

文章编号:1001-9014(2006)04-0282-05

黄浦江不同水质指标的光谱响应模型比较研究

巩彩兰¹, 尹球¹, 匡定波¹, 田华²

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 上海市水文总站, 上海 200232)

摘要:对黄浦江全河段进行了光谱反射率和典型水质参数的同步测量, 测量的水质参数包括总磷(TP)、总氮(TN)、溶解氧(DO 值)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD_{Cr})、五日生化需氧量(BOD₅)、悬浮物浓度(TSS)、浊度(Turb)和氨氮(NH₃-N)共 9 个水质指标, 分析了 9 个水质指标之间的相关关系. 研究了单波段归一化反射率与各水质指标的线性关系模型. 结果表明, 单波段光谱反射率与除氨氮和化学需氧量 2 个水质指标之外的其余 7 个水质指标有较好的相关关系, 光谱反射率的比值与水质指标的相关性得到一定提高, 与氨氮和化学需氧量 2 个水质指标的相关系数也大于 0.5.

关键词:黄浦江; 水质指标; 光谱响应模型
中图分类号:X122 **文献标识码:**A

STUDY ON THE SPECTRAL REFLECTIVITY MODELS OF DIFFERENT WATER QUALITY PARAMETERS IN HUANGPU RIVER

GONG Cai-Lan¹, YIN Qiu¹, KUANG Ding-Bo¹, TIAN Hua²

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Shanghai Hydrological Head Station, Shanghai 200232, China)

Abstract: For Huangpu river, spectral reflectivities were measured synchronously with typical water quality parameters, including total phosphor (TP), total nitrogen (TN), dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand with potassium permanganate (COD_{Mn}), chemical oxygen demand with cadmium (COD_{Cr}), biochemical oxygen demand (BOD₅), total suspended sediments (TSS), ammoniac nitrogen (NH₃-N) and turbidity degree (Turb). Relationships between the nine water quality parameters were analyzed. The linear relationship models were studied between water quality parameters and normalized reflectivities. The results show that there are good relationships between the normalized spectral reflectivities and the water quality parameters except for NH₃-N and COD_{Cr}. If the normalized spectral reflectivities are replaced by the ratio of spectral reflectivity at different bands, the relativity will be improved, and the correlative coefficients will be more than 0.5 for NH₃-N and COD_{Cr}.

Key words: Huangpu river; water quality parameter; spectral reflectivity model

引言

城市河流因其具有流动性, 形状狭长, 沿途受到支流等的污染, 对于感潮河流还受到潮汐作用的影响, 因此, 相对于海洋水体和内陆湖泊而言, 河流水质遥感更加复杂. 卫星遥感因其空间分辨率较低而难以满足应用需求, 航空高光谱分辨率遥感具有较高的空间分辨率和光谱分辨率, 对于城市河流水质污染研究具有较大的应用价值. 研究不同水质指标的光谱响应模型可以为遥感图像的水质反演奠定基

础. 近年来, 高光谱技术发展迅速, 国内外已经有很多利用高光谱技术进行海洋和内陆湖泊水环境监测的成功研究, 尹球等^[1,2]分析了湖泊水环境指标的超光谱响应特征, 疏小舟等^[3,4]研究了内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系, 李素菊^[5]等进行了巢湖浮游植物叶绿素 a 含量的高光谱遥感定量估算. 赵冬至等^[6]研究了中国污染水体的光谱特征, 吕恒^[7]等利用反射光谱数据, 模拟 MERIS 数据的波段设置, 建立了太湖悬浮物遥感定量模型, Harma^[8]等运用半经验法对 MODIS 与 MERIS 进行

收稿日期: 2005-08-24, 修回日期: 2006-01-05

Received date: 2005-08-24, revised date: 2006-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(40271084), 国家 863 计划(2002AA130010-1-4)资助项目

作者简介: 巩彩兰(1974-), 女, 山西阳泉人, 副研究员, 主要从事环境遥感应用研究.

