

引用格式:Wang Yuanbo,Feng Dejun,Li Shujuan,*et al.* Review of Estimating Crop Biomass based on Remote Sensing Information[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(3): 468-475. [王渊博,冯德俊,李淑娟,等.基于遥感信息的农作物生物量估算研究进展[J].遥感技术与应用, 2016, 31(3): 468-475.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.3.0468

基于遥感信息的农作物生物量估算研究进展

王渊博¹,冯德俊¹,李淑娟²,武文娟¹,任红艳²

(1.西南交通大学地球科学与环境工程学院遥感信息系,四川 成都 610031;

2.中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室

地球数据科学与共享研究室,北京 100101)

摘要:科学准确地估算农作物生物量是生物质能源开发利用战略的必要前提。随着遥感技术的不断发展,可获取遥感数据的时间、空间、光谱分辨率都在不断提高,为长时间跨度和大空间尺度的农作物生物量估算提供了有力支撑。对目前农作物生物量估算方法进行了分析总结,重点阐述了基于遥感信息的农作物生物量估算方法,并根据基于模型的不同将其分为4类(基于植被指数、净初级生产力、作物生长模型、作物表面模型的农作物生物量估算方法),对每一类方法的原理进行了详细论述,并就其在国内外典型的应用情况进行了分析,在此基础上总结了各种估算方法的优势及存在问题,展望了该领域未来主要的发展方向。

关键词:农作物;生物量;遥感;估算

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)03-0468-08

1 引言

能源问题已经成为制约我国经济社会可持续发展的重大问题之一^[1],研发并利用生物质能对缓解能源危机^[2]和保护生态环境都具有重要的作用^[3-4]。目前,发展生物质能要坚持“不与人争粮,不与粮争地”的原则^[5],因此,在中国发展生物质能产业的原料只能来自剩余物,而农作物秸秆约占可获得剩余物总量的38.9%^[6],是最有潜力实现产业化的生物质能源。但是,农作物生物质具有分布分散不连续、单位附加值低、不宜输送、一般不进行地区间交易等特点^[7]。为了合理有效地利用生物质能源,就必须对其可获取农作物生物量进行科学准确地评估,并对其空间分布进行必要的分析^[7]。通过对农作物生物量的估算数据,结合不同区域不同作物因经济、环

境等限制因素下可获得系数、损失比例、能源转换比例等参数,就可对某个区域可获取生物质能的利用潜力进行评估^[8-9]。

目前,有关农作物生物量估算方法主要有基于统计数据的估算方法和基于遥感信息的估算方法两大类。基于统计数据的农作物生物量估算方法,通常是对研究区域实地调查数据及相关文献数据进行一定的数学分析^[9-10]以获取其秸秆系数(作物田间秸秆产量与经济产量的比例),然后根据某种作物的经济产量对其秸秆生物量进行估算^[11]。此方法原理简单,所需数据量较小,且容易获取,可以对大尺度的(省、地市)农作物生物量进行快速估算^[12-13];但是,其秸秆系数的时效性难以保证,同时,由于其获取的作物经济产量数据具有非实时性和较大的空间尺度等特点,难以对作物的秸秆生物量进行预测及

收稿日期:2015-08-08;修订日期:2015-10-24

基金项目:国家重大科技专项项目“新能源评估研究示范”课题(30-Y30B13-9003-14/16-04),国家973计划项目“高分辨率遥感数据精处理和空间信息智能转化的理论与方法”(2012CB719900)共同资助。

作者简介:王渊博(1989—),男,河南禹州人,硕士研究生,主要从事遥感信息处理、农作物生物质能利用评估等方面的研究。

E-mail:670523010@qq.com。

通讯作者:冯德俊(1974—),男,四川盐亭人,副教授,主要从事遥感信息处理方面的研究。Email:fengdj@126.com。

县域内的空间分布分析。

随着遥感技术的飞速发展,越来越多高空间、时间、光谱分辨率数据投入应用以及利用遥感数据提取地表植被信息及相关参数技术和方法不断完善,使得快速、准确、多空间尺度的农作物生物量估算成为可能。本文就基于遥感信息的农作物生物量估算方法的原理进行了详细的阐述,并结合国内外典型的应用情况对各种方法的优势及存在的不足进行总结,并展望了该领域未来主要的发展方向。

2 基于遥感信息的农作物生物量估算方法

目前,基于遥感信息的农作物生物量估算方法根据其采用模型不同分为以下 4 类:基于植被指数(Vegetation Index)、净初级生产力(Net Primary Productivity)、作物生长模型(Crop Growth Model)和作物表面模型(Crop Surface Models)的生物量估算方法。

2.1 基于植被指数的农作物生物量估算方法

基于植被指数的农作物生物量估算方法的基本原理就是通过对对比分析不同植被指数与农作物生物量的相关性,选择最合适的植被指数和回归类型构建相应的作物生物量估算的经验模型,以此对农作物生物量进行估算。

