

冬小麦不同生育时期叶面积指数反演方法

赵娟^{1,2}, 黄文江^{1*}, 张耀鸿², 景元书²

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094
2. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044

摘要 针对当前作物叶面积指数遥感反演过程中, 在不同生育时期采用相同的植被指数进行反演存在叶面积指数反演精度较低的问题。以冬小麦为研究对象, 选取了对冬小麦覆盖度响应程度不同的六种宽带和四种窄带共 10 种植被指数, 分析比较了在冬小麦整个生育期选用当前广泛使用的归一化植被指数(NDVI)反演冬小麦的 LAI 和在冬小麦不同生长阶段选用不同的植被指数反演冬小麦 LAI 的结果差异。在冬小麦整个生育期内使用 NDVI 反演小麦 LAI 得到的 LAI 反演值和真实值之间的 $R^2=0.5585$, $RMSE=0.3209$ 。改进的比值植被指数(mSR)适合于反演冬小麦生长前期(拔节期之前)的 LAI, 得到的 LAI 反演值和真实值之间的相关系数 $r=0.7287$, 均方根误差 $RMSE=0.2971$; 比值植被指数(SR)适于反演冬小麦生长中期(拔节到抽穗前), 得到的 LAI 反演值和真实值之间的 $R^2=0.6546$, $RMSE=0.3061$; NDVI 适于反演冬小麦生长后期(抽穗到成熟期)的 LAI, 得到的 LAI 反演值和真实值之间的 $R^2=0.6794$, 均方根误差 $RMSE=0.3164$ 。研究表明: 在冬小麦的不同生育时期, 根据地表作物覆盖度的变化和反射率的变化, 选择不同的植被指数建立冬小麦 LAI 的反演模型获得的反演精度均高于在冬小麦整个生育期使用 NDVI 获得的反演结果。说明在冬小麦的不同生育时期选择不同的植被指数构建 LAI 的分段反演模型可以改善冬小麦 LAI 的反演精度。

关键词 冬小麦; 生育时期; 植被指数; 叶面积指数; 反演

中图分类号: TP7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)09-2546-07

引言

叶面积指数(leaf area index, LAI)通常定义为单位地表面积上单面叶片的面积之和^[1]。它是反映植被长势个体特征和群体特征的关键指标, 控制着地表植被的许多生物、物理过程, 如植被冠层光线的截获, 植被的光合作用、呼吸作用、蒸散以及碳循环等过程^[2]。

目前遥感反演植被 LAI 的方法主要有基于植被指数的经验统计法和基于辐射传输模型的物理模型法等。经验统计法和物理模型法有本质区别但又具有互补性^[3]。物理模型法虽然具有较强的机理性和通用性, 但是存在病态反演问题, 同时所需的输入参数多, 计算代价大, 在应用时需要考虑模型的不确定性和反演方法的合理性, 在一定程度上限制了该法的应用。基于植被指数的 LAI 经验统计反演法虽然缺乏较强的机理性, 但它是将遥感观测和地面观测相连接的一种重

要手段, 可以及时有效、无损害地监测作物长势, 并对产量预报有较强适用性^[4]。已有多位学者从不同角度对植被指数反演 LAI 的问题进行了大量研究。Haboudane 等分析了包括 NDVI 和 TVI 等在内的八种植被指数的光谱敏感性, 并提出了两个估算作物冠层叶面积指数的新型植被指数^[5]。Yang 等比较了多个植被指数估算玉米 LAI 的精度, 得出植被指数反演玉米 LAI 时 EVI 的反演结果优于 NDVI^[6]。Verrelst 等利用 JCHRIS/PROBA 数据分析了 NDVI 和 SRI 以及 SIPI 等 11 种宽波段和窄波段植被指数的角度敏感性, 研究得出包括 NDVI 和 PRI 在内的七种植被指数对冠层反射率的角度效应表现敏感^[7]。Hasegawa 等将 NDVI 和植被热暗点指数 HDS 相结合, 提出了反演 LAI 的归一化热点信息植被指数(normalized hot-spot-signature vegetation index), 研究得出利用多角度遥感数据和考虑植被的热点信息可以显著提高植被 LAI 的反演精度^[8]。梁亮等比较了 18 种高光谱植被指数, 得出 OSAVI 对小麦 LAI 的变化较敏感, 在各个植被指

收稿日期: 2012-10-16, 修订日期: 2013-02-28

基金项目: 中国科学院百人计划项目和国家自然科学基金项目(41271412, 41071276)资助

作者简介: 赵娟, 女, 1988年生, 中国科学院遥感与数字地球研究所硕士研究生 e-mail: zhaajuan@ceode.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: yellowstar0618@163.com

