

立体观测法探测云顶高度的误差分析

黄云仙, 马烁*, 白衡

(解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要:云顶高度信息的确定对于大气物理及气候研究具有重要意义,立体观测法是探测云顶高的有效方法之一.依据立体观测法探测云顶高的几种观测模式及其测高原理,建立了单星模式探测云顶高的误差分析模型,并给出了具体的云顶测高误差公式.通过模拟卫星参数,分析了单星不同观测模式下的云顶测高误差.仿真结果表明,三线阵探测器观测模式在立体法探测云顶高度方面具有较大的优越性.

关键词:立体观测;三线阵探测器;云顶高;误差分析

中图分类号:P426.5+4 **文献标识码:**A

Errors in detection of cloud-top height by stereoscopic observation

HUANG Yun-Xian, MA Shuo*, BAI Heng

(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The determination of the cloud-top height is of importance to the study of atmospheric physics and climate. An effective method to detect cloud-top height is the stereoscopic observation. According to several working modes of this method and their principles, the model for analyzing errors in the cloud-top height detection is established in the single satellite mode, and specific error formulas are presented. By means of simulating satellite parameters, the error of cloud-top height detection is analyzed in different observation modes of single satellite. The results of the simulation illustrate that the three-line-array detector observation mode has relatively greater advantages than other models in detecting cloud-top height by the stereoscopic observation.

Key words: stereoscopic observation; three-line-array detector; cloud-top height; error analysis

PACS: 93.85.Bc, 93.85.-q, 92.60.Nv

引言

云在地球大气的能量和水汽收支中具有重要的调节作用,是影响气候变化的重要因子.不同的云反映着不同的大气运动状况,通过对云的观测可以了解大气的运动规律等.云顶高度的测量可以增加对台风、雷暴、地线的结构和动力特征的了解¹⁻⁵.准确的云顶高度信息对于强对流天气的研究和预警具有重要意义,尤其对于局地强风暴、热带气旋等灾害性天气的云团结构分析和云团三维空间移动监测等.因此对云的立体观测研究具有重要的意义.

目前云顶高度反演方法有近似法、气候学方法、

窗区通道温度方法、多通道测云高、二氧化碳(CO₂)多通道方法、立体观测法等.在近似法中高度值的确定主观性较强,容易产生较大的误差;气候学方法是按照历年统计资料通过高度值的频次分布分析来得出云的高度信息,此方法依赖于统计资料,无法得到准确的高度信息;窗区通道温度的方法主要是利用红外窗区资料确定云顶高度,此方法依赖于云发射率的先验知识,云周围的温度分布以及云团的重叠率等,并且需要假定云团满足局地热力学平衡条件.在实际探测不满足热力学平衡条件且大气温度廓线未知时,得到的云顶高度误差通常达1~2 km,有时甚至更大^[1].在红外窗区发射率技术的基础上,欧

收稿日期:2011-07-21,修回日期:2012-02-27

基金项目:国家自然科学基金(41076118)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(41076118)

作者简介(Biography):黄云仙(1963-),女,上海市人,副教授,主要从事气象信息处理技术研究. E-mail:yunxianhuang@yahoo.com.

*通讯作者(Corresponding author):E-mail:ms2hq@yahoo.com.

Received date: 2011-07-21, revised date: 2012-02-27

空局提出一种用 Meteosat 卫星的红外和水汽通道资料客观确定高云和薄云高度的方法^[6-7],但是水汽通道仅能测对流层中层和上层的辐射率,因此该方法仅用于较高云层. Menzel 等提出利用三个 CO₂ 通道吸收带来测量云顶高^[8],但该方法假设不同 CO₂ 通道内云的有效发射率相等,且需要大气湿廓线等间接测量参数,给测高精度带来较大影响,误差普遍达到 1.5 km 以上^[9]. 立体观测法使用几何学和摄影测量学直接获得高度值,不受间接测量值问题的影响,并且其使用卫星的立体观测资料,分辨率更高,应用范围更广. 研究用立体观测法计算云顶高度具有重要意义.

本文首先详细介绍了立体观测法探测云顶高的几种观测模式及探测原理,并就单星模式下对云顶高的测量误差展开研究,得出测高误差公式;通过模拟卫星参数,对比分析了单星不同观测模式下的云顶测高误差;进一步分析探测云顶高度的其他误差源,对云的相对运动给测高误差带来的影响进行具体分析;结果表明,三线阵探测器观测模式在立体观测法探测云顶高度方面具有较大的优越性.

