

遥感反演连续植被叶面积指数的空间尺度效应

徐希孺, 范闻捷*, 陶欣

北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871

* 联系人, E-mail: fanwj@pku.edu.cn

收稿日期: 2008-01-28; 接受日期: 2008-06-12

国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB714402)、国家自然科学基金(批准号: 40871186, 40401036)和国家高技术研究计划(编号: 2005AA133011XZ07)资助

摘要 叶面积指数(LAI)是描述植被冠层几何结构的最基本的参数, 是气候模型、地-气相互作用等过程的重要输入参数. 近年来遥感反演 LAI 的尺度效应问题得到广泛关注. 在作物冠层反射率模型基础上, 讨论了 LAI 尺度效应的产生机制, 并获得不同尺度之间 LAI 的转换公式, 数值模拟试验和实际遥感图像试验都证明了该尺度转换公式的可靠性.

关键词

空间尺度效应
遥感反演叶面积指数
真实叶面积指数
连续植被冠层反射率模型

叶面积指数(LAI)是描述植被冠层几何结构的最基本的参数, 是气候模型、地-气相互作用过程等模型的重要输入参数^[1-7]. 通过遥感手段获得准确的叶面积指数一直是遥感应用的基本任务. 近年来遥感反演植被指数值的尺度效应问题已引起遥感界的高度关注. 许多研究结果都表明由不同分辨率的遥感数据所获得 LAI 值是不同的, 一般来说粗分辨率所反演的 LAI 值往往小于高分辨率遥感图像所推断的 LAI 值, 并且指出产生这种现象的重要原因是反演方法的非线性性质和存在空间异质性^[2,8-16]. 对 MODIS 的 LAI 产品进行多尺度分析和验证结果也表明随着尺度的增加, 当一种植被类型中混合了大量其他种类植被时, 会产生较大的反演误差^[12,13]. 这一研究表明植被分布的不均一也可能带来尺度效应. 在这些文献中, 尺度是指传感器的空间分辨率, 尺度效应是指用不同分辨率的遥感数据所反演的 LAI 值之间存在差异. 讨论遥感反演叶面积指数值的尺度效应时, 有两个需要回答的基本问题: ① 产生 LAI 尺度效应的根源何在? ② 由不同分辨率遥感数据所反演的 LAI 值之间是否存在可以相互转换的关系, 这种相互转换

的关系是什么?

事实上影响遥感反演 LAI 值的因素很多. 首先, 遥感模型是否正确是最基本的问题, 不同的太阳-目标-传感器三者几何关系, 其反射率测量值显然不同, 由此而引起 LAI 反演值的差异不能与尺度效应混为一谈; 其次, 植被离不开土壤, 所测信号至少包含植被和土壤两种信息, 而土壤反射率受土壤类型、含水量等种种因素控制, 所以消除土壤背景信息是讨论 LAI 尺度效应的另一个前提条件; 除此之外, 大气效应等因素也应排除在外. 曾有很多作者把常用的植被指数(如 NDVI 和 RVI 等)与叶面积指数(LAI)之间的统计相关关系作为讨论 LAI 尺度效应的出发点, 然而就常用的植被指数而言, 上述 3 个问题能同步得到妥善处理的却很少, 所以实际相关关系的一致性较差, 离散度偏大, 故有必要寻找新的模型作为立足点, 进而讨论空间尺度效应的两个基本问题.

1 关于叶面积指数概念及其定义

目前公认的 LAI 定义为地表植被柱体内叶子总表面积的一半与柱体底面积之比^[17]. 但该定义对植

被柱体的边界及叶面积的空间分布没有作任何界定^[18], 因此, 设某混合像元由植被和裸露土壤(异质)两部分组成, 并假定植被在 a_1 区域内均匀分布, a_2 为裸露土壤所占据的面积, 区域 a_1 与 a_2 之界线基本上可参考植被垂直投影区域, 按约定俗成规则来划定, 像元面积 $A = a_1 + a_2$, 如图1所示。

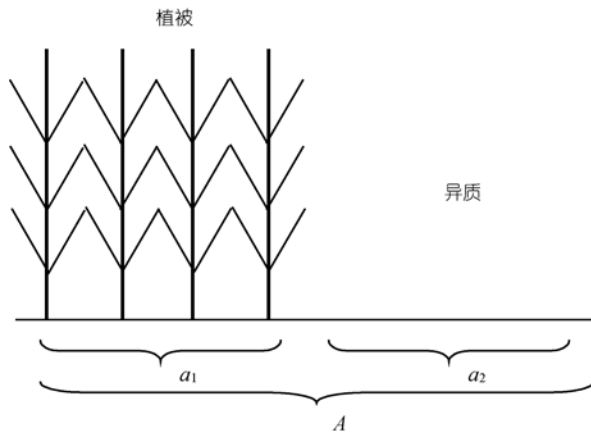


图1 混合像元的组成

根据传统的 LAI 定义, 对于混合像元可以给出两种不同的表达式:

$$LAI_t = \frac{LA}{a_1}, \quad (1)$$

$$LAI_a = \frac{LA}{A}, \quad (2)$$

其中 LA 代表植被柱体内叶子总面积的一半。显然这两种定义其物理含义并不相同, LAI_t 更能体现植被真实生长状况, 也符合作物播种面积之概念, 故本文称之为真实叶面积指数, 而 LAI_a 更适合于遥感中遇到的混合像元, 故称之为“表观”叶面积指数, 这两种定义之差别在于真实叶面积指数的定义完全排除了异质斑块的存在, 并假定叶面积在 a_1 内均匀分布, 而表观叶面积指数的定义却与之相反。由于相同的叶面积要均摊到更大的面积上, 所以表观叶面积指数值总是小于真实叶面积指数值。在现实遥感图像中真实叶面积指数是否存在? 用不同的像元尺度去度量一幅以连续植被为主的真实遥感图像, 对像元内叶面积所占面积比例(a_v)作统计分析, 我们选取2005年5月6日山东济宁的SPOT-5全色和多光谱图

