

兰州市空中水汽含量和水汽通量变化研究

刘世祥^{1,2}, 王遂缠¹, 刘碧³, 黄玉霞^{1,2}, 王有生^{1,2}, 蒲肃^{1,2}

(1. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020 2. 甘肃省专业气象台, 甘肃 兰州 730020 ;
3. 重庆市合川县官渡中学, 重庆 合川 401541)

摘 要 利用历年的高空和地面资料, 深入分析了兰州市空中水汽含量和水汽通量的变化特征。结果表明 (1) 夏季空中水汽含量和水汽输送相对较多, 冬季相对较少, 2~7 月是水汽含量的增长期, 9~1 月是递减期, 8 月与 7 月持平, 97% 的水汽集中在 400 hPa 以下; (2) 兰州市空中水汽变化与降水量、降水日数、气温的变化有明显的一致性, 也存在一定的差别; (3) 兰州市空中水汽输送强度中心接近 500 hPa 高度, 冬季水汽日变化最大层位于 700~600 hPa, 这与我国东部地区空中水汽输送高度和边界层水汽日变化特征有明显的区别。

关键词 水汽含量; 水汽输送; 变化特征

中图分类号 P426

文献标识码 A

引 言

兰州处于中国内陆腹地、青藏高原东北边坡的河谷盆地中, 地势崎岖, 植被稀少, 生态环境恶劣, 干旱少雨的气候一直影响着兰州市工农业生产的发展。随着兰州市建设规模的扩大, 水资源紧缺成为经济发展、特别是农业发展的主要制约因素, 在节约用水的倡导下, 积极开辟新的增水途径, 开发空中水资源成为解决河西走廊水资源短缺最有效的途径之一。因此, 探讨、开发和有效利用兰州市空中水资源, 对于西部大开发和兰州市经济的可持续发展都具有重要的理论价值和现实意义。

资源性缺水是兰州市工农业生产最主要的问题, 了解该地区降水特征、大气水的来源及水汽输送等基本问题显得越来越重要。上个世纪后期, 徐淑英^[1]、邹进上^[2]、丁一汇等^[3]先后对我国的水汽输送和水分平衡、水汽含量分布的基本特点、季风区的水汽收支等进行了研究, 取得了重要成果。近几年来, 孙国武^[4]、何金海^[5]、俞亚勋^[6]、任宏利^[7]、刘世祥^[8]等对西北地区水的问题和西北地区水汽输

送的环流特征进行了研究。可以看出他们比较注重大范围水问题的研究, 对局部水资源的研究却比较少。而对局部水汽变化的细微研究, 却恰恰能较好地揭示该地及周边环境的天气气候特点, 因此有必要对兰州市空中水汽的变化特征进行研究。

1 资料与方法

1.1 资 料

选取兰州市 1980~1998 年高空逐日资料和 1971~2000 年地面逐日资料用于分析。

1.2 方 法

引用文献 [9] 中水汽含量和水汽通量的计算方法。

水汽含量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, 计算表达式为:

$$W = Q_v \times (H_2 - H_1) \quad (1)$$

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

水汽含量变化率: 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:

$$D_W = (W_p - W_{p-1}) / W_{p-1} \quad (2)$$

式中 W_p 为当月水汽含量, W_{p-1} 为上一个月的水汽含量, D_W 为水汽含量变化率, 即本月与上月相比水汽含量的变化, 实际上就是指本月的水汽变化情况。

水汽通量: 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, 计算表达式为:

$$W_Q = \frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} q \bar{V} dp \quad (3)$$

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

2 水汽含量的季节变化

表 1 兰州 08 时水汽含量分布(单位 $kg \cdot m^{-2}$)

