

文章编号: 1007-4619 (2003) 02-0081-05

植被单叶光谱特性的理论模拟

颜春燕, 蒋耿明, 王 成, 牛 铮, 王长耀

(中国科学院 遥感应用研究所, 遥感信息科学开放实验室, 北京 100101)

摘 要: 利用 PROSPECT 模型和实测的玉米叶片光谱数据, 得出了叶肉结构参数 N , 从而模拟了在不同的叶绿素和水分含量下玉米叶片的光学特性; 发现叶绿素对叶片吸收率的影响在可见光部分占了主导作用, 随着叶绿素含量的增加, 叶片的吸收率增加; 从近红外到 2400nm, 水分对吸收率的影响占据了主导地位, 此时, 随着水分含量的增加, 叶片的吸收率也开始增加。同时, 给定叶绿素和水分含量, 还模拟了当叶肉结构参数变化时的叶片的光学特性, 随着 N 的增大, 叶片的反射率逐渐增大, 并渐趋一致, 而透过率随着 N 的增加而逐渐减小, 最后也逐渐靠近。

关键词: 单叶; 光谱特性; 模拟

中图分类号: TP701 文献标识码: A

1 引 言

植被冠层的光学特性大部分取决于叶片和土壤的光学特性。利用高光谱分辨率数据的研究表明对从遥感方法获得的植被冠层的光谱信息的解译需要详细地了解叶片的光学特性^[1]。

由于叶片是与太阳能相互作用的最重要的植被界面, 因此了解叶片的生理过程(它将叶的光学特性与生物化学特性相联系)就显得尤为重要。特别地, 将叶片光谱特性与生化组分相联系成为优先考虑。有关的研究, 有两种不同的方法: 一种是建立叶片反射率(或透过率)与生化含量的统计关系^[2]; 另一种是基于光学法则的叶片内部光子传输物理模型。物理模型很好地解释了光与植被叶的相互作用过程。

在这些模型中, 辐射传输模型成功地在向前过程计算出了叶片的反射率和透过率, 本文所使用的 PROSPECT^[3] 叶光学特性模型是这些成功模型中的一个代表。

2 PROSPECT 模型简介^[3, 4]

2.1 模型的建立

PROSPECT 是一个基于 Allen^[5, 6] 的平板模型的

辐射传输模型, 它表述了植株叶片从 400nm 到 2500nm 的光学特性。

Allen 的平板模型将植被叶片看作一层紧密且透明的平板, 表面平行, 并且假设入射光线是各向同性的。然而, 在微观尺度上, 由于叶表面的形状的波动起伏, 入射光线是以 Ω 立体角内的入射方向穿透叶片的。经过对 Allen 的原始的平板模型的改进, 考虑进这个 Ω 角后, 总的反射率和透过率的公式可以表示为:

$$\rho_{\alpha} = [1 - t_{av}(\alpha, n)] + \frac{t_{av}(90, \alpha) t_{av}(\alpha, n) \theta^2 [n^2 - t_{av}(90, n)]}{n^4 - \theta^2 [n^2 - t_{av}(90, n)]^2} \quad (1)$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{t_{av}(90, n) t_{av}(\alpha, n) \theta}{n^4 - \theta^2 [n^2 - t_{av}(90, n)]^2} \quad (2)$$

其中, α 为定义立体角 Ω 的最大入射角; n 为折射指数; θ 为平板的透过系数; $t_{av}(\alpha, n)$ 为电解板表面的平均透过率, 它的表达式相当复杂, 但可以精确地计算出来^[7]; 式(1)和(2)还可以表示为:

$$\rho_{\alpha} = x^2 \rho_{90} + y \quad (3)$$

$$\tau_{\alpha} = x \tau_{90} \quad (4)$$

其中:

$$x = t_{av}(\alpha, n) / t_{av}(90, n) \quad (5)$$

$$y = x \left(t_{av}(90, n) - 1 \right) + 1 - t_{av}(\alpha, n) \quad (6)$$

收稿日期: 2001-11-07; 修订日期: 2002-01-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900)。

