

文章编号: 1007-4619(2007)03-0289-07

# 叶片辐射等效水厚度计算 与叶片水分定量反演研究

刘良云, 王纪华, 张永江, 黄文江

(国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

**摘 要:** 在分析叶片水分对叶片反射率光谱影响的基础上, 结合叶片内部水、干物质、叶绿素等光谱吸收系数曲线特征, 分析了 975 nm 波长水气吸收特征处叶片与光线相互作用原理, 并利用 Beer 定律和 945 nm、975 nm 波长光谱反射率差值, 推导了 975 nm 波长辐射等效水厚度 REWT 的计算公式。由于表面反射、杂散射光、非均匀介质和叶片内部多次散射等因素, 光在叶片内部的辐射传输不能直接用 Beer 定律描述, 且利用 Beer 定律计算的 REWT 与叶片等效水厚度 EWT 之间会有较大的偏差。论文设计和获取了多植物、不同水分梯度的叶片光谱获取试验数据, 整理和分析了欧盟 Lopex<sup>93</sup> 数据, 利用这两组独立数据和论文提出的 REWT 计算公式, 对比验证了 975 nm 波长叶片 REWT 和叶片 EWT 的统计模型, 结果表明: 由于光在叶片内部的多重散射, REWT 是 EWT 的 3.3 倍左右。论文研究结果一方面为叶片 EWT 定量遥感探测提供了一种快速、简单且有较强通用性的计算方法和模型, 另一方面, 探测叶片 REWT 和 EWT 的定量关系, 有助于了解叶片内部的光辐射传输情况, 特别是间接了解近红外波段叶片内部的多重散射情况。

**关键词:** 等效水厚度; 辐射等效水厚度; 比尔定律; 光谱反射率

**中图分类号:** TP701 **文献标识码:** A

## Detection of Leaf EWT by Calculating REWT from Reflectance Spectra

LIU Liang-yun, WANG Ji-hua, ZHANG Yong-jiang, HUANG Wen-jiang

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The spectral characteristics and the interaction between leaf and light were analyzed based on the optical absorption coefficients of foliar biochemical contents and the method and equation to calculate the radiative-equivalent water thickness (REWT) of leaves were presented based on the reflectance difference between 945 nm and 975 nm bands. Because of surface direct reflectance and multi-scatter in the leaf, the REWT derived from Beer principle was quite different from the biochemical equivalent water thickness (EWT). The leaves spectra of different species at different water status were measured by our experiment and Lopex<sup>93</sup>, and the REWT values at 975 nm band were calculated based on the presented method. The relation between leaves' EWT and REWT was analyzed and tested from our experimental dataset and Lopex<sup>93</sup> dataset. The REWT was 3.3 times larger than EWT with a significant correlation coefficient ( $R^2$ ) of 0.80 for our dataset and 0.86 for Lopex<sup>93</sup> dataset. The results show that: (1) the REWT can be calculated from the reflectance difference between 945 nm and 975 nm, and it was reliable and significantly correlated with EWT; (2) the relation between REWT and EWT reflected the leaf internal light transfer and multi-scatter path-length in near-infrared bands was quite different from leaf thickness.

**Key words:** equivalent water thickness (EWT); radiative-equivalent water thickness (REWT); Beer principle; spectral reflectance

收稿日期: 2005-12-01; 修订日期: 2006-11-08; 录用日期: 2006-12-20. Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目: 国家 863 (编号: 2006AA10Z201) 和国家自然科学基金项目 (编号: 40301035, 40571118)。

作者简介: 刘良云 (1975—), 男, 研究员, 2000 年于中国科学院西安光学精密机械研究所获博士学位, 从事光学遥感及应用研究。

# 1 引 言

水分是植物的重要组分,水分亏缺直接影响作物的生理生化过程,从而对作物产量和品质造成影响。作物缺水会引起叶片在空间的伸展姿态、内部的形态结构、颜色、厚度等发生一系列的变化,从而引起叶片及冠层光谱反射率特性的变化。所以,利用作物光谱特性对叶片或植株含水量进行遥感诊断已成为农业遥感的热点。

