

作物生物量遥感估算研究进展

杜鑫, 蒙继华*, 吴炳方

中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101

摘要 作物生物量是作物长势监测以及产量估算中的一个关键指标。随着 3S 技术的发展, 遥感数据可以为作物生物量的估算提供有力的支撑, 充分发挥遥感信息的宏观及实时动态性, 使在大的时间和空间尺度上进行作物的生物量估算成为可能。文章通过总结作物生物量遥感估算的研究现状, 根据采用的数据源不同以及基于的模型基础不同将现有作物生物量遥感估算模型划分为 6 类, 并对每一类模型的方法、原理、和应用进行了详细阐述, 讨论分析了作物生物量遥感估算方法的发展趋势, 以及各种估算方法的自身优势和仍需完善的方面, 并对今后的发展进行了展望。

关键词 作物; 生物量; 遥感监测

中图分类号: TP79 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)11-3098-05

引言

生物量是作物长势监测的一个重要指标^[1, 2], 作物单株生物量反映了个体长势, 单位面积生物量则反映了作物群体长势。同时作物生物量还是重要的农学参数, 是形成作物产量的基础, 区域尺度上作物生物量的估算可以为作物产量的监测与预测提供依据, 结合收获指数就可以对区域尺度上的作物单产进行空间制图^[3]。另一方面农田生物量是研究全球碳循环的重要组成部分, 农田在陆地生态系统的物质循环和能量流动中起着主导作用, 对农田生物量进行监测将为研究农田生态系统中能量平衡、能量流动和养分循环等功能过程提供基础数据。

随着 3S 技术的发展, 遥感数据为生物量的测定提供一种有效的手段, 使其估算过程更加简化, 通过遥感获取地表植被信息及相关参数, 已成为实时的大范围反演地表生物量的一种重要工具和手段。

本文就当前基于遥感信息构建的作物生物量估测模型的思路方法以及模型精度检验等方面的研究现状进行总结, 并展望发展趋势。

1 遥感监测方法

目前主要的作物生物量遥感监测方法可以根据采用的数

据不同或采用的模型不同等特点可划分为 5 种监测方法, 即基于传统光学数据简单统计分析的估算方法, 基于高光谱数据的估算方法, 基于雷达数据的估算方法, 基于净初级生产力(NPP)的估算方法, 及基于作物生长模型的估算方法。

1.1 基于传统光学数据简单统计分析的估算方法

生物量-遥感光谱指数简单统计相关模式主要指利用生物量直接与遥感光谱指数进行简单相关统计分析来估算作物生物量。这种模式通常有 2 种方式: 一种是直接以遥感波段作为自变量, 使用单波段或多波段为模型驱动因子与生物量建立估算模型; 另一种是将遥感数据影像各波段组合成各种不同形式的遥感指数, 以这些遥感指数直接或间接作为模型驱动因子构建相关统计模型估算作物生物量。

傅玮东、黄敬峰等基于农业气象试验站观测农学资料、光谱资料以及同步接收的 NOAA/AVHRR 资料, 计算了冬小麦生物量与比值植被指数(RVI)和归一化差值植被指数(NDVI)的相关系数(0.923 3 和 0.978 4), 均达到了极显著水平, 并建立了冬小麦生物量的光谱监测模型和气象卫星遥感监测模型^[4, 5]。张霞等以 MODIS 为数据源, 构建了归一化差异光谱指数(NDSI)和再次归一化光谱指数(RDSI), 并对两种植被指数与小麦生物量的关系进行了分析, 并发现(b19, b2), (b19, b17)和(b19, b16)这 3 个波段组合所构建的指数对小麦生物量高度敏感, 达到了 99% 显著相关, 而且明显优于 MODIS 自身的植被指数产品 MODIS-NDVI 和

收稿日期: 2009-11-19, 修订日期: 2010-02-26

基金项目: 国家青年自然科学基金项目(40801144), 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-YW-09-01)和(863 计划)专题项目(2009AA12Z146)资助

