

文章编号: 2096-1618(2021)03-0330-06

成都地区云水资源分布特征及其与降水的关系

林 丹^{1,2}

(1. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

摘要:为分析成都地区云水资源的分布特征,利用2016年1月至2018年12月的卫星CERES数据和地面自动站降水资料,采用统计分析和对比分析的方法,得到雨日和无雨日的云水资源差别,并针对降水过程进一步分析云水资源分布与降水的关系。结果表明:冰水路径和液水路径月分布特征不一致,冰水路径从3月开始逐渐增加,9月开始减少,液水路径在春季和秋季较多,其次为冬季,夏季最少;雨日的液水路径和冰水路径在各月份均明显高于无雨日;高层和中高层的液水路径和冰水路径高于中低层,尤其雨日时高层和中高层的冰水路径明显高于中低层;大部分降水过程伴随液水路径的增长和冰水路径的减少。当雨量大于2 mm时,降水中的冰水路径明显小于降水前。

关键词:气象学;人工影响天气;云水资源;液水路径;冰水路径

中图分类号:P426.6

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.03.015

0 引言

四川地区云的空间分布具有明显的地域性,总云量的高值区位于四川盆地西部成都、雅安一带^[1],但成都地区降水季节分布不均,冬季和春季降水偏少,7月和8月常出现暴雨,并伴随冰雹、雷暴等致灾性中小尺度天气系统,再加上成都地区城市人口密度大,城市化进程发现迅速^[2],对人工影响天气的需求越来越大。人工影响天气根据自然界降水形成的原理,人为补充某些形成降水的必要条件,促使云滴迅速凝结或碰并增大成雨滴,最终降落到地面,而降水又与空中云水资源关系密切。空中云水资源是指存在与大气中的液态水和固态水总量,也是可以通过人工干预来合理开发利用的水资源^[3]。以往研究表明,层状云平均降水效率大约30%左右,空中云水资源开发潜力较大。因此研究空中云水资源的分布特征对提升人工影响天气服务能力,提高人工影响天气科学性等具有重要意义。

有不少学者研究空中云水资源并得到一些结论,常倬林等^[4]研究表明宁夏地区大气可降水量空间分布是从东南向西北方向递减,季节变化是随夏秋春冬依次递减。张沛等^[5]利用MODIS数据和ECMWF ERA5再分析数据计算得到六盘山地区具有较为丰沛的大气可降水量和水汽输送,且夏季云水路径和云光学厚度均明显大于周边地区,空中水资源相对丰富而降水量不足,空

中水资源具有一定开发空间。刘菊菊^[6]研究中国地区云水量发现云液水含量大值区主要位于四川东部-湖南地区,冰水含量大值区主要位于中东部地区,云水量的空间变化趋势表现为西增东减。王颖等^[7]对祁连山地区云参数的时空特征及其与降水的关系进行了分析,结果表明夏季云水丰富、云发展旺盛且云滴较小,冬季则相反,云参数的空间分布与区域内山脉走向一致,且降水效率与云水路径相关性最好。张沛^[8]综合利用MODIS\CloudSat卫星资料以及再分析资料计算发现,西北地区的水汽通量、大气可降水量、云量和云水路径等参量在夏季明显大于其他季节,但夏季降水效率平均不到50%,云水含量垂直分布趋势均为随着高度增高,液态水含量减小,而冰水含量先增大后减小。从以往研究发现,有关成都地区的研究还比较缺乏,旨在分析近年来成都地区空中云水资源的特征,对今后开展人工影响天气作业提供一些科学依据。

1 数据资料

目前,对空中云水资源的研究主要采用NCEP再分析资料^[9-10]、探空资料^[11-12]、卫星资料^[13-16]和飞机探测资料,但由于飞机探测资料受时间和空间限制,探空资料缺测较多且时间不连续,NCEP再分析资料对云中液水和冰水含量的数据较少,因此主要采用NASA“云与地球辐射能量系统(clouds and the earth's radiant energy system,CERES)”发布的L3级云资料,该资料包含了云粒子有效半径、云水含量、光学厚度等多种云特征参数,适合用来研究中小尺度区域及不同地形条件下的云水

收稿日期:2020-05-11

基金项目:四川省科技厅资助项目(2019YJ0621);四川省留学回国人员科技活动择优资助项目(2018-72);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(省重点实验室2018-重点-13、省重点实验室2018-青年-19)

