

文章编号: 1007-4619(2005)04-0337-06

半干旱草场的多角度多波段反射率遥感模型

冯晓明^{1,2}, 赵英时¹

(1 中国科学院 研究生院, 北京 100049 2 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 从几何光学(GO)模型出发, 针对半干旱的草场植被, 引入了多光谱冠层反射模型 MSRM、土壤反射光谱 Price模型以及土壤方向性反射 Wallhal模型, 提出一种适用于区域尺度的多角度多波段反射率模型, 并采用 MISR和 MODIS卫星数据进行验证, 验证结果表明模型有较好的适用性。这为多角度、多波段遥感数据用于半干旱草场植被的定量研究提供了新的方法。

关键词: 多角度; 多波段; 反射率模型; 半干旱草场

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引言

利用遥感数据一直是遥感基础理论研究和应用的热点和难点, 过去的几十年里产生了 40多种植被指数和近百种数学模型。植被指数是专题信息提取的好方法, 但并非真正的定量描述, 物理模型的反演才是定量遥感的本质。与过去单一方向的遥感观测相比, 多角度遥感提供了丰富的反射率数据和地表的结构信息, 为定量遥感提供了丰富的信息源, 利用二向性反射模型结合多角度遥感数据可以反演植被的结构参数。植被的辐射传输过程很复杂, 常涉及很多参数, 而多角度的观测存在限制, 因而方程的解总是不确定的, 这给遥感反演带来困难。为了提高反演的精度, 国内外学者进行了多方面的研究。目前的研究多侧重于把多光谱数据作为先验知识, 改进反演策略等, 而且多侧重于理论模型的研究。

本文进一步探索多角度遥感中对多波段信息的应用, 针对不同覆盖状况的半干旱草场, 提出了一种多角度多波段的反射率遥感模型, 并利用多角度 MISR数据和多波段 MODIS数据对该模型进行了检验。

2 研究区域及数据来源

研究区位于内蒙古中西部约北纬 42° — 46° , 东

经 114° — 117° 的地区, 属于中温带半干旱地带, 植被以荒漠典型草原和草甸草原为主, 生态环境比较脆弱。近年来, 由于全球气候的变换和人们对资源的不合理利用, 研究区内的草场资源受到不同程度的破坏, 根据退化程度的不同, 大致可以分为严重退化草场、中等退化草场和未退化草场(图 1), 而对研究区内草场状况定量化的研究, 有利于指导人类正确利用自然资源、保护生态环境。

我们用于研究的数据为多角度 MISR数据和多波段 MODIS数据。MISR和MODIS都是1999年12月发射的 Terra极轨飞行器所搭载的探测器。MISR这个新型探测器可以从9个方向, 分4个波段观测地球, 9个角度分别为 0° , $\pm 26.1^{\circ}$, $\pm 45.6^{\circ}$, $\pm 60.0^{\circ}$, $\pm 70.5^{\circ}$, 4个波段分布在可见光到近红外范围内, 其中心波长分别为 446nm, 558nm, 672nm, 867nm^[1]。MODIS的特点在于能够提供多波段的数据, 它在 0.4—14 μ m 的波长范围内分了 36个光谱通道, 这 36个波段分别用来获取来自陆地、海洋、大气的信息。我们选取其中用于陆地信息探测的第 1—7波段, 它们的中心波长分别为 469nm, 555nm, 645nm, 859nm, 1240nm, 1645nm, 2120nm。

本文选用了 MISR的 BRDF数据(Hemispherical Directional Reflectance Factor), 它指在太阳光照射条件下, 地表出射辐射与相同入射条件下的朗伯体出射辐射之比。该数据经过了系统辐射纠正、角对角

收稿日期: 2003-11-19 修订日期: 2004-10-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077907)、国家自然科学基金(40271082)。

作者简介: 冯晓明(1980—)女, 2001年毕业于华东师范大学, 获得地图学与地理信息系统专业学士学位, 现为中国科学院研究生院硕博生, 从事多角度遥感研究。Email: fengxm@mails.gscas.ac.cn



