

文章编号: 1000-0240(2006)05-0722-06

祁连山区云光学特征的遥感反演与云水资源分布特征分析

张 杰¹, 张 强¹, 田文寿², 何金梅³

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃兰州 730020; 2. 兰州大学大气科学学院, 甘肃兰州 730000; 3. 兰州中心气象台, 甘肃兰州 730020)

摘 要: 利用 Terra 和 Aqua 卫星上载的 MODIS 探测器接收资料和祁连山区及周边气象台站 6 h 降水量资料, 应用 6S 辐射传输模式和 Mie 模式, 针对 2002—2005 年以来的 18 次大范围云覆盖的祁连山区, 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参数, 结合地理信息系统分析了其随海拔高度变化的分布特征及其与地面降雨量的关系。结果表明: 祁连山区云的光学厚度、云粒子有效半径以及云液态含水量分布受地形影响具有显著的地域差异, 最大值分布在海拔 4 300 m 以下的山区, 是云水资源丰富区和易降水区; 云宏观特征参数与地面 6 h 降水量成正相关关系, 产生降水概率较大的云光学厚度在 8~20 之间, 云粒子有效半径在 6~12 μm 之间, 云液态含水量在 0.04 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 就能产生降水。祁连山区云液态含水量可高达 0.15 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 表明山区云水资源具有很大的开发潜力。

关键词: EOS MODIS; 祁连山区; 云光学厚度; 云粒子有效半径; 云液态含水量

中图分类号: P407.4 **文献标识码:** A

云的反射和辐射特征不仅严重地影响着气候变化^[1-3], 而且也反映了中尺度天气过程的特征^[4]。云的光学厚度和云滴有效半径是决定云辐射特征的两个重要的光学特征参数, 而且也是反映云含水量的重要参数^[5], 其与降水量强弱有直接的关系^[6]。因此, 应用卫星对云光学特征的观测和研究成为国际上关注的热点问题。美国 NASA 于 1991 年发起了一个综合性的项目 ESE, 其目的之一就是从太空监测大气特征。中分辨率光谱仪(MODIS)就是主要的观测大气的仪器之一^[7], 并且已经被上载到地球观测系统(EOS) Terra 和 Aqua 两颗卫星上。到目前为止, NASA 已经成功完成了上述参数的反演和 MOD06 的遥感产品生成^[8], 定期发布在 <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/>, 并在此基础上反演和改进了云的液态水路径算法^[9]。然而, 其服务产品主要针对全球大范围区域, 所以产品的分辨率低, 不能很好地反映某一个地区。

祁连山深居欧亚大陆腹地, 山麓周围被高原、戈壁、沙漠、绿洲等环抱, 山区降水丰富, 发育着现代冰川, 并且孕育了黑河、疏勒河和石羊河三大内陆河流域, 是西北干旱区发展农业、生态业的主要水源之一。由于山区空中水汽含量充沛^[10], 而且高山具有显著增水效应^[11], 所以祁连山区丰富的空中云水资源是干旱区开发淡水资源的一个有效渠道。本研究主要应用 MODIS 观测数据, 反演祁连山区云的光学厚度、云粒子有效半径以及云液态含水量, 并分析其空间分布及其与降水的关系。试图探索祁连山区云水资源的丰富区、以及易降水的高值区, 为人工增雨作业提供参考依据, 避免无效投入, 节约能源。同时, 为开发云水资源的潜力作出一定的效果评价。

1 区域概况、资料处理原理与方法

1.1 区域概况和资料说明

祁连山位于青藏高原北坡, 分布在 $37^{\circ} \sim 40^{\circ}$

收稿日期: 2006 01 03; 修订日期: 2006 03 06

基金项目: 中国气象局气象新技术推广项目; 甘肃省自然科学基金项目(3ZS05H A25 011); 科技部西部开发科技行动重大项目(2004BA901A16)资助

作者简介: 张杰(1975—), 女, 甘肃民勤人, 助理研究员, 2000 年毕业于中国农业大学, 现为在读博士生, 主要从事遥感应用、陆面过程及其对气候变化的影响研究。E-mail: gszhangjie@163.com

N, 94° ~ 103° E 之间, 山脉地形呈西北东南走向, 最高海拔 5 564 m, 山脉北部平原基本在海拔 1 700 多米以下. 因此, 本研究主要分析的区域是海拔 1 800 m 以上的部分.

