

文章编号:1001-9014(2010)01-0185-05

耦合辐射传输模型的植被含水量遥感改进监测

赵 祥, 王锦地, 刘素红

(北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室,
环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:基于耦合的叶片与冠层辐射传输模型,研究并使用了改进的植被指数提取植被含水量,以实现植被水分含量的遥感监测.使用 PROSAIL 模拟的高光谱数据,首先对 NDVI、WI、NDWI、MSI、CSI 及 NDII 等已有的植被指数提取含水量进行可行性分析比较.结果显示 NDVI 不能估算出植被含水量,CSI 估算能力也不理想,其余四个指数 WI、NDWI、NDII、MSI 估算植被含水量时相关系数平方在 0.76 左右;之后对 NDWI 提取植被含水量进行了敏感因子分析,结果表明 NDWI 与 MCARI 具有较好的线性关系,从而得出改进的植被含水量估算方法.该方法可以较好地去除 LAI 的干扰,估算的相关系数平方提高为 0.97,增加了 27%,估算残差由初始的 0.0156 降低为 0.00535,减少了 65%.

关键词:辐射传输;植被;含水量;高光谱
中图分类号:TP753 文献标识码:A

MODIFIED MONITORING METHOD OF VEGETATION WATER CONTENT BASED ON COUPLED RADIATIVE TRANSFER MODEL

ZHAO Xiang, WANG Jin-Di, LIU Su-Hong

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: By coupling leaf with canopy radiation transfer model, a modified vegetation index was explored to extract the vegetation water content in order to monitor the vegetation water content from remote sensing data. Some vegetation indices for the vegetation leaf water content, such as NDVI, WI, NDWI, MSI, CSI and NDII, were analyzed and compared based on the hyperspectral data simulated by PROSAIL. The results show that the water content can not be estimated by NDVI, and CSI is not an ideal tool. The rest four indices WI, NDWI, NDII, and MSI can generate relatively good results with the correlation coefficients square between the estimation and real value being all about 0.76. Then, sensitivity factors were analyzed for NDWI extracting the water content, and the results show that NDWI and MCARI have a good linear relationship. This method can better remove the interference of LAI. The correlation coefficient square between the estimation and real value has been improved to 0.97, which is increased by 27% compared to the foregoing value. The estimated residual is reduced from 0.0156 to 0.00535, a reduction of 65% compared to NDWI method.

Key words: radiative transfer; vegetation; water content; hyperspectral

引言

因为遥感技术具有周期短、范围广、速度快等技术优势,已被广泛应用于水质监测^[1]、农业与林业研究、植被病变监测或土壤盐碱化监测^[2]等应用领域.植被含水状况是区域土壤含水量信息的间接表

达,也是干旱监测的一个重要途径.目前广泛应用的干旱监测方法大致可以分为两类:一类是基于地表水和能量平衡模型的干旱监测,这些方法都是基于单点观测,很难反映大面积的干旱状况;另一类是基于卫星遥感信息的植被指数,这些指数通常基于可见光-近红外数据进行植被含水量估算.

收稿日期:2009-02-11,修回日期:2009-12-24

Received date: 2009-02-11, revised date: 2009-12-24

基金项目:国家自然科学基金(40871163, 40771150), 国家高技术研究发展计划(2007AA120205)和国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714403)

作者简介:赵 祥,男,安徽当涂人,博士,主要从事定量遥感应用研究.

通常情况下,某一特定的植被指数往往只能有效探测植被的某一生化组分或者某一特定结构参数信息的变化,如何更加有效地对植被理化参量进行提取是遥感应用中经常遇到的难题.本文基于叶片辐射传输模型 PROSPECT^[3]与冠层反射率模型 SAIL^[4]耦合的多参数模型 PROSAIL,选择几个常用的植被指数,通过反演模型参数叶片含水量(Cw)与叶面积指数(LAI)可以得到植被冠层含水量 EWT (Equivalent Water Thickness, EWT)^[5],分析了各植被指数估算植被含水量的性能.在对植被光谱敏感因子分析后,提出了优化的植被含水量估算指数,有效地提高了反演精度.

