

近 21 年丹江口流域空中云水量特征及与面雨量的关系¹

陈英英¹ 王明¹² 蔡淼³ 贾文茜¹ 李德俊¹ 谭静¹

(1. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中国气象局武汉暴雨研究所, 湖北 武汉 430205;

3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

【摘要】: 利用 2001~2021 年丹江口流域降水资料及 MODIS 云水路径产品, 采用统计方法分析地面降水与空中云水的时空演变特征及相关关系。结果表明: (1) 近 21 年丹江口流域面雨量略有增加, 空间分布西南多东北少、季节特征显著。(2) 丹江口流域平均液水路径小于 300 g/m^2 , 季节变化不明显, 空间差异不大, 与反演算法的局限性有关; 而平均冰水路径和云水路径分别为 $150 \sim 500 \text{ g/m}^2$ 和 $250 \sim 750 \text{ g/m}^2$, 均在夏季出现峰值、季节特征与面雨量吻合, 且由于受地形影响、地域分布特征明显。定量分析显示, 云水路径与面雨量存在较好的相关性(相关系数为 0.73)。(3) 丹江口流域冬季云水更新周期较长, 12 月可达 34.5 h, 夏季云水循环较快, 7 月云水更新周期仅为 2.7 h。

【关键词】: 丹江口流域; 空中云水量; MODIS; 云水更新周期

【中图分类号】: P463.3 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2022)12-2672-10

【DOI】: 10.11870/cjlyzyyhj202212011

近半个世纪来, 受全球气候变化、经济社会发展、生态环境恶化等因素影响, 华北地区水资源短缺问题日益严重。为保障华北乃至全国社会经济可持续发展, 国家自 2002 年起动工修建“南水北调”工程, 其中引自丹江口水库的南水北调中线工程于 2014 年 12 月 12 日正式通水^[1], 截至 2021 年 7 月 19 日, 中线一期工程自陶岔渠首累计调水入渠水量达 400 亿 m^3 ^[2]。南水北调中线工程优化了水资源配置格局, 复苏了沿线河湖生态环境, 但同时也使汉江中下游水量大幅减少, 在气候变化、三峡蓄水等多方面因素的共同影响下, 近年来长江中游流域径流呈减少趋势^[3], 对长江中下游地区航运及生态环境造成不利影响。为增加南水北调中线水源区可调水量, 实现南水北调中线工程年均调水量 130 亿 m^3 的远景规划, 同时不影响以“生态优先、绿色发展”为引领的长江经济带的高质量发展, 分析丹江口流域空中云水量、面雨量的年际变化及其相互关系很有必要, 可为丹江口流域人工增雨试验、合理开发空中云水资源提供技术支撑。

¹ **【收稿日期】**: 2022-01-06; **【修回日期】**: 2022-03-07

【基金项目】: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J036); 国家重点研发计划项目(2016YFA0601704); 中部区域丹江口水库汇水区人工增雨(雪)研究试验(ZXC-H22255)

【作者简介】: 陈英英(1982 ~), 女, 高级工程师, 主要研究方向为大气物理与大气环境. E-mail: brisk007@163.com

空中云水量是指存在于大气中的单位面积垂直气柱所含的液态水和固态水总量，与降水存在相关性^[4]，也是通过人工干预有可能直接开发利用的水凝物。常规气象观测中，云的观测以云量^[5]、云状、云高等宏观特征为主，针对云水含量的微观观测资料相对较少，对定量研究云水含量的长期变化、空间分布及其开发利用潜力造成困难。目前研究云水含量的主要手段为直接观测的机载探测设备^[6,7]，遥感类的地基微波辐射计^[8]、雷达观测^[9]、卫星反演^[10,11,12,13,14,15]以及再分析资料等^[16,17]。其中机载探测主要依靠人工影响天气外场试验或作业，需要较大的资金投入，并且只能获取短期、航线上的云水含量资料，时空范围有限；地基遥感测站分布稀疏，同样无法获取区域观测资料；而天气雷达对非降水云探测能力不足，再分析资料涉及到其他数据的融合处理。

相比之下，卫星观测资料显示出其覆盖范围广、时间序列长、标准统一等优势，为大尺度云气候学研究提供了有力手段。耿蓉等^[18]利用多种卫星观测资料 (ISCCP、MODIS 和 Cloudsat) 与模式再分析资料 (CFSR 和 ERA-Interim) 进行比较，从气候态角度对中国及其周边地区不同资料获取云水路径之间的差异进行分析，发现 MODIS、ERA 和 CFSR 在水平分布、主要变化模态、月变化特征方面都显示出较高的一致性，而 ISCCP 的绝对数值和变化幅度与它们均存在一定差异。GEIER et al^[11]的研究结果也表明，ISCCP 云水路径年均值明显小于 CERES 的反演结果。李江妹等^[19]选取 2002~2011 年洋面云样本，对比了微波和可见光/近红外两种反演方法获取的云水结果的差异，发现 MODIS 光谱反演方法在冰云存在时会造成下方液态云水的漏测，漏测比例约为 10.8%。但受陆地较强的背景微波辐射影响，卫星被动微波反演云水的实现，在陆地上要比洋面上困难。综合考虑，文中选取时间跨度较长、空间分辨率较高、陆地反演结果可信、与再分析资料较为一致的 MODIS 反演产品进行丹江口流域空中云水量的研究，其反演算法的局限性将在第 3 节中具体讨论。Chen 等^[20]、郑倩等^[21]也曾利用 MODIS 同类观测结果开展了云的液态水路径和降水冰云的特征研究。

本文利用 2001~2021 年丹江口流域地面国家气象站的月降水数据、MOD08_M3 卫星云水路径资料，研究了丹江口流域面雨量的年际变化和不同相态空中云水量的多年平均、季节变化趋势、空间分布特征以及与面雨量的相关性，并计算了云水更新周期。以期提升对流域空中云水资源的观测能力及科学组织实施人工增雨作业的能力。

1 资料和方法

1.1 研究区介绍

本研究所指的丹江口流域如图 1 所示，位于湖北、河南、陕西三省交界处。根据云水资源人工增雨开发潜力评估，图 1 中的丹江口流域为丹江口水库人工增雨的理想作业区，增加的降水可直接流入丹江口水库^[22]。文中附图所涉及地图基于国家基础地理信息中心提供的审图号为 GS(2019)1819 的标准地图制作，底图无修改。

