

王瑞英,周文韬,任丹阳,等. 基于 ERA5 资料的陕西地区云水资源评估[J]. 陕西气象,2023(6):10-16.

文章编号:1006-4354(2023)06-0010-07

基于 ERA5 资料的陕西地区云水资源评估

王瑞英^{1,2},周文韬²,任丹阳³,薛文华²

(1. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

2. 西安市人工影响天气服务保障中心,西安 710016;3. 西安市大气探测中心,西安 710016)

摘要:利用 1981—2020 年欧洲中心高分辨率 ERA5 再分析资料及站点实测降水资料,通过中国气象局人工影响天气中心发布的云水资源监测评估方法,对陕西云水资源进行了评估。结果表明:陕西年均水汽总量 $28\ 670.2 \times 10^8$ t,水凝物总量 $1\ 938.4 \times 10^8$ t,降水总量 $1\ 390.7 \times 10^8$ t,云水资源总量 547.7×10^8 t,“南多北少”的纬向分布特征明显;近 40 a 陕西全域云水资源呈下降趋势,含量丰沛的南部地区下降最为明显;液态水凝物主要位于低层 850~600 hPa,固态水凝物主要位于中层 650~350 hPa,根据水凝物垂直分布,春、秋两季人工影响天气的适宜催化高度约为 3~5 km,冬季 2~4 km,夏季 4~8 km;陕西西、南边界水汽和水凝物净流入,东、北边界净流出,区域整体净收支为正,多年气候倾向率为负,呈下降趋势。

关键词:ERA5 再分析资料;云水资源;空间分布;水资源收支

中图分类号:P426

文献标识码:A

近年来,在全球变暖和大气环流年代际突变的背景下^[1-3],干旱和洪水等与降水相关的极端气象事件频发,水资源短缺问题日益凸显^[4-6]。空中云水资源作为一种潜在的水资源,是生态环境的重要组成部分,其总量十分丰富,但空中水资源只有 15% 左右形成了地表水资源^[7-8]。科学评估区域内云水资源分布及演变情况,对指导本地人工影响天气战略布局,加快空中水资源开发利用及缓解水资源短缺等具有重要意义。刘芸芸等^[9]通过对西北干旱区空中水资源特征的研究发现,1979—2008 年西北干旱区整层年水汽含量略有增加,夏季水汽总收入受中纬度西风变化的影响呈现显著增加趋势。解承莹等^[10]从区域可降水量与水汽收支变化等方面剖析了青藏高原夏季空中水资源时空变化特征及机制。受观测手段限制,以往的研究多侧重于空气中的气态水物质,将水汽、大气可降水量等作为研究云水资源的主要指

标,鲜少涉及云中固态或液态的水凝物。随着大气探测、数据同化等技术的发展,一些专家学者开始尝试使用能够区分云中不同相态水物质的卫星或再分析资料开展云水资源的相关研究。杨大生等^[11]利用 CloudSat 卫星资料分析了中国夏季月平均云水含量的分布及变化特征,认为平均云液水含量垂直廓线存在两个峰值区,平均冰水含量的高值区主要在对流层中上部,青藏高原地形以及东亚夏季季风对云含水量分布具有明显影响。刘菊菊等^[12]利用 ERA-Interim 再分析数据,分析了中国云水量的时空分布特征及变化趋势,发现中国云液水含量大值区主要在四川东部至湖南一带的中低层,云冰水含量大值区则主要位于我国中东部地区的中高层。中国气象局人工影响天气中心 2016 年提出了云水资源监测评估方法 (cloud water resource-monitoring and evaluation method,简称 CWR-MEM)^[13],为我国云水

收稿日期:2022-12-15

作者简介:王瑞英(1993—),女,汉族,陕西宝鸡人,硕士,助理工程师,主要从事短期气候预测研究。

基金项目:陕西省气象局秦岭与黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023Y-10);西安市科协青年人才托举计划项目(095920221313)

资源的研究打开了新的开端。张玉欣等^[14]、张正国等^[15]利用 CWR-MEM 方案分别对青海、广西地区开展了云水资源评估,得到了具有指导意义的本地区云水资源总量和分布特征。

陕西深居大陆腹地,南北跨度大,由高原、山地、平原和盆地等多种地貌构成,气候差异明显,降水时空分布极不均匀^[16],水资源安全风险高,同时也缺乏精细化的云水资源评估结论指导本地区人工影响天气工作的开展。使用 ERA5 再分析资料,利用 CWR-MEM 方案,从云水资源总量、云中不同相态水物质分布、输送及收支特征等角度开展陕西地区云水资源评估,以期为本地区科学开发空中水资源提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料

