基于方向反射率的大尺度叶面积指数反演算法及其验证*

唐世浩[1,2] 朱启疆[2] 孙 睿[2]

1. 国家气象局卫星气象中心研究所，中国遥感卫星辐射量和定标重点开放实验室，北京 100081；
2. 北京师范大学遥感与GIS研究中心，遥感科学国家重点实验室，北京 100875

摘要 提出了一种新的叶面积指数反演方法，该算法尝试采用不同于传统遥感反演方法的思路和架构，借鉴了地面观测叶面积指数的原理和方法，首先从叶面积指数的定义出发推导出叶面积指数与方向间隙率的关系，然后通过遥感BRDF产品和大尺度方向间隙率算法获得方向间隙率信息，最终通过角度积分得到大尺度*LAI*（叶面积指数）. 敏感性分析表明，该算法可以较好反映叶面积指数的相对分布信息，并采用长白山和黑河地区的地面观测数据对反演结果进行验证，为了解决高分辨率观测数据到低分辨率遥感数据的尺度转换问题，采用了与地面观测尺度相适应的高分辨率遥感数据进行过渡. 首先建立实测*LAI*与高分辨率反射率数据之间的经验关系，进而得到高分辨率的叶面积指数分布，再利用高分辨率叶面积指数产品通过面积加权，获得对应低分辨率像元的*LAI*值. 验证结果表明，算法具有较高的精度.

关键词 叶面积指数 遥感 反演 BRDF 间隙率

叶面积指数是陆地生态系统的一个十分重要的参数，它和蒸散、冠层光截获、地表净第一性生产力、能量交换等密切相关，是所有描述地表和行星边界层之间能量、物质(水汽和CO_2等)、动量通量交换模型的基本参数. 如何通过遥感手段获得冠层叶面积指数信息对于全球变化及其区域响应研究具有重要意义[1].

遥感反演叶面积指数的方法大致可分为两类：一类是基于植被指数的反演方法，主要是通过建立植被指数与叶面积指数之间的经验关系来反演叶面积指数. 目前用得比较多的植被指数有标准化差值植被指数(*NDVI*)和比值植被指数(*SR*)，其他植被指数要么形式比较复杂，需要参数过多，要么与叶面积指数(*LAI*)关系不明显，在大面积*LAI*反演中用得不多. 但*NDVI*和*SR*在消除土壤背景影响方面的能力较差，而且*NDVI*的饱和点较低，很容易达到饱和，在*LAI*较大时反应不灵敏. 此外，*NDVI*，SR与叶面积指数之间的经验关系随地域、植被类型、生长季等的变化而变化，将这些经验关系用于遥感像元尺度反演时会带来很大的误差. 与其他方法相比，经验关系所能利用的信息量也十分有限.

另一类反演*LAI*的方法是基于遥感物理模型的反演. 由于遥感物理模型的参数具有明确的物理含义，是反演研究的重点. 对于基于遥感物理模型的反演方法来说，其反演精度与所用模型息息相关，因此高精度的遥感物理模型是成功反演的关键. 了解各类遥感物理模型的特点和优势对于反演具有重要意义. 遥感物理模型按其理论基础可分为混浊介质模型、几何光学模型、混合模型和数值模拟模型

2005-07-20 收稿，2005-10-18 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号：40301034，40271081)、中加合作CIDA和国家重点基础研究发展规划(批准号：G2000077900)资助项目

E-mail：tangshh@nsmc.cma.gov.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4大类.

遥感物理模型的反演方法主要可分为传统的计算机迭代的反演方法、查找表法、杂和方法(如神经网络法等)几种. 传统的计算机迭代的方法计算量较大，不适合逐像元反演，对于大数据集来说，需要简化模型或算法，但简化往往是以牺牲反演的精度为代价.

查找表法的出现在一定程度上解决了传统计算机迭代方法面临的问题. 查找表法预先通过前向模型构造表格，将反射率与待反演参数直接联系起来，这样在反演时只需在表格中进行查找和内插等操作即可实现参数反演. 但有时为了获得高精度，表的维数必须足够大，必然导致在线搜索速度降低. 而且，对于查找表方法来说，许多参量必须事先固定，例如在 MODIS/MISR 算法中[2]，所有冠层被分为6类. 对于每一类，一些变量被作为常数，用其代表性值代替，而实际上这些参量不仅可能变化很大，而且对反射率的影响也很大.

