

基于 Landsat/TM 影像提取太湖 CDOM 浓度空间分布

陈 军^{1,2}, 王保军^{1,2}, 孙记红^{1,2*}, 付 军^{1,2}

1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071

2. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071

摘 要 在湖泊生态系统中, CDOM(colored dissolved organic matter)是营养物质的重要来源,也是碳循环过程的主要物质组成。作者在 2003 年 10 月 27 日—28 日太湖水质实验数据的基础上,研究与探讨了从 Landsat/TM 影像中提取太湖 CDOM 浓度分布状况的方法。通过研究可知,利用 CDOM 在 TM1 波段的强吸收特性,对应的光谱曲线呈现一个吸收波谷;以 TM1 波段反射率为遥感参数,结合遥感反演技术,能较好地提取太湖水体 CDOM 浓度信息;与两个检验数据相比较,模型预报值与实测数据的偏差为 $0.922 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对应的相对偏差为 14.85%;此外,反演结果表明,在 2003 年 10 月 28 日,太湖水体中的 CDOM 浓度分布呈湖心和湖南高,湖东和湖西低的格局。

关键词 CDOM; 遥感反演; Landsat/TM; 太湖

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)01-0034-05

引 言

CDOM 是一种较好的固碳材料,水体中 CDOM 含量的增加有助于减少地表及大气层中的碳含量^[1]。水体中 CDOM 浓度的变化直接关系到大气中温室气体的含量,进而影响全球气候变化。研究表明,大洋水体和内陆水体中的 CDOM 是一个重要的储碳仓库,其存储的碳元素含量与大气中的碳元素含量几乎持平^[2]。然而,CDOM 是一种不透明的物质,其对水下光场分布起到很大的影响作用。CDOM 具有较强的光学吸收特性,过高的 CDOM 含量不利于阳光穿透水体,进而导致水中浮游植物可利用的太阳能大大地降低,严重抑制了浮游植物进行初级生产力的生产^[3,4]。此外,在湖泊生态系统中,水体中的 CDOM 也是氮、磷等有机营养物质的重要供应源。因此,实时动态地监测水体中 CDOM 浓度变化状况是认识水体中碳循环的基础,也是深入了解营养物质在湖泊生态系统中循环的重要途径^[5]。

传统的 CDOM 浓度调查方法主要利用船舶走航的形式采集水质样本,然后在实验室里分析处理水质样本,进而获得 CDOM 浓度。这种测量方法具有精度高,但是费时、取样范围有限等特点,且不利于宏观上认识研究区域内 CDOM

浓度在空间上的变化状况。遥感技术具有经济快捷、大尺度观测等优点。尤其对于实验条件恶劣的湖区,遥感的非接触性测量优势更为显著。在过去的几十年中,许多学者对 CDOM 光学特性及反演方法进行了一系列的研究。Nelson 等利用 Sargasso 实验数据,研究与探讨了该水域 CDOM 的吸收特性随季节的变化状况。研究结果表明, Sargasso 水体中的 CDOM 吸收系数光谱斜率具有较明显的季节差异^[6]; Johannessen 等利用 Bering 地区的实验数据,研究与探讨了 CDOM 的吸收系数与紫外波段的衰减系数之间的关系,表明 CDOM 吸收系数的光谱斜率随着紫外波段衰减系数的减少而减少^[7];马荣华等利用东太湖的实验数据,研究与探讨了 CDOM 吸收系数的光谱斜率与波长的关系。研究结果表明,光谱斜率与波长具有较好的分段线性关系^[8]。本研究在总结前人研究成果的基础上,结合 2003 年 10 月 27 日—28 日的太湖水质实验数据,探讨了从 Landsat/TM 影像中提取太湖 CDOM 浓度分布状况的方法,旨在挖掘大尺度观测太湖 CDOM 浓度的有效途径。

1 研究区域与研究数据

太湖位于长江三角洲,介于 $30^{\circ}55'40'' \sim 31^{\circ}32'58''\text{N}$,

收稿日期: 2010-05-10, 修订日期: 2010-08-20

基金项目: 中国海陆地质地球物理系列图项目(GZH200900504), 国家自然科学基金项目(40901168, 40606013)和国家“十一五”科技支撑项目(2008BAC34B03)资助

