

# 三波段梯度差植被指数的理论基础及其应用\*

唐世浩<sup>①②\*\*</sup> 朱启疆<sup>①</sup> 王锦地<sup>①</sup> 周宇宇<sup>①</sup> 赵峰<sup>①</sup>

①北京师范大学遥感与 GIS 研究中心, 资源与环境科学系, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;

②中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘要** 针对现有植被指数的不足, 从分析植被的光谱特点入手, 提出一种新的植被指数 TGDVI, 并建立了用 TGDVI 反演植被覆盖度和叶面积指数的方法. 理论分析和模型模拟方法研究表明, 该植被指数具有高饱和点和一定的背景影响消除能力, 并可以和植被覆盖度、叶面积指数建立比较明确的函数关系. 此外, 该植被指数对于薄云的影响也有一定的去除能力. 北京顺义试验数据研究表明, 利用该植被指数反演叶面积指数可以获得比较理想的效果. 从理论上分析了 NDVI 饱和点低的原因, 指出 NDVI 的低饱和点是由其定义本身和植被的光谱响应特点决定的, 从一定意义上说是无法克服的. 同时还通过模型模拟证明比值植被指数与叶面积指数之间为近似分段线性关系, 而非普遍采用的线性关系, 这主要是由背景影响以及红光、近红光反射率随叶面积指数增加变化速率不一致造成的.

**关键词** 植被指数 遥感 叶面积指数 植被覆盖度 反演

研究发现, 当不同波段的反射率以一定的形式组合成一个参数时, 它与植被特性参数间的关系(例如 LAI, FPAR 等)比单一波段值更稳定、可靠, 而且用来探测生物量有更好的灵敏性. 这种多波段反射率的组合被称为植被指数. 植被指数是对地表植被活动的简单、有效和经验的度量<sup>[1]</sup>. 植被指数有助于增强遥感影像的解译力, 并已作为一种遥感手段广泛应用于土地利用覆盖探测、植被覆盖密度评价、作物识别和产量预报等方面. 植被指数还可用来诊断一系列植被生物物理参量, 如叶面积指数 (LAI)、植被覆盖度、光合有效辐射吸收系数(APAR)等, 并进而用于分析植被生长过程.

从消除土壤背景、大气等因素影响的角度出发, 出现了各种形式的植被指数, 如比值植被指数(SR)、标准化差值植被指数(NDVI)、垂直植被指数(PVI)、土壤调节植被指数(SAVI)、大气阻抗植被指数(ARVI)、全球环境监测植被指数 (GEMI)、增强的土壤大气修正植被指数 (EVI)等<sup>[1]</sup>. 这些植被指数从满足不同的应用需要出发, 各有优缺点. 一些植被指数虽然有较强的消除土壤背景或大气影响的能力, 但使用时需要参数太多, 对参数的精度要求也较高, 往往因所需的参数无法满足要求而使其效果大打折扣, 而有的植被指数因与叶面积指数、FPAR 等生物物理参量关系不明显, 应用也不十分广泛. 因此, 衡量一个植被指数的优劣, 除了精度方面的考虑外, 使用简便、与常用生物物理参量关系明显也是重要的参考指标. 虽然许多研究

2002-12-04 收稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 40271081)、“973”项目(批准号: G2000077900)、“863”项目(批准号: 2002AA130010)和中国博士后科学基金资助

\*\* E-mail: langshihao@263.net

都表明 NDVI 具有饱和点低、消除背景影响能力差等缺陷, 但 NDVI 的应用仍十分广泛, 究其原因, 使用简单、精度能够满足一些应用需求、没有综合效果更好的植被指数替代等都是决定其使用的主要因素。

本文从分析植被光谱的特点入手, 提出一种三波段梯度差植被指数(TGDVI), 并建立了通过该植被指数反演植被覆盖度和叶面积指数的方法. TGDVI 物理意义明确, 计算简单, 与 SR 和 NDVI 一样不需要太多的参数, 并具有一定的消除背景和薄云影响的能力, 同时该植被指数还解决了 NDVI 饱和点低的问题。