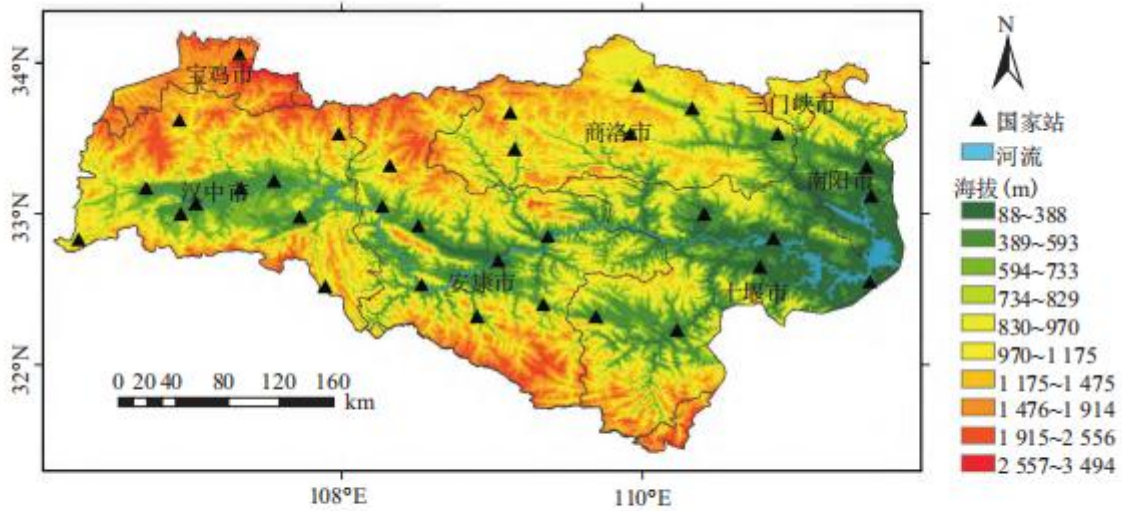


图 1 丹江口流域及国家气象站示意图

Fig. 1 Diagram of Danjiangkou Basin and National Meteorological Observation Station

1.2 地面与卫星资料

选取丹江口流域 33 个地面国家气象站的月降水资料进行雨量分析，其中陕西 25 个站、河南 2 个站、湖北 6 个站，时间范围为 2001~2021 年，站点信息如图 1 所示。

采用覆盖全球、时间跨度较长(2000 年 3 月至今)的 MOD08_M3 数据集的月云水路径资料，包括液水路径(CP_L)、冰水路径(CP_I)和云水路径(即液水+冰水的累计路径, CP)分析丹江口流域空中云水量分布及年际变化特征，并研究其与降水的相关性。为保证资料的年度完整性，时间范围取 2001~2021 年，空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

1.3 面雨量计算方法

面雨量的计算方法使用较多的是算数平均法和泰森多边形法^[23]，本文丹江口流域面雨量由流域范围内 33 个国家站的月降水量使用面积加权平均的方法计算求得。

2 丹江口流域面雨量变化趋势

近 21 年丹江口流域的面雨量变化曲线如图 2 所示，通过最小二乘法建立流域面雨量对月份的一元回归方程，得到 $Y=8.43x+784.04$ (x :年份序列, Y :面雨量),通过 0.05 的显著性检验。可以看出，2001~2021 年丹江口流域面雨量的年际变化有波动、总体呈略微增加的趋势，其中面雨量最大年为 2021 年 1 235 mm，次大为 2011 年 1 058 mm，最少年为 2001 年 639 mm，次少年为 2006 年 719 mm；从面雨量的年内变化来看，季节特征显著(图 7c)，近 21 年间有 16 年呈现出在 6~9 月分别有一个面雨量峰值和一个次峰值的分布规律，符合分析范围即丹江口流域既属于季风区也属于华西秋雨区的特点，其余年份面雨量的次峰值月出现在 5 月或 10 月。

图 3 为 2001~2021 年丹江口流域平均面雨量的季节空间分布，可以看出，春季面雨量 141~256 mm，呈南多北少的分布特征；夏、秋季面雨量在全年的占比较大，分别为 323~636 mm 和 198~422 mm，均呈由西南部向东北部递减的趋势；冬季面雨量最少，为 18~57 mm，呈东多西少的分布特征。其中，春、夏、秋三个季节面雨量的大值区均位于陕西镇巴附近，年平均面雨量达到 1 350 mm(春季 256 mm、夏季 636 mm、秋季 422 mm、冬季 36 mm)，为丹江口流域的降水中心。这主要是受地形因素的影响，

镇巴县地处大巴山西部、米仓山东段，位于西南暖湿气流的迎风坡，海拔最高点达 2 534 m，水汽抬升作用充分，成云致雨效应明显。

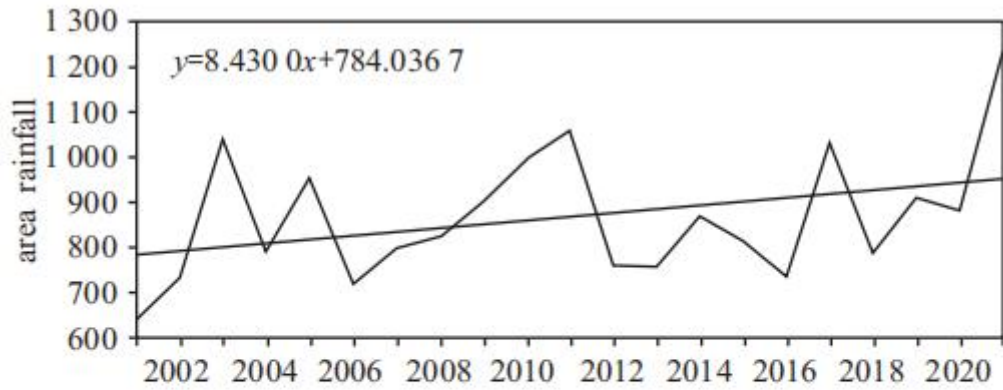


图 2 2001~2021 年丹江口流域面雨量 and 一元回归方程曲线

Fig. 2 Area rainfall in Danjiangkou Basin during 2001–2021 and corresponding regression equation curve

