

DOI: 10.5846/stxb201405150996

黄彦, 田庆久, 耿君, 王磊, 栾海军. 遥感反演植被理化参数的光谱和空间尺度效应. 生态学报, 2016, 36(3): - .

Huang Y, Tian Q J, Geng J, Wang L, Luan H J. Review of spectral and spatial scale effects of remotely sensed biophysical and biochemical vegetation parameters. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): - .

遥感反演植被理化参数的光谱和空间尺度效应

黄彦^{1,2,3}, 田庆久^{1,2,3,*}, 耿君^{1,2,3}, 王磊^{1,2,3}, 栾海军^{1,2,3}

1 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

2 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023

3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要: 植被理化参数是生态系统中碳和养分等物质循环与能量交换的重要指标, 利用遥感技术反演是获取区域及全球植被理化参数的重要手段, 但光谱和空间尺度效应的存在, 限制了源自不同遥感传感器植被理化参数产品的统一应用。本文阐述了遥感反演植被理化参数光谱尺度效应的概念及其产生原因, 主要从光谱波段位置和波段宽度两方面对国内外相关研究进行了介绍和评述。同时, 从遥感反演植被理化参数的空间尺度效应产生原因、空间异质性描述方法和空间尺度转换方法等方面对其国内外研究现状进行了归纳和评述。最后, 总结了遥感反演植被理化参数光谱和空间尺度效应研究的不足之处和发展趋势, 并指出光谱和空间耦合效应的研究将是一大趋势, 而在生态学等领域形成的尺度效应研究的理论和方法也值得借鉴参考。

关键词: 尺度效应; 光谱; 空间; 植被理化参数; 综述

Review of spectral and spatial scale effects of remotely sensed biophysical and biochemical vegetation parameters

HUANG Yan^{1,2,3}, TIAN Qingjiu^{1,2,3,*}, GENG Jun^{1,2,3}, WANG Lei^{1,2,3}, LUAN Haijun^{1,2,3}

1 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China

3 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Biophysical and biochemical vegetation parameters are significant indicators of carbon and nutrient cycling and energy exchange in ecosystems. Remote-sensing inversion is an important method of obtaining regional and global biophysical and biochemical vegetation parameters. However, spectral and spatial scale effects result in differences among remotely sensed bio-parameters from different sources. This limits their use in unified applications and affects the precision of ecological models that utilize them as input parameters. This review examines the concept of the spectral-scale effect of remotely sensed bio-parameters and its causes. The spectral-scale effect is the phenomenon in which differences exist in the remotely sensed bio-parameters obtained using different band resolutions and band positions. The spectral-scale effect has two main aspects: the response of different regions of the spectrum to different internal structures, and the response to the chemical composition of green vegetation. Moreover, the response intensities and bandwidths of different sensors are different. This paper reviews relevant research on the spectral-scale from the perspectives of spectral-band position and bandwidth. Studies on band position usually analyze finite and discontinuous bands through statistical methods, but the physical characteristics of spectrum itself are not accounted for. Studies have not reached a consensus on whether a wide

基金项目: 国家科技重大专项(Y20A-C04, Y20A-D52); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951503); 南京大学优秀博士研究生科研能力提升计划 B(201301B012)

收稿日期: 2014-05-15; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianqj@nju.edu.cn

band or narrow band is more suitable for vegetation physicochemical parameter estimation. The manner in which spectral bandwidth influences extraction of vegetation information, construction of vegetation indices, and bio-parameter estimation is not yet clear. Research on the influence of the spatial effect on remotely sensed bio-parameters was summarized and analyzed from the perspectives of understanding the causes of the spatial effect, spatial heterogeneity description methods, and spatial scaling methods. The main conclusion of existing research is that the spatial-scale effect of remotely sensed bio-parameter inversion is related to use of nonlinear inversion methods and spatial heterogeneity of the parameters. However, most studies focused on leaf area index (LAI) and are aimed at relatively simple estimation models based on vegetation indices such as the normalized differential vegetation index (NDVI). Commonly used spatial-scale effect description methods are the variance method, the fractal method, the variation-function method, and the wavelet-transform method. Future research should seek to explain the physical meaning of the spatial-scale effect and to systematically and quantitatively simulate and analyze its characteristics. Although the spatial-scaling method has been adapted for use in spatial-scaling modeling from mathematical, statistical and physical methods, a great gap still exists between the theory of spatial-scaling models and their practical application. This review elucidates the need for more studies on spectral-scale effects in biophysical and biochemical vegetation parameters. In-depth spatial-scale effect studies aimed at the various vegetation parameters and inversion methods, using more complex physical models, are required. Studies on coupled spectral and spatial effects are a possible future direction, and theories and methods from ecology and other fields may provide valuable guidance.