### 1 三波段梯度差植被指数(TGDVI)及其基本原理

一般来说, 植被在绿光波段有一个低反射峰, 在近红外波段有一个高反射峰, 在红光波段为一个吸收谷. 而土壤光谱在绿到近红外波段近似线性变化. 图 1 为 jhu 光谱库中全部 25 种土壤在 0.56~0.83  $\mu\text{m}$  之间的光谱曲线. 从该曲线可以看出, 在该波长范围内, 大部分土壤光谱近似线性变化. 图 2 为典型的土壤和植被光谱曲线形式. 绿、红、近红外波段是一般传感器都具有的三个波段. 根据上述植被和土壤的光谱特点, 提出如下形式三波段梯度差植被指数 (TGDVI):

$$\begin{cases} \text{TGDVI} = \frac{R_{\text{ir}} - R_{\text{r}}}{\lambda_{\text{ir}} - \lambda_{\text{r}}} - \frac{R_{\text{r}} - R_{\text{g}}}{\lambda_{\text{r}} - \lambda_{\text{g}}}, \\ \text{TGDVI} = 0, \quad \text{若 } \text{TGDVI} < 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中  $R_{\text{ir}}$ ,  $R_{\text{r}}$  和  $R_{\text{g}}$  分别为近红外、红、绿波段的反射率;  $\lambda_{\text{ir}}$ ,  $\lambda_{\text{r}}$  和  $\lambda_{\text{g}}$  为相应波段的波长. 分析该植被指数可以看出, 随植被增加, 绿光和近红外反射率增加、红光反射率减小, 该植被指数增大; 反之, 该指数减小. 对于植被来说, TGDVI 一般不会小于 0.

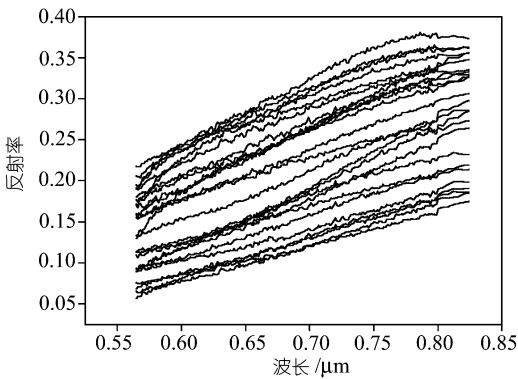


图 1 jhu 光谱库 25 种土壤光谱(0.56~0.83  $\mu\text{m}$ )

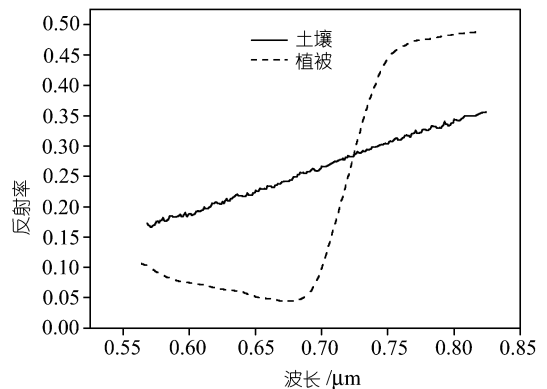


图 2 典型的土壤和植被光谱曲线(0.56~0.83  $\mu\text{m}$ )

TGDVI 具有一定的消除土壤背景影响的能力. 假设在绿、红、近红外波段, 植被、土壤面积比不随波段变化(该假设比较粗糙, 但一些通用的植被指数一定程度上也隐含了该假设), 像元的反射率为像元内植被和土壤的面积加权和, 若忽略误差项, 则三波段的反射率为

$$R_{\text{ir}} = AR_{\text{vir}} + (1 - A)R_{\text{sir}}, \quad (2)$$

$$R_{\text{r}} = AR_{\text{vr}} + (1 - A)R_{\text{sr}}, \quad (3)$$

$$R_{\text{g}} = AR_{\text{vg}} + (1 - A)R_{\text{sg}}, \quad (4)$$

其中  $R_{ir}$ ,  $R_r$  和  $R_g$  分别为近红外、红、绿波段的反射率;  $R_v$  和  $R_s$  为相应波段植被和土壤的反射率;  $A$  为植被覆盖面积比.

