

为森林资源动态监测的 TM 影像标准化*

张玉贵

摘要 对 TM 卫星影像做综合大气校正,可获得地物反射率影像。大气参数是由当地气象记录的内插值导出,再以像幅内黑暗地物做调整。地形模型既可用于调整各参量随高程的变化,又用以校正辐射的地形效应。当无地形模型时,可由卫星影像本身提取入射角。校正后影像便于做资源信息的多时相比较,即动态监测。还可应用校正过程中生成的参数,做林地及其它再生资源的各生物指标的计算。

关键词 遥感、数字图像处理、大气校正

应用多时相遥感数据,进行再生资源动态监测及植被信息提取,必须做一些基础研究,由于多时相的遥感影像间可以相当精确配准,而且可精确地参照标准地物作地形、大气及辐射校正,那么不同年份,季相相同的影像,便可用多种方法比较再生资源覆盖类型的变化。植被的变异表现为生长或衰亡,绿度增大或减小,表现为生物量的变化。而航天遥感数据,恰好在表现绿色生物量的各种特征方面有独到的优点。因此,可以把农林牧业等方面的要求与航天遥感所能提供的信息在绿色生物量、绿度等各种植被指数方面进行接口。

1 对影像标准化的需要

林业遥感曾普遍采用了缨帽变换及波段比值。后者突出了不同反射波段间的差异,从而间接地反映生物量的差别;而在森林病害监测方面,垂直植被指数也表现优异。由此看来,需要发展适用于农林牧业的植被模型或指数。为了计算这些生物指标,需要剔除原始影像中的干扰因素。用光谱变换方法以及植被变换方法,如比值计算方法可以削弱,但不能完全消除大气及地形对遥感数据的影响。理论及实践证明,用反射率影像计算 NDVI, ARVI^[1],比用磁带原始记录值要精确得多。而 Gardner^[2]给出了估算模型,就是用 TM 通道反射率计算农作物叶面积指数、干湿生物量、盖度等。

“‘三北’防护林体系和植被动态监测及信息管理系统研究”专题(简称“‘三北’监测”)的主要研究内容之一就是卫星遥感监测“三北”防护林造林成果及植被变化,从而评价其生态环境效益。这是需要经过辐射校正的,因而是归一化的多时相影像,这就是标准化的反射率影像。实际的卫星数字影像因受多种因素干扰,并不反映地物的本质。对卫星影像影响严重的因素,主要是大气和地形,此两者改变了实际辐照度。再加上传感器变异等,多个因子互相关联、制约。因此只考虑单因子的校正一般效果不够理想。

2 实验区,校正步骤

2.1 实验区

1994-10-17 收稿。

张玉贵副研究员(中国林业科学研究院资源信息研究所 北京 100091)。

* 本研究为 1991 年国家自然科学基金资助项目。

“三北”监测”实验区包括三个类型区:即黄土高原水土流失区,实验点选在昕水河流域的隰县、大宁县及蒲县;内蒙古西部半干旱风沙区,实验点选在磴口县;内蒙东部农牧区,实验点选在科左中旗。为了对每一个类型区做林地及植被动态监测,需要跨度为 10 a 左右的 TM 影像数据磁带;一般选在 1986~1994 年。为了提高自动分类精度,最好能获得多季相数据,以便利用不同植被群落反射光谱的季相差异。校正的目的就是把各年代、各种气象及大气条件下获取的影像归一化为反射率影像,表达了地物的本质特性。

为做大气校正,需要卫星飞越时的大气参数。可是,卫星数据不附带这些重要参数。本研究利用当天当地气象台、站的四次记录。以卫星飞越时间做非线性内插,估算实时气象参数。并由此计算分谱大气气溶胶含量(以气溶胶衰减 t_p 表示),水汽衰减 t_w 等参量。之后,将大气分谱光学总厚度 t ,太阳天顶角 θ_s ,观测角 θ_v ,大气顶部阳光分谱照度 E_0 等输入大气传输模型,便可获得按光谱段分布的地面全光谱照度 E_g ,散射天光辐照度 E_d ,散射路径亮度 L_p ,以及它们按高程的指数衰减规律(标度高)^[3]。将所得数据代入公式(3),便可获得像元在各波段的反射率 R ,当有精确的高程数据时,可计算各像元高程点的坡度,坡向的反射率。并根据大气参量的标度高,计算该像元的平均反射率。另外,卫星磁带记录值 $DN(0\sim 255)$,并不是卫星高度的观测亮度,首先需应用校准参数 L_{max} 及 L_{min} ,将各波段的 256 级量化值,转为各波段分谱亮度 L_{obs} 。

