

行道树叶绿素变化的高光谱监测研究

宋开山¹, 张 柏¹, 刘殿伟¹, 张渊志²

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 赫尔辛基科技大学空间实验室, 赫尔辛基 芬兰)

摘要: 采样分析了城市行道树与对比区相应树种的叶绿素变化, 并对由叶绿素变化引起的高光谱响应进行了分析, 结果表明: (1) 城市环境对行道树叶绿素有重要影响, 其中, 对针叶树种叶绿素的影响较小, 对阔叶树种叶绿素的影响较大; (2) 导数光谱与测试树种叶绿素含量关系密切, 在 740 ~ 760 nm 附近相关系数达 0.83 以上; (3) PSSR 植被指数与测试树种的叶绿素含量关系密切, 幂函数回归的确定性系数达 80% 左右。以上结论说明: 高光谱遥感可以用来监测因城市环境引起的植被叶绿素变化。

关键词: 高光谱; 反射率; 导数光谱; 叶绿素; 行道树

中图分类号: S718.43 **文献标识码:** A

Hyperspectral Approaches for Detecting the Roadside Tree Chlorophyll Content Changes at Branches Scale

SONG Kai-shan¹, ZHANG Bai¹, LIU Dian-wei¹, ZHANG Yuan-zhi²

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, Jilin, China; 2. Laboratory of Space Technology, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland)

Abstract: Effects of urban communication environment on the chlorophyll content of roadside tree leaves were compared with that of corresponding tree leaves growing in a less polluted environment - Jingyue National Forest Park by analyzing samples collected in both areas. Hyperspectral data of those samples were acquired by using ASD Field NDIR Spectroradiometer. The results of analysis showed that: (1) The urban environment could cause serious effects on the chlorophyll content of roadside tree leaves, and deciduous tree leaves responded to this effects intensively while for conifers tree leaves this was not the case. (2) Hyperspectral reflectance and its derivative had intimate relation with the chlorophyll content of sampled roadside tree leaves, and the relationship between chlorophyll content of tree leaves and hyperspectral reflectance and its derivatives varied with the wavelength, in blue and short part and near infrared region of spectrum there was a strong correlation between chlorophyll and reflectance and derivatives, the correlation coefficient was above 0.83 during 740 ~ 760 nm. (3) PSSR (the pigment specific simple ratio) index had an intimate relation with chlorophyll content, and a power regression model was established with the determination coefficient around 0.80, which showed that it could be used to detect roadside tree leaf chlorophyll content change caused by urban communication environment.

Key words: hyperspectral; reflectance; derivative reflectance; chlorophyll; roadside tree

城市行道树生长在较为复杂的环境中, 机动车尾气、CO₂、NO₂、醛类、颗粒物和各种工厂、生活排放物等对其生长有着这样或那样的影响^[1,2]。研究表

收稿日期: 2004-12-29

基金项目: 中科院知识创新工程重大项目(kzcx1-sw-19)

作者简介: 宋开山(1974—), 男, 博士, 主要从事地物高光谱与偏振光谱特征研究, 发表论文 13 篇。

明:行道树在城市特殊环境中生长往往会引起生化指标的变化,其中,行道树叶绿素常常被用来作为环境污染的重要指示指标。不同污染程度,不同的交通繁忙地段以及不同气体对植物叶绿素含量的影响已有报道^[3~5]。在国内,李寒娥^[6]研究了行道树叶片叶绿素含量随季节的变化以及不同树种叶绿素含量对环境的响应。

早在1983年Horler等人^[7]就建议用高光谱遥感来估算植被的叶绿素浓度,但这一设想只有在新一代高光谱传感器出现后才真正成为可能^[8]。近年来应用高光谱监测植被叶绿素含量变化的文献大量出现^[9~13],并且建立了多种高光谱植被指数与遥感模型来定量估算植被叶绿素的变化^[12]。在国内仅见以高光谱手段监测农作物的文献^[14,15],但以高光谱监测不同树种叶绿素变化的研究基本没有开展,由于土壤、环境、气候的变化,各种基于统计方式建立的模型都有一定的局限性,因此亟待在我国不同的地域开展此类研究。虽然通过实验手段可以检测由于受汽车尾气以及其它环境胁迫因素影响而导致的行道树叶绿素的变化^[6],但是只从有限的测点来估算整个城市行道树的叶绿素变化未免有些牵强,而高光谱遥感恰巧可以解决大尺度面源环境监测问题。正是基于此原因,本文将主要探索用高光谱方式监测城市行道树叶绿素变化的可能性。

