

杨茜,李轲,廖代秀,等. 重庆地区空中水资源的时空分布特征[J]. 气象,2010,36(8):100-105.

重庆地区空中水资源的时空分布特征^{* 1}

杨 茜^{1,2} 李 轲¹ 高阳华²

1 重庆市人工影响天气办公室, 重庆 401147

2 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

提 要: 利用1987—2006年重庆及其周边地区11个站的探空资料,通过计算水汽含量、水汽通量等参量,分析了重庆地区上空水汽含量和水汽输送的时空分布特征。结果表明,重庆地区空中水汽含量在夏季最大,冬季最小;南部、西部较多,北部、东部较少。绝大部分的水汽含量集中在500 hPa以下。重庆地区的水汽主要来自西边界的西风水汽输送和南边界的西南风水汽输送;重庆大部分地区上空的水汽输送多以辐合为主,尤其在重庆西部地区更为明显,进行人工增雨潜力较大。

关键词: 水汽含量, 水汽输送, 时空分布

The Spatial and Temporal Distribution of Water Vapor Resources over Chongqing Areas

YANG Qian^{1,2} LI Ke¹ GAO Yanghua²

1 Weather Modification Office of Chongqing, Chongqing 401147

2 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

Abstract: On the basis of sounding data at 11 stations from 1987 to 2006 in Chongqing and its surrounding areas, the spatial and temporal distribution characteristics of water vapor resources in Chongqing areas are analyzed. The results show that the water vapor content in the air is the most in summer but the least in winter. There is more water vapor content in southern and western parts of Chongqing and less in northern and eastern parts of Chongqing. The most of water vapor content is under 500 hPa level of the troposphere. The water vapor transportation is coming mainly from the west and west-south. There is a convergence of water vapor transport in Chongqing, especially in western Chongqing. There is a great potential to the artificial rainfall enhancement in this area, especially the western Chongqing.

Key words: water content in the air, water vapor transport, spatial and temporal distribution

引 言

水资源是维系地球生态环境可持续发展的首要条件,在地一气系统的水循环过程中,空中水资源并没有完全转化为降水降落到地面,空中水汽含量极其丰富,具有一定的人工增雨潜力^[1-4]。合理开发和利用空中水资源对缓解水资源短缺,对于经济社会

可持续发展有重要意义。关于水资源特别是空中水汽含量的研究引起了科学工作者的重视^[5-8],针对不同背景下,分析不同地域条件下水汽含量的分布特征对人工增雨工作起了科学指导的作用^[9-15]。由于特殊的地理地形和天气气候条件,重庆地区的高温干旱频发。特别是2006年夏季,重庆更是遭受了百年一遇的特大伏旱,给当地经济、社会和人民生活带来巨大影响,引起了社会的普遍关注^[16-18]。人工增

* 重庆市科技攻关项目(CSTC,2008AB0015)和重庆市气象局气象科技“短平快”课题“重庆市空中水资源分析、评估以及人工增雨潜力的分析”(200607)共同资助

2008年6月24日收稿; 2009年10月22日收修定稿

第一作者:杨茜,主要从事大气环境及气候变化研究. Email: yangqiancq@126.com

雨是抗旱减灾的重要手段和技术措施之一。因此,开展对重庆地区空中水资源分布和变化特征研究,对于提高重庆市人工增雨的水平具有重要意义。

1 资料及方法

利用重庆及其周边地区 11 个探空气象站 1987—2006 年逐日两个时次探空观测资料,垂直方向从地面至 200 hPa 共 7 个层次(地面~850 hPa、850~700 hPa、700~500 hPa、500~400 hPa、400~300 hPa、300~250 hPa 和 250~200 hPa)。水平方向采用 Cressman 插值法将各站点资料进行空间插值,得到分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格点数据。利用插值后的网格点资料计算重庆地区整层水汽含量、水汽输送通量及水汽输送通量散度等,分析重庆上空水资源时空分布特征及水汽输送特征。

水汽含量是指一定体积内的水汽质量,在气象分析中通常采用式(1)定义为单位气柱中的水汽含量^[19]。

$$w = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_z} q(p) dp \quad (1)$$

其中 g 为重力加速度, p_s 和 p_z 分别代表地面气压和大气顶气压(本文取为 200 hPa), $q(p)$ 代表各层比湿,是由观测的露点温度资料计算得到的。

