

用 Aqua/CERES 反演的云参量估算西北区 降水效率和人工增雨潜力

陈乾, 陈添宇, 张鸿

(甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020)

摘要 利用美国 NASA Langley 研究中心提供的云和地球辐射能量系统(CERES), 单个卫星视场大气顶/地面通量和云(SSF)的 Aqua 卫星 2002 年 7 月至 2004 年 6 月的云水路径和冰水路径资料, 分析中国西北地区降水效率和人工增雨潜力。选取天山、祁连山、南疆沙漠和东南部季风区 4 片有代表性的地域, 按该资料的云分类, 分别计算低层云和高层云区域月平均值, 结合相应时期和地区的降水量, 分析不同云层与月降水量的相关。结果表明, 西部干旱区降水与高层云相关较好, 而东南部季风区则与低层云相关好。整个西北区以低层的云水路径与降水量相关系数最高, 平均 $R^2 = 0.8459$ 。定义月降水效率为月平均降水强度(mm/h)除以总的云水路径, 结果表明, 不论低层云或高层云的降水效率都是东南部季风区最大, 祁连山区略大于天山区, 南疆沙漠最小。其年变化低层云除南疆 7 月最高外, 其余地区 8 月最高。高层云的降水效率东南部季风区 8 月最大, 其余 3 片 7 月最高。取 $(LWP/IWP - C) \times LWP$ 作为人工降水最大可能增(减)雨的度量, 则 4 片中祁连山区最大, 其次是天山, 东南部季风区最小, 年平均为负值。人工增雨潜力的年变化表明, 高层云的峰值 A 区和 C 区在 8 月, D 区则在 9 月, 其余峰值均出现在 6 或 7 月。本文重点研究天山、祁连山区地形云人工增雨潜力, 为今后人工增雨(雪), 开发山区云水资源提供科学依据。

关键词 中国西北区; 云水路径; 冰水路径; 降水效率; 人工增雨潜力

中图分类号: P481

文献标识码: A

引言

我国淡水资源短缺, 人均年占水量 $2\ 200\ m^3$, 仅为世界人均占水量 $7\ 300\ m^3$ 的 $1/4$ 。甘肃人均年占水量 $1\ 100\ m^3$ 是全国人均水平的一半^[1]。河西走廊北有腾格里和巴丹吉林 2 大沙漠, 降水稀少, 年均降水量仅 $50 \sim 200\ mm$, 是我国最干燥的区域之一, 人均水资源仅 $706\ m^3$ ^[2]。其用水主要来源于祁连山区的降水, 缺水极为严重, 水资源利用率石羊河流域高达 154%, 黑河 112%, 整个河西 115%, 塔里木河 79%, 准葛尔盆地 80%, 远高于全国 20% 的水平, 超过国际公认的 40% 可开发利用^[3-4]。由于大量占用生态水, 使绿洲荒漠化。为保持社会经济的可持续发展, 对水资源的开发利用必须开源节流, 在节约用水方面目前已有较多对策, 关键是落实。

本文讨论开源的措施, 祁连山和天山是伸向干旱地区的湿岛, 是荒漠中的甘泉。祁连山北坡的雪山冰川养育了河西走廊, 它南坡的冰川融水是青海柴达木北缘城镇和绿洲的生命之源, 也是青海湖的水源。天山是新疆的天然水库, 南、北疆的大部分城镇和绿洲是靠天山的冰雪融水滋润的。为合理地开发山区云水资源, 我们初步探讨了山区地形云人工增雨的潜力。

祁连山脉位于青藏高原东北部, 平均海拔 4 000 m 以上。由于特殊的地理位置和地形作用, 山区东南部受高原夏季风影响, 大坂山口南坡年平均降水量高达 800 mm 以上, 是河西走廊平原地带降水量的 4~16 倍, 显然这些降水多半由地形云引起。观测表明, 山外水汽随午后谷风向山区汇集, 沿山坡抬

收稿日期 2006-07-12 改回日期 2006-08-23

资助项目 国家自然科学基金重点项目“西北地形云结构及降水机理研究”(40533015)资助

作者简介 陈乾(1934-)男, 上海市人, 研究员, 从事卫星遥感应用研究. E-mail: qianchen_2006@yahoo.com.cn

升生成地形云降水,如祁连山东段的乌鞘岭,夏季雨强峰值出现在 14~15 时。2001 年世界气象组织关于人工影响天气技术现状的声明指出:“我们认为对气流流经高山上空形成的云撒播成冰剂是最具有前景的,而且是一种经济上可行的增加降水的方式,对这种类型的云进行人工影响天气作业极具吸引力,因为从水资源管理方面来说,它们可以将水储存在水库或高海拔地区的积雪场。统计证据表明在一定条件下,现有的技术能够增加由过冷却的地形云产生的降水^[5]。作为水汽和降水的中间阶段,云在能量转换和水分循环中起着重要的作用^[6]。但云降水时云中过冷水和冰晶的配置如何?这涉及人工增雨潜力,它是催化地形云成败的关键。

