

# 不同遥感影像大气纠正算法在农作物种植面积提取中的对比

王妮<sup>1</sup>, 江南<sup>2</sup>, 吕恒<sup>2</sup>, 彭世揆<sup>1</sup>

(1.南京林业大学,江苏南京 210037;2.南京师范大学,江苏南京 210046)

**摘要:**以海安县的 LANDSAT5—TM 影像为研究对象,用于农作物种植面积遥感提取,但由于大气辐射使卫星遥感数据引起畸变从而影响提取精度,为消除该影响,采用黑暗像元减法(DOS)、大气辐射传输模型法 FLAASH、ATCOR2、6S 等四种大气校正方法进行大气校正并对各种方法进行验证比较,从综合方面考虑得出最优大气校正方法。利用 40 个主要农作物的样本点的 NDVI 值与经过大气校正 MODIS 地表反射率的 NDVI 值比较,同时利用农作物的反射率值与标准值进行比较对比,以及结合各类主要农作物分类结果精度进行验证。实验结果表明,大气校正在一定程度上提高了农作物真实地表反射率,使得农作物的反射率更加精确,分类精度较原图像也有较大提高,因此提高了主要农作物各类面积提取的精度,综合计算效率和效果等指标得出在面向农作物面积遥感提取的大气方法中,采取 FLAASH 方法可以达到较好的效果。

**关键词:**大气校正;TM 影像;农作物的反射率值;最大似然法分类

中图分类号:S127 文献标识码:A 10.3969/j.issn.1007-0907.2011.04.038 文章编号:1007-0907(2011)04-0070-05

## The Methods of the Atmospheric Correction Based on the Crop Area Estimating

WANG Ni

(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstracts:**This paper takes Landsat-TM remote sensing imagery about Haian county as the research object.It corrects the TM remote sensing image by four atmospheric correction methods such as the dark-object subtracting method (DOS) and the methods based on atmospheric radiant transfer models such as FLAASH, ATCOR2,6S.It is hoped to find the best methods of atmospheric correction,which is evaluated from every all-around part such as the efficiency and the precision. First of all, TM is used to operate radiance calibration which transforms a DN value of one pixel to its reflectance value. Secondly, it inputs the reflectance values to FLAASH module for getting the image which composed with the real earth reflectance values. The ATCOR2 and 6S have the same flow. They all need to know the locations of objects, the type and the parameters of sensor, the atmospheric parameters and aerosol values and so on. At the same time, the DOS method only depends on DN values of the TM data. Finally, it is the importance of the research to validate the four methods. And using the classification precisions of the Maximum Likely Classification method, they are compared with TM original classification image, which is the best atmospheric correction method with the highest total precision and Kappa coefficient. Through the atmospheric corrections on a certain extent, it receives the realized earth reflectivity and improves the accuracy of the reflection values about rice in advancing the accuracy of crops estimating area. The result showed that, both ATCOR2 and the FLAASH atmospheric correction are good, and both have the large scale enhancement to the recognition precision about crops. But ATCOR2 has a very long computation process, also the efficiency is not high, in which many experience patterns. The counting efficiency of FLAASH is high, and the reflection value about rice equals to the experimental true value basically. Moreover it has the very big help to improve the precision of recognizing crops area. Therefore the FLAASH atmosphere adjustment method can achieve the best effect regarding the crops area extraction. Summarizing some standards like calculated efficiency and results, the FLAASH atmospheric correction methods win better impacts.

**Key words:**Atmospheric Correction;TM Remote Sensing Imagery;Reflection values about rice;MLC

在农作物定量估测研究中,需要利用可见光及近红外波段数据定量地计算卫星植被指数并比较其随时间和空间的变化规律,建立各种农学参数与卫星植被指数的定量关系直至对产量进行定量预报。同时,通过研究农作物面积提取结果,与空间分布的农作物单产数据共同作用于农作物的估计产量,因此植被

指数对农作物面积提取和作物长势有着至关重要的作用。卫星植被指数不但受地表状况的影响,还与卫星过境时的大气状况有极其密切的关系,尤其是归一化植被指数对大气的变化非常敏感,如不进行校正,误差有时可达到 50%以上。