作者简介: 杜鑫, 1982 年生, 中国科学院遥感应用研究所博士研究生 e-mail: duxin82@gmail.com

* 通讯联系人 e-mail: mengjh@irsa.ac.cn

MODIS-EVI^[6]。

这种统计模型在形式上简单易用,但此方法需要大量的样点观测数据,模型不具备作物生长发育过程的理论基础,同时模型只能在建模区域内应用,很难推广到其他区域或其他作物使用。

1.2 基于高光谱数据的估算方法

近年来,随着高光谱分辨率遥感的广泛发展,对于作物的遥感监测能够在光谱维展开,使得地表作物的微弱光谱差异的定量分析成为可能^[7]。基于高光谱的作物生物量估算方法正是基于高光谱分辨率遥感在这方面的巨大优势,结合作物的生长发育规律,对其冠层高光谱反射率进行测定,并利用敏感波段来构建植被指数以及采用微分等技术确定关键波段的特定参数(红边参数等)来对作物的生物量进行估测。

Prasad 等基于地面观测的光谱数据研究了不同作物生物量的敏感波段和敏感植被指数,结果发现 650~700 nm, 500~550 nm 及 900~940 nm 三个范围的波段与作物生物量的关系最好^[8]。Hansena 等利用反射率高光谱数据在 438~884 nm(光谱波段间隔 1 nm)范围内穷尽了所有两波段间的相关关系,并且由此构建了多种归一化光谱指数估算小麦地上鲜生物量^[9]。王秀珍等在水稻上的研究表明,一阶微分高光谱参数(如红边波长、红边振幅、绿峰最大反射率、红谷最小反射率及其组合等)与地上生物量显著相关,提出以蓝边内一阶微分总和(490~530 nm)与红边内一阶微分总和(680~780 nm)构成的比值植被指数为高光谱估算水稻地上鲜生物量最佳光谱变量^[10]。宋开山等采用单变量非线性拟合模型和线性逐步回归以及神经网络技术,建立了玉米地上鲜生物量高光谱遥感估算模型。对估算结果进行分析,发现绿光波段反射峰区、红光波段以及红边区的单波段反射率与作物的地上鲜生物量相关性较大,而其他波段与作物的鲜生物量相关性相对较差^[11]。宋开山等还建立了以近红外与可见光波段的冠层光谱反射率的比值植被指数(RVI)为变量的大豆地上鲜生物量遥感估算模型,并指出在 350~680 nm 和 760~1 050 nm 波谱区的冠层光谱反射率,红边区 680~760 nm 的导数光谱与大豆地上鲜生物量相关程度高^[12]。柏军华等分析棉花地上鲜生物量冠层高光谱反射率变异系数,反射率光谱、一阶微分光谱与地上鲜生物量相关关系的结果表明:棉花地上鲜生物量与反射率光谱相关系数最大值在可见光波段出现在 589~700 nm,在近红外波段出现在 865~919 nm 波段,地上鲜生物量与一阶微分光谱相关系数在可见光波段出现 524~528 nm, 552~588 nm, 710~755 nm 三个高值区。并建立了棉花地上鲜生物量高光谱遥感监测模型,经检验,单波段估算模型准确度为 83.9%,组合参数估算模型准确度达 84.0%^[13]。

基于高光谱的作物生物量估算方法,充分发挥了遥感数据在光谱维的优势,并考虑作物生长发育过程中其冠层反射率的不同响应,模型建立相对简单,和简单统计分析法相似,这种方法也需要大量的观测数据的支持,并且,由于没有充分考虑作物的生长发育过程,难以同时适用于不同作物,在区域外推上也有很大的局限性。但将来随着更多的考虑作物生理生态机制,以及计算机处理能力的增强,高光谱