1 研究方法

1.1 冠层含水量估算指数

有很多基于高光谱数据估算植被含水量的植被指数,最广泛的是归一化差值水分指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)^[6]和水分指数^[7](Water Index, WI),也有研究中应用 NDVI^[8]、归一化差值近红外指数(Normalized Difference Infrared Index, NDII)^[9]和水应力指数(Moisture Stress Index, MSI)^[10]对植被含水量进行反演. Serrano 等人^[11]应用 AVIRIS 高光谱数据对上述几种指数估算植被含水量进行了评估,认为 WI 及 NDWI 可以较好地估算植被含水量; Sims 等^[12]从光谱反射率出发,综合 RVI^[13]与 WI^[7]对稀疏与浓密冠层植被的敏感差异性,提出使用冠层结构指数(Canopy Structure Index, CSI)对植被含水量进行估算; Penuelas 等指出 WI^[7]可以较为灵敏地反映叶片相对含水量、叶片水势、气孔电导性和细胞壁弹性等.

若以 R_n 表示反射率, n 表示波长,单位为 nm, 则各指数具体形式如下:

$$NDVI = (R_{895} - R_{675}) / (R_{895} + R_{675}), \quad (1)$$

$$NDWI = (R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240}), \quad (2)$$

$$WI = R_{900} / R_{970}, \quad (3)$$

$$NDII = (R_{819} - R_{1649}) / (R_{819} + R_{1649}), \quad (4)$$

$$MSI = R_{1599} / R_{819}, \quad (5)$$

$$CSI = 2sSR - sSR^2 + sWI^2, \quad (6)$$

公式(6)中

$$sSR = (SR_{680} - 1) / (SR_{680} - 1)_{\max}, \quad (7)$$

$$sWI = (WI_{1180} - 1) / (WI_{1180} - 1)_{\max}, \quad (8)$$

$$SR_{680} = R_{800} / R_{680}, \quad (9)$$

$$WI_{1180} = R_{900} / R_{1180}. \quad (10)$$

1.2 耦合的参数反演方法

PROSPECT 模型是一个基于“平板模型”的叶片辐射传输模型^[3],可以计算叶片 400nm 到 2500nm 的半球反射率和透过率.模型参数主要有:叶绿素、叶肉结构参数、含水量、叶片干物质含量.干物质代表纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质、淀粉等,这些物质或者因其在叶片内的含量很少,或者由于它们的吸收作用非常微弱,很难将它们的作用单独表示出来,因此采用了总的干物质来表达这些物质的综合作用. SAIL 模型描述了水平均匀植被冠层中直射和上行下行散射光通量的辐射传输过程^[4],它是使用最为广泛的冠层二向性反射物理模型之一. Kusk 对模型引进了描述热点形状的参数^[14],改进后的模型随之称为 SAILH. SAIL 模型的输入参数包括:叶片的反射率和透过率、叶面积指数、叶倾角参数、土壤反射率、太阳辐射的散射分量以及光线入射和观测的几何参数.

耦合后的 PROSPECT + SAIL 模型,简称为 PROSAIL 模型(参见图 1).



图1 植被参量反演方案

Fig. 1 Workflow of parameter inversion

PROSAIL 模型数学形式可以表示为:

$$\rho(\lambda) = f(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, LAI,$$

$$Cab, Cw, Cdm, SKYL, Rs), \quad (11)$$

式中 $\rho(\lambda)$ 表示波长 λ 处的反射率,其它模型参数可以分为以下几类:

理化参数

Cab: 叶绿素 a + b 含量, 单位: $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

Cw: 单位叶面积水重, 单位: g/cm^2 或 cm

Cdm: 叶片干物质含量, 单位: g/cm^2

LAI: 叶面积指数

背景参数

R_s : 壤反射率

其它参数

θ_s : 太阳天顶角

φ_s : 太阳方位角

θ_v : 观测天顶角

φ_v : 观测方位角

SKYL: 天空光比例.

