

内蒙半干旱草场遥感反射率模型研究^{*}

冯晓明^{1,2} 赵英时¹

(1. 中国科学院研究生院 资源与环境学院 北京 100049;
2. 中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要: 结合辐射传输 (RT) 模型和几何光学 (GO) 模型的建模思想, 建立适用于半干旱草场的遥感反射率模型。考虑到研究区土壤裸露严重, 比较分析经验土壤模型 Price+Walthall 和机理土壤模型 Soilspect 应用于草场遥感反射率模型的优缺点。研究表明: 草场模型较好得拟合了遥感观测值; 土壤反射采用 Price+Walthall, 模型参数少, 但草场的“热点”效应不明显; 土壤反射采用 Soilspect, 模型参数多, 且难以获得; 根据需要选取相应的模型。此模型可用于内蒙半干旱草场的退化状况监测。

关键词: 半干旱草场; 遥感; 反射率模型; 土壤模型

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) S1-0309-05

遥感技术是目前区域研究的重要手段。对于区域植被覆盖状况的监测, 模型的选取是首要关键, 至今已有了多种植被反射率模型^{1~3}。按照研究对象, 可以分为辐射传输 (RT) 模型和几何光学 (GO) 模型。前者应用于几何形状不明显的草冠层, 后者应用于具有明显几何形状的树木。本文的研究区位于内蒙半干旱草场, 由于受自然条件的限制和人类活动的影响, 草场遭到破坏, 植株结构退化、土地裸露情况日益严重^{4,5}。为了实现对草场退化情况的监测, 研究采用中等分辨率的卫星遥感数据 (MISR, MODIS)。现有的模型应用于研究区存在一定的局限, 主要由于遥感尺度的像元包含多种组份 (草覆盖区, 裸土), 不能单纯地利用辐射传输模型来表达。而几何光学模型很好地解决了这个问题, 考虑了研究对象的不同组分。本文结合两者的思想, 提出了遥感尺度上的半干旱草场反射率模型。由于土壤在研究区内占有很大的比重, 尤其在草场退化比较严重的区域, 本文在上述模型的基础上, 侧重于土壤反射经验模型和机理模型的应用比较。

1 草场反射率模型介绍

几何光学 (GO) 模型假设树冠具有固定的几何形状, 受太阳光照射后, 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。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⁴。对于干旱与半干旱草场, 本文考虑裸露土壤和植被覆盖区域两种独立的成分。严格地说, 草冠层由新生的绿叶和衰老的枯叶组成, 绿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, 但它和土壤紧密的混杂在一起, 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:

$$R(\theta_s, \theta_o, \phi) =$$

$$G(Q_s, Q_o, \phi)K_G + C(\theta_s, \theta_o, \phi)K_C \quad (1)$$

其中, G 、 C 分别是裸地区和植被区的反射率; K_G 、 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。

假设植株在草场内呈泊松分布, 则有:

$$K_G = \exp(-\lambda m \pi r^2 [\sec \theta'_s + (\sec \theta'_o - O(\theta_s, \theta_o, \phi))]) \quad (2)$$

$$K_C = 1 - K_G \quad (3)$$

式中, λ 为泊松参数, m 为单位面积内植株的平均个数, r 是植株的平均水平半径, 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, 其中包含植株的形状参数 b/r (植株的垂直半径和水平

* 收稿日期: 2005-02-02

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

作者简介: 冯晓明 (1980 年生) 女, 博士研究生; E-mail: fengxm@mails.gscas.ac.cn

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. $\theta' = \tan^{-1}(b/r \tan \theta)$ 。

对于植被覆盖区的反射率, 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 400 ~ 2500 nm 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^[3]。模型如下:

$$C(\theta_s, \theta_o, \phi) = f_d C_d(\theta_s, \theta_o, \phi) + (1 - f_d) C_f(\theta_s, \theta_o, \phi) \quad (4)$$

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 McCartney 和 Unsworth (1978) 的公式计算直射入射光所占比例的光谱分布。 C_d 是冠层对直射太阳光的反射, C_f 是冠层对散射天空光的反射, 两者随着入射角和观测角的变化而变化。

$$C_d = C_d^C + C_d^G + C_d^{C \leftrightarrow C} + C_d^{C \leftrightarrow G} \quad (5)$$

$$C_f = C_f^C + C_f^G + C_f^{C \leftrightarrow C} + C_f^{C \leftrightarrow G} \quad (6)$$