资源的相关特征。选取2016–2018年CERES逐日和逐3 h数据($1^\circ \times 1^\circ$),包括大气可降水量、液水路径和冰水路径及同一时段地面自动站逐日和逐3 h降水数据。统计成都市龙泉站、温江站、双流站、新都站和郫县站5个地面自动站雨量数据得到雨量平均值,并平均地面自动站周边格点数据得到云参数平均值。

2 结果分析

2.1 降水效率分布特征

在自然条件下,云中降水的转化并不充分,仅有一部分空中水能降落到地面,成为人类可以取用的水资源,不同地区不同季节云的降水效率也有很大差异。空中云水资源的开发需要了解该地区的大气可降水量特征和对应的降水效率。在使用CERES大气可降水量数据前,将温江站2016年逐日探空数据与之进行比较,验证CERES大气可降水量数据在成都地区的适用性。图1给出了基于探空的大气可降水量和卫星的大气可降水量在2016年内的日变化趋势,可以看出两种数据在年内的日变化趋势是大致相同的,年内均呈现出逐渐增加至逐渐减少的趋势,且两种数据在年内的日数值变化区间大致相同,大气可降水量约介于10~70 mm,卫星数据在夏季和秋季略低于探空数据。图2给出了基于探空的大气可降水量和卫星的大气可降水量的散点分布和拟合直线,可以看出两种数据散点分布均匀,拟合情况较好,相关系数较高,具有明显的线性相关特征。从以上比较结果可知,CERES大气可降水量数据能够较好地反映出该地区的变化特征。

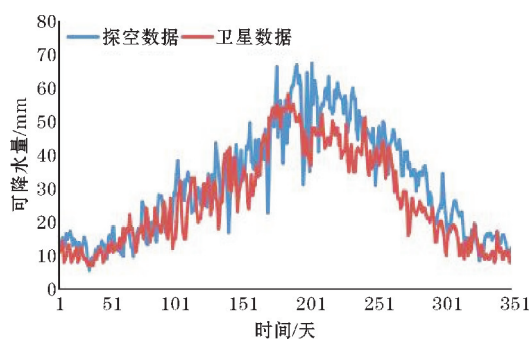


图1 大气可降水量日变化

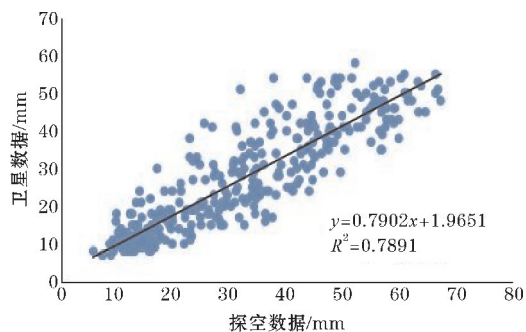


图2 探空和卫星大气可降水量数据散点图

采用降水效率计算公式 $N = R/P \times 100\%$, 其中 R 为2016–2018年成都逐日降水量, P 为同一时段大气可降水量,并按月份统计得到月平均降水效率(图3)。计算发现,一年之中,降水量和大气可降水量的年内月变化趋势基本一致,1–7月逐月增加,8–12月逐月减少,5–9月的降水量和大气可降水量明显高于其他月份。从降水效率来看,5–8月的降水效率最高,超过30%,1月降水效率最低,低于5%,春季降水效率为20.4%,夏季为33.5%,秋季为14.4%,冬季为10.9%。可见,降水效率与降水量和大气可降水量有一定的对应关系,夏季降水效率最高,相应的降水量和大气可降水量也最高,但总的来说自然降水效率较低,特别是春季和秋季,具有很大的开发潜力。