三波段梯度分别为

$$\frac{R_{ir} - R_r}{\lambda_{ir} - \lambda_r} = \frac{A(R_{vir} - R_{vr})}{\lambda_{ir} - \lambda_r} + \frac{(1-A)(R_{sir} - R_{sr})}{\lambda_{ir} - \lambda_r}, \quad (5)$$

$$\frac{R_r - R_g}{\lambda_r - \lambda_g} = \frac{A(R_{vr} - R_{vg})}{\lambda_r - \lambda_g} + \frac{(1-A)(R_{sr} - R_{sg})}{\lambda_r - \lambda_g}. \quad (6)$$

假定在所选波段, 土壤光谱随波长线性变化, 其斜率为  $K$ , 即  $\frac{R_{sir} - R_{sr}}{\lambda_{ir} - \lambda_r} = \frac{R_{sr} - R_{sg}}{\lambda_r - \lambda_g} = K$ , 则

三波段梯度差指数为

$$\text{TGDVI} = A \left[ \frac{(R_{vir} - R_{vr})}{\lambda_{ir} - \lambda_r} - \frac{(R_{vr} - R_{vg})}{\lambda_r - \lambda_g} \right]. \quad (7)$$

可见, 在上述假定下, TGDVI 仅与植被光谱有关, 与土壤背景无关.

### 1.1 TGDVI 与植被覆盖度的关系

在前面的假定下, 可以根据 TGDVI 计算植被覆盖度( $A$ )和叶面积指数(LAI).

根据(7)式得:

$$A = \text{TGDVI} / \left[ \frac{(R_{vir} - R_{vr})}{\lambda_{ir} - \lambda_r} - \frac{(R_{vr} - R_{vg})}{\lambda_r - \lambda_g} \right], \quad (8)$$

式中,  $R_{ir}$ ,  $R_r$ ,  $R_g$ ,  $\lambda_{ir}$ ,  $\lambda_r$  和  $\lambda_g$  均已知, 因此只要知道纯植被覆盖时的光谱即可确定植被覆盖度  $A$ . 纯像元光谱可通过一些图像处理方法得到. 事实上, 对于同种植被覆盖来说, 若图像上存在纯植被覆盖像元, 可以不必通过寻找纯植被光谱来计算植被覆盖度. 分析图 2 中曲线可以看出, 对于近红外、红、绿三波段梯度差来说, 土壤面积的增加和植被面积的减小总是使该梯度差趋于减小, 反之则趋于增大, 对于全植被覆盖来说, 该梯度差最大. 于是(8)式可改写为

$$A = \text{TGDVI} / \text{TGDVI}_{\max}. \quad (9)$$

$\text{TGDVI}_{\max}$  为最大三波段梯度差:

$$\text{TGDVI}_{\max} = \text{MAX}(\text{TGDVI}). \quad (10)$$

### 1.2 TGDVI 与叶面积指数的关系

植被覆盖度与叶面积指数的关系可以近似表示为<sup>[2]</sup>

$$A = 1 - e^{-k\text{LAI}}, \quad (11)$$

其中  $k$  为与几何结构有关的系数, 可通过模拟、实测或根据后面介绍的方法计算得到.

LAI 可由(9)和(11)式得到:

$$\begin{cases} \text{LAI} = \ln(1 - \text{TGDVI} / \text{TGDVI}_{\max}) / (-k) & A < 1, \\ \text{LAI} = \text{LAI}_{\max} & A = 1. \end{cases} \quad (12)$$

$\text{LAI}_{\max}$  为该植被类型的最大 LAI 值.

### 1.3 系数 $k$ 的近似计算

(11)式中系数  $k$  可通过下式计算<sup>[2]</sup>:

$$k = \Omega \cdot K, \quad (13)$$

式中,  $\Omega$  为聚集指数, 随机分布  $\Omega = 1$ , 规则分布  $\Omega > 1$ , 丛生分布  $\Omega < 1$ , 聚集指数的确定可参照文献[3]的方法或根据实测和经验确定.  $K$  为消光系数<sup>[41]</sup>:

$$K = G(\theta) / \cos(\theta), \quad (14)$$

式中  $G(\theta)$  为  $\theta$  方向的投影系数.