选取了 2002—2005 年以来发生在祁连山区的 18 次天气过程资料, 资料来源于甘肃省气象局遥感中心. 在 18 次过程资料选取中, 首先考虑祁连山区有大范围云覆盖, 并且卫星过境的 6 h 降雨量不为 0. 为了分析地形与云光学特征分布的关系, 取托来南山为主要研究对象, 该山北部有托勒气象台站(38.8° N, 98.41° E), 年均降水量为 221 mm, 为典型的山区北坡少雨区. 为了比较山体南北坡降水的差异, 沿托勒站所在的经度方向, 取一个剖面, 来分析云的光学特征的差异. 在个例中, 托勒站 6 h 降水量(8:00~14:00)都不为 0. 而卫星经过当地的时间也在此时间段, 说明应用卫星数据反演的光学特征与降水有一定的关系. 地面降水资料来源于兰州中心气象台.

1.2 参数的物理意义和计算原理

关于 EOS MODIS 的云参数反演方法也比较多, 其原理是在可见光波段, 云的反射函数主要依赖于云的光学厚度; 在近红外或中红外波段, 云的反射函数主要依赖于云滴有效半径^[12-13]. 根据上述原理, 建立了一种利用 MODIS 传感器的 0.65 μm 和 2.1 μm 通道测量的反射率, 应用 Mie 理论模式和 6S 辐射传输模式, 采用 Nakajima *et al.*^[14] 提出的渐进理论方法, 计算云的光学厚度和云滴有效半径. 下面给出了几个参量的定义和算法.

SRD (Sensor Requirement Document) 给出了云的光学厚度 τ 定义, 即对于垂直大气柱的所有云层, 具有消光特性的垂直光学厚度, 它与整层云的透过率 t 有关, 表示为:

$$t = \exp(-\tau) \quad (1)$$

云粒子有效半径 r_e 定义为粒子大小分布的三次方积分与二次方积分的比率, 可表示为:

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr} \quad (2)$$

式中: $n(r)$ 为粒子谱分布; r 为粒子半径.

云特征参数的反演用 Mie 散射理论, 假定云粒子分布为正态分布, 粒子分布表示为:

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = \sum_{j=1}^2 \frac{dN_j(r)}{dr} \quad (3)$$

$$\frac{dN_j(r)}{dr} = \frac{N_j}{\sqrt{2\pi\sigma^2} \cdot 3r} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \frac{\ln r - \ln r_m}{\ln 10}\right) \quad (4)$$

式中: N_j 为数密度; r_m 为中值半径; σ 为 $\log r$ 的标准偏差.

将粒子谱分布和光学参数一起作为 Mie 模式的输入参数, 可得到非对称因子 g 、相函数 p 、系数 Q 以及单体散射反照率 A_g 等. 然后将所得结果代入 6S 辐射传输模式, 最后生成球面反照率、平面反照率、非均一项、总透过率以及常数等要素库. 在模式中输入地理参数、地表反照率等, 得到关于 τ , r_e 的反射率查算表的计算值, 作为确定 τ , r_e 的参考依据之一.

计算 τ , r_e 的第二步就是进行云检测, 并对 0.65 μm、2.1 μm 的反射率数据进行大气订正, 作为标准的测量值, 然后通过渐进理论^[14] 进行插值来确定 τ , r_e . 确定 τ , r_e 的原理是根据 Nakajima *et al.*^[14] 定义的最小化方法:

$$\chi^2 = \sum_i [\ln R_{\text{meas}}^i(\mu, \mu_0, \phi) - \ln R_{\text{calc}}^i(\tau, r_e, \mu, \mu_0, \phi)]^2 \quad (5)$$

式中: R_{meas}^i 和 R_{calc}^i 分别为测量值和计算参考值.