1 研究方法

1.1 试验设计

采样设计:为了研究行道树因城市交通环境而产生叶绿素含量变化,特将受城市交通环境影响较小的净月潭国家森林公园对应树种进行同期叶绿素含量的对比研究。城市行道树样本采集选在长春市交通较为繁忙的新民主大街和西安大路,平均交通流量分别为1 400、2 100辆·h⁻¹。对行道树叶绿素有影响的排放物为CO、NO_x、SO₂。净月潭国家森林公园距离长春市21 km,公园内森林基本不受机动车排放物影响。为了使样本具有可比性,所有样本均采自树龄相近、距离地面4 m左右朝南方向的2年生营养小枝作为测试样本;为满足光谱测试需求,每个样品采集20个枝条。采样品种、位置(由GPS获取)及采样时间见表1。样品采下后,立即放入盛有冰块密封较好的泡沫箱里。所有样品在当日

10:00左右采集完毕,然后快速带回实验室以备光谱及叶绿素测试用。本次实验树种主要涉及阔叶树种,因落叶松兼有落叶与针叶树种的特点,叶绿素含量与阔叶树种相近而且变化较大,故把落叶松(*Larix decidua* Mill.)作为研究对象。

1.2 光谱测试方法

光谱测试采用美国分析光谱仪器公司(Analytical Spectral Devices, ASD公司)生产的ASD Field-Spec光谱仪,该设备可在350~1 050 nm波长范围内进行连续测量,采样间隔为1.4 nm,光谱分辨率3 nm,视场角25°,共有512个采样数据。以太阳光作为测试光源,2次光谱测试时间都在正午,天气晴朗无云,以保证同等的光照条件。把所有样品均匀平放在一块80 cm×80 cm的黑布上,每种样品头尾交叉铺放2层,使样品铺放区无黑布裸露;传感器探头垂直向下与样品相距约0.75 m,观测范围直径约为0.33 m(样品范围大于仪器视场角)。光谱测试之前,先测试光谱仪暗电流,每次样品测试都以白板进行定标,测试结果为样品光谱反射率。每个样品光谱值重复采集10次,把10组数据的平均值作为该样品最终光谱反射率。

1.3 叶绿素测试方法

从测试样本中选取10枚成熟叶片,用打孔器在样品叶片中间部位叶脉一侧取10个小圆(10个小圆质量在0.5 g左右,将其剪成细丝,充分搅匀),以千分之一精度电子天平称取0.12 g左右,然后放入盛有10 mL提取液(丙酮:乙醇:蒸馏水=45:45:10)的试管中,以橡皮塞封口,闭光提取24 h,定容到25 mL供测试。以UV2550岛津分光光度计分别测OD=645、OD=663处的光密度,以Arnon公式计算叶绿素含量,表1中的叶绿素T表示总体叶绿素。

1.4 高光谱数据分析方法

采取的数据分析方法主要为:(1)各波段反射率及一阶导数与叶绿素的相关分析,得出反演行道树叶绿素的最佳波段。(2)PSSR(Pigment specific simple ratio)特定色素简单比值植被指数^[13],其中 $PSSRa = R_{800}/R_{680}$,a代表叶绿素A,R代表指定波段的反射率; $PSSRb = R_{800}/R_{635}$,b代表叶绿素B,R的含义不变。

表1 不同样品的一般性信息及叶绿素含量统计值

树种名称	叶绿素含量及采样位置 ^① 、采样时间						经度(E)/ (° ')	纬度(N)/ (° ')	采样时间 (年一月一日)
	叶绿素 A 含量		叶绿素 B 含量		叶绿素 T 含量				
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差			
落叶松	1.314 7	0.272 8	0.401 5	0.060 5	1.670 8	0.352 0	125 18.32	43 52.17	2003-08-16
糖槭	1.527 2	0.319 6	0.505 2	0.151 5	1.877 2	0.436 6	125 15.52	43 53.97	
大青杨	1.118 9	0.218 8	0.291 8	0.095 1	1.426 3	0.155 2	125 17.31	43 51.70	
蒙古栎	1.738 3	0.124 2	0.514 6	0.047 0	2.240 4	0.168 7	125 17.36	43 51.45	
对照区净月潭国家森林公园样本叶绿素含量及采样位置、采样时间									
落叶松	1.490 7	0.315 4	0.461 3	0.114 9	1.881 4	0.322 0	125 10.19	43 39.31	2003-08-21
糖槭	1.693 4	0.304 9	0.541 8	0.108 3	2.135 8	0.394 4	125 11.22	43 41.57	
大青杨	2.513 6	0.138 3	0.708 4	0.052 3	3.124 8	0.312 5	125 11.34	43 41.62	
蒙古栎	2.325 0	0.302 4	0.656 7	0.095 5	3.016 6	0.400 4	125 12.06	43 41.27	