云层特别是过冷却水层的液态水含量和冰水路径,在人工增雨潜力分析和效果评估中很有用^[7]。卫星反演的云参量是监测云宏观特征的重要手段,国际卫星云气候计划(ISCCP)通过收集分析 4 颗静止卫星(GMS , METEOSAT , GOES , INSAT)和至少 1 颗极轨卫星(NOAA)获取的可见光至热红外波段的辐射资料,经过云识别、辐射反演、统计处理后,得到的 ISCCP /D 系列数据集^[8]较原先的 C 数据集有较大地改进。最显著的变化是校正辐射定标,使所用各卫星资料归一化,以除去长期记录序列中的错误变化;用冰晶微物理模式代替水滴模式以降低卷云判识的倾向性偏差,增加更详细的云性质,给出不同类型云的云量、光学厚度和云水路径等。但无冰水路径,而且其空间分辨率(280 km)太低,难以分析山区地形云。陈勇航等^[9]曾用 15 a 的 ISCCP D2 月平均资料,分析了西北地区不同类型云的云量和云水路径的时空分布及其与降水的关系。结果表明,高原气候区是各种云出现最多的地区,特别是积状云的云量明显高于其他地区,但这些云的云水路径值低。高云和部分中云云量空间分布特征与降水有着较好的一致性,绝大多数云类春夏季节云量维持较高,秋冬季节云量较少。云水路径值较大的层状云类的云量多寡与降水相一致,积状云类和层积云类云量多少与降水没有一定的关系。因为其空间分辨率太低,而且分区较粗,未能精确估算天山和祁连山区的云水资源。由于祁连山、天山地区地形云降水过程中云液态水的演变与国内外的研究结果有很大差别,为此利用最新的云参量反演, NASA Langley 研究中心辐射气溶胶室提供的云和地球辐射能量系统(CERES),单个卫星视场大气顶/地面通量和云

(SSF)的全球资料^[10],分析祁连山、天山山区地形云降水效率和人工增雨潜力很有必要。

1 资料来源和处理

CERES/SSF 资料来自 TRMM , Terra 和 Aqua 3 颗卫星搭载的云和地球辐射能量系统(CERES)探测器, CERES 包含 3 个热敏电阻热辐射扫描仪,能测量近可见光直到远红外光谱区的辐射。其中短波探测器测量地球反射和放射的太阳辐射;窗区探测器测量在水汽窗区地球放射的长波辐射;总的探测器测量总的地球反射和放射的辐射。

CERES 扫描周期 6.6 s,每隔 0.01 s 取样一次,当探测器转到垂直平面时,实施对地球观测。CERES 判识云时需用同一颗卫星的图像资料,对 Terra 和 Aqua 卫星用 MODIS 光学遥感仪器,它具有 36 个光谱通道,分布在 0.4~14 μm 的波谱范围内。其中能反演云参量的有 19 个通道, 0.645 μm 波段提供 250 m 分辨率的测值。

CERES 采用新一代的角分布辐射传输模式算法^[11],以满足显著的各向异性辐射场,对反演云性质和大气顶及地表辐射通量有较大地改进,比以往用地球辐射收支试验(ERBE)资料的估算精度提高了一倍。它提供了云性质合理的反演,得出与地面到大气顶辐射通量相一致的地表和云参量的计算。单个卫星视场大气顶/地面通量和云(SSF)的数据集,其空间覆盖依赖卫星轨道, Terra 和 Aqua 卫星能覆盖全球,每个 SSF 区组包含 1 h 资料,接近 1 条轨道的 2/3, SSF 的幅(Swath)宽限于图幅的宽度。

TRMM 高度低分辨率高(10 km),但只能覆盖南北纬 40°,此星发射后仅 8 个月 CERES 仪器出现故障,于 1998 年 9 月 1 日停止工作。Terra 卫星 2000 年 2 月 25 日有资料,但其早晨过境,对监测山区地形云不利。Aqua 卫星 14~15 时经过祁连山、天山地区,正值山顶(如乌鞘岭)降水率达峰值时刻。为此我们采用 Aqua 2002 年 7 月至 2004 年 6 月整 2 a 每天下午的 SSF 数据集,它由确定云性质、大气顶和地面辐射通量的子集构成,按 CERES 的算法理论基础文件(ATBD)反演总云量^[12],按云的有效气压 P_e 确定云层高度,并将云分为单层云和双层云 2 类共 10 种,单层云 4 种:①低云 L($P_e > 700$ hPa);②低中云 LM($700 > P_e > 500$ hPa);③高中云 UM($500 > P_e > 300$ hPa);④高云 H($P_e < 300$ hPa);双层云 6 种是上述 4 种云的组合^[13]。统计

