

应用北京一号卫星数据监测高分辨率 叶面积指数的空间分布*

金慧然¹ 陶欣¹ 范闻捷^{1**} 徐希孺^{1,2} 李培军¹

1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875

摘要 利用“北京一号”卫星(高性能对地观测小卫星, DMC+4)可同步提供中分辨率多波段信息和高分辨率全色波段信息的优势, 选择冬小麦为研究对象, 在考虑太阳—冬小麦冠层—传感器三者的几何关系和作物群聚效应的基础上, 建立易于反演的植被冠层辐射模型, 实现了对冬小麦长势空间分布的监测, 并通过数值模拟和野外实验对模型进行了验证. 研究表明所采用的模型和反演方法是有效的, 为进一步研究 LAI 尺度效应打下了基础.

关键词 DMC+4 植被冠层辐射模型 LAI 空间分布

对作物播种面积和作物长势的监测是农业遥感的基本内容. 叶面积指数值 LAI 是判断作物生长状况的最基本的参数. 由于植被具有独特的波谱特征, 所以各类反演方法大都采用多光谱数据, 利用不同波段之间反射率的差异, 通过经验的或者物理模型获得作物的 LAI^[1-7]. 但是, 由于我国农业人口较多, 田块比较破碎, 如果采用中等分辨率(比如 TM 30 m 分辨率)或较低分辨率的遥感图像去估算作物的 LAI, 由于混合像元广泛存在, 反演误差会很大. 而较高分辨率的全色波段数据虽然可以在很大程度上避免了混合像元的影响, 甚至可以凭借目标的几何形态直接依靠目视判断而获得正确的作物播种面积, 但无法获得正确的叶面积指数值. 如何能既利用较低分辨率的多光谱数据在获取作物叶面积指数上的优势, 又能利用全色波段提供的高分辨率作物播种面积信息, 使两者优势互补, 得到高分辨率的作物 LAI 空间分布信息, 这就是本文试图要回答的问题.

DMC+4(disaster monitoring constellation +4)为解决这一问题提供了可能. DMC+4 于 2005 年 10 月 27 日北京时间 14:52 在俄罗斯普列谢茨克

(Plesetsk)成功发射, 轨道高度 686 km, 是一颗具有双遥感的对地观测小卫星. 中分辨率遥感器为 32 m 多光谱, 包括绿(520—620 nm)、红(630—690 nm)、近红(760—900 nm)三个波段, 幅宽 600 km, 重访周期 2—3 d; 高分辨率遥感器为 4 m 全色(500—800 nm), 幅宽 24 km, 重访周期约半年^[8,9]. 该星可以同时提供 32 m 分辨率的多光谱数据和 4 m 空间分辨率的全色波段数据, 两者具有相同的太阳—目标—遥感器三者的几何关系, 利用多光谱信息可以提取像元内平均 LAI 值, 而全色波段数据可以基本满足监测农作物播种面积的需要. 本文选择中国北方种植范围较广的冬小麦为研究对象, 在考虑了太阳—冬小麦冠层—传感器三者的几何关系和作物群聚效应的基础上, 建立了易于反演的植被冠层辐射模型, 通过反演实现对作物长势空间分布的监测. 作者采用 2001 年顺义野外实验数据和同步的 ETM 数据对模型的可靠性进行数值模拟试验, 再利用 DMC+4 2006 年 3 月山东泰安数据进行了实地验证, 获得了 4 m 分辨率的 LAI 分布图, 达到了两种遥感图像优势互补的目的, 结果表

2006-12-26 收稿, 2007-03-28 收修改稿

* 国家“八六三”计划(批准号: 2005AA133011XZ07)和国家自然科学基金(批准号: 40401036)资助项目

** 通信作者, E-mail: fanwj@pku.edu.cn

明本研究采用的模型和反演方法是有效的.