叶片光谱特性由叶片水分、色素、干物质等对光吸收和散射的特性所决定<sup>[1]</sup>。叶片水分对叶片光谱的首要贡献是叶片含水量对入射光谱辐射的吸收,包括 975、1200、1450 和 1950 nm 等水分子振动的倍频或合频处的光谱吸收特征<sup>[2]</sup>;次要贡献为叶片细胞因含水量的变化而膨胀收缩,从而改变光在叶片内部的多次散射特性,并影响叶片近红外波段的光谱反射率<sup>[3-4]</sup>。

很多单叶和冠层水平的实验研究表明,由于叶片水分的光谱吸收,短波红外波段光谱反射率随叶片或冠层含水量的增加而减小<sup>[4-6]</sup>。尽管一些研究表明,某些波段的光谱反射率与叶片水分状况存在强负相关特性<sup>[4-6]</sup>,但更多的研究集中在如何利用光谱指数反演叶片水分。这些光谱指数主要目的是消除叶片内部结构造成的光散射差异或比叶重导致的干物质吸收光谱差异<sup>[7,8]</sup>。Gao 和 Hunt 等人利用近红外 NR 和短波红外 SWIR 两个波段的归一化比值指数反演了叶片等效水厚度 (EWT)<sup>[8,9]</sup>; Ceccato、Danson、Penúelas 等人利用近红外波段弱水汽吸收特征的两个窄波段光谱反射率的(归一化)比值指数建立了叶片 EWT 的遥感反演经验模型<sup>[3,10,11]</sup>。这些经验统计模型虽然有一定的机理解释,并成功用于叶片 EWT 反演,但机理解释为定性描述,而不是定量公式和模型,且不同试验数据测定的模型系数有较大差异,其通用性较弱。

本文在叶片光谱特性分析的基础上,通过引入辐射等效水厚度 (REWt) 的概念,利用 945 nm 和 975 nm 波长叶片反射率差值,并结合 Beer 定律,建立了单叶水平的 EWT 和 REWt 遥感反演的机理模型。并利用实验数据,对 EWT 和 REWt 遥感反演模型进行检验和验证。论文研究目的一是为叶片 EWT 定量光谱探测提供一种快速、简单且有较强通用性的计算方法和模型,二是通过探测叶片 REWt 和 EWT 的定量关系,分析近红外波段在叶片内部的

多次散射情况。

## 2 模型和方法

### 2.1 Beer 定律与光在叶片内部的辐射传输

Beer 定律能够定量描述光在均匀介质中的传输特性,即当一单色光通过一均匀介质时,其吸光度与光通过的介质厚度成正比。Beer 定律被广泛应用于样品浓度、含量检测,公式如下:

$$\ln \left( \frac{I_0}{I} \right) = -k \cdot \Delta \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为透过介质前、后的光强,  $k$  为消光系数,  $\Delta$  为检测物质的辐射等效厚度。

利用叶片反射率光谱诊断叶片养分信息,表面反射、杂散射光和非均匀介质等因素是引起 Beer 定律偏离的主要因素之一。其主要原因是:(1)光线通过叶片上下表面时,表面反射对叶片光谱反射和透过有很大影响;(2)入射能量来自于各个方向,不同入射方向的光线在叶片内部的传输路径有一定差异;(3)叶片内部不是均匀介质,细胞间多次散射改变叶片内部光传输路径。因此,利用 Beer 定律计算的辐射等效厚度与物质实际含量有一定偏差<sup>[12,13]</sup>。

研究叶片内部各种生化组分的辐射等效厚度与生化组分实际含量有重要意义,一方面,它可以为通过探测的辐射等效厚度来计算叶片生化组分实际含量提供依据;另一方面,也可以帮助了解光在叶片内部的辐射传输行为。

