

植被叶片光谱及红边特征与叶片生化组分关系的分析*

梁守真^{1,2,3} 施 平¹ 马万栋¹ 邢前国¹ 于良巨¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003; 2. 中国科学院南海海洋研究所 广州 510301;
3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 以 LOPEX'93 数据集为基础, 利用最新的叶片光学模型——PROSPECT5 模型模拟了不同生化组分(叶肉结构参数、等效水厚、叶绿素、类胡萝卜素和干物质)含量叶片的反射率、透射率和吸收率光谱, 并在此基础上提取植被红边特征, 系统分析光谱和叶片生化组分的关系, 建立光谱特征与叶片生化组分的关系模型, 为生化组分反演提供一定的理论基础。结果表明, 在可见光部分, 叶片的光谱主要取决于叶肉结构参数和色素(叶绿素和类胡萝卜素); 在红外波段, 叶片的光谱主要受水分、叶肉结构参数和干物质含量的影响。不同的波段范围内, 光谱对生化组分的敏感度不同。叶片的红边特征不受水分和类胡萝卜素的影响, 但红边位置随叶绿素的增加向长波方向移动(红移)。红边斜率随内部结构参数的增加而增加, 两者之间的关系可用二次方程描述, 这为叶肉结构参数的求解提供了一个方向。

关键词 PROSPECT 模型 叶片生化组分 光谱 红边特征 LOPEX'93 数据集

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2010)04-0804-06

Relational analysis of spectra and red-edge characteristics of plant leaf and leaf biochemical constituent

LIANG Shou-Zhen^{1,2,3}, SHI Ping¹, MA Wan-Dong¹, XING Qian-Guo¹, YU Liang-Ju¹

(1. Yantai Institute for Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Using LOPEX'93 dataset, this paper simulated spectra reflectance, transmittance and absorptance of plant leaves under different biochemical constituents of leaf mesophyll structure parameter, water, chlorophyll, carotenoids and dry matter. The newest PROSPECT5 (leaf optical properties spectra) model was used for relational analysis of spectra and biochemical constituents as detected by vegetation remote sensing, on the basis of which red-edge characteristics were determined. The research task was to establish a model relating biochemical constituents to spectral characteristics via systematic relational analysis. Biochemical constituents of plant leaf should be inverted by the model. The results show that visible range of leaf spectra mainly depend on leaf mesophyll structure parameter and pigment (including chlorophyll and carotenoid). In the infrared range, leaf spectra largely depend on water, leaf mesophyll structure parameter and dry matter. Red-edge position moves towards long-wave with increasing chlorophyll, the so-called red-shift. Red-edge characteristics are not affected by water and carotenoid, and red-edge slope increases with increasing leaf mesophyll structure parameter. These relations are perfectly describable by di-order fitting equations. This lays the basis for solving mesophyll structure parameter issues.

Key words PROSPECT model, Biochemical constituent of plant leaf, Spectra, Red-edge characteristics, LOPEX'93 dataset
(Received Aug. 2, 2009; accepted Nov. 13, 2009)

植被叶片是植被冠层最重要的成分, 利用遥感技术获取的冠层光谱信息的解译需要叶片光学性质的详细信息^[1]。叶片的光学性质(反射、透射和吸收)

主要受其生化组分和物理特征的影响^[2]。目前有两种获取叶片光学性质的方法: 一是利用光学仪器实测, 二是采用叶片光学模型模拟叶片光学性质^[3]。相

* 山东省科技发展计划项目(2007GG2QT06019)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q07-01)资助

梁守真(1979~), 男, 博士生, 主要从事环境遥感研究。E-mail: liangshzh0816@163.com

收稿日期: 2009-08-02 接受日期: 2009-11-13

对于实测方法, 叶片光学模型有更多的优势, 并且从冠层反射率观测值反演叶片的生物化学组分也需要叶片的光学模型。PROSPECT (Leaf optical properties spectra) 模型是目前最成功的叶片光学模型之一, 在植被光谱研究中被广泛应用^[4-6]。

本文利用 PROSPECT 模型对不同组分条件下的叶片光谱进行模拟, 并提取光谱的红边特征(包括位置、斜率), 进而对其关系进行分析。目的是通过系统分析光谱和叶片生化组分之间的关系, 找出与生化组分高度相关的光谱特征, 从而为建立稳健的反演模型和进行生化组分反演提供基础。