大气校正的目的是消除地物光学信息在传输过程中由于大

收稿日期:2011-06-18

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX09B\_188Z);国家高技术研究发展专项经费资助(2006AA120101)

作者简介:王妮(1984-),女,山东烟台人,南京林业大学博士研究生,主要研究方向为遥感与地理信息系统。

通讯作者:江南(1957-),男,江苏南京人,教授,博士生导师,研究方向为遥感机理与应用研究。

气条件引起的辐射失真。这些辐射失真主要是由于地面目标物和传感器之间有大气层的存在,且其中存在着大量的水汽、二氧化碳、灰尘和烟尘等微小粒子,主要表现为:太阳的辐射穿过地球表面的大气层时被大气吸收和散射;地面的波辐射也要被大气吸收和散射而产生信号的衰减。

因此,减弱了传感器接收的信号,使图像清晰度、对比度均下降,同时反射率、辐射亮度等相关物理量都会出现偏差,所以必须进行大气校正还原目标物的真实反射率。大气辐射校正的目的是将卫星遥感数据转换为地物真实信息的表观反射率,便于更有效地利用遥感数据。

本文研究针对主要粮食作物种植面积遥感测量的大气校正技术,利用现有的 6S 模型、MODTRAN 模型相结合,选择适合主要粮食作物种植面积遥感测量的大气校正模型,以达到更准确获取遥感测量主要粮食作物种植面积的要求。以 Landsat-TM5 卫星遥感影像为研究目标,分别采用黑暗像元减法(DOS)、大气辐射传输模型法 FLAASH、ATCOR2、6S 等四种大气校正方法进行遥感影像的大气校正,并对各种方法进行各类作物种植面积提取精度的验证比较。针对部分气象数据缺失,采用了 MODIS 气溶胶产品现有数据根据大气传输辐射模型和经验模型计算相应数据,为水稻种植面积提取提供了数据支持。

## 1 研究数据

海安县的 LANDSAT5 的 TM 影像,获取时间为 2008 年 5 月 2 日 02:19:13(格林威治时间)。空间分辨率为 30m,中心坐标分别为 120°18'53"E,32°16'50"N。Landsat5 卫星离地面高度 H 为 705km。TM 影像的太阳方位角为 122°,太阳天顶角为 28°,卫星天顶角为 63°,传感器的观测角为 45°。

该地区的 2008 年 5 月 3 日 11:03:29 获取的 MODIS 的 8d 气溶胶产品。本研究在 HDFview2.5 软件下根据公式(1),获取研究区域的实际光学厚度值 AOT'。

$$AOT' = SF \cdot (ATO - OFFSET) \quad (1)$$

式(1)中,AOT 为产品中显示的数值,SF 为单位量纲,产品中定义该值为 0.001,OFFSET 为产品增益值,起到校正数值作用,产品中定义为 0。根据研究区域的经纬度,计算得到该区域当天 550nm 气溶胶厚度为 0.716。

在研究区中定义了 40 个样本点,这些样本点均为当地主要农作物。另外,利用遥感数据抽样与实地调查相结合,得到的 32 个样本地块类型,作为分类数据验证样本。

## 2 本研究采用的大气校正方法

大气校正的方法很多,大气校正的理论方法可以是根据标准的大气模式或地面实测资料,也可以是根据影像本身进行反演的结果,本研究就已知大气参数的大气校正方法和未知大气参数的大气校正方法展开研究。基于大气辐射传输模型(6S 模型、MODTRAN4 模型等)是校正精度最高的方法,利用提供大量的参数文件查找表,把全球气溶胶划分为若干类型,每种类型的大气参数由观测者通过气象数据获得。气溶胶浓度主要指气溶胶的光学厚度。但由于大气辐射传输模型需要繁杂的大气参数,而这些大气参数无法获取的情况下,有人提出基于图像本身的方法,通过图像本身所获得的信息来纠正大气所带来误差,常用

