

近岸 II 类水体表层悬浮泥沙浓度遥感模式研究进展

刘志国¹, 周云轩^{1,2}, 蒋雪中¹, 沈芳¹

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026)

摘 要 因为具有明显的时间与空间分辨率优势, 遥感数据成为近岸 II 类水体悬浮泥沙浓度(SSC)信息提取研究的重要数据源之一. 悬浮泥沙遥感信息提取的现状可归纳为: (1) 建立近岸 II 类水体 SSC 遥感模式的方法有三种类型, 分别是基于地面光谱与 SSC 测量的反射率反演方法、基于图像信息法和基于大气辐射传输理论模型法; (2) 基于地面测量的反射率反演方法属于理论与经验相结合的方法, 也是目前用于 SSC 定量化遥感模式研究的常用方法. 其数学表达形式包括线性关系式、对数关系式、负指数关系式、Gordon 模式和综合模式等; (3) 到目前为止已有的 II 类水体 SSC 遥感模式适用性方面还不理想, 远未达到与试验室分析相匹配的精度. 文章认为: 加强地面水文光谱实验研究, 建立多光谱 SSC 定量模式, 以高分辨率和高光谱遥感融合数据为基础的 SSC 定量遥感是今后该方向发展趋势.

关键词 II 类水体, 悬浮泥沙浓度, 遥感

中图分类号 TP79

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2006)01-0321-06

Progress on suspended sediment concentration remote sensing in nearshore case 2 waters

LIU Zhi-guo¹, ZHOU Yun-xuan^{1,2}, JIANG Xue-zhong¹, SHEN Fang¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Faculty of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract Remote sensing data are among the most important data sources for monitoring and extracting suspended sediment concentration (SSC) in near-shore coastal case 2 waters for its high spatial resolution and temporal advantage. The status of SSC extraction from remote sensing imageries may be summarized as follows. (1) Broadly speaking, SSC remote sensing modeling techniques fall into three categories. They are reflectance inversion methods based on ground spectral measurement against SSC, methods based on atmospheric corrections, and atmospheric propagation model based SSC modeling methods, respectively. (2) The ground reflectance inversion methods for SSC are of a combination of theory and experience, which are employed intensively. The empirical mathematic expressions between reflectance and SSC are in one of the forms of linear, logarithmic, negative exponential, Gordon relation or combinations of previous forms. (3) Available SSC models so far are not satisfied due to their incomparable accuracy to the SSC measured from in situ bottled samples. The authors believe that hydrological spectra study should be strengthened in order to establish a SSC model relating to multiple spectra. The trend for SSC inversion with remote sensed data is the application of fused images with both high spatial and spectral resolution.

Keywords case 2 waters, suspended sediment concentration (SSC), remote sensing

0 引 言

遥感技术是 20 世纪 70 年代迅速发展起来的一门综合性探测技术. 因其具有重复周期短、空间分辨

率高和视野广阔等特点, 遥感技术发展与应用的速度和广度非常突出. 经过 30 多年的发展, 遥感技术已被广泛应用于资源与环境调查、军事应用、城市规划等多个领域, 正经历着技术不断完善、能力不断增

收稿日期 2005-03-10; 修回日期 2005-05-20.

基金项目 国家 973 项目(2002 CB412403)、农业部海洋与河口渔业重点开放实验室基金教育部科学技术研究重点项目(105076)联合资助.

作者简介 刘志国, 男, (1978-) 山东省费县人. 在读博士研究生, 从事海岸带环境遥感方向研究. (E-mail: Liuzhiguo2k@163.com)

万方数据

强、应用领域不断扩大的发展过程。人类进入多层次、多角度、全方位和全天候对地观测的新时代,遥感在环境监测中的应用逐步深入^[1,2]。

遥感技术和海洋科学的结合,形成了以海洋和海岸带环境为监测和研究对象的新兴分支学科——海洋遥感。狭义上,海洋遥感是指用遥感技术监测海洋中各种现象和过程的方法^[3],其内容涉及到海洋学的多个领域,包括利用遥感技术监测海洋的环流、表面温度、风场、波浪、生物活动等。

在海洋遥感研究中,海洋水体按照光学性质划分为 I 类水体(Case 1 Waters)和 II 类水体(Case 2 Waters)。其中,II 类水体的光学特性主要由悬浮物、黄色物质(又称有色可溶性有机物)决定;近岸水体直接受到来自海岸带和河口径流携带的陆源物质影响,属于 II 类水体^[4,5]。

遥感监测 II 类水体的悬浮泥沙浓度(Suspended Sediment Concentration, SSC)是海洋遥感领域的一个重要研究方向。掌握近海水体悬浮泥沙浓度和运移特征是分析河口形态和演变规律的重要方面。II 类水体悬浮泥沙的含量直接影响到水质的透明度和水色等光学性质,同时也影响到水生生态环境和河口海岸带冲淤变化过程。借助遥感手段,可以快速地获取水体泥沙的信息,具有重要的意义。

1 研究进展

遥感技术是获取海岸带资源、环境和灾害等信息的高新技术手段。在海洋水色遥感中,主要观测要素包括叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等,其中固体悬浮物浓度是一个主要的研究对象。