1 模型与方法

1.1 PROSPECT 模型

PROSPECT 模型是基于 Allen 开发的平板模型的辐射传输模型^[7], 用于模拟植被叶片在可见光到短波红外(400~2 500 nm)的方向-半球反射率和透射率, 认为叶片光谱是叶片结构参数和生物化学参数的函数。在模型中, 散射过程可通过折射指数 n 和叶片叶肉结构参数 N 来描述, 吸收则利用叶片组分含量和相应的特定吸收系数的线性组合来描述^[8]。叶片的反射率 $R_{N, \alpha}$ 和透射率 $T_{N, \alpha}$ 可表示为:

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

$$T_{N, \alpha} = \frac{\tau_\alpha T_{N-1, 90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1, 90}} \quad (2)$$

式中各参数含义见参考文献[2]。

PROSPECT 模型模拟阔叶叶片的光谱, 仅产生 0.02~0.03 的误差, 且这种偏差几乎全部集中在可见光范围内^[5]。但对于针叶来说, 由于不满足 PROSPECT 模型的假设(针叶植被叶片的光谱模拟可采用 LIBERTY 模型^[9]), 该模型对其光谱仅能给出合理的描述^[10]。

PROSPECT 模型的输入一般包括 4 个参数: 叶肉结构参数(N)、叶绿素 a+b (Cab, $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)、等效水厚(Cw , cm)和干物质量(Cm , $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)。目前, 最新的 PROSPECT5 模型增加了类胡萝卜素 (Car, $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)吸收的计算^[11], 使其模拟精度更高。

1.2 红边特征

红边是指由于健康植被在红光波段强烈的吸收与近红外波段强烈反射, 使光谱反射率在 680~750 nm 之间陡然增加的窄条带区^[12]。红边特征一般包括红边位置 REP(Red-edge position)、红边斜率 RES(Red-edge slope)、红边面积 REA (Red-edge area) 等, 这些红边特征参数与植物叶绿素、生物量、氮、生长状态、物候等的变化有密切关系^[11,13]。红边位

置被定义为 680~750 nm 区间内反射率增高最快的点^[14], 也就是一阶导数光谱在该区间最大值所对应的波长; 红边斜率是红边位置对应的一阶导数值; 红边面积是 680~750 nm 波长范围内的反射率光谱对波长的积分值。相关的计算公式见参考文献[8]。

2 模拟数据——LOPEX'93 数据集

本文所利用的植物叶片生化组分数据来自于 LOPEX'93 数据集^[15], 该数据集包括 70 个叶片样本, 代表了 50 种木本和草本植物(4 种裸子植物、9 种单子叶植物、37 种双子叶植物), 全部来自于自然生长状态下的植被, 采集时间为初夏和初秋。除叶肉结构参数 N 外, 该数据集中包含了 PROSPECT 模型需要的所有生化参数。但由于针叶植被不适合采用 PROSPECT 模型来进行模拟, 因此数据集中只有部分叶片数据被采用, 本研究统计了所选取的叶片各组分含量(表 1)。

目前叶肉结构参数 N 仍无法用物理或化学方法实测获得。根据 Jacquemoud 等^[2]的研究, 温室绿色植被叶片的叶肉结构参数 N 范围为 1~2.5, 但自然条件下生长的植被并没有发现这种特性^[6], 因此不适合于 LOPEX'93 数据样本。但将其值范围设为 1~4 能够较好地拟合 LOPEX'93 数据集^[16]。

表 1 LOPEX'93 数据集

Tab. 1 LOPEX'93 dataset

	叶绿素 a+b (Cab) Chl. a+b ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	类胡萝卜 素 (Car) Carotenoids ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	等效水厚 (Cw) Equivalent water thick- ness (cm)	干物质量 (Cm) Dry matter content ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)
最小值 Min	16.5	3.7	0.004 6	0.001 87
最大值 Max	85.5	19.4	0.040 5	0.013 50
平均值 Mean	48.6	10.5	0.011 5	0.004 45

3 光谱模拟与结果分析

在利用 PROSPECT5 模型模拟叶片光谱时, 仅仅改变 1 个参数值, 而其他参数保持不变, 并取表 1 中组分的平均值。但叶肉结构参数 N 不变时, 将其设为 2。光线最大入射角 α 设为 59°。计算红边特征时, 为避免一阶导数值太小或出现负值, 将取其绝对值并乘以 1 000。