的方法为 DOS 模型法(黑暗像元减法),也就是利用真实反射率应该为 0 的地物的表观反射率来推算出程辐射的值,进而通过减去程辐射求得真实地表反射率来进行大气校正的一种方法,该方法模型算法简单快速,大气数据信息量要求不高,也符合大气辐射传输模型原理,保证一定的精度。

### 2.1 已知大气参数的大气校正方法

假如天空辐照度各向同性和地面朗伯面反射,且天空晴朗无云,忽略大气的折射、湍流和偏振,则地物表观反射辐射亮度  $L_{\lambda}$  是太阳辐照度  $E_s$  和表面反射率  $R_{\lambda}$  的函数:

$$L_{\lambda} = \frac{R_{\lambda}[E_0(\lambda) \cdot \cos\theta_z e^{-\tau_{\text{atm}}(\lambda)} + E_{\text{cb}}]}{\pi} \quad (2)$$

首先把图像灰度值转换成具有辐射意义的亮度值,即为辐射定标,Landsat 卫星自带了定标系统,能够提供精度较高的绝对辐射定标系数,将原卫星遥感图像的 DN 值转换为辐射值,校正由于传感器灵敏度下降引起的图像畸变,提高信息量化的精度,因此从 Landsat5 数据的头文件中的定标系数以及定标增益建立的公式中计算出陆地目标的定标系数。采用具体公式为:

$$L_{\lambda} = \left[ \frac{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}{255} \right] \cdot DN + L_{\text{min}} \quad (3)$$

式中: $\lambda$  为波段值; $L_{\lambda}$  为像元在传感器处的光谱辐射值; $L_{\text{min}}$  为 DN 值为 0 时的光谱辐射亮度值, $L_{\text{max}}$  为产生最大 DN 值(此处是 255)所需的最小辐射亮度。

假设天空辐照度各向同性且地面是朗伯体反射,则大气顶层表观反射率是表面反射率和大气反射率的总和,因此可以与公式(3)相结合进行计算得到表观反射率值  $p^*$ ,具体公式为:

$$p^* = \frac{\pi L_{\lambda}}{E_0(\lambda) \cdot \cos\theta_z \cdot w_i(\lambda)} \quad (4)$$

式中, $L_{\lambda}$  为波段平均单位光谱辐射亮度, $E_0(\lambda)$  为大气层外相应波长的太阳光谱辐照度, $w_i(\lambda)$  为各波段的波段宽度。 $E_0(\lambda)$  和  $w_i(\lambda)$  是 Landsat5 TM 的固定参数。

本研究采用比较广泛使用的三种方法:FLAASH、6S、ATCOR2。大气校正研究过程中,即使气象数据可以获取,但当天的卫星垂直能见度很难获得。运用 6S 模式提供的通过气象能见度可以计算气溶胶光学厚度,按照标准气溶胶廓线算气溶胶光学厚度值,因此通过气溶胶粒子密度(粒子数/cm<sup>3</sup>)的垂直分布计算  $\lambda=550$  nm 的气溶胶消光横截面积和气溶胶光学厚度,来代替能见度,解决能见度缺失的情况。

NASA 的 MODIS 气溶胶光学厚度算法中,首先为了获得较高的信噪比,将 250m 和 500m 的晴空卫星资料合成为 1 km 分辨率的资料,通过近红外通道的观测在暗背景地区得到蓝光 0.47 $\mu$ m 和红光 0.66 $\mu$ m 通道地表反射率。在 10km $\times$ 10 km 的像素点中选择出具有较低地表反射率的像素点进行反演并取平均。在气溶胶模型的选取上,为大陆型气溶胶进行反演。对于非沙尘型气溶胶,采用按地域来确定气溶胶模式的方法。在中国大陆的东部和南部,在非沙尘情况下,取为工业城市型气溶胶。最后按照两个通道的光学厚度,可进一步确定 550 nm 的光学厚度。NASA 利用上述方法每天业务地反演了 Level 2 的全球气溶胶光学厚度产品,该产品主要是为适应全球气候变化研究的目的,10km $\times$ 10 km 分辨率已经基本满足这一需要。如需要更精确

