

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.02.011

基于 MODIS 资料的陕西水云特征研究

刘 敏

(陕西省榆林市气象局, 陕西 榆林 719000)

摘 要: 陕西位于西北内陆地区, 是中国气候的敏感区, 为准确认识其上空的水云特征, 利用 MODIS 的 MYD06 二级云产品数据, 对陕西水云的概率分布、云顶高度、粒子有效半径、光学厚度进行了统计分析。结果表明: (1) 水云概率分布显示出单峰结构, 峰值出现在 11 月, 5 月出现概率最低。水云在秋季出现概率最高, 春季出现概率最低。(2) 7 月和 9 月水云云顶高度的概率分布会产生显著的变化, 7 月和 8 月的分布形态与其余各月有显著差别。水云云顶高度平均最大值出现在春季的 4~5 月, 最小值出现在冬季的 12~2 月。(3) 水云的粒子有效半径在 10 月~次年 5 月, 分布形态相似, 6~9 月分布形态与之明显不同。水云粒子尺度平均最大值出现在夏季的 6~8 月, 最小值出现在秋季的 11 月。(4) 光学厚度在 0~5 之间的水云在 10 月~次年 5 月, 出现概率最高, 峰值出现在 12~2 月; 6~9 月光学厚度在 5~10 之间的水云出现概率最高, 峰值出现在 7~8 月。水云光学厚度最大值出现在秋季的 9~11 月, 最小值出现在夏季的 7~8 月。

关键词: 水云; 云顶高度; 云粒子有效半径; 云光学厚度; 概率分布

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)02-0154-07

Investigation of Characteristics of Water Cloud for Shaanxi Based on MODIS Data

LIU Min

(Yulin Meteorological Bureau, Yulin 719000, China)

Abstract: Shaanxi Province is the climate sensitive region of China, locating at northwest inland. The probability distribution of water cloud, cloud-top height, optical thickness and the effective radius of cloud are analyzed by using MYD06-L2 of MODIS cloud product to understand the property of water cloud over Shaanxi. The results were concluded as follows: (1) Single peak was obtained for probability distribution pattern of water cloud and reached the top at November, while the lowest at May. Moreover, the maximum and minimum appearance probabilities were observed at autumn and spring. (2) The probability distribution of water cloud-top height produced significant change in July and September, and from April to May, the water cloud-top height mean value reached the maximum and from December to February the minimum mean value appeared, and specially that of July and August showed distinct form. (3) It was found that the probability

基金项目: Supported by Youth Foundation of Shaanxi Meteorological Bureau (陕西省气象局青年基金, 2017Y-20)

作者简介: 刘 敏 (1986 -), 男, 山西临汾人, 硕士, 工程师, 主要从事天气预报服务等方面的研究。

E-mail: 506257363@qq.com.

收稿日期: 2017-12-27; **修改日期:** 2018-03-10

distributions of the effective radius of cloud particle are similar from October to May the next year, while obvious differences existed from June to September. The maximum and minimum average appeared from June to August and in November, respectively. (4) The water cloud with optical thickness ranging 0~5, had a higher probability from October to May the next year and reached the top from December to February the next year. Yet, water cloud with optical thickness ranging 5~10 performed different. The higher probability existed from May to October, and reached the top from July to August. Additionally, the maximum and minimum of optical thickness occur from September to November and July to August, respectively.

Key words: water cloud; cloud-top height; effective radius of cloud particle; cloud optical thickness; probability distribution