作者简介: 陈 军, 1982 年生, 青岛海洋地质研究所实习研究员 e-mail: chenjun820711@163.com

* 通讯联系人 e-mail: linyu0546@163.com

119°52′32″~120°36′10″E之间,是我国第三大淡水湖,面积2 338 km²,平均水深不到2 m。根据NASA水体光学测量规范^[9],在2003年10月27日—28日,利用ASD手持地物光谱仪FieldSpec Pro对太湖水质样本进行光谱测量。样本分布状况见图1,样本的光谱曲线见图2。在光谱测量的同时,利用尼克森采水器取表层大约从水面到水下30 cm处的水体样本,当天带回实验室并提取CDOM等水质成份浓度。本研究在进行地表实验的同时,订购了2003年10月28日Landsat/TM遥感影像数据,且每天地表实验时间安排在Landsat/TM卫星过境前后1 h以内。

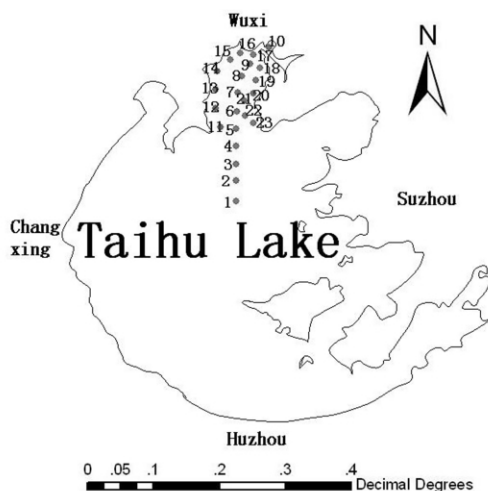


Fig 1 Distribution of in situ measurements in Taihu Lake

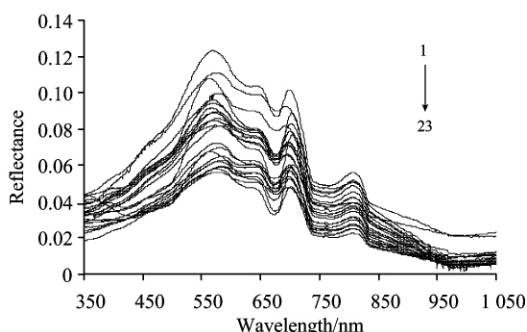


Fig 2 In situ measurements of spectral curves

2 研究方法

2.1 大气校正

对于水色遥感而言,传感器所接收到的辐亮度信息主要包括大气程辐射和载有水体水质浓度信息的离水辐亮度。大气校正的目的是从总信号中剥离出离水辐亮度信号。大气校正的难点在于如何从总信号中提取弱信号。在蓝光波段,传感器所探测到的信号,80%以上是来自大气散射的贡献,而离水辐亮度信号仅占总信号的10%左右,绿光波段的比重将更小^[10]。因此,选择合适的大气校正算法是水质参数遥感反演成败的关键。

目前,水色遥感以Gordon标准大气校正算法为主流业务化算法。该算法的核心思想是:将大气程辐射的贡献细分

为Rayleigh散射和气溶胶散射。Rayleigh散射可通过解考虑多次散射的辐射传输方程获得;气溶胶散射则利用清澈水体在近红外波段反射率近似为0的特性,结合查找表算法计算而得^[11]。该算法在Ⅰ类水体中获得了很大的成功,但是在Ⅱ类水体中,悬浮物在近红外波段的强散射性导致该算法不再适用。此外,在Ⅱ类水区上空,气溶胶光学厚度分布极不均匀,进一步加大了Gordon算法的不确定性。鉴于此,本研究采用了Chen等提出来的基于气溶胶光学厚度非均匀性分布的大气校正算法^[12]。该算法以地表同步实测数据为基础,利用标准Gordon算法计算得到每个实测点的气溶胶光学厚度,并将所有实验站点处的气溶胶光学厚度进行反距离空间插值,进而获得整个研究区域上空的气溶胶光学厚度分布状况。该算法的数学表达式如下^[12]

$$R_w(\lambda) = \frac{\pi[L_t(\lambda) - L_{rs}(\lambda) - L_{as}(\lambda)]}{\exp(-\tau(\lambda)\sec\theta_s)[F_0\cos\theta_z\exp(-\tau(\lambda)\sec\theta_z) + E_d(\lambda)]} \quad (1)$$

$$\tau(\lambda) = \tau_r(\lambda) + \tau_{O_3}(\lambda) + \tau_a(\lambda) \quad (2)$$