目前,常用于生物量估算的植被指数主要有:归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)比值植被指数(RVI)、差值植被指数(DVI)、叶面积指数(LAI)、绿地面积指数(GAI)、绿波段归一化植被指数(GNDVI)、再次归一化植被指数(RDVI)、修正的土壤调节植被指数(MSAVI)等^[14-15]。

马勤建等^[16]将利用光谱仪获取的高光谱数据进行一阶微分处理,并将处理后的光谱数据组合构建的 NDVI 和 LAI 与新疆实测棉花生物量数据进行多元统计分析,结果表明基于 NDVI 的指数估算模型,相关系数达到极显著水平,能够有效估测作物生物量。还有学者利用光谱响应函数将经过一阶微分处理的小麦高光谱数据转换为等效的 MODIS 植被指数,并与小麦生物量进行相关性分析,结果发现考虑了蓝光波段和冠层背景调整因子增强型植被指数(EVI)相对于另外 5 种等效 MODIS 植被指数(NDVI、RVI、DVI、RDVI、MSAVI)对小麦生物量具有更高敏感度,能够明显提高对小麦生物量估测精度^[17]。徐改花等^[18]分别将地面实测 LAI 和 NDVI 及利用数码相片提取小麦生长期覆盖度信息及其组合与小麦生物量进行相关性分析,结果表明

LAI 与小麦生物量的相关性最好,模型的估算精度并非与其参数个数成正比。Lokupitiya 等^[19]分别将原始的 NDVI 数据和经过典型相关性分析(Canonical Correlation Analysis, CCA)生成的 NDVI 数据与相关部门公布的农作物生物量数据进行相关性分析,发现通过 CCA 处理能够有效避免 NDVI 数据间的多重共线性问题,能够显著提高其相关性,并利用 CCA 处理的 NDVI 构建生物量估算模型对爱荷华州作物生物量进行了估算。Claverie 等^[20]利用 Formosat-2 卫星遥感影像的 NDVI 数据和指数模型获得了绿地面积指数(GAI),并利用 GAI 校正耦合简单算法估算模型(SAFY)的主要参数,并利用 SAFY 模型对法国图卢兹市的玉米和向日葵生物量进行估算,并与实测数据进行相关性分析,结果显示,相关性达到显著水平。还有研究表明基于绿光波段校正的植被指数 GNDVI(Green NDVI)比 NDVI、RVI 和 SAVI 对咖啡生物量相关性更高,达到极显著水平,利用基于 GNDVI 建立的咖啡生物量估算模型能够更好地对研究区域的咖啡生物量进行估算^[21]。

基于植被指数的农作物生物量估算方法的原理较为简单,且可操作性较强,适用于小区域农作物生物量的估测。但是,此方法需要大量的样点数据,且没有考虑作物的生理生态机制及其生长环境等要素,因而此方法的普适性较差,难于进行跨区域、跨作物种类的应用。

2.2 基于净初级生产力(NPP)的农作物生物量估算方法

相对于多年生植被(森林、草地)而言,农作物的生长周期较短,且在生长季结束后,其生物量的累积过程也随之结束,因此,其总生物量就等于其生长期净初级生产力(NPP)累计量。通过植被净初级生产力模型,可以得到单位时间和单位面积上农田生态系统所能累积的有机生物量,利用式(1)可获取单位面积上的某种农作物生长期内总生物量:

$$B_t = \sum_{i=1}^n B_i \quad (1)$$

其中: B_t 为该作物生长期内总累积生物量, B_i 为第 i 单位时间内作物生物量增加量, n 为作物生长期跨度所包含的单位时间间隔总数。

目前,主要的 NPP 估算模型可分为 4 类:气候相关模型、生理生态过程模型、光能利用模型和生态遥感耦合模型^[22-23]。气候相关模型是利用气候因子(如温度、降水、太阳辐射等)来估算作物 NPP^[24],其

中具有代表性的模型有 Miami 模型^[25]、Thorntwaite 模型^[26]、Chikugo 模型^[27]以及国内的朱志辉模型和周广胜模型^[28]等。但是,由于该类模型的生理生态机制不是很清楚,且估算结果是以点代面,大部分模型的模拟结果只是潜在作物生产力(即某一地区作物群体在气候处于最佳状态下能达到的最大 NPP)。生理生态过程模型是从机理上模拟作物的光合作用、呼吸作用、蒸腾作用及土壤水分散失过程,将土壤—作物—大气连续体 (SPAC) 作为一个系统,进行各层的物质、能量交换模拟并建立相应的模型或模型库,具有代表性的模型有 CENTURY^[29]、CARAIB^[30]、TEM^[31]、BIOME-BGC^[32]等。这类模型生态机理清楚,估算结果比较准确;但是其模型相对比较复杂,所需的参数较多,且一般较难获得,区域尺度转换也比较困难,难以进行大区域 NPP 估算。光能利用模型是将 NPP 的调控因子以相对简单的方法组合在一起,模型简单实用,而且其中重要的参数光合有效辐射吸收比例 (FPAR) 可以通过遥感数据获得,所以应用比较普遍。近年来,引进或者改进国外的光能利用模型主要有 CASA 模型^[33]和 GLO-PEM 模型^[34]。生态遥感耦合模型融合了生态过程和遥感模型的优点,可反映区域及全球尺度的 NPP 空间动态,增强了陆地 NPP 估算的可靠性和可操作性,目前还处在尝试阶段,主要的模型有 BEPS 模型和改进的 PEM 模型^[35]。

