

叶片光化学植被指数(PRI)的修正及其敏感性分析

吴朝阳^{1,2}, 牛铮¹, 汤泉^{1,2}

1. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 光化学植被指数(PRI)被成功的应用于估算不同叶片生化组分的光能利用率(LUE), 这些生化组分包括叶片含水量、氮元素浓度等。以往的研究中已经成功建立了叶片、冠层和景观尺度 PRI 和 LUE 的相关关系。但是, 为了利用 PRI 更加准确地估算叶片 LUE, 很多问题仍然亟需解决, 比如当 LUE 高于 $0.03 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$ (photosynthetic photon flux density), PRI 会出现一个明显的饱和区域以及 PRI 和 LUE 关系会随季节发生较大变化。文章对 PRI 进行了修正, 并基于 PROSPECT 模型对这一修正形式进行了 4 个参数的敏感性分析。分析结果表明, 叶片 SR-PRI(Simple ratio PRI) 对叶肉结构参数(N)、叶绿素浓度(c_{ab})敏感性要高于叶片的等效水厚(c_w)和干物质浓度(c_m)。因此叶肉结构参数(N)和叶绿素浓度(c_{ab})的微小变化都会造成 SR-PRI 的较大变化, 进而影响到 LUE 的估算精度。对 SR-PRI 的实证实验表明, 这一指数也能够很好地用来估算叶片的光能利用率并且结果要优于 PRI 和 LUE 之间的相关关系。SR-PRI 最重要的一方面在于其更清晰的物理意义和对 531 nm 处反射率变化的敏感性, 因为这一波段位置的反射率变化是评价光能利用率的核心参数。

关键词 光化学植被指数 PRI; 简单比值光化学植被指数 SR-PRI; 敏感性; 修正

中图分类号: TP79 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)09-2014-05

引言

光能利用率 LUE(light use efficiency) 是估算净初级生产力 NPP(net primary productivity) 的一个关键变量。获取可靠精度的光能利用率对研究能量的分布以及全球环境的变化有着重要的意义^[1]。光化学植被指数 PRI(photochemical reflectance index) 的定义为 531 和 570 nm 处反射率的归一化植被指数。这两个波段位置的反射率受到叶黄素循环的影响并和叶片的光能利用率密切相关。因此 PRI 为估算叶片的光能利用率提供了一种很好的方法。当入射光强超过光合作用能够使用的能量时, 就会引起叶黄素从环氧化状态转变为脱环氧化状态来散发热量以保护光合器官^[2], 因而导致 LUE 的变化。

研究表明, PRI 和 F/F_m 以及 LUE 在叶片^[3]、冠层^[4]以及景观尺度^[5]上都能建立很好的相关关系。目前研究精力关注于各种干扰因素对 PRI 和 LUE 关系的影响, 如叶片水含量、氮元素浓度等^[6]。Barton 和 North^[7] 对影响冠层

PRI 的干扰因素做出了定量的研究, 包括太阳天顶角、叶面积指数 LAI(leaf area index)、叶倾角分布 LAD(leaf angle distribution) 以及土壤类型等。在冠层内部性质保持不变的情况下, 随着观测天顶角的变化 PRI 会发生很大的变化。Guo^[6] 等指出只有当光合作用 II 和 CO_2 固定的效率经过调整时, PRI 和 LUE 的关系才成立。Nakaji^[8] 等研究了日本落叶松的光能利用率和 PRI 的季节性变化后指出, PRI 和 LUE 的关系并不能一直存在。因此, 除 PRI 以外, 其他的参数比如叶片的色素浓度或者 NDVI 应该同时被引入, 以此更好地捕捉 LUE 的变化信息。

本文的目的在于提出了一种更具物理意义的 PRI 的修正形式, 并对其进行了叶片参数的敏感性分析。同时对这一指数的可行性进行了实证研究。

1 方法

1.1 PRI 的修正

PRI 首次由 Gamon^[9] 等提出, 主要是选择了 531 和 570

收稿日期: 2007-05-10, 修订日期: 2007-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB714406), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-313)和遥感科学国家重点实验室科研基金项目(KQ060006)资助