$$E_d(\lambda) = \frac{[1 - \exp(-\tau(\lambda)\sec\theta_z)]F_0}{2} \quad (3)$$

$$\tau_r = 0.008524\lambda^{-4}(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \quad (4)$$

$$\tau_{O_3} = 0.03 \cdot \exp[-227(\lambda - 0.6)^2] \quad (5)$$

式中, λ 为波长; $R_w(\lambda)$ 为离水反射率; $\tau(\lambda)$ 为大气总光学厚度; $L_t(\lambda)$ 为传感器接收到的总辐亮度; $L_{rs}(\lambda)$ 为Rayleigh散射贡献的辐亮度; $L_{as}(\lambda)$ 为气溶胶散射贡献的辐亮度; F_0 为大气层外太阳辐照度; θ_z 为太阳高度角; θ_s 为卫星高度角; $E_d(\lambda)$ 为到达水面的漫射辐照度; $\tau_r(\lambda)$ 为Rayleigh散射光学厚度; $\tau_{O_3}(\lambda)$ 为臭氧吸收光学厚度; $\tau_a(\lambda)$ 为气溶胶光学厚度。

2.2 CDOM浓度定量模型

水质参数反演就是利用离水辐亮度或遥感反射率等表观光学量,通过生物光学模型推演水体的固有光学量属性以及物质组分含量的过程。其中,CDOM浓度反演是水色遥感的重要内容之一。CDOM的光学特性主要表现为强吸收特性。有关CDOM的吸收特征已有学者做了大量的研究,这些研究成果可归结为下式^[13, 14]

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda_0)\exp[-s(\lambda - \lambda_0)] \quad (6)$$

式中, $a_{CDOM}(\lambda)$ 为CDOM在波长 λ 处的单位吸收系数; s 为CDOM吸收光谱的曲线斜率。在一般情况下, $\lambda_0 = 440$ nm。由式(6)可知,当波长大于440 nm时,CDOM的单位吸收系数随着波长的增加而减少。

Landsat/TM影像具有较高的分辨率,被广泛应用于水色遥感领域。根据Dekker等的研究可知^[15]:TM1的辐亮度信息主要受CDOM和叶绿素a浓度的影响;TM2主要被用于浮游植物和水华的探测;TM3的离水辐亮度信息是悬浮泥沙浓度,叶绿素a和CDOM等水质光学特性共同作用的结果,鉴于这种复杂的多成份光学特性的耦合效应,TM3波段的辐亮度信息结构较难被定量地解释清楚;TM4的辐亮度与悬浮泥沙浓度具有较强的相关性。结合式(6)和图2所示的光谱曲线可知,CDOM的单位吸收系数在TM1波段最强,在光谱曲线上表现为一个吸收谷。这也意味着,与其

他波段相比较, TM1 波段的离水辐亮度包含了更丰富的 CDOM 信息。鉴于此, 本研究采用了 TM1 波段的反射率作为遥感参数, 建立 CDOM 遥感反演模型。

ASD 手持地物光谱仪的光谱响应函数与 Landsat/TM 传感器的光谱响应函数不同, 因此, 在进行回归分析之前, 必须利用 Landsat/TM 传感器的光谱响应函数将 ASD 测量的光谱曲线数据转换为与 Landsat/TM 传感器匹配的光谱反射率^[16]。考虑到 CDOM 反演算法应该具有较好的反演效果(不仅模型计算值与实测值在整体变化趋势上相一致, 而且每个节点处的实测值与计算值相一致, 此外, 模型还具有良好的可扩展性), 本研究采用了陈军等提出的分段映射算法构建 CDOM 反演模型(参考陈军的硕士论文—地质大学, 2009)。将实测数据划分为两组: 模型校正数据集(21 个点)和模型检验数据集(2 个点, 即图 1 中的 14 和 17 号点)。由点 19 对太湖实测反射率和 CDOM 浓度数据构建的 CDOM 浓度分段映射反演模型如图 3 所示。

