

卫星影像的云雾检测及干扰去除

徐逸祥, 朱子豪, 刘英毓

(台湾大学地理环境资源学系, 台北)

摘要: 云雾检测及去除是光学遥感图像处理的难题。厚云雾因具高反射特性, 可通过阈值的设定将其检测并去除; 薄云因混有地物光谱特性而较难检测, 需先对影像做相对辐射校正处理, 再将影像由 RGB 转换成 HIS 彩色模型, 并假设薄云雾的加入等于白色颜料的加入, 即仅改变光谱的亮度或饱和度值, 色相并无改变, 藉此, 可用多时段方式检测。实践证明, 在 HIS 系统中可简化薄云雾的检测准则, 大大提高自动化检测云雾的可能性。

关键词: 卫星影像; 相对辐射校正; 云雾检测及去除; HIS 彩色模型; 影像镶嵌

中图分类号: TP 79 : P 426.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2006)03-0023-06

0 引言

云雾 (cloud and haze) 是光学遥感的最大干扰因素之一。厚云雾对地面光谱信息造成无法补救的破坏; 薄云雾虽未完全遮蔽地面信息, 但仍扭曲原有的地面光谱特征, 严重影响光谱分析、地物分类和制图 (Gao and Li, 2000; Zhang et al., 2002; Han et al., 2004)。根据林务局农林航空测量所经验, 台湾各地适合航照拍摄的天数较少, 北部 50 d/a、中部 70 d/a、南部 50 d/a、东部 20 d/a; 中央大学太空与遥测中心虽然同时接收 SPOT-2、4、5 图像, 但也至少要 2 个月才有无云的影像; 国家太空中心每天接收福卫二号 (Formosat-2) 影像, 但干净无云的影像也要 3 个月才有一张。然而, 灾害监测对遥感影像的需求周期几乎以“天”为单位, 云雾干扰问题如不解决, 即使有大量的影像数据, 也无法满足救灾工作者的需求。

本研究以 SPOT 及福卫二号影像为例, 尝试以经验阈值与区域增长 (region growing) 的方式进行厚云雾检测, 并在 HIS 彩色模型中进行薄云雾检测, 进一步利用相对辐射校正 (relative radiometric normalization) 的方式调整色差并镶嵌, 期望提供影像加值者另一种生产干净无云影像之方法。

1 云雾处理之相关研究

研究证实, 云雾对特定的红外波段有特殊的反

射及吸收特性 (Lavreau, 1991; Gao et al., 2000; Han et al., 2004), 可利用特定红外波段进行检测。但相关研究很少提及云层对地物判释的影响, 且大部分与地面资源调查有关的卫星传感器皆以接收可见光及近红外波段为主。因此, 如何在可见光及近红外波段找出云雾或还原受云雾影响的区域, 成为许多学者研究的焦点。如 Richter (1996) 以 Lavreau (1991) 所提出的缨帽变换 (tasseled cap) 为基础, 后续结合 Zhang, et al. (2002) 提出的 HOT (haze optimized transformation), 发展了云雾消除模块——ATCOR 2 (Atmospheric Correction 2 dimension) 和 ATCOR 3 (Atmospheric Correction 3 dimension), 分别对地形平坦及起伏大的区域进行薄云雾去除。此外, 小波分析 (wavelet analysis) (Du, et al., 2002)、傅立叶变换 (Fourier Transformation)、高通滤波器 (high-pass filtering) 处理云雾 (赖格英等, 2003) 等方法近几年亦有发展。除 RGB 彩色模型外, HIS 彩色模型因能仿真人类对色彩感知的特性, 亦常用于影像中特定物体的判释 (Gonzalez and Woods, 1992; 李丽芬, 1995; Beauchemin and Fung, 1999; 黄星奕等, 2000), 但在云雾检测研究中的应用则较少。本研究利用 HIS 彩色模型与人眼感知色彩概念相近的优点, 探讨其在遥感影像薄云雾检测中的应用。