像作为研究对象, 该地区为冬小麦的主产区, 图像获取时的冬小麦已接近成熟, 为典型的连续植被, 其结果如图2所示, 横坐标为 a_v 值, 取值范围为0~1, $a_v=1$ 为植被纯像元, $a_v=0$ 为异质纯像元, 纵坐标为该 a_v 值出现的频率 f , 不同曲线代表不同像元尺度, 比如像元尺度为10 m×10 m, 20 m×20 m, 50 m×50 m, …… , 列于图右上角。

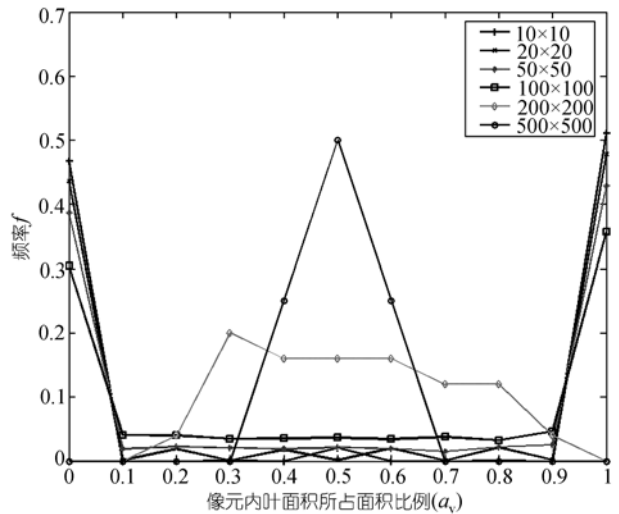


图2 不同像元尺度下 a_v 的频率分布图

图2表明随着像元尺度的降低, 纯像元所占比例不断升高, 而混合像元所占比例不断减少, 频率曲线表现为两头高、中间低, 反之随着像元尺度的增加, 两头低、中间高, 此时混合像元已占主导地位, 甚至纯像元几乎消失。由此可以推断, 对连续植被而言, 随着像元尺度的减小, 可以找到一个“宏观小、微观大”的尺度, 在该尺度下, 混合像元所占比例可以忽略不计, 而像元内叶面积分布亦近似均匀, 可以认为该像元尺度下所测得的叶面积指数为真实叶面积指数, 并称该尺度为零级像元尺度。对于任何大于“零”级像元尺度的遥感图像, 都可以被认为是由许多零级像元拼接而成的, 考虑到零级像元尺度真实叶面积指数存在着空间变化, 显然混合像元的真实叶面积指数应为零级像元叶面积指数值的面积加权和。所谓叶面积指数值的尺度效应纠正, 实质上就是从可直接由遥感图像获得的表观叶面积指数值去获取它的叶面积指数真值。

2 讨论 LAI 尺度效应的基本出发方程

设研究对象为连续植被, 层厚为 H , 传感器视场内 4 种成分: 光照叶子、阴影叶子、光照地表、阴影地表, 它们各自的面积比例分别为 K_c, K_t, K_g, K_z , 目标的反射率可近似表达为 $\rho = \rho^1 + \rho^m$, 其中 ρ^1 代表一次散射贡献量, ρ^m 为多次散射贡献量^[19-22].

$$K_g = e^{-\lambda_0 \left[\frac{G_s + G_v}{\mu_0} - \frac{G_v}{\mu_v} \Gamma(\phi) \right] LAI}, \quad (3)$$

$$K_z = e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI} - e^{-\lambda_0 \left[\frac{G_s + G_v}{\mu_0} - \frac{G_v}{\mu_v} \Gamma(\phi) \right] LAI}, \quad (4)$$

$$K_c = 1 - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI \Gamma(\phi)}, \quad (5)$$

$$K_t = \left(1 - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI} \right) - \left(1 - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI \Gamma(\phi)} \right) = e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI \Gamma(\phi)} - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI}, \quad (6)$$

其中 G_v 和 G_s 分别为视线方向和太阳方向的 G 函数值^[23], $\mu_v = \cos \theta_v$, $\mu_0 = \cos \theta_s$, θ_v 和 θ_s 为视线天顶角和太阳天顶角, λ_0 为群聚效应而引入的尼尔逊参数^[23], $\Gamma(\phi)$ 为描述热点效应而引入的经验函数, ϕ 为视线方向和太阳方向间的夹角, $\Gamma(0) = 1$, $\Gamma(\pi) = 0$, 当 $0 < \phi \leq \pi$, $\Gamma(\phi) = 1 - \phi/\pi$. 假设进入传感器的一次散射亮度为 L^1 , $L^1 = K_g L_g + K_z L_z + K_c L_c + K_t L_t$, 其中 L_g, L_z, L_c 及 L_t 分别为光照背景、阴影背景、光照叶子及阴影叶子所提供的一次散射亮度值, 设 f_g 及 f_v 分别为地表背景及冠层叶子的双向反射率分布函数, $L_g = f_g(\mu_0 F_0 + E_d)$, $L_z = f_g E_d$, $L_c = f_v(\mu_0 F_0 + E_d)$, $L_t = f_v E_d$, 并令 $\rho^1 = \pi L^1 / (\mu_0 F_0 + E_d)$, $\mu_0 F_0$ 为太阳直射对目标构成的辐照度, E_d 为天空亮度对目标构成的辐照度, 假设叶子及土壤背景为朗伯反射面, $\rho_g = \pi f_g$, $\rho_v = \pi f_v$, ρ_g 与 ρ_v 分别为土壤背景与叶子的半球反射率, 则