数据的应用,必将成为作物生物量遥感估算的一种重要手段。

1.3 基于雷达数据的估算方法

在过去的十几年中,ERS, JERS, RadarSat, EnviSat, ALOS 等搭载雷达传感器的卫星陆续发射升空,使得对于地表状况的遥感监测能够全天候、全天时的展开。大量理论研究和实验分析已经证明雷达数据在作物生物量估算中有很好的表现^[14-17]。并随着极化、干涉等技术的发展,基于雷达数据对作物生物量的遥感估算方法已经被越来越多的专家学者研究开展,通过提取不同波段(C, X, L 等)的后向散射信号所包含的作物生长状况信息,建立模型来进行作物生物量的估算。

Macelloni 等研究结果表明对于大叶片作物, C 波段,尤其是 L 波段,后向散射随着生物量的增加而增加,这主要是由于信号在传播过程中散射占据了主导作用;对于小叶片作物,由于传播过程中吸收更加明显,后向散射随着生物量的增加,其趋势是平的或者下降的^[14]。Mattia 等的研究表明入射角 23°和 VV 极化模式下, C 波段雷达数据对小麦地上生物量最为敏感(尤其是抽穗之前),但由于会受到土壤湿度变化的影响,不适合直接建立生物量反演方法;并发现入射角 40°, HH 极化模式与 VV 极化模式下 C 波段后向散射的比值,在小麦生长季内,与其地上生物量相关性很强,这一结果表明基于 ENVISAT ASAR 数据反演小麦地上生物量的可行性^[15]。Wigneron 等研究了基于 C 波段雷达数据来监测大豆生物量,并建立了简单的大豆生物量估算模型^[16]。Ferrazzoli 等发现入射角 35°和 HV 极化模式下, C 波段后向散射与小麦、苜蓿等作物的生物量相关性较高,与玉米、向日葵、高粱等作物的生物量相关性较低; L 波段对低密度作物的生物量变化有响应,短一些的 Ku, X, C 波段对高密度作物的生物量信息比较敏感^[18]。Brown 等认为 C 波段分别在 HH 和 VV 极化模式下的散射差异可以作为小麦生物量的关键指示因子^[19]。董彦芳等的研究结果表明 SAR 的后向散射系数与作物生物量具有较强的相关性,入射角为 28.5°时, C 波段 HV 极化的后向散射系数比 HH 极化具有更好的相关性;同时发现在更小入射角的情况下, HH 极化的后向散射系数与生物量的相关性较差,然而 HV 交叉极化的相关性却很好^[20]。

基于雷达数据的作物生物量估算方法,充分利用了雷达数据全天候、全天时的特点。随着极化雷达和干涉雷达的出现,结合不同的极化模式的雷达信息进行作物生物量建模反演的研究已陆续开展,并取得了不错的结果,而干涉雷达信息也为精确反演作物高度、探测作物生长变化提供了契机。鉴于雷达数据的上述特点,其必将成为遥感估算作物生物量的主要发展趋势之一。但是,这类方法也有自身的局限性,比如 C 波段在估算作物生物量时的饱和效应;模型建立过程中大多采用统计相关的分析方法,受限于观测数据,不适合大范围推广;以及雷达数据的高额费用等。

1.4 基于净初级生产力(NPP)的估算方法

在作物生长期间,植株地上部分生物量可通过下式获得

$$B_i = B_{i-1} + \Delta B_i \quad (1)$$

式中 B_i 和 B_{i-1} 分别为第 i 天和第 $i-1$ 天的植株地上生物量, ΔB_i 为第 i 天植株地上部干物质的日增重, 可以通过各种植被净初级生产模型进行估算。

