

文章编号 2095-1531(2015)02-0198-07

基于反射率特性的高光谱遥感 图像云检测方法研究

冯书谊*, 张宁, 沈霁, 叶盛, 张震
(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 为了提高高光谱遥感图像数据的利用率, 提出了一种基于光谱反射率特性的星载高光谱图像云检测方法。首先分析了各类地物在不同光谱下的反射率特征, 根据其特点从星载高光谱图像中选取特定 5 个波长的图像数据, 然后依照图像地物反射率及阈值判定法区分出高云区和中低云区, 最后对二者合并, 得到目标云区。试验结果表明, 该方法的云检测率可达 90% 以上, 虚警率在 1% 以内, 可以准确区分云与雪地区域、沙漠区域以及植被区域, 实现云检测。

关键词: 高光谱; 遥感图像; 云检测; 反射率

中图分类号: P407.8 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20150802.0198

Method of cloud detection with hyperspectral remote sensing image based on the reflective characteristics

FENG Shu-yi*, ZHANG Ning, SHEN Ji, YE Sheng, ZHANG Zhen
(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

* Corresponding author, E-mail: feng_shu_yi@aliyun.com

Abstract: To improve the effectiveness of remote-sensing image data, a cloud detection method based on the reflectivity of hyperspectral remote image is proposed. According to the characteristic of the reflectivity between different earth background, image data of five specific wavelengths are chosen, then high-cloud area and low-cloud are determined by judging the threshold of different spectrum. The object cloud area can be obtained by combining the high-cloud and low-cloud areas. The experiment result indicates that the accuracy of cloud detection is more than 90%, while false alarm ratio is less than 1%, which proves that the cloud area can be accurately identified from multiple types of earth background.

Key words: hyperspectral; remote sensing image; cloud-detection; reflectivity

收稿日期: 2014-11-19; 修订日期: 2015-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61072135)

1 引言

大气系统中有相当一部分地区表面被云层覆盖,造成多、高光谱卫星对地观测数据中存在大量含云图像数据,较大程度降低了遥感数据的利用率^[1-2]。为了能够提高卫星对地观测数据的有效率,星载图像自主云检测就显得非常重要。

目前国内从事星载实时云检测算法研究还未见公开报道,在地面应用中进行云检测的研究有中科院遥感中心、气象局及农情预测部门等单位^[3]。研究中所采用的图像分别为 MODIS、LANDSAT 等多光谱及高光谱图像。其中北京理工大学承担地面站的云判读任务,通过模式识别与并行计算对可见光图像进行云判读^[4]。其算法利用图像空间域或频率域特点作为判据,分别采用图像的均值、方差、边缘和熵构成四维空间,采用最小距离法对云和地物进行分类。

国外云识别的方法主要以 ISCCP 方法、CLAVER 方法等阈值方法为主^[5-6]。其中 ISCCP 算法利用的波段为可见光(0.6 μm)和红外(11 μm)波段。把每一个像元的观测辐射值与晴空辐射值比较,若两者的差大于晴空辐射值本身的变化时,判定该像元点是云点。CLAVER 算法以 2×2 像元窗口为基础,利用 5 个通道的光谱信息,采用决策树的方式使用固定或半经验的初始化阈值来识别区域图像是否为无云、部分有云和全云。

现有的云检测算法大多需要提取图像的特征或进行复杂的决策判断,其计算量比较大,并不适用于星载高光谱图像的实时云检测。因此,本文提出了一种基于光谱反射率特性的星载高光谱图像云检测方法。

2 地物的反射特性

由于高光谱图像的谱段数较多,首先需要对各谱段图像反射率特性进行分析,选取适当的谱段进行云检测。

图 1^[7]描述了云、雪、水体和植被在不同谱段

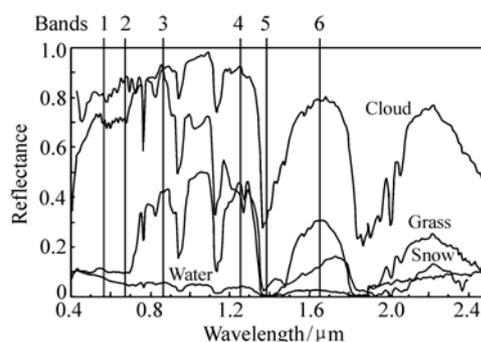


图 1 不同地物在不同波长谱段下的反射率分布^[7]

