

DOI:10.13203/j.whugis.20140721



文章编号:1671-8860(2017)05-0637-06

基于稳健估计的白桦叶片铜元素含量反演

王明常¹ 应申² 任福² 陈圣波¹ 张旭晴¹ 王凤艳¹ 牛雪峰¹

¹ 吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林 长春,130026

² 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

摘要:根据阔叶叶片模型(a model of leaf optical properties spectra, PROSPECT)叶片辐射传输模型机理,利用一次范数稳健估计估算叶片结构参数 N 和铜元素的吸收系数 k_{Cu} 。选取黑龙江呼玛地区作为研究区,利用美国 ASD 公司的 FieldSpec 3 Hi-Res 光谱仪野外测定白桦叶片的反射光谱,实验室测定相应叶片的铜含量,利用改进的 PROSPECT-Cu 模型进行白桦叶片铜元素含量反演。通过与野外样品测定值和反演值进行比较分析,决定系数为 0.963。研究结果表明,反演结果得到的叶片 Cu 含量是准确的,反演方法是可行的。

关键词:辐射传输模型;叶片反射率;PROSPECT 模型;稳健估计

中图法分类号:P237

文献标志码:A

植物叶片不同的生化组分会不同的波谱特征,通过光谱不同的变化规律即可以确定植物的生长情况和状态^[1-3],利用光谱特性的差异可以在遥感图像中提取出不同的植物生化组份^[4-7]。很多研究人员重点研究重金属污染的植被光谱效应,力争通过重金属胁迫植被的光谱特征变化来监测、提取重金属污染信息^[8-9]。受到铜胁迫的植被光谱特征会发生“蓝移”^[10-12],利用小波变换、曲线模拟和统计分析的方法可以提取重金属植被污染信息。植物的生长发育状况是指示生态系统污染的一项重要指标^[13],而且重金属污染植被的反射光谱特性会发生明显改变^[14-15]。环境的变化会改变叶片中的元素含量,如氮元素、重金属、磷元素、铜元素含量都会因为环境的变化而不同^[16-17],因此,叶片辐射传输模型为植被冠层反射模型提供了基础的反射率和透射率。叶片辐射传输模型主要有针叶模型(leaf incorporating biochemistry exhibiting reflectance and transmittance yields, LIBERTY)和阔叶模型(a model of leaf optical properties spectra, PROSPECT),利用针叶模型可以模拟松树叶光谱并反演水含量,阔叶叶片模型的拓展及应用研究较多^[18-23]。利用 PROSPECT 模型可以进行叶绿素含量、叶面积指数、叶

肉结构参数、水分含量等生化参数定量反演。

本文根据 PROSPECT 模型的原理,利用稳健估计进行叶片结构参数 N 和铜的吸收系数估算,并改进了 PROSPECT 模型,增加了铜元素含量的模拟。野外光谱测量和室内生化含量分析结果表明,模拟和实测光谱具有较好的一致性,为铜矿区植被污染及植被覆盖区找矿奠定了理论基础。

1 研究区域与叶片辐射传输原理

1.1 研究区与数据

研究区位于黑龙江省北部的多宝山区和呼玛区(见图 1),实验区 1 多宝山区采样编号为 D01-1、D02-5、D03-5,实验区 2 呼玛区采样点编号为 H01-7、H04-1、H05-3、H05-4、H04-3。2012 年 8 月,利用美国 ASD 公司的 FieldSpec 3 Hi-Res 便携式野外光谱仪进行了野外光谱测定,该仪器波长范围 350~2 500 nm,波长精度 ± 1 nm。为保证采集光谱的质量,选择在光照稳定的 10:00~15:00 时间段进行采集,在晴空无云无风的天气下进行光谱测定;并进行叶片生物化学含量分析,包括叶片水含量,叶绿素 a、b 的含量,干物质及叶

收稿日期:2015-02-23

项目资助:国家自然科学基金(41372337,41472243);数字制图与国土信息应用工程国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(GCWD201402);区域开发与环境影响湖北省重点实验室开放研究基金(2015(B)003)。