Tab. 1 The distribution of water vapor content at 08:00 over Lanzhou city

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
300 ~ 250 hPa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
400 ~ 300 hPa	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1
500 ~ 400 hPa	0.3	0.3	0.5	0.7	1.1	1.6	2.2	2.1	1.5	0.8	0.4	0.3
600 ~ 500 hPa	0.5	0.6	0.9	1.3	1.9	2.7	3.6	3.5	2.6	1.5	0.8	0.6
700 ~ 600 hPa	1.1	1.3	1.9	2.5	3.4	5.0	6.8	6.7	4.9	3.0	1.8	1.2
地面 ~ 700 hPa	2.1	2.6	3.7	5.2	7.3	10.7	13.5	13.6	10.5	6.5	3.8	2.4
整层合计	4.1	5.0	7.2	9.9	14.2	20.8	27.3	27.1	20.2	12.0	6.9	4.6

3 水汽含量的日变化特征

兰州市地处内陆深处, 昼夜温差变化较大, 空中水汽变化也大。表 2 给出了兰州各月各层和整层 08 时与 20 时水汽含量的差值。从整层看, 08 时水汽含量大于 20 时, 其中 5 ~ 7 月日变化较大, 差值在 $2.0 \sim 2.1 kg \cdot m^{-2}$ 之间, 1 月和 12 月日变化最小, 为 $0.4 kg \cdot m^{-2}$ 。从各层看, 500 hPa 以下各层水汽含量的差值较大, 500 hPa 以上各层水汽含量的差值很小。在 500 hPa 以下各层和整层水汽含量 08 时大于 20 时可能与大气层结的稳定性关系比较密切。在没有外来水汽输送的情况下, 大气中水汽主要来自地面土壤和植被的蒸发。下午到傍晚时段, 由于太阳辐射强, 大气层结相对不稳定, 水汽在对流和湍流的作用下向高处和远处扩散, 使近地面水汽明显减少, 空气较为干燥。而清晨时段大气层结相对稳定, 从土壤和植被蒸发出的水汽集中在近地面, 使清晨时段空中水汽含量相对大一些。夏季水汽含量日较差大, 冬季日较差小, 这与季节温度有关, 夏季气

表 1 给出了兰州市 08 时各月各层和整层平均水汽含量。从整层看, 夏季水汽含量最多, 平均为 $25.1 kg \cdot m^{-2}$, 占 47.3%; 依次是秋季为 $13.0 kg \cdot m^{-2}$, 占 24.5%; 春季为 $10.4 kg \cdot m^{-2}$, 占 18.8%; 冬季最少, 为 $4.6 kg \cdot m^{-2}$, 占 9.3%。各月中 1 月份水汽含量最少, 7 月水汽含量最多, 分别为 $4.1 kg \cdot m^{-2}$ 和 $27.3 kg \cdot m^{-2}$, 7 月水汽含量是 1 月的 6.6 倍, 8 月略低于 7 月, 春季水汽含量由少转多, 秋季由多转少, 处于明显的过渡期。在各高度层上, 水汽含量皆以夏季最为丰富, 春、秋季次之, 冬季最少。空中水汽含量的这种季节变化特征与降水量、降水日数、月平均气温的季节变化基本一致(表略)。

温高, 热容量大, 空中水汽含量的变化也大, 冬季则相反。500 hPa 以上各层由于水汽含量较小, 其变化再不作讨论。

在对流层中低层, 特别是地面 ~ 700 hPa 和 700 ~ 600 hPa 冬季和夏季水汽日变化存在明显的差异。夏季地面 ~ 700 hPa 水汽含量差值最大, 随高度上升而递减, 冬季 700 ~ 600 hPa 水汽含量差值最大, 这种异常变化可能与冬季边界层大气高频出现的逆温有较大关系。夏季地面气温高, 降水多, 植被多, 水汽含量多, 近地层水汽的日变化就大。冬季大气层结较稳定, 兰州市受盆地屏障效应、山峰加热效应、山谷冷湖效应、以及污染物为主的气溶胶加热效应等影响, 边界层内逆温层发生频率高达 96%, 厚度厚, 强度强, 逆温层顶高度基本上位于 700 ~ 600 hPa, 逆温层顶温度高, 水汽的日变化就大, 这可能就是冬半年日变化最大层出现在 700 ~ 600 hPa 的原因。这与我国东部地区边界层水汽日变化特征有明显的不同。