目前常用来进行陆地植被净初级生产力的模型可以分为 3 类: 气候相关模型、生理生态过程模型、光利用率模型^[21]。气候相关模型以 Miami 模型、Chikugo 模型、Thornthwaite Memorial 模型^[22, 23] 为代表, 这类模型由于缺乏严密的生理、生态理论为依据, 大部分模拟结果也只是潜在净初级生产力。生理生态过程模型以 TEM 模型^[24, 25]、CENTURY 模型^[26]、BIOME-BGC 模型^[27] 为代表, 主要基于植物生长发育的生理过程或生态系统内部功能过程, 在系统尺度上来模拟冠层的光合作用、蒸腾作用、碳氮变化等。这类模型相对比较复杂, 研究涉及的领域广泛, 所需参数太多且难以获取, 区域尺度转换困难, 大范围推广比较困难。光利用率模型, 以 CASA 模型^[28, 29] 和 GLO-PEM 模型^[30, 31] 等为代表, 模型认为在非理想状况下, 植被的光合作用受最短缺的资源限制, 这种限制既可以通过一个调节模型来模拟, 也可以是一个简单的比率常数。这类模型相对比较简单, 输入数据可以由遥感直接获取, 适合区域及全球推广。

Moriondo 等以天为频率估算了小麦地表生物量的增量, 对整个生育期进行累加后获取了意大利中部地区和南部地区的小麦生物量空间分布^[32]。Bastiaanssen 等基于 AVHRR 数据实现了对巴基斯坦的印度河盆地地区的小麦、水稻、棉花、甘蔗等作物的生物量反演, 最终完成了对上述作物的单产估算^[33]。Tao 等基于 CASA 模型和 GLO-PEM2 模型完成对中国玉米的生物量模拟, 然后对其产量进行了估算。并得出对于玉米生长季内生物量的估算, 两个模型并没有显著的差别^[34]。

基于净初级生产力的作物生物量估算方法, 尤其是生理生态过程模型和光利用率模型, 相对于通过统计分析建立的方法, 能够更好的反应作物生长发育的生理生态机制, 更加准确的对作物的生物量进行估算。近年来, 基于这类模型开展了大量的作物生物量估算研究, 并在作物长势、产量监测等方面取得了不错的进展。但这类模型在区域推广、参数简化(生理生态过程模型)和合理的模拟植物光合作用以及能量的累积和分配(光利用率模型)等方面仍有待进一步完善。

1.5 基于作物生长模型的估算方法

作物生长模拟研究自 20 世纪 60 年代由荷兰的 de Wit 和美国的 Duncan 开创以来, 在诞生后几十年里, 作物模型发展的越来越复杂, 功能也越来越强大^[35, 36], 一些复杂的模型, 如 OILCROPSUN^[37], CERES^[38, 39], WOFOST^[40], CROPSYST^[41], ALMANAC 模型^[42, 43] 等都可以在作物生长周期内以固定频率模拟作物的生长。这些模型把大量影响作物生长的因素(如土壤水、温度、风速、基因、管理水平、病虫害)集成到了模型中, 但模型的初始化所需要的一些关于土壤和作物生理的参数都不易获取。遥感可以在区域尺度上为作物生长模型提供驱动参数, 使得利用作物生长模型开展区域尺度的作物生物量估算成为了可能。

马玉平等基于 WSPFRS 模型(引入遥感信息后的 WOFOST 模型)对华北冬麦区的冬小麦生长发育进行监测, 并

与直接用 WOFOST 模型模拟出的结果进行对比分析, 认为前者更加准确的模拟了华北地区冬小麦生长季内的生物量的变化^[44]。闫岩等基于遥感数据与 CERES-Wheat 模型同化监测冬小麦长势, 结果表明, 能够较好的模拟冬小麦主要生育期的生物量变化^[45]。Singh 等分别使用了 CERES-Wheat 和 CropSyst 两种作物生长模型估算了小麦的地上生物量, 使用地面观测数据对模型模拟结果进行了验证, 认为 CropSyst 比 CERES-Wheat 模型在小麦生物量估算上更具有优势^[46]。Confalonieri 等分别对 WARM, CropSyst 和 WOFOST 三种模型对水稻的监测进行评估, 结果表明 3 种模型的模拟结果都与实测数据保持较好的一致性^[47]。

