

基于热点植被指数的冬小麦叶面积指数估算

陈瀚阅^{1,2}, 牛铮^{1*}, 黄文江³, 黄妮^{1,2}, 张瀛^{1,4}

(1. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 4. 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101)

摘要: 针对传统植被指数方法中利用单一方向的光谱特性估测 *LAI* 容易出现饱和现象和冠层结构信息不足的缺陷, 以二向反射特性的归一化植被指数 (*NHVI*) 为基础, 将表征叶片空间分布模式的热暗点指数 (*HDS*) 引入土壤调整型植被指数 (*SAVI*), 增强型植被指数 (*EVI*) 中, 构建具有二向反射特性的土壤调整型热点植被指数 (*SAHVI*) 和增强型热点植被指数 (*EHVI*)。同时使用红光, 近红外, 蓝光和绿光波段计算 *HDS*, 选择对 *LAI* 敏感性较高的 *HDS* 参与构建新型植被指数, 并利用试验测量的小麦冠层二向反射率数据和叶面积指数, 研究新型植被指数与 *LAI* 的线性关系。结果表明: 基于蓝光和红光波段计算的 *HDS* 参与构建的 *EHVI*、*SAHVI* 与 *LAI* 的线性相关程度要优于 *EVI*、*SAVI*, 且较 *NHVI* 有进一步提高, 能有效缓解 *LAI* 估算中植被指数饱和现象。

关键词: 遥感, 光谱分析, 植被指数, 叶面积指数, 二向反射, 热暗点指数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.030

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0167-06

陈瀚阅, 牛铮, 黄文江, 等. 基于热点植被指数的冬小麦叶面积指数估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 167-172.

Chen Hanyue, Niu Zheng, Huang Wenjiang, et al. Estimation of winter wheat *LAI* using hotspot-signature vegetation indices[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 167-172. (in Chinese with English abstract)

0 引言

通过植被指数与叶面积指数 (leaf area index, *LAI*) 之间的模型关系来估算 *LAI*, 即植被指数法, 是利用卫星遥感数据估算 *LAI* 的一种常用方法^[1-2]。当植被覆盖度在 25%~80%之间时, 归一化植被指数 (normalized difference vegetable Index, *NDVI*) 随植被生物量呈线性增加, 是监测作物长势、估算植被叶面积指数、生物量和光合效率的最常用的指标^[3]。受到红光波段吸收饱和现象的影响和 *NDVI* 本身算式形式的限制, *NDVI* 随着植被覆盖度的增大也会出现饱和现象; 同时, 对于非随机分布的植被, 在未知其空间分布方式情况下, 无论选择何种入射-观测角度组合, 都无法利用 *NDVI* 准确地估算出冠层的叶面积指数^[4]。为了消除土壤背景影响和提高植被指数饱和点, 不少学者陆续提出多种改进的植被指数, 包括基于土壤线概念对土壤背景进行修正的垂直植被指数 (*PVI*)^[5], 土壤调节植被指数 (soil adujsted vegetation index, *SAVI*)^[6], 由红光和蓝光波段反射率

线性组合代替红光波段反射率的抗土壤和大气植被指数 (soil and atmospherically resistant vegetation index, *SARVI*)^[7]以及基于 *SARVI* 进一步提出的增强型植被指数 (enhanced vegetation index, *EVI*)^[8]。这些植被指数在一定程度上削弱了饱和现象, 但始终是由单一方向的光谱反射率计算而成, 不能表达植被冠层立体结构特征。多角度遥感包含了大量的地面目标的立体结构信息, 因此具备求解植被三维结构的潜力^[9-11]。不少学者也利用各种各样的多角度植被双向反射分布模型反演 *LAI*^[12-13], 但在实际的应用过程中, 多角度模型输入参数较多、求解过程复杂甚至无解、反演结果存在很大的不确定性且模型反演非常耗时, 不利于大区域 *LAI* 产品生产。

针对上述缺陷, Kouiti Hasegawa 等结合能够表征植被冠层特征的热暗点指数 (hot spot-dark spot index, *HDS*, 详见 1.1) 和 *NDVI* 提出了具有二向反射特性的归一化热点植被指数 (normalized hotspot-signature vegetation index, *NHVI*), 并利用近红外波段计算 *HDS* 构建 *NHVI* 用于针叶林 *LAI* 估测研究。经验证 *NHVI* 和 *LAI* 的线性关系要优于 *NDVI*^[14]。

