

禹定峰, 邢前国, 陈楚群, 史合印, 施平. 利用导数光谱估算珠江河口水体悬浮泥沙浓度[J]. 生态科学, 2010, 29(6): 563-567.
YU Ding-feng, XING Qian-guo, CHEN Chu-qun, SHI He-yin, SHI Ping. Using derivative spectrum to estimate suspended ediment concentration of estuarine waters[J]. *Ecological Science*, 2010, 29(6): 563-567.

利用导数光谱估算珠江河口水体悬浮泥沙浓度

禹定峰^{1,2}, 邢前国^{1,3*}, 陈楚群³, 史合印⁴, 施平^{1,3}

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东, 烟台 264003
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049
3. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广州 510301
4. 广州海洋渔业环境资源监测中心, 广州 510301

【摘要】 悬浮泥沙不仅影响水体的生态状况, 而且对河口地貌及岸线的演变起到重要作用。高光谱技术可用于船载、机载及星载的光学传感器上, 被认为是监测光学复杂水体的有效工具。为研究高光谱技术在河口悬浮泥沙监测应用中的可行性, 于 2004 年 5 月及 2006 年 8 月, 在珠江口进行了两个航次的现场水质采样及同步光谱测量。测量的原始遥感反射率光谱的分辨率为 0.38 nm, 处理成为 10 nm 的带宽, 并进一步处理成导数光谱。以悬浮颗粒物(SPM)表征悬浮泥沙, 分析了 SPM 和各光谱间的相关性。结果显示, 一阶导数光谱, 特别是 605 nm, 可用于河口水体的 SPM 估算。该研究结果可应用到光学复杂河口水体的悬浮泥沙现场监测, 并且对 Hyperion 及环境 1 号等卫星成像高光谱数据有潜在的应用价值。

关键词: 高光谱; 导数光谱; 悬浮泥沙; 珠江河口

doi:10.3969/j.issn.1008-8873.2010.06.012 中图分类号: TP79; X832 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2010)06-563-05

Using derivative spectrum to estimate suspended sediment concentration of estuarine waters

YU Ding-feng^{1,2}, XING Qian-guo^{1,3*}, CHEN Chu-qun³, SHI He-yin⁴, SHI Ping^{1,3}

1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
3. *Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*
4. *Guangzhou Monitoring Center of Marine and Fisher Environment, Guangzhou 510235, China*

Abstract: Suspended sediments not only influence water quality, but also play an important role in coastline evolution. With the aid of sensors on board buoy, plane and satellite, hyperspectral technique is considered as one promising tool to solve the problems in monitoring optically-complex waters. In order to apply hyperspectral techniques in the in-situ suspended sediment monitoring in estuarine waters, we carried out two cruises in the Pearl River Estuary in May 2004 and August 2006. Water samples were collected at each sampling station simultaneously. The original reflectance spectra with 0.38 nm spectral resolution were re-sampled to 10 nm, and then the first-order and second-order derivative spectra were processed. Correlation analysis was performed between the measured suspended particle matter (SPM) concentrations and each band. The results indicated that first-order derivative spectra, especially at the wavelength of 605 nm, could be used to estimate concentration of SPM at estuarine waters. This suggests a new way for the in-situ suspended sediment measurement and potential application to Hyperion and HJ-1 satellite images in the optically-complex estuarine waters.

Key words: hyperspectrum; derivative spectrum; suspended sediments; Pearl River Estuary

收稿日期: 2010-02-06 收稿, 2010-00-00 接受

基金项目: 广东省自然科学基金重点项目(06105018) 和中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-Q07-01)

作者简介: 禹定峰, 男(1986—), 硕士研究生, 主要从事水色遥感方面的研究。E-mail: dfyu@yic.ac.cn

*通讯作者: 邢前国, E-mail: qgxing@yic.ac.cn

1 引言 (Instruction)

悬浮泥沙影响着水体的浊度及透明度,进而影响水体的生态状况,并且由于悬浮泥沙的沉积、再悬浮等作用,其对河口地貌及海岸线的演变起到重要作用。因此,悬浮泥沙不仅是水质评价的重要参数,也是海岸带环境演变研究的重要因子。近岸水体的光学特征相当复杂,如何应用遥感手段对悬浮泥沙进行有效观测,国内外学者开展了许多相关研究,但目前尚没有统一的模式,这与悬浮泥沙多变的光学特性有关:悬浮泥沙的粒径及组成成分均会影响其光学属性,来源不同,悬浮泥沙的这些特性相差甚大。