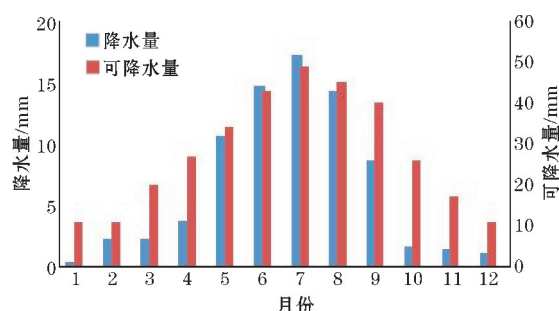


图3 降水量和可降水量月分布

洪延超等^[17]研究表明,降水效率仅为判别指标之一,用来判别开发潜力并不全面,应该尽可能地以云中存在云水量的多少来判别。对于人工影响天气来说,主要是利用云的微物理过程,例如在温度低于0℃的云中存在着大量未冻结的水滴,在云中适当的部播撒催化剂可使水滴转化为冰晶并释放潜热,从而改变云的微物理过程和结构,最终增加降水。因此在研究降水与云参数的关系时,除了大气可降水量,同时需要了解云中液水和冰水含量分布特征,将云中的云水转化成降落到地面的水。

2.2 云水含量分布特征

采用CERES逐日数据,计算成都地区液水路径和冰水路径的月分布特征(图4)。可以看出,冰水路径的月分布特征与大气可降水量分布特征相似,冰水路径从3月开始逐渐增加,9月开始减少,而液水路径的月分布特征与大气可降水量分布特征不一致,春季和秋季较多,其次为冬季,夏季最少。7月和8月是液水路径低值区,也是冰水路径的高值区,说明7月和8月云层发展深厚,云中有大量冰云存在,云顶温度较低,云中含有大量的冰水。10月–次年2月是冰水路径低值区,12月–次年2月液水路径也相对较少。四季而

言,冬季的云水含量偏少,过往研究也表明四川地区总云量和低云量均为冬季最低,云量的分布特征与云水含量分布特征基本一致^[2]。

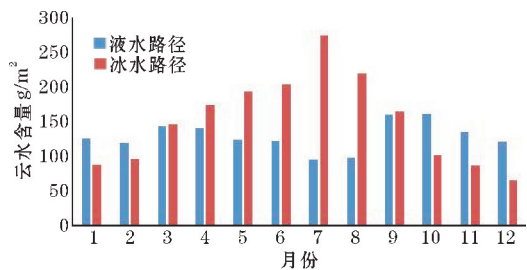
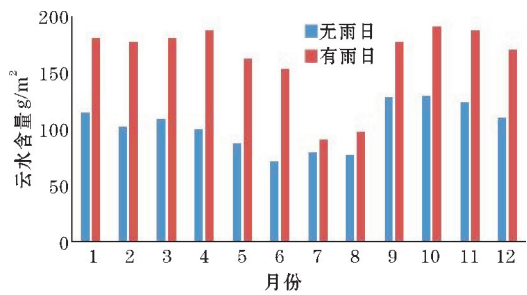
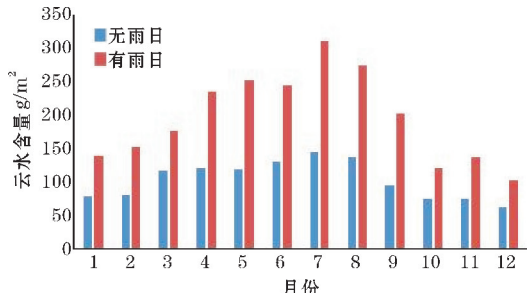


图4 液水路径和冰水路径月分布

科学理论表明有雨必先有云,但是有云不一定有雨,将日雨量数据分成雨日和无雨日两类,若日雨量大于0 mm,则定义为雨日,反之则为无雨日,分别统计两类情况下的云参数值(图5)。从液水路径来看,在雨日,5月开始液水路径略微减少,7月和8月达到最低值,9月-次年4月液水路径维持在170~190 g/m²;在无雨日,5-8月液水路径偏少,低于100 g/m²,其余月份液水路径维持在100~120 g/m²;雨日的液水路径在各月份均明显高于无雨日,差值最大可达90 g/m²。从冰水路径来看,在雨日,4月开始冰水路径增加,超过200 g/m²,在7月和8月达到最高值,随后逐渐减少,12月达到最低100 g/m²;在无雨日,9月-次年2月是低值区,冰水路径均低于100 g/m²,其余月份冰水路径维持在100~140 g/m²,夏季略高;雨日的冰水路径在各月份均明显高于无雨日,差值最大可达160 g/m²。



