

康婷婷, 居为民, 李秉柏. 水稻叶面积指数遥感反演方法对比分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 366-371.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.05.116

水稻叶面积指数遥感反演方法对比分析

康婷婷¹, 居为民¹, 李秉柏²

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏南京 210023; 2. 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 江苏南京 210014)

摘要:利用环境星 HJ-CCD 影像与同步获取的 LAI 实测数据生成江苏省江淮之间西部和里下河地区水稻的 30 m HJ/LAI, 对 MODIS/LAI 数据产品和利用 MODIS 数据与 4 尺度几何光学模型反演的 LAI 数据集进行质量评价, 结果表明, 不同植被指数与研究区水稻 LAI 的相关性差别很大, 其中 GNDVI 与水稻 LAI 的相关性最好, R^2 为 0.72, 估算精度达 70.89%, 而 RMSE 仅为 1.38, 适于该区水稻 LAI 的遥感估算; 研究区 MODIS/LAI 和基于 4 尺度几何光学模型反演的 LAI 与 HJ/LAI 的变化趋势较为一致, 均呈现出西南和东北部 LAI 值较低、北部和中部 LAI 值较高的特征, 但 MODIS/LAI 和基于 4 尺度几何光学模型反演的 LAI 不仅变化范围较小, 而且偏低明显, MODIS/LAI 的低估现象更为严重; 在 1 km 尺度上, MODIS/LAI 和基于 4 尺度几何光学模型反演的 LAI 的精度分别为 60.21% 和 66.56%, 与 HJ/LAI 比较的 R^2 分别为 0.09 和 0.28 ($N=2585$), 在 0.01 水平上显著相关。

关键词:遥感; 叶面积指数; 水稻; HJ-CCD; MODIS/LAI 产品; 反演方法

中图分类号: S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)05-0366-05

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 通常定义为单位地面积上的叶片单面面积^[1], 它影响植被光合、呼吸、蒸腾、降水截留、能量交换等诸多生态过程^[2-3]。水稻的 LAI 是水稻生长的一项重要参数, 它能提供水稻生长的动态信息。此外, 水稻的 LAI 还与生物量和产量直接相关^[4-5]。光学遥感技术以其简单、较准确、无破坏性等优点, 为区域到全球尺度的 LAI 获取提供了一种有效途径^[6]。利用遥感数据提取 LAI 的方法可分为统计模型和反演模型两大类^[7]。统计模型具有参数少、计算效率高、容易实现等优点, 常被应用于利用高分辨率遥感数据获取小区域的 LAI, 以验证中分辨率遥感数据反演生成的 LAI 产品精度; 反演模型因为具有较强的物理基础和不需要 LAI 观测数据的优点而被广泛应用于生成区域或全球的 LAI 数据产品, 如以辐射传输模型为基础反演生成的 MODIS/LAI 产品^[8-9] 和基于 4 尺度几何光学模型反演算法^[10] 生成的欧洲航天局 Globcarbon LAI 产品等, 但这些产品可能存在系统性误差, 需要进行验证。

本研究利用环境星 HJ-CCD 影像, 结合地面同步获取的 LAI 实测数据, 生成 30 m 的水稻 LAI 分布图 (HJ/LAI), 对 MODIS 的 LAI 数据 (MODIS/LAI) 和利用 MODIS 数据与 4 尺度几何光学模型反演生成的 500 m 水稻 LAI 数据进行质量评价。

1 研究区概况

江苏省位于长江下游, 总面积 10.26 万 km^2 , 地形以平原为主, 是长江三角洲的重要组成部分。江苏属暖温带-亚热带

气候过渡区, 冬温夏热, 四季分明, 年均气温 13~16 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 700~1200 mm, 无霜期 200~240 d, 由于受季风影响, 气候存在明显的年际波动。江苏省每年水稻种植面积在 200 万 hm^2 以上, 占粮食种植总面积的 42%, 其总产量占全省粮食总产的 56%^[11]。江苏省水稻种植区的田块结构及种植方式具有较好的代表性, 是理想的野外试验区域。现以江苏省江淮之间西部和里下河地区 118 $^{\circ}$ 28'~120 $^{\circ}$ 19' E、32 $^{\circ}$ 12'~33 $^{\circ}$ 25' N 为研究区 (图 1), 该区为稻麦两熟地区, 水稻品种类型为中、晚熟中稻。栽插水稻在 5 月中旬播种, 6 月中旬移栽; 直播稻 6 月 10—15 日播种, 抽穗期约在 8 月中下旬, 10 月下旬或 11 月初成熟。水稻产量水平为 9000 kg/hm^2 左右。在研究区布设 9 个具有代表性的样区, 分别于 2012 年 7 月 11 日、7 月 26 日、8 月 15 日、8 月 28 日、9 月 11 日、9 月 25 日和 10 月 10 日进行水稻 LAI 的观测, 对应的水稻生育期见表 1。