第一作者:王明常,博士,教授,主要从事遥感与地理信息系统研究。wangmc@jlu.edu.cn

通讯作者:牛雪峰,教授。niuxf@jlu.edu.cn

片中重金属铜含量的测定。

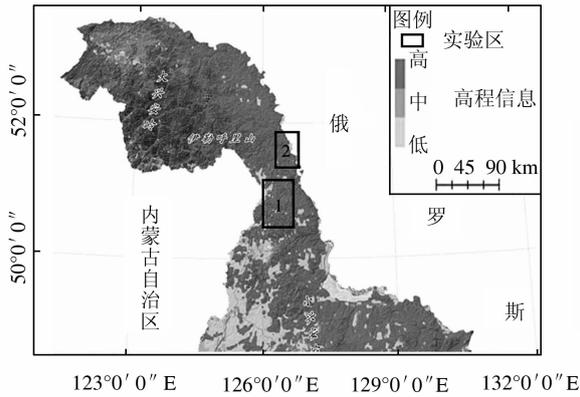


图1 采样区位置图

Fig. 1 Map of Sampling Location

1.2 叶片辐射传输原理

叶片辐射传输模型最开始是由 Allen 等在 1969 年提出来的平板模型,该模型是在假设光线各向同性平行的基础上,把叶片看成是半透明的粗糙的各向同性的吸收平板^[24],光线在其内部发生朗伯反射,通过反射率和透射率的公式较为准确地模拟叶片的反射率。PROSPECT 模型把叶片看成是有粗糙表面的平板,光线在其表面是发生了各向同性散射,把非致密叶片看成中间有 $N-1$ 层的空气层所隔开的 N 层致密层,每一层致密层折射率为 n ,吸收系数 k 。

叶片 N 层的总折射率和透射率为:

$$R_a(N) = [R_a(1)(ab^{N-1} - a^{-1}b^{1-N}) + (T_a(1)T_{90}(1) - R_a(1)R_{90}(1))(b^{N-1} - b^{1-N})] / [ab^{N-1} - a^{-1}b^{1-N} - R_{90}(1)(b^{N-1} - b^{1-N})] \quad (1)$$

$$T_a(N) = \frac{T_a(1)(a - a^{-1})}{ab^{N-1} - a^{-1}b^{1-N} - R_{90}(1)(b^{N-1} - b^{1-N})} \quad (2)$$

其中,

$$a = \frac{1 + R_{90}^2(1) - T_{90}^2(1) - \delta}{2R_{90}^2(1)}$$

$$b = \frac{1 + R_{90}^2(1) - T_{90}^2(1) + \delta}{2R_{90}^2(1)}$$

$$\delta = \sqrt{(R_{90}^2(1) - T_{90}^2(1) - 1)^2 - 4T_{90}^2(1)}$$

$$\text{或 } \sqrt{(T_{90}^2(1) - R_{90}^2(1) - 1)^2 - 4T_{90}^2(1)}$$

式中, $R_a(1)$ 、 $T_a(1)$ 分别是一层介质的多次反射率、透射率; α 是入射角; $T_{90}(1)$ 、 $R_{90}(1)$ 分别为入射角 90° 的第一层透射率和反射率。已知一层介质反射率、透射率的条件下,利用迭代原理,就可以用式(1)、(2)计算叶片 N 层反射率、透射率^[24]。

2 稳健估计

2.1 一次范数的稳健估计

一次范数是稳健估计的一种,稳健估计比最小二乘估计具有更强的稳定性和抗粗差干扰的能力^[25-28],其目标就是在粗差不可避免的情况下尽可能地不受粗差的干扰,使得到的结果具有最优或者接近最优。向量范数通式为:

$$\|V\|_p = \left(\sum_{i=1}^n \|V\|^p \right)^{1/p} \rightarrow \min \quad (3)$$

式中, V 为观测值改正数; p 为范数, $p=1$,则 $\|V\| = |v_1| + |v_2| + |v_3| + \dots + |v_n| \rightarrow \min$ 为一次范数最小, v_1, v_2, \dots, v_n 是观测单次改正数。

