

甘肃省空中水汽含量、水汽输送的时空分布特征

刘世祥 杨建才 陈学君 刘治国 董安祥

(兰州中心气象台,730020)

提 要

利用甘肃省各探空站历年的高空资料,通过计算空中水汽含量和水汽通量,对其气候特征、水汽的来源或输送进行分析。结果表明,空中水汽含量和水汽输送夏季较多,冬季较少,南部较多,北部较少;2~7月是水汽含量的增长期,8月至次年1月是递减期;输送水汽的源地主要有孟加拉湾及周边海域、南海和东海海域、青藏高原、四川盆地及周边地区;输送水汽的路径主要有中层西南路径、中低层偏南路径以及东南路径。

关键词: 水汽含量 水汽输送 气候特征

引 言

本文利用甘肃省各高空站(高空站地理分布见图1)30年逐日的高空资料,通过计算空中水汽含量和水汽通量,对空中水汽资源、水汽输送的季节变化和地理分布气候特征进行分析,对甘肃大降水天气过程的水汽来源、水汽输送、以及有利的天气形势和天气系统进行讨论,其目的是为甘肃省人工增雨提供必要的理论依据。

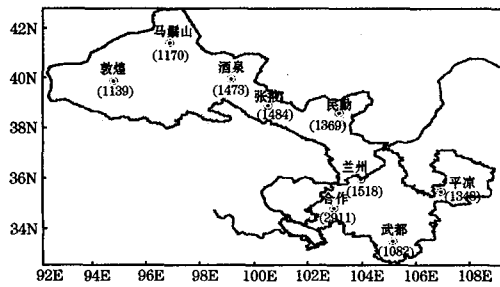


图1 甘肃省各探空站分布(括号内为海拔高度)

1 空中水汽含量的分布与变化特征

水汽含量是指一定体积内的水汽质量,在气象应用中,定义为单位面积某一厚度内湿气团的质量^[3]。依据定义水汽含量为:

$$W = Q_v \times (H_2 - H_1)$$

其中,水汽密度 Q_v 为分析层厚度的平均值, W 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1.1 水汽含量的季节变化和地理分布特征

表1给出了各地各月整层水汽含量分布情况。从平均来看,各月水汽含量在 $3.5 \sim 23.5 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。夏季水汽含量平均为 $21.2 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,高于秋季($10.4 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、春季($8.4 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)和冬季($3.8 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。各月中7月水汽含量最多,1月最少,7月与1月相比,相差 $20.0 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。最南端的武都7月与1月水汽含量相差 $30.6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,最北端的马鬃山7月与1月水汽含量相差 $12.4 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。说明夏季空中水汽含量丰富,冬季匮乏;水汽含量的季节变化幅度南部地区大,北部地区小。春季空中水汽含量由少转多,秋季由多转少,春秋季处于明显的过渡阶段。空中水汽含量的季节变化特征与降水量、降水日数的季节变化特征(见表2)基本一致,不同点在于空中水汽含量最少月份出现在1月,而降水量、降水日数最少月则出现在12月。

甘肃各地平均空中水汽含量在 $6.2 \sim 19.5 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,武都最大,马鬃山最小。武都水汽含量为马鬃山的3倍,说明水汽含

量南部相对丰富,北部相对匮乏,其分布从南向北逐渐递减(不考虑高海拔的合作和马鬃山两站)。从表1中还可以看出,高海拔站与相邻低海拔站相比,水汽含量明显偏小,这是因为空中水汽含量的计算与本站海拔高度的取值有直接关系。