作者简介: 吴朝阳, 1982年生, 中国科学院遥感应用研究所博士研究生 e-mail: hefery@163.com

nm 处的反射率, 可由下式表示

$$PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570}) \quad (1)$$

光能利用率 (LUE) 的定义为冠层截取的每摩尔光合有效辐射中碳的固定量。Barton 和 North^[7] 用一个简单的成直角的双曲线来模拟总的光合作用 (P) 和垂直于叶片光强 (Q_L) 的关系

$$P = P_{max} Q_L / (k_m + Q_L) \quad (2)$$

其中 P_{max} 是最大光合作用速率, K_m 为 $P = 0.5 P_{max}$ 时的 Q_L 值。因此 LUE 可以表达为

$$LUE = P_{max} / (k_m + Q_L) \quad (3)$$

Pe uelas^[5] 研究了三种植物 PRI 和 LUE 的关系, 给出了一个经验公式

$$PRI = 0.16(LUE - 0.0096) / (0.012 + (LUE - 0.0096)) \quad (4)$$

结合 (1), (2), (4) 式, 我们可以得到 531 和 570 nm 处反射率的关系, 如 (5) 式

$$R_{531} = R_{570} (12.083 (P_{max} / (k_m + Q_L)) + 9) / 8.750 (P_{max} / (k_m + Q_L)) + 41 \quad (5)$$

从 (5) 式我们可以看出 531 和 570 nm 处反射率的相互关系, 当公式的两边同时除以 570 nm 处反射率时, 公式右边仅和总的光合作用和垂直于叶片光强有关。这更具有光能利用率的含义, 因此我们得到了 PRI 的一种修正形式, 称为简单比例 PRI (Simple Ratio, PRI SR- PRI)

$$SR - PRI = R_{531} / R_{570} \quad (6)$$

其中, R_{531} 代表 531 nm 处的反射率 (叶黄质信号波段), R_{570} 代表 570 nm 处的反射率 (参考波段)。

1.2 敏感性分析及结果

本文选择了叶片自身的生化组分参数对 SR- PRI 的影响, 主要包括叶肉结构参数 (N , 基值 1.5), 等效水厚 (c_w , 基值 $0.015 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$), 叶绿素浓度 (c_{ab} , 基值 $0.035 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$) 和干物质浓度 (c_m , 基值 $0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)。选择这四种参数的原因是这些参数可以通过 PROSPECT 模型来模拟^[10]。关注于叶绿素浓度的原因不仅因为这是 PROSPECT 模型的一个输入参数而且叶绿素浓度和叶黄素浓度之间存在一个普遍的相关关系 ($r^2 = 0.87$)^[11]。各种参数的基值选择参考的是 LOPEX 93 的部分实验数据。

1.2.1 叶肉结构参数 (N) 的影响

叶肉结构参数 N 是 PROSPECT 模型的基本参数之一, 代表叶片同性层的数量。在本文中, N 的变化范围是从 1 到 3.5, 步长为 0.25, 其他参数保持不变。

随着 N 值的增加, 531 和 570 nm 处的反射率都增加, 因为 N 越大意味着层数的增多, 对多次散射具有增强作用, 因此叶片反射率会随着 N 的增大而增大。同时, N 对 570 nm 处的反射率影响要比对 531 nm 更大, 导致整体而言 SR- PRI 随着 N 值的增加而减小, 如图 1 所示。同时, 我们从图上可以看出曲线簇下降的越来越慢, 这意味着 SR- PRI 能够很好的监测 531 和 570 nm 处反射率的变化。因此我们可以得出结论, SR- PRI 对叶肉结构参数 N 的变化具有较高的敏感性。

1.2.2 等效水厚 (c_w) 的影响

水分通常占叶片湿重的 40% ~ 80%, 是最主要的生化组

分之一。等效水厚 (c_w) 的变化主要影响 970, 1400 和 1900 nm 附近的反射率, 对 531 和 570 nm 处的反射率几乎没有影响。因此随着 c_w 从 0.004 变化到 $0.04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 叶片 SR- PRI 保持不变, 所有的曲线簇完全重合, 这一特点表明 SR- PRI 对 c_w 的变化并不敏感。