Nilson 给出的倾角为水平、垂直分布等情况的  $G$  函数形式. 若叶倾角分布采用单参数椭圆分布近似<sup>[5]</sup>, 可以得到  $G$  函数的解析表达式<sup>[61]</sup>:

$$G(\theta) = \sqrt{1 - \cos(\theta)^2 + \cos(\theta)^2 \chi^2} / A, \quad (15)$$

$$A = \begin{cases} \chi + \varepsilon / \sin(\varepsilon) & \varepsilon = \cos^{-1}(\chi) & \chi < 1, \\ 2 & & \chi = 1, \\ \chi + \text{ctg} \varepsilon \cdot \ln(\text{tg} \varepsilon + \chi) & \varepsilon = \cos^{-1}(1/\chi) & \chi > 1, \end{cases} \quad (16)$$

喜直型  $\chi < 1$ , 喜平型  $\chi > 1$ , 均匀型  $\chi = 1$ .  $\chi$  为群体中叶层的垂直投影面积与水平投影面积之比. 对于随机分布  $G(\theta) = 0.5$ , 在大多数情况下, 可以采用该近似值.

## 2 TGDVI 的模拟效果分析及与其他植被指数的比较

为了说明 TGDVI 的效果, 采用 SAIL 模式进行模拟验证<sup>[7]</sup>. SAIL 模型的输入参数主要来自 2002 年 3 月底到 5 月初在北京顺义开展的以冬小麦为主要观测对象的大型遥感综合实验. 该实验不仅观测了冬小麦冠层、土壤的光谱反射率数据, 同时也获得了冬小麦叶片的光谱反射率、透射率数据. 实验所用的光谱仪为美国 GER 公司生产的野外便携式光谱仪 MARK-V(波长范围覆盖 400~2500 nm)以及美国分析光谱设备(ASD)公司的 FieldSpec HandHeld 型可见光、近红外光谱仪(波长范围为 325~1075 nm).

根据该试验, SAIL 模型的输入参数如下: 叶倾角分布取喜直型<sup>[8]</sup>, 叶面积指数取(0.01, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 20)15 个不同的值. 叶子光学特性采用顺义实验实测值. 土壤反射率服从土壤线方程, 其系数根据顺义试验实测值通过回归得到(表 1). 模拟中绿、红、近红外三波段波长取 TM2, 3 和 4 通道中心波长, 分别为 0.56 nm, 0.66 nm 和 0.83 nm.

表 1 顺义试验土壤线方程

土壤线方程	样本数	相关系数
$IR = 0.01492 + 1.22698 \times R$	20	0.98827
$R = R$	20	1
$R = 0.0035 + 1.27787 \times G$	20	0.99641

针对不同的土壤类型, 土壤红光的反射率值在 0.05~0.4 之间变化, 步长取 0.05. 太阳天顶角取 45°, 方位角 0°, 观测天顶角、方位角取 0°.

图 3 为不同土壤背景条件下, 根据 SAIL 模型模拟值计算的 NDVI, SR, TGDVI 和 EVI 与叶面积指数之间的关系. 从图中可以看到, SR, TGDVI 和 EVI 的饱和点明显高于 NDVI. TGDVI, EVI, NDVI 与 LAI 之间均存在类似负指数关系, 而 SR 与 LAI 之间的关系比较复杂, 虽然基本

1) 覃文汉. 植被双向反射的模型研究与应用初探. 中国科学院地理研究所博士论文, 1992. 10~12

上可以用线性关系来近似,但在叶面积指数较低和叶面积指数较高时会带来一些误差.这主要是由土壤背景的影响以及红光和近红光随叶面积指数的变化速率不一致造成的.

