

周万福,田建兵,康小燕,等. 基于FY-2卫星数据的青海东部春季不同类型降水过程云参数特征[J]. 干旱气象,2018,36(3):431-437, [ZHOU Wanfu, TIAN Jianbing, KANG Xiaoyan, et al. Characteristics of Retrieved Cloud Parameters During Precipitation Processes with Different Types in Spring in Eastern Qinghai Province Based on FY-2 Satellite Data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3):431-437], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-03-0431

基于FY-2卫星数据的青海东部春季 不同类型降水过程云参数特征

周万福,田建兵,康小燕,张博越,颜海前

(青海省人工影响天气办公室,青海 西宁 810001)

摘要:卫星资料在气象业务中的应用越来越广泛,有效识别云的宏微观物理参数将有利于人影业务的发展。利用2005—2007年春季青海省东部地区FY-2卫星观测资料,针对不同形态、等级的降水过程,反演该区域降水云的宏微观物理参数,并与降水量做相关分析。结果表明:青海东部FY-2卫星反演的春季降水云粒子有效半径大多为 $8\sim 65\ \mu\text{m}$,云顶温度大多为 $215\sim 240\ \text{K}$,云层厚度大都在 $1\ 500\sim 5\ 200\ \text{m}$ 之间,云水含量大多为 $10\sim 150\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,但不同形态、量级降水过程反演的云特征参数值及其与地面降水量的相关性差异较明显。

关键词:FY-2;反演;云参数;青海东部

文章编号:1006-7639(2018)03-0431-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-03-0431

中图分类号:P426.6

文献标志码:A

引言

精确掌握不同云和云系的云水含量、云顶温度、云顶高度和云粒子有效半径等宏微观物理特性及其演变规律,获得人工影响天气作业的最佳作业指标、作业条件和作业时机,从而科学指挥作业^[1-3],这对于人工影响天气非常重要。目前对云系宏微观物理参数的探测手段相对较多,主要有雷达、地面雨滴谱、微波辐射计、飞机穿云探测和常规探空探测等方法^[4-9]。其中,以飞机穿云观测最为直接有效,但飞机探测成本高,探测范围、位置、频次等受到很大限制,且飞机性能、飞行条例、气象条件和空域申请等都使其无法常规化和业务化。气象卫星可以对地球-大气进行大面积全天候观测,能够获取大范围云和云系的一些宏、微观特征信息,随着卫星探测技术的不断提高,其在人工影响天气领域的应用前景更加广阔^[10-11]。

卫星反演是监测大气水汽的有效手段之一,可有效解决因地面测站稀少而缺乏探测数据的问题;同时,通过高时间分辨率卫星反演的云宏微观物理

参数能反映云的发展状况,从而获取云催化作业前后云参量的变化情况,有利于人工增雨效果物理检验。早期,云物理参数的卫星反演研究一般是利用极轨卫星NOAA系列AVHRR传感器数据,可用于分析云、雾中粒子大小的分布状况^[12-13]。21世纪初,Terra和Aqua卫星携带的中分辨率成像光谱仪(MODIS)^[14]成功完成了云宏微观物理参数的反演及MOD06云产品生成^[15],并在此基础上反演和改进了云的液态水路径算法^[16]。还有学者借助于6S辐射传输模式,利用MODIS资料反演了云的光学厚度、云粒子有效半径以及云液态含水量等云参数^[17],并用云顶温度和有效半径分析云垂直结构及降水形成过程^[18]。

尽管极轨卫星空间分辨率较高,但对于人工影响天气业务来说,其时间分辨率太低,很可能漏过人工增雨作业的最佳时机。我国自主研发的FY-2系列静止卫星,每30 min获取一次星下点空间分辨率达1.25 km的多通道卫星云图资料,汛期(5—9月)的时间分辨率为15 min,对于人影业务发挥了

收稿日期:2017-10-13;改回日期:2018-01-31

基金项目:国家自然科学基金项目(41165008,41161009)和国家重点研发计划(2017YFC0403603)共同资助

作者简介:周万福(1976—),男,青海西宁人,硕士,高级工程师,主要从事大气物理与环境遥感研究。E-mail:zhouwanfu@sina.com。

重要作用^[19]。例如,利用 FY-2 系列卫星和探空资料反演云结构特征参数,研究层状云和对流云在不同降水强度情况下云参数的频数分布规律及其与降水的关系^[20-22],可以有效掌握云的宏微观演变规律对降水的影响,对于解决人影业务中的“三适当”问题和后继的效果评估提供科学依据。