时将 L, LM 合并为 A 类, 我们称其为低层云; UM, H 合并为 B 类(高层云)如图 1 所示。分别估算这 2 类云的云量、云的光学厚度、云水路径及冰水路径等^[14-15]。

CERES 辐射仪像素分辨率 2 km, SSF 的空间分辨率取决于视场或称星下足印(Footprint), TOV 的视角沿卫星飞行轨道 1.3°, 正交于轨道 2.6°, 卫星高度 705 km, 因此它在天顶时地面的视场为 16 km × 32 km 的椭圆, 其空间分辨率 20 km(图 1)。我们用该资料先对西北地区, 特别是祁连山、天山山区地形云参量与降水的关系作了统计分析。

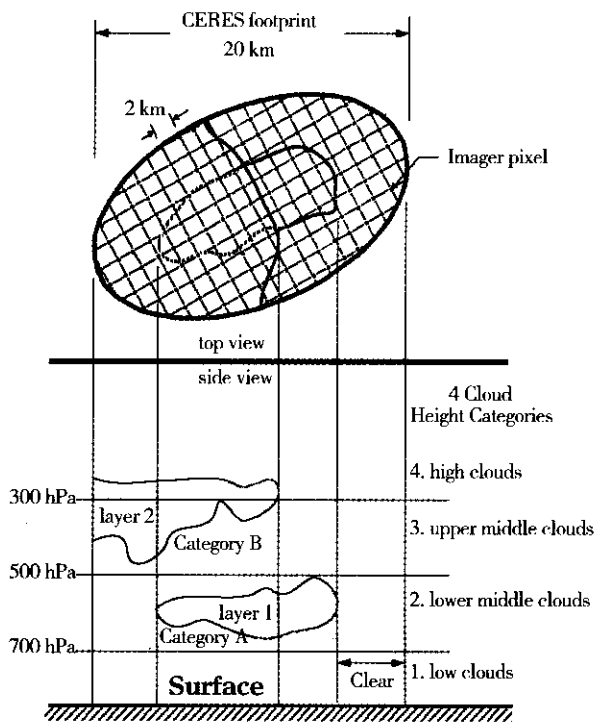


图 1 CERES 的空间分辨率和云的几何图形^[10]

Fig. 1 CERES spatial resolution and cloud geometry^[10]

2 云参量与降水的关系分析

低云液态水路径的年平均空间分布与同时段(2002 年 7 月至 2004 年 6 月)的年平均降水量对应较好, 沿天山、祁连山一带以及陕南等地是云水和降水的高值区, 年雨量中心分别达 500、600 和 900 mm 以上。低值区在塔里木、柴达木盆地和巴丹吉林沙漠等地 < 50 mm。雨量距平图表明, 西北区东部接近常年。西部除个别站出现负距平外, 大多数地区较常年偏多, 最大在南疆西南部, 距平中心达 140%,

其次是天山和祁连山区中西部达 40% ~ 60%, 山区某些站如山丹马场 2003 年雨量达 522.6 mm, 破 48 a 历史记录。这时段天山和祁连山的地形云较常年偏多*, 故 Aqua/MODIS 卫星资料年代虽短但其下午的测值对分析山区地形云有代表性。我们将西北区分为东南部季风区 A(32 ~ 36°N, 103 ~ 111°E)、祁连山 B、天山 C 和南疆沙漠 D 4 个区(图 2)。分区统计其高层云和低层云的云水路径及冰水路径逐月和年平均值, 如表 1 和表 2 所示。为计算与卫星分区相对应的同期逐月区域平均降水量, 东南季风区范围内取 38 站, 其中有 2 个高山站, 祁连山区 11 站, 海拔高度均在 2 100 m 以上, 其中 5 站海拔 3 000 m 以上; 天山区用 6 个基准站, 仅吐尔伯特站海拔 3 507 m, 其余 1 753 ~ 2 459 m, 南疆取 10 站; 其年变化如图 3。对照各区低云和高云的平均云水路径年变化(图 4)可看出, 东南部季风区降水最多, 但夏季云水反比天山和祁连山区少。这定性表明山区

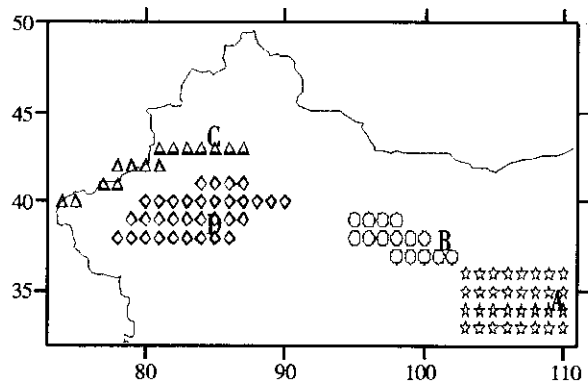


图 2 西北区分区示意图(东南部季风区 A, 祁连山区 B, 天山区 C, 南疆沙漠 D)