利用测量的叶片光谱提取叶片生化参量的方法已经相对比较成熟,但是在冠层尺度上,因为冠层光谱受到叶片生化参量、土壤背景、冠层结构等因素以及一些未知因素的共同影响,限制了生化参量的反演精度,所以从植被冠层光谱中提取生化参量仍然是具有挑战性的研究.目前提取植被冠层生化参量的方法可分为数学统计和物理模型两类反演方法,本文综合两种反演方法,首先使用耦合的叶片与冠层光学辐射传输模型(PROSPECT + SAIL) 模拟得到植被冠层反射率光谱,之后建立植被指数与植被理化参量之间的统计回归关系式,最后通过回归关系式估算出植被冠层参量.

2 冠层反射率敏感性分析

为了分析不同理化参数对 PROSAIL 模型的敏感程度,我们使用了一种非常简便的模拟方法分析了叶绿素、植被含水量、干物质以及叶面积指数对反射率波谱不同波长范围的敏感性.具体的敏感性分析方法如下:当分析某一参数对模型的敏感性时,设定其余所有输入参数为一常见定值,使待分析变量分别取不同的值,从而得到一系列相应的冠层反射率波谱曲线,通过对结果进行分析,即可得到某一参数的敏感性.

本文只考虑从高光谱影像中分析叶绿素、植被含水量、干物质以及叶面积指数这四个参量的敏感性.在使用 PROSAIL 模型模拟时,针对这四个参数分别使用了不同的取值进行模拟,具体模拟取值参见表 1,其余参数根据卫星与载荷成像条件进行设置,例如根据本文使用的遥感影像成像几何、地理参数、实测的土壤反射率及天空光比例设置模型的相应参数.

表 1 PROSAIL 模型输入参数取值列表

Table 1 Values list of parameters in PROSAIL

模型参数	取 值
LAI	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4.0, 4.5, 6
Cab	20, 35, 50, 65, 80, 90
Cdm	0.0035, 0.0045, 0.0055, 0.0065, 0.0075, 0.0085
Cw	0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03, 0.05, 0.08, 0.1

通过模拟可以发现, LAI 对全部波谱区间反射率都有不同程度的影响,当 LAI 逐渐变大时,可见光和短波红外反射率逐渐变小,近红外反射率逐渐变高,当 LAI 接近于 6 时,近红外反射率趋于饱和,这主要是由于可见光区间的叶绿素和短波红外区间的水分的影响;叶绿素 a + b 对可见光反射率有较大的影响,对波长大于 750nm 以后区间反射率没有影响;含水量对近红外区间较大的影响;干物质对可见光区间的反射率影响较小,对近红外区间反射率影响相对较大.

3 结果与讨论

3.1 基于植被指数反演结果

图 2 显示了以上各指数对植被含水量的估算效果,估算能力使用相关系数(R)及残差(RSE)进行评判.结果显示 NDVI 不能估算出植被含水量;CSI 估算能力也很一般;其余四个指数 WI, NDWI, NDII, MSI 估算植被含水量时相关系数的平方均在 0.76 左右,估算结果的残差均在 0.015 左右,常规小麦、玉米植被含水量的值在 0.01 至 0.02 之间,如果估算的 RSE 为 0.015,则会给估算的结果引入很大的不确定性.这表明使用植被指数估算植被含水量时仍有可以完善提高的地方.

3.2 植被指数优化

这些植被含水量估算指数中,NDWI 应用最为广泛,理论基础较为透彻.那么其还有可以提高的地方吗?让我们来分析其公式形式,在 NDWI 中使用了波长 860nm 和 1240nm 处植被反射率,这两个波长处反射率的归一化形式很好地去除了其它影响因子吗?