2.2 校正步骤

第一步把数字影像 DN 应用公布的亮度校准参数转换为卫星高度分谱亮度 L_{obs} ,传感器校准是为了解决入射到仪器上的光谱亮度 L_{obs} 与相应波段记录值 DN 之间的关系^[4~6]。公式(1)中的 L_{max} , L_{min} 是对应于 $DN=0$ 及 $DN=255$ 的常数。

$$L_{obs} = DN(L_{max} - L_{min})/255 + L_{min} \quad (1)$$

第二步是通过各参数的校正把此分谱亮度转换为反射率。如果假定大多数地物具有漫反射特性,则卫星观测到的分谱亮度 L_{obs} 为^[7~9]:

$$L_{obs} = 1/\pi(E_0 \cos i \exp(-t/\cos\theta_v) + gE_d)R \exp(-t/\cos\theta_v) + L_p \quad (2)$$

式中 i 为阳光对地面像元入射角,即像元法线与入射线夹角; t 为大气衰减系数(光学厚度); $t_v = \exp(-t/\cos\theta_v)$ 为大气向下的透射率; $T_v = \exp(-t/\cos\theta_v)$ 为大气向上的透射率; g 为倾斜地形上,散射天光的几何因数,可取 $g=0.5+0.5s$, s 为坡度角。

以 $E_g = (E_0 \cos i T_v + gE_d)$ 表示对地物表面的全辐照度,则(2)式可简写为:

$$L_{obs} = 1/\pi RT_v E_g + L_p \quad (3)$$

于是反射率为 $R = \pi(L_{obs} - L_p)/(E_g T_v)$

由气象记录导出大气厚度各分量及各分量随高程变化的公式^[3]。各参数的推导及 Turner 模型计算步骤已形成计算机校正程序。应用标度高,简化了对不同高程像元的对应值的计算过程^[3,8,9]。应用本程序对山西昕水河流域的 2 景,浙江 1 景,磴口 4 景影像做了运算。结果表明,即使粗略的高程模型也有助于计算大气厚度,及其随高程的衰减变化。每个像元高程的差异导致光学厚度各分量 t , t_p 及 t_w 以及全光谱照度 E_g , 天光辐照度 E_d 及路径亮度 L_p 的变化。这样,可以通过对光学厚度等参量的校正,改进数个数字影像级。对于像内蒙磴口县以及科左中旗这样非常平整的地形,计算高程对大气参数的调制或每个像元的 $\cos i$ 是没有意义的。校正程序中已设计有一种不做高程调制量计算的选择。此时,校正的目的只在于计算各时相的太阳天顶角及大气条件的影响,从而统一各影像的辐射水平,以便做多时相比较。

3 应用数字地形校正地面辐射量

与高程比较,地形对 TM 影像的影响更为严重,它改变了阳光对像元法面的入射角 i 。对水平地面, $\cos i = \cos \theta_0$ 。公式(2)是相当严谨的,各种因素对辐射的影响都考虑到了。所以,从理论上讲,计算复杂地形的反射率 R 也是可行的。公式(2)要求输入入射角 i ,计算直射阳光分量;并要求输入坡度角 s ,计算天空光分量的贡献。

3.1 入射角及坡度角的计算

由邻近像元高程计算每个像元的坡度角 s 及坡向角 a ,之后计算太阳直射光对每个像元的入射角的 $\cos i$ 。

$$\cos i = \cos \theta_0 \cos s + \sin \theta_0 \sin s \cos(\varphi_0 - a) \quad (4)$$

式中 φ_0 为太阳方位角。按 1:5 万地形图,将等高线数字化后内插,得出与像元可做比较的分辨率。在昕水河流域的隰县、大宁、蒲县,都已建立了 1:5 万的地形库。由于黄土高原地形破碎,地形图等高线过密,数字化时无法跟踪。故每 5 根线取 1 根,得高程差为 50 m 的等高线。