Fig. 2 The four different regions of Northwest China

降水效率低, 人工增雨潜力大。此外祁连山和天山雨峰在 7 月而云水 6 月最多, 与 6 月山区霁日多对应, 这表明 6 月山区地形积云发展最盛。冬季天山降雪大, 而云水路径祁连山区大于天山。但低层云冰水路径天山明显大于祁连山区(表 1、表 2), 因此冬季天山降雪效率较高, 同时也表明祁连山区人工引晶增雪潜力较大。

与相应月降水量的相关统计表明, R^2 一般都在 0.5 以上, 平均 0.6915。就地区而言南疆最差, 可能因降水稀少加之测站位于沙漠边缘的绿洲缺乏代表

* 陈乾, 陈勇航, 黄建平, 等. 利用 CERES/SSF 资料对西北区云参量和降水的初步分析(待发表).

性 其余 3 区较接近平均为 0.74 ~ 0.76。就地区而言与降水量相关最好的云参量各区有差异,东南部季风区(A 区)低云总云水路径最高达 0.923,祁连山区(B 区)高云光学厚度最好为 0.9644,天山(C 区)和南疆(D 区)则以高云的液态水路径最高分别为 0.9228 和 0.8023*。总之西部干旱区降水与高层云参量相关较好,而东南部季风区则与低层云参量相关好。此乃西部凝结高度高,甘肃河西和青海柴达木探空相对湿度峰值位于 500 ~ 300 hPa(1 月

除外),且愈往西北愈高,如极干旱的敦煌、冷湖湿度峰值在 300 hPa。统计表明,河西密卷云出现频率最高,区域性降水的云为蔽光高层云和复高积云。整个西北区以低层云的液态水路径与降水量相关系数最高,样本数为 24 个月平均 $R^2 = 0.8459$ 。除 A 区外均通过了信度 $\alpha = 0.0001$ 的 F 检验, B, C, D 3 区的检验值 F 分别为 12.14, 34.06 和 25.69, $> F_{\alpha} = 11.14$, A 区的 $F = 1.66$ 仅通过 $\alpha = 0.25$ 的 F 检验。

表 1 A, B, C, D 各区逐月和年区域平均低云和高云的液态水路径(LWP) χ 单位 $g \cdot m^{-2}$
Tab. 1 The regional averages of monthly and annual mean cloud liquid water path for lower and upper layer clouds over region A, B, C, D

地 区	低云的液态水路径(LWP)				高云的液态水路径(LWP)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	72.20	46.35	21.61	43.81	60.13	43.91	23.32	51.14
2	100.86	87.44	34.75	58.65	97.24	80.05	34.75	56.60
3	160.58	98.85	61.56	87.35	123.28	78.44	54.04	76.44
4	171.03	134.27	108.91	75.48	133.28	91.91	83.10	76.82
5	205.90	269.33	238.77	88.23	116.73	147.70	125.13	80.55
6	222.02	314.04	377.88	100.18	125.77	159.86	189.36	86.01
7	215.29	257.93	362.81	97.16	141.68	132.55	166.94	73.75
8	251.97	209.09	248.61	53.60	195.11	122.60	156.63	55.17
9	221.29	153.80	133.25	80.93	149.96	102.09	134.45	81.08
10	166.33	100.33	95.62	29.27	147.31	91.24	95.87	55.69
11	131.78	58.95	58.46	52.08	117.98	62.45	51.61	56.03
12	105.15	51.82	40.71	65.22	100.74	44.33	37.03	69.63
年平均	168.70	148.57	148.58	69.33	125.75	96.43	96.02	68.24

注 经分析原资料可能将液态水路径和冰水路径存放颠倒,本表所列数据是原资料的冰水路径。

表 2 A, B, C, D 各区逐月和年区域平均低云和高云的冰水路径(IWP) χ 单位 $g \cdot m^{-2}$
Tab. 2 The regional averages of monthly and annual mean cloud ice water path for lower and upper layer clouds over region A, B, C, D

地 区	低云的冰水路径(IWP)				高云的冰水路径(IWP)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	53.23	49.64	57.41	34.87	73.17	47.28	44.01	45.82
2	62.31	46.97	54.51	28.26	72.94	72.45	30.53	29.59
3	86.86	48.91	66.29	25.23	109.97	81.87	36.24	11.66
4	90.74	42.74	84.62	29.03	77.52	67.79	66.95	14.07
5	101.97	60.83	85.83	30.45	63.39	83.02	86.27	12.10
6	92.78	54.85	73.04	31.49	43.82	13.91	65.94	12.72
7	87.82	54.17	72.74	36.83	55.84	10.97	34.54	9.97
8	116.88	47.92	56.65	28.28	50.08	19.91	21.11	9.77
9	125.24	52.40	63.23	28.00	57.84	31.73	35.26	9.33
10	101.40	37.77	60.97	19.43	98.05	26.31	49.25	14.16
11	80.91	50.97	67.98	24.61	98.17	40.87	53.83	36.26
12	83.03	56.92	96.04	43.91	102.59	65.62	59.84	59.00
年平均	90.27	50.34	69.94	30.03	74.45	46.81	48.65	22.04

* 陈乾, 陈勇航, 黄建平, 等. 利用 CERES/SSF 资料对西北区云参量和降水的初步分析(待发表).

