

文章编号: 1672-8785(2016)09-0001-07

基于 PROSAIL 模型的高光谱 遥感图像模拟研究

莫云华^{1,2} 张文娟^{2*} 张连蓬¹

(1. 江苏师范大学城建与环境学部, 江苏徐州 221116;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘 要: 针对高光谱图像数据难以获取的情况, 提出了一种基于 PROSAIL 辐射传输模型的高光谱图像模拟方法。首先, 对 PROSAIL 模型的输入参数进行了敏感性分析。以此为基础, 针对 5 个典型生化参数 (叶片结构参数 N 、叶绿素含量 C_{ab} 、叶片干物质含量 C_m 、类胡萝卜素含量 C_{ar} 和叶面积指数 LAI), 基于支持向量机构建了一种基于多光谱数据的参数计算模型。其次, 根据得到的典型生化参数图, 通过利用 PROSAIL 模型逐像元计算获得了高光谱模拟图像。对 HJ1A 环境卫星的 CCD1 多光谱图像数据进行了实验, 实现了高光谱图像数据模拟。在将等效计算后的模拟结果与 HJ1A CCD1 多光谱图像数据进行对比后发现, 两幅图像对应波段的平均结构相似度都超过了 95%; 除了蓝光波段之外, 全图的相对误差均小于 10%。结果表明, 本文方法可以很好地实现基于多光谱数据的高光谱图像模拟。

关键词: 图像模拟; 高光谱; 植被; 辐射传输模型; PROSAIL

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.09.001

Simulation of Hyperspectral Remote Sensing Image Based on PROSAIL Model

MO Yun-hua^{1,2}, ZHANG Wen-juan^{2*}, ZHANG Lian-peng¹

(1. Department of Urban Construction and Environment, Jiangsu Normal University,

Xuzhou 221116, China; 2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: For the case that it is difficult to acquire hyperspectral image data, a hyperspectral image simulation method based on the radiation transfer model PROSAIL is proposed. Firstly, the sensitivity analysis of the input parameters of the PROSAIL model is carried out. On this basis, a parameter calculation model based on a support vector machine is established for five typical biochemical parameters (leaf structure parameter N , chlorophyll content C_{ab} , leaf dry matter content C_m , carotenoid content C_{ar} and leaf area index LAI). Secondly, simulated hyperspectral images are obtained through pixel by pixel calculation by using the PROSAIL model according to the typical biochemical parameters. The multispectral

收稿日期: 2016-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41325004; 41271370); 国家科技重大专项 (高分辨率对地观测系统); 中科院遥感数字所所长青年基金项目 (Y5ZZ11101B)

作者简介: 莫云华 (1989-), 男, 江苏淮安人, 硕士, 主要从事光学遥感图像模拟方面的研究。

*** 通讯作者:** E-mail: zhangwj@radi.ac.cn

ectral image data from CCD1 onboard the environmental satellite HJ1A are used to realize the simulation of hyperspectral image data. After the equivalent simulation results are compared with the multispectral image data, it is found that the average structure similarity of the corresponding bands of two different images is greater than 95%. Except the blue color band, the total relative error is less than 10%. This shows that the proposed method can be used to realize the simulation of hyperspectral images based on multispectral data.

Key words: image simulation; hyperspectral; vegetation; radiative transfer model; PROSAIL

0 引言

由于高光谱遥感数据具有光谱分辨率高的特点,人们可以利用高光谱遥感技术对宽波段遥感中难以探测的物质进行探测^[1]。但是,通过在轨运行的高光谱卫星却难以获得大量的高光谱图像数据。而利用图像模拟技术则可计算生成高光谱图像数据,从而为遥感研究提供数据支撑^[2]。

