

文章编号: 1007 4619 (2006) 06 0910 07

黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析

巩彩兰, 尹 球, 匡定波

(中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 利用地物光谱测量技术及同步配套的常规水质采样分析实验, 对上海市黄浦江全河段水体进行调查研究。共选取 31 个典型站位进行了光谱测量和同步水质取样, 每个测点分析了 9 个水质指标, 包括 TP, TN, COD_{Mn} , COD_{Cr} , NH_3-N , BOD_5 , DO, 悬浮物浓度和浊度。各水质参数之间存在较大的相关性, 以总氮 (TN) 和悬浮物浓度两个水质指标为例, 分析了这两个水质指标与单波段归一化反射率、反射率的一阶微分、不同波段之间反射率的比值以及反射率取对数等之间的相关关系, 给出了以上两个水质指标的单波段归一化反射率、一阶微分反射率识别的特征波段, 以及两个波段比值的最佳波段组合。建立了常规水质参数与水体光谱反射率之间的关系模型, 为利用遥感技术监测水环境提供了基础。

关键词: 光谱反射率; 黄浦江; 水质指标

中图分类号: TP79 文献标识码: A

Correlations Between Water Quality Indexes and Reflectance Spectra of Huangpujiang River

GONG Cai lan, YIN Qiu, KUANG Ding bo

(Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences Shanghai 200083, China)

Abstract: This study was conducted to establish correlations between reflectance spectra and water quality indexes of the Huangpujiang River of Shanghai, sampled in August and November of 2002. 31 typical stations were selected to measure the spectral reflectance and 9 water quality parameters were analyzed for every measured stations, including Total Phosphorous (TP), Total Nitrogen (TN), Chemical Demand Oxygen with potassium permanganate (COD_{Mn}) and with chromate (COD_{Cr}), Dissolved Oxygen (DO), Biological Demand Oxygen (BOD_5), Suspended Sediments and Turbidity. With significant correlation between the nine water quality indexes, TN and suspended sediment concentration were selected, then the paper mainly analyzed the correlations between the two water quality indexes and the normalized reflectance, its logarithm, derivative spectrum, and the ratio of spectral reflectance at different bands. The characterized bands were analyzed for the two water quality parameters with single band normalized spectral reflectance and the first derivative reflectance, and the linear models were built between the water quality parameters and the spectral reflectance ratios of different band, all these models had the good correlation coefficient of more than 0.75 between the two parameters and the spectra reflectance.

Key words: spectral reflectance; Huangpujiang River; water quality index

收稿日期: 2005 07 15; 修订日期: 2005 10 10

基金项目: 国家自然科学基金 (40271084), 国家 863 计划 (2002AA130010 1 4), 及上海市科技发展基金 (011661077, 02DZ15001, 02DZ15002) 项目资助。

作者简介: 巩彩兰 (1974—), 女, 副研究员, 2002 年毕业于华东师范大学自然地理专业 (理学博士)。现主要从事水环境高光谱遥感应用研究, 已发表论文 10 多篇。E-mail: gclsxw@163.com。

1 引言

遥感技术具有宏观、快速、周期性等优势,作为水环境监测的手段,遥感技术日益受到重视。随着 20 世纪 80 年代成像光谱技术的出现,高光谱遥感技术作为对地观测技术的重大突破,正日益显示出重要的实用价值^[1],航空成像光谱遥感用于识别和估算水域中的叶绿素及悬浮物含量等方面的研究取得了较大成功^[2-7]。

随着定量遥感技术的发展与遥感应用的逐步深入,地物波谱数据愈加显示出其在遥感领域的重要技术支撑作用,充分理解水体中各水质指标的光谱响应特征,是遥感方法定量研究水环境的基础。近年来,国内外有不少学者开展了基于实测地物光谱的湖泊水质遥感定量研究工作^[8-11],这些工作主要集中在研究与内陆湖泊富营养化有关的叶绿素浓度与光谱反射特征的关系方面,对内陆河流的实测地物光谱特征与水质指标的定量研究少见报道。