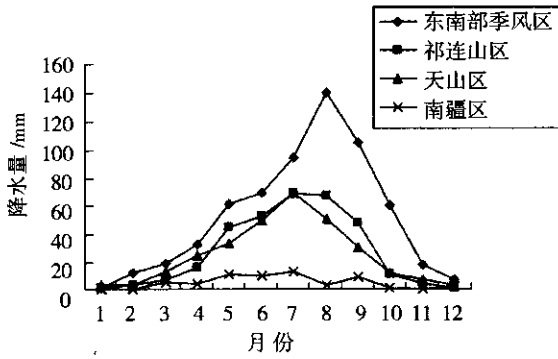


图3 A, B, C, D 各区 2002 年 7 月至 2004 年 6 月区域平均逐月降水量

Fig. 3 The regional averages of monthly precipitation over region A, B, C, D from July 2002 to June 2004

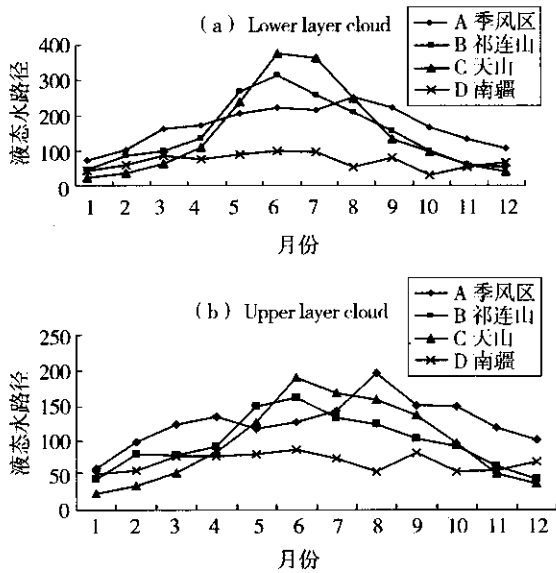


图4 A, B, C, D 各区逐月低层云 (a) 和高层云 (b) 的平均液态水路径 (单位 $g \cdot m^{-2}$)

Fig. 4 The regional averages of monthly cloud liquid water path for lower (a) and upper (b) layer clouds over region A, B, C, D

图5 展示出 A, B, C, D 各区逐月平均低层云的液态水路径与相应月降水量拟合的相关曲线。西北地区雨量最丰沛的东南部和极干旱的南疆月降水量与云参量峰值出现时间一致。故 A 和 C 区随着云参量增加月降水量呈对数增长。祁连山和天山地区为二次曲线, 祁连山区更明显。此乃山区月降水量峰值较云参量峰值推迟出现 1~2 月。山区 7~8 月降水量达峰值时云水路径略有下降。如祁连山区降水量峰值在 7~8 月, 而低云和高云的液态水路径峰值出现在 6 月。天山降水量峰值在 7 月, 高云和低云的云水路径均出现在 6 月。本资料系 Aqua 卫星每天下午的

一次测值, 它表明 6 月山区午后热对流产生的云水资源已达极盛, 西北山区冰雹 6 月最多可以证明。

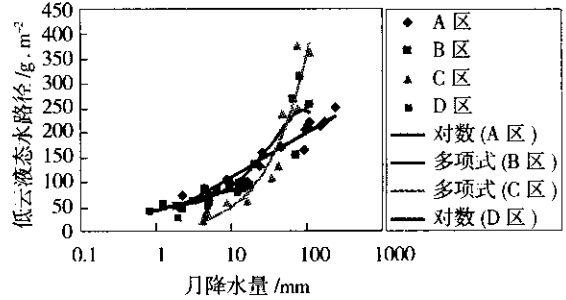


图5 A, B, C, D 各区逐月平均低层云液态水路径与月降水量的相关分析

Fig. 5 The correlation analysis between monthly mean cloud liquid water path for lower layer clouds and monthly precipitation over region A, B, C, D

3 各区降水效率

Aqua 卫星每天下午 14~15 时经过甘肃和新疆, 计算降水效率应取该时段的平均降水强度, 但冬半年没有逐时雨量记录, 故取逐月平均降水强度 (mm/h) 除以总的云水路径作为降水效率, 这对气候分析也许是可行的。众所周知雨强有日变化, 山