鉴于 *SAVI* 和 *EVI* 对土壤背景的修正作用及其对植被冠层结构的敏感性, 本文构建了具有二向反射特性的土壤调节型热点植被指数 (soil-adjusted hotspot-signature vegetation index, *SAHVI*) 和增强型热点植被指数 (enhanced hotspot-signature vegetation index, *EHVI*), 并利用北京小汤山试验区冬小麦地面实测光谱指数对所构建的 2 个指数进行验证。

收稿日期: 2011-03-29 修订日期: 2011-11-23

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划资助 (2010CB950603); 公益性行业 (气象) 科研专项经费 (GYHY201006042); 国家自然科学基金 (40971202); 国家自然科学基金 (41001209); 欧盟项目 CEOP-AEGIS (FP7-ENV-2007-1 Grant nr. 212921)

作者简介: 陈瀚阅 (1985-) 女, 汉族, 福建莆田人, 博士生, 研究方向植被定量遥感研究, 北京 中国科学院遥感应用研究所, 100101。

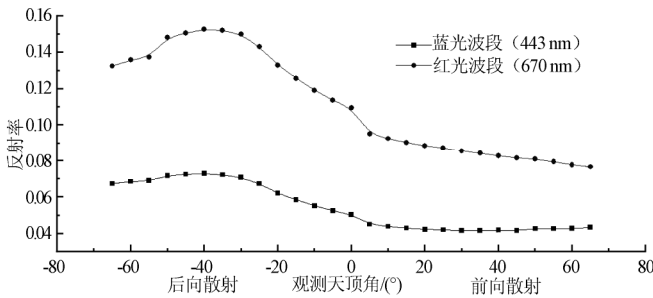
Email: chenhanyue.420@hotmail.com

*通信作者: 牛铮, 男, 北京人, 研究员, 研究方向为定量遥感。北京 中国科学院遥感应用研究所, 100101。Email: niuz@irsa.ac.cn

1 研究方法

1.1 热暗点指数 (HDS)

热点和暗点是植被冠层方向反射模型的最主要特性之一。热点 (hot-spot) 是指观测方向与太阳入射方向同侧即后向散射区域存在的反射率最强点^[15] (图 1 观测角度-40°处), 而暗点 (dark-spot) 是指观测方向与入射方向异侧即前向散射区域存在的反射率最弱点。图 1 为太阳天顶角接近 40°时小麦冠层主平面内红光和蓝光波段二向反射率值变化情况。



注: Blue、Red 分别为蓝光、红光波段主平面多角度反射率。

图 1 主平面内红光和蓝光波段多角度反射率值变化情况

Fig.1 Reflectance changes of red and blue bands with different zenith angles

主平面内反射率的变化受冠层光照叶片和阴影叶片数量变化的影响很大^[9-10,16], 表现在热暗点指数 (HDS) 上更为明显^[16]。热暗点指数计算公式如 (1)

$$HDS = (\rho_{HS} - \rho_{DS}) / \rho_{DS} \quad (1)$$

式中, HDS 为热暗点指数, ρ_{HS} 为热点反射率, ρ_{DS} 为暗点反射率。HDS 随热暗点反射率落差的增大而增大, 表征了冠层表面的粗糙程度。因此, HDS 与冠层结构 (例如植物叶片空间分布) 有关。有研究证明 HDS 与聚焦指数 (取决于叶片空间散布模式) 呈负线性相关^[16]。

1.2 土壤调整型热点植被指数 (SAHVI) 和增强型热点植被指数 (EHVI) 计算

通过 NDVI 和 HDS 联合所构建的归一化热点植被指

数 NHVI, 不仅表现了冠层内叶片的反射光谱特性 (NDVI 特性), 而且表征了植被冠层结构和空间分布特征 (HDS 特性), 计算公式如 (2)^[14]

$$NHVI = NDVI \times HDS \quad (2)$$

HDS 是通过光合有效辐射吸收比例 (FAPAR) 间接影响 LAI 和 NDVI 之间的关系^[14], 而 FAPAR 与多种植被指数呈现出良好的线性关系^[17-19]。因此, 可以联合 HDS 和其它形式单一方向的植被指数 (本文统称为 vegetation index, VI) 构建具有二向反射特性的热点植被指数 (本文统称为 hotspot-signature vegetation index, HVI), 即计算公式推广如式 (3)

$$HVI = VI \times HDS \quad (3)$$

鉴于 SAVI 和 EVI 对土壤背景的修正作用, 且 EVI 对冠层结构参数较 NDVI 更敏感^[8], 联合 HDS 具备突出植被指数二向反射特性的潜力, 本研究选择 SAVI 和 EVI 分别联合 HDS 构建 SAHVI 和 EHVI。