1 植被冠层辐射模型的建立

1.1 植被冠层辐射模型

选择在我国北方种植面积较广的冬小麦作为研究对象. 冬小麦播种都以垄为基础, 在沿垄的方向上具有连续性, 而在与垄垂直的方向上存在明显的离散特征. 可见冬小麦地是拥有连续与离散双重特征的对象, 因此所建的模型必须拥有双重特性, 为此将目标的反射辐射近似为一次散射(L^1)和多次散射(L^m)两项之和:

$$L = L^1 + L^m \quad (1)$$

由于几何光学模型描述植被二向性反射辐射特征较成功, 将它引入到本模型的一次散射计算. 虽然连续植被不像离散植被那样存在整块连续的光照区与阴影区, 但是实验表明传感器仍然能观测到光照的植被叶面和处于阴影状态下的叶面, 以及土壤光照面和土壤阴影面, 换言之, 光源(太阳)—目标—传感器三者之间的几何关系仍然是影响传感器所测亮度值的主要因素之一.

传感器接收到的一次散射辐射亮度 L^1 可表示为:

$$L^1 = K_g L_g + K_z L_z + K_c L_c + K_t L_t \quad (2)$$

其中 L_g , L_z , L_c 和 L_t 分别为地表光照面、地表阴影面、叶子光照面和叶子阴影面的反射辐射亮度^[10-12], 可表达为

$$\begin{aligned} L_g &= f_g (\mu_0 F_0 + E_d), L_z = f_g E_d \\ L_c &= f_c (\mu_0 F_0 + E_d), L_t = f_c E_d \end{aligned} \quad (3)$$

f_g 与 f_c 分别为地表与叶子的双向反射率分布函数, F_0 为太阳直射辐射通量密度, $\mu_0 = \cos s_s$, s_s 为太阳天顶角, E_d 为天空漫辐射的辐射通量密度. 此处, K_g , K_z , K_c 和 K_t 和分别代表地表光照面、地表阴影面、光照叶子投影面、阴影叶子投影面等面积在整个像元中所占的面积比例:

$$\begin{aligned} K_c + K_t &= \int_0^H (z, \nu) P_t(z, \nu) dz = \\ &= \int_0^H \frac{u(z)}{\mu_\nu} G(z, \nu) e^{-\frac{u(z)}{\mu_\nu} \cdot G(z, \nu) \cdot z} dz = \end{aligned}$$

$$1 - e^{-\frac{u}{\mu_\nu} \cdot G(z, \nu) \cdot H} = 1 - e^{-\frac{G(z, \nu)}{\mu_\nu} LAI} \quad (4)$$

其中 H 代表冬小麦冠层厚度, (z, ν) 代表射线沿视线方向(ν), 在 z 高度处与叶子碰撞的概率, $P_t(z, \nu)$ 代表沿视线方向, 由 $z=0$ 到深度 z 处的冠层孔隙率, $G(z, \nu)$ 为在 z 高度处叶子的 G 函数, $u(z)$ 为 z 高度处的叶面积体密度值, $\mu_\nu = \cos \nu$, ν 为视线天顶角, 本文假定 u 和 G 都不随高度而变, $LAI = u \cdot H$.

$$K_g + K_z = P_t(H, \nu) = e^{-\frac{u}{\mu_\nu} \cdot G(z, \nu) \cdot H} = e^{-\frac{G(z, \nu)}{\mu_\nu} LAI} \quad (5)$$

其中 $P_t(H, \nu)$ 代表沿视线方向整层冠层的孔隙率.

$$K_g + K_z + K_c + K_t = 1 \quad (6)$$

(6) 式表明上述两个表达式与直观物理概念相一致, 是合理的. 根据随机投影原理^[13,14]:

$$K_g = P_t(H, s_s, \nu) = e^{-LAI \left[\frac{G(z, \nu)}{\mu_s} + \frac{G(z, \nu)}{\mu_\nu} \cdot \overline{K}(s_s, \nu) \right]} \quad (7)$$

其中 s_s 代表太阳直射方向, $\mu_s = \cos s_s$, s_s 为太阳天顶角, $P_t(H, s_s, \nu)$ 代表地表双向(s_s 与 ν) 孔隙率, $\overline{K}(s_s, \nu)$ 表示叶子在视线方向(ν, ν) 与光线来向(s_s, s_s) 上的双重投影面积的重叠概率. 针对连续植被, Kuusk^[15] 和 Jupp^[13] 为 $\overline{K}(s_s, \nu)$ 的计算都提出过各自的模型, 但都比较复杂, 不利于反演. 事实上, 决定热点效应等非线性现象的主要动因是光源(太阳)—目标—传感器三者之间的几何关系, 本文提出如下简单的线性模型去近似复杂模型.