高光谱可反映地物光谱的细微变化特征,在水体遥感的研究中有着重要的应用价值。但是,由于高光谱数据往往含有几十到几百个波段,因此传统的利用波段组合进行反演建模的方法不能满足高光谱数据的要求。然而,导数光谱的数学形式简单,意义明确。一阶导数光谱显示了光谱的遥感反射率随波长的变化,是在某一个波长遥感反射比曲线的斜率;二阶导数光谱显示了遥感反射率变化曲线斜率的变化,通常称之为曲率^[1]。连续的高光谱也为光谱的导数分析提供了可能。许多学者^[2,3-10]在遥感研究中采用导数光谱技术建立遥感反演模型。目前,关于导数光谱在水体遥感中应用的主要观点有:(1)导数光谱是识别叶绿素吸收峰特征的重要工具^[7];(2)当其他组分也存在的时候,690 nm 附近的一阶导数光谱可以用于估算叶绿素浓度^[5]。

本文运用导数光谱技术估算河口混浊水体悬浮泥沙浓度,对应用 Hyperion/EO-1 的可行性进行研究。

2 研究方法 (Research methods)

2.1 研究区域

本研究的主要对象是珠江河口近上游的高浑浊水体。珠江河口位于中国高速发展的珠江三角洲地带,受河口地区人类活动的影响,如工业、农业、水产业、水上交通等,水体的污染超出了它自身净化的能力,水环境恶化。为了对水质的变化趋势进行监测,广州市海洋资源与环境监测中心每年在 17 个固定站位进行季节性的水体采样监测。

2.2 水质采样

本研究的水质采样与光谱数据测量同步进行。

2004年5月15日和2006年8月21日,中国海监调查船在 17 个站位进行了水质采样。所有站位的水深变化范围为 1.2~9.4 m。水温、盐度采用 YSI 现场测量,各站位表层水样在水表面以下约 0.5 m 处采取,水样经初步处理后,带回实验室当天测量混浊度、总悬浮颗粒物以及其他水质参数。图 1、2 分别为两个航次实际测量的水体浊度(Turbidity)以及悬浮颗粒物浓度(SPM,用来表征悬浮泥沙浓度),其中,浊度的变化范围为 13.6~128.9 NTU, SPM 浓度变化范围为 16~140 mg·L⁻¹。浊度与 SPM 之间良好的线性相关性($r=0.81$),说明悬浮泥沙是造成该区域水体高度浑浊的主要原因。

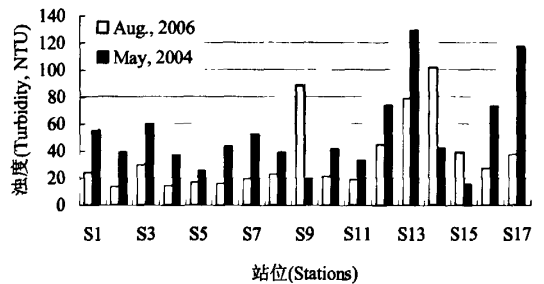


图 1 两个航次 17 个站位的实测浊度

Fig. 1 Turbidity at 17 sampling stations for two cruises

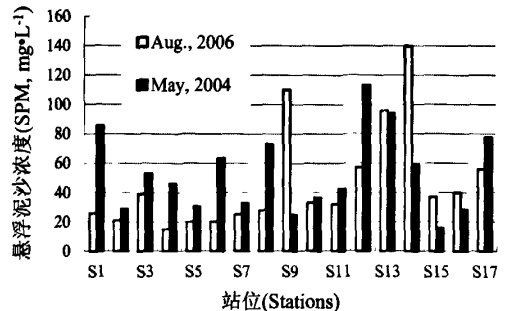


图 2 两个航次 17 个站位的实测悬浮泥沙浓度

Fig. 2 SPM at 17 sampling stations for two cruises

2.3 遥感反射率测量和导数光谱处理

在水质采样的同时,利用便携式光谱仪(SD2000)测量每个站位的水体的上行辐亮度(Lw)、天空光的辐亮度(Ls)以及参考板的上行辐亮度(Lp)。光谱仪具有两个通道,主通道记录了从 188.98 nm 到 869.39 nm 连续的 2 048 个波段,光谱分辨率约为 0.38 nm。校