未退化草场



严重退化草场

图 1 不同覆盖度草场近景

Fig 1 Grassland of different coverage

的几何纠正和大气纠正环进行大气纠正。地物的 BRDF 可以通过下式得到^[1]：

$$BRDF = BRF \mu \quad (1)$$

选用的 MODIS 反射率产品均经过系统辐射纠正和几何纠正，并且通过 MODTRAN 大气辐射模型的大气纠正^[2]，可以得到地物的多波段反射率。两者的空间分辨率均为 1 km。2

3 模型介绍

几何光学(GO)模型用于森林地区反射率的求算^[3]。模型中假设树冠具有固定的几何形状，受阳光照射后，树冠分成光照部分和阴影部分，树冠在地面上的投影把地面分成光照地面和阴影地面，这样，林区的遥感像元可以分解为 4 个组分：光照树冠、阴影树冠、光照地面、阴影地面(图 2)。像元的反射率是组分的线性加权，权重为各个组分在像元内所占面积的比例。而草场的植株不同于树木，因此在本文的干旱与半干旱草场的研究中，把裸露土壤和植被覆盖区域作为两种独立的成分来考虑。严格地说，草冠层由新生的绿叶和衰老的枯叶组成，绿

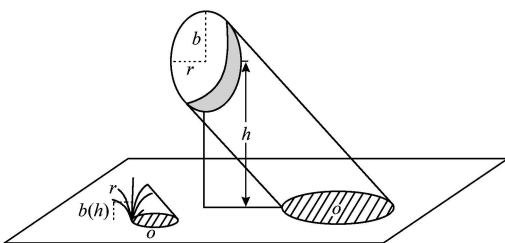


图 2 树木与草的场景比较图

Fig 2 The scene of tree and grass

叶和枯叶的光学特性不同，但就草场整个生长期而言，绿叶和枯叶混杂的时间较短，我们选取处于 7 月份生长旺季的草场为研究对象，可忽略枯叶的影响；其次，凋落物会影响地面的光学特征，但它和土壤紧密地混杂在一起，可以把它看成土壤的一部分。因此草场的反射率 R 可以写成：

$$R(\theta_s, \theta_o, \varphi) = G(\theta_s, \theta_o, \varphi)k_G + C(\theta_s, \theta_o, \varphi)k_C \quad (2)$$

其中， G 是裸地反射率(待求)； C 是植被冠层反射率(待求)； k_G 和 k_C 是一定观测角度下像元内裸地和植被冠层所占面积的比例； θ_s 、 θ_o 、 φ 分别为太阳天顶角、观测天顶角、观测方位角和太阳方位角之间的夹角，一般在卫星数据的说明文件中可以找到。

3.1 组分面积比例

作为下垫面的土壤，其属性在空间分布上既具有随机性，又具有相关性；植株的分布也同时具有独立性和空间自相似的特征。对于草本植物叶片，一般认为在空间上呈随机分布。因此，本文采用泊松模型来描述。

假设在面积为 S 的区域内有植株覆盖，每个植株对地面产生覆盖的面积为 a ，以地面某一点为参考，研究其被覆盖和裸露的概率。

(1) 只有 1 个植株时，地面某点被覆盖的概率是 a/S ，地表裸露的概率为 $1 - a/S$ 。

(2) 当第 $k-1$ 个植株覆盖地面某点，则第 k 个植株覆盖这一点的条件概率为 $\lambda a/S$ ($\lambda a/S \leq 1$)，其中 a/S 为无条件概率，此时地表裸露的概率为 $(1 - a/S)(1 - \lambda a/S)^{k-1}$ 。