海洋及其近岸水体的水文要素动态变化迅速,并且常规的船测法在采样密度和视野上也会受到限制,难以进行大尺度的研究。遥感可以发挥它的时间尺度和空间尺度的优势,并节省投资,适合对大范围的水体悬浮泥沙情况进行观测。国内外学者借助遥感数据资料,开展了大量的相关工作。

海洋和海岸带环境遥感数据源主要以陆地卫星(Landsat/MSS)和气象卫星(NOAA/AVHRR)系列等常规数据为主。特别 90 年代以来,美国等国家陆续发射了专门的海洋水色卫星,包括水色传感器(SeaWiFS)、中分辨率成像光谱仪(MODIS),为海洋遥感提供了专门的通道。中国也发射了一系列携带海洋传感器的卫星和海洋卫星如 HY-1A、HY-1B 和 CMODIS,加强了对中国及周边海域的遥动态监测。随着卫星技术的发展,常规遥感数据、水色卫

星数据和高光谱分辨率遥感技术为水质监测提供了更好的条件^[6-8]。尤其高光谱和高分辨率遥感的发展为海洋遥感带来新的活力,从而促进了近岸 II 类水体悬浮泥沙的定量化遥感反演研究^[9]。

1.1 国外 SSC 遥感模式研究

美国陆地卫星成功发射以后,国外学者利用遥感技术进行了大量的 II 类水体悬浮泥沙的研究工作。Richard L., Miller^[10], J. Lira^[11] 和 S. Ouilon^[12] 等利用 TM、SPOT 和 MODIS 等卫星遥感影像并结合现场(准)同步采样和光谱测量分析,建立了基于统计分析方法的悬浮泥沙遥感反演模式。Louis E 利用神经网络方法通过 TM 影像进行叶绿素和悬浮颗粒物的估算。Hu Chuanmin 等在墨西哥湾利用 SeaWiFS 水色卫星数据建立了区域性悬浮泥沙遥感数据集,探讨近岸上层水体悬浮泥沙遥感理论及应用模型^[13]。Ruhl, C. A. 等借助 NOAA/AVHRR 气象卫星资料和现场 OBS 测量水体混浊度、泥沙浓度等现场信息之间的统计相关模式,计算、分析了悬浮泥沙浓度的分布情况,并分析了湾内悬浮泥沙浓度场受潮流等因素的影响^[14]。在混浊水体中, D. G Bowers 等尝试建立高光谱测量仪数据和悬浮颗粒浓度之间的监测模型,采用的光谱波段宽度更窄^[15]。关于光谱特征的研究,国外许多的学者也利用 SeaWiFS、NOAA/AVHRR 和 SPOT 卫星数据与地面测量光谱进行分析,并提出了相应的遥感模式^[16,17]。

1.2 国内 SSC 遥感模式研究

近年来,国内有关近海 II 类水体悬浮泥沙遥感模式方面的研究发展很快。在长江口、杭州湾、黄河口、珠江河口等水体含沙量丰富的典型区域,研究者利用遥感手段对水体悬浮泥沙浓度信息提取和定量化模式进行探讨。一方面,借助陆地卫星(MSS、TM/ETM)、气象卫星(NOAA、FY-1、FY-2)和海洋水色卫星(SeaWiFS、HY-1)等遥感数据源,并结合相应的地面(准)同步观测、试验资料,提出了以经验分析法为主的统计相关模式^[18-20];另外,通过地面水文观测实验和光谱特征分析,对遥感泥沙参数、敏感波段和波段组合等概念进行定义,总结含沙水体的光谱规律,为 II 类水体悬浮泥沙定量化遥感模式的建立提供支持^[21]。

2 悬浮泥沙浓度的遥感模式

利用遥感进行地面目标信息的定量反演是指对地表物质的物理量(如反射率、发射率、温度及一些

结构参量等)和大气参量(如气溶胶、水含量等)等要素的反演.目前,这方面的研究主要采用的方法有基于地面实测法、基于图像信息法和大气辐射传输模式法等.

2.1 基于地面实测分析法

基于地面实测法是一种比较简便的反射率反演方法,它把从地面获取的辅助信息对传感器进行地面定标,然后用遥感数据计算地表物理参数.通过建立地面实测信息和遥感数据之间的对应关系,归纳出反演的模式.该模型假定地面目标反射率与成像光谱仪探测器获得的信号之间具有线性关系

$$DN_i = A_i \cdot \rho(\lambda) + B_i, \quad (1)$$

其中, DN_i 表示在*i*波段上给定象元的信号值; $\rho(\lambda)$ 为该象元所对应的地面目标在波段*i*上的反射率值; A_i 为影响 DN_i 值的倍增项,如大气透过率与增益项等; B_i 代表大气程辐射和传感器的零响应.在应用中,利用现场测量的地面目标的反射率和传感器同步获取的地物反射率值,利用统计回归算法得到 A_i 、 B_i ,从而实现由遥感数据对地物反射率的反演.

