

常倬林,党张利,孙艳桥,等. 基于 FY2G 卫星的宁夏空中云水资源特征研究[J]. 气象研究与应用,2022,43(1):47-52.

Chang Zhuolin, Dang Zhangli, Sun Yanqiao, et al. Study on characteristics of air cloud water resources in Ningxia Based on FY2G satellite[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(1): 47-52.

基于 FY2G 卫星的宁夏空中云水资源特征研究

常倬林^{1,2}, 党张利^{1,2}, 孙艳桥^{1,2}, 林彤^{1,2}

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002;

2. 中国气象局云雾物理重点开放实验室/中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 为了提高宁夏空中云水资源开发利用效率, 利用 2017—2019 年 FY2G 卫星反演产品、自动站降水资料及微波辐射计反演产品, 分析宁夏不同地区云微观特性的时空变化特征, 研究液水含量的降水效率及云水资源开发潜力。结果表明: (1) 剔除不合理数据后, FY2G 卫星反演结果与微波辐射计反演结果相关性较好, 反演产品基本上能够代表宁夏云水资源特征; (2) 宁夏云中过冷层厚度大约在 1.65~2km, 液态水含量在 0.02~0.5mm, 云光学厚度的均值在 3~7, 云粒子有效半径在 3~8 μm ; (3) 宁夏云液态水降水效率为 53.9%, 人工增雨的潜力为 46.1%, 云液态水降水效率在夏季、秋季、春季、冬季依次降低。

关键词: FY2G; 垂直累计液态水含量; 云光学厚度; 过冷层厚度; 有效粒子半径

中图分类号: P426

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.9

引言

水对人类和环境至关重要, 水资源有限但是对水的需求却一直在增长。有限的水资源和增长的需求之间的矛盾促使人们更加关注通过人工播云增加降水^[1]。云作为人工影响天气催化作业的主要对象, 过冷层厚度、云的光学厚度、云滴有效半径、液水含量等是评估空中云水资源的重要依据, 也是人工增雨作业条件选择的重要参考, 摸清该地区云的宏微观特征, 加大对空中云水资源的开发力度显得尤为重要。

国内外专家针对云水资源开展了大量的研究。李江南等^[2]分析了热带气旋云微物理过程的观测分析和数值模拟研究进展。在再分析资料应用方面, 王佳等^[3]、邓佩云等^[4]利用再分析资料的风场及云含水量分析了空云水资源年均总量、时空特征及变化趋势; 在特种观测资料应用中, 黄建平^[5]、郝巨飞^[6]

利用地基微波辐射计及红外观测仪探测数据, 分析了不同地区液态云水路径和降水量的变化特征; 毕敬等^[7]、高沁等^[8]利用气象观测站的降水、云状、云量的资料对人工增雨需求、人工增雨潜力和人工增雨云水资源量进行分析。在利用卫星资料方面, 陈勇航等^[9]对西北地区的云水资源分布特征进行了分析研究, 探讨了云特性参量对云辐射强迫的影响。在雷达探测资料对空中云水资源的研究方面, 章文星等^[10]利用 2008 年 5—12 月安徽省寿县大气辐射综合观测试验资料, 比较研究了云雷达 (W-band, 95 GHz)、云高仪 (Vaisala Ceilometer) 及扫描式全天空红外成像仪 (SIRIS-1 型) 三种云观测仪器的观测结果。对宁夏地区空中云水资源的研究, 田磊等^[11-13]利用微波辐射计、云雷达对宁夏云量、云液态水含量等进行了分析, 常倬林等^[14]利用 2009—2014 年 NASA 地球观测系统 (EOS)、地球辐射能量系统 (CERES)

收稿日期: 2021-12-23

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0104)、国家自然科学基金项目 (41775139)、宁夏青年拔尖人才培养基金项目 (RQ0023)、宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2019BEG03001)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2021J043)、中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室指令性项目 (CAMP-201917)

作者简介: 常倬林 (1981—), 女, 汉族, 副研级高工, 硕士, 主要从事大气物理与大气环境及人工影响天气研究。E-mail: changzhil05@126.com

的云资料和气象站降水资料,对宁夏云水资源及增雨潜力特征进行了对比研究。上述大量的研究主要围绕利用自动气象站、探空观测、再分析资料、极轨卫星资料等进行分析。针对宁夏地区的空中云水资源的研究主要集中在利用极轨卫星反演资料及微波辐射计等探测资料方面,FY 静止卫星具有高时间分辨率等优势,而利用 FY 静止卫星资料对宁夏空中云水资源的评估工作还未开展。