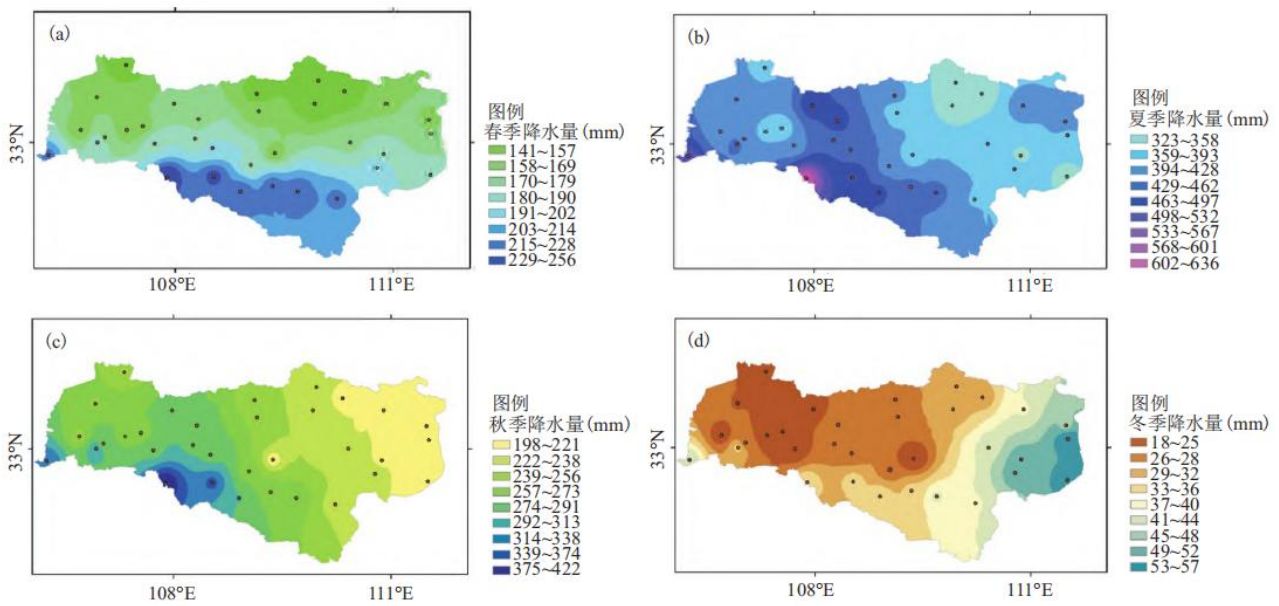


图 3 2001~2021 年丹江口流域平均雨量的季节空间分布(a 春季 b 夏季 c 秋季 d 冬季)

Fig. 3 Spatial distribution of average area rainfall in Danjiangkou Basin from 2001 to 2021

3 丹江口流域空中云水量分布特征及与面雨量的关系

3.1 空中云水量的时空分布及与面雨量的相关性

本节主要利用 2001~2021 年逐月的 MOD08_M3 数据分析丹江口流域空中云水量的季节变化、年际变化特征及与面雨量的对应关系。由图 4 丹江口流域 2001~2021 年春、夏、秋、冬不同季节平均 CP_L 的分布可以看出，CP_L 均小于 300 g/m²，季节差异不显著，总体来说，春季略高，夏秋季节次之，冬季最少，与面雨量的季节变化趋势不相吻合(春季平均面雨量 181.7 mm，夏季平均面雨量 413.1 mm，秋季平均面雨量 259.6 mm，冬季平均面雨量 32.7 mm)。四个季节 CP_L 的空间分布大都呈南多北少、西多东少的规律，整体上空间差异不大。上述现象可能是由于 MODIS 采用的光谱反演方法会在冰云存在的情况下导致大量下方水云的漏测所造成，因漏测的水云多发生在云顶温度低、冰水含量高的深厚对流云中^[19]，从而造成图 4 中 CP_L 四季不同程度的偏低，对比图 5 可以估测，丹江口流域 CP_L 偏低的幅度是“夏季>春季>秋季>冬季”，在一定程度上解释了 CP_L 与面雨量的季节变化趋势、空间分布特征相关性较低的原因，图 8 也从定量的角度进行了相关分析。

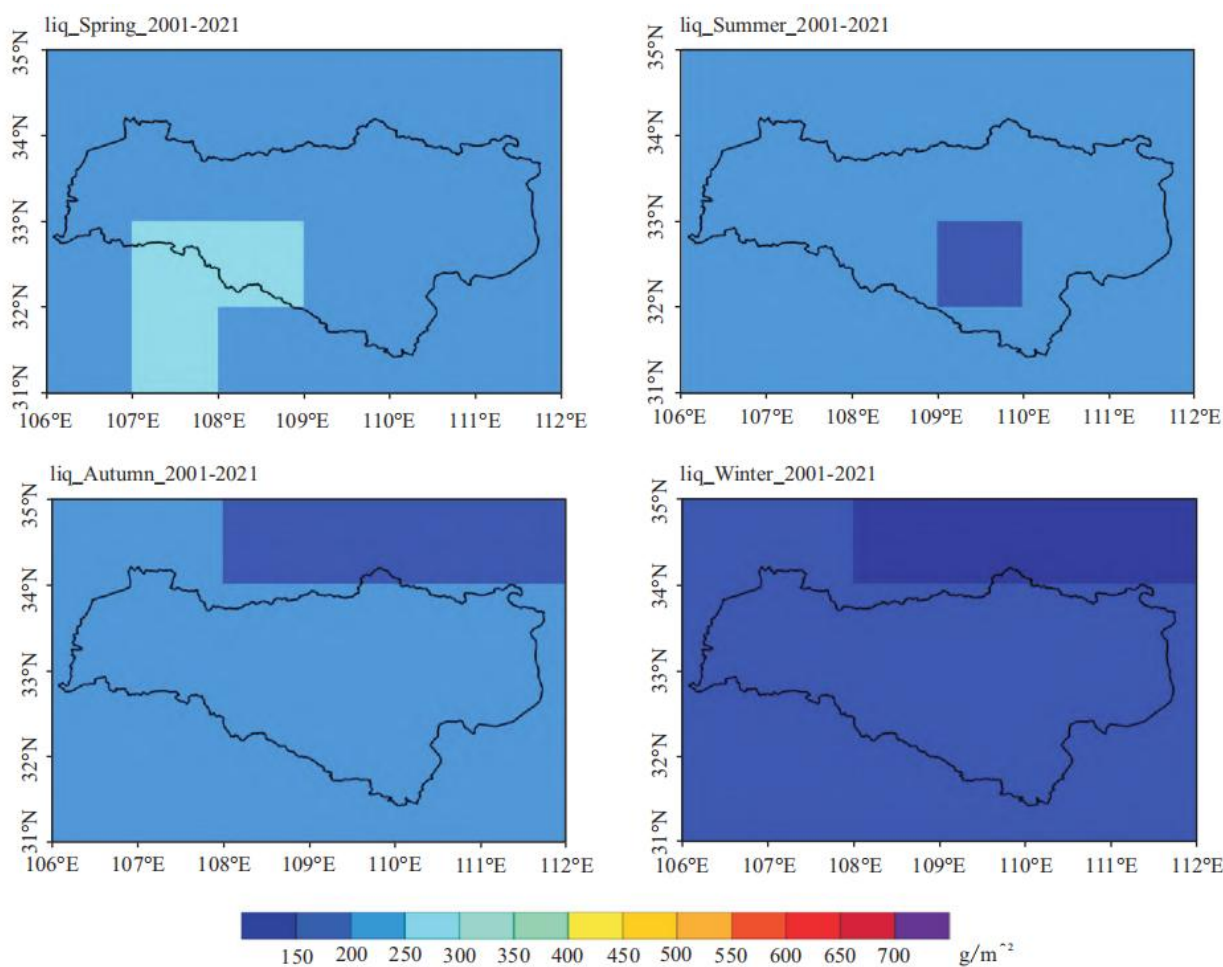


图 4 2001~2021 年丹江口流域不同季节平均 CP_L 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average CP_L in different seasons in Danjiangkou Basin from 2001 to 2021