青海东部是青海省主要的农业生产基地,也是春季主要的人工影响天气作业区域。近年来,该区域总云水含量呈明显上升趋势^[23-25],充分利用该地区云水资源,进行人工增雨作业条件的研究,具有一定的实际应用价值。由于该区域气象探空站稀少,人工影响天气作业指标的获取相对较难,利用卫星遥感判识技术反演大气中的水汽和云特征参数,进行人工增雨作业指挥将更具优势。基于这些认识,本文利用 FY-2 卫星资料,针对青海东部春季不同类型降水过程,反演降水云系的云顶温度、云顶高度和云粒子有效半径等云宏微观物理参量,并分析与降水量的关系,以期获得该地区人工影响天气作业的最佳作业指标,从而科学有效指挥作业。

1 研究区概况

青海省东部(101°E—103°E,35°N—38°N)地处祁连山脉和昆仑山系余脉日月山之间,位于黄土高原和青藏高原的过渡地带(图1)。境内海拔高度悬殊较大,大多为1 650~3 000 m,地形山峦起伏,沟壑纵横,气候差异明显,属于半干旱大陆性气候,高寒、干旱、昼夜温差大、冬夏温差小、日照时间长、太阳辐射强,地理分布差异较大,且垂直变化较明显。年平均气温6.9℃,年平均降水量323.6 mm,年平均蒸发量1 644 mm。其中,海拔3 000 m以上的北部地区及山区较为寒冷,而海拔1 700~2 500 m的黄河、湟水河谷地带较温暖。这里人口相对集中,经济较为发达,是青海省重要的农牧业经济区。

2 资料与方法

2.1 资料

选用2005—2007年FY-2静止卫星全圆盘标称投影资料对云粒子有效半径等云的宏微观参量进行反演计算和试验。我国自行研发的FY-2系列静止卫星具有较高的时间频次(双星互补,通常

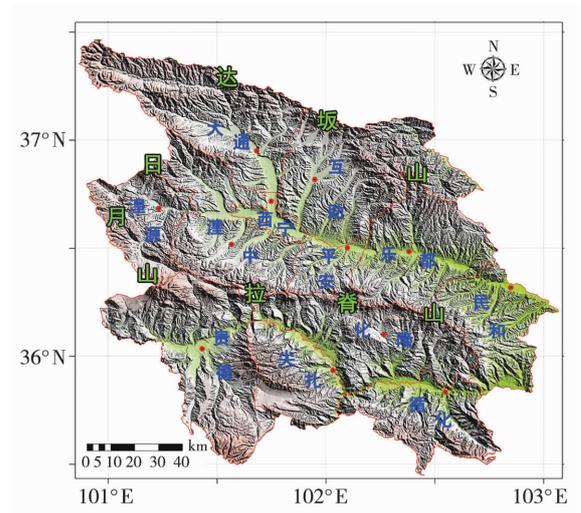


图1 青海省东部地理位置及地形
Fig. 1 The geographical location and topography in eastern Qinghai Province

为每小时2次,汛期加密时每小时4次),且拥有多个观测通道,为研究云参数提供较为丰富的信息。其中,中红外4通道对云滴大小分布非常敏感。虽然FY-2卫星资料的空间分辨率低于MODIS卫星观测云资料,但15~30 min的时间分辨率,使其在气象业务的实际应用潜力更高。地面资料选取对应时间青海东部12个气象站逐日观测数据。

2.2 研究方法

利用SBDART辐射传输模式和FY-2卫星数据得到云顶温度、高度及云滴有效半径等宏微观物理参量与FY-2卫星两通道亮温的相关关系,并运用模式内迭代算法,得到云顶高度、温度以及云滴有效半径等云的宏微观量。反演步骤如下:

首先,选择FY-2卫星图像上光学厚度大的像元,即可见光通道的反射率大于25%,且红外1通道的温度低于7℃;去除云顶温度过低的像元(过低的云顶温度通常反映云顶全部由冰晶组成),即选取红外1通道的温度高于-40℃的像元;利用SBDART辐射传输模式,计算指定太阳天顶角、相对方位角、卫星天顶角以及地表反射率和大气模式条件下的查算表,将FY-2卫星两通道的值内插至查算表中,反演云粒子有效半径 r_e 及光学厚度 τ ,并计算整层云的总液态含水量LWP,计算公式如下:

$$LWP = \int_{\text{bottom}}^{\text{top}} Ldz = \int \left(\int \frac{4}{3} \pi r^3 \rho n(r) dr \right) dz = \frac{4}{3} \pi \rho H \int r^3 n(r) dr = \frac{2}{3} \rho \tau r_e \quad (1)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} r_e = \frac{\int r^3 n(r) dr}{\int r^2 n(r) dr} \\ \tau = \int_{\text{bottom}}^{\text{top}} k_{\text{ex}} dz = \int (\int \pi r^2 Q_{\text{ex}} n(r) dr) dz = 2\pi H \int r^2 n(r) dr \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n(r)$ 是粒子大小分布; r 是粒子半径(μm); Q_{ex} 为云粒子的消光效率因子; k_{ex} 为消光系数; H 是积分过程中形成的常量; ρ 为云水密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

在云顶高度的反演过程中,如果云体较厚,可以当作黑体处理,则红外窗区通道的亮度温度基本可以反映云顶温度,从而确定出云顶高度。然而,云顶以上的大气层多少有一些衰减,因此亮度温度略低于云顶温度,从而使云顶高度的估计偏高。一般卫星都是用辐射计做被动遥感,其对云底高度是没有探测能力的。然而,云底高度可认为是抬升凝结高度,即地面气块做干绝热抬升达到凝结的高度。因此,利用地面观测的温度和露点资料可以计算出这一高度。用反演的云顶高度减去云底高度即为云层厚度。

3 云的宏微观参量反演

3.1 降水过程分类

根据青海东部地区贵德、西宁、平安、尖扎等12站2005—2007年3—5月地面日降水观测资料,按照表1分类标准,得到2005—2007年春季276d中,大到暴雪共计3d,占春季总天数的1.1%;中到大雪共计4d,占全部天数的1.45%;小到中雪共计26d,占全部天数的9.4%;中到大雨共计4d,占全部天数的1.45%;小到中雨共计96d,占全部天数的34.8%;无有效降水的天数共计143d,占全部天数的51.8%(表2)。可见,青海东部地区2005—2007年春季降水日数和无降水日数各占一半,且降雨日数比降雪日数明显偏多。

表1 降水过程分类

Tab.1 The classification of precipitation process

类型	等级	日降水量/mm
雪	小雪	0.1~2.4
	中雪	2.5~4.9
	大雪	5.0~9.9
	暴雪	≥ 10.0
雨	小雨	0.1~9.9
	中雨	10.0~24.9
	大雨	25.0~49.9
	暴雨	≥ 50.0

表2 2005—2007年春季青海东部地区降水日数统计

Tab.2 The statistics of precipitation days in eastern Qinghai Province in spring from 2005 to 2007

类型	降水日数/d				比例/%
	2005年	2006年	2007年	合计	
大到暴雪	1	1	1	3	1.10
中到大雪	2	0	2	4	1.45
小到中雪	11	5	10	26	9.40
中到大雨	2	1	1	4	1.45
小到中雨	30	35	31	96	34.80
无降水日	45	51	47	143	51.80

另外,根据降水范围将春季降水过程划分为区域降水和局地降水,其中区域降水定义为研究区域内同时有6站以上出现降水,而局地降水则定义为不多于6站出现降水。经统计(表略),2005—2007年春季青海东部地区区域降水共计出现69次,占全部天数的25.0%,而局地降水共计出现64次,占全部天数的23.2%;中雪和中雨以上量级的降水过程全部为区域降水。春季,青海东部地区的降水大部分属于系统性降水,降水云系多为冷性层状云,较大的降水过程常伴有较为强烈的中小尺度对流云系,这类降水对春季土壤墒情至关重要,是春季人工增雨的主要降水过程。

3.2 卫星反演

利用SBDART辐射传输模式,对2005—2007年春季青海东部降水过程的FY-2卫星云参数进行反演,考虑人工增雨云催化作业以及辐射传输模式的显著性等因素,以区域性降水过程为主,选择涵盖青海东部地区各类降水过程,筛选出大到暴雪3次过程、中到大雪4次过程、小到中雪7次过程、中到大雨4次过程、小到中雨7次过程,即对这25次过程进行反演及统计。

3.2.1 小到中雨过程

针对2005—2007年春季青海东部筛选出的7次小到中雨天气过程,反演云粒子有效半径、云水含量、云顶温度和云层厚度等云物理量,并与降水量进行相关分析。其中,数据匹配按照有台站自记降水量优先,剔除无降水的时次,并选取地面站

点上方 10:00—16:00 时段的卫星数据。由图 2 看出,在小到中雨天气过程中,青海东部云粒子的有效半径主要集中在 $5 \sim 15 \mu\text{m}$ 范围,云水含量集中在 $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以下,云顶温度大部分为 $215 \sim 235 \text{ K}$,云

