

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

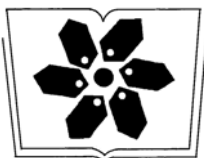
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第11期 Vol.33 No.11 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 11 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义 徐涵秋, 唐 菲 (3249)
- 两种自然保护区设计方法——数学建模和计算机模拟 王宜成 (3258)
- 家域研究进展 张晋东, Vanessa HULL, 欧阳志云 (3269)
- 浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法 李玉照, 刘 永, 赵 磊, 等 (3280)
- 辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展 肖艳芳, 周德民, 赵文吉 (3291)
- 微囊藻毒素对陆生植物的污染途径及累积研究进展 靳红梅, 常志州 (3298)

个体与基础生态

- 年龄、性别及季节因素对千岛湖岛屿社鼠最大活动距离的影响 叶 彬, 沈良良, 鲍毅新, 等 (3311)
- 寄主大小及寄生顺序对蝇蛹佣小蜂寄生策略的影响 詹月平, 周 敏, 贺 张, 等 (3318)
- 两种苹果砧木根系水力结构及其 PV 曲线水分参数对干旱胁迫的响应
..... 张林森, 张海亭, 胡景江, 等 (3324)
- 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响 刘 苹, 赵海军, 仲子文, 等 (3332)

种群、群落和生态系统

- 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素 江志兵, 朱旭宇, 高 瑜, 等 (3340)
- 洞头海域网采浮游植物的月际变化 朱旭宇, 黄 伟, 曾江宁, 等 (3351)
- 狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力 李兆佳, 熊高明, 邓龙强, 等 (3362)
- 三亚岩相潮间带底栖海藻群落结构及其季节变化 陈自强, 寿 鹿, 廖一波, 等 (3370)
- 长期围封对不同放牧强度下草地植物和 AM 真菌群落恢复的影响 周文萍, 向 丹, 胡亚军, 等 (3383)
- 北京松山自然保护区森林群落物种多样性及其神经网络预测 苏日古嘎, 张金屯, 王永霞 (3394)
- 藏北高寒草地生态补偿机制与方案 刘兴元, 龙瑞军 (3404)
- 辽东山区次生林生态系统不同林型树干茎流的理化性质 徐天乐, 朱教君, 于立忠, 等 (3415)
- 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响 郑 威, 闫文德, 王光军, 等 (3425)
- 人工高效经营雷竹林 CO₂ 通量估算及季节变化特征 陈云飞, 江 洪, 周国模, 等 (3434)
- 新疆典型荒漠区单食性天花吉丁虫磷元素含量对环境的响应 王 晶, 吕昭智, 宋 菁 (3445)
- 双斑长跗萤叶甲越冬卵在玉米田的空间分布型 张 聪, 葛 星, 赵 磊, 等 (3452)
- 舟山群岛四个养殖獐种群遗传多样性和遗传结构 林杰君, 鲍毅新, 刘 军, 等 (3460)

景观、区域和全球生态

- 乡镇尺度金塔绿洲时空格局变化 巩 杰, 谢余初, 孙 朋, 等 (3470)
- 合并与不合并: 两个相似性聚类分析方法比较 刘新涛, 刘晓光, 申 琪, 等 (3480)

资源与产业生态

基于投入产出表的中国水足迹走势分析 王艳阳,王会肖,张 昕 (3488)

基于 MRICES 模型的气候融资模拟分析 朱潜挺,吴 静,王 铮 (3499)

黄东海陆架区沉积物中磷的形态分布及生物可利用性..... 张小勇,杨 茜,孙 耀,等 (3509)

鄱阳湖采砂南移扩大影响范围——多源遥感的证据 崔丽娟,翟彦放,邬国锋 (3520)

温度、盐度及其互作效应对吉富罗非鱼血清 IGF-I 与生长的影响 强 俊,杨 弘,王 辉,等 (3526)

城乡与社会生态

福建省城镇-交通系统的景观分隔效应 张天海,罗 涛,邱全毅,等 (3536)

研究简报

青藏高原高寒草原区工程迹地面积对其恢复植物群落特征的影响 毛 亮,周 杰,郭正刚 (3547)

黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析..... 孟秦倩,王 健,张青峰,等 (3555)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 清晨的天山马鹿群——家域是动物行为学和保护生物学的重要概念之一,它在动物对资源环境的适应与选择,种群密度及社会关系等生态学过程研究中有着重要的作用。马鹿属于北方森林草原型动物,在选择生境的各种要素中,隐蔽条件、水源和食物的丰富度是最重要的指标。野生天山马鹿是中国的特产亚种,主要分布在北天山深山海拔1500—3800m 地带的森林草原中,在高山至谷地之间不同高度的坡面上,马鹿按季节、昼夜变化的不同进行采食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203290434

肖艳芳,周德民,赵文吉. 辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展. 生态学报, 2013, 33(11): 3291-3297.