1 云立体观测模式

在卫星上对云进行立体观测,相机可采用单星观测模式和双星联合观测模式,而单星观测模式又可以进一步分为单星单相机画幅式观测模式、单星单相机三线阵探测器观测模式、单星多相机观测模式.

1.1 单星单相机画幅式观测模式

相机沿着卫星飞行的方向,在满足测绘要求的重叠率的条件下,进行步进式画幅成像,如图 1 所示. 相机两次曝光之间的时间为拍摄间隔,拍摄间隔决定了相邻图像的重叠率,测绘要求相邻图像的重叠率要达到 60%. 在短的拍摄间隔内,相机对目标区域进行步进式拍摄,从而可获取重叠影像(如图 1 中 *c* 区域),相重叠的图像可构成立体像对,通过图像预处理与特征匹配,根据摄影测量学原理最终反演出云顶高度和垂直结构信息.

1.2 单星单相机三线阵探测器观测模式

三线阵探测器观测目前主要应用于摄影测量,对地面等进行三维建模. 将它用来探测云顶高,方法较为简单,并且减少了一些卫星参数带来的误差,所以用三线阵探测器观测模式探测云顶高是立体观测法探测云顶高中重要的一种方法.

该模式选取面阵器件中间的一行作为正视影

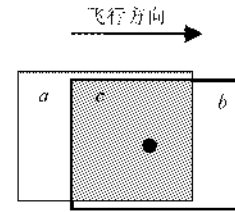


图 1 相机画幅式观测模式示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the frame-type observation mode

像,边缘的两行作为前视影像以及后视影像(如图 2 所示),这样可使三条线阵成像时具备相同的镜头参数与一组具备刚性几何关系的内方位元素,同时大幅度的降低了系统的研制难度与整机重量,但是由于成像器件大小的限制,前视与后视光轴的夹角不会很大,限制了相机的基高比.

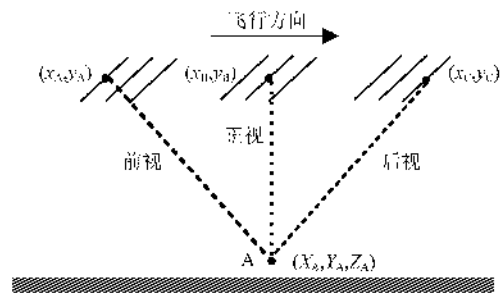


图 2 三线阵探测器观测模式示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the three-line-array detector observation mode

线性阵列在像平面上的位置、像元的间隔以及摄影机标定值已知,可以利用影像匹配的方法得到地面点 A 在 3 条航线影像上的同名像点及其坐标 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 和 (x_C, y_C) ,最后通过共线方程式(1),按照摄影测量前方交会公式(2)、式(3),计算得到相应地面点 A 的坐标 (X_A, Y_A, Z_A) ,从而可得到 A 的高程信息.

$$\frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} X_A - X_S \\ Y_A - Y_S \\ Z_A - Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 X_1 \\ N_1 Y_1 \\ N_1 Z_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} N_1 = \frac{B_x Z_2 - B_z X_2}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1} \\ N_2 = \frac{B_x Z_1 - B_z X_1}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中： (x, y) 为像点坐标， f 为探测器焦距， $(\varphi, \omega, \kappa)$ 为某摄影时刻的卫星姿态角， λ 为比例尺分母， (X_s, Y_s, Z_s) 为左投影光线过A点时摄站位置坐标， (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) 为A点分别在左像空间辅助坐标系以及右像空间辅助坐标系的坐标， N_1 、 N_2 为左右投影光线点投影系数， (B_x, B_y, B_z) 为两摄站点的坐标差，即摄影基线分量。

1.3 单星多相机观测模式

该模式通过单颗卫星互成一定夹角的两台或三台相机分别在轨道不同位置获取云顶目标的影像，如图3所示，其成像原理与三线阵探测器观测模式相同。其与单星单相机相比可以提高相机的基高比，但是技术复杂，工艺要求高，相机的数量要成倍的增加，需要的卫星资源也要成倍的增加。