的地面气溶胶浓度,则可以对气溶胶进行反演,并进一步计算可见光和近红外地表反射率的比值分布。

## 2.2 未知大气参数的大气校正方法

如只有卫星影像,由卫星传感器接收到的光谱辐亮度  $L_{\lambda}$ ,在不考虑大气散射和吸收的情况下,应该是经过大气衰减后的地面辐亮度和大气本身的程辐射  $L_p$  之和。如下所示:

$$L_{\lambda} = L_{\lambda} \cdot e^{-\tau_{\text{atm}}(\lambda)} + L_p \quad (5)$$

对于 TM 图像来说,  $\theta_v = \pi/2 = 45^\circ$ 。所以要求得表观反射率,必须先求出程辐射,而程辐射的值则有不同的方法进行确定,主要是由于 DOS 模型中暗值像元的确定方法不同,本研究的方法如下:

将已进行辐射定标的 TM 影像数据进行统计分析, DOS 模型的关键是程辐射的求解。由 DOS 模型理论,程辐射由图像直

方图下限值决定。直方图由非零 DN 值开始,逐渐随像元个数增高。该直方图的下限值被假定为该光谱段向上程辐射量与暗体反射辐射量之和。因此,程辐射为暗体目标(水体、阴影等)辐射亮度减去暗体表面反射的贡献,又因为暗体目标本身辐射亮度为 0,故暗体表面反射率即为程辐射值。

在利用 DOS 方法时,应根据实际情况而定。从影像判断出最低 DN 值的地物类型,由于水体可能存在污染,因此考虑在研究区内也许有阴影存在,需要对选择的直方图下限值与图像中的水体的象元值相比较,以确定该下限值是否可能为水体所致。各个波段最低反射率值见表 1。

因此,如果没有大气散射的影响,每一波段的最小值可以认为是该波段的大气散射分量,采取各波段分别减去各自最小分量完成大气散射的消除。从表 1 看出,主要农作物植被区阴

表 1 TM 各个波段的最低反射率

波长( $\mu\text{m}$ )	0.43~0.52	0.53~0.61	0.63~0.69	0.78~0.9	1.55~1.75	2.09~2.35
最低 DN 值	66	33	7	24	8	0
对应地物	植被	植被	植被	水田/水塘	建筑物阴影	-
最低反射率	0.089395	0.087691	0.014059	0.066501	0.009624	0

影(植被区域低反射率值直方图来确定)可以设定为暗像元。根据实地农作物样地调查,该区域为水稻种植区,其中低反射率值是由太阳辐射后水稻阴影所造成的,5 月份正值水稻出苗期和小麦收获期,水体资源丰富,水稻种植后水体所反映出阴影区如图 1 所示。



注:图中显示的是海安地区 TM 影像(4,3,2 波段显示),右下角放大区域是农作物植被区域(红色为植被),黄色框选出的像元的反射率为 0.08824,为植被区暗像元

图 1 主要农作物植被区阴影像元

根据程辐射的最低值得各波段的最低反射率即程辐射反射率  $R_p$ ,进而得到程辐射  $L_p$ 。则去除程辐射的 DOS 模型大气校正方法的公式为:

$$R_{\rho} = \rho^* - R_p \quad (6)$$

式中,等式左边参数是经过 DOS 法得到的真实像元反射率值。

## 3 结果分析与方法验证

通过 FLAASH、DOS、6S、ATCOR2 大气校正方法得到的结果图像(图 2~6,以 TM 的 432 波段显示),较原 TM 影像清晰度都有了明显的提高,利于目视解译,量化指标如图 7。

### 3.1 根据归一化植被指数以及地面真实反射率判定

NDVI 值是由卫星影像的红光和近红外光谱值计算得到的,大气对影像的影响主要是对可见光的影响,程辐射作用使地表辐亮度值偏高,如忽略大气吸收的作用,则进行大气校正后的



