

森林冠层反射率模拟模型敏感参数研究

——以 INFORM 模型为例

苑惠丽¹, 李吉英²

(1. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 滨州学院建筑工程学院, 山东 滨州 256603)

摘要: 利用专门模拟森林冠层反射率的 INFORM 模型, 结合野外实测数据对该模型中的八个输入参数进行了敏感性分析和敏感参数的步长优化研究。结果表明: 叶面积指数、冠层高度、平均冠幅和森林密度四个参数是敏感参数, 叶面积指数、冠层高度、平均冠幅输入步长分别为 0.66、1 和 0.555 m, 森林密度为 244~1 244 棵·hm⁻² 时, 以 100 棵·hm⁻² 为输入步长; 为 1 244~5 244 棵·hm⁻² 时, 以 400 棵·hm⁻² 为输入步长。这为减轻模型计算量、提高运行效率、保证模拟结果的精度提供了一定的技术参考。

关键词: 模拟反射率; INFORM 模型; 参数敏感性; 优化步长

中图分类号: S663.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2020)02-0078-06

Study of the Sensitive Parameters in Simulating Forest Canopy Reflectance Using INFORM Model

YUAN Hui-li¹, LI Ji-ying²

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Binzhou University, Binzhou 256603, China)

Abstract: In this paper, the INFORM model, which specially simulated forest canopy reflectance, was used to analyze the sensitivity of eight input parameters and optimize the step size of the sensitive parameters. The results showed that the LAI, canopy height, mean crown breadth and forest density were sensitive parameters. The LAI, canopy height, mean crown were input at the step of 0.66 m, 1 m and 0.555 m, respectively. The forest density were input at the step of 100 trees·hm⁻² within the scope of 244~1 244 trees·hm⁻², while at the step of 400 trees·hm⁻² within the scope of 1 244~5 244 trees·hm⁻². The research can simplify the model calculation, improve operational efficiency and ensure the accuracy of the simulation results.

Key words: simulating reflectance; INFORM model; parameters sensitivity; optimum step

森林冠层反射率是有效进行植被类型解译、森林冠层叶面积指数(LAI)、光合有效辐射吸收系数、叶绿素等固碳参量遥感反演的重要依据。辐射传输模型通过实测叶片反射率和相关理化参数,揭示植被冠层对太阳辐射的吸收、二向反射、透射及其辐射在冠层传递的物理机制^[1],分析电磁波与冠层参数之间的相互作用,可以高精度地模拟不同植被类型的冠层反射率^[2-4]。因此,基于辐射传输模型的森林冠层反射率模拟及其应用成为近年研究的热点。

除了常用的 PROSPECT 模型^[5]、SAIL 模型^[6]、Li-Strahler 几何光学模型^[7]等,近几年出现的专门针

收稿日期: 2020-04-12

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20170117)

作者简介: 苑惠丽(1981—),女,山东滨州人,讲师,博士,主要从事流域地表要素遥感研究。

对森林冠层的 Geosail 模型、SPRINT 模型、FLIM 模型、FCR 模型和 FLIGHT 模型等,都需要大量的输入参数,较难获取。因此,有必要进行模型参数的敏感性分析,对不敏感的参数通过均值或者已有的研究推荐值代替,以便简化模型计算量,提高运行效率,对于敏感参数,则设定合适的步长,控制生成反射率的数量减少数据冗余,同时保证模拟结果的精度^[8]。本文拟选择专门针对于森林冠层反射率模拟的 INFORM 模型(Invertible Forest Reflectance Models)^[9]为研究对象,结合野外观测数据,进行输入参数的敏感性分析和优化敏感参数输入步长的探究,为其它辐射传输模型的应用提供借鉴。

1 数据和方法

1.1 数据源

本研究以安徽省六安市金寨县境内的林区野外森林样地的参量观测结果作为数据源。金寨县处于 31°06′41″~31°48′51″N 与 115°22′19″~116°11′52″E 之间,总面积 3 917 km²。该研究区位于大别山腹地,平均海拔 300 m,属于北亚热带湿润季风气候,多年平均气温 15.6 °C,年平均降水量 1 381.5 mm。全县林地面积 2 940 km²,森林覆盖率达 77%,主要林种有茶园、板栗、毛竹、马尾松、杉木、栎树等。