2.2 叶片结构参数 N 的稳健估计

PROSPECT 模型用叶片结构参数 N 、叶片叶绿素含量 C_{ab} 、叶片水含量 C_w 和叶片干物质含量 C_m 来描述叶片反射率。

$$\sum |F - R| = \min$$

即

$$\sum_{i=400}^{2500} \sum_{N=1}^3 |f(N, C_{ab}, C_w, C_m) - R_i| = \min \quad (4)$$

式中, F 为模拟反射率; R 为实测反射率; $f(N, C_{ab}, C_w, C_m)$ 为 PROSPECT 模型的反射率模拟值。在求 N 的过程中,通过对参数 N 设置一定的步长和值域,把 N 的值域控制为 $1 \sim 3$ 。取步长为 10^{-2} ,把不同的 N 迭代到 PROSPECT 模型中并得到不同的反射率和透射率,提取每一个结果中的反射率的列,累加到一个空的矩阵的每一列中组成一个 2101×300 的矩阵,最后通过与实测值求一次范数最小,求出最优的 N 值。对多个实测数据求出不同的 N 值,进而求平均值,得到最合理的 N 值。计算模拟得到最优的 $N=1.78375$ 。

2.3 Cu 元素吸收系数 k 的稳健估计

重金属铜污染的植被的反射光谱特性会发生明显改变,为了准确地模拟出植物在铜 Cu 含量下的反射率,在 PROSPECT-4 模型中添加铜含量(C_{Cu})作为模型中函数的输入参数,把改进的模型叫 PROSPECT-Cu。在已知的数据中已经有铜的含量,但是缺少铜的吸收系数的相关数据,所以需要利用已有的数据以及修改后的模型 PROSPECT-Cu 求出铜吸收系数 k_{Cu} 。

铜的吸收能力在不同的波长下不同,用 1 nm 波长间隔,把 $400 \sim 2500 \text{ nm}$ 的波谱范围分为 2101 个铜离子的吸收系数,得到的吸收系数将会是一个矩阵。在 PROSPECT 模型中加入新的参数,反射率函数变为 $f(N, C_{ab}, C_w, C_m, C_{Cu}, k)$ 。

$$\sum |F - R| = \min$$

即

$$\sum_{i=400}^{2500} \sum_{k_{Cu}=10^{-5}}^1$$

$$|f_i(N, C_{ab}, C_w, C_m, C_{Cu}, k) - R_i| = \min \quad (5)$$

在 PROSPECT-4 函数中,本文仅添加了铜参数,实质上改变的就是模型中的总吸收系数 k 值。

$$k = \frac{k_{ab} + k_w + k_m + k_{Cu}}{N} \quad (6)$$

式中, k_{ab} 、 k_w 、 k_m 、 k_{Cu} 分别为叶绿素 a 和 b、水、干物质、铜的吸收系数。在计算铜吸收系数时,以 10^{-4} 为步长,值域为 $10^{-5} \sim 1$ 。经过 PROSPECT-Cu 模型模拟之后提取每一个步长所对应的反射率,利用一次范数求出每一行,也就是每一个波谱的最小值对应的铜吸收系数,从 400 nm 到 2 500 nm 的波谱计算下来就可以获得一个 2 101 行单列矩阵 k_{Cu} 。多组数据取平均值得到铜 Cu 的吸收系数 k_{Cu} 。

2.4 白桦叶片铜含量的稳健估计

将计算得到的叶片结构 N 值和铜的吸收系数 k_{Cu} 作为已知条件,利用 PROSPECT-Cu 模型进行不同铜元素含量的反射率模拟:

$$\sum |f(N, C_{ab}, C_w, C_m, C_{Cu}) - R| = \min$$

即

$$\sum_{i=400}^{2500} \sum_{K_{Cu}=10^{-5}}^1$$

$$|f_i(N, C_{ab}, C_w, C_m, C_{Cu}) - R_i| = \min \quad (7)$$

根据式(7)的一次范数稳健估计方法,对实测光谱进行铜元素含量反演,反演结果与实测铜含量差值较小(见表 1),计算实测值和模拟值的决定系数为 0.963。从图 2 中可以看出,PROSPECT-Cu 的模拟反射率与实测反射率吻合较好,但是图 2 中有一个明显的问题就是在 1 650~1 850 nm 之间有个明显的变动。出现这样的变动是因为实测