当植株的个数趋于无穷，则可以得到地表裸露的概率 k_G 和植被覆盖的概率 k_C ：

$$k_G = e^{-\lambda a S} \quad (3)$$

$$k_C = 1 - e^{-\lambda a \delta} \quad (4)$$

引入植株的几何形态, 上式又可以表示为:

$$k_C = e^{-\lambda m \pi r^2 [\sec \theta'_s + \sec \theta'_o - O(\theta_s, \theta_o, \phi)]} \quad (5)$$

$$k_C = 1 - k_C \quad (6)$$

式中^[4], m 为单位面积内植株的平均个数, r 是植株的平均半径, O 表示植株沿太阳入射方向和观测方向在地表上投影的重叠, 式中包含植株的形状参数 b/h (植株的垂直半径和水平半径之比) 和 h/b (植株的中心高度和植株垂直半径之比), 对于草本的植株, h/b 固定在 1.0, $\theta' = \tan^{-1}(b/h \tan \theta)$, ϵ 为散射相角,

$$\cos \epsilon' = \cos \theta'_s \cos \theta'_o + \sin \theta'_s \sin \theta'_o \cos \phi$$

3.2 冠层反射率

冠层的辐射传输过程受很多因素的影响, 包括辐射源 (太阳和天空散射)、大气、植被、土壤背景和探测器^[3]。用于描述冠层的辐射传输过程的典型模型有 SA IL 模型, N-K 模型以及以这些模型为基础的一些改进模型。考虑到草场研究与 MSR 数据源的特点, 我们选用了 Andres Kuusk 于 1994 年提出的多光谱冠层反射模型 MSRM。该模型中引入了 PROSPECT 模型, 可以计算波谱范围 400nm—2500nm 的反射光谱曲线, 并且能够较好地解释叶片表面的镜面反射和叶片尺度上的“热点”现象, 同时具有较高的计算效率^[9]。其概念模型可以表示为:

$$\rho = f(\theta_s, \theta_o, \phi, f_d, LAI, LAD, N, C_{ab}, C_w, C_{dm}, C_{sug}, \rho_s) \quad (7)$$

其中, ρ 为冠层的反射率; 模型的参数包括外部参数: θ_s, θ_o, ϕ ; 大气参数: 直射入射的太阳光所占的比例 f_d ; 叶片结构参数: 叶面积指数 LAI 平均叶倾角 LAD; 叶片生物物理参数: 叶片层数 N , 叶绿素含量 C_{ab} , 叶片含水量 C_w , 叶片干物质含量 C_{dm} , 含糖量 C_{sug} ; 以及土壤反射 ρ_s 。

由于太阳直射光和天空散射光在冠层内部的传输过程有很大的差别, 因此需要分别考虑, 模型如下^[6]:

$$C(\theta_s, \theta_o, \phi) = f_d C_d(\theta_s, \theta_o, \phi) + (1 - f_d) C_r(\theta_s, \theta_o, \phi) \quad (8)$$

其中, C 是冠层的半球-方向反射率; f_d 与大气的状况有关, 模型中采用了 Mc Cartney 和 Unsworth 的公式计算太阳直射光所占比例的光谱分布。 C_d 是冠层对太阳直射光的反射, C_r 是冠层对天空散射光的反射, 两者随着入射角和观测角的变化而变化。 C_d, C_r 可由下式^[6]求得。

$$C_d = C_d^c + C_d^f + C_d^{c \leftrightarrow c} + C_d^{c \leftrightarrow g} \quad (9)$$

$$C_r = C_r^c + C_r^f + C_r^{c \leftrightarrow c} + C_r^{c \leftrightarrow g} \quad (10)$$

其中, C_d^c, C_r^c 为冠层对入射的单次反射, C_d^f, C_r^f 为土壤背景对入射的单次反射, $C_d^{c \leftrightarrow c}, C_r^{c \leftrightarrow c}$ 为冠层内部的多重散射, $C_d^{c \leftrightarrow g}, C_r^{c \leftrightarrow g}$ 为冠层与土壤背景之间的多重散射, 均为 θ_s, θ_o, ϕ 的函数。式 (9)、(10) 的展开形式参看文献 [6]。