目前国内许多关于悬浮泥沙遥感模式的研究工作是采用这种原理.乐华福等^[22]利用船测法对水体表层悬浮泥沙浓度、后向散射辐射度进行测量,并对550 nm和670 nm反射峰值所相应的波段信息进行计算,建立悬浮泥沙浓度和这两个波段反射率之间的数学关系式.

2.2 基于图像信息法

较早的大气辐射校正法是利用清洁水体的象元值代替大气程辐射,不考虑其它大气因素的影响.后来该方法加以改进形成暗目标减法.它主要针对程辐射问题,并解决大气透过率和天空光向下漫射辐射等其它因素影响的问题^[23].这类方法的特点是,它只通过遥感图像自身信息,而不需要现场测量的辅助数据来进行分析,适用于对历史数据和很偏远的研究区域的研究,是未来遥感信息量化研究中的重要方向之一.

李炎等充分挖掘遥感影像的本身信息,利用斜率传递法分析SSC和遥感数据之间的关系,建立SSC和光谱反射率关系以及大气中的海面—传感器光谱反射率关系^[24].

2.3 基于大气辐射传输理论模型法

该模式根据辐射在大气中传输的基本理论,分析遥感探测中要处理的问题.在传感器获取数据的同时,需要对一系列的大气环境参数进行测量.其优点是能够比较合理的处理大气散射、气体吸收问题,

形成连续光谱,避免在光谱反演中出现较大的定量误差.

目前,国内外许多遥感专家正在从事这方面的研究,结合地面场地外定标进行目标信息的反演研究,并取得了比较理想的结果.潘德炉^[25]等人通过对海洋水色要素的离水辐射率在可见光部分辐射传输理论的研究,建立了水体中各要素成分浓度的遥感离水模式,其模式已经通过FY-1B卫星的海洋水色通道实测资料验证,并被推广应用.

3 水文光谱特征

含沙水体的光谱反射特征是建立遥感信息与悬浮泥沙浓度之间量化模型的基础.目前已有大量的实验工作进行这方面的研究^[26].已有的实验表明含沙水体的反射率光谱有两个峰值: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.研究者分析了这两个峰值所在波段的水体光谱反射率(R_w)和水体表层SSC之间的联系^[27-29],总结出离水辐射率 R_w 随SSC(公式中以*S*表示)变化的规律:

(1) R_w 随着*S*的增加而增加,即

$$dR_w/dS > 0;$$

(2) 变化率 dR_w/dS 并不是一个常量,而是随着*S*的增加而减少,即

$$d^2R_w/dS^2 < 0;$$

(3) $S=0$ 时, R_w 为一个大于0的常量;*S*较大时, R_w 随*S*的增加迅速趋于一个小于1的极值,即 $\lim_{S \rightarrow 0} R_w(S) > 0$ 和 $\lim_{S \rightarrow +\infty} R_w(S) < 1$;

(4) $S=0$ 时,黄光波段光谱反射率 R_{w_1} 和近红外波段光谱反射率 R_{w_2} 与清水相同,趋于一个接近0的常量,此时

$$R_{w_1} \approx R_{w_2}.$$

4 悬浮泥沙遥感估算模式

在水体光谱规律分析的基础上,目前的研究者提出了许多水体悬浮泥沙浓度(SSC)信息与遥感反射率拟合的数学模式.这些关系式多以地面实测基础上的半理论半经验的统计模式为主.这些模式是借助遥感数据源针对不同的水域范围而建立,具有代表性,是比较典型的分析悬浮泥沙浓度(SSC)和光谱反射率值*R*(一般用含沙水体光谱峰值对应的遥感影像波段上的象元灰度值替代)的关系式.根据这些模式的数学形式,可分为以下几个类型.

4.1 线性关系式

在利用遥感数据分析悬浮泥沙浓度(SSC)的研究中,线性关系式因其形式简单而很早被采用.该模式一般形式如下:

$$R = A + BS \quad (2)$$

式中 R 为水面光谱反射率, S 表示悬浮泥沙浓度, A 和 B 为与水体光学性质和太阳与传感器几何关系有关的经验参数,属于有限的线性区间内近似表达式.许多学者利用该模式结合遥感影像数据和现场测量数据进行统计相关求取参数,然后分析和计算悬浮泥沙浓度.该模式简单、计算量小,适合于低浓度水体;其缺点是不能准确表达复杂条件下的泥沙浓度信息,尤其在高浓度区的误差较大.

4.2 对数关系式

$$R = A + B \log S, \quad (3)$$

式中 R 为水面光谱反射率, S 表示悬浮泥沙浓度, A 和 B 为与水体光学性质和太阳与传感器几何关系有关的经验参数.在悬浮泥沙浓度不高的情况下,对数形式能够较真实地反映悬浮泥沙与卫星数据之间的关系,比简单的线性关系适用性广;但当悬浮泥沙浓度比较高时,它计算的误差偏大.该类型的代表模式有长江口模式^[30](公式4).

$$\log S = 0.52 \cdot R_3/R_1 - 0.88, \quad (4)$$

其中, R_3 、 R_1 为反射率/灰度值, S 是含沙量.