1 引 言

云作为影响全球能量平衡、气候和天气变化的重要因素,是产生降水的主体。水云是降水效率较高的云,在温度高于 0 °C 时,所有的云都是由水滴组成的,随着温度降低,在没有固态界面时粒子不易冻结而处于过冷却状态,大气中的云雾粒子仍以液态为主。以往对云的研究主要集中在云气候方面,由于观测手段和资料的限制,云相态的研究受到了一定限制;且研究多采用地面观测资料,或是国际云气候观测整理的云集资料,因而获取云粒子的微观特性有较大难度;飞机观测也只能取得部分样本,得不到长时间大范围的数据,对云粒子微观特性的研究造成了较大困难。卫星可提供地面观测等无法提供的云微物理参量,包括云水含量、光学厚度、云粒子有效半径等,能够应用于大范围较长年限的时空分布特征和变化趋势的分析。周毓荃等^[1]利用多普勒雷达资料、FY-2E 静止卫星和 MODIS 极轨卫星反演产品,研究了 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的云降水结构及云雨转化特征,研究结果表明云相态、云粒子大小以及光学厚度与降水量之间有密切关系;曹亚楠等^[2]利用 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 资料模拟计算了水云的大气红外辐射特性;段皎等^[3]利用 ISCCP 的 D2 云气候资料集和 MODIS 云的资料分析了云地区云的光学厚度和云滴有效半径的分布特征;林丹^[4]利用 MODIS 卫星产品分析了西南地区的云水特征;赵仕伟等^[5]利用 EOS/MODIS 数据反演了水云云底高度,并结合飞机探测数据对其进行对比实验,验证了利用 MODIS 数据反演水云的云底高度是可行的;叶晶等^[6]利用 MODIS 数据反演了多层云光学厚度和有效粒子半径;曹亚楠^[7]等利用 MODIS 数据研究了北京地区卷云的特性。已有的关于云微物理特性的研究得出了诸多可靠的结论,对于陕西地区单一相态云的研究相对较少。

本文利用 MODIS 二级云产品 MYD06 数据对 7 种相态云(晴天、不透明的水云、不透明的冰云、冰水混合相态的云、透明的水云、透明的冰云、不确定的云)的概率分布进行统计分析;对陕西水云云顶高度特征进行统计分析;对陕西水云粒子有效半径特征进行统计分析;对陕西水云光学厚度特征进行统计分析。

2 资料和方法

MODIS 是 EOS 计划的 Terra 和 Aqua 卫星携带的重要传感器。Terra 和 Aqua 卫星为极轨卫星,每两天可重复观测地球表面,提供 36 个波段的观测数据。MODIS 数据产品分为 0 级、1 级、2~4 级产品。

利用 MODIS 经过定标和地理定位的云产品 MYD06 二级产品。数据区域选为陕西(31°42'~39°35'N, 105°29'~111°15'E),2014 年 3 月~2017 年 2 月 3 年的资料。

MYD06 二级云产品数据将云的相态分为了 0、1、2、3、4、5、6 共 7 种,其中 0 表示晴天;1 表示不透明的水云;2 表示不透明的冰云;3 表示冰水混合相态的云;4 表示透明的水云;5 表示透明

的冰云; 6 表示不确定。选取云相态为 1 和 4 的水云作为研究对象。

统计处理过程主要分以下 5 个部分:

- 1) 利用编写好的程序将 HDF 文件格式中所需要的经度、纬度、云相态、地表压强、云顶温度、云顶压强、云光学厚度、云粒子有效半径数据读取出来;
- 2) 将云光学厚度、云粒子有效半径数据处理成分辨率为 5 km 的数据;
- 3) 根据 MODIS 数据文件格式说明, 对数据进行质量控制, 剔除奇异值和缺测值;
- 4) 对经纬度数据做出判断, 在所研究的地区范围内, 根据云相态统计各种云相出现的概率;
- 5) 在所研究的经纬度范围内, 当云相态为 1 或 4(即不透明的水云或透明的水云) 时, 读取水云的云粒子有效半径、水云的光学厚度、计算水云的云顶高度并进行统计分析。

3 水云特性统计分析

3.1 水云的月概率分布特征

将云相态为 1 和 4 的水云作为水云样本对水云出现的概率进行了统计分析。

图 1 为水云的月概率分布图, 从图中可以看出, 水云在 11 月出现概率最高, 平均可达 0.36, 其次是 8 月, 为 0.34; 5 月出现概率最低, 平均为 0.22, 次低是 4 月, 平均为 0.23。