3.3 土壤反射率

土壤的辐射传输过程与很多因素有关。Price 等对来自美国、巴西等国的 564 个土样进行反射率光谱测量与分析, 得到 10 个可以近似描述整个反射光谱数据库的基向量, 经主成分分析, 从这些基向量中成功地提取了 4 个基函数用以描述土壤的整个反射谱, 模型如下^[7]:

$$\rho_{soil}(\lambda) = s_1 \varphi_1(\lambda) + s_2 \varphi_2(\lambda) + s_3 \varphi_3(\lambda) + s_4 \varphi_4(\lambda) \quad (11)$$

其中 $\varphi_1(\lambda), \varphi_2(\lambda), \varphi_3(\lambda), \varphi_4(\lambda)$ 为基函数 (可从文献获得), s_1, s_2, s_3, s_4 为权重系数, $\rho_{soil}(\lambda)$ 为不考虑方向信息的土壤反射率。

Walsh 提出了一个计算土壤方向性反射率的经验模型, 该模型经过实测数据的检验, 对于一般的土壤都很有效。本文土壤方向性反射率的计算, 采用了其修正模型, 表示为^[3]:

$$\rho_s(\theta_s, \theta_o, \phi) = \frac{\rho_s(\theta_s, 0, 0)}{e_o(\theta_s)} [e_o(\theta_s) + e_1(\theta_s) \theta_o \cos(\phi) + e_2(\theta_s) \theta_o^2] \quad (12)$$

其中, $e_o(\theta_s) = 16.41 - 4.3 \theta_s^2, e_1(\theta_s) = 7.363 \theta_s, e_2(\theta_s) = -4.3 + 7.702 \theta_s^2$, Price 公式计算得到的反射率作为 $\rho_s(\theta_s, 0, 0)$ 输入。

由于忽略了草场地表凋落物的影响, 因此对于像元内裸土的反射率和冠层下土壤背景的反射率采用相同的方法来计算。

类似于式 (8), 我们可以得到:

$$G(\theta_s, \theta_o, \phi) = f_d G_d(\theta_s, \theta_o, \phi) + (1 - f_d) G_r(\theta_s, \theta_o, \phi) \quad (13)$$

其中, G_d, G_r 分别是裸地对直射太阳光和散射天空光的反射。

4 反射率计算

根据覆盖度的不同, 研究区的草地分为未退化草地、中等退化草地、严重退化草地。本文利用上述 GO-RT 混合模型 (式 (2)) 分别对 3 类对象进行计算。计算的过程中, 首先遇到的是参数确定的问题,

不同退化程度草场输入的参数不一样。

2001年 7月 26日至 8月 2日,我们对研究区内 3种类型草地的样地(面积约 1km²)分别进行实地数据采集,获得的数据有些作为模型的直接输入值,如冠层的叶面积指数、草群的平均生物量(干重 g m²)、草群的平均含水量、植株的平均密度(丛 / m²);有些可以间接推算出模型所需的参数值,如群落盖度以及土壤反射率等。根据群落盖度和植株的平均密度,我们可以确定植株的平均半径;调整土壤的参数 s₁、s₂、s₃、s₄,使得裸土的反射光谱和实测的土壤反射光谱一致。另有部分参数可以根据已有的研究资料确定,如草场干叶片的叶绿素含量为 0.5%^[8]、叶片的折射指数为 1.4、叶片层数 N 为 1.5^[9]。除此之外,我们假定草场内的叶角为均匀分布。对于一些难以确定的参数,在计算的过程中加以调整。由于研究区地势平坦,因此忽略地形对太阳天顶角和观测天顶角的影响。

以中等退化草场为例,草场反射率计算时所用的输入参数如表 1。

表 1 中等退化草场反射率计算的输入参数

Table 1 The input parameters of the reflectance calculation for the grassland of secondary degradation

参数	值
太阳高度角 (°)	28
叶面积指数	0.6
叶片相对尺寸	0.06
Makov 参数	1.0
叶角方差	0
叶角 (°)	45
叶片折射指数	1.4
叶干重 (g km ²)	52.6
水含量 %	150
叶绿素含量	0.5
干物质含量	99.4
糖物质含量	0.2
叶片层数	1.5
土壤参数 s ₁	0.27
土壤参数 s ₂	0.0616
土壤参数 s ₃	-0.003
土壤参数 s ₄	-0.03
单位面积内草的数目	500
草的平均水平半径	0.07
垂直半径与水平半径之比	10