李四海^[31]等借助泥沙参数

$$S_r = (R_5 + R_6)/(R_5/R_6),$$

利用水色卫星资料建立了表层水体泥沙浓度的提取模式,并按照不同的浓度条件给出相应的参数(公式5和公式6)

$$S > 200 \text{ g/L},$$

$$\log_{10} S = 1.355.8 S_r^2 - 36.998 S_r + 2.3857, \quad (5)$$

$$S < 200 \text{ g/L}, \log_{10} S = 12.305 S_r + 1.9777. \quad (6)$$

4.3 Gordon 关系式

$$R = C + S/(A + BS), \quad (7)$$

上式中 R 为水面光谱反射率, S 表示悬浮泥沙浓度, A 、 B 、 C 为常数,它是根据准单散射近似公式得到,在实际应用中使用的不多,但比较有名,适用区间包括低含沙量和高含沙量区.代表性的模式有为长江口模式^[32],其中 x 为 TM_1 的反射率, S 是悬浮泥沙浓度

$$S = x/(0.09751 - 0.1105 \cdot x) \cdot 10^{-2}. \quad (8)$$

4.4 负指数关系式

$$R = A + B(1 + e^{-DS}), \quad (9)$$

万方数据

公式中 R 为水面光谱反射率, A 、 B 、 D 为系数,各常数项均由与水体内的光学性质和悬浮颗粒粒径有关的参数构成.负指数公式的特点是难以准确表达高含沙量区的高阶变化.代表性的负指数模式为杭州湾模式^[33],建立了 NOAA/AVHRR 象元亮度(L)和悬浮泥沙浓度(S)间的关系式

$$L = 0.479 - e^{-0.0126S - 1.1904}. \quad (10)$$

4.5 综合模式

黎夏^[34]在珠江口流域对 MSS 数据进行分析,建立了 MSS 遥感图像亮度值和现场测量的泥沙浓度信息之间的定量化遥感模式.该模式结合了辐射传输理论、Gordon 和负指数关系式,给出亮度 L 和悬浮泥沙浓度(S)之间的联系,表达式如下

$$\begin{aligned} L &= \text{Gordon}(S) \cdot \text{Index}(S) \\ &= A + B[S/(G+S)] + C[S/(G+S)] \cdot e^{-DS}. \end{aligned} \quad (11)$$

该模式在珠江口流域使用效果较好,并成功地被其它公开发表的数据所验证,其形式还可以进一步得到深化.

5 悬浮泥沙定量遥感研究的趋势

目前,利用遥感手段提取水体泥沙信息的研究尚存在一些不足的地方.首先,遥感定量化提取模型是在一定水域范围内建立的,考虑到水文泥沙环境和光谱特征的差异,这些模式并不能直接推广到其它区域使用.另外,Ⅱ类水体中含有其它有色物质的影响、大气成分对辐射传输的影响等因素使得卫星遥感所能接收的离水辐射信息较弱,仅仅简单的数学统计相关并不能准确的表达遥感信息和泥沙浓度值之间的关系.特别是高光谱遥感数据的信息也没有被充分挖掘,使得实验研究的光谱规律并不能被很好的被应用到模型中来.

目前趋势下,Ⅱ类水体悬浮泥沙的遥感模式研究应该加强光谱实验方面的分析,充分了解不同水体环境、泥沙条件下的光谱规律,并利用更有效的大气校正模型消除大气的影 响,从而提高分析的精度和模型的适用性.

除水色卫星遥感资料外,高空间分辨率遥感和高光谱分辨率遥感等为近岸Ⅱ类水体悬浮泥沙信息研究提供了充分的数据源,如 SPOT、IKONOS 和 MODIS 等^[35,36].EOS-AM/PM 上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 上的水色波段与宽视场水色扫描仪 SeaWiFS 相比有更高的信噪比和更窄的波段宽度.它的海洋水色通道主要集中在 8~16 通道,它主要

用于探测与海洋水色有关的叶绿素、悬浮泥沙、黄色物质等三要素物质的浓度,浮游植物中的叶绿素吸收系数以及水体总吸收系数等物理量。要考虑分析不同类型的遥感影像间相互融合基础上的建模方法研究,利用多源遥感数据分析和地面同步实验相结合的方法,对悬浮泥沙定量化提取模式和定量估算模型的研究,可以综合影像数据的空间信息和波谱信息,提高分析模型的精度。

图 1 是关于利用遥感方法进行近岸Ⅱ类水体悬浮泥沙浓度信息的流程,其关键内容是遥感数据处理、地面光谱实验分析和建立两者相联系的模型等。

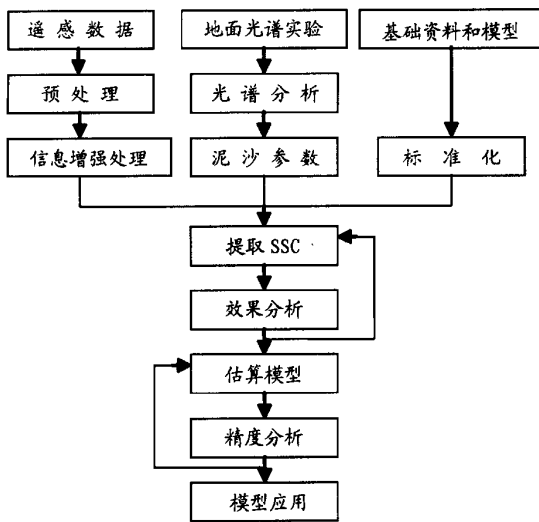


图 1 利用遥感方法提取悬浮浓度泥沙信息和建模流程
Fig. 1 The flowchart of quantitative SSC Extraction and modelling from Remote Sensing Data