准后的参考板反射系数随着波长变化较小, 为 23.4~25.5%。测量时, 光纤探头距水体表面约 0.5 m, 轮流测量 L_w 、 L_s 和 L_p , 具体观测几何参数可参考文献^[11,12]。每个站位测量光谱 3~5 组, 取平均值。遥感反射率的计算按以下公式:

$$Rrs = \frac{L_u - L_s \times \rho_f}{L_p \times \pi / \rho_p} \quad (1)$$

其中, ρ_f 是天空光在水体表面的菲涅耳反射率, 通常取经验值 0.022^[13]。

上面计算出的反射率光谱的分辨率为 0.38 nm, 将高分辨率的光谱处理成低分率的光谱, 在利用导数光谱分析时, 可以减轻天空光在水表面发生的菲涅耳(Fresnel)反射效应的影响^[13]。因此, 在本研究中, 光谱重采样成 10 nm 的分辨率; 该分辨率与地球观测卫星 EO-1 的载荷 Hyperion 较接近, 因此可以考虑未来应用于 Hyperion 数据。按公式 2、3 再将重采样后的光谱进行导数光谱处理^[8]:

$$Rrs^{1st} = \frac{Rrs_{n+1} - Rrs_n}{\lambda_{n+1} - \lambda_n} \quad (2)$$

$$Rrs^{2nd} = \frac{Rrs_{n+1}^{1st} - Rrs_n^{1st}}{0.5(\lambda_{n+2} - \lambda_n)} \quad (3)$$

其中, n 为波段数, λ 为波长, 单位为 nm, Rrs^{1st} 和 Rrs^{2nd} 分别为一阶导数光谱和二阶导数光谱, 对应的中心波长分别为 $\lambda_n + (\lambda_{n+1} - \lambda_n)/2$ 、 $\lambda_{n+1}/2 + (\lambda_{n+2} + \lambda_n)/4$ 。原始、一阶、二阶导数光谱示例分别如图 3 的(a)、(b)、(c)所示:

3 结果和讨论(Results and discussion)

实测的各站位的最高的反射峰值在 580 nm 附近, 峰值的反射率介于 0.034 到 0.057 之间, 这与一般基于离水辐射的水体遥感反射率较为接近, 这说明, 在测量过程中已经较好地避免了太阳耀斑的影响。由于目标水体的浑浊度都很高, 因此, 所有站位的底部效应对实测光谱的形状可视为无影响。

对各站位 370 nm 到 820 nm 间的 45 个波段的遥万方数据

感反射率与实测 SPM 浓度进行相关性分析, 结果显示

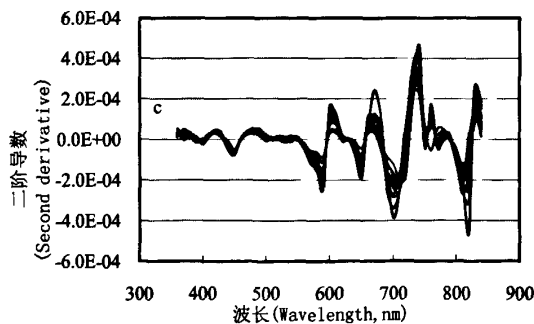
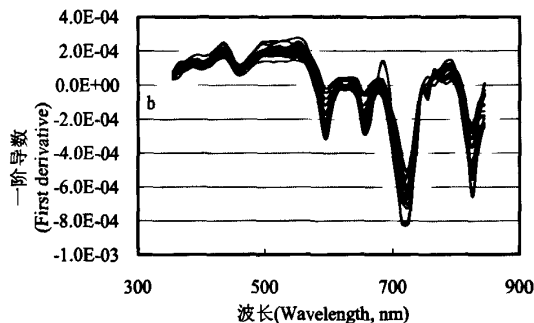
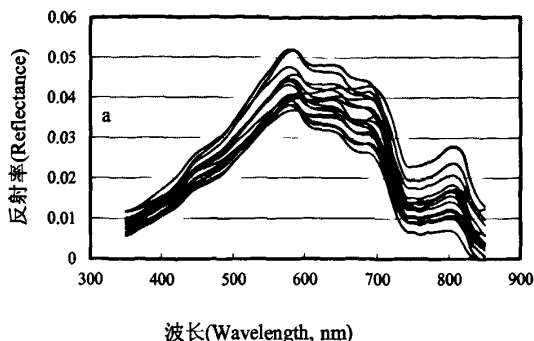