### 2.2 叶片含水量对叶片反射率光谱的影响

植株含水量的差异会对作物叶片和冠层光谱造成一定的影响。为了研究叶片与光辐射之间相互作用的机理,建立了许多叶片光学模型,其中 PROSPECT 叶片光学模型发展最成熟,且应用最广泛<sup>[14]</sup>。利用 PROSPECT 叶片光学模型可以定量模拟和分析叶片叶绿素含量、含水量、干物质、叶片结构参数等对叶片反射率光谱的影响。图 1 为模拟不同叶片含水量条件下的叶片反射率光谱(固定模型其他参数,结构参数 N 值为 1.5,叶绿素含量为  $55 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,干物质含量  $0.004 \text{g}/\text{cm}^2$ )。模拟结果表明,叶片含水量对叶片光谱反射率的主要影响为 975、1200、1450 和 1950 nm 等水分子振动的倍频或合频处的光谱吸收特征。由于叶片含水量变化通常还会改变叶片内部和表面结构,从而影响叶片表面直接反射和内部多次散射,尽管 PROSPECT 模型能

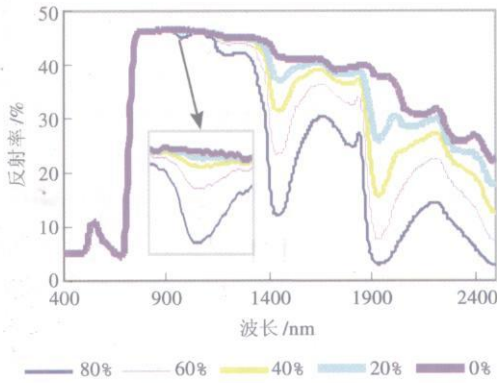


图 1 模拟不同含水量条件下的叶片光谱

Fig.1 The simulated leaf spectra under different water content

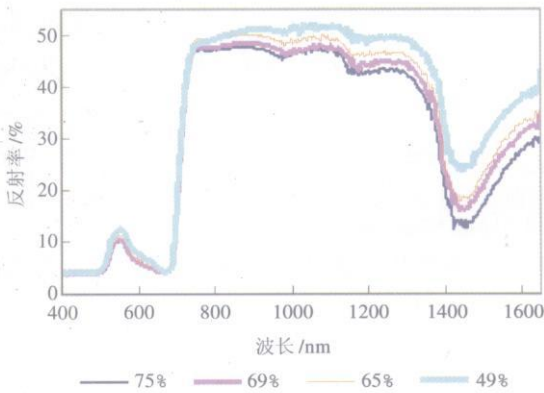


图 2 实测同一叶片、不同含水量条件下的叶片光谱

Fig.2 The measured leaf spectra under different water content

够较好模拟叶片内部物质吸收对光谱的直接影响,但这些间接光谱影响难以定量模拟。图 2 为论文试验实测的同一叶片、不同含水量条件下的叶片反射率光谱,结果也说明了叶片含水量对叶片光谱的主要影响。

### 2.3 叶片等效水厚度的光谱探测方法

利用叶片反射光谱的水气吸收特征有可能计算叶片的辐射等效水厚度 (REWT)。图 3 为叶片内部主要生化组分的光谱吸收率曲线<sup>[14, 15]</sup>。由图 3 可见,4 个水气吸收特征中的 975nm 水气吸收特征处,叶片色素、干物质等光谱吸收系数变化可以忽略(叶绿素吸收系数为 0,干物质吸收系数变化不到  $0.01 \text{ g/cm}^2$ ),但水气吸收系数从 945nm 处的 0 值变化到  $0.31 (\text{cm}^{-1} \text{ 或 } \text{g/cm}^2)$ ,具体数值见表 1。若假定 945nm 和 975nm 波长的叶片折射率、叶片内部粒子散射特性没有变化,则 945nm 和 975nm 波长的叶片光谱反射率差异是由于叶片内部水分吸收引起的。