图 1 给出了兰州市各月各层和整层 08 时与 20 时水汽含量的差值与 20 时水汽含量的百分比变化。

可以看出, 全年整层水汽含量平均日变化百分

表2 兰州各月各层和整层水汽含量08与20时差值(单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
 Tab.2 The difference of water vapor content at 08 00 and 20 00 over Lanzhou city

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
400~300 hPa	0.02	0.02	0.02	0.00	-0.02	-0.07	-0.07	-0.04	-0.01	0.02	0.01	0.01
500~400 hPa	0.05	0.05	0.06	-0.02	0.00	-0.10	-0.15	-0.07	-0.06	0.05	0.04	0.04
600~500 hPa	0.11	0.10	0.12	0.08	0.13	0.05	0.01	0.02	0.03	0.13	0.11	0.09
700~600 hPa	0.23	0.23	0.27	0.41	0.44	0.57	0.66	0.32	0.39	0.40	0.34	0.23
地面~700 hPa	0.04	0.25	0.36	0.93	1.47	1.71	1.67	0.96	0.90	0.49	0.33	0.07
整层合计	0.4	0.7	0.9	1.4	2.0	2.1	2.1	1.2	1.2	1.1	0.8	0.4

率为11.3% ,其中春季日变化百分比最大 ,平均为15.3% ,依次是冬季(12.3%)、秋季(9.7%)和夏季(8.0%)。从各层看 ,在4至5月地面~700 hPa层水汽含量日变化百分比最大 ,可能与春季昼夜气温变化较大有一定关系 ,在冬半年700~600 hPa层水汽含量日变化大于夏半年 ,这同样可能与冬季边界层大气逆温出现频率较大有关。

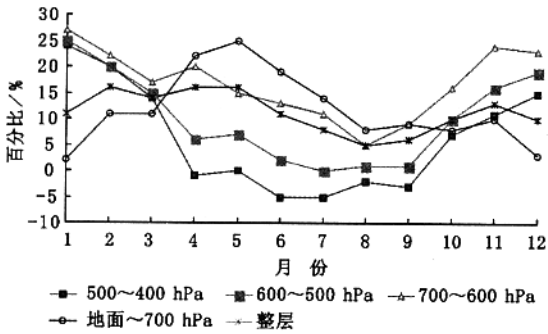


图1 各层08与20时水汽含量差值与20时水汽含量百分率
 Fig.1 The difference of water vapor content at 08 00 and 20 00 of each layer and the percentage of water vapor content at 20 00 over Lanzhou city

4 水汽含量的月变化特征

为了与月降水量、降水日数、气温变化进行比较分析 ,图2给出了各月整层平均空中水汽含量、降水量、降水日数逐月增减变化率和气温逐月的增减变化(本月与上月的气温差)。从图2看出 ,空中水汽含量从2月开始增长 ,2~7月为增长期 ,8月基本与7月份持平 ,其中春季水汽含量增长较快 ,为42% ,其次是夏季。在3月和6月出现2个峰值 ,分别为44%和47%。9月至下年1月是空中水汽含量的递减期 ,11月递减最快为-41% ,其中8~10月加速递减 ,11~1月减速逐渐减缓。降水量从1月开始增长 ,较空中水汽含量提前1个月 ,1~8月为增长期 ,其中春季增长特快 ,3月和5月出现2个峰值 ,分别为254%和124%。9~12月是降水量的递减期 ,其中11月递减最大。降水日数与降水量一样从