波段拟合,来监测芬兰的 85 个湖泊和 105 个沿海水体监测点的水质状况, Darecki^[9] 等在本质上保留 MODIS 的叶绿素经验产品的公式,将实测波罗的海的特殊参变量代入其中,对二类水体叶绿素浓度的反演进行了改良, Barak^[10] 利用机载成像光谱仪 CASI 数据精确绘制 Haifa 湾的叶绿素 a 与悬浮物浓度分布图, Hoogenboon^[11] 通过对 AVIRIS 数据的敏感性分析认为 AVIRIS 数据可以估测内陆水体中的叶绿素,且指出最佳波段组合。

黄浦江水体的水质状况直接关系到上海市人们的生活和上海城市的可持续发展。常规的水质监测方法对于定期获得固定站点的水质数据具有重要意义,遥感技术具有宏观、经济、客观、快速等优势,可以快速获取大面积水体的水质状况。通过本次研究建立的黄浦江不同水质指标的光谱响应模型,应用于高光谱遥感图像的水质反演,可以了解黄浦江水体不同河段的水质状况。

1 数据采集

2002 年 8 月至 2003 年 10 月期间,组织了 9 次黄浦江水面光谱测量实验及配套的同步水体采样分析实验,共 99 个站点光谱和水质分析数据。涉及总磷、溶解氧、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、悬浮物浓度、浊度、总氮、氨氮、化学需氧量、及温度共 10 个主要水质指标。每一个测点至少测量 9 次光谱反射率,用于数据的筛选和平均等处理,从而保证光谱数据可靠性。除水温外,水样在外场试验结束后立即送往国家认证的水环境分析中心,按照有关国家标准分析各项水质指标^[12]。对黄浦江干流全程、重要支流、淀山湖(进口)、长江(出口)进行了系统的光谱测量与采样分析同步试验,获得独一无二、丰富的实测资料,为分析建模提供了良好基础。

2 数据分析方法

在进行水体光谱测量时,天气条件的变化、周围环境的影响以及测量角度的变化都会影响反射率数值的大小。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(400nm ~ 750nm)的波段反射率平均值进行归一化^[13],然后再研究归一化后各波段的光谱反射率与水质指标之间的关系。

相对于单波段光谱反射率,采用不同波长光谱反射率之间的比值运算,可以提高其与水质指标的相关性。同时也可以部分消除光谱测量过程中仪器

本身的性能以及测量环境变化等对测量结果造成的影响,突出某些指标的光谱反射信息。采用穷举法计算所有波段的光谱反射率比值与水质指标的相关系数,并绘制相关系数等值线图,从而建立二者最大相关系数的线性关系模型。

采用统计分析方法进行水质指标之间的关系分析,以及水质指标的光谱响应模型分析。多元统计分析技术是在高光谱水环境研究中最普遍采用的技术,它以光谱数据或它们的变换形式(如原始光谱反射率、归一化光谱反射率、一阶或二阶微分变换、对数变换等)作为自变量,水质参数(如悬浮物浓度、叶绿素-a 浓度、透明度等)作为因变量,建立多元回归估计模型。该方法对不同的数据源需要重新拟合参数,不断调整模型。但由于其使用较灵活,许多研究者采用此类方法来估计水体水质参数^[1-5,14]。本次研究主要采用统计分析的方法,并用最小二乘法拟合水质指标与光谱反射率之间的线性关系模型。

3 各水质指标之间的相关分析

不同地区水污染的来源各不相同,与特定污染源相对应的是某些污染指标之间存在特定的相关性。因此分析水质指标相关性有助于判断污染物的来源。同时,利用污染指标相关公式,通过对一个污染指标的遥感测定,可同时测定与之存在相关关系的污染指标,后者在遥感信号上响应的波长可以与前者不同甚至没有直接响应,从而扩大水质遥感的能力。我们首先对黄浦江各种污染指标进行了相关性分析,结果见表 1 所列。