图1 研究区示意图

2 数据与方法

2.1 HJ/LAI 数据

2.1.1 水稻 LAI 的观测 水稻 LAI 的观测步骤为: (1) 对于

收稿日期: 2014-06-07

基金项目: 全球变化重大科学研究计划 (编号: 2010CB950702); 公益类行业 (气象) 专项 (编号: GYHY201106027)。

作者简介: 康婷婷 (1989—), 女, 硕士, 主要从事农作物生态遥感研究。E-mail: kangtingting.1989@163.com。

通信作者: 居为民, 教授。E-mail: juweimin@nju.edu.cn。

表1 与水稻 LAI 观测日期对应的水稻生育期

种类	7月11日	7月26日	8月15日	8月28日	9月11日	9月25日	10月10日
粳稻	分蘖	分蘖末	拔节	抽穗	灌浆	腊熟	成熟
杂交稻	分蘖末	拔节	抽穗	灌浆	腊熟	成熟	

直播稻田,在定点的田块内选取有代表性的稻株 9 组,每组为 33 cm × 33 cm,共 1 m²,查出总株数和总茎蘖数,确定每株的茎蘖数,参照此茎蘖数选取 10 株水稻作为样株;对于移栽稻田,在定点的田块内选取有代表性的稻株 10 组,面积约为 2.7 m²,每组按行查 5 株,查数植株的茎蘖数,取平均数,按照 10 组的平均数选取 5 穴水稻作为样株,带回室内考苗。在每个样区内记录水稻总茎蘖数。(2)将所选水稻植株的全部叶片剪下,从中选择不同层次、有代表性的叶片 20 张,测量每张叶的长度(l)和叶片最宽处宽度(w),计算 20 张叶片的总面积 a : $a = \sum_{i=1}^{20} k \times l_i \times w_i$,其中, k 为水稻叶片面积校正系数,水稻苗期和成熟期叶形偏尖,设为 0.75,其他各生育期设为 0.83。(3)将 20 张代表叶和剩余的所有叶片分别烘干称质量,得到代表叶和剩余叶片的干质量分别为 m 和 M ,则取植株的叶面积 S 为: $S = a \times [1 + (M/m)]$,从而得到样区的水稻 LAI 为: $LAI = [S(N/n)]/A$,式中, N 为样区水稻的总株/穴数, n 为取样的株数或穴数, A 为样区面积。

2.1.2 环境星 HJ-CCD 影像处理 研究区水稻生育期内的环境星影像大都有云覆盖,因此只选择与观测日期相近、成像时间分别为 2012 年 7 月 27 日(部分有云)、9 月 6 日(部分有云)和 9 月 29 日(无云)的 3 景 HJ-CCD 影像,数据级别均为 2 级,经辐射定标、大气校正、几何精校正后得到 4 个波段的地表反射率。基于构建的波谱响应函数,利用 Envi 4.8-Flaash 模块进行大气校正,得到相应的地表反射率数据;几何精纠正是基于 2010 年江苏省土地利用图,采用二次多项式法进行,纠正误差控制在 1 个像元内。投影方式为 UTM/WGS84 50N,空间分辨率为 30 m。

2.1.3 HJ/LAI 遥感统计模型的构建 本研究选择常用于估算水稻 LAI,且可从 HJ-CCD 数据中生成的 SR、NIR/G、NDVI、GNDVI、GBNDVI、SAVI、EVI、DVI 和 RDVI 共 9 种植被指数^[12-20](表 2)进行建模,将 GPS 测定的各样区坐标经过投影变换后与 3 个时期的 HJ-CCD 影像叠加,分别得到 7、6、6 对 LAI 观测数据和植被指数有效数据,利用这 19 对数据建立 LAI 的遥感估算模型。根据所建 LAI 遥感估算模型的 R^2 和 RMSE,确定 LAI 的最佳遥感估算模型。

2.1.4 HJ/LAI 数据的生成 利用所建立的水稻 LAI 估算模型,结合 2012 年 9 月 29 日的 HJ-CCD 数据和 2010 年江苏省土地利用图,生成研究区 30 m 分辨率的水稻 LAI 分布图,对其进行重采样到 1 km 分辨率,用于验证 MODIS LAI 和反演的 LAI。由于研究区内水田与非水田大量混杂,水田的面积比例平均为 49.55%,在 1 km 尺度内存在大量的混合像元,因此,基于每个 30 m 的像元都是纯像元进行假设,分别统计每个 1 km 像元内水田的比例,仅对水田面积比例大于 75% 的像元进行 LAI 数据的精度评价。

