

## 融合冠层水分特征的光谱参数 NCVI 及反演玉米 LAI

曹仕<sup>1</sup>, 刘湘南<sup>1\*</sup>, 刘美玲<sup>1</sup>, 曹珊<sup>2</sup>, 姚帅<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083

2. 中国水利水电第八工程局, 湖南长沙 410000

**摘要** 精确反演农作物冠层叶面积指数对指导作物管理和作物估产具有非常重要的意义。以吉林市郊区玉米种植区为试点, 考虑冠层叶片水分含量对 LAI 的贡献, 在 NDVI 的基础上结合表征冠层叶片水分含量的植被指数 DSWI, 提出一种归一化综合植被指数 NCVI, 以此建立模型反演 LAI, 并对模型进行检验。结果表明: NCVI 模型反演 LAI 值与实测值之间存在良好的对应关系, 此模型突破了传统经验模型对稠密冠层 LAI 反演的局限, 对 LAI 值大于 3 的冠层反演效果良好; 另外, NCVI 模型对土壤水环境十分敏感, 在干旱半干旱地区的反演效果明显优于一般区域。

**关键词** 叶面积指数; 归一化综合植被指数; 冠层水分含量; 遥感反演; 玉米

**中图分类号**: TP722.4;S127 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)02-0478-05

### 引言

叶面积指数(leaf area index, LAI)是指单位地面面积上所有叶子单面表面积的总和, 是表征植被冠层结构最基本的参数之一, 同时也是陆地生态系统的一个十分重要的结构参数, 它与植物的蒸腾、呼吸、光合作用以及降水的截取、地表净初级生产力等密切相关<sup>[1-4]</sup>。自 1947 年提出以来, 叶面积指数已成为一个重要的植物学参数和评价指标, 并在农业、牧业、林业以及生物学、生态学、环境学等领域得到广泛应用<sup>[5]</sup>。

现今利用遥感反演叶面积指数的方法大致分为两类, 即物理模型方法和经验模型方法。物理模型方法以物理光学原理为基础, 具有较强的时空扩展性, 但却因算法的复杂性而导致其实现困难、计算繁冗, 并且还存在着病态反演的问题<sup>[6]</sup>。经验模型方法则利用光谱指数快速获得叶面积指数, 具有简单灵活的特点, 是目前最常用的间接获得 LAI 的方法<sup>[7, 8]</sup>。目前叶面积指数反演经验模型用的最多的光谱指数是归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI), 但此类模型一般只考虑单一植被指数, 当冠层过于稠密, LAI 值达到 3 以上时, NDVI 指数反演达到饱和, 其模型严重受限, 无法进行进一步反演。

随着空间精细化模型的发展和基于过程的分布式模拟技

术的应用, 对 LAI 的区域精确估算显得越来越重要, 经验模型中传统反演方法的局限性显然不能满足其要求, Kouiti 利用 BRDF 结合 NDVI 解决了无法反演高 LAI 的限制<sup>[9]</sup>, 但其需要的数据比较复杂, 不适于普遍推广使用。而本研究从冠层叶片水分含量出发, 在 NDVI 的基础上结合表征叶片水分含量的植被指数, 提出一种反演 LAI 的归一化综合植被指数(normalized composite vegetation index, NCVI), 用以提高 LAI 的反演精度, 打破经验反演的局限性, 扩大经验模型的适用范围。

### 1 NCVI 理论基础与实验设计

#### 1.1 实验设计

研究区域为吉林省吉林市郊区玉米种植区, 实验随机选取了 A, B, C, D 四块不同地域, 在每块地域取 15 个测试点, 对每个试点的玉米植株进行光谱测试和叶面积指数的测试, 并对冠层上、中、下的叶片和试点土壤进行采样, 随后在实验室进行水分测量。

冠层光谱反射率的测量采用 ASD field pro3 便携式辐射光谱仪, 其探测波长范围: 350~2 500 nm; 光谱分辨率: 350~1 050 nm 范围内为 3.5 nm, 1 000~2 500 nm 范围内为 10 nm; 光谱采样间隔: 350~1 050 nm 范围内为 1.4 nm, 1 000~2 500 nm 范围内为 2 nm; 采样时间: 10 次·s<sup>-1</sup>。叶面积

收稿日期: 2010-04-23, 修订日期: 2010-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771155)和国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2007AA12Z174)资助

作者简介: 曹仕, 1985 年生, 中国地质大学(北京)信息工程学院硕士研究生 e-mail: caoshi224@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: liuxncugb@163.com