3.1 不同叶肉结构参数对叶片光谱的影响

3.1.1 叶肉结构参数对叶片光谱的影响

叶肉结构参数 N 代表叶片内同性层的数量。本研究模拟的 N 值范围为 1~4、步长为 0.5 时叶片光谱见图 1a。在 400~2 500 nm 波长范围内, 反射率波谱

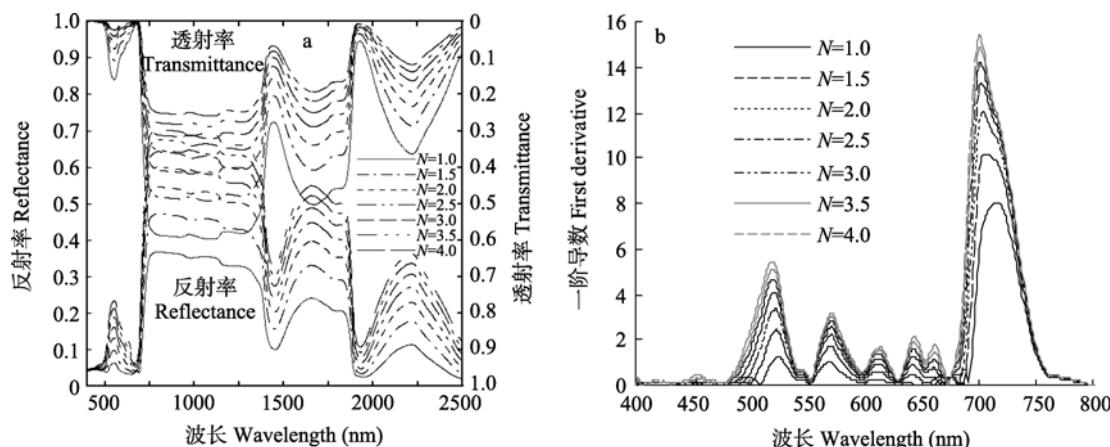


图1 不同叶肉结构参数N条件下模拟的叶片光谱(a)和一阶导数(b)
Fig. 1 Simulated spectra (a) and first derivative (b) of leaf under different mesophyll structure parameter N

形状和典型绿色植被波谱形状一致,有明显的吸收谷和反射峰。叶肉结构参数 N 值对 400~2500 nm 范围内的波谱都有影响。叶片反射率随着 N 值的增加而增加,但增幅逐渐减小。红外波段反射率增加是由于 N 值增加,即叶肉内部层数增多,对多次散射有增强作用,类似于多层叶片在近红外波段反射率的叠加效应。在可见光部分,反射率的变动范围小于近红外和短波红外波段,并且该波段内吸收谷处,反射率变化不明显。

叶片的透射率和反射率波谱形状相似,但随 N 值的增大透射率减小且变动幅度比反射率小,说明反射率对叶肉结构参数的敏感度高于透射率。当 N 为 1 时,除 400~500 nm 外,反射率值小于透射率,但随着 N 增加,反射率开始大于透射率。当 N 为 2 时,除 2 185~2 430 nm 外,反射率都大于透射率。

根据反射率、吸收率和透射率的关系(三者之和为 1),图 1a 中反射波谱和透射波谱中间的部分即为吸收率。吸收率变动很小。 N 为 4 时最小, N 为 3.5 时次之,其次是 N 为 3 时; N 为 1.5 时吸收率最大且和 N 为 2 时有几乎相同的吸收率,向下依次为 2.5 和 1。在 700~1 400 nm 范围内吸收率几乎不随 N 值变化,吸收率对 N 不敏感。

图 1b 为利用模拟光谱计算的反射率一阶导数。从图中可以看出,当 N 分别为 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 时,红边位置分别为 715 nm、705 nm、703 nm、701 nm、700 nm、700 nm、700 nm。由此可见,红边位置受 N 影响不大,随着 N 的增大,红边位置稍向短波方向移动,但 N 为 3 时便出现饱和。而随 N 的增加,相应的红边斜率分别为 8.04、10.19、12.01、13.26、14.21、14.92、15.46。可以看出,红边斜率对叶肉结构参数 N 极其敏感,红边斜率随 N 的增加而增加。叶肉结构参数 N 值和红边斜率可能存在某

