

黄、东海二类水体春季表观光谱特性 与表层悬浮体浓度反演模式*

樊 辉^{1,2} 黄海军³

(1. 云南大学亚洲国际河流中心 昆明 650091; 2. 山东省科学院地理信息技术研究中心 济南 250014;
3. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室 青岛 266071)

提要 利用 Savitzky-Golay 滤波信号处理方法, 分析了南黄海、北东海 2003 年春季水色遥感试验所取得的遥感反射率和表层悬浮体取样数据, 以期探讨该海区近岸二类水体表观光谱及其导数光谱特性, 及遥感反射率及其导数与水体表层总悬浮颗粒物浓度(TSS)和悬浮泥沙浓度(SS)的关系。结果表明, 遥感反射率及其一阶导数均适于水体总悬浮颗粒物浓度与悬浮泥沙浓度反演, 但其更高阶导数通常会抑制悬浮泥沙的作用则不建议采用; 遥感反射率及其一阶导数与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 的相关性较其与 TSS 和 SS 更为显著。基于相关分析所筛选出的较优波段, 建立了南黄海、北东海水域春季总悬浮颗粒物浓度与悬浮泥沙浓度统计反演模式。

关键词 Savitzky-Golay 滤波、遥感反射率、悬浮泥沙、光谱导数、最小二乘回归

中图分类号 P731

近岸二类水体悬浮体浓度信息对于河口海岸带水质和水污染管理与监测、泥沙分布与运移模拟以及泥沙淤、蚀动态平衡等方面研究都具有重要意义 (Curran *et al*, 1988)。除传统现场取样外, 航空或航天遥感光谱辐射观测为全面、快速、低成本、同步重复地获取这些信息开辟了另一蹊径。但其前提是, 必须建立卫星遥感信号与影响水体光谱特性的水色组分之间的定量关系。固有光学特性是定量描述水体光辐射传输的基础, 其只受水体及所含各物质组分浓度的影响。通过刚好水表面上(R_0^+)或水表面下(R_0^-)光谱特性测量能搭建水体固有光学特性和卫星遥感信号之间的联系 (Dekker *et al*, 2002), 再利用生物光学模型则可反演水体各组分浓度。近岸二类水体异于海洋一类水体或纯水, 其光谱响应特性存在很大的地区差异。因此, 水体光谱特性实地测量对水色遥感反演算法的发展极为重要。在二类水体中, 目前唯一有效的表观光谱特性测量方法是水表面以上测量法(简称表面法)(唐军武等, 2004)。表面法测量导出的遥感反

射率(R_{rs})是水色遥感中极为重要的表观光学量, 在研究二类水体水色三要素的浓度中起着至关重要的作用, 越来越多地被应用于水色遥感反演模型。

水色遥感定量反演模型可分为分析、半分析(或半经验)和经验(或统计)三种 (Morel *et al*, 1980)。分析和半分析算法以辐射传输理论为基础, 而经验模型则主要考虑反射比或反射光谱导数。本文作者拟利用 Savitzky-Golay 滤波处理南黄海与北东海水体高光谱观测数据, 以分析研究区水体遥感反射率对表层总悬浮颗粒物浓度和悬浮泥沙浓度的响应特性, 再采用最小二乘回归分析方法企求构建本区表层总悬浮颗粒物浓度与悬浮泥沙浓度遥感反演经验模型。

1 试验数据获取

高质量现场光谱实测数据的稀缺严重制约着我国沿海近岸二类水体水色遥感反演算法研究的发展。为此, 2003 年春季国家卫星海洋应用中心联合香港科技大学、中国科学院海洋研究所、国家海洋局北海分