另外, 不同波段对太阳辐射能吸收反射特征的差异导致计算的 HDS 与植被结构参数的相关程度存在差异。据调查, 针对加拿大南部研究区域部分森林样本点, 基于 670 nm (红光) 得到的 HDS 与叶面积密度的线性相关性要优于 865 nm (近红外)^[16]。HDS 是用来表征叶片空间分布模式, 与探测波段无关, 因此可以采用近红和红光以外其它波段的热暗点反射率计算 HDS, 并选择对植被结构参数变化较敏感的 HDS 参与构建 HVI。除了红光和近红外波段外, 处于叶绿素反射峰的绿光波段和吸收谷的蓝光波段对叶绿素含量亦有较好的敏感性^[20-21]。因此本研究拟选取蓝光 (443 nm), 绿光 (550 nm), 红光 (670 nm), 近红外 (864 nm) 4 个波段热暗点反射率计算 HDS, 通过各自与 LAI 的关系对比, 选取对 LAI 敏感性较强的 HDS 参与 HVI 构建。VI 由垂直观测的红光、蓝光、近红外反射率求得。VI 和 HVI 具体计算式见表 1。

表 1 单一方向植被指数 (VI) 和具有二向反射特性植被指数 (HVI) 计算公式

Table 1 Algorithms of different single directional vegetation indices (VI) and hotspot-signature vegetation indices (HVI)

光谱植被指数	VI 计算公式	HVI 计算公式
归一化植被指数 (NDVI)	$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$	$NHVI_{waveln} = NDVI \times HDS_{waveln}$
增强型植被指数 (EVI) ^[8]	$EVI = \frac{2.5(\rho_{nir} - \rho_{red})}{1 + \rho_{nir} + 6\rho_{red} - 7.5/\rho_{blue}}$	$EHVI_{waveln} = EVI \times HDS_{waveln}$
土壤调节型植被指数 (SAVI) ^[6]	$SAVI = \frac{(\rho_{nir} - \rho_{red})(1 + 0.5)}{\rho_{nir} + \rho_{red} + 0.5}$	$SAHVI_{waveln} = SAVI \times HDS_{waveln}$

注: ρ_{nir} , ρ_{red} , ρ_{blue} 分别为近红外、红光、蓝光波段垂直观测的反射率值, HDS_{waveln} ($waveln=443, 550, 670, 864$ nm) 表示波长为 $waveln$ 的波段构建的 HDS, $NHVI_{waveln}$ ($EHVI_{waveln}$, $SAHVI_{waveln}$) 表示联合 HDS_{waveln} 和 $NDVI$ (EVI , $SAVI$) 构建的 $NHVI$ ($EHVI$, $SAHVI$)。

1.3 地面试验

试验数据为 2004 年 4—6 月在北京小汤山精准农业示范基地定点测量的冬小麦冠层二向反射率数据和 LAI。试验采用美国 ASD 便携式野外光谱仪测定小麦冠层反射率数据, 主平面观测角度范围由后向 65°至前向 65°, 角度间隔 5°。光谱测定分别在冬小麦的返青期、拔节期、

孕穗后期、灌浆期、乳熟期及腊熟期几个时期定点进行。叶片采样与光谱测定同目标同步或准同步, 采用叶重法测量叶面积指数。

选择太阳天顶角在 40°左右观测的 443 nm (蓝光), 550 nm (绿光), 670 nm (红光), 864 nm (近红外) 4 个波段主平面观测二向反射率数据参与研究, 样本数据

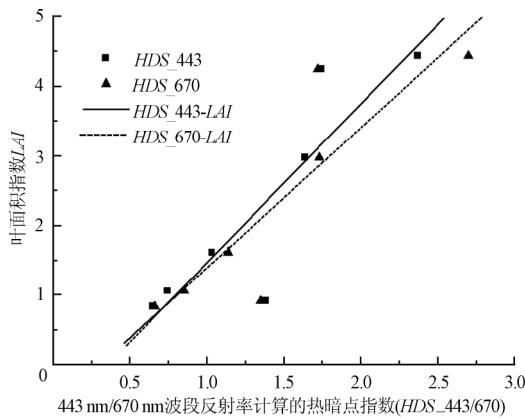
详细信息见表 2。由于试验限制，样本点比较匮乏，但 2 种小麦类型样本点所占比例相近，且观测时刻涵盖各生长期，LAI 值范围 0.84~4.44，具有一定的代表性。