在全年中, 水云概率分布为单峰型, 夏秋季为高峰期, 春季为低值期。

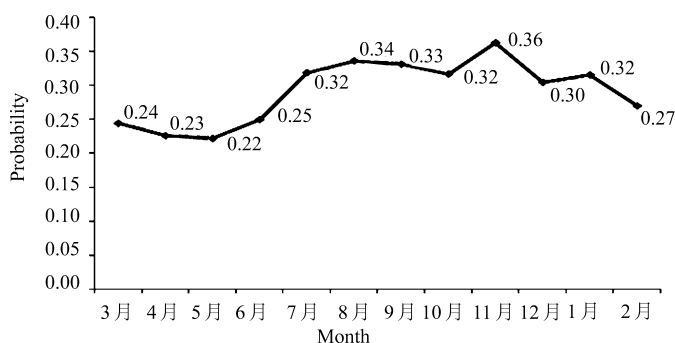


图 1 水云的月概率分布图

Fig.1 Probability distribution of water cloud by month

水云在秋季出现概率最高, 平均可达 0.34, 其次是夏季和冬季, 平均为 0.30; 春季出现概率最低, 平均为 0.23。

3.2 陕西水云云顶高度特征分析

利用经度 (longitude)、纬度 (latitude)、云相态 (cloud phase infrared)、云顶温度 (cloud top temperature)、云顶气压 (cloud top pressure)、地表气压 (surface pressure) 数据, 计算出水云云顶高度, 并统计分析水云云顶高度的月、季、年分布特征。

参考文献 [8] 给出的大气压强随高度的变化关系

$$Z - Z_0 = \ln\left(\frac{P_0}{P_Z}\right) \frac{RT_Z}{M_{\text{air}}g} \quad (1)$$

式中 Z 为云顶处的高度, Z_0 为地面高度, P_0 为地表压强, P_Z 为云顶压强, R 为普适气体常量, T_Z 为云顶温度, M_{air} 为干空气的分子量, g 为重力加速度。

Z_0 取为 0, R 取为 $8.31447 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, M 取为 $0.0289644 \text{ Kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, g 取为 $9.80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 计算出

水云云顶高度。

从水云云顶高度的月概率分布图 (图略) 中可以看出, 7 月和 9 月水云云顶高度的概率分布会产生显著变化, 7 月和 8 月的分布形态与其余各月有显著差别。各月中, 出现概率最高的为云顶高度在 0~1 km 的水云, 概率分布表现为双峰型, 12~2 月, 概率高达 0.54, 另一个高峰期为 7~8 月, 出现概率为 0.38 左右; 7~8 月, 云顶高度在 1~2 km 的水云出现概率会明显增加。云顶高度在 8~9 km 的水云仅在 5~8 月出现, 出现概率为 0.01。

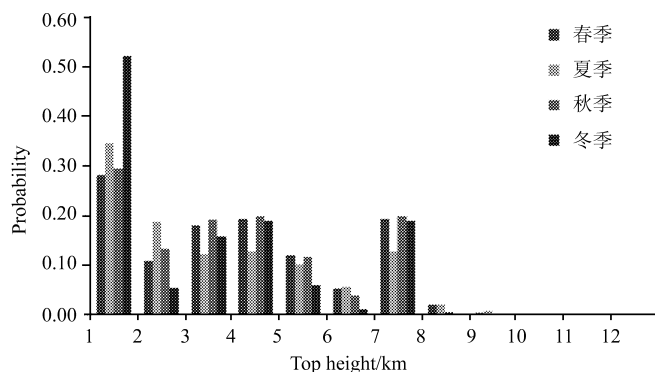


图 2 水云云顶高度季概率分布图

Fig.2 Probability distribution of water cloud top height by season

图 2 为水云云顶高度的季概率分布图, 春、秋两季水云云顶高度的概率分布相似, 夏季和冬季差别显著。各季中出现概率最高的均为云顶高度在 0~1 km 之间的水云; 夏季 1~2 km 高度的水云出现概率显著增加, 且高度较高的水云出现概率也会增加, 最高的为云顶高度在 8~9 km 之间的水云; 冬季顶高在 0~1 km 之间的水云占绝大多数, 出现概率高达 0.52。云顶高度在 2~3 km 和 3~4 km 的水云在春、秋、冬三季中出现概率较高, 而在夏季会显著减少。冬季高云顶水云出现概率会显著降低, 水云云顶高度平均最大值出现在春季的 4~5 月, 最小值出现在冬季的 12~2 月。

从水云云顶高度的季节分布来看, 水云云顶高度春季最大, 平均为 2.65 km; 次大值出现在夏季, 平均为 2.40 km; 冬季最小, 平均为 1.56 km; 次小为秋季, 平均为 2.37 km, 水云云顶高度年平均值为 2.24 km。

3.3 陕西水云粒子有效半径特征分析

利用经度 (longitude)、纬度 (latitude)、云相态 (cloud phase infrared) 和云粒子有效半径 (cloud effective radiuse) 数据, 统计分析了水云粒子有效半径的月、季、年分布特征。