黄浦江是上海的母亲河,作为上海市主要的饮用水源,其水质状况受到广泛的关注。本次研究的目的是通过系统分析实测水质指标与光谱反射率特征在不同河段的变化情况,以及所测各水质指标之间的相关分析,重点研究悬浮物浓度和总氮(TN)与光谱反射率之间的关系,建立黄浦江水面光谱反射率与水质参数的相关关系模型,为利用高光谱遥感技术反演水质状况提供理论模型。

2 实验情况

2002 年夏季和秋季,共选取 31 个测点(图 1),进行覆盖黄浦江全河段及淀山湖水面的光谱反射率与同步水质测量。光谱测量采用美国 GER 公司生产的 GER1500 型地物光谱测量仪,仪器光谱范围 350—1050 nm,光谱分辨率 3 nm,视场角 0.3°。选择晴朗无风天气,测量时间为上午 10 点至下午 2 点之间,传感器探头垂直向下测量,通过测量参考板的辐照度与目标的辐照度获得目标的光谱反射率值。每一个测点至少测量 9 次光谱反射率,在室内处理光谱数据时对 9 个测量值进行平均,得到水面光谱反射率平均值,作为该测点的光谱反射率值。除水温外,水样在外场试验结束后立即送往水环境分析中心,按有关国家标准(GB 3838 2002)^[12]分析其他 9 个水质指标。两次测量分析 10 个水质指标及其变

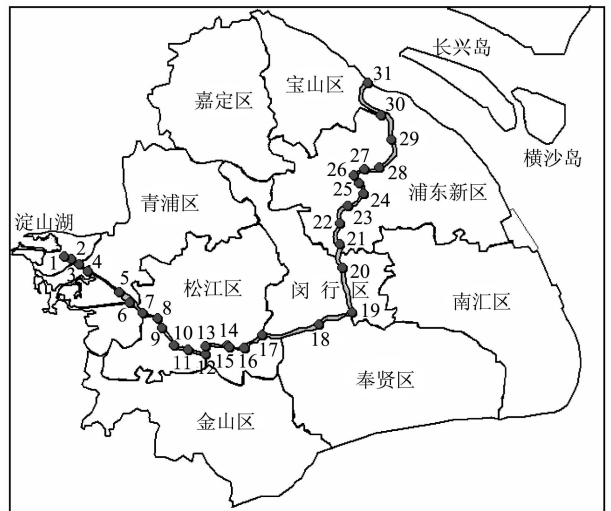


图 1 各测点站位分布示意图

Fig 1 Sketch map of the location of 31 measuring points

化范围的情况见表 1。

表 1 实验测量黄浦江水体主要水质指标分布范围

Table 1 Upper and lower values of the ten water quality indexes measuring from two experiments in Huangpujiang River

水质指标	参数范围
水温 / $^{\circ}\text{C}$	14.8—30
浊度 / $^{\circ}\text{C}$	30—257
悬浮物浓度 / (mg/D)	4.2—110
NH_3N / (mg/D)	0.33—1.84
TN / (mg/D)	1.24—4.32
TP / (mg/D)	0.106—0.536
DO / (mg/D)	0.7—8.2
BOD_5 / (mg/D)	1.9—10.3
COD_{Cr} / (mg/D)	8—43
COD_{Mn} / (mg/D)	4.8—8.3

3 数据处理与分析

3.1 数据处理方法

本次研究主要采用统计分析方法,利用实验获取的光谱反射率数据与水质参数,通过分析,分别建立各水质参数与归一化光谱反射率、光谱反射率的比值、光谱反射率的对数值以及光谱反射率一阶微分之间的一元线性回归方程。利用 MATLAB6.5 软件的统计分析模块,采用最小二乘法求线性回归方