1.3 液态含水量的计算

当上述两个参数得到后, 根据 Trabert 推得的公式:

$$V = \frac{C}{w} \sum n_i r_i^3 / \sum n_i r_i^2 = \frac{C}{w} k r_e \quad (6)$$

通常所说的光学厚度是 550 nm 的光学厚度, 它是能见度 V 的另一种反映. 根据气溶胶和云模式:

$$V = \frac{1}{\beta} \ln \frac{1}{\epsilon} = \frac{3.912}{\beta} \quad (7)$$

式中: β 为分子和气溶胶在 550 nm 波长的总消光系数, 与大气透过率有关; ϵ 为对比度阈值, 等于 0.02. 基于模式消光系数值和式(1)和(7), 计算得到能见度和光学厚度的复杂函数关系. 为了能够直接得到能见度和 550 nm 的光学厚度 τ 的关系, 笔者利用 6S 辐射传输模式, 采用中纬度夏季和中纬度冬季的大气模式状态, 通过输入 0~20 km 间距为 0.2 km 的一系列能见度资料, 最后得到一系列 550 nm 的光学厚度 τ 值, 并将 V 与光学厚度 τ 建立如下关系:

$$V = \frac{4.5254 \tau^{(-1.0971)}}{1000} \quad (8)$$

云的液态含水量^[13] 可表示为 τ 和 r_e 的函数:

$$w = \frac{2.6 \times r_e}{4525.4 \times \tau^{(-1.0971)}} \quad (9)$$

式中: V 为能见度(m); C 为系数, 按散射理论取值

为 2.6; w 为液态含水量($g \cdot m^{-3}$); 假设所有云滴都是同样大小, 则取 k 值为 1, 但对于宽谱, k 值就要取大一些.

2 结果分析

2.1 个例分析

6月22日08:00时的500 hPa高空图上, 在祁连山西部的上空有低压槽, 山区东部有偏南风维持; 在700 hPa上, 偏南风仍然很强, 祁连山和青海部分地区处于高空槽前的西南暖湿气流中. 另外在08:00时的卫星云图上整个祁连山区有大片的中、低云系覆盖.

云光学厚度大小与云的含水量有关, 图1(a)是2002年6月22日12:00时祁连山区云光学厚度的

空间分布, 等值线为海拔4 000 m以上 200 m 间距的等高线. 结果表明, 区域内云系的光学厚度在3以上, 最高值高达21, > 7 的光学厚度分布基本在 $97^\circ E$ 以东, > 15 的光学厚度分布成南北走向, 中心在 $98^\circ E$ 附近; 海拔4 000 m以上的山区, 光学厚度基本在11以上, 并且其分布与高度分布十分一致. 海拔5 000 m以上的山区, 光学厚度可高达17~19, 最高值分布在海拔4 000~4 200 m之间, 光学厚度 > 19 , $97^\circ E$ 以西, 云光学厚度相对较小, 但其高值区集中在海拔4 000 m以上的山区, 可达15. 云粒子有效半径的空间分布可以反映地面易降水区域, 研究表明^[15], 在降水过程中, 云顶一直由较大的粒子组成. 图1(b)为2002年6月22日12:00时左右(BTM)祁连山区云粒子有效半径的空间分布,