陕西水云的粒子有效半径主要分布在 5~30 μm 之间, 概率高达 0.95; 粒子有效半径在 5~15 μm 之间出现的概率最大, 大于 30 μm 和小于 5 μm 的概率都很小。

从陕西水云粒子有效半径的月概率分布图 (图 3) 中可以看出, 水云粒子有效半径在 10 月 ~ 次年的 5 月分布形态相似, 6~9 月分布形态与之明显不同。10 月 ~ 次年的 5 月出现概率最高的是尺度在 5~10 μm 之间的粒子, 6 月以后粒子尺度明显增大, 6~9 月出现概率最高的是尺度在 10~15 μm 之间的粒子。6~9 月, 尺度为 15~20 μm 之间的粒子出现概率明显增高。粒子有效半径小于 5 μm 和大于 30 μm 出现的概率很小, 均不足 0.05。

夏季粒子有效半径的概率分布与其它季节明显不同。夏季出现概率最高的是尺度在 10~15 μm 之间的粒子, 其余 3 季出现概率最高的是尺度在 5~10 μm 之间的粒子, 夏季大粒子出现概率明显增大。变化最

为明显的是尺度在 $15\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间的粒子, 夏季出现概率明显增大。秋冬季节, 粒子有效半径小于 $5\ \mu\text{m}$ 和大于 $30\ \mu\text{m}$ 出现的概率为 0。

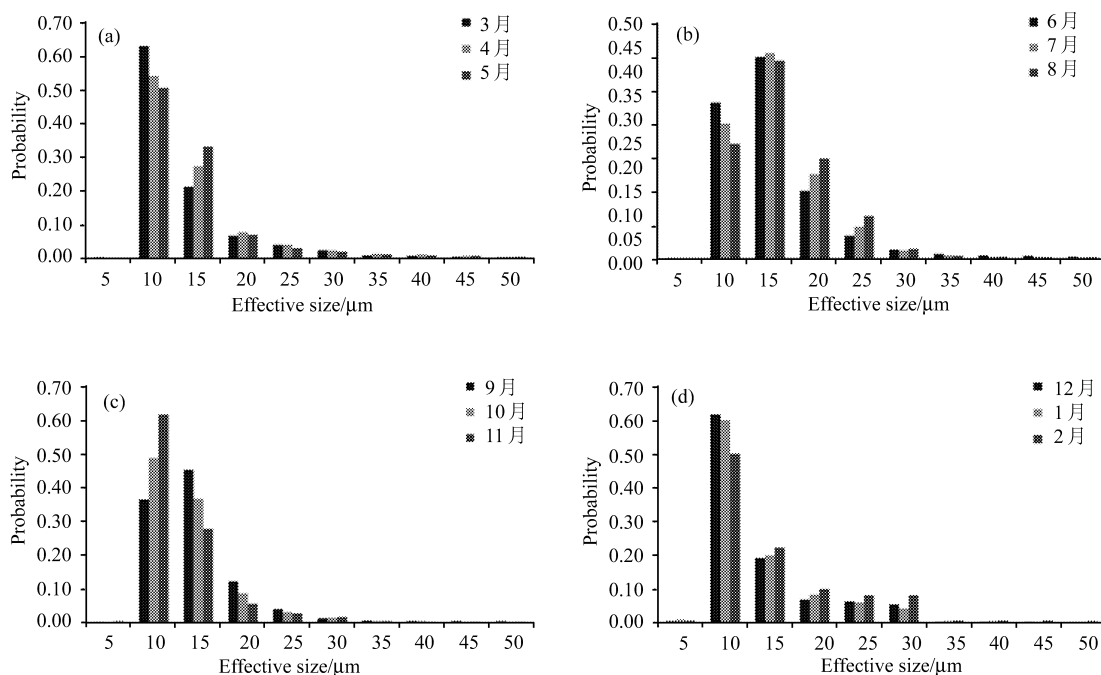


图 3 水云粒子有效半径月概率分布图

Fig.3 Probability distribution for the effective radius of water cloud by month

从水云粒子有效半径的季节平均分布来看, 水云粒子夏季最大, 平均为 $13.57\ \mu\text{m}$; 次大值出现在春季, 平均为 $11.78\ \mu\text{m}$; 秋季最小, 平均为 11.33 ; 次小为冬季, 平均为 $11.67\ \mu\text{m}$ 。水云粒子尺度平均最大值出现在夏季的 6~8 月, 最小值出现在秋季的 11 月, 水云粒子有效半径年平均值为 $12.09\ \mu\text{m}$ 。