利用遥感数据进行作物生物量和净初级生产力的估算,主要是通过 NPP 与作物吸收的光合有效辐射 (APAR) 和作物所吸收的光合有效辐射转化为有机物的转化率 (ϵ) 的关系实现的,其关系由著名的 Monteith 方程来表示,如式 (2) 所示^[36]:

$$NPP = APAR \cdot \epsilon \quad (2)$$

其中: $APAR = FAPAR \cdot PAR$, PAR 是光合有效辐射, $FAPAR$ 是作物冠层对光合有效辐射的吸收系数,因此, NPP 估算方程可理解为如式 (3) 所示:

$$NPP = (FAPAR \cdot PAR) \cdot \epsilon \quad (3)$$

$FAPAR$ 和 PAR 都可通过遥感数据的反演获得^[37-38],但是,不同作物由于生长时期、环境以及生长区域不同而引起的冠层结构、空气温度、大气水汽、土壤水分、太阳入射角等的差异都会影响到其 $FAPAR$ 、 PAR 和有机物转化率 (ϵ),进而影响作物净初级生产力累积量和生物量^[37-39]。

Na 等^[40]利用 MODIS 数据中的 MYD09、MYD11 和 MYD15 数据获取近红外 (NIR) 和短波红外波段 (SWIR) 数据,地表温度 (LST) 和光合有效

辐射吸收比例 (FPAR) 等,然后利用 CASA 模型对水稻各月及总累计 NPP 进行估算,并将利用 NPP 估算的水稻生物量与实测数据进行对比分析,结果表明利用 NPP 能够较好地对水稻生物量进行估算。Jin 等^[41]分别利用 HJ-1 和 TM 影像及改进的 CASA 模型对中国新疆地区棉花的 NPP 进行计算,并分别利用 NPP 估算的生物量与实测数据进行对比分析,结果表明 HJ-1 对于新疆地区棉花生物量及产量预测具有更好的精度。王芳等^[42]将光能利用模型和生理生态过程模型进行耦合,将复杂生理生态过程模型中的部分结果,作为光能利用模型的一些参数,利用基于 BIOME-BGC 模型改进的 MOD17A2/A3 数据获得了较好的生物量估算效果,并根据生物质能可用部分的影响因素,建立可用生物质能决策模型。

基于 NPP 的生物量估算模型充分考虑不同区域气候、降水、太阳辐射等对作物生长具有决定性影响的因素,特别是生理生态过程模型和光能利用模型能够从机理对作物的光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、土壤水分散失过程以及资源平衡理论进行模拟,能够更准确有效地对作物生物量进行估算。但是,仍需要对生理生态过程模型进行合理简化,以减少模型中参数个数及可获取性,同时致力于区域尺度转换研究,便于进行大区域生物量估算。

2.3 基于作物生长模型 (CGM) 的农作物生物量估算方法

基于作物生理生态机理,充分考虑作物生长与大气、土壤、品种遗传特性乃至人为管理措施等相关作用的作物生长模型,能够在作物生长期以特定的频率对作物的生长进行模拟^[43-44]。目前主要的生物生长模型有荷兰的 WOFOST (World Food Studies) 模型^[45]、美国的 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 系列模型^[46]和 CERES (Crop Environment Resource Synthesis) 系列模型^[47]、澳大利亚的 APSIM 系列模型^[48] (Agricultural Production Systems Simulator)、中国的 CCSODS (Crop Computer Simulation Optimization Decision Making System) 系列模型^[39]以及由国际农粮组织 (FAO) 开发的 AquaCrop 模型^[49]。随着遥感反演技术的不断成熟,作物生长模型中的许多驱动参数都可以由遥感技术获得,使得基于遥感的作物生长模型的农作物生物量估算成为可能^[50-52]。