(a) 液水路径



(b) 冰水路径

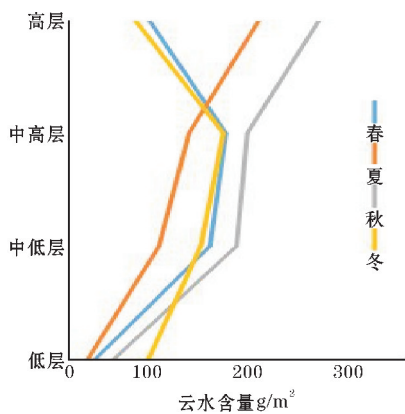
图5 无雨日和雨日云水含量分布

近年来,春季和秋季的干旱发生频率高,持续时间长,影响范围广,春季和秋季抗旱任务艰巨。对云水含量的分析表明,春季和秋季含有较为丰富的液水路径和冰水路径,再加之春季和秋季受西风带短波槽和切变线系统的影响最多,多为大范围的层积混合云系,适合进行人工增雨作业。在夏季,尽管四川省降雹概率最高的地区为高原山区,但由于局地对流多,云系发展快速,成都地区在4-10月也时常出现冰雹。从雨日的冰水路径来看,4-8月降水过程时冰水路径偏大,尤其夏季是冰水路径的高值区,云层发展深厚,为冰雹粒子的生长提供了有利的环境。随着经济社会的发展,人为污染物排放增多,每到秋冬季节特别是入冬以后,空气质量恶化,并随之带来一系列巨大的损失和危害。冬季的雨量少,云水含量也较少,人工增雨更需要抓住每次有利的降温降水天气过程,冬季雨日时的液水路径和其他季节相当,冰水路径低于其他季节,可知冬季云层发展不如其他季节深厚,但降水时云中依然含有较为丰富的液水路径,具有增雨潜力。

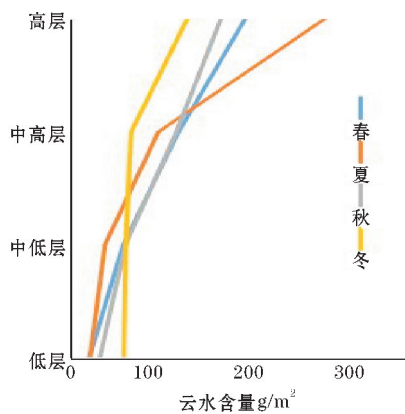
2.3 不同高度层云水含量分布特征

为更深入了解云中不同高度层的云水含量特征,采用 CERES 资料中的逐日分层数据,CERES 对高度层的分类是依据等压面高度,共分为4层,低层为地面到700 hPa,中低层为700~500 hPa,中高层为500~300 hPa,高层为300 hPa以上。计算发现,高层的液水路径在春季和冬季存在缺测值,低层的液水路径和冰水路径在四季中均存在缺测值,这可能和成都的云层分布相关,低层700 hPa以下云量较少,大部分云层分布在3000 m以上,而300 hPa以上大部分为冰云,液水含量较少。

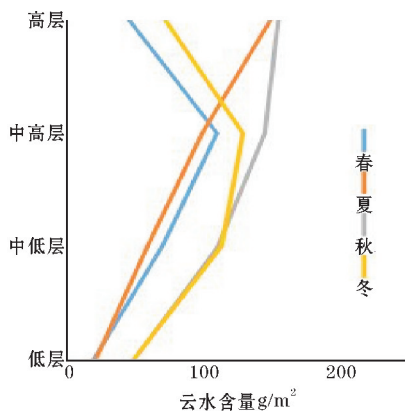
图6和图7为雨日和无雨日时不同高度层的液水路径分布特征。从不同高度层的液水路径来看(图6),总的来说,在春季和冬季,中高层的液水路径高于中低层,在夏季和秋季,云层发展相对春季和冬季更强,云顶高度更高,高层的液水路径最大,其次为中高层和中低层。从雨日的液水路径来看,秋季雨日的液水路径最大,高层液水路径约300 g/m²,中高层和中低层液水路径约200 g/m²,夏季雨日高层液水路径约200 g/m²,中高层和中低层液水路径偏低,春季和冬季雨日液水路径相差不大。比较雨日和无雨日的液水路径发现,雨日的液水路径明显高于无雨日,春季和秋季的雨日液水路径与无雨日相差最大,秋季雨日高层液水路径与无雨日差值最大可达100 g/m²。