表 2 试验样本数据详细信息
Table 2 Precise information of each plot

观测日期	太阳天顶角/(°)	小麦品种	实测 LAI
2004-06-09	39.004	9507	0.84
2004-06-09	39.6372	京 411	0.92
2004-04-01	39.1641	9507	1.06
2004-05-30	39.1394	京 411	1.62
2004-05-20	39.8185	9507	2.98
2004-04-17	39.095	京 411	4.25
2004-05-03	40.6263	京 411	4.44

1.4 热暗点选定

针对所有观测数据，热点定为后向散射区域与太阳天顶角同向的观测点。前向散射区域内，暗点并无



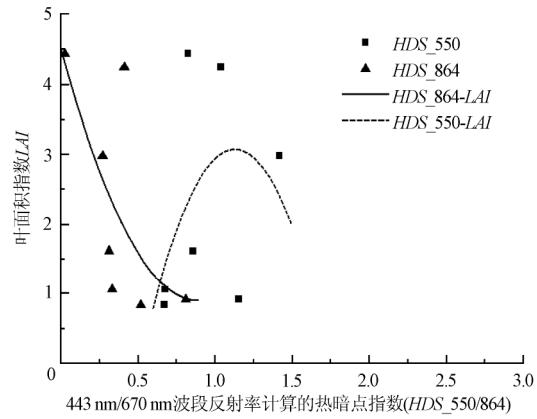
a. HDS_443/670 与 LAI 最优拟合模型

固定点^[16]，选择前向散射区域内反射率最小值作为暗点反射率。

2 结果与分析

2.1 不同波段反射率计算的 HDS 对 LAI 敏感性分析

图 2 为太阳天顶角接近 40°时，观测的不同波段反射率计算的 HDS (HDS_{wavlen}) 与 LAI 关系对比，图中曲线表示各 HDS_{wavlen} ($wavlen=443, 550, 670, 864$) 与 LAI 的最优拟合模型。图 2a 为 HDS_{443} 和 HDS_{670} 值基本随 LAI 增长而增大，动态变化明显。随着小麦的生长，小麦叶片分布越集聚（聚焦指数越小），叶片间相互遮挡的概率较叶片均匀分布的情况就越大，带来前向散射区域观测到的光照组分减少，阴影组分增大，进而导致暗点反射率降低，HDS 随之增大。这与 HDS 与聚焦指数负线性相关是一致，表明 $HDS_{443/670}$ 与小麦冠层结构有一定关系。



b. HDS_550/864 与 LAI 最优拟合模型

注：HDS_443, 550, 670, 864 表示波长为 443, 550, 670, 864 nm 的波段计算的 HDS。

图 2 不同波段反射率计算的 HDS (HDS_{wavlen}) 与 LAI 关系对比

Fig.2 Comparison of relationship between HDS calculated by reflectance of different bands (HDS_{wavlen}) and LAI

图 2b 为 HDS_{550}/HDS_{864} -LAI 关系对比结果，相对于 $HDS_{443}/670$ ， $HDS_{550}/640$ 较为分散，与 LAI 关系不明确，并存在随 LAI 负增长的点。究其原因，一方面可能与样本点较少和实验测量误差有关；另一方面因为本身“热点”效应在红光波段比近红外波段更显著，蓝光、红光波段对太阳辐射以吸收为主，多次散射作用很小，导致阴影处反射率更低，对 HDS 值的直接影响更大，但绿光波段对叶绿素的强反射，以及近红外波段受到多次散射的影响，削弱了热暗点之间反射能量的对比。通过对 4 个通道 HDS 值对比，可以发现，同一样本点， $HDS_{443}/670$ 值普遍高于 $HDS_{550}/640$ ，整体数据的变化范围也相对较大 ($HDS_{443}/670$ 取值范围 0.6~2.7， HDS_{550} 为 0.3~1.4， HDS_{864} 为 0.1~0.8)，因此 $HDS_{443}/670$ 对 LAI 的敏感性要高于 $HDS_{550}/864$ ，能更好的区分植被结构特征。基于此，以下研究均选取 $HDS_{443}/670$ 参与 HVI 构建。