2 云雾检测

2.1 影像中厚云雾检测方法

当云雾过于浓密时, 不但地面反射的可见光及

近红外光无法穿透,云层亦会反射大量入射的可见光及近红外光,因此,厚云雾遮蔽处呈现白色,藉此,可在单张影像中将可见光及近红外光段反射强度高的区域界定为厚云雾。但由于大气状况及太阳入射角度不同的影响,使同一种地物在不同时间反射的光谱强度不同,不易以影像原始的 DN 值定义出固定阈值。有鉴于此,本研究订定阈值前,将欲处理的影像进行标准差延伸加强(standard deviation stretch enhancement)经处理后,即可定义代表厚云雾的光谱反射阈值。依本人经验,厚云雾区域经影像加强后反射值皆会高于 235,因此,可将高于 235 之区域检测后去除。

厚云雾的区域增长(region growing)检测法是以某一像元为种子(seed),并给定一个阈值,再计算邻近像元与该像元种子的光谱欧氏距离(spectral Euclidean distance),如果光谱欧氏距离在阈值之内,则此邻近像元判定为增长的一部分,即云雾;否则就判定为非云雾,计算如式(1)。

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - e_i)^2} \quad (1)$$

式中 D 为光谱欧氏距离; n 为波段数; i 为某一波段; d_i 为 i 波段中 d 像元的值; e_i 为 i 波段中 e 像元的值。透过经验阈值过滤,可去除大部分厚云,但有时厚云周围仍有小部分较薄之厚云无法去除,且可能也无法以 HIS 去除薄云雾的概念进行处理。故此时可以已检测的厚云为基础,以区域增长方式对邻区较薄的厚云雾进行检测。

2.2 薄云雾的 HIS 彩色模型检测法

经验阈值和区域增长法虽然可以检测厚云,但难以识别薄云。为此,我们引入 HIS 彩色模型检测法。该方法的优点主要有二:第一,亮度分量 I 和影像中的彩色信息是分离的;第二, H 值和 S 值与人眼觉察色彩的方式有关。这些性质对以人眼视觉为基础且具彩色敏感性质的影像处理算法来说,是一个理想工具(Gonzalez and Woods, 1992)。依本研究

的经验,Conrac Corp., Conrac Division. (1980) 所发展的 RGB 与 HIS 转换公式具有较佳的薄云检测结果,公式如下

$$\begin{cases} R = \frac{M - r}{M - m} \\ G = \frac{M - g}{M - m} \\ B = \frac{M - b}{M - m} \end{cases} \quad (2)$$

式中 r, g, b 分别代表一个像元中红、绿、蓝 3 个 DN 值标准化后的值,在 0 到 1 的范围内; M 是 r, g, b 三个值中的最大值; m 是 r, g, b 三个值中的最小值。由此可代入式(3)~(5),将 I, H 及 S 值分别计算出来。

$$I = \frac{M + m}{2} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} &\text{若 } I \leq 0.5, S = \frac{M - m}{M + m} \\ &\text{若 } I > 0.5, S = \frac{M - m}{2 - M - m} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} &\text{若 } M = m, \text{ 则 } H = 0 \\ &\text{若 } R = M, \text{ 则 } H = 60(2 + b - g) \\ &\text{若 } G = M, \text{ 则 } H = 60(4 + r - b) \\ &\text{若 } B = M, \text{ 则 } H = 60(6 + g - r) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

薄云雾并非完全遮蔽地物的光谱信息,因此容易被判释为地物,但在 HIS 模型下,对薄云雾处理有很大的辅助作用。由于薄云并未完全遮蔽地物信息,使人在色彩感知上有“掺入白色”的概念,故可假设薄云会造成原本地物 HIS 模型中的 S 值降低、 I 值提高、 H 值则变化不大,若 H 值有明显变化,则表示是受地物变迁或是厚云雾覆盖影响。因此,本研究采用多时段检测方式,以一张完全无云雾影像做为基准,对另一张受薄云雾影响的影像进行处理。根据本研究经验,若有云雾影像与无云雾影像的 H 值之差小于 15 或是大于 345,而 S 值比无云雾影像低但 I 值比无云雾影像高之区域,即表示其受薄云雾影响。薄云雾检测流程如图 1 所示。