其中, C_d^C 、 C_f^C 为冠层对入射的单次反射, C_d^G 、 C_f^G 为土壤背景对入射的单次反射, $C_d^{C \leftrightarrow C}$ 、 $C_f^{C \leftrightarrow C}$ 为冠层内部的多次散射, $C_d^{C \leftrightarrow G}$ 、 $C_f^{C \leftrightarrow G}$ 为冠层与土壤背景之间的多次散射, 均为 θ_s 、 θ_o 、 ϕ 的函数。

2 土壤模型

目前描述土壤的二向性反射光谱特征主要有经验模型和机理模型两种方法, 本文分别采用两种方法来模拟土壤的反射率, 并进行比较分析。

2.1 Price 和 Walthall 模型

土壤的辐射传输过程与很多因素有关, Price 等 (1990) 测量了来自美国、巴西和其他一些国家的 564 个土样, 对它们的反射率光谱进行 Gram-Schmidt 分析, 得到 10 个可以近似描述整个反射谱数据库的基向量, 对这些基向量作主成分分析, 并且在此基础上成功地实现了用 4 个基函数来描述土壤的整个反射谱, 使得参数的个数减少到了 4 个^[6]:

$$\rho_{\text{soil}}(\lambda) = S_1 \varphi_1(\lambda) + S_2 \varphi_2(\lambda) + S_3 \varphi_3(\lambda) + S_4 \varphi_4(\lambda) \quad (7)$$

其中, $\varphi_1(\lambda)$ 、 $\varphi_2(\lambda)$ 、 $\varphi_3(\lambda)$ 、 $\varphi_4(\lambda)$ 就是基函数, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 则表示 4 者的权重。由此得到的土壤反射率不具有方向信息。

Walthall (1985) 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。Nilson 和 Kuusk (1989) 进一步修正了该模型:

$$\rho_s(\theta_s, \theta_o, \phi) = \frac{\rho_s(\theta_s, 0, 0)}{e_0(\theta_s)} [e_0(\theta_s) + e_1(\theta_s) \theta_o \cos(\phi) + e_2(\theta_s) \theta_o^2] \quad (8)$$

其中 $e_0(\theta_s) = 16.41 - 4.3 \theta_s^2$, $e_1(\theta_s) = 7.363 \theta_s$, $e_2(\theta_s) = -4.3 + 7.702 \theta_s^2$

Price 公式计算得到的反射率作为输入。

2.2 Soilspect 模型

Hapke 模型是一个被广泛使用的土壤二向性反射模型。该模型考虑的是一个 $z=0$ 的水平表面, 包含有不规则的、方向随机的土壤颗粒, 颗粒的尺寸相对于波长来说很大。土壤接收方向为 (θ_s, ϕ) 、强度为 J 的入射辐射太阳能, 并且被方向为 $(\theta_o, 0)$ 的传感器观测, 散射角 g 指的是入射光和出射光的夹角。传感器所能观测到的辐射 I 为单次散射部分 I_s 和多次散射部分 I_m 之和:

$$I = I_s + I_m \quad (9)$$

其中,
$$I_s = \frac{J\omega(\lambda)}{4\pi} \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_s + \cos \theta_o} P(g) \quad (10)$$
$$I_m = \frac{J\omega(\lambda)}{4} \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_s + \cos \theta_o} \cdot [H(\cos \theta_s)H(\cos \theta_o) - 1] \quad (11)$$

其中, $H(x) = \frac{1+2x}{1+2x\sqrt{1-\omega}}$, ω 是指单次散射反照率, $P(g)$ 是散射相函数。

Chandrasekhar (1960) 研究表明, 对于一个半有界的介质, 单次散射部分 I_s 对颗粒的散射相函数的敏感度大于次散射部分 I_m 相对于散射相函数的敏感度。因此在计算单次散射的时候, 散射相函数采用实际值, 计算多次散射的时候, 假设散射是各向均一的。即 $P(g) = 1$ 。

Soilspect 模型在对 Hapke 模型改进的基础上得到的^[7]。根据 Legendre 多项式提出了一个散射相函数 $P(g, g')$, 可以同时解释来自光滑土壤表面的后向散射和前向散射 (镜面效应)。在此函数中, g' 表示镜面反射方向与出射光方向之间的夹角:

$$P(g, g') = 1 + b \cos(g) + \frac{c(3 \cos^2(g) - 1)}{2} + b' \cos(g') + \frac{c'(3 \cos^2(g') - 1)}{2} \quad (12)$$

