  $E-P$  经验关系式来计算该地区台站的地面水汽压, 也可以根据一个站的经验关系式来计算另一个站的地面水汽压. 这个方法对于考察那些缺乏探空资料台站上空的大气水汽含量, 具有很好的实际应用价值.

(3) 本文结果是根据全国不同高度、不同经纬度的 210 个台站的气象要素资料分析得到的, 结果较为精确. 利用本文方法求得的大气水汽含量同杨景梅等<sup>[3-4]</sup> 求出的大气水汽含量符合很好. 从而为考察地区水汽条件, 尤其是广大边远地区, 带来了方便, 在天文选址、大气辐射与传输、遥感探测以及气象学等多个领域都具有重要的实用价值.

**致谢** 感谢国家气象信息中心气象资料室数据共享服务室提供了大量整理归档的气象资料.

## 参 考 文 献

- [1] 钱璇, 王盘兴, 姚永强, 等. 中国科学, 2011, 41: 801
- [2] 王继昌, 姚永强, 杨国安. 天文技术与方法, 2008, 5: 310
- [3] 杨景梅, 邱金恒. 大气科学, 2002, 26: 1
- [4] 杨景梅, 邱金恒. 大气科学, 1996, 20: 620
- [5] 张学文. 气象, 2004, 30: 9
- [6] 李国翠, 李国萍, 刘凤辉, 等. 热带气象学报, 2009, 25: 488
- [7] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 2000: 319-342

# The Distribution of Precipitable Water Vapor over China

QIAN Xuan<sup>1</sup> YAO Yong-qiang<sup>1</sup> LI Jun-rong<sup>1</sup> YIN Jia<sup>1</sup> ZHANG Yong-jing<sup>2</sup>  
LIU Li-yong<sup>1</sup> WANG Hong-Shuai<sup>1,3</sup> ZHOU Yun-he<sup>1</sup> LI Lin<sup>1</sup> YOU Xian-long<sup>1</sup>  
MA Jiang-long<sup>1</sup>

(1 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

(2 *Jinan Meteorological Administration, Jinan 250021*)

(3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

**ABSTRACT** Based on the database of the 210 ground meteorological stations over China from 1961 to 2008, the empirical relation between ground water vapor pressure and precipitation is discovered. Then the equations used for estimating ground water vapor pressure based on precipitation are developed. The precipitable water vapor is one of the important parameters for astronomical site survey. With this study, we can develop a new method to obtain the precipitable water vapor of specific area or over China with the only available precipitation. The results show that the relation is quite stable in different seasons. The calculated water vapor pressure is well consistent with the practical measurements, and the calculated precipitable water vapor corresponds well with the local long-term average.

**Key words** atmospheric effects, methods: statistical, methods: data analysis