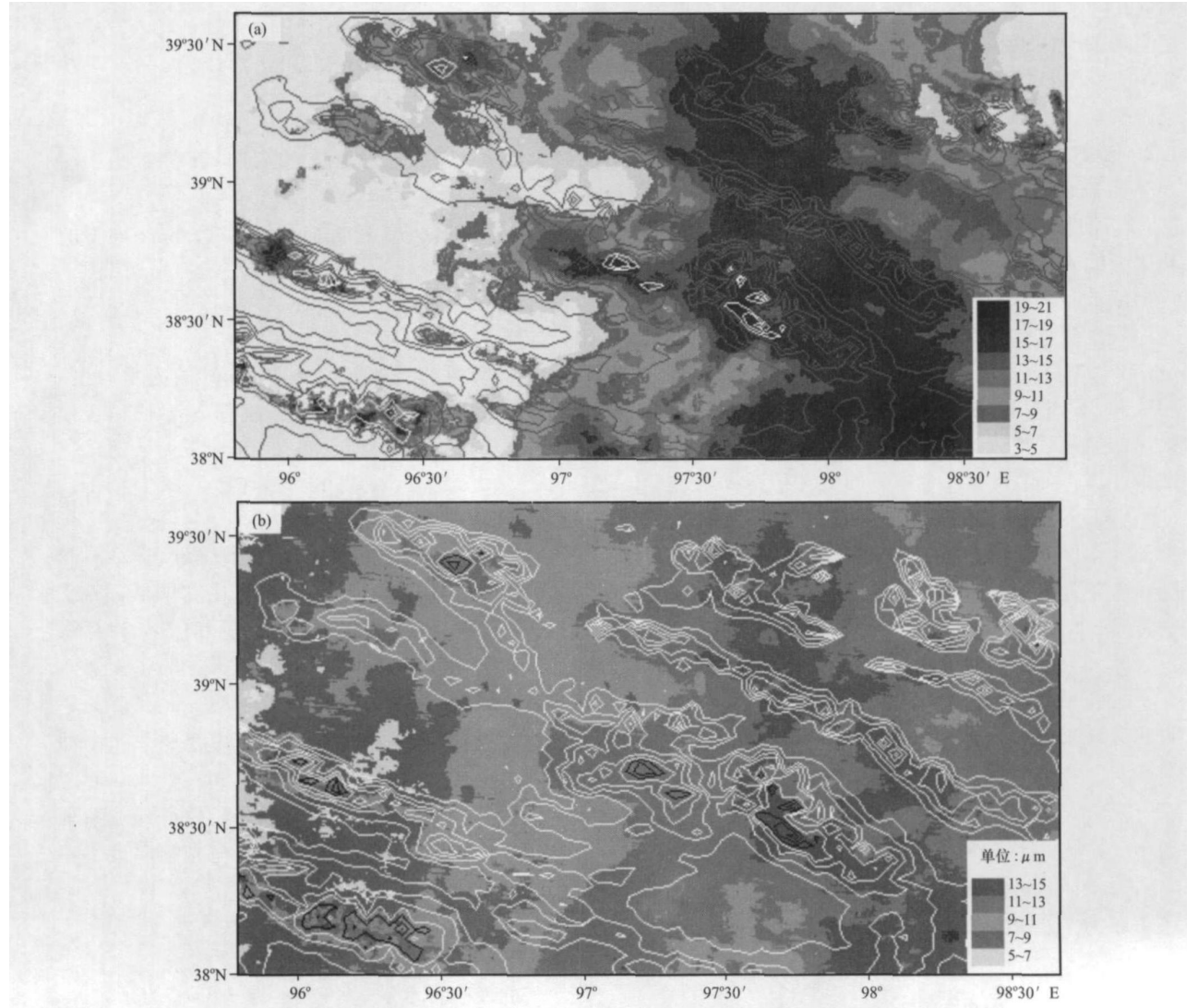


图 1 2002 年 6 月 22 日 12 时左右祁连山区云光学厚度 (a) 和云粒子有效半径 (b) 的空间分布

(等值线代表 4 000 m 以上 200 m 间距的等高线, 其中(a)中黑色等值线和(b)中白色等值线都表示 5 000 m 以上的等高线)

Fig. 1 Special distributions of optics thickness (a) and efficient radius of cloud particle (b) at about 12:00 on June 22, 2002

区域内云系的粒子有效半径在 $5 \mu\text{m}$ 以上, 最高值高达 $15 \mu\text{m}$, $> 11 \mu\text{m}$ 的云粒子有效半径分布基本在 97°E 以东, 并成南北走向, 中心在 98°E 附近. 海拔 4000 m 以上的山区, 云粒子有效半径基本在 $11 \mu\text{m}$ 以上, 并且其分布与高度分布十分一致; 海拔 5000 m 以上的山区, 云粒子有效半径可高达 $13 \sim 15 \mu\text{m}$, 最高值分布在海拔 $4000 \sim 4200 \text{ m}$ 之间. 97°E 以西, 云粒子有效半径相对较小, 但其高值区集中在海拔 4000 m 以上的山区, 可达 $11 \mu\text{m}$. 上述结果表明, 这次过程, 云系的主体在 97°E 以东, 高值中心在 98°E 附近, 成南北走向, 并且云光学厚度和云粒子有效半径分布与地形分布一致. 祁连山区云水相对丰富区在海拔 4000 m 以上的山区, 最丰富的区域介于海拔 $4000 \sim 4200 \text{ m}$ 范围之间, 易降水区在海拔 4000 m 以下的山区.

当然, 个例分析受很多因素的制约, 具有很大的偶然性, 不能反映所有天气状况下的云特征分布.