引入函数 ϕ , 其中 ϕ 为光线与视线之间的夹角. 在此我们用 ϕ 的大小去表达阴影效果, 对于行播作物而言, 各层叶面积之间的可视投影关系还受垄向影响, 而每个像元的平均垄向为未知数. 所以, 即使光源(太阳)—目标—传感器三者之间的几何关系为可知, 即对连续植被 ϕ 为可知, 但对于行播作物的等效 ϕ 值仍然是未知数. 定义 ϕ 取值如下: 当 $\phi=0$, $\phi(0)=1$; 当 $\phi=\pi$, $\phi(\pi)=2$; 当 $0 < \phi < \pi$ 时:

$$(\phi) = 1 + \frac{\phi}{\mu_s} \quad (18)$$

当 $\phi=0$ 时, 传感器处于热点位置, $\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} = \frac{G(s)}{\mu_s}$
 $= \overline{K}(s, \nu)$; 当 $\phi=$ 时, 叶面积在视线和射线方
 向上的投影面积不再重叠, $\overline{K}(s, \nu) = 0$, 并假定
 $\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} \approx \frac{G(s)}{\mu_s}$.

$$K_g = e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} \quad (9)$$

$$K_z = e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI} - e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} \quad (10)$$

相应地,

$$K_c = 1 - e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} \quad (11)$$

这样定义 (ϕ) 的理由是: 当 $\phi=0$ (即处于热点位置), 见不到处于阴影状态下的叶子, 则公式 (11) 能很好地表达上述情况. 随着 ϕ 的增加, 可视光照叶面逐步减小, 公式 (11) 仍然能表达上述变化, 虽然公式 (11) 并不能严格地表达实际行播作物的 K_c 随 ϕ 的变化过程, 但仍可作为一种近似.

$$K_t = \left(1 - e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI} \right) - \left(1 - e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} \right) = \frac{e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} - e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI}}{e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} - e^{-\frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI}} \quad (12)$$

事实已经证明, 遥感反演的叶面积指数值深受像元尺度影响, 尺度效应的主要产生根源在于像元内存在异质性, 或者说 LAI 空间分布的不均匀性, 所以在冠层尺度上, 叶子空间分布的群聚现象成为正确反演叶面积指数值的一个不可忽视的因素. 对此我们采用 Nilson 参数(ω)作为修正的手段, 当叶子存在群聚效应时, ω 的取值小于 1, ($\omega < 1$). 实际上这是一种用等效叶面积指数来表达群聚效应的方法, 亦可把垂直莖向上的不连续性视为另一种尺度的群聚效应, 总之, 对每个像元而言, ω 应该是一个有其自身含义的待定参数. 至此, 以上表达式应改为:

$$K_c + K_t = 1 - e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI} \quad (13)$$

$$K_g + K_z = e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI} \quad (14)$$

$$K_g = e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} \quad (15)$$

$$K_c = 1 - e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} \quad (16)$$

至于多次散射的贡献 L^m , 由于光子经多次散射, 其各向异性性质已大大地被削弱, 所以可以采用任何一种辐射传输方程的二流近似解去代表 L^m , 该类表达式很多^[16-18], 可任选其一, 自变量为 LAI. 显然这种简化表达与复杂的植被冠层结构的投影关系有一定的差距, 差距如何只有用观测事实去验证.

$$\omega = \frac{L^1}{\mu_0 F_0 + E_d}, \quad g = f_g, \quad c = f_c, \quad m = \frac{L^m}{\mu_0 F_0 + E_d}, \quad \omega = \omega + m, \quad \text{则:}$$

$$= \left\{ e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} + \left[e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI} - e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} \right] \cdot \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right\} + \left\{ \left[1 - e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} \right] + \left[e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI \cdot (\phi)} - e^{-\omega \frac{G(\nu)}{\mu_\nu} LAI} \right] \cdot \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right\} + m \quad (17)$$

这就是本文反演 LAI 的基本出发方程, 该式保留了地表和叶子的波谱特征、LAI、不同尺度的群聚效应、二向性反射特征等影响因子. 该公式适用于不同波长, g, c 可以实地测量, 也可以从波谱数据库获取. F_0, μ_0 可以通过太阳常数的波谱数据及天文年历获得. 假定 $E_{d,0.5\mu m} = 0.1 F_{0,0.5\mu m}$, 其他波段可由下列公式求取 $\frac{E_d}{E_{d,0.5\mu m}} = \left(\frac{\lambda}{0.5} \right)^{-4}$. 本文假定叶子取向分布为随机型, 则 $G(\nu) = \frac{1}{2}$.