Key Words: scale effect; spectral; spatial; bioparameters; review

植被理化参数是生态系统研究的重要指标,例如叶面积指数是定量陆地生态系统中光合作用、呼吸作用、蒸腾、碳和养分循环以及降水截获等过程的物质与能量交换的最重要结构参数之一^[1],也是计算生态系统净初级生产力乃至生态系统碳平衡的基础^[2]。而叶绿素是光合作用过程必不可少的色素,是地球上最为重要的有机分子,叶绿素含量是监测植被生长发育和营养胁迫的重要指标,与净初级生产力直接相关^[3];氮素含量是表征植被营养状况的最重要指标,与植被的各种生态和生化过程关系密切^[4]。同时,植被理化参数也是陆地生态系统碳循环模型、作物生长模型等生态系统模拟模型的重要参数^[5-7]。而利用遥感手段反演植被理化参数是获取这些生态指标的重要途径,遥感技术的高时效性、宏观性使之相对于以稀疏离散点为基础的地面采样观测,在获取区域以及全球植被理化参数时具有明显的优势^[8-9]。然而,源自不同遥感数据的植被理化参数产品存在着多方面的不一致性^[10-12],限制了它们的统一应用,也影响着以之作为输入参数的生态模型的模拟精度。

产生遥感反演植被理化参数产品不一致性的一个重要原因是遥感反演的“尺度效应”,这一问题多年来一直受到国内外遥感界的高度关注,是定量遥感的一个关键问题^[13-16],也是遥感产品真实性检验的重要环节^[17]。尺度效应问题,是指在某一尺度上观测到的性质、总结出的原理或规律,在另一尺度上可能仍然有效,也可能相似或者需要修正^[18]。这一概念通常针对空间尺度效应,即不同空间分辨率的遥感数据所得到的信息不同,一般来说粗分辨率数据所反演得到的植被理化参数值小于较高分辨率的数据所得到的参数值,而通常认为这与反演方法的非线性及待反演的植被理化参数的空间异质性有关^[10,19-21]。尺度效应的概念广义上也可推及光谱方面^[15,22],即由不同光谱分辨率的遥感数据所得到的植被信息也存在差异,同时由于各种植被结构和成分在不同波段位置上存在不同的响应特征,光谱波段位置的差异也会造成所提取的植被信息不同^[23-27]。而随着近年来各种航天、航空及地基遥感传感器的不断开发和投入应用,以及越来越多的植被理化参数得以通过遥感方法进行反演,研究其遥感反演的多方面尺度效应的迫切性越来越显著。

1 光谱尺度效应研究进展

相对于“空间尺度”而言,“光谱尺度”的提法较少;但基于不同波段分辨率(即不同波段宽度)的遥感数

据得到的反演量不同的现象也实际存在^[24-27],广义上符合“尺度效应”的概念^[16,22],也有研究将相关问题称之为“光谱效应”(effect of spectral)^[23]或“波宽效应”(effect of bandwidth)^[28],而光谱尺度的问题与波段位置也密不可分^[24,26]。随着多种遥感传感器的研发和投入应用,特别是随着高光谱遥感的不断发展,国内外遥感界也开展了一定的相关研究。光谱尺度效应产生的原因,一方面,光谱的不同区域对绿色植被内部结构及化学组成响应不同,表现为植被光谱独特的峰谷特征^[29];另一方面,不同传感器的波段对地物的响应强度和带宽也不同,表现为不同的光谱响应值和半高宽(FWHM, Full Width at Half Maximum)^[17]。因此,不同的波段位置与波段宽度在植被冠层的信息反映上就存在着差异。

1.1 波段位置

波段位置的研究首要的是最佳波段位置的选择问题,这一问题也是植被指数构造、植被理化参数经验模型建立以及传感器波段设置的基础。事实上已有研究表明现有的在轨卫星传感器波段的中心位置并不一定是植被指数构建的最佳波段位置^[30],因此该问题的研究尚有很大必要。许多数学和统计方法被应用于最佳波段位置的确定研究上。如 Kokaly 和 Clark^[31]利用 NIRSsystems1 Model 6250 光谱仪数据,在 1730 nm, 2100 nm 和 2300 nm 为中心的与白松等叶片氮、木质素和纤维素含量相关性最高的光谱特征区域,利用逐步多元回归方法确定最优波段位置并对以上叶片生化组分成功估算;Cho 和 Skidmore^[32]提出线性外推法来确定红边位置,从而对黑麦、玉米和草地的植株氮含量进行了成功估算;Darvishzadeh 等^[33]利用 GER3700 光谱仪数据 400 nm 和 2400 nm 之间的 584 个波段构造所有可能的植被指数 NDVI 和 SAVI2 (Soil-Adjusted Vegetation Index 2),建立其与草地 LAI、叶片叶绿素含量和冠层叶绿素含量之间的相关关系,根据决定系数最终确定适于估算以上草地生理生化参数的植被指数最佳波段。Yao 等^[34]利用 FieldSpec Pro FR2500 光谱仪数据,在 350—2500 nm 光谱范围内每 10 nm 逐步进行所有波段两两组合比值、归一化等植被指数和小麦叶片氮积累量的相关性分析,通过决定系数值选择相关关系最佳的波段范围,在此范围内再逐 1 nm 构造两两波段比值、归一化等植被指数与氮积累量相关关系,最终确定适于氮积累量估测的最佳特征波段及其构造的植被指数。这些研究往往采用统计方法对不连续的有限个波段进行分析,对波段位置的研究上系统性较弱,且对光谱本身的物理特征反映不足,在相关的研究中或可引入分形和小波分析等更能体现连续光谱特征的方法^[35-36]。