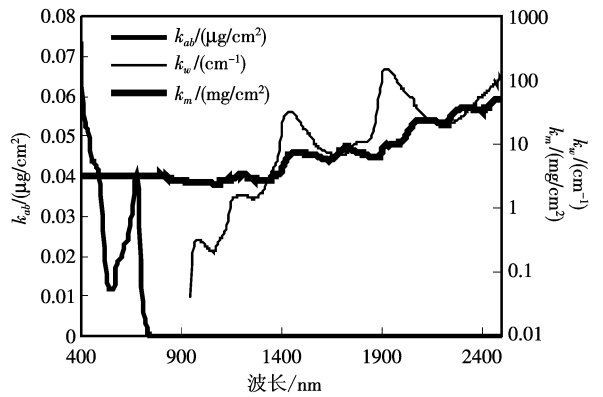


图 3 叶片内部主要生化组分光谱吸收系数

( $k_{ab}$ 、 $k_w$  和  $k_m$  分别为叶绿素、水分、干物质的光谱吸收系数)

Fig 3 Absorption coefficients of foliar biochemical contents

表 1 975nm 水汽吸收光谱特征附近叶片主要生化组分的吸收系数

Table 1 The absorption coefficients of leaf biochemical contents around 975nm bands

波长 /nm	干物质 /( $\text{mg/cm}^2$ )	水 / $\text{cm}^{-1}$
940	2.62	0
945	2.62	0
950	2.63	0.041
955	2.61	0.135
960	2.61	0.211
965	2.61	0.257
970	2.61	0.288
975	2.62	0.305
980	2.61	0.313
985	2.60	0.320
990	2.57	0.321
995	2.59	0.324
1000	2.56	0.305

光与叶片相互作用可以用图 4 表示。光强用  $I$  表示,  $I_0$  为入射到叶片表面的总能量,一部分能量被直接反射 ( $I_{R, \text{sur}}$ ),另一部分能量穿过叶片表面并进入叶片内部 ( $I_1$ )。进入叶片内部的光强 ( $I_1$ )与叶片内部细胞相互作用,经过多次散射分为三个部分,即叶片内部吸收能量 ( $I_a$ ),进入叶片内部多次散射并被反射回去的能量 ( $I_{R, \text{in}}$ ),多次散射并经透过叶片能量 ( $I_t$ ),传感器探测到的反射能量 ( $I_r$ )为表面

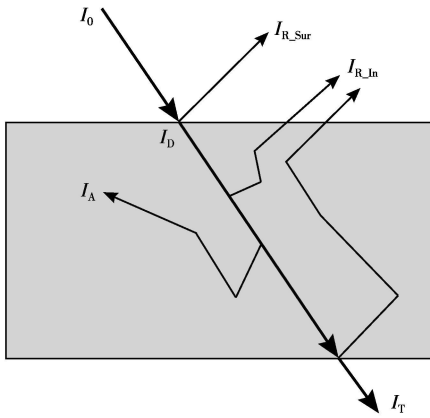


图 4 光在叶片内部的辐射传输

Fig 4 Interaction between light and leaf

反射和内部反射能量之和。用公式可以表示为

$$\begin{aligned} I_b &= I_{R,Sur} + I_b = I_{R,Sur} + (I_{R,In} + I_A + I_T) \\ &= I_A + I_R + I_T \end{aligned} \quad (2)$$

根据 Beer定律,利用漫反射技术探测叶片内部生化组分,吸收物质的吸光度为

$$\ln \left( 1 - \frac{I_b}{I_0} \right) = -k \cdot \Delta \quad (3)$$

利用反射光谱有可能计算叶片生化组分的辐射等效厚度。以叶片水分辐射等效厚度为列,利用 945nm 和 975nm 光谱反射率,计算反射率差值,它一方面可以消除叶片内部其他生化组分的光谱吸收,另一方面,还可以消除叶片表面反射等因素的影响。因此,利用 945nm 和 975nm 的光谱反射差值,可以计算 975nm 波长的辐射等效水厚度。推导公式如下,

$$\begin{aligned} -k_{Water,975} \cdot REWT_{975} &= \ln \left( 1 - \frac{I_{Water,975}}{I_{b,975}} \right) \\ &= \ln \left( \frac{I_{R,In,975} + I_{T,975} + I_{A,Other,975}}{I_{b,975}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $I_{Water}$  为相应波长叶片内部水分吸收能量,  $I_{A,Other}$  为叶片内部其他物质吸收能量,  $k_{Water}$  为水消光系数 (975nm 波长为  $0.31g/cm^2$ ), 下标 975 为 975nm 波长的光学参数,  $REWT_{975}$  为 975nm 波长的辐射等效水厚度,其他符号定义同公式 (2)。