在上述基础上,我们可以计算出 2001年 7月底研究区内不同退化程度草场的多角度多波段反射率。

5 模型验证

为了检验模型的有效性,我们把 MISR 和

MODIS 卫星数据作为实测值,对模型计算值进行了验证。在计算研究区的反射率时,模型的输入参数取为实地数据采集的值,同时保证用于验证的卫星数据与模型计算数据是同步的。考虑到卫星数据的采集受到一定时间周期的限制,而且受云覆盖的影响,我们最终选用的是 2001-07-29 的 MISR 数据和 2001-07-10 的 MODIS 数据。

遥感图像上不同类型草场可以根据植被指数与植被覆盖度的关系以及地面样地来确定。实验证明,当覆盖度在 15%—80% 范围内时,与归一化植被指数 (NDVI) 呈线性关系,可表示为^[5]:

$$F = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (14)$$

其中, F 为植被覆盖度, NDVI_{min}、NDVI_{max} 为研究区内 NDVI 的最小、最大值。

由上式可以得到,覆盖度为 60%、35%、15% 的草场对应于像元上 NDVI 值约为 0.54—0.58、0.39—0.43、0.27—0.31 的像元。

5.1 草场反射率的角度谱

本文计算了 672nm 处的草场反射率,为了便于与实测值的比较,我们把太阳天顶角固定在卫星过境时的 28°,太阳方位角和观测方位角之间的夹角计算时取定为 60°,观测天顶角在 -80°—80° 的范围内变化,计算结果如图 3。由图 3 可以看出:3 种类型的草场反射率随着观测天顶角的变化呈现规律性的变化。

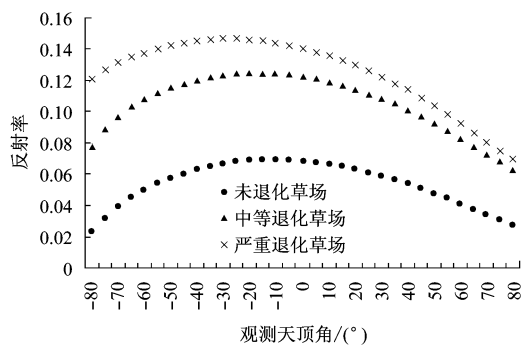


图 3 不同退化程度草场的反射率角度谱

Fig 3 The bi directional reflectance for grasslands of different degradation levels

本文在 MISR 多角度图像上各取每种草场类型的像元若干个,以其反射率的平均值分别作为未退化草场、中等退化草场和严重退化草场的实测值,和模型计算值相比较,如图 4 所示。

三者的绝对误差分别为 8.45%、8.16%、

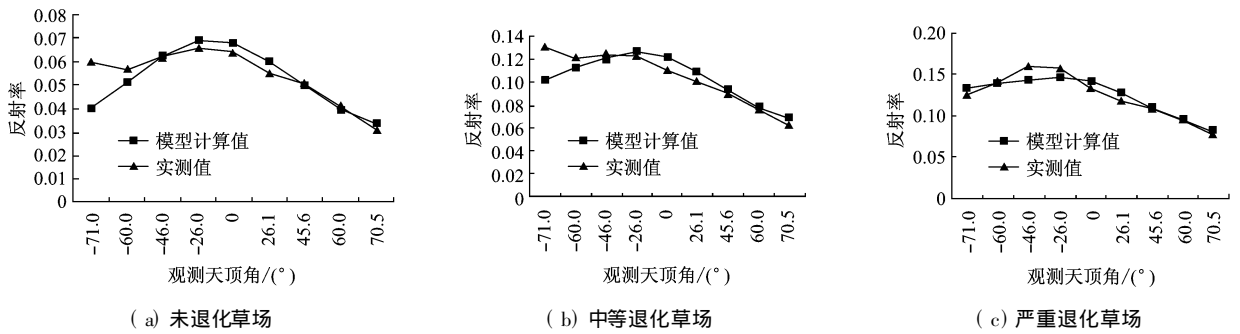


图 4 草场反射率角度谱的验证 (波长 672nm 处)