通过对前面的敏感性分析以及模拟得到的数据综合分析表明,叶面积指数与木质素均会对这两个波长处反射率产生影响,因而均会对 NDWI 产生影响;下面我们来分析对 NDWI 的影响因子.图 3 显示了 NDWI 与植被含水量 C_w 之间的散点图,从该图来看,当 LAI 不变时,干物质含量 C_m 对 NDWI 具有一定的影响.同样的植被含水量时, C_m 变大时,NDWI 变小.因此,估算时,随着 C_m 的变大,使用 NDWI 时容易低估植被含水量.

图 4 显示了 LAI 对 NDWI 的影响,此时,干物质含量保持 0.0045 不变, LAI 从 1 变化到 6,从模拟结果来看,当植被含水量不变时,随着 LAI 变大,NDWI 也会变大,此时,会高估植被含水量.

对已有的数据分析表明,植被的干物质含量变

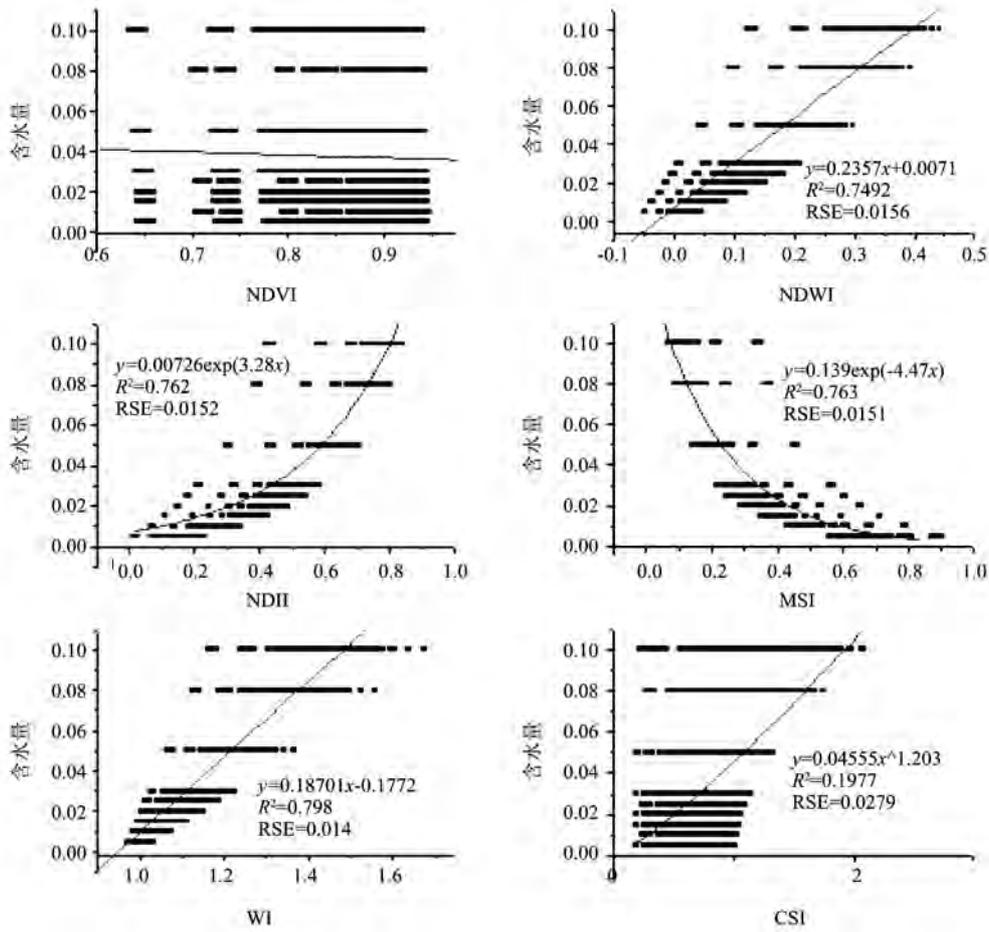


图 2 含水量估算结果
Fig. 2 Results of inversed water content

化引起的 NDWI 变化较小,而 LAI 变化引起的 NDWI 变化较大,同时,植被的干物质含量变化一般不会很大,而 LAI 变化范围却很大,所以可以认为其中主要影响来自于叶面积指数.因此,只要设法去除叶面积指数的影响,NDWI 估算植被含水量的结果可能会得到改善.