设置了 21 个样地,样地统一采用正方形,面积为 10 000 m² (100 m×100 m)。每个样地内确定两个 30 m×30 m 的样方。每个样方调查内容包括经纬度、海拔、群落类型、坡度、坡向、树种、树高、冠幅、LAI、森林密度等,且所有的测量工作均在 10:00~16:00 完成,观测了共 42 个样方信息。

1.2 INFORM 模型

INFORM 模型(Invertible Forest Reflectance Models)是 2001 年 Atzberger 在 FLIM 模型(Forest Light Interaction Model)^[10]的基础上发展起来的。该模型中,森林被看作是含有树冠和空隙的不连续冠层。对于一给定波段,森林冠层反射率(R)定义为完全致密均匀的植被层与被覆盖或没有被覆盖的地表两者的反射率之和:

$$R = R_C \cdot C + R_G \cdot G \quad (1)$$

式中, R_C 表示完全植被层的反射率,即无限冠层反射率; R_G 表示地表反射率,也称背景反射率; C 和 G 分别称为冠层因子和地表因子。

$$C = (1 - T_s \cdot T_o) \cdot c_s \cdot c_o \quad (2)$$

式中, T_s 和 T_o 分别为太阳入射方向和观测方向的平均冠层透射率; c_s 和 c_o 分别为太阳入射方向和观测方向的地面覆盖率。

地表因子 G 的计算公式为:

$$G = F_{ad} \cdot T_s \cdot T_o + F_{cs} \cdot T_o + F_{ad} \cdot T_s + F_{os} \quad (3)$$

式中, F_{ad} 、 F_{cs} 、 F_{ad} 和 F_{os} 作为地表因子的组成部分,分别代表阴影树冠、光照树冠、阴影地表及光照地表。

各地表因子的计算公式为:

$$F_{ad} = c_o c_s + \rho [c_o (1 - c_o) c_s (1 - c_s)]^{0.5} \quad (4)$$

$$F_{cs} = c_o (1 - c_s) - \rho [c_o (1 - c_o) c_s (1 - c_s)]^{0.5} \quad (5)$$

$$F_{ad} = c_s (1 - c_o) - \rho [c_o (1 - c_o) c_s (1 - c_s)]^{0.5} \quad (6)$$

$$F_{os} = (1 - c_o) (1 - c_s) + \rho [c_o (1 - c_o) c_s (1 - c_s)]^{0.5} \quad (7)$$

式中, ρ 表示 c_s 和 c_o 之间的正相关关系。

$$\rho = e^{(-\frac{gH}{CD})} \quad (8)$$

$$g = (\tan^2 \theta_o + \tan^2 \theta_s - 2 \tan \theta_o \tan \theta_s \cos \psi)^{0.5} \quad (9)$$

式中, g 为几何因子,该值取决于太阳光照信息和观测几何信息; θ_o 和 θ_s 分别为观测方向和太阳光入射方向的天顶角; ψ 为太阳光入射方向和观测方向的相对方位角; H 为冠层高度; CD 为冠幅。

为了计算 C 和 G 两个参量,需要定义两个参数:太阳光入射方向的地面覆盖率 c_s 和观测方向的地面覆盖率 c_o 。它们由森林密度(SD)、光照和观测几何信息(θ_s, θ_o) 计算得到:

$$c_o = 1 - e^{\frac{-k \cdot SD}{\cos \theta_o}} \quad (10)$$

$$c_s = 1 - e^{\frac{-k \cdot SD}{\cos \theta_s}} \quad (11)$$

$$k = \frac{\pi \cdot (0.5 \cdot CD)^2}{10\,000} \quad (12)$$

地表因子 G 计算公式中太阳入射方向和观测方向的平均冠层透过率 (T_s 和 T_o) 由 SAILH 模型^[11] 模拟得到:

$$T_o = f_{\text{SAILH}}(LAI, ALA, \tau_{\text{leaf}}, \rho_{\text{leaf}}, \theta_o, \psi, skyl, hot) \quad (13)$$

$$T_s = f_{\text{SAILH}}(LAI, ALA, \tau_{\text{leaf}}, \rho_{\text{leaf}}, \theta_s, \psi, skyl, hot) \quad (14)$$