注: ①由于每个树种都有3个以上样本,在这里采用了居于中间位置的样本经纬度作为该种样本的代表位置;叶绿素含量单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 糖槭(*Acer negundo* L.), 大青杨(*Populus ussuriensis* Kom.), 蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch.)。

2 结果与讨论

2.1 城市环境对行道树叶绿素含量的影响

从表1可以看出:市内落叶松的叶绿素含量与净月潭对比区的差别不大,但总体上略低于净月潭对比区的;市内糖槭的叶绿素含量略低于净月潭对比区的,而市内大青杨、蒙古栎的叶绿素含量明显低于净月潭对比区的。由表1还可以发现:叶绿素A、T含量的标准差变化较大,而叶绿素B含量的变化较小,由此也说明,在同等环境下,植物种类对环境的抗逆能力显著不同,因此,在研究城市环境对行道树影响时应选取较为敏感的树种。

2.2 市内与对比区行道树种光谱变化趋势

图1是部分样本的光谱反射率曲线(这里只随机选取了4组对比光谱来说明不同树种在不同波段的反射特征)。由图1可见,市内行道树与净月潭公园对应树种的光谱反射率存在较大差异。植物叶片

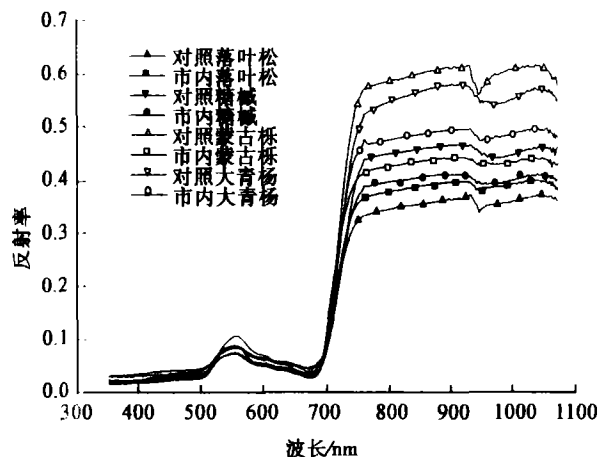


图1 市内与对比区各树种光谱反射率曲线

对蓝光波段与红波光段强烈吸收,在绿波段由于叶绿素原因,存在一个小反射峰,在近红外波段,由于植物叶片内部细胞结构造成入射光多次散射,使得绿色植物叶片在该波长范围内强烈反射入射光能。以上只是绿色植被光谱反应的一般情况,在环境胁迫因素作用下,会致使植物叶片细胞组成物质的含量以及结构发生变化,这一切都将在光谱反射过程中表现出来,是环境遥感监测的理论基础。由图1可以发现,城市行道树与净月潭对比区相应树种的光谱反射率存在一定差异,尤其在550 nm附近与近红外波段这种差异更大。

2.3 反射率与叶绿素含量之间的关系

在整个光谱仪有效波长范围内每隔10个波段选取一个光谱反射值与叶绿素A、B、T做线性拟合,得到的确定性系数随波长变化曲线见图2(样本数 $n=37$)。由图2可以看出:在紫光、蓝光波段,光谱反射率与测试树种叶绿素的相关性较强;在大部分绿光波段光谱反射率与叶绿素的相关关系较差;红光波段与叶绿素的相关关系起伏较大,在706 nm处达到最低值,而在红边(690~740 nm)向近红外(740~1050 nm)过渡波长区,光谱反射率与叶绿素的相关关系迅速提高,到近红外区基本趋于稳定。由图2中3条曲线的对比可发现:叶绿素A与光谱反射率的相关性最高;叶绿素B、T与光谱反射率的相关性在650 nm之前二者时有高低,在近红外区非常接近。叶绿素A、B以及叶绿素T之间存在密切的相关关系,但是叶绿素T不完全等于叶绿素A和叶绿素B之和,而且由于叶绿素A、B的衰老速度不一样,因此叶绿素T与叶绿素A或B的相关性也随着植物生长阶段而有所不同。在本研究中,样品采集时,不同树种已经处于生理衰老期,因此叶绿素T与