* 国家自然科学基金项目, 40706035 和 40676037 号及国家 863 资助项目, 2007AA12Z161 号。

通讯作者: 樊辉, E-mail: fanh@zhanlue.net

收稿日期: 2008-12-14, 收修改稿日期: 2009-03-16

局等单位,在南黄海、北东海开展了一次二类水体水色试验,具体站点分布见图 1。

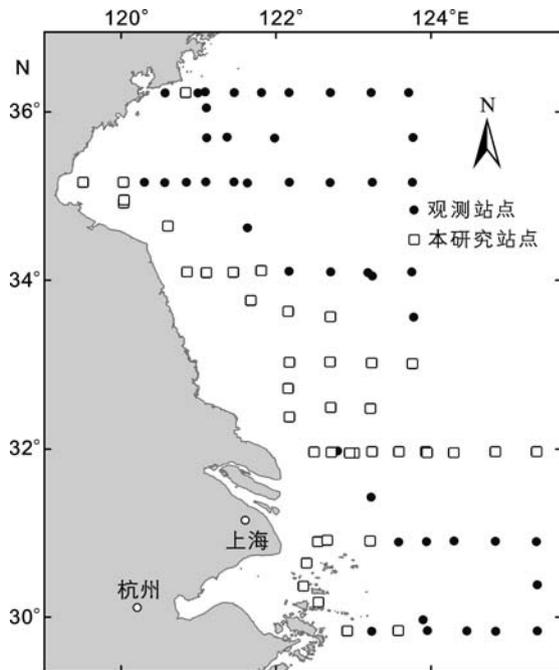


图 1 光谱测量与悬浮体取样站位

Fig.1 The location of sampling stations for field spectral measurement

本文中所采用的表观光谱数据是利用美国 ASD 公司生产的双通道地物波谱仪 FieldSpec Dual VNIR 采集的,其测量光谱范围为 350—1050 nm,光谱精度为 1 nm。具体测量内容包括表观向上辐射亮度观测 (L_u)、天空漫散射的反射辐射亮度观测 (L_{sky}) 和标准板的总辐照度反射观测 (L_p)。唐军武等(2004)详细描述了本次水色试验表观光谱测量具体操作步骤及数据处理方法。遥感反射率 R_{rs} 的计算公式可以表述为:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{[L_u(\lambda) - \rho L_{sky}(\lambda)] \rho_p}{\pi L_p(\lambda)} \text{ (sr}^{-1}\text{)}$$

式中 ρ 为气-水界面对天空光的反射率; ρ_p 为标准板的反射率(取值为 0.272)。

海面光谱观测同时,在每个站点采集表层(0—50 cm)海水样品 2 L,采用负压抽滤法过滤(滤膜孔径为 0.45 μm ,按总量的 20% 设置校正膜)。根据水样浑浊情况,过滤样品量为 30—2000 ml。按照 GB/T13909-92 海洋调查规范海洋地质地球物理调查规程的要求,空白滤膜及过滤后滤膜在 40 $^{\circ}\text{C}$ 恒温下反复烘干、称量,直至前后两次重量差不超过 0.01 mg(电子天平精度为十万分之一)为止。此后,将过滤膜放入预先烘烤

称重的小坩埚中,先用酒精灯将滤膜燃烧,再置于 500 $^{\circ}\text{C}$ 高温的马福炉中烘烤 1h。烧失后所得重量为无机悬浮颗粒物重量(即悬浮泥沙重量),经高温燃烧后的损失量为有机悬浮颗粒物重量。

2 研究方法

由于受照度、观测几何、海面状况和大气条件等多因素影响,海域水体表观光谱曲线不可避免会存在一些噪声,导致很难构建表观光谱特性与水体各组分浓度的经验关系模型。为此,不少学者运用光谱求导来消除背景信号与光谱要素叠合,并取得了较好结果(Chen *et al*, 1992; Fraser, 1998; Goodin *et al*, 1993; Han *et al*, 1997; Malthus *et al*, 1995; Tsai *et al*, 1998)。特别是基于偏最小二乘原理提出的 Savitzky-Golay 滤波,能较好地保持分析信号中的有用信息,且能同步实现平滑滤波与求导。本文作者利用 Savitzky-Golay 卷积法处理原始遥感高光谱数据,进而分析去噪后的遥感光谱反射率的 0 阶(即其本身)、1 阶和 2 阶导数与水体表层总悬浮颗粒物浓度及悬浮泥沙浓度的相关性,再基于筛选出的较优波段,运用最小二乘回归统计方法建立水体表层总悬浮颗粒物浓度与悬浮泥沙浓度反演经验模型。