云水及大气环流场资料来源于欧洲中期数值预报中心(ECMWF)发布的第五代全球客观再分析资料产品 ERA5,数据包括云液水、云冰、雨、雪、水汽、水平风场、温度场、地面蒸发及地面气压,水平分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 1 h,除地面蒸发和地面气压场外,垂直分辨率从 1 000~100 hPa 共 27 层,数据长度为 1981—2020 年。ERA5 数据使用了综合预报系统(IFS)CY41R2 模式 4D-Var 数据同化产生,相较于过去研究云水常使用的 CloudSat、MODIS 卫星资料及 ERA-Interim 再分析资料,不仅具有更高的时空分辨率,还采用了更为详细的云水参数化方案,能够根据云水不同相态及粒径区分出云液水、云冰、雨和雪。陕西同时段降水数据来源于中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0),剔除缺

测站点后共有 94 个站点数据参与计算。

1.2 评估方案

评估方案主要参照中国气象局人工影响天气中心 2016 年发布的 CWR-MEM^[13]。定义 ERA5 数据中云液水、雨 2 个量之和为液态水凝物,云冰、雪 2 个量之和为固态水凝物,液态、固态水凝物之和为总水凝物。水汽和水凝物统称为空中水资源。

根据 T 时段内,任意区域水汽、水凝物平衡方程

$$\text{水汽终值} - \text{水汽初值} = \text{水汽输入} - \text{水汽输出} + \text{蒸发} - \text{凝结} + \text{地面蒸发}, \quad (1)$$

$$\text{水凝物终值} - \text{水凝物初值} = \text{水凝物输入} - \text{水凝物输出} + \text{凝结} - \text{蒸发} - \text{降水}, \quad (2)$$

得云水资源计算方法:

$$\text{水汽总量} = \text{水汽初值} + \text{水汽输入} + \text{地面蒸发} - \text{蒸发}, \quad (3)$$

$$\text{水凝物总量} = \text{水凝物初值} + \text{水凝物输入} + \text{凝结}, \quad (4)$$

$$\text{云水资源总量} = \text{水凝物总量} - \text{降水总量}. \quad (5)$$

由于云内蒸发和凝结难以监测和计算,将凝结-蒸发作为整体,由水汽和水凝物平衡方程计算求得。当凝结-蒸发为正时,凝结量大于蒸发量,定义该数值为某格点柱单位时间的凝结量,反之则为蒸发量。

2 陕西省云水资源评估结果

2.1 空中水资源总体情况

1981—2020 年近 40 a 陕西空中水资源总量及降水转化效率平均值见表 1。空中水资源总量

表 1 1981—2020 年陕西地区年均空中水资源量

云水资源评估量	年均值	说明
水汽总量/(10^8 t)	28 670.2	评估时段内,评估区域内参与大气水循环过程的所有水汽收入量。
水凝物总量/(10^8 t)	1 938.4	评估时段内,评估区域内参与大气水循环过程的所有水凝物收入量。
降水总量/(10^8 t)	1 390.7	评估时段内,评估区域的降水总量。
水汽凝结量/(10^8 t)	1183.4	评估时段内,评估区域的水汽凝结总量。
云水资源总量/(10^8 t)	547.7	评估时段内,评估区域内水凝物总量没有降落到地面的部分。
水汽降水效率/%	5	一定范围,一段时间中,降水总量占水汽总量的概率。
水凝物降水效率/%	72	一定范围,一段时间中,降水总量占水凝物总量的概率。

约为 $30\ 608.6 \times 10^8$ t, 换算成单位面积上的水深约为 14.8 m, 其中年均水汽总量 $28\ 670.2 \times 10^8$ t, 占 94%; 液态或固态的水凝物总量 $1\ 938.4 \times 10^8$ t, 仅占 6%, 水汽转化为水凝物的凝结量为 $1\ 183.4 \times 10^8$ t, 占水凝物总量的 61%, 说明水凝物主要由区域内大气运动凝结而成, 本地生消对其含量影响较大。水凝物含量虽少却是影响降水量的直接因素^[17-18], 陕西每年约有 $1\ 390.7 \times 10^8$ t 降水降落至地面, 相当于全区年平均降水量 674.6 mm, 水汽降水效率约为 5%, 而水凝物向降水的自然转化率为 72%。根据 CWR-MEM 计算, 陕西空中留存云水资源约有 547.7×10^8 t, 含量丰沛, 仍有很大一部分水凝物未产生地面降水, 有一定开发利用空间。