式中, LAI 为叶面积指数, ALA 为平均叶倾角, $skyl$ 为散射辐射比, hot 为热点^[11], τ_{leaf} 和 ρ_{leaf} 分别为叶片透过率和反射率, 由叶片反射率模型 Prospect 模拟得到:

$$(\rho_{\text{leaf}}, \tau_{\text{leaf}}) = f_{\text{Prospect}}(N, Cab, Cm, Cw) \quad (15)$$

式中, N 为叶肉结构参数, Cab 为叶绿素含量, Cm 为干物质含量, Cw 为等效水厚度。

另外, R_G 和 R_C 也由 SAILH 模型计算得到:

$$R_G = f_{\text{SAILH}}(LAI_U, ALA_U, \tau_{\text{leaf}}, \rho_{\text{leaf}}, \rho_{\text{soil}}, \theta_o, \theta_s, \psi, skyl, hot) \quad (16)$$

$$R_C = f_{\text{SAILH}}(LAI_{\text{inf}}, ALA, \tau_{\text{leaf}}, \rho_{\text{leaf}}, \rho_{\text{soil}}, \theta_o, \theta_s, \psi, skyl, hot) \quad (17)$$

式中, LAI_U 和 ALA_U 分别为林下植被 LAI 和林下植被 ALA , ρ_{soil} 为土壤反射率。

INFORM 模型输入参数众多, 利用 INFORM 模型模拟冠层反射率 R 可以表示为如下 17 个叶片参数、冠层参数、光照及几何参数的函数, 即:

$$R = f_{\text{INFORM}}(SD, CD, H, LAI, ALA, LAI_U, ALA_U, LAI_{\text{inf}}, \rho_{\text{soil}}, N, Cab, Cm, Cw, \theta_s, \theta_o, skyl, hot) \quad (18)$$

1.3 参数敏感性分析及敏感参数步长优化方法

INFORM 模型中各参数如表 1 所示, 其中叶面积指数 (LAI)、森林密度 (SD)、冠幅 (CD)、冠层高度 (H) 四个冠层参量由野外测量获得; 叶绿素含量 (Cab)、干物质含量 (Cm) 和等效水厚度 (Cw) 三个叶片生化参量, 由欧盟委员会联合研究中心的空间应用研究所实测获取的 LOPEX'93 植物生化参数数据库确定; 散射辐射比、热点、叶倾角、林下植被 LAI 、林下植被 ALA 、叶肉结构参数几个参数取定值, 分别为 0.1、0.4、55°、0.5、45° 和 1.7。

表 1 研究区野外观测冠层参数及植物生化参数统计情况

参量	$SD/$ (棵 · hm^{-2})	CD/m	H/m	LAI	$Cab/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$Cw/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$Cm/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	θ_s
均值	1 695	5.16	10.19	3.54	—	—	—	—
标准差	1 767	1.46	3.05	1.59	—	—	—	—
最小值	244	1.20	5.50	1.09	42	0.004 6	0.003 1	25
最大值	5 152	5.64	13.30	6.37	46	0.015 0	0.003 9	61
分级步长	1 227	1.11	1.95	1.32	1	0.002 6	0.000 2	9

据此, 对 INFORM 模型各参数进行分级, 输入模型模拟森林冠层反射率。该模型由 Matlab2017b 编程实现, 敏感性输入参数的变化将直接影响到最终结果, 而输入参数步长决定了模拟反射率的数量, 为避免数据冗余且保证反射率条数要求, 有必要进一步对输入参数的步长进行合理的设定。