遥感数据分析,尤其是遥感影像的大气校正、影像的融合和高光谱数据的挖掘是关键步骤,也有待在现有算法上进行改进。高分辨率和高光谱数据间的融合,可以充分挖掘遥感数据的空间和波谱信息,更好的利用遥感手段所提供的丰富信息。

地面水体光谱实验是另外一个重要环节。分析不同水文、泥沙环境条件下的水体光谱特征,探寻遥感信息和泥沙信息之间的规律,可为建立水体悬浮泥沙浓度的遥感模式提供理论支持,从而提高模型的精度。

在遥感信息融合和光谱信息挖掘的基础上,建立科学、合理的悬浮泥沙遥感模式,从而使模型具有更广的适用性。

6 结 论

(1)利用遥感信息提取Ⅱ类水体悬浮泥沙浓度的研究较多,包括地面的实地测量、水体的光谱实验工作。目前已经提出了很多区域性的模型,为水体悬浮泥沙定量化遥感监测分析提供了基础。

(2)遥感数据源以气象卫星、海洋水色卫星、陆地卫星为主,特别是水色卫星系列、高光谱遥感数据源,为悬浮泥沙定量化遥感模式研究提供了条件。

(3)根据光谱实验分析结果,研究者选择最佳波段或波段组合来反映泥沙信息,并以统计相关模式为主的半经验半分析法建立了象元灰度或者亮度值与地面同步观测之间数学模式。在数学表达形式上,包括线性关系式、对数关系式、负指数关系式和 Gordon 关系式,并推导出一些综合的模式。

(4)目前研究中同样存在着一些不足的地方。在建立模型或定量化模式的时候,大多是选择对应于某个光谱特征值波长范围的遥感数据波段象元值进行统计相关模式研究。其所利用的遥感影像波段范围与含沙水体的反射光谱(峰值)规律并不完全匹配,再加上波段宽度和辐射值校正等问题,使得遥感数据光谱信息的利用并不充分,也对模型的精度产生影响。

(5)随着遥感手段的进步和应用需求的提高,今后有关Ⅱ类水体悬浮泥沙遥感模式研究应该继续深入地分析有关地面含沙水体的光谱规律,考虑不同水文、泥沙条件下的光谱变化情况,并加强对高光谱遥感数据的挖掘,从而建立科学、灵活的悬浮泥沙遥感信息模式。

参 考 文 献 (References):

- [1] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 朱振海, 黄晓霞, 李红春, 等. 中国遥感的回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 310~316.
- [3] 陈述彭. 遥感大辞典[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] A Morel L, Prieur. Analysis of variation in ocean color[J]. *Limnol Oceanogr*, 1977, 22: 709~722.
- [5] Gordon H R, Morel A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery[J]. A review, lecture notes on coastal and estuarine studies, Barter R T, Mooers N K, Bowman M J, Zeitzschel B(eds.), Springer-Verlag, New York, 114.
- [6] Sathyendranath S. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically complex, Waters[A]. In: venetia stuart reports of the international ocean-colour coordinating group[C],