Xiao Y F, Zhou D M, Zhao W J. Review of inversing biophysical and biochemical vegetation parameters in various spatial scales using radiative transfer models. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3291-3297.

辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展

肖艳芳*, 周德民, 赵文吉

(首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 植被是生态系统最重要的组成成分之一, 许多与植被有关的物质能量交换过程都与植被的理化参数密切相关, 因此定量估算植被的理化参数含量对监测植被生长状况、森林火灾预警以及研究全球碳氮循环过程等都具有重要意义。在众多定量反演植被理化参数的方法中, 基于数学、物理学以及生物学的基本理论建立起来的辐射传输模型受到越来越多的关注。辐射传输模型描述了植被与入射辐射之间的相互作用过程和特征, 相对于传统的经验/半经验方法, 辐射传输模型物理意义明确, 具有稳定性和可移植性强的特点。在分析国内外最新相关研究的基础上, 首先从植被叶片、冠层和像元 3 个不同的尺度阐述反演植被理化参数的辐射传输模型。叶片尺度上主要介绍 PROSPECT 模型和 LIBERTY 模型; 冠层尺度上主要介绍 SAIL 冠层辐射传输模型以及 PROSPECT 与 SAIL 耦合的 PROSAIL 叶片-冠层辐射传输模型; 像元尺度的植被理化参数反演目前主要采用冠层尺度的辐射传输模型。其次, 分析尺度变化下植被理化参数遥感反演所面临的主要问题, 如不同尺度下模型参数敏感性的变化、辐射传输模型的选取以及混合像元的影响等。最后, 总结展望植被理化参数反演多模型与多种数据源相结合的研究趋势, 以及将来具有高空间分辨率的高光谱遥感卫星升空后所带来的发展前景。

关键词: 理化参数; PROSPECT; PROSAIL; 尺度; 辐射传输模型

Review of inversing biophysical and biochemical vegetation parameters in various spatial scales using radiative transfer models

XIAO Yanfang*, ZHOU Demin, ZHAO Wenji

Key Laboratory of Three Dimension Information Acquisition and Application MOE, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: Vegetation is one of the most important components of the earth ecosystem, and its biophysical and biochemical parameters are closely correlated to many exchanges of energy and matter in natural environments. So estimation of the key biophysical and biochemical variables accurately is critical for many ecological, agronomic, and meteorological applications, such as monitoring the growth condition of vegetation, warning the forest fire and studying the global carbon-nitrogen cycle.

Empirical-statistical approach and physically based canopy reflectance model are the two main methods to estimate vegetation characteristics. Since the vegetation reflectance is impacted by several internal and external factors, which are different both spatially and temporally according to the different vegetation types. There is a critical issue on the empirical-statistical approach due to its lacking of generality. And the empirical-statistical approach will be site-, time- and crop-specific because of the existed relationship of reflectance and its established biochemical and biophysical parameters. The vegetation radiative transfer models, as the most important physically based model, are established on fundamental theories of mathematics, physics and biology, and they describe the transfer and interaction of radiation inside the canopy based on physical laws. Many researchers have proved the radiative transfer models as an important tool to understand and quantify

基金项目: 国家自然科学基金 (NSFC41171415); 国家基金重点项目 (41130744/D0107)

收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-09-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoyanfang2006@126.com

the relationship between vegetation object properties and remotely detected radiance signals, with their strong stability and good spatiotemporal transferability by comparing with the empirical-statistical approach. On the basis of different vegetation types and research objectives, a variety of radiative transfer models have been developed for different research purpose in the past two decades, and there are many reports on the application of these models.