Fig.1 Reflectivity with four types of background under different wavelength^[7]

下的反射率分布情况,由于不同地物在不同谱段下反射率差异比较大,因此可以据此进行地物种类区分。

在 0.58 ~ 0.68 μm 之间的可见光波段,不同类型下垫面介质的反射率也明显不同。其中水体反射率最低,绿色植被其次,土壤和城镇反射率稍高。在此波段处,晴空数据地物具有较低的反射率,反射值在 0 ~ 0.3 之间。但云和雪在此波段的反射率一般高于 0.6,明显高于其余下垫面的反射率。

1.38 μm 波长处于强的水汽吸收波段,地面的反射因水汽吸收难以到达传感器,导致反射率低,而高云上方的水汽对云的反射值削弱较少,因此该波段对高层卷云敏感,具有高的反射率,低云则具有低的反射率,通常低于 0.02。

雪和云在可见光波段具有相似的反射特性,因此在可见光范围内难以判读,但是在中、长红外谱段,云与雪的吸收特性相差较多。比如在 1.64 μm 短波红外波段中,雪因吸收太阳辐射强而导致反射率低,云则相对吸收太阳辐射少而反射率高。因此可在该谱段利用归一化雪指数方法进行判读。

沙漠及亮度较高的土壤和云在可见光波段也具有相似的反射特性,而在 1.25 ~ 1.65 μm 短波红外波段则区别较为明显。云、雪和冰的反射率在此谱段区间内趋于降低,而沙漠和亮度高的土壤则相反,因此通过此波段区间的反射率特性进行沙漠和云雪冰的判别。

3 光谱图像云检测方法

通过对上述各敏感谱段下地物反射特性的分析,并根据特定谱段下地物反射率差异,采用反射率阈值法进行云检测。

首先在高光谱图像中选择 0.66、0.86、1.25、1.38、1.65 μm 5 个谱段的光谱图像^[7~8],而后根据光谱图像及太阳角等参数计算出相应谱段下的地物反射率^[9~13],最后对应不同谱段的地物反射率进行阈值判定法确定云区域。

范冬娟等人^[14]提出了一种基于最小二乘的经验线法来计算光谱图像的地物反射率。传感器得到的像素值为 DN ,假定地表为近似朗伯反射体,去除交叉辐射效应的影响后得到像素值 D'_N ,同时假定地面辐射亮度与反射率之间存在线性关系,得到:

$$D'_N = K \times \rho + b. \quad (1)$$

通过使用已知地物光谱响应值结合最小二乘法求出系数 K, b 的值,从而得到 DN 与反射率 ρ 的关系。可通过使用已知地物的光谱响应值与反射率,结合式(1)计算出线性系数,从而得到像素值与地物的反射率间的关系。

确定反射率后进行各谱段的反射率阈值判定,流程如图2所示。

由于 1.38 μm 谱段具有强水汽吸收特性,该波段对高层卷云敏感,具有高的反射率,因此首先对该波长的图像数据反射率进行阈值判断。设置阈值 $T_1 = 0.23$ 使得 $\rho_{\text{地物}} < T_1 < \rho_{\text{高云}}$,反射率大于阈值 T_1 的区域可为高云待定区域,小于 T_1 的为中低云待定区域。

对于高云待定区域,由于在 1.65 μm 短波红外波段中,雪因吸收太阳辐射强而导致反射率低,云则相对吸收太阳辐射少而反射率高,可以用 1.65 μm 波段的图像数据反射率进一步进行云雪判断。设置判别阈值 $T_2 = 0.4$,使得 $\rho_{\text{雪}} < T_2 < \rho_{\text{高云}}$,该波段图像数据的反射率大于阈值 T_2 的即为高云。