表1 各地各月整层水汽含量(kg·m⁻²)分布

月份	马鬃山	敦煌	酒泉	张掖	民勤	兰州	平凉	合作	武都	平均
1	2.3	3.1	2.9	2.9	2.8	4.1	4.1	2.3	6.6	3.5
2	2.3	3.2	3.1	3.2	3.1	5.0	5.2	2.9	8.1	4.0
3	2.9	4.2	4.1	4.6	4.3	7.2	7.8	4.4	11.4	5.7
4	4.3	6.1	5.6	6.7	6.1	9.9	10.4	6.6	15.8	7.9
5	5.9	9.3	8.5	10.3	9.6	14.2	14.6	10.4	22.8	11.7
6	10.4	15.6	14.6	16.9	16.0	20.8	21.4	14.2	29.8	17.8
7	14.7	20.8	19.9	22.1	22.0	27.3	29.7	18.0	37.1	23.5
8	13.0	18.7	18.5	21.5	22.0	27.1	28.5	16.7	35.0	22.3
9	7.8	12.2	12.0	15.0	14.5	20.2	20.1	13.0	28.4	15.9
10	4.7	7.2	6.6	8.2	7.9	12.0	12.2	7.7	19.4	9.6
11	3.3	4.9	4.2	4.8	4.6	6.9	7.2	4.1	11.7	5.7
12	2.7	3.8	3.4	3.6	3.4	4.6	4.8	2.6	7.3	4.0
平均	6.2	9.1	8.6	10.0	9.7	13.3	13.8	8.6	19.5	11.0
7月-1月	12.4	17.7	17.0	19.2	19.2	23.2	25.5	15.7	30.6	20.0

表2 各地各月平均月降水量、降水日数统计

月份	降水日数/天	降水量/mm
1	2.3	1.6
2	2.6	2.4
3	4.5	7.9
4	5.1	14.4
5	6.8	27.1
6	9.1	37.7
7	10.2	53.8
8	9.3	50.7
9	7.7	32.7
10	5.2	16.4
11	2.4	3.7
12	1.7	1.2
平均	5.6	20.8
7月-1月	7.9	52.2

为消除海拔高度对水汽含量计算的影响,计算分析了500~400hPa水汽含量的分布特征(表略)。可以得出,500~400hPa层水汽含量的季节变化特征与整层水汽含量基本一致,水汽含量从南向北逐渐递减的地理分布特征比整层水汽含量表现的更清楚。

1.2 各地各月水汽含量的增减趋势

各地逐月水汽含量变化率是反映空中水

汽含量月增减趋势的物理量。水汽含量变化率表达式为:

$$D_w = (W_p - W_{p-1})/W_{p-1}$$

式中 W_p 为当月水汽含量, W_{p-1} 为上个月的水汽含量, D_w 为水汽含量变化率。

各地水汽含量变化率计算结果见表3。

表3 各地各月水汽含量增减变化率(%)

月份	马鬃山	敦煌	酒泉	张掖	民勤	兰州	平凉	合作	武都	平均
1-12	-15	-17	-13	-18	-17	-10	-13	-11	-10	-14
2-1	3	3	6	10	11	20	26	26	24	14
3-2	25	32	32	42	38	45	51	53	40	40
4-3	47	43	47	46	42	38	34	50	38	42
5-4	39	53	52	54	58	43	40	56	44	49
6-5	75	68	72	64	66	47	47	37	31	56
7-6	41	33	36	31	38	31	38	26	25	33
8-7	-11	-9	-7	-2	0	0	-3	-6	-5	-4
9-8	-39	-34	-34	-29	-33	-24	-29	-21	-18	-29
10-9	-39	-40	-44	-44	-44	-39	-38	-39	-31	40
11-10	-30	-30	-36	-40	-41	-42	-40	-46	-39	-38
12-11	-17	-21	-18	-24	-25	-32	-32	-36	-36	-27

从平均来看,2~7月是空中水汽含量的增长期,2月平均增长14%,是增长最小的月份,6月平均增长56%,是增长最大的月份,其中,2~6月水汽含量迅速增长,7月增速减缓。8月至次年1月是空中水汽含量的递减期,10月平均递减-40%,是递减最大的月份,其中,8~10月水汽含量在迅速递减,11月至次年1月递减速度放缓。为了与降水量和降水日数各月变化趋势有比较,表4给出了各地各月平均降水量、降水日数月增减变化率,可以看出,降水量、降水日数从元月开始增长,8月开始递减;其增长率最大月出现在3月;这可能与3月份地面开始强烈增温有关;而在递减期内,8~11月在加速递减,11月递减率最大,12月递减速度放缓。空中水汽含量和降水量、降水日数增减变化之间的差异,其因素可能比较复杂,还待今后分析研究。

从各地来看,水汽含量的变化略有差异。在增长期内,河西地区水汽含量2月略有增长,而河东地区2月则有较明显的增长;河东地区的合作和武都水汽增长幅度5月出现最大值,3月出现次大值;兰州和平凉水汽增长

幅度6月出现最大值,3月出现次大值。在递减期内,河东地区水汽含量11月平均递减最大,较全省平均递减最大月份推迟1个月。

表4 平均月降水量、降水日数增减变化率(%)