也有学者针对波段位置变化对植被指数构造和植被理化参数估算的影响进行研究。如 Galvão 等^[24]对热带草原的研究表明,当红光波段向 690 nm 延伸时对 NDVI 的影响比较明显;而如果要增大绿色植被、衰老植被和土壤之间 NDVI 的对比度,波段位置应该包括一个以叶绿素吸收波段(660—680 nm)为中心的红光波段和一个近红外波段(750—1100 nm)^[37]。此外,波段的选择与红光波段随植被覆盖度增加而饱和的问题有关,许多研究在植被指数构造和相关植被理化参数估测中试图通过波段位置的选择和采用不同的波段组合方式来解决这一问题^[38-40]。事实上,“红边位置”^[41]等表征植被光谱特征波段位置的“三边”参数已被广泛用于植被理化参数的估算中,而基于三边位置移动(如“红移”)监测的植被受胁迫诊断方法在植被病虫害和重金属污染等研究中发挥了很大作用^[42-43]。

1.2 波段宽度

波段宽度对植被理化参数估算影响的研究首先着眼于多光谱与高光谱波段数据孰优孰劣上。而对于宽波段还是窄波段更适于植被理化参数估算的问题,国内外学界尚未达成共识。例如一些研究表明,在利用遥感数据估算 LAI 时,窄波段植被指数比宽波段效果更好^[30,44-45],但也有研究得出相反的结论^[46-48]。窄波段被认为可比宽波段提供更多的信息,且对植被特征敏感性更高^[44,49-51],同时可降低植被覆盖度低时土壤背景的影响^[44]及覆盖度高时红光波段的饱和现象^[39]。但宽波段也被认为可提高信噪比,降低背景噪声的影响^[47-48,52]。

其次,相关研究解决的重要问题是最佳波段宽度的选择问题,如 Thenkabail 等^[53]利用黑麦、小麦等六种典型作物的地面光谱和 LAI、生物量、氮含量等生长参数和生理指标,通过两波段植被指数与植被参数的相关性等值线图上相关性最高的波段范围,确定了 12 个核心波段所对应的植被指数最佳波段宽度,如 660 nm 波

段处的最佳波段宽度为 20 nm, 845 nm 处为 120 nm。王福民等^[54]利用水稻冠层光谱通过在 Landsat TM (Thematic Mapper) 红光波段和近红外波段范围内不断扩展波段宽度, 计算了各个波段宽度对应的 NDVI 及其与 LAI 的最大相关系数, 并根据两者拟合方程决定系数值确定最佳的波段宽度为 15 nm。而孙小芳的研究表明当光谱分辨率小于 64 nm 时, 才能较好地反映与叶绿素含量等相关的水稻光谱曲线峰谷细节特征^[36]。总的来说这方面的研究较少, 但由于宽波段和窄波段用于植被理化参数估算的优劣并没有定论, 而高光谱遥感影像也更易获取, 对植被理化参数估算最佳波段宽度的研究还有待深入。

也有学者针对波段宽度变化对植被信息提取、植被指数构造和植被理化参数估算的影响规律进行了研究。如 Dalponte 等^[27]将 AISA Eagle 传感器影像的光谱从 4.6 nm 重采样到 9.2 nm、13.8 nm、18.4 nm、23 nm、27.6 nm、32.2 nm 和 36.8 nm 这几个光谱分辨率, 发现随着光谱分辨率的降低, 利用此数据进行森林分类的精度也随之降低。但这种相对系统的研究非常少, 所涉及的植被理化参数也较为有限。而各植被理化参数的光谱响应方式不同, 如 LAI 与近红外波段低频的光谱信息相关性更高, 且涉及的波段范围较广; 而叶绿素含量与可见光波段、水分含量与红外波段的高频的光谱特征更为相关, 且涉及波段范围较窄^[55-56]。因此不同植被特征对于波段宽度的敏感性不同, 对其的研究也有待深入。

1.3 波段位置与波段宽度相结合的研究

植被的不同物理化学特性在各个波段位置上的响应程度不同, 波段位置和波段宽度对其参数估算的影响相辅相成, 因此也有学者将两者综合考虑进行研究。如 Teillet 等^[23]利用 AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) 高光谱数据研究了森林冠层 NDVI 受波段位置和宽度的影响, 表明红光波段对 NDVI 影响较大, 而在波段宽度小于 50 nm 时, 近红外波段基本不受波段位置影响。王福民等^[54]的研究表明在红光波段宽度小于 60 nm 范围内, 窄波段 NDVI 比宽波段 NDVI 对 LAI 估算效果好, 而超过 60 nm 后受近红外波段宽度影响而略有波动。Yao 等^[40]以最佳波段位置交互不同波段宽度进行研究, 表明 NDVI (807 nm, 736 nm) 的核心波段 807 nm 和 736 nm 在分别选择带宽 71 nm 和 18 nm 时, 对小麦植株吸氮量进行估算的精度最高。但总得来说, 此方面的研究也非常的少, 同时也存在前文所提及的波段位置和波段宽度分别研究中所存在的问题, 还需展开深入研究。