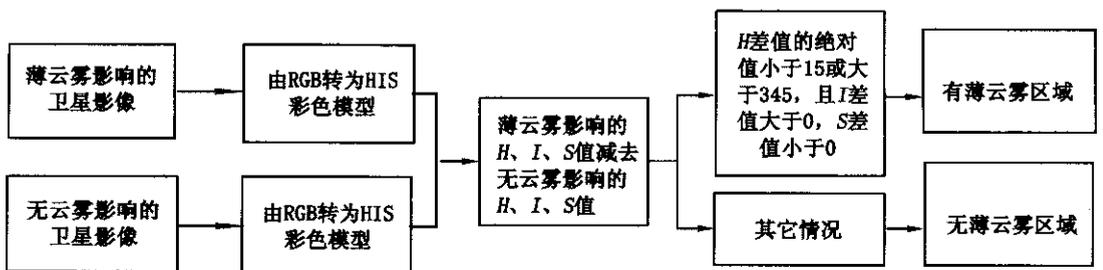


图 1 薄云雾检测流程

对于云雾检测结果,前人文献仅以可视化的方式对检测结果的优劣进行文字叙述,未提出量化指标来检测检测精度。鉴于此,本研究以“专家法”进行检测精度评估。首先,将肉眼可见的薄云雾数字化,再寻求 3 位专家编修本研究的数字化结果。3 位专家在 2 倍标准差延伸加强 (standard deviation stretch enhancement) 及无延伸加强 (no stretch enhancement) 两种模式下进行薄云雾判释及数字化,最后取 3 者圈选结果的交集作为本研究的地真资料。

2.3 薄云雾检测中的相对辐射校正

引用相对辐射校正,是为解决薄云雾检测时,不同时期影像间因太阳入射强度或大气状况不同而产生的影像亮度差异,一般常利用某些地物不易随时间改变性质(物体反射率)的特性,来做不同时期的辐射校正(何佩艳,2003),此种地物即为拟似非变异地物(pseudo invariant feature)。在所有地物中,人工地物或裸露地相对于其它自然地物而言,性质不易改变,因此可视为拟似非变异地物。本研究以 Schott et al. (1988) 的方法,建立无云雾及有云雾影像的辐射校正公式,即

$$DC_{hi} = a + b \times DC_{ci} \quad (6)$$

式(6)可视为一回归方程, a 、 b 分别为回归参数中的截距及斜率。本研究引用 Olsson (1993) 之方法,以最小平方解算 a 、 b 。

将无云雾影像的 DN 值 X 逐一代入式(7),即可得到校正后的影像 DN 值 \hat{Y} 。

$$\hat{Y} = a + bX \quad (7)$$

由于研究区地物种类复杂,且影像中包含云雾覆盖的区域,不易以自动化方式选取样本,故较适合以人工方式进行两时期影像的样本筛选(何佩艳,2003)。但本研究发现,传统常用的线性回归方式,同一种回归式不一定适用于不同种类的地物,因此,本研究改进前人的回归方式,依不同地物种类决定不同的相对辐射校正公式(本研究简称此改进方式为“分类线性回归”)。

首先,把两时期影像中本研究及 3 位专家皆认为无云雾的区域取出,依取出的区域取两张影像交集,再将交集范围内地物以非监督分类分为 7 个种类,并比较两张分类后影像中相对应的地物类别,最后,取相对应类别的交集区域,以所有交集区域的 DN 值产生回归系数,依此 7 种地物之回归系数,对整张无云雾影像进行相对辐射校正。

