

基于 TM 的辐射传输模型反演 叶面积指数可行性研究

陈艳华^{1,2}, 张万昌^{1,2}, 雍斌^{1,2}

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2. 中国科学院大气物理所东亚区域气候 - 环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

摘要: 基于 PROSAIL 辐射传输模型, 引入土壤反射指数 SRI 来简化模型, 提出直接从反射率计算 SRI 的方法; 同时, 针对不同的植被状况, 采取不同波段组合对模型的参数进行敏感性分析, 确定自由参数与反演波段组合, 提出一种基于不同植被状况的叶面积指数反演策略; 最后, 应用遗传算法对模拟的 TM 光谱反射数据进行实验。结果表明, 对于 $LAI < 3$ 的植被, 反演精度较高; 但是对于 $LAI > 3$ 的植被, 反演精度较低, 其原因主要是冠层反射对 LAI 不再敏感。因此, 辐射传输模型反演 LAI 有一定适用范围, 只有在此范围内 LAI 的反演精度才可靠。

关键词: 辐射传输模型; PROSAIL; 叶面积指数; 模型反演

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2007)02-0044-06

0 引言

叶面积指数 (LAI) 是植被冠层结构的一个重要参数, 它控制着植被的许多生物物理过程, 如光合、呼吸、蒸腾、循环和降水截获等, 同时也可以为冠层表面最初能量交换描述提供结构化定量信息^[1], 已经成为多个国际研究组织的研究重点^[2,3]。由于传统的 LAI 反演算法是基于植被指数的统计回归, 易受土壤背景等多种外在因素的影响, 缺少可移植性^[4], 因此, 科学家们转向反演用于描述冠层内电磁辐射传输过程的辐射传输模型。

冠层辐射传输模型的反演是一个反问题, 具有不适定性^[5], 即不满足解的存在性、唯一性和对数据的连续依赖性中的任何一条。这主要有 2 个方面的原因^[6]: ①不同的模型参数可能产生几乎一样的反射光谱。比如, 叶子水平分布的稀疏植被冠层的光谱反射与叶子垂直分布的浓密植被冠层的光谱反射相似; ②模型建模与观测的反射率存在不确定性。模型的不确定性来自对叶子散射行为的简化和叶子朗伯特散射假设等, 而观测的反射率数据的不确定性主要由传感器噪声与数据预处理产生。由此将会导致模型反演的解在参数空间产生一种跳跃, 意味着求出来的解可能分布在整个参数空间, 而不收敛于真实解附近。Jacquemoud 和 Baret^[7] 利用 PRO-

SAIL 模型模拟高光谱反射, 假定 LAI 保持在一个初始值附近来进行冠层反射模型数值反演, 结果表明, LAI 越小, 叶子结构参数 N 越大, 平均叶倾角 LAD 也越小, 说明 LAI 和 LAD 与叶子结构参数 N 对冠层反射率的影响作用是相反的, 不同的参数组合可能对应几乎相似的光谱。

鉴于此, 本研究基于 PROSAIL 耦合冠层反射模型, 针对不同的植被状况, 采取不同波段组合对模型的参数进行敏感性分析, 研究并确定不同植被状况的敏感性参数及其参数的取值范围, 提出一种基于不同植被状况的叶面积指数反演策略, 并用模拟的 TM 反射率数据进行了实验验证。

1 研究方法

1.1 PROSAIL 模型简介

PROSAIL 模型是由 SAIL 冠层反射模型^[8] 和 PROSPECT 叶子光学特性模型^[9] 耦合而成的。SAIL 模型是把植被当作混浊介质, 假设叶片方位角分布均匀, 考虑任意的叶片倾角, 冠层双向反射率作为观测角度的一个函数。SAIL 模型广泛应用于农业植被与阔叶植被类型, 而且模拟精度较高^[10,11]。Kuusk 等^[12] 对 SAIL 模型又进行了改进, 考虑了热点影响, 计算单次散射贡献对二向反射率的贡献时, 又考虑了叶片以及相应的阴影影响。PROSPECT 模型是一

个基于 Allen 等^[13]的平板模型改进的用于模拟叶子反射与透射的叶片辐射传输模型,表述了新鲜植被叶片从 400 nm 到 2 500 nm 的光学特性。在平板模型的基础上,PROSPECT 模型假设叶片是被 $N-1$ 层空气间隔分隔的、由 N 层均质层叠合起来的平板,其所涉及到的参数及其符号如表 1 所示。本研究是针对 TM 光谱数据的,所以传感器方位角 z 与传感器天顶角 α 都取为 0° 。