指数的测量使用 LAI-2000 冠层分析仪, LAI-2000 使用 320~490 nm 的感应波段。每样点处重复测量光谱反射率 10 次、叶面积指数 5 次, 取均值。测量时间为 2009 年 9 月 13 日 12:00-14:00, 天气晴朗。

### 1.2 NCVI 理论基础

在已有的农作物 LAI 反演方法中, 通常只使用了红光和近红外波段的反射率(如 NDVI 反演法)(表 1)。毫无疑问, 红光和近红外波段都是对植被生长状况非常敏感的波段, 通常用来表征叶绿素和细胞结构, 但却无法反映冠层叶片含水量, 显然冠层叶片水分含量是 LAI 反演中的一个重要参数。一般情况下, 冠层覆盖面积相等而叶面积指数不同的植物, 在航空遥感传感器下, 其在表征叶绿素和细胞结构的波段(即红光和近红外波段)的表现可能相差不大, 尤其是在植被过于稠密时, NDVI 更是趋于饱和, 变化值极小, 由此利用 NDVI 反演的 LAI 也就不甚精确, 这也导致利用 NDVI 无法反演 LAI 值在 3 以上的植被。但冠层叶片水分含量却与 LAI 密切相关, 不会因为植被过于稠密而失去对 LAI 的灵敏性, 在相同阳光照射和蒸腾作用下, 由于植物的保水性, LAI 值大的植物叶片水分保留多, 尤其在干旱半干旱的土壤缺水区

域, 由于植物得不到根系水源的有效支援, 其叶片水分含量相差更为明显。因此在本研究中, 对绿色植被水分含量敏感的波段也被纳入研究范围, 柴琳娜等也曾证明对水分敏感的短波红外波段对 LAI 反演精度的提高具有一定贡献<sup>[10]</sup>。

Table 1 Proposed models for predicting LAI using NDVI in crop

对象	反演公式	R <sup>2</sup>	文献
玉米	$LAI=0.9710 * e^{1.9157 * NDVI}$	0.75	黎娅等 <sup>[11]</sup>
大豆	$LAI=0.0311 * e^{5.2098 * NDVI}$	0.84	宋开山等 <sup>[12]</sup>
小麦	$LAI=0.3775 * e^{2.4293 * NDVI}$	0.51	李淑敏等

在前人研究基础上, 以各植被水分含量敏感指数作为备选参数(表 2), 利用相关分析与取值范围选取结合 NDVI 反演 LAI 的最优冠层水分敏感指数, 并利用此指数构成新的归一化综合植被指数 NCVI 以反演植被冠层叶面积指数。本研究以 A 和 B 两地域的 30 个测试点数据建模, 以 C 和 D 两地域 30 个测试点数据进行模型验证。

Table 2 Sensitive vegetation indices to water content in canopy

水分敏感指数	公式	文献
WI(water index)	$R_{900}/R_{970}$	Penuelas et al. <sup>[13]</sup>
NDWI(normalized difference water index)	$(R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$	Gao <sup>[14]</sup>
fwBI(floating-position water index)	$R_{900} / \min(R_{930} - 970)$	Strachan et al. <sup>[15]</sup>
DSWI(disease water stress index)	$(R_{803} + R_{549}) / (R_{1659} + R_{681})$	Apan et al. <sup>[16]</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 冠层水分表征参数的提取

植被光谱在红外和短波红外波段(690~1300 nm), 由于高反射率形成的高平台之间, 存在 2 个由植物体内水分吸收导致的微小波谷(以 972, 1172 nm 为中心), 而在 1300 nm 以后的波段中, 反射率曲线则具有 2 个由于水分强烈吸收所致的明显波谷, 分别位于 1400 和 1950 nm, 冠层含水量越大, 吸收越强, 波谷越深<sup>[17]</sup>。

基于上述分析, 为获取最适宜的冠层水分含量表征参数, 对水分含量敏感备选参数 WI, NDWI, fwBI 和 DSWI 进行比较分析。四种植被指数的取值范围分别为: DSWI(1.34~2.36), fwBI(0.93~1.06), NDWI(0.01~0.13), WI(0.88~0.98), 取值范围大小从高到低为 DSWI(1.02) > fwBI(0.13) > NDWI(0.12) > WI(0.11)。并利用实测叶片含水量对备选指数进行相关性处理, 得到的结果如图 1 所示, 光谱指数的响应系数从高到低为 DSWI > fwBI > NDWI > WI。综合响应系数和取值范围因素选取 DSWI 作为本次研究的冠层水分表征参数。