3.4 陕西水云光学厚度特征分析

利用经度 (longitude)、纬度 (latitude)、云相态 (cloud phase infrared) 和云光学厚度 (cloud optical thickness) 数据, 统计分析了水云光学厚度的月、季、年分布特征。

陕西水云的光学厚度主要分布在 $0\sim 80$ 之间, 概率高达 0.90; 光学厚度在 $0\sim 5$ 之间出现的概率最大, 大于 80 的概率很小, 不足 0.10。

图 4 为陕西水云光学厚度的概率分布图。光学厚度在 $0\sim 5$ 之间的水云在 10 月~次年 5 月, 出现概率最高, 峰值出现在 12 月至 2 月; $6\sim 9$ 月光学厚度在 $5\sim 10$ 之间的水云出现概率最高, 峰值出现在 7~8 月; 光学厚度在 $10\sim 15$ 之间的水云在 3 月以后, 出现概率开始逐月增加, 7~8 月出现概率达到最高, 9 月开始出现概率减少, 12 月到次年 2 月出现概率最低; 光学厚度在 $15\sim 20$ 之间的水云出现概率稳定在 0.09 左右, 峰值出现在 7~8 月; 光学厚度在 $20\sim 25$ 之间的水云出现概率稳定在 0.07 左右; 光学厚度在 $25\sim 30$ 之间的水云出现概率稳定在 0.05 左右; 光学厚度在 $30\sim 35$ 之间的水云出现概率稳定在 0.04 左右; 光学厚度在 $35\sim 40$ 之间的水云出现概率稳定在 0.04 左右; 光学厚度在 40 以上的水云出现概率较低; 光学厚度在 80 以上的水云 7 月和 8 月不会出现; 光学厚度在 90 以上的水云 4~6 月和 9~11 月会出现, 但概率较小。

春、秋、冬三季, 出现概率最高的是光学厚度在 $0\sim 5$ 之间的水云, 夏季出现概率最高的是光学厚度在 $5\sim 10$ 之间的水云; 光学厚度在 $0\sim 5$ 之间的水云冬季出现概率最高, 秋季出现概率最低; 光学厚度在 $5\sim 10$ 之间的水云夏季出现概率最高, 冬季出现概率最低; 光学厚度在 $10\sim 15$ 之间的水云夏季出现概率高, 冬季

出现概率最低, 光学厚度在 15~20、20~25、25~30、35~40 之间的水云概率分布均匀, 各季间差别不大。

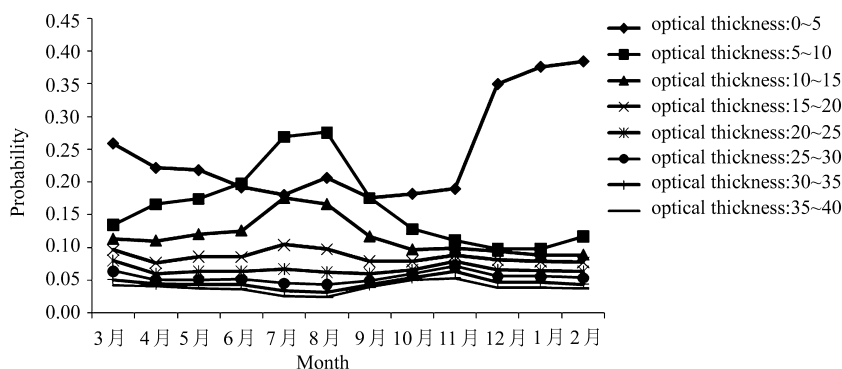


图 4 水云光学厚度概率分布图

Fig.4 Probability distribution for optical thickness of water cloud

水云光学厚度秋季最大, 平均为 26.93; 次大值出现在春季, 平均为 22.45; 夏季最小, 平均为 18.59; 次小为冬季, 平均为 18.75。水云光学厚度最大值出现在秋季的 9~11 月, 最小值出现在夏季的 7~8 月, 水云光学厚度年平均值为 21.68。

4 结 论

通过统计分析陕西 2014 年 3 月~2017 年 2 月 3 年间的 MODIS 二级云产品数据, 获得了水云出现概率、云顶高度、粒子有效半径、光学厚度的分布特征, 主要结论有:

1) 水云概率分布显示出单峰结构, 峰值出现在 11 月, 平均可达 0.36, 5 月出现概率最低, 平均为 0.22。水云在秋季出现概率最高, 春季出现概率最低。水云出现的年平均概率为 0.29。

2) 7 月和 9 月水云云顶高度的概率分布会产生显著的变化, 7 月和 8 月的分布形态与其余各月有显著差别。各月中, 出现概率最高的为云顶高度在 0~1 km 的水云, 概率分布表现为双峰型。水云云顶高度平均最大值出现在春季的 4~5 月, 最小值出现在冬季的 12~2 月。春、秋两季水云云顶高度的概率分布相似, 夏季和冬季差别显著。

3) 水云的粒子有效半径在 10 月~次年的 5 月, 分布形态相似, 6~9 月分布形态与之明显不同。水云粒子尺度平均最大值出现在夏季的 6~8 月, 最小值出现在秋季的 11 月。夏季粒子的概率分布与其它季节明显不同, 夏季出现概率最高的是尺度在 10~15 μm 之间的粒子, 其余 3 季出现概率最高的是尺度在 5~10 μm 之间的粒子, 水云粒子平均有效半径夏季最大, 秋季最小。

4) 10 月~次年 5 月光学厚度在 0~5 之间的水云出现概率最高, 峰值出现在 12~2 月; 6~9 月光学厚度在 5~10 之间的水云出现概率最高, 峰值出现在 7~8 月。水云光学厚度最大值出现在秋季的 9~11 月, 最小值出现在夏季的 7~8 月。水云光学厚度秋季最大, 夏季最小。

参考文献:

- [1] Zhou Yuquan, Jiang Yuanhua, Cai Miao. Characteristics and transformation of cloud and precipitation of the extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, **38**(3): 321-332(in Chinese).

- 周毓荃, 蒋元华, 蔡 森. 北京“7.21”特大暴雨云降水结构及云雨转化特征 [J]. 大气科学学报, 2015, **38**(3): 321-332.
- [2] Cao Yanan, Wei Heli, Xu Qingshan, *et al.* Simulation of atmospheric radiative properties at IR bands under water clouds based on MODIS data [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0601001(in Chinese).
曹亚楠, 魏合理, 徐青山, 等. 利用 MODIS 资料模拟计算水云大气红外辐射特性 [J]. 光子学报, 2014, **43**(6): 0601001.
- [3] Duan Jiao, Liu Yu. Trends of cloud optical thickness and cloud effective radius variation in China [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2011, **39**(4): 408-416(in Chinese).
段 皎, 刘 煜. 中国地区云光学厚度和云滴有效半径变化趋势 [J]. 气象科技, 2011, **39**(4): 408-416.
- [4] Lin Dan. Characteristic analysis of cloud water in Southwest China using MODIS data [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2015, **45**(1): 138-144(in Chinese).
林 丹. 利用 MODIS 卫星产品分析西南地区云水特征 [J]. 气象科技, 2015, **45**(1): 138-144.
- [5] Zhao Shiwei, Zhao Zengliang, Yao Zhigang, *et al.* A preliminary study of cloud base heights retrieved for water clouds with EOS/MODIS data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, **24**(3): 341-345(in Chinese).
赵仕伟, 赵增亮, 姚志刚, 等. 利用 EOS/MODIS 数据反演水云云底高度的初步研究 [J]. 遥感技术与应用, 2009, **24**(3): 341-345.
- [6] Ye Jing, Li Wanbiao, Yan Wei. Retrieval of the optical thickness and effective radius of multilayered cloud using MODIS data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, **67**(4): 613-622(in Chinese).
叶 晶, 李万彪, 严 卫. 利用 MODIS 数据反演多层云光学厚度和有效粒子半径 [J]. 气象学报, 2009, **67**(4): 613-622.
- [7] Cao Yanan, Wei Heli, Xu Qingshan. Statistics analysis of cirrus properties in Beijing region based on MODIS cloud products [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, **8**(4): 271-281(in Chinese).
曹亚楠, 魏合理, 徐青山. 基于 MODIS 云产品的北京地区卷云特性统计分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2013, **8**(4): 271-281.
- [8] Shi Guangyu. *Atmospheric Radiation* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 6-7(in Chinese).
石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 6-7.