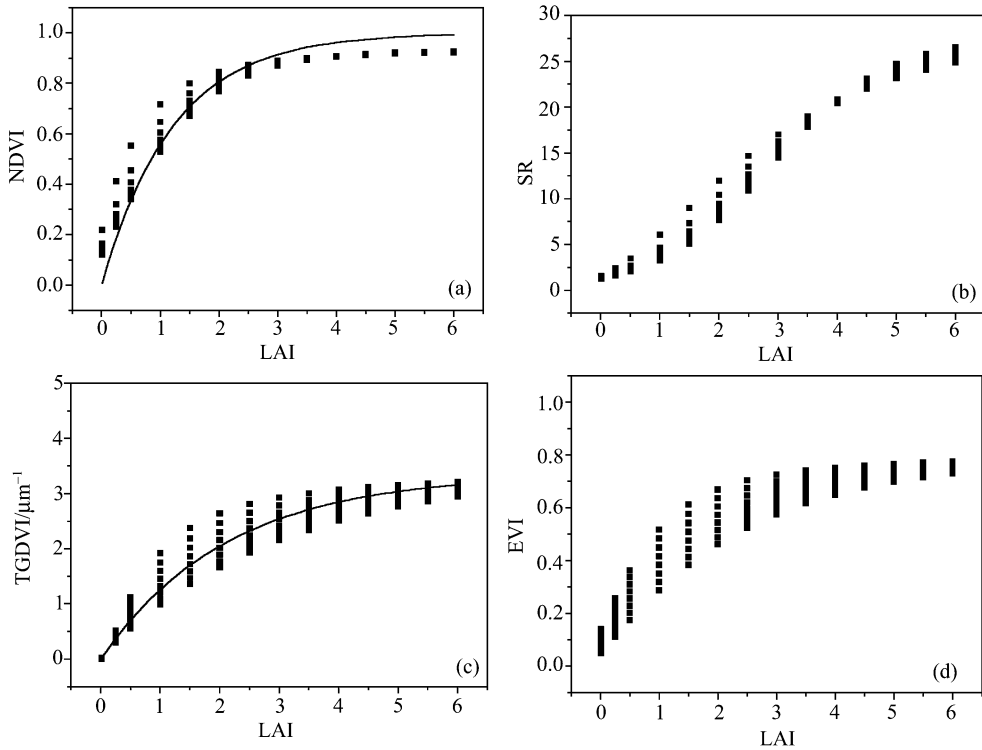


图 3 不同植被指数与 LAI 的关系

(a) NDVI; (b) SR; (c) TGDVI; (d) EVI

从表面上看,图 3(c)和(d)中的点比图 3(a)更离散,即 TGDVI 和 EVI 在消除土壤背景影响方面的优势并没有表现出来,但这主要由以下几方面原因造成:(1) TGDVI 是从线性光谱混合模式推导出来的,而 SAIL 模型可以看作一种非线性混合模型,因而采用 SAIL 模型模拟值无法得到最理想的结果;(2) TGDVI 和 EVI 在计算时多引入一个波段,而每一个波段的模拟值都存在误差,因而也增加了点的离散度;(3) NDVI 在 LAI 大于 2 时基本达到饱和,因而点的离散度很小,TGDVI 和 EVI 则不然.

### 3 TGDVI 的高饱和点及其理论解释

图(3)中 TGDVI 的饱和点高于 NDVI. 通过计算 TGDVI 和 NDVI 对 LAI 的一阶偏导数,可以进一步从理论上证明这一点.

根据(12)式得 TGDVI 与 LAI 的关系式为  $TGDVI = TGDVI_{\max}(1 - e^{-kLAI})$ . 分别采用  $TGDVI = a(1 - e^{-kLAI})$ ,  $NDVI = (1 - e^{-kLAI})$  对图 3(c)和(a)进行拟合,拟合结果见表 2.

可以看出,拟合效果均较好,与理论预测一致. 尤其值得指出的是,对于 TGDVI 来说,拟合出的  $k$  值为 0.471,与假定叶倾角随机分布、聚集指数为 1 时计算得到的  $k = 0.5$  基本一致<sup>[9]</sup>;

$a$  值为 3.357, 与以 LAI 等于 20 时根据 SAIL 模型模拟得到的  $TGDVI_{\max}$  值一致. 这说明前面的假设和推导基本合理.

表 2 拟合冬小麦 TGDVI, NDVI 与 LAI 关系公式

植被指数	拟合方程	相关系数	样本数
TGDVI	$TGDVI = 3.357(1 - e^{-0.471LAI})$	0.94787	112
NDVI	$NDVI = 1 - e^{-0.820LAI}$	0.92301	112

分别计算 TGDVI 和 NDVI 对 LAI 的一阶偏导数:

$$\frac{\partial TGDVI}{\partial LAI} = 1.581 \times e^{-0.471 \times LAI},$$

$$\frac{\partial NDVI}{\partial LAI} = 0.820 \times e^{-0.820 \times LAI},$$

结果见图 4. 从图中可以看出, TGDVI 的饱和点高于 NDVI. 图 4 中 NDVI 的饱和点被明显高估了. 一般研究认为, 对于小麦等作物来说, NDVI 的饱和值大概在 2~3 之间<sup>[1]</sup>. 这主要是因为采用  $1 - e^{-kLAI}$  形式的函数模拟时, 人为提高了 NDVI 的饱和点, 这一点从图 3(a) 可以反映出来. 根据图 3(a) 判断, NDVI 的实际饱和点大约在 2~3 之间, 与一般研究结论并不矛盾.