$\cos(g) = \cos(\theta_s) \cos(\theta_o) + \sin(\theta_s) \sin(\theta_o) \cos(\phi)$
 $\cos(g') = \cos(\theta_s) \cos(\theta_o) - \sin(\theta_s) \sin(\theta_o) \cos(\phi)$
式中, b 、 c 、 b' 和 c' 为散射相函数参数。

把土壤假设为一个由很多气孔间隔开的若干块体组成的不连续系统, Hapke (1963) 引入了后向

散射函数 $B(g)$ ，该函数包含两个参数：散射角 g 和粗糙度 h ，描述热点效应大小的函数 B_0 ，通常 B_0 并不是严格地通过理论计算得到的，但是以往的研究经验表明： B_0 不确定下来会带来反演结果的不合理，因此我们把该值设定为 1，则完整的公式可以表示为：

$$I = \frac{J\omega(\lambda)}{4\pi} \frac{\cos\theta_s}{\cos\theta_s + \cos\theta_o} \{ P(g)[1 + B(g)] + H(\cos\theta_s)H(\cos\theta_o) - 1 \} \tag{13}$$
$$B(g) = \frac{B_0}{1 + \tan(g/2)/h} = \frac{1}{1 + \tan(g/2)/h}$$
$$H(x) = \frac{1 + 2x}{1 + 2x\sqrt{1 - \omega}}$$
$$P(g, g') = 1 + b\cos(g) + \frac{c(3\cos^2(g) - 1)}{2} + b'\cos(g') + \frac{c'(3\cos^2(g') - 1)}{2}$$
$$\cos(g) = \cos(\theta_s)\cos(\theta_o) + \sin(\theta_s)\sin(\theta_o)\cos(\phi)$$
$$\cos(g') = \cos(\theta_s)\cos(\theta_o) - \sin(\theta_s)\sin(\theta_o)\cos(\phi)$$

上述方程表明，对于给定的散射角 g ， h 增加会导致后相散射的增加，模型所需的参数为： ω 、 h 、 b 、 c 、 b' 和 c' 。

3 模拟与分析

我们根据覆盖度的不同，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 混合模型分别对三类对象进行计算。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也不一样。

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 1 km²）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的反射率等。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 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 ，使得裸土的反射光谱和实测的土壤反射光谱一致。还有部分参数可以根据资料确定下来，草场内植株干叶片中叶绿素含量 0.5%^[8]，参考前人的研究，叶片的折射指数确定为 1.4，叶片层数 N 定在 1.5^[9]，除此之外，我们假定草场内的叶角为均匀分布。一些无法确定的参数，如叶片的相对尺寸，我们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，表 1 给出反射率计算的模型输入参数列表。

表 1 中等退化草场反射率模型的冠层输入参数
Tab 1 Canopy attribute parameters of the reflectance model for the grassland of secondary degradation

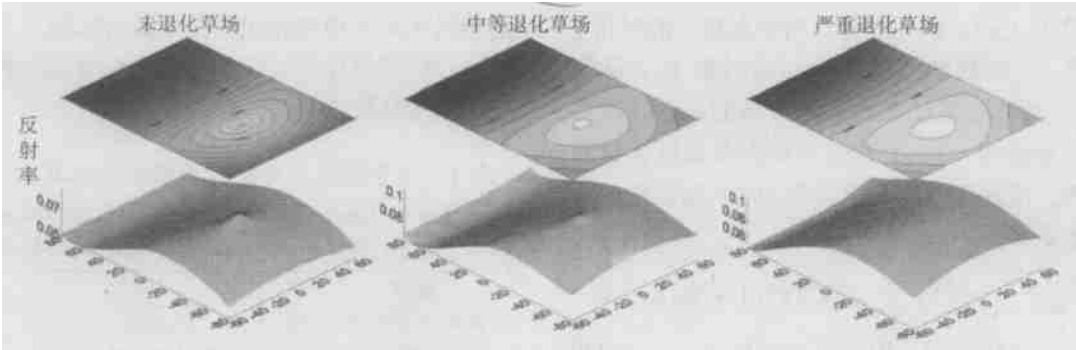
参数	值	参数	值
太阳高度角/℃	28	水含量/(%)	150
叶面积指数	0.6	叶绿素含量/(%)	0.5
叶片相对尺寸	0.06	干物质含量/(%)	99.4
Markov 参数	1.0	糖物质含量/(%)	0.2
叶角方差	0	叶片层数	1.5
叶角/℃	45	单位面积内草的数目	500
叶片折射指数	1.4	草的平均水平半径	0.07
叶干重/(g·m ⁻²)	52.6	垂直半径与水平半径之比	10