In this review, we focused on introducing the vegetation radiative transfer models used to estimate biophysical and biochemical parameters at different spatial scales, and we discussed the key issues with these models for estimating vegetation variables as the viewpoint of the changed scale. Firstly we overviewed vegetation radiative transfer models at three scales of leaf, canopy and pixel. At leaf scale, we primarily introduced the foundation and application of PROSPECT model and LIBERTY model. At canopy scale, the special emphasis is on the SAIL model and the coupled PROSAIL model. At pixel scale, the frequently-used radiative transfer models continue to be the models established at canopy scale, though some researchers have retrieved the biophysical and biochemical parameters at regional or global scale using a number of optical remote sensing sensors. Secondly, we discussed the critical issue of estimating the biophysical and biochemical parameters with remote sensing technique dealing as the scale changed. With the different spatial scales the sensitivity of vegetation reflectance to biochemical and biophysical variables can be changed, and it remains a key issue if dealing with how to choose a more proper model to the specific scale. The mixed pixel would be very critical to the retrieval accuracy when we use remote sensing images with medium and low resolution to estimate the biochemical and biophysical parameters. Finally, we discussed the possible future approaches to estimate the biochemical and biophysical parameters using radiative transfer models, both in terms of burning issues and development prospect.

Key Words: biophysical and biochemical variables; PROSPECT; PROSAIL; scale; radiative transfer model

植被为包括人类在内的几乎所有生物的生存提供物质和能量来源,是生态系统中最重要的重要组成部分之一。许多有关植物物质能量交换的生态过程如光合作用、蒸腾作用、呼吸作用、初级生产力和分解作用等都与植被的理化参数密切相关。例如叶绿素是植被光合作用的必要元素,是监测植被营养胁迫、叶片氮素缺乏、病虫害以及估算农作物产量的重要指示剂^[1]。植物含水量是植被干旱监测和森林火灾预警的一个不可或缺的指标^[2]。氮素是植物生长最重要的营养元素,与植物的净光合速率以及呼吸作用、初级生产力等具有很强的关系^[3]。

遥感技术是在一系列空间和时间尺度上监测地球生物圈和植被动态变化的十分有效的工具。定量估测植被的生理生化参数,是遥感技术成功地应用于植被信息管理的关键因素。相对于费时、费力且难以大面积开展的传统植被理化参数测量方法,遥感技术能够方便快速地获取连续空间上的地物光谱信息。尤其是近年来高光谱成像技术的快速发展,使得通过遥感技术定量反演植被理化参数成为研究的热点。

辐射传输模型基于数学、物理学、生物学的基本理论,通过模拟光在植被内部的辐射传输过程与作用机制,来获取植被生化参数及植被结构等信息。相对于缺乏明确物理意义的经验/半经验方法,辐射传输模型在反演植被理化参数方面表现出更强的稳定性和可移植性。由于研究对象的空间尺度变化大,不同尺度下影响植被辐射传输过程的因素不尽相同,因此针对研究对象的不同,国内外的研究者在不同尺度上建立了描述植被与电磁波辐射之间相互作用的数学物理模型。本文在总结国内外研究者大量工作的基础上,分别介绍叶片尺度、冠层尺度和像元尺度下几种典型的辐射传输模型,阐述基于辐射传输模型反演植被理化参数的尺度研究进展,分析目前理化参数遥感反演所面临的主要问题和发展前景。

1 不同尺度下的植被辐射传输模型

1.1 叶片尺度

1990年 Jacquemoud^[4]基于 Allen 平板模型发展起来的 PROSPECT 模型是应用最多的叶片辐射传输模型。该模型假设叶片由 N 层同性质的平板组成,由 N-1 层空气隔开,光线的非漫射特性只存在于最顶层。模

型需要输入两类参数:叶片结构参数 N 和叶片的生化参数含量,包括色素含量,等效水厚度,干物质含量等。模型前向运算可以得到叶片 400—2500 nm 的半球反射率和透射率,反演则可以估算叶片的生化参数含量。PROSPECT 模型建立后,不断有学者对其进行改进,1997 年 Baret 和 Fourty 简化了 PROSPECT 模型,用干物质含量代替蛋白质、纤维素和木质素等的含量^[5]。Bousquet 等描述了叶片方向性反射的物理属性,将叶片表面引起的镜面反射引入模型中^[6];Ferret 等改进的 PROSPECT5 模型成功地将叶绿素和类胡萝卜素含量分开反演^[7];Pedrós 等基于 PROSPECT 模型估算了叶绿素 a 的荧光^[8]。PROSPECT 模型比较准确地模拟了光在叶片内的辐射传输过程,许多研究者利用不同类型的叶片对 PROSPECT 模型的性能进行检验,证明该模型是目前最好的叶片辐射模型之一。施润和等基于 PROSPECT 模型模拟大量不同生化参数含量和叶片结构的叶片光谱,研究了利用高光谱指数定量反演叶绿素含量的可行性和精度^[9]。