数中其反演能力最好。Liu 等利用 Landsat5/7 的卫星数据比较了四种植被指数对小麦、玉米、大豆三种典型作物 LAI 的反演精度, 得出 NDVI 最易受外部因素的干扰, 而 EVI 具有更好的反演能力^[9]。李鑫川等研究了分段 LAI 的敏感植被指数, 得出在不同植被 LAI 时选择最佳植被指数可以显著提高 LAI 反演精度^[4]。

光谱植被指数是植被冠层反射率在电磁波谱不同波段(大部分是在可见光和红外波段)的数学运算的结果^[2]。如归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[10]、比值植被指数(simple ratio index, SR)^[11]、增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)^[12]等。植被指数反演 LAI 通常会受以下几方面的影响:(1)植被叶片的光学性质;(2)透过植被叶片层与土壤背景相互作用的太阳辐射透过率;(3)各种大气成分与太阳辐射的相互作用;(4)植被冠层结构、观测的几何光学条件等, 因而基于植被指数的 LAI 反演往往具有时效性、地域性^[9, 13, 14]。随着生育期的推进, 冬小麦 LAI 随时间动态变化, 在不同观测条件、不同植被覆盖度下小麦冠层反射率存在差异, 不同波段光谱反射率(植被指数)的敏感因子和干扰因素也不同。因此, 各个植被指数对不同作物覆盖度的响应有差别, 使得不同植被指数的 LAI 反演能力不同。植被 LAI 反演时易受土壤背景和大气条件的影响, 其中多个植被指数在作物覆盖度较高时(植被覆盖度超过 80%)会出现信息饱和(其中 NDVI 最为典型), 无法准确反映出作物各个生育期 LAI 的变化状况。另外叶面积指数与植被指数间的相关关系并非唯一确定, 构建的关系受到植被叶片其他生化参数的影响, 如叶绿素含量等^[5]。为减小或消除各种背景因素对植被指数的反演精度的影响, 学者们提出了多种修正型和新型植被指数, 如优化的土壤调节植被指数(optimization of soil adjusted vegetation index, OSAVI)^[15]、改进的比值植被指数(modified simple ratio index, mSR)^[16]、三角形植被指数(triangular vegetation index, TVI)^[17]等。在冬小麦的不同生长时期, 观测视场内植被和土壤背景信息不断变化, 使得小麦光谱反射率不断变化。前人的研究中进行作物 LAI 的反演基本都是选择同一植被指数进行作物整个生育期 LAI 的反演, 鲜有考虑作物生育期分段反演的研究。本研究针对当前作物叶面积指数遥感反演过程中, 不同生育期采用同一植被指数进行 LAI 反演存在反演精度低的问题, 以冬小麦为研究对象, 分析了在冬小麦整个生育期使用单一的植被指数(NDVI)和在冬小麦的不同生长阶段根据地表的覆盖度选择不同的植被指数来反演小麦 LAI 的结果差异, 从而提高冬小麦 LAI 的反演精度和长势监测能力, 为作物长势的遥感监测和精准农业的田间管理提供科学依据。

1 实验部分

1.1 试验设计

建模试验于 2002 年—2003 年在北京市昌平区(40°09′65″—40°12′26″N, 116°12′23″—116°21′44″E)和顺义区(40°05′42″—40°12′77″N, 116°38′21″—116°46′06″E)试验基地进

行。试验区地势平坦, 土壤类型为壤土, 全年均气温 14.0℃, 年均降水量 480 mm 左右, 属于温带大陆季风气候。试验选择优质小麦品种京 9428 和烟优 3691 作为供试品种, 生育期为每年的 10 月到次年 6 月中旬。其中昌平区 6 个试验地块, 顺义区 9 个试验地块, 每个地块种植面积 50 亩左右, 研究区各个试验地块在小麦生长期采用基本一致的施肥和灌溉管理。

验证试验于 2003 年—2004 年在同一研究区域(北京市昌平区和顺义区)进行, 选择与建模试验相同的小麦品种。其中昌平区 7 个试验地块, 顺义区 5 个试验地块, 其他条件与建模试验一致。

1.2 研究项目与测定方法

1.2.1 小麦冠层反射光谱采集

冬小麦冠层光谱反射率的测定采用美国 ASD 公司的 ASD FieldSpec Pro FR 型地物光谱仪, 该光谱仪的光谱采样间隔分别为 1.4 nm(350~1 000 nm)和 2 nm(1 000~2 500 nm)。试验测定了冬小麦主要生育期(起身期、拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期)的冠层光谱反射率。选择试验地块中小麦覆盖基本均一的地点作为采样点, 在晴朗无云、风力很小、距地表 1.3 m、太阳直接照射且在北京时间 10:30—14:00 进行测量, 视场角 25°, 视场范围内重复测定 20 次, 各点测定前后立即进行参考板校正, 将 20 次反射率值取平均得到研究区冬小麦冠层光谱反射率值。