层厚度大多为 $2\,000 \sim 4\,200 \text{ m}$ 。其中,云粒子有效半径与降水量的相关性通过了 0.01 信度的双侧显著性检验,而云水含量、云顶温度、云层厚度与降水量的相关性较差。

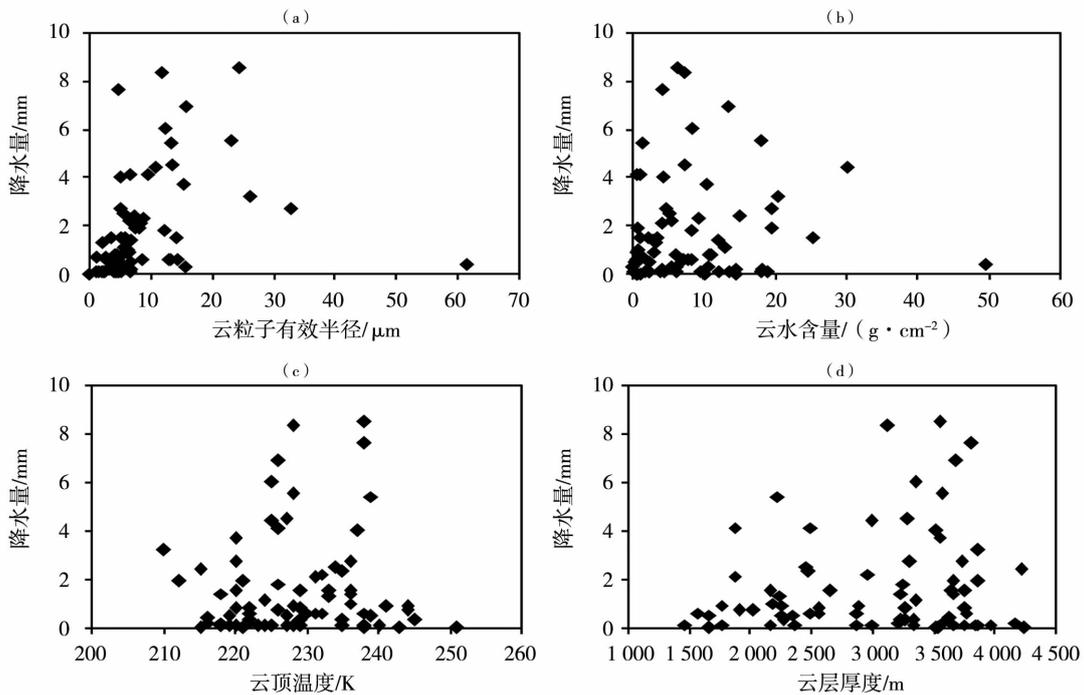


图 2 2005—2007 年春季青海东部小到中雨过程反演的云物理量与降水量的关系

(a) 云粒子有效半径; (b) 云水含量; (c) 云顶温度; (d) 云层厚度

Fig. 2 The relation between retrieved cloud physical parameters and precipitation for light and moderate rainfall processes in eastern Qinghai Province in spring from 2005 to 2007

(a) effective radius of cloud particle, (b) cloud water content, (c) cloud top temperature, (d) cloud layer thickness

3.2.2 中到大雨过程

针对 2005—2007 年春季青海东部挑选出的 4 次中到大雨天气过程,进行云粒子有效半径、云水含量、云顶温度和云层厚度等云物理量反演,并分析与站点降水量的关系。卫星反演的云物理量与站点降水量作相关分析的数据处理方法同上。从图 3 可看出,在中到大雨天气过程中,青海东部云粒子的有效半径在 $270 \mu\text{m}$ 以下,主要集中在 $12 \sim 30 \mu\text{m}$ 范围,云水含量集中在 $30 \sim 150 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间,云顶温度主要介于 $215 \sim 230 \text{ K}$,云层厚度为 $1\,500 \sim 4\,300 \text{ m}$;降水量随着云粒子有效半径、云水含量和云顶温度的增大以及云层厚度的减小而增大,其中云粒子有效半径、云顶温度、云水含量与降水量的正相关性均通过 0.01 信度的双侧显著性检验,而云层厚度与降水量的负相关性较弱,未通过显著性检验。总体来说,中到大雨情况下卫星反演的云物理量比小到中雨情况下的可信度更高。