水汽输送通量和水汽输送通量散度是用来定量表达水汽输送量的基本参数。单位边长整层大气的水汽输送通量 Q 的计算公式^[15]: 纬向水汽输送通量 $Q_u = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_z} qu dp$, 经向水汽输送通量 $Q_v = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_z} qv dp$, 单位为 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ 。水汽输送通量散度 $D_Q = \frac{\partial Q_u}{a \cos \varphi \partial \lambda} + \frac{\partial Q_v}{a \partial \varphi}$, 单位为 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$, a 为地球半径, φ 和 λ 分别为纬度和经度。

2 重庆上空水汽含量的时空分布特征

水汽含量是表征大气可降水量的一个重要参数,空中水汽含量的垂直和水平分布直接反映了一个地区降水状况和水资源的开发潜力。

2.1 时间变化特征

由重庆上空多年平均整层水汽含量的逐月变化(图 1)可见,重庆上空水汽含量的月际变化呈单峰型,从 1 月份到 7 月份的水汽含量逐渐增加,8 月份到 12 月份又逐月减少。7 月份的水汽含量最大,达

到 53.8 mm,其次是 8 月份和 6 月份也较大,都在 45 mm 以上;而 1 月份水汽含量最少,仅为 15.0 mm,2 月份和 12 月份的水汽含量也较小。

水汽含量的逐月变化率能够反映空中水汽增减变化特征(见图 1),重庆上空水汽含量在 2—7 月份是增长期,4 月份和 6 月份的增长率较大,分别为 32.13% 和 29.27%,7 月份的增长率最小,为 12.39%。8 月份至次年 1 月份的水汽含量逐月减少,11 月份的减少率最大,为 -29.32%,8 月份减少率最小,为 -4.55%。

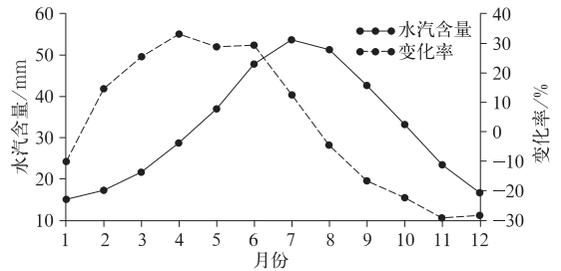


图 1 1987—2006 年重庆单站上空各月平均的整层水汽含量及变化率

Fig. 1 The monthly mean and change rate of water vapor content over Chongqing Station during 1987—2006

由 1987—2006 年重庆上空的年平均整层水汽含量的变化(图 2)可以看到,重庆上空水汽含量在整个时段内呈明显减少的趋势,减少率为 -0.10 mm/a,通过了 0.1 的显著性水平检验。在 1990 年以前,水汽含量值较大,且稳定少变,年平均空中水汽含量在 33.5 mm 左右,而在 1990 年后水汽含量波动明显且呈减少趋势。

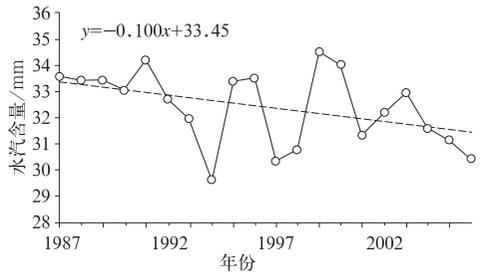


图 2 1987—2006 年重庆单站上空的年平均整层水汽含量(实线)和趋势线(虚线)的变化曲线

Fig. 2 The change curve of yearly mean (solid line) and its trend (dashed line) of water vapor content over Chongqing Station during 1987—2006

表 1 为重庆上空各季节整层水汽含量的平均值、变化率及其相互之间的相关系数,就季节平均水汽而言,季节变化明显,水汽含量在夏季最多,平均为 51.01 mm,冬季最少,为 16.36 mm,秋季和春季分别为 33.14 mm 和 29.14 mm。各个季节的水汽

含量均表现为减少趋势,其中夏季的减少率最大,为 -0.12 mm/a ,秋季和春季次之,冬季的减少率为 -0.07 mm/a ,只有冬季的减少趋势通过 0.1 的显著性水平检验。各个季节水汽含量之间的相关系数表明,春季含水量变化与夏季和冬季的变化比较相似,相关系数分别为 0.5661 和 0.6233,都通过了 0.01 的显著性水平检验。

表 1 重庆各季节的整层水汽含量的平均值、变化率及相互之间的相关系数

Table 1 The seasonal mean, change rate and correlation coefficient between each other of water vapor content over Chongqing Station