目前,高光谱图像模拟方法主要分别基于光谱库数据、基于现有遥感数据和基于物理模型的图像模拟方法^[3]。其中,基于物理模型的图像模拟方法能够获得较高的精度,而且适用范围广泛。由于该方法能够模拟不同遥感器的数据,本文基于这种方法开展研究工作。对于植被覆盖区域来说,利用叶片-冠层耦合模型可以较好地模拟冠层反射率。具体的叶片-冠层耦合的反射率模型现已有多种,其中由 PROSPECT+SAIL 构成的 PROSAIL 模型是应用最为广泛的模型之一。它主要针对阔叶植被冠层,并根据植被结构、生化参数和观测几何等来生成地表反射率光谱。

由此可见,使用 PROSAIL 模型可以模拟不同时空条件下的遥感数据,但是模型输入参数的精度会直接影响模拟图像的准确性,因此获得较为精确的模型输入参数显得非常关键。目前,地表参数主要是基于多光谱数据计算获得的,所以本文针对多光谱数据,获得地表参数图,进而基于 PROSAIL 模型进行高光谱图像模拟。

在地表参数获取方面,作为一种机器学习算法,支持向量机在模型预测和参数反演中应用得越来越多。它是 Vapnik V N 等人于 1995 年

在统计学习理论的基础上提出的一种新型机器学习算法^[4]。任晓和谢巧云等人利用支持向量机对叶绿素含量、叶面积指数等植被生化参数进行了反演,并取得了不错的实验结果,进而证明了支持向量机方法的普适性^[5-8]。由此可见,支持向量机在反演植被生化参数方面具有一定的优势。

因此,本文针对 PROSAIL 模型中的典型参数,采用支持向量机分别构建计算模型,以获得典型参数图,进而利用 PROSAIL 辐射传输模型计算高光谱模拟图像。

1 研究方法

首先,对 PROSAIL 模型的输入参数进行分析以确定待计算的生化参数;然后针对多光谱图像,基于支持向量机回归方法构建生化参数计算模型;最后,通过计算得到生化参数图,并利用耦合的叶片-冠层辐射传输模型 PROSAIL 得到高光谱模拟图像。图 1 所示为基于 PROSAIL 模型进行高光谱图像模拟的技术路线。

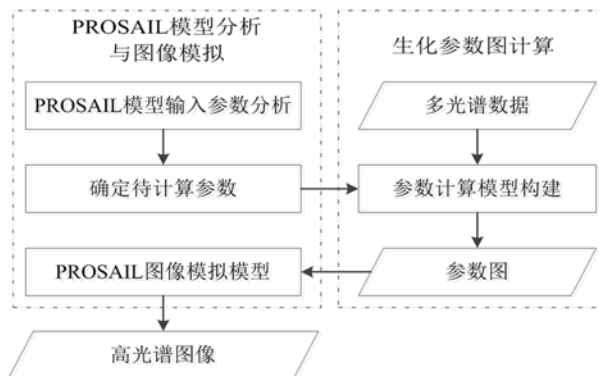


图 1 基于 PROSAIL 模型进行高光谱图像模拟的技术路线

表 1 PROSAIL 模型的输入参数

模型	符号	含义	单位
叶片	N	叶片结构参数	—
	C_{ab}	叶绿素 a+b 含量	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	C_w	等效水厚度	cm
	C_m	干物质含量	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	C_{ar}	类胡萝卜素含量	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	C_{brown}	棕色素含量	—
冠层	LAI	叶面积指数	—
	$LIDF^*$	叶倾角分布函数	—
	S_L	热点效应参数	—
	ρ_s	土壤反射率	—
	$SKYL$	天空光比例	—
观测几何	sza or θ_s	太阳天顶角	deg
	vza or θ_v	观测天顶角	deg
	raa or φ_{sv}	相对方位角	deg