图 2 TM 原图像

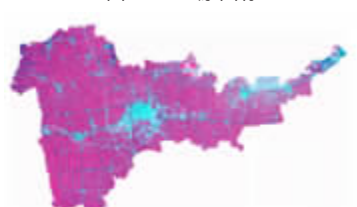


图 3 FLAASH 校正后的图像

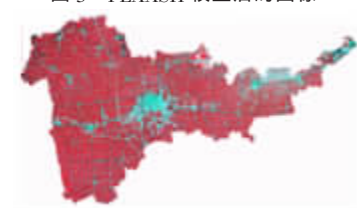


图 4 ATCOR2 校正后的图像

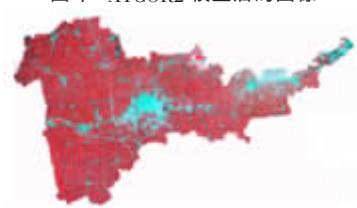


图 5 DOS 校正后图像

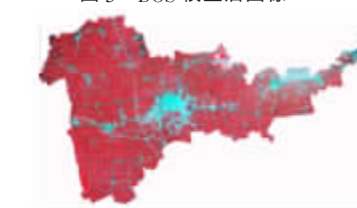


图 6 6S 校正后的图像



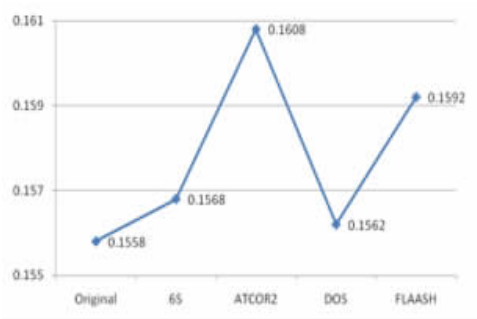


图7 图像清晰度比较曲线

NDVI 值会明显有所提高,因此本研究通过各结果的 NDVI 值与大气校正前的 NDVI 值进行比较来评价校正效果,并计算 MODIS 反射率产品数据与各种大气校正结果的相关性。

鉴于 250mMODIS 反射率产品与 250m×250m 范围内的 TM 大气校正反射率平均值结果具有相关性,相关系数达到 0.923 (置信度为 95%),因此通过将 40 个样本点在原图、FLAASH、ATCOR2、DOS、6S 方法校正后的反射率影像的反射率值以及 250mMODIS 的反射率产品的对应值进行比较,假设 MODIS 反射率值为真值来验证方法。因为 MODIS 与 TM 影像的分辨率差异过大,250m 的影像上一个像元相当于 30m 影像上的 9 个像元,也就是 TM 图像上 9 个像元的平均地表真实反射率作为 MODIS 上的比较值。

将各种大气校正结果与原始值以及假设标准值进行比较,如图 8。

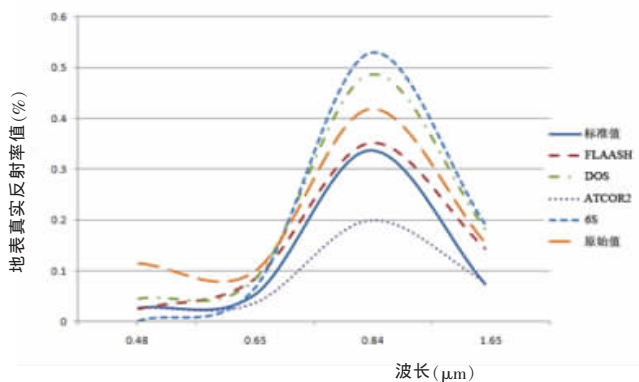


图8 各种大气校正方法比较

MODIS 反射率产品的反射率值作为标准农作物的反射率值,从图 6 可以看出,四种方法的反射率值与标准值相比均有所改善,但 FLAASH 的效果最好,DOS 与 6S 方法出现了过校正的现象。