若假定 975nm 与 945nm 波长处的叶片内部其他物质吸收能量相等,且忽略 945nm 波长的叶片水分吸收,公式 (4)可以近似为,

$$\begin{aligned} -k_{Water,975} \cdot REWT_{975} &\approx \ln \left( \frac{I_{R,In,975} + I_{T,975} + I_{A,Other,945}}{I_{b,975}} \right) \\ &= \ln \left( \frac{I_{R,In,975} + I_{T,975} + (I_{R,945} - I_{R,Sur,945} - I_{T,945})}{I_{b,975}} \right) \end{aligned}$$

$$= \ln \left( \frac{I_{R,975} + I_{T,975} + (I_{R,945} - I_{R,Sur,945}) - I_{R,945} - I_{T,945}}{I_{b,975}} \right) \quad (5)$$

下标 945 为 945nm 波长的光学参数,其他符号定义同公式 (4)。

若假定 945nm 和 975nm 波长处通过叶片上表面直接反射的能量 ( $I_{R,Sur}$ )相等,公式 (5)可以近似为,

$$\begin{aligned} -k_{Water,975} \cdot REWT_{975} &\approx \ln \left( \frac{I_{R,975} + I_{T,975} + I_{R,945} - I_{R,945} - I_{T,945}}{I_{b,975}} \right) \\ &= \ln \left( \frac{I_{R,945} + I_{R,975} + I_{R,975} - I_{R,945} - I_{T,945}}{I_{b,975} + I_{b,975} + I_{b,975} - I_{b,975} - I_{b,975}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

在前两个条件的基础上,进一步假定两个波长入射光源能量没有变化,且叶片表面直接反射 ( $I_{R,Sur}$ )相对较小,可以忽略,则公式 (6)可以近似为,

$$\begin{aligned} -k_{Water,975} \cdot REWT_{975} &\approx \ln \left( \frac{I_{R,945} + I_{R,975} + I_{R,975} - I_{R,945} - I_{T,945}}{I_{b,975} + I_{b,975} + I_{b,975} - I_{b,945} - I_{b,945}} \right) \\ &\approx \ln(1 - (\rho_{945} + \tau_{945} - \rho_{975} - \tau_{975})) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $\rho$ ,  $\tau$  为叶片光谱反射率和透过率,其他符号同公式 (2)~(6)。

对于连续波长光源,上述三个近似条件是合理的。因此,可以利用公式 (7)的叶片反射率和透过率,计算 975nm 波长的叶片 REWT。

考虑到叶片反射率光谱和透过率光谱的高相似特性,特别是近红外平台处其他物质的光谱吸收变化可以忽略,可以假定 945nm 和 975nm 波长的透过率差值与反射率差值存在高线性相关关系。因此, (7)式可以进一步简化为,

$$REWT_{975} \approx \frac{\ln(1 - (1 + \alpha)(\rho_{945} - \rho_{975}))}{k_{Water,975}} \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为 945nm 和 975nm 波长的透过率差值与反射率差值的比值系数。

### 3 试验与数据获取

#### 3.1 多种植物、不同水分梯度的叶片光谱获取试验

试验对象:试验于 2005 年 3 月在北京农林科学院开展,共收集了 14 个温室和野外种植植物的叶片,包括榕树、富贵竹、百合、元宝树、桔子、鸭掌木、巴西木、马拉巴栗、革叶榕、非洲茉莉、大叶伞、白鹤芋和蒲公英等。这些叶片特点是叶面均一,单个叶片的色素、干物质、水分等生化参数的空间变异较小;并且,这 14 种植物包含双子叶和单子叶植物,不