在上述基础上，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。

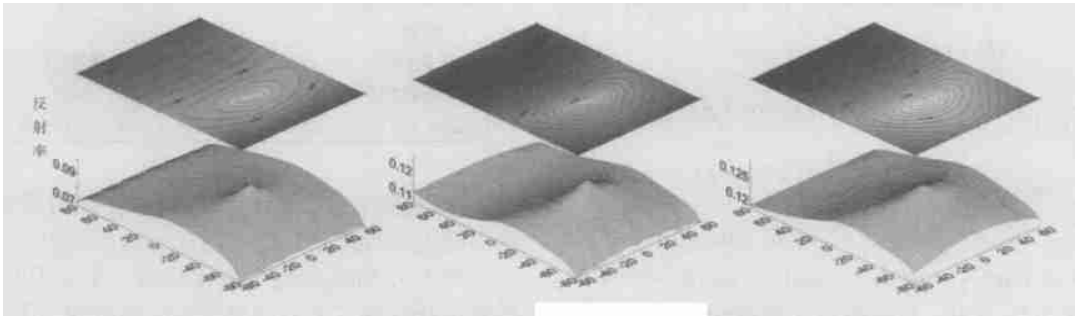
图 1 为 558 nm 处未退化草场、中等退化草场、严重退化草场三者的反射率角度分布图，由图可以看出：（a）图中未退化草场的反射率具有一定的“热点”效应，随着退化程度的增加，像元中土壤所占百分比增加，则“热点”效应减弱，最后消失。（b）图中，三种不同退化程度的草场均表现出了“热点”效应。这两种计算结果的差异是由不同的土壤反射模型引起的。研究表明，自然界中地物的反射普遍具有“热点”现象。因此土壤模型为 Soilspect 的反射率模型能够较好地反映草场的角度分布规律。

图 2 为中等退化草场天底方向的反射率光谱曲线，可以看出，由于土壤信息含量的不同，不同退化程度的草场反射率光谱也有明显差别。计算采用的是土壤模型为 Price+Walthall 的反射率模型。因为 Price 模型的参数少，根据实测的数据很容易获得。Soilspect 模型涉及的参数相对较多，其中土壤的单次散射反照率是波段的函数，需要足够多的实测光谱数据才能获得，这在一般的研究中难以实现，特别是区域性的研究。

我们把模型计算的结果和实测的卫星数据作了比较，为了突出土壤模型的作用，选取严重退化草场为对象，图 3 所示分别为红波段和近红外波段的模型计算值和多角度 MSR 数据的比较。图中计算值 1 为土壤模型为 Price+Walthall 的反射率模型值，计算值 2 为土壤模型为 Soilspect 的反射率模型值。



(a) 土壤模型为 Price+Walthall 的草场反射率



(b) 土壤模型为 Soilspect 的草场反射率

图 1 草场反射率角度分布图

Fig 1 Angular distribution of grassland reflectance

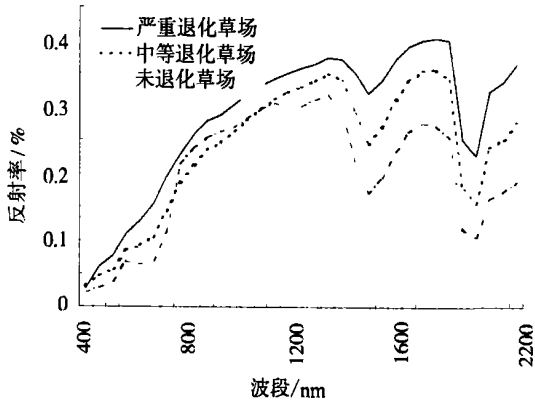


图 2 反射率光谱

Fig 2 Reflectance spectrum

表 2 中等退化草场反射率模型的参数

Tab. 2 Parameters of the reflectance model for the grassland of secondary degradation

参数	值	参数	值
权重 S_1	0.27	权重 S_2	0.0616
权重 S_3	-0.003	权重 S_4	-0.03
单次散射反照率 ω_{ssa}	0.87	粗糙度 h	0.078
散射相函数参数 b	0.31	散射相函数参数 c	0.21
散射相函数参数 b'	0.08	散射相函数参数 c'	0.08