2.2 基于不同植被指数的 LAI 线性估算模型精度对比及分析

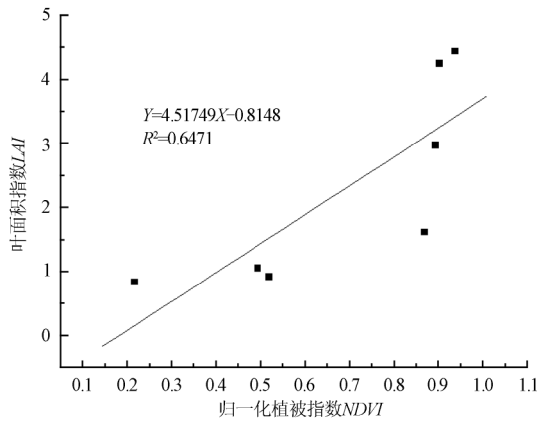
由图 3 可知，在单一方向的植被指数中， EVI -LAI、

$SAVI$ -LAI 线性回归模型精度要高于 $NDVI$ -LAI (见图 3a, c, e)； $NHVI$ ($EHVI$, $SAHVI$) 与 LAI 的线性关系明显优于 $NDVI$ (EVI , $SAVI$)， R^2 都达到 0.85 以上，相对于 $NHVI$ ， $EHVI$ 和 $SAHVI$ 与 LAI 的线性关系有进一步的提高， R^2 达到 0.9 以上 (见图 3d, f)；针对 $NHVI$ ， $EHVI$ ， $SAHVI$ ，基于 443 通道构建的 HVI 与 LAI 的线性关系都要略好于 670 通道；所有指数中，线性回归模型精度最高的是 $EHVI_{443}$ -LAI，其次为 $SAHVI_{443}$ -LAI。

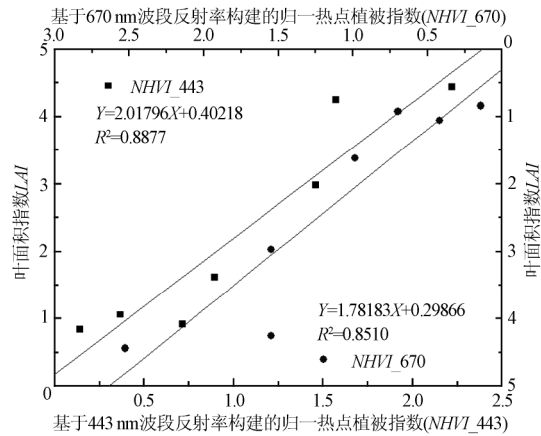
针对单一方向植被指数，当 $LAI > 2$ 时， $NDVI$ 值就出现了明显饱和现象 (见图 3a)， EVI 和 $SAVI$ 对此有所改善，但 LAI 大于 2 时与 LAI 的线性关系相对减弱 (见图 3c, e)，这主要是因为在高植被区可见光波段吸收趋于饱和，近红外波段的反射率 (ρ_{nir}) 对植被光谱指数起了主宰作用。图 4 为假设红光波段和蓝光波段都达到饱和值 (基于 Sail 模型模拟设为 0.01926)， $NDVI$ ， EVI ， $SAVI$ 对近红外波段反射率的一阶偏导，可以发现，3 种植被指数随 ρ_{nir} 的变化幅度都趋于饱和，尤其是 $NDVI$ 。而当 VI 变化速率变小时，叶片分布模式的差异使得 HDS 对 LAI 的敏感性并未减弱 (如图 2a)，因此 HVI 能将 LAI 大于 2 的样本点很好的区分开，一定程度

削弱了 LAI 估算中植被指数饱和现象, 线性相关模型精度明显提高。而 EHVI 和 SAHVI 与 LAI 的线性关系较 NHVI

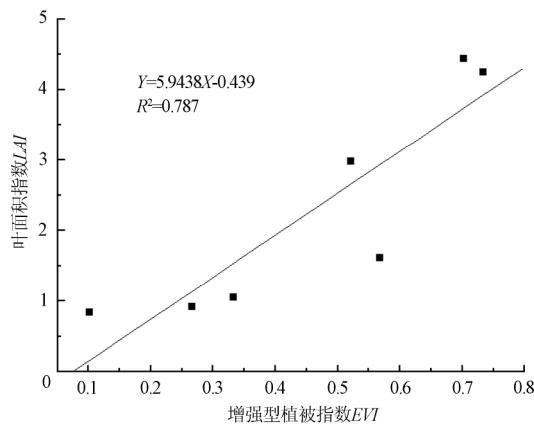
有进一步提高得益于高植被区 EVI 和 SAVI 随 ρ_{nir} 的变化幅度趋于饱和的速率比 NDVI 小 (见图 4)。