3 结果与讨论

3.1 水体光谱特性

本次水色试验所采集水样总悬浮颗粒物浓度范围为 0.7—1762.1 mg/L,悬浮泥沙浓度范围为 0.07—1649.9 mg/L。不同浓度水体其遥感反射率光谱曲线呈现不同形态(图 2A),但其值均小于 0.06 sr^{-1} 。当总悬浮颗粒物含量极少时(<1 mg/L),其光谱曲线接近一类水体,较 600 nm 长的波段其遥感反射率近似为零;总悬浮颗粒物浓度 >10 mg/L,光谱曲线在 570 nm 附近有一明显峰值(主峰),并随浓度升高向较长波段偏移(Han *et al*, 1996),同时在 810 nm 附近另一峰值区(次级峰)渐趋明显;当水体总悬浮颗粒物含量达到一定值时,其次级峰区遥感反射率高过主峰区。以前的研究也表明含沙水体的光谱反射率存在两个峰值,分别为位于黄光波段(560—590 nm)的主峰和位于近红外波段(760—1100 nm)的次级峰(Curran *et al*, 1988)。

遥感反射率光谱曲线与其一、二阶导数光谱曲线存在很强的对应关系(图 2B,C)。一阶导数光谱曲线的

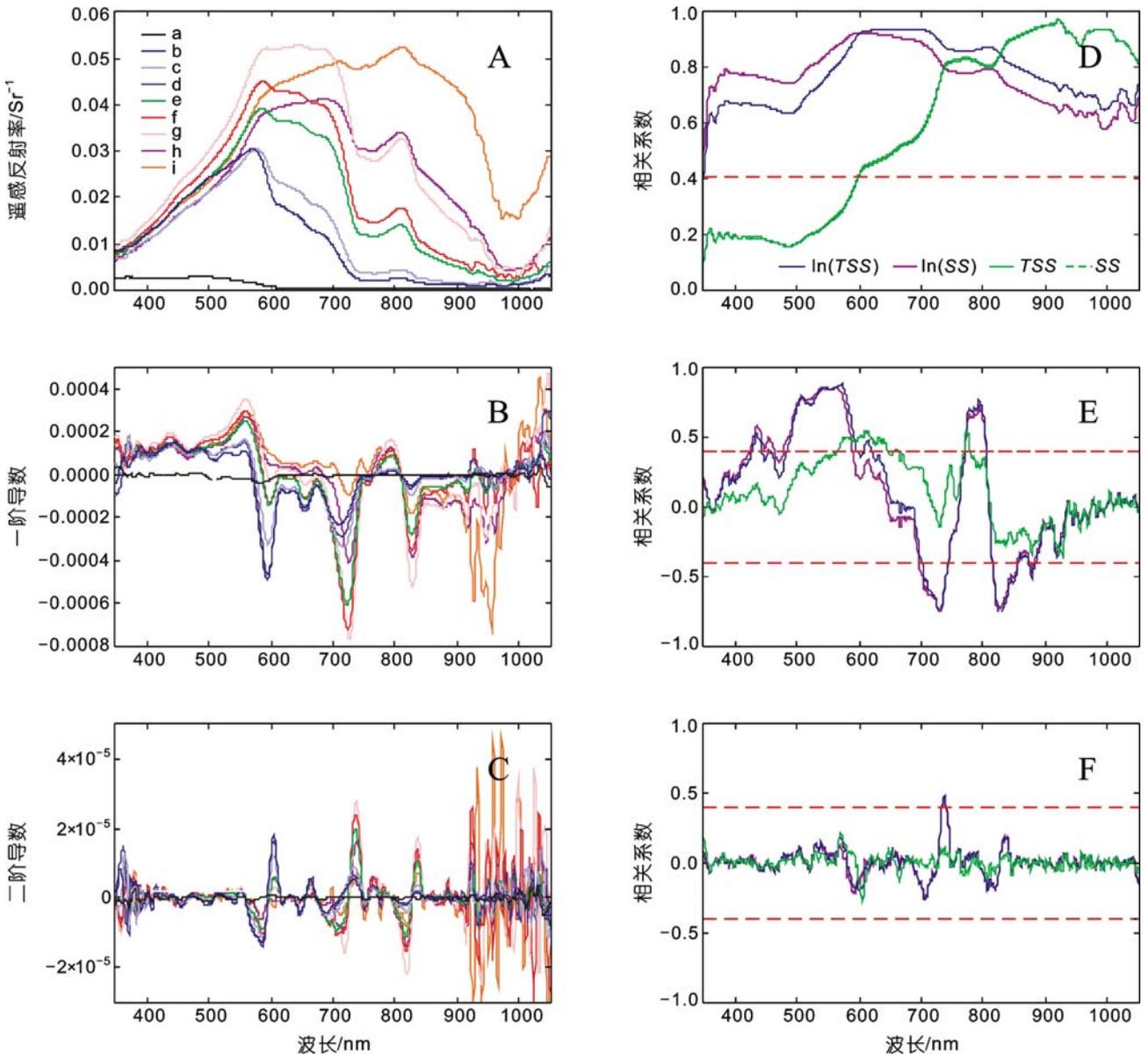


图 2 水体遥感反射率与悬浮颗粒物浓度关系

Fig.2 Relationship between remote sensing reflectance (R_{rs}) and suspended particulate material

A. 遥感反射率; B. 遥感反射率一阶导数; C. 遥感反射率二阶导数; D. 遥感反射率与总悬浮颗粒物浓度(TSS)、悬浮泥沙浓度(SS)及其自然对数相关系数; E. 遥感反射率一阶导数与 TSS、SS 及其自然对数相关系数; F. 遥感反射率二阶导数与 TSS、SS 及其自然对数相关系数

两个峰值出现在 560 nm 和 795 nm 附近, 其谷底值则分别位于 595 nm、725 nm、815 nm 附近; 而二阶导数光谱曲线的峰值位于 610 nm、730 nm 和 830 nm 附近, 其谷底值则处于 590 nm、720 nm 和 820 nm 附近。在 400—900 nm 以外波段范围, 一、二阶导数光谱曲线变化较为剧烈, 噪声较强, 其主要原因是这些波段区水体遥感光谱反射率极小, 更易受海面、大气条件以及测量误差等随机因素的干扰。