由于 MCARI1 与 LAI 之间具有较好的相关关系^[15],因此可以分析 NDWI 与 MCARI1 之间的关系.

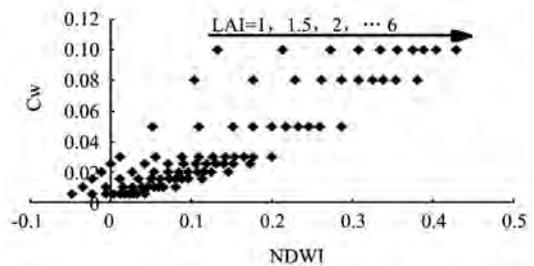


图 4 LAI 不同时 NDWI 与 Cw 的散点图
Fig. 4 Scatter-plot of NDWI and Cw in different LAI

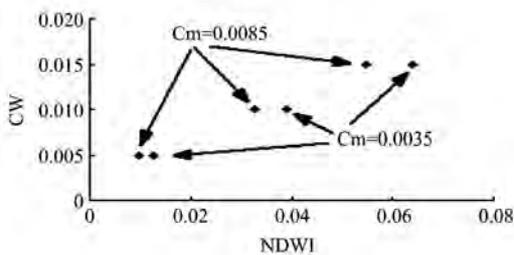


图 3 Cm 不同时 NDWI 与 Cw 的散点图
Fig. 3 Scatter-plot of NDWI and Cw in different Cm

图 5 显示了 NDWI 与 MCARI1 的散点图.从该图上可以看出,当植被含水量一定时,随着 LAI 的递增,NDWI 与 MCARI 均同时在递增.而当植被含水量逐渐增大时,NDWI 与 MCARI 具有非常好的相互关系,此时,若 LAI 保持不变,则 NDWI 与 MCARI1 的斜率与植被含水量完全相关.

基于以上分析,我们提出整合两种窄波段植被指数(NDWI 与 MCARI1)从而得到一个新的估算植

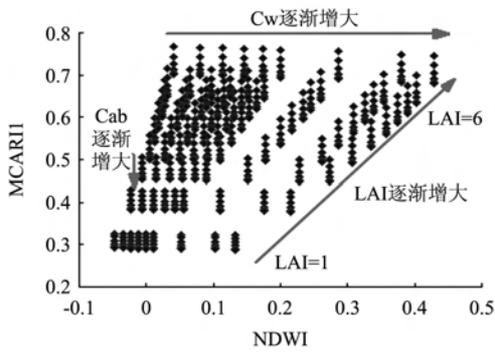


图5 NDWI 与 MCARII 散点图
Fig. 5 Scatter-plot of NDWI and MCARII

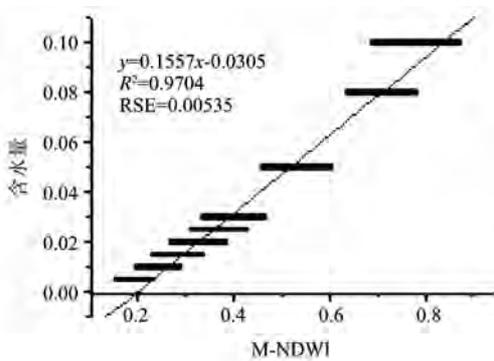


图6 M-NDWI 与含水量落散点图
Fig. 6 Scatter-plot of M-NDWI and Cw

被含水量的植被指数,命名为改进的归一化水分指数 (Modified-Normalized Difference Water Index, M-NDWI),公式如下:

$$M - NDWI = (NDWI + 0.1)/MCARII \quad (12)$$

$$MCARII = 1.2[2.5(R_{800} - R_{550}) - 1.3(R_{800} - R_{670})] \quad (13)$$

使用 PROSPECT + SAIL 模拟的数据计算得到 M-NDWI 与植被含水量之间新的估算关系,结果显示于图 6,使用 M-NDWI 对植被含水量进行估算,可以很好地去掉 LAI 的影响,从而可以提高估算结果的准确度.使用 M-NDWI 估算植被含水量时,两者呈现出非常好的线性相关,相关系数的平方达到 0.97,同时,估算的残差为 0.00535,而使用 NDWI 估算时的残差为 0.0156,两者相差近 3 倍.由此可见,M-NDWI 可以较好地估算植被含水量.

3.3 指数应用

2005 年 4 月至 5 月期间,在山东省兖州地区开展了大型遥感地面同步实验,在卫星过境时,同步进行了地面波谱测量与植被含水量等数据.在研究区共设置了 5 个地面实验区,每个区大小为 5km × 5km.为了能准确地从图像上找到对应的纯净像元,

并确保数据具有一定代表性,每个大样区内选取 4 ~ 5 个大小约为 500m × 500m 小麦地作为地面同步实验样区.实验时迅速测量叶片的鲜重、干重与叶面积指数,即可以方便地计算出叶片含水量.

根据改进的植被含水量估算公式,可以使用大气校正后的 Hyperion 高光谱数据^[16]估算出研究区的植被含水量分布图.由于高光谱影像覆盖地区非常小,没有覆盖全面研究区,因此我们采用简单的类似 NDVI 回归计算得到 LAI 的转换方法获得覆盖研究区的植被含水量分布图.具体转换步骤如下:

- (1) 对覆盖研究区及地面实验点的 TM 影像进行辐射校正、几何校正、大气校正,并且与高光谱影像 Hyperion 进行配准;
- (2) 将使用高光谱得到的植被含水量与 TM 影像的 6 个波段反射率建立多变量线性回归关系式;
- (3) 使用建立的回归关系式在 TM 影像上生成涵盖所有实验点的植被含水量分布图;

图 7 是改进反演方法前后结果与地面实测数据的对比图,改进方法估算结果相关系数平方为 0.78,较改进前有了明显的提高,说明 M-NDWI 比较真实地反映了植被含水状况.

4 结论

传统的地面测量获得的只是有限的生物物理参数信息,难以反映生物物理参数的空间变异性,并且这些方法一般都是事后性、破坏性的,难以真正大面积应用.遥感以其大面积、快速、动态的优势在宏观

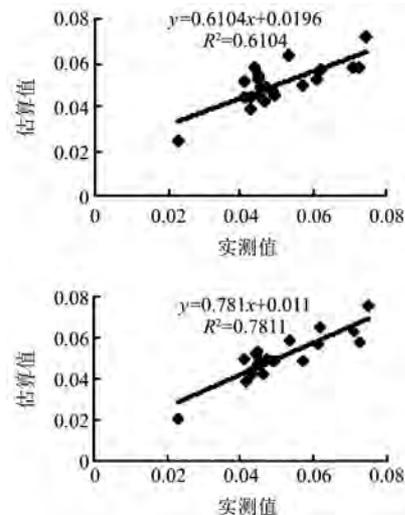


图7 Cw 反演值与实测值散点图(上:改进前,下:改进后)
Fig. 7 Scatter-plot of measured and predicted Cw
(up: before modification; down: after modification)
(下转第 240 页)

- ture imaging radiometers[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2004, **42**(8): 1649—1656.
- [5] Schilizzi R T. The square kilometer array[C]. *Proceeding. SPIE*, Ground-based Telescopes, J. M. Oschmann, ed, Ireland, 2004, **5489**: 62—71.
- [6] Cornwell T J, Golap K, Bhatnagar S. Wide field imaging problems in radio astronomy[C]. *International conference on acoustics, speech and signal processing*, Philadelphia, PA, USA, 2005, **5**: 18—23.
- [7] ZHANG Xianda. *Matrix analysis and applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press(张贤达, 矩阵分析与应用, 北京: 清华大学出版社), 2004: 153—158.