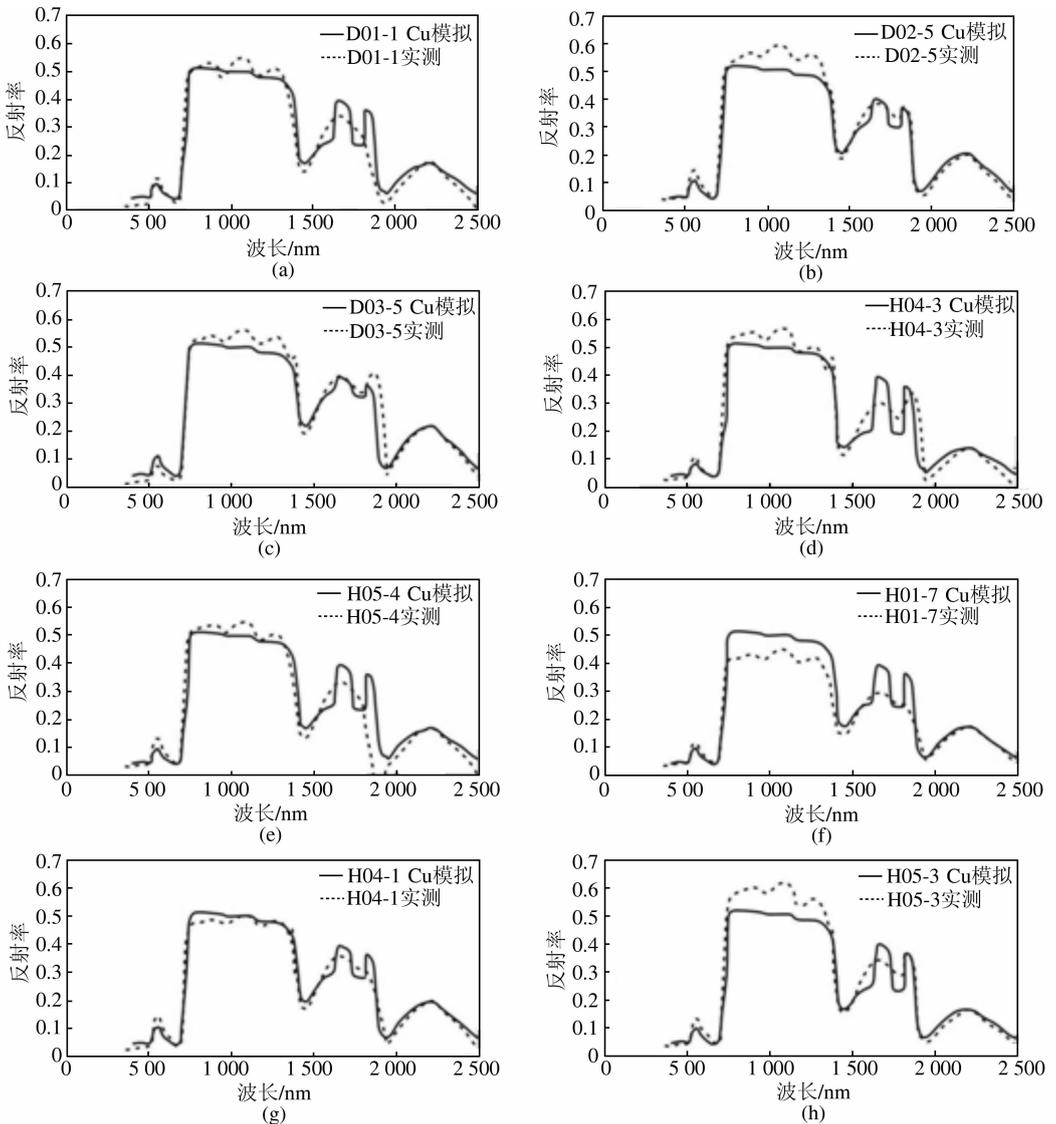


图 2 PROSPECT-Cu 模拟反射率与实测反射率对比

Fig. 2 Comparison Between Simulated Reflectivity and Measured Reflectivity of PROSPECT-Cu