为了与前人的辐射校正方式进行对比,本研究以 $RMSE$ 值检测有云雾及无云雾两张影像之间 DN

值的差异程度,表 1 为两种线性回归方式的比较。

表 1 两种辐射校正方式下的 $RMSE$ 值比较

测试区	波段	纠正前 $RMSE$	纠正后 $RMSE$	
			传统线性回归	分类线性回归
厚云雾测试区	绿	8.697	7.245	5.882
	红	15.942	9.763	4.173
	近红外	21.874	17.243	9.128
薄云雾测试区 (林地及海洋区)	绿	41.317	18.024	10.118
	红	81.312	16.253	9.943
	近红外	52.805	17.424	13.742
薄云雾测试区 (农业区)	蓝	4.749	4.905	3.951
	绿	6.148	5.591	4.364
	红	5.532	4.419	4.154
	近红外	17.266	10.927	11.536

3 研究结果与讨论

本研究以台北县石碇乡新店溪上游 SPOT 卫星影像作为厚云雾检测及影像镶嵌测试影像(图 2)。

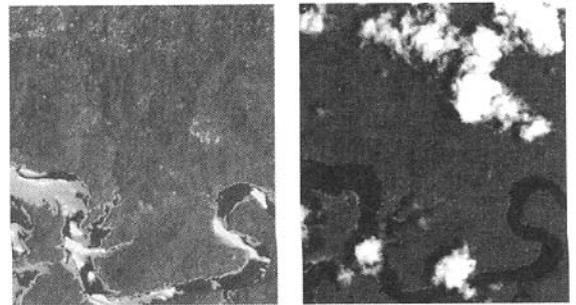


图 2 厚云雾测试 SPOT 影像
(左:1999 年 3 月 7 日无云雾影像;
右:1999 年 3 月 20 日有云雾影像)

薄云雾则以多时段数据进行检测,本研究选取两组地物组成不同的区域作为测试数据:一为位于台北县贡寮乡,较均质且变迁少的林地及海洋区(图 3);另一为位于云林县仑背乡,地物复杂且变迁快速的

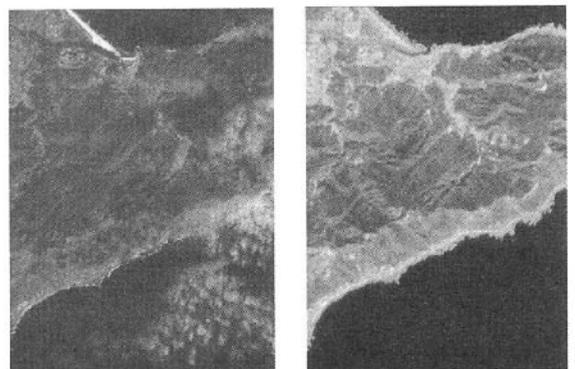


图 3 薄云雾测试 SPOT 影像
(左:1999 年 2 月 10 日有云雾影像;
右:1998 年 11 月 13 日无云雾影像)

农业区(图4)。每组测试数据包含无云雾及有云雾两种影像,所有影像皆已做过大气校正及正射校正。对于3个测试区,本研究以整体精度(overall accuracy)、使用者精度(user's accuracy)、生产者精度(producer's accuracy)和kappa值等指标进行检测结果评估,并探讨发生错误的原因。



图4 薄云雾测试之福卫二号影像
(左:2004年9月29日有云雾影像;
右:2004年10月12日无云雾影像)

3.1 厚云雾测试区

本研究以经验阈值及区域增长的方式对厚云雾进行检测及去除,结果如图5(左)所示。可见,影像中连续厚实的厚云雾处理结果很理想,但仍有少数零星的厚云雾无法去除。

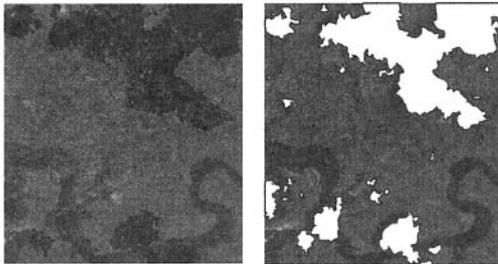


图5 厚云雾处理结果与专家判释结果之比较
(左:云雾处理结果;右:专家判释交集)