首先, 根据已经区域化的 INFORM 模型, 敏感参数分别按照一定的步长在取值范围内递增得到与之——对应的模拟森林冠层反射率, 然后做模拟森林冠层反射率随敏感参数变化的散点图, 以此分析确定各参数的输入步长。为便于比较分析, 成图前需将各参数换到同一数量级。如对于森林密度 (SD) 这一参量, 其取值需除以 1 000 棵 · hm^{-2} 以达到与其他参数统一数量级。

2 结果与讨论

2.1 参数敏感性分析

采用修正的 Morris 筛选法^[12] 对表 1 中所列参数进行局部敏感性分析, 待分析参数在取值范围内以

固定步长 25% 进行扰动,INFORM 模型中其他参数取固定值。如对 Cab 进行敏感性分析时, Cab 以 25% 为步长扰动,步长值为 $1 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

从图 1 中(a)、(b)、(c)和(d)模拟结果看出,在可见光和近红外波段(450~880 nm)范围内,在叶绿素含量(Cab)、等效水厚度(Cw)、干物质含量(Cm)和太阳天顶角(θ_s)四个参量的增加过程中,模拟的森林冠层反射率变幅不大,为不敏感参数。而随着样地森林密度(SD)的增加,除蓝、红波段外,各个波段的冠层反射率都显著增大,且变化幅度越来越小,尤其是大于 4 000 棵 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时,反射率值近于饱和(图 1(e));随森林冠层冠幅的增加,各波段反射率都有明显变化,在可见光波段,随冠幅增加,模拟的冠层反射率降低,而在近红外波段呈明显增大趋势(图 1(f));随森林冠层高度(H)的增加,各波段内模拟的冠层反射率都随之降低(图 1(g));随 LAI 的增大,可见光波段的冠层反射率降低,近红外波段反射率明显增加;因此,森林密度、平均冠幅、冠层高度及 LAI 四个冠层参数的变化都会引起模拟冠层反射率的显著增加或减少,均为敏感性参数。

2.2 敏感参数步长优化

从图 2 中可以看出:1)同一波段范围内,各参数在取值范围内,引起的模拟反射率变化幅度不同,且森林密度与模拟反射率的散点分布不单调,因此,在计算时要随着森林密度的递增累加模拟反射率变化的绝对值;2)在蓝波段, LAI 引起的模拟冠层反射率变化范围最大,在绿波段平均冠幅(CD)引起的反射率变化最大,在红波段 LAI 引起的反射率变化最大,在近红外波段森林密度(SD)引起的反射率变化最大;3)冠层高度(H)在取值范围内对各波段森林冠层反射率模拟结果变化范围都是最小的,且单调,变化幅度均一;4)平均冠幅(CD)对蓝波段和红波段影响较小,变幅小,模拟冠层反射率分布不单调,对绿波段和近红外波段影响较大,变幅大,且单调;5)森林密度(SD)主要引起绿波段、红波段和近红外波段反射率的变化,在四个波段上都不单调,且变幅不均一,如图 2(c)、(d)所示。大约在森林密度达到 244~1 000 棵 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时,变幅急剧减小;在 4 000~5 000 棵 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时,变幅缓慢增大;因此,在确定参数分级时,森林密度参数可以采用变步长的方式;6) LAI 在取值范围内对各波段影响都单调变化,变幅均一。