谭正等^[53]运用数据同化的方法,将 SAR 数据提取的生物量信息应用于 WOFOST 水稻生长模

型,并通过分析水稻生物量和 SAR 数据提取的后向散射系数的时域变化关系建立生物量估算模型,结果表明,引入 SAR 数据修正后的 WOFOST 水稻生长模型更符合水稻生长的实际情况,对于水稻生物量的估测精度有明显提高。Machwitz 等^[54]将 AP-SIM7.4 模型与辐射传输模型(PROSAIL)相结合,并将粒子滤波技术应用用于 RapidEye 数据与 AP-SIM7.4 模型的同化过程中,利用 RapidEye 数据对 APSIM7.4 模型输入参数的不确定性进行修正,并对卢森堡中部地区的玉米生物量进行模拟预测,结果表明,通过卫星数据校正的模型能够明显提高预测精度。Abedin 等^[55]利用 AquaCrop 模型对印度新德里地区不同灌溉程度和氮肥施用量的玉米生物量进行模拟及估算,通过与实测值进行对比分析发现,当田地的灌溉程度为土壤持水量为 75% 和氮肥施用量为 150 kg/hm² 时估测的精度最高,由此,可以利用 AquaCrop 模型对印度北部的半干旱地区玉米的生物量及产量进行估算。

作物生长模型和卫星遥感数据的结合能够较好地预测大面积作物的生物量。但是,作物生长过程是一个非常复杂的过程,作物生长模型还不能完全揭示其生理生化过程,大范围条件下初始宏观资料的获取和参数调整还存在一定的困难。同时,同化遥感信息在空间分辨率与时间分辨率之间的矛盾也有待进一步解决。

2.4 基于作物表面模型(CSMs)的生物量估算方法

基于作物表面模型(CSMs)的生物量估算,主要是通过无人机(Unmanned Aerial Vehicle)或三维激光扫描仪等设备获取高空间分辨率、高时间分辨率的作物 R-G-B 可见光影像或三维点云数据,并利用相应计算机视觉软件对其进行处理。然后,利用作物表面模型(CSMs)获得作物的株高(Plant Height)数据,最后将株高数据与实测生物量进行相关分析,并构建相应的生物量估算模型^[56]。

Bendig 等^[57]利用无人机获取 RGB 可见光影像构建的多时相高分辨率作物表面模型(CSMs)估算出德国某农业研究站小麦的株高数据,通过分析发现其与实测生物量具有显著的相关性,由此构建 5 种回归模型对生物量进行估算并进行交叉验证,其研究还发现生长期晚期作物的倒伏现象是造成生物量估算误差的主要原因之一。Tilly 等^[58]利用安装了数码相机三维激光扫描仪获取三维 RGB 点云和有纹理信息的水稻表面数据,并结合高密度的测量点数据,建立了空间分辨率为 1cm 的作物表面模

型(CSMs)并获取水稻的株高数据,基于试验田中株高与生物量建立生物量估算模型,并在普通的农田中对其鲁棒性和普适性进行验证,结果表明其模型具有较高的可靠性。Bendig 等^[59]通过实验发现基于株高参数的估算模型比基于植被指数的估算模型具有更好的鲁棒性,而结合了株高参数和植被指数的估测模型对作物生物量的估测精度并没有显著的提高。

不论是无人机(UAV)还是三维激光扫描仪,都能够为基于作物表面模型(CSMs)的农作物生物量估算提供多时相、高空间分辨率遥感数据,这也是其主要的优势^[56]。但是,作物株高与其品种、化肥使用水平等因素密切相关^[60],因此,模型对于普通农田普适性的检验,有必要进一步加强。此外,此类研究方法中是通过作物的株高数据集间接对作物生物量进行估算,在数据收集及处理的过程中可能会导致误差传递。同时,无人机和三维激光扫描仪的覆盖范围非常有限,且成本较高,难以对大范围的生物量进行估算,未来需考虑与卫星遥感数据与方法进行结合。

3 农作物生物量估算的发展趋势

随着遥感技术的飞速发展,多样化、专业化的新型传感器不断发射升空,使得应用于农作物生物量估算的数据种类更多,数据获取频率更高,空间分辨率、光谱分辨率也更高。同时,无人机及地面三维激光扫描仪的应用以及与卫星遥感技术的结合为农作物生物量估算提供了新的技术手段,此外,利用遥感数据提取作物生理生态及生长环境信息的技术和方法也在快速发展,以下是基于遥感信息的农作物生物量估算的发展趋势。

(1)用于农作物生物量估算的植被指数将会有质和量的提升。首先,基于新的数据源的植被指数也将会被用于农作物生物量估算,如空间分辨率达 10~20 m 的法国 SPOT6、7 卫星、包含 11 个波段数据的美国 Landsat 8 卫星、可提供地球上几乎所有植被的每日生长状况的欧空局 PROBA-V 卫星,以及中国最近发射的中巴资源一号 02C、04 星和 GF-1、GF-2、GF-5 卫星,特别是 GF-2 卫星具有优于 1 m 的空间分辨率。这些具有高空间分辨率、高辐射精度、高定位精度的新型传感器的遥感数据,必将为植被指数的获取及改进提供新的有效途径;同时,越来越多的适合于农作物生物量估算的新型植被指数会被开发出来;此外,将基于地面实测光谱数据与卫星