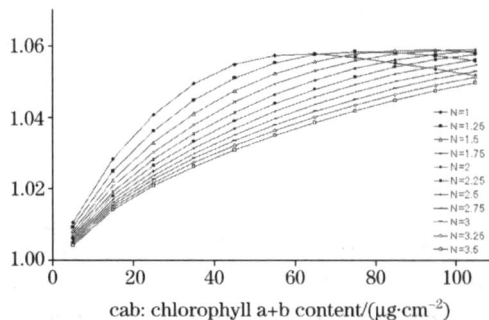


Fig. 1 SR- PRI distribution with leaf mesophyll structure parameter changing from 1 to 3.5

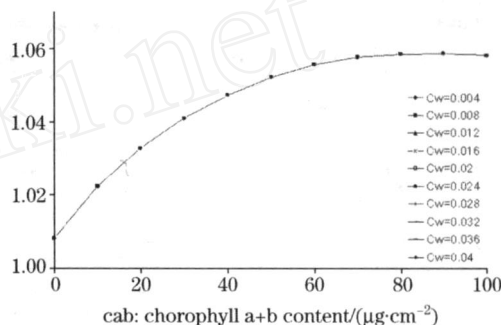


Fig. 2 Values of SR- PRI for c_w from $0.004-0.04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$

1.2.3 叶绿素浓度 (c_{ab}) 的影响

光能利用率变化的关键因素在于叶片色素浓度的变化, 尤其是叶绿素和叶黄素之间的转化。叶绿素浓度对反射率的影响主要集中在 430 ~ 660 nm, 包括蓝、绿和红波段。Sims^[11] 等指出叶片叶绿素浓度和叶黄素浓度之间有着可靠的相关关系 ($r^2 = 0.87$), 因此, 叶绿素的浓度可以间接反映叶黄素的变化, 对 531 和 570 nm 即 SR- PRI 非常重要。在我们的模拟实验中, c_{ab} 的变化范围是从 0 ~ $100 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 步长为 $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。如图 3 所示, 随着 c_{ab} 的增加, SR- PRI 也增加, 原因是 570 nm 处的反射率比 531 nm 处下降得更快。由于 c_w 的变化对 SR- PRI 没有影响, 因而整个曲线簇为相互平行的直线, 同时, SR- PRI 的变化是不均匀的, 平行线之间的距离在减小, 这意味着对于大多数的叶片而言, 这一指数能够监测出叶片 531 和 570 nm 处的反射率变化, 即 SR- PRI 对叶绿素的浓度 (c_{ab}) 变化敏感。

1.2.4 叶片干物质浓度的影响

叶片的干物质 (c_m) 主要包括纤维素、木质素等, 随着 c_m 从 0.002 增加到 $0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 由于 531 和 570 nm 处反射率的降低, 并且 531 nm 处的反射率下降地较快, SR- PRI 值总体在降低。但是由于这两个波段反射率下降地相对均匀, 因此 SR- PRI 曲线的斜率变化不大, 这一点从图 4 中可以明显的看出来, 整个曲线簇形状基本没有变化, 即 SR- PRI 对

c_m 的变化敏感性不高。

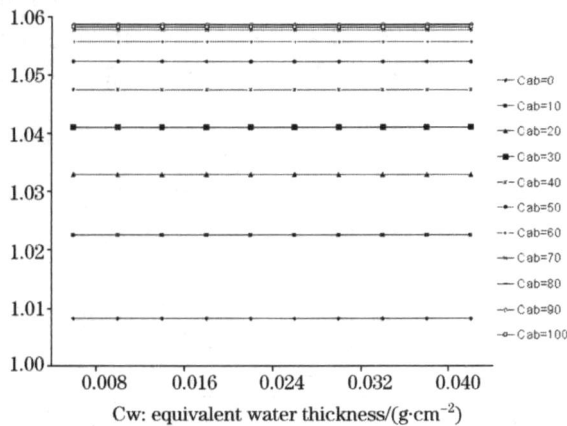


Fig. 3 SR-PRI plotted against c_{ab} with changing from 0-100 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$