杂和方法是遥感物理模型与非参数统计反演模型结合. 通过前向模型产生数据集，用非参数统计模型(如神经网络、局部回归等方法)在方向反射和待反演参数之间建立联系. 与查找表方法相比，杂和方法的一个主要优势是关键变量的变化能够被有效解释. 虽然在产生模拟数据时可能用到很多变量，但杂和法可以将输出只与几个关键输入变量建立联系. 因为非参数统计模型可以对数据进行非线性投影，使一些因子被增强，而其他因子被压缩.

虽然遥感物理模型一般是数学可反演的，但这些模型无法提供辐射传输和冠层结构的真实描述，而且测量的反射率也有一定置信区间. 因此，对这些方法来说，反演过程并不总是惟一的，不同的生物变量可以导致相似的方向和波谱特征，从而导致解的不稳定.

总的来说，遥感叶面积指数的反演方法目前还处于探索阶段，尚缺少精度高、具有一定理论基础、简单实用的反演算法.

1 算法基本原理

LAI 可以表示为叶面积密度 μ 与冠层高度 z 的乘积，

$$\mathrm{LAI} = \mu \cdot z \,, \tag{1}$$

μ 可通过方向间隙率计算.

随机分布无限厚水平均匀冠层，θ_v 方向的平均间隙率 $T(\theta_v)$ 可以表示为路径长度 $S(\theta_v)$、叶面积密度 μ 和 θ_v 方向叶面积投影系数 $G(\theta_v)$ 的指数函数.

$$T(\theta_v) = \exp(-G(\theta_v)\mu S(\theta_v)) \,, \tag{2}$$

可以改写为

$$G(\theta_v)\mu = -\frac{\ln T(\theta_v)}{S(\theta_v)} = K(\theta_v) \,, \tag{3}$$

$K(\theta_v)$ 为以天顶角 θ_v 穿过冠层的探针单位路径长度与叶子的平均接触次数[3].

Miller 给出叶面积密度的解析解为[4]

$$\mu = 2\int_0^{\frac{\pi}{2}} K(\theta_v)\sin\theta_v \mathrm{d}\theta_v \,, \tag{4}$$

光线路径长度与天顶角的关系为

$$S(\theta_v) = z/\cos(\theta_v) \,, \tag{5}$$

根据 μ 与 z 得到 LAI 的表达式为

$$LAI = -2\int_0^{\pi/2} \ln(T(\theta_v))\cos\theta_v \sin\theta_v \mathrm{d}\theta_v \,, \tag{6}$$

对于多角度观测 θ_{vi}，$i = 1, \ldots m$ 采用上式的离散近似，叶面积指数可以采用如下形式计算，

$$\begin{aligned} LAI &= -2\sum_{i=1}^{m} \ln(T(\theta_{vi}))\sin\theta_{vi}\cos\theta_{vi}\Delta\theta_{vi} \\ &= -2\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\ln(T(\theta_{vij}))\right)\cos\theta_{vi}\sin\theta_{vi}\Delta\theta_{vi} \,, \end{aligned} \tag{7}$$

上式中，$\sum_{i=1}^{m}\sin\theta_{vi}\Delta\theta_{vi} = 1$，即 $\int_0^{\pi/2}\sin\theta_{vi}\mathrm{d}\theta_{vi} = 1$，相当于权重系数. 其中 m 为测量中采用的天顶角数，n 为测量中采用的方位角数. $\ln(T(\theta_{vi}))$ 取每个环中透过率对数的空间平均值. $\ln(T(\theta_{vi}))$ 不取平均透过率的对数，主要因为当冠层中存在叶面积密度不同的均匀区时，对这些区域透过率取平均会低估叶面积指

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数[5].

上述推导表明，通过方向间隙率信息，可以反演叶面积指数. 由于光线的可逆性，上式对于顶视和底视应该同样适用. 对于地面观测来说，方向间隙率可通过测量冠层顶部与底部的辐射比得到，但对于卫星传感器高度和尺度来说，这种做法显然不现实[5].