该公式的特点是: 除大气效应外, 几乎包含了所有影响 LAI 反演精度的基本要素, 比如土壤背景波谱特征, 非各向同性性质, 反演 LAI 的尺度效应等, 而且由于保留了 g 与 c 显著的波谱差别, 多波段所组成的方程组相关性小, 易于 LAI 的反演. 总之该模型既非纯粹的几何光学模型, 又非传统意义下的连续植被模型, 它综合了两者特点, 适合于拥有连续与离散双重特征行播作物.

1.2 数值模拟

ETM 与 DMC+4 一样拥有两个分辨率(6 个波段 30 m 分辨率, 15 m 全色波段)的遥感数据, 由于 ETM 波段信息比较丰富, 参数稳定, 并且已有大量的应用实验证明 KT 变换公式(18)可靠, 同时地面实验数据完整, 与卫星数据同步匹配好, 故选用 2001 年顺义实验区的地面实测资料和同步的 ETM 资料进行数值模拟实验(图 1)。

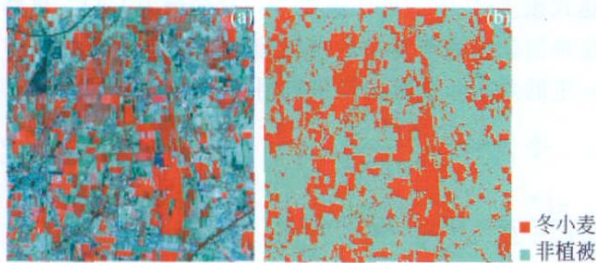


图 1 ETM+ 多光谱图像分类前后对比

(a) 原始图像; (b) 分类图像

在对 ETM 图像进行大气和几何纠正后进行分类, 计算每个像元的亮度(B , brightness)和绿度(G , greenness)^[19]:

$$B = 0.3037 TM_1 + 0.2793 TM_2 + 0.4743 TM_3 + 0.5582 TM_4 + 0.5082 TM_5 + 0.1682 TM_7$$

$$G = -0.2848 TM_1 - 0.2435 TM_2 - 0.5436 TM_3 + 0.7243 TM_4 + 0.0840 TM_5 - 0.1800 TM_7 \quad (18)$$

其中 TM_1, TM_2, \dots, TM_7 分别代表 ETM 每个波段的反射率值, B 代表地表背景的反射特性, G 代表植被覆盖状况。事实上, 公式(18)是一种针对植被的信息压缩方法, 俗称 K-T 变换。另外, 反演公式(17)只含有三个未知数 LAI, ϕ 和 ρ_0 , 若暂定初始值 $\rho_0 = 1$, 取 LAI 为某个值, 针对 ETM 六个波段, 每选定一个 ϕ 值, 便可根据公式(17)算得对应六个波段的 ρ 值, 再代入公式(18), 便可获得相应的 B 和 G 值。改变 ϕ 值, 重复上述过程便可得到 B-G 图中的等 LAI 线(图 2)。依此类推, 若取 ϕ 为某个值, 改变 LAI 值, 算得相应的 ρ 值, 进而获得 B 和 G 值, 便可获得 B-G 图中的等 ϕ 线。