同植物间叶片厚度和比叶重变异较大,比叶重变化范围为 0.0025—0.0118mg/cm<sup>2</sup>,叶片含水量变化范围为 23.4%—83.5%。

**光谱测定:**每个植物挑选 1 片新鲜叶片。叶片光谱测定采用 ASD FieldSpec FR2500 光谱仪耦合 LI-1800LS 外置积分球方式,在室内条件下测定叶片的方向半球反射率光谱,即入射光源方向固定,通过计算半球方向的平均反射能量获得叶片光谱反射率<sup>[16]</sup>。

**生理生化参数测定:**每个叶片光谱测定后,迅速测定叶片重量和面积,然后将叶片放入干燥箱中,大约每自然风干 1 小时后作为一个水分处理梯度,对每个植物的叶片都设计了 8 个水分梯度,在 8 种风干状态下测定其叶片光谱和叶片重量。8 种水分梯度的光谱测定试验完成后,将叶片放入烘箱中烘干至恒重,获得叶片干重,并利用公式 (9), (10), (11) 分别计算不同植物的叶片比叶重 (SLW)、不同水分处理梯度试验所对应的叶片含水量 (LWC) 和叶片等效水厚度 (EWT)。

$$SLW (mg/cm^2) = \frac{\text{叶片干重} (mg)}{\text{叶片面积} (cm^2)} \quad (9)$$

$$LWC (\%) = \frac{\text{叶片鲜重} - \text{叶片干重}}{\text{叶片鲜重}} \times 100\% \quad (10)$$

$$EWT (cm) = \frac{\text{叶片鲜重} (g) - \text{叶片干重} (g)}{\text{叶片鲜重} (cm^2)} \times 100\% \quad (11)$$

### 3.2 Lopex93 试验数据

Lopex (The Leaf Optical Properties Experiment) 数据是由欧盟联合实验中心 (Joint Research Center JRC) 于 1993 年获取的<sup>[17]</sup>。试验收集了 JRC 附近方圆 50km 范围内 120 种植物的叶片,并测定了比较完整的配套生理生化属性数据。其中包含叶片反射率光谱、叶片比叶重、叶片含水量等选项的数据共 320 组。试验各项指标的测定方法与论文设计试验相同。论文选取了全部数据中单叶配套数据,一共 320 组,叶片的比叶重变化范围为 0.0017—0.0157mg/cm<sup>2</sup>,叶片含水量变化范围为 39.6%—92.6%,叶片等效水厚度变化范围为 0.004—0.066cm。

## 4 数据分析与模型检验

### 4.1 叶片等效水厚度的光谱探测模型参数定标

利用 945nm 和 975nm 波长的反射率差值计算

叶片 REWT 需要对公式 (8) 中的  $\alpha$  系数进行参数定标。 $\alpha$  为 945nm 和 975nm 波长的透过率差值与反射率差值的比值系数。该参数可以利用 Lopex93 试验数据,通过经验统计方法计算。图 5 为 945nm 和 975nm 波长的透过率差值与反射率差值的统计散点图,结果表明  $\alpha$  值为 0.6404。

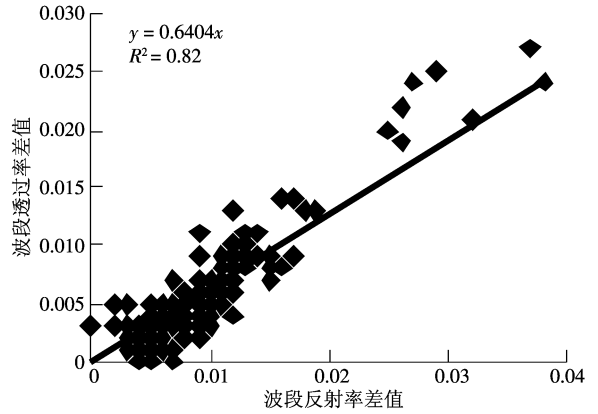


图 5 945nm 和 975nm 波段反射率差值与透过率差值关系  
Fig 5 Relation between reflectance difference and transmittance difference at 945 and 975nm