较之液水含量，MODIS 对冰水含量反演的可信度更高^[18]。由图 5 丹江口流域 2001~2021 年春、夏、秋、冬不同季节平均 CP_I 的分布可以看出，与图 4 相比，CP_I 数值上比 CP_L 增大，取值范围为 150~500 g/m²；且 CP_I 的季节变化显著，表现为夏季>春季>秋季>冬季，与面雨量的季节变化趋势基本吻合(春季平均面雨量 181.7 mm，夏季平均面雨量 413.1 mm，秋季平均面雨量 259.6 mm，冬季平均面雨量 32.7 mm)，只在春、秋季的排序上存在差异，这主要是受华西秋雨的影响。从表 2 可以看出，丹江口流域 9 月的面雨量仅次于 7 月，与华西秋雨出现时段一致。此时高原夏季风南撤，华西地区上空受西风带中小槽控制，西太平

洋副高西侧的西南气流带来南海和印度洋上空的丰沛水汽，与秋季频繁南下的冷空气在此交汇而产生较长时间的阴雨，使得秋季降雨量一般多于春季。这也说明降水的原因除了有水汽条件，还要充分考虑环流等动力条件的影响，从而解释了春季的CP_I大于秋季而春季的降水小于秋季的原因。空间分布上，除夏季外，其余三季CP_I的空间分布均呈现南多北少的特征，夏季高冰水含量区呈西北-东南走势，与图3面雨量的分布存在较好的空间一致性。

云水路径CP是液水路径CP_L和冰水路径CP_I的累计值，由图6丹江口流域2001~2021年春、夏、秋、冬不同季节平均CP的分布可以看出，由于冰水含量占总云水量的比例较大，CP的季分布特征与图5中CP_I的分布特征基本一致，同样表现为夏季>春季>秋季>冬季，CP的取值范围为250~750 g/m²；CP的最大值(>700 g/m²)同样出现在夏季、位于陕西镇巴附近(图6b)，前文中已有介绍，这与当地地形抬升作用密不可分，受大巴山、米仓山的阻挡，水汽遇冷凝结、有利于形成云水。

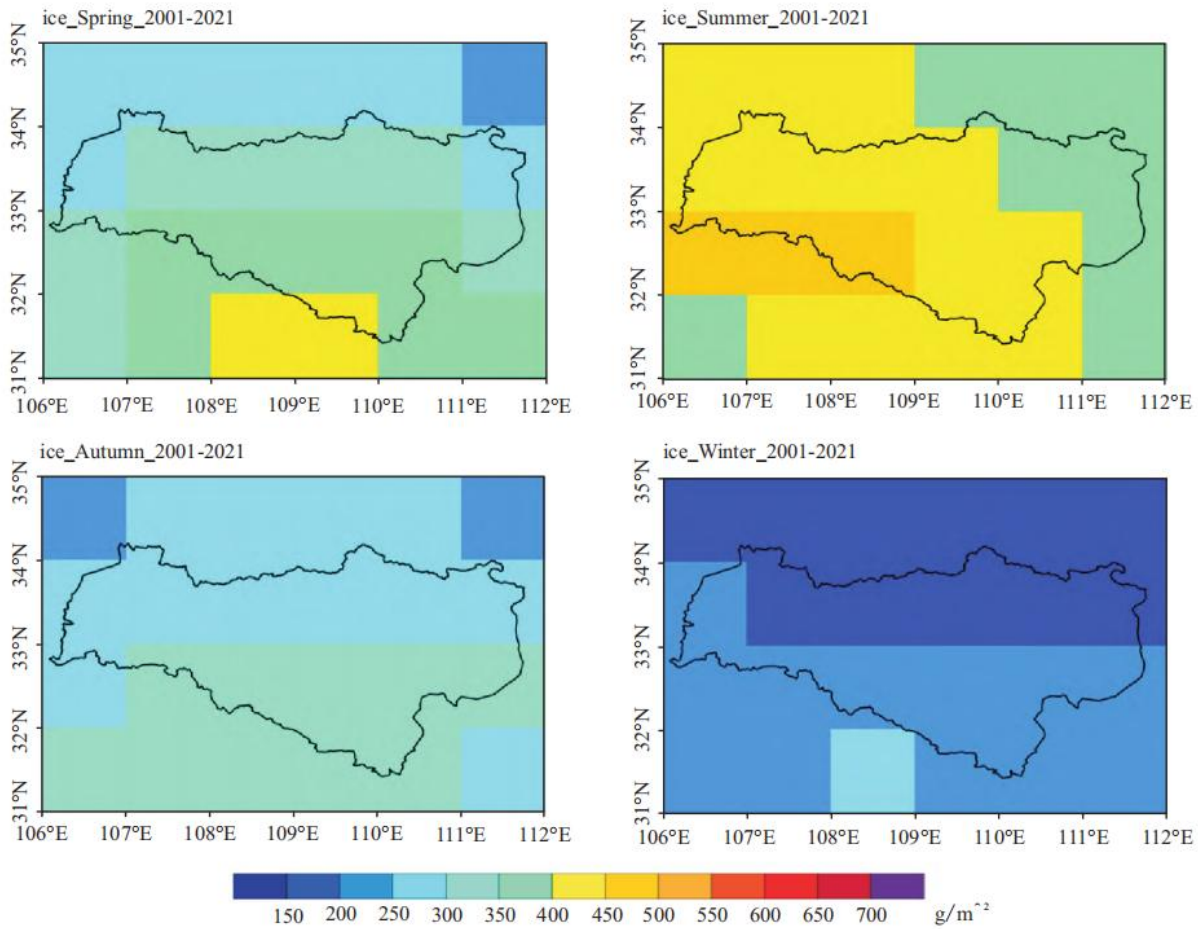


图5 2001~2021年丹江口流域不同季节平均CP_I的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of average CP_I in different seasons in Danjiangkou Basin from 2001 to 2021