月份	降水日变化	降水量变化
1-12	31	39
2-1	14	47
3-2	73	231
4-3	15	82
5-4	33	88
6-5	34	39
7-6	12	43
8-7	-9	-6
9-8	-17	-36
10-9	-23	-50
11-10	-54	-77
12-11	-28	-69

2 空中水汽通量的分布特征

水汽通量是反映空中水汽输送的特征量,表示单位时间内流经与风向正交的某一厚度气柱截面的水汽量^[2],计算表达式为:

$$W_q = \frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} gVdp$$

其中, W_q 为水汽通量,单位 $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$ 。 V 为风矢量, q 是比湿。

2.1 空中水汽输送的季节变化和地理分布特征

表5给出了各地各月整层水汽通量的分布情况。平均来看,各月水汽含量在 $3.0 \sim 6.7g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$ 之间。夏季水汽通量平均为 $6.5g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$,高于秋季($5.2g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$)、春季($4.1g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$)和冬季($3.1g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$)。各月中8月水汽通量最大,1月和2月最小。8月水汽通量是1月的2.2倍,说明夏季空中水汽输送较强,冬季较弱;春季水汽通量输送由弱转强,秋季由强转弱。

甘肃各地月平均水汽通量在 $4.2 \sim 5.7g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$ 之间,平均为 $4.7g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$ 。陇东和南部地区水汽输送量较大(不考虑高海拔的合作),其次在河西中东部;甘肃中部和河西西部地区水汽输送量较小。在盛夏7、8月,河西平均水汽通量略大于河东,在其他月中河东各地水汽通量基本上大于河西。

通过计算分析500~400hPa水汽通量的分布特征(表略),可以得出,在消除海拔高度对水汽通量计算的影响后,水汽通量分布表现出明显的从南向北逐渐递减态势。

表5 各地各月整层水汽通量(全通量)分布($g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$)

月份	马鬃山	敦煌	酒泉	张掖	民勤	兰州	平凉	合作	武都	平均
1	2.0	2.0	2.4	1.9	2.2	2.2	2.8	2.2	3.0	2.3
2	1.9	2.1	2.3	2.0	2.2	2.1	2.8	2.4	3.1	2.3
3	2.1	2.5	2.8	2.5	2.5	2.3	3.2	3.1	4.0	2.8
4	3.2	2.8	3.6	3.5	3.7	3.1	4.2	3.6	4.2	3.5
5	3.3	2.8	3.4	4.0	3.8	4.5	4.9	5.0	5.8	4.2
6	4.4	4.1	4.9	5.8	5.1	5.8	6.2	6.4	8.2	5.6
7	6.3	6.5	6.6	7.1	5.9	4.9	6.3	5.4	6.0	6.0
8	6.2	6.1	6.6	7.4	6.2	5.0	6.4	5.8	5.9	6.1
9	4.4	4.6	5.3	5.7	5.3	5.0	6.3	6.1	6.8	5.5
10	3.6	3.6	3.6	3.5	4.2	3.9	6.0	4.7	6.2	4.3
11	3.3	3.6	3.5	2.8	3.4	3.1	4.0	3.1	4.4	3.4
12	2.7	2.9	2.9	2.5	2.9	2.5	3.1	2.3	3.1	2.7
平均	3.6	3.6	4.0	4.1	4.0	3.7	4.5	4.2	5.0	4.1
7月-1月	4.3	4.4	4.2	5.2	3.7	2.7	3.5	3.1	3.0	3.7

注:“—”表示各月各站水汽通量最低值;“~”表示各月各站水汽通量最大值

从各地各月来看,各地水汽通量的季节变化基本上与平均状况一致。但水汽输送最低月份一部分地方出现在1月,另一部分地方出现在2月,这种时间上的差异并没有明显的区域分布特征。水汽通量最高值出现时间却有一定的地域分布,北部的马鬃山和敦煌出现在7月,中部的兰州和南部的合作、武都出现在6月,河西的酒泉、张掖、民勤和东部的平凉出现在8月,为何出现这样的分布还待今后研究。从7月和1月水汽通量差值看,河西地区差值较大,河东地区差值较小,张掖差值最大,兰州差值最小。