- Dartmouth, Canada, 2000, 3.
- [7] 李四海, 恽才兴. 河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究[J]. 遥感学报, 2000, 5(2): 154~160.
- [8] 刘闯, 葛成辉. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. 遥感信息, 2000, 3: 45~48.
- [9] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000, 15~21.
- [10] Richard L, Miller, etc. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters[J]. Remote sensing of Environment, 2004, 93: 259~266.
- [11] Lira J, Morales A, Zamora F. Study of sediment distribution in the area of the Panuco River plume by means of remote sensing[J]. International Journal of Remote sensing, 1997, 18(1): 171~182.
- [12] Forget, Philippe, Ouillon, etc. Surface suspended matter off the Rhone river mouth from visible satellite imagery[J]. Oceanologica Acta, 1998, 21(6): 739~749.
- [13] Hu Chuanmin, Carder Kendall L, Muller Karger, Frank E. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal Waters[J]. Remote sensing of Environment, 2000, 74(2): 195~206.
- [14] Ruhl C A. Combined use of remote sensing and continuous monitoring to analyse the variability of suspended-sediment concentration in san francisco bay california[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 53: 801~812.
- [15] Bowers D G, Gaffney S. White M, et al. Turbidity in the southern Irish Sea[J]. Continental Shelf Research, 1998, 18(5): 487~500.
- [16] David Doxaran. Spectral signature of highly turbid waters Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 149~161.
- [17] Froidefond J M, Gardel L, Guiral D, et al. Spectral remote sensing reflectances of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence[J]. Remote sensing of Environment, 2002, 80: 225~232.
- [18] 邓明, 黄伟, 李炎. 珠江口悬浮泥沙遥感数据集[J]. 海洋与湖泊, 2002, 4: 341~350.
- [19] 潘德炉, 李淑菁. 卫星海洋水色遥感信息特征量的研究[J]. 遥感学报, 1998, 2(1): 26~31.
- [20] 温令平. 伶仃洋悬浮泥沙遥感定量分析[J]. 水运工程, 2001, 32(9): 9~17.
- [21] 宋立松, 陈武, 向卫华, 等. 基于粗糙集的杭州湾含沙量遥感模型[J]. 水利学报, 2004, 5: 58~63.
- [22] 乐华福, 林寿仁, 赵太初, 等. 近海 II 类海水反射率与表面悬浮泥沙相关性的研究[J]. 国土资源遥感, 2000, 1: 34~43.
- [23] 田庆久, 郑兰芬, 童庆禧. 基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法[J]. 应用气象学报, 1998, 4: 456~461.
- [24] 李炎, 李京. 基于海面一传感器光谱反射率斜率传递现象的悬浮泥沙遥感算法[J]. 科学通报, 1999, 44(17): 1892~1898.
- [25] 唐军武, 田国良. 水色光谱分析与多成份反演算法[J]. 遥感学报, 1997, 1(4): 252~256.
- [26] 陈涛, 李武, 吴曙初. 悬浮泥沙浓度与光谱反射率峰值波长红移的相关关系[J]. 海洋学报, 1994, 16: 38~43.
- [27] 黄海军, 李成治, 郭建军. 黄河口海域悬沙光谱特征的研究[J]. 海洋科学, 1994, 5: 40~45.
- [28] 傅克付, 荒川久幸, 曾宪模. 悬沙水体不同波段反射比的分布特征及悬沙量估算实验研究[J]. 海洋学报, 1999, 21(3): 134~140.
- [29] 韩震, 恽才兴, 蒋雪中. 悬浮泥沙反射光谱特性实验研究[J]. 水利学报, 2003, 327(12): 118~122.
- [30] 陈鸣, 李士鸿, 刘小靖. 长江口悬浮泥沙遥感信息处理和分析[J]. 水利学报, 1991, 5: 47~51.
- [31] 李四海. 近海海洋水色遥感机理及其应用[D]. 上海: 华东师范大学博士论文, 2001: 36~40.
- [32] 何青, 恽才兴等. 长江口表层水体悬浮泥沙浓度场遥感分析[J]. 自然科学进展, 1999, 9(2): 160~164.
- [33] 李京. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 数据监测杭州湾海域的悬浮泥沙含量[J]. 海洋学报, 1987, 9(1): 132~135.
- [34] 黎夏. 悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用[J]. 环境遥感, 1992, 7(2): 106~114.
- [35] 王荣, 唐伶俐, 戴昌达. MODIS 数据在测量地物辐射亮度和反射率特性中的应用[J]. 遥感信息, 2002: 21~25.
- [36] Richard L., Miller, etc. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters[J]. Remote sensing of Environment, 2004, 93: 259~266.

近岸Ⅱ类水体表层悬浮泥沙浓度遥感模式研究进展

作者: [刘志国](#), [周云轩](#), [蒋雪中](#), [沈芳](#), [LIU Zhi-guo](#), [ZHOU Yun-xuan](#), [JIANG Xue-zhong](#), [SHEN Fang](#)

作者单位: [刘志国, 蒋雪中, 沈芳, LIU Zhi-guo, JIANG Xue-zhong, SHEN Fang \(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海, 200062\)](#), [周云轩, ZHOU Yun-xuan \(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海, 200062; 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春, 130026\)](#)

刊名: [地球物理学进展](#) **ISTIC PKU**

英文刊名: [PROGRESS IN GEOPHYSICS](#)

年, 卷(期): 2006, 21(1)

被引用次数: 18次

参考文献(36条)

1. [赵英时](#) [遥感应用分析原理与方法](#) 2003
2. [朱振海; 黄晓霞; 李红晔](#) [中国遥感的回顾与展望](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2002(02)
3. [陈述彭](#) [遥感大辞典](#) 1990
4. [A Morel L Prieur](#) [Analysis of variation in ocean color](#) 1977
5. [Gordon H R; Morel A](#) [Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery](#)
6. [Sathyendranath S](#) [Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically complex, Waters](#) 2000
7. [李四海; 恽才兴](#) [河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究](#)[期刊论文]-[遥感学报](#) 2000(02)
8. [刘闯; 葛成辉](#) [美国对地观测系统\(EOS\)中分辨率成像光谱仪\(MODIS\)遥感数据的特点与应用](#)[期刊论文]-[遥感信息](#) 2000(0q)
9. [浦瑞良; 宫鹏](#) [高光谱遥感及其应用](#) 2000
10. [Richard L; Miller](#) [Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters](#)[外文期刊] 2004(1/2)
11. [Lira J; Morales A; Zamora F](#) [Study of sediment distribution in the area of the Panuco River plume by means of remote sensing](#)[外文期刊] 1997(01)
12. [Forget; Philippe; Ouillon](#) [Surface suspended matter off the Rhone river mouth from visible satellite imagery](#) 1998(06)
13. [Hu Chuanmin; Carder Kendall L; Muller Karger; Frank E](#) [Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal Waters](#) 2000(02)
14. [Ruhl C A](#) [Combined use of remote sensing and continuous monitoring to analyse the variability of suspended-sediment concentration in san francisco bay california](#)[外文期刊] 2001
15. [Bowers D G; Gaffney S; White M](#) [Turbidity in the southern Irish Sea](#)[外文期刊] 1998(05)
16. [David Doxaran](#) [Spectral signature of highly turbid waters Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations](#)[外文期刊] 2002(1)
17. [Froidefond J M; Gardel L; Guiral D](#) [Spectral remote sensing reflectances of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence](#)[外文期刊] 2002
18. [邓明; 黄伟; 李炎](#) [珠江口悬浮泥沙遥感数据集](#)[期刊论文]-[海洋与湖沼](#) 2002(4)
19. [潘德炉; 李淑菁](#) [卫星海洋水色遥感信息特征量的研究](#)[期刊论文]-[遥感学报](#) 1998(01)