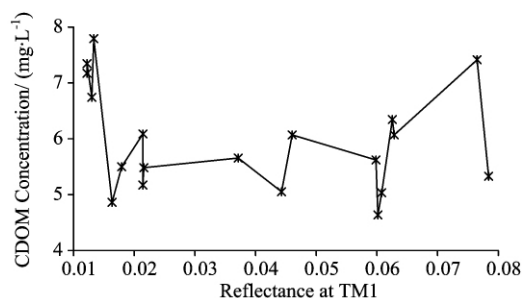


Fig 3 Subsection mapping algorithm for CDOM concentration retrieval

3 实例分析与计算

3.1 大气校正结果

大气校正是水色遥感进行反演定量研究的前提条件, 大气校正的成败直接关系到水质参数遥感定量结果的可靠性。2003 年 10 月 28 日, 太湖水体光谱测量实验在 Landsat/TM 卫星过境前后大约 1 h 内进行, 因此可以认为 28 日的水质光谱实验与 Landsat/TM 卫星是准同步的。由此可知, 本研究的实验数据是符合 Chen 等提出的大气校正算法的前提条件的^[12]。本研究采用式(1)~式(5)所描述的大气校正算法对 TM1 波段影像进行大气校正。图 4 描述了大气校正前后的 TM1 波段影像状况。由图 4 可知, 在大气校正之前, TM1 波段的反射率主要分布在 0.09~0.12 之间, 在大气校正之后, TM1 波段的反射率主要分布在 0.06~0.075 之间, 遥感影像质量得到很大的改善, 并且信息量比大气校正之前有明显的增加。

3.2 太湖 CDOM 浓度分布状况

本研究在 IDL 开发平台下, 逐一提取影像像元的反射率, 并确定该值归属的分段区间。若像元的反射率落在实测反射率的最大值与最小值范围之内, 则选择该像元反射率所归属的分段子区间的两个节点作为 Newton 插值算法的两个控制点, 进行内插得到 CDOM 浓度; 若像元反射率落在实测反射率的最大值与最小值范围之外, 则选择离该像元反射率

最近的区段, 利用 Newton 插值算法构建该区段的反演模型, 然后进行外推得到反演值。由上述算法计算得到的太湖 2003 年 10 月 28 日的 CDOM 浓度分布状况如图 5 所示。由图 5(a)可知, 太湖水体中的 CDOM 浓度分布呈湖心和湖南高, 湖东和湖西低的格局, 最高浓度为 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $6.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

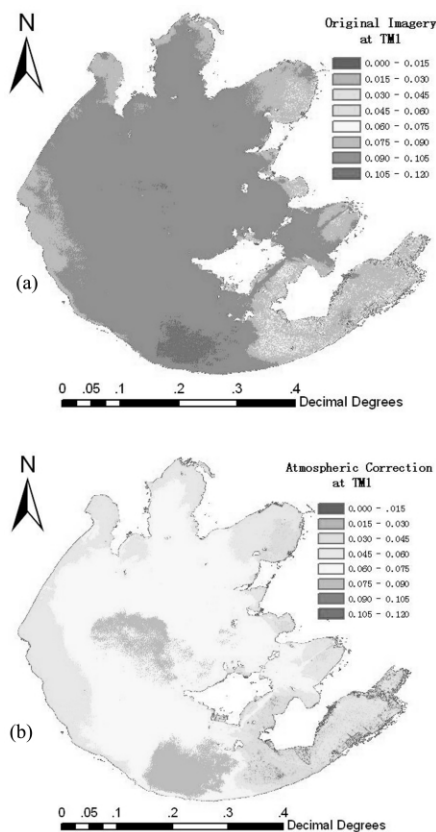


Fig 4 Comparison between before and after the atmospheric correction

(a) and (b) representing the reflectance of Landsat/TM imagery at TM1 before and after atmospheric correction, respectively

CDOM 的一个重要成分为浮游植物的降解产物, 因此, CDOM 与叶绿素 a 等物质浓度的分布密切相关。由以往的研究可知, 在 2003 年 10 月 28 日, 太湖叶绿素 a 浓度分布格局与 CDOM 浓度的分布格局基本一致, 这也从另一个角度说明了反演结果的可靠性。另外, 在构建分段映射反演算法的同时, 本研究从实验数据中分别挑选出低浓度和中浓度的两个实测数据作为反演结果的精度验证数据集。图 5(b)表示验证数据与反演结果的关系。由图 5(b)可知, 在该两个站点处, 实测数据与反演结果之间的平均偏差为 $0.922 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 其对应的相对误差为 14.85%。由此可知, 利用分段映射算法, 能较好地从小 Landsat/TM 影像中提取 CDOM 浓度信息。