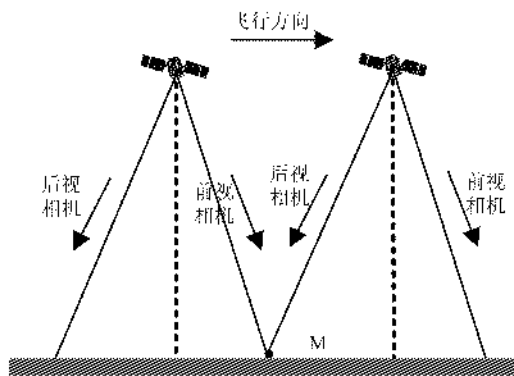


图3 单星多相机观测模式示意图

Fig.3 Schematic diagram of single satellite multi-camera observation mode

1.4 双星联合观测模式

该模式采用两颗卫星对云目标进行成像，获取立体像对。由两颗不同位置的气象卫星同时扫描得到目标的立体观测资料，由于视角的差异导致相同目标在不同卫星观测资料中出现视差偏移，利用这种视差偏移以及飞行器的位置可以得到与目标物理特征几乎无关的几何高度。Fujita利用立体观测中相同目标物的几何视角偏差计算云顶高度^[2]，王洪庆、吕胜辉等利用卫星——真云——投影云共线的事实以及卫星——投影云——真云之间的几何关系提出了一种新的云顶高度计算方法^[10]。Hasler^[1,3]、Seize^[11]、Fujita^[2]以及王洪庆^[12]等针对上述不同的

双星测高方法对测高误差进行了具体分析。

由于双星联合观测时间上的不同步(时间间隔可能较长)，及不同卫星的各种参数的不同(观测精度、分辨率等的不统一)，给云的观测带来许多问题，具体实现较为困难。

本文主要针对单星的三种观测模式进行云顶高观测误差分析与对比。尤其是三线阵探测器观测模式，由于目前气象卫星上还没有搭载相关的三线阵探测器，利用三线阵探测器观测模式对云顶测高误差的研究目前未见报道。

2 云顶高立体观测误差分析

假设云之间不存在相对运动，且在不考虑卫星姿态以及轨道等误差的情况下，对云顶高立体观测的误差进行分析。

2.1 静止云的测高误差

静止的云可以看作是地面静止物体，立体相机对地面静止物体的测高误差可以归结为对立体像对的匹配误差。将像平面上像素匹配的偏移量通过航高与镜头焦距确定的比例尺转换计算为高度的误差。设地球的质量为 M ，半径为 R ， f 为探测器焦距， H 和 B 分别为立体摄像的摄影航高和基线距离； h 为云顶高度， τ_p 和 θ 为沿着卫星飞行方向立体像对的匹配误差像元以及面阵的像元尺寸， σ_s 为地面静止物体的测高误差。根据测量原理可得到静止云的测高误差如下公式：

$$\sigma_s = \frac{\tau_p \theta (H - h) / f}{B} H. \quad (4)$$

2.2 移动的云的测高误差

立体相机的观测目标为云，云是以一定的速度在进行移动，所以要针对云的移动对测高带来的误差进行估计。如图4所示，在卫星从P点移动到Q'点的过程中，假设云点以水平速度 V_{Δ} 沿卫星飞行方向从C点移动到D点。后视光线本应在Q时刻摄取点C，由于云点的移动使后视光线必须延后到Q'点，即后视光线摄影时刻在Q'点，多经历 d_n 才能摄取到该点，所得高程误差为 σ_m 。如图可满足下式：

$$\frac{\sigma_m}{H - h + \sigma_m} = \frac{V_{\Delta}}{\sqrt{\frac{G \cdot M}{R + H}}} \quad (5)$$

当云点的运行方向与卫星飞行方向相反时，后视光线将在点Q之前的某一时刻摄取到该云点，同理可满足下式：

$$\frac{\sigma_m}{H - h - \sigma_m} = \frac{V_{\bar{z}}}{\sqrt{\frac{G \cdot M}{R + H}}} \quad (6)$$

在不考虑卫星姿态以及轨道误差的情况下,已知上述介绍的两种误差可以用中误差获取测云顶高度的总的误差 σ_h :