研究表明，*NDVI* 与间隙率间存在比较好的相关关系，当植被达到全覆盖后，*NDVI* 变化缓慢，在卫星传感器尺度可以利用 *NDVI* 的上述特性通过方向 *NDVI* 值近似得到方向间隙率信息，方向间隙率与方向 *NDVI* 之间的关系为

$$T(\theta,\vartheta,\phi) = 1 - \frac{NDVI(\theta,\vartheta,\phi) - NDVI_{\mathrm{back}}(\theta,\vartheta,\phi)}{NDVI_{\mathrm{sat}}(\theta,\vartheta,\phi) - NDVI_{\mathrm{back}}(\theta,\vartheta,\phi)}, \quad (8)$$

其中 $NDVI_{\mathrm{sat}}$ 为植被达到全覆盖时的 NDVI 值，$NDVI_{\mathrm{back}}$ 为背景的 NDVI 值. θ 为太阳天顶角，ϑ 为观测天顶角，ϕ 为相对方位角. $T(\theta, \vartheta, \phi)$ 为方向间隙率，在 0—1 之间变化. 当 *NDVI* 大于 $NDVI_{\mathrm{sat}}$ 时，令 $NDVI = NDVI_{\mathrm{sat}}$，表示植被已经达到全覆盖. 当 $NDVI < NDVI_{\mathrm{back}}$ 时，令 $NDVI = NDVI_{\mathrm{back}}$，此时 *NDVI* 主要受背景影响，间隙率为 1.

方向 *NDVI* 的定义如下[6]：

$$NDVI(\theta,\vartheta,\phi) = \frac{BRDF_{\mathrm{ir}}(\theta,\vartheta,\phi) - BRDF_{\mathrm{r}}(\theta,\vartheta,\phi)}{BRDF_{\mathrm{ir}}(\theta,\vartheta,\phi) + BRDF_{\mathrm{r}}(\theta,\vartheta,\phi)}, \quad (9)$$

其中 $BRDF_{\mathrm{ir}}$，$BRDF_{\mathrm{r}}$，分别是近红外和红光波段的 *BRDF* 值[7-11].

理论上说，每一植被类型、每一太阳和观测角度配置，都应确定一对饱和与背景 *NDVI* 值，但这样做不仅工作量巨大，而且对提高反演精度也不会有太大帮助. 对于同一植被类型来说，饱和与背景 *NDVI* 值随角度变化不会太大，因此，在实际反演中，确定一对饱和与背景 *NDVI* 组合即可.

值得指出的是，这里所说的饱和 *NDVI* 值是指当植被达到全覆盖时的 *NDVI* 值，相当于 *NDVI* 从快速变化到平稳变化的过渡点值，并不等同于最大 *NDVI*. 因为植被达到全覆盖时，由于多次散射的影响，*NDVI* 仍会缓慢增加. 全植被覆盖的 *NDVI* 值大概相当于叶面积指数为 3—5 时的 *NDVI*值.

饱和 *NDVI* 可以通过经验和模型模拟得到，也可通过统计实际方向 *NDVI* 值的方法获得. 模型模拟法首先模拟各地表覆盖类型 *NDVI* 与 *LAI* 的关系曲线，然后求出曲线的拐点值作为饱和 *NDVI*. 该方法比较简单、快速. 像元统计法统计各同类像元点最大方向 *NDVI* 值直方图，近似取同类像元点最大 *NDVI* 值的 90%作为饱和 *NDVI*. 理论上说，这种方法精度更高，但需要有足够多的样本支持，计算量也较大.

图 1 显示了通过统计法确定的饱和 *NDVI* 值和通过 5-scale 模型[12-14]确定的饱和 *NDVI* 变化范围. 可以看出，通过统计法确定的饱和 *NDVI* 基本落在模型模拟范围内.