2.2 云宏观特征参数与海拔高度变化的关系

比较山体南北坡降水的差异, 从图 2 可看出, 随海拔高度的分布, 云粒子有效半径的变化也有南北坡差异(图 2a). 南坡上, 随高度增加而增加, 当高度达到海拔 4300 m 时, 云粒子有效半径达最大值, 为 $14.7 \mu\text{m}$, 之后随高度升高基本保持不变或略有减小; 在北坡上, 随高度的降低, 云粒子有效半径一直呈降低趋势, 并且云粒子有效半径较同高度南坡上低. 说明祁连山区最容易产生降水的区域在海拔 4300 m 左右的南坡. 云光学厚度(图 2b)的变化有南北坡差异, 南坡上, 随高度增加而增加, 云光学厚度呈上升趋势, 当高度达到海拔 4300 m 时, 云光学厚度达最大值, 为 18.7 , 之后随高度升高缓慢减小; 在北坡上, 随高度的降低, 光学厚度一直呈降低趋势. 原因是: 在夏季, 祁连山区受西南暖湿气流的影响较大. 所以, 水汽从南部输入, 受地形的抬升作用, 水汽沿南坡辐合上升, 云光学厚度增加; 当水汽达到一定高度后, 环境处于负温度区, 水汽凝结形成云水, 所以云粒子有效半径增大; 当达到 4300 m 高度后, 部分水汽很难继续上升, 在海拔 4300 m 会形成较大降水; 之后, 有部分水汽沿山坡继续上升, 所以光学厚度和云粒子有效半径有所减小. 当云移至北坡时, 云处于气流辐散的状态下, 云的光学厚度和云粒子有效半径都变为减小的趋势. 冬季受西风带影响较大, 对于西北东南走向的祁连山区, 水汽的分布仍是南坡略大于北

坡, 所以, 平均水汽分布仍是南坡大于北坡.

云光学厚度和云粒子有效半径只能反映降水产生的高值区, 人工影响天气不仅要考虑在可能产生降水的区域实施人工降水, 而且也比较关注水汽的分布状况. 下面将根据上述资料, 反演云的液态含水量, 并分析其在山区随海拔高度的分布特征.

云液态含水量(图 2c)的变化有南北坡差异, 南坡上, 随高度增加而增加, 云液态含水量呈上升趋势, 当高度达到海拔 4300 m 时, 云液态含水量达最大值 $0.187 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 之后随高度升高, 逐渐减小; 在北坡上, 随高度的降低, 云液态含水量一直呈降低趋势, 但降低的趋势较南坡升高的趋势剧烈.

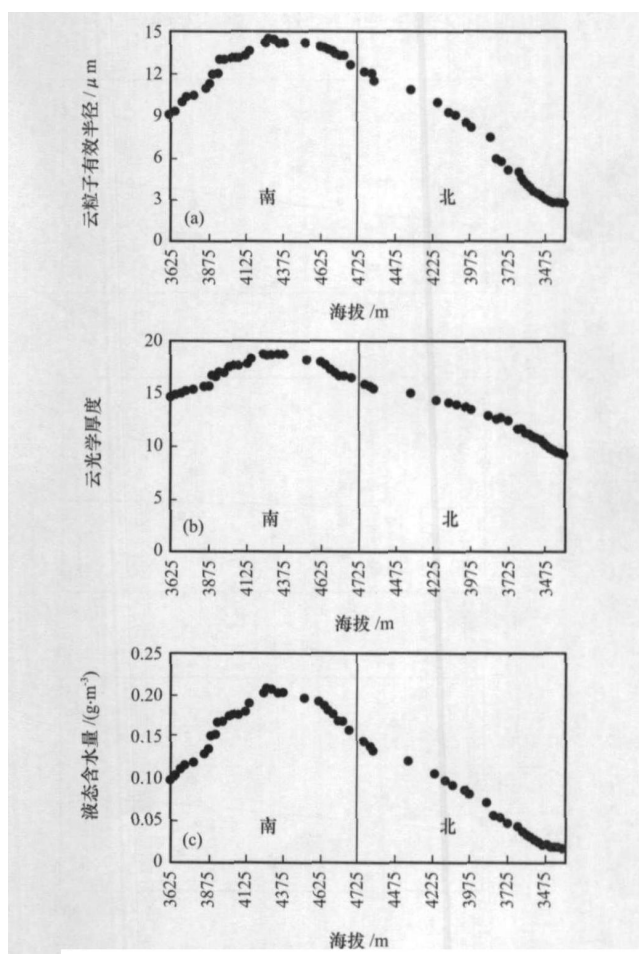


图 2 云粒子有效半径(a)、云光学厚度(b)和液态含水量(c)随海拔高度的分布

Fig. 2 Efficient radius of particle(a), optical thickness(b) and content of liquid water(c) of cloud changing with altitude