4 结论

CDOM 是影响水质状况的重要参数之一, 也是良好的固

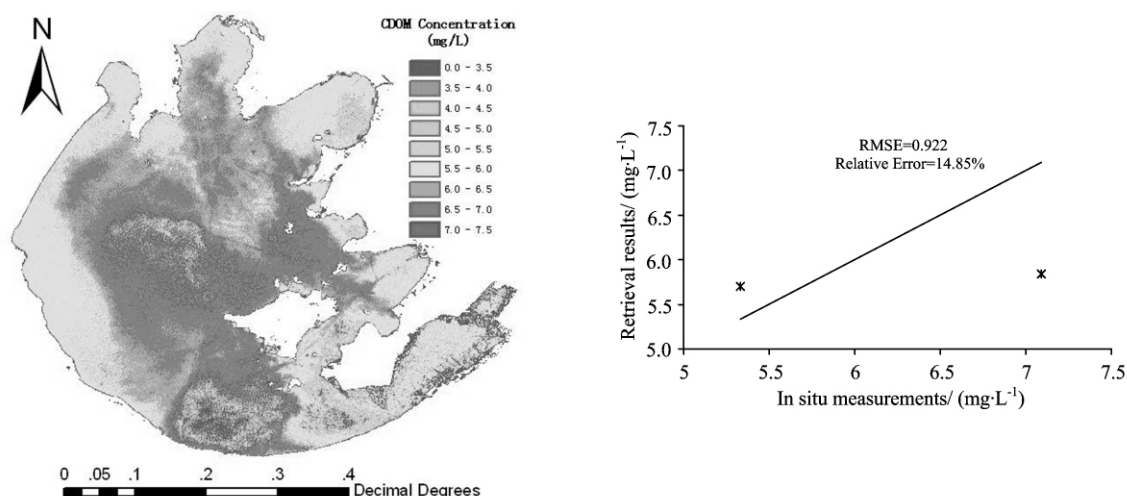


Fig 5 CDOM concentration retrieved from Landsat/TM imagery

(a) presenting the results of subsection mapping algorithm; (b) presenting the bias between fieldworks and modeled prediction

碳材料。水体中 CDOM 含量增加有助于减少地表及大气层中的碳含量。水体中 CDOM 浓度的变化直接关系到大气中温室气体的含量,进而影响全球气候变化。而水体中 CDOM 浓度动态变化状况是了解上述物理过程的关键。因此,对 CDOM 浓度动态变化监测方法的研究具有重要的理论和应用意义。通过本文的研究可以得出如下几点结论。

(1)在同步实验数据存在的情况下,由 Chen 等提出的大气校正算法比较适合用于 II 类水体大气校正。通过对比大气校正前后影像反射率可知, TM1 波段影像的质量得到明显

的改善,信息量也得到有效的增强。

(2)分段映射反演算法能较好地 from TM1 波段影像中提取太湖水体中的 CDOM 浓度分布状况。与实测数据相比较,分段映射反演算法所获取的 CDOM 浓度与模型预测结果偏差 $0.922 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对应的相对误差为 14.85%。

(3)在 2003 年 10 月 28 日,太湖水体中的 CDOM 浓度分布呈湖心和湖南高,湖东和湖西低的格局。与以往的研究对比分析可知,太湖 CDOM 浓度的分布格局与叶绿素 a 浓度分布格局基本一致。

References

- [1] Hedges F E, Farrington J. Marine Chemistry, 1993, 41: 289.
- [2] Hoge F E, Lyon P E. Geophysical Research Letters, 2002, 29(19): 1.
- [3] Kirkpatrick G J, Orrico C, Moline M A, et al. Applied Optics, 2003, 42(33): 6564.
- [4] Zhang Y L, Van-Dijk M A, Liu L M, et al. Water Research, 2009, 43: 4685.
- [5] Hanson C H, Waite A M, Thompson P A, et al. Deep-Sea Research II, 2007, 54: 902.
- [6] Nelson N B, Siegel D A, Michaels A F. Deep-Sea Research I, 1998, 45: 931.
- [7] Johannessen S C, Miller W L, Cullen J J. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C9): 3301. 10.1029/2000JC000514.
- [8] MA Rong-hua, DAI Jing-fang, ZHANG Yun-lin(马荣华, 戴锦芳, 张运林). Chinese Journal of Lake Sciences(湖泊科学), 2005, 17(2): 120.
- [9] Mueller J L, Austin R W. Ocean Optics Protocols for SeaWiFS Validation; NASA Technical Memorandum 104566. Greenbelt, MD, NASA Goddard Space Flight Center. 1992.
- [10] Chomko R M, Gordon H R. Applied Optics, 1998, 37(24): 5560.
- [11] Gordon H R, Wang W. Applied Optical, 1994, 33(3): 443.
- [12] Chen J, Sun J H, Zhang M W, et al. Chinese Journal of Oceanology and Limnology. Under Review(CJOL), 2010, 3: 56.
- [13] Bukata R P, Jerome J H, Kondratyev K Y, et al. Optical Properties and remote Sensing of Inland and Coastal Waters. Boca Raton, FL, CRC Press, 2000.
- [14] Kirk J T O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. New York: Cambridge University Press, 1994.
- [15] Dekker A G, Peters S W M. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14: 799.
- [16] Vries C D, Danaher T, Denham R, et al. Remote Sensing of Environment, 2007, 107: 414.