### 4.2 叶片辐射等效水厚度与叶片等效水厚度的关系

根据公式 (8), 可以计算叶片辐射等效水厚度,通过建立叶片辐射等效水厚度 REWT 与叶片等效水厚度 EWT 的关系,就可以利用光谱数据诊断叶片水分状况。

图 6 为利用 Lopex93 试验数据计算的叶片 975nm 波长的 REWT 与叶片 EWT 的统计散点图。图 7 为利用试验 I 数据计算的叶片 EWT 和 REWT 的统计散点图。结果表明,叶片 REWT 和 EWT 存在稳定且极显著的正相关关系,且叶片 REWT 都是 EWT 的

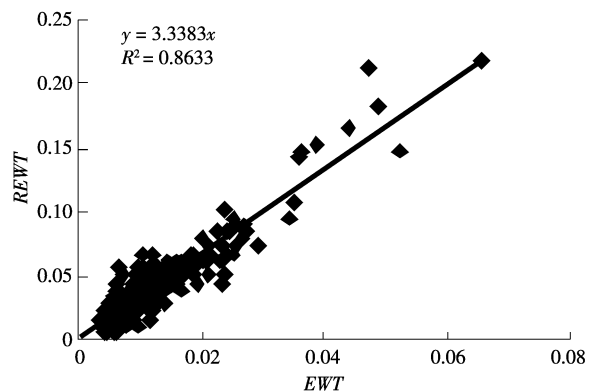


图 6 Lopex93 数据计算的叶片 EWT 与 975nm REWT 关系  
Fig 6 Relation between EWT and REWT from Lopex93 dataset

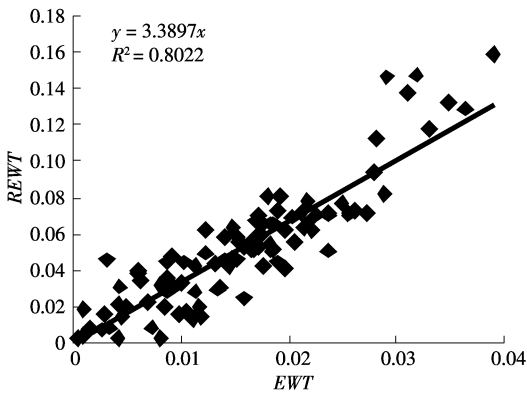


图 7 北京数据计算的叶片 EWT 与 975nm REWT 关系

Fig 7 Relation between EWT and REWT from our dataset

3.3 倍左右。因此,利用 945nm 与 975nm 波长的光谱反射率差值,结合 Beer 定律计算叶片 REWT,从而可以探测叶片的 EWT。

图 6 和图 7 不仅阐明了叶片 REWT 与 EWT 存在稳定可靠的关系,还间接反映了近红外波段光线在叶片内部的多次散射信息,即 975nm 波长的光线在叶片内部的散射路径相当于 3.3 倍的叶片厚度。

## 5 结论与讨论

叶片生化组分遥感监测研究文献非常丰富,主要包括经验统计方法和基于辐射传输模型的数值迭代反演方法。其中经验统计方法虽然简单,模型外推性十分有限,不同用户需要为自己实验获取模型验证数据;而辐射传输模型机理解释性好,通用性较强,但模型迭代反演算法较复杂。本文在分析叶片光谱特征基础上,提出了通过 945nm 和 975nm 波长光谱反射率差,进而利用 Beer 定律推导叶片辐射等效水厚度 REWT 的计算方法。并利用两套独立数据,建立和比对验证了叶片 REWT 和 EWT 的统计模型,结果表明 REWT 是 EWT 的 3.3 倍左右。论文两套独立实验验证数据的叶片种类多,代表性较好。因此论文提出的 EWT 探测方法不仅机理解释性好,算法简单,而且对比试验结果表明模型通用性好。