2.2 空中水资源空间分布特征

2.2.1 水平分布

根据陕西多年平均空中水资源水平分布情况, 水汽和水凝物“南多北少”的纬

向分布特征明显。整层水汽瞬时值含量在 $10 \sim 24$ kg/m² 之间(图 1a), 大值中心及次大值中心分别位于陕南和关中盆地。水汽的这种分布形式或与地形、地面河流密切相关: 一方面秦岭阻挡了大部分南来的水汽, 造成秦岭以南水汽含量丰富; 另一方面关中北、西、南三面地势较高, 偏东风气流的水汽输送受地形阻挡在关中平原内堆积。相较于水汽, 水凝物含量偏小近 2 个量级(图 1b), 主要在 $0.12 \sim 0.36$ kg/m² 之间变化, 自南向北递减, 陕南水凝物平均含量约为陕北的 2 倍。其中, 液态水凝物含量大于固态水凝物(图 1c), 水平分布与总水凝物分布相似; 固态水凝物除陕南南部外, 在关中南部的山地一带也有较高含量(图 1d), 这可能与秦岭大地形强迫气流抬升有关, 水汽及液态水凝物易凝华、冻结成冰晶。

陕西年降水量南北递减特征明显(图 2a), 陕北平均在 600 mm 以下, 关中 500~700 mm, 陕南

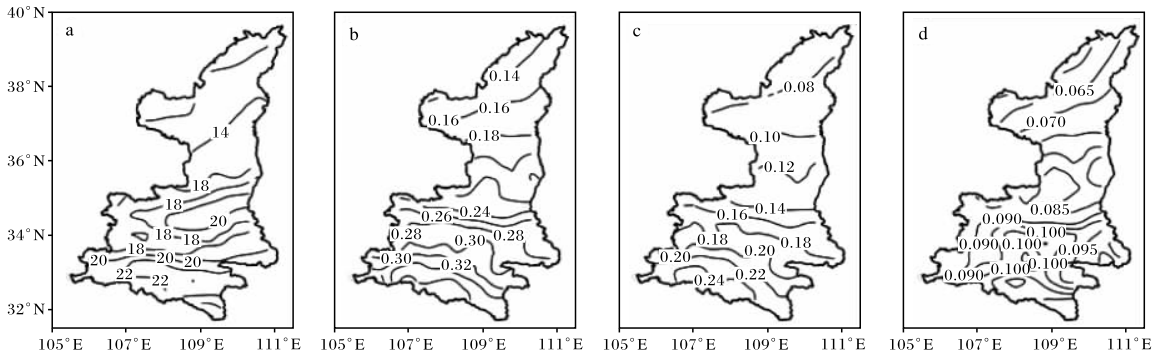


图 1 1981—2020 年陕西地区水汽(a)、总水凝物(b)、液态水凝物(c)、固态水凝物(d)多年平均瞬时值的空间分布(单位均为 kg/m²; 审图号为 GS(2019)3333 号)

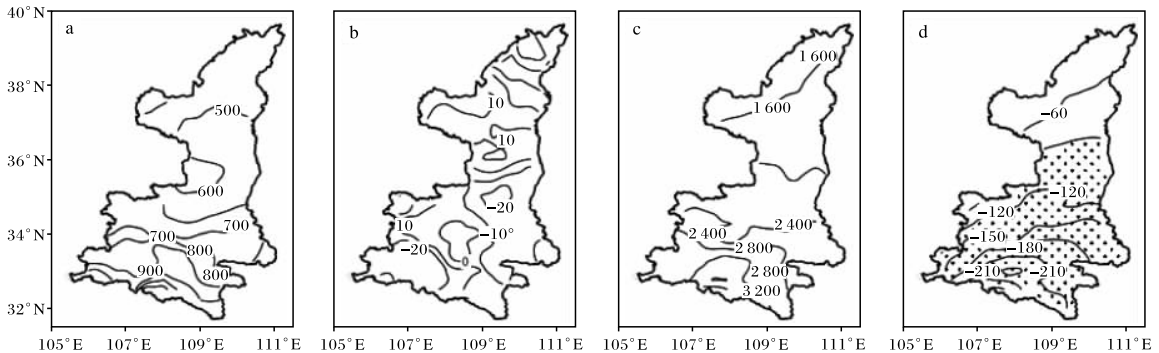


图 2 1981—2020 年陕西地区年降水量(a, 单位为 mm)、年降水量气候倾向率(b, 单位为 mm/10 a)、年云水资源(c, 单位为 kg/m²)、年云水资源气候倾向率(d, 单位为 (kg/m²)/10 a; 黑点区域表示通过 0.01 的显著性检验)的空间分布(审图号为 GS(2019)3333 号)