3位专家判释云雾的交集如图5(右)所示,以此结果为地真资料,并由向量式数据转为与SPOT卫星影像相同的12.5 km网格格式数据,再与自动检测结果做误差矩阵分析(表2)。

表2 厚云雾判释结果误差矩阵分析(单位:像元)

检测结果	地 真 资 料		总数	使用者精度/%
	厚云雾	无云雾		
厚云雾	20 388	31	20 419	99.85
无云雾	2 983	79 618	82 601	96.39
总数	23 371	79 649	103 020	
生产者精度/%	87.24	99.96		97.07

不同时期影像的相对辐射校正除能解决变迁检测的问题外,亦能应用于影像镶嵌,将辐射校正后的无云雾影像及去除厚云雾后的影像进行影像镶嵌,

其结果如图6(右)所示。相比之下,图6(左)中圈选之范围因未经辐射校正,其镶嵌结果在颜色上明显与另一张影像呈现不协调的现象,而图6(右)在视觉上则看不出有镶嵌痕迹(以二倍标准差延伸之方法展示)。

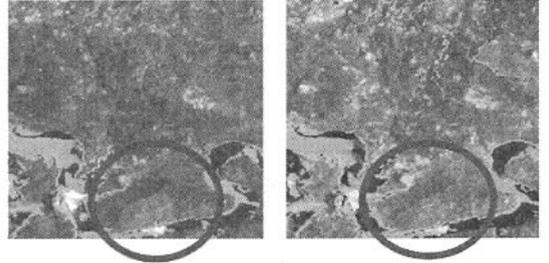


图6 相对辐射校正前后可视化镶嵌结果比较
(左:校正前镶嵌;右:校正后镶嵌)

3.2 薄云雾测试区

3.2.1 林地及海洋区

将两时期影像做相对辐射校正,并以Conrac Corp.的公式进行RGB及HIS转换,找出有云雾影像的H值与无云雾影像相差小于15或大于345,而S值比无云雾影像低但I值比无云雾影像高的区域,以此区域代表薄云雾检测结果,如图7(左)所示。

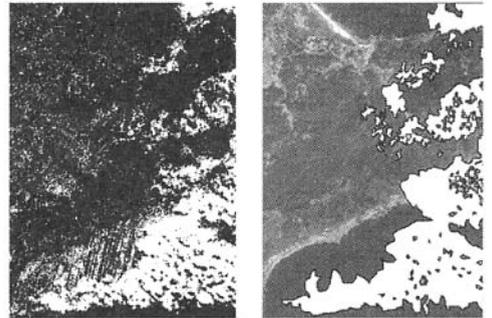


图7 薄云雾检测与专家判释比较
(左:检测结果,白色部分为检测有云区域,黑色部分为检测无云区域;右:专家判释交集)

将3位专家判释为薄云雾(厚云雾除外)的交集作为地真资料,如图7(右)所示,以此交集结果由向量式数据转为与SPOT卫星影像相同之12.5 km网格格式数据,与图7(左)之检测结果进行逐个像元比较得到表3。

表3 林地及海洋区薄云雾判释结果误差矩阵(单位:像元)

检测结果	地 真 资 料		总数	使用者精度/%
	薄云雾	无云雾		
薄云雾	58 392	27 847	86 239	67.61
无云雾	29 230	2 000 637	229 867	87.28
总数	87 622	228 484	316 106	
生产者精度/%	66.64	87.81		81.94

从整体结果来看,Conrac Corp. 的转换方式整体精度为 81.94% $kappa = 0.547$ 。从细部检视,无论在海面或是陆地,在检测结果中皆会看到许多被判为薄云的细小孤立像元,且这些像元大部分都为误判发生之处。