TGDVI 的高饱和点可以从分析红光和近红外光对叶面积指数变化的响应得到解释. 当叶面积增加到一定数量, 达到全覆盖的时候, 叶面积再增加, 可见光的反射率变化很小, 几乎接近常数. 对于近红外来说, 在叶面积从 0 开始至 2 的阶段, 近红外反射率随叶面积增加迅速增大, 即使植被达到全覆盖, 由于近红外的高散射率, 其反射率仍随叶面积的增大而增大, 不过速度放缓. 因此, 近红外波段的反射率对植被光谱指数起了主宰作用, 而可见光波段的反射率基本上起到一种相对基准线的作用<sup>[10]</sup>. 这也说明为什么比值植被指数的饱和点比较高, 而且与 LAI 之间应是分段线性关系. 对于 NDVI 来说, 当植被覆盖达到一定程度, 叶面积指数再增加, 虽然分子上近红外与红光反射率的差值仍在增加, 但增幅明显减小, 而此时分母上二者的和也在缓慢增大, 这就部分抵消了分子产生的增量, 从而导致 NDVI 饱和点降低. 对于 TGDVI 来说, 其分母接近常数, 分子随近红外反射率的增加而增加, 效果与比值植被指数相似, 因而饱和点较 NDVI 高.

从 NDVI 和 TGDVI 对近红外的一阶偏导数和二阶偏导数变化可以更清楚地对它们进行比较. 假设植被覆盖达到一定程度, 叶面积指数再增加, 红光反射率  $R_r$  不变或变化很小. NDVI 对近红外波段的一阶和二阶偏导数分别为

$$\frac{\partial NDVI}{\partial R_{ir}} = \frac{2R_r}{(R_{ir} + R_r)^2},$$

$$\frac{\partial^2 NDVI}{\partial^2 R_{ir}} = \frac{-4R_r}{(R_{ir} + R_r)^3}.$$

NDVI 随  $R_{ir}$  的增大而增大, 但增大幅度迅速减小. 根据 SAIL 模型的模拟值, 红光反射率饱和值取 0.01926, 则 NDVI 对近红外的一阶导数如图 5.

可以看出, NDVI 随  $R_{ir}$  的变化迅速趋于饱和. 对于 TGDVI 来说, 其一阶导数可近似表示为

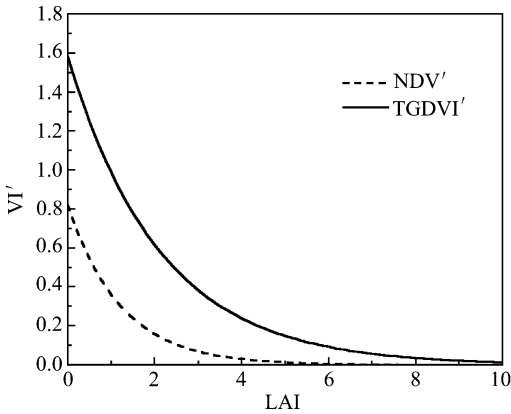
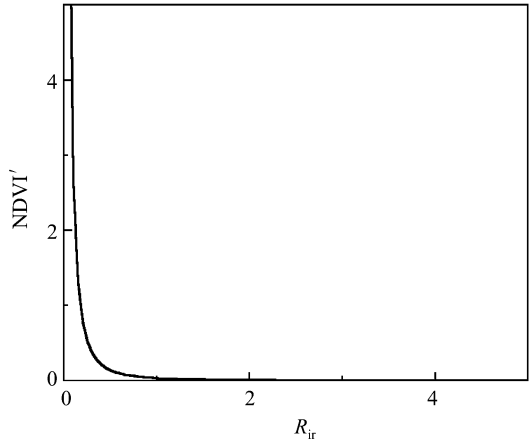