表 1 PROSAIL 模型的参数

参 数		符号
外部参数	太阳天顶角/(°)	z_{sun}
	太阳方位角/(°)	α_{sun}
	传感器天顶角/(°)	z
	传感器方位角/(°)	α
	水平能见度/km	VIS
冠层生物物理参数	叶面积指数	LAI
	平均叶倾角/(°)	LAD
	叶子内部结构参数	N
	叶绿素 AB 含量/($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	C_{a+b}
	叶子干物质含量/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	C_m
	叶子等效水厚度 (cm)	C_w
土壤光谱反射率	土壤光谱反射率	S_1
	土壤光谱反射率	ρ_i^A

1.2 土壤反射指数的引进

由于 PROSAIL 模型使用的土壤背景反射参数是一个土壤反射光谱,不利于模型的有效反演,因此需要利用一个简单的参数,即土壤反射指数来替代。研究表明,土壤反射率的光谱形状具有相似性,可以用土壤反射指数来代表特定的土壤光谱^[14]。土壤反射函数如式 1 所示。

$$\rho_i = \rho_{i-\min} + (\rho_{i-\max} - \rho_{i-\min}) \times SRI \tag{1}$$

式中, ρ_i 为裸土在波段 i 的反射率; $\rho_{i-\min}$ 、 $\rho_{i-\max}$ 分别为裸土在波段 i 的最小(湿土)和最大(干土)反射率,本研究是利用 ASTER 土壤光谱库的最大最小反射率; SRI 为土壤反射指数,代表土壤光谱反射位于裸土最大反射和最小反射之间的比例。

图 1 为 PROSAIL 模型模拟的 LAI 等值线与 SRI 等值线图。 LAI 等值线是指在一定的 LAI 、 LAD 及外部条件(太阳角、视角、大气条件)下,改变背景的光学性质时所观测到的叶冠反射率的点对所组成的线(图 1 实线),它既不汇聚原点,也不与土壤线平行。 SRI 等值线是指在一定的 SRI 、 LAD 及一定的外部条件下,改变 LAI 时所观测到的叶冠反射率的点对组成的线,图中用虚线表示。通过模型模拟可知, LAI 等值线是一条直线,并且线上的点分别对应一个 SRI 值, SRI 越大,对应的冠层反射率越大,相应的冠层反射点对越偏离原点。假设图中点 P 为某一植

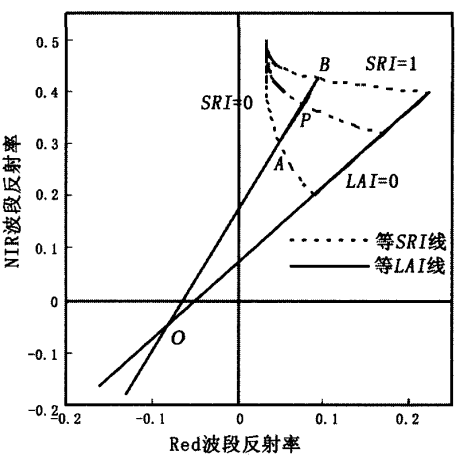


图 1 LAI 等值线与 SRI 等值线

被点,点 O 为 LAI 等值线与土壤线的交点,点 A 是通过点 P 的 LAI 等值线与 $SRI=0$ 等值线的交点,点 B 是通过点 P 的 LAI 等值线与 $SRI=1$ 等值线的交点,则定义点 P 的土壤反射指数为点 P 和点 A 之间的距离 $|PA|$ 与点 A 和点 B 之间的距离 $|AB|$ 的比值,即 $SRI = \frac{|PA|}{|AB|}$ 。这样就可以直接利用反射率数据计算植被像元的 SRI 值,然后再运用公式(1)计算每个植被像元的土壤背景反射率。