3.2.3 小到中雪过程

针对 2005—2007 年春季青海东部挑选出的 7 次小到中雪天气过程,进行云粒子有效半径、云水含量、云顶温度和云层厚度等云物理量的反演,并分析与站点降水量的关系。从图 4 可看出,在小到中雪天气过程中,青海东部卫星反演的云粒子有效半径在 $50 \mu\text{m}$ 以下,主要集中在 $8 \sim 40 \mu\text{m}$ 范围内,云水含量大多为 $10 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$,云顶温度大多为 $215 \sim 240 \text{ K}$,云层厚度主要在 $1\,500 \sim 4\,000 \text{ m}$ 之间;降水量与云粒子有效半径、云水含量和云层厚度呈正相关,而与云顶温度则呈负相关,且 4 个云参量与降水量的相关性均通过 0.01 信度的双侧显著性检验。

3.2.4 中到大雪过程

由于 2005—2007 年出现暴雪只有 3 站次,因此将暴雪过程归并到中到大雪过程进行分析。针对选取的 4 次中到大雪天气过程,反演云粒子有效半径、云水含量、云顶温度和云层厚度等云物理量,并分析与降水量的关系。从图 5 中看出,在中到大雪天气

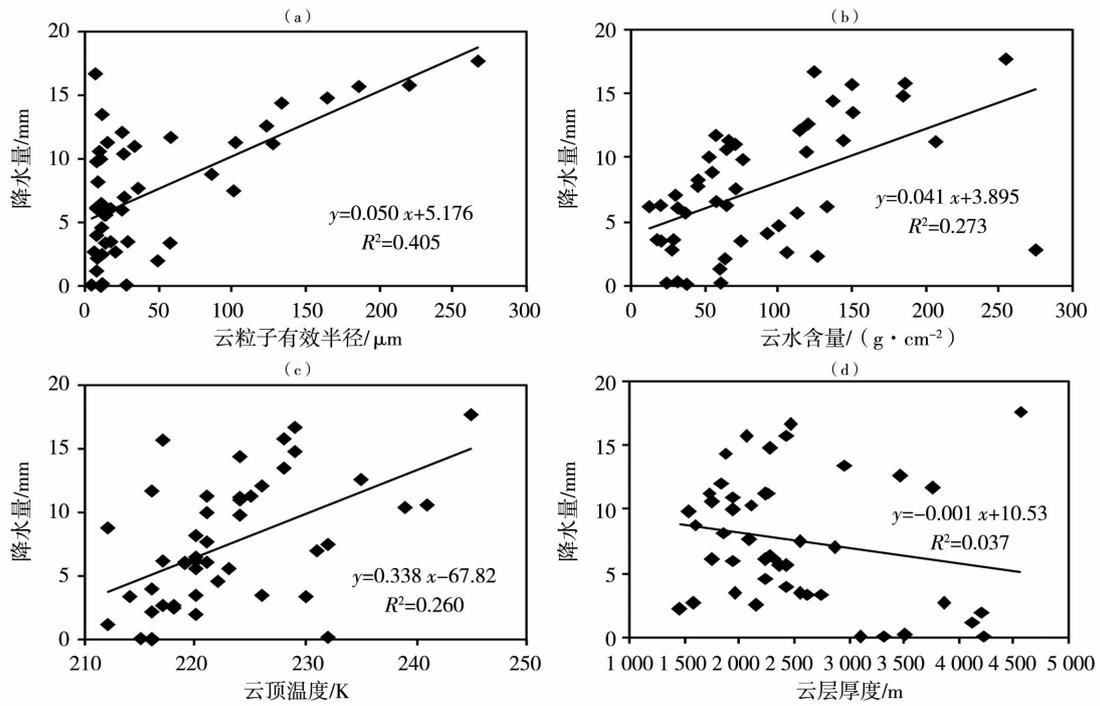


图3 2005—2007年春季青海东部中到大雨过程反演的云物理量与降水量的关系

(a)云粒子有效半径;(b)云水含量;(c)云顶温度;(d)云层厚度

Fig. 3 The relation between retrieved cloud physical parameters and precipitation for moderate and heavy rainfall processes in eastern Qinghai Province in spring from 2005 to 2007

(a) effective radius of cloud particle, (b) cloud water content, (c) cloud top temperature, (d) cloud layer thickness