作者简介: 颜春燕(1975—), 女, 毕业于南京气象学院农业气象专业。现于中国科学院遥感应用研究所攻读博士学位, 研究方向: 植被遥感和全球变化。已发表论文 2 篇。Email: yanchunyan@263.net

当然, 这些并不是 PROSPECT 模型的最终形式。实际上, 上述模型还是将叶片看作一层紧密的叶, 而在许多情况(双子叶和老叶)下, 这个模型是不适用的。对上述模型继续进行改进, 假设每片叶是由 N 层同性层堆叠而成, 由 $N-1$ 层气体空间隔开。由于光线的非漫射特性只涉及到最顶层, 在改进后的模型中, 将第一层与其它 $N-1$ 层分开。第一层接收的是 Ω 立体角内的入射光线(入射角为 α), 令 ρ_α 和 τ_α 为它的反射率和透过率。在叶子内部, 假设光通量是各向同性的, 令 ρ_{90} 和 τ_{90} 为内部每层的反射率和透过率。整个 N 层叶片的反射率和透过率为:

$$R_{N, \alpha} = \rho_\alpha + \frac{\tau_\alpha \tau_{90} R_{N-1, 90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1, 90}} \quad (7)$$

$$T_{N, \alpha} = \frac{\tau_\alpha T_{N-1, 90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1, 90}} \quad (8)$$

同样地, 通过式(3)和(4), 式(7)和(8)也可以表示为:

$$R_{N, \alpha} = xR_{N, 90} + y \quad (9)$$

$$T_{N, \alpha} = xT_{N, 90} \quad (10)$$

x 和 y 与式(5)和(6)一样。而:

$$\frac{R_{N, 90}}{b_{90}^N - b_{90}^{-N}} = \frac{T_{N, 90}}{a_{90} - a_{90}^{-1}} = \frac{1}{a_{90} b_{90}^N - a_{90}^{-1} b_{90}^{-N}}$$

其中

$$a_{90} = \left[1 + \rho_{90}^2 - \tau_{90}^2 + \delta_0 \right] / \left[2\rho_{90} \right]$$

$$b_{90} = \left[1 - \rho_{90}^2 + \tau_{90}^2 + \delta_0 \right] / \left[2\tau_{90} \right]$$

$$\delta_0 = \sqrt{(\tau_{90}^2 - \rho_{90}^2 - 1)^2 - 4\rho_{90}^2}$$

这即为 PROSPECT 模型的最终形式, 可以看出, 这个模型需要 4 个参数: α, n, θ 和 N 。

2.2 模型参数的拟合

2.2.1 折射指数 n 和 α 角的确定

估计折射指数 n , 需要利用一片除去水分和色素的紧密叶。在 400nm 到 800nm 可以选择一片白化叶, 在近红外波段表现最小反射率和最大透过率的白化叶可以认为是最为紧密的, 它的反射率和透过率可以看作 $R_{1, \alpha}$ 和 $T_{1, \alpha}$ 的参考值。在 800—2500nm 选择一片干叶, 干叶不是很紧密, 它的 $R_{1, \alpha}$ 和 $T_{1, \alpha}$ 的获得通过 Allen 等^[4] 提出的方法。

各向同性的入射光 ($\alpha = 90^\circ$) 导致平均反射率 $r_w(\alpha, n) = 1 - t_w(\alpha, n)$, α 的拟合是通过调整 $r_w(\alpha, n) < R_{1, \alpha}$ 获得的。

获得了 $\alpha, R_{1, \alpha}$ 和 $T_{1, \alpha}$, 折射指数 n 通过下式拟合:

$$\left[T_{1, \alpha}^2 - [R_{1, \alpha} - 1 + t_w(\alpha, n)]^2 \right] [n - t_w(90, n)] - t_w(90, n) t_w(\alpha, n) [R_{1, \alpha} - 1 + t_w(\alpha, n)] = 0$$