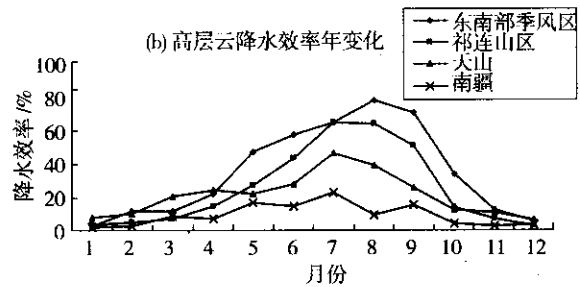
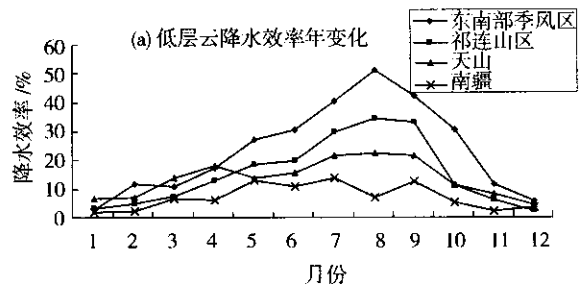


图6 A, B, C, D 各区逐月低层云 (a) 和高层云 (b) 的降水效率 (单位 %)

Fig. 6 The regional averages of monthly precipitation efficiency for lower (a) and upper (b) layer clouds over region A, B, C, D

区雨峰一般在14~20时。甘肃境内祁连山区2000m以上的17个气象站和雨量站6~8月逐时降水的平均值表明,山区夏季14~15时的雨强接近日平均雨强,两者比值为1.04。川区和盆地雨峰通常在夜间,14~15时的雨强比平均雨强小,因此我们计算的降水效率对A区和D区可能偏大。结果表明,不论低层云或高层云的年降水效率都是东南部季风区最大,祁连山区略大于天山区,南疆沙漠最小。其年变化低层云除南疆7月最高外其余地区8月最高,高层云的降水效率东南部季风区8月最大,其余3片7月最高。冬半年天山的降水效率大于祁连山区,夏半年(5~9月)则相反,祁连山区明显大于天山,反映出两者分属不同的气候区。东南部季风区除冬季接近或小于天山外,其余各月降水效率均为4片之首(图6a、6b)。

4 人工降水潜力分析

冷云水滴增长产生降水的机制,主要通过过冷水滴与冰晶混合相云中冰水转化的蒸凝过程(Bergeron process)和冰晶的淞附聚集增长实现。因此,过冷水滴(SWD)越多冰晶(IC)越少,人工引晶增雨潜力越大。可取两者的比值(SWD/IC)减去降

水效率最高时的(SWD/IC)*值即过冷水滴与冰晶的最佳匹配,表示人工降水潜力,正值表示人工催化将增雨,负值可能减雨。但降水效率最高时其值难以确定,因为降水过程还受气溶胶浓度、水汽、上升气流、云状等众多因子影响。目前卫星反演的云参量中没有过冷水,本文取云水路径LWP除以冰水路径IWP代替SWD/IC。假设降水效率最高时的(LWP/IWP)*=C,现设定C=2.15,它是A区低层云8月自然降水效率最高时的LWP/IWP值。将(LWP/IWP-2.15)作为人工引晶增雨潜力的指标。今后随着FY-2C人工影响天气产品的增加,在使用中可修改C值。降水量多寡不仅与过冷水和冰晶含量的比值有关,还与云水有关,因此我们取下式作为人工降水最大可能增(减)雨的度量:

$$LAP = (LWP/IWP - C) \times LWP \quad (1)$$

上式LAP为人工降水最大可能增(减)雨量。它可作为对某云层是否催化的判据,在人工增雨作业决策指挥系统中试用。

西北各区逐月和年平均人工增雨潜力如表3,可看出4片中祁连山区最大,其次是天山,东南部季风区最小,年平均为负值。这证明在祁连山进行人工增雨,条件得天独厚,基本上可以全年开展。

表3 A、B、C、D各区逐月和年区域平均低云和高云的人工降水潜力(单位: g·m⁻²)

Tab.3 The regional averages of monthly and annual mean latent capacity of artificial precipitation for lower and upper layer clouds over region A, B, C, D

项 目	低层云人工降水潜力 (LWP/IWP-2.15)×LWP				高层云人工降水潜力 (LWP/IWP-2.15)×LWP			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	-57.31	-56.37	-38.33	-39.16	-79.86	-53.63	-37.78	-52.87
2	-53.59	-25.21	-52.56	-4.39	-79.43	-83.66	-35.16	-13.43
3	-48.40	-12.75	-75.18	114.57	-126.88	-93.50	-35.61	336.56
4	-45.35	133.17	-93.98	34.00	-57.39	-72.99	-75.51	254.34
5	-26.93	613.49	150.87	65.96	-36.02	-54.78	-87.53	363.00
6	53.97	1122.80	1142.48	103.28	90.53	1493.51	136.65	396.83
7	64.91	673.70	1029.61	47.38	54.89	1316.54	447.85	386.79
8	1.45	388.22	556.57	-13.64	340.65	491.38	825.59	192.87
9	-84.79	162.90	-5.65	59.93	66.36	108.93	223.60	529.96
10	-84.78	50.79	-55.61	-18.84	-95.41	120.20	-19.50	99.21
11	-68.70	-58.56	-75.42	-1.75	-111.87	-38.86	-61.47	-33.90
12	-92.91	-64.23	-70.27	-43.35	-117.67	-65.36	-56.70	-67.53
年平均	-36.87	243.99	201.04	25.33	-12.67	255.65	102.03	199.32