2.2 水汽通量u、v分量的季节变化和地理分布特征

水汽输送具有方向性,因此,分析水汽通量u(东西向)、v(南北向)分量的分布特征,可以加深对空中水汽资源的认识。

通过计算水汽通量u、v分量,可以看到,各地各月整层水汽通量u分量(表略)值较大,基本上接近全通量值,在水汽输送中起主导作用,主要向东输送;水汽通量u分量的季

节变化和地理分布特征与全通量基本一致。整层水汽通量 v 分量(见表6)值较小,平均向南输送。夏季水汽通量 v 分量为 $1.2\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,高于春季($1.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)、秋季($1.0\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和冬季($0.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)。其中,6月水汽通量 v 分量平均向南输送最大,为 $2.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,而6月也是雷阵雨、冰雹等强对流天气最多的时候。2月水汽通

量 v 分量最小,为 $0.5\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从表6中还可看出,张掖、民勤、兰州等地水汽通量 v 分量较其它地区大,可能是这些地区偏北风较其他地区更明显的原故。另一点是位于陇东南地区的武都和平凉7月和8月水汽向北输送大于向南输送,这也说明盛夏季节在偏南风的引导下,向甘肃河东地区输送的水汽较为明显。

表6 各月整层水汽通量 v 分量分布($\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
马鬃	-0.6	-0.5	-0.4	-1.1	-1.5	-1.3	-1.0	-0.2	-0.7	-0.7	-0.9	-0.8	-0.8
敦煌	-0.1	-0.1	-0.2	-0.6	-1.1	-1.1	-0.5	-0.8	-0.7	-0.1	0.0	-0.1	-0.5
酒泉	-0.9	-0.7	-0.6	-1.0	-0.9	-1.4	-1.0	-0.9	-1.2	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
张掖	-0.9	-0.8	-0.8	-1.6	-1.7	-2.4	-2.2	-2.2	-2.2	-1.3	-1.2	-1.0	-1.5
民勤	-1.0	-0.9	-0.7	-1.5	-1.9	-2.3	-1.8	-0.9	-1.9	-1.7	-1.3	-1.5	-1.4
兰州	-0.5	-0.4	-0.3	-0.8	-1.9	-3.3	-2.0	-1.3	-1.6	-1.0	-0.5	-0.7	-1.2
合作	-0.5	-0.5	-0.5	-1.2	-1.4	-2.2	-1.3	-1.3	-1.9	-0.8	-0.8	-0.7	-1.1
平凉	-0.7	-0.6	-0.1	-1.6	-1.8	-2.1	1.9	1.8	-0.7	-1.5	-1.1	-0.8	-0.6
武都	-0.6	-0.2	-0.5	-1.3	-1.7	-2.6	0.2	0.6	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7
平均	-0.6	-0.5	-0.5	-1.2	-1.5	-2.1	-0.9	-0.6	-1.3	-0.9	-0.8	-0.8	-

3 甘肃降水天气过程的主要水汽源地和输送路径

空中水汽资源来自两方面:其一,来自本地下垫面的蒸发;其二,来自大气的输送。甘肃多高山、丘陵、沙漠、戈壁,植被稀少,气候干燥,下垫面蒸发的水汽十分有限,因此,降水过程中水汽来源主要靠外来大气输送。

输送水汽的初始源地可追溯到海洋上。向包括甘肃在内的整个西北东部地区输送水汽的源地主要有两个:一个是孟加拉湾及周边海域,另一个是南海和东海海域^[5]。

夏季,上述海面的水汽可以源源不断地被直接输送到西北东部降水区;但在大多数情况下,上述海域的水汽首先被输送到偏南方向的某一陆域,在地形和流场的作用下集聚起来,成为一巨大的陆地“水汽库”或水汽中转站。在适当的环流形势条件下,这些陆地“水汽库”的水汽便被输送到甘肃以及整个西北东部降水区。这是西北东部地区降水最多见和更直接的水汽源地。