3.2 遥感反射率及其导数与总悬浮颗粒物、悬浮泥沙浓度相关性分析

为进一步阐述水体遥感反射率随水体悬浮颗粒物含量的变化, 分别计算了遥感反射率及其一、二阶导数与总悬浮颗粒物浓度(TSS)和悬浮泥沙浓度(SS), 及其自然对数[$\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$] \ln 的皮尔森相关系数(图 2D—F)。遥感反射率与 TSS、SS 的相关系数(r)较为一致, 当波长小于 600 nm, 其相关性不显著(在 $\alpha=$

0.01 置信水平,下同),而在 600 nm 以长波段,其相关性随波长递增。该结果与 Malthust 等(1995)所研究内陆二类水体结果极为相似,却异于 Chen 等(1992)的室内研究,其研究表明水体光谱反射率与 SS 在 400—1000 nm 波段范围内均呈显著相关(相关系数均大于 0.7),特别是在 710—930 nm 波段区间,其相关系数高于 0.95。究其原因,Chen 等(1992)在理想实验条件下仅观测光谱反射率对 SS 变化的响应,未考虑二类水体中叶绿素与黄色物质等其它水色组分的影响,加之野外光谱测量与悬浮体取样等方面的误差,亦可能影响遥感反射率与 TSS、SS 之间的相关性(Chen *et al.*, 1992)。图 2D 也表明,遥感反射率与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 均呈显著相关,其相关系数高于 0.6,特别是 600—700 nm 波段范围,其相关系数高达 0.9。这表明表层 TSS、SS 与遥感光谱反射率存在对数相关。该结论亦被其它地区的同类研究所印证(黎夏, 1992; Aranuvachapun *et al.*, 1988; Curran *et al.*, 1988; Doxaran *et al.*, 2002)。