其尽管遥感使得部分作物生长模型所需要的参数可以在大尺度上获取, 但所需的参数过多, 仍然在一定程度上限制了作物生长模型在区域作物生物量估算中的应用。

2 作物生物量遥感估算的发展趋势

随着遥感技术的不断创新发展, 越来越多的传感器发射升空, 可以获取的遥感数据日益增多, 并且监测方式更加多样化, 监测频率更加密集, 监测波段覆盖范围更广且光谱分辨率更高, 同时, 遥感数据信息提取手段和方法也不断完善, 使得作物生物量遥感估算的研究正处于快速发展进步的阶段, 可以大致分为以下几个发展趋势。

(1) 新的遥感数据源的产生必将催生新的作物生物量遥感估算方法。随着越来越多的高光谱、雷达、激光雷达等传感器的发射, 基于不同数据源的作物遥感估算方法陆续建立, 作物生物量的估算也得以在不同角度展开, 使得不同估算结果之间的相互校验成为可能。当前, 随着遥感数据源在时间、空间、光谱分辨率等方面不断提高, 以及多源遥感数据的综合应用, 充分发挥不同数据源的优势, 如高光谱遥感可以监测宽波段遥感不可探测的特性, 雷达遥感全天候全天时监测的能力, 激光雷达遥感极高的角分辨率、距离分辨能力、抗干扰能力等, 来建立相应的估算方法必将成为今后准确估算作物生物量的基础。如最近升空的 RapidEye, 使在“红边”区域对植被的监测达到了米级分辨率; TerraSAR 数据则开创了植被在 X 波段的米级观测; 而最近国产卫星“HJ-1”星座凭借其 4 天重复覆盖的 30 m CCD 和 100 m 超光谱数据, 也逐渐进入人们的视野。以上数据源的更新, 必将引发新的作物生物量估算方法的研究和建立。

(2) 基于净初级生产力(NPP)的作物生物量遥感估算方法的研究需要进一步完善。基于估算 NPP 的方式来估算作物生物量的方法, 由于能够在一定程度上反应作物的生理生态过程, 并易与遥感数据相结合, 目前备受青睐。但前述已提出, 其中的生理生态过程模型在区域推广、参数简化等方面, 以及光利用率模型在合理的模拟植物光合作用、能量的累积和分配等方面, 都有待进一步完善。鉴于基于统计分析建立的估算方法, 从某种程度来说, 是对遥感信息与作物生物量影响因素间响应关系的探索, 建立的模型尽管简洁明了, 但是没有明确的生物物理机制, 难以真正反映作物的生长发育过程, 区域外推的适用性不高, 不能从根本上解释作

物生物量形成的本质,因此,对基于 NPP 估算的作物生物量估算方法进行完善,既能发挥遥感数据实时快速、大范围监测的特性,又能基于一定的生理生态过程,对作物生物量的监测,尤其是实时的作物长势监测,是十分有意义的。

(3)基于作物生长模型的作物生物量遥感估算方法的研究将得到进一步加强。作物生长模型考虑大量影响作物生长的因素,完整的描述和预测作物生长及产量形成全过程。而遥感技术的发展可以轻松快捷的获取大量的实时数据定量描述作物的实际生长发育状况,从而对作物的生长模拟过程进行调整或订正。二者的结合,恰好可以发挥各自的优势,进而改进估算结果的精度。现阶段,基于作物生长模型的作物生物量遥感估算方法的研究是作物长势监测的热点之一,如何更好的结合遥感数据,快速获取模型的输入参数、实现模型的本地化,将是其需要进一步加强的。

(4)遥感估算结果的精度验证和评价将成为今后必须面对的问题。遥感监测作物生物量不只是定性的对作物的生长状况的好坏进行评价,而是要对作物的整个生长过程进行定量监测,并最终能够实现对作物产量的估算和预测。这样作物生物量遥感估算结果的精度验证就不可避免了,而由于观测数据多是“点”上的数据,无法与空间连续分布的遥感估算