图中每一个点代表 ETM 图像中每一个像元所对

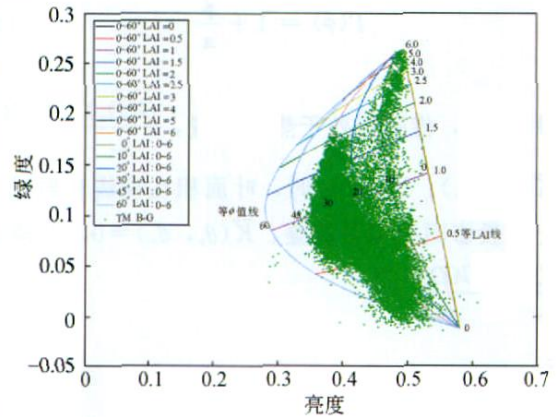


图 2 B-G 值与公式(17)模拟图之间的匹配

应的 B 和 G 值, 通过内插, 便可推断该像元的 LAI_c 和 ϕ 值。选取地面有实测值的部分像元, 用 LAI_r 代表其实测值, 则 $\rho_0 LAI_r = LAI_c^{[20]}$, 求得多点的平均 ρ_0 值, 再去替代它的初始值, 重复该过程直到初始值与迭代结果相近为止, 剩下部分有实测 LAI_r 值的像元可用作反演公式(17)有效性的检验, 验证结果表明本模型是有效的。这是一种利用图形反演 LAI 值的方法, 它与数值反演运算有同等的效率。应用此方法可以简便、快速、直观地证明本文模型的有效性。

2 利用 DMC+4 数据反演高空间分辨率冬小麦 LAI 的空间分布

选取 2006 年 3 月 31 日在山东泰安试验区拍摄的 DMC+4 遥感图像¹⁾, 综合利用 4 m 高空间分辨率数据及 32 m 同步多光谱图像数据, 反演 4 m 分辨率的 LAI 值的空间分布。

2.1 图像预处理

利用相关系数极值法, 对 32 m 分辨率的多光谱图像和 4 m 全色波段图像进行配准^[21]。在对各个波段数据进行辐射校正后, 使用 6S 模型对 DMC+4 多光谱绿、红、近红外三个波段以及全色图像进行大气效应纠正, 消除大气分子、气溶胶等对电磁波的吸收和散射影响, 得到地表真实反射率。对 4 m 高分辨率的全色图像还需要进行交叉辐射纠正, 本文采用刃边法直接从图上获得点扩散函数^[22], 通过 Fourier 变换与逆变换, 使高频部分得到补偿, 增强了图像的清晰度。

1) 本文 DMC+4 数据由北京宇视蓝图信息技术有限公司提供, Copyright BLMIT

2.2 冬小麦 LAI 空间分布反演结果

对经过辐射校正和几何、大气纠正的 DMC + 4 三个波段光谱数据, 有四个独立方程, 可联立求解:

$$\begin{cases} \text{green} = g_{\text{.green}} \left(K_g + K_z \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right) + \\ c_{\text{.green}} \left(K_c + K_t \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right) + m_{\text{green}} \\ \text{red} = g_{\text{.red}} \left(K_g + K_z \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right) + \\ c_{\text{.red}} \left(K_c + K_t \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right) + m_{\text{red}} \\ \text{ir} = g_{\text{.ir}} \left(K_g + K_z \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right) + \\ c_{\text{.ir}} \left(K_c + K_t \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right) + m_{\text{ir}} \\ K_g + K_z + K_c + K_t = 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中, 各波段 F_0 使用辐射定标确定的数值, 各波段散射辐射通量密度 E_d 的计算方法与 ETM 一致, 各波段 g_{\cdot} 和 c_{\cdot} 可以从光谱库得到, 再求解线性方程组即可求得四个未知数 K_g , K_z , K_c 和 K_t , 进而可计算出 DMC+4 多光谱图像像元的叶面积指数、 ϕ 和 ω . 计算得到 32 m 分辨率的 LAI 分布如图 3 所示.