2 空间尺度效应研究进展

空间尺度问题一直是地理学的重要研究内容, 也渗透于其研究方法之中, 地理学所提倡的“自上而下的演绎方法和自下而上归纳方法”^[57]即是空间尺度思想的体现; 对于生态学, 特别是景观生态学而言, 空间尺度的概念是一切研究的基础, 尺度效应分析、多尺度空间格局分析和尺度推绎均是其重要的研究议题^[58-59]。随着遥感传感器空间分辨率的不断提升和遥感应用领域的拓展与深化, 遥感的空间尺度问题也日益凸显, 空间尺度效应的存在制约了遥感定量的精度, 限制了遥感技术从定性向量化发展, 因此也是定量遥感领域亟待解决的热点问题^[15-16]。“美国地理遥感之父”Simonett 教授在 1970 年代末期, 就指出“尺度问题是遥感科学的核心问题”^[16], 1993 年在法国召开的热红外遥感尺度问题国际会议, 认为尺度问题是对从天空观测地球的首要挑战^[60], 而所谓的尺度, 均主要指的是空间尺度。但时至今日, 空间尺度问题的理论和实践挑战依然艰巨, 尺度效应和尺度转换的机理、异质像元的真实性检验、多尺度数据的联合应用等方面的研究仍较薄弱^[16]。

2.1 空间尺度效应

空间尺度效应的研究通常是从两个方面进行^[61]: 一方面是在特定尺度下研究遥感物理定律、定理、模型以及概念的修正。如李小文等^[62]对非同温黑体表面上 Planck 定律的尺度效应进行研究, 给出了适合于该类对象的有尺度修正的 Planck 定律及二阶 Taylor 近似。另一方面, 也是大部分研究的着眼点, 则是针对不同观测尺度或空间分辨率下所获取的参数之间的差异及变化规律进行分析。如 Liang^[63]研究了从 30 m 到 1 km 的 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)、反照率和 LAI 的变化规律, 发现 BRDF、反照率基本随空间尺度的变化呈线性变化, 而 LAI 则表现出非线性的规律; Tian 等^[64]比较了地表实测 LAI 与分别由 30 m

Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) 数据及以之模拟的 250 m、500 m 和 1000 m MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 数据反演的植被 LAI, 结果表明 ETM+ 反演的 LAI 值与实测值很好吻合, 而 MODIS 的 LAI 反演结果存在 5% 的低估; 万华伟等^[61] 研究了不同测量尺度下冬小麦波谱, 发现不同测量尺度光谱差别非常大, 所表现出的反映植被生长的特征也存在很大差异。

一些学者致力于对植被理化参数反演的空间尺度效应产生原因进行研究, 主要的结论是植被理化参数反演的空间尺度效应与反演方法的非线性及待反演参数的空间异质性有关。如 Chen 等^[19] 的研究表明在进行森林 LAI 估算时, 非线性的反演方法被用在多种土地覆被类型混合的像元, 是造成尺度效应的主要原因。陈健等^[65] 对芦苇 LAI 反演误差分析的结果显示, NDVI 算法的非线性对 LAI 影响很小, 而 LAI 的空间异质性则是引起 LAI 尺度效应的根本原因。姚延娟等^[20] 研究了两种情况下混合像元对 LAI 反演所带来的不确定性问题, 结果表明由不同长势的作物所构成的混合像元对 LAI 反演影响不大, 而不同组分形成的混合像元对 LAI 反演结果影响很大。Wu 和 Li^[15] 指出遥感反演的尺度效应大小与反演函数的非线性程度有关, 且不能武断地认为线性的遥感反演方法不产生尺度效应, 而非线性反演方法一定会产生尺度效应。徐希孺等^[66] 在作物冠层反射率模型基础上进行理论分析, 得出连续植被 LAI 尺度效应是 LAI 空间不均一性和反演公式的非线性性质造成的结论, 其中异质性是产生尺度效应的主要因素。朱小华等^[21] 通过 LAI 均值化及反射率数据线性累加模拟了不同尺度的 LAI 反演, 从模型的非线性和地表景观结构的异质性两方面分析了造成反演误差的原因, 结果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。范闻捷等^[67] 则认为遥感反演 LAI 尺度效应的共因是 LAI 的空间分布不均与反演函数的非线性, 但同时也应充分认识到植被类型对尺度效应机制的影响, 离散植被的空间尺度效应产生机理与连续植被存在不同。而对于不同植被理化参数, 其在空间上的异质程度差异, 或其遥感反演所采用模型的非线性程度的不同, 都会造成其空间尺度效应表现的不同。但现有较多的相关研究是针对 LAI 进行, 而对叶绿素含量等其它植被理化参数则较少。相信随着多种植被理化参数遥感反演方法的不断成熟及其遥感产品的投入生产和应用, 对其空间尺度效应的研究也会陆续展开。同时, 现有的植被理化参数空间尺度效应研究大多针对基于 NDVI 等植被指数的较为简单的估算模型, 其非线性程度较低, 而随着更多基于复杂的物理模型的反演方法的应用, 对其空间尺度效应的研究也将深入。