遥感数据耦合,构建等效卫星遥感植被指数,也将为利用地面遥感进行大面积农作物生物量估算提供了有效途径。

(2)基于 NPP 的农作物生物量估算模型有待进一步优化。基于 NPP 的农作物生物量估算方法,虽然考虑了作物生长过程中的生理生态过程对生物量的影响,且可通过遥感手段获取必要的参数,但是,其估算模型较为复杂且区域尺度转换较为困难,严重限制其应用和推广。因此,基于 NPP 的农作物生物量估算模型的合理简化势在必行,同时,不断改进的遥感信息提取手段和方法也必将有助于模型参数的提取与最佳生物量估算模型的构建;另外,未来也必需加强模型在不同区域尺度转换的研究,以利于其进行大区域生物量的估算。

(3)基于作物生长模型(CGM)农作物生物量估算方法将会在模拟作物生理生态过程及与遥感技术结合方面日益完善。作物的生长过程是受到多方面要素综合影响的过程,是一个极其复杂的过程,目前的 CGM 模型还不能完全揭示其生理生态过程,未来可以利用大量的、密集的遥感实时数据,对作物的生长发育状况进行定量描述,以便更加真实模拟作物的生理生态过程。随着越来越丰富的遥感信息的获取,可以尝试将多种时空分辨率尺度以及多源卫星影像数据进行同化,度量误差信息,提高模型的模拟精度。

(4)基于作物表面模型(CSMs)的生物量估算方法的研究将进一步加强。基于 CSMs 的数据获取主要是基于无人机(UAV)和地面三维激光扫描(TLS)平台,未来有必要加强与卫星遥感的结合,以便进行大区域农作物生物量的估算。同时,作物株高影响因素以及与生物量之间关系的研究有待进一步加强,以减少估算过程中的传递误差。

(5)加强多种模型、多源数据之间的交叉检验,提高农作物生物量估算模型的精度。农作物生物量估算过程是一个定量的过程,其估算模型的精度必须得到保证。利用不同模型、不同传感器的遥感数据源以及地面观测数据等不同角度的生物量估算结果进行交叉检验,势必会对生物量估算精度有所提高,并为各种模型的精度评价提供了有力的依据。

4 结 语

目前,国内外已经开展了许多农作物生物量估算的研究,基于统计数据的农作物生物量估算可以实现较大区域的农作物生物量估算,同时为基于遥

感的农作物秸秆生物量估算提供一定的参考数据。基于遥感的农作物秸秆生物量估算中,基于植被指数的农作物生物量估算方法由于其简单易操作的特性,目前应用较为广泛,但是其在跨区域、跨作物种类方面的研究还有待进一步加强;而基于净初级生产力(NPP)、作物生长模型(CGM)和作物表面模型(CSMs)的农作物生物量估算方法都是基于一定的作物生理生态机制,且与遥感信息紧密结合,是将来农作物生物量估算的主要发展趋势。但是,必须进一步加强其生理生态过程模拟及量化理论的研究,充分利用各种遥感数据对其生理生态过程进行科学模拟,以便构建更加简洁有效的农作物生物量估算模型。

参考文献(References):

- [1] Jiang Zemin. Reflections on Energy Issues in China[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, (3): 345-359. [江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, (3): 345-359.]
- [2] Qin Shiping. China Biomass Energy Industry Development Prospects[C]// Global Biomass Energy Industry Development Top BBS (Status, Trends and Challenges). Shanghai: QZ Events, 2014. [秦世平. 中国生物质能产业发展前景[C]// 全球生物质能源产业发展高层论坛(现状、趋势与挑战)论文集. 上海: 勤哲文化传播(上海)有限公司, 2014.]
- [3] Chen Yalin, Gao Jixi, Li Yonhong. Potential of Bio-energy Substitute Fossil Energy and Environmental Effects[J]. China Environmental Science, 2010, (10): 1425-1431. [陈雅琳, 高吉喜, 李咏红. 中国化石能源以生物质能源替代的潜力及环境效应研究[J]. 中国环境科学, 2010, (10): 1425-1431.]
- [4] Liu Qing, Liu Rongrong. The Theory of Sino-US Cooperation on Clean Energy[J]. International Studies, 2011, (2): 29-32, 52. [刘卿, 刘蓉蓉. 论中美清洁能源合作[J]. 国际问题研究, 2011, (2): 29-32, 52.]
- [5] The Ministry of Agriculture Plans Development Office[2007] 18, Agricultural Biomass Industry Development Planning, (2007~2015)[S]. 2007. [农计发[2007]18号, 农业生物质能产业发展规划(2007~2015年)[S]. 2007.]
- [6] Liu Gang, Shen Lei. Quantitative Appraisal of Biomass Energy and Its Geographical Distribution in China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, (1): 9-19. [刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007, (1): 9-19.]
- [7] Shi Chunyuan. Runoff Biomass[M]. Beijing: China Rural Science & Technology, 2011. [石元春. 决胜生物质[M]. 北京: 中国农村科技, 2011.]
- [8] Hu Junmei. Analysis of Resources Utilization on Crop Stalks[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, (4): 207-210. [胡俊梅. 农作物秸秆资源化利用分析[J]. 广东农业科学, 2010,