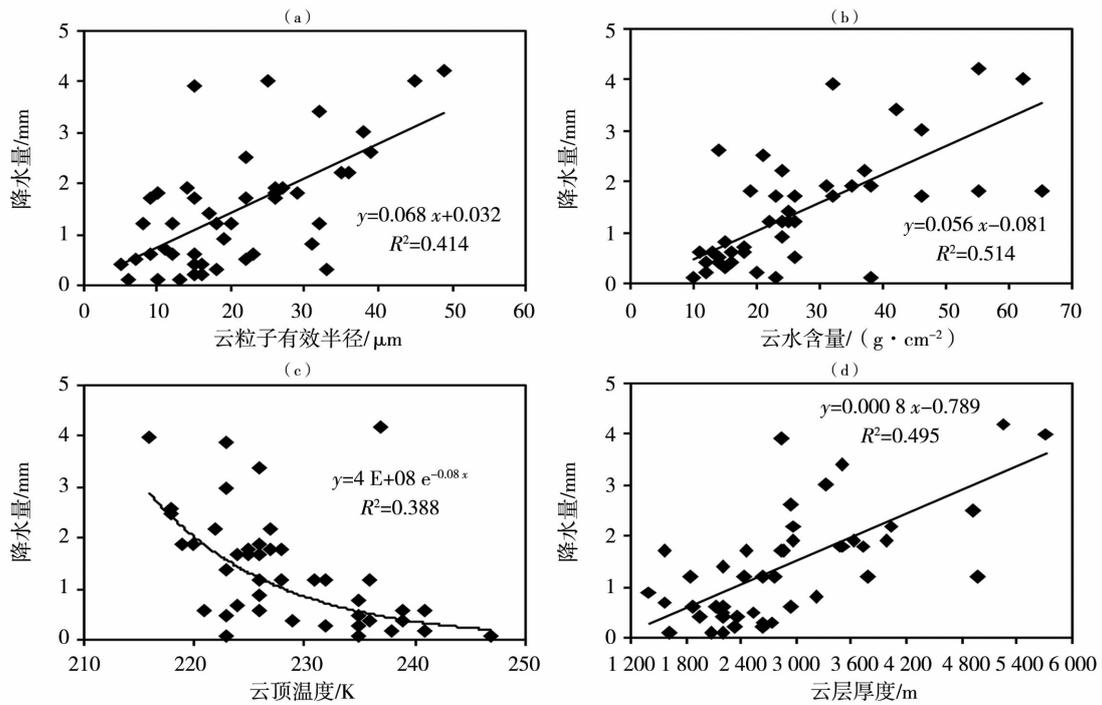


图4 2005—2007年春季青海东部小到中雪过程反演的云物理量与降水量的关系

(a)云粒子有效半径;(b)云水含量;(c)云顶温度;(d)云层厚度

Fig. 4 The relation between retrieved cloud physical parameters and precipitation for light and moderate snowfall processes in eastern Qinghai Province in spring from 2005 to 2007

(a) effective radius of cloud particle, (b) cloud water content, (c) cloud top temperature, (d) cloud layer thickness