图 3 原始光谱、一阶导数光谱及二阶导数光谱
Fig. 3 Samples of Rrs, 1st-order and 2nd-order derivative spectra

(图 4), Rrs 与 SPM 浓度之间的相关关系向长波方向逐渐增加, 这与他人的研究成果较为一致, 但最大相关系数低于 0.65 ($|r| < 0.65$)。该结果显示, 混浊水体的悬浮泥沙光谱特性在反射率光谱上得到反映, 但特征还是比较有限。对一阶、二阶导数光谱同 SPM

浓度进行了相同的相关性分析,并与反射率光谱进行对比,可以发现,一阶导数光谱与SPM之间在有些波段具有更好的相关性,其最大相关系数($|r| > 0.8$)主要在685 nm、605 nm及645 nm处;与一阶导数光谱相比,各二阶导数光谱与SPM的相关系数均低于0.75($|r| < 0.75$)。采用一阶导数光谱技术,不仅可以消除天空光在水体表面镜面反射的影响^[8];二阶导数光谱可以消除悬浮物质的影响^[10]。因此,一阶导数光谱有利于除去近线性的背景噪声,从而有利于悬浮泥沙浓度信息的提取,而二阶导数可能会将悬浮泥沙的光谱信息作为噪声剔除反而使其相关性降低。故,运用特定波长处的一阶导数光谱值进行悬浮泥沙浓度反演可能会是一较好的选择。

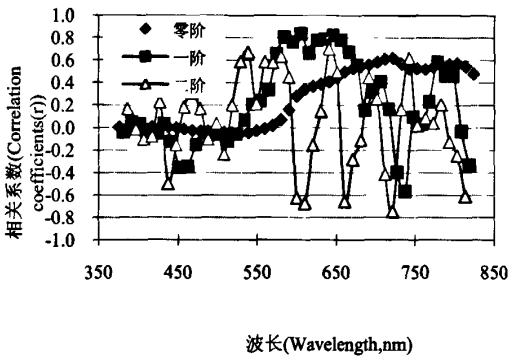


图4 原始光谱、一阶导数光谱、二阶导数光谱与SPM之间的相关系数

Fig. 4 Correlation between SPM and the bands of Rrs, 1st-derivative and 2nd-derivative spectra

如图5所示,采用回归分析法建立如式4所示的指数模型。运用该反演模型,根据一阶导数光谱值进行悬浮泥沙浓度估算,其结果如图6所示,其实测值与估算值间的根方根差(公式5)为 $13.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、相对误差(公式6)的平均值为18.7%、标准偏差为18.5%。在SPM浓度为 $16\sim 140 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下,该估算精度是令人满意的。我们还采用独立样本对模型^[12]进行验证试验:用2006年12月的不同海区的航次数据对公式4进行验证;用2004年5月航次的数据进行建模,用2006年8月航次的数据进行验证,均获得了满意的精度。

$$[\text{SPM}] = 106.56 \times e^{10137 \times \text{Rrs}_{605}^{1st}} \quad (4)$$

万方数据

其中, Rrs_{605}^{1st} 为605 nm处的一阶导数光谱值。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{SPM}_{estimated} - \text{SPM}_{measured})^2}{N}} \quad (5)$$

$$\text{RE} = \frac{|\text{SPM}_{estimated} - \text{SPM}_{measured}|}{\text{SPM}_{measured}} \times 100\% \quad (6)$$

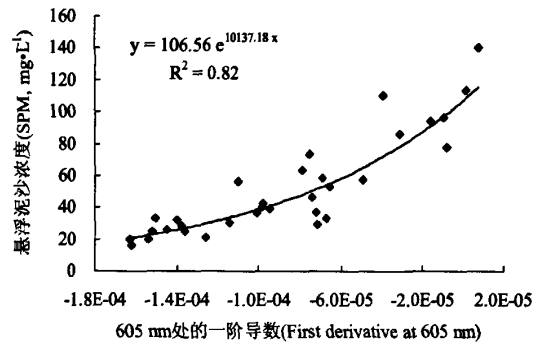


图5 605 nm处的一阶导数光谱与SPM浓度之间的关系
Fig. 5 Correlation between SPM and 1st-order derivative value at 605 nm