$$\rho^1 = \rho_g \left\{ e^{-\lambda_0 \left[\frac{G_s + G_v}{\mu_0} - \frac{G_v}{\mu_v} \Gamma(\phi) \right] LAI} + \right.$$

$$\left. \left[e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI} - e^{-\lambda_0 \left[\frac{G_s + G_v}{\mu_0} - \frac{G_v}{\mu_v} \Gamma(\phi) \right] LAI} \right] \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right\} + \rho_v \left\{ \left(1 - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI \Gamma(\phi)} \right) + \left[e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI \Gamma(\phi)} - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI} \right] \frac{E_d}{\mu_0 F_0 + E_d} \right\}. \quad (7)$$

公式(7)保留了由太阳-目标-传感器观测几何所造成的目标非朗伯反射特性, 忽略了由叶片与土壤表面非朗伯体反射特性所造成的冠层非朗伯反射特性. 当 $\phi = 0$ (即取热点时),

$$\rho^1 = \rho_g e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI} + \rho_v \left(1 - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI} \right);$$

如令 $b = \lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v}$, 则

$$\rho^1 = \rho_g e^{-b LAI} + \rho_v (1 - e^{-b LAI}). \quad (8)$$

对多次散射贡献, 可采用 Hapke 模型^[24,25]:

$$\rho^m = \frac{\omega}{4} \cdot \frac{1}{\mu_v \mu_0} [H(\mu_v) H(\mu_0) - 1] I_{ms}, \quad (9)$$

其中 ω 为单叶片的单次散射反照率, $\omega \approx 2\rho_v$,

$$H(\mu_{0,v}) = \frac{1 + 2\mu_{0,v}}{1 + 2\mu_{0,v} \sqrt{1 - \omega}},$$

$$I_{ms} = \frac{1}{\Delta'} (1 - e^{-\Delta' \lambda_0 LAI}), \quad \Delta' = \frac{G_s}{\mu_0} + \frac{G_v}{\mu_v}.$$

当 $\phi = 0$,

$$\rho^m = \rho_v \cdot \frac{[H^2(\mu_v) - 1]}{4\mu_v G_v} (1 - e^{-2b LAI}).$$

如令 $m = \frac{[H^2(\mu_v) - 1]}{4\mu_v G_v}$, 则

$$\rho^m = m \cdot \rho_v (1 - e^{-2b LAI}),$$

$$\rho = \rho^1 + \rho^m \approx \rho_g e^{-b LAI} + \rho_v (1 + m) (1 - e^{-b LAI}),$$

考虑到冠层内叶子相互遮荫可以构成“孔隙”, 它有降低多次散射反照率的作用, 所以采用这种近似表达,

在某种意义上, 可以达到抵消 Hapke 模型过高估计多次散射反照率的作用. 总之, 加入多次散射的贡献, 只需对 ρ_v 作等值效应修正, 令 $\rho'_v = \rho_v(1+m)$, 则

$$\rho \approx \rho_g e^{-b \cdot LAI} + \rho'_v (1 - e^{-b \cdot LAI}). \quad (10)$$

公式(10)与公式(8)仍能保持形式一致. 对于 $\phi \neq 0$, 同样只需对 ρ_g , ρ_v 及 b 作适当的修正, 公式(8)的基本形式可以保持不变. 所以公式(8)可以作为讨论 LAI 尺度效应的基本出发方程. 在演绎公式(8)和(10)的过程中, 引入了一些等效参数, 并作了某些近似, 虽然这会使 LAI 的遥感反演不能彻底地摆脱 BRDF、土壤背景等变化因素的干扰, 但该公式仍保留了冠层反射率的基本特征, 调整 ρ_g 可以适用于不同土壤条件, 调整 b 等参数可以修正观测几何、群聚效应以及 LAD 等因素所带来的误差. 总之, 公式(10)与精确的 LAI 反演模型相比, 反演精度有所下降, 但它比精确反演公式更简单, 有利于讨论 LAI 的空间变化所引起的尺度效应.

3 产生尺度效应的物理机制

设像元 A 是由两个面积相等的小像元组成, 分别称为子像元 1 与 2, 它们的叶面积指数真值分别用 LAI_1 与 LAI_2 表示, $LAI_2 = LAI_1 + \Delta LAI$. 像元 A 的平均叶面积指数即表观叶面积指数为 $LAI_a = (LAI_1 + LAI_2)/2 = LAI_1 + \Delta LAI/2$, ΔLAI 的取值范围为 $-LAI_1 \rightarrow \infty$. 当 $\Delta LAI = -LAI_1$ 时, $LAI_2 = 0$, 此时子像元 2 为异质, 根据真实叶面积指数的定义, 像元 A 的真实叶面积指数为 $LAI_t = LAI_1$, 但 $LAI_a = LAI_1/2$; 除此之外, $LAI_2 > 0$, 此时 $LAI_a = LAI_t$. 总之, $LAI_a \leq LAI_t$.