2.2 MODIS/LAI 数据

选择覆盖研究区且与 HJ-CCD 影像时相接近的 2012 年第 265 ~ 273 天共 8 d 的 MODIS/LAI 数据,空间分辨率为

表2 植被指数计算公式

名称	计算公式	文献出处
SR	NIR/Red	[12]
NIR/G	$NIR/Green$	[13]
NDVI	$(NIR - Red)/(NIR + Red)$	[14]
GNDVI	$(NIR - Green)/(NIR + Green)$	[15]
GBNDVI	$(NIR - (Green + Blue))/(NIR + (Green + Blue))$	[16]
SAVI	$\frac{NIR - Redp}{NIR + Red + L}(1 + L)$	[17]
EVI	$2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1}$	[18]
DVI	$NIR - Red$	[19]
RDVI	$\sqrt{NDVI \times DVI}$	[20]

注: Blue、Green、Red、NIR 为波段反射率; L 是土壤调节参数,取值为 0.5。

1 km,将其投影转换为 UTM/WGS 84,裁剪出研究区的数据;对 2 个时相的数据取最大值,生成 MODIS LAI 的合成图便于进一步比较分析。

2.3 基于 4 尺度几何光学模型的 LAI 反演

2.3.1 反演方法 LAI 的反演采用 Deng 等提出的基于 4 尺度几何光学模型的 LAI 反演算法进行,其出发点是植被指数与 LAI 之间的关系方程,该方程考虑了太阳、传感器和目标物之间相对角度对反射率的影响效应^[10]。该算法利用 4 尺度几何光学模型进行模拟试验,在不同地表覆盖类型和太阳天顶角-传感器天顶角-太阳与传感器之间相对方位角条件下,建立 LAI 与减小的比值植被指数(RSR)之间的关系,进行 LAI 的反演。RSR 计算为: $RSR = SR \times (\rho_{SWIR_{min}} - \rho_{SWIR}) / (\rho_{SWIR_{min}} - \rho_{SWIR_{max}})$,式中, SR 为比值植被指数, $SR = \rho_{nir} / \rho_{red}$, ρ_{nir} 和 ρ_{red} 分别为近红外和红光波段反射率; ρ_{SWIR} 、 $\rho_{SWIR_{min}}$ 和 $\rho_{SWIR_{max}}$ 分别为短波红外反射率、短波红外反射率的最大值和最小值, $\rho_{SWIR_{min}}$ 和 $\rho_{SWIR_{max}}$ 与地表覆盖类型有关。如考虑太阳天顶角-传感器天顶角-太阳与传感器之间相对方位角变化对 LAI 与 RSR 之间关系的影响,有效叶面积指数(L_E)可以表示为: $L_E = f_{LE_RSR}$

$\left[SR \times \left(\frac{P_{SWIR_{min}} - \rho_{SWIR} f_{SWIR_BRDF}(\theta_V, \theta_S, \phi)}{\rho_{SWIR_{min}} - \rho_{SWIR}} \right) \times f_{BRDF}(\theta_V, \theta_S, \phi) \right]$,式中, f_{LE_RSR} 为某一特定的太阳天顶角-传感器天顶角-太阳与传感器之间相对方位角条件下 RSR 与 LAI 之间的关系,由 4 尺度几何光学模型模拟确定,随地表覆盖类型变化; f_{BRDF} 和 f_{SWIR_BRDF} 为二向反射分布函数(BRDF)订正因子,由改进的 Ross_Li 模型^[21]计算确定; θ_S 是太阳天顶角; θ_V 是传感器天顶角; ϕ 是太阳和传感器之间的相对方位角; $SR \times \left(\frac{P_{SWIR_{min}} - \rho_{SWIR} f_{SWIR_BRDF}(\theta_V, \theta_S, \phi)}{\rho_{SWIR_{min}} - \rho_{SWIR}} \right) \times f_{BRDF}(\theta_V, \theta_S, \phi)$ 为考虑了 BRDF 效应的 RSR。详细反演步骤可参见文献[10]。真实 LAI 计算公式为: $LAI = L_E / \Omega$,式中, Ω 为植被冠层聚集度系数,表征的是植被冠层叶片的空间分布特征^[22-24],采用 Zhu 等发展的利用 MODIS BRDF 产品模拟“热点”(太阳与传感器的天顶角为 45°、相对方位角为 0°)和“暗点”(太阳与传感器

的天顶角为 45° 、相对方位角为 180°)反射率,进而反演聚集度的方法^[21]生成。

2.3.2 LAI的反演步骤 (1)利用MODIS地表反射率产品MOD09A1和地表覆盖数据GLC2000驱动基于4尺度几何光学模型的LAI反演算法生成2012年每8d的500m有效叶面积指数,对其进行平滑处理和插补^[25],以进一步消除云的影响。(2)利用MODIS BRDF模型参数产品MCD43A1及其质量信息产品MCD43A2和改进的Ross_Li模型,模拟计算“热点”和“暗点”反射率,生成500m聚集度系数,利用500m DEM数据SRTM 4.1对其进行地形订正^[21]和平滑处理^[25]。(3)结合聚集度系数和有效叶面积指数,生成2012年每8d的500m LAI,投影为UTM/WGS 84。本研究选择第265和273天的数据,对2个时相的数据取最大值,生成反演LAI的合成图,进行重采样到1km分辨率,再裁剪出研究区的数据进行分析。