2.2.2 结构参数的确定

理论上, N 是与叶内细胞排列相联系的参量。其拟合可以通过在吸收率最小的波长处调整 N 值, 使得 $(R - R_{N, \alpha})^2 + (T - T_{N, \alpha})^2$ 最小, 其中 R 和 T 为实验的反射率和透过率数据, $R_{N, \alpha}$ 和 $T_{N, \alpha}$ 为理论数据。

2.2.3 各组分的特定吸收光谱

模型中给出了一个透过系数 θ , 通过下式与吸收系数 k 相联系:

$$\theta - (1 - k) e^{-k} - k^2 \int_k^\infty x^{-1} e^{-k} dx = 0$$

而 k 可以表示为:

$$k = k_e + \sum_i \frac{c_i \cdot k_i}{N}$$

其中, c_i 为组分 i 的浓度; k_i 为相应组分的特定吸收系数; k_e 为白化叶的非零吸收, N 如前所述。

3 模型的应用

3.1 数据说明

模型所用数据是 2000 年 7 月到 9 月在中国科学院栾城农业生态实验站获得的玉米光谱数据。所用的光谱仪为美国 GER 公司生产的野外便携式光谱仪 MARK-V。该仪器的视场角较小 (6°), 可以减少背景因素的影响。该仪器采用双光路系统, 可以降低天气状况的影响。

实验中观测了玉米叶片不同生长时期(苗期、拔节期、扬花期、灌浆期、成熟期)的光谱数据。测量选择在晴朗无云的天气进行, 风力约 1—2 级, 观测时间为北京时间 10:00—14:00 之间。测量方式为摘取代表性的叶片实地测量, 摘取和测量控制在 2min 之内。

本文中以 7 月 12 日(苗期)玉米叶片光谱数据为例, 采用 PROSPECT 模型, 进行了光谱特性的模拟。

3.2 参数的模拟

3.2.1 折射指数 n 和 α

尽管 α 取决于反射表面的几何性质, 而且通常也随着植株的不同而不同, 在本文中, 我们也同样取它的最优值^[3] $\alpha = 59^\circ$ 。

模拟得到的折射指数如图 1, 叶肉界面物质的

折射指数接近于 1.4, 从 400nm 到 2400nm 规则地递减。

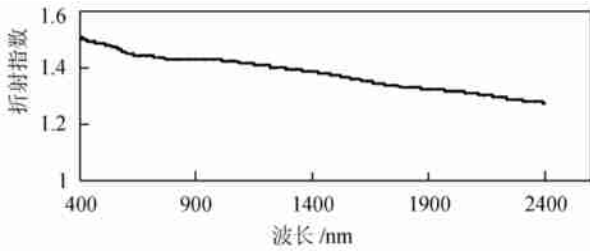


图 1 叶肉界面折射指数光谱

Fig. 1 Refractive index of mesophyll interface

3.2.2 结构参数

由于使用的光谱数据中没有透过率数据, 我们利用反射率数据, 通过在吸收率最小的波长处调整 N 值, 使得 $(R - R_{N, \alpha})^2$ 最小, 对 7 月 12 日的玉米, 得到 $N=2$ 。

另外, 我们也计算了拔节期、扬花期、灌浆期和成熟期的 N 值, 均为 2。这是与理论相吻合的, N 值是个与作物种类相联系的变量。当然, 对于老叶片, 由于内部结构无序, 其 N 值可能会远大于正常叶片^[3]。

3.2.3 水和叶绿素的特定吸收系数

在本文中, 我们假设叶的吸收仅是由水和叶绿素引起的。因此叶吸收系数 k 可以表示为 $k = k_e + (k_w \cdot c_w + k_c \cdot c_c) / 2$, 其中, k_w 为水的特定吸收系数, c_w 为水的含量; k_c 为叶绿素的特定吸收系数, c_c 为叶绿素的含量。本文采用 Jacquemoud^[3] 测量所得的活体的 k_w 和 k_c 。