(上接第 189 页)

生态研究中得到广泛应用,借用遥感手段提取植被理化参数研究取得了较大的发展. 植被是生态系统中最重要的重要组成部分之一,正确估算植被的水分含量参数,可以为不同尺度的生态系统模型提供了有用的输入参数,同时可以实现基于遥感方法的干旱监测.

耦合辐射传输模型分析结果显示,NDVI 不能估算出植被含水量,CSI 估算能力也不理想,而 WI, NDWI, NDII, MSI 估算植被含水量较佳;根据植被含水量的敏感因子分析结果,提出整合两种窄波段植被指数(NDWI 与 MCARI1)从而得到一个改进的估算植被含水量的植被指数. 对比结果显示,改进的含水量估算指数可以较好地去除 LAI 的影响,其估算精度有了明显的提高.

REFERENCES

- [1] SUN De-Yong, LI Yun-Mei, WANG Qiao, *et al.* Study on remote sensing estimation of suspended matter concentrations based on in situ hyperspectral data in lake taiwaters [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 基于实测高光谱的太湖水体悬浮物浓度遥感估算研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2): 124—128.
- [2] LIU Huan-Jun, ZHANG Bai, WANG Zong-Ming, *et al.* soil saline-alkalization evaluation basing on spectral reflectance characteristics[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(刘焕军, 张柏, 王宗明, 等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(2): 138—142.
- [3] JACQUEMOUD S, BARET F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **34**(2): 75—91.
- [4] VERHOEF W. Light scattering by leaf layers with applications to canopy reflectance modelling: the SAIL model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, **16**: 125—141.
- [5] DANSON F M, STEVEN M D, MALTHUS T J. High-spectral resolution data for determining leaf water content[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 461—470.
- [6] GAO B C. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 257—266.
- [7] PÉÑUELAS J, PÍNOL J, OGAYA R, *et al.* Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900 / R970) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**(13): 2689—2875.
- [8] PÉÑUELAS J, FILELLA I, BIEL C, *et al.* The reflectance at the 950-970nm region as an indicator of plant water status [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(10): 1887—1905.
- [9] HARDISKY M A, LEMAS V, SMART R M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alternifolia* canopies [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, **49**: 77—83.
- [10] GOETZ A F H, VANE G, SOLOMON J E, *et al.* Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, **228**(7): 1147—1153.
- [11] SERRANO L, USTIN S L, ROBERTS D A, *et al.* Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **74**: 570—581.
- [12] SIMS D A, GAMON J A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **84**: 526—537.
- [13] JORDAN C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on forest floor [J]. *Ecology*, 1969, **50**(4): 663—670.
- [14] KUUSK A. The hop spot effect of a uniform vegetative cover [J]. *Sov Journal of Remote Sensing*, 1985, **3**: 645—658.
- [15] HABOUDANE D, MILLER J R, PATTEY E, *et al.* Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 337—352.
- [16] ZHAO X, LIANG S, LIU S, *et al.* Improvement of dark object method in atmospheric correction of hyperspectral remotely sensed data [J]. *Sci China Ser D*, 2008, **51**(3): 349—356.

更正声明

我刊于 2010 年 4 月份 29 卷 2 期刊发了《用于 SAR 图像分割的第二代 Bandelet 域 HMT-3S 模型》一文, 其页脚处的第一个国家自然科学基金号“6097112”改为“60971128”, 特此声明。