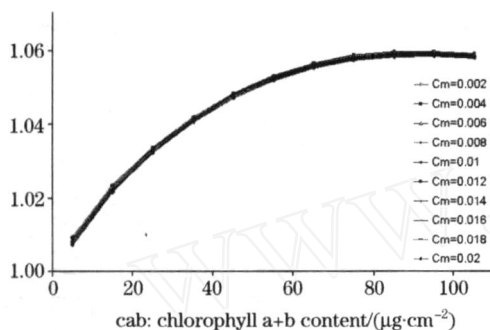


Fig. 4 SR-PRI vs c_m varying from 0.002-0.02 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$

从以上的分析中,我们可以得到以下结论。

(1) SR-PRI 不仅是光能利用率的一个指数,并且具有更清晰的物理意义。

SR-PRI 的定义是 531 和 570 nm 处的反射率比值。由于叶黄素转化对 531 nm 处的反射率变化影响明显,对 570 nm 处的反射率几乎没有影响,因此 SR-PRI 值能直接反映 531 nm 处的反射率变化,即能更好地监测 LUE 的变化。

(2) SR-PRI 对叶肉结构参数(N)和叶绿素浓度(c_{ab})变化敏感。

这一结论是 SR-PRI 的最大优点。任何色素浓度的变化以及叶绿素和叶黄素之间的转换都会导致 531 和 570 nm 处反射率的变化,即改变 SR-PRI 值。如果这一指数对这些参数变化敏感,它就能更好地来评价 LUE 的变化,而这正是 PRI 修正的目的所在。

2 实证研究

2.1 材料和方法

我们选择了四种植物进行了实验,分别是橡皮树(Moraceae),绿萝(Araceae),玉树(Euphorbiaceae)和竹子(Gramineae),分别以 A, B, C, D 表示。主要目的在于考察 SR-PRI 是否能反映叶片 LUE 的变化,并与 PRI 进行了比较。

四种植物均在实验室生长,平均温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,保证一定量的水分和阳光照射。实验之前,将样本置于室外 7 d 以适应自然环境的变化。

叶片反射率获取的方法是使用积分球(RTS-3ZC, Spheroptics, USA)。实验中使用的参考板为 99% 的朗伯体白板(Labsphere, Inc., North Sutton, New Hampshire, USA)。每片叶片测量 10 次,取平均值作为最终值来计算 PRI 和 SR-PRI。净光合速率和外界辐射强度的测量使用的是 LF6400 便携式的气体分析系统(LFCOR, Inc., Lincoln, Nebraska, USA)。外界辐射由仪器中测量单元中的一个量子传感器获取,并用来计算 LUE。

2.2 实验结果

实验结果获得了 PRI+1 (这里对 PRI 进行了一个数学变换,加上了常数 1,以利于在同一坐标系下进行直接比较)。我们对四种植物分别进行两种指数的比较,见图 5。

2.3 比较分析

PRI 以一种非线性的方式增强了 531 和 570 nm 处反射率的差别,这就意味着当这两个波段的反射率有较大的变化时,尤其是对于叶黄质和 LUE 的关键参数 531 nm, PRI 的敏感性降低。因此, PRI 对高 LUE 值区域不敏感,如 0.03 mol CO₂ mol⁻¹ PPFD,这一点从 PRI 曲线的饱和区域就可以看出来。

对于同样的数据,直接比值形式的 SR-PRI 要比 PRI 增加的更快,这一特点可能导致当 LUE 较低时(典型的是小于 0.003 mol CO₂ mol⁻¹ PPFD),过高的估计了 531 nm 处反射率的影响。相反的, PRI 随 LUE 增加而出现的饱和区域又会低估了 531 nm 处反射率的影响,通常 LUE 大于 0.03 mol CO₂ mol⁻¹ PPFD 时 PRI 会出现饱和。但是,绝大多数的 LUE 在 0.005 ~ 0.05 mol CO₂ mol⁻¹ PPFD 范围内波动,这就意味着对于绝大多数的 LUE, SR-PRI 是一个更可行的指数。

3 结论

本文基于由 Barton 和 North 提出的一个简单垂直的双曲线模型提出了 PRI 的一种更具物理意义的修正形式 SR-PRI,并利用 PROSPECT 模型对其进行了叶片参数的敏感性分析。结果表明,SR-PRI 对叶肉结构参数(N)、叶绿素浓度(c_{ab})的敏感性要高于叶片的干物质浓度(c_m)和等效水厚(c_w)。和 Barton 以及 North 的研究不同,我们主要关注于叶片“内部”的参数对 SR-PRI 的影响,因为这些生化组分的参数能直接影响 531 和 570 nm 处的反射率,而这是 PRI 和 LUE 关系的关键作用机制。