大于 800 mm, 分布形势与水凝物相似。计算降水量与水凝物含量之间的相关关系, 发现二者相关系数高达 0.824, 变化趋势一致, 而降水与水汽含量的相关系数仅 0.462, 在一定程度上反映了降水主要受水凝物分布的制约。从 1981—2020 年降水量气候倾向趋势的空间分布(图 2b)可以看出, 陕北地区年降水量呈增加趋势, 气候倾向率为 0~30 mm/10 a, 关中和陕南以降水减少为主, 气候倾向率在 -20 mm/10 a 上下, 均未通过显著性检验。进一步根据 CWR-MEM 评估云水资源量的空间分布(图 2c), 结果表明陕南云水资源最为丰沛, 大部分地区云水含量在 2 800 kg/m² 以上, 由南向北递减。近 40 a 来, 陕西全域云水资源量呈下降趋势(图 2d), 云水含量越丰沛的南部地区下降越明显, 陕南云水资源量的气候倾向率约为 -200 (kg/m²)/10 a, 极值达 -240 (kg/m²)/10 a, 关

中的为 120~180 (kg/m²)/10 a, 陕北的则在 90 (kg/m²)/10 a 以下, 延安中部以南地区通过了 0.01 的显著性检验。

2.2.2 垂直分布 大气中的水汽含量随高度递减, 主要集中在离地面 4 km 以下的气层中, 而水凝物的垂直分布相对复杂。为了了解陕西水凝物的垂直分布特征, 沿 106.5°E~110.5°E 分别做液态水凝物和固态水凝物的垂直剖面。可以看出液态水凝物(图 3a)在垂直方向上的大值区主要位于低层 850~600 hPa, 对应温度 -5~10 °C, 同一高度上液态水凝物含量自南向北递减, 陕南地区含量最高, 主要在 0.04~0.08 g/kg 之间, 约为陕北的 3~4 倍。固态水凝物垂直分布(图 3b)的大值区主要位于 650~350 hPa, 温度在 -30~-5 °C 之间, 大值中心水凝物含量超 0.024 g/kg, 主要位于秦岭所在的 32°N~34°N, 与地形关系密切。

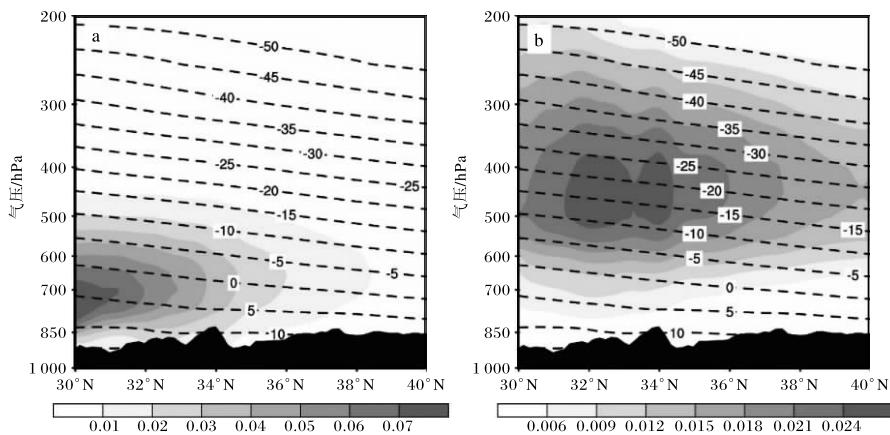


图 3 1981—2020 年陕西地区液态水凝物(a)、固态水凝物(b)瞬时均值(阴影, 单位为 g/kg)与温度(等值线, 单位为 °C)沿 106.5°E~110.5°E 的垂直分布