由图 2E 可知,遥感反射率一阶导数光谱与 TSS、SS 仅在 560—640 nm 和 768—780 nm 波段呈显著正相关,最大相关系数不及 0.6,该值明显小于 Chen 等(1992)的室内观测结果,但与其海面观测结果较为相近。Chen 等(1992)的研究表明:室内观测所得光谱一阶导数与 SS 在 480—570 nm、710—740 nm、820—830 nm 和 910—940 nm 波段均存在显著线性相关,其相关系数高于 0.95,最大的正、负相关系数分别位于 560 nm 和 727 nm;而野外海面观测所得光谱一阶导数与 SS 之间正、负相关系数达 0.6 以上的波段分别位于 570—680 nm 和 800—930 nm。本次研究中,遥感反射率的一阶导数并未能如预期提高其与 TSS、SS 的相关性。这是由于一阶导数光谱虽可消除纯水反射率与海面镜面反射对水体遥感反射率的影响,但也能彰显叶绿素、黄色物质等其它水体组分的细微变化(Goodin *et al.*, 1993),而这些组分又可能与 TSS 或 SS 存在共线性相关,特别是在水体其它组分含量较高、水色较为复杂的黄、东海近岸区。此外,不同类型水体其一阶导数光谱对 TSS 或 SS 响应的波段区间往往存在很大的差异。如 Goodin 等(1993)曾报道一阶导数光谱与 SS 在 720 nm 波段显著相关,Malthust 等(1995)观察到一阶导数光谱与表层 TSS 在 670、722 和 840 nm 波段相关性较好,而 Fraser 等(1998)则发现一阶导数光谱与浑浊度在 429、628 和 695 nm 波段相关性更优。因此,理想的室内条件下或某一地区光谱

观测所得的反演关系很难直接推广应用到其它地区水色遥感反演(Curran *et al.*, 1988)。图 2E 还表明遥感反射率一阶导数光谱与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 均在 425—450 nm、485—600 nm 和 770—805 nm 波段呈正相关,而在 700—745 nm 和 815—855 nm 波段则呈负相关,最大正、负相关系数均达 0.8 以上。由此,可推测研究海区水体表层 TSS、SS 与遥感反射率存在对数相关。

二阶导数光谱与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 仅在 735—740 nm 间存在显著相关,而与 TSS、SS 相关性不明显(图 2F)。此情形可能是由于二阶导数抑制了悬浮泥沙对光谱的贡献(Goodin *et al.*, 1993)。由此,不建议利用二阶导数光谱反演 TSS 与 SS。

3.3 表层悬浮颗粒物与悬浮泥沙浓度反演经验模式

基于上节的相关分析,遥感反射率与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 分别在 662 nm($r=0.94$)和 599 nm($r=0.93$)相关系数最大;其一阶导数则在 569 nm($r=0.90$)和 539 nm($r=0.88$)波段与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 之间的相关系数达到最大。利用最小二乘线性回归得出遥感反射率及其一阶导数光谱与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 的相关关系式与关系图(图 3)。通过分析回归残差分布可发现,所得出的总悬浮颗粒物浓度与悬浮泥沙浓度回归统计反演模型较适合中等 TSS 或 SS 水体,当水体中 TSS 或 SS 过高或过低时,可能会产生较大反演误差。

4 结论

利用 Savitzky-Golay 滤波分析了南黄海、北东海春季水色遥感试验所取得的遥感反射率光谱数据,研究表明:不同浓度悬浮水体其遥感反射率光谱曲线显现不同的形态,但其反射率均小于 0.06sr^{-1} ;总悬浮颗粒物浓度 $>10\text{ mg/L}$ 时,光谱曲线在 570 nm 附近有一明显峰值(主峰),且随浓度升高向红光波段偏移,同时在 810 nm 附近另一峰值区(次主峰)渐显,甚至高过主峰值;在 400—900 nm 波段范围,一、二阶导数光谱能较好地描述遥感反射率光谱曲线的变化,而其余波段受外界环境影响较大,噪声较强。此外,结合表层水样分析结果,利用最小二乘线性回归分析方法探讨了水体遥感反射率及其一、二阶导数与海面总悬浮颗粒物浓度和悬浮泥沙浓度的相关关系。遥感反射率与 TSS、SS 仅在 600 nm 以长波段呈显著相关,而与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 在 400 nm 以长波段均呈显著相关,且相关系数均高于 0.6;一阶导数光谱与 TSS、SS 仅在 560—640 nm 和 768—780 nm 波段存在