图 4 TGDVI 和 NDVI 对 LAI 的一阶偏导数

图 5 NDVI 对  $R_{ir}$  的一阶偏导数

$$\frac{\partial \text{TGDVI}}{\partial R_{ir}} = \frac{1}{\lambda_{ir} - \lambda_r}$$

与 SR 相似, TGDVI 随近红外反射率的增大而增大, 增大幅度基本不变。

#### 4 TGDVI 在反演叶面积指数中的应用效果分析

采用顺义试验获得的多点、多时相的冬小麦冠层光谱反射率和叶面积指数配套数据对 TGDVI 反演叶面积指数的效果进行验证。试验期从 2001 年 3 月 26 日到 2001 年 5 月 19 日。实验方法为在试验期内选择晴天对不同地块的冠层光谱和叶面积指数进行观测。冠层光谱的观测仪器为美国分析光谱设备(ASD)公司的 FieldSpec HandHeld 型可见光、近红外光谱仪。该仪器波长范围为 325~1075 nm, 观测时采用 25 度视场角, 仪器距地高度 1.5 m。以光谱仪正下方为中心, 采集周围半米见方内的小麦叶片进行叶面积指数观测。

利用实测冠层光谱数据计算 TGDVI, 其中绿、红、近红外波长对应 TM2, 3 和 4 通道中心波长。然后根据(12)式计算 LAI。为便于比较, 采用最常用的简单比植被指数(SR)作对照。简单比植被指数(SR)的系数通过前面的 SAIL 模型模拟得到, 具体计算公式见表 3。

表 3 反演时采用的公式及反演结果

植被指数	计算公式	相关系数	标准偏差	样本数
TGDVI	$\text{LAI} = (\ln(1 - \text{TGDVI}/3.357))/(-0.471)$	0.92599	0.34269	20
SR	$\text{LAI} = (\text{SR} - 0.625)/4.560$	0.45973	1.04788	20

不同植被指数 LAI 计算值与实测值的对比见图 6。可以看出, TGDVI 的反演效果明显优于 SR。值得指出的是, 该结果是在严格的地面控制实验条件下获得的。对于航空、航天遥感来说, 由于大气校正、配准精度、像元尺度的 LAI 观测数据难于获取等原因, TGDVI 的反演结果肯定达不到上述精度, 但其结果优于 SR 这种趋势是不会改变的。

#### 5 结论与讨论

本文从植被和土壤的光谱特点出发, 提出三波段梯度差植被指数(TGDVI), 并推导出它与

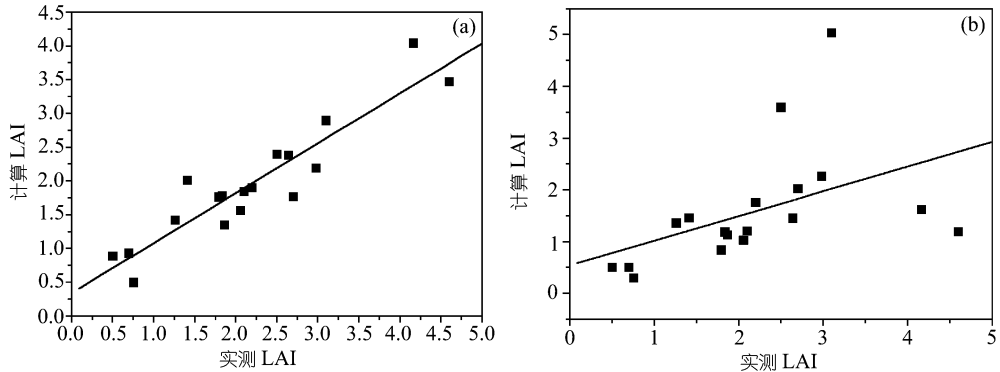


图 6 实测与反演叶面积指数相关分布图  
(a) TGDVI 计算结果, (b) SR 计算结果

植被覆盖度、叶面积指数的关系. 通过理论推导和模型模拟研究表明, 和其他植被指数相比, TGDVI 具有高饱和点和一定的背景消除能力, 与植被覆盖度、叶面积指数之间存在相对明确的函数关系.