对于空间尺度效应的定量化描述, 目前比较常用的方法主要可分为方差法、分形法、变异函数法和小波变换法四类^[68], 如 Woodcock^[13] 提出的局部方差法, 通过计算不同尺度下移动窗口标准差的均值来反映数据的空间异质性, 以局部方差达到最大值的空间分辨率作为目标观测的最佳尺度; Zhang 等^[69] 提出了信息分形维算法对不同尺度 LAI 和地表温度产品的差异进行定量描述; Garrigues 等^[70] 利用变异函数的线性组合形式, 提出用积分变程描述空间结构的平均长度尺度, 以离散方差反映亚像元内的空间异质性; 陈健等^[65] 利用半变异函数对像元空间异质性进行了定量描述; Ma 等^[71] 以小波方差来计算各空间分辨率下的空间长度尺度; 吴骅^[68] 采用变异函数的离散方差和小波变换的小波方差实现了区域总异质性、块内异质性以及块间异质性的遥感定量估算。此外, Chen 等^[19] 利用纹理和结构参数对尺度效应进行描述。以上研究均在一定程度上对空间尺度效应进行了定量描述, 而阐述空间尺度效应的物理内涵, 并更系统地定量模拟分析其特征规律是今后研究的一个发展方向。

2.2 空间尺度转换

李小文等^[62] 认为不同尺度之间存在三种层次的关系, 一、“尺不变”的关系, 即较大空间尺度上的参数等于其所包含的较小尺度相应元素的空间均值, 两者之间存在的是线性函数关系, 但这样的情况很少见; 当要表达符合能量加权法则的电磁波能量的遥感数据时, 可以认为其为尺不变^[72]。二、“相似性”或“自相似性”的关系, 即不同尺度之间由于像元大小和地表复杂程度不同, 可以表达为分形的关系; LAI、植被指数和比辐射率等不符合能量加权法则的遥感产品均为此种情况。三、只存在“渊源关系”, 即较大尺度只能表达为较小尺度内的面积积分, 而参数关系不能以简单的函数表示。植被理化参数空间尺度转换的研究即是针对第二种情

况,建立植被理化参数从一种尺度到另一种尺度上的转换关系,包括“升尺度”(up-scaling)和“降尺度”(down-scaling)两个方面^[17],现有的关于植被理化参数空间尺度转换的研究更多针对是升尺度。张仁华等^[72-73]给出了表示不同尺度间差异的通用公式:

$$F_1 - F_2 = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_1^n (\phi_i)^2 - V(\phi) \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\frac{1}{n} \sum_1^n (\varphi_i)^2 - V(\varphi) \right]^{\frac{1}{2}}} - \left[\frac{1}{n} \sum_1^n \left(\frac{\phi_i}{\varphi_i} \right)^2 - V\left(\frac{\phi}{\varphi} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, F_2 和 F_1 分别为在同一模型、同一地物、相同面积下大尺度像元的直接反演值和小尺度像元反演值的平均值。这一表达式揭示了遥感产品的均方差及其反演模型的正幂部分和负幂部分的离散度对两种尺度的转换差异的影响。对于基于非线性模型的遥感反演产品,构成其尺度差异的基本影响因子有两尺度的面积倍数 n ,模型的正幂 ϕ 和负幂 φ ,以及它们的方差 V 。Chen等^[19]和Liang^[63]的研究也指出了不同空间尺度的差异与函数的方差有关。