- (4):207-210.]
- [9] Wang Xiaoyu. Spatial and Temporal Distribution of Crop Residue Resource in the East, Central-South, and Southwest Regions of China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [王晓玉. 以华东、中南、西南地区为重点的大田作物秸秆资源量及时空分布的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [10] Xing Hong, Zhao Yuan, Wang Yiqiang. Estimate and Distribution of Rural Biomass Resource Potential in Nantong City Jiangsu Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (10): 3480-3489. [邢红, 赵媛, 王宜强. 江苏省南通市农村生物质能资源潜力估算及地区分布 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (10): 3480-3489.]
- [11] Liao C, Yan Y, Wu C, *et al.* Study on the Distribution and Quantity of Biomass Residues Resource in China [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 27 (2): 111-117.
- [12] Jiang D, Zhuang D, Fu J, *et al.* Bioenergy Potential from Crop Residues in China: Availability and Distribution [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16 (3): 1377-1382.
- [13] Delphine S, Wallace E, Jacquet F. Economic Analysis of the Potential of Cellulosic Biomass Available in France from Agricultural Residue and Energy Crops [J]. *BioEnergy Research*, 2009, 3 (2): 183-193.
- [14] Yan F, Wu B, Wang Y. Estimating Aboveground Biomass in Mu Us Sandy Land Using Landsat Spectral Derived Vegetation Indices over the Past 30 Years [J]. *Journal of Arid Land*, 2013, (4): 521-530.
- [15] Wang Zhengxing, Liu Chuang, Huete Alfredo. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in Vegetation Index Research [J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 2003, (5): 979-987. [王正兴, 刘闯, Huete Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI [J]. *生态学报*, 2003, (5): 979-987.]
- [16] Ma Qinjian, Wang Dengwei, Huang Chunyan, *et al.* Estimation Model of Cotton Dry Matter Accumulation Using Hyperspectral Vegetation Index [J]. *Remote Sensing Information*, 2008, (6): 38-41. [马勤建, 王登伟, 黄春燕, 等. 利用高光谱植被指数估算棉花干物质积累的模型研究 [J]. *遥感信息*, 2008, (6): 38-41.]
- [17] Hou Xuehui, Niu Zheng, Huang Ni, *et al.* The Hyperspectral Remote Sensing Estimation Models of Total Biomass and True LAI of Wheat [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2012, (4): 30-35. [侯学会, 牛铮, 黄妮, 等. 小麦生物量和真实叶面积指数的高光谱遥感估算模型 [J]. *国土资源遥感*, 2012, (4): 30-35.]
- [18] Xu Gaihua, Zhang Fuping, Zhou Zhengchao *et al.* Estimation of Winter Wheat's Biomass Using Digital Photographs [J]. *Resource Development & Market*, 2011, (3): 193-196. [徐改花, 张福平, 周正朝, 等. 利用数码相片对冬小麦生物量的试算 [J]. *资源开发与市场*, 2011, (3): 193-196.]
- [19] Lokupitiya E, Lefsky M, Paustian K. Use of AVHRR NDVI Time Series and Ground-based Surveys for Estimating County-level Crop Biomass [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31 (1): 141-158.
- [20] Claverie M, Demarez V, Duchemin B, *et al.* Maize and Sunflower Biomass Estimation in Southwest France Using High Spatial and Temporal Resolution Remote Sensing Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 12 (4): 844-857.
- [21] Coltri P P, Zullo J. Coffee Crop's Biomass and Carbon Stock Estimation with Usage of High Resolution Satellites Images [J]. *Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, (10): 1786-1795.
- [22] Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Xu Dan, *et al.* Advances in Terrestrial Net Primary Productivity (NPP) Estimation Models [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, (3): 296-300. [朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2005, (3): 296-300.]
- [23] Sun Jinwei, Guan Dexin, Wu Jiabin, *et al.* Research Advances in Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation [J]. *World Forestry Research*, 2012, (1): 1-6. [孙金伟, 关德新, 吴家兵, 等. 陆地植被净初级生产力研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2012, (1): 1-6.]
- [24] Su Q, An S, Zhao L. Computation and Analysis of NPP in Northern Slope of Tianshan Mountain based on 5 Kinds of Climate-Productivity Model [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47 (9): 1786-1791.
- [25] Stephen D G, William P. Global Potential Net Primary Production Predicted from Vegetation Class, Precipitation and Temperature [J]. *Ecology*, 2008, 89 (8): 2117-2126.
- [26] Yao Y, Yang J, Wang R, *et al.* Responses of Net Primary Productivity of Natural Vegetation to Climatic Change over Source Regions of Yangtze River in 1959-2008 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33 (6): 1286-1293.
- [27] Sun S, Zhou S, Shi J, *et al.* Calculation and Comparison of Vegetation Net Primary Productivity (NPP) in Zhejiang Province with Three Models [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31 (2): 271-276.
- [28] Pu Z, Zhang S, Wang S. Response of NPP to Climate Change over Last 47 Years in Tianshan Mountain Areas [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30 (3): 283-288.
- [29] Peng C H, Apps M J. Modelling the Response of Net Primary Productivity (NPP) of Boreal Forest Ecosystems to Changes in Climate and Fire Disturbance Regimes [J]. *Ecological Modelling*, 1999, 122 (3): 175-193.
- [30] Warnant P, François L, Strivay D, *et al.* CARAIB: A Global Model of Terrestrial Biological Productivity [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8 (3): 255-270.
- [31] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, *et al.* Potential Net Primary Productivity in South America Application of A Global Model [J]. *Ecology Application*, 1991, 1 (4): 399-429.
- [32] Meng J, Wu B, Zhou Y. Monitoring Terrestrial Net Primary Productivity of China Using BIOME-BGC Model based on Remote Sensing [C]// 25th IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2005), Seoul, 2005.