1.3 模型敏感性分析

模型反演时需要模型的参数进行敏感性分析,选择一些对模型反演比较敏感的参数进行反演,才有可能最大程度地提高模型参数反演的精度^[7]。本研究的敏感性分析是利用一组模型参数数据集模拟得到反射率 ρ_0 ,然后对数据集中的每一个参数变化取值范围的 10%,得到对应的变化 10% 后的模拟反射率 ρ_{pert} 。 ρ_{pert} 与 ρ_0 的差别用价值函数 F' 来表示,即

$$F' = \frac{\sum_{j=1}^n (|\rho_0^j - \rho_{\text{pert}}^j|)}{n} \tag{2}$$

式中,价值函数 F' 表示模型的敏感性; n 为波段数。表 2 为 PROSAIL 模型参数的取值范围^[7,15-17]。

表 2 PROSAIL 模型参数的取值范围^①

参数	LAI	LAD	N	C_{a+b}	C_w	C_m	S_1
最小值	0.01	15	1	10	0.004	0.001	0.01
最大值	5	75	3	80	0.06	0.04	0.2

①参数单位同表 1。

本研究的敏感性分析是基于 9 种植被状况,分别是 $LAI=0.5$ 、 1.8 和 3.0 与 $LAD=57^\circ$ 、 30° 和 75° 的组合。同时,由于实际中波段 1 和波段 2 易受大

气溶胶散射的影响,波段 7 易受大汽水汽含量与土壤背景湿度的影响,因此反演时将不使用这 3 个波段。模型的其它参数^[7,15-17]则定义为 $N=1.5, C_{a+b}=50\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2, C_w=0.025\text{ cm}, C_m=0.012\text{ g}/\text{cm}^2, S_1=0.06, SRI=0.1$ 。针对各种植被状况,使用不同波段组合进行的敏感性分析结果如表 3 所示。

表 3 不同植被状况下不同波段组合对模型植被参数的敏感性分析^①

波段组合	植被状况		LAI	LAD	N	C_{a+b}	C_w	C_m	S_1	SRI
	LAD	LAI								
3,4,5 波段	57	0.5	0.034 04	0.005 27	0.001 28	0.000 36	0.001 86	0.003 79	0.000 94	0.014 02
		1.8	0.014 82	0.008 21	0.003 5	0.000 53	0.003 51	0.010 7	0.001 64	0.005 28
		3	0.006 02	0.010 79	0.004 44	0.000 53	0.003 73	0.014 94	0.002 19	0.002 16
	30	0.5	0.039 88	0.003 54	0.002 76	0.000 53	0.002 79	0.005 75	0.001 25	0.011 86
		1.8	0.013 39	0.005 06	0.006 52	0.000 71	0.004 69	0.014 18	0.002 66	0.003 22
		3	0.004 62	0.006 37	0.007 79	0.000 72	0.004 89	0.018 35	0.004 14	0.001 11
	75	0.5	0.033 15	0.004 84	0.000 3	0.000 22	0.001 18	0.002 35	0.000 65	0.015 77
		1.8	0.016 03	0.010 18	0.000 97	0.000 34	0.002 34	0.007 11	0.001 1	0.007 82
		3	0.006 37	0.013 98	0.001 35	0.000 33	0.002 48	0.010 38	0.001 17	0.004
3,4 波段	57	0.5	0.027 05	0.006 43	0.001 32	0.000 53	0	0.003 73	0.000 86	0.013 81
		1.8	0.012 24	0.012 12	0.003 36	0.000 79	0	0.012 37	0.001 63	0.005 63
		3	0.006 05	0.013 65	0.004 13	0.000 79	0	0.018 49	0.002 28	0.002 53
	30	0.5	0.037 46	0.004 69	0.002 78	0.000 8	0	0.005 71	0.001 17	0.011 76
		1.8	0.014 04	0.006 61	0.006 1	0.001 07	0	0.016 35	0.002 77	0.003 61
		3	0.006 31	0.007 46	0.007 12	0.001 08	0	0.022 4	0.004 41	0.001 4
	75	0.5	0.026 1	0.00568	0.000 34	0.000 33	0	0.002 29	0.000 58	0.015 47
		1.8	0.010 93	0.014 37	0.000 99	0.000 51	0	0.008 21	0.001 03	0.008 1
		3	0.003 63	0.019 25	0.001 32	0.000 5	0	0.012 97	0.001 15	0.004 41