Study on Colored Dissolved Organic Matter Concentration Retrieved from Landsat/TM Imagery at Taihu Lake

CHEN Jun^{1, 2}, WANG Bao-jun^{1, 2}, SUN Ji-hong^{1, 2*}, FU Jun^{1, 2}

1. The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China
2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract At the lake ecosystem, the CDOM (colored dissolved organic matter) not only is an important source of nutrients, but also is major component of carbon cycle. Based on the fieldworks of water qualities experiments at Taihu lake, China, on 27 and 28 October, 2003, the present paper used the Landsat/TM imageries to study and estimate the distribution pattern of CDOM concentration at Taihu lake. According to the study results, it was found that CDOM was a strong absorber at TM1 band, where there was a wave trough at that corresponding wavelength. Taking the reflectance at TM1 as a remote sensing parameter, the remote sensing technology could perfectly retrieval the CDOM concentration from the Landsat/TM imagery at TM1 band. Compared with the validation dataset at two stations, the mean bias between modeled prediction and in situ measurements was $0.922 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the corresponding relative bias was 14.85%. Additionally, the retrieval results show that the spatial distribution of CDOM concentration was higher in the south and center of the lake, but lower in the east and west lake.

Keywords CDOM; Remote sensing retrieval; Landsat/TM; Taihu lake

* Corresponding author

(Received May 10, 2010; accepted Aug. 20, 2010)

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

《分析测试学报》

国内刊号: CN 44-1318/TH

国际刊名化代码 CODEN: FCEXES

国外代号: BM 6013

国际标准刊号: ISSN 1004-4957

邮发代号: 46-104

广告经营许可证: 440000100186

《分析测试学报》是由中国分析测试协会、中国广州分析测试中心共同主办的全国性学术刊物, 中文核心期刊。刊登质谱学、光谱学、色谱学、波谱学、电化学、电子显微学等方面的分析测试新理论、新方法、新技术的研究成果, 介绍新仪器装置及在生物、医药、化学化工、商检、食品检验等方面实用性强的实验技术。适合科研院所、高等院校、检测机构、医药、卫生以及厂矿企业分析测试工作和管理人员阅读。

经过多年的发展, 本刊已成为国内知名的化学类核心期刊。2006 年, 影响因子在全国分析学科刊物排名中列第 1 名, 被引频次每年递增约 30%, 稿源丰富, 基金论文比超过 70%。近几年, 本刊刊发的论文被 CA(美国化学文摘)收录率达 94%, 2006 年引文频次在 CA 千种表中国部分中列第 38 名, 并被国际上其他知名的数据库如日本科技文献速报、俄罗斯文摘、英国分析文摘(AA)、《质谱公报》等收录。在《中文核心期刊要目总览》2008 年版的化学类期刊列第 10 位; 进入由全国 8000 种期刊遴选出的 500 种科技期刊组成的“中国科技期刊精品数据库”; 中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)统计来源; 中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊); 《中国科学引文数据库》来源期刊; 中国期刊全文数据库(CJFD)收录期刊; 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录; 《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊; 《中国期刊网》全文收录期刊; 《中国学术期刊文摘(中、英文版)》收录为源期刊等。

本刊为月刊, 国内外公开发行。大 16 开, 单价: 12.00 元/册, 全年 144 元。请在全国各地邮局订阅。未在邮局订到者可直接向本编辑部补订。补订办法: 请从邮局汇款至广州市先烈中路 100 号《分析测试学报》编辑部, 邮编: 510070, 写明订户单位、详细地址、收刊人姓名、邮编及补订份数(全年或某期), 电话: (020)87684776 或 37656606, <http://www.fxcsxb.com>(可在线投稿), e-mail: fxcsxb@china.com。