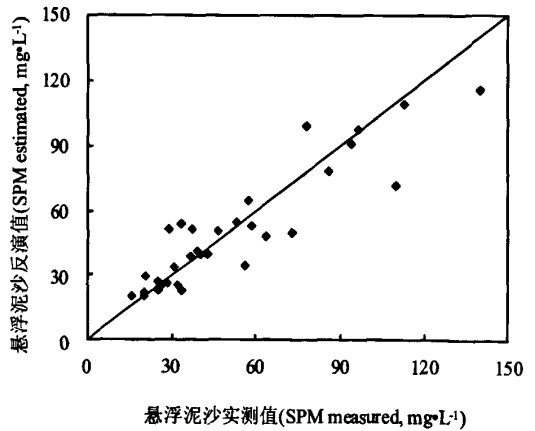


图6 反演得到的SPM浓度和实测值的对比
Fig. 6 SPM concentrations retrieved vs. the measured

4 结论与展望 (Conclusions and prospect)

2004年5月15日和2006年8月21日,在珠江口海域进行了两个航次的现场遥感反射率光谱

测定及悬浮泥沙等水质采样。对遥感反射率光谱进行重采样,使之成为连续的 10 nm 带宽的光谱,并将其处理成一阶、二阶导数。光谱与 SPM 浓度之间的相关分析及建模分析研究结果表明,一阶导数光谱,尤其是 605 nm 的一阶导数光谱用来估算河口混浊水体的悬浮泥沙浓度,可获得较高的精度。导数光谱技术可能为悬浮泥沙的遥感估算提供一种新方法。

本研究所采用的导数光谱的波段宽度为 10 nm,该带宽与 Hyperion/EO-1 的波段设置十分接近;605 nm 左右的波段也处于大气窗口内,因此,该研究成果可望进一步运用于 Hyperion 数据。我国新发射的高光谱卫星环境 1 号,其光谱分辨率较高,为 5 nm,因此也可以通过加和处理成 10 nm 的光谱,并运用本研究结果进行测试。就水体遥感而言,大气程辐射等相关大气效应不可忽略,对于要应用到卫星遥感上,大气效应对导数光谱的影响有待进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Xing Q G, Chen C Q, Shi H Y, Shi P, Zhang Y Z. Estimation of Chlorophyll-a Concentrations in the Pearl River Estuary Using in Situ Hyperspectral Data: A Case Study[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(4):22-26.
- [2] Philpot W D. The derivative ratio algorithm: avoiding atmospheric effects in remote sensing[J]. *IEEE transactions on geoscience & remote sensing*, 1991, 29(3):350-357.
- [3] Chen Z M, Curran P J, Hanson J D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 40(1):67-77.
- [4] Gong P, Pu R, Yu B. Conifer species recognition: An exploratory analysis of in situ hyperspectral data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(2):189-200.
- [5] Han L H, Rundquist D C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: A case study in a turbid reservoir[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3):253-261.
- [6] Holden H and Ledrew E. Spectral Discrimination of Healthy and Non-Healthy Corals Based on Cluster Analysis, Principal Components Analysis, and Derivative Spectroscopy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(2):217-224.
- [7] Tsai F, Philpot W. Derivative Analysis of Hyperspectral Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1):41-51.
- [8] Becker B L, Luschn P, Qi J. Identifying optimal spectral bands from in situ measurements of Great Lakes coastal wetlands using second-derivative analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2):238-248.
- [9] Han L H. Estimating chlorophyll-a concentration using first derivative spectra in coastal water[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(23):5235-5244.
- [10] Goodin D G, Han L H, Fraser R N, Rundquist D C, Stebbins W A. Analysis of Suspended Solids in Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1993, 59(4):505-510.
- [11] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 王晓梅, 宋庆君. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J]. *遥感学报*, 2004, 8(1):37-44.
- [12] 邢前国. 珠江口水质高光谱反演[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所. 2007. 18-101.
- [13] Hu C M, Chen Z Q, Clayton T D, Swarzenski P, Brock J C, Muller-Karger F E. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(3):423-441.