① 黑体表示该参数是在当前植被状况下用于反演的波段组合与敏感性参数,植被列中的 LAD 和 LAI 代表 9 种典型的植被状况。

从表 3 可知,不仅在不同植被状况下模型对各植被参数的敏感性不同,不同波段组合下模型对各植被参数的敏感性的大小与主次也不一样。LAI、SRI、LAD 和 C_m 是冠层辐射传输模型植被参数中前 4 个最敏感的参数。综合不同波段组合的敏感性分析,模型对于 LAI 的敏感性有随着 LAI 值的增大而递减的趋势,对于土壤反射参数的敏感性有随着 LAI 的增加而逐渐减少的趋势;而在相同叶倾角植被条件下,模型对于 LAD 的敏感性有随着 LAI 的增加而增加的趋势。当植被覆盖稀少时,LAI 与 SRI 是最敏感的参数,SRI 的估算对于 LAI 的反演有较大影响;随着植被覆盖的增加,LAI 和 SRI 的敏感性降低,LAD 和 C_m 的敏感性逐渐增加;对于垂直叶子植被,模型对 LAI 的敏感性一般大于对 LAD 的敏感性;对于水平叶子的浓密植被,模型对 C_m 最敏感,敏感性大于对 LAI 和 LAD 的敏感性。因此,不同植被覆盖状况下,反演时设置的自由参数是不相同的。同时表 3 也说明,冠层辐射传输模型反演 LAI 参数并不是只使用一种波段组合就适合于所有植被状况,主要是因为不同植被状况下不同波段对不同植被参数的相对敏感性不同,并且各植被参数对光谱的影响具有内在的联系。

1.4 不同植被状况的反演策略

为了尽可能提高反演精度,应根据其植被状况找到对 LAI 参数最敏感的波段组合和自由参数来进行反演。

行冠层反射模型反演。表 4 为由敏感性分析得到的不同植被状况反演 LAI 使用的自由参数与反演最优波段组合。从中可以看出,不同植被状况下反演冠层模型选择的自由参数个数不超过 4 个,并且不同植被状况下,敏感性参数的大小与顺序是不一样的。

表 4 不同植被状况 LAI 反演策略^①

		植被状况		自由参数	最优波段组合
		LAD	LAI		
57	0.5			LAI, SRI, LAD	3, 4, 5
	1.8			LAI, C_m , LAD, SRI	3, 4, 5
	3			C_m , LAD, LAI, N	3, 4, 5
30	0.5			LAI, SRI, C_m	3, 4, 5
	1.8			C_m , LAI, LAD, SRI	3, 4
	3			LAD, C_m , LAI, SRI	3, 4
75	0.5			LAI, SRI	3, 4, 5
	1.8			LAI, LAD, SRI, C_m	3, 4, 5
	3			LAD, C_m , LAI, SRI	3, 4, 5

① 表中自由参数列按敏感性由大到小排列,并且选择的自由参数的敏感性总和占总体 80% 以上。

2 实例运用与结果分析

2.1 模拟反射率数据集的获取

本实验采用 PROSAIL 模型随机模拟的 TM 反射率数据集,共 2 000 个数据。所有参数的取值范围是根据一些经验的统计数据来定义的^[10-13]。根据敏感性分析结果,设定变化的参数是 LAI、LAD、N、

C_w 、 C_{a+b} 和 SRI , 其它参数为固定值, 各参数具体设置范围为: $0 < LAI < 6$, $20^\circ < LAD < 80^\circ$, $1 < N < 3$, $0.004\text{ cm} < C_w < 0.060\text{ cm}$, $20\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 < C_{a+b} < 80\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$, $S_1 = 0.06\text{ g}/\text{cm}^2$, $0.001\text{ g}/\text{cm}^2 < C_m < 0.04\text{ g}/\text{cm}^2$, $VIS = 30\text{ km}$, $0 < SRI < 1$, $z_{sun} = 41.6^\circ$, $\alpha_{sun} = 145.6^\circ$ 。参数取值是根据在设定范围内随机采样得到的。

2.2 目标函数与遗传算法的设计

冠层反射模型的反演是通过固定一些参数和变化一些自由参数来最小化观测反射率与模型模拟反射率之间的差别实现的。这种实现过程的函数表达式为

$$F = \sum_{j=1}^n (|\rho_{meas}^j - \rho_{mod}^j|) \tag{3}$$

式中, n 为观测光谱的波段数; ρ_{meas} 为观测的波谱反射率; ρ_{mod} 为模型模拟的波谱反射率。模型反演植被冠层参数的精度主要由 3 个方面确定: 观测的波谱反射率 ρ_{meas} 的精度、辐射传输模型的精度和优化算法的精度。反演的 LAI 值取使价值函数达到全局最小值的参数所对应的 LAI 值。