1.1 基于 PROSAIL 模型进行高光谱模拟的输入参数分析

PROSAIL 模型由 PROSPECT 叶片光学模型和 SAIL 冠层反射率模型耦合而成。该模型是一种著名的叶片反射率模型^[9], 它由 Jacquemoud S 和 Baret F 在 1990 年首先提出并在 1995 年加以完善。PROSPECT 模型可以模拟叶片从可见光到近红外波段的反射率和透射率, 即认为它们是叶片结构参数和生物化学参数的函数。SAIL 模型^[10] 是 Suits 模型^[11] 的一个扩展, 它是最早的冠层反射率模型之一, 而且已被遥感学术界广泛应用。本文用 PROSPECT-5B 替换了 PROSAIL 模型中的 PROSPECT 模型, 因为该版本的模型可以提升叶片干物质、类胡萝卜素和棕色素对叶片半球反射率和透过率的影响, 从而提高模型精度。

PROSAIL 模型的输入参数可以分为太阳—地表—遥感器的几何位置、叶片相关参数和冠层相关参数三类。表 1 列出了 PROSAIL 模型所需的各项输入参数, 所对应的输出为 400 ~ 2500 nm 波段范围内光谱分辨率为 1 nm 的冠层光谱。

由此可见, 在利用 PROSAIL 模型进行高光谱图像模拟时, 需要获得表 1 中所对应的各项输

入参数。观测天顶角和观测方位角一般可通过影像辅助文件获得; 太阳天顶角和太阳方位角可根据实验区的经纬度以及图像采集时间等计算获得。相对方位角是太阳方位角与观测方位角之差。土壤反射率、热点效应参数和等效水厚度等参数可根据实验区的具体情况进行设定。因此, 需要通过多光谱数据计算得到的参数包括叶片结构参数 N 、叶绿素含量 C_{ab} 、叶片干物质含量 C_m 、类胡萝卜素含量 C_{ar} 和叶面积指数 LAI 。

1.2 基于支持向量机的参数计算模型的构建

1.2.1 样本数据的准备

建立支持向量机反演模型, 首先需要生成样本数据, 即包括模型的输入数据: 冠层多光谱数据以及对应的待求解植被生化参数 (包括叶片结构参数 N 、叶绿素含量 C_{ab} 、叶片干物质含量 C_m 、类胡萝卜素含量 C_{ar} 和叶面积指数 LAI)。由于难以用通过实测获得的大量不同含量下的生化参数以及配套光谱作为样本数据, 本文在一定范围内对待计算的生化参数进行取值, 并基于 PROSAIL 模型求得相应的地物光谱数据, 进而求得配套的多光谱数据。表 2 列出了参数取值范围和步长设置情况。

表 2 待计算参数及其取值

参数	取值范围	步长	单位
叶片结构参数 N	0.5 ~ 4	0.5	—
叶绿素含量 C_{ab}	5 ~ 80	10	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
叶片干物质含量 C_m	0.003 ~ 0.033	0.003	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
类胡萝卜素含量 C_{ar}	0.5 ~ 16	1	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
叶面积指数 LAI	1.5 ~ 6	0.5	—

1.2.2 样本数据的处理

由于获取的冠层反射率数据的光谱分辨率为 1 nm, 我们需要根据多光谱数据的波段设置, 通过计算得到相应的多光谱反射率数据, 并将其与对应的生化参数作为支持向量机建模的样本数据。通过波谱等效计算可以将高光谱数据等效成宽波段反射率数据, 其等效计算公式如下:

$$\rho_{multi}(\lambda_i) = \frac{\sum \rho(\lambda) f(\lambda_i)}{f(\lambda_i)} \quad (1)$$

式中, $\rho_{multi}(\lambda_i)$ 为多光谱数据中中心波长为 λ_i 的通道的反射率数据; $\rho(\lambda)$ 为高光谱反射率数据; $f(\lambda_i)$ 为多光谱数据中中心波长为 λ_i 的通道的光谱响应函数。