程的系数,以 F 概率作为判据,判断在检验的显著性水平 ≤ 0.05 时,各水质指标与光谱反射率的各种变化形式之间的相关系数。

3.2 各水质指标之间的相关关系

首先,对除温度之外的实验测量的 9 个水质指标进行相关分析,图 2 为各水质指标之间相关系数大于 0.6 的网状图。由该图可以发现某些指标之间存在较好的相关关系,从而可以推断引起黄浦江水

质变化的污染源的类型。由图 2 还可见,与某一指标负相关的两个水质指标必然存在正相关,如 BOD_5 与 COD_{Mn} 均与 DO 值负相关,则 BOD_5 与 COD_{Mn} 之间存在较好的正相关。有 4 个水质指标与悬浮物浓度相关系数大于 0.6,同样,也有 4 个指标与 BOD_5 相关系数大于 0.6,其中,尤以总磷和悬浮物浓度的正相关系数比较高 ($r=0.851$), BOD_5 与 DO 值之间的负相关较好 ($r=-0.852$)。TN 仅与 COD_{Mn} 一个水质指标相关系数较高 ($r=0.692$)。

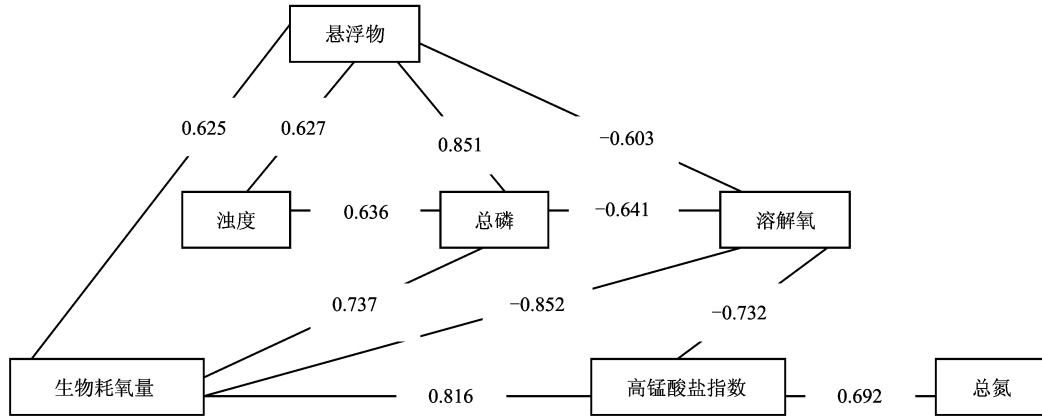


图 2 实验测量各水质指标之间相关系数网状图

Fig 2 Netty map of the correlation among seven water quality indexes

本次研究主要分析悬浮物浓度和 TN 两个水质指标与光谱反射率的相关关系。研究黄浦江水体悬浮物浓度的光谱响应特征具有很重要的意义,由于黄浦江在吴淞口与长江交汇,受长江口涨、落潮影响,黄浦江水体的悬浮物浓度会发生较大的变化,因长江水体悬浮物浓度很高,但水质好于黄浦江水体水质,因此,悬浮物浓度的变化对黄浦江水体的水质有较大影响。多年水质监测资料表明,黄浦江水体以总氮、总磷污染为主,而总磷又与悬浮物浓度相关性高 ($r=0.851$),因此这里选择总氮研究其光谱响应特征,能够反应黄浦江水体的主要污染物的光谱特征。

3.3 水质指标与单波段归一化反射率之间的相关分析

在进行水体光谱测量时,天气条件等背景环境的变化及测量角度的不同都会对所测反射率数值的大小产生影响。为了便于不同采样点光谱值之间的比较,对每条反射光谱利用其在可见光范围 (400—750nm) 的波段反射率平均值进行归一化,然后再研究归一化后各波段的反射率与水质指标之间的关