季节	平均值 /mm	变化率 /mm·a ⁻¹	相关系数			
			春季	夏季	秋季	冬季
春季	29.14	-0.10	1	0.5661***	0.2447	0.6233***
夏季	51.01	-0.12		1	-0.01744	0.3431
秋季	33.14	-0.11			1	0.1506
冬季	16.36	-0.07*				1

*、**、*** 分别表示通过 0.1、0.05、0.01 的显著性水平检验
*、**、*** 分别表示 correlation coefficients passed the significant level at 0.1, 0.05 and 0.01 respectively

2.2 垂直变化特征

图 3 给出重庆上空年平均水汽含量的逐层垂直分布,水汽含量随高度的增加而迅速减少,绝大部分的水汽含量集中在 500 hPa 以下,地面至 500 hPa 的水汽含量占整层水汽含量的 92.0%,尤其是对流层下层的地面至 850 hPa 和 850 至 700 hPa 的水汽含量较多,分别为 10.98 mm 和 10.71 mm,分别占整层水汽含量的 33.9% 和 33.0%。而 300 hPa 以上高空水汽含量极少,仅占整层水汽含量的 1.1%,

这与以前研究者关于水汽含量主要集中在对流层下层的特征一致^[3,9]。

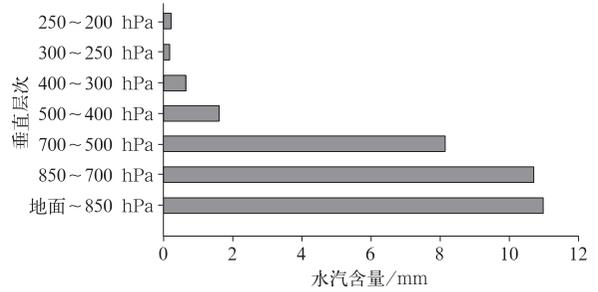


图 3 重庆上空逐层的年平均水汽含量垂直分布
Fig. 3 The vertical distribution of yearly mean water vapor content over Chongqing Station

2.3 空间分布特征

图 4 为重庆及周边地区上空水汽含量各个季节平均的空间分布图,重庆地区春季整层水汽含量(图 4a)在 24~30 mm 之间,由北到南逐渐增加,重庆东北部水汽含量相对较小在 24~26 mm 左右,而重庆中西部与东南部地区上空水汽含量相对较大,在 28~30 mm 之间。夏季整层水汽含量(图 4b)相对春季有显著的增加,重庆上空整层水汽含量达到 46~50 mm,与春季分布不同的是水汽含量最大值区位于重庆西部,达到 50 mm 以上。重庆地区秋季水汽含量(图 4c)在 28~32 mm 之间,重庆西部水汽含量同样较多,在 32 mm 以上。重庆冬季水汽含量(图 4d)在 13~17 mm 之间,重庆东北部水汽含量相对较小,在 13~15 mm 左右。

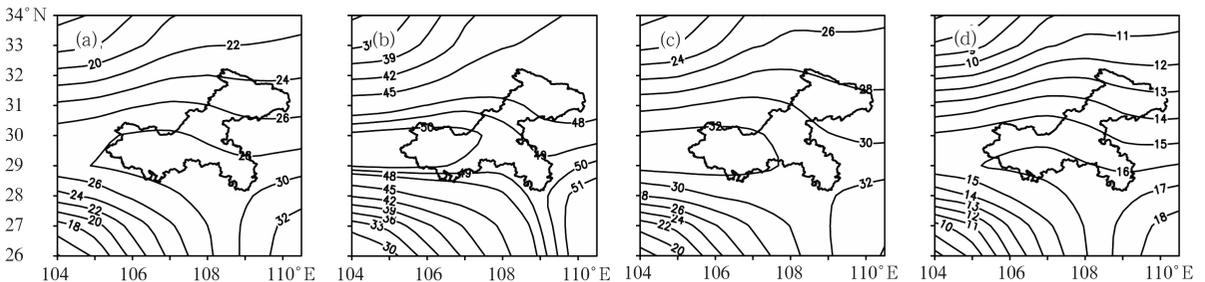


图 4 1987—2006 年重庆及周边地区上空各个季节平均的整层水汽含量空间分布图

(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季(单位: mm)

Fig. 4 The distribution of seasonal mean water vapor content over Chongqing area during 1987—2006
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter (unit: mm)