Fig 4 The validation of the bi directional reflectance in 672nm for the grasslands

4.77%。从图 4 可见,当观测天顶角为 -70° 时,模型计算值和实测值之间出现了较大的偏差。根据反射率角度分布的趋势曲线,本文认为该点出现异常,可以舍去。舍去该点后,三者的绝对误差分别为 5.31%, 6.37%, 4.69%, 造成误差的原因主要是模型的系统误差和部分输入参数的不确定性。

5.2 草场反射率光谱

我们分别计算了 3 种类型草场太阳天顶角为 28° 、观测天顶角为 0° (天底方向) 的草场反射率光谱,如图 5

由图 5 可见,未退化草场光谱的植被特征比较明显,随着退化程度的加重,光谱中的土壤特征增多。这一点在 600—800nm 处的反射率表现得非常明显。

取 MODIS 的第 1—7 波段中心波段所在的反射率值,将它与模型的计算值作比较,如图 6

三者的绝对误差分别为 5.14%, 4.68%, 5.77%。

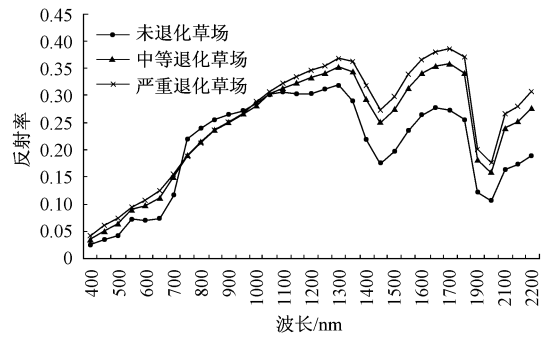


图 5 不同退化程度草场反射率的光谱曲线

Fig 5 The reflectance spectrum for the grasslands of different degradation levels

由上图可以知道,850—1600nm 处的模型的误差比较大,而且都是模型计算值较实测值偏小。可能造成误差的地方除了模型本身和输入的参数之外,还有由于数据上的限制,我们所用的 MODIS 卫星数据与计算值在时间上有所偏差。

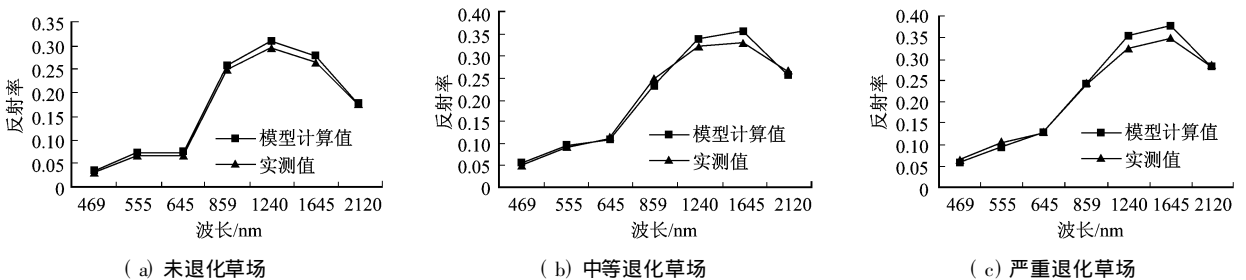


图 6 草场反射率光谱的验证

Fig 6 The validation of the reflectance spectrum s for grasslands

6 结论和讨论

(1) 针对多角度和多波段卫星遥感数据在半干旱草场植被的定量研究,本文提出了一种反射率模型。考虑到半干旱地区的草场结构简单,且下垫面

的凋落物和土壤紧密混杂成一个整体,因此模型以二向反射为基础,对像元进行了植土二分,并考虑了冠层的多次散射。经过实测多角度 MISR、多波段 MODIS 数据的验证,结果表明模型可靠。对于雨水丰富的湿润地区,植被覆盖具有复杂的空间结构,则像元的反射需要重新定义。