人工增雨潜力的年变化表明,东南部季风区和天山的高层云8月最大,南疆的高层云峰值在9月,其余峰值均出现在6或7月。祁连山区的低层云2~5月和9~12月,高层云4~7月和10~11月人工

增雨潜力大于天山,南疆春秋高云的人工增雨潜力大。东南部季风区除夏季外人工增雨潜力为负值,其余各片一般11月至次年3月是负值,如图7a-b。

* 陈乾,陈勇航,黄建平,等.利用CERES/SSF资料对西北区云参量和降水的初步分析(待发表).

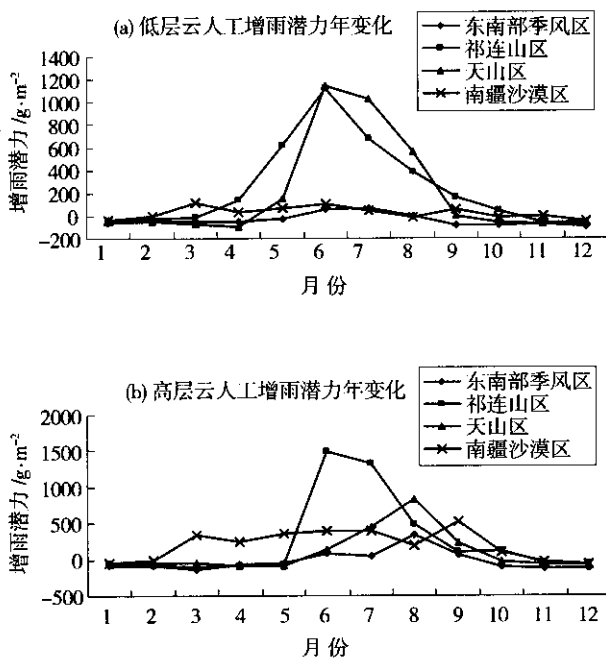


图 7 A、B、C、D 各区逐月低层云 (a) 和高层云 (b) 的人工降水潜力 (单位 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig. 7 The regional averages of monthly latent capacity of artificial precipitation for lower (a) and upper (b) layer clouds over region A, B, C, D (unit: $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

5 结 论

利用 Aqua 卫星反演的云参量,对照中国西北地区相应的降水资料,计算了东南部季风区、祁连山、天山和南疆沙漠 4 个区的降水效率和人工增雨潜力,得到如下几点认识:

(1) 西部干旱区降水与高层云相关较好,而东南部季风区则与低层云相关好。此乃西部凝结高度高,探空相对湿度峰值位于 500~300 hPa,极干旱区的敦煌、冷湖湿度峰值在 300 hPa。统计表明,河西区域性降水的云为蔽光高层云和复高积云,未出现雨层云。整个西北区以低层云的云水路径与降水量相关系数最高平均 $R^2 = 0.8459$ 。

(2) 东南部季风区和南疆随着云参量增加,月降水量呈对数增长。而祁连山和天山地区则为二次曲线,祁连山区更明显。此乃祁连山、天山地区降水量峰值在 7 月,而高云和低云的云水路径均 6 月最大。

(3) 取月平均降水强度 (mm/h) 除总的云水路径作为降水效率。则不论低层云或高层云的降水效率都是东南部季风区最大,祁连山区略大于天山区,

南疆沙漠最小。低层云的降水效率除南疆 7 月最高外其余地区 8 月最高。高层云的降水效率东南部季风区 8 月最大,其余 3 片 7 月最高。

(4) 取 $(LWP/IWP - C) \times LWP$ 作为人工降水最大可能增(减)雨的度量,其年平均值祁连山区最大,其次是天山,东南部季风区最小为负值。人工增雨潜力的年变化表明,东南部季风区和天山的高层云 8 月最大,南疆的高层云峰值在 9 月,其余峰值均出现在 6 或 7 月。祁连山区的低层云 2~5 月和 9~12 月,高层云 4~7 月和 10~11 月人工增雨潜力大于天山,南疆春秋季节高云的人工增雨潜力大。