种统计关系,通过这种统计关系可根据其中一个的值求解另一个的值。

3.1.2 叶肉结构参数和红边斜率的关系

为更好地分析叶肉结构参数 N 和红边斜率的关系,建立关系模型,将步长设为 0.2,重新进行叶片光谱模拟,同时保留步长为 0.5 的模拟数据,提取红边斜率。对叶肉结构参数 N 和红边斜率进行了两种不同的拟合:线性拟合和二次拟合(图 2)。两个拟合方程的 R^2 都在 0.9 以上,说明它们之间有较高的相关性;但线性拟合的残差平方和达到 8.24,而二次拟合方程的残差平方和只有 0.24。说明可以用二次拟合方程来解释叶肉结构参数 N 与红边斜率的关系。

3.2 叶绿素和类胡萝卜素含量对叶片光谱的影响

叶绿素和类胡萝卜素(包括胡萝卜素和叶黄素)含量的变化对叶片光谱的影响范围比较窄。叶绿素影响仅限于 400~800 nm(图 3a);而类胡萝卜素的影响范围更小,仅限于 400~600 nm(图 4);近红外和短波红外波段不受叶绿素和类胡萝卜素的影响。在可

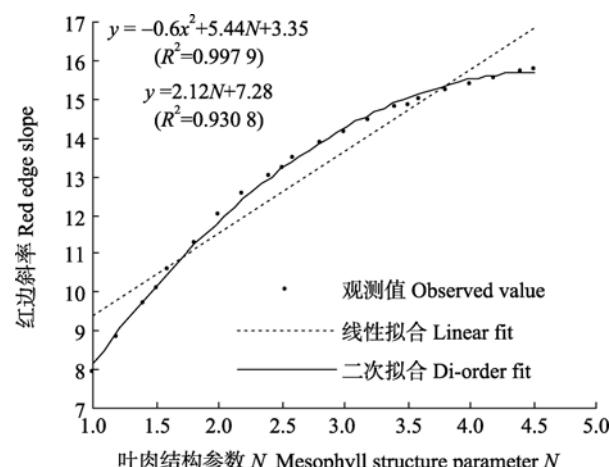


图 2 叶肉结构参数 N 和红边斜率的关系
Fig. 2 Relation between mesophyll structure parameter N and red edge slope

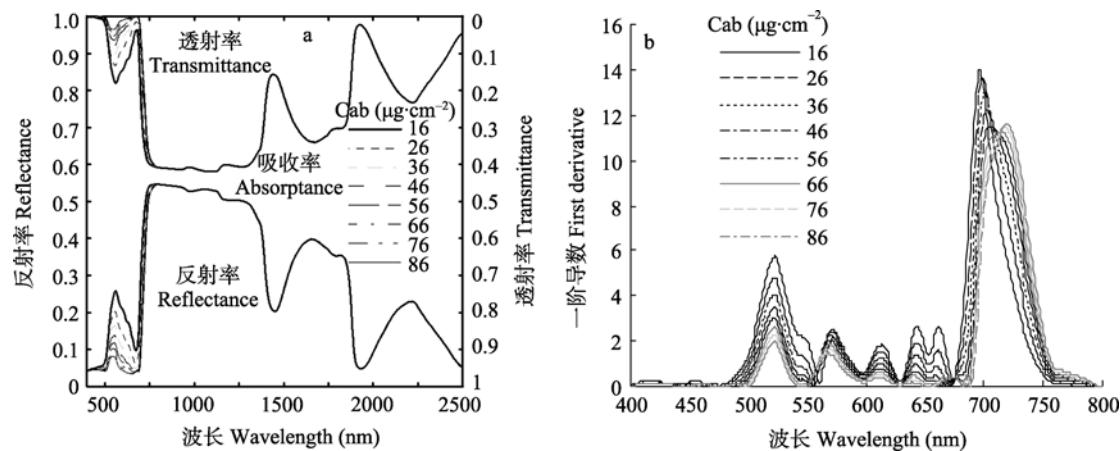


图3 不同叶绿素含量下模拟的叶片光谱(a)和一阶导数(b)
Fig. 3 Simulated spectra (a) and first derivative (b) of leaf under different chlorophyll contents