3.2 配准的困难及对地形数据的精度要求

用 ARC/INFO 中的 TINLATTTCCE 模块将矢量等高线数据,转换并内插为栅格等高线数据,与 TM 影像配准。但在矢量向栅格转换过程中,选用 Linear 方式内插的等高线之间不能拟合,即形成阶梯状高程。而选用 Quintic 方式内插等高线,需要极大量的机时,而生成的内插高程图像、入射角图像、坡度图像仍与原 TM 影像相差甚远。为此,开发了矢量高程向栅格高程的转换及内插程序,效果稍有改进。

计算每个像元的入射角、坡度角以及辐照度是个相当困难的问题。首先是卫星影像与地形图的配准精度问题。两者来源不同,只有当保证地形图本身无扭曲变形时,以控制点方式把卫星影像配准到地形图,才能保证大多数像元是配准的。第二个问题是对地形图本身的比例尺精度要求与地形的破碎程度成正比。50 m 高程差的等高线已将黄土高原的沟壑抹平,细部像元入射角信息已被歪曲。所以,即使有了校正模型和程序,却没有足够精确的地形模型,也不能对黄土高原的沟壑区这类极其复杂的地类做校正。而对该区石质山林地,由于坡面较规整,计算出的入射角与实际情况基本符合,校正结果仍属满意。总之,由于坡度及坡向不是高斯分布,对崎岖不平的山地,粗放的数字模型可能无助于提高太阳直射光的辐射校正。为了计算每个像元的辐照度,对山体高大的山区,需要 1:5 万的地形图;对较破碎的山区,则需要 1:1 万比例尺的地形图。这样的要求在当前似乎过高了。最好的途径是从卫星影像本身提取所需的入射角等参量。因此开发了不用高程数据的地形阴影校正方法。

4 校正参数及校正影像应用举例

4.1 无数字地形的阴影校正

主导思想是:当没有或无法利用地形模型时,每个像元的入射角必须而且只能由像元值本身计算。因此要充分利用 TM 影像 6 个反射波段的信息。考虑到各波段磁带记录 DN 值,与全光照度 E_e 成正比。由(1)、(3)式可建立 E_e 与 DN 的关系式。而 E_e 又与入射角有关。因此从 6 个反射波段的 DN 值可以估算该像元的入射角 i 。由此可将该像元的照度调整到太阳对水平

地面入射角 θ 的强度上,从而达到全部或部分消除阴影的目的。

当阳光对地面像元的入射角 i 小于 90° ,而大于太阳天顶角时,定义为半阴影;若 $i > 90^\circ$,定义为全阴影,设在半阴影中像元的太阳入射角为 i ,太阳对水平面入射角为 θ_0 ,则它们的全照度分别为 E_{gi} 及 E_{g0} ,于是有

$$E_{gi} = E_0 * \cos i T_0 + g_i E_d; \quad E_{g0} = E_0 * \cos \theta_0 T_0 + g_0 E_d$$

若 i 等于或大于 90° ,则上式中第 1 项为零,此时只有部分天空光辐照,像元处于全阴影中。推理的出发点是:对每一波段,在不同照度下的 DN 的比值都与全照度成正比,即

$$E_{gi}/E_{g0} = (DN_i - L_p)/(DN_0 - L_p) \quad (5)$$

由(5)式可以推导出一种简便的计算每个像元的太阳辐照入射角 i 的公式。(5)式是个最基本的表达式,它表明各波段的照度比可由卫星影像的像元值推导出来。比值 E_{gi}/E_{g0} 是随入射角 i 增大而变大的,但各波段变化率不同。计算过程中应用大气校正导出的参数。

将以上方法应用于浙江龙泉县山坑林场 $1\ 850 \times 1\ 450$ 像元面积,取得非常满意的效果。当时太阳高度角为 38° ,高大山体的阴影非常严重,阴影中地物几乎无法判读。而校正后的 4/5/3 波段合成影像,从信息量和彩色饱和度等方面都大有改进,除只有天光辐照的全阴影外,只要有少许阳光辐照,都可校正。所以此校正法很适用于高大山体林区的辐射校正。