3.3 光谱曲线的模拟

3.3.1 叶片反射率的模拟

给定不同的叶绿素和水分含量, 我们模拟了叶片的反射率曲线, 如图 2 和图 3。图 2 是在水分含量一定 (0.05cm) 的情况下, 给定 4 种不同的叶绿素含量得到的反射率曲线。图 3 是在叶绿素含量一定 ($20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) 的情况下, 给定 4 种不同的水分含量得到的反射率曲线。

在图 2 中, 当水分含量不变, 随着叶绿素含量的升高, 在可见光区 (400—800nm), 叶片的反射率降低, 大于 800nm 以后, 随着波长的增大, 反射率趋于一致直至重合。

图 3 的情况正好相反, 当叶绿素含量不变, 在可见光区, 随着水分含量的升高, 反射率没有什么变化, 当波长大于 800nm 后, 水分含量明显地影响了反射率的大小。随着水分的增加, 反射率降低。

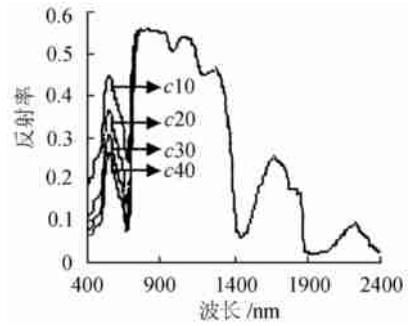


图 2 不同叶绿素含量下模拟的叶片反射率

Fig. 2 Simulated reflectance under different chlorophyll content

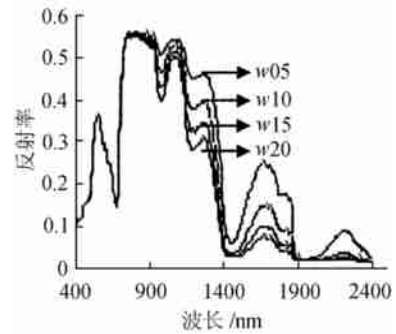


图 3 不同水分含量下模拟的叶片反射率

Fig. 3 Simulated reflectance under different water content

注: c10 表示叶绿素含量为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 依次类推, w05 表示水分含量为 0.05cm, 依次类推。

3.3.2 叶片透过率的模拟

与反射率的模拟一样, 我们给定相同的叶绿素和水分含量模拟叶片的透过率, 结果如图 4 和图 5。

从图 4 和图 5 可以看到, 透过率和反射率随叶绿素和水分含量的变化是一致的。

3.3.3 叶片吸收率的模拟

模拟出了叶片的反射率和透过率, 用百分之百减去反射率和透过率, 吸收率顺应产生。如图 6 和图 7。

由图 6、图 7 可见, 叶绿素对叶片吸收率的影响在可见光部分占了主导作用, 随着叶绿素含量的增加, 叶片的吸收率增加; 从近红外到 2400nm, 水分对吸收率的影响占据了主导地位, 此时, 随着水分含量的增加, 叶片的吸收率也开始增加。

上述结果可以从叶绿素和水分的特定吸收光谱^[3] (图 8、图 9) 获得解释, 由图 8、图 9 可以看到, 叶绿素仅在可见光部分存在吸收光谱, 从近红外光以后, 其吸收光谱为零; 而水分的情况正好相反, 在可见光区无吸收光谱。

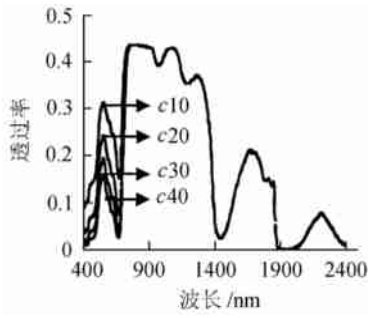


图 4 不同叶绿素含量下模拟的叶片透过率

Fig 4 Simulated transmittance under different chlorophyll content

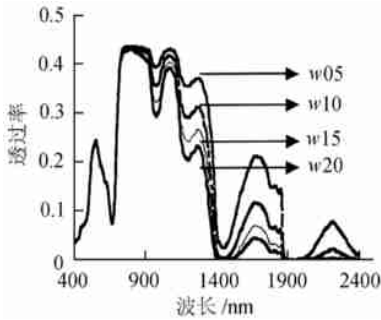


图 5 不同水分含量下模拟的叶片透过率

Fig 5 Simulated transmittance under different water content

注: c10 表示叶绿素含量为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 依次类推;
w05 表示水分含量为 0.05cm, 依次类推.