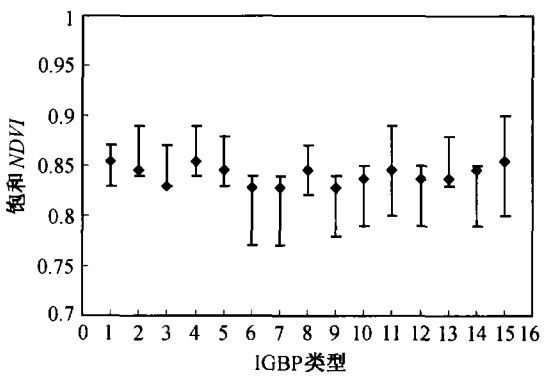

图 1 不同 IGBP 类型饱和 *NDVI*

采用(7)式计算得到的应为有效叶面积指数，计算实际叶面积指数时还要在有效叶面积指数的基础上考虑由于叶单元(叶或簇)在空间的聚集效应造成的影响. 有效叶面积指数 L_{ef} 与实际总叶面积指数 L_{t} 的关系为[15]

$$L_{\mathrm{ef}} = L_{\mathrm{t}} \cdot \Omega, \quad (10)$$

Ω 为聚集指数，是由植被基本单元的空间分布模式决定的.

不同 IGBP 类型的典型聚集指数见表 1：

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 不同IGBP类型的典型聚集指数

IGBP类型	类型名	聚集指数
1	常绿针叶林	0.6
2	常绿阔叶林	0.8
3	落叶针叶林	0.6
4	落叶阔叶林	0.8
5	混合林	0.7
6	郁闭灌丛	0.8
7	开放灌丛	0.8
8	有林草原	0.8
9	稀树草原	0.8
10	草地	0.9
11	永久湿地	0.9
12	农田	0.9
13	城市和建设用地	0.9
14	农作物和自然植被交错区	0.9
15	雪/冰	—
16	裸地或稀疏植被	—
17	水体	—

2 算法敏感性分析

在前述算法中，影响算法精度的主要因素是饱和*NDVI*和背景*NDVI*. 图2为根据BRDF观测值绘制的不同饱和与背景*NDVI*组合时的*LAI*等值线. 图中背景*NDVI*沿横坐标变化，饱和*NDVI*沿纵坐标变化. 从图中可以看出，背景*NDVI*变化对*LAI*计算结果影响很小. 在本例中背景*NDVI*从0变化到0.2，对*LAI*的影响不超过0.5. 而饱和*NDVI*对计算结果影响较大. 图中*LAI*越大，等值线越密集，纵坐标方向梯度越大，说明饱和*NDVI*对*LAI*的影响越大；而*LAI*较小时，等值线很稀疏，梯度很小，说明对*LAI*的影响较小. 上述结果

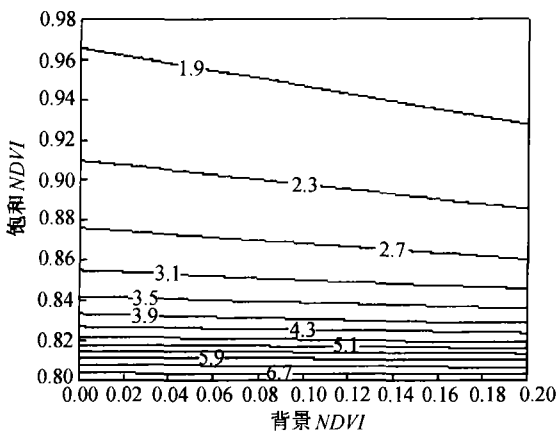

图2 饱和与背景*NDVI*对算法的影响

表明，饱和*NDVI*对*LAI*计算结果的影响较大，确定不当，可能会带来较大的绝对误差，但相对误差不至于太大. 这一特点对于了解*LAI*的相对分布无疑十分有利. 另外，在有实测资料的情况下，通过实测资料反馈进一步修正初始的饱和与背景*NDVI*值可以极大提高算法精度.

3 算法验证

地面试验主要选择两个试验区(图3)：位于中国东北部的吉林长白山自然保护区和位于中国西北部的祁连山区黑河上游肃南裕固族自治县段.