利用导数光谱估算珠江河口水体悬浮泥沙浓度

作者: 禹定峰, 邢前国, 陈楚群, 史合印, 施平, YU Ding-feng, XING Qian-guo, CHEN Chu-qun, SHI He-yin, SHI Ping

作者单位: 禹定峰, YU Ding-feng(中国科学院烟台海岸带研究所, 山东, 烟台, 264003; 中国科学院研究生院, 北京, 100049), 邢前国, 施平, XING Qian-guo, SHI Ping(中国科学院烟台海岸带研究所, 山东, 烟台, 264003; 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广州, 510301), 陈楚群, CHEN Chu-qun(中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广州, 510301), 史合印, SHI He-yin(广州海洋渔业环境资源监测中心, 广州, 510301)

刊名: 生态科学

英文刊名: ECOLOGICAL SCIENCE

年, 卷(期): 2010, 29(6)

参考文献(26条)

1. Han L H [Estimating chlorophyll-a concentration using first derivative spectra in coastal water](#)[外文期刊] 2005(23)
2. Xing Q G;Chen C Q;Shi H Y;Shi P;Zhang Y Z [Estimation of Chlorophyll-a Concentrations in the Pearl River Estuary Using in Situ Hyperspectral Data:A Case Study](#) 2008(4)
3. Becker B L;Luschd P;Qi J [Identifying optimal spectral bands from in situ measurements of Great Lakes coastal wetlands using second-derivative analysis](#)[外文期刊] 2005(02)
4. Philpot W D [The derivative ratio algorithm:avoiding atmospheric effects in remote sensing](#) 1991(3)
5. Tsai F;Philpot W [Derivative Analysis of Hyperspectral Data](#)[外文期刊] 1998(01)
6. Chen Z M;Curran P J;Hanson J D [Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration](#) 1992(1)
7. Holden H;Ledrew E [Spectral Discrimination of Healthy and Non-Healthy Corals Based on Cluster Analysis,Principal Components Analysis,and Derivative Spectroscopy](#)[外文期刊] 1998(02)
8. Gong P;Pu R;Yu B [Conifer species recognition:An exploratory analysis of in situ hyperspectral data](#) 1997(2)
9. Han L H;Rundquist D C [Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration:A case study in a turbid reservoir](#)[外文期刊] 1997(03)
10. Han L H;Rundquist D C [Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration:A case study in a turbid reservoir](#) 1997(3)
11. Gong P;Pu R;Yu B [Conifer species recognition:An exploratory analysis of in situ hyperspectral data](#)[外文期刊] 1997(02)
12. Holden H;Ledrew E [Spectral Discrimination of Healthy and Non-Healthy Corals Based on Cluster Analysis,Principal Components Analysis,and Derivative Spectroscopy](#) 1998(2)
13. Chen Z M;Curran P J;Hanson J D [Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration](#)[外文期刊] 1992(01)
14. Tsai F;Philpot W [Derivative Analysis of Hyperspectral Data](#) 1998(1)
15. Hu C M;Chen Z Q;Clayton T D;Swarczewski P Brock J C Muller-Karger F E [Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands:Initial results from Tampa Bay,FL](#)[外文期刊] 2004(03)

16. [Becker B L, Luschn P, Qi J Identifying optimal spectral bands from in situ measurements of Great Lakes coastal wetlands using second-derivative analysis](#) 2005(2)
17. [邢前国 珠江口水质高光谱反演](#) 2007
18. [Han L H Estimating chlorophyll-a concentration using first derivative spectra in coastal water](#) 2005(23)
19. [唐军武;田国良;汪小勇;王晓梅 宋庆君 水体光谱测量与分析 I :水面以上测量法](#)[期刊论文]-[遥感学报](#) 2004(01)
20. [Goodin D G, Han L H, Fraser R N, Rundquist D C Stebbins W A Analysis of Suspended Solids in Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra](#) 1993(4)
21. [Goodin D G;Han L H;Fraser R N;Rundquist D C Stebbins W A Analysis of Suspended Solids in Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra](#) 1993(04)
22. [唐军武, 田国良, 汪小勇, 王晓梅, 宋庆君 水体光谱测量与分析 I :水面以上测量法](#) 2004(1)
23. [Philpot W D The derivative ratio algorithm:avoiding atmospheric effects in remote sensing](#)[外文期刊] 1991(03)
24. [邢前国 珠江口水质高光谱反演](#) 2007
25. [Xing Q G;Chen C Q;Shi H Y;Shi P, Zhang Y Z Estimation of Chlorophyll-a Concentrations in the Pearl River Estuary Using in Situ Hyperspectral Data:A Case Study](#) 2008(04)
26. [Hu C M, Chen Z Q, Clayton T D, Swarzenski P Brock J C Muller-Karger F E Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands:Initial results from Tampa Bay, FL](#) 2004(3)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_stkx201006012.aspx