1.2.3 支持向量机模型的参数选择

我们将多光谱数据以及相应的生化参数分为两部分: 一部分作为训练数据; 另一部分作为验证数据。用训练数据训练支持向量机, 得到参数反演模型; 用验证数据对得到的反演模型进行精度验证, 经参数优化调整后得到生化参数计算模型。本文的训练样本有 7888 个, 验证数据有 1972 个。

本文用 LIBSVM 工具箱建立反演模型; 采用 epsilon-SVR 模型和 RBF 核函数; 使用网格搜索法对关联参数 c 和 g 进行参数寻优。LIBSVM 工具箱是林智仁等人开发设计的一个用于 SVM 分类与回归的软件包^[12], 其下载地址为 www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm。

2 实例

2.1 研究区简介

研究区位于甘肃省张掖市甘州区, 地处 $100^{\circ}1'E \sim 100^{\circ}52'E$ 和 $38^{\circ}32'N \sim 39^{\circ}24'N$ 之间。研

究区内, 大部分为植被覆盖区, 其植被类型主要为玉米。

2.2 实验数据

实验采用的多光谱数据为 HJ1A 环境卫星的 CCD1 图像数据 (2012 年 7 月 14 日), 其空间分辨率为 30 m。为了获得地表反射率图像, 需要对多光谱图像进行大气校正。本文采用 FLAASH 大气校正模块进行了大气校正, 并通过分类掩膜提取出了植被覆盖区。

2.3 实验结果

2.3.1 生化参数的反演结果

针对 HJ1A 环境卫星的 CCD1 多光谱图像数据, 我们使用训练数据建立了 5 个参数计算模型, 并使用 HJ1A CCD1 多光谱图像得到了 5 个参数 (叶片结构参数 N 、叶绿素含量 C_{ab} 、类胡萝卜素含量 C_{ar} 、叶片干物质含量 C_m 和叶面积指数 LAI) 的含量图 (见图 2)。

对于上述参数计算模型, 使用验证数据进行了模型验证分析。表 3 列出了各个参数的模型预测值与相应验证数据之间的平方相关系数。

从表 3 中可以看出, 叶绿素含量 C_{ab} 、叶片干物质含量 C_m 和叶面积指数 LAI 的反演模型预测结果与验证数据之间具有很好的相关性, 其平方相关系数都达到了 0.8 以上。其中, 叶绿素含量 C_{ab} 和叶面积指数 LAI 的反演精度与任晓^[6]、吕杰^[7]和谢巧云^[8]等人的实验结果较为接近。而叶片结构参数 N 与类胡萝卜素含量 C_{ar} 的反演模型预测值与验证数据之间的平方相关系数都不足 0.5, 说明这两个参数的反演精度有待进一步提高。反演结果的偏差将会导致图像模拟结果存在一定的误差。