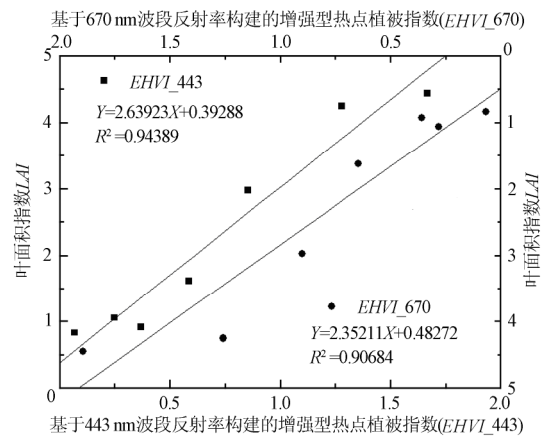
a. NDVI 与 LAI 线性关系模型



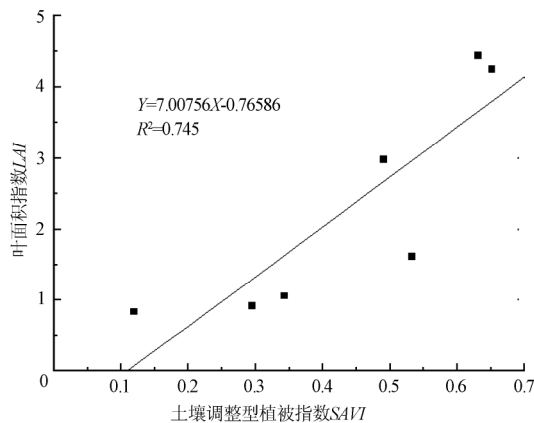
b. NHVI_443/670 与 LAI 线性关系模型



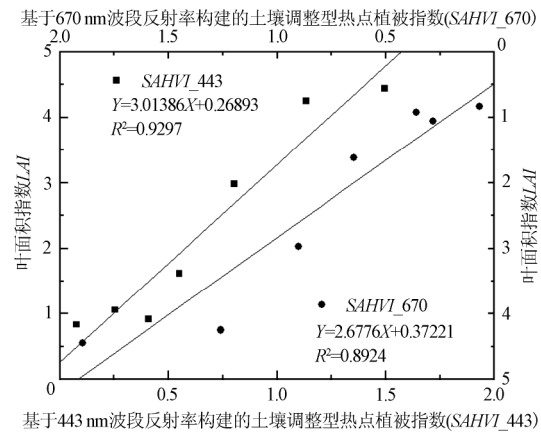
c. EVI 与 LAI 线性关系模型



d. EHVI_443/670 与 LAI 线性关系模型



e. SAVI 与 LAI 线性关系模型



f. SAHVI_443/670 与 LAI 线性关系模型

注: NHVI_443, 670 (EHVI_443, 670, SAHVI_443, 670) 表示联合 HDS_443, 670 nm 和 NDVI (EVI, SAVI) 构建的 NHVI (EHVI, SAHVI)。

图 3 不同植被指数与 LAI 线性关系

Fig.3 Linear relationship between different vegetation indices and LAI

3 讨论

利用植被指数与叶面积指数之间的统计模型估算叶面积指数是基于卫星遥感数据估算 LAI 的常用方法, 不少学者提出了各种各样的植被指数。本文将热暗点信息引入传统单一方向植被指数构建了土壤调整型热点植被指数 (SAHVI) 和增强型热点植被指数 (EHVI), 并

经地面试验验证, HVI 能有效缓解 LAI 估算中植被指数饱和现象。但如何将 HVI 用于卫星遥感数据 LAI 估算, 实现大面积 LAI 产品生产, 计算 HVI 关键是热点和暗点反射率数据的获取, 而多角度卫星数据往往很难准确的观测到热点和暗点反射率, 必须借助于模型模拟来实现热点信息的提取。已有学者通过模拟多角度数据的热点信息实现集聚指数的提取^[23-25]。Lacaze 等利用迭代的方