3.2.2 农业区

采用与 3.2.1 相同的方法对农业耕作区进行检测,结果如图 8(左)所示。

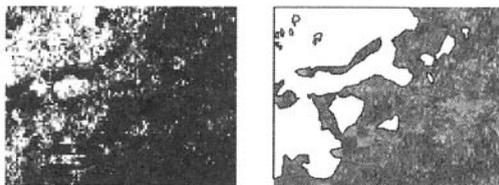


图 8 薄云雾检测与专家判释比较
(左:云雾处理结果,白色部分为检测有云区域,黑色部分为检测无云区域;右:专家判释交集)

将图 8(右)专家判释交集由向量式数据转为与福卫二号影像相同之 8 km 网格式数据,与图 8(左)之检测结果进行逐个像元比较,得到表 4。

表 4 农业区薄云雾判释结果误差矩阵 (单位:像元)

检测结果	地 真 资 料		总数	使用者精度/%
	薄云雾	无云雾		
薄云雾	148 947	21 154	170 101	87.56
无云雾	137 185	521 221	658 406	79.16
总数	286 132	542 375	828 507	
生产者精度/%	52.06	96.10		80.89

从整体结果来看,Conrac Corp. 的转换方式整体精度为 80.89% $kappa = 0.533$ 。虽然农业区之整体精度与林地及海洋区没有明显差异,但云雾漏判(error of omission)比例高达 47.94%,表示接近一半的薄云雾没有被检测出来。从细部检视,大部分云雾漏判区域皆发生在两时期前后地物发生变化之处,显示以多时段方式进行薄云雾检测在农业区内效果有限。

另外,在此区右半部的检测结果中,可看到许多被判为薄云的细小孤立像元,检视原始影像可知这些细小单元多发生在高反射的地物上(如建筑物)。就本研究及专家们的经验,与较低反射的地物相比,肉眼较不易辨认高反射地物上是否有薄云雾存在,而 HIS 为模拟人类判释的彩色模型,因此表示 HIS 模型和人眼一样,不易判别高反射地物上薄云雾的有无。 万方数据

4 结论与建议

在薄云雾影响下,影像 HIS 彩色模式中的 H 值改变不大,而 I 值将被提高, S 值则被降低。因此,可先将影像进行相对辐射校正,再以多时段变迁检测方式识别影像中的云雾影响部分。在研究过程中,我们亦发现一些值得后续探讨之处:

(1)本研究目前尚无法自动检测出厚云雾的阴影,但若同样以欧氏距离与区域增长的概念,可先以人工方式寻找阴影中心,以其中中心为种子,设定适合的欧氏距离阈值,亦可找出厚云雾云影。

(2)以多时期数据检测薄云雾的方法及概念虽然简易,但需解决两时期影像辐射校正之问题。解决此问题后,如何定义地物“变异”与“不变异”,亦是一难题。研究中以两张影像之 H 值相差的绝对值是否小于 15 或大于 345 来决定地物变异与否,即表示两时期影像可能发生的细微变化,如大气状况、太阳入射角度、地物含水量,甚至是相对辐射校正不佳等影响因素。不过,阈值的订定仅为本研究中多次试误(try and error)的结果,无其它文献佐证。因此,后续可研究单张影像检测的可行性,虽然以单张影像进行检测需较多的统计信息及空间度量,但可避免上述多时期影像中变异定义的问题。

(3)地物被阴影覆盖可视为影像 I 值降低但 H 值不变,故或许经由 I 值的调整来处理云影。但云影在光谱上会与水体相混,因此,若在一定投影区中有阴影反射,则可以透过云及阴影的空间关连性,增加判释的正确率。

参考文献

[1] 李丽芬. HIS 色彩空间影像应用于分类之研究[D]. 新竹:交通大学,1995.
 [2] 何佩艳. 辐射同态化对 SPOT 卫星影像用于变迁检测影响之研究——以合欢山地区为例[D]. 台中:中兴大学,2003.
 [3] Gonzalez R C, Woods R E. 数字影像处理(Digital Image Processing I M]. 吴成柯,戴善荣,程湘君,译. 台北:儒林图书有限公司,1993.
 [4] Canty M J, Nielsen A A, Schmidt M. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91:441-451.
 [5] Conrac Corp, Conrac Division. Raster Graphics Handbook[M]. California: Conrac Corp., 1980.
 [6] Elvidge C D, Yuan D, Weerackoon R D, et al. Relative radiometric normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) data using an automatic scattergram controlled regression[J]. PE&RS,

1995 ,61(10) :1255 – 1260.