1.2.2 叶面积指数测定

冬小麦叶面积指数的测定是在冠层光谱测定的相应位置处, 选择小麦长势较均匀、具有区域代表性的小麦样地, 选取其中 50~100 片叶片测量面积后, 采用比叶重法计算采样点的叶面积指数。

1.3 植被指数选取

植被指数反演叶面积指数, 是根据地面测定的光谱数据或遥感观测数据进行统计描述或相关性分析, 建立遥感观测光谱数据或其变换形式(植被指数)与地面实测 LAI 间的关系^[18]。到目前为止, 学者已经提出了多种植被指数, 如用以消除土壤背景干扰的土壤调节植被指数(soil adjusted vegetation index, SAVI)^[19]、用于消除大气影响的植被指数, 如全球环境监测植被指数(GEMI)^[20], 以及针对特定传感器的植被指数, 如针对 MODIS 数据的增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)等。本文选取了 10 种光谱植被指数, 利用地面测定的光谱数据, 以 LAI 为因变量, 光谱数据或其变换形式(植被指数)为自变量, 建立 LAI 的估算模型, 即 $LAI=f(x)$, 其中 x 为冠层光谱反射率或植被指数。

图 1 和图 2 分别表示冬小麦整个生育期 LAI 的变化和在不同的 LAI 时冠层的反射率变化。从图中可以看出冬小麦的叶面积指数从返青期不断增加, 在孕穗期达到峰值, 此后又逐渐降低, 同时在生长前期 LAI 的增长速率大于后期的递减速率。随着小麦冠层覆盖度(LAI)的增加冠层反射率随之增大, 不同 LAI 值时冠层反射率差异在近红外波段表现显著。根据研究目的和冬小麦整个生育期 LAI 的变化规律, 将冬小麦整个生育期划分为 3 个阶段: 小麦生长前期(拔节之前的生长阶段), 生长中期(拔节期到抽穗前)和生长后期(抽

穗后的生长阶段)。利用 2002 年—2003 年地面实测数据, 选取计算了物理意义明确的 10 种植被指数, 包括六种窄带植被指数(窄带植被指数使用可见光和近红外波段的反射率)和四种宽带植被指数(宽带植被指数使用红光和近红外波段的反射率)进行植被指数与 LAI 的回归分析, 构建冬小麦 LAI 的分段反演模型。

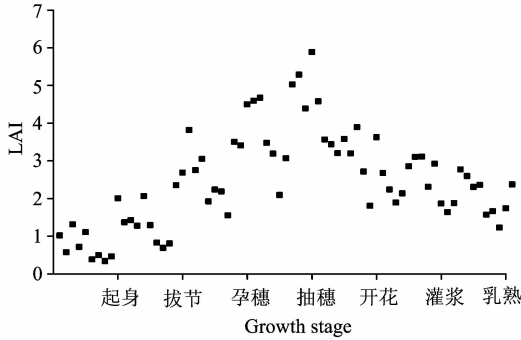


Fig. 1 Variation of winter wheat LAI during the whole growth duration

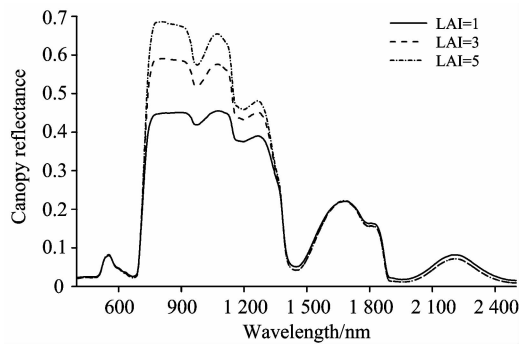


Fig. 2 Winter wheat canopy reflectance under different LAI values

Table 1 Overview of spectral vegetation indices

植被指数	计算公式	参考文献
OSAVI	$OSAVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r + 0.16}$	[15]
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r}$	[10]
宽波段 植被指数	$EVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + 6\rho_r - 7\rho_b + 1}$	[12]
	$TVI = 60(\rho_n - \rho_b) - 100(\rho_r - \rho_b)$	[17]
	$NDGI = \frac{\rho_g - \rho_r}{\rho_g + \rho_r}$	[11]
SR	$SR = \frac{\rho_{nir}}{\rho_r}$	[11]
NDVI ₇₀₅	$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	[21]
mSR ₇₀₅	$mSR_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{445}}{\rho_{750} + \rho_{445}}$	[16]
窄波段 植被指数	$mNDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705} - 2\rho_{445}}$	[16]
Vog1	$VOG1 = \frac{\rho_{740}}{\rho_{720}}$	[22]