陕西作为西北内陆省份, 人工增雨雪的主要方案为碘化银催化方案, 其主要原理是在 -15~0 °C 的过冷云水区播撒大量人工冰核, 使云体迅速冰晶化释放大量冻结潜热和凝结潜热, 从而使云体在垂直和水平方向发展。前述分析表明, 在 -15~0 °C 高度上, 既存在液相的过冷水滴, 又存在固相冷云冰晶。为探究陕西不同季节人工增雨雪适宜作业高度, 进一步沿 106.5°E~110.5°E 做总水凝物的四季垂直分布图(图 4)。陕西春、秋、冬总水凝物垂直分布相似, 大值区主要位于低层 850~600 hPa; 秋季水凝物平均含量最高, 冬季次

之, 春季较少。春、秋两季水凝物大值区对应温度 -5~10 °C, 主要为液相水滴组成的暖云, 云上部分适合作业, 平均催化高度约为 3~5 km; 冬季水凝物大值区对应 -15~0 °C, 主要为液相过冷水滴和冰相粒子组成的混合态冷云, 适宜催化高度 2~4 km。夏季水凝物分布与春、秋、冬不同, 垂直方向上大值中心主要位于 500 hPa 上下, 对应 -15~5 °C, 人工增雨作业平均适宜高度约为 4~8 km。

2.3 陕西云水资源输送及收支状况

受西南季风与北半球中纬度西风影响, 陕西地区云水资源主要通过西、南边界输入, 由东、北

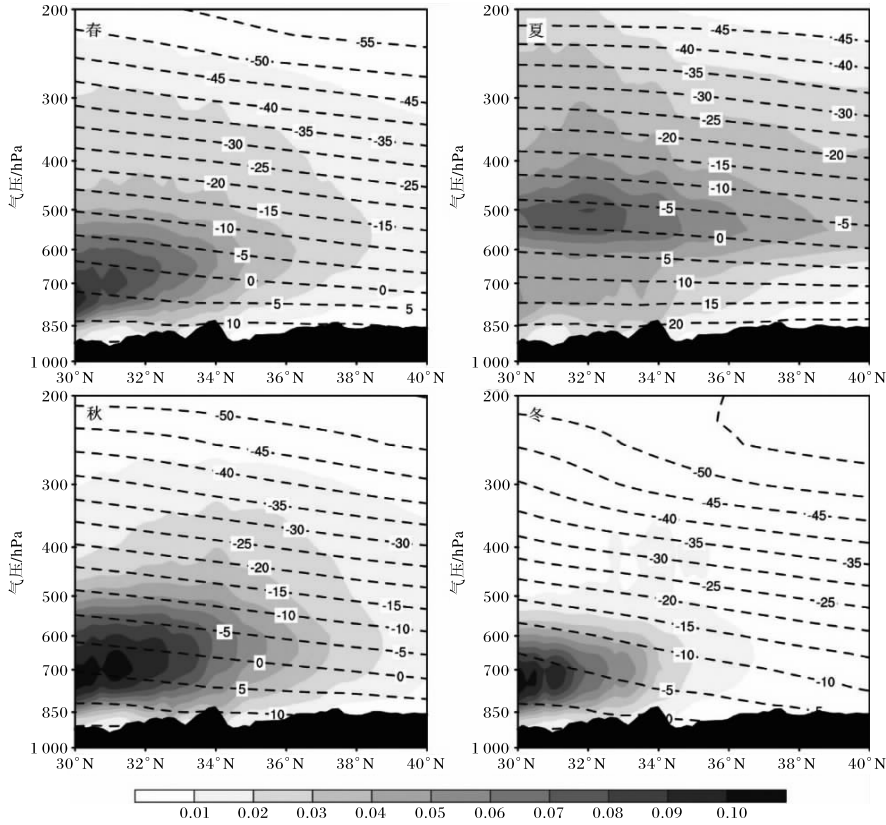


图4 1981—2020年陕西地区总水凝物四季瞬时均值(阴影,单位为g/kg)与温度(等值线,单位为℃)沿106.5°E~110.5°E的垂直分布

边界输出。进一步探究陕西各季、各边界空中水资源的收支状况(表2),可以看出,水汽与水凝物各季节纬向净收支为负,经向净收支为正,区域总体则为净收入。从季节变化来看,水汽夏季总体

净收入最大,秋季次之,冬季最小。夏季南边界水汽输入量为全年之最,西边界输入量仅次于秋季,对应西南季风水汽输送;春、秋南亚季风减弱,但西太平洋反气旋环流较强,西、南边界仍有一定量