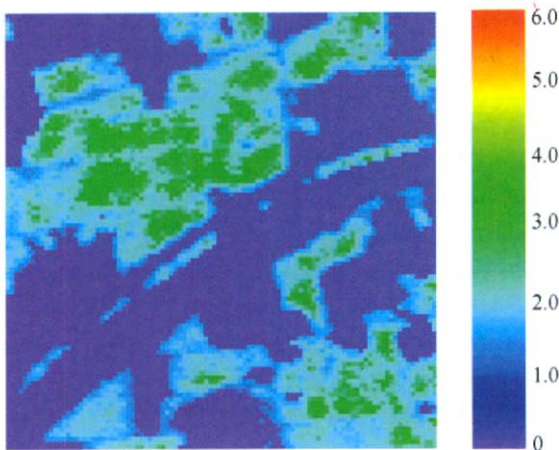


图 3 DMC+4 多光谱图像叶面积指数分布图

将从多光谱图像求得的 ϕ 值和 ω 值, 代入 4 m 分辨率全色波段的对应像元, 利用纯像元从图像中获得全色波段的 g_{\cdot} 和 c_{\cdot} , 根据公式(17), 即可求得每个小像元的 LAI. 本方法的实质是利用三个波段对应的三个独立方程求得三个未知数 LAI、 ϕ 和 ω ,

因为 32 m 和 4 m 分辨率的两个传感器具有近似相同的 ω 和 ϕ 值, 所以通过 4 m 分辨率的单波段数据便可获得 4 m 分辨率的 LAI 分布图, 其精度是现有的多种混合像元分解方法所无法比拟的. 4 m 分辨率叶面积指数分布如图 4 所示.

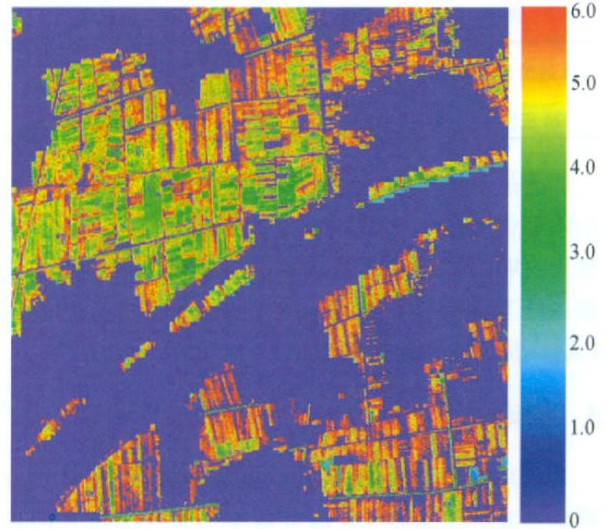


图 4 DMC+4 全色图像叶面积指数分布图

2.3 误差分析

由于在 DMC+4 图像覆盖区域缺少对应的地面实测数据, 而在 TM 图像上可以找到与地面实测点对应的像元, 因此我们通过 2005 年 4 月 29 日 Landsat-5 卫星在山东地区拍摄的图像, 对上述结果进行验证. 图 5 为 TM 与 DMC+4 图像对应像元的叶面积指数值的比较.

从图 5 可知, 冬小麦的叶面积指数在 3—6 之间

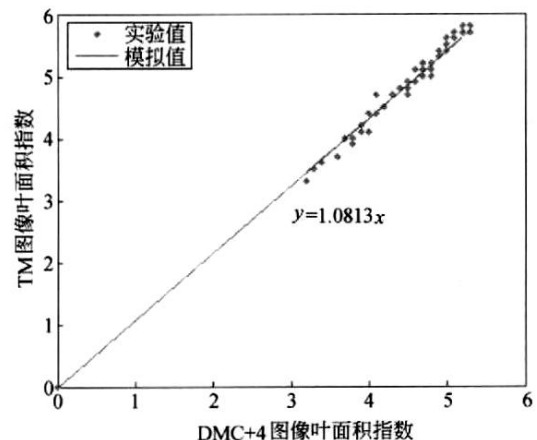


图 5 TM 与 DMC+4 对应像元叶面积指数反演值比较

分布, 两者近似成线性关系. 由于 TM 图像的拍摄时间稍晚于 DMC+4 图像, 因此 TM 图像像元叶面积指数的反演值略高是合理的.

TM 图像像元叶面积指数的反演值与地表实验测量值对比, 如表 1 所示.

表 1 TM 反演 LAI 值与实地测量 LAI 值比较

实地测量 LAI 值	4.49 ± 0.14	4.95 ± 0.17	5.11 ± 0.17	6.19 ± 0.23	6.05 ± 0.06
TM 反演 LAI 值	4.50	4.98	5.10	5.83	5.67

通过对比可知, 公式 (17) 反演遥感图像像元的 LAI 值误差在 10% 之内, 反演的精度较高. 图 5 和表 1 说明, 将已建立的植被冠层辐射模型应用于北京一号卫星数据, 能够比较准确地反演混合像元 LAI, 具有较好的适用性.