结果很好的对应,一直以来都是遥感学界的一个难题,而随着越来越多的遥感定量监测的需求,这一难题必须要在今后的研究中予以重视并最终解决。

3 结 语

目前,作物生物量的遥感估算中,基于传统光学数据简单统计分析的估算模型仍然是应用最广的算法,但是由于这种算法缺乏理论依据,在一个区域建立的模型很难在其他地区进行推广或应用。而基于一定生理生态学机制的,并能够充分利用遥感信息的宏观及实时动态性,发挥其直接反映作物整体状况条件的优势,建立作物生物量遥感估算模型是一种必然的趋势。

从传统光学遥感到微波、激光再到高光谱遥感,由于传感器的不断革新,从而能够获取作物的连续光谱信息和更多的精细光谱信息;并且与生态学、农学、植物生理学等更多的学科有机结合,使更多能够准确描述作物生长发育过程的机理模型得以建立,则基于遥感监测作物生物量的发展前景将十分广阔。

参 考 文 献

- [1] LI Wei-guo, ZHAO Chun-jiang, WANG Ji-hua, et al(李卫国,赵春江,王纪华,等). Remote Sensing for Land & Resource(国土资源遥感), 2007, (2): 6.
- [2] Bai J, Li S, Wang K. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(4): 437.
- [3] XU Xin-gang, WU Bing-fang, MENG Ji-hua, et al(徐新刚,吴炳方,蒙继华,等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2008, 24(2): 290.
- [4] FU Wei-dong, LIU Shao-min, HUANG Jing-feng(傅玮东,刘绍民,黄敬峰). Journal of Arid Land Resources and Environment(干旱区资源与环境), 1997, 11(1): 84.
- [5] HUANG Jing-feng, WANG Ren-chao, WANG Xiu-zhen, et al(黄敬峰,王人潮,王秀珍,等). Journal of Zhejiang University(Agric. & Life Sci.)(浙江大学学报·农业与生命科学版), 1999, 25(50): 519.
- [6] ZHANG Xia, ZHANG Bing, WEI Zheng, et al(张霞,张兵,卫征,等). Journal of Images and Graphics(中国图像图形学报), 2005, 10(4): 420.
- [7] PU Rui-liang, GONG Peng(浦瑞良,宫鹏). Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications(高光谱遥感及其应用). Beijing: Higher Education Press(北京:高等教育出版社), 2000.
- [8] Thenkabail P S, Smith R B, De Pauw E. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(2): 158.
- [9] Hansena P M, Schjoerring J K. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4): 542.
- [10] WANG Xiu-zhen, HUANG Jing-feng, LI Yun-mei, et al(王秀珍,黄敬峰,李云梅,等). Acta Agronomica Sinica(作物学报), 2003, 29(6): 815.
- [11] SONG Kai-shan, ZHANG Bai, YU Lei, et al(宋开山,张柏,于磊,等). System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture(农业系统科学与综合研究), 2005, 21(1): 65.
- [12] SONG Kai-shan, ZHANG Bai, LI Fang, et al(宋开山,张柏,李方,等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2005, 21(1): 36.
- [13] BAI Jun-hua, LI Shao-kun, WANG Ke-ru, et al(柏军华,李少昆,王克如,等). Acta Agronomica Sinica(作物学报), 2007, 33(2): 311.
- [14] Macelloni G, Paloscia S, Pampaloni P, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(4): 873.
- [15] Mattia F, Le Toan T, Picard G, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(7): 1551.
- [16] Wigneron J P, Ferrazzoli P, Oliosio A, et al. Remote Sensing of Environment, 1999, 69(2): 179.
- [17] McNairn H, Brisco B. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(3): 525.
- [18] Ferrazzoli P, Paloscia S, Pampaloni P, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(1): 5.
- [19] Brown S C M, Quegan S, Morrison K, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(7): 1602.