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_m^2} \quad (7)$$

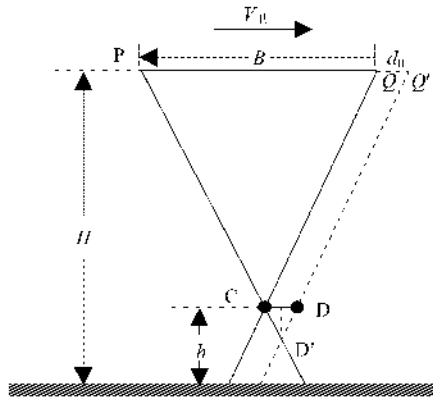


图4 云点移动时带来的误差示意图
Fig.4 Schematic diagram of the error caused by the movement of cloud

3 模拟及分析

取卫星的轨道高度为 800 km,单星单相机两幅式观测模式的最高基高比为 0.3,单星单相机三线阵式观测模式基高比最大为 0.6,单行双相机观测模式可以获得更高的基高比.面阵探测器像元尺寸为 14 μm ,地面分辨率为 125 m.根据上述推导的云顶高度误差,通过模拟卫星参数对几种观测模式下的测高误差进行分析.

3.1 静止云的测高误差分析

在计算静止云的测高误差时,取图像匹配精度为 0.5 个像元.不同观测模式下,不同基高比的测高误差 σ_s 根据式(4)计算,如表 1 所示.从表中可以看出,在对静止云进行测高观测时测高误差与基高比成反比,基高比越大,误差越小.

表 1 不同观测模式下对静止云的测高误差(单位:m)
Table 1 Height measurement error of stationary cloud under different observation modes (unit: m)

观测模式 \ 基高比	0.15	0.3	0.6	0.8
画幅式	408.9	204.5	-	-
三线阵	408.9	204.5	102.3	-
双相机	408.9	204.5	102.3	76.7

3.2 移动云的测高误差分析

由于画幅式观测模式不同于三线阵探测器以及双相机观测模式,在计算移动目标的测高误差时,首先通过两次观测时间差和云速可以计算出云的位移,然后通过航高与镜头焦距计算出此位移所对应的像空间偏移量,这个偏移量可以认为是由于云移动而造成的匹配误差,然后再根据式(4)计算出云的移动对测高误差的影响.三线阵探测器以及双相机观测模式对云移动在测高误差上的影响可通过式(5)、式(6)计算.在不考虑匹配误差的情况下,在不同云速以及不同观测模式下,计算移动云的测高误差如表 2 和表 3 所示.从表中可以看出,在画幅式观测模式下,云测高误差的大小与云的移动速度以及基高比都有关,而在其他两种模式下,测高误差只与云速有关.

表 2 云速为 20 m/s 时,不同观测模式下的测高误差(单位:m)

Table 2 Height measurement error under different observation modes at the cloud velocity of 20m/s (unit: m)

观测模式 \ 基高比	0.15	0.3	0.6	0.8
画幅式	1866.7	933.3	-	-
三线阵	2065.8	2065.8	2065.8	-
双相机	2065.8	2065.8	2065.8	2065.8

表 3 云速为 10 m/s 时,不同观测模式下的测高误差(单位:m)

Table 3 Height measurement error under different observation modes at the cloud velocity of 10m/s (unit: m)

观测模式 \ 基高比	0.15	0.3	0.6	0.8
画幅式	933.3	466.7	-	-
三线阵	1032.9	1032.9	1032.9	-
双相机	1032.9	1032.9	1032.9	1032.9

3.3 云的测高总误差

已知上述两种误差可以用式(7)获取测云顶高度的总误差 σ_h ,如表 4、表 5 所示.

表 4 云速为 20 m/s 时,不同观测模式下的总测高误差(单位:m)

Table 4 Total height measurement error under different observation modes at the cloud velocity of 20m/s (unit: m)

观测模式 \ 基高比	0.15	0.3	0.6	0.8
画幅式	1911	955.4	-	-
三线阵	2105.9	2075.9	2068.3	-
双相机	2105.9	2075.9	2068.3	2067.2

表 5 云速为 10 m/s 时,不同观测模式下的总测高误差(单位:m)

Table 5 Total height measurement error under different observation modes in the cloud velocity of 10m/s (unit: m)

基高比 观测模式	0.15	0.3	0.6	0.8
画幅式	1018.9	466.7	-	-
三线阵	1110.9	1052.9	1038	-
双相机	1110.9	1052.9	1038	1035.7