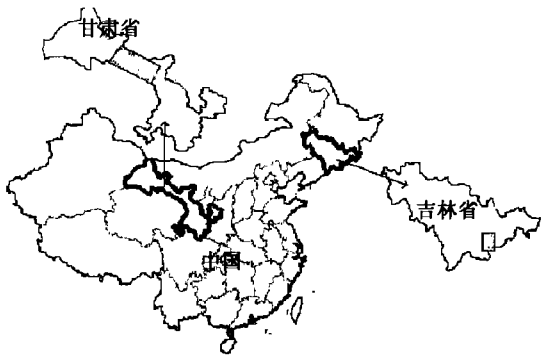

图3 试验区

长白山自然保护区随着海拔高度变化，从海拔720—2600 m，可划分为层次鲜明、景观各异的4个垂直景观带. 海拔720—1100 m，是以红松林为主的常绿叶针叶树和榆树、黄波萝等针叶、阔叶混交林带. 海拔1100—1700 m，是暗针叶林带，主要以红松、云杉、冷杉、落叶松等针叶树为主. 海拔1700—2000 m，是亚高山岳桦林带，是暗针叶林带和高山苔原带的过渡带，乔木以岳桦为主，还有云杉、冷杉、落叶松、东北赤杨等. 海拔2000 m以上是高山苔原带，没有森林的分布. 长白山区实验点主要位于长白山自然保护区内，依海拔高度垂直分布，涵盖了保护区内的主要林型，每一林型结合遥感图像和当地实际情况选择3—5个疏密不同的样点进行观测. 样点分布情况见图4.

黑河上游地区共有16个采样点，沿黑河流域分布，所有样点均为青海云杉林.

本次试验用到的主要仪器是TRAC和激光叶面积指数仪. TRAC不仅使用间隙率数据，而且引入

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

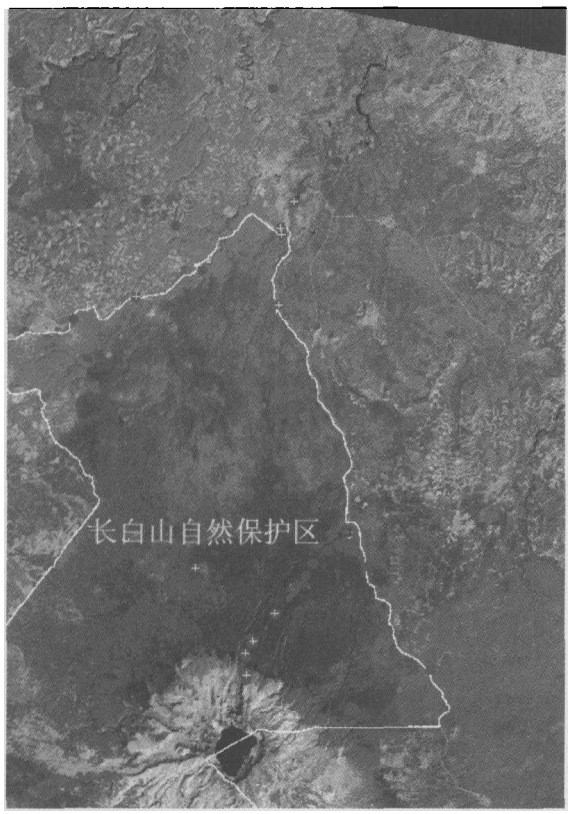

图4 长白山实验区样点分布图

了间隙尺度(大小)分布的概念，因而可以观测聚集指数(Ω). 有了聚集指数这个参数，叶面积指数的计算可以不用假设随机的叶片空间分布，从而减少从有效叶面积指数到实际叶面积指数的计算误差. 为获得簇内聚集指数(needle-to-shoot area rario)和元素宽度(element width)，实验区样方内树种被分为3类，即主要树种、次要树种、受迫树种，从每种树种树冠高位、中位、低位取3—9个叶元素(叶或簇)用于实验室分析. 详细数据处理方法参见文献[16，17].

由于MODIS像元尺度较大(1 km)，地面观测结果很难直接用于MODIS尺度产品的验证. 本文采用通过高分辨率产品进行过渡的验证方法. 地面观测尺度与高分辨率TM或ASTER像元尺度基本一致，因而可以通过回归建立高分辨率植被指数与地面实测LAI的相关关系，并进而获得高分辨率的叶面积指数分布信息. 再以高分辨率叶面积指数分布图为基础，找出感兴趣低分辨率像元对应的N个高分辨率像元及其叶面积指数，通过线性组份面积加权获得该低分辨率像元的叶面积指数.

低分辨率像元的叶面积指数通过下式计算

$$LAI_{\mathrm{L}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} LAI_{\mathrm{H}}(i) \ , \qquad (11)$$

其中LAI_{L}为低分辨率像元的叶面积指数，$LAI_{\mathrm{H}}(i)$为组成该低分辨率像元的第i个高分辨率像元的叶面积指数.