3 结果与分析

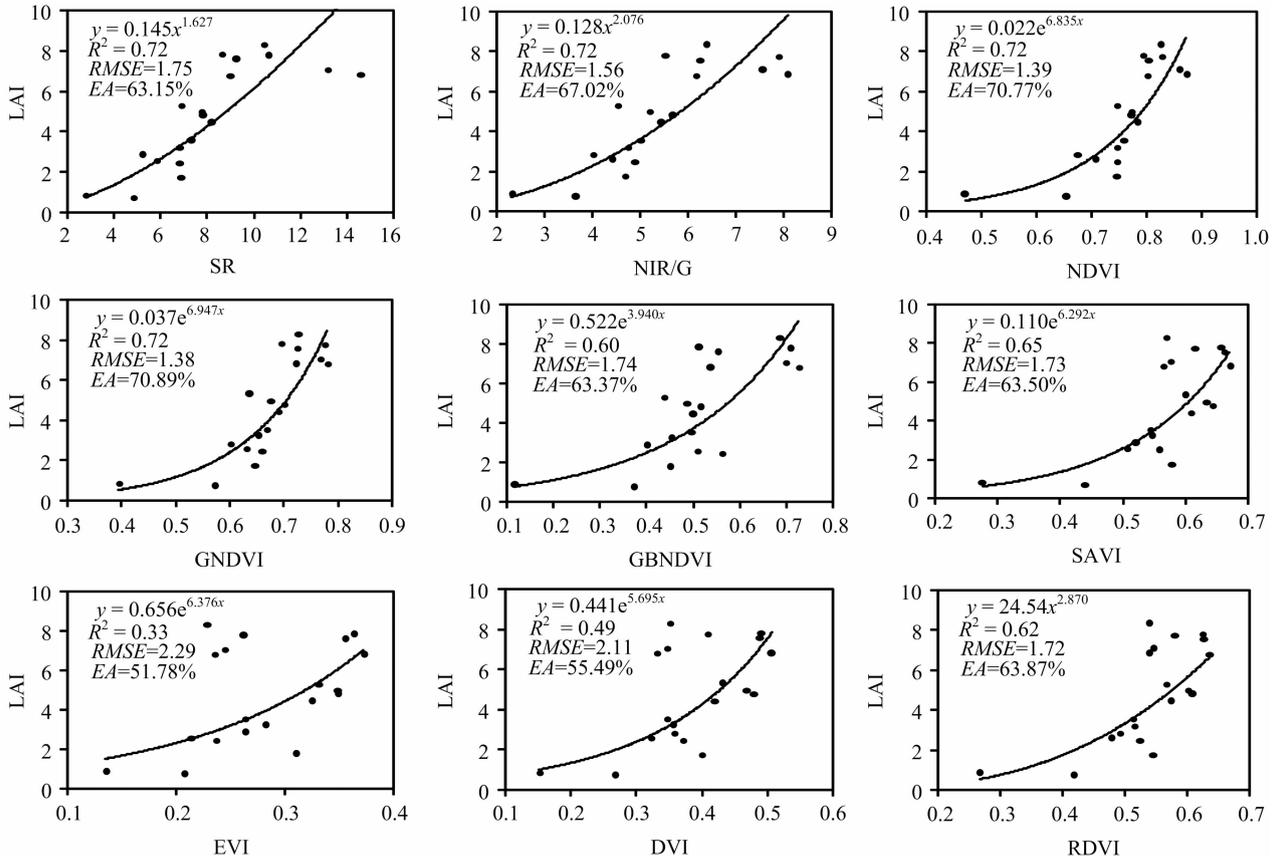
3.1 水稻HJ/LAI遥感统计模型

根据植被指数与LAI的关系,建立各种植被指数对LAI的拟合方程。经过比较各种形式(线性、对数、指数、幂函数等)的拟合方程发现,对于水稻整个生育期,NDVI、GNDVI、GBNDVI、SAVI、EVI和DVI对LAI的最佳拟合方程为指数形式,而SR、NIR/G和RDVI为幂函数形式,这与前人研究结