上述公式中: ρ_{nir} , ρ_r , ρ_g , ρ_b , ρ_{445} , ρ_{705} , ρ_{720} 和 ρ_{750} 分别表示小麦冠层在可见光的蓝光(450 nm)、绿光(560 nm)、红光(680 nm)、近红外波段(800 nm)以及在 445, 705, 720, 740 和 750 nm 的反射率值。

2 不同生育时期叶面积指数反演结果与分析

选择应用最广泛的归一化植被指数 NDVI 反演冬小麦整个生育期的 LAI, 在划分的三个生长阶段根据计算得到的植被指数与 LAI 进行回归分析, 以各模型的决定系数 (R^2) 作为反演模型精度的评价指标, 选取其中拟合精度高、误差小的模型作为最佳 LAI 分段反演模型。利用地面试验数据来验证建立的分段反演模型的适应性, 将模型反演值和地面实测值回归拟合, 以反演的决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 作为主要依据来评价模型的验证结果。

2.1 冬小麦全生育期叶面积指数单一植被指数反演

归一化植被指数 (NDVI) 是最早提出也是应用最广泛的植被指数, 它反映了绿色生物量、叶绿素含量和冠层水势的变化, 对绿色植被和冠层背景变化很敏感, 是植被长势和植被覆盖度的最佳指示因子之一^[10]。但 NDVI 在植被 LAI 值较低 ($LAI > 2$) 时就会出现信号饱和^[9]。由 SPASS20.0 统计分析软件进行 NDVI 与小麦整个生育期 LAI 的线性回归分析, 结果如图 3(a) 所示, NDVI 与 LAI 之间的线性相关系数为 0.571 1, 相关性较差。根据回归分析得到的线性模型利用地面实测数据进行冬小麦整个生育期 LAI 的反演, 结果如

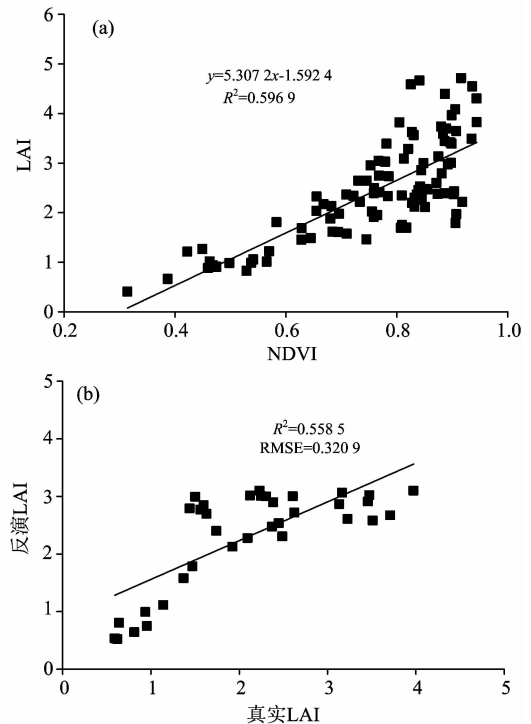


Fig. 3 Regression result between NDVI and LAI (a) and LAI inversion (b) result during the winter wheat growth duration

图 3(b)所示。由回归模型获得的小麦 LAI 反演值和真实值之间的 $R^2=0.5585$, $RMSE=0.3209$ 。从图 3(a)可以看出在冬小麦 LAI>2 时, NDVI 指数就表现出了信息饱和现象。原因在于小麦叶片的多次散射增强了光谱反射率的各向异性,同时 NDVI 易受外部因素的干扰,使其对小麦冠层各向反射率的敏感性降低^[18]。从而影响了小麦 LAI 的反演结果。因此,分析得出小麦 LAI 值较高时不适宜用 NDVI 来反演。