### 2.2 NCVI 反演模型的建立

学者们常用 NDVI 来表征绿色生物量、叶绿素含量以及细胞结构, 但很少用来表征冠层水分含量, 主要是因为 ND-

VI 包含的冠层水分信息较少, 不足以表征冠层水分含量, 以至于经验法中用 NDVI 反演 LAI 具有一定的局限性。为了解决高稠密冠层的经验反演障碍, 本研究加入水分敏感参数 DSWI, 与 NDVI 组合形成归一化综合植被指数(NCVI)反演 LAI。NDVI 取值范围为 0.68~0.89, DSWI 取值范围为 1.34~2.36, 一般情况下 NDVI 与 DSWI 具有同向性, 为了获取更好的与 LAI 变化趋势相匹配的组合指数, 研究分别以 NDVI 与 DSWI 的乘积和组成 NCVI<sub>1</sub> 和 NCVI<sub>2</sub> 为基础建立反演模型。

$$NCVI_1 = NDVI * DSWI$$

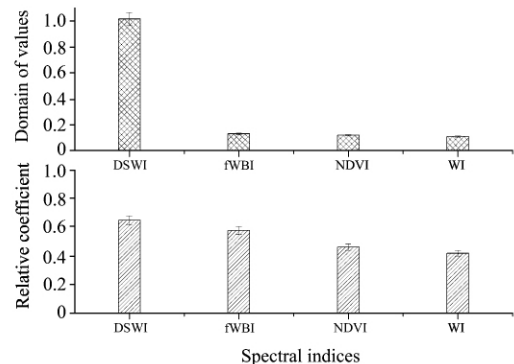


Fig 1 Features of sensitive vegetation indices to water content

$$NCVI_2 = NDVI + DSWI$$

根据土壤水分含量将不同测试点划分为富水环境和缺水环境，土壤含水量在  $45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上的为富水环境，反之则为缺水环境。分别对总体、富水、缺水背景下的玉米冠层

LAI 与新指数  $NCVI_1$  和  $NCVI_2$  之间进行建模(图 2, 表 3)。结果表明： $NCVI_1$  建模效果无论从相关性、标准差还是从显著水平上都明显好于  $NCVI_2$ ，显然 NDVI 与 DSWI 的乘积比更符合 LAI 的变化趋势。