果^[16,26-27]一致。由图2可见,不同的植被指数对LAI的拟合效果存在一定的差别,EVI与LAI的拟合效果最差($R^2=0.33$, $RMSE=2.29$, $EA=51.78\%$);DVI、GBNDVI、RDVI与LAI的拟合效果稍好, R^2 在 $0.49\sim 0.62$ 之间, $RMSE$ 相对较小且 EA 相对较大;SAVI与LAI的拟合效果较好($R^2=0.65$),这是由于SAVI引入了土壤调节参数,减小了土壤背景对植被指数的影响。NIR/G模型的 R^2 和 EA 高于SR, $RMSE$ 比SR低0.18,这表明绿波段代替红波段构建植被指数,能更好地估测水稻LAI,这与王福民等研究结果^[16,27]一致;GNDVI的 R^2 与NIR/G相近,但 $RMSE$ 明显低于NIR/G、 EA 高于NIR/G,这表明GNDVI的拟合效果好于NIR/G;NDVI的 R^2 和 $RMSE$ 与GNDVI非常相似,但GNDVI的 EA 高于NDVI,这表明相对于红波段植被指数,绿波段指数与水稻LAI有更好的相关关系^[16,27]。因此,本研究以基于GNDVI构建的模型进行研究区水稻LAI的遥感估算。

3.2 水稻HJ/LAI数据的空间分布

利用2012年9月29日的HJ-CCD数据和建立的GNDVI-LAI指数模型生成研究区30m的HJ/LAI。由图3-a可见,研究区水稻LAI的分布呈西部和东部较低、北部和中部较高的趋势;洪泽县、宝应县、金湖县北部、高邮市东部、兴化市南部和江都区北部水稻的LAI一般高于6;金湖县南部和兴化市北部的LAI在3~6之间;高邮市西南部、邗江区和扬州市区人口密集,蔬菜或旱地作物面积较多,水田面积较少,



$RMSE$ 为均方根误差, $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (LAI_s(i) - LAI_o(i))^2}{N}}$; EA 为估算精度, $EA = \left[1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (LAI_s(i) - LAI_o(i))^2}{N}} \right] / \left(\frac{\sum_{i=1}^N LAI_o(i)}{N} \right) \times 100\%$,