2.2 冬小麦生长前期叶面积指数反演

回归分析得出(表 2),在冬小麦生长前期选用的十种植被指数中改进的比值植被指数 mSR 与 LAI 之间线性相关性极显著,相关系数为 0.7652。归一化绿度植被指数 NDGI 与 LAI 之间的线性相关性最差,相关系数为 0.5324。小麦生长前期,麦苗生长较快,观测视场内小麦信息占相对主要成分,大约有 30% 的土壤背景信息。mSR 选用的是可见光的蓝光波段(445 nm)、红光波段(705 nm)以及近红外波段的反射率,该指数是比值植被指数 SR 的进一步改进,修正了植被叶片的镜面反射效应^[16],增大了绿色植被与土壤背景间的太阳辐射差异,所以在此生长阶段使用 mSR 可以很好地反映作物覆盖度变化。

Table 2 Correlation between vegetation indices and LAI during earlier growth stages

植被指数	回归方程	r	F 统计量	Sig. F
OSAVI	$y=4.3741x-1.4056$	0.6784	23.2045	0.001
NDVI	$y=4.3286x-1.3886$	0.6652	21.8591	0.001
SR	$y=0.2089x-0.3499$	0.7221	28.574	0.000
EVI	$y=1.4101x-0.2261$	0.6241	18.2613	0.000
TVI	$y=0.0014x-0.2261$	0.7413	31.5265	0.000
NDGI	$y=4.8499x+0.9191$	0.5612	17.0739	0.003
NDVI ₇₀₅	$y=5.5614x-1.0508$	0.7042	26.1913	0.000
mNDVI ₇₀₅	$y=5.7076x-1.6602$	0.6475	20.2030	0.001
mSR ₇₀₅	$y=0.9908x-0.3252$	0.7651	35.8274	0.000
VOG1	$y=3.222x-3.5725$	0.7376	30.2932	0.000

图 4(a)为改进的比值植被指数 mSR 与 LAI 的相关性分析结果,相对于其他的植被指数 mSR 与 LAI 的相关性极为显著,因此选择 mSR 来反演小麦生长前期的 LAI。图 4(b)为得到的 LAI 反演结果,得出 LAI 反演值与真实值之间的 $R^2=0.7287$, $RMSE=0.2971$ 。说明小麦生长前期, mSR 适于反演小麦生长前期的 LAI,利用该指数建立的反演模型可以获得精度较高的 LAI 反演结果。

2.3 冬小麦生长中期叶面积指数反演

根据回归分析得出,冬小麦生长中期比值植被指数 SR 与 LAI 之间的相关性极显著,相关系数 0.6748,如图 5(a)所示。优化的土壤调节植被指数 OSAVI 与 LAI 之间的相关性最差,相关系数仅为 0.4893。SR 是植被近红外波段和可见光波段的反射率的比值,它对植被叶面积指数和叶绿素含量的变化很敏感,常用于定量遥感的作物长势状况监测。在冬小麦生长中期麦苗生长旺盛,到 4 月下旬,地表作物的覆盖度较高,小麦叶面积指数在 4~5 之间,观测视场内以小麦信息为主,土壤背景对小麦冠层反射率基本没有影响。

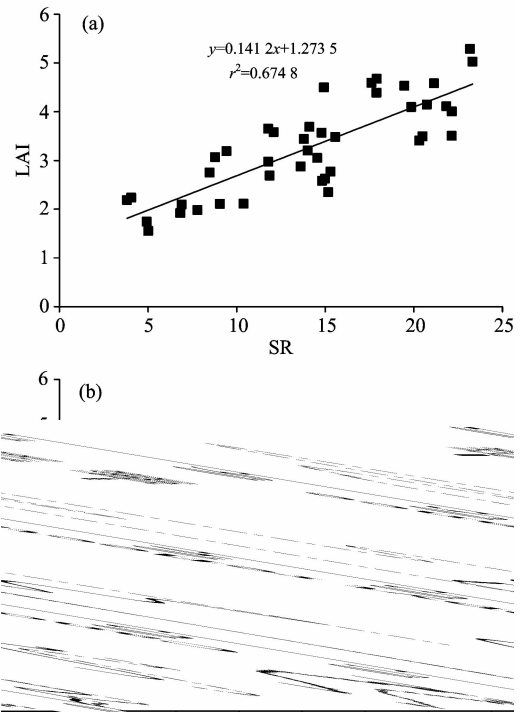


Fig. 4 Regression result between mSR and LAI (a) and LAI inversion result (b) during earlier growth stages in winter wheat

Table 3 Correlation between vegetation indices and LAI during medium growth stages in winter wheat