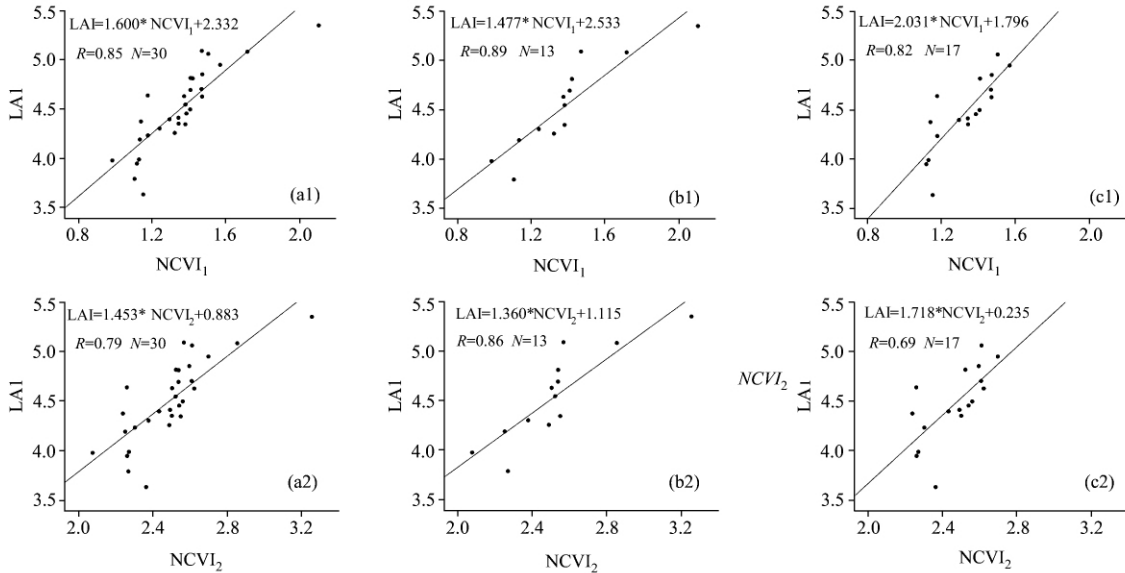


Fig 2 Scattering plots of real LAI data and NCVI data

Table 3 Quantitative relationships of LAI and NDVI in different background

土壤背景	公式	R	SD	N	P
总体	(a1) $LAI = 1.600 * NCVI_1 + 2.332$	0.85	0.218	30	$< 0.0001$
	(a2) $LAI = 1.453 * NCVI_2 + 0.883$	0.79	0.256		$< 0.0001$
水分含量小于 $45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	(b1) $LAI = 1.447 * NCVI_1 + 2.533$	0.89	0.214	13	$< 0.0001$
	(b2) $LAI = 1.360 * NCVI_2 + 1.115$	0.86	0.243		$< 0.001$
水分含量大于 $45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	(c1) $LAI = 2.031 * NCVI_1 + 1.769$	0.82	0.222	17	$< 0.0001$
	(c2) $LAI = 1.718 * NCVI_2 + 0.235$	0.69	0.277		$< 0.01$

注：SD 代表标准差，N 代表样本数，P 代表显著水平

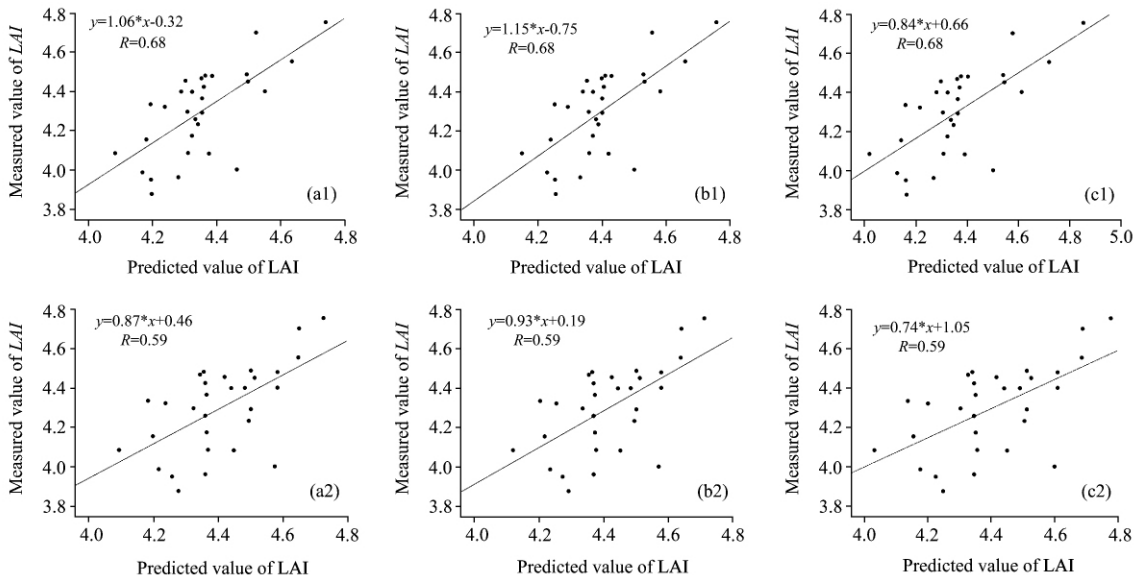


Fig 3 Scattering plots of real LAI data and simulation data inversed from NCVI models

基于水分背景考虑,土壤水分含量在  $45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下的环境中,NCVI 建模效果最佳,明显好于富水环境。这说明:富水环境中由于根系水源充足,能迅速补充冠层叶片的水分流失,使得不同 LAI 的冠层水分差异不甚明显;而在半干旱缺水环境中,冠层叶片水分得不到有效的补充,使得不同 LAI 的冠层水分差异加剧,从而利用这种差异以更好的反演 LAI。

### 2.3 模型验证

利用  $\text{NCVI}_1$  和  $\text{NCVI}_2$  在不同环境下建立的模型,反演 C 和 D 两地的 LAI,然后利用反演的 LAI 与实测的 LAI 进行验证分析。结果表明: $\text{NCVI}_1$  在不同环境下的反演验证结果都好于  $\text{NCVI}_2$ ,其反演值更接近于实测值;而在基于不同水环境  $\text{NCVI}_1$  反演验证中,缺水环境反演效果明显好于富水环境(图 3)。这一事实再次证明 NCVI 在反演 LAI 时,其精度与土壤水环境有很大联系,土壤水分含量越少,其反演精度效果越好,所以在干旱半干旱地区反演 LAI 更适宜用 NCVI 模型。

## 3 结 论

本研究利用增加了冠层水分表征的新指数 NCVI 建立的经验模型对吉林市郊区玉米叶面积指数进行了反演,并对实测 LAI 值、不同环境下遥感反演 LAI 值进行了比较分析,得出结论为。