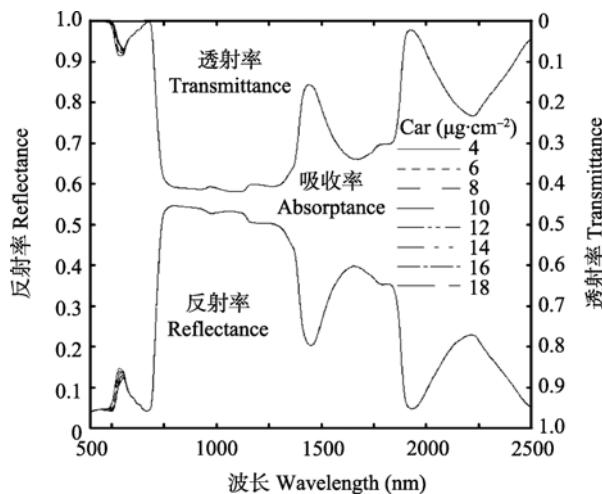


图4 不同胡萝卜素含量下模拟的叶片光谱
Fig. 4 Simulated spectra of leaf under different carotenoid contents

见光 400~800 nm 部分, 随着叶绿素从 $16 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加到 $86 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 反射率和透射率降低, 吸收率增加, 反射率和透射率峰值稍向短波方向偏移。在 400~600 nm 范围内反射率和透射率随类胡萝卜素增加而降低, 但变化很小; 透射率和反射率峰值随之向长波方向轻微移动。这可能是类胡萝卜素最大吸收带在蓝紫光部分导致的。

叶片的红边受叶绿素影响较大(图 3b), 但对类胡萝卜素不敏感。当类胡萝卜素发生变化时, 叶片光谱的红边位置和斜率保持不变, 分别为 703 nm、12; 当叶绿素含量分别为 $16 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $26 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $36 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $46 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $56 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $66 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $76 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $86 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 它们分别对应的红边位置分别为 697 nm、699 nm、700 nm、703 nm、704 nm、715 nm、718 nm、719 nm; 与之相对应的红边斜率分别为 13.97、13.67、12.96、12.18、11.5、11.3、11.43、11.58。由此可见, 随着叶绿素含量的逐渐增

加, 红边位置逐渐向长波方向移动。这主要是由于叶绿素含量增加, 植物光合作用增强, 需要消耗更多的长波光子。对于叶绿素和红边位置的关系, 研究人员已做了大量的研究^[17~19], 本文不再探讨。红边斜率和叶绿素之间关系不明显, 先是减小, 后来又随叶绿素含量增加稍有加大。

3.3 等效水厚对叶片光谱的影响

水分是新鲜叶片最主要的生化组分, 也是影响植物光合作用和生物量的主要因素之一^[20]。从图 5 可以看出, 水分的影响范围主要在近红外和短波红外波段, 而对 400~760 nm 波段范围没有影响, 760~900 nm 有非常轻微的影响, 一般情况下可以忽略不计。叶片在近红外和短波红外波段的反射率和透射率随着等效水厚的增加而降低, 尤其是在 1 400~2 500 nm 的短波红外范围内, 反射率和透射率降低最为明显。3 个明显的吸收谷为 975 nm、1 450 nm 和 1 925 nm, 其吸收深度和宽度随等效水厚的增

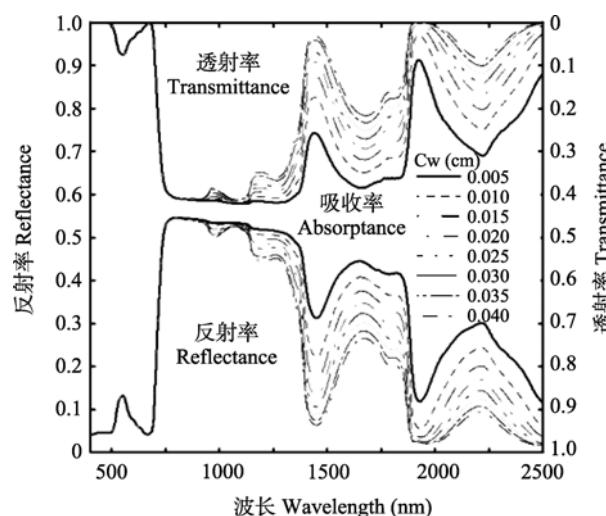


图5 不同等效水厚条件下模拟的叶片光谱
Fig. 5 Simulated spectra of leaf under different equivalent water thickness