本文基于 FY2G 卫星反演的云微观特性产品,对宁夏云水资源的分布特征及开发潜力进行研究,评估了宁夏石嘴山、银川、吴忠、中卫及固原五市等不同地形地貌及不同气候特征的区域云水资源的时空变化特征,特别是针对六盘山区山顶及山东西两侧的云水资源特征进行了分析,以典型站点为代表分析了宁夏液态水含量的降水效率及开发潜力,对高效科学开发宁夏空中云水资源具有一定的科学意义和应用价值。

1 数据和方法

1.1 数据资料

研究中使用的资料为 2017—2019 年 FY2G 卫星资料反演的云过冷层厚度(Hsc)、云光学厚度(Opth)、云粒子等效半径(Ref)、垂直累计液态水含量(Lwp)资料,2017—2019 年隆德气象站布设的 RPG-HATPRO-G4 型微波辐射计资料、2017—2019 年宁夏区域自动站资料。

其中 FY2G 卫星数据时间分辨率为 30min,空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。地基微波辐射计使用的是德国 RPG-HATPRO-G4 型多通道微波辐射计,其布

设在隆德气象站内空旷地带,采用并行 42 通道设计其位置见图 1。

分析中使用到的站点位置如图 1 所示,其中石嘴山、银川为宁夏北部川区代表,吴忠、中卫为宁夏中部干旱带代表,固原为宁夏南部山区的代表。六盘山顶指的是海拔 2856m 六盘山气象站,六盘山西测以隆德站为代表,六盘山东侧以泾源站为代表。

1.2 方法

在数据资料处理中,提取了 FY2G 卫星反演的云过冷层厚度、云光学厚度、云粒子等效粒子半径、垂直累积液态水含量 30min 分辨率的产品,在与微波辐射计反演的液态水含量进行对比的基础上,剔除了差值较大的数据,进行了小时、日、月、季、年平均,在日、月、季、年的平均时未划分小时,分为白天和晚上。在对微波辐射计资料处理时,对微波辐射计反演的液态水含量的分钟数据,00 分和 30 分前后 5min 数据进行平均,与卫星资料反演的垂直累计液态水含量进行对比分析。液态水含量的降水效率使用小时降水量除以小时液态水含量得到,人影作业潜力使用 1 减去液态水含量的降水效率得到。

2 FY2G 卫星反演产品的适用性分析

对 FY2G 卫星反演的垂直累计液态水含量与微波辐射计反演的液态水含量进行对比分析,剔除二者相差较大的特殊数据后,样本数量为 3543 个,对该样本做散点图并进行统计分析。从图 2 中可以看出,卫星资料和微波辐射计资料反演结果呈线性相关,相关系数达到 0.95,且通过 0.01 的显著性检验,剔除后的反演结果可用。由于微波辐射计受降