1月开始增长 ,较空中水汽含量提前1个月 ,1~8月为增长期 ,分别在1月、3月和5月出现3个峰值 ,分别为81%、92%和44%。9~12月是降水日数的递减期 ,11月递减最大为73% ,9~11月是加速递减 ,12月递减放缓。气温从2月开始升温 ,与空中水汽开始增长月一致 ,8月开始降温 ,其中3月和4月气温增长最快 ,11月递减最快。可以看出 ,以上4种要素变化具有明显的共性 ,如3月是共同的增长峰值月 ,11月是共同的递减峰值月 ,说明3~10月是进行人工增雨最好的季节。但也存在明显的差异 ,主要表现在开始增长月和增长最大月的不一致性 ,说明空中水汽的变化不是影响降水量和降水日数变化的唯一因素。

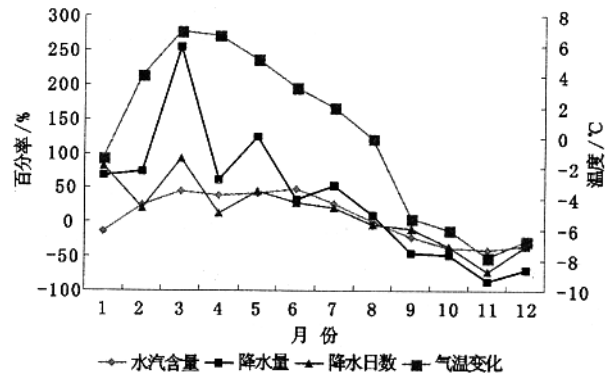


图2 空中水汽含量、降水量、降水日数的月际变化率和气温的变化(与上月的气温差)
 Fig.2 The monthly change rate of water vapor content, rainfall and rainy days and the change of temperature

我们把这一变化与甘肃河西地区张掖市空中水汽含量、降水量和降水日数的变化进行了比较。张掖市空中水汽含量、降水量、降水日数在3月开始出现明显的增长 ,6月增长最快或较快 ,10月递减最快 ,这与副热带西风急流6月北抬上高原和10月从高原南撤^[10]对应时间比较好 ,说明副热带西风急流和青藏高原对河西地区空中水汽输送有重要的影响。而兰州市空中水汽含量、降水量、降水日数的变化趋势与副热带西风急流季节变化似乎是对应关系

不明显,这可能说明甘肃中部地区来自西风带的水汽输送已不是主要的,而来自其它方向的水汽输送,如对流层中层高原上空西南气流的水汽输送等可能占据了重要位置。

兰州市及中部大部分地方 3 月是地面平均气温从零下到零上的转换时期,地面积雪融化,土壤解冻,地表水分蒸发的时间比较集中,空中水汽相对较多,这可能使空中水汽含量、降水量、降水日数在 3 月表现出明显增长的原因。4 月,气温大幅上升,地面积雪已融化,表层土壤已基本解冻,地表水分蒸发已变得很小,此时空中水汽、降水量和降水日数增幅较小。降水少,天气干燥,裸露地表上的干浮土增加,只要有冷空气活动,大风沙尘天气跟随而来,这也是春季 4 月兰州市强和特强沙尘暴天气比较多的一个重要原因。5 月降水量、降水日数再次加快增长,可能与副热带西风急流开始北抬,空中水汽输送得到加强有关。

表 3 兰州 08 时水汽含量百分比(单位:%)

Tab. 3 The percentage of water vapor content at 08 00 over Lanzhou city

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
400~300 hPa	2	2	2	2	3	3	4	4	3	3	2	2
500~400 hPa	7	6	7	7	8	7	9	8	8	7	5	6
600~500 hPa	13	13	13	13	14	12	14	13	14	13	11	12
700~600 hPa	27	26	26	26	25	24	24	25	24	24	26	26
地面~700 hPa	50	52	51	51	50	53	49	49	50	53	55	53