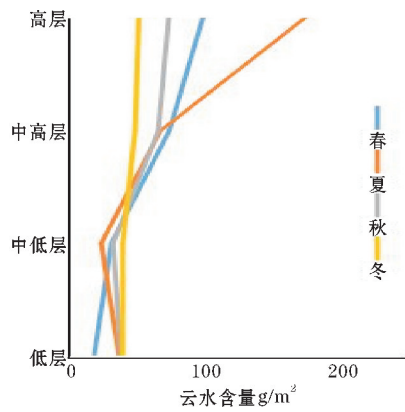
(a)有雨日



(a)有雨日



(b)无雨日



(b)无雨日

图 6 不同高度层液水路径分布

图 7 不同高度层冰水路径分布

从不同高度层的冰水路径来看(图 7),高层冰水路径最大,其次为中高层,中低层冰水路径较少,说明冰云大部分分布在中高层及以上区域,尤其雨日时中高层和高层冰水路径明显高于中低层。从雨日的冰水路径来看,夏季雨日高层冰水路径明显高于其他季节,接近 400 g/m^2 ,冬季雨日的冰水路径最小。比较雨日和无雨日的冰水路径发现,与液水路径特征相似,雨日的冰水路径明显高于无雨日,尤其高层的冰水路径与无雨日相差最大,差值可达 100 g/m^2 ,总的来说,冬季雨日冰水路径与无雨日相差最小,春季和秋季相对较大。

针对人工影响天气作业来说,受作业装备性能的影响,飞机增雨作业大多介于 $3000\sim6000\text{ m}$ 的高度,地面作业大多介于 $3000\sim7000\text{ m}$ 的高度,因此,主要考虑介于 $700\sim300\text{ hPa}$ 的中低层和中高层云水含量。成都地区中低层和中高层含有较为丰富的液水路径,中高层含有较为丰富的冰水路径,尤其是在春季和秋季,与无雨日比较,雨日的云水含量明显偏多,具有较大增雨潜力。云水转化的条件与云水量的分布有关,高层云产生的冰相粒子向低层云降落,低层云提供增长所需的水分^[18],为了使降水效率达到最大,可以在云中引入适量的冰晶核,加快冰水转化过程。

2.4 降水前和降水云中云水含量变化特征

综上所述,雨日和无雨日的液水路径和冰水路径具有显著差异性,因此在研究降水前和降水中的云水含量变化特征时,采用逐 3 h 数据,将产生降水的这一时次作为降水中,前一时次作为降水前,匹配相应的雨量和云参数数据。将 3 h 降水量分为 3 级,小于 1 mm , $1\sim2\text{ mm}$ 和大于 2 mm ,分别计算降水前和降水中的液水路径和冰水路径。成都地区冬季雨量较小,1 月和 2 月没有出现雨量大于 1 mm 时的降水过程,11 月没有出现雨量大于 2 mm 时的降水过程,因此这些月份缺失液水路径和冰水路径数据。

图 8 和图 9 为降水前和降水中液水路径和冰水路径月分布特征。从降水前的液水路径来看,不同等级雨量的液水路径相差不大,雨量介于 $1\sim2\text{ mm}$ 时的液水路径略高。当雨量介于 $1\sim2\text{ mm}$ 时,6–9 月的液水路径低于 200 g/m^2 ,最大值出现在春季的 3 月和秋季的 11 月,液水路径约 230 g/m^2 。当雨量小于 1 mm 和大于 2 mm 时,7 月和 8 月的液水路径最小,约为 $100\sim110\text{ g/m}^2$,其余月份液水路径大多介于 $150\sim200\text{ g/m}^2$ 。从降水前的冰水路径来看,雨量小于 1 mm 时的冰水路

径最小,其次是雨量介于1~2 mm时,雨量大于2 mm时的冰水路径略高。进入4月后冰水路径增加,当雨量小于1 mm时,冰水路径维持在200 g/m²以上,当雨量介于1~2 mm,冰水路径维持在240 g/m²以上,当雨量大于2 mm时,冰水路径维持在260 g/m²,6~8月的冰水路径均大于250 g/m²,其中7月冰水路径最大,高于300 g/m²,直至10月后冰水路径减少。