叶绿素 B 的相关性更密切,所以回归的确定性系数 R^2 的变化趋势与叶绿素 B 更接近。

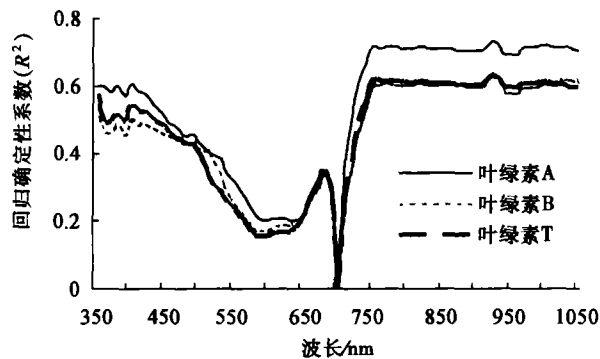


图2 光谱反射率与叶绿素的拟合关系

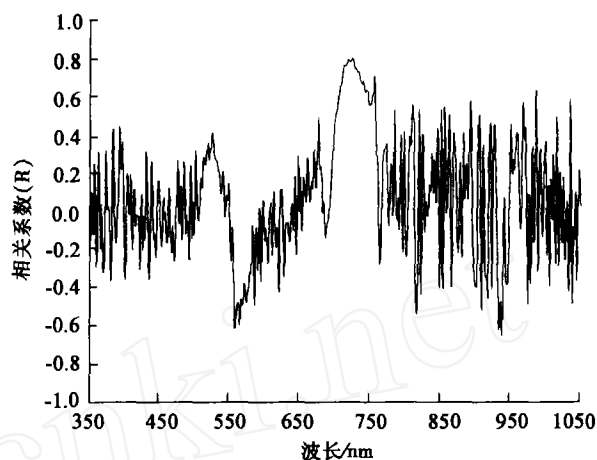


图3 导数光谱与叶绿素 a 含量的相关系数随波长的变化

2.4 一阶导数与叶绿素含量之间的关系

导数光谱分析技术源于化学光谱分析,用以解决许多物质光谱吸收、反射或发射特性相同或相近导致的诊断光谱特征重叠而无法在光谱特征上区分某些物质的难题^[16]。在多光谱遥感阶段,因波段数太少而无法采用导数光谱技术来分析有限的多光谱遥感数据。随着高光谱遥感技术的发展,导数光谱技术在遥感领域得到广泛应用。本研究所采用的导数光谱计算公式如下:

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda \quad (1)$$

式(1)中: ρ' 代表导数光谱值, ρ 为原始光谱反射率, λ 为波长, $\Delta\lambda$ 为相邻波段的间隔。

对所有样本的光谱数据按公式(1)计算后,与叶绿素 A 进行相关分析得到图 3(样本数 $n = 37$),可以发现在 350 ~ 1 050 nm 范围内,导数光谱与叶绿素 A 含量间的相关关系浮动较大,尤其在 350 ~ 500 nm 与 760 ~ 1 050 nm 2 个波谱区。上述情况的出现是由于高光谱数据存在较大的数据冗余,相邻波段的光谱反射率非常接近,光谱求导后对光谱反射率的变化非常敏感所致。由图 3 可以看出:在叶绿素反射峰 550 nm 左右,导数光谱与叶绿素之间存在较大的负相关关系;在红边区的 735 ~ 765 nm 范围内,导数光谱与叶绿素存在显著的正相关关系。测试树种叶绿素 B、T 含量同导数光谱的相关关系的变化趋势与叶绿素 A 的变化趋势基本相同,但通过统计分析表明仍然是叶绿素 A 与导数光谱的相关性最强(为表示方便,这里省去叶绿素 B 与 T 的图解);导数光谱与叶绿素含量的相关关系较光谱反射率与叶绿素含量相关关系提高了近 4%。