遗传优化算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而发展的一种自适应全局优化概率搜索算法^[18]。常用的遗传算法一般包含 4 个主要操作: 编码、选择、交叉和变异。我们采用 Matlab 7.2 软件提供的遗传算法程序包来实施反演, 该软件提供多编码方案与遗传算子, 并且可以设置变量的变化范

围。本文采用双精度实数编码方案, 即直接用浮点数串来表示模型参数, 这种编码方案可以克服二进制编码由于 Hamming 悬崖与编码过长等引起的搜索效率低、缺乏微调功能等缺点, 而且容易引入与问题相关的启发式信息以增加搜索能力。选择算子采用一种标准化几何排序的方法, 首先根据适应度函数计算个体的适应度值, 再按适应度值对个体进行排序并根据个体的位置分配选择概率。交叉算子选择的是启发式交叉算子。变异算子选择自适应变异算子, 能够保证在迭代初期赋予较大的交叉与变异率, 以造成足够的扰动, 扩大解空间。随着迭代次数的增加, 交叉和变异率逐步减小至一常数, 从而保证平滑收敛, 克服了由于群体素质一致带来的进化停滞与过早收敛于非最优解问题。

2.3 反演结果与讨论

首先, 根据红光波段与 NIR 波段组成的空间散点图, 利用公式 1 估算 SRI 值; 然后, 计算各个数据的 $NDVI$ 值, 根据 $NDVI$ 的大小经验估算 LAI 的范围, 确定植被的疏密状况; 再根据 LAI 的范围从表 3 中选择合适的 LAI 反演方案; 最后, 利用遗传算法实现 LAI 的反演。因为在实际中可以通过植被分类等手段来确定 LAD 范围, 相同的植被类型具有相似的 LAD 。本研究假设前提知道每个数据的 LAD 大致分布范围。自由参数和固定参数的设定如表 5 所示。

表 5 模型反演的自由参数与固定参数的取值范围^①

植被状况		自由参数取值范围				固定参数取值					
<i>LAD</i>	<i>LAI</i>	<i>LAI</i>	<i>LAD</i>	C_m	N	N	C_{a+b}	C_w	C_m	S_1	<i>LAD</i>
57	0.5	0~1.2	44~65			1.5	50	0.02	0.012	0.06	
	1.8	1.2~2.5	44~65	0.001~0.04		1.5	50	0.02		0.06	
	3	2.5~5	44~65	0.001~0.04	1~3		50	0.02		0.06	
30	0.5	0~1.2		0.001~0.04		1.5	50	0.02		0.06	30
	1.8	1.2~2.5	25~44	0.001~0.04		1.5	50	0.02		0.06	
	3	2.5~5	25~44	0.001~0.04	1~3		50	0.02		0.06	
75	0.5	0~1.2				1.5	50	0.02	0.012	0.06	75
	1.8	1.2~2.5	65~80	0.001~0.04		1.5	50	0.02		0.06	
	3	2.5~5	65~80	0.001~0.04		1.5	50	0.02		0.06	

①参数单位同表 1, 植被列中的 LAD 和 LAI 代表 9 种典型的植被状况。

插页彩片 19 给出了模型反演 LAI 值和真实 LAI 值之间的比较结果, $R^2 = 0.807$ 。从中可以看出, 植被的 LAI 值越低, 反演精度就越高; LAI 值越高, 反演精度就越低。这主要是由于低 LAI 的植被的冠层反射率对 LAI 的敏感性大, 而且大于对其它植被参数的敏感性, 而高 LAI 的植被的冠层反射率对 LAI 的敏感性小, 特别是叶子水平分布的高 LAI 植被。从图 3 中可以看出, 对于 $LAI = 3$, $LAD = 57^\circ$ 的植被, 反演的 LAI 总体比真实的 LAI 偏大, 原因是另外两个

自由参数 C_m 和 N 综合了 LAI 的影响。在这种植被条件下, 3、4 和 5 波段组合对叶片干物质含量 C_m 敏感性最大。对于 $LAI = 3$, $LAD = 30^\circ$ 的浓密植被, 反演的 LAI 总体比真实的 LAI 偏小, 原因是另外 3 个自由参数 C_m 、 LAD 与 N 的敏感性都大于 LAI 的敏感, 压制了 LAI 的信息。如果要在这种情况下高精度反演 LAI , 需要额外的辅助性数据参与模型反演, 比如, 其他传感器反演的叶片干物质含量数据, 或者一些诸如叶片干物质含量与结构参数的统计关系等