接下来检测波长为 0.66 μm 的图像数据,由于此波长图像数据中 $\rho_{\text{水,土}} < \rho_{\text{低云}}, \rho_{\text{水,土}} < \rho_{\text{雪}}, \rho_{\text{水,土}} < \rho_{\text{沙漠}}$ 。设置水、土壤判别阈值 $T_3 = 0.4$,使

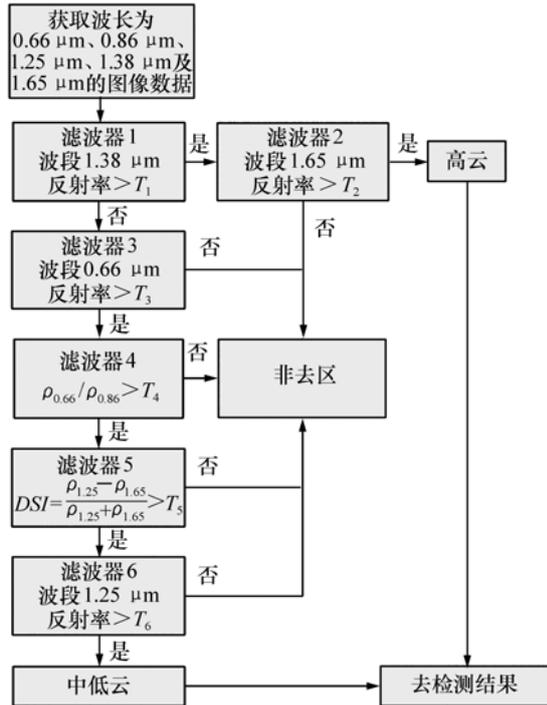


图2 基于光谱反射率特性的云检测流程

Fig.2 Flow of cloud detection based on spectral reflective characteristic

$\rho_{\text{水,土}} < T_3 < \rho_{\text{低云}}, \rho_{\text{水,土}} < T_3 < \rho_{\text{雪}}$ 且 $\rho_{\text{水,土}} < T_3 < \rho_{\text{沙漠}}$ 。把反射率低于阈值 T_3 的水体以及土壤区域滤除,而将高于该阈值的云区域、雪区域以及沙漠岩石区域作进一步的筛选。

接着检测波长为 0.86 μm 的图像反射率值,并计算其与 0.66 μm 的反射率比值 $\rho_{0.66}/\rho_{0.86}$ 。由于植被在波长为 0.66 μm 图像数据的反射率较低而在波长为 0.86 μm 的图像数据的反射率较高,而云在两个波段的反射率没有明显区别,所以云在这两个波段的反射率比值要大于 T_4 ,植被在这两个波段的反射率的比值小于 T_4 ,取 $T_4 = 0.4$,使得归一化沙漠岩石指数 $DSI_{\text{沙}} < T_5 < DSI_{\text{雪}}$ 且 $DSI_{\text{沙}} < T_5 < DSI_{\text{低云}}$ 。比值小于阈值 0.4 的区域为植被区域,因而排除了植被区域,得到含有沙漠岩石、雪区和低云区的非植被区域。

对上述得到的非植被区域后,选取 1.25 和 1.65 μm 谱段的反射率,计算 DSI ,排除沙漠岩石区域。 DSI 定义如下:

$$DSI = \frac{\rho_{1.25} - \rho_{1.65}}{\rho_{1.25} + \rho_{1.65}}. \quad (2)$$

设阈值 $T_5 = 0.3$,将 DSI 小于 0.3 的区域作为

沙漠岩石区域被排除。

对排除沙漠岩石区域后的图像信息,对其 $1.25 \mu\text{m}$ 谱段的反射率进行阈值分析排除,通过实验计算得到雪的反射率 $\rho_{\text{雪}3}$ 和中低云的反射率 $\rho_{\text{低云}2}$,由实验得到 $\rho_{\text{雪}3} < \rho_{\text{低云}2}$,设置雪区域的判别阈值 $T_6 = 0.6$,反射率小于阈值 T_6 的区域为雪区域,反射率大于 T_6 的区域为中低云区域^[15]。