在黑河试验区，因林种比较单一，对高分辨率遥感图像来说，直接采用$NDVI$与LAI的关系即可获得较好的反演效果，而在长白山区，因林种较复杂，每个林种采样点少，$NDVI$与LAI的关系不明显，受林种影响较小的RSR与实测LAI的相关关系较好[18-19]. 验证过程如图5所示.

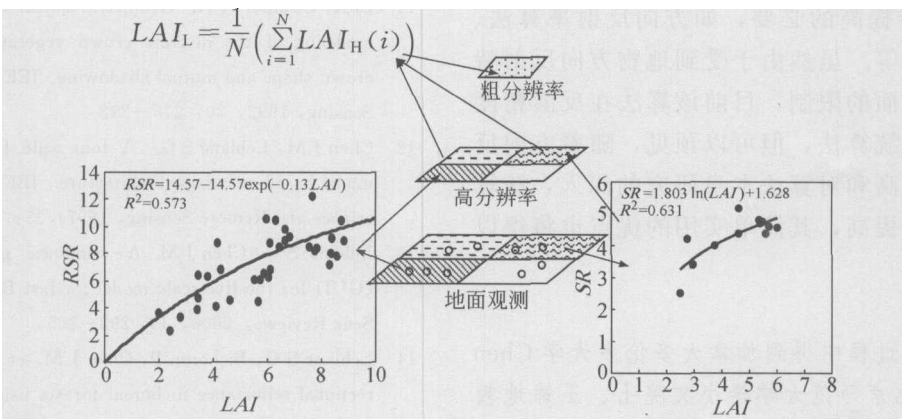

图5 验证过程

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

采用上述验证方法分别对MODIS叶面积指数产品和本文算法结果进行验证. 结果表明，与MODIS叶面积指数产品相比，本算法反演结果和地面实测*LAI*相关关系更好(表2).

表2 验证结果

算法	相关系数	标准差	样本数
Modis产品	0.464	2.095	48
本算法	0.702	0.885	48

4 结论

大尺度叶面积指数反演，一直是遥感地表要素反演的重点和难点之一. 常用的反演方法，如经验关系法、模型反演法等在应用到较大遥感尺度时都存在这样或那样的问题. 一方面，大尺度叶面积指数的地面观测资料很难直接获取，由于混和像元等问题的影响，用小尺度观测资料与大尺度遥感数据建立经验关系显然缺乏可靠性. 模型反演法的缺陷也十分明显，首先是目前还没有比较完善的适用于大尺度的遥感前向模型，其次是遥感模型的参数设置比较复杂，有些参数实际上很难获取. 而且要提高反演精度，需要考虑各种情况，并构建庞大的查找表支持，这对于普通的遥感客户和应用来说，显然是无法承受的. 而本文提出的大尺度*LAI*遥感反演算法，既吸收了植被指数方法简单实用的优点，又利用了地物的方向反射特性，而且具有一定的理论基础.

本文的更重要意义在于提供一种不同于传统*LAI*反演算法的思路和架构，在这个架构下，许多研究都有进一步提高的必要，如方向反射率算法、方向间隙率算法等. 虽然由于受到地物方向反射特性产品精度等方面的限制，目前该算法在反演精度上不见得优于传统算法，但可以预见，随着方向反射产品精度的提高和对算法本身研究的深入，该算法的精度会不断提高，其简单实用的优点也将得以充分发挥.

致谢 成文过程中得到加拿大多伦多大学Chen J. M. 教授、北京师范大学李小文院士、王锦地教授的指导和帮助，谨致谢忱.

参 考 文 献

1 Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for nonflat leaves. Plant Cell Environ, 1992, 15: 421—429

2 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. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(24): 32257—32276

3 Welles J M, Norman J M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. Agronomy Journal, 1991, 83: 818—825

4 Miller J B. A formula for average canopy density. Aust J Bot, 1967, 12: 141—144

5 Lang A R G, Xiang Y. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. Agric For Meteorol, 1986, 37: 229—243

6 李小文，高 峰，王锦地，等. 二向性归一化植被指数：概念及应用. 自然科学进展，2001，11(8)：819—823

7 Gao F Li X, Strahler A H, et al. Evaluation of the LiTransit kernel for BRDF modeling. Remote Sensing Reviews, 2001, 19: 205—224