从降水中的液水路径来看,总的来说,与降水前液水路径分布特征相似,雨量介于1~2 mm时的液水路径略高,雨量小于1 mm时的液水路径最小。当雨量介于1~2 mm时,4~9月的液水路径低于200 g/m²,最大值出现在春季的3月和秋季的10月,液水路径接近250 g/m²。当雨量小于1 mm时,7月和8月的液水路径最小,约为100 g/m²,其他月份液水路径相差不大,约170~200 g/m²。与降水前冰水路径分布特征相似,降水中雨量小于1 mm时的冰水路径最小,其次是雨量介于1~2 mm时,雨量大于2 mm时的冰水路径略高。4~9月,冰水路径偏大,10~3月冰水路径偏小。

比较降水前和降水中的液水路径发现,大部分月份的降水中液水路径大于降水前的液水路径,仅在春季和秋季出现有降水中的液水路径小于降水前的情况,夏季降水前和降水中的液水路径差值较小,低于10 g/m²。比较降水前和降水中的冰水路径发现,大部分月份的降水中冰水路径小于降水前的冰水路径。当雨量小于2 mm时,春季、秋季和冬季均有出现降水中冰水路径大于降水前的情况,当雨量大于2 mm时,降水中的冰水路径明显小于降水前,尤其是夏季和秋季,最大差值可达70 g/m²以上。可知,大部分的降水过程伴随液水路径的增长和冰水路径的减少,这可能是由于成都地区主要以冷云降水为主,冰粒子的贡献较大,高层的冰粒子降落到混合层长大,再下降到液水云层中融化,最后转化为降水粒子降落到地面。洪延超等^[17]研究表明冰粒子的融化对降水有重要贡献,在河南一次大范围锋面云系的数值模拟研究中,70%的降水是冰粒子的贡献,降水几乎完全由冰粒子融化形成。

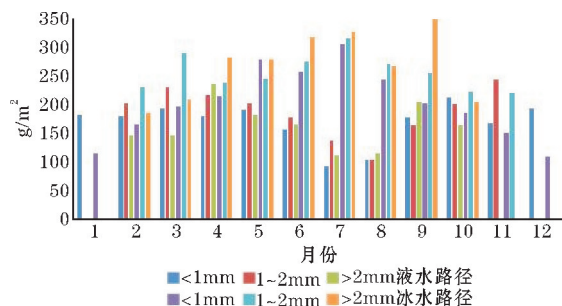


图8 降水前云水含量月分布

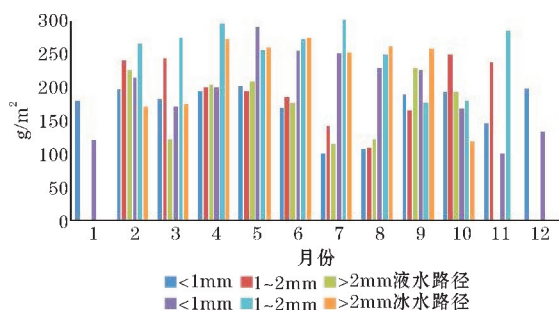


图9 降水中云水含量月分布

3 结论

(1)降水量和大气可降水量的年内月变化趋势基本一致,1~7月逐月增加,8~12月逐月减少。从降水效率来看,5~8月的降水效率最高,1月最小。降水效率与降水量和大气可降水量有一定的对应关系,夏季降水效率最高,相应的降水量和大气可降水量也最高。

(2)冰水路径的月分布特征与大气可降水量分布特征相似,从3月开始逐渐增加,9月开始减少。液水路径的月分布特征与大气可降水量分布特征不一致,春季和秋季较多,其次为冬季,夏季最少。

(3)在春季和冬季,中高层的液水路径高于中低层,在夏季和秋季,高层的液水路径最大,其次为中高层和中低层。四季的高层冰水路径均最大,其次为中高层,中低层冰水路径较少。

(4)雨日的液水路径和冰水路径在各月份均明显高于无雨日,春季和秋季的雨日液水和冰水路径与无雨日相差较大。

(5)比较降水前和降水中云水含量,大部分月份的降水中液水路径大于降水前的液水路径,大部分月份的降水中冰水路径小于降水前的冰水路径。当雨量大于2 mm时,降水中的冰水路径明显小于降水前,尤其是夏季和秋季。