其中, N 为有效数据对数, $LAI_o(i)$ 为观测的LAI值, $LAI_s(i)$ 为利用植被指数估算的LAI值

图2 基于HJ-CCD数据计算的各模型与野外实测LAI之间的关系

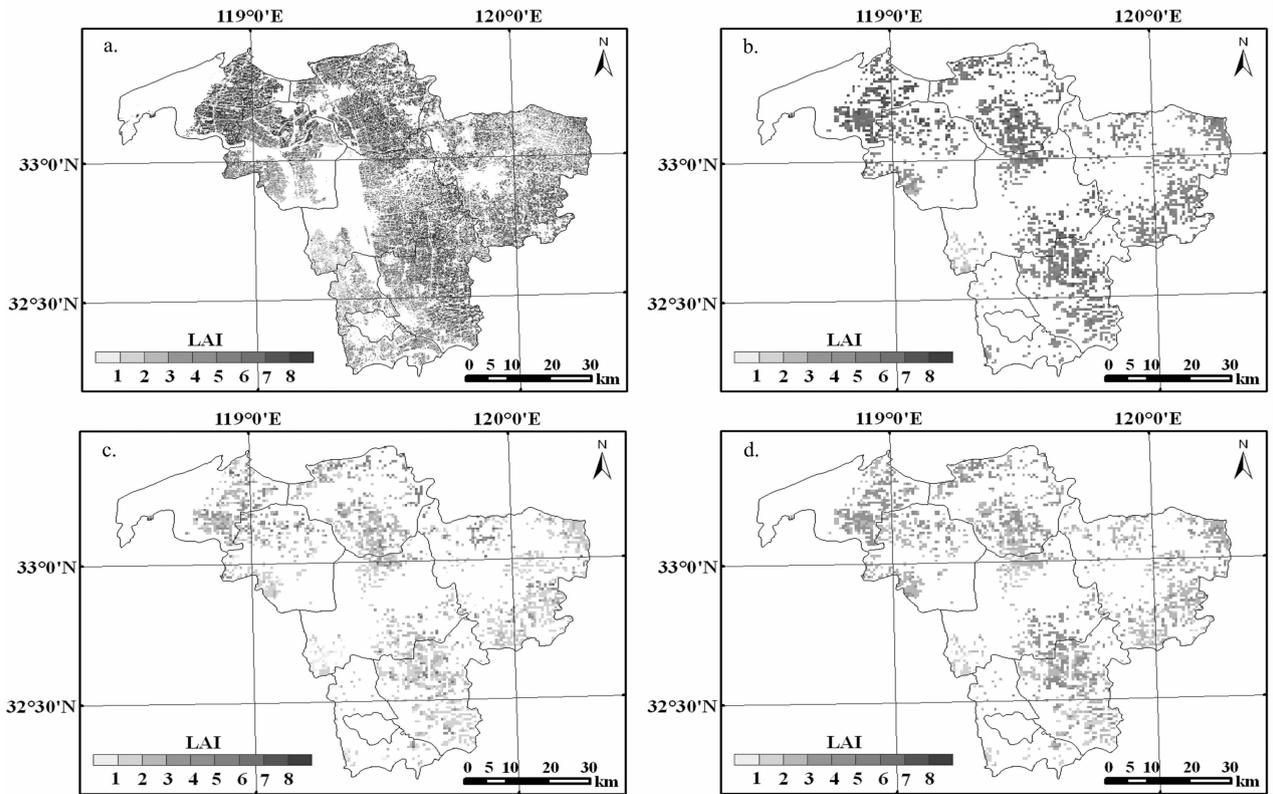


图3 水稻 30 m HJ/LAI (a) 和 1 km HJ/LAI (b)、MODIS/LAI (c) 和反演的 LAI (d) 分布

LAI 较低。

3.3 HJ/LAI、MODIS/LAI 和反演的 LAI 比较分析

为比较 LAI 数据的空间分布特征,根据 2010 年江苏省土地利用图进行计算,仅把 3 种 1 km 的 LAI 数据中水田面积比例大于 75%,且 MODIS LAI 反演使用的地表覆盖数据 MOD12Q1 和 GLC2000 均为农田的部分进行空间制图。由图 3-b、图 3-c 和图 3-d 可见,MODIS/LAI、基于 4 尺度几何光学模型反演的 LAI 与 HJ/LAI 数据在空间分布上较为一致,均呈现出西南和东北部 LAI 值较低、北部和中部 LAI 值较高的特征,MODIS/LAI 和反演的 LAI 的精度分别为 60.21% 和 66.56%,且反演的 LAI 一般高于 MODIS/LAI;MODIS/LAI 和反演的 LAI 明显低于 HJ/LAI,在研究区的北部和中部尤为明显,在 1 km 尺度,HJ/LAI、MODIS/LAI、反演的 LAI 的变化范围分别为 4.33~8.34、1.19~6.60、2.00~5.68。

为反映 LAI 整体上的数值分布格局,绘制了 3 种 LAI 数据的统计分布直方图。由图 4 可见,基于 4 尺度几何光学模型反演的 LAI 变化范围最小,为 0.73~5.68,有 95.13% 的 LAI 分布在 1.5~4.0 范围内;MODIS/LAI 数值变化范围为 0.58~6.80, LAI 集中分布在 1.0~3.5 范围内;HJ/LAI 的变化范围为 0.72~8.37,有 93.81% 的 LAI 分布在 3.5~7.5 之间。这说明与 HJ/LAI 相比,MODIS/LAI 和反演的 LAI 整体上分布较为集中,并存在严重的低估,且 MODIS/LAI 比反演的 LAI 更甚,而 HJ/LAI 包含了更多的细节信息。

由图 5 可见,MODIS/LAI 和反演的 LAI 值一般低于 HJ/LAI 值,两者趋势线斜率均小于 1,都存在一定的低估现象,且 MODIS/LAI 的低估现象比反演的 LAI 更严重;MODIS/LAI 和反演的 LAI 的变化趋势与 HJ/LAI 一致,相关 R^2 分别为 0.09

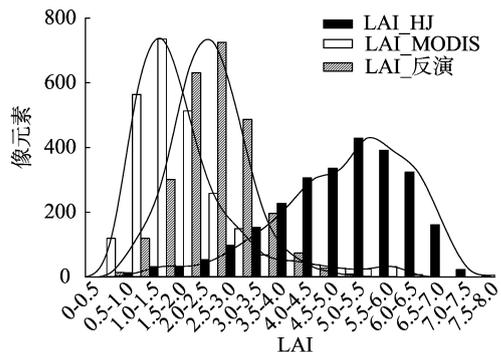
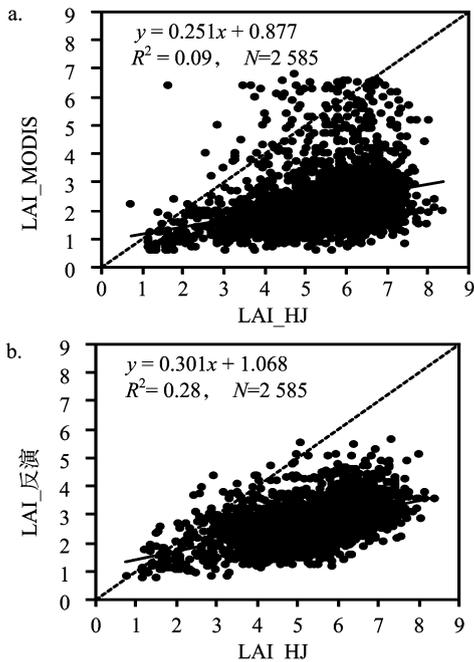


图4 水稻 1 km HJ/LAI、MODIS/LAI 和反演的 LAI 的直方图

和 0.28 ($N=2585$),在 0.01 水平上显著相关,且反演的 LAI 与 HJ/LAI 的相关性好于 MODIS/LAI;数据点存在一定的离散性,MODIS/LAI 与 HJ/LAI 比较的 $RMSE$ 为 2.13,反演的 LAI 与 HJ/LAI 比较的 $RMSE$ 为 1.79,这可能是由反演模型参数设置误差、地表异质性、地表覆盖分类差异和影像的配准误差等原因所造成的^[25]。