### 3.2 根据分类精度的提高

农业测量的精确度和农作物面积的提取精度的关键是看农作物分类识别的精度,因此本研究利用对各大气校正后结果图像进行有监分类,看是否提高了分类精度,这样才能对基于农作物面积提取的大气校正方法进行选择。分类方法采用了应用最为广泛的极大似然法,为了只说明大气校正对农作物面积提取的效果,故对各个结果图像无任何其它干扰操作。样本数据为地面抽样调查农作物数据,包含样本地块 32 个,分类后比较农作

物分类精度。分类后的结果图像如图 9~13 (绿色区域为农作物种植区域,黄色区域为林木种植区域,红色区域为建设用地及其它用地,蓝色区域为水域)。



图9 原 TM 最大似然法分类图像

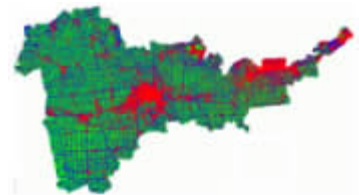


图10 FLAASH 校正后的分类图像



图11 6S 校正后的分类图像

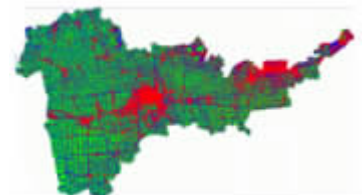


图12 ATCOR 校正后的最大似然法分类图像

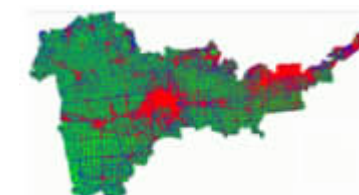


图13 DOS 校正后的最大似然法分类图像

根据表 2 结果显示,ATCOR2 和 FLAASH 的校正效果好,都对农作物识别精度有了大幅度提高,不仅分类总精度从 97.8727% 提高到 98.2573% 和 98.9013%,Kappa 系数从 0.9425 到 0.9526 和 0.9699,而且针对农作物提取的生产者精度和用户精度也有不同幅度的提高,同时根据地面实地调查样地数据检验精度,各类主要农作物分类中(表 3),FLAASH 与 ATCOR2 分类结果精度提高不少,有利于农作物类别的提取。虽然 ATCOR2 对农作物识别精度相对较高,但计算用时很长,且效率不高,其中较多经验模式,对于数据量大的中高分辨率大尺度影像的大气校正处理则对硬件要求较高,而 FLAASH 不仅计算效率高,硬件要求相对较低,NDVI 值与实验真值较吻合,而且对农作物面积提取精度提高有很大的帮助,故对于农作物面积提取,

FLAASH 大气校正方法能达到最好效果。

表 2 各个校正方法处理后影像的分类精度比较

方法选择	总精度(%)	Kappa 系数	农作物类生产者精度(%)	农作物类用户精度(%)
原 TM	97.8727	0.9425	99.54	96.63
FLAASH	98.2573	0.9526	99.84	97.83
6S	97.9537	0.9447	99.53	96.41
ATCOR2	98.9013	0.9699	99.91	98.70
DOS	97.8662	0.9424	99.54	96.36

表 3 主要农作物分类结果比较分析

作物	原 TM	FLAASH	6S	ATCOR2	DOS
小麦	66.67	83.33	71.43	76.19	66.67
水稻	28.67	56.67	30.51	57.43	29.33
油菜	30.24	35.11	30.43	21.36	31.21
其它农作物	21.52	23.52	23.77	23.89	20.13
平均值	36.78	49.64	39.04	44.72	36.84

#### 4 结论与问题

DOS 模型可以在未知天气的状况下,用简单快速的方法获取程辐射率,运算时间短,比传统的大气辐射传输模型易用省时,且适应性强,对硬件要求低,使 TM 影像在不同时间不同天气状况下快速进行动态检测。而 DOS 模型只是从消除程辐射的情况出发,对大气散射和吸收则忽略不计,DOS 模型类型多样,具有很强的灵活性,可以进一步根据研究区域的不同进行 DOS 模型方法研究,有待进一步研究。