20. [温令平](#) [伶仃洋悬浮泥沙遥感定量分析](#)[期刊论文]-[水运工程](#) 2001(09)
21. [宋立松](#); [陈武](#); [向卫华](#) [基于粗糙集的杭州湾含沙量遥感模型](#)[期刊论文]-[水利学报](#) 2004(5)
22. [乐华福](#); [林寿仁](#); [赵太初](#) [近海II类海水反射率与表面悬浮泥沙相关性的研究](#)[期刊论文]-[国土资源遥感](#) 2000(1)
23. [田庆久](#); [郑兰芬](#); [童庆禧](#) [基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法](#) 1998(04)
24. [李炎](#); [李京](#) [基于海面-遥感器光谱反射率斜率传递现象的悬浮泥沙遥感算法](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 1999(17)
25. [唐军武](#); [田国良](#) [水色光谱分析与多成份反演算法](#)[期刊论文]-[遥感学报](#) 1997(04)
26. [陈涛](#); [李武](#); [吴曙初](#) [悬浮泥沙浓度与光谱反射率峰值波长红移的相关关系](#) 1994
27. [黄海军](#); [李成治](#); [郭建军](#) [黄河口海域悬沙光谱特征的研究](#) 1994
28. [傅克付](#); [荒川久幸](#); [曾宪模](#) [悬沙水体不同波段反射比的分布特征及悬沙量估算实验研究](#) 1999(03)
29. [韩震](#); [恽才兴](#); [蒋雪中](#) [悬浮泥沙反射光谱特性实验研究](#)[期刊论文]-[水利学报](#) 2003(12)
30. [陈鸣](#); [李士鸿](#); [刘小靖](#) [长江口悬浮泥沙遥感信息处理和分析](#)[期刊论文]-[水利学报](#) 1991
31. [李四海](#) [近海海洋水色遥感机理及其应用](#)[学位论文] 2001
32. [何青](#); [恽才兴](#) [长江口表层水体悬浮泥沙浓度场遥感分析](#)[期刊论文]-[自然科学进展](#) 1999(02)
33. [李京](#) [利用NOAA卫星的AVHRR数据监测杭州湾海域的悬浮泥沙含量](#) 1987(01)
34. [黎夏](#) [悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用](#) 1992(02)
35. [王荣](#); [唐伶俐](#); [戴昌达](#) [MODIS数据在测量地物辐射亮度和反射率特性中的应用](#)[期刊论文]-[遥感信息](#) 2002(3)
36. [Richard L; Miller](#) [Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters](#)[外文期刊] 2004(1/2)

本文读者也读过(10条)

1. [姜杰](#). [JIANG Jie](#) [利用遥感反演悬浮泥沙浓度的方法研究](#)[期刊论文]-[海洋地质动态](#)2006, 22(9)
2. [张春桂](#). [张星](#). [陈敏艳](#). [潘卫华](#). [曾银东](#). [ZHANG Chun-gui](#). [ZHANG Xing](#). [CHEN Min-yan](#). [PAN Wei-hua](#). [ZENG Yin-dong](#) [福建近岸海域悬浮泥沙浓度遥感定量监测研究](#)[期刊论文]-[自然资源学报](#)2008, 23(1)
3. [李洪灵](#). [张鹰](#). [姜杰](#). [LI Hong-ling](#). [ZHANG Ying](#). [JIANG Jie](#) [基于遥感方法反演悬浮泥沙分布](#)[期刊论文]-[水科学进展](#)2006, 17(2)
4. [陶菲](#). [张鹰](#). [王晶晶](#). [张芸](#). [TAO Fei](#). [ZHANG Ying](#). [WANG Jing-jing](#). [ZHANG Yun](#) [悬浮泥沙浓度遥感反演模式研究](#)[期刊论文]-[海洋工程](#)2007, 25(4)
5. [钟凯文](#). [刘旭拢](#). [解靛](#). [孙彩歌](#) [基于遥感方法反演珠江三角洲河段悬浮泥沙分布研究](#)[会议论文]-2008
6. [张芸](#). [张鹰](#). [王晶晶](#). [ZHANG Yun](#). [ZHANG Ying](#). [WANG Jing-jing](#) [悬浮泥沙浓度遥感反演模型研究](#)[期刊论文]-[海洋科学](#)2008, 32(5)
7. [廖迎娣](#) [基于SeaWiFS遥感技术的中国东部沿海海区悬沙含量研究](#)[学位论文]2008
8. [刘治国](#). [周云轩](#). [沈芳](#). [LIU Zhi-guo](#). [ZHOU Yun-xuan](#). [SHEN Fang](#) [河口水体泥沙浓度的水面光谱统计模式分析](#)[期刊论文]-[水利学报](#)2007, 38(7)
9. [刘慧慧](#) [河北曹妃甸地区近海表层悬浮泥沙浓度的遥感反演与分析](#)[学位论文]2009
10. [吴传庆](#). [杨志峰](#). [王桥](#). [申文明](#). [孙仲平](#). [熊文成](#). [WU Chuan-qing](#). [YANG Zhi-feng](#). [WANG Qiao](#). [SHEN Wen-ming](#). [SUN Zhong-ping](#). [XIONG Wen-cheng](#) [泥沙浓度的动态峰反演方法](#)[期刊论文]-[遥感技术与应用](#)2008, 23(5)