除 PROSPECT 模型外,Ganapol 等在随机模型的基础上提出 LEAFMOD 叶片辐射传输模型,该模型假设叶片均匀充满散射和吸收光线的生物物质,给定叶子的厚度和叶片的吸收和散射系数等光学特性即可估算叶子的反射和透射^[10]。1998 年 Dawson 针对针叶没有明显的栅栏组织,且大部分细胞为球形细胞,提出 LIBERTY 模型,用来模拟针叶簇叶或单叶的光谱特性^[11]。LIBERTY 模型需要的输入参数有 6 个,分别为平均细胞直径、表征细胞内上行辐射分量的细胞间隙、基吸收、白化吸收(去掉水分叶绿素的吸收,相当于木质素的吸收)、针叶厚度、生化组分含量(叶绿素、水分、蛋白质、木质素和叶绿素)。

1.2 冠层尺度

SAIL 模型是最早的冠层模型之一,该模型是由 Verhoef 于 1984 年在对 Suits 模型进行改进的基础上提出的四流辐射传输模型^[12],在模型中冠层被假设为平面平行的无限延展介质,冠层的结构由叶面积指数和叶倾角分布确定。在叶片方位角分布均匀的假设下,考虑任意的叶片倾角,利用叶倾角分布函数为权重计算任意叶倾角分布的吸收和散射系数,冠层的二向反射率作为观测角度的函数。归纳起来,SAIL 模型所需要输入的参数主要包括 3 部分:叶片反射率和透射率、描述冠层结构的参数以及观测和太阳的几何位置。

SAIL 模型提出后,许多研究者对 SAIL 进行不断的改进和完善,Kussk 将叶片尺寸与冠层高度的比值作为热点加入 SAIL 模型中,改进后的模型称为 SAILH 模型^[13];Verhoef 和 Weiss 分别提出 GeoSAIL 和 2M-SAIL 模型,用来描述垂直分布的非均质冠层^[14-15]。需要注意的是要区分 GeoSAIL 模型与 GeoSail 模型的不同,国内许多研究者将两者混淆,GeoSAIL 模型可以看作是一个双层的 SAIL 模型,同时模型还包含了一个描述土壤反射率的子模型,用于模拟土壤湿度对冠层反射率的影响;GeoSail 模型则是 2001 年由 Huemmrich^[16] 提出的用于描述不连续冠层反射率的模型,是几何光学模型 Jasinski 模型^[17]与辐射传输模型 SAIL 模型的结合,模型将冠层假设为大小相同的圆柱体或圆锥体,由 SAIL 模型分别模拟光照冠层、光照背景和阴影三部分的反射率。近几年对 SAIL 模型的改进仍然很活跃,2007 年 Verhoef 提出鲁棒性更强,计算速度更加优化的 4SAIL 模型^[18];Verhoef 和 Bach 对 GeoSAIL 模型进行扩展,考虑了冠层聚集度,提出 4SAIL2 模型^[19]。

SAIL 模型主要适用于可以假设为水平均匀的浓密冠层,如封陇后的农作物冠层和连续分布的森林冠层等。离散的森林冠层表现出不同形状的非均质结构,利用辐射传输模型模拟冠层反射率时需要考虑更多的冠层结构因素。因此除 SAIL 系列模型之外,研究者还发展了许多其他的冠层辐射传输模型,如 FCR 模型^[20]、NADIM 模型^[21]、MCRM 模型^[22]以及 4 个专门针对不连续森林冠层的辐射模型 DART 模型^[23]、SPRINT 模型^[24]、FLIM 模型^[25]和 FLIGHT 模型^[26]。表 1 给出了常用冠层辐射传输模型的输入参数。