- [33] Yu D, Shi P, Shao H, *et al.* Modelling Net Primary Productivity of Terrestrial Ecosystems in East Asia based on An Improved CASA Ecosystem Model[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(18): 4851-4866.
- [34] Chen Z, Shao Q, Liu J, *et al.* Analysis of Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation on The Qinghai-Tibet Plateau, based on MODIS Remote Sensing Data[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(8): 1306-1312.
- [35] Zhou Jun. The Analysis of Temporal and Spatial Characteristics of Net Primary Productivity (NPP) in Chongqing based on Remote Sensing Data[D]. Chongqing: Southwest University, 2013. [周珺. 基于遥感数据的重庆市净初级生产力(NPP)时空特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.]
- [36] Monteith J L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystem[J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9: 747-766.
- [37] Chen Lijun, Liu Gaohuan, Li Huiguo. Estimating Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation in China Using Remote Sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, (2): 129-135, 164. [陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. 遥感学报, 2002, (2): 129-135, 164.]
- [38] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of Net Primary Production of Chinese Terrstrial Vegetation based on Remote Sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, (3): 413-424. [朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, (3): 413-424.]
- [39] Tao Xin, Fan Wenjie, Wang Dacheng, *et al.* Remote Sensing Retrieval of FAPAR: Model and Analysis[J]. Advances in Earth Science, 2009, (7): 741-747. [陶欣, 范闻捷, 王大成, 等. 植被 FAPAR 的遥感模型与反演研究[J]. 地球科学进展, 2009, (7): 741-747.]
- [40] Na S, Hong S Y, Kim Y H, *et al.* Prediction of Rice Yield in Korea Using Paddy Rice NPP Index-Application of MODIS Data and CASA Model[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2013, 29(5): 461-476.
- [41] Jin X, Xu X. Estimation of Cotton Yield based on Net Primary Production Model in Xinjiang, China[C]// International Conference on Agro-Geoinformatics, Shanghai, 2012.
- [42] Wang Fang, Li Xia, Xun Shi. Estimation of Cropland Residue Bioenergy Using Remote Sensing: A Case Study Guangdong Province[J]. Journal of Natural Resources, 2006, (6): 870-878. [王芳, 黎夏, Xun Shi. 农作物生物物质能的遥感估算——以广东省为例[J]. 自然资源学报, 2006, (6): 870-878.]
- [43] Lin Zhonghui, Ge Xingguo, Xiang Yueqin. Research Advances on Crop Growth Models. Acta Agronomica Sinica, 2003, (5): 750-758. [林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述[J]. 作物学报, 2003, (5): 750-758.]
- [44] Yang Jingmin, Yang Jingyi, Jiang Xu, *et al.* Progress of Crop Model Research[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2012, (5): 553-561. [杨靖民, 杨靖一, 姜旭, 等. 作物模型研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2012, (5): 553-561.]
- [45] Boogaard H, Wolf J, Supit I, *et al.* A Regional Implementation of WOFOST for Calculating Yield Gaps of Autumn-sown Wheat across the European Union[J]. Field Crops Research, 2013, (143): 130-142.
- [46] Sarkar R. Decision Support Systems for Agrotechnology Transfer[C]// Organic Fertilisation, Soil Quality and Human Health. Springer Netherlands, 2012.
- [47] Singh A K, Tripathy R, Chopra U K. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst Models for Water-Nitrogen Interactions in Wheat Crop[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7): 776-786.
- [48] Shen Yuying, Nan Zhibiao, Bill Bellotti, *et al.* Development of APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) and Its Application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, (8): 1027-1032. [沈禹颖, 南志标, Bill Bellotti, 等. APSIM 模型的发展与应用[J]. 应用生态学报, 2002, (8): 1027-1032.]
- [49] Zhu Xiufang, Li Yixuan, Pan Yaozhong, *et al.* A Review on the Research and Application of AquaCrop Model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, (8): 270-278. [朱秀芳, 李宜展, 潘耀忠, 等. AquaCrop 作物模型研究和应用进展[J]. 中国农学通报, 2014, (8): 270-278.]
- [50] Xing Yajuan, Liu Dongsheng, Wang Pengxin. Advances of the Coupling Application of Remote Sensing Information and Crop Growth Model[J]. Advances in Earth Science, 2009, (4): 444-451. [邢雅娟, 刘东升, 王鹏新. 遥感信息与作物生长模型的耦合应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, (4): 444-451.]
- [51] Wang Jing, Li Xin. Progresses on Data Fusion Technology of Crop Growth Model and Multi-source Observation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2): 209-219. [王静, 李新. 基于作物生长模型和多源数据的融合技术研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 209-219.]
- [52] Wang J, Li X. Progresses on Data Fusion Technology of Crop Growth Model and Multi-source Observation Information[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2): 209-219.
- [53] Tan Zheng, Liu Xiangnan, Zhang Xiaoqian, *et al.* Simulation of Dynamics of Crop Biomass by Assimilation SAR Data into Crop Growth Model[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, (5): 1127-1132. [谭正, 刘湘南, 张晓倩, 等. 作物生长模型同化 SAR 数据模拟作物生物量时域变化特征[J]. 中国农学通报, 2012, (5): 1127-1132.]
- [54] Machwitz M, Giustarini L, Bossung C, *et al.* Enhanced Biomass Prediction by Assimilating Satellite Data into A Crop Growth Model[J]. Environmental Modelling & Software, 2014(62): 437-453.
- [55] Abedinpour M, Sarangi A, Rajput T B, *et al.* Performance Evaluation of AquaCrop Model for Maize Crop in a Semi-Arid Environment [J]. Agricultural Water Management, 2012, (110): 55-66.
- [56] Bendig J, Bolten A, Bareth G, *et al.* UAV-based Imaging for Multi-Temporal, Very High Resolution Crop Surface Models to Monitor Crop Growth Variability [J]. Photogrammetrie Fernerkundung-Geoinformation, 2013, (6): 551-562.