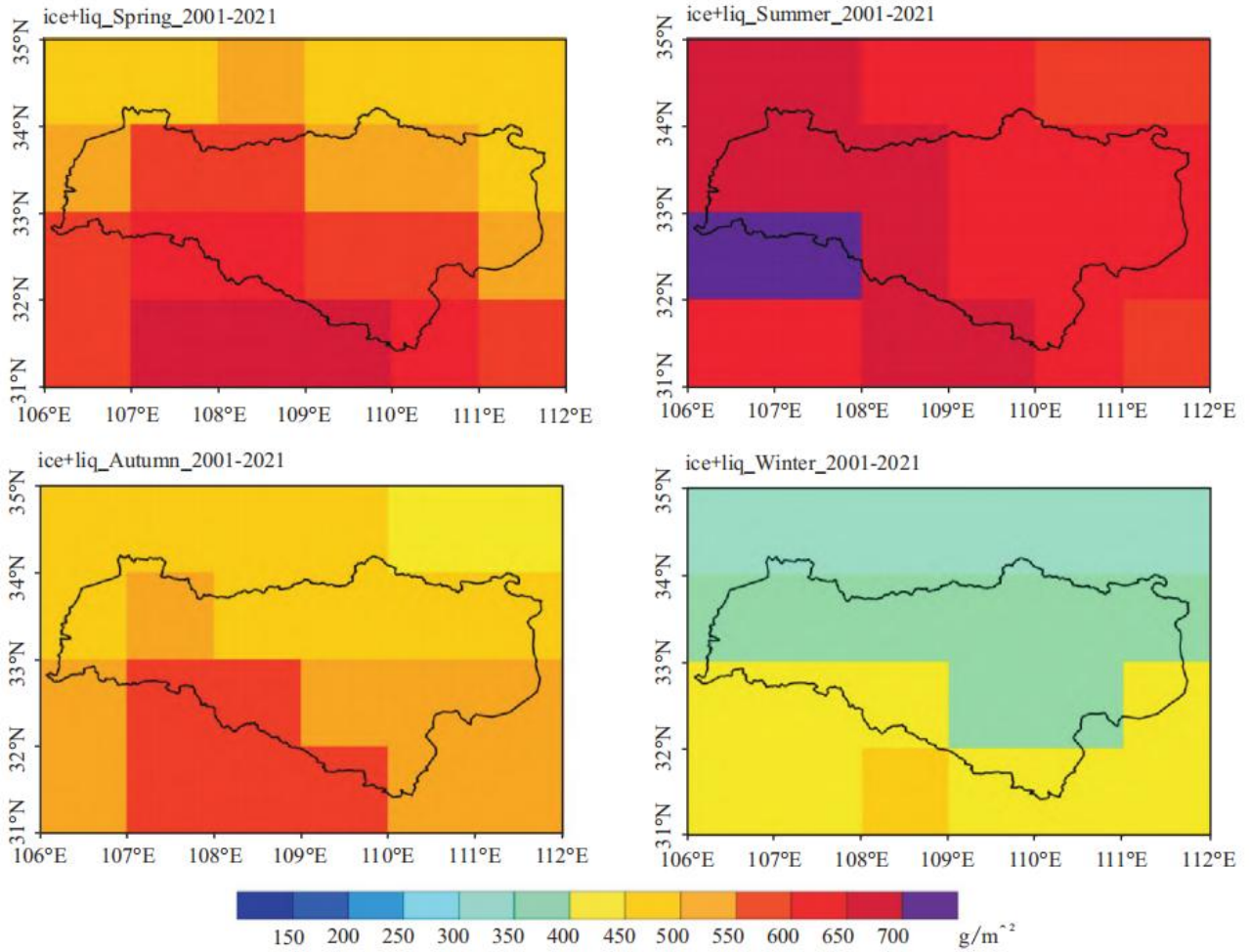


图 6 2001~2021 年丹江口流域不同季节平均 CP 的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of average CP in different seasons in Danjiangkou Basin from 2001 to 2021

图 3 与图 6 对比发现，面雨量与总云水的空间分布规律基本一致，尤其是春、夏、秋三个季节吻合度较高，春季面雨量与云水空间分布为南多北少，夏、秋季面雨量与云水的大值区呈西北、东南带状分布，极大值均位于陕西镇巴附近。

图 7 为丹江口流域 CP_L、CP_I、CP 区域平均的年际变化曲线(通过 0.01 的显著性检验), 区域选取范围为 33°~34° N、106°~112° E 范围内的 6 个格点, 以及 32°~33° N、108°~112° E 范围内的 4 个格点。结果表明, 2001~2021 年丹江口流域空中云水量演变特征为: CP 年际线性拟合系数为-0.035 7, 近似为 0, 说明近 21 年来, 丹江口流域空中云水量在趋势上无明显变化, 略有减少。图 7(a)中 CP_L 的月值范围在 75~345 g/m^2 , 呈略微减小趋势, 没有明显的季节特征, 与图 4 的分析结果一致, 原因在前文中已有说明; 图 7(b)中 CP_I 的月值范围在 83~805 g/m^2 , 也呈略微减少趋势, 季节特征明显, 夏季通常有较为明显的峰值, 与图 5 的分析结果吻合; 图 7(c)中 CP 的月值范围在 158~1 097 g/m^2 , 季节特征与 CP_I 类似。