引证文献(17条)

1. [卢克](#) [河口悬浮泥沙浓度遥感反演模型的探讨](#)[期刊论文]-[浙江水利水电专科学校学报](#) 2012(3)
2. [樊彦国](#). [孟志河](#). [张磊](#). [刘复生](#). [朱浩](#) [基于遥感光谱反射率反演黄河口海域II类水体悬浮泥沙浓度模型](#)[期刊论文]-

3. 王贵彪, 蔡丽娜. [水体光谱分析法在解译中的应用](#) [期刊论文] - [测绘与空间地理信息](#) 2011(6)
4. 江辉, 周文斌, 刘小真. [基于RBF神经网络的鄱阳湖表层水体总悬浮颗粒物浓度遥感反演](#) [期刊论文] - [生态环境学报](#) 2010(12)
5. 刘茜, David G Rossiter. [基于高光谱数据和MODIS影像的鄱阳湖悬浮泥沙浓度估算](#) [期刊论文] - [遥感技术与应用](#) 2008(1)
6. 左书华, 杨华, 赵群, 赵洪波. [温州海区近岸表层水体悬沙分布及运动规律的遥感分析](#) [期刊论文] - [地理与地理信息科学](#) 2007(2)
7. 许勇, 张鹰, 张东. [基于Hyperion影像的悬浮泥沙遥感监测研究](#) [期刊论文] - [光学技术](#) 2009(4)
8. 王繁, 周斌, 徐建明, 宋立松, 王新. [杭州湾悬浮泥沙浓度垂向分布规律分析与模拟](#) [期刊论文] - [浙江大学学报\(工学版\)](#) 2008(11)
9. 潘进, 丁贤荣, 康彦彦, 葛小平, 李森. [辐射沙脊群海域悬沙场遥感反演方法](#) [期刊论文] - [地理空间信息](#) 2013(2)
10. 许勇, 成长春, 张鹰, 张东. [基于MODIS影像的射阳河口海域可溶性无机氮磷营养盐浓度遥感监测研究](#) [期刊论文] - [海洋通报](#) 2012(6)
11. 孙凤琴. [厦门环东海域整治过程悬浮泥沙变化遥感监测](#) [期刊论文] - [厦门理工学院学报](#) 2009(2)
12. 左书华, 李蓓, 杨华. [长江口南汇嘴海域表层悬浮泥沙分布和运动遥感分析](#) [期刊论文] - [水道港口](#) 2010(5)
13. 刘小丽, 沈芳, 朱伟健, 刘曦. [MERIS卫星数据定量反演长江河口的悬沙浓度](#) [期刊论文] - [长江流域资源与环境](#) 2009(11)
14. 刘王兵, 于之锋, 周斌, 蒋锦刚, 潘玉良, 凌在盈. [杭州湾HJ CCD影像悬浮泥沙遥感定量反演](#) [期刊论文] - [遥感学报](#) 2013(4)
15. LI Jing, GAO Shu, WANG Yaping. [Delineating suspended sediment concentration patterns in surface waters of the Changjiang Estuary by remote sensing analysis](#) [期刊论文] - [海洋学报\(英文版\)](#) 2010(4)
16. 李婧, 高抒, 汪亚平. [长江口水域悬沙含量时空变化卫星遥感定量研究方法探讨](#) [期刊论文] - [海洋学报\(中文版\)](#) 2009(4)
17. 刘王兵, 于之锋, 周斌, 蒋锦刚, 潘玉良, 凌在盈. [杭州湾HJ CCD影像悬浮泥沙遥感定量反演](#) [期刊论文] - [遥感学报](#) 2013(4)

引用本文格式: 刘志国, 周云轩, 蒋雪中, 沈芳, LIU Zhi-guo, ZHOU Yun-xuan, JIANG Xue-zhong, SHEN Fang. [近岸II类水体表层悬浮泥沙浓度遥感模式研究进展](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2006(1)