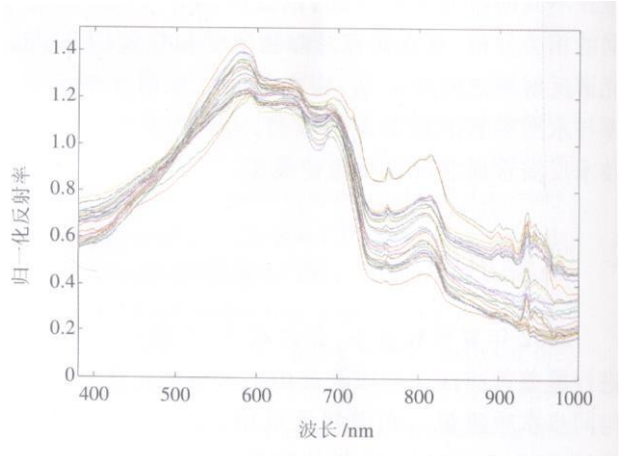


图 3 黄浦江 31 个站点归一化水体光谱反射率曲线

Fig 3 The spectral reflectance of 31 points in Huangpujiang River

系^[1]。归一化反射率曲线见图 3,由反射率归一化数据曲线可见,黄浦江从上游至下游的光谱反射率,有两个比较明显的反射峰,580—700nm 附近为一个较宽的反射峰,反射率从 580—700nm 呈下降趋势,其中,580—590nm 为一个较高的反射峰,600—

650nm 反射率变化较小, 675nm 附近有个小的吸收峰, 到 700nm 附近光谱反射率开始下降。805—816nm 附近为另一个较明显的反射峰, 但该反射峰的光谱反射率值较前一个反射峰小。

悬浮物浓度和总氮 (TN) 与各波段归一化反射率的相关系数曲线如图 4 所示。由图 4 可见, 悬浮物浓度与归一化反射率在 455 08—650 17nm 附近为负相关, 最大负相关出现在 533 38nm 附近, $r = -0.70$; 悬浮物浓度与归一化反射率在 711 87—918 07nm 之间正相关系数最大, 且变幅不大, r 取值在 0.57—0.65 之间。总氮与归一化反射率在 538 21—715 02nm 之间负相关, 其中, 在 654 94nm 出现最大负相关系数 $r = -0.8064$, 正相关系数增至 740 12—775 97nm 之间变化趋缓, r 约为 0.20, 806 9nm 有一个小的反射谷, 之后正相关系数又呈

上升趋势。图 5 分别为与悬浮物浓度和总氮相关系数最大的单波段归一化反射率的线性回归模型。

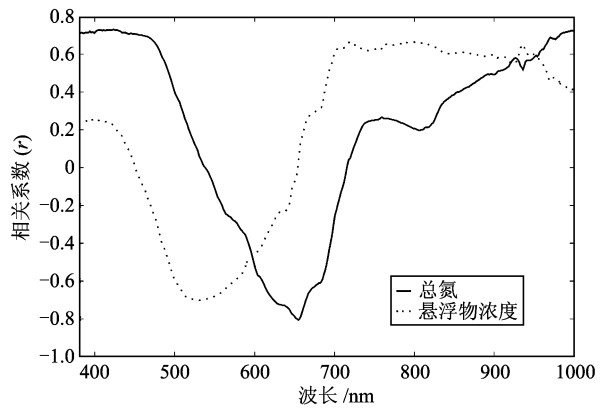
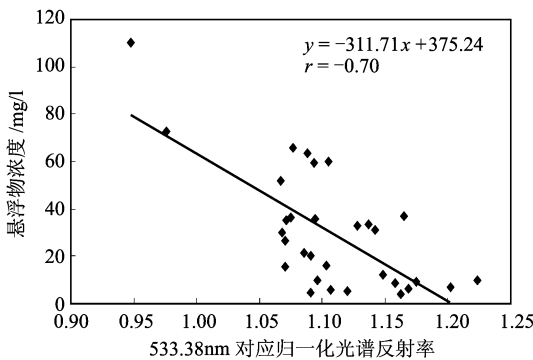
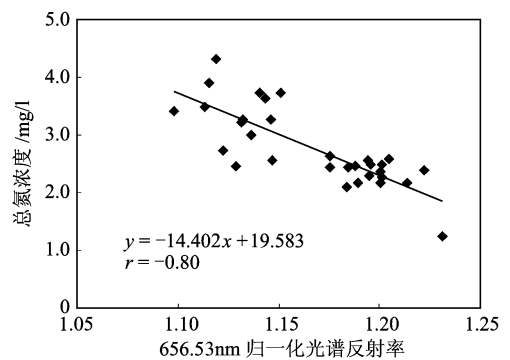