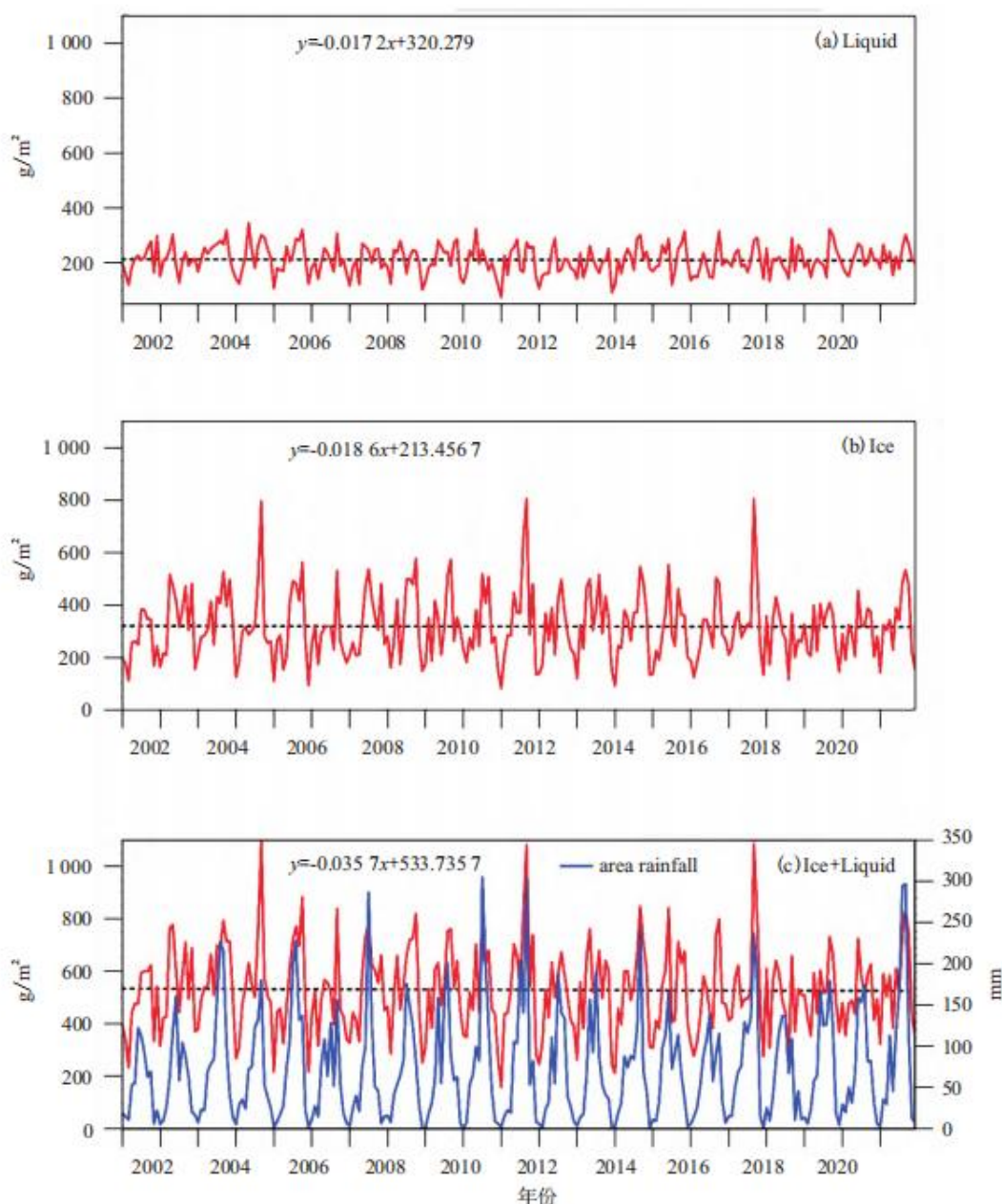


图 7 2001~2021 年逐月空中云水路径及线性拟合(液相(a) 冰相(b) 总云水/面雨量(c))

Fig. 7 Monthly cloud water path from 2001 to 2021 and corresponding linear fitting curve (liquid phase (a) ice phase (b) cumulative liquid and ice phase/area rainfall(c))

由于 CP_L 和 CP_I 对降水均有贡献, 因此在图 7(c) 总云水 CP 的逐月分布图中叠加相应的面雨量进行对比。可以看出, 面雨量的季节变化规律与 CP 基本一致, 表现为: 季节特征显著, 多在夏季出现峰值、在春季或秋季出现次峰值、冬季降为最小。两者的对应关系上, 面雨量较大月份的 CP 也较大, 如 2011 年 9 月和 2017 年 9 月, 但并不是较大的 CP 就一定会出现较大的面雨量, 如 2004 年 9 月和 2005 年 10 月。区别在于: 一年中面雨量的次峰值大多情况下只有一个, 而 CP 可能会有两个甚至以上的次峰值; 另外, 面雨量的季节差异更为显著, 冬季部分月份面雨量接近 0, 而 CP 作为空中云水资源的观测参数, 除 2011 年 1 月外, 其余均保持在 200 g/m² 以上。均说明云水是降水的必要条件而非充分条件。

3.2 空中云水量与面雨量的散点分布

由 3.1 节可知, 虽然云水路径为瞬时量、降水量为累积量, 单位上不匹配, 但两者之间依然存在实际的物理关联。图 8 给出了两者散点分布图(通过 0.01 的显著性检验), 其中横轴为 2001~2021 年共计 252 个月丹江口流域云水路径的区域平均值, 纵轴为与其对应月份的流域面雨量平均值, 可以看出, 图 8(a) 液水路径与面雨量的相关系数较低 $R=0.47$, 主要受 MODIS 反演算法对云冰下面的液水有漏测的影响; 图 8(b) 冰水路径与面雨量的相关性较好, $R=0.73$; 累计云水与面雨量的相关系数也达到 0.73(图 8(c))。总体上可以证实, 丰沛的云水对降水形成有利, 且与雨量呈正相关关系。这是由于云水路径 CP 是由卫星反演的云光学厚度和云粒子有效半径计算得到, 而大的光学厚度和云粒子有效半径, 对降水起促进作用^[24]。

3.3 云水更新周期

为解决作为瞬时值的云水路径 CP 与累计降水量不能直接定量匹配的问题, 采用国家人工影响天气中心提出的方法[16], 即

流域逐月云水路径平均值与地面雨强平均值相除, 获得逐月的“云水更新周期”, 表示为: $RTh = \overline{Mh}/SP$, 式中 \overline{Mh} 指一段时间的平均云水路径(本文取月平均值, 单位 mm, 等效于 $103g/m^2$), SP 指地面雨强(单位 mm/h), 得到的云水更新周期 RTh 单位为小时。云水更新周期可表示当地云水的更新状况, 更新周期越短, 说明云水循环越快, 云水资源越丰沛。

表 1 给出了计算得到的 2001~2021 年丹江口流域逐月面雨量、云水和云水更新周期, 可以看出, 面雨量最大的月份为 7~9 月, 约占全年总面雨量的 51%, 主要受夏季强降水和华西秋雨的影响; 面雨量最小的两个月为 1 月和 12 月, 仅为 8.9 和 8.1 mm。丹江口流域全年的云水更新周期在 2.7~34.5 小时之间, 具有明显的季节变化特征, 冬季云水更新周期长, 12 月云水更新周期达 34.5 小时, 夏季云水更新周期短, 7 月云水更新周期仅为 2.7 小时, 春秋季节的云水更新周期介于冬、夏之间。