- [20] DONG Yan-fang, SUN Guo-qing, PANG Yong(董彦芳, 孙国清, 庞勇). *Science in China Series D(中国科学 D 辑)*, 2005, 35(7): 682.
- [21] ZHU Wen-quan, CHEN Yun-hao, XU Dan, et al(朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等). *Chinese Journal of Ecology(生态学杂志)*, 2005, 24(3): 296.
- [22] ZHOU Guang-sheng, ZHENG Yuan-run, CHEN Si-qing, et al(周广胜, 郑元润, 陈四清, 等). *Scientia Silvae Sinicae(林业科学)*, 1998, 34(5): 2.
- [23] CHEN Li-jun, LIU Gao-huan, FENG Xian-feng(陈利军, 刘高焕, 冯险峰). *Chinese Journal of Ecology(生态学杂志)*, 2002, 21(2): 53.
- [24] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4-5): 785.
- [25] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 173.
- [26] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 785.
- [27] Running S W, Hunt E R. San Diego, CA: Academic Press, 1993. 141.
- [28] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811.
- [29] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74.
- [30] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, et al. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3): 239.
- [31] Prince S D, Goward S N. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4-5): 815.
- [32] Moriondo M, Maselli F, Bindi M. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3): 266.
- [33] Bastiaanssen W G M, Ali S. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94(3): 321.
- [34] Tao F, Yokozawa M, Zhang Z, et al. *Ecological Modelling*, 2005, 183(4): 385.
- [35] Boote K J, Jones J W, Pickering N B. *Agronomy Journal*. 1996, 88(5): 704.
- [36] XIE Yun, Kiniry J R(谢云, Kiniry J R). *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2002, 28(2): 190.
- [37] Villalobos F J, Hall A J, Ritchie J T, et al. *Agronomy Journal*, 1996, 88(3): 403.
- [38] Jones C, Kiniry J. *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. College Station: Texas A & M University Press, 1986.
- [39] Ritchie J T, Otter S. *Description and Performance of CERES-Wheat: A User-Oriented Wheat Yield Model*. Willis W O, ARS Wheat Yield Project. US: USDA-ARS, ARS-38, 1985.
- [40] Supit I, Hooijer A A, Van Diepen C A. *System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS Vol. 1: Theory and Algorithms*. Catno: CL-NA-15956-FN-C. EUR 15956, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1994.
- [41] Stockle C O, Donatelli M, Nelson R. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3-4): 289.
- [42] Kiniry J R, Williams J R, Gassman P W, et al. *Transactions of the ASAE*, 1992, 35(3): 801.
- [43] Kiniry J R, Sanderson M A, Williams J R, et al. *Agronomy Journal*, 1996, 88(4): 602.
- [44] MA Yu-ping, WANG Shi-li, ZHANG Li, et al(马玉平, 王石立, 张黎, 等). *Acta Meteorologica Sinica(气象学报)*, 2005, 63(2): 204.
- [45] YAN Yan, LIU Qin-huo, LIU Qiang, et al(闫岩, 柳钦火, 刘强, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2006, 10(5): 804.
- [46] Singh A K, Tripathy R, Chopra U K. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(7): 776.
- [47] Confalonieri R, Acutis M, Bellocchie G, et al. *Ecological Modelling*, 2009, 220(11): 1395.

Overview on Monitoring Crop Biomass with Remote Sensing

DU Xin, MENG Ji-hua*, WU Bing-fang

Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract Crop biomass is one of the key indicators not only in crop condition monitoring, but also in crop production estimation. With the development of 3S technology, it is feasible to estimate crop biomass at large scales with remote sensing. In the present paper, the researches on crop biomass estimation models with remote sensing were reviewed, and the methods of crop biomass estimation were classified into six categories according to their differences in data source and methodology. The advantages and deficiencies of each method were discussed and analyzed. Finally, the paper presents the prospect of the methods of crop biomass estimation.

Keywords Crop; Biomass; Remote sensing; Estimating methods

* Corresponding author

(Received Nov. 19, 2009; accepted Feb. 26, 2010)