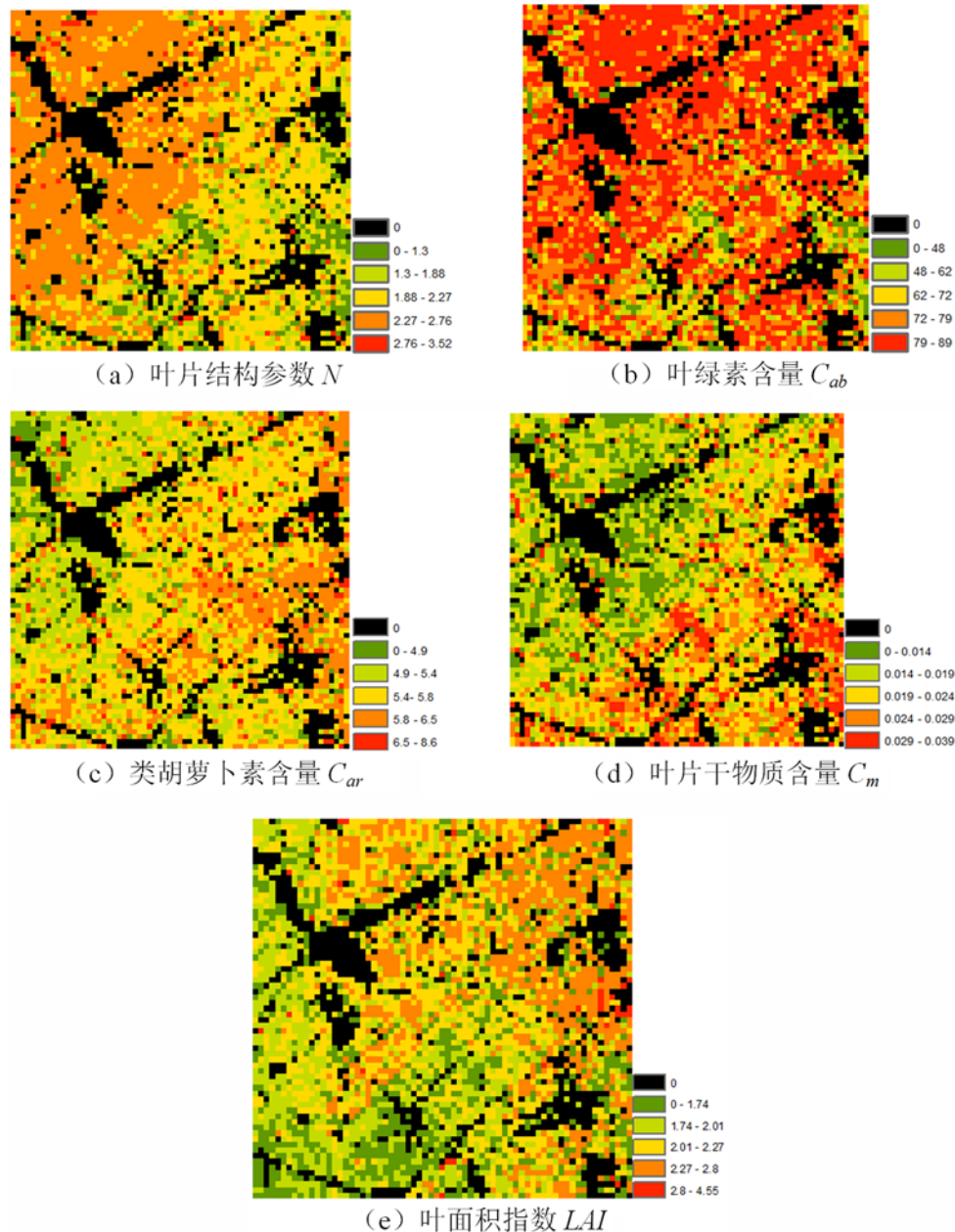


图 2 基于 HJ1A CCD1 数据的参数反演图

表 3 参数反演值与验证值之间的平方相关系数 (R^2)

参数	N	C_{ab}	C_{ar}	C_m	LAI
R^2	0.4818	0.8255	0.4811	0.8116	0.8842

2.3.2 基于 PROSAIL 模型的高光谱图像模拟

由于研究区范围较小, 我们不考虑各像元观测几何的变化, 即根据研究区的经纬度以及图像采集时间等因素, 对模型固定的输入参数进行了设置 (见表 4)。

结合 5 幅参数图, 利用 PROSAIL 模型即可获得高光谱模拟图像。图 3(a) 和图 3(b) 所示分别为模拟图像的光谱立方体和特定像元 (第 15 行第 15 列) 的光谱曲线。从该像元的光谱特征中可以看出, 这是一条典型的植被光谱曲线。

表 4 模型固定的输入参数

棕色素含量	等效水厚度 (cm)	热点效应参数	土壤亮度参数	太阳天顶角 ($^{\circ}$)	观测天顶角 ($^{\circ}$)	相对方位角 ($^{\circ}$)
0	0.024	0.01	1	30	10	0