实证和比较分析表明 SR-PRI 能够用来估算叶片的光能利用率,并且精度略高于 PRI。然而,SR-PRI 仍然存在问题,如当 LUE 值较低时,531 nm 处的反射率的作用被高估。以后对于 PRI 的修正研究应该关注于 PRI 和 LUE 的不同尺度问题,同时不仅要关注于外界环境参数的影响,如 LAI、太阳-传感器之间的几何关系等,还要考虑叶片自身的生化参数,尤其是叶片的叶绿素和叶黄素的浓度。

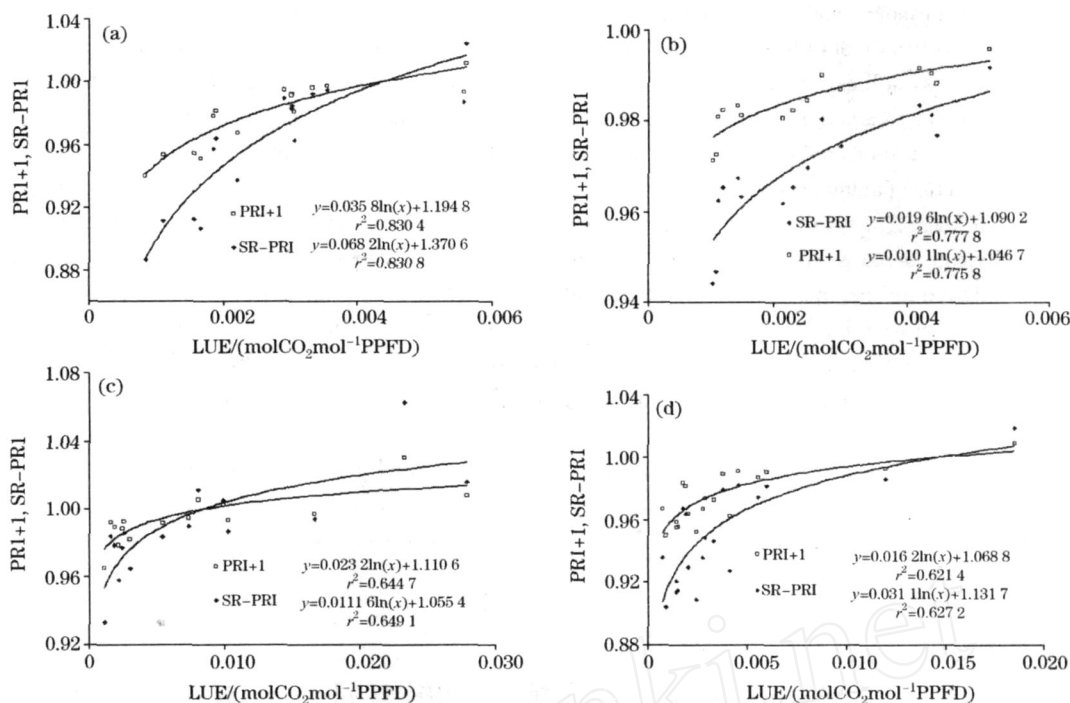


Fig 5 LUE plotted against PRI + 1 and SR PRI for each of the four species

参 考 文 献

- [1] Adams J M , Faure H , Faure-Denard L . Nature , 1990 , 348 : 711 .
- [2] Demmig-Adams B , Adams B . Trends in Plant Science , 1994 , (1) : 21 .
- [3] Gamon J A , Serrano L , Surfus J S . Oecologia , 1997 , 112 (4) : 492 .
- [4] Pe uelas J , Llusia J , Pinaol J , et al . International Journal of Remote Sensing , 1997 , 18 : 2863 .
- [5] Pe uelas J , Filella I , Gamon J A . New Phytologist , 1995 , 131 (3) : 291 .
- [6] Guo J M , Trotter C M . International Journal of Remote Sensing , 2006 , 27 : 4677 .
- [7] Barton C V M , North P R J . Remote Sensing of Environment , 2001 , 78 : 264 .
- [8] Nakaji T , Oguma H , Fujinuma Y . International Journal of Remote Sensing , 2006 , 27 : 493 .
- [9] Gamon J A , Pe uelas J , Field C B . Remote Sensing of Environment , 1992 , 41 : 35 .
- [10] Jacquemoud S , Baret F . Remote Sensing of Environment , 1990 , 34 : 75 .
- [11] Sims D A , Gamon J A . Remote Sensing of Environment , 2002 , 81 : 337 .