图 4 归一化反射率与水质指标之间的相关系数曲线
Fig 4 The correlation between two water quality indexes and the normalized reflectance



(a)



(b)

图 5 水质指标与特征波段归一化反射率的线性模型

(a) 悬浮物浓度; (b) 总氮

Fig 5 Linear models between the water quality parameters and the normalized spectral reflectance at the diagnostic wave bands

(a) Total suspended sediments (b) Total Nitrogen (TN)

3.4 水质指标与归一化反射率一阶微分之间的相关关系分析

为了进一步研究光谱反射率与各水质指标之间的关系, 将两次测量的 31 组数据作为一个样本, 在分别进行光谱反射率微分、取对数、比值运算等的基础上, 研究光谱反射率与水质指标之间的相关关系。因反射率数据为离散数据, 采用与所求微分波段相邻的两波段的反射率之差除以波长之差作为该波段的反射率微分值, 表达式为:

$$D_i = (R_{i+1} - R_{i-1}) / (\text{Band}_{i+1} - \text{Band}_{i-1}) \quad (1)$$

式中, D_i 表示 i 波段对应的光谱反射率取微分, R_{i+1} 和 R_{i-1} 分别表示第 $i+1$ 和第 $i-1$ 波段对应的光谱反射率, Band_{i+1} 和 Band_{i-1} 表示第 $i+1$ 和第 $i-1$ 波段对应的

波长。对所有波长归一化反射率求微分如图 6 所示。

各波段归一化反射率的一阶微分与悬浮物浓度和 TN 相关系数较大的波段见图 7。由图 7 可见, 归一化反射率一阶微分与悬浮物浓度相关系数大于 0.80 的波段为 586 37nm, 而与 TN 复相关系数大于 0.70 的波段有 886 33nm, 887 85nm, 872 68nm 和 881 78nm 等波段。由此可见, 悬浮物浓度的特征波段在可见光的蓝光波段附近, 而总氮的特征波段在近红外波段。