以往研究表明,影响四川盆地降水的主要是高原低值系统、西南涡、副热带高压等系统,降水主要发生在春季、夏季和秋季,冬季降水偏少,春季主要以弱对流为主,夏季主要以对流性降水为主,秋季则各占一半,尤其是春季和秋季出现的大范围层积混合云系适合人工增雨作业,夏季降水偏多,伴随雷暴等极端天气,更多的关注人工防雹作业。结合对成都地区的云水资源分布特征的研究结论,云水资源具备人工影响天气作业潜力,但对人工影响天气作业最佳潜力区判断、可播云系识别依旧比较困难,在以后的研究中需综合利用数值模拟、飞机探测数据等,使人工影响天气作业更科学和有效。

致谢:感谢成都市科技项目(2018-ZM01-00038-SN)对本文的资助

参考文献:

- [1] 王维佳. 四川地区云和空中水资源分布与演变[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 58-65.
- [2] 李昕翼, 肖国杰, 白爱娟, 等. 成都地区降水时空分布变化[J]. 气象科技, 2011, 39(4): 417-422.
- [3] 陈祺, 尹宪志, 张龙, 等. 甘肃省空中云水资源分布及人工增雨潜力评估[J]. 现代农业科技, 2015(1): 243-244.
- [4] 常倬林, 崔洋, 张武, 等. 基于 CERES 的宁夏空中云水资源特征及其增雨潜力研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1112-1120.
- [5] 张沛, 姚展予, 贾烁, 等. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 421-434.
- [6] 刘菊菊. 基于 ERA-Interim 的中国云水量时空特征及成因分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [7] 王颖, 张武, 任娇, 等. 祁连山地区云物理参数特征及其与降水的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 632-640.
- [8] 张沛. 中国西北典型地区空中水资源特征和降水效率研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [9] 于占江, 赵焯, 冯洋, 等. 京津冀空中水资源的时空变化特征及成因[J]. 水电能源科学, 2019(3): 17-20.
- [10] 马学谦, 张小军, 马玉岩, 等. 三江源及其周边地区多源水汽资料对比检验[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 78-87.
- [11] 晋立军, 李培仁, 李俊霞, 等. 一次强降水过程中垂直累积液态含水量的特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1297-1301.
- [12] 朱飙, 张强, 卢国阳, 等. 祁连山区空中水汽分布特征及变化趋势分析[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 935-943.
- [13] 徐诚, 肖天贵. 利用 FY-2E 卫星资料对川西一次强降水过程成因分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2015, 30(5): 481-490.
- [14] 张东艳, 王永前. 基于 MODIS 和 AMSR-E 反演京津冀地区大气水汽含量及比较[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(3): 308-317.
- [15] 王雯璟. 中国西北地区空中云水资源特征的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [16] 桂柯. 运用地基探测与卫星遥感方法研究中国地区大气含水量[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2017.
- [17] 洪延超, 李宏宇. 一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1308-1323.
- [18] 洪延超. 层状云结构和降水机制研究及人工增雨问题讨论[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 937-950.

Distribution Characteristics of Cloud Water Resources and its Relationship to the Rainfall in Chengdu

LIN Dan^{1,2}

(1. Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, 610072, China)

Abstract: In order to analyze the distribution characteristics of cloud water resources in Chengdu, according to satellite CERES data and ground automatic station precipitation data from January 2016 to December 2018, the differences between cloud water resources in rainy and non-rainy days were obtained by using statistical analysis and comparative analysis methods, and the relationship between the cloud water resources distribution and precipitation was analyzed further according to the precipitation process. The results showed that the distribution characteristics of the ice water path and the liquid water path were different in the year. The ice water path gradually increased from march and decreased from September. There was much more liquid water path in spring and autumn, followed by winter and least in summer. The liquid water path and ice water path in rainy days were significantly higher than that in non-rainy days. The liquid water path and ice water path in high level and mid-high level were greater than those in mid-low level, and especially in rainy days, the ice water path in high level and mid-high level were obviously greater than those in mid-low level. Most precipitation processes were accompanied by the increase of liquid water path and the decrease of ice water path. When the rainfall was greater than 2mm, the ice water path in precipitation was significantly less than that before precipitation.

Keywords: meteorology; artificial weather modification; cloud water resources; liquid water path; ice water path