8 Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 20455—20468

9 Wanner W, Li X, Strahler A H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. J Geophys Res, 1995, 100: 21077—21090

10 Lucht W, Schaaf, C B, Strahler A H, An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 977—987

11 Li X, Strahler A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30: 276—292

12 Chen J M, Leblanc S G. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35: 1316—1337

13 Leblanc S G, Chen J M. A windows graphic user interface (GUI) for the five-scale model for fast BRDF simulations. Rem Sens Reviews, 2000, 19: 293—305

14 Leblanc S G, Bicheron P, Chen J M, et al. Investigation of directional reflectance in boreal forests using an improved 4-scale model and airborne POLDER data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1396—1414

15 Chen J M, Josef C. Quantifying the effect of canopy architecture

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1995, 33(3): 777—787

16 Chen J M, Rich P M, Gower S T, et al. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(24): 29429—29444

17 Leblanc S G, Chen J M. A practical method for correcting multiple scattering effects on optical measurements of leaf area index. Agric For Meteorol, 2001, 110: 125—139

18 Brown I, Chen J M, Leblanc S G, et al. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(1): 16—25

19 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. Remote Sensing Environ, 2002, 80: 165—184

我国模式植物拟南芥研究在国际上占有一席之地

植物功能基因组学是当前植物学最前沿的领域之一，由于基因功能的研究涉及专利和知识产权，对一个国家的长远发展起战略性的作用，所以国际竞争日益加剧. 美国1990年启动“植物基因组学”计划，2000年底公布了模式植物拟南芥的全部序列. 2001年开始，美国“2010年计划”又全面启动，目标是到2010年确定拟南芥中所有基因的功能. 由于拟南芥是国际上第一个完成全部基因组序列测定的高等植物，利用其作为模式植物进行植物功能基因组学研究，大量涉及重要生命过程的基因被发现. 我国是农业大国，同时面临人口、粮食、环境和资源等多方面的压力，加强植物学研究，发现和克隆重要基因并加以应用是解决上述困难和矛盾的一条重要途径.

为了尽快使我国在国际植物功能基因知识产权竞争中拥有一席之地，从而为我国的农业生产和社会经济服务，国家自然科学基金委员会生命科学部、国际合作局在专家评审的基础上，于2001年快速启动了“拟南芥全部转录调控因子蛋白组学研究”重大国际合作研究项目，投入经费1200万，资助北京大学、中国科学院遗传研究所和美国耶鲁大学开展合作，希望通过本项目推动我国的相关研究.

经过3年多的努力，中美双方科学家发挥了各自的优势，在较短的时间内，取得了重要进展：

(1) 克隆了1303个转录调控因子基因，占拟南芥全部转录因子的85%，是世界上获得转录因子基因最多最完整的国家，已将其中的1282个提交到拟南芥生物研究中心(ABRC). 根据ABRC提供的数据，我国所提供的克隆已成为全世界拟南芥研究中需求量位居第二的克隆组(转录因子家族是需求量最大的)，成为世界植物科学界了解中国的重要窗口.

(2) 建立了大规模蛋白质表达试验的新方法，纯化、分离并验证了获得的融合蛋白的质量；集中表达了其中9个家族(如AP2/EREBP, MYB, bHLH, HMG, TCP, HSF, SBP, TUB, EIL等)的533个转录调控因子基因，发现超过70%的载体能表达出产生足够杂交信号的蛋白质；制作了相关的蛋白质芯片，为转录因子网络调控的研究奠定了良好的基础.

(3) 深入研究了AP2/EREBP和MYB两个最大的转录因子基因家族的表达调控规律；解析了At-WRKY1蛋白C-末端晶体结构及其与靶DNA的结合模式.

通过本项目的实施，使我国在拟南芥研究尤其是转录因子方面在国际上占有了一席之地，建立了进行模式植物拟南芥研究的平台，为我国科学家进行转录因子和相关研究奠定了基础，促进了国内相关单位之间的合作，培养了一批年轻的人才，极大地提高了我国拟南芥分子生物学研究的水平，提升了基础植物学研究在国际上的影响力，推动了我国植物科学的发展.

(供稿：温明章 陈 淮)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net