表1 利用 PROSPECT-Cu 反演的铜含量与实测含量对比/($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)Tab. 1 Comparison Between the Simulated Content of Cu and the Measured Content of Cu/($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

编号	D01-1	D02-5	D03-5	H04-3	H05-4	H01-7	H04-1	H05-3
反演 Cu 含量	0.163 3	0.148 3	0.038 4	0.255 5	0.167 7	0.146 4	0.093 3	0.103 5
实测 Cu 含量	0.173 2	0.139 4	0.024 2	0.273 2	0.186 7	0.184 3	0.081 6	0.110 6

值在受到影响的情况下需要通过内插得到反射率数据,这个内插出来的值与真实值具有一定的偏差,在求重金属铜吸收系数 k_{Cu} 的时候会受到影响,从而造成了得到的 PROSPECT-Cu 模拟曲线有一定的波动。

3 结论与讨论

黑龙江研究区白桦叶片在重金属 Cu 胁迫下,叶片的生物化学含量发生变化,叶片结构也发生变化,相应地,叶片光学属性发生改变。应用改进的叶片辐射传输模型对重金属铜胁迫下的叶片反射率进行分析,模型模拟值发生偏差,通过叶片实测值稳健估计,得到 Cu 离子的电磁波吸收系数,改进模型,使得叶片反射率模拟曲线更为精细。文献[29]通过采用不同程度的铜污染土壤作为培养基质,选择春小麦、上海青两种农作物进行铜胁迫实验,虽然铜含量很低,但证明了重金属铜污染植被的反射光谱特性会发生明显改变[29]。在前人优秀研究成果的启发下,本文获得了研究区 8 个不同的白桦叶片反射光谱,对叶片的铜含量进行了实验室内含量分析,并根据叶片辐射传输机理模型,进一步从植物生理模型与叶片反射光谱模型的角度探索铜污染引起的光谱变化的内在机制。本文还利用一次范数稳健估计的方法,估算白桦叶片结构参数 N 和铜元素的吸收系数 k_{Cu} ,改进 PROSPECT 模型。实验结果表明,模拟铜元素含量与实测含量的决定系数相关性强,说明了本文方法的可行性和准确性。

本文仅限于铜污染叶片光谱特征的变化,确定了光谱特征与叶片内部结构之间的关系,为建立重金属污染植被光谱反射物理模型提供基础理论与数据支持。在反演叶片铜含量时,由于用白桦叶片样品数量少,样品空间不足,有待进一步研究验证。利用植物叶片不同时期的反射率反演出不同时期的生化含量,当获取生化含量等数据时就可以模拟出其反射率,进而可以确定植物所处的生长周期。通过模拟数据和反射波谱特征可以观察到白桦叶片在重金属铜的胁迫下其生化含量和叶片结构参数会发生改变,利用对植物叶片生化含量的反演可以得到研究区域的重金属的含