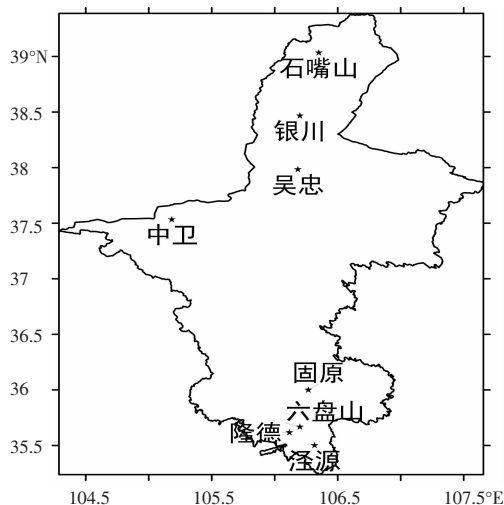


图 1 宁夏各站点分布

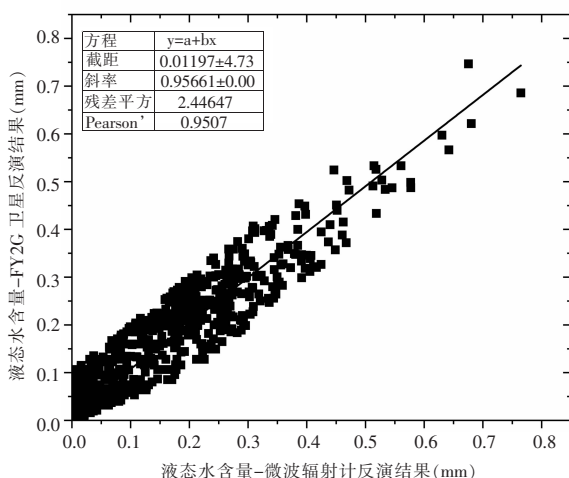


图 2 FY2G 卫星反演液态水含量与微波辐射计反演液态水含量对比图

水影响较大,用其分析增雨潜力结果不可靠,但它在晴空条件下的观测值比较准确,而卫星反演产品正好可以弥补在阴天和降水背景下对大气水汽和云液态水状态的监测,结合二者的优点可以得到更为准确的结果。

3 云水资源时空分布特征

3.1 云体过冷层厚度分布特征

从图 3 可见,宁夏中南部地区云体过冷层厚度的值大约在 1.9km 至 2km 之间,高于北部川区云体过冷层厚度的值(1.65~1.8km),即宁夏南部山区冷云催化的平均条件在全区最好,在南部山区,六盘山西侧云体过冷层厚度低于六盘山顶,六盘山顶云体过冷层厚度低于六盘山东侧。其中六盘山东侧云体过冷层厚度高于固原市云体过冷层厚度,同时,可以看出云体在从西侧到东侧爬升的过程中,由于受到地形的抬升作用的影响,冷云过程的发展越来越强烈。

从云体过冷层厚度的季节分布来看,宁夏大部

分区域冬季云体过冷层厚度最大,其次为春季、夏季,秋季。不同的是宁夏最东南侧的泾源与最西侧的中卫,云体的过冷层厚度在冬季最大,其次为夏季,春秋季节最小。除去季节温度变化的影响外,这可能与夏季泾源与中卫对流发展较其它地区更为强烈有关,与这两个地区在宁夏全区冰雹较其它区域更为频发的事实比较一致。可能在夏季时泾源及中卫冷云催化条件好于其它区域。从云体过冷层厚度的月变化来看,从 1 月到 11 月呈现出微弱的下降趋势,泾源及中卫月变化的程度高于其它地区。

从日变化来看,云体过冷层厚度呈抛物线分布,00 时至 08 时,宁夏各地云体过冷层厚度在 1.8~2.4km,从 09 时开始云体过冷层厚度开始逐渐上升,到 16 时,云体过冷层厚度达到最大,16 时后开始逐渐下降,但上升的速度要高于下降速率。16 时之前,宁夏从南到北云体过冷层厚度逐渐降低,16 时后,区域变化较为复杂。