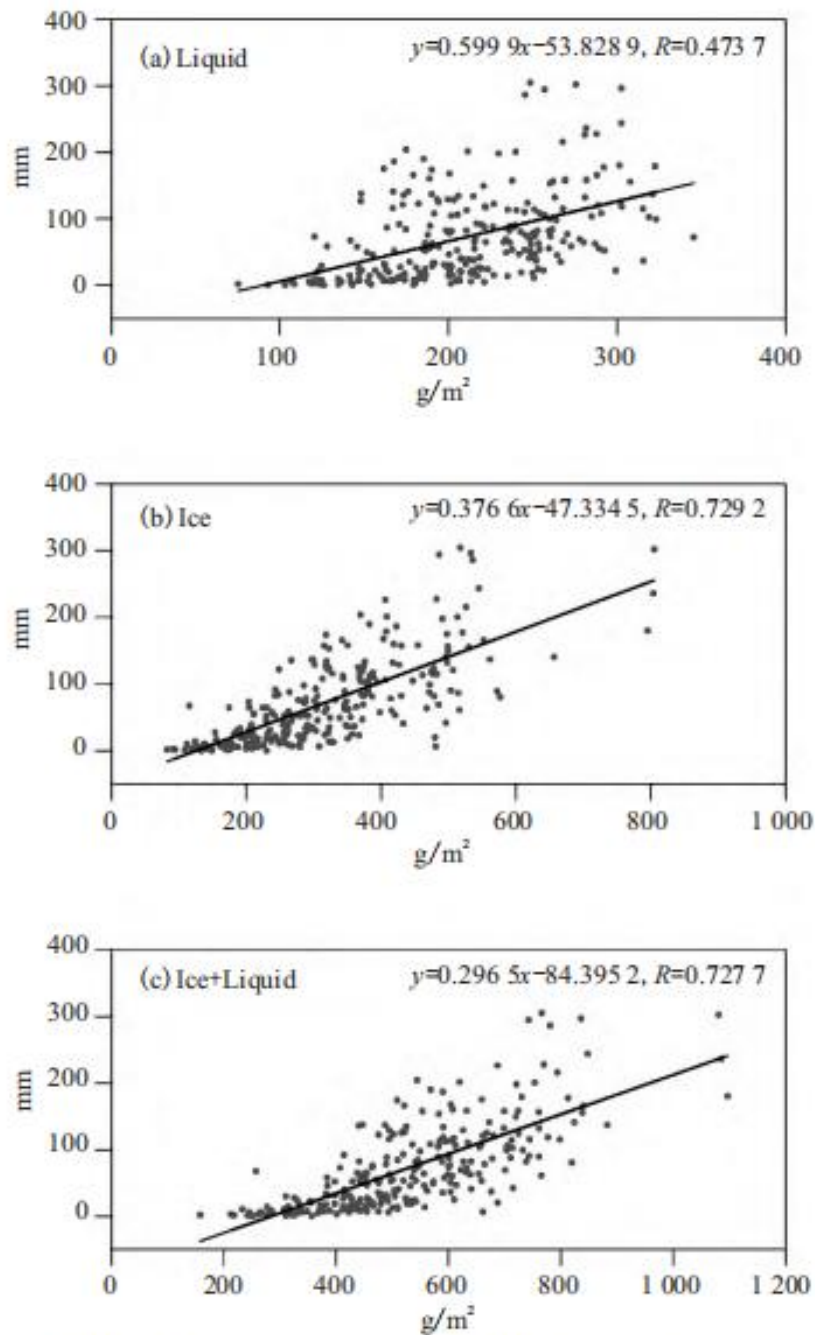


图8 丹江口流域空中云水路径与面雨量的散点图及拟合(液相(a) 冰相(b) 累计(c))

Fig. 8 Scatter plot and fitting curve of cloud water path and area rainfall in Danjiangkou Basin (liquid phase (a) ice phase (b) cumulative liquid and ice phase (c))

表 1 2001~2021 年丹江口流域月平均降水和云水路径特征

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月平均 面雨量 (mm)	8.9	15.7	30.2	58.1	91.5	107.3	155.8	140.5	145.6	76.4	30.3	8.1
月平均 小时面 雨强 (mm/h)	0.012	0.023	0.041	0.081	0.123	0.149	0.209	0.189	0.202	0.103	0.042	0.011
月平均 云水路 径(mm)	0.348	0.414	0.438	0.536	0.580	0.569	0.566	0.605	0.756	0.626	0.532	0.380
云水更 新周期 (h)	29	18	10.7	6.6	4.7	3.8	2.7	3.2	3.7	6.1	12.7	34.5

4 结论与讨论

(1) 近 21 年来丹江口流域面雨量呈略微增大的趋势，面雨量最大年份为 2021 年 1 235 mm，最小年份为 2001 年 639 mm。降水季节变化显著，近 21 年间有 16 年呈现出在 6~9 月分别有一个面雨量峰值和一个次峰值的分布规律，符合丹江口流域既属于季风区也属于华西秋雨区的特点。空间分布上，春季南多北少，夏、秋季由西南部向东北部递减，冬季则东多西少。

(2) 利用 MOD08_M3 数据进行丹江口流域分季节的液水、冰水、云水路径的统计分析发现：数值大小上，液水路径($<300 \text{ g/m}^2$)小于冰水路径($150\sim 500 \text{ g/m}^2$)，冰水在总云水中占比较大；空间分布上，除夏季高冰水/云水路径区呈西北-东南走势外，三者总体均呈现南多北少的分布特征，液水路径的空间差异不大，冰水路径和云水路径存在较明显的地域性，如最大值均出现在夏季的陕西镇巴附近，与当地地形的抬升作用密不可分；季节分布上，液水路径季节变化不明显，而冰水路径和云水路径存在明显的季节变化特征，一般在夏季出现峰值；云水路径的年际变化相对稳定。有关液水路径的分析要考虑 MODIS 算法对于冰水下的液水漏测所带来的影响。

(4) 与地面降水的相关关系方面，冰水路径、云水路径与面雨量均存在较好的相关性，252 个样本的相关系数达到 0.73，且季节变化规律基本一致。逐月总云水路径与面雨量的对比发现，丰富的云水是降水的必要而非充分条件。

(5) 丹江口流域全年的云水更新周期在 2.7~34.5 小时之间，具有明显的季节变化特征，冬季云水更新周期长，夏季云水更新周期短，春秋两季的云水更新周期介于冬、夏之间。

参考文献

- [1] 张学鹏, 王建贞. 南水北调中线工程正式通水[J]. 水利发电, 2015, 41(1): 73.