4 结论与讨论

本研究利用 HJ-CCD 影像与地面同步获取的 LAI 实测数据结合,生成研究区水稻 30 m 的 HJ/LAI,并以 HJ/LAI 作为标准,通过尺度转换以及空间匹配,验证 MODIS/LAI 和利用 MODIS 数据与 4 尺度几何光学模型的 LAI 反演算法生成的 500 m LAI 的数据质量。获得的主要结论有:(1)不同植被指数与研究区水稻 LAI 的相关性相差很大,其中,GNDVI 与水稻 LAI 的相关性最好, R^2 为 0.72,精度达 70.89%,而



a—MODIS/LAI与HJ/LAI; b—基于4尺度几何光学模型反演的LAI与HJ/LAI

图5 MODIS/LAI与HJ/LAI、基于4尺度几何光学模型反演的LAI与HJ/LAI的散点图(1 km分辨率)

RMSE 仅为 1.38, 适于该区水稻 LAI 的遥感估算。(2) 研究区水稻 HJ/LAI 的分布呈西部和东部较低、北部和中部较高的趋势。洪泽县、宝应县、金湖县北部、高邮市东部、兴化市南部和江都区北部水稻的 LAI 一般高于 6; 金湖县南部和兴化市北部的 LAI 在 3~6 之间; 高邮市西南部、邗江区和扬州市区 LAI 较低。(3) MODIS/LAI 和反演的 LAI 与 HJ/LAI 数据的变化趋势较为一致, 空间变化明显, 均呈现出西南和东北部 LAI 值较低、北部和中部 LAI 值较高的特征。在 1 km 尺度上, MODIS/LAI 和反演的 LAI 的精度分别为 60.21% 和 66.56%, 与 HJ/LAI 的相关 R^2 分别为 0.09 和 0.28 ($N = 2585$), 在 0.01 水平上显著相关, 一定程度上反映了地表变化的细节。

本研究在利用 HJ-CCD 影像, 结合地面同步获取的 LAI 实测数据的基础上, 建立最优的水稻遥感估算模型, 生成研究区水稻的 30 m HJ/LAI 分布图, 对 MODIS/LAI 数据和利用 MODIS 数据与 4 尺度几何光学模型反演的 LAI 数据进行比较分析验证, 结果发现, HJ-CCD 可以应用于研究区水稻 LAI 的估算, MODIS/LAI 和反演的 LAI 的空间变化特征与 HJ/LAI 相似, 但存在低估现象。应该注意的是, 由于研究区水稻生育期内的影像大都有云覆盖, 且对应每个生育阶段的有效 LAI 观测点的数量不同, 使用根据全生育期的 LAI 采样数据建立的 LAI 估测模型和 2012 年 9 月 29 日的 HJ-CCD 影像生成的研究区 30 m 的 HJ/LAI 分布图会存在一定的误差。另外, LAI 观测误差(仪器、选点)、环境星的大气校正和几何校正、LAI 观测点与影像像元的对应关系、像元的异质性、遥感数据时相与 LAI 观测时间完全不一致、地表覆盖的误分类等也会对 HJ/LAI 的估算产生影响。因此, 需要对得到的结论进一步验证。同时, MODIS/LAI 和利用 MODIS 数据与 4 尺度几何光学模型生成的 LAI 数据都是 8 d 的合成产品, 用一期 HJ-

CCD 影像评估产品精度存在较大局限, 也容易得出产品精度较低的结论; MODIS/LAI 和反演的 LAI 数据的精度是根据 30 m HJ/LAI 数据进行评价的, 而 30 m HJ/LAI 数据存在着一定的误差, 也会对评价结果产生一定的影响。

参考文献:

- [1] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(4): 421-429.
- [2] Sprintsin M, Cohen S, Maseyk K, et al. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(5): 565-574.
- [3] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [4] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 47-52.
- [5] 何隆华, 储开华, 肖向明. 植被图像植被指数与实测水稻叶面积指数的关系 [J]. *遥感学报*, 2004, 8(6): 672-676.
- [6] Sprintsin M, Karnieli A, Berliner P A, et al. The effect of spatial resolution on the accuracy of leaf area index estimation for a forest planted in the desert transition zone [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(4): 416-428.
- [7] 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述 [J]. *国土资源遥感*, 2003, 3(3): 58-62.
- [8] Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, et al. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data [J]. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 1998, 103(D24): 32257-32275.
- [9] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 214-231.
- [10] Deng F, Chen J M, Plummer S, et al. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2219-2229.
- [11] 江苏省地方志编纂委员会. 江苏省志·地理志 [M]. 南京: 江苏古籍出版社, 1999.
- [12] Pearson R L, Miller L D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie [C]// *Remote Sensing of Environment*, 1972: 1355.
- [13] Shibayama M, Akiyama T. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27(2): 119-127.
- [14] Rouse J W, Hass R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [C]// NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp, 1974: 309-313.
- [15] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [16] 王福民, 黄敬峰, 唐廷林, 等. 新型植被指数及其在水稻叶面积指数估算上的应用 [J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(2): 159-166.
- [17] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295-309.