空间尺度转换的方法,早期主要是利用统计分析方法进行,如Hu和Islam^[74]提出的“分布式”(Distributed)和“集总式”(Lumped)尺度转换模型,前者将小尺度的反演模型输入参数进行算术平均到大尺度后进行反演,后者将小尺度的反演结果直接进行算术平均;张万昌等^[75]利用这一方法实现了30 m ETM+影像反演LAI向900m的尺度转换,并对MODIS的LAI产品进行了校正。基于简单加权平均的尺度转换对数据特征及反演的物理机制均考虑不足,因此一些学者致力于对其他方法进行探索。Chen等^[19]将尺度效应表示为地表覆盖类型组比值的函数,以主导覆盖类型的百分比对不同尺度植被理化参数的反演进行修正;田庆久等^[76]利用此法进行了针叶林、混交林和空旷地三种地表类型上的LAI的升尺度转换。近年来国内外学者采用多种数学方法,建立具有一定数学物理基础的尺度转换模型^[68],包括泰勒级数展开法、计算几何法、分形方法等。如Garrigues等^[10]以泰勒展开式对LAI估算的尺度误差进行了计算;朱小华等^[21]通过泰勒展开式实现了大尺度LAI反演结果的误差纠正。而吴骅等^[77]对泰勒级数展开模型和计算几何模型对LAI尺度转换的普适性进行了分析,表明针对小尺度数据,泰勒级数模型可以更好地刻画尺度效应。张仁华等^[69,72]引入分形几何学思想,建立了尺度转换的信息分形维算法;栾海军等^[78]利用分形方法实现了NDVI的连续升尺度转换模型。此外,徐希孺等^[66]从混合像元的真实LAI表达公式出发,通过数值模拟方法确定了纯含有植被的零级像元占 n 级像元面积比例随像元级别的变化规律,在此基础上建立了LAI向 n 级像元进行转换的公式。总的来说,建立更具有物理内涵和普适性更强的空间尺度转换模型是当前研究的发展方向。同时,也存在已取得的方法和结果距离实际应用有较大差距的问题亟待解决^[16]。

3 总结与展望

综上所述,植被理化参数遥感反演的光谱尺度效应研究方兴未艾,而空间尺度效应近年来虽已进行了大量研究,但其理论和实践挑战依然艰巨,在尺度效应和尺度转换的机理等诸多方面的研究仍有待深入^[16]。

(1)“光谱尺度效应”这一提法较少,相关的研究更是缺乏系统性,现有研究往往是以建立植被指数的最佳波段选择和最佳波段宽度确定为目的^[32-34,53-54],或针对在轨卫星传感器的波段位置和宽度差异进行分析^[24],且并无定论。而对光谱尺度效应机理与表现研究不足,且相关研究往往采用非连续的统计方法,对光谱本身的物理特征反映不足。因此,针对植被理化参数的光谱特征和反演的尺度效应的研究还亟待深入。

(2)空间尺度效应方面,现有的植被理化参数空间尺度效应研究更多是针对LAI进行,且大多基于经验性的估算模型因而非线性程度较低。随着针对多种植被理化参数、并采用更复杂物理模型的遥感反演方法的成熟,及其遥感产品的投入生产与应用,空间尺度效应的研究将更加深入。同时,对空间尺度效应的物理内涵进行充分阐释,采用更系统的描述指标定量模拟分析空间尺度效应的特征规律,建立更具有普适性的空间尺度转换模型,并实际应用于植被理化参数的产品生产中,是今后研究的重点发展方向。

(3) 光谱分辨率和空间分辨率是遥感数据的两大基本特征,而随着更多高分遥感传感器的投入应用,势必面临光谱和空间效应耦合作用情况,但实际上这方面的研究却刚刚开始^[79-80],需要从形成机理和建立模型入手,深入开展研究。

(4) 遥感反演植被理化参数的空间尺度效应虽有别于生态学等领域中的尺度效应,但与之密切相关,后者研究所形成的较为系统的理论、方法等^[81]均值得借鉴参考。

参考文献 (References):