[7] Gao B C , Li R R. Quantitative improvement in the estimates of NDVI values from remotely sensed data by correcting thin cirrus scattering effect[J]. Remote Sensing of Environment , 2000 , 74 : 494 – 502.

[8] Hall F G , Strebel D E , Nickeson J E , et al. Radiometric rectification : Toward a common radiometric response among multitemporal , multisensor images[J]. Remote Sensing of Environment , 1991 , 35 : 11 – 27.

[9] Han K S , Champeaux J L , Roujean J L. A land cover classification product over France at 1 km resolution using SPOT4/VEGETATION data[J]. Remote Sensing of Environment , 2004 , 92 : 52 – 66.

[10] Lavreau J. De – hazing Landsat Thematic Mapper images[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , 1991 , 57 (10) : 1297 – 1302.

[11] Olsson H. Regression functions for multitemporal relative calibration of thematic mapper data over boreal forest[J]. Remote Sensing of Environment , 1993 , 46 : 89 – 102.

[12] Richter R. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region[J]. Computers & Geosciences , 1996 , 22(6) : 675 – 681.

[13] Schott J R , Salvaggio C , Volchok W J. Radiometric scene normalization using pseudo invariant feature[J]. Remote Sensing of Environment , 1988 , 26 : 1 – 16.

[14] Ya 'allah S M , Saradjian M R. Automatic normalization of satellite images using unchanged pixels within urban areas[J]. Information Fusion , 2005 , 6 : 235 – 241.

[15] Zhang Y , Guindon B , Cihlar J. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images[J]. Remote Sensing of Environment , 2002 , 82 : 173 – 187.

DEVELOPING TECHNIQUE FOR THE DETECTION AND REMOVAL OF CLOUD AND HAZE IN SATELLITE IMAGES

XU Yi – xiang , ZHU Zi – hao , LIU Ying – yu

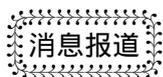
(Department of Geography , National Taiwan University , Taipei , China)

Abstract : Detection and removal of cloud and haze are arduous problems in optical remote sensing imagery processing. Thick cloud and haze have the character of high reflection , so we can set the threshold to detect and remove the areas having extremely high reflection and even mosaic the images with near dates ' ones to create clear and cloudless images. Relatively , areas covered by thin cloud and haze have the spectral characteristics of both surface features and cloud and haze , thus making it difficult to separate them. Consequently , the authors first processed the images with relative radiometric normalization and then transformed the images from the RGB to the HIS color model. The assumption was that the interference of thin cloud and haze , similar to mixing a color pigment with white , would increase the color intensity and decrease the saturation of an image but would not change its hue value. Guided by this assumption , the authors processed the multi – temporal images and isolated areas contaminated by thin cloud and haze. The results suggest that it is possible for an automatic method based on the HIS color model to detect thin cloud and haze on satellite images.

Key words : Satellite images ; Relative radiometric normalization ; Detection and removal of cloud and haze ; HIS color model ; Images mosaic

第一作者简介:徐逸祥(1981 –)男,台湾大学地理环境资源学系硕士班研究生,主要从事遥感、地理信息系统等方面的研究,现为台湾大学理学院空间信息研究中心兼任助理。

(责任编辑 :刁淑娟)



我国明年将要发射三颗灾害监测卫星

我国计划在 2007 年发射 3 颗环境与灾害监测预报小卫星,将帮助实现我国及周边国家自然灾害的全天候、全天时、动态监测能力。