总体来说,重庆上空整层水汽含量各个季节的空间分布基本呈现西部多,东北部少的特点,水汽含量在夏季最大,水汽最为充沛,秋季其次,春季次之,冬季最小。在夏季、春季干旱期中水汽较为充沛,在有利天气形势下可抓住机会进行人工增雨作业,使空中水汽转换为地面降水,有效缓解干旱,特别是重庆西部地区水汽含量较大,人工增雨潜力较大。

3 重庆上空水汽输送的时空分布特征

3.1 水汽输送通量

水汽输送通量能反映一个地区水汽的来源。图 5 是重庆及周边地区上空各个季节平均的整层水汽通量矢量及纬向水汽通量。春季(图 5a),重庆以西

地区存在着西风水汽输入进入重庆地区,同时重庆以南地区存在大于 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西风偏南的水汽输送从重庆南部进入重庆地区。重庆周边地区上空纬向水汽通量被正值区控制,存在着自西向东的水汽输送,并且由西北向东南的递增,重庆以北地区的纬向水汽通量较小在 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,而重庆以南地区的纬向水汽通量较大在 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。夏季(图 5b),重庆以南地区存在较强的西南风水汽输送,同时重庆以西也存在着西风水汽输送进入重庆,重庆地区的水汽主要来自西边界和南边界。重庆周边地区上空纬向上仍为自西向东的水汽输送,在重庆东南方向水汽输送均大于 $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,重庆以北地区的纬向水汽输送通量在 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。秋季(图 5c),重庆的水

汽来源也来自较强西南水汽输送,但强度相对夏季则有所减弱,仍维持在 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。重庆周边地区上空纬向上仍为自西向东的水汽输送,自北向南递增,重庆西南方向存在着 $90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽输送大值区。冬季(图 5d),重庆以西存在着西风水汽输送,重庆以南存在着较强的西风偏南的水汽输送,重庆大部分地区水汽输送低于 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。重庆周边地区上空纬向水汽输送分布特征与春季类似,整个地区存在着自西向东的水汽输送,并且自西北向东南递增,重庆以北地区的纬向水汽通量较小在 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,而重庆以南地区的纬向水汽通量较大,在 $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,但重庆及以南地区的纬向水汽通量比春季小。

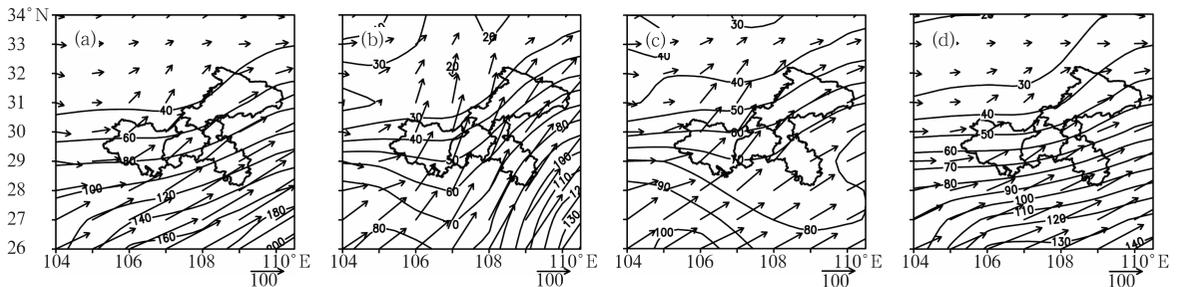


图 5 1987—2006 年重庆及周边地区上空各个季节平均的整层水汽通量矢量及纬向水汽通量
(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 The distribution of seasonal mean water vapor flux vector and zonal water vapor flux over Chongqing area during 1987—2006
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 6 是重庆及周边地区四季的整层经向水汽通量输送图。春季(图 6a),重庆周边地区上空经向水汽通量被正值区控制,存在着自南向北的水汽输送,并且由西北向东南的递增,重庆以西以北地区的经向水汽通量较小在 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,而重庆以南地区的经向水汽通量较大在 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

以上,经向水汽输送易在重庆地区留滞。夏季(图 6b),重庆周边地区上空经向上仍为自南向北的水汽输送,并且由北向南的递增,尤其是重庆东部地区等值线比较平直。在重庆的东南方向存在着正的 $120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽输送大值区,东南部由南到北水汽输送加强,重庆以北地区的经向水汽输送