量,进而可以为植被覆盖区找矿和矿山环境监测等应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] Belanger M J, Miller J R, Boyer M G. Comparative Relationships Between some Red Edge Parameters and Seasonal Leaf Chlorophyll Concentrations[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1995, 21: 16-21
- [2] Carter G A. Primary and Secondary Effects of Water Content on the Spectral Reflectance of Leaves [J]. *American Journal of Botany*, 1991, 78: 916-924
- [3] Goetz A F, Vane G. Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing [J]. *Science*, 1985, 228 (4 704): 1 147-1 153
- [4] Knippling E B. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1970(1):155-159
- [5] Yu Junming, Lan Chaozhen, Zhou Yi, et al. Retrieval of Water Content of Crop Based on Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 210-213(于君明, 蓝朝桢, 周艺, 等. 农作物含水量的遥感反演[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(2): 210-213)
- [6] Wang Xiaohong, Liu Yaolin, Du Xiao. Drought Monitoring Using Vegetation Leaf Water in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(6): 498-501(王晓红, 刘耀林, 杜晓. 基于 MODIS 图像的植被叶面水反演与农业干旱监测 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(6): 498-501)
- [7] Dai Zhenyong, Zhang Wei, Chen Xiaoling, et al. Monitoring TSM by HJ CCD Imagery Index in Poyang Lake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(11): 1 303-1 307(代侦勇, 张伟, 陈晓玲, 等. 应用 HJ CCD 传感器指数的鄱阳湖 TSM 浓度遥感监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(11): 1 303-1 307)
- [8] Buschmann C, Lichtenthaler H K. Principles and Characteristics of Multi-colour Fluorescence Imaging of Plants[J]. *Journal of Plant Physiology*,

- 1998,152(2) : 297-314
- [9] Jago R A, Cutler M E J, Curran P J. Estimating Canopy Chlorophyll Concentration from Field and airborne spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(3) : 217-224
- [10] Qu Ying, Liu Suhong, Li Xiaowen. A Novel Method for Extracting Leaf-Level Solar-Induced Fluorescence of Typical Crops Under Cu Stress[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(5) : 1 282-1 286(瞿瑛,刘素红,李小文. 重金属 Cu 胁迫下典型农作物叶片日光诱导荧光辐射特征提取研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5) : 1 282-1 286)
- [11] Ren Hongyan, Zhuang Dafang, Pan Jianjun, et al. Study on Canopy Spectral Characteristics of Paddy Polluted by Heavy Metals[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2) : 430-434(任红艳, 庄大方, 潘剑君, 等. 重金属污染水稻的冠层反射光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2) : 430-434)
- [12] Liu Meiling, Liu Xiangnan, Li Ting, et al. Analysis of Hyperspectral Singularity of Rice Under Zn Pollution Stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3) : 191-197(刘美玲, 刘湘南, 李婷, 等. 水稻锌污染胁迫的光谱奇异性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3) : 191-197)
- [13] Liu Shengwei, Gan Fuping, Wang Runsheng. The Application of Hyperion Data to Extracting Contamination Information of Vegetation in the Dexing Copper Mine, Jiangxi Province, China[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2004, 59(1) : 6-10, 31(刘圣伟, 甘甫平, 王润生. 用卫星高光谱数据提取德兴铜矿区植被污染信息[J]. 国土资源遥感, 2004, 59(1) : 6-10, 31)
- [14] Sridhar M B B, Han F X, Diehl SV. Monitoring the Effects of Arsenic and Chromium Accumulation in Chinese Brake Fern (*Pteris Vittata*) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(5) : 1 055-1 067
- [15] Chi Guangyu, Liu Xinhui, Liu Suhong, et al. Studies of Relationships Between Cu Pollution and Spectral Characteristics of *TritiZnm Aestivum L* [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(7) : 1 272-1 276(迟光宇, 刘新会, 刘素红, 等. Cu 污染与小麦特征光谱相关关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(7) : 1 272-1 276)
- [16] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E. Light Reflectance Compared with Other Nitrogen Stress Measurements in Corn Leaves [J]. *Agronomy Journal*, 1994, 86: 934-938
- [17] Sridhar M B B, Han F X, Diehl S V, et al. Spectral Reflectance and Leaf Internal Structure Changes of Barley Plants Due to Phytoextraction of Zinc and Cadmium [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(5) : 1 041-1 054
- [18] Feret J B, Asner G P, Francois C, et al. An Advanced Leaf Optical Properties Model Including Photosynthetic Pigments [C]. The 10th International Symposium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Davos, Switzerland, 2007
- [19] Fret J B, Francois C, Asner G P, et al. PROSPECT-4 and 5: Advances in the Leaf Optical Properties Model Separating Photosynthetic; Pigments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6) : 3 030-3 043
- [20] Pedros R, Goulas Y, Jacquemoud S, et al. FluorMODleaf: A New Leaf Fluorescence Emission Model Based on the PROSPECT Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1) : 155-167
- [21] Jacquemoud S, Baret F, Andrieu B, et al. Extraction of Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of the PROSPECT + SAIL Model on Sugar Beet Canopy Reflectance Data-Application to TM Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(3) : 163 -172
- [22] Gerber F, Marion R, Olioso A, et al. Modeling Directional-Hemispherical Reflectance and Transmittance of Fresh and Dry Leaves from 0. 4 μm to 5. 7 μm with the PROSPECT-VISIR Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2) : 404-414
- [23] Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, et al. PROSPECT+SAIL Models: A Review of Use for Vegetation Characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1) : 56-66
- [24] Lu Cheng, Chen Shengbo, Liu Wansong. Research of PROSPECT Leaf Optical Property Model [J]. *Global Geology*, 2013, 32(1) : 177-188(陆成, 陈圣波, 刘万松. 叶片辐射传输模型 PROSPECT 理论研究[J]. 世界地质, 2013, 32(1) : 177-188)
- [25] Cui Xizhang. Generalized Surveying Adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University of Surveying and Mapping Science and Technology Press, 2001(崔希璋. 广义测量平差[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2001)
- [26] Deng Xianli. Optimization Techniques [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1998(邓先礼. 最优化技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998)
- [27] Sun Haiyan. *P*-norm Distribution Maximum Likelihood Adjustment and Its Precision Evaluation[J].

Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2001,15(1): 23-27 (孙海燕, P -范极大似然平差及其精度评定[J], 黑龙江工程学院学报(自然科学版),2001,15(1): 23-27)

- [28] Bai Hui ren, Li Wei ren. Gross Error Management Method of First Order Minimum Norm in Surveying Estimate[J]. *Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering*,2003, 20(4): 6-8(白会人,李维

仁. 测量平差中粗差的一次范数最小的处理方法[J]. 吉林建筑工程学院学报,2003, 20(4): 6-8)

- [29] Zhu Yeqing, Qu Yonghua, Liu Suhong, et al. Spectral Response of Wheat and Lettuce to Copper Pollution[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014,18(2): 335-352(朱叶青,屈永华,刘素红,等. 重金属铜污染植被光谱响应特征研究[J]. 遥感学报,2014, 18(2): 335-352)

Inversion Model for the Copper Element in Birch Leaves Based on Robust Estimation

WANG Mingchang¹ YING Shen² REN Fu² CHEN Shengbo¹ ZHANG Xuqing¹
WANG Fengyan¹ NIU Xuefeng¹

1 College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2 School of Resource and Environment Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Based on the leaf radiative transfer model PROSPECT, the leaf structure parameters N and the absorption coefficient of copper k_{Cu} of copper element were estimated by use of the first order norm robust estimation. We chose the DuoBaoShan and Huma region of HeiLongJiang province as the study area, where the reflective spectra of birch leaves were determined using ASD FieldSpec 3 Hi-Res, and the component copper contents were measured in the laboratory. Then, the copper contents of Birch leaves were stimulated using the improved PROSPECT-Cumodel. The determination coefficient was 0.963 obtained by analyzing the simulated copper component and the measured component contents of Birch leaves. The study showed the stimulated results for copper component contents were accurate and the inversion method was feasible. The reflectance of leaves stressed by heavy mental were analysed with the PROSPECT Model, showing that errors had expanded, so the model was further developed, an advanced version—PROSPECT-Cu, inverts the copper content inside the leaf with the robust estimation method.

Key words: radiative transfer model; leaf reflectivity; PROSPECT model; robust estimation

First author: WANG Mingchang, PhD, professor, specializes in remote sensing and geographical information system. E-mail: wangmc@jlu.edu.cn

Corresponding author: NIU Xuefeng, professor. E-mail: niuxf@jlu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41372337, 41472243; Open Research Fund Program of Key Laboratory of Digital Mapping and Land Information Application Engineering, National Administration of Surveying, Mapping and Geo-information, No. GCWD201402; Open Research Fund Program of Hubei Province Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response of China, No. 2015(B) 003.