3 结论

(1) 本文利用 DMC+4 能同步提供 32 m 中分辨率多波段信息和 4 m 高分辨率全色波段信息的优势, 针对冬小麦地连续与离散的双重特征, 建立了能包含影响植被冠层反射特性的多种要素的混合模型. 由于该模型既具有综合性, 保留了多光谱的基本信息特征, 又作了必要的简化, 所以具有精度高和易于反演的特点. 实验验证表明本研究的反演结果与田间实测数据误差在 10% 以下, 这是一个适合于兼有连续与离散双重特性的叶面积指数反演方法.

(2) 同步提供具有相同太阳—目标—传感器三者几何特征的中等分辨率多波段数据及高分辨率全色波段数据, 是 DMC+4 卫星的特色, 这为研究遥感反演 LAI 的尺度效应提供了极好的基本数据源, 必将为推进尺度效应的研究起到不可替代的作用, 也为解决农作物估产 (包括精确估算播种面积和作物长势) 提供了新机遇和新思路.

参 考 文 献

- Verstraete MM, Pinty B, Myneni RB. Potential and limitations of information extraction on the terrestrial biosphere from satellite remote sensing. *Remote Sens Environ*, 1996, 58: 201—214
- Weiss M, Baret F. Evaluation of canopy biophysical variable retrieval performances from the accumulation of large swath satellite data. *Remote Sens Environ*, 1999, 70: 293—306
- 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数 (LAI) 的遥感定量方法综述. *国土资源遥感*, 2003, 3: 58—62
- 唐世浩, 朱启疆, 孙睿. 基于方向反射率的大尺度叶面积指数反演算法及其验证. *自然科学进展*, 2006, 16(3): 331—337
- 姚延娟, 阎广建, 王锦地. 多光谱多角度遥感数据综合反演叶面积指数方法研究. *遥感学报*, 2005, 9(2): 117—122
- 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. *遥感技术与应用*, 2003, 18(2): 57—65
- 屈永华, 王锦地, 刘素红, 等. 贝叶斯网络支持的地表参数混合反演模式研究. *遥感学报*, 2006, 10(1): 6—14
- 霍东民, 严明, 于冰洋. DMC 遥感小卫星数据预处理方法分析. *遥感学报*, 2005, 9(4): 480—485
- 李伯林, 左焯. DMC+4 小卫星在国际灾害监测中的应用与评价. *遥感学报*, 2005, 9(4): 469—471
- Li X, Strahler AH. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1985, 23: 705—721
- Li X, Strahler AH. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1986, 24: 906—919
- Li X, Strahler AH. Geometric-optical bi-directional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 276—292
- Jupp DLB, Strahler AH. A hotspot model for leaf canopies. *Remote Sens Environ*, 1991, 38: 193—210
- Strahler AH, Jupp DLB. Modeling bi-directional reflectance of forests and woodlands using boolean models and geometric optics. *Remote Sens Environ*, 1990, 34: 153—166
- Kuusk AE. The hot spot effect of a uniform vegetation cover. *Earth Res from Space*, 1983, 4: 90—99
- Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agric Meteorol*, 1971, 8: 25—38
- Nilson T, Kuusk A. A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. *Remote Sens Environ*, 1989, 27: 157—167
- Hapke BW. Bi-directional reflectance spectroscopy, 1, Theory. *J Geophys Res*, 1981, (86): 3039—3054
- 徐希孺. *遥感物理*. 北京: 北京大学出版社, 2005, 47—49
- Chen JM, 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 Sens Environ*, 2002, 80(1): 165—184
- 刘茜, 徐希孺. 航空影像与 TM 影像的配准及用航空影像对 TM 进行作物估产方法的精度检验. *环境遥感*, 1994, 9(4): 275—277
- 刘正军, 王长耀, 骆成凤. CBERS-1 PSF 估计与图像复原. *遥感学报*, 2004, 8(3): 234—237