(i) 情景 1. 如果保留了小于像元尺度 LAI 的空间不均一性, 即 $\Delta LAI \neq 0$, 忽略两个子像元之间的多次散射, 则混合像元 A 的反射率值 $\rho_{A,m}$ 应为子像元反射率(ρ_1 和 ρ_2)之面积加权和:

$$\rho_{A,m} = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2) = \frac{1}{2}(\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_1} (1 + e^{-b \cdot \Delta LAI}) + \rho_v.$$

如用公式(10)去反演像元 A 的叶面积指数值 $LAI_{A,m}$, 则:

$$\begin{aligned} b \cdot LAI_{A,m} &= -\ln \left[\frac{\rho_{A,m} - \rho_v}{\rho_g - \rho_v} \right] \\ &= -\ln \left[\frac{1}{2} e^{-b \cdot LAI_1} (1 + e^{-b \cdot \Delta LAI}) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

(ii) 情景 2. 如果像元 A 内 LAI 的不均一性被掩盖, 并用平均值 $LAI_1 + \Delta LAI/2$ 作为像元 A 的叶面积指数取值, 则像元 A 的反射率 $\rho_{A,s}$ 与平均叶面积指数值 $LAI_{A,a}$ 之间应存在如下关系:

$$\begin{aligned} \rho_{A,s} &= (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_1} e^{-\frac{1}{2} b \cdot \Delta LAI} + \rho_v \\ &= \frac{1}{2} (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_1} \cdot 2 e^{-\frac{1}{2} b \cdot \Delta LAI} + \rho_v, \\ b \cdot LAI_{A,a} &= -\ln \left[\frac{\rho_{A,s} - \rho_v}{\rho_g - \rho_v} \right] \\ &= -\ln \left[\frac{1}{2} e^{-b \cdot LAI_1} \cdot 2 \cdot e^{-\frac{1}{2} b \cdot \Delta LAI} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

$$e^{-b \cdot LAI_{A,m}} - e^{-b \cdot LAI_{A,a}} = \frac{1}{2} e^{-b \cdot LAI_1} \left(1 - e^{-\frac{1}{2} b \cdot \Delta LAI} \right)^2 \geq 0. \quad (13)$$

只要 $\Delta LAI \neq 0$, 则 $LAI_{A,m} < LAI_{A,a} \leq LAI_t$.

两种情景的差别在于: 情景 1 保留了 LAI 的空间变化, 而情景 2 不存在 LAI 的空间变化, 用平均叶面积指数值掩盖了确实存在的 LAI 的空间变化. 上述分析表明只要像元内存在着尺度小于像元尺度的叶面积指数的空间变化, 那么用公式(10)去反演像元尺度的 LAI, 其反演值必然小于真值, 两种情景具有相同的 LAI_t 和 LAI_a , 但遥感反演的叶面积指数值却不相同. 这就是 LAI 的尺度效应. 由此可以得出以下几点结论:

(1) $\Delta LAI \neq 0$ 与反演方程的非线性性质是产生尺度效应的充分必要条件, 可以有两种原因致使 $\Delta LAI \neq 0$: 其一, 存在尺度小于像元的 LAI 的空间变化; 其二, 像元本身就是存在异质性的混合像元; 两种原因同等重要. 也可以说 LAI 的空间不均一性是产生 LAI 尺度效应的根源, 事实上, 我们在建立 LAI 的反演模型时, 已经隐含了一个前提条件, 即 LAI 不存在空间变化, 如果强迫它应用于 LAI 存在空间变化的

情形, 产生误差也就理所当然了.

(2) 尺度效应总是使反演的叶面积指数值小于真值, 像元尺度 A 掩盖了小于尺度 A 的 LAI 的空间变化, 当尺度不断增加时, 它所掩盖的 LAI 的空间变化的尺度也越来越大, 每掩盖一种尺度的 LAI 的空间变化, 就将造成表观叶面积指数相应的减少量, 所以表观叶面积指数值 LAI_a 将随尺度增大而累计减小, 正好符合观察事实.

4 尺度转换模型

4.1 尺度的描述

空间尺度在遥感影像中是指像元的空间分辨率 r . 引入相对尺度 r_R 及尺度级数 n 的概念

$$r_R = r / r_0, \quad (14)$$

此处 r_0 是指零级像元尺度, 在这个尺度上混合像元近乎不存在, 且像元内植被近似均匀分布. 如果相邻两级像元尺度之比为一个常数 d , 则

$$r_R = d^n \text{ (或 } n = \log_d r_R \text{)}. \quad (15)$$

所以 $n=0$ 代表 $r = r_0$, 此时遥感反演获得的 LAI 值为真值, 可用 LAI_0 表示, $n \geq 1$ 时存在 LAI 的尺度效应, 可用 LAI_n 表示. 尺度转换公式就是求取 LAI_n 与 LAI_0 之间的函数转换关系.

4.2 忽略 LAI_0 空间变化条件下的尺度转换公式

对零级尺度像元, 下式成立:

$$\rho_0 = (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_0} + \rho_v. \quad (16)$$

设一级尺度像元内包含 N 个零级尺度像元, 用 $LAI_{0,i}$ 代表第 i 个零级像元的叶面积指数真值, $LAI_{0,i} = LAI_{0,a} + \Delta LAI_{0,i}$, 其中 $LAI_{0,a}$ 为零级尺度 LAI 在一级像元尺度内的平均值,

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N LAI_{0,i} = LAI_{0,a} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta LAI_{0,i},$$

则

$$\rho_{0,a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_{0,i} = (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_{0,a}} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{-b \cdot \Delta LAI_{0,i}} + \rho_v.$$

如假设 $\Delta LAI_{0,i} = 0$, 则

$$\rho_{0,a} = (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_{0,a}} + \rho_v. \quad (17)$$