Sensitivity Study of a Revised Leaf Photochemical Reflectance Index (PRI)

WU Chao-yang^{1,2}, NIU Zheng¹, TANG Quan^{1,2}

1. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Photochemical reflectance index (PRI) defined as a normalized difference index using two narrow reflectance bands at 531 and 570 nm that are closely related to xanthophyll cycle pigment content has been successfully used to estimate leaf photosynthetic light use efficiency (LUE) across species which vary in water content and nitrogen concentration. Previous research demonstrated that a consistent relationship could be established between PRI and LUE calculated from gas exchange measure-

ments at the leaf, small canopy, and full forest or crop canopy scales. However, a number of problems, such as the saturation of PRI when LUE exceeds $0.03 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPFD}$ (photosynthetic photon flux density) and disjunctive relationships of PRI and LUE in seasonal changes, still existed and need to be handled in order to evaluate LUE more accurately. A sensitivity study of a revised PRI with four leaf parameters was performed based on PROSPECT model in the present article to study the effects of different biochemical concentrations on leaf SR-PRI (simple ratio PRI). Sensitivity study proved that leaf SR-PRI is more sensitive to leaf mesophyll structure parameter (N) and chlorophyll a + b content (c_{ab}) than parameters of dry matter content (c_m) and equivalent water thickness (c_w), indicating that leaf mesophyll structure parameter (N) and chlorophyll a + b content (c_{ab}) should be especially considered when acquiring leaf SR-PRI. And changes in the two parameters would cause large variation in SR-PRI which would reduce the precision for estimating light use efficiency. Validation study of SR-PRI was carried out in the analysis and the results proved that SR-PRI can also be a feasible index of estimating LUE for four species of plants with correlation coefficients better than that of PRI and LUE. The advantage of SR-PRI compared to PRI is its much clearer physical meaning and its sensitivity to the changes in reflectance at 531 nm which serves as a core parameter to evaluate light use efficiency.

Keywords Photochemical reflectance index (PRI); Simple ratio PRI (SR-PRI); Sensitivity; Revision

(Received May 10, 2007; accepted Aug. 20, 2007)

《光谱学与光谱分析》2008 年征订启事

欢迎投稿 欢迎订阅

《光谱学与光谱分析》1981 年创刊, 国内统一刊号: CN 11-2200/O4, 国际标准刊号: ISSN 1000-0593, CODEN 码: GYGFED, 国内外公开发刊, 大 16 开本, 240 页, 月刊; 是中国科协主管, 中国光学学会主办, 钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版, 每期售价 30.00 元, 全年 360 元; 国内邮发代码 82-68, 国外发行代码 M905。刊登主要内容: 激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X 射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊, 中国科协优秀科技期刊, 中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊, 中国科技论文统计源刊, “中国科学引文数据库”, “中国物理文摘”, “中国学术期论文摘”, 同时被国内外的 CSCI, SCI, AA, CA, EI, MEDLINE 等文献机构收录。根据国家科技部信息研究所发布信息, 中国科技期刊物理类影响因子及引文量《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告 (广告经营许可证: 京海工商广字第 8094 号)。

《光谱学与光谱分析》的主编为黄本立院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅, 若有漏订者可直接与光谱学与光谱分析期刊社联系。

联系地址: 北京市海淀区学院南路 76 号, 光谱学与光谱分析期刊社 邮政编码: 100081

联系电话: 010-62181070, 62182998

电子信箱: chngpxygf@vip.sina.com; 修改稿专用邮箱: gp2008@vip.sina.com

网 址: <http://www.gpxygf.com>