6 空中水汽输送的分布特征

从兰州市整层水汽通量看,夏季水汽通量平均为 $5.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,高于秋季($4.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、春季($3.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和冬季($2.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。其中 6 月水汽通量最大,2 月最小,分别为 5.8 和 $2.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 3 给出了兰州市各月各层水汽通量。从各层看,水汽输送皆以夏季最多,春、秋季次之,冬季最少。3~10 月空中水汽输送强度中心基本上位于 500 hPa 高度,而到冬季空中水汽输送强度中心层则下降到 600~500 hPa,其它各层水汽输送以最强层为轴心向下或向上逐渐减小。同样,把兰州市空中水汽输送强度中心高度变化与甘肃河西地区张掖市进行比较。张掖市夏季空中水汽输送强度中心在 500 hPa 高度,春秋季水汽输送强度中心在 600~500 hPa 高度,冬季水汽通量强度中心接近 700~600 hPa 高度。由此看出,在各季节中兰州市空中水汽输送强度中心高度较张掖市要高一些,说明兰州市及甘肃中部地区受青藏高原的影响比河西地区更

5 水汽含量随高度的变化

表 3 给出了兰州市 08 时各月各层与整层水汽含量的百分比。可以看出,在各高度层上空中水汽含量皆以夏季相对丰富,春秋季节次之,冬季相对匮乏。各月各层水汽含量所占比重随高度的增加而迅速减少,绝大部分水汽含量集中在 400 hPa 以下,约占 97% 左右,其中地面~700 hPa 层水汽含量最大,平均占 53%,700~500 hPa 平均占 37%,500~400 hPa 平均占 7%。这说明水汽的贡献主要来自大气低层,特别是近地面层。在同一高度层中各月水汽所占的比重基本上接近,只有 700~600 hPa 夏季所占比重相对小一些,冬季所占比重相对大一些,这可能也与冬季兰州边界层大气逆温出现频率较高有关。

加明显,空中水汽输送不仅夏季受青藏高原的重要影响,冬季也受到青藏高原的明显影响。有关水汽输送高度的问题,文献 [11] 在分析甘肃东部地区水资源分布特征时也曾得到这样类似的结论。兰州市及甘肃中部地区空中水汽输送强度中心位于 500 hPa 高度,这一结果与我国东部地区水汽输送最强中心在 700 hPa 以下高度有明显的区别^[12]。

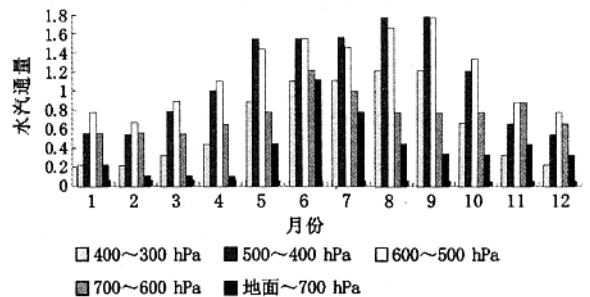


图 3 兰州市 08 时各月各层水汽(全)通量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Monthly water vapor flux at 08 00 of each layer over Lanzhou city

7 总结与讨论

空中水汽含量各月的增减变化与降水量和降水日数的增减变化存在明显的一致性,如3月是共同的增长峰值月,11月是共同的递减峰值月,说明3~10月是进行人工增雨最好的季节。但它们也存在明显的差异,主要表现在开始增长月和增长最大月的不一致性,这也说明空中水汽的变化不是影响降水量和降水日数变化的唯一因素。

兰州市及西北地区由于特殊的地理位置和地形,冬季逆温出现频率较高,造成边界层内水汽日变化最大高度从近地面抬升到700~600 hPa高度,这与我国东部地区边界层内水汽日变化特征有明显不同。

3~10月,空中水汽通量强度中心基本上位于500 hPa高度,而到冬季则下降到600~500 hPa,这一结果与我国东部地区水汽输送最强中心在700 hPa以下高度有明显区别。通过与河西地区比较说明,兰州市及甘肃中部地区受青藏高原的影响比河西地区更加明显,不仅夏季受青藏高原的重要影响,冬季也受到青藏高原的明显影响。