对中低云待定区域进行植被区域、沙漠岩石区域、雪区域以及对水体以及土壤区域的排除,最终得到中低云区域。

4 试验结果与分析

为了验证算法的通用性,文中选用不同数据进行试验,其中包括了云、岩石、沙漠、雪、植被及

水体等多种下垫面。图3(a)、4(a)的以海洋为下垫面,图3(b)、4(b)以沙漠及岩石为下垫面,图3(c)、4(c)选取了由植被、土壤、河流及雪为背景的复杂下垫面图像。目标图像分辨率为 $1\,024 \text{ pixel} \times 1\,024 \text{ pixel}$ 。

闫宇松^[4]等人采用特征提取的算法实现了云剔除,与此类似,在本实验中我们将样图分割为若干个方块,每个方块的大小为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$,计算各方块图像灰度、频率及纹理特征,并以分类的方式对各方块进行了识别。试验结果如图3所示。

虽然该算法也可较为准确的识别云区,但由于将图像进行了子块分割,所识别出的云图具有方块效应,对于云方块中的有效目标也将被剔除,影响了云检测的准确率。减小分割方块的大小可

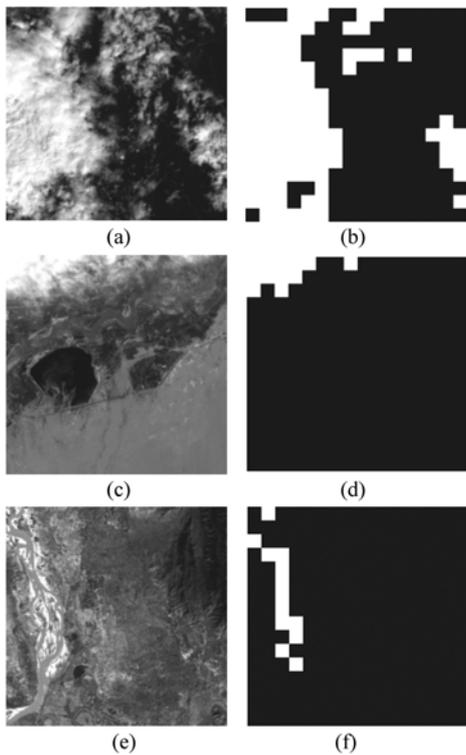


图3 特征提取算法云检测试验结果((a)、(c)、(e)为高光谱图像中的可见光波段图,(b)、(d)、(f)为云检测结果图)

Fig.3 Result of cloud detection based on feature extraction((a)、(c)、(e) is the original hyperspectral image, while (b)、(d)、(f) is the corresponding test result)

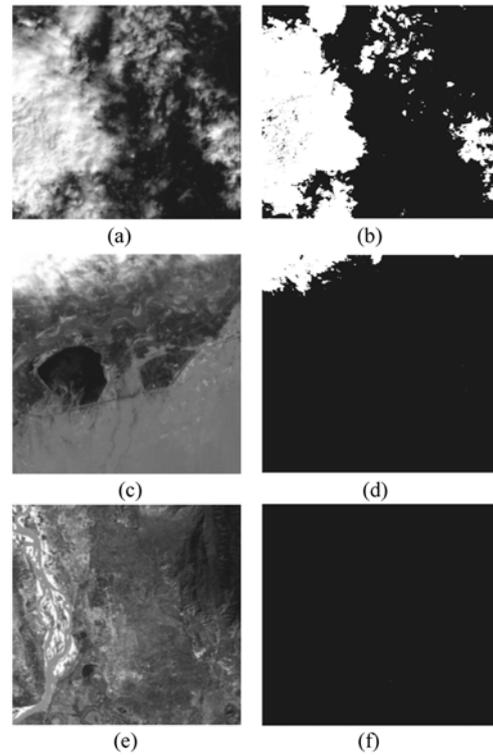


图4 基于反射率特性的云检测试验结果((a)、(c)、(e)为高光谱图像中的可见光波段图,(b)、(d)、(f)为云检测结果图)