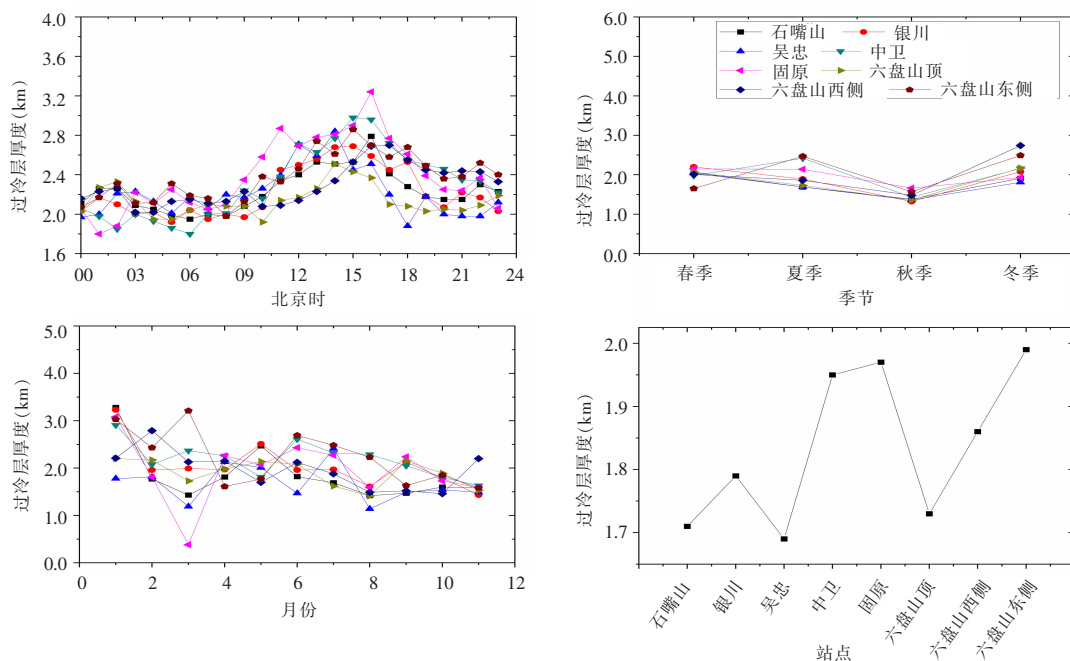


图 3 FY2G 反演的白天过冷层厚度的时间、月、季节及年分布特征

3.2 液水含量分布特征

从液水含量的年变化来看(图 4),白天,从宁夏北部地区到南部山区,液水含量缓慢上升,石嘴山市液水含量最小大约在 0.024mm,其次为银川、吴忠、中卫及固原,其液水含量的值大约在 0.03mm。值得注意的是,在六盘山区垂直累计液态水含量的值远高于宁夏其它区域,其范围为 0.04~0.065mm,其中,

六盘山顶垂直累计液态水含量的值最高,其次为六盘山西侧,最后为六盘山区东侧。这也正说明在六盘山区云水资源较其它区域更为丰富,在六盘山区建设地形云野外科学试验基地开发空中云水资源十分重要。

从垂直累计液态水含量的季节变化来看,宁夏垂直累计液态水含量在夏季最大,春季次之,秋季再

次之,冬季最小。夏春秋冬四季垂直累积液态水含量均值范围分别大约为 0.038~0.082mm、0.029~0.058mm、0.008~0.058mm、0.008~0.055mm。从空间分布来看,固原、中卫、吴忠、银川各季节垂直累积液态水含量相差不大,宁夏最北边石嘴山垂直累积液态水含量最小。六盘山区垂直累积液态水含量高于其它地区,夏季,六盘山顶垂直累积液态水含量高于六盘山西侧,六盘山西侧垂直累积液态水含量值高于六盘山东侧;春秋季节垂直累积液态水含量由大到小为六盘山西侧、六盘山顶、六盘山东侧;冬季垂直累积液态水含量由大到小为六盘山西侧、六盘山东

侧、六盘山顶。夏季人工增雨催化的最为合适区域是六盘山顶,其它季节最为合适的催化区域为六盘山西侧,特别是冬季时六盘山东侧也为催化作业的较为合适的区域。从月变化来看,云垂直累积液态水含量在 6 月、7 月最大,2 月、11 月较小,基本呈抛物线分布,不同的是六盘山顶垂直累积液态水含量在 7 月达到峰值,其它地区则在 6 月达到峰值。垂直累积液态水含量 06 时最小,从 06 时开始逐渐上升到 11 时达到最大,随后开始减小,13 时出现次小值,随后到 15 时达到极大值。同样可以看出六盘山区垂直累积液态水含量在各个时次均高于其它地区。