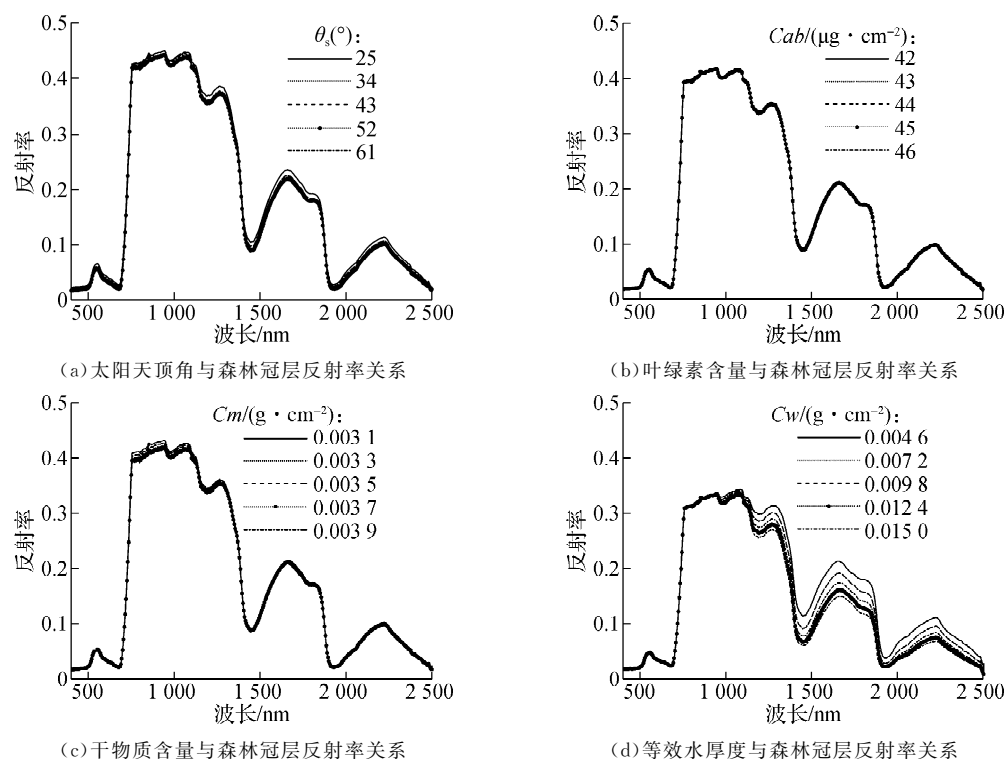


图 1 INFORM 模型部分参数敏感性分析

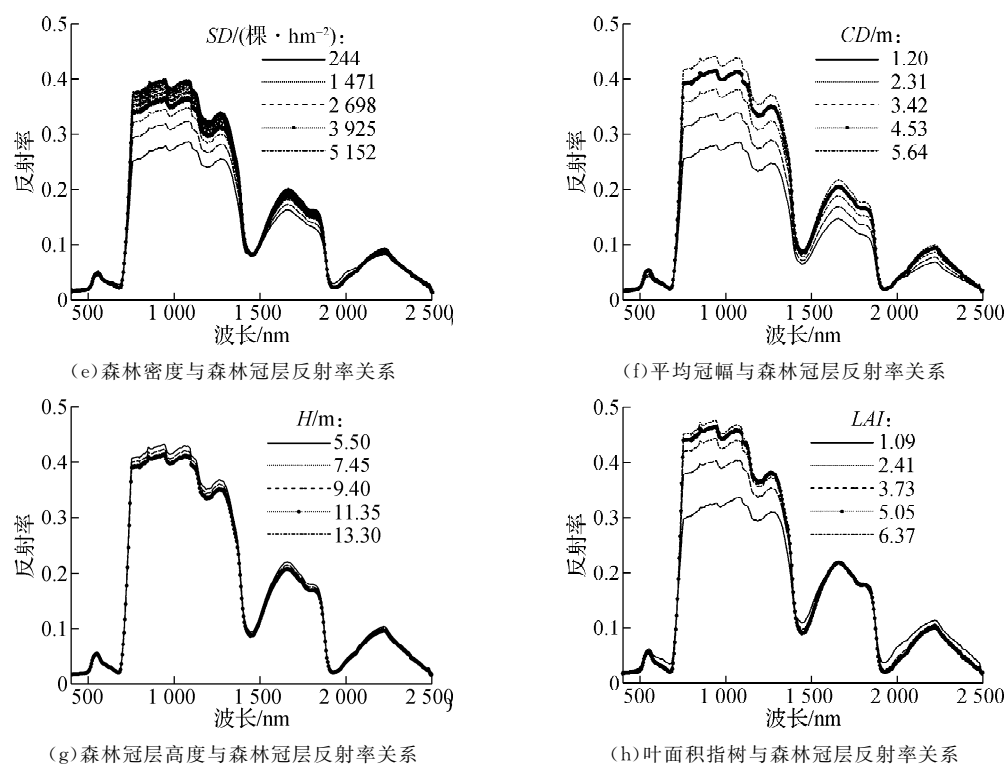


图1 INFORM模型部分参数敏感性分析(续)