2.3 云光学特征与降水量的关系

根据反演的结果, 读取祁连山区及周边地区的气象台站的相应光学特征数据, 并与台站的 6 h 降水量资料进行了对比分析(图 3). 结果表明, 云粒

子有效半径、云光学厚度、云液态含水量参数与降水的关系基本是一致的正相关关系, 并且当光学厚度在 3.6, 云粒子有效半径在 $4.3 \mu\text{m}$ 以上, 云液态含水量 $> 0.029 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时都有可能产生降水。当然, 降水概率发生大的区域是: 光学厚度在 $8 \sim 20$ 之间, 云粒子有效半径在 $6 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间, 云液态含水量 $> 0.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的范围内。综上所述, 当天气形式有利于降水产生时, 降水量与云的宏观特征有一定正相关关系。但是, 降水与单一因子之间的相关性不是十分大, 离散的点很多, 所以单一的云特征参数不能很好地反映地面降雨量。当云液态含水量 $> 0.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 就能产生降水。而图 2 的个例分析发现, 山区云的液态含水量可高达 $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 说明山区的云水资源有人工开发的潜力。

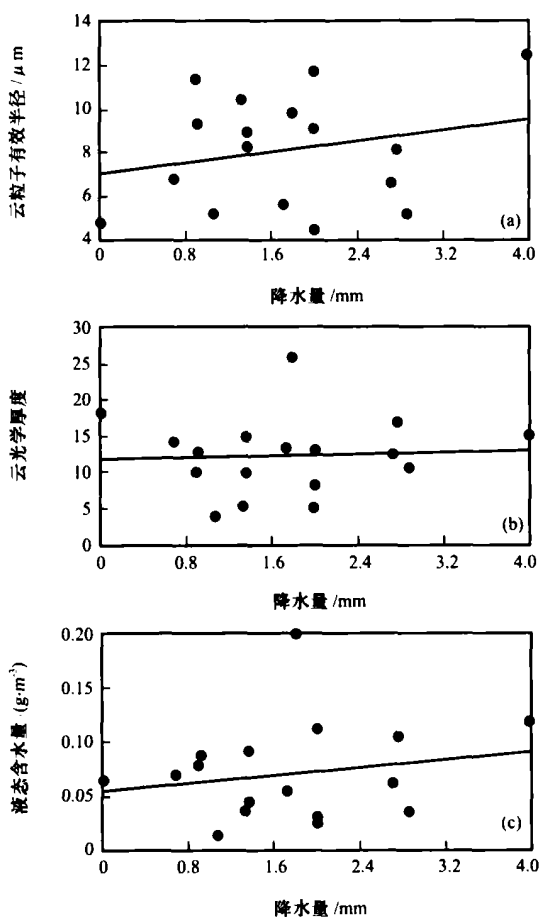


图 3 云粒子有效半径(a)、云光学厚度(b)和液态含水量(c)与 6 h 降水量的关系

Fig. 3 Precipitation of 6 hours in relation to efficient radius of particle (a), optical thickness (b) and content of liquid water(c) of cloud

3 结论

关于云粒子有效半径、云光学厚度反演和观测

的研究相对较少, 本研究通过上述两个参数推算出的云液态含水量与文献[16]中引用的观测结果很接近, 相差 0.012, 相对误差在 8% 左右, 说明上述几个参数反演结果是比较准确的。

在祁连山区南坡, 云光学厚度、云粒子有效半径以及云液态含水量等随高度升高而上升, 在海拔 4 300 m 左右达到最大值, 之后随高度增加而降低; 在北坡, 云特征参数随高度降低一直呈下降趋势; 所以, 海拔 4 300 m 及以下的南坡是祁连山区降水的高值区, 而北坡为相对少雨区, 处于祁连山区的托来南山北坡的托勒气象站也为山区的少雨站。

当大气环境有利于降水产生时, 上述几个云的宏观特征参数与降水量基本成正相关关系, 云特征参数越大, 降水越多, 但单一因子之间的关系并不十分好。云特征参数的大小不能直接反映降水与否, 如果要从云宏观特征入手来反映地面自然降水的情况, 还需考虑一些天气背景和垫面状况的相关信息。