3.5 水质指标与归一化反射率取对数之间的相关关系分析

悬浮物浓度和总氮 (TN) 与归一化反射率数据取对数所得数据进行统计分析, 其相关关系如图 8 所示。

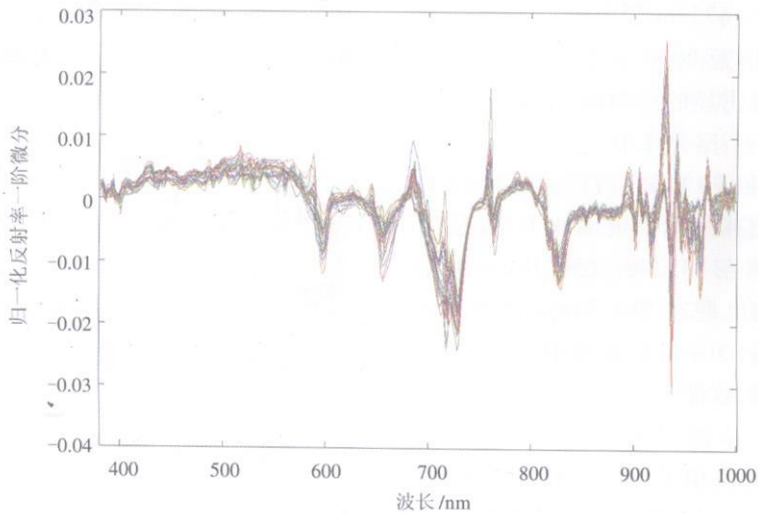


图 6 归一化反射率的一阶微分曲线

Fig 6 First derivative of the normalized spectral reflectance

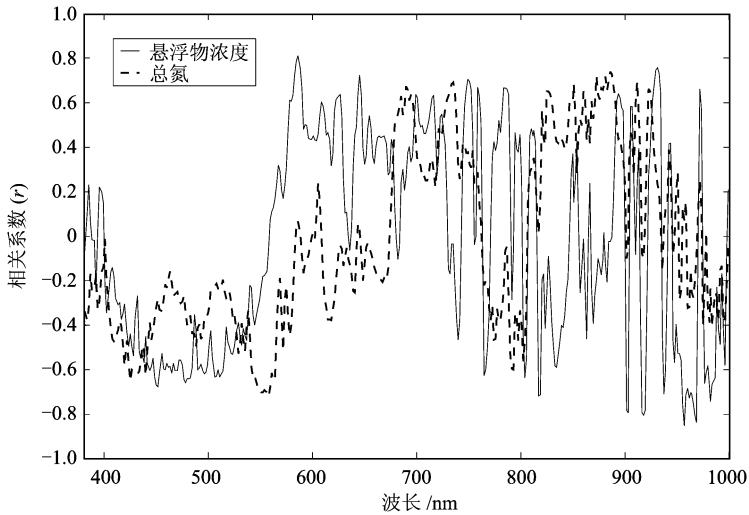


图 7 水质指标与各波段归一化反射率的一阶微分相关系数曲线图

Fig 7 Relationship between the two water quality indexes and the first derivative spectral reflectance

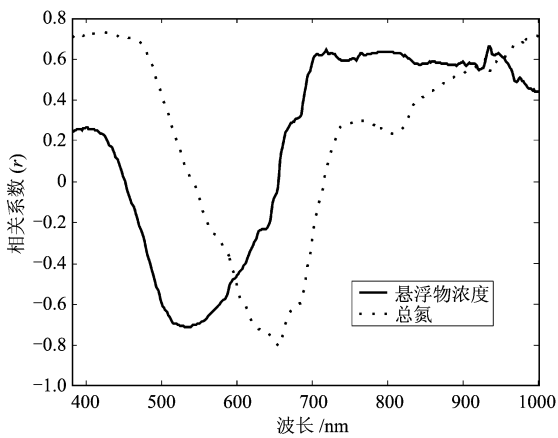


图 8 归一化反射率取对数与各水质指标的相关系数曲线

Fig 8 Relationship between the logarithm of the normalized spectral reflectance and the water quality indexes

两个水质指标与归一化反射率对数的相关系数曲线在 800nm 之前形状基本一致,只是最大相关系数出现的位置不同,800nm 之后,与总氮的相关系数呈直线上升,而与悬浮物浓度相关系数曲线在 930nm 有小的波峰,之后呈下降趋势。相对于单波段归一化反射率,取对数之后与水质指标的相关关系并没有明显的提高。

3.6 水质指标与归一化反射率比值之间的相关关系分析

将波长从 350—1000nm 的所有波段反射率的两两比值与各水质指标进行相关分析,得到与水质指标相关系数最大的波段反射率比值如图 9 和图 10 所示。从图中相关系数等高线可以看出,两个反射率波