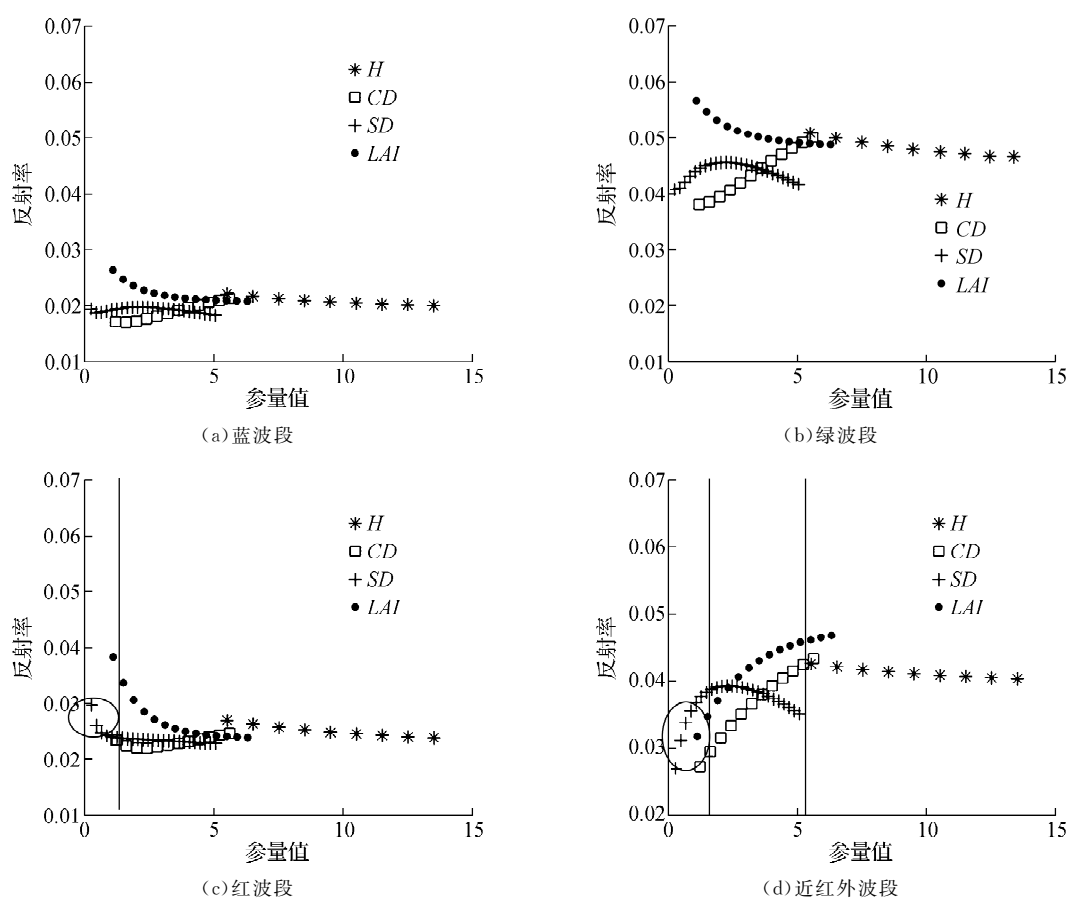


图2 INFORM模型敏感性参数步长优化

基于此,以冠层高度(H)引起的模拟反射率变化为标准,确定其他三个敏感性参数的步长,得到表2。冠层高度(H)设为1 m,平均冠幅(CD)步长设为0.555 m, LAI 步长设为0.66,森林密度(SD)以变步长的方式输入,在244~1 244 棵 $\cdot$ hm $^{-2}$ 时,以100 棵 $\cdot$ hm $^{-2}$ 为步长,在1 245~5 244 棵 $\cdot$ hm $^{-2}$ 时,以400 棵 $\cdot$ hm $^{-2}$ 为步长。