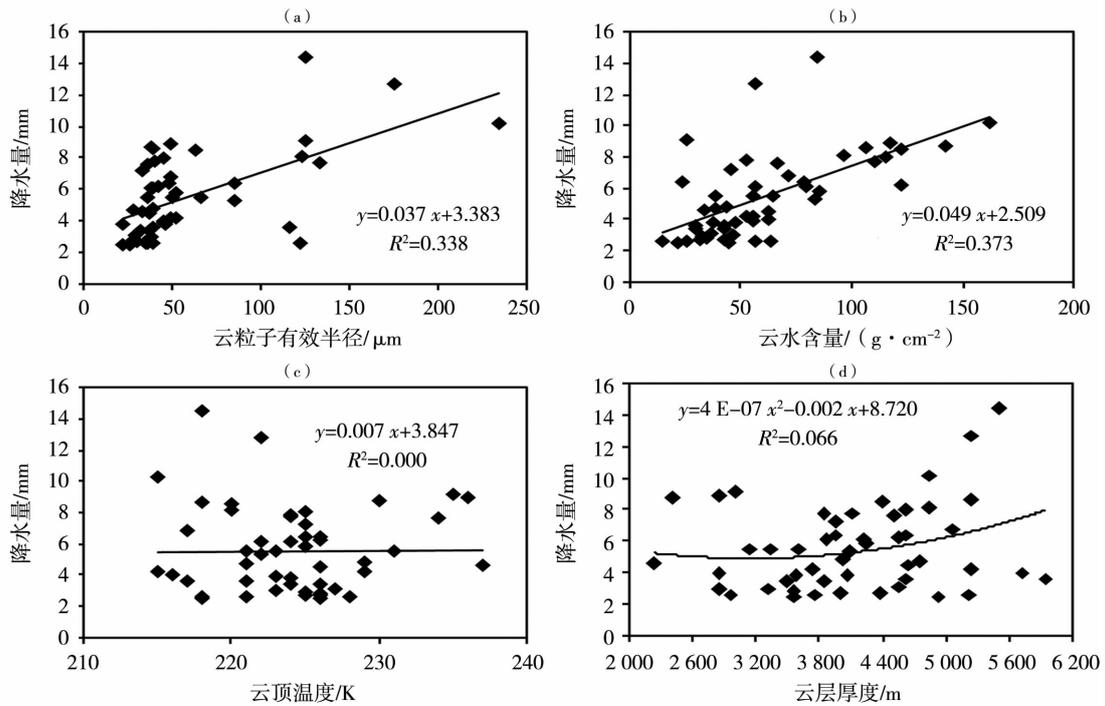


图5 2005—2007年春季青海东部中到大雪过程卫星反演的云物理量与降水量的关系

(a) 云粒子有效半径; (b) 云水含量; (c) 云顶温度; (d) 云层厚度

Fig. 5 The correlation between cloud physical parameters and precipitation for medium and heavy snowfall processes in eastern Qinghai Province in spring from 2005 to 2007

(a) effective radius of cloud particle, (b) cloud water content, (c) cloud top temperature, (d) cloud layer thickness

过程中,云粒子有效半径大多在 130 μm 以下,尤其集中在 25 ~ 65 μm 范围内,云水含量大多在 30 ~ 120 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 范围,云顶温度大多在 215 ~ 230 K 范围,云层厚度主要在 2 600 ~ 5 200 m 之间;降水量与云粒子有效半径、云水含量表现出显著正相关(通过 0.01 信度的显著性检验),且降水量与云水含量相关性更好,而与云顶温度和云层厚度无相关关系。

表3是2005—2007年春季青海东部各类降水过程卫星反演的云物理量集中值统计,发现各类降

水过程中反演的云物理量值有比较明显的差异,同时也存在重叠交叉现象,这对于单独依靠卫星观测识别降水类型有很大困难。针对4种降水类型反演的云粒子有效半径与降水量的相关关系均通过了显著性检验,而云层厚度与降水量的相关关系均未通过显著性检验,这可能与云层厚度的计算方法有关。在人影业务中,云顶温度和云水含量是较为关键的2个物理量,通过卫星反演的数值,可以更加准确地作出人影作业指挥判断,但这需要大量的实际作业来验证。

表3 2005—2007年春季青海东部各类降水过程卫星反演的云物理量集中值统计

Tab. 3 Statistics of concentrated value of cloud physical parameters during the spring precipitation processes from 2005 to 2007 in eastern Qinghai Province

物理量	中到大雪	小到中雪	中到大雨	小到中雨
云粒子有效半径/ μm	25 ~ 65	8 ~ 40	12 ~ 30	5 ~ 15
云顶温度/K	215 ~ 230	215 ~ 240	215 ~ 230	215 ~ 235
云层厚度/m	2 600 ~ 5 200	1 500 ~ 4 000	1 500 ~ 4 300	2 000 ~ 4 200
云水含量/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	30 ~ 120	10 ~ 50	30 ~ 150	<20

4 结 论

利用卫星资料反演云参数对于研究云的生消、发展有重要意义,特别是对于观测台站较为稀少的区域,开展卫星资料的云参数反演在一定程度上能够弥补观测上的不足,可为人影科学指挥作业提供重要参考。主要结论如下:

(1)青海东部地区春季降水云的云参数特征主要表现为:云粒子有效半径集中在 $5 \sim 65 \mu\text{m}$ 范围内,中到大雪过程的云粒子有效半径最大,小到中雨过程的云粒子有效半径最小,且降雪比降雨的粒子谱分布更宽;4种类型降水天气的云顶温度相差不明显,大多在 $215 \sim 240 \text{ K}$ 范围,且中等量级以上降水天气过程的云顶温度相对较低;4种类型降水天气的云层厚度区别较大,大致在 $1\ 500 \sim 5\ 200 \text{ m}$ 之间,中等量级以上降水过程的云层厚度明显比小量级降水过程厚;4种类型降水天气的云水含量差异较明显,云水含量大多集中在 $10 \sim 150 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$,中到大雨(雪)降水过程的云水含量比小到中雨(雪)降水过程大1个量级。