法反演了 GHOST (G-function and Hot Spot) 反射率模型^[22], 获得了热点和暗点的反射率, 基于集聚指数与 *HDS* 之间的线性回归关系模型, 利用 *POLDER* 数据实现了集聚指数提取^[16]。Leblanc 等利用 *POLDER* 数据基于 5-scale 模型的简化版 *FLAIR* 模型模拟了冠层的热点和暗点获得了像元叶片集聚指数^[23]。Chen et al 等基于热点效应模型结合 *POLDER* 多角度数据获得了全球归一化热点暗点指数 (normalized difference hot spot dark spot, *NDHD*), 从而反演获得了全球叶片集聚指数分布^[24]。此外, *RossThick-LiSparse* 模型^[25-26]等 *BRDF* 模型也可以基于原有多角度数据模拟热暗点反射率。与集聚指数类似, 通过模型模拟得到热暗点反射率, 利用 *HVI* 与 *LAI* 之间的回归模型, 即可将 *HVI* 用于遥感数据的 *LAI* 估算。但目前集聚指数反演多是基于 *POLDER* 数据完成, 空间分辨率偏低 (星下点约为 6 KM), 数据不连续。*MISR* 提供了地表 9 个角度的同时观测, 数据从 2000 年开始延续至今, *MODIS BRDF/Albedo* 产品 (*MOD43B1*) 提供 500 m 分辨率 *RossThick-LiSparse* 模型参数, 这些都为基于 *HVI* 获取公里像元级叶面积指数的动态信息提供数据保证, 从而真正使叶面积指数在生态系统模拟中发挥作用。

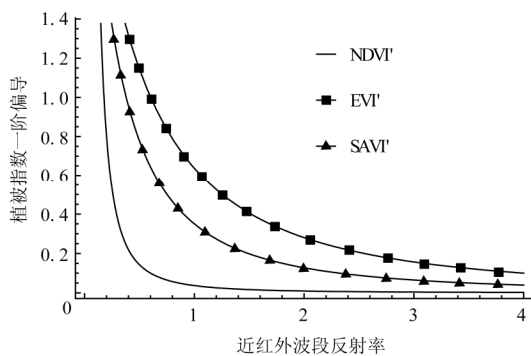


图 4 归一化植被指数 (*NDVI*) /增强型植被指数 (*EVI*) /土壤调整型植被指数 (*SAVI*) 对近红外波段反射率 (ρ_{nir}) 一阶偏导数
Fig.4 *NDVI/EVI/SAVI* on first order partial derivative of ρ_{nir}

4 结 论

本文基于 *NHVI* 构建原理, 联合 *EVI*, *SAVI* 和 *HDS* 建立了具有二向反射特性的 *EVI* (*EHVI*) 和 *SAVI* (*SAHVI*), 经冬小麦地面试验验证新型植被指数与 *LAI* 线性关系。结果表明: 由 2 个处于吸收谷的波段 (蓝光和红光波段) 计算的 *HDS* 对植被冠层参数的敏感性要高于 2 个处于反射峰的波段 (绿光和近红外波段); *EHVI*_{443/670}、*SAHVI*_{443/670} 与 *LAI* 的线性关系要优于 *EVI* 和 *SAVI*, 能有效克服 *LAI* 估算中植被指数饱和现象, 且估算精度较 *NHVI* 有了进一步提高, 由此得出 *HVI* 具备提高 *LAI* 估测精度的潜力。此外, 本研究完全基于地面实测数据进行带有一定的局限性, 今后可以借助核驱动模型的发展, 实现基于多角度遥感数据模拟 *HDS* 和 *HVI*, 从而为 *HVI* 推广应用到遥感数据的 *LAI* 产品生产提供机遇。

[参 考 文 献]