致谢:黄建平、陈勇航博士提供 CERES/SSF 资料和部分云参量的统计结果,作者在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 陆武成. 正确应对水资源问题努力促进可持续发展[EB/OL]. [2006-06-01]. <http://www.mwr.gov.cn>.
- [2] 康尔泗,李新,张济世,等. 甘肃河西内陆河流域荒漠化的水资源问题[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 657-667.
- [3] 钱正英. 西北地区的水资源配置[EB/OL]. [2006-06-01]. <http://www.mwr.gov.cn>.
- [4] 洛桑灵智多杰. 有效保护和科学配置河西内陆河流域水资源,保持社会经济的可持续发展[EB/OL]. [2004-01-07]. <http://www.hwcc.com.cn>.
- [5] 王大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社, 2002. 570-571.
- [6] Peixoto J P, Oort A H. Physics of Climate[M]. [s. l.]: American Institute of Physics, 1992. 520.
- [7] 郑国光,陈跃,王鹏飞,等译. 人工影响天气研究中的关键问题[M]. 北京:气象出版社, 2005. 37.
- [8] Rossow W B, Schiffer R A. Advances in understanding cloud from ISCCP[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1999, 80(11): 2261-2287.
- [9] 陈勇航,黄建平,王天河,等. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 717-727.
- [10] 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[M]. Release2, Version1. Atmospheric sciences competency, Hampton, VA, U. S. A.
- [11] Wielicki B A, Baum B A, Coakley J A, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Algorithm Theoretical Basis Document, Overview of Cloud Retrieval and Radiative Flux Inversion (Subsystem 4.0) [R]. Release 2.2. Atmospheric sciences competency, Hampton, VA, U. S. A., 1997.
- [12] Baum B A, Welch R M, Minnis P, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Algorithm Theoretical Basis Document, Imager Clear-Sky Determination and Cloud Detection (Subsystem 4.1) [R]. Release 2.2. Atmospheric sciences competency, Hampton, VA, U. S. A., 1997.

- [13] Baum B A , Minnis P , Coakley J A , et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Algorithm Theoretical Basis Document , Imager Cloud Layer and Height Determination (Subsystem 4.2) [R]. Release 2.2. Atmospheric sciences competency , Hampton , VA , U. S. A. ,1997.
- [14] Minnis P , Young D F , Kratz D P , et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Algorithm Theoretical Basis Document , Cloud Optical Property Retrieval (Subsystem 4.3) [R]. Release 2.2. Atmospheric sciences competency , Hampton , VA , U. S. A. ,1997.
- [15] Green R , Wielicki B A. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Algorithm Theoretical Basis Document , Convolution of Imager Cloud Properties With CERES Footprint Point Spread Function (Subsystem 4.4) [R]. Release 2.2. Atmospheric sciences competency , Hampton , VA , U. S. A. ,1997.

Estimates of Precipitation Efficiency and Latent Capacity of Artificial Precipitation over Northwest China Using Aqua/CERES Data Retrieval of Cloud Parameters

CHEN Qian , CHEN Tian - yu ZHANG Hong

(Gansu Weather Modification Office , Lanzhou 730020 , China)

Abstract By using the cloud liquid water path and cloud ice water path data of CERES/SSF from Aqua provided by NASA Langley research center from July 2002 to June 2004 , the precipitation efficiency and latent capacity of artificial precipitation over Northwest China were analyzed. The monsoon regions of southeast part of Northwest China A , the Qilian Mountains B , the Tianshan Mountains C and the deserts of south Xinjiang D have been selected for four representative regions. The regional averages of monthly cloud liquid water path and cloud ice water path divided into lower and upper layers clouds have been evaluated , respectively. The correlations between different clouds and monthly precipitation over region A , B , C , D have been estimated. The results show that the monthly precipitations had close relationship with upper layer clouds over the arid regions (region B , C , D) , but they were in good correlation with lower layer clouds over the monsoon regions (region A). The averaged square correlation coefficient between cloud liquid water path of lower layer clouds and precipitations was the maximum of $R^2 = 0.8459$ in the whole of Northwest China. The precipitation efficiency was defined as the ratio of monthly averaged precipitation to total cloud liquid water path. Results show that the maximal value of precipitation efficiency of lower and upper layers clouds was located in the region A , it was slight more in the Qilian Mountains than that in the Tianshan Mountains , and it was the minimum in the deserts of south Xinjiang. The annual variations of precipitation efficiency of lower layer clouds presented the maximal value in August except for the region D in July , while that of upper layer clouds presented the maximal value in July except for the region A in August. The latent capacity of artificial precipitation was given as the formula of $(LWP/IWP - C) \times LWP$ as the maximal potential enhancement , it was the maximal in the Qilian Mountains among four regions and the second is in the Tianshan Mountains , and the minimum was in the region A that the annual average value was negative. The annual variations of latent capacity of artificial precipitation showed that the maximum of upper layer clouds was in August over the region A and C , in September over the region D , and all that of lower layer clouds occurred in June or July. The focal point of this study was the latent capacity of artificial precipitation of orographic cloud over the Qilian and Tianshan mountains in order to provide some scientific basis for artificial rain (snow) and cloud water resources exploitation over the mountain areas in the future.

Key words Northwest China ; cloud liquid water path ; cloud ice water path ; precipitation efficiency ; latent capacity of artificial precipitation