(2)模型引入泊松分布来描述植株分布的随机性和空间相关特征,不同退化程度的草场相关的程度不同,与实地观测的结果保持一致。

(3)模型不考虑草场内不同的植株形状,而统一假定植株的几何形状为椭圆,模型计算值与实测数据的验证结果表明,对于卫星遥感的观测,该假设满足应用的需求。

(4)文中像元组分的反射率子模型都具有参数少的特点,使得模型简单,计算效率较高,但另一方面,描述土壤反射率的 Price 模型和 Walthall 模型都是经验公式,研究区内裸土还是占有相当的比重,特别是草场退化严重的区域,因此采用更为精确的辐射传输的机理模型来计算土壤的反射率还是很重要的。进一步的工作将在这个基础上展开。

致 谢 本文所用的 MISR 数据从 NASA 的 Langley 研究中心大气科学数据中心获得,在此表示感谢。

参 考 文 献 (References)

[1] David J Diner John V. Martonchik Christoph Borel *et al*

Level 2 Surface Retrieval Algorithm Theoretical Basis <http://www-misr.jpl.nasa.gov> 2000

- [2] Liu Zh H Zhao Y S Application of MODTRAN and 6S Models to Atmospheric Correction of MODIS Image Data[J]. *Journal of Remote Sensing* 2002 6(Suppl): 117- 122
- [3] Ni W G Li Xi W. A Coupled Vegetation - Soil Bidirectional Reflectance Model for a Semiarid Landscape[J]. *Remote Sensing of Environment* 2000 74: 113- 124.
- [4] Wanner W, Li X Stahler A H. On the Derivation of Kernels for Kernel driven Models of Bidirectional Reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research* 1995 100: 21077- 21089.
- [5] Zhao Y S The Application Principle and Method of Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2003 [赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003]
- [6] Andres Kuusk. A Multispectral Canopy Reflectance Model[J]. *Remote Sensing of Environment* 1994 50: 75- 82
- [7] John C. Price On the Information Content of Soil Reflectance Spectra[J]. *Remote Sensing of Environment* 1990 33: 113- 121.
- [8] Research Center of Plant Ecology and Biodiversity Conservation Institute of Botany Chinese Academy of Sciences Research of Plant Ecology[M]. Beijing: Science Press, 1988 [中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 1988]
- [9] Jacquemoud S Baret F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra[J]. *Remote Sensing of Environment* 1990 34: 75- 91.

A Spectral directional Reflectance Remote Sensing Model of the Semiarid Landscape

FENG Xiaoming^{1,2}, ZHAO Ying-shi¹

(1. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China

2. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China)

Abstract It's a widely studied field to get the structural parameters of the vegetation with remote sensing data. In this paper multi spectral information is used in the multi angular remote sensing research. A spectral directional reflectance remote sensing model of regional scale is presented for the semiarid grassland.

Starting with the Geometric Optical modeling and considering the difference between the tree and the grass, two most important scene elements are accounted for in this model: bare soil and canopy. The model is composed of the Multi-spectral Reflectance Model (MSRM) for calculating the canopy reflectance, the soil spectral reflectance Price model and the soil BRDF Walthall model for calculating the soil reflectance. Poisson model is used to calculate the percentage of each component of remote sensing pixel. Validation has been done using MISR and MODIS data for the model. The result shows that RMS between modeled multi angular reflectance and MISR data and RMS between modeled multi spectral reflectance and MODIS data are 5.31%, 6.37%, 4.69% and 5.14%, 4.68%, 5.71% for no degraded grassland, slightly degraded grassland and badly degraded grassland respectively. The precision of our model can meet requirement of research work. The sub model of soil reflectance is experimental. The study has shown that it can be replaced by the mechanism model for the percentage of soil is dominated especially in the badly degraded grassland.

In conclusion, it provides a new approach of application of remote sensing application to quantitative study and quick evaluation of grassland degradation in the semiarid region.

Key words bidirectional reflectance; reflectance spectrum; reflectance model; semiarid landscape