水汽通量输送强度中心位于500 hPa高度这一结果与以往人们认为水汽输送中心位于700 hPa有明显差别。通过分析认为,青藏高原是江河的发源地,高原湖泊、沼泽、冰川、积雪较多,降水频率高,近地面层空气相对比较湿润,加上高原上空太阳辐射强,地面水分蒸发常形成对流和高原云带东移影响西北地区东部,使青藏高原成为向西北东部降水区直接输送水汽的源地。当副热带西风急流配合冷空气在青藏高原上空摆动形成大槽时,槽前西南气流引导高原云带向东北方向输送,直接影响高原东部地区,这说明副热带西风急流和青藏高原对西北东部地区空中水汽输送和天气气候有重要影响。需要特别重视的一点是,在西北东部地区降水预报中非

常关注青藏高原天气系统和高原西南气流的形成与发展,黄河中上游地区区域性大降水过程与高原西南暖湿气流的形成与发展密不可分。在卫星云图上高原云带的形成、发展与东移直接影响西北东部地区,影响范围大,对降水的预示性非常好。另外,祁连山是空中水汽脊区^[7,12],是夏季强对流天气和冰雹产生源地,特别是冷空气沿西北气流南下时,在祁连山形成的中小尺度天气系统直接南下影响下游的兰州市,为兰州市输送水汽,说明具有丰富水资源的祁连山对兰州市的天气气候有直接的影响。

参考文献:

- [1] 徐淑英. 我国的水汽输送和水平衡[J]. 气象学报, 1958, 29(1): 33-43.
- [2] 邹进上, 刘惠兰. 我国平均水汽含量分布的基本特点及其控制因子[J]. 地理学报, 1981, 36(4): 377-391.
- [3] 丁一汇. 季风区的水汽收支[A]. 亚洲季风[M]. 北京: 气象出版社, 1994, 105-113.
- [4] 孙国武. 我国西北地区水的问题综述[J]. 干旱气象, 2004, 22(4): 76-81.
- [5] 何金海, 刘芸芸, 常越. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(1): 10-16.
- [6] 俞亚勋. 中国西北地区大气水分和水汽输送[J]. 气象学报, 2001, 15(2): 133-138.
- [7] 任宏利, 张培群, 李维京, 等. 中国西北东部地区春季降水及其水汽输送特征[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 365-374.
- [8] 刘世祥, 杨建才, 陈学君, 等. 甘肃省空中水汽含量、水汽输送的时空分布特征[J]. 气象, 2005, 31(1): 50-54.
- [9] 张存, 周毓荃. 人工影响天气优化技术方案[M]. 北京: 气象出版社, 2000, 33-35.
- [10] 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在六月和十月大气环流的突变现象[J]. 气象学报, 1958, 29(4): 249-263.
- [11] 俞亚勋, 王劲松, 李青燕, 等. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 149-155.
- [12] 蔡英, 钱正安, 宋敏红. 华北和西北区干湿年间水汽场及东亚夏季风的对比分析[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 14-23.

Trend Analysis of the Water Vapor Content and Its Transport over Lanzhou City

LIU Shi-xiang^{1,2}, WANG Sui-chan¹, LIU Bi³, HUANG Yu-xia^{1,2}, WANG You-sheng^{1,2}, PU Su^{1,2}

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China;

2. Gansu Professional Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China;

3. Guandu Middle Schol, Hechuan 401541, Chongqing, China)

Abstract Based on the data of aerological and surface meteorological observation for many years, the trend of water vapor content and its transport over Lanzhou city were analyzed deeply. Results are as follows: (1) The water vapor content and its transport are relatively more in summer than that in winter, and the water vapor content increases from Feb to Jul, decreases from Sep to Jan, and keeps invariable in Jul and Aug; nearly 97% water vapor content concentrates below the height of 400 hPa; (2) The trend of water vapor content distinctly corresponds to the change of precipitation, rainy days and temperature, but also there are some differences; (3) Over Lanzhou city, the large center of water vapor transport is near the height of 500 hPa, the maximum diurnal variation of water vapor is at the layer of 700~600 hPa in winter, and these are obviously different from those over the east of China.

Key words water vapor content; water vapor transport; trend