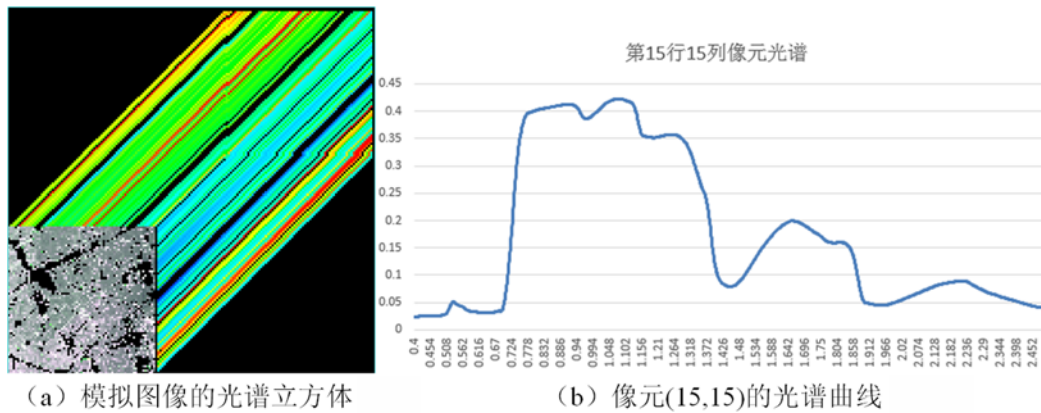


图 3 模拟图像的光谱立方体及像元光谱曲线

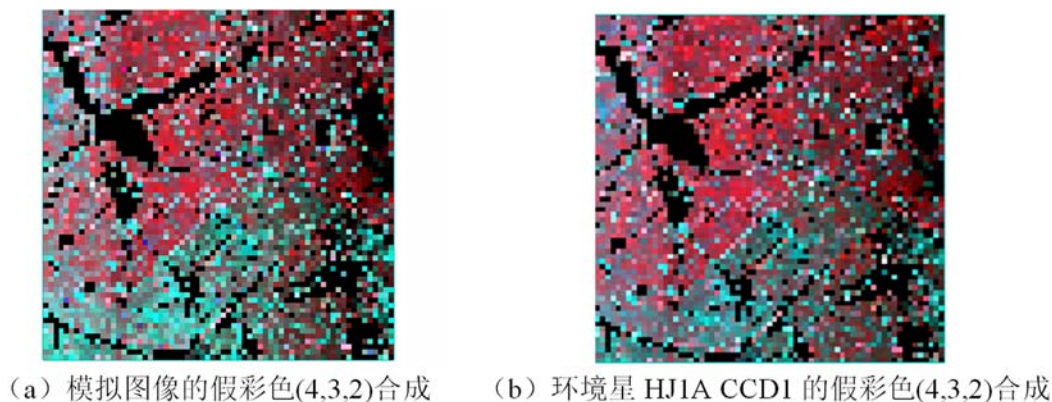


图 4 模拟图像以及 HJ1A 环境卫星的 CCD1 图像的假彩色合成

表 5 平均结构相似度的计算结果

波段	蓝光波段	绿光波段	红光波段	近红外波段
平均结构相似度	95.35%	96.16%	95.78%	95.08%

2.3.3 模拟结果的分析

为了验证高光谱模拟图像的结果,我们利用波谱响应函数将高光谱模拟数据等效到 HJ1A 环境卫星的 CCD1 宽波段。图 4 所示为高光谱模拟图像经等效计算后与 HJ1A CCD1 图像的对比情况。

本文从图像的结构相似度和相对误差两个方面对模拟结果进行了质量分析。

(1) 结构相似度评价

结构相似度是一种衡量两幅图像相似程度

的指标^[13]。它符合人类视觉系统对图像结构信息的提取习惯,因此本文对等效计算后的模拟图像与环境卫星图像进行了结构相似度评价。结构相似度越大,表示两幅图像的结构相似性越高,其最大值为 1。