- [1] 蒙继华, 吴炳方, 李强子. 全国农作物叶面积指数遥感估算方法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 160—167. Meng Jihua, Wu Bingfang, Li Qiangzi. Method forest imating crop leaf area index of China using remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 160—167. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨峰, 范亚民, 李建龙, 等. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 237—243. Yang Feng, Fan Yamin, Li Jianlong, et al. Estimating LAI and CCD of rice and wheat using hyperspectral remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 237—243. (in Chinese with English abstract)
- [3] Baret F G, Guyot. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. Remote Sensing of Enviroment, 1991, 35(2/3): 161—173.
- [4] 覃文汉, 项月琴. 植被结构及太阳/观测角度对 NDVI 的影响[J]. 环境遥感 (中国), 1996, 11(4): 285—290. Qin Wenhan, Xiang Yueqin. Influence of vegetation structure and Sun/view geometry on NDVI[J]. Remote Sensing of Enviroment(China), 1996, 11(4): 285—290. (in Chinese with English abstract)
- [5] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric[J]. Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541—1552.
- [6] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (*SAVI*)[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295—309.
- [7] Kaufman Y J, Tanré D. Atmospherically resistant vegetation index (*ARVI*) for EOS-MODIS[J]. IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing, 1992, 30(2): 261—270.
- [8] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 59(3): 440—451.
- [9] Chen J M, Liu J, Leblanc S G, et al. Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 516—525.
- [10] Gao F, Schaaf C B, Strahler A h, et al. Detecting vegetation structure using a kernel-based *BRDF* model[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(2): 198—205.
- [11] Brown de, Colstoun E C, Walthall C L. Improving global scale land cover classifications with multi-directional polder data and a decision tree classifier[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(4): 474—485.
- [12] 刘照言, 马灵玲, 唐伶俐. 基 *SAIL* 模型的多角度多光谱遥感 *LAI* 反演[J]. 干旱区地理, 2010, 33(1): 93—97. Liu Zhaoyan, Ma Lingling, Tang Lingli. Inversion of LA I based on *SAIL* model with multi-angle and multi-spectral remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(1): 93—97. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李淑敏, 李红, 孙丹峰, 等. *PROSAIL* 冠层光谱模型遥感反演区域叶面积指数[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10): 2725—2729.

- Li Shumin, Li Hong, Sun Danfeng, et al. Estimation of regional leaf area index by remote sensing inversion of PROSAIL canopy spectral model[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(10): 2725—2729. (in Chinese with English abstract)
- [14] Kouiti Hasegawa, Hiroshi Matsuyama, Hayato Tsuzuki, et al. Improving the estimation of leaf area index by using remotely sensed NDVI with BRDF signatures[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 514—519.
- [15] 梁顺林, 范闻捷译. 定量遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 59.
- [16] Lacaze R, Chen J M, Roujean J L, et al. Retrieval of vegetation clumping index using hot spot signatures measured by POLDER instrument[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(1): 84—95.
- [17] 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.
- [18] Sellers P J. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21(2): 143—183.
- [19] Wiegand C L, Richardson D E, Escobar A H, et al. Vegetation indices in crop assessments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35(2/3): 105—119.
- [20] Gitelson A A, Kaufman Y J. MODIS NDVI Optimization To Fit the AVHRR Data Series--Spectral Considerations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 343—350.
- [21] Gitelson A A, Stark R, Grits U. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2537—2562.
- [22] Lacaze R, Roujean J L. G-function and Hot Spot (GHOST) reflectance model-Application to multi-scale airborne POLDER measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76 (1): 67—80.
- [23] Leblanc S G, Chen J M, White H P. et al. Canada-wide foliage clumping index mapping from multiangular POLDER measurements[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2005, 31 (5): 364—376.
- [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] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. *J. Geophys. Res.* 1992, 97 (D18): 20455—20468.
- [26] Li X, Strahler A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing[J]. *IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing*. 1992, 30 (2): 276—292.

Estimation of winter wheat LAI using hotspot-signature vegetation indices

Chen Hanyue^{1,2}, Niu Zheng^{1*}, Huang Wenjiang³, Huang Ni, Zhang Ying^{1,4}

(1. *The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;* 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;* 3. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;* 4. *Center for National Spaceborne Demonstration, China National Space Administration, Beijing 100101, China*)

Abstract: Leaf area index (LAI) is often retrieved from mono-angle remote sensing, the main weaknesses of which are the saturation limits at intermediate values of LAI and lacking structure information. Given the above deficiencies, two new vegetation indices, Soil Adjusted Hotspot-signature Vegetation Index (SAHVI) and Enhanced Hotspot-signature Vegetation Index (EHVI), were proposed for a better quantitative estimation of LAI. To obtain the new indices, we adjusted at-nadir Enhanced Vegetation Index (EVI) and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) to incorporate Hot-Dark Spot (HDS) index respectively that represents spatial distribution pattern of leaves. Next, the red, near-infrared, blue and green bands were exploited to calculate the respective HDS indices. Four HDS indices were compared for correlation with increasing LAI and those relatively more sensitive to LAI variability were then selected to construct SAHVI and EHVI. At last, the linear relationships between the new indices and LAI were investigated based on in-situ measurements of bi-directional reflectance and LAI from winter wheat. It was found stronger correlations between SAHVI, EHVI, NHVI and LAI than between EVI, SAVI, NDVI and LAI. Better resistance to saturation limits were both observed for SAHVI and EHVI.

Key words: remote sensing, spectrum analysis, vegetation index, leaf area index, bi-directional reflectance, hot-spot-dark-spot index