设一级尺度像元内完全由异质性所占据的零级像元所占面积比例为 m_1 , 含有植被的零级像元所占面积比例为 $a_{v,1}$ ($m_1 = 1 - a_{v,1}$), 则

$$\begin{aligned} \rho_1 &= (1 - m_1) \rho_{0,a} + m_1 \rho_g \\ &= (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_{0,a}} + \rho_v \\ &\quad + m_1 \left[(\rho_g - \rho_v) (1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}}) \right], \end{aligned}$$

$$\rho_1 - \rho_v = (\rho_g - \rho_v) \left[1 - a_{v,1} (1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}}) \right], \quad (18)$$

将一级尺度混合像元作为一个整体, 下式成立:

$$\rho_1 = (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_1} + \rho_v,$$

$$b \cdot LAI_1 = -\ln \left(\frac{\rho_1 - \rho_v}{\rho_g - \rho_v} \right) = -\ln \left[1 - a_{v,1} (1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}}) \right], \quad (19)$$

该式表明了一级尺度像元的 LAI_1 与零级尺度叶面积指数真值的平均值 $LAI_{0,a}$ 之间的函数关系.

同样地, 对于二级尺度像元, 完全由异质性所占据的一级像元所占面积比例为 m_2 , 含有植被的一级像元所占面积比例为 $a_{v,2}$ ($m_2 = 1 - a_{v,2}$),

$$\rho_2 = (1 - m_2) \rho_{1,a} + m_2 \rho_g, \quad (20)$$

$$\rho_{1,a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_{1,i},$$

$\rho_{1,i}$ 代表 ρ_1 的空间变化, 由 m_1 的空间变化所致, 可用 $m_{1,i}$ 表示, 同时把 $\rho_{0,a}$ 的平均空间范围由一级像元尺度扩展到二级像元尺度, 假设条件不变, 则

$$\rho_2 = (1 - m_2) \left[(\rho_g - \rho_{0,a}) m_{1,a} + \rho_{0,a} \right] + m_2 \rho_g, \quad (21)$$

其中 $(\rho_g - \rho_{0,a}) = (\rho_g - \rho_v) (1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}})$,

$$\begin{aligned} &(\rho_g - \rho_{0,a}) m_{1,a} + \rho_{0,a} \\ &= (\rho_g - \rho_v) m_{1,a} (1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}}) + (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_{0,a}} + \rho_v \\ &= \rho_g - (\rho_g - \rho_v) a_{v,1,a} (1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}}). \end{aligned}$$

代入公式(21):

$$\begin{aligned} \rho_2 &= a_{v,2} \rho_g - (\rho_g - \rho_v) a_{v,2} a_{v,1,a} (1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}}) + \rho_g - a_{v,2} \rho_g \\ &= (\rho_g - \rho_v) \left[1 - a_{v,2} a_{v,1,a} (1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}}) \right] + \rho_v, \end{aligned}$$

其中 $a_{v,2} = 1 - m_2$. 二级像元作为一个整体, 下式成立

$$\begin{aligned} \rho_2 &= (\rho_g - \rho_v) e^{-b \cdot LAI_2} + \rho_v, \\ b \cdot LAI_2 &= -\ln \left(\frac{\rho_2 - \rho_v}{\rho_g - \rho_v} \right) \\ &= -\ln \left[1 - a_{v,2} a_{v,1,a} \left(1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

依此类推,

$$b \cdot LAI_n = -\ln \left[1 - a_v(n) \left(1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}} \right) \right], \quad (23)$$

其中 $a_v(n) = a_{v,n} a_{v,n-1,a} \cdots a_{v,1,a}$.

由于零级像元内无异质, $a_{v,0} = 1$. 如果 n 级像元相对于遥感图像中最大异质块的尺度足够大, 以至于 n 级像元中已不再出现纯异质斑块占据的 $n-1$ 级尺度像元, 此时 $m_n = 0$, 可导致 $a_{v,n} = 1$.

换言之, 当像元尺度足够大时, 趋于某个常数 c , 它取决于大尺度条件下 $a_v(n)$ 的取值, 通过数值模拟可以获得 $a_v(n)$ 随 n 的变化规律, 如图 3 所示.

$$a_v(n) = \frac{1-c}{e^{f(n)}} + c, \quad (24)$$

其中 c 为待定常数, 决定于大尺度条件下 $a_{v,n}$ 的取值, $f(n)$ 为 n 的单调递增函数, 且应满足 $f(0) = 0$ 的条件, 一般条件下, 可取线性增长模式 $f(n) = pn$, p 为经验常数.

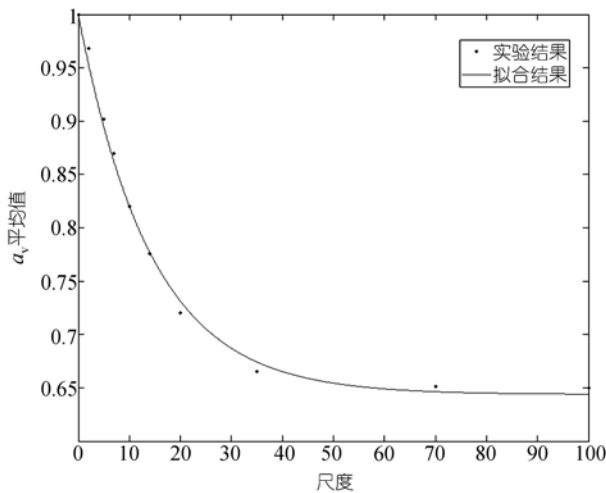


图 3 a_v 的尺度递减规律

4.3 讨论 $LAI_{0,i}$ 存在空间变化的修正

在上述讨论中, 假定 LAI_0 不存在空间变化是不符合实际的, 显然 LAI_0 空间变化幅度越大, 所引起的误差也就越大, 如采用 LAI_0 的方差值 (用 $V_{LAI,0}$ 表示) 代表 LAI_0 空间变化的强度, 通过数值试验表明叶面积指数反演误差 ΔLAI_0 与 $V_{LAI,0}$ 成正比, 如图 4 所示.