加而加大。在红外波段吸收率随着等效水厚的增加而增加,但在可见光波段吸收率对水分不敏感。因此利用水吸收波段和反射率相对稳定的波段进行组合,可有效监测植被的缺水状况。

由于叶片在 400~760 nm 不受等效水厚的影响,所以叶片光谱红边特征也不会随着等效水厚的变化而发生改变,红边位置和斜率分别为 703 nm、12。

3.4 干物质对叶片光谱的影响

叶片的干物质是指叶片除去水分后所有物质总

和,主要包括木质素、纤维素、蛋白质和淀粉。从图 6a 可以看出,干物质的影响范围主要集中在近红外和短波红外波段。在此波段范围内,叶片的反射率和透射率随着干物质量的增加而降低,吸收率增加。而在透射率和反射率的波谷 1 380~1 400 nm、1 875~1 900 nm 处反射率和透射率只有轻微的变化。从图 6b 可以看出,红边位置不随干物质量的变化而移动,始终保持在 703 nm 处;红边斜率随干物质量增加呈下降趋势,从最大 12.19 下降到最小 11.36。

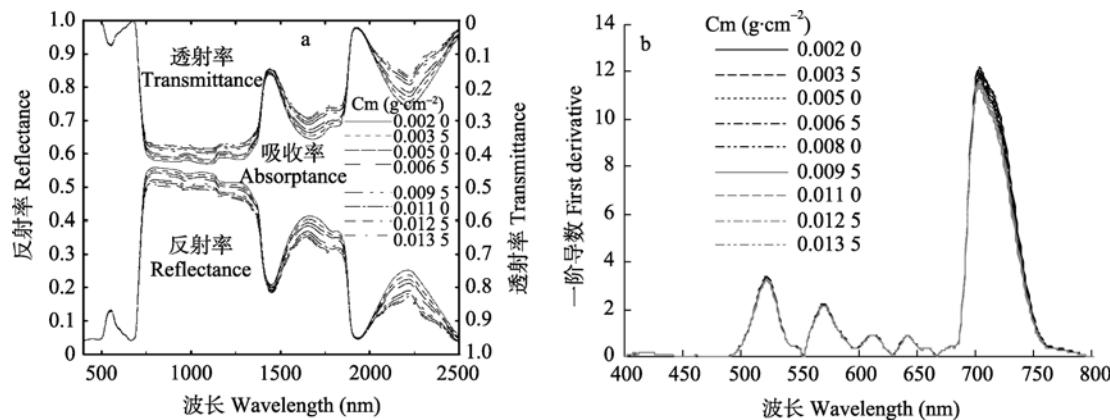


图 6 不同干物质下模拟的叶片光谱(a)和一阶导数(b)
Fig. 6 Simulated spectra (a) and first derivative (b) under different dry matter contents

4 结论

叶片的内部结构和生化组分决定了叶片的光谱,它们对叶片光谱影响范围、程度都有所不同。从生化参数到叶片光谱,是一个正演问题,也就是前向建模问题。利用遥感光谱数据获取叶片组分或属性,则属于反演问题。相对于正演,反演是遥感更为关注的问题。但反演需要了解光谱随组分的变化情况,从中寻找与生化组分高度相关的光谱特征,才能建立稳健的反演模型。PROSPECT 模型能根据叶片组分含量有效地模拟叶片光谱,本文采用 PROSPECT5 模型对不同组分含量情况下叶片的光谱进行了模拟,模拟结果很好地展示了叶片光谱随组分的变化情况。根据模拟光谱提取的红边特征发现,叶肉结构参数和红边斜率、叶绿素含量和红边位置高度相关。叶肉结构参数和红边斜率的关系可用一个二次方程完美地拟合,这为解决叶肉结构参数的求解提供了一个方向。对于叶绿素含量和红边位置的关系,目前已建立多个模型。但水分和红边特征无明显关系,因此对于水分的反演,目前最常用的方法是采用两个或多个波段相结合的方式,最常见的是归一化差异水体指数 NDWI^[21]。