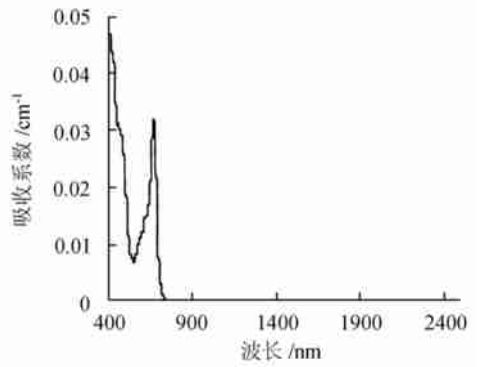


图 8 叶绿素的特定吸收光谱

Fig 8 Specific absorption index of chlorophyll

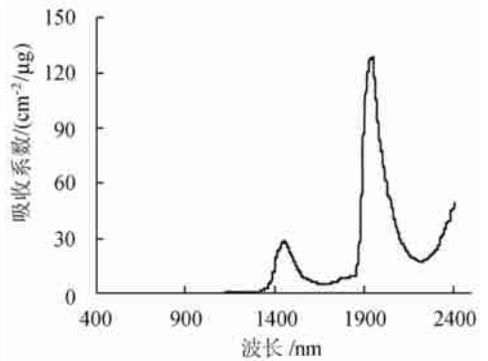


图 9 水分的特定吸收光谱

Fig 9 Specific absorption index of water

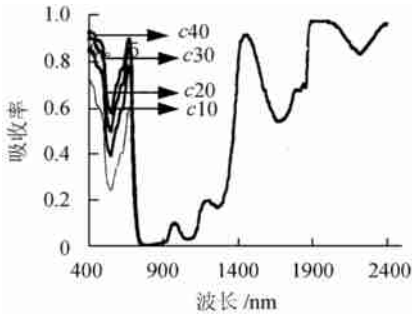


图 6 不同叶绿素含量下叶片的吸收率

Fig 6 Absorbance under different chlorophyll content

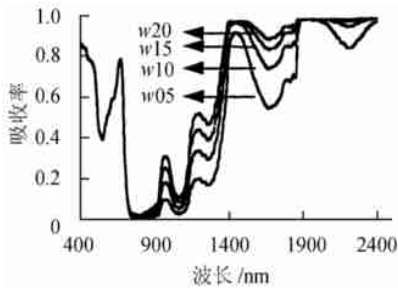


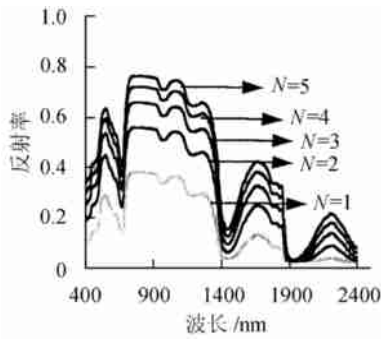
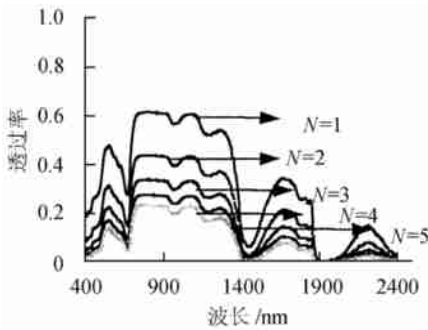
图 7 不同水分含量下叶片的吸收率

Fig 7 Absorbance under different water content

3.3.4 叶肉结构参数的影响

PROSPECT 模型的成功之处不仅在于辐射传输模型能够很好地解释光与叶片的作用过程, 还在于该模型需要的参数较少, 其正向过程需要的 4 个参数 α, n, θ 和 N , α, n 作为先验常数参数代入, 最终, 只需输入叶肉结构参数和考虑进的组分的含量, 即可模拟出不同的叶片的光谱特性。