在没有多角度观测数据的条件下,单独利用冠层模型无法反演得到叶片的理化参数含量。为了实现这一反演目的,需要将冠层模型与叶片模型进行耦合。1992 年 Baret 首次将 SAILH 模型与 PROSPECT 模型结合,提出 PROSAIL 模型,考虑土壤背景对辐射传输过程的影响,将 Hapke 土壤反射率模型也耦合到叶片-冠层模型中^[27]。近年来,研究者提出利用耦合的大气辐射传输模型模拟冠层的大气层外多角度表观辐射^[19]。除 PROSAIL 模型外,研究者尝试将不同的叶片模型与不同的冠层辐射传输模型相结合。例如,PROSPECT 模型与 GeoSail、GeoSAIL、2M-SAIL、4SAIL、4SAIL2 模型耦合描述植被冠层中的某些非均质特性;PROSPECT 模型

与 DART、SPRINT、FLIM、FLIGHT 模型耦合来模拟不连续的森林冠层;其他叶片模型如 LEAFMOD 和 LIBERTY 也用来与冠层辐射传输模型进行耦合^[28-34]。但总的来说,PROSAIL 叶片-冠层模型的应用最为广泛。

表 1 常用冠层辐射传输模型的输入参数
Table 1 The input parameters of several canopy radiative transfer models

模型 Models	输入参数 Input parameters
SAIL	叶面积指数、叶倾角分布函数、热点参数、土壤反射率、天空光散射比、太阳天顶角和方位角、观测天顶角和方位角、叶片反射率和透过率
FCR	叶面积指数、热点参数、平均叶倾角、叶倾角椭圆分布函数的离心率、太阳天顶角和方位角、观测天顶角和方位角、埃氏浑浊系数、叶片结构参数 N、叶片的叶绿素面积含量、叶片等效水厚度、叶片表面蜡质层与叶片内物质折射率的比值、Price 土壤模型各方程的权重
NADIM	叶面积指数、叶倾角分布函数、热点参数、叶片平均密度、叶片反射率、叶片透过率、土壤反照率、观测天顶角
MCRM	叶面积指数、热点参数、平均叶倾角、马尔可夫聚集参数、太阳天顶角和方位角、观测天顶角和方位角、埃氏浑浊系数、叶片结构参数、叶片的叶绿素面积含量、叶片等效水厚度、Price 土壤模型第一方程的权重
SPRINT	叶面积指数、叶倾角分布函数、树密度、树分布类型、树冠形状、树干高度、树高度、树干半径、树冠半径、所取树枝的面积、叶密度
FILM	叶倾角分布函数、树密度、树冠直径、树冠高度、树冠叶面积、树冠消光系数、土壤反射率、太阳天顶角和方位角、观测天顶角和方位角
FLIGHT	叶倾角分布函数、树高、树冠半径、冠基、树干直径、树冠形状、树分布类型、冠层覆盖比例

1.3 像元尺度

植被的理化参数是定量描述区域或全球范围内物质循环和能量流动过程模型的重要参量。目前大区域范围的高光谱影像不易获取,中低分辨率的遥感数据仍然是区域或全球尺度上反演植被理化参数的重要数据源。由于中低分辨率遥感数据的空间结构信息不够详细,在其像元尺度上无法辨别单个的冠层,植被理化参数的反演尺度由冠层上升到像元尺度。近年来,一些研究者尝试使用中低分辨率的多分辨率影像如 SPOT、MODIS、MERIS 等估测大区域乃至全球范围的植被生理生化参数^[35-42]。Zarco-Tejada 首先利用叶片-冠层的辐射传输模型模拟的等效 MODIS 反射率光谱分析冠层结构、观测几何等在估测叶片含水量中的影响,最后利用同步的 MODIS 数据反演得到叶片含水量并与实测值比较^[43]。Houborge 将叶片模型 PROSPECT、冠层模型 ACRM 和大气校正模型 6SV1 进行耦合,基于多步查找表法,从 SPOT 影像中估测叶片的叶绿素含量和 LAI^[39]。le Maire 结合叶片模型 PORSECT4、冠层模型 4SAIL2 和土壤模型 SOILSPECT,利用 MODIS 时间序列反射率影像估测轮作作物的叶面积指数 LAI^[44]。