植被指数	回归方程	r	F 统计量	Sig. F
OSAVI	$y=8.4386x-3.7929$	0.5299	45.0876	0.000
NDVI	$y=8.5433x-3.9039$	0.5456	48.0275	0.000
SR	$y=0.1412x+1.2735$	0.6748	48.1036	0.000
EVI	$y=2.0017x-1.1816$	0.5460	46.5292	0.000
TVI	$y=0.0019x-0.9624$	0.6313	68.5035	0.000
NDGI	$y=6.2189x+1.3487$	0.5324	45.5497	0.000
NDVI ₇₀₅	$y=9.8764x-2.8598$	0.6054	61.3762	0.000
mNDVI ₇₀₅	$y=11.0524x-4.4762$	0.5868	56.8086	0.000
mSR ₇₀₅	$y=1.034x-0.008$	0.5952	61.7601	0.000
VOG1	$y=4.0955x-4.6344$	0.6494	74.1018	0.000

由地面试验数据验证 SR 构建的小麦生长中期 LAI 反演模型,结果如图 5(b)所示,获得的 LAI 模型反演值与真实值之间的 $R^2=0.6546$, $RMSE=0.3061$,反演结果较好。研究得出,比值植被指数 SR 适于小麦生长中期 LAI 的反演。

2.4 冬小麦生长后期叶面积指数反演

冬小麦生长后期,逐渐进入成熟期,作物的叶面积指数也随之降低,各植被指数中归一化植被指数 NDVI 与小麦 LAI 之间的线性相关性较显著,相关系数为 0.7125,回归分析结果如图 7(a)所示。TVI 与 LAI 之间相关性最差,相关系数仅为 0.2891。小麦抽穗前,冠层光谱反射率主要由植株的茎秆和叶片的组分光谱决定,抽穗后冠层的光谱特性主要由麦穗决定^[23]。由图 6 可以看出冬小麦抽穗前后的冠层光谱反射率存在明显差异。尤其是在近红外波段,小麦抽穗后的冠

层光谱反射率远高于抽穗前的反射率数值,说明麦穗对小麦冠层的光谱反射率有一定的影响。

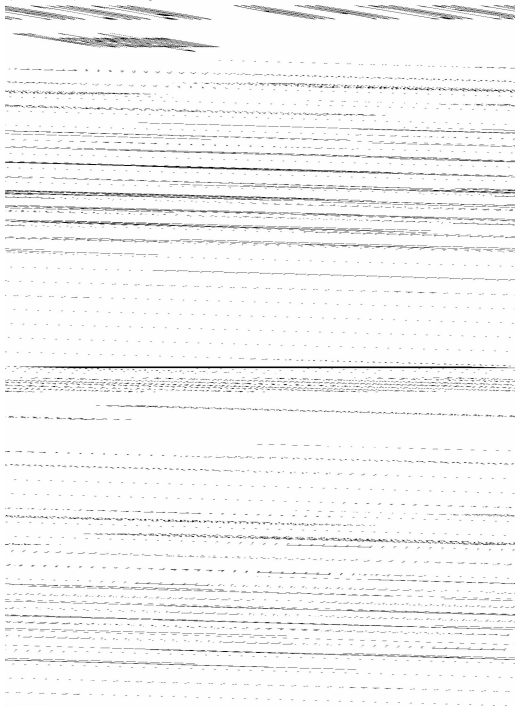


Fig. 5 Regression result between SR and LAI (a) and LAI inversion result (b) during medium growth stages in winter wheat

Table 4 Correlation between vegetation indices and LAI during later growth stages in winter wheat

植被指数	回归方程	r	F 统计量	Sig. F
OSAVI	$y=16.2381x-11.9065$	0.6933	24.8703	0.000
NDVI	$y=16.6457x-12.3273$	0.7125	24.257	0.000
SR	$y=0.0624x+1.3234$	0.5185	11.8433	0.006
EVI	$y=8.6231x-10.8296$	0.3288	5.3747	0.041
TVI	$y=0.0005x+1.3568$	0.2891	4.4741	0.058
NDGI	$y=8.3712x-0.3268$	0.3863	6.925	0.023
NDVI ₇₀₅	$y=9.0772x-3.8672$	0.5725	14.7293	0.003
mNDVI ₇₀₅	$y=11.0289x-6.1985$	0.4532	9.1169	0.012
mSR ₇₀₅	$y=1.0507x-1.3899$	0.5773	15.0225	0.003
VOG1	$y=1.4509x-0.78946$	0.4356	8.4909	0.014

根据上述分析结果,选择 NDVI 来反演小麦生长后期的 LAI,获得的 LAI 反演值和真实值之间的 $R^2=0.6794$, $RMSE=0.3064$,反演结果较好,如图 7(b)所示。由此表明 NDVI 指数由于受冠层背景和自身饱和性的影响,不适于冬小麦整个生育时期 LAI 的反演而适于小麦生长后期 LAI 的反演。