Fig.4 Result of cloud detection based on reflective characteristics((a)、(c)、(e) is the original hyperspectral image, while (b)、(d)、(f) is the corresponding test result)

以提高检测率,但会极大地增加运算复杂度,同时由于该算法中还使用了频域变换及迭代等复杂运算,硬件系统中也使用了多块 DSP 结合 FPGA 来实现,因此硬件实现的要求相对较高。

相对于上述基于特征提取的云检测算法,本文提出的基于反射率特性的云检测算法不需对图像进行分割,云区轮廓的检测也不依赖于形态学方法,只需在计算地物反射率后设置多阶滤波器进行区分和判别,识别率优于形态学检测算法且实现方法简单。

试验结果如图 4 所示。可以看出,本算法可

实现不同背景下云区的识别,其中对厚云的检测结果较好,对能透过并看到地面景物的薄云并未剔除,从而保留了薄云下的地物信息。将检测结果和人工判读结果进行对比,结果如表 1 所示。从结果可以看出,云检测的准确率均在 90% 以上,并且检测的虚警率很低,很少有非云区被当做云层,这样能在最大程度保留地物信息的基础上去除无用的云区。本算法可以检测出海洋、沙漠上空的云,并能较好地地区和云类似的雪区,已达到预期检测效果。

表 1 两种算法检测结果及对比

Table 1 Results and comparison of two algorithm

	图 3(a)/图 4(a)		图(3)/图(4)		图 3(e)/图 4(e)	
	特征提取法	本算法	特征提取法	本算法	特征提取法	本算法
准确率/%	86.30	93.30	92.30	98.70	95.30	99.80
虚警率/%	2.50	0.60	3.60	0.10	4.70	0.20
漏警率/%	8.80	6.10	1.80	1.20	0	0

5 结 论

本文分析了不同地物在不同波段的光谱反射特性,利用基于 5 个特征谱段的反射率阈值判定法进行了多光谱数据的云检测处理。对不同背景的数据进行测试,并对结果进行了对比分析。从试验结果可以看出,本算法具有一定通用性,检测效果较为理想。该云检测算法具有以下优势:

(1)本算法可有效地区分云层及各种下垫

面,包括沙漠、岩石、植被及雪等,检测准确率可达 90% 以上。

(2)本算法不依赖于云的形态,运算量相对较小,适合于星载高光谱图像的云检测。

(3)进行了归一化处理,部分消除了太阳角及大气程辐射的误差。

但是本算法也存在一定不足,主要是在反射率的计算上进行了一定的假设和简化,对大气吸收及散射、探测器误差及复杂地形特性未进行充分考虑,会在一定程度上影响云检测的准确度。

参考文献:

- [1] 王颖,董戈.一种基于小波边缘检测的 CLOUDSAT 数据云检测方法研究[J].科学技术与工程,2009,9(13):3847-3849.
WANG Y,DONG G. Application research of edge detection in cloud detection using wavelet transform based on C loudsat data[J]. *Science Technology and Engineering*,2009,9(13):3847-3849. (in Chinese)
- [2] 李微,方圣辉,佃袁勇,等.基于光谱分析的 MODIS 云检测算法研究[J].武汉大学学报,2005,30(5):435-438.
LI W,FANG S H,DIAN Y Y,*et al.*. Cloud detection in MODIS data based on spectrum analysis[J]. *Geometrics and Information Science of Wuhan University*,2005,30(5):435-438. (in Chinese)
- [3] 马芳,张强,郭锐,等.多通道卫星云图云检测方法的研究[J].大气科学,2007,31(1):120-128.
MA F,ZHANG Q,GUO N,*et al.*. The study of cloud detection with multi-channel data of satellite[J]. *Chinese J. Atmos-*