2 尺度变化下植被理化参数反演面临的问题

2.1 模型参数敏感性的变化

随着反演尺度的变化,不断有新的模型耦合到叶片-冠层辐射传输模型中,不同尺度下植被反射率对植被理化参数变化的敏感度是否具有“尺度效应”,其敏感度随尺度是如何变化的?这是在不同尺度下利用辐射传输模型反演植被理化参数所必须要解决的首要问题。在 PROSPECT 叶片模型中,叶片结构参数 N 是反演叶片生化参数的最大误差所在。Jacquemoud 和施润和的研究结果都表明 N 的变化会影响 400—2500 nm 全波段的光谱特性^[4,45],这种影响在很大程度上干扰了生化参数含量变化引起的叶片反射率或透射率的变化。当尺度扩展到冠层时,以 PROSAIL 叶片-冠层辐射传输模型为例,叶片结构参数 N 对模拟的冠层反射率的影响变得非常小。目前,虽然一部分研究者对植被辐射传输模型参数的敏感性进行了分析,例如,Bacour 定量计算了 PROSAIL 中所有冠层参数变化对冠层反射率的影响,在可见光波段,叶绿素对冠层反射率的贡献达到 60%,而近红外波段,平均叶倾角和叶面积指数是影响冠层反射率的主要因素^[46]。但是这些研究大多集中在叶片-冠层尺度。对于近几年提出的叶片-冠层-大气辐射传输模型中参数敏感性变化的研究,以及对于某一参数敏感性随尺度的变化特征的研究很少见于文献中。

2.2 像元尺度下混合像元的影响

从冠层尺度扩展到遥感影像像元尺度的难点是混合像元的问题。在冠层尺度上,辐射传输模型的提出大多是基于纯净、覆盖均一的冠层,而在像元尺度上,由于遥感数据空间分辨率的限制,使得遥感影像中存在着大量的混合像元。对于连续、均匀分布的植被,混合像元不会对理化参数反演结果造成较大的影响,但是对于离散、稀疏的植被,混合像元的影响就不容忽视。朱小华研究表明地表景观结构的异质性是造成多尺度 LAI 反演误差的关键因素^[47]。尤其是中国,由于田块破碎程度较高,混合像元在中低分辨率遥感影像中所占的比例很高,混合像元问题是利用中低分辨率卫星遥感数据反演植被理化参数含量所必须要克服的难题。目前应用遥感影像反演植被理化参数的研究中使用的辐射传输模型大多是冠层尺度上的模型,几乎没有考虑混合像元的影响。虽然在一些模型中考虑了土壤背景对冠层反射率的影响,但是需要注意的是模型中所提到的土壤背景的影响是指植被冠层覆盖范围内的土壤反射率由于叶片之间的缝隙而到达传感器干扰了冠层反射率,而并非冠层覆盖范围以外的背景。

2.3 不同尺度下反演模型的选择

由于陆地表面的复杂性,人们在某一尺度上根据观测到的性质总结出的原理或规律,在另一尺度上可能仍然有效,可能需要修正,也可能完全不适用。对于植被来说,这种尺度效应更加明显。例如当影像的分辨率小于植株时,将植株描述为平面平行的无限延伸介质就无法正确地描述光的辐射传输过程,此时 SAIL 模型的有效性就值得商榷;相反,如果影像的分辨率无法分辨出单个的冠层,一些专门针对不连续森林设计的辐射传输模型可能就不再适用,在这一分辨率下,将像元看作水平均一的介质,利用 SAIL 模型反演像元尺度上理化参数含量的精度或许更高。然而就目前国内外的研究来看,不同类型的植被在不同分辨率下如何选择合适的辐射传输模型的相关研究还非常少。

3 总结与展望

植被理化参数遥感反演经历了从叶片尺度到冠层尺度再到像元尺度的发展过程,基于数学、物理学以及生物学理论建立的植被辐射传输模型,以其较强的稳定性和可移植性,在植被理化参数的遥感反演中发挥了非常重要的作用。随着尺度的不断上升,基于辐射传输模型反演植被理化参数面临着诸如参数敏感性和不确定性的变化,混合像元对反演结果的影响,以及不同尺度下模型的选择等问题,这些问题是实现适时、准确、大范围和多尺度监测植被理化参数含量空间分布变化所必须要解决的难题,也是今后在基于辐射传输模型反演植被理化参数方面有待深入研究的问题:

(1) 利用全局的敏感性分析方法定量分析不同尺度下模型参数敏感性的变化,对不同尺度下重要参数的确定以及先验知识的选取都具有重要的作用。目前这方面的研究主要集中在某一个尺度上,对于参数敏感性随尺度的变化特征的研究很少见于文献中。

(2) 混合像元对像元尺度上监测植被理化参数的影响。混合像元如何影响理化参数的反演结果以及这种影响的大小;混合像元分解技术能否有效地解决混合像元对理化参数反演结果的影响等都是需要深入研究的问题。