2.5 PSSR 植被指数与叶绿素的相关关系

自高光谱技术问世以来,大量遥感工作者开发了用于不同探测目标的遥感模型来定量或半定量研究探测对象,Chappelle 和 Penuelas 首先致力于用高光谱窄波段植被指数研究植被叶片叶绿素、胡萝卜素含量,并且取得了很大的成功^[9, 11]。本文采用的 PSSR 植被指数是 Blackburn 在借鉴 Chappelle、Lichtenthaler 等人的工作基础上开发出来的对植被叶绿素含量较为敏感的植被指数^[17]。图 4(a)是 PSSRa 植被指数与叶绿素 A 进行不同的函数回归分析后,确定幂函数为最佳拟合方程,确定性指数 R^2 达到 0.836。图 4(b)是 PSSRb 植被指数与叶绿素 B 进行幂函数回归后,得到的最佳回归方程,线性回归、指数回归所得到的确定性指数 R^2 只是略低于幂函数回归方式,出现这种情况的一个原因是由于测试树种叶绿素 B 的差异水平低,多种回归方式都能满足有限的散点拟合。图 4(c)的植被指数是 Lichtenthaler 发现的对植被叶绿素 T 较为敏感的高光谱植被指数^[17],由于这一植被指数仍属于对植被色素敏感的简单比值植被指数,为了表示方便采用 PSSRt 表示。Lichtenthaler 发现 R_{750}/R_{700} 叶片级别上与叶绿素 T 呈线性关系,但是 Blackburn 在借鉴这一植被指数研究冠层级别叶绿素 T 含量变化时,发现幂函数为最佳回归方程^[10]。作者只是列举了不同叶绿素植被指数中的 PSSR 与叶绿素回归方程以及回归效果,其他数据分析方式还有待进一步验证。由图 4(a ~ c)对比可发现:市内行道树叶绿素 A、T 与光谱反射率的散点分布在回归方程曲线的低值区,而对照数据散点

分布在相对高值区,二者有相同的分布趋势。市内行道树叶绿素 B 与光谱反射率数据则相对远离回归方程,对照区的数据则出现相反情况,这种现象的机理还有待进一步探讨与定量研究。

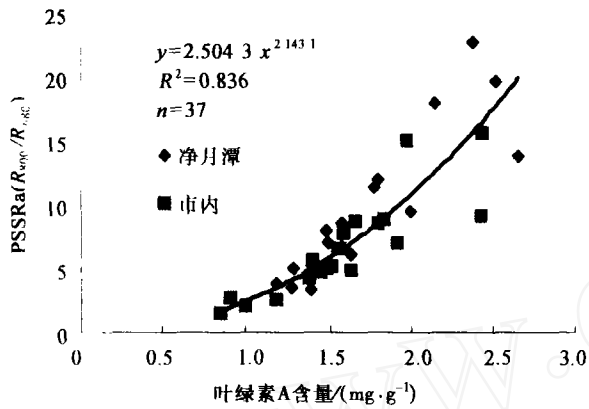


图4(a) PSSRa与叶绿素A的关系

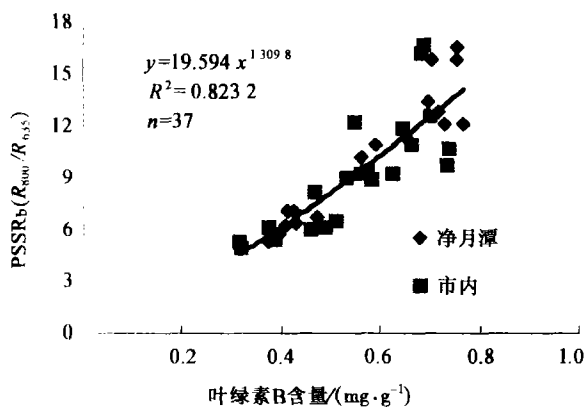


图4(b) PSSRb与叶绿素B之间的关系

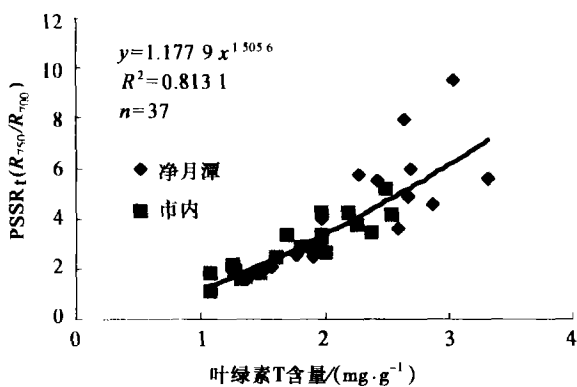


图4(c) PSSRt与叶绿素T之间的关系

3 结论

通过分析长春市行道树与净月潭森林公园对比区相应树种叶绿素含量的差异及此差异引起的高光

谱响应,得出以下结论:

(1) 城市环境对行道树的叶绿素含量有着重要影响,这种影响因不同树种的抗逆能力而有不同表现;城市环境对针叶树种叶绿素含量影响小,对阔叶树种叶绿素含量影响较大。

(2) 高光谱对植被叶绿素含量变化较为敏感,通过对采样行道树的光谱反射率、一阶导数与叶绿素相关分析,表明它们之间关系密切,可以用高光谱技术来监测城市行道树叶绿素变化。

(3) 通过 PSSR 与采样树种叶绿素进行的回归分析表明,PSSR 高光谱植被指数可以用来监测不同树种叶绿素的变化趋势。

以上结论是从一个特定季节高光谱数据与叶绿素分析中得出来的,行道树叶绿素含量在整个生长季如何变化、不同物种的差异以及相应的光谱响应都需要进一步工作来加以研究。本文的结论是建立在采样树种枝条级别上,把光谱测试工作建立在树冠级别上将对解决实际问题更有帮助,另外在光谱测试中如何控制叶面积对光谱反射率的影响也是需要解决的问题。

参考文献:

- [1] Cornis L. 李耶波译. 植物会遭受汽车污染的危害吗? [J]. 环境科学情报, 1983, 3:49 ~ 54
- [2] 郁梦德. 植物叶片中氯、硫含量与叶龄和季节关系的初步分析 [J]. 环境科学, 1980, 2:38 ~ 43
- [3] Xion Z T. Bioaccumulation and physiological effects of excess lead in a roadside pioneer species onchus oleraceus [J]. Environmental Pollution, 1997, 97(3): 275 ~ 279
- [4] Pandy J, Pandy U. Evaluation of air pollution phytotoxicity in a seasonally dry tropical urban environment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1994, 33(3): 195 ~ 213
- [5] 李寒娥, 朱忠保. 湖南省大嵯山大气污染与杉木衰亡的关系 [J]. 植物生态学报, 1999(增刊): 164 ~ 170
- [6] 李寒娥. 交通环境对城市行道树叶片叶绿素的影响 [J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2002, 20(1): 49 ~ 54
- [7] Horler D H, Dockray M, Barber J, et al. The red edge of plant leaf reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4: 273 ~ 288
- [8] Curran P J. Imaging spectrometry [J]. Progress in Physical Geography, 1994, 18: 247 ~ 266
- [9] Chappelle W, Kim M S, McMurtrey J E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 39: 239 ~ 247
- [10] Blachburn A (a). Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf

- and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66: 273 ~ 285
- [11] Penuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance [J]. *Photosynthetica*, 1995, 31: 221 ~ 230
- [12] Gitelson A, Merzlyak N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148: 494 ~ 500
- [13] Blachburn A (b). Spectral indices for estimation photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(4): 657 ~ 675
- [14] 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 不同品种、肥水条件下冬小麦光谱红边参数研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(8): 980 ~ 987
- [15] 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. *遥感学报*, 2000, 4(4): 279 ~ 283
- [16] Demetriades-Shah T H, Steven M D, Clark J A. High Resolution Derivative Spectra in Remote Sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 33(1): 55 ~ 64
- [17] Lichtenthaler H K, Gitelson A, Lang M. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(4): 483 ~ 493

本刊加入《中国学术期刊(光盘版)》 和“中国期刊网”的声明

为适应我国信息化建设需要,扩大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入该数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《林业科学研究》编辑部

2006年1月

本刊加入“万方数据资源系统(ChinaInfo) 数字化期刊群”的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,我刊现已入网“万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群”,所以,向本刊投稿并录用的稿件文章,将一律由编辑部统一纳入“万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群”,提供信息服务。如作者不同意将文章编入数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。作者著作权使用费与本刊稿费一次性给付,不再另付。

《林业科学研究》编辑部

2006年1月