分析表明, 祁连山区云的液态含水量 $> 0.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 就能产生降水。而祁连山区含水量最丰富的区域在海拔 4 300 m 左右, 云的液态含水量高达 $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 说明祁连山区的云水资源有很大的开发潜力。

参考文献(References):

- [1] Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, *et al.* Cloud radiative forcing and climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment [J]. *Science*, 1989, **243**: 57-63.
- [2] Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, *et al.* Interpretation of cloud climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models [J]. *Science*, 1989, **245**: 513-516.
- [3] Wetherald R T, Manabe S. Cloud feedback processes in a general circulation model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 1397-1415.
- [4] King M D, Radke L F, Hobbs P V. Determination of the spectral absorption of solar radiation by marine stratocumulus clouds from airborne measurements within clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 894-907.
- [5] Roeckner E, Schlese U, Biercamp J, *et al.* Cloud optical depth feedbacks and climate modelling [J]. *Nature*, 1987, **329**: 138-140.
- [6] Liu Jian, Dong Chaohua. Using satellite data to analyze properties of cloud particles size on the top cloud [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, **21**(2): 124-128. [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.]
- [7] Chu A, Strabala K, Song R, *et al.* MODIS Atmosphere QA Plan [R]. NASA Goddard Space Flight Center, 1997: 1-43.
- [8] 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 Trans. Geosci. Remote Sens., 1992, 30: 2-27.
- [9] Han Q, Rossow W, Welch R *et al.* Validation of satellite retrievals of cloud microphysics and liquid water path using observations from FIRE[J]. J. Atmos. Sci., 1995, 52: 4183-4195.
- [10] Yi Shuhua, Liu Hongli, Li Weiliang, *et al.* Spatial and temporal distributions of cloud over Northwest of China[J]. Monthly Meteorology, 2003, 29(1): 7-11. [宣树华, 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.]
- [11] Ding Xianrong. Water increasing effect of mountains and its value of water resources [J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(6): 681-685. [丁贤荣. 高山增水效应及其水资源意义[J]. 山地学报, 2003, 21(6): 681-685.]
- [12] King M D. Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements [J]. Atmos. Sci., 1987, 44: 1734-1751.
- [13] Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part 1: Theory [J]. J. Atmos. Sci., 1990, 47: 1878-1893.
- [14] Nakajima T, Tanaka M. Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere [J]. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 1986, 35: 13-21.
- [15] Liu Jian, Xu Jianmin, Fang Zongyi. Analysis of the particle sizes at top of cloud and fog with NOAA-AVHRR data [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1999, 10(1): 28-33. [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.]
- [16] Zhang Xuwen. Water content of cloud and its water circulation [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 83-86. [张学文. 云的含水量及其水循环[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 83-86.]

Remote Sensing Retrieval and Analysis of Optical Character of Cloud in Qilian Mountains

ZHANG Jie¹, ZHANG Qiang¹, TIAN Wen shou², HE Jin mei³

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou Gansu 730020, China; 2. Institute of Atmospheres Science, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China; 3. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou Gansu 730020, China)

Abstract: By using MODIS data from Terra and Aqua satellite, 6 hours precipitation data of 18 cases from 2002 to 2005, applying 6S Model and Mie Model, some parameters, including optical thickness of cloud, efficient radius of cloud particle and content of liquid water, are retrieved. Their special distributions are also analyzed by combining with GIS software. Then, the relation of all those parameters and 6 hours precipitation are analyzed. The results show that there is a striking dissimilarity in special distribution of the optics thickness and efficient radius of cloud particle, which is in-

fluenced by terrain, with a maximum on the south slopes lower than 4 300 m of the mountains, a region with rich resources of cloud water. There are positive correlation between precipitation and the three parameters. Precipitation probability is large when optical thickness changes from 8 to 20, efficient radius of cloud particle changes from 6 to 12 μm and content of liquid water is more than $0.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Content of liquid water higher than $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ at 4 300 m a. s. l. shows that there is a large potential to exploit cloud water in the Qilian Mountains.

Key words: EOS MODIS; Qilian Mountains; optical thickness of cloud; efficient radius of cloud particle; content of liquid water