(3) 各种辐射传输模型在不同尺度上有效性的比较。在大区域监测尺度上,中低分辨率的遥感影像仍然是植被理化参数反演的主要数据源。与高分辨率的高光谱数据相比,中低分辨率的遥感数据识别地物异质性的能力较差,此时在冠层尺度上建立起来的适用于高光谱数据的辐射传输模型能否具有相似的反演效果。

随着研究的不断深入和遥感技术的快速发展,尤其是将来具有高空间分辨率的高光谱遥感卫星升空后,植被理化参数反演发展过程中的一些难题将得到解决,而多模型以及多种遥感数据的综合利用也将成为区域尺度上反演植被理化参数的重要研究方向。例如可以通过利用同一地区同一时相的多尺度遥感数据,定量地分析模型参数敏感性随空间尺度的变化情况;稀疏植被下混合像元的问题可以通过多角度与高光谱数据相结合的方法解决;混合像元分解模型与植被辐射传输模型的耦合也可能会成为解决混合像元影响的有效途径。

References:

- [1] Boegh E, Soegaard H, Thomsen A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 329-343.
- [2] Ustin L, Roberts A, Pinzon J, Jacquemoud S, Gardner M, Scheer G, Castañeda C M, Palacios-Orueta A. Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 280-291.
- [3] Zhang X, Liu L Y, Zhao C J, Zhang B. Estimating wheat nitrogen concentration with high spectral resolution image. *Journal of Remote Sensing*, 2003, (3): 176-182.
- [4] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(2): 75-91.
- [5] Baret F, Fourty T. The limits of a robust estimation of canopy biochemistry // Guyot G, Phulpin T, eds. *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. Rotterdam: AA Balkema, 1997: 413-420.
- [6] Bousquet L, Lachérade S, Jacquemoud S, Moya I. Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2/3): 201-211.
- [7] Feret J B, Francois C, Asner G P, Gitelson A A, Martin R E, Bidet L P R, Ustin S L, le Maire G, Jacquemoud S. PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3030-3043.
- [8] Pedrós R, Goulas Y, Jacquemoud S, Louis J, Moya I. FluorMODleaf: a new leaf fluorescence emission model based on the PROSPECT model. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 155-167.
- [9] Shi R H, Zhuang D F, Niu Z, Wang W. Quantitative inversion of chlorophyll content based on radiative transfer model. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 591-595.
- [10] Ganapol B D, Johnson L F, Hammer P D, Hlavka C A, Peterson D L. LEAFMOD: a new within-leaf radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 63(2): 182-193.
- [11] Dawson T P, Curran P J, Plummer S E. LIBERTY: modeling the effects of leaf biochemistry on reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(1): 50-60.
- [12] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125-141.
- [13] Kuusk A. The hot spot effect in plant canopy reflectance // Myneni R B, Ross J, eds. *Photon-Vegetation Interaction. Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*. Berlin: Springer Verlag, 1991: 139-159.
- [14] Verhoef W, Bach H. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 23-41.
- [15] Weiss M, Troufleau D, Baret F, Chauki H, Prévot L, Olioso A, Bruguier N, Brisson N. Coupling canopy functioning and radiative transfer models for remote sensing data assimilation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 113-128.
- [16] Huemmrich K F. The GeoSail model: a simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(3): 423-431.
- [17] Jasinski M F, Eagleson P S. Estimation of subpixel vegetation cover using red-infrared scattergrams. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(2): 253-267.
- [18] Verhoef W, Jia L, Xiao Q, Jia L, Su Z. Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1808-1822.
- [19] Verhoef W, Bach H. Coupled soil-leaf-canopy and atmosphere radiative transfer modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(2): 166-182.
- [20] Kuusk A. A multispectral canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50(2): 75-82.
- [21] Gobron N, Pinty B, Verstraete M M, Govaerts Y. A semidiscrete model for the scattering of light by vegetation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1997, 102(D8): 9431-9446.
- [22] Kuusk A. A Markov chain model of canopy reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 76(3/4): 221-236.
- [23] Demarez V, Gastellu-Etchegorry J P. A modeling approach for studying forest chlorophyll content. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(2): 226-238.
- [24] Goel N S, Thompson R L. A snapshot of reflectance models and a universal model for the radiation regime. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 18(2/4): 197-225.
- [25] Rosema A, Verhoef W, Noorbergen H, Borgesius J J. A new forest light interaction model in support of forest monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42(1): 23-41.
- [26] North P R J. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 946-956.
- [27] Baret F, Jacquemoud S, Guyot G, Leprieux C. Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(2/3): 133-142.
- [28] Koetz B, Schaepman M, Morsdorf F, Bowyer P, Itten K, Allgöwer B. Radiative transfer modeling within a heterogeneous canopy for estimation of