对冬小麦不同生育时期 LAI 的反演结果进行分析比较,得出结论:由于不同生长阶段地表小麦的覆盖度不断变化,因而在不同生长阶段选用合适的植被指数分段反演 LAI 得到的精度均高于在整个生育期使用单一的植被指数(NDVI)的反演精度。

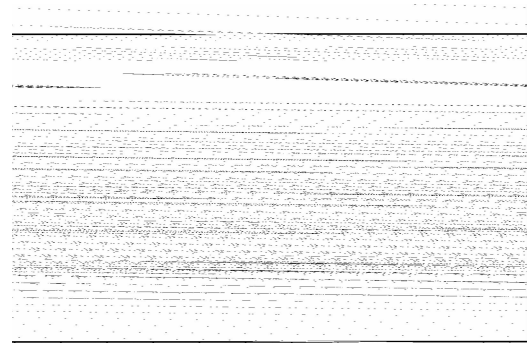


Fig. 6 Winter wheat canopy reflectance before and after headings

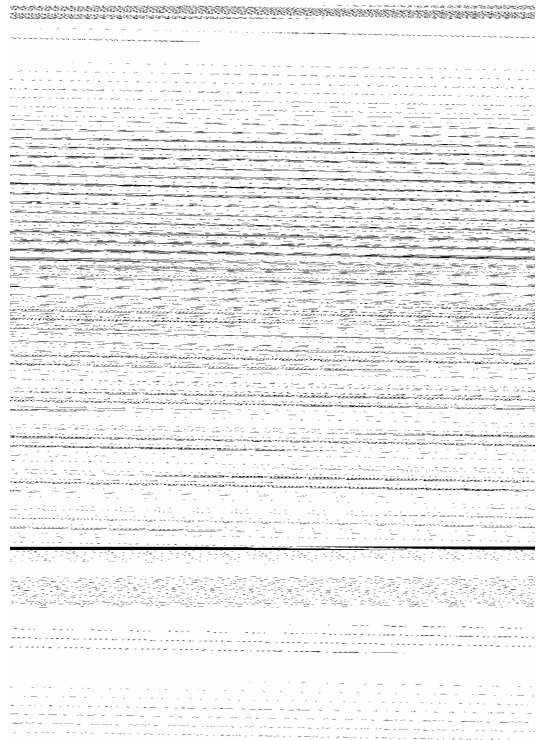


Fig. 7 Regression result between NDVI and LAI (a) and LAI inversion result (b) during later growth stages in winter wheat

3 结 论

冬小麦各个生育时期地表覆盖度不断变化,作物冠层的光谱反射率在各个生育时期也表现不同,从而使得不同植被指数对作物覆盖度响应程度不同。分析选取了在小麦各生长阶段对小麦覆盖度有最佳响应能力的植被指数,建立了小麦不同生育时期叶面积指数的分段反演模型。得出如下结论:

(1)在冬小麦的整个生育期使用 NDVI 构建的模型来反演小麦叶面积指数,得到的 LAI 反演值与真实值的 $R^2=0.5585$,均方根误差 $RMSE=0.3209$ 。

(2)在冬小麦生长前期,改进的比值植被指数 mSR 与小麦 LAI 之间的线性相关性极好,利用 mSR 建立的反演模型,

获得的 LAI 反演值与真实值之间的 $R^2=0.7287$, $RMSE=0.2971$, 反演精度较高。因而 mSR 适于反演冬小麦生长前期的 LAI。

(3)在冬小麦生长中期, 比值植被指数 SR 与小麦 LAI 之间的线性相关性较高, 利用 SR 建立的反演模型得到的 LAI 反演值与真实值间的 $R^2=0.6546$, $RMSE=0.3061$ 。因而 SR 适于反演冬小麦生长中期的 LAI。

(4)在冬小麦生长后期, 采用归一化植被指数 NDVI 构建的反演模型, 获得的 LAI 反演值与真实值之间的 $R^2=0.6794$, $RMSE=0.3164$, 反演结果较好。因而 NDVI 适于反演冬小麦生长后期的 LAI。

在冬小麦不同生长阶段各个植被指数对小麦冠层反射率的响应不同, 在冬小麦的整个生育期采用单一的植被指数不

能获得理想反演结果, 根据植被覆盖度选用合适的植被指数进行 LAI 分段反演。NDVI 虽然对地表植被覆盖度的变化较敏感, 但它易受背景场、植被特性的影响以及自身信号的饱和性也会降低反演精度^[24, 25, 26]。