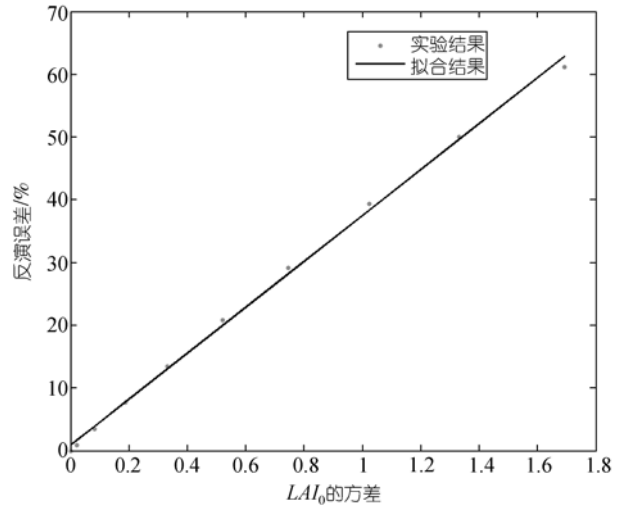


图 4 反演误差 ΔLAI_0 和像元内部植被 LAI 方差 $V_{LAI,0}$ 的关系

修正公式为

$$LAI_{0,a}^* = LAI_{0,a} + m \cdot V_{LAI,0}, \quad (25)$$

其中 $LAI_{0,a}$ 代表用公式(23)获得的忽略了 LAI_0 空间变化条件下的 LAI 真值平均值, $V_{LAI,0}$ 代表零级尺度下 $LAI_{0,i}$ 的方差值, $m=0.3589$. 显然 $V_{LAI,0}$ 是一个未知量, 根据数值模拟, 不同尺度级方差可用下式近似:

$$V_{LAI,n} = V_{LAI,0} \cdot e^{-n}. \quad (26)$$

如果一级尺度与二级尺度的遥感影像为已知影像, 则:

$$V_{LAI,0} = V_{LAI,1}^2 / V_{LAI,2}. \quad (27)$$

5 LAI 尺度效应的数值模拟

设定最小空间尺度(比如假定为 1 m)并随机设定不同尺度的异质斑块在空间的分布, 对每一个植被像元设定其 $LAI_{0,i}$ 值, 如图 5 所示.

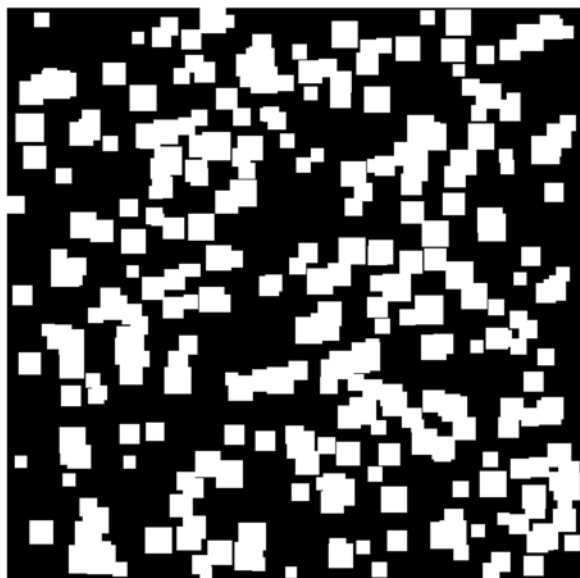


图 5 数值模拟的遥感图像
白色为纯土壤像元, 黑色为纯植被像元

设定 $\rho_g, \rho_v, G_v, \theta_v$ 值, 并假定 $\lambda_0 = 1$, 取热点处, 因为每个像元的 $LAI_{0,i}$ 已经假定, 便可按公式 (8) 计算出每个基本像元的 $\rho_{0,i}$, 并获得零级尺度 $\rho_{0,i}$ 空间分布图. 如假设相对像元尺度与级数间关系为 $r_R = 3^n$, 那么零级尺度为 1 m×1 m, 一级尺度为 3 m×3 m, 二级尺度为 9 m×9 m, 依此类推. 通过线性和, 可获得一级、二级……各自的 $\rho_{1,i}, \rho_{2,i}, \dots$ 空间分布图, 再根据

$$b \cdot LAI_{n,i} = -\ln \left(\frac{\rho_{n,i} - \rho_v}{\rho_g - \rho_v} \right),$$

求得各级像元叶面积指数反演值 $LAI_{n,i}$, 根据 $LAI_{0,i}$ 分布图及混合像元 $LAI_{n,t}$ 的定义, 便可获得 $LAI_{n,i,t}$ 分布图, 反演出的 LAI 值和真实 LAI 值的对比如表 1 所示. 当真实 LAI 较小时, 反演误差也很小, 随着实际 LAI 值的增加, 反演绝对误差随之增加, 但相对误差最大不超过 10%. 按公式 (25) 对 $LAI_{n,i}$ 进行方差纠正,

表 1 未经方差纠正和经方差纠正后的反演结果对比
(单位: %)

	最大误差	最小误差	平均误差	标准差
方差纠正前	6.62	5.9	6.32	6.33
方差纠正后	2.78	0.11	0.81	1.13

便可获得方差纠正后的叶面积指数反演值. 纠正前后 LAI 反演误差之对比见表 1.