-
- [2] 韦凤年, 王慧. “长渠” 引来幸福水——写在南水北调中线工程通水五周年之际[J]. 中国水利, 2019, (23):8-11.
- [3] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2):488-497. DAI W, LV D Q, LI J B, et al. The effect of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2):488-497.
- [4] 孙丽, 张晋广, 杨磊, 等. 基于 Aqua/CERES 数据的辽宁省云宏微观特征及其与降水的相关性研究[J]. 干旱气象, 2020, 38(4):612-618. SUN L, ZHANG J G, YANG L, et al. Micro- and macro- features of cloud in Liaoning Province and its correlation with precipitation based on Aqua/CERES Data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(4):612-618.
- [5] 张琪, 李跃清, 陈权亮, 等. 近 46 年西南地区云量的时空变化特征[J]. 高原气象, 2011, 30(2):339-348. ZHANG Q, LI Y Q, CHEN Q L, et al. Temporal and spatial distribution of cloud cover over southwest China in recent 46 years[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2):339-348.
- [6] 蔡兆鑫, 蔡淼, 李培仁, 等. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J]. 大气科学, 2019, 43(6):1191-1203. CAI Z X, CAI M, LI P R, et al. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(6):1191-1203.
- [7] 秦彦硕, 蔡淼, 刘世玺, 等. 华北秋季一次低槽冷锋积层混合云宏微观物理特征与催化响应分析[J]. 气象学报, 2017, 75(5):835-849. QIN Y S, CAI M, LIU S X, et al. A study on macro and micro physical structures of convective-stratiform mixed cloud associated with a cold front in autumn and their catalytic responses in North China[J]. Acta Meteorological Sinica, 2017, 75(5):835-849.
- [8] 陈树成, 史静, 王彦, 等. 基于地基微波辐射计遥感的天津大气水汽和液态水特征[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(6):38-45. CHEN S C, SHI J, WANG Y, et al. Characteristics of atmospheric water vapor and liquid water over Tianjin identified by remote sensing data from ground-based microwave radiometer[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(6):38-45.
- [9] 曹宁, 张立新, 桑建人, 等. 基于微雨雷达的六盘山区地形云降水宏微观特征观测分析[J]. 气象科学, 2019, 39(6):775-785. CAO N, ZHANG L X, SANG J R, et al. Observation and analysis on the macroscopic and microscopic characteristics of topography, cloud and precipitation in Liupan Mountain area based on micro rain radar[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(6):775-785.
- [10] 范思睿, 王维佳, 林丹. 基于 ISCCP 云资料的中国地区不同类型云的时空分布[J]. 干旱气象, 2020, 38(2):213-225. FAN S R, WANG W J, LIN D. Temporal and spacial distribution characteristics of clouds with different types over China based on ISCCP data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(2):213-225.
- [11] GEIER E B, GREEN R N, KRATZ D P, et al. Cloud and the earth' s radiant energy system(CERES) data management system SSF collection document, Release 2, Version 1[M]. Atmospheric Sciences Competency, Hampton, VA. U. S. A. 2003.
- [12] 李梦, 金宏春, 陈勇航, 等. 天山低层云水资源中冰粒子物理属性年际变化[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4):696-704. LI M, JIN H C, CHEN Y H, et al. The inter-annual variation of macro and micro physical properties of ice particles in the

lower layer cloud water resources over Tianshan Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4):696-704.

[13] 林丹. 西南地区不同类型云的云水含量时空分布和变化趋势[J]. 干旱气象, 2015, 33(5):748-755, 801. LIN D. Temporal and spatial distribution and change trend of cloud water of different types clouds in southwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(5):748-755, 801.

[14] LIN L, ZOU X. Diurnal variation in cloud liquid water path derived from five cross-track microwave radiometers onboard polar-orbiting satellites[J]. Remote Sensing, 2020, 12(14):2177.

[15] 李特, 郑有飞, 王立稳, 等. 基于 MODIS 产品的中国陆地冰云季节变化特征[J]. 应用气象学报, 2017, 28(6):724-736. LI T, ZHENG Y F, WANG L W, et al. Ice cloud distribution and seasonal migration over land area of China based on MODIS data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(6):724-736.

[16] 蔡淼. 中国空中云水资源和降水效率的评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. 2013. CAI M. Cloud water resources and precipitation efficiency evaluation over China[D]. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 2013.

[17] 刘菊菊, 游庆龙, 周毓荃, 等. 基于 ERA-Interim 的中国云水量时空分布和变化趋势[J]. 高原气象, 2018, 37(6):1590-1604. LIU J J, YOU Q L, ZHOU Y Q, et al. Distribution and trend of cloud water content in China based on ERA-Interim reanalysis[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(6):1590-1604.

[18] 耿蓉, 王丽, 傅云飞, 等. 中国及其周边地区多种水凝物资料的气候态特征比较[J]. 气象学, 2018, 76(1):134-147. GENG R, WANG Y, FU Y F, et al. Comparison of climatological characteristics of several hydrometeors in China and the surrounding region[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(1):134-147.

[19] 李江妹. 多种卫星遥感云水路径的比较分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学. 2017. LI J M. Comparison of cloud liquid water path from different satellite-based measurements[D]. University of Science and Technology of China, Hefei, 2017.

[20] CHEN Y H, PENG K J, HUANG J P, et al. Seasonal and regional variability of cloud liquid water path in northwestern China derived from MODIS/CERES observations[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(4):1037-1042.

[21] 郑倩, 郑有飞, 王立稳, 等. 基于 MODIS 和 Cloudsat 的京津冀降水冰云季节分布特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6):1446-1455. ZHENG Q, ZHENG Y F, WANG L W, et al. Seasonal distribution characteristics of precipitating ice clouds in Beijing-Tianjin-Hebei region based on MODIS and Cloudsat[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6):1446-1455.

[22] 曾光平, 刘峻. 人工降水十堰效果检验的统计模拟方法研究[J]. 气象学报, 1993, 51(2):241-247. ZENG G P, LIU J. A research on a statistical simulation method for the test of the artificial rainfall effect[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1993, 51(2):241-247.

[23] 于大峰, 陈良华, 孙士型, 等. 长江上游流域面雨量时空分布特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(4):563-569. YU D F, CHEN L H, SUN S X, et al. Temporal and special features of areas rainfall in the upper reaches of the Yangtze river[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(4):563-569.

[24] 王磊, 周毓荃, 蔡淼, 等. 华北云特征参数与降水相关性的研究[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(3):9-16. WANG L, ZHOU Y Q, CAI M, et al. Study on correlation between cloud characteristic parameters and precipitation in North China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(3):9-16.