综上所述, 遥感手段监测作物长势时应根据各个生长阶段地表覆盖度的状况选用合适的植被指数来反演 LAI, 由此可以提高作物叶面积指数反演精度和长势监测水平。上述研究结果是由地面实测数据得出, 这些结论对大面积大区域的作物长势监测有一定的借鉴意义, 但仍需在区域尺度上进行更深层的研究, 尚未考虑小麦的株型、作物冠层反射率的方向性特征以及作物生长环境等因素的影响, 这些问题有待进一步的研究。

References

- [1] Chen J M, Black T A. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(4): 421.
- [2] Viña A, Gitelson A A, Nguy-Robertson A L, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3468.
- [3] Pinty B, Lavergne T, Widowski J L, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 10.
- [4] LI Xin-chuan, XU Xin-gang, BAO Yan-song, et al(李鑫川, 徐新刚, 鲍艳松, 等). *Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学)*, 2012, 45(17): 3486.
- [5] Haboudane D, Miller J R, Pattey E, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(3): 337.
- [6] Yang F, Sun J L, Fang H L, et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011. doi: 10.1016/j.jag.2011.09.004.
- [7] Verrelst J, Schaepman M E, Koetz B, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2341.
- [8] Hasegawa K, Matsuyama H, Tsuzuki H, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 514.
- [9] Liu J, Pattey E, Jégo G. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 347.
- [10] Rouse J. *Proceedings of the 3rd ERTS Symposium*, 1973, 1: 48.
- [11] Tucker C J. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127.
- [12] Liu H Q, Huete A. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457.
- [13] TIAN Qing-jiu, MIN Xiang-jun(田庆久, 闵祥军). *Advances in Earth Science(地球科学进展)*, 1998, 13(4): 327.
- [14] ZHAO Ying-shi(赵英时). *The Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application(遥感应用分析原理与方法)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2003.
- [15] Rondeaux G, Steven M, Baret F. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95.
- [16] Datt B. *Journal of Plant Physiology*, 1999, 154(1): 30.
- [17] Broge N H, Mortensen J V. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 45.
- [18] Gonsamo A, Pellikka P. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 70: 15.
- [19] Huete A R. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295.
- [20] Pinty B, Verstraete M M. *Plant Ecology*, 1992, 101(1): 15.
- [21] Gitelson A, Merzlyak M N. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 143: 286.
- [22] Vogelmann J E, Rock B N, Moss D M. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1563.
- [23] WANG Ji-hua, SONG Xiao-yu, LI Cun-jun, et al(王纪华, 宋晓宇, 李存军, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2005, 9(3): 323.
- [24] Houborg R E, Boegh. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 186.
- [25] Martínez-Beltrán C, Jochum M A O, Calera A, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(5): 1355.
- [26] Maselli F, Chiesi M. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(1): 55.

Inversion of Leaf Area Index during Different Growth Stages in Winter Wheat

ZHAO Juan^{1,2}, HUANG Wen-jiang^{1*}, ZHANG Yao-hong², JING Yuan-shu²

1. Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract Being orientated to the low precision of crop leaf area index (LAI) inversion using the same spectral vegetation index during different crop growth stages, the present paper analyzed the precision of LAI inversion by employing NDVI (normalized difference vegetation index). Ten vegetation indices were chosen including six broad-band vegetation indices and four narrow-band vegetation indices responding to vegetation cover to inverse LAI in different growth stages. Several conclusions were drawn according to the analysis. The determinant coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE) between LAI inversion value and true value were 0.558 5 and 0.320 9 respectively during the whole growth duration. The mSR (modified simple ratio index) index was appropriate to inverse of LAI during earlier growth stages (before jointing stage) in winter wheat. The R^2 and RMSE between LAI inversion value and true value were 0.728 7 and 0.297 1 respectively. The SR (simple ratio index) index was suitable enough to inverse of LAI during medium growth stages (from jointing stages to heading stages). The R^2 and RMSE between LAI inversion value and true value were 0.654 6 and 0.306 1 respectively. The NDVI (normalized difference vegetation index) index was proven to be fine to inverse LAI during later growth stages (from heading stage to ripening stage). The R^2 and RMSE between LAI inversion value and true value were 0.679 4 and 0.316 4 respectively. Therefore it was indicated that the results of LAI inversion was much better inverse of winter wheat LAI choosing different vegetation indices during different growth stages for winter wheat according to the change of vegetation cover and canopy reflectance than merely with NDVI to inverse LAI in the whole growth stages. It was concluded that the precision of LAI inversion was significantly improved with segmented models based on different vegetation indices.

Keywords Winter wheat; Growth stages; Vegetation indices; Leaf area index; Inversion

(Received Oct. 16, 2012; accepted Feb. 28, 2013)

* Corresponding author