6 遥感图像的尺度转换关系

图 6 为 2005 年 5 月 6 日拍摄的山东济宁市 SPOT-5 多光谱图像, 空间分辨率为 10 m, 图像大小为 5994×3402 个像元, 对应地面实际面积为 60 km×34 km.

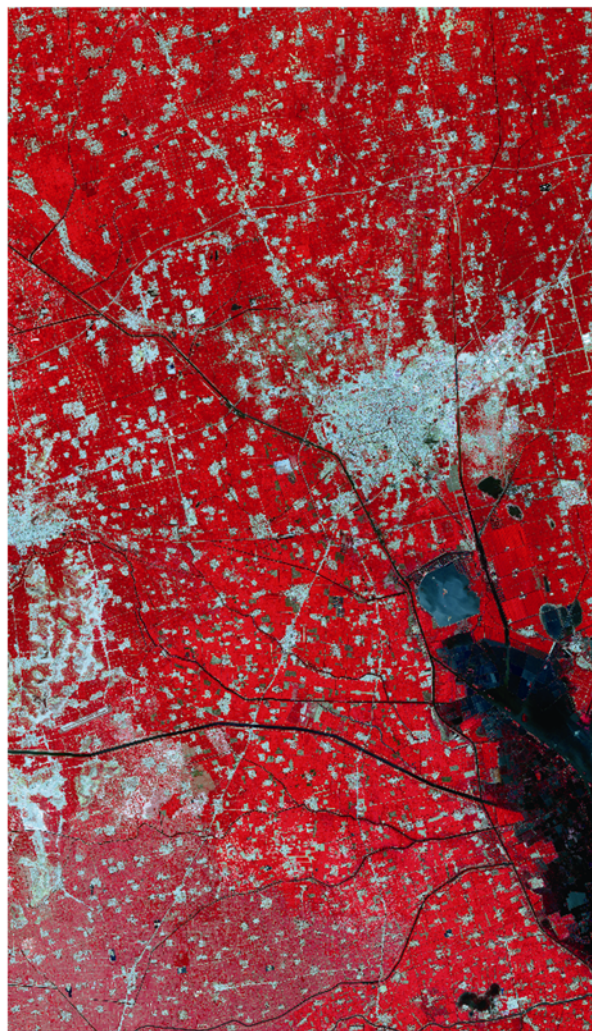


图 6 山东济宁地区 SPOT 假彩色合成遥感图像

首先对 SPOT 图像进行大气效应纠正及几何纠正, 完成辐射定标. 为了从多分辨率遥感图像中找到尺度转换关系, 就必须使不同分辨率遥感图像除像元尺度不同以外, 其他所有影响植被指数反演值的因素都保持相同. 为此, 采用在同一高分辨率遥感图

像基础上, 通过像元辐射亮度值线性累加而获得低分辨率多尺度的遥感图像。

其次, 对不同尺度图像进行初步的分类处理, 主要地表类型有以冬小麦地为主的植被、城镇、道路、水体及水渠等, 由于水体光谱特征明显有别于其他类型, 所以应特别标明粗分辨率像元背景中水体所占面积百分比, 可利用 10 m 分辨率图像为粗分辨率图像提供背景的组成成分, 使 ρ_g 更接近真值。由于冬小麦地占优势, 且考虑到图中每一像元的太阳-目标-传感器观测几何并不相同, 故应用公式(8)与(10)反演 LAI , 同时应用公式(25)和(26)计算了零级叶面积指数方差 V_{LAI_0} 所产生的修正值, 结果表明叶面积指数值约在 3~5 之间, 由方差修正引起的相对误差约为 5%, 故在本例中异质性是产生尺度效应的主要因素, 将公式(23)变换形式,

$$e^{-b \cdot LAI_n} = 1 - \left[e^{-pn} (1-c) + c \right] \left(1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}} \right).$$

鉴于 c 和 $\left(1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}} \right)$ 为常数或近似常数,

$$e^{-b \cdot LAI_n} = (1-D) - B \cdot e^{-pn},$$

其中,

$$B = (1-c) \left(1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}} \right),$$

$$D = c \left(1 - e^{-b \cdot LAI_{0,a}} \right).$$

由此可见, LAI_n 与尺度级数 n 之间存在近似负线性关系。图 7 表达了图 6 的 LAI_n 与 n 之间的关系, 每一条曲线代表一个 1 km×1 km 的大像元内 LAI_n 与 n 之间的关系, 结果表明总体上 LAI_n 与 n 之间确实存在近似负线性相关性, 但鉴于图 3 所描述的 $a_v(n)$ 与 n