表 5 列出了两幅图像的结构相似度计算结果。从表 5 中可以看出,等效计算后的模拟图像与环境卫星图像的对应波段的平均结构相似度都大于 95%,说明这两幅图像的对应波段都比较相似。

表 6 相对误差图的统计结果

波段	蓝光波段	绿光波段	红光波段	近红外波段
相对误差均值	16.1%	8.2%	5.2%	2.7%

(2) 模拟结果的误差分析

对等效计算后的模拟图像与环境卫星图像进行了相对误差运算, 其计算公式如下:

$$\sigma = \frac{|\rho_{hj} - \rho_{sim}|}{\rho_{hj}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, ρ_{hj} 为真实的环境卫星多光谱数据; ρ_{sim} 为基于高光谱模拟图像得到的多光谱数据。

我们对相对误差图像进行了统计(结果见表 6)。可以看出, 除了蓝光波段的相对误差较大之外, 其他三个波段的误差均小于 10%, 其中近红外波段为 2.7%, 而蓝光波段的相对误差为 16.1%。

3 结束语

针对采用支持向量机回归算法得到的参数图, 本文利用 PROSAIL 模型实现了基于多光谱数据的高光谱图像模拟。首先, 对 PROSAIL 模型的输入参数进行了敏感性分析; 在此基础上, 采用支持向量机建立了典型生化参数的计算模型, 并得到了典型参数含量图; 最后, 基于参数计算结果, 利用 PROSAIL 模型进行了高光谱遥感数据模拟。

精度分析结果表明, 叶绿素含量 C_{ab} 、叶片干物质含量 C_m 和叶面积指数 LAI 的模型预测结果与验证数据之间具有很好的相关性, 其平方相关系数均达到了 0.8 以上; 而叶片结构参数 N 与类胡萝卜素含量 C_{ar} 的平方相关系数都不足 0.5。图像结构相似度的评价结果表明, 等效计算后的模拟图像与环境星图像对应波段的平均结构相似度都大于 95%, 说明这两幅图像的对应波段都较为相似。通过对比 HJ1A 卫星的 CCD 数据可以发现, 除了蓝光波段的相对误差较大之外, 其他三个波段的误差均小于 10%, 其中近红外波段为 2.7%, 而蓝光波段的相对误差为 16.1%。因此, 基于 PROSAIL 模型进行高光谱遥感图像模拟是可行的。

由于直接影响最终的模拟结果, 生化参数的反演精度需要得到进一步提高。此外, PROSAIL 模型中并没有考虑土壤的 BRDF 效应, 因此对最终的模拟结果也有一定的影响。

参考文献

- [1] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感原理、技术与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 张文娟. 三角共路型干涉成像光谱仪图像模拟技术研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2008.
- [3] 刘瑶. 中红外大气强吸收通道图像模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2015.
- [4] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. New York: Springer, 1995.
- [5] Durbha S S, King R L, Younan N H. Support Vector Machines Regression for Retrieval of Leaf Area Index from Multiangle Imaging Spectroradiometer [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **107**(1-2): 348-361.
- [6] 任晓, 劳彩莲, 徐照丽, 等. 估测田间烟叶色素含量的光谱模型研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(6): 1654-1659.
- [7] 吕杰. 基于支持向量机的作物叶绿素含量反演模型 [J]. *测绘科学*, 2015, **40**(9): 88-91.
- [8] 谢巧云. 叶面积指数反演方法的普适性研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2014.
- [9] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **34**(2): 75-91.
- [10] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, **16**(2): 125-141.
- [11] Suits G H. The Calculation of the Directional Reflectance of a Vegetative Canopy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1972, **2**(1): 117-125.
- [12] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a Library for Support Vector Machines [J]. *Acm Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2006, **2**(3): 389-396.
- [13] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600-612.