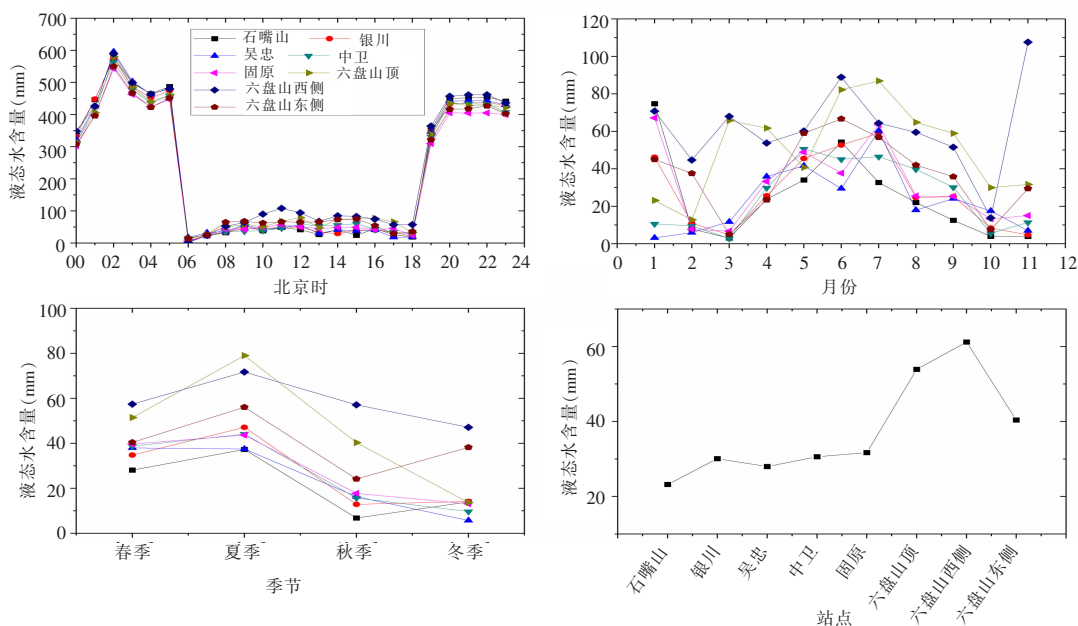


图 4 FY2G 反演的白天液态水含量的时间、月、季节及年分布特征

3.3 云光学厚度和云粒子等效半径特征

宁夏地区云光学厚度的均值在 3~7, 从宁夏北部到南部山区云光学厚度年均值逐渐上升, 但变化范围不大, 其值在 3~4; 云光学厚度的高值区仍然在六盘山区, 其值在 4.1~6, 其中六盘山顶云光学厚度的均值高于六盘山西侧, 六盘山西侧高于东侧。云粒子有效半径在 3~8 μm , 北部石嘴山、银川两市的云粒子有效半径 4.5 μm , 吴忠市云粒子有效半径 4 μm , 中卫及固原地区云粒子有效半径较北部川区云粒子有效半径大, 可以达到 4.8 μm 。同样, 六盘山云粒子有效半径要高于其它区域, 其中, 六盘山顶云粒子半径最大, 大约为 7 μm , 其次为六盘山西侧, 值为 6.8 μm , 最小的为六盘山东侧在 5 μm 左右。

4 人影作业潜力分析

利用卫星资料反演的液态水含量与自动站实际降水资料对宁夏人影作业潜力进行分析, 由上述分析可知卫星资料反演的液态水含量在宁夏各地区的差异不大, 因此选择典型的站点(六盘山西侧隆德站点)作为代表来分析宁夏人影作业潜力。挑选出隆德站有降水时的小时降水资料与卫星反演的小时液态水含量, 按照液态水含量降水效率计算公式进行计算, 得到液态水含量降水效率有效样本 217 个。经分析得出, 宁夏云液态水的降水效率为 53.9%, 人工增雨的潜力为 46.1%。分季节来看, 夏季云液态水降水效率最大为 56.8%, 其次为秋季和春季, 分别为 54.3% 和 54%, 最小的为冬季, 云液态水降水效率为

52%。从月变化来看,从 1 月—12 月,云液态水降水效率分别为 49.8%、50.8%、53.4%、53.9%、54.8%、54%、52%、65.1%、55.6%、50.1%、59.7%、77%。由此可见,宁夏冬春季人影作业潜力高于夏秋季,1—4 月人影作业潜力大于其它月份,因此,宁夏应该加大冬春季人工增雨雪作业力度,更加高效开发空中云水资源。

5 结论与讨论

本文研究了宁夏不同地区云微观特性的时空变化特征,探究了液水含量的降水效率及云水资源开发潜力。初步结论如下:

(1)剔除了不合理数据后,FY2G 卫星反演云液态水含量与微波辐射计反演液态水含量相关性达到 95%,FY2G 卫星反演产品基本上能够代表宁夏云水资源特征。

(2)宁夏云过冷层厚度大约在 1.65~2km,液态水含量在 0.02~0.5mm,其中云过冷层厚度在冬季、春季、夏季、秋季依次降低,6 月和 16 时云过冷层厚度最大;垂直累计液态水含量和云光学厚度在夏季、春季、秋季、冬季依次减少,同样在 6 月二者的值最大,液态水含量白天时在 11 时和 13 时最大。

(3)宁夏云水资源基本在南部山区大于中部干旱带,中部干旱带大于北部川区。在山区,云过冷层厚度东侧大于西侧,西侧大于山顶;云液态水含量和云光学厚度西侧大于山顶,山顶大于东侧;云粒子等效半径在山顶大于西侧,西侧大于东侧。