之间的函数关系是一个统计意义下的关系, 而且 c 值随大像元个体的不同而异, 所以图 7 中若干个例曲线偏离近似负线性关系也就可以理解了。

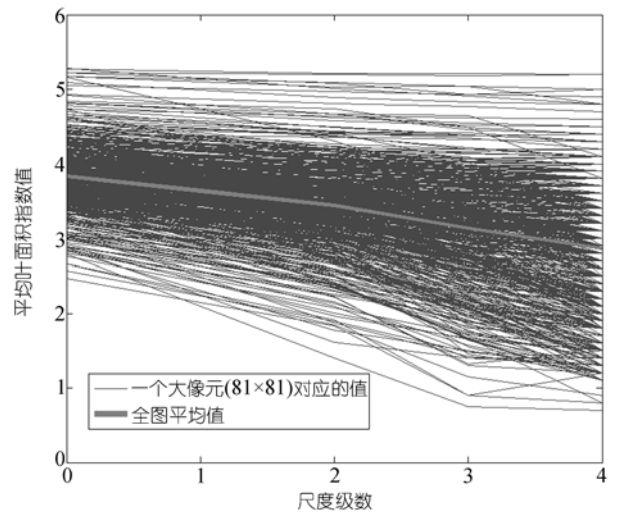


图 7 叶面积指数值与尺度级数间的关系图

7 结论

(1) 对连续植被而言, 遥感反演的叶面积指数值具有尺度效应, 其原因在于 LAI 空间不均一性和反演公式的非线性性质。

(2) 对连续植被而言, LAI 的尺度纠正公式由两部分构成, 异质性所产生的尺度效应可以由公式(23)纠正, 由 $LAI_{0,i}$ 空间波动所产生的误差可用公式(25)与(26)予以纠正。

(3) 从遥感角度分析, 总体上植被可分为两大类型: 连续型和离散型。鉴于离散型植被的基本特性是“离散”, 所以从真实叶面积指数的定义到反演模型都需要作较大的改变, 因此离散植被的叶面积指数尺度演变规律需要另立题研究。

致谢 感谢审稿专家提出的建设性意见。

参考文献

- 1 Badhwar G D, MacDonald R B, Metha N C. Satellite-derived leaf-area-index and vegetation maps as input to global carbon cycle models - a hierarchical approach. *Int J Remote Sens*, 1986, 7: 265—281 [\[DOI\]](#)
- 2 Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens Environ*, 1991, 35: 161—173 [\[DOI\]](#)
- 3 Bicheron P, Leroy M. A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model. *Re-*

- Remote Sens Environ, 1999, 67: 251—266[DOI]
- 4 Wood E F, Lakshmi V. Scaling water and energy fluxes in climate systems: three land-atmospheric modeling experiments. *J Clim*, 1993, 6: 439—857
 - 5 Bonan G B. Land-atmosphere interactions for climate system models: coupling biophysical, biogeochemical, and ecosystem dynamical processes. *Remote Sens Environ*, 1995, 51: 57—73[DOI]
 - 6 Buermann W, Dong J, Zeng X, et al. Evaluation of the utility of satellite-based vegetation leaf area index data for climate simulations. *J Clim*, 2001, 14(17): 3536—3550[DOI]
 - 7 Townshend J R G, Justice C O. Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations. *Int J Remote Sens*, 1988, 9: 187—236[DOI]
 - 8 Aman A, Randriamanantena H P, Podaire A. Upscale integration of normalized difference vegetation index: the problem of spatial heterogeneity. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 326—338[DOI]
 - 9 Bonan G B, Pollard D, Thompson S L. Influence of subgrid-scale heterogeneity in leaf area index, stomatal resistance and soil moisture on grid-scale land-atmosphere interactions. *J Clim*, 1993, 6: 1882—1897[DOI]
 - 10 Ehleringer J R, Field C B. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Boston: Academic Press, 1993
 - 11 Hall F G, Huemmrich K F, Goetz S J, et al. Satellite remote sensing of surface energy balance: success, failures, and unresolved issues in FIFE. *J Geophys Res*, 1992, 97(D17): 19061—19089
 - 12 Hu Z, Islam S. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 747—755 [DOI]
 - 13 Tian Y, Wang Y, Zhang Y, et al. Radiative transfer based scaling of *LAI* retrievals from reflectance data of different resolutions. *Remote Sens Environ*, 2003, 84: 143—159[DOI]
 - 14 Chen J M. Spatial scaling of a remotely sensed surface parameter by contexture. *Remote Sens Environ*, 1999, 69: 30—42[DOI]
 - 15 Tian Y H, Woodcock C E, Wang Y J. Multiscale analysis and validation of the MODIS *LAI* product I. Uncertainty assessment. *Remote Sens Environ*, 2002, 83: 414—430[DOI]
 - 16 Garrigues S, Allard D, Baret F, et al. Influence of landscape spatial heterogeneity on the non-linear estimation of leaf area index from moderate spatial resolution remote sensing data. *Remote Sens Environ*, 2006, 105: 286—298[DOI]
 - 17 Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant Cell Environ*, 1992, 15: 421—429[DOI]
 - 18 张仁华, 孙晓敏, 朱治林. IM GRASS 中的尺度转换和现实的定量遥感. *气候与环境研究*, 1997, 2(3): 310—315
 - 19 Li X, Strahler A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a coniferous forest canopy. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1986, 24: 906—919[DOI]
 - 20 Chen J M, Leblanc S. A 4-scale bidirectional reflection model based on canopy architecture. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 1316—1337[DOI]
 - 21 Nilson T, Kuusk A. A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. *Remote Sens Environ*, 1989, 27: 157—167[DOI]
 - 22 Nilson T. Approximate analytical methods for calculating the reflection functions of leaf canopies in remote sensing applications. In: Myneni R B, Ross J, eds. *Photon-vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Physiology*. Heidelberg and New York: Springer-Verlag, 1991. 162—189
 - 23 徐希孺. *遥感物理*. 北京: 北京大学出版社, 2005. 47—49
 - 24 Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory. *J Geophys Res*, 1981, 86: 3039—3054[DOI]
 - 25 Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 4. The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, 1986, 67: 264—280[DOI]