- [1] Pu R, Gong P. Hyperspectral remote sensing of vegetation bioparameters // Weng Q H, ed. *Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications*. Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis Group, LLC, 2011.
- [2] 宫鹏. 拓展与深化中国全境的环境变化遥感应用. *科学通报*, 2012, 57(16): 1379-1387.
- [3] Blackburn G A, Ferwerda J G. Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1614-1632.
- [4] Martin M E, Plourde L C, Ollinger S V, Smith M L, McNeil B E. A generalizable method for remote sensing of canopy nitrogen across a wide range of forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3511-3519.
- [5] 彭少麟, 张桂莲, 柳新伟. 生态系统模拟模型的研究进展. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13(1): 85-94.
- [6] 毛留喜, 孙艳玲, 延晓冬. 陆地生态系统碳循环模型研究概述. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2189-2195.
- [7] 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 刘永霞, 刘岩, 孙金英, 岳延滨, 张智优, 陈煜利. 作物模型发展探讨. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [8] 曾也鲁, 李静, 柳钦火. 全球 LAI 地面验证方法及验证数据综述. *地球科学进展*, 2012, 27(2): 165-174.
- [9] 刘洋, 刘荣高, 陈镜明, 程晓, 郑光. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望. *地球信息科学学报*, 2013, 15(5): 734-743.
- [10] Garrigues S, Allard D, Baret F, Weiss M. Influence of landscape spatial heterogeneity on the non-linear estimation of leaf area index from moderate spatial resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(4): 286-298.
- [11] Ganguly S, Schull M A, Samanta A, Shabanov N V, Milesi C, Nemani R R, Knyazikhin Y, Myneni R B. Generating vegetation leaf area index earth system data record from multiple sensors. Part 1: Theory. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(12): 4333-4343.
- [12] Ganguly S, Samanta A, Schull M A, Shabanov N V, Milesi C, Nemani R R, Knyazikhin Y, Myneni R B. Generating vegetation leaf area index Earth system data record from multiple sensors. Part 2: Implementation, analysis and validation. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(12): 4318-4332.
- [13] Woodcock C E, Strahler A H. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21(3): 311-332.
- [14] Goodchild M F, Quattrochi D A. Introduction: Scale, Multiscaling, Remote Sensing, and GIS// Quattrochi D A, Goodchild M F, eds. *Scale in Remote Sensing and GIS*. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers, 1997.
- [15] Wu H, Li Z L. Scale issues in remote sensing: a review on analysis, processing and modeling. *Sensors*, 2009, 9(3): 1768-1793.
- [16] 李小文, 王祎婷. 定量遥感尺度效应刍议. *地理学报*, 2013, 68(9): 1163-1169.
- [17] 梁顺林. 定量遥感. 范闻捷, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] 李小文, 王锦地, Strahler A H. 尺度效应及几何光学模型用于尺度纠正. *中国科学(E辑): 技术科学*, 2000, 30(s1): 12-17.
- [19] Chen J M. Spatial scaling of a remotely sensed surface parameter by contexture. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69(1): 30-42.
- [20] 姚延娟, 刘强, 柳钦火, 李小文. 异质地表的叶面积指数反演的不确定性分析. *遥感学报*, 2007, 11(6): 763-770.
- [21] 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): 586-592.
- [22] Malenkov Z, Bartholomeus H M, Acerbi-Junior F W, Schopfer J T, Painter T H, Epema G F, Bregt A K. Scaling dimensions in spectroscopy of soil and vegetation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(2): 137-164.
- [23] Teillet P M, Staenz K, William D J. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(1): 139-149.
- [24] Galvão L S, Vitorello Í, Filho R A. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannas. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(2): 181-193.
- [25] van Leeuwen W J D, Orr B J, Marsh S E, Herrmann S M. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(1): 67-81.
- [26] 王福民, 黄敬峰, 王秀珍, 陈拉, 唐延林. 波段位置和宽度对不同生育期水稻 NDVI 影响研究. *遥感学报*, 2008, 12(4): 626-632.
- [27] Dalponte M, Bruzzone L, Vescovo L, Gianelle D. The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of

- forest areas. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(11): 2345-2355.
- [28] Zhao D H, Li J L, Qi J G. Identification of red and NIR spectral regions and vegetative indices for discrimination of cotton nitrogen stress and growth stage. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 48(2): 155-169.
- [29] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [30] Zhao D H, Huang L M, Li J L, Qi J G. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(1): 25-33.
- [31] Kokaly R F, Clark R N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3): 267-287.
- [32] Cho M A, Skidmore A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(2): 181-193.
- [33] Darvishzadeh R, Skidmore A, Schlerf M, Atzberger C, Corsi F, Cho M. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63(4): 409-426.
- [34] Yao X, Zhu Y, Tian Y C, Feng W, Cao W X. Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(2): 89-100.
- [35] 刘小刚, 赵慧洁, 李娜. 基于多重分形谱的高光谱数据特征提取. *光学学报*, 2009, 29(3): 844-848.
- [36] 孙小芳. 利用小波分形维数确定水稻光谱分辨率特征尺度. *遥感学报*, 2013, 17(6): 1420-1426.
- [37] Galvão L S, Vitorello I, Pizarro M A. An adequate band positioning to enhance NDVI contrasts among green vegetation, senescent biomass, and tropical soils. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(9): 1953-1960.
- [38] Liu H Q, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.
- [39] Mutanga O, Skidmore A K. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(19): 3999-4014.
- [40] Yao X F, Yao X, Tian Y C, Ni J, Liu X J, Cao W X, Zhu Y. A new method to determine central wavelength and optimal bandwidth for predicting plant nitrogen uptake in winter wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(5): 788-802.
- [41] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4(2): 273-288.
- [42] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江. 利用高光谱红边与黄边位置距离识别小麦条锈病. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(6): 1614-1618.
- [43] 朱叶青, 屈永华, 刘素红, 陈圣波. 重金属铜污染植被光谱响应特征研究. *遥感学报*, 2014, 18(2), 344-353.
- [44] Thenkabail P S, Smith R B, De Pauw E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(2): 158-182.
- [45] Lee K S, Cohen W B, Kennedy R E, Maierseperger T K, Gower S T. Hyperspectral *versus* multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 508-520.
- [46] Jacquemoud S, Baret F, Andrieu B, Danson F M, Jaggard K. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(3): 163-172.
- [47] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 156-172.
- [48] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 45-57.
- [49] Elvidge C D, Chen Z K. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(1): 38-48.
- [50] Fava F, Colombo R, Bocchi S, Meroni M, Sitzia M, Fois N, Zucca C. Identification of hyperspectral vegetation indices for Mediterranean pasture characterization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 11(4): 233-243.
- [51] Mariotto I, Thenkabail P S, Huete A, Slonecker E T, Platonov A. Hyperspectral *versus* multispectral crop-productivity modeling and type discrimination for the HypSIERI mission. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139: 291-305.
- [52] Knox N M, Skidmore A K, Schlerf M, de Boer W F, van Wieren S E, van der Waal C, Prins H H T, Slotow R. Nitrogen prediction in grasses: effect of bandwidth and plant material state on absorption feature selection. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(3): 691-704.
- [53] Thenkabail P S, Smith R B, De Pauw E. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(6): 607-622.
- [54] 王福民, 黄敬峰, 唐延林, 王秀珍. 采用不同光谱波段宽度的归一化植被指数估算水稻叶面积指数. *应用生态学报*, 2007, 18(11):