但以上算法有两方面缺点。由于它计算入射角的依据是各波段的 DN 值的代数和或加权和,那么当两种地物各波段的反射率都成比例,而大小不同时,反射率低的很可能被误认为反射率高的地物的阴影而校正为后者。针叶林各波段代数和偏小,多数被当做阴影而校正为阔叶林。因此必须加上适用于针叶林的限制阈值,加以处理。

第二方面的缺点是无法校正全阴影($i > 90^\circ$)中的地物。主要是因为 TM 影像量化级范围太小。在 $0 \sim 255$ 级量化级中,实际直方图并不满贯。而分配给全阴影的级差只有 $3 \sim 5$ 个,在校正后全部偏向一种色调。因此校正后也没有反映出地物类别,把此种校正法应用于山西隰县 TM 影像,也反映出了这两方法的问题。特别在黄土塬坡面上,由于水土流失形成的千沟万壑,又深又窄,本像幅 3 景的太阳高度角从 61 变到 56 ,无在塬的阳面或阴面,都出现许多阳光照射不到的全阴影。其中可能是荒草坡,也可能有杨树(*Populus spp.*)甚至刺槐(*Robinia pseudoacacia L.*)。但由于数量级仅为 $3 \sim 5$ 级,校正后色调单一,对阴影中地物的分类贡献不大,所以根本原因还在于 TM 影像的量化级为 8 bit,只有 256 级。且原始数据直方图(尤其是 TM_1 、 TM_2 、 TM_3 波段)太窄。所以,对全阴影做细致处理要求提高观测亮度的量化级。

4.2 ARVI 的计算

在植被动态监测方面,人们多直接应用多时相 TM 影像记录的 DN 值,做比值计算,或计算某种植被指数之后做比较,但这存在着误差。以 TM_4/TM_3 为例,根据公式(2),可推导出:

$$\begin{aligned} R_4/R_3 &= [E_{o2} T_{o2} T_{v2} (L_{obs4} - L_{p4})] / [E_{o4} T_{o4} T_{v4} (L_{obs2} - L_{p2})] \\ &= (\text{与波段有关的大气参数常数项}) * (L_{obs4} - L_{p4}) / (L_{obs2} - L_{p2}) \end{aligned}$$

其中, L_{obs} 是由 DN 值转换而得。由此可见,用反射率 R 代替 DN 值更为精确,因为直接应用 TM 影像记录的 DN 值做比值计算,忽略了路径亮度等参数。Kaufman^[1]更提出了用 ARVI (Atmospheric Resistant Vegetation Index) 代替归一化植被指数 NDVI 可以消除大气的干扰。

$$ARVI = (R_{ir} - R_{rb}) / (R_{ir} + R_{rb}) \quad (6)$$

其中, $R_n = c(R_s - R_r)$, 而 R_s, R_r, R_n 分别为绿波段, 红波段及红外波段植被反射率, 这相当于大气校正后的 TM_2, TM_3 , 及 TM_4 波段反射率, c 为常数, $ARVI$ 比 $NDVI$ 多了一个波段信息, 而且可抗大气变动的影晌。在实际应用时, 不一定需要先对全景做校正, 生成各波段反射率影像文件, 再代入(6)式中。为了简便, 可以直接用太阳高度角 θ , 太阳光照度 E , 大气光学厚度 t 等大气校正中间参量对这三个波段的 TM 影像做简便处理, 生成 $ARVI$ 影像, 此处不做详述。总之, 反射率影像为比较多时相的 $ARVI$ 提供了充分的条件。

4.3 各种生物量指数的计算

为了给计算机专家系统做动态分析, 提供判别依据, 需要计算一些具体生物量指标, 这包括叶面积指数 LAI , 地面覆盖百分率, 即郁闭度 PGC , 全生物量 TWW , 干绿叶重 $DGLW$, 植冠水分含量 CMC 等。为林地建立遥感影像与这些生物量或其它生物指标之间关系式, 已超出本研究范围。借用农业方面的参数当然会产生系统误差。但是, 对于多时相影像, 如果系统误差的偏移方向一致, 则生物量指数的差值仍是有意义的。Gardener^[2]给出了 5 组, 即 $LAI, PGC, DGLW, TWW, CMC$, 每组 5 个表达式。每个表达式有两项, 而每项都是 TM 波段反射率的直接比值, 归一化比值或比值的对数。只有应用反射率或准反射率影像做此类估算才有意义。应用本文提出的方法, 还可以对其它生物指标提供反射率影像。