本研究结果在实际应用时,还需要考虑如下问题:

(1) 论文实验获取的光谱数据是利用积分球测定的方向一半球反射率光谱,由于叶片存在二向反射特性(BRDF),因此应用到方向一方向反射率时,模型参数还需要进行验证。

(2) 论文方法和试验是在叶片水平上开展的,推广到冠层遥感应用时,一方面观测 REWT 和冠层 EWT 的模型系数可能会有一定变化;另一方面,还需要考虑土壤表面反射、土壤水分和大气水汽吸收的影响。

(3) 由于叶片内部散射机制和特征与波长有关,975nm 波长叶片 REWT 和 EWT 关系应用到其他波长时,模型系数会有一定差异,既便可以计算 REWT,但不能直接应用模型中的系数探测 EWT。

(4) 论文采用了文献[15]的纯净水的水气吸收系数,实际叶片内部水分吸收系数可能会有一定偏差,从而影响 REWT 和 EWT 的比例系数,但不会影响和降低论文方法的 EWT 的反演精度。

(5) 论文提供叶片水分等效厚度方法对其他物质光谱探测也是有参考价值的,主要困难是相应物质辐射等效厚度计算和辐射等效厚度与真实等效厚度的模型定标。

## 参考文献 (References)

- [1] Gates D M, Keegan H J, Schleter J C, et al. Spectral Properties of Plants[J]. *Applied Optics*, 1965, **4**: 11–20.
- [2] Palmer K F, Williams D. Optical Properties of Water in the Near Infrared[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, **64**: 1107–1110.
- [3] Liu L Y, Wang J H, Huang W J, et al. Estimating Winter Wheat Plant Water Content Using Red Edge Parameters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(17): 3331–3342.
- [4] Cater G A. Primary and Secondary Effects of Water Content on the Spectral Reflectance of Leaves[J]. *American Journal of Botany*, 1991, **78**(7): 916–924.
- [5] Aldakheel Y Y, Danson F M. Spectral Reflectance of Dehydrating Leaves: Measurements and Modeling[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**: 3683–3690.
- [6] Ceccato B, Flasse S, Tarantola S, et al. Detecting Vegetation Leaf Water Content Using Reflectance in the Optical Domain[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **77**: 22–33.
- [7] Tucker C J. Remote Sensing of Leaf Water Content in the Near-infrared[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, **10**: 23–32.
- [8] Gao B C. NDWI: A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing Vegetation Liquid Water from Space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **52**: 257–266.
- [9] Hunt E R, Rock B N. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-infrared Reflectances[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, **30**: 143–154.
- [10] Danson F M, Steven M D, Malthus T J, et al. High-spectral Resolution Data for Determining Leaf Water Concentration[J].

- International Journal of Remote Sensing 1992, **13**(3): 461–470.
- [11] Penñelas J, Pinol J, Ogaya R, et al. Estimation of Plant Water Concentration by the Reflectance Water Index  $WI(R900/R970)$  [J]. International Journal of Remote Sensing 1997, **18**(13): 2869–2872.
- [12] Yan Y L. Fundamentals and Application of Near-infrared Reflectance Spectroscopy [M]. Beijing: Light Industry Press 2005. [严衍禄. 近红外光谱分析基础与应用 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.]
- [13] Downing H G, Carter G A, Holladay K W, et al. The Radiative-Equivalent Water Thickness of Leaves [J]. Remote Sensing of Environment 1993, **46**(1): 103–107.
- [14] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra [J]. Remote Sensing of Environment 1990, **34**: 75–91.
- [15] Curcio J A, Petty C C. Extinction Coefficients for Pure Liquid Water [J]. Journal of the Optical Society of America 1951, **41**: 302–304.
- [16] LICOR Inc. LI-1800 Portable Spectroradiometer Instruction Manual [M]. Publication No. 8210-0030. Nebraska USA. 1989.
- [17] The JRC Leaf Optical Properties Experiment (LOPEX '93). <http://www.sigm7.jussieu.fr/Led/>