表2 INFORM 模型敏感参数步长优化

参量	$SD/(\text{棵} \cdot \text{hm}^{-2})$		CD/m	H/m	LAI
最小值	244	1 245	1.20	5.5	1.09
最大值	1 244	5 244	5.64	13.5	6.37
优化步长	100	400	0.555	1	0.66

3 结 语

本文在详细分析了 INFORM 模型各输入参数的基础上,结合野外实测森林冠层参量,进行了模型输入参数的敏感性分析,并通过构建敏感参数与模拟森林冠层反射率之间的散点图优化模型中随敏感参数的输入步长。主要结论有:1)森林密度(SD)、平均冠幅(CD)、冠层高度(H)和 LAI 为 INFORM 模型模拟森林冠层反射率的敏感性参数。在蓝、红波段, LAI 引起的模拟冠层反射率变化范围最大,在绿波段平均冠幅(CD)引起的反射率变化最大,在近红外波段森林密度(SD)引起的反射率变化最大。2)根据敏感性参数对森林冠层反射率的影响程度不同,以冠层高度(H)引起的模拟反射率变化为标准,确定其他敏感参数的步长。冠层高度(H)的步长为1 m,平均冠幅(CD)的步长为0.555 m,而森林密度(SD)以变步长的方式输入,在244~1 244 棵 $\cdot$ hm $^{-2}$ 时,以100 棵 $\cdot$ hm $^{-2}$ 为步长,在1 244~5 244 棵 $\cdot$ hm $^{-2}$ 时,以400 棵 $\cdot$ hm $^{-2}$ 为步长, LAI 步长为0.66。

本文确定了森林冠层辐射传输模型 INFORM 模型的敏感性参数,提出了优化敏感参数的输入步长求算方法,并可以在其他辐射传输模型中进行应用。有利于减轻模型计算量,对于提高运行效率,保证模拟结果的精度具有重要的实践应用价值。

参考文献:

- [1] Jaquinta J, Pinty B, Privette J L. Inversion of a physically based bidirectional reflectance model of vegetation[J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 687 - 698
- [2] 刘轲, 黄平, 任国业, 等. 基于冠层反射率模型的作物参数多阶段反演方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 190 - 198
- [3] 肖艳芳, 周德民, 宫辉力, 等. 冠层反射光谱对植被理化参数的全局敏感性分析[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 368 - 374
- [4] Dong T, Wu B, Meng J, et al. Sensitivity analysis of retrieving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 1 - 7
- [5] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2): 75 - 91
- [6] 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
- [7] 李刚, 张华, 王道龙, 等. 基于 PROSAIL 模型的温性草甸草原 FPAR 遥感反演[J]. 中国草地学报, 2014, 36(2): 61 - 69
- [8] Yuan H, Ma R, Atzberger C, et al. Estimating forest APAR from multispectral landsat-8 data using the invertible forest reflectance model INFORM[J]. Remote Sensing, 2015(6): 7425 - 7446
- [9] Atzberger C. Development of an invertible forest reflectance model: The INFOR-model[J]. A Decade of Trans, 2000, 64: 325 - 331
- [10] Rosema A, Verhoef W, Noorbergen H, et al. A new forest light interaction model in support of forest monitoring[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 42(1): 23 - 41
- [11] Kuusk A. The hot spot effect in plant canopy reflectance[J]. Springer Berlin Heidelberg, 1991, 107(6): 139 - 159
- [12] Francos A. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale[J]. System Safety, 2003, 79(2): 205 - 218

(责任编辑:谭彩霞)