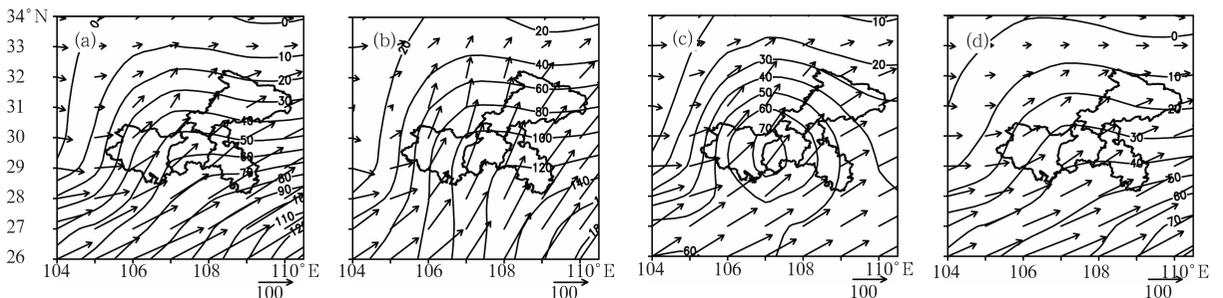


图 6 1987—2006 年重庆及周边地区上空各个季节平均的整层水汽通量矢量及经向水汽通量
(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 The distribution of seasonal mean water vapor flux vector and meridional water vapor flux over Chongqing area during 1987—2006
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

通量 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。秋季(图 6c),重庆周边地区上空经向上仍为自南向北的水汽输送,且在重庆中西部地区存在闭合 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 水汽输送大值中心,水汽极易汇聚,并以该中心向周围水汽输送值减少,秋季经向水汽输送比夏季弱。冬季(图 6d),重庆周边地区上空的经向水汽输送分布特征与春、夏季类似,整个地区存在着自南向北的水汽输送,并且自西北向东南递增,重庆以北地区的经向水汽通量较小在 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,而重庆以南地区的经向水汽通量在 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,但重庆及以南地区的经向水汽通量比春、夏季小得多,说明冬季由南向北输送水汽相对较小。

可见,重庆的水汽来源主要重庆西边界的西风水汽输送,以及重庆南边界的西南风水汽输送,水汽输送方向呈现由西南向东北输送的路径。夏季西南风水汽输送强度最大,水汽尤为充沛;而冬季则以西风控制更为显著,水汽较少。

3.2 水汽输送通量散度

为了解各个方向输送来的水汽能否在重庆地区汇聚,进一步分析重庆周边地区一年四季的整层水

汽输送通量散度(图 7)。春季(图 7a),在四川东部达州地区有明显 $-10 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽辐合中心,重庆除东北部局部地区为水汽辐散外,其余地区均为水汽辐合区,特别是重庆西部地区水汽辐合特征较为明显,水汽易于汇聚。夏季(图 7b),四川东北部的水汽辐合中心强度相对春季有所加强,可达 $-18 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,同时在贵州西北部存在 $-12 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽辐合中心,重庆所有地区都位于水汽辐合区内,说明夏季水汽有利于在重庆上空汇聚。秋季(图 7c),四川东北部水汽辐合中心强度相对夏季有所减弱,为 $-14 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在贵州北部存在水汽通量散度为 $6 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 水汽辐散中心,重庆除东南部为水汽辐散区外,其余地区均为水汽辐合区。冬季(图 7d),重庆大部分地区都是水汽辐合区,水汽极易汇聚,四川东北部强辐合中心强度减少为 $-5 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

总体来说,重庆地区上空水汽输送均以辐合为主,在重庆西部的辐合特征更为明显,水汽易在重庆西部汇聚,具有较大的人工增雨潜力。

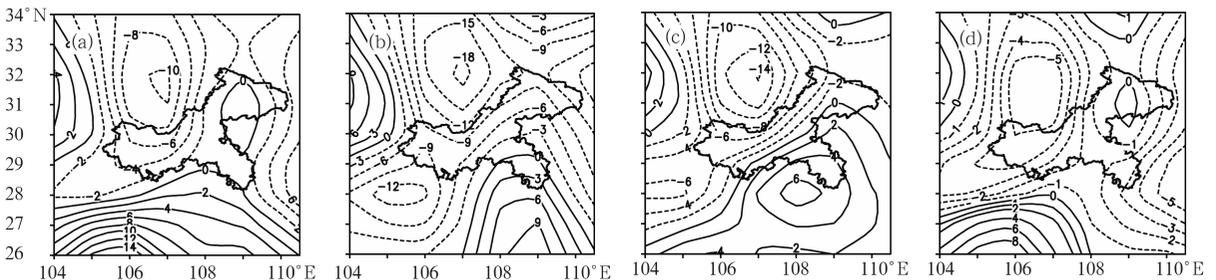


图 7 1987—2006 年重庆上空各个季节平均的整层水汽通量散度空间分布图

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季 (单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 The distribution of seasonal mean water vapor flux divergence over Chongqing area during 1987—2006