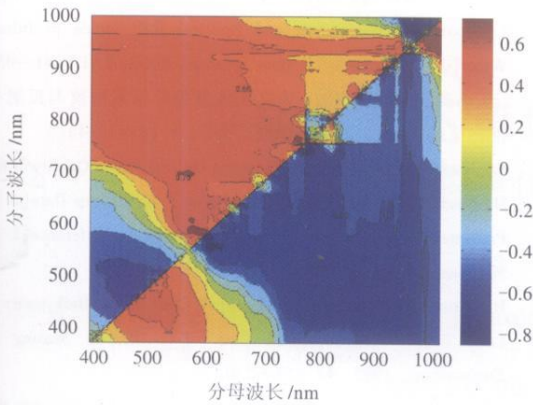


图9 悬浮物浓度与各波段比值的相关系数分布图
Fig.9 Relationship between the suspended sediment content and the ratio of the different band spectral reflectance

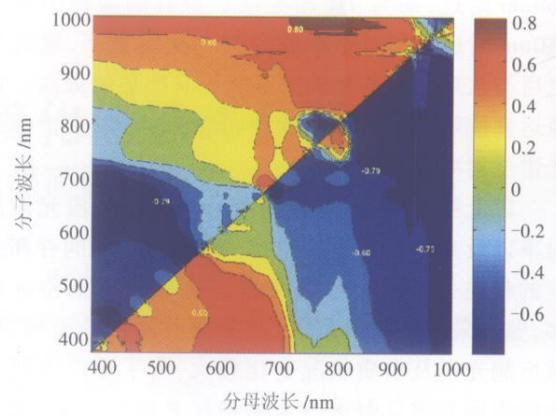


图10 总氮与各波段比值的相关系数分布图
Fig.10 Relationship between the TN and the ratio of the different band spectral reflectance

段比值与悬浮物浓度和总氮两个指标相关系数的绝对值最大的分子波长和分母波长,表 2 给出了水质参数与反射率比值相关性较大的波段位置及其线性模型。

从图 9和图 10可以看出,两个水质指标与各波段比值的相关系数等值线分布特征有较大区别。对于悬浮物浓度而言,与 950nm之后两波段的反射率比值正相关系数较大,与 580nm附近两波段的反射率比值出现最大负相关。对于总氮而言,分母波长

670—1000nm与分子波长在 960nm之后的光谱反射率比值,正相关系数最大 ($r>0.8$);负相关最大的位置分布在分子波长 550—720nm,分母波长 400—580nm之间,以及,分子波长 550—900nm,分母波长 800—900nm之间。由此可见,两波段比值的波长位置均为与水质指标相关性较大的单波段,通过两波段反射率相比,可以消除部分噪声,增强信息量,从而与水质指标的相关性较单波段光谱反射率有所提高。

表 2 反射率比值与水质参数之间的线性关系模型

Table 2 Linear models between the spectral reflectance ratios and the water quality parameters

水质参数 (y)	分子波长 /nm	分母波长	线性模型	相关系数 (r)
悬浮物浓度	964.7	981.2	$y=327.32x-309.9$	0.82
	581.57	589.57	$y=-1971.9x+2000.3$	-0.80
总氮	970.71	822.29	$y=3.86x+0.94$	0.81
	568.75	538.21	$y=-29.41x+29.13$	-0.79

4 结果与讨论

水体实验数据分析表明,各水质指标之间存在一定相关关系,因此,在分析水质指标与光谱反射率时,可以选择相关系数较高的几个指标中的一个进行分析,基于各水质指标之间的相关分析,并考虑到黄浦江水体的主要污染特征,本次工作分析了悬浮物浓度和总氮两个水质指标与光谱反射率的相关关系。

分析水面光谱反射率测量实验数据后知道,黄

浦江水体表面光谱反射率具有一些共同的特征,584.77nm,699.27nm,817.68nm和936.15nm为明显的反射峰,605.56nm,677.14nm,757.30nm和904.49nm为明显的反射谷。

单波段光谱反射率与水质指标相关分析结果表明,总氮的特征波段为656.53nm;悬浮物浓度的特征波段为533.38nm,711.87—918.07nm之间的光谱反射率与悬浮物浓度的相关系数变化不大,约为0.7。