- [57] Bendig J, Bolten A, Bennertz S, *et al.* Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-based RGB Imaging[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 10395-10412.
- [58] Tilly N, Hoffmeister D, Cao Q, *et al.* Multitemporal Crop Surface Models: Accurate Plant Height Measurement and Biomass Estimation with Terrestrial Laser Scanning in Paddy Rice[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 1-20.
- [59] Bendig J, Yu K, Helge A, *et al.* Combining UAV-based Crop Surface Models, Visible and Near Infrared Vegetation Indices for Biomass Monitoring in Barley[J]. *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Multi-temporal Crop Surface Modelling*, 2015: 79-87.
- [60] Bendig J, Willkomm M, Tilly N, *et al.* Very High Resolution Crop Surface Models (CSMs) from UAV-based Stereo Images for Rice Growth Monitoring in Northeast China[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, (1): 45-50.

Review of Estimating Crop Biomass based on Remote Sensing Information

Wang Yuanbo¹, Feng Dejun¹, Li Shujuan², Wu wenjuan¹, Ren hongyan²

(1. *Department of Remote Sensing Information Engineering, Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China;*

2. *State key Laboratory of Resource and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China*)

Abstract: The prerequisite for the strategy of developing and utilizing bio-energy is scientific and accuracy estimating the biomass of crop. With the development of remote sensing technology, the temporal, spatial and spectral resolution of remote sensing data can be used for estimating crop biomass, which are constantly improving. And that provides a strong support for estimating the biomass of crop in the big time span and large spatial scale. At the same time, the quantity of crop biomass must be better estimated. In the present paper, the researches on crop biomass estimation were summarized and analysed, and focused on discussing the part of using the remote sensing information. On that basis, the methods of estimating the crop biomass were classified four categories according to the models they based on, including based on Vegetation Index, Net Primary Productivity, Crop Growth Model and Crop Surface Models estimating crop biomass methods, the principles and methods of the four categories were explained detailedly, and then discussed their advantage and deficiency by analyzing the typical application of every methods. Finally, between the different data and models of cross validation were discussed, and the new research directions in this area are suggested.

Key words: Crop; Biomass; Remote sensing; Estimating methods