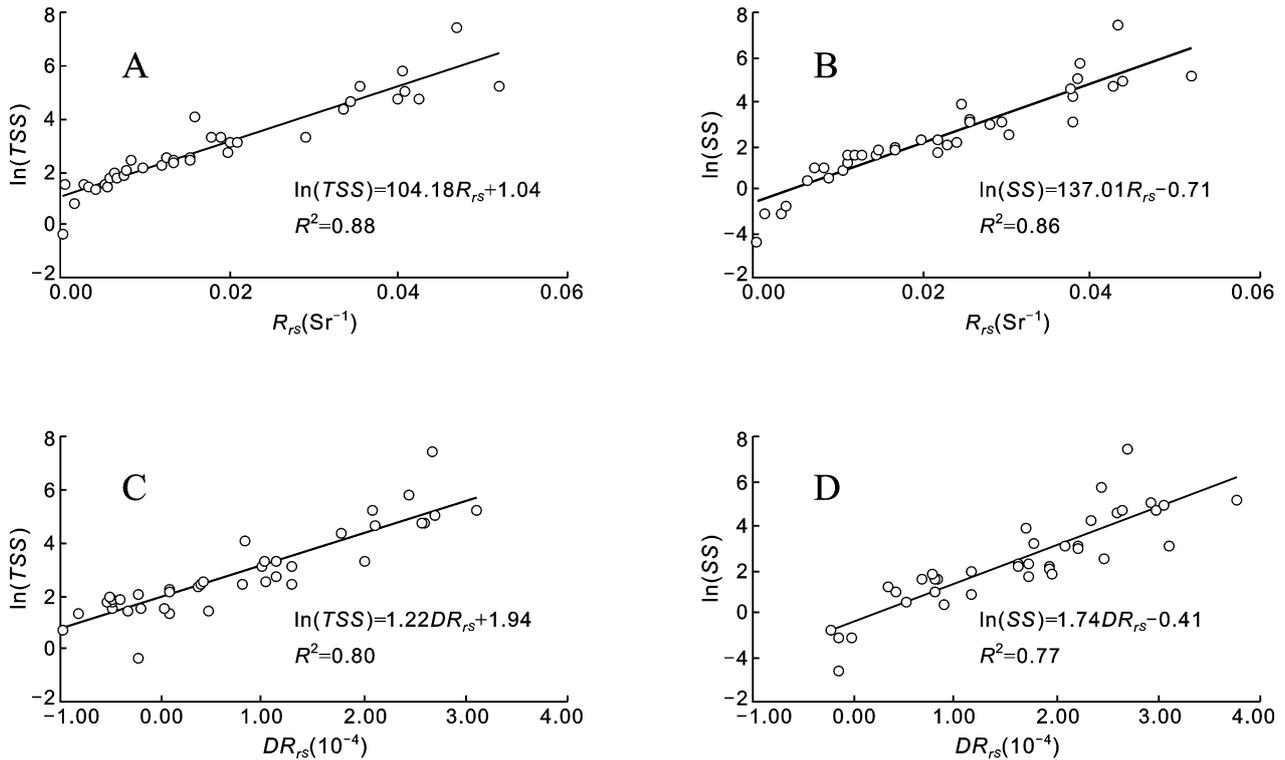


图3 遥感反射率(R_{rs})及其一阶导数(DR_{rs})与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 相关关系

Fig.3 Relationship between remote sensing reflectance (R_{rs}) and both $\ln(TSS)$ and $\ln(SS)$; Relationship between first derivative remote sensing reflectance (DR_{rs}) and both $\ln(TSS)$ and $\ln(SS)$

显著相关, 而与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 在 425—450 nm、485—600 nm 和 770—805 nm 波段均呈显著正相关, 在 700—745 nm 和 815—855 nm 波段呈显著负相关; 二阶导数光谱仅与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 在 735—740 nm 间呈显著正相关, 而与 TSS 、 SS 则相关性不显著。故遥感反射率及其一阶导数均可用于水体总悬浮颗粒物浓度与悬浮泥沙浓度反演, 但其更高阶导数通常会抑制悬浮泥沙的作用则不建议采用。