NDVI 和 TGDVI 对 LAI 的饱和点差异可以从其定义形式得到解释. 红光和近红光随叶面积指数增加的变化速率不一致, 当叶面积指数增大到一定程度, 红光的反射率变化很小, 而近红外波段的反射率仍有较大变化. 因而, 近红外波段的反射率对植被光谱指数起了主宰作用, 而红光波段的反射率基本上是起到一种相对基准线的作用<sup>[10]</sup>. 分析 NDVI 和 TGDVI 随近红外反射率的变化情况可以看出, TGDVI 的饱和点明显高于 NDVI. 通过 SAIL 模型模拟的 NDVI 和 TGDVI 随 LAI 的变化情况也反映了这一点.

对于 LAI 反演来说, SR 可以说是在众多植被指数中被用得最广泛、最成功的一个<sup>[11]</sup>. 但其缺陷也是很明显的. 一方面 SR 没有考虑土壤背景影响; 另一方面, 近红外与红光随叶面积指数的变化并非完全同步, 因此 SR 与叶面积指数之间并非完全线性关系. 如果用同一线性关系模拟, 在叶面积指数较小和较大时会产生很大误差. 此外, SR 与叶面积指数的经验关系随观测时间、地点、植被类型的变化而变化, 具有很大的不确定性, 这就给大范围的叶面积指数反演带来困难. 而在满足一定的假设条件下, TGDVI 与植被覆盖度、叶面积指数之间可以建立比较明确的函数关系. 其所需的参数也是遥感可反演的, 或可以根据经验确定的. 因此, 与 SR 相比, TGDVI 的优势也比较明显. 薄云的光谱在 TGDVI 所用三波段范围内表现出线性变化特征, 从而使 TGDVI 具有一定的消除薄云影响的能力. 初步研究结果表明, 其效果要优于 NDVI 和 SR.

虽然在形式上 TGDVI 与导数光谱植被指数相似, 但是 TGDVI 抓住了导数光谱的核心, 可以看作是导数光谱植被指数在有限波段的扩展和成功应用.

TGDVI 假定在有限波段范围内土壤反射率随波长线性变化, 在计算植被覆盖度时也没有考虑植被、土壤面积比随波长的变化情况, 与实际情况存在差异, 可能会影响 TGDVI 的精度和使用效果. 但最后的模型模拟和试验验证结果较好, 说明这种简化还是可行的. 此外, TGDVI 用到三个波段的信息, 而且没有经过比值处理, 波段噪声的影响会较大, 因此建议使



用前对数据进行降噪处理<sup>[12]</sup>, 以获得理想效果.

**致谢** 感谢中国科学院遥感应用研究所李小文院士在成文过程中提供的帮助和指导. 文中部分采用了中国科学院遥感应用研究所、中国科学院地理与资源研究所和北京市农林科学院等本课题组成员提供的数据, 在此一并表示感谢.

### 参 考 文 献

- 1 刘玉洁, 杨忠东, 等编著. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社, 2001. 232~233
- 2 Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agric Meteorol*, 1971, 8: 25~38
- 3 Roselyne L, Chen J M, Jean-louis R, et al. Retrieval of vegetation clumping index using hot spot signatures measured by polder instrument. *Remote Sens Environ*, 2002, 79: 84~95
- 4 Chen J M, Paul M R, Stith T G, et al. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 29429~29443
- 5 Campbell G S. Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distribution. *Agric Forest Meteorol*, 1990, 49: 173~176
- 6 覃文汉, 项月琴. 多组分植被方向反射系数的解析计算模型. *中国科学, C 辑*, 1996, 26(6): 542~551
- 7 Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL Model. *Remote Sens Environ*, 1984, 16: 125~141
- 8 Goel N S, Strelbel D E. Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agron J*, 1984, 76: 800~803
- 9 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 遥感区域地表植被二氧化碳通量的机理及其应用. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(2): 215~224
- 10 张仁华, 著. 实验遥感模型及地面基础. 北京: 科学出版社, 1996. 104~113
- 11 Chen J M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal application. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1996, 22(3): 229~242
- 12 Green A A, Berman M, Switzer P, et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(1): 65~74