- pheric Sciences*,2007,31(1):120-128. (in Chinese)
- [4] 闫宇松,龙腾. 遥感图像的实时云判技术[J]. 北京理工大学学报,2010,30(7):817-821.
YAN Y S, LONG T. Real-time cloud detection in optical remote sensing image[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*,2010,30(7):817-821. (in Chinese)
- [5] GOODMAN A H, HENDERSON-SELLERS A. Cloud detection and analysis;a review of recent progress[J]. *Atmospheric Research*,1988,21:203-222.
- [6] CHOI H, BINDSCHADLER R. Cloud detection in Landsat imagery of ice sheets using shadow matching technique and automatic normalized difference snow index threshold value decision[J]. *Remote Sensing of Environment*,2004,91(2):237-242.
- [7] MICHAEL K. GRIFFIN, HSIAO-HUA K. BURKE, DAN MANDL, *et al.*. Cloud cover detection algorithm for EO-1 Hyperion imagery[J]. *SPIE*,2003,9(24):483.
- [8] YANG P, LIOU K N, GAO B, *et al.*. MODIS user manual[J]. NASA,1999:1-30.
- [9] 田卓,易凡,黄启俊,等. 基于MODIS数据的卷云反射率的反演实现[J]. 光学与光电技术,2012,10(4):73-77.
TIAN ZH, YI F, HUANG Q J, *et al.*. Realization of retrieving the cirrus clouds reflectivity based on MODIS data[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2012,10(4):73-77. (in Chinese)
- [10] 陈道群,黄启俊,易凡,等. 中纬度卷云光学特性的研究[J]. 光学与光电技术,2011,9(4):74-78.
CHEN D Q, HUANG Q J, YI F, *et al.*. Study on optical properties of Mid-Latitude cirrus[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2011,9(4):74-78. (in Chinese)
- [11] 廖子君,杨春平. 可见光波段卷云散射特性的研究[J]. 光学与光电技术,2011,9(6):25-28.
LIAO Z J, YANG CH P. Scattering properties of ice clouds in the visible light spectral region[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2011,9(6):25-28. (in Chinese)
- [12] 杨嗣承,易凡,等. 基于多重散射的卷云辐射传输特性[J]. 光学与光电技术,2012,10(1):32-36.
YANG S CH, YI F, ZHANG X, *et al.*. Radiation transmission properties of cirrus based on multiple scattering[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2012,10(1):32-36. (in Chinese)
- [13] 刘洋,田小建,王晴,等. 采用局部分形的高效图像分割方法在红外云图处理中的应用[J]. 光学精密工程,2011,19(6):1368-1374.
LIU Y, TIAN X J, WANG Q, *et al.*. Application of efficient image segmentation method based on local fractal in the infrared cloud image processing[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(6):1368-1374. (in Chinese)
- [14] 范冬娟,张韶华. 高光谱影像反射率反演方法的研究[J]. 海洋测绘,2006,26(3):28-30.
FAN D J, ZHANG SH H. Research on the methods of the reflectivity inversion of the high spectrum image[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*,2006,26(3):28-30. (in Chinese)
- [15] MARK A. FOLKMAN, JAY PEARLMAN, LUSHALAN B. LIAO, *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration[C]. SPIE, Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere, Sendai, Japan October. 9, 2000.

作者简介:



冯书谊(1984—),男,湖南岳阳人,硕士,工程师,2006年于南京航空航天大学获得学士学位,2009年于上海交通大学获得硕士学位,主要从事星载数字图像处理及数据传输方面的研究。E-mail:feng_shu_yi@aliyun.com



叶盛(1977—),男,上海人,学士,高级工程师,2000年于电子科技大学获得学士学位,主要从事图像获取、处理及压缩等方面的研究。E-mail:brightys@163.com



张宁(1982—),男,山东济宁人,博士,工程师,2006年于吉林大学获得学士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事图像处理及星载电子学方面的研究。E-mail:dzs_zhangning@163.com



张震(1984—),男,山东临沂人,硕士,助理工程师,2008年于西安理工大学获得硕士学位,2012年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事星载图像编码及处理技术方面的研究。E-mail:zz841215@126.com



沈宁(1987—),男,江苏常州人,硕士,工程师,2010年、2013年于上海交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事图像处理和视频编解码领域的研究。E-mail:js6652327@163.com

《发光学报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)86176862,84613407

E-mail:fgxht@126.com

国内统一刊号:CN 22-1116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:12-312

国外发行代号:4863BM

http://www.fgxb.org