(4)宁夏云液态水降水效率为 53.9%,人工增雨的潜力为 46.1%,云液态水降水效率在夏季、秋季、春季、冬季依次降低,1—4 月人影作业潜力大于其它月份。

宁夏云液态水的降水效率不高,云水资源的开发潜力较大。今后可以从动力、热力条件等多方面分析原因,进而研究人工增雨条件的评估技术和催化作业技术等,为科学高效开发区域云水资源提供更多的支撑。

参考文献:

- [1] Pokharel B, Geerts B, Jing X. The Impact of Ground-Based Glaciogenic Seeding on Orographic Clouds and Precipitation: A Multisensor Case Study[J]. *Journal Of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(4): 890–909.
- [2] 李江南, 庞思敏. 热带气旋云微物理过程的研究进展[J]. *气象研究与应用*, 2021, 42(3): 1–6.
- [3] 王佳, 陈钰文. 江苏省空中云水资源评估[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(2): 121–124.
- [4] 邓佩云, 桑建人, 杨萌, 等. 近 30 年六盘山东与西坡降水及空中水汽条件差异特征分析[J]. *气象科技*, 2021, 49(1): 77–85.
- [5] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. *大气科学*, 2010, 34(3): 548–558.
- [6] 郝巨飞, 高俊喜, 杨允凌, 等. 邢台市大气水汽及云水变化的降水前兆分析[J]. *气象研究与应用*, 2021, 42(1): 13–19.
- [7] 毕敬, 刘志辉, 贾有福, 等. 赤峰市空中云水资源人工增雨开发潜力评估[J]. *内蒙古农业科技*, 2015, 43(6): 98–99, 180.
- [8] 高沁, 汪玲, 李琼, 等. 湖南省不同作业期人工增雨的需求探析[J]. *气象研究与应用*, 2021, 42(3): 50–54.
- [9] 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 西北地区空中云水资源的时空分布特征[J]. *高原气象*, 2005, 24(6): 905–912.
- [10] 章文星, 吕达仁. 地基热红外云高观测与云雷达及激光云高仪的相互对比[J]. *大气科学*, 2012, 36(4): 657–672.
- [11] 田磊, 孙艳桥, 胡文东, 等. 银川地区大气水汽、云液态水含量特性的初步分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(6): 1774–1779.
- [12] 田磊, 桑建人, 姚展予, 等. 六盘山区夏秋季大气水汽和液态水特征初步分析[J]. *气象与环境学报*, 2019, 35(6): 28–37.
- [13] 田磊, 桑建人, 姚展予, 等. 基于 Ka 波段云雷达的六盘山顶云特征分析[J]. *气象与环境学报*, 2021, 37(2): 84–90.
- [14] 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.

Study on characteristics of air cloud water resources in Ningxia Based on FY2G satellite

Chang Zhuolin^{1,2}, Dang Zhangli^{1,2}, Sun Yanqiao^{1,2}, Lin Tong^{1,2}

- (1. China Meteorological Administration Key Laboratory of Agricultural Meteorological Disaster Monitoring,
Early Warning and Risk Management in Arid Areas, Yinchuan 750002, China;
2. China Meteorological Administration Key Laboratory of Cloud and Fog Physics/
China Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the development and utilization efficiency of air cloud water resources in Ningxia, the temporal and spatial variation characteristics of cloud micro characteristics in different regions of Ningxia were analyzed by using FY2G satellite inversion products, automatic station precipitation data and microwave radiometer inversion products from 2017 to 2019. The precipitation efficiency of liquid water content and the development potential of cloud water resources were also studied. The results show that (1) after removing the unreasonable data, the FY2G satellite inversion results have a good correlation with the microwave radiometer inversion results, and the inversion products can basically represent the characteristics of cloud water resources in Ningxia. (2) The thickness of the cloud supercooling layer in Ningxia is about 1.65~2km, the liquid water content is 0.02~0.5mm, the average cloud optical thickness is 3~7, and the effective radius of cloud particles is 3~8 μ m. (3) The precipitation efficiency of cloud liquid water in Ningxia is 53.9%, and the potential of artificial precipitation is 46.1%. The precipitation efficiency of cloud liquid water decreases successively in summer, autumn, spring and winter.

Key words: FY2G; vertical cumulative liquid water content; cloud optical depth; supercooling layer thickness; effective particle radius