表2 1981—2020年陕西年均水汽、水凝物边界收支情况

云水资源	季节	侧边界净收支				纬向净收支	经向净收支	总体净收支
		东	西	南	北			
水汽/(10 ⁶ kg/s)	春	-43.82	36.78	10.32	-2.04	-7.03	8.28	1.24
	夏	-48.63	43.55	28.08	-17.04	-5.08	11.04	5.95
	秋	-56.00	47.37	19.50	-7.61	-8.63	11.88	3.25
	冬	-33.37	27.27	5.60	1.06	-6.10	6.66	0.56
	全年	-45.46	38.74	15.87	-6.41	-6.71	9.46	2.75
水凝物/(10 ⁴ kg/s)	春	-73.65	69.50	36.98	-13.92	-4.16	23.06	18.90
	夏	-79.70	71.70	25.10	-17.05	-8.00	8.05	0.05
	秋	-93.39	83.34	56.35	-21.34	-10.05	35.01	24.96
	冬	-44.73	40.74	32.45	-7.88	-4.00	24.56	20.56
	全年	-72.87	66.32	37.72	-15.05	-6.55	22.67	16.12

的水汽输送;冬季受中纬度西风带影响,纬向输送量大于经向输送,总体净收入为四季最小。水凝物秋季总体净收支最大,冬、春季次之,夏季最小。秋季水凝物水平输送强,西、南边界的水平输入量为四季最大;冬季水凝物水平输送量最小,但总体净收支仅次于秋季;夏季西边界输入较强,但东、北边界输出量也较大,导致区域总体净收支最小。

水汽、水凝物的水平输送作为大气水循环过程中的一个重要环节,影响着云水资源分布、局地气候变化等。为探明陕西云水资源下降原因,分别分析水汽、水凝物收支逐年变化(图5)。陕西

水汽收支年际波动明显,纬向净收支为正,长期变化趋势下降,气候倾向率为 -0.41×10^6 (kg/s)/10 a;经向净收支为负,存在上升趋势,气候倾向率为 0.08×10^6 (kg/s)/10 a,小于纬向净收支下降速率,因而陕西区域总体净收支下降,平均每10 a水汽净收入量降低 0.32×10^6 kg/s,通过了0.05的显著性检验。水凝物收支演变与水汽一致,但趋势更为明显,纬向、经向及总体净收支的气候倾向率分别为: -1.91×10^4 (kg/s)/10 a、 1.25×10^4 (kg/s)/10 a和 -0.65×10^4 (kg/s)/10 a,纬向、经向净收支均通过了0.05的显著性检验。

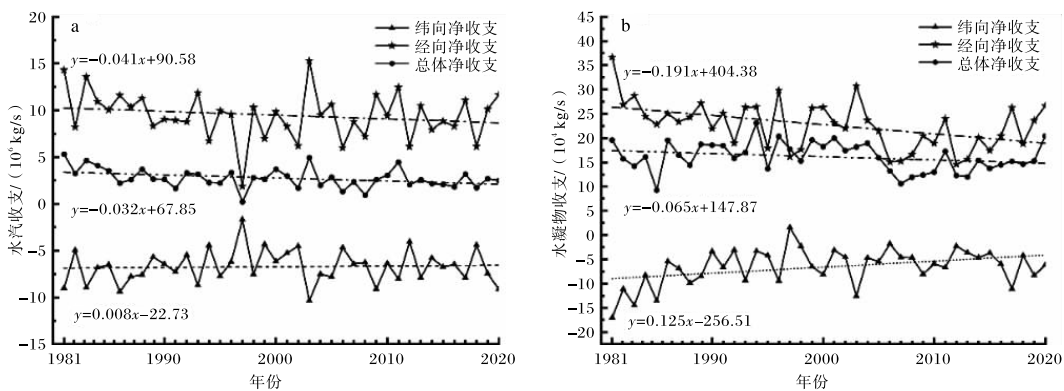


图5 1981—2020年陕西地区水汽(a)、水凝物(b)收支年际变化

进一步分析水汽、水凝物输送量与云水资源的相关性,前者与云水资源含量的相关系数为0.78,后者为0.33,均通过0.01的显著性检验。结合前述水汽凝结量及凝结量占比的分析,表明陕西地区的云水资源主要由水汽水平输入后通过区域内抬升凝结等方式相变而来,水汽的水平输送对云水资源含量的影响更大。