本文中, 我们给定叶绿素和水分含量(叶绿素含量为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 水分含量为 0.05cm), 输入不同的叶肉结构参数 N (从 1 到 5), 模拟出了一系列的反射和透过光谱。 N 是一个与叶片内部结构有关的参数, 随着不同的植物种类而不同, 也因干叶或湿叶而不同, 基本上来说, 单子叶植物该值较小, 双子叶植物 N 值较大。对于同种类型的叶片, 干叶的 N 比鲜叶的 N 大。如图 10 和图 11, 随着 N 的增大, 叶片的反射率逐渐增大, 并渐趋一致, 而透过率的变化趋势正好相反, 随着 N 的增加, 透过率逐渐减小, 最后也逐渐靠近。这可能是由于失水导致叶片内部多重散射增加, 而透过率减小。

图 10 不同 N 值下的叶片反射率Fig 10 Simulated reflectance under different N 图 11 不同 N 值下的叶片透过率Fig 11 Simulated transmittance under different N

4 结论与讨论

本文利用 PROSPECT 模型, 模拟了不同叶绿素

水平, 水分状态及叶肉结构参数状态下的叶片的光谱特性, 获得了较好的效果。

当然, 不仅只有叶绿素和水分才会影响叶片的光谱特性, 因此, 本文只考虑到叶绿素和水的特定吸收光谱存在一定的局限性, 相信考虑进更多的化学组分(如 N , 纤维素, 木质素等等), 叶片的光谱模拟效果会更好。

参考文献 (References)

- [1] Vane G, Goetz A F H. Terrestrial Imaging Spectroscopy [J] . *Remote Sens. Environ.*, 1988, **24**: 1—29.
- [2] Niu Z, Chen YH, Sui H Z. *et al.* Mechanism Analysis of Leaf Biochemical Concentration by High Spectral Remote Sensing [J] . *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(2): 125—130. [牛铮, 陈永华, 隋洪智等. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析 [J] . 遥感学报, **4**(2): 125—130.]
- [3] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: a Model of Leaf Optical Properties Spectra [J] . *Remote Sens. Environ.*, 1990, **34**: 75—91.
- [4] Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J, *et al.* Estimating Leaf Biochemistry Using the PROSPECT Leaf Optical Properties Model [J] . *Remote Sens. Environ.*, 1996, **56**: 194—202.
- [5] Allen W A, Gausman H W, Richardson A J, *et al.* Interaction of Isotropic Light with a Compact Plant Leaf [J] . *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(10): 1376—1379.
- [6] Allen W A, Gausman H W, Richardson A J. Mean Effective Optical Constants of Cotton Leaves [J] . *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(4): 542—547.
- [7] Stem F. Transmission of Isotropic Radiation across an Interface between Two Dielectrics [J] . *Appl. Opt.*, 1964, **3**(1): 111—113.

Theoretical Simulation of Single Leaf's Optical Characteristics

YAN Chun-yan, JIANG Geng-ming, WANG Cheng, NIU Zheng, WANG Chang-yao

(LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: In this study using PROSPECT Model and in situ optical measurement of corn leaf, mesophyll structure parameter N of different growth phase as calculated. Based on this, given different chlorophyll and water content, corn leaf optical characteristics were modeled. It is found that in the visible region, chlorophyll dominates the optical characteristics, with the increasing of leaf chlorophyll content leaf reflectance and transmittance decrease and accordingly leaf absorptance increases while in the infrared region, water's effect prevails, with the increasing of water content leaf reflectance and transmittance decrease and accordingly leaf absorptance increases. At the same time, given fixed chlorophyll and water content, leaf optical characteristics varying with different mesophyll structure were simulated. It is found that with the increasing of N , leaf reflectance increases and reaches an asymptote while leaf transmittance decreases and reaches an asymptote also.

Key words: single leaf; optical characteristics; simulation