通过对原始 DN 值、大气表观反射率、地面反射率的 NDVI 对比可以发现,经过辐射校正(辐射定标和大气校正)后计算的 NDVI 的值高于原始 DN 值计算的 NDVI;去除传感器本身产生的内部误差和由大气影响引起的外部误差后的 NDVI 更能够真实反映地面植被的覆盖情况。在农作物面积提取研究中,NDVI 值是否精确关系着结果是否精确,因此通过大气校正的方法,可以使 NDVI 值达到实际农作物的 NDVI 值。

MODIS 反射率产品是经过严格的大气分子散射、臭氧、气溶胶及云处理的校正的产品,其算法对 MODIS 7 个波段的数据均进行大气双向反射和太阳高度角校正。它与农作物的 LAI 和 NDVI 有着极显著的相关性,同时与 6S 模型、MODTRAN+ 模型都根据大气辐射的传输过程,采用双向辐射校正方法,使用气溶胶和大气分子散射、吸收模式定标传感器辐射值为表观反射率,乃至转化成表面辐射率,来解释辐射传输问题。但 MODIS 数据与 TM 数据的分辨率有较大差异,故存在边缘像元和混合像元参与计算问题,本文采用 MODIS 像元值对应 TM 区域平均值以初步解决该问题。

经过验证,ATCOR2 和 FLAASH 校正方法都对农作物识别精度有了大幅度提高,但 ATCOR2 的计算用时很长,且效率不高,其中较多经验模式,对卫星遥感数据尺度存在局限性,而 FLAASH 不仅计算效率高,对数据的局限性小,NDVI 值与实验真值较吻合,而且对农作物面积提取精度提高有很大的帮助,故对于农作物面积提取,FLAASH 大气校正方法能达到最好效果。尤其是在小麦和水稻识别过程中起到较大作用,海安县主要作物为小麦与中稻,且为轮作种植模式,基于 TM 数据 30m 的分辨率,排除混合像元的影响,分类结果显示该校正方法可以用于更大区域的农作物识别和面积提取,分类精度有待于进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 黄敬峰,王人潮,杨忠恩.水稻遥感估产中 AVHRR 通道 1 和通道 2 的大气影响校正[J].农业工程学报,2000,16(5):130-134.
- [2] Fraser R S, Ferrare R A, Kaufman Y J, et al. Algorithm for atmospheric corrections of aircraft and satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, (13): 541-557.
- [3] Horwath R B, Polcyn J G, Fablan C. Effect of atmospheric path on airborne multispectral sensors [J]. Remote Sens Environ, 1970, (1): 203-208.
- [4] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-infrared Satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, (9): 1357-1381.
- [5] 陈云浩, 李晓兵, 谢峰. 我国西北地区地表反照率的遥感研究[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 327-333.
- [6] 刘三超, 张万昌, 蒋建军, 等. 用 TM 影像和 DEM 获取黑河流域地表反射率和反照率[J]. 地理科学, 2003, 23(5): 585-591.
- [7] 王建, 潘竟虎, 王丽红. 基于遥感图象的 ATCOR2 快速大气纠正模型及应用[J]. 遥感技术与应用, 2002, (8): 193-197.
- [8] Chavez P S Jr. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data [J]. Remote Sens Environ, 1988, (24): 459-479.
- [9] 刘小平, 邓孺儒, 彭晓娟. 基于 TM 影像的快速大气校正方法[J]. 地理科学, 2005, 25(1): 87-92.
- [10] 池宏康, 周广胜, 许振柱, 等. 表观反射率及其在植被遥感中的应用[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 74-80.
- [11] Slater P N. Remote sensing-Optics and Optical Systems[M]. Addison Wesley: Reading MA, 1980. 567-575.
- [12] 程乾. 基于 MOD09 产品的水稻叶面积指数和叶绿素含量的遥感估算模型[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1453-1458.
- [13] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 遥感大气气溶胶及气溶胶产品的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, (39): 108-117.
- [14] 田庆久, 郑兰芬, 董庆禧. 基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法[J]. 应用气象学报, 1998, 9(4): 456-461.
- [15] 龚建周, 夏北成. 基于大气辐射校正的广州市植被覆盖度遥感估算[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 575-580.
- [16] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比[J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 127-135.

(责任编辑 侯旭光)