本文系统地分析了不同组分对叶片光谱和红边特征的影响,但由于条件限制,研究中存在一定的缺陷,如模拟光谱所采用的参数只是各种植被新鲜叶片的总体统计数据,并非针对某一种植被;且为减少模拟次数,只让其中 1 个参数改变,其他参数保持不变,而实际上这种情况在自然条件下是不可能存在的,叶片的生化参数一般都是协同变化的。因此本文的研究是一种较为理想情况下(健康、新鲜叶片)的理论探讨。目的是希望通过模拟不同组分条件下叶片的光谱,从理论上寻求建立光谱特征和叶片组分定量关系的方法,为下一步利用遥感数据或地面实测光谱数据反演叶片组分含量奠定一定的理论基础。此外应注意的是,在利用遥感数据进行组分定量反演时,关系模型应建立在冠层光谱和叶片组分上。这是由于遥感传感器获取的是冠层的光谱,而不是单个叶片的光谱,即冠层光谱和叶片组分之间的关系,这也是以后需要研究的内容。

参考文献

- [1] Vane G, Goetz A F H. Terrestrial imaging spectroscopy[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 24: 1~29
- [2] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical

- properties spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34: 75–91
- [3] Liang S L. *Quantitative remote sensing of land surfaces*[M]. New Jersey: Wiley Interscience INC, 2004
- [4] 吴朝阳, 牛铮, 汤泉. 叶片光化学植被指数(PRI)的修正及其敏感性分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(9): 2014–2018
- [5] Feret J B, François C, Gregory P A, et al. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3030–3043
- [6] Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J, et al. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 56: 194–202
- [7] Allen W A, Gausman H W, Richardson A J, et al. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, 59: 1376–1379
- [8] Cho M A, Skidmore A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101: 181–193
- [9] Dawson T P, Curran P J, Plummer S E. A new technique for interpolating red edge position[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(1): 50–60
- [10] Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, et al. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(supplement): S56–S66
- [11] Feng Y, Miller J R. Vegetation green reflectance at high spec-
- tral resolution as a measure of leaf chlorophyll content[C]. *Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Calgary Alberta, 1991: 351–355
- [12] 赵英时. *遥感应用分析原理与方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [13] 代辉, 胡春胜, 程一松. 冬小麦冠层光谱红边特征分析[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 80–83
- [14] Ustin S L, Roberts D A, García M, et al. Remote sensing methods monitor natural resources[J]. *Photonics Spectra*, 1999, 33(10): 108–111
- [15] Hosgood B, Jacquemoud S, Andreoli G, et al. Leaf optical properties experiment 93 (LOPEX93) report[R]. Ispra (Italy) European Commission-Joint Research Centre, EUR-16095-EN, 1994
- [16] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 77(1): 22–33
- [17] Curran P, Hay A. The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, 52: 229–241
- [18] 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻指数及叶绿素密度的相关分析[J]. *遥感学报*, 2000, 4(4): 279–283
- [19] Jago R A, Cutler M E J, Curran P J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68: 217–224
- [20] 潘瑞炽. *植物生理学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [21] Gao B C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 257–266

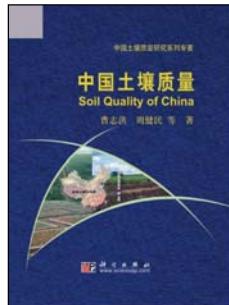
《中国土壤质量》(中国土壤质量研究系列专著)

曹志洪 等著 科学出版社出版

978-7-03-027130-3 ￥80.00 2010年4月出版

《中国土壤质量》一书在国家重大基础研究计划(973计划)项目课题“土壤质量指标的量化表达和评价咨询系统”和其他国家、省部级课题的研究成果, 以及长期以来在土壤质量指标与评价研究中所积累的研究成果的基础上编著而成。全书共分10章。系统介绍了土壤质量的概念与内涵及其研究的发展趋势, 阐述了土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤健康质量的指标体系与评价方法, 提出了中国重要土壤类型的土壤质量标准的建议方案, 以典型区域水稻土和蔬菜地为例揭示了土壤肥力质量和土壤环境质量的时空演变规律, 研发了基于实例分析的土壤质量评价咨询系统, 最后对中国土壤质量指标与评价的应用进行了简要展望。

本书可供土壤学、植物营养学、环境科学、生态学、土地科学及农学等领域的研究、教学和技术人员参考, 也可供各级政府的农业、环保、土地等部门参考。



购书联系: 科学出版社科学销售中心 周文字 电话: 010-64031535 E-mail: zhouwenyu@mail.sciencep.com

网上订购: www.dangdang.com www.amazon.cn

联系科学出版社: 010-64012501 www.lifescience.com.cn E-mail: lifescience@mail.sciencep.com