遥感反射率及其一阶导数与 $\ln(TSS)$ 、 $\ln(SS)$ 的相关性较其与 TSS 和 SS 的相关程度更高。基于所选相关系数最大波段, 拟合出遥感反射率及其一阶导数与水体表层总悬浮颗粒物浓度与悬浮泥沙浓度的统计反演关系式。所得统计反演模型较适合中等悬浮颗粒物含量水体, 当水体 TSS 或 SS 过高或过低时, 均会出现较大反演误差。

致谢 本文的遥感反射率光谱数据由国家卫星海洋应用中心提供, 海上悬浮体取样与室内数据处理由中国科学院海洋研究所部昂和刘芳协助完成, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 唐军武, 田国良, 汪小勇等, 2004. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法. 遥感学报, 8(1): 37—44
- 黎 夏, 1992. 悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用. 环境遥感, 7(2): 106—114
- Aranuvachapun S, Walling D E, 1988. Landsat-MSS radiance as a measure of suspended sediment in the Lower Yellow River (Hwang Ho). Remote Sensing of Environment, 25(2): 145—165
- Chen Z, Curran P J, Hansom J D, 1992. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. Remote Sensing of Environment, 40(1): 67—77
- Curran P J, Novo E M M, 1988. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral Radiance: A review. Journal of Coastal Research, 4(3): 351—368
- Dekker A, Bukata R P, 2002. Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. In: Hallikainen M T ed. IEEE Press, Piscataway N J, USA, 519—534
- Doxaran D, Froidefond J, Castaing P, 2002. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. International Journal of

- Remote Sensing, 23(23): 5079—5085
- Fraser R N, 1998. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll a among Nebraska Sand Hills lakes. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8): 1579—1589
- Goodin D G, Han L, Fraser R N *et al*, 1993. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(4): 505—510
- Han L, Rundquist D C, 1996. Spectral characterization of suspended sediments generated from two texture classes of clay soil. *International Journal of Remote Sensing*, 17(3): 643—649
- Han L, Rundquist D C, 1997. Comparison of NIR/red ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: A case study in a turbid reservoir. *Remote Sensing of Environment*, 62(3): 253—261
- Malthus T J, Dekker A G, 1995. First derivative indices for the remote sensing of inland water quality using high spectral resolution reflectance. *Environment International*, 21(2): 221—232
- Morel A, Gordon H R, 1980. Report of the working group on water color. *Boundary Layer Meteorology*, 18(3): 343—355
- Tsai F, Philpot W D, 1998. Derivative analysis of hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 41—51

SPECTRAL SIGNATURE OF CASE WATERS AND ITS RELATIONSHIP WITH SURFACE SUSPENDED SOLID CONCENTRATION IN THE YELLOW SEA AND EAST CHINA SEA

FAN Hui^{1,2}, HUANG Hai-Jun³

(1. *Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming, 650091*; 2. *Research Center for Geography Information Technology, Shandong Academy of Sciences, Jinan, 250014*; 3. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

Abstract An experimental above-water radiance measurement campaign was conducted during spring of 2003 in the Yellow Sea and East China Sea, with a co-incident water sample for each measurement. The Savitzky-Golay smoothing was employed to filter field spectral signature and to derive the first and second-derivative spectra. Remote sensing reflectance (R_{rs}) and its derivatives were analyzed and their correlation relationships with the concentrations of total suspended solid (TSS) and suspended sediment (SS) were demonstrated. The result shows that there are higher correlation coefficients between both R_{rs} and its first derivative and the natural logarithms of TSS and SS than between both R_{rs} and its first derivative and both TSS and SS. Moreover, the waveband with the maximum correlation coefficient was used to construct the corresponding regression equations of R_{rs} and its first derivative with the natural logarithms of TSS and SS.

Key words Savitzky-Golay smoothing filter, Remote sensing reflectance, Suspended solid, Derivative spectral reflectance, Least square regression