3 结论

利用欧洲中心高分辨率ERA5再分析资料及站点实测降水资料,通过中国气象局人工影响天气中心发布的CWR-MEM方案,对陕西1981—2020年近40 a的云水资源含量、分布及演变特征进行了分析,主要得出以下结论。

(1)陕西年均水汽总量 $28\ 670.2 \times 10^8$ t,水凝物总量 $1\ 938.4 \times 10^8$ t,降水总量 $1\ 390.7 \times 10^8$ t,水凝物降水效率72%,云水资源 547.7×10^8 t,空中留存未形成地面降水的云水资源含量丰沛,可开发潜力大。

(2)陕西水汽、水凝物、云水资源及降水的水平空间分布整体表现为“南多北少”的纬向特征。水汽存在两个大值中心,分别位于陕南和关中盆地;水凝物自南向北递减,含量较水汽偏小近2个量级;年降水量分布与水凝物相似,二者相关性较好,陕北年降水量呈增加趋势,关中和陕南以降水减少为主,变化量均在30 mm/10 a以下;陕南云水资源最为丰沛,由南向北的递减,近40 a陕西全域云水资源量呈下降趋势,陕南下降最为明显。

(3)陕西液态水凝物主要位于低层850~600 hPa,同一高度上自南向北递减,固态水凝物主要位于中层650~350 hPa,主要位于秦岭所在的 $32^\circ\text{N} \sim 34^\circ\text{N}$ 。根据水凝物垂直分布,春、秋两季的催化高度约为3~5 km,冬季高度为2~4 km,夏季为4~8 km。

(4)陕西西、南边界为水汽和水凝物的净流入,东、北边界为净流出,区域总体净收支为正,多年气候倾向率为负,呈下降趋势。水汽夏季区域

总体净收入最大,冬季最小;水凝物秋季最大,夏季最小。

(5)所有的结论来源于 ERA5 再分析资料,且空中水资源凝结、蒸发量的估算方法存在一定误差,仅供参考,需要在以后的工作中通过卫星、微波辐射计、云雷达等设备探测和验证。

参考文献:

- [1] 彭加毅,孙照渤,朱伟军. 70年代末大气环流及中国旱涝分布的突变[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(3): 300-304.
- [2] 沙万英,邵雪梅,黄玫. 20世纪80年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响[J]. 中国科学:D辑, 2002, 32(4): 317-326.
- [3] 苏京志,温敏,丁一汇,等. 全球变暖趋缓研究进展[J]. 大气科学, 2016, 40(6): 1143-1153.
- [4] 陆咏晴,严岩,丁丁,等. 我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1470-1477.
- [5] 王苗,郭品文,邬昀,等. 我国极端降水事件研究进展[J]. 气象科技, 2012, 40(1): 79-86.
- [6] 王熹,王湛,杨文涛,等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程, 2014, 32(7): 1-5.
- [7] 吴海涛,解宏伟,宿策. 青海省空中水资源及其开发潜力评估[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2017, 35(6): 25-32.
- [8] 刘国纬,汪静萍. 中国陆地-大气系统水分循环研究[J]. 水科学进展, 1997, 8(2): 99-107.
- [9] 刘芸芸,张雪芹. 西北干旱区空中水资源的时空变化特征及其原因分析[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(6): 385-392.
- [10] 解承莹,李敏姣,张雪芹. 近30a青藏高原夏季空中水资源时空变化特征及其成因[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 979-989.
- [11] 杨大生,王普才. 中国地区夏季6~8月云水含量的垂直分布特征[J]. 大气科学, 2012, 36(1): 89-101.
- [12] 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.
- [13] 中国气象局人工影响天气中心. 云水资源评估技术指南(2016版)[Z]. 北京:中国气象局人工影响天气中心, 2016.
- [14] 张玉欣,马学谦,韩辉邦,等. 2014—2018年青海省云水资源时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1254-1262.
- [15] 张正国,简悦,李宇中,等. 基于ERA5资料的广西地区云水资源评估[J]. 气象科技, 2021, 49(5): 806-814.
- [16] 刘文莉,张明军,王圣杰,等. 1960—2011年陕西省年内降水分配非均匀性特征及预测[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1877-1887.
- [17] 毛节泰,郑国光. 对人工影响天气若干问题的探讨[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 643-646.
- [18] 雷恒池,洪延超,赵震,等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 967-974.