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter (unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

4 小结

通过分析重庆地区上空水汽含量和水汽输送的时空变化特征,主要有以下几点结论:

(1) 重庆上空水汽含量的月际变化呈单峰型分布,7月水汽含量最大,可达 53.8 mm ,而1月水汽含量最少为 15.0 mm ;就季节平均而言,水汽含量夏季最多 (51.0 mm),冬季最少 (16.3 mm)。在1987—2006年间,重庆地区上空水汽含量在整个时段内有逐渐减少的趋势。

(2) 重庆上空水汽含量随高度的增加而迅速减少,绝大部分的水汽含量集中在 500 hPa 以下,地面至 500 hPa 的水汽含量占整层水汽含量的 92.0% 。

(3) 重庆上空整层水汽含量空间分布均呈现从西北到东南水汽含量逐渐增加的特征,南部、西部较多,北部、东部较少。

(4) 重庆的水汽来源主要是西边界的西风水汽输送,以及重庆南边界的西南风水汽输送,水汽输送方向呈现由西南向东北输送的路径。夏季西南风水汽输送强度最大,水汽尤为充沛;而冬季则以西风控制更为显著,水汽较少。重庆地区上空水汽以辐合

为主,尤其在重庆西部辐合特征更为明显,水汽易在该地区汇聚,具有较大的人工增雨潜力。

参考文献

- [1] 唐林,王治平,丁岳强,等. 湖南省拓溪水库流域空中水汽资源特征及人工增雨潜力[J]. 气象, 2006,32(5):29-34.
- [2] 胡志晋. 关于空中水资源和人工增雨潜力的估算问题[C]. 北京:中国气象局科教司,1999.
- [3] 郭良才,白虎志,岳虎,等. 祁连山区空中水汽资源的分布特征及其开发潜力[J]. 资源科学,2007,29(2):68-73.
- [4] 邵洋,郑国光. 河南省春季层状云系降水的空中水资源特征分析[J]. 气象,2007,33(7):22-32.
- [5] 杨景梅,邱金桓. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式[J]. 大气科学,1996,20(5):620-626.
- [6] 张学文. 可降水量与地面水汽压力的关系[J]. 气象,2004,30(2):9-11.
- [7] 杨红梅,葛润生,徐宝祥. 用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量[J]. 气象,1998,24(9):8-11.
- [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] 程炳岩,郭渠,孙卫国. 川渝地区降水变化与 Nino3 区 SST 的关系及其稳定性分析[J]. 气象,2010,36(3):27-33.
- [10] 德力格尔,黄彦彬,李仑格. 青海省东北部地区春季空中水资源潜力分析[J]. 高原气象,2002,21(6):622-627.
- [11] 曾光平,方仕珍,林芬. 福建省夏早期间空中水资源及人工降雨条件[J]. 气象,1993,19(11):25-30.
- [12] 杨红梅,何平,徐宝祥. 用 Gps 资料分析华南暴雨的水汽特征[J]. 气象,2002,28(5):17-21.
- [13] 王宝鉴,黄玉霞,王劲松. 祁连山云和空中水汽资源的季节分布与演变[J]. 地球科展,2006,21(9):948-955.
- [14] 宋正山,杨辉,张庆云. 华北地区水资源各分量的时空变化特征[J]. 高原气象,1999,18(4):552-556.
- [15] 杜川利,刘晓东. 中国区域陆地水资源数值模拟分析[J]. 气象,2009,35(8):49-60.
- [16] 刘晓冉,杨茜,程炳岩. 2006 年川渝伏旱同期环流场和水汽场异常特征分析[J]. 气象,2009,35(8):27-34.
- [17] 陈洪滨,范学花. 2006 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾[J]. 气候与环境研究,2007,12(1):100-112.
- [18] 邹旭恺,高辉. 2006 年夏季川渝高温干旱分析[J]. 气候变化研究进展,2007,3(3):149-153.
- [19] 朱乾根等. 天气学原理和方法(第四版)[M]. 北京:气象出版社,2007:636-641.