李建龙, 师学义, 祝宇成. 基于生态绿当量的土地利用结构优化——以晋城市城区为例[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 371-374.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.05.117

基于生态绿当量的土地利用结构优化 ——以晋城市城区为例

李建龙, 师学义, 祝宇成

(中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要:依据生态绿当量的概念,构建基于生态绿当量的土地利用结构优化模型,并将其应用于山西省晋城市城区之中。结果表明,城区的实际总绿当量为0.940,小于最佳林地覆盖面积对应的生态绿当量,须进行土地利用结构优化,所以本研究提出了基于上述模型的城区土地利用优化建议。经计算,优化后的城区总绿当量为1.026,符合最佳绿地覆盖要求,表明城区土地利用结构趋于合理,达到了土地利用结构优化的目的。

关键词:生态绿当量;土地利用结构;晋城市城区;最佳林地覆盖面积

中图分类号:F301.24 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2015)05-0371-04

土地资源作为环境的重要组分及其他资源的重要载体,是人类生存及发展不可替代的自然环境资源。近年来,随着我国产业结构升级及经济发展步入新常态,土地利用结构不尽合理的问题日益凸显,所以土地利用结构的优化对实现土地资源可持续利用及我国社会经济可持续发展具有至关重要的作用。土地利用结构优化是指为达到一定的生态、经济、社会最优目标,基于土地资源的自身特性和土地适宜性评价,对区域内各种土地利用类型进行的数量安排和空间布局。现阶段对土地利用结构的研究逐步由经济、社会效益研究转向生态效益研究,然而生态效益的研究多集中于定性分析,定量分

析较少;因此,本研究在引入生态绿当量概念的基础上,构建了基于生态绿当量的土地利用结构优化模型,并将其用于山西省晋城市城区之中,以期提高晋城市城区的土地利用效率及效益,并为其他区域相关研究提供参考与借鉴。

1 生态绿当量在土地利用结构优化中的应用

1.1 生态绿当量的内涵

绿当量概念是在衡量生态补偿能力的基础上提出的,生态补偿是自然生态系统对人类活动导致的生态环境破坏所起的补偿及缓冲作用,其基本原理是保证社会、经济活动前后,植被的生态功能相当,即保证具有相当“绿量”或基本相同的生态功能“当量”。“绿量相当”包括以下2个方面:首先保证开发前后的植被具有等量光合作用;其次保证合理的布局以抵偿区域内原植被所发挥的生态功能^[1]。所以从本质而言,绿当量即生态补偿能力的度量。绿当量分为狭义绿当量和广义绿当量,狭义绿当量单指补偿某种单位污染物所需的绿量;

收稿日期:2015-01-08

基金项目:科技部、国土资源部公益性行业专项(编号:201411007);北京市教务共建项目建设计划-北京市重要实验室建设项目(编号:51900265054)。

作者简介:李建龙(1992—),男,河南濮阳人,硕士研究生,从事土地资源评价与土地利用规划研究。E-mail: eugblj@aliyun.com。

[18] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS - MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 59(3): 440-451.

[19] Jordan C F. Derivation of leaf - area index from quality of light on the forest floor [J]. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.

[20] Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3): 375-384.

[21] Zhu G L, Ju W M, Chen J M, et al. Foliage clumping index over China's landmass retrieved from the MODIS BRDF parameters product [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(6): 2122-2137.

[22] Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands [J]. Agricultural Meteorology, 1971, 8: 25-38.

[23] Chen J M, Rich P M, Gower S T, et al. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D24): 29429-29443.

[24] Chen J M, Menges C H, Leblanc S G. Global mapping of foliage clumping index using multi - angular satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(4): 447-457.

[25] Chen J M, Deng F, Chen M Z. Locally adjusted cubic - spline capping for reconstructing seasonal trajectories of a satellite - derived surface parameter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2230-2238.

[26] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 水稻叶面积指数的多光谱遥感估算模型研究 [J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(2): 57-65.

[27] 陈拉, 黄敬峰, 王秀珍. 不同传感器的模拟植被指数对水稻叶面积指数的估测精度和敏感性分析 [J]. 遥感学报, 2008, 12(1): 143-151.

[28] Chen J M, Pavlic G, Brown L, et al. Derivation and validation of Canada - wide coarse - resolution leaf area index maps using high - resolution satellite imagery and ground measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 165-184.