(1)NCVI 建立的反演叶面积指数的经验模型为线性关系模型,突破了一般经验模型对稠密冠层反演的局限,可以对 LAI 值大于 3 的冠层进行很好的反演。试验区玉米冠层实测 LAI 值范围在 3.5~5.5 之间,而模型反演值与实测值比较接近,且线性关系显著。

(2)在不同土壤水环境的反演中,NCVI 由于对冠层水分比较敏感,使得 NCVI 模型在干旱半干旱地区的反演效果明显优于普通区域。而对  $\text{NCVI}_1$  和  $\text{NCVI}_2$  的反演比较中, $\text{NCVI}_1$  能更好的反映出冠层 LAI 的变化,说明 NCVI 与 DSWI 的乘法组合更能代表不同冠层 LAI 植被的生理生态特征变化。

## References

- [1] Chen J M, Black T A. *Plant, Cell and Environment*, 1992, 15: 421.
- [2] Bonan G B. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51:57.
- [3] Hanan N P, Bégué A. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 74: 155.
- [4] Veroustraete F, Patyn J, Myneni R B. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 115.
- [5] WANG Xi-qun, MA Lü-yi, JIA Zhong-kui, et al(王希群, 马履一, 贾忠奎, 等). *Chinese Journal of Ecology(生态学杂志)*, 2005, 24(5): 537.
- [6] Verstraete M M, Pinty B, Myneini R B. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 201.
- [7] Wang P, Sun R, Hu J, et al. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85: 607.
- [8] Tian Q, Luo Z, Chen J M, et al. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85: 624.
- [9] Kouiti H, Hiroshi M, Hayato T, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 514.
- [10] CHAI Lin-na, QU Yong-hua, ZHANG Li-xin, et al(柴琳娜, 屈永华, 张立新, 等). *Advances in Earth Science(地球科学进展)*, 2009, 24(7): 756.
- [11] LI Ya, FENG Xiao, QIAO Shu, et al(黎 娅, 冯 晓, 乔 淑, 等). *Journal of Henan Agricultural University(河南农业大学学报)*, 2009, 43(4): 364.
- [12] SONG Kai-shan, ZHANG Bai, WANG Zong-ming, et al(宋开山, 张 柏, 王宗明, 等). *Chinese Journal of Ecology(生态学杂志)*, 2007, 26(10): 1690.
- [13] Penuelas J, Isla R, Filella I, et al. *Crop Science*, 1997, 37(1): 198.
- [14] Gao B C. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 257.
- [15] Strachan I B, Pattey E, Boisvert J B. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80: 213.
- [16] Apan A, Held A, Phinn S, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(2): 489.
- [17] WAN Yu-qing, TAN Ke-long, ZHOU Ri-sheng, et al(万余庆, 谭克龙, 周日升, 等). *Research of Hyperspectral Remote Sensing Application(高光谱遥感应用研究)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2006. 142.

# Estimation of Leaf Area Index by Normalized Composite Vegetation Index Fusing the Spectral Feature of Canopy Water Content

CAO Shi<sup>1</sup>, LIU Xiang-nan<sup>1\*</sup>, LIU Mei-ling<sup>1</sup>, CAO Shan<sup>2</sup>, YAO Shuai<sup>1</sup>

1. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Sinohydro Bureau No. 8, Changsha 410000, China

**Abstract** The accurate inversion of leaf area index (LAI) in canopy is very important for guiding crop management and assessing crop yield. Sixty samples belonging to corn in four different areas of Jilin City were scanned by ASD field pro3 and LAI-2000 for optical data and LAI. A new vegetation index, the normalized composite Vegetation index (NCVI), containing the factor of canopy water content, is proposed in the present paper for a better quantitative estimation of LAI than with the remotely sensed normalized difference vegetation index (NDVI), especially in the arid and semi-arid areas. A model was built for inversion of LAI with NCVI, and experience validation. The results showed that there was a good linear correlation between the simulation LAI inverted from NCVI model and the real LAI values. The model breaking the limitations of the traditional empirical models for LAI inversion has a good result for estimating LAI of the dense canopy whose LAI value was greater than 3. In addition, NCVI model was very sensitive to the water environment of soil, and the inversion result in the arid and semi-arid areas was superior to the general area.

**Keywords** Leaf area index; Normalized composite vegetation index (NCVI); Canopy water content; Remote sensing inversion; Corn

(Received Apr. 23, 2010; accepted Sep. 8, 2010)

\* Corresponding author