四川盆地及周边地区经常是孟加拉湾水汽绕高原北上,或南海、东海海域水汽北上的

汇聚地。在一定的环流形势条件下,四川盆地及周边地区水汽继续向北输送,成为向西北东部降水区直接输送水汽的源地^[4,5]。

位于甘肃上游的青藏高原,是江河的发源地,高原湖泊、沼泽、冰川、积雪较多,降水次数也多,近地面层空气相对比较湿润。另一方面,高原上游地区有低值系统发展或东移,将暖湿水汽带入高原腹地,或者由西南季风携带阿拉伯海及印度洋的水汽漂移到高原地区。高原上水汽虽没有中低层的四川盆地及周边地区的水汽丰富,但高原上空风速较大,水汽输送占有很大比重。经统计指出,500hPa和700hPa在多雨时段水汽的净输送量所占比重基本是一致的^[5],说明来自高原水汽对西北东部地区的降水来说具有特殊作用。还有一点是在降水天气过程中,预报员对高原上空西南气流的形成、云团的发展和云带的移动等所给予的特别关注,这也说明了高原水汽和水汽输送对西北东部地区降水的重要作用。高原水汽在受到高原下垫面加热后具有暖湿特性。在东高西低天气形势下,高原近地面层暖湿水汽被输送到西北东

部降水区,使青藏高原成为向西北东部降水区直接输送水汽的源地。

4 总结与讨论

(1)甘肃省空中水汽含量夏季丰富,冬季匮乏,春季空中水汽含量由少转多,秋季由多转少;水汽含量南部相对丰富,北部相对匮乏,从南向北逐渐递减;冬季和夏季水汽含量差值南部地区大,北部地区小。

(2)2~7月是水汽含量的增长期,8月至次年1月是递减期,其中,2~6月水汽含量是加速增长,7月增速减缓。8~10月水汽含量在加速递减,11月至次年1月递减速度放缓。

(3)空中水汽输送夏季较强,冬季较弱,南部相对较强,北部相对较弱;春季水汽通量输送由弱转强,秋季由强转弱;冬季和夏季水汽通量差值北部地区略大于南部地区。

(4)向甘肃输送水汽的源地主要有两个海洋水汽源地和两个陆面水汽源地,分别是孟加拉湾及周边海域,南海和东海海域,青藏高原和四川盆地及周边湿润区。

从以上分析得出,空中水汽含量和水汽输送具有明显的季节变化和地理分布特征;从时空分布特点看,夏季空中水汽含量和水汽输送较多,是进行人工增雨效果最好的季

节,其次是春季和秋季。以农业需水抗旱为主的甘肃省,在春秋季节进行人工增雨其意义更大。3月份全省各地空中水汽已有明显增长,降水量也有大幅度的增长,因此,春季从3月开始进行人工增雨最好;2月河东地区空中水汽也有明显增长,如果考虑进行冬季人工增雪,则2月较好。

从水汽源地和输送路径看,高原水汽输送在对流层中层,四川盆地及周边湿润区水汽输送在对流层中低层,在有利的降水天气形势下,两个水汽源地同时从不同的高度向西北东部降水区输送水汽,增加降水区云层厚度,利于云滴增长和降水量的增加。因此,西北东部地区成为利用高炮、飞机进行人工增雨作业最好的地域。

参考文献

- 1 李尚成,杨珍贵,丁瑞津等. 定西大气水汽资源分析. 甘肃气象,1993,11(1):15~17.
- 2 朱乾根. 天气学原理. 北京:气象出版社,1992:328~329.
- 3 张存,周毓荃. 人工影响天气优化技术方案. 北京:气象出版社,2000:33~35.
- 4 白肇焯,徐国昌. 中国西北天气. 北京:气象出版社,1988:215~218,234~250.
- 5 西北暴雨编写组. 西北暴雨. 北京:气象出版社,1992:39~42.

The Temporal-spatial Distribution of Vapor Content and Vapor Transportation of Gansu Province

Liu Shixiang Yang Jiancai Chen Xuejun Liu Zhiguo Dong Anxiang

(Lanzhou Central Meteorological Observatory, Gansu Province, 730020)

Abstract

Based on the radiosonde data in Gansu Province, an analysis of the climate character of the vapor content and the vapor flux in the air, and the vapor source or transportation condition is made. As the result, the vapor content and the vapor transportation in the air are more in quantity in summer but less in winter, more in south and less in north. It is the increasing periods from February to July and the decreasing period from August to January. The cradle of transporting vapor mainly contains the Bengal bay, the South China Sea and the East China Sea, the Qingzang Plateau, and Sichuan Basin. The route of transporting vapor mainly includes middle-level southwest path, southerly middle-low-level path and southeast path.

Key Words: vapor content vapor transportation climate