- 2444-2450.
- [55] Cheng T, Rivard B, Sánchez-Azofeifa G A, Feng J, Calvo-Polanco M. Continuous wavelet analysis for the detection of green attack damage due to mountain pine beetle infestation. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(4): 899-910.
- [56] Cheng T, Rivard B, Sánchez-Azofeifa G A. Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 659-670.
- [57] 蔡运龙. 当代自然地理学态势. *地理研究*, 2010, 29(1): 1-12.
- [58] 张娜. 生态学中的尺度问题: 内涵与分析方法. *生态学报*, 2005, 26(7): 2340-2355.
- [59] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [60] Raffy M. Change of scale theory: a capital challenge for space observation of earth. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(12): 2353-2357.
- [61] 万华伟, 王锦地, 屈永华, 焦子铨, 张颢. 植被波谱空间尺度效应及尺度转换方法初步研究. *遥感学报*, 2008, 12(4): 538-545.
- [62] 李小文, 王锦地, Strahler A H. 非同温黑体表面上 Planck 定律的尺度效应. *中国科学(E辑): 技术科学*, 1999, 29(5): 422-426.
- [63] Liang S L. Numerical experiments on the spatial scaling of land surface albedo and leaf area index. *Remote Sensing Reviews*, 2000, 19(1/4): 225-242.
- [64] Tian Y H, Woodcock C E, Wang Y J, Privette J L, Shabanov N V, Zhou L M, Zhang Y, Buermann W, Dong J R, Veikkanen B, Häme T, Andersson K, Ozdogan M, Knyazikhin Y, Myneni R B. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product: I. Uncertainty assessment. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 414-430.
- [65] 陈健, 倪绍祥, 李静静, 吴彤. 植被叶面积指数遥感反演的尺度效应及空间变异性. *生态学报*, 2006, 26(5): 1502-1508.
- [66] 徐希孺, 范闻捷, 陶欣. 遥感反演连续植被叶面积指数的空间尺度效应. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2009, 39(1): 79-87.
- [67] 范闻捷, 盖颖颖, 徐希孺, 闫彬彦. 遥感反演离散植被有效叶面积指数的空间尺度效应. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2013, 43(2): 280-286.
- [68] 吴骅. 地表关键特征参数的尺度效应与尺度转换方法研究——以叶面积指数和地表温度为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [69] Zhang R H, Tian J, Li Z L, Sun X M, Jiang X G. Spatial scaling and information fractal dimension of surface parameters used in quantitative remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(17/18): 5145-5159.
- [70] Garrigues S, Allard D, Baret F, Weiss M. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 81-96.
- [71] Ma L L, Tang L L, Li Z L. Spatial variability analysis to remote sensing image on different scales with wavelet variance// *International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition*. International Society for Optics and Photonics. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2007.
- [72] 张仁华, 田静, 李召良, 苏红波, 陈少辉. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2010, 40(2): 211-222.
- [73] Zhang R H, Li Z L, Tang X Z, Sun X M, Su H B, Zhu C, Zhu Z L. Study of emissivity scaling and relativity of homogeneity of surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 245-259.
- [74] Hu Z L, Islam S. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 747-755.
- [75] 张万昌, 钟山, 胡少英. 黑河流域叶面积指数(LAI)空间尺度转换. *生态学报*, 2008, 28(6): 2495-2503.
- [76] 田庆久, 金震宇. 森林叶面积指数遥感反演与空间尺度转换研究. *遥感信息*, 2006, 4, 5-11.
- [77] 吴骅, 姜小光, 刁晓环, 李传荣, 李召良. 两种普适性尺度转换方法比较与分析研究. *遥感学报*, 2009, 13(2): 183-189.
- [78] 栾海军, 田庆久, 顾行发, 余涛, 胡新礼. 基于分形理论与 GEOYE-1 影像的 NDVI 连续空间尺度转换模型构建及应用. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(6): 538-549.
- [79] Lausch A, Pause M, Doktor D, Preidl S, Schulz K. Monitoring and assessing of landscape heterogeneity at different scales. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(11): 9419-9434.
- [80] Thorp K R, French A N, Rango A. Effect of image spatial and spectral characteristics on mapping semi-arid rangeland vegetation using multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA). *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132: 120-130.
- [81] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, 21(12): 2096-2105.