- forest fire fuel properties. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(3): 332-344.
- [29] Verhoef W, Bach H. Remote sensing data assimilation using coupled radiative transfer models. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28(1/3): 3-13.
- [30] le Maire, G, Francois C, Soudani K, Berveiller D, Pontauiller J, Breda N, Genet H, Davi H, Dufrene E. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3846-3864.
- [31] Dawson T P, Curran P J, North P R J, Plummer S E. The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: a theoretical analysis. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(2): 147-159.
- [32] Dash J, Curran P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(23): 5403-5413.
- [33] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Harron J, Hu B X, Noland T L, Goel N, Mohammed G H, Sampson P. Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from Boreal conifer forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(2): 198-199.
- [34] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Morales A, Berjón A, Agüera J. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 463-476.
- [35] Bacour C, Baret F, Béal D, Weiss M, Pavageau K. Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI×C_{ab}, from top of canopy MERIS reflectance data: principles and validation. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(4): 313-325.
- [36] Harris A, Dash J. The potential of the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index for carbon flux estimation. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1856-1862.
- [37] Dash J, Jeganathan C, Atkinson P M. The use of MERIS Terrestrial Chlorophyll Index to study spatio-temporal variation in vegetation phenology over India. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1388-1402.
- [38] Houborg R, Soegaard H, Boegh E. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(1): 39-58.
- [39] Houborg R, Boegh E. Mapping leaf chlorophyll and leaf area index using inverse and forward canopy reflectance modeling and SPOT reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 186-202.
- [40] Houborg, R, Anderson, M C, Daughtry, C S T. Utility of an image-based canopy reflectance modeling tool for remote estimation of LAI and leaf chlorophyll content at the field scale. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 259-274.
- [41] Houborg R, Anderson M C, Daughtry C S T, Kustas W P, Rodell M. Using leaf chlorophyll to parameterize light-use-efficiency within a thermal-based carbon, water and energy exchange model. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(7): 1694-1705.
- [42] Chen G, Liu Q H, Liu Q, Du Y M. A study on geometrical processing methods for LAI products intercomparison between MODIS and TM. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2007, 43(3): 356-361.
- [43] Zarco-Tejada P J, Rueda C A, Ustin S L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(1): 109-124.
- [44] le Maire G, Marsden C, Verhoef W, Ponzoni F J, Seenb D L, Bégué A, Stapee J L, Nouvellon Y. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 586-589.
- [45] Shi R H, Zhuang D F, Niu Z, Wang W. Influence of mesophyll structure on leaf spectra and biochemical inversion. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Science*, 2005, 22(5): 589-595.
- [46] Bacour C, Baret F, Jacquemoud S. Information content of HyMap hyperspectral imagery. *Proceedings of the 1st International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia (Spain)*, 2002: 503-508.
- [47] Zhu X H, Feng X M, Zhao Y S, Song X N. Scale effect and error analysis of crop LAI inversion. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(3): 579-592.

参考文献:

- [3] 张霞, 刘良云, 赵春江, 张兵. 利用高光谱遥感图像估算小麦氮含量. *遥感学报*, 2003, (3): 176-182.
- [9] 施润和, 庄大方, 牛铮, 王汶. 基于辐射传输模型的叶绿素含量定量反演. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 591-595.
- [42] 陈果, 柳钦火, 刘强, 杜永明. MODIS 和降尺度 TM 数据反演叶面积指数相互验证中几何处理方法的研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(3): 356-361.
- [45] 施润和, 庄大方, 牛铮, 王汶. 叶肉结构对叶片光谱及生化组分定量反演的影响. *中国科学院研究生院学报*, 2005, 22(5): 589-595.
- [47] 朱小华, 冯晓明, 赵英时, 宋小宁. 作物 LAI 的遥感尺度效应与误差分析. *遥感学报*, 2010, 14(3): 579-592.

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 朱永官

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 11 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 11 (June, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元