植被冠层参数的内在联系数据。因此,辐射传输模型反演 LAI 是有一定适用范围的,只有在此范围内反演精度才可靠。

3 结论

本研究分析了辐射传输模型反演 LAI 的可行性,提出了一种基于不同植被状况的叶面积指数反演策略,从而减少模型反演的不适性。

首先,基于 PROSAIL 辐射传输模型,引入土壤反射指数 SRI 来简化模型,提出直接从反射率计算 SRI 的方法;同时,针对不同的植被状况,采取不同波段组合对模型的参数进行敏感性分析,确定不同植被状况的自由参数与反演波段组合,提出一种基于不同植被状况的叶面积指数反演策略;最后,应用遗传算法对模拟的 TM 光谱反射数据进行实验。这种反演策略使用的自由参数少,而且选择对 LAI 最敏感的波段组合进行反演,从而能够更高精度地反演 LAI。但是这种方法只是基于模型模拟的 TM 反射率数据,实际获取的 TM 光谱影像数据由于受到大气和地形等多种因素的影响,光谱反射率数据存在一定的误差,需要经过一系列纠正使误差控制在很小的范围之内。观测的反射率误差对于 LAI 反演精度的影响分析今后有待进一步的研究。

从反演结果来看,不同植被条件下反演的精度也不相同,并且辐射传输模型反演 LAI 有一定的适用范围,只有在此范围内 LAI 的反演精度才可靠。对于叶子水平叶面积指数大的植被,叶面积指数反演精度较低,这主要是由于在这种情况下冠层反射不再对 LAI 敏感,需要利用一些辅助数据如植被参数的先验统计数据来辅助反演才可以提高 LAI 反演精度。同时,TM 图像属于多光谱数据,光谱包含的信息量较少,目前许多科学家已经把辐射传输模型反演 LAI 的研究转向能够提供更多信息的高光谱数据与多角度遥感数据,可以更大程度地减少模型反演的不确定性,提高反演的可靠性。

致谢: 美国马里兰大学地理系方洪亮博士和荷兰国家航空实验室的 Wout Verhoef 教授在研究过程中给予了细心的指导并提出了宝贵的意见,在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] Chen J M, Cihlar J. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM Images[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55: 153 - 162.
- [2] IGBP. The International Geosphere - Biosphere Program: A Study of the Earth and its Living Resources. Global Change in Global Change[R]. The Initial Core Projects, 1990.
- [3] Sellers P J, Schimel D S. Remote Sensing of the Land Biosphere and Biogeochemistry in the EOS Era: Science Priorities, Methods and Implementation - EOS Land Biosphere and Biogeochemical Cycles Panels[J]. Global Planetary Change, 1993, 7: 279 - 297.
- [4] 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感, 2003, (3): 58 - 62.
- [5] 刘佳琦. 数学物理方程反问题的分类及不适定性问题求解[J]. 应用数学与计算数学, 1983, (4): 43 - 63.
- [6] Combal B, Baret, et al. Retrieval of Canopy Biophysical Variables from Bidirectional Reflectance Using Prior Information to Solve the Ill - posed Inverse Problem[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 84: 1 - 15.
- [7] Jacquemoud S, Baret F. Estimating Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of a Reflectance Model on High Spectral Resolution Data[J]. Crop Structure and Light Microclimate: Characterization and Applications, 1993, 339 - 350.
- [8] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: the SAIL Model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16: 125 - 141.
- [9] Jacquemoud S, Baret F. Prospect: A Model of Leaf Optical Properties Spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34: 75 - 91.
- [10] Goel N S, Thompson R L. Inversion of Vegetation Canopy Reflectance Models for Estimating Agronomic Variables. IV. Total inversion of the SAIL model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 15: 237 - 253.
- [11] Major D, Schaafje G B, Wiegand C, et al. Accuracy and Sensitivity Analyses of SAIL Model Predicted Reflectance of Maize[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41: 61 - 70.
- [12] Kuusk A. The Hot - spot Effect in Plant Canopy Reflectance, Photon - Vegetation Interactions, Application in Optical Remote Sensing and Plant Ecology[J]. Springer Verlag, 1991, 139 - 159.
- [13] 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.
- [14] Liang S, Strahler A H. An Analytic BRDF Model of Canopy Radiative Transfer and Its Inversion[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31: 1081 - 1092.
- [15] Goel N S, Strebel D E. Inversion of Vegetation Canopy Reflectance Models for Estimating Agronomic Variables. I. Problem Definition and Initial Results Using the Suit's Model[J]. Remote Sensing of Environment, 1983, 13: 487 - 507.
- [16] Jacquemoud S. Inversion of the PROSPECT + SAIL Canopy Reflectance Model from AVIRIS Equivalent spectra: Theoretical Study[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 44: 281 - 292.
- [17] Privette J L, Myneni R B, Tucker C J, et al. Invertibility of a 1 - D Discrete Ordinate Canopy Reflectance Model[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 44: 281 - 292.

ing of Environment, 1994, 48: 89-105.