不同于陆地静止目标立体观测,云是一个运动的目标,由上述仿真模拟结果,可以看出云的运动速度越大,高程误差越大;系统的基高比越大,焦距越长,系统的高程误差越小。

4 其他误差源及分析

在上面的分析中,没有考虑云的垂直运动,并且假设云的移动速度在卫星飞行时间间隔内是一常数。由于在云的发展过程中,不可能没有云的垂直运动,如果在某块区域云有强烈的垂直运动,则会产生更大的高度误差。另外,在匹配的过程中不可能保证匹配范围内总是充满云,因此在云的边界或者云层的不连续也会造成较大的匹配误差。

在极端天气的情况下,中高层云的速度可能达到很大,且云的运动方向不一致,即云存在相对运动,这样就会导致在短时间内云的特征发生变化,从而增加了立体像对匹配的不稳定性,虽然提高基高比理论上可以改善探测云高的误差,但不能盲目的通过提高基高比来减小云顶高测量误差。下面通过模拟数据说明这一观点。

卫星的航高 H ,基高比为 k ,在此时间内,假如相邻云点的平均相对速度为 $V_{\text{相对}}$,地球的质量为 M ,半径为 R ,则两个云点之间的相对位移 $S_{\text{云}}$ 为:

$$S_{\text{云}} = \frac{V_{\text{相对}} H k}{\sqrt{\frac{GM}{R+H}}} \quad (8)$$

假设卫星航高为 800 km,地面分辨率为 125 m,相邻云点的相对速度为 10 m/s,当基高比为 0.3 时,代入上式可得相邻云点之间位移为 320 m,大约为 3 个像素,从式(8)可以看出,云点的相对位移与基高比成正比,当提高基高比时,相邻云点的相对位移成倍增加,从而使云的特征迅速变化,不利于前视影像和后视影像中同名像点的匹配,这样容易导致匹配不稳定,在某些点可能造成较大的误差,从而对云顶的高度观测不具有合理性。

利用卫星对地面进行测绘时,由于地面高程信息大都是固定不变的,所以,可以人工调查选取地面控制点,达到对测高误差进行控制的目的。由于云是动态变化的,不同时间它的高度信息以及移动速度是不同的,所以无法选取控制点。在卫星摄影测量过程中,特别是在无控制条件下,误差估计会遇到许多新问题。由于无地面控制点,星上测定的外方位元素是绝对定向的唯一可以依靠的数据。由于目前科技不断进步,外方位元素中的三个线元素精度较高,能满足无地面控制点的测量要求,但即便是高精度的卫星传感器,测角误差都会达到 2',所以三个角元素的测量误差定会带来测高误差^[3]。

5 结论

针对单星的三种不同的立体观测模式,在不考虑云的相对运动、垂直运动以及卫星姿态、轨道误差的情况下,分别就云是静止的、云是以某一水平速度移动的情况,对云立体测高误差进行仿真模拟,仿真结果表明,总测高误差会随着基高比的增大以及云速的减小而减小。

通过仿真模拟,三种观测模式在不同云速下,画幅式观测模式虽然误差小,但是重叠率必须满足测绘要求,这就要求其必须利用较多的卫星资源来获取大区域的重叠图像信息。虽然在较理想情况下,测高误差随着基高比的增大而减小,但是无限制地提高基高比会给后期的图像匹配带来影响,所以合理的选取基高比非常重要。双相机观测模式相对于三线阵探测器观测模式来说,只是可以采用较大的基高比,但是利用了多个相机加大了卫星重量以及研制难度。三线阵探测器观测模式相对于其他几种观测模式来说,在达到合理基高比的同时,又降低了整机重量以及研制难度,在测云顶高方面有很好的应用前景。

致谢:感谢中科院上海技术物理研究所丁雷研究员和张颀研究员在立体测云方式方面的帮助。

REFERENCES

- [1] Hasler A F. Stereographic observations from geosynchronous satellites; an important new tool for the atmospheric sciences[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1981, **62**(2): 194-212.
- [2] Fujita T T. Principle of stereoscopic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms[J]. *Meteor. Soc. Jpn.*, 1982, **60**: 355-368.