(2)4种类型降水天气过程下,反演的云粒子有效半径和云水含量与降水量均呈正相关。其中,4种降水情况下反演的云粒子有效半径与降水量相关性显著,而除小到中雨情况外其他3种降水情况下反演的云水含量与降水量相关性显著。降水量与云顶温度的相关性仅在中到大雨和小到中雪的情况下通过了显著性检验,而与云层厚度的相关性仅在小到中雪的情况下通过了显著性检验,这可能与云层厚度的计算方法有关。

本文卫星反演的云参量是建立在计算云的光学厚度基础上,由于云的光学厚度与粒子谱分布并非一一对应,使得反演的云粒子有效半径、云顶温度等参量不可避免地存在一定的偏差。此外,反演模式中使用了可见光通道,在夜间无法反演,这也是本文所用算法的局限性。

参考文献:

- [1] 郭学良. 大气物理与人工影响天气[M]. 北京:气象出版社, 2010.
- [2] 洪延超,雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J]. 气候与环境研究,2012,17(6):951-967.
- [3] 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.
- [4] 刘黎平,邵爱梅. 新一代可移动式天气雷达在人工影响天气中的应用研究[J]. 暴雨灾害,2007,26(1):40-45.
- [5] 邵洋,刘伟,孟旭. 人工影响天气作业装备研发和应用进展[J]. 干旱气象,2014,32(4):649-658.
- [6] 刘红燕,雷恒池. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征[J]. 大气科学,2006,30(4):693-702.
- [7] 李艳伟,杜秉玉,周晓兰. 新疆天山山区雨滴谱特性及分布模式[J]. 南京气象学院学报,2003,26(4):465-472.
- [8] 李娟,游来光,胡志晋,等. 黄河上游玛曲地区雨滴谱特征的观测研究[J]. 高原气象,2006,25(5):942-949.
- [9] 张国庆,孙安平,周万福,等. 青海门源雨滴谱特征及降水机制的初步分析[J]. 高原气象,2009,28(1):77-84.
- [10] 居丽玲,牛生杰,段英. 一次秋季冷锋降水过程气溶胶与云粒子分布的飞机观测[J]. 大气科学学报,2011,34(6):697-707.
- [11] 庞朝云,张丰伟,张建辉. 西北干旱地区一次降水性层状云的飞机观测分析[J]. 干旱气象,2013,31(2):272-277.
- [12] 刘健,董超华. 卫星资料在云顶粒子尺度特征分析中的应用[J]. 红外与毫米波学报,2002,21(2):124-128.
- [13] 刘健,许健民,方宗义. 利用NOAA卫星的AVHRR资料试分析云和雾顶部粒子的尺度特征[J]. 应用气象学报,1999,10(1):28-33.
- [14] CHU A, STRABALA K, SONG R, et al. MODIS atmosphere QA plan[R]. NASA Goddard Space Flight Center, 1997:1-43.
- [15] KING M D, KAUFMAN Y J, MENZEL W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992,30:2-27.
- [16] HAN Q, ROSSOW W, WELCH R, et al. Validation of satellite retrievals of cloud microphysics and liquid water path using observations from FIRE [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1995,52:4183-4195.
- [17] 张杰,张强,田文寿,等. 祁连山区云光学特征的遥感反演与云水资源的分布特征分析[J]. 冰川冻土,2006,28(5):722-727.
- [18] 刘贵华,余兴,戴进,等. 地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析[J]. 气象学报,2011,69(2):363-369.
- [19] 许健民,郭强,陆其峰,等. 风云气象卫星数据处理算法的若干创新[J]. 气象学报,2014,72(5):1023-1038.
- [20] 周毓荃,蔡森,欧建军,等. 云特征参数与降水相关性的研究[J]. 大气科学学报,2011,34(6):641-652.
- [21] 盛日锋,龚佃利,王庆,等. FY-2/D卫星反演的云特征参数与地面降水的相关分析[J]. 气象科技,2010,38(增):68-72.
- [22] 陈英英,周毓荃,毛节泰,等. 利用FY-2C静止卫星资料反演云粒子有效半径的试验研究[J]. 气象,2007,33(4):29-34.
- [23] 周万福,张国庆,肖红斌,等. 2005年雨季“三江源”地区对流云的特征分析[J]. 高原气象,2008,27(3):695-700.
- [24] 苏正军,王广河,刘卫国,等. 青海省春季降水云的微物理特征分析[J]. 应用气象学报,2003,14(增):36-40.
- [25] 宜树华,刘洪利,李维亮,等. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析[J]. 气象,2003,29(1):7-11.