Genetic Algorithm with a Canopy Radiative Transfer Model [J].

[18] Fang H, Liang S, Kuusk A. Retrieving Leaf Area Index Using a

Remote Sensing of Environment, 2003, 85:257-270.

A FEASIBILITY STUDY OF LEAF AREA INDEX INVERSION USING RADIATIVE TRANSFER MODEL BASED ON TM DATA

CHEN Yan-hua^{1,2}, ZHANG Wan-chang^{1,2}, YONG Bin^{1,2}

(1. International Institute for Earth System Science (ESSI), Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Using a canopy radiative transfer model, PROSAIL, the authors introduced soil reflection index (SRI) to simplify model, and proposed a method for computing SRI directly from reflection. Besides, sensitivity analyses of various vegetation parameters on modeling performance under different band integration approaches were conducted. On the basis of sensitivity analyses of the model, a set of new band integration approaches with genetic algorithm was induced to calculate the estimating values of LAI for Landsat TM data. Experiments with Landsat TM data indicate that the retrieval accuracy is relatively high for vegetation with LAI less than 3, and that, with LAI more than 3, the retrieval accuracy is low. These phenomena are attributed to the fact that the canopy reflection is no longer sensitive to LAI when the vegetation is too densely developed. From this study, it is concluded that LAI retrieval with the PROSAIL model is only credible in a certain range.

Key words: Radiative transfer model; PROSAIL; Leaf area index; Model reversion

第一作者简介: 陈艳华(1983-),男,硕士研究生,主要从事遥感信息提取及遥感和GIS在水文学中的应用方面的研究。

(责任编辑:李瑜)

(上接第96页)

[8] Johnson L F, Billow C R. Spectrometric Estimation of Total Nitrogen Concentration in Douglas-fir Foliage [J]. Int. J. Remote Sens., 1996, 17(3): 489-500.

[9] 贝拉斯. 光纤陀螺仪样机的测试结果[J]. 刘燕华译. 舰船导航, 1990, (4): 74-76.

2.5 报纸文章

[序号]作者. 文献题名[N]. 报纸名, 出版日期(版次).

如:[10]郑荣. 青藏高原1:25万区调首战告捷[N]. 中国国土资源报, 2003-05-28(3).

2.6 国际国家标准

[序号]标准编号, 标准名称[S].

如:[11]GB/T16159-1996, 汉语拼音正词法基本规则[S].

2.7 专利

[序号]专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

如:[12]姜锡洲. 一种温热外敷药制备方案[P]. 中国专利: 881056073, 1989-07-26.

2.8 电子文献

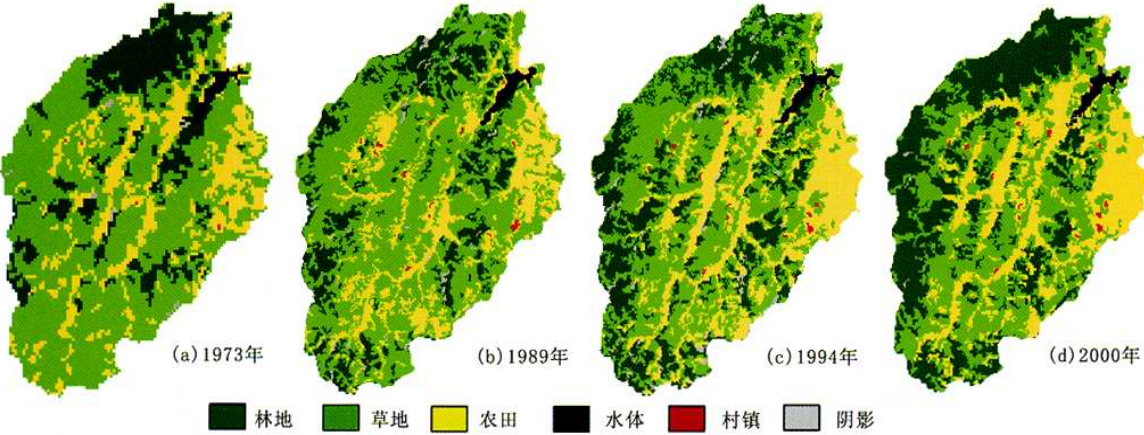
[序号]主要责任者. 电子文献题名[电子文献及载体类型标识]. 电子文献的出处或可获得地址, 发表或更新日期/引用日期(任选).