进一步分析归一化反射率光谱一阶微分、对数、比值与水质指标的关系,结果表明:归一化反射率的一阶微分与悬浮物浓度相关系数最高的位置在

580nm附近,而与 TN相关系数最好的波段出现在 880nm附近。相对于单波段归一化反射率,取对数之后与水质指标的相关关系并没有明显的提高。比值运算能够抑制一部分噪声,从而提高水质指标与光谱反射率的相关系数。

以上结果表明,各水质指标与不同波段光谱反射率以及光谱反射率的微分、对数、比值之间存在一定的关系。而影响黄浦江水体的污染指标较多,鉴于采样时间不同,以及采样时潮情等差异,导致所测光谱及水质状况变化较大,为了更好地研究水体表面光谱反射率与水质指标之间的关系,需要在测量条件如光照、潮情等近似一致的情况下,多次测量获得样本,进行更准确的分析,同时,结合航天和航空遥感图像进行定性解译与定量分析,从而更好地利用遥感手段,全面、客观地监测水质及水环境变化情况。

参 考 文 献 (References)

- [1] Chen S P, Tong Q X, Guo H D. Remote Sensing Information Mechanism Study [M]. Beijing: Science Press, 1998. [陈述彭,童庆禧,郭华东. 遥感信息机理研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [2] George D G. The Airborne Remote Sensing of Phytoplankton Chlorophyll in the Lakes and Tams of the English Lakes District [J]. Int J. Remote Sensing, 1997, 18: 1961—1975.
- [3] Fraser R N. Hyperspectral Remote Sensing of Turbidity and Chlorophyll a Among Nebraska Sand Hill Lakes District [J]. Int J. Remote Sensing, 1998, 19: 1579—1589.
- [4] Thiemann S, Kaufmann H. Lake Water Quality Monitoring Using Hyperspectral Airborne Data: A Semiempirical Multisensor and Multitemporal Approach For the Mecklenburg Lake District Germany [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 228—237.
- [5] Shu X Z, Yin Q, Kuang D B. Relationships Between Algal Chlorophyll Concentration and Spectral Reflectance of Inland Water [J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4 (1): 41—45. [疏小舟,尹球,匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系 [J]. 遥感学报, 2000, 4 (1): 41—45.]
- [6] Saunders J S, Jupp D L B. Mapping Optical Water Quality of the Hawkesbury River Using CASIA Airborne Spectrometer Data [A]. Presented at the 7th Australian Remote Sensing Conference [C]. Melbourne Australia March 1—4, 1994.
- [7] Hamilton M K. Estimating Chlorophyll Content and Bathymetry of Lake Tahoe Using AVIRIS Data [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44: 217—230.
- [8] Islam M R, Yamaguchi Y, Ogawa K. Suspended Sediment in the Ganges and Brahmaputra Rivers in Bangladesh: Observation from TM and AVHRR Data [J]. J. Hydrol. Process, 2001, 15: 493—509.
- [9] Yin Q, Su X Z, Xu Z A, et al. Analysis on the Ultra Spectral Characteristics of Water Environmental Parameters about Lake [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23 (6): 427—430. [尹球,疏小舟,徐兆安等. 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23 (6): 427—430.]
- [10] Li S J, Wu Q, Wang X J, et al. Correlations between Reflectance Spectra and Contents of Chlorophyll a in Chaohu Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14 (3): 228—234. [李素菊,吴倩,王学军等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系 [J]. 湖泊科学, 2002, 14 (3): 228—234.]
- [11] Gitelson A. The Peak Near 700nm on Radiance Spectra of Algae and Water: Relationships of Its Magnitude and Position with Chlorophyll Concentration [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 13 (17): 3367—3373.
- [12] Chinese Environment Protection Rules Compilation Water Quality Analysis Method [M]. Beijing: Chinese Rules Press, 2001. [中国环境保护标准汇编——水质分析方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.]