(下转第 374 页)

- retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment and yellow substance in coastal waters [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(12): 2369–2378.
- [7] Doxaran D, Froidefond J M, Castaing P. Remote-sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(15): 2623–2634.
- [8] Binding C E, Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**(3): 373–383.
- [9] Volpe V, Silvestri S, Marani M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(1): 44–54.
- [10] TANG Jun-Wu, WANG Xiao-Mei, SONG Qing-Jun, et al. Statistical inversion models for case II water color elements in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Advances in Marine Science* (唐军武, 王晓梅, 宋庆君, 等. 黄海、东海二类水体水色要素统计反演模式, 海洋科学进展), 2004, **22**(B10): 1–7.
- [11] Jiao H B, Zha Y, Gao J, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Tai, China using in situ hyperspectral data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4267–4276.
- [12] Lee Z P, Carder K L, Robert A A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5755–5772.
- [13] Zhang X, Ito I. Estimating scattering of pure water from density fluctuation of the refractive index[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(3): 1671–1678.
- [14] Doron M, Babin M, Mangin A, et al. Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance[J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, C06003, doi: 10.1029/2006JC004007.
- [15] Le C-F, Li Y M, Zha Y, et al. Validation of a quasi-analytical algorithm for highly turbid eutrophic water of Meiliang Bay in Tai Lake, China[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(8): 2492–2500.
- [16] Wang M H, Son S H, Lawrence W, et al. Retrieval of diffuse attenuation coefficient in the Chesapeake Bay and turbid ocean regions for satellite ocean color applications[J]. *Journal of geophysical research*, 2009, **114**, C10011, doi: 10.1029/2009JC005286.
- [17] Tassan S, Ferrari C M. Variability of light absorption by aquatic particles in the near-infrared spectral region[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(24): 4802–4810.
- [18] Babin M, Stramski D. Variations in the mass-specific absorption coefficient of mineral particles suspended in water[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2004, **49**(3): 756–767.

(上接第 318 页)

- [3] Hasler A F, Morris K R. Hurricane structure and wind fields from stereoscopic and infrared satellite observations and radar data[J]. *Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**(6): 709–727.
- [4] Hasler A F, Strong J, Woodward R H, et al. Automatic analysis of stereoscopic satellite image pairs for determination of cloud-top height and structure[J]. *Appl. Meteorol.*, 1991, **30**(3): 257–281.
- [5] Mack R A, Hasler A F, Adler R F. Thunderstorm cloud-top observations using satellite stereoscopy[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**(10): 1949–1964.
- [6] Bowen R A, Fusco L, Morgan J, et al. Operational production of cloud motion vectors (satellite winds) from Meteosat image data; Use of data from meteorological satellites[R]. ESA No. 143, European Space Agency, 1979, 65–75.
- [7] Szejwach G. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from infrared radiances; Application to METEOSAT[J]. *J. Appl. Meteor.*, 1982, **21**(3): 384–393.
- [8] Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS[J]. *Clim. Appl. Meteor.*, 1983, **22**(3): 377–384.
- [9] Hawkinson J A, Fultz W, Ackerman S A. A comparison of GOES sounder and cloud lidar- and radar-retrieved cloud-top heights[J]. *J. Appl. Meteor.*, 2005, **44**(8): 1234–1242.
- [10] Wang H Q, Lv S H, Zhang Y, et al. Determination of cloud-top height from stereoscopic observation[J]. *Progress in Natural Science*, 2002, **12**(9): 689–694.
- [11] Seiz G. Multiview cloud-top height and wind retrieval with photogrammetric methods; application to meteosat-8 HRV observations[J]. *Clim. Appl. Meteor.*, 2007, **46**(8): 1182–1195.
- [12] WANG Hong-Qing, ZHANG Yan, LIN Yin-Jing, et al. The error analysis of cloud-top height from stereoscopic observation[J]. *Highlights of Sciencepaper Online* (王洪庆, 张焱, 林隐静, 等. 双星立体观测云顶高度几何反演中的误差分析. 中国科技论文在线精品论文), 2008, **1**(13): 1429–1435.
- [13] WANG Ren-Xiang, LI Jing, WANG Xin-Yi, et al. Elevation error estimation of satellite photogrammetric without ground control point[J]. *Science of Surveying and Mapping* (王任享, 李晶, 王新义, 等. 无地面控制点卫星摄影测量高程误差计算. 测绘科学), 2005, **6**(30): 9–11.