如:[13]王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>, 1998-08-16/1998-10-04.

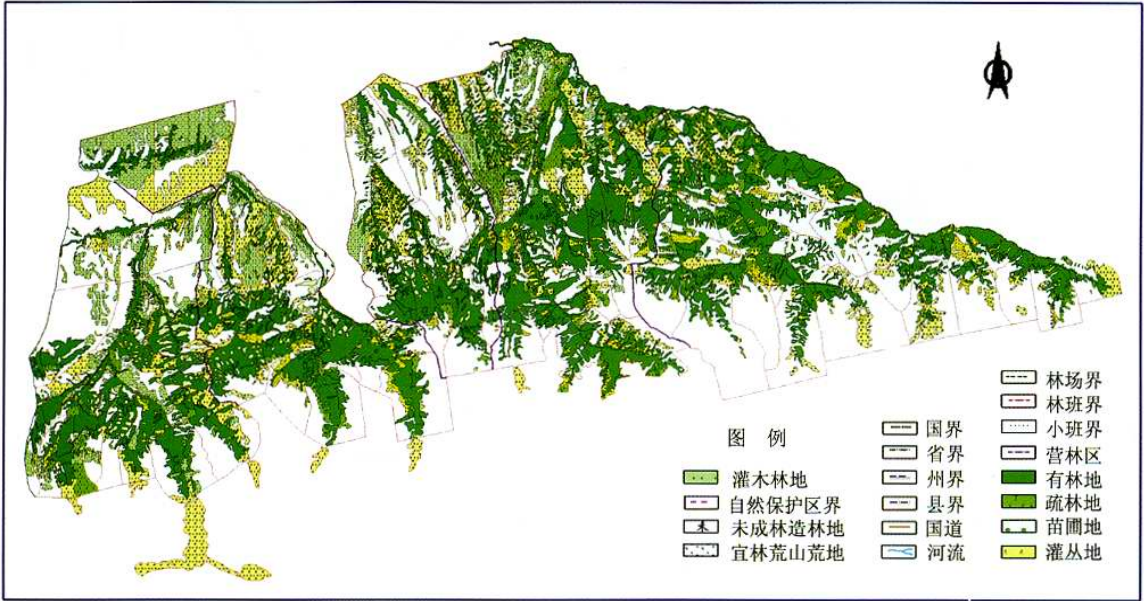
[14]万锦. 中国大学学报论文文摘(1983-1993). 英文版[DB/CD]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1996.

2.9 各种未定义类型的文献

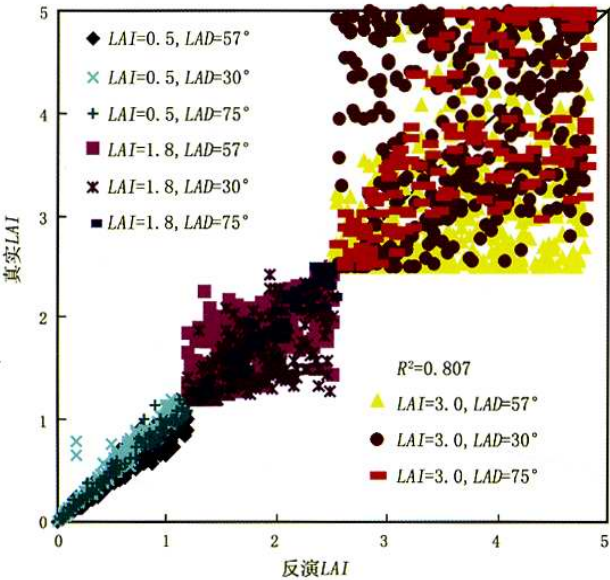
[序号]主要责任者. 文献题名[Z]. 出版地: 出版者, 出版年.



彩片17 鹅项小流域土地利用/覆被状况



彩片18 新疆天山西部森林资源分布图



彩片19 反演LAI与真实LAI的比较



彩片20 原始高光谱图像

万方数据