4.4 多时相动态变化比较

对地形较平坦地区, 不需要输入地形数据, 可分别对不同时相生成各波段的反射率影像, 之后做动态比较。在山区较大, 而又不十分破碎的林区, 1:5 万比例尺的地形模型可用以生成做地形校正的反射率影像, 之后做比较。而对地形十分破碎的地区, 几乎无法生成满意的地形模型, 可应用中间大气参量, 做比值类生物量估算, 并按像元计算生物量指标, 比较两个时相的动态变化。其它多时相监测方法, 如对动态变化量很敏感的差值因数 TDF (Time Difference Factor) 影像, 也最好用大气校正结果的参数。以上方法都已完成程序设计, 有的已做过小面积实验。由此可见, 为了进行植被(包括林地)的动态监测, 校正影像起关键作用。

5 结 论

(1) 校正扫描成像的多光谱影像可用气象记录估算大气参数, 而由能见度估算的气溶胶衰减需要以其它方法做监测和调整。

(2) 地形高程数据的精度是极关键的。可以对它做三种选择性处理。当无数字地形时, 只做大气校正, 而以平均高程做计算, 当只有粗略的数字地形, 可以计算高程对大气光学厚度的调制。当有了精确的地形模型, 则可加入对 $\cos i$ 及天光分布的校正。

(3) 不用地形高程的阴影校正方法直接从影像本身计算每个像元的入射角。用它可改进高山区林地影像, 有利于目视解译。但它仍存在某些本质的缺陷, 例如当地物具有类似光谱分布, 而且各波段光谱值都互成比例时(阔叶林与针叶林之间), 效果不够好。

(4) 校正后影像为森林及其它生物资源动态的各种监测方法提供了方便。有些生物量计算不一定必须输入反射率影像, 只要代入实时大气及辐照参数, 即可对原始影像做处理, 生成生物量影像。

参 考 文 献

- 1 Kaufman Y J. atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 261~269.
- 2 Gardner B R. Evaluation and interpretation of Thematic Mapper Ratios in equations for estimating corn growth parameters. Remote Sensing Env. , 1985, 18: 225~238.
- 3 张玉贵. 以气象记录为辅助数据的 TM 影像大气校正方法. 国土资源遥感, 1994, (4): 54~62.
- 4 Markham B L, Barker J L. TM bandpass solar irradiances. Intern. J. Remote Sensing, 1987, 8(3): 517~523.
- 5 Price J C. Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices. Remote Sensing Env. 1987, 21: 15~27.
- 6 Slater P N. Reflectance and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration. Remote Sensing Env. , 1987, 22: 11~37.
- 7 Teillet P M. Image correction for radiometric effects in remote sensing. Int. J. Rem. Sens. , 1986, 7(12): 1637~1651.
- 8 Forster B C. Derivation of atmosph. correction procedures. Intern. J. Remote Sensing, 1984, 5(5): 799~817.
- 9 Turner R E, Spencer M M. Atmospheric model for correction of spacecraft data. Proc. 8th Intern. Symp. on Remote Sens. envirn. , Purduo, 1972. 895.

Standardization of Landsat TM Imagery for Forest Resources Dynamic Change Monitoring

Zhang Yugui

Abstract The paper described an atmospheric correction method for LANDSAT TM imagery. The dynamic change monitoring of vegetation coverage and the variability of atmospheric conditions necessitate the normalization or standardization of satellite imagery. The atmospheric parameters at overpass time were evaluated through interpolation among local meteorological records. The digital model is used to adjust the variation of illumination parameters with elevation, and to correct for the topographic effect. The corrected imagery can be suitably used for multitemporal monitoring of renewable resources.

Key words remote sensing, digital image processing, atmospheric correction