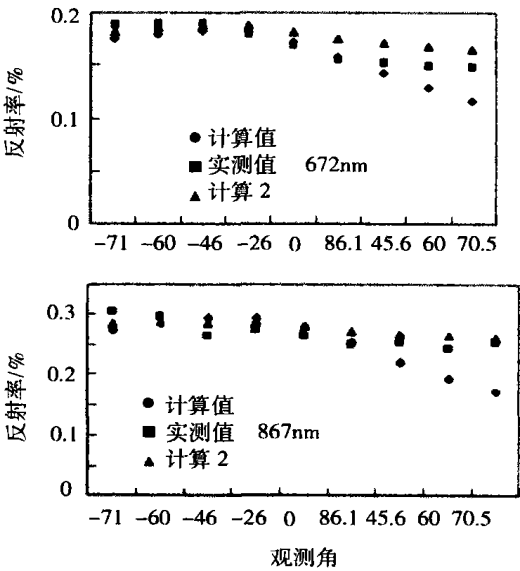


图 3 模型值与 MISR 数据的比较

Fig 3 Comparison between modeled reflectance and MISR data

从图 3 可以看出，两个模型的差异主要在前向散射部分，计算值 1 的前向散射相对于计算值 2 偏高，而实际的值居于两者之间。两模型计算的均方差(RMS)，红波段(672 nm)处分别为：0.0139、0.0137，近红波段(867 nm)处分别为：0.0372、0.0164。

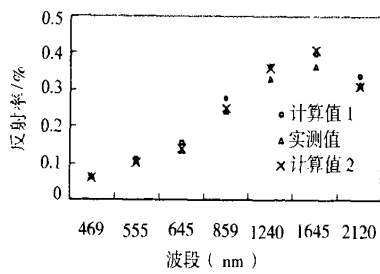


图 4 模型值与 MODIS 数据的比较

Fig. 4 Comparison between modeled reflectance and MODIS data

图 4 为模型值与多波段 MODIS 数据的比较，可以看出，两模型对于地物的光谱曲线都较好的拟和了，两者的均方差分别为：0.0258、0.0209。

4 结 论

本文建立半干旱草场遥感反射率模型，经过遥感观测数据验证可知，模型可靠。本文进一步比较了经验的 Price+Walthall 模型和机理的 Soilspect 模型对草场反射率模拟的影响，研究结果表明：

- (1) 采用 Price+Walthall 模型，模型参数较少，草场反射光谱模型值和遥感数据 MODIS 拟合较好，但是不能反映出草场反射的“热点”效应。
- (2) 采用 Soilspect 模型，模型参数多，特别是单次散射反照率随波段变化，在大部分区域研究中难以获得。模型模拟较好的表现出草场反射的“热点”效应。

Research on Remote Sensing-based Reflectance Model of Semi-arid Grassland in Inner Mongolia

FENG Xiao-ming^{1,2}, ZHAO Ying-shi¹

(1. College of Resources and Environment, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
2. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: Taking the work of Radiance Transfer model and Geometric-Optical model as the start point, arrived at a remote sensing-based reflectance model of semi-arid grassland. Considering the heavy exposure of the soil, compared and analyzed the influence of experiential soil model Price+Walthall and mechanical soil model Soilspect on reflectance of grassland. The result shows that the modeled reflectance is coincident with the remote sensing data. With Price+Walthall, parameters of the grassland model are few but the ‘hotspot’ is not evident. With Soilspect, the parameters of grassland are more and difficult to get. Better to choose the model according to the requirement. in the investigation of semi-arid grassland in Inner Mongolia.

Key words: semi-arid grassland; remote sensing; reflectance model; soil model

由此可知，不同的土壤模型应用于草场反射率的求算都存在有利和制约的因素，本文建议，模型应用时根据实测地面数据的多少来决定。地面数据较少时，土壤模型采用 Price+Walthall，反之，采用 SOILSPECT 模型。

本文所用的 MSR 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:

[1] VERHOEF W. Light scattering by leaf layers with application to canopy relectance modeling: the SAIL model[J] . Remote Sensing of Enviroment, 1984, 16: 125— 141.

[2] LI X, STRAHLE A H WILDCR C. A hybrid geometric optical— radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies[J] . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33: 446— 480.

[3] ANDRES KUUSK. A multispectral canopy reflectance Model [J] . Remote Sensing of Enviroment. 1994, 50: 75— 82.

[4] 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.

[5] 银山, 包玉海. 内蒙古沙尘天气生态环境背景遥感分析[J] . 水土保持研究, 2002, 3: 149— 151.

[6] JOHN C PRICE. On the information content of soil reflectance spectra[J] . Remote Sensing of Eenviroment, 1990, 33: 113— 121.

[7] JACQUEMOUD S, BARET. F PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra[J] . Remote Sensing of Enviroment, 1990, 34: 75— 91.