由上表可以看出,悬浮物浓度、浊度、总磷、生物耗氧量、五日生化需氧量、溶解氧 6 个水质指标之间互相联系,而且相关系数均 > 0.6,高锰酸盐指数与

表 1 各水质指标的相关系数矩阵

Table 1 The correlation matrix of different water quality parameters

	浊度	悬浮物 浓度	溶解氧	总磷	总氮	氨氮	化学 需氧量	高锰酸盐 指数	五日生化 需氧量
浊度	1.00								
悬浮物浓度	0.63	1.00							
溶解氧	-0.02	-0.60	1.00						
总磷	0.64	0.85	-0.64	1.00					
总氮	-0.47	-0.09	-0.40	0.09	1.00				
氨氮	0.21	-0.11	0.40	0.10	0.19	1.00			
化学需氧量	-0.28	-0.27	0.00	-0.02	0.44	0.12	1.00		
高锰酸盐指数	-0.12	0.40	-0.73	0.53	0.69	0.05	0.24	1.00	
五日生化需氧量	0.17	0.63	-0.85	0.74	0.53	0.02	0.10	0.82	1.00

溶解氧和总氮 2 个水质指标的相关系数绝对值大于 0.6,而总氮仅与高锰酸盐指数 1 个水质指标的相关系数 >0.6. 氨氮与化学需氧量 2 个水质指标与其它水质指标的相关系数都很小,最好相关系数 < 0.3.

4 水质指标与光谱反射率的线性关系模型

各水质指标与不同波长光谱反射率的相关性分析结果如图 1 所示.

从图中可以看出以下明显特征:(1) 溶解氧与归一化光谱反射率的相关系数曲线与其它指标不同,这是由于水中溶解氧值越大代表水质越好,而其它水质指标值越大,表明水质越差.(2) 其它 8 个水质指标与归一化光谱反射率的相关系数曲线走势基本一致,差别在于出现最大相关系数的位置和取值.(3) 总磷和悬浮物浓度 2 个水质指标之间相关系数 >0.8,这二者与归一化反射率的相关系数曲线走势非常一致,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 538.21nm 附近, $r = -0.70$;总磷与归一化反射率在 461.7nm ~ 654.94nm 附近为负相关,最大负相关出现在 539.82nm 附近, $r = -0.78$;在 729nm ~ 915.06nm 之间,正相关系数达最大,且变化趋平缓, r 约为 0.8;悬浮物浓度与归一化反射率在 711.87nm ~ 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.(4) 浊度与归一化反射率的相关系数曲线在 400nm ~ 610.35nm 之

间为负值,最大负相关出现在 502.64nm, $r = -0.8255$;到 699.27nm 出现最大正相关,相关系数 $r = 0.7047$;699.27nm 之后,相关系数呈下降趋势,其中,741.69 ~ 822.29nm 之间,相关系数变化不大, r 取值在 0.53 ~ 0.57 之间.(5) 五日生化需氧量与归一化反射率在 489.61nm ~ 675.56nm 之间负相关,其中,在 603.96nm 出现最大负相关系数 $r = -0.7527$,正相关系数增至 744.82nm ~ 823.82nm 之间变化趋缓, r 约为 0.70,823.82nm 之后,正相关系数又继续增大,最大正相关系数约等于 0.897. 高锰酸盐指数与归一化反射率,在 502.64nm ~ 692.95nm 之间负相关,其中,624.7nm 附近出现最大负相关 $r = -0.7338$;正相关系数增至 744.82nm ~ 823.82nm 之间变化趋缓,相关系数 r 在 0.56 ~ 0.60 之间,823.82nm 之后,正相关系数又继续增大,在 966.2nm 附近,相关系数 $r = 0.8202$. 总氮与归一化反射率在 541.43nm ~ 715.02nm 之间负相关,其中,在 651.76nm 附近,出现最大负相关,负相关系数 $r = -0.8$;正相关系数增至 744.82nm ~ 823.82nm 之间变化趋缓,相关系数 r 在 0.2 ~ 0.25 之间,823.82nm 之后,正相关系数又继续增大,最大相关系数 $r > 0.7$.(6) 化学需氧量和氨氮两个水质指标与归一化反射率相关系数较小, r 最大 < 0.5. 其中,化学需氧量和归一化反射率在 565.54nm ~ 735.43nm 之间,以及 782.18nm ~ 823.82nm 之间呈负相关,最大负相关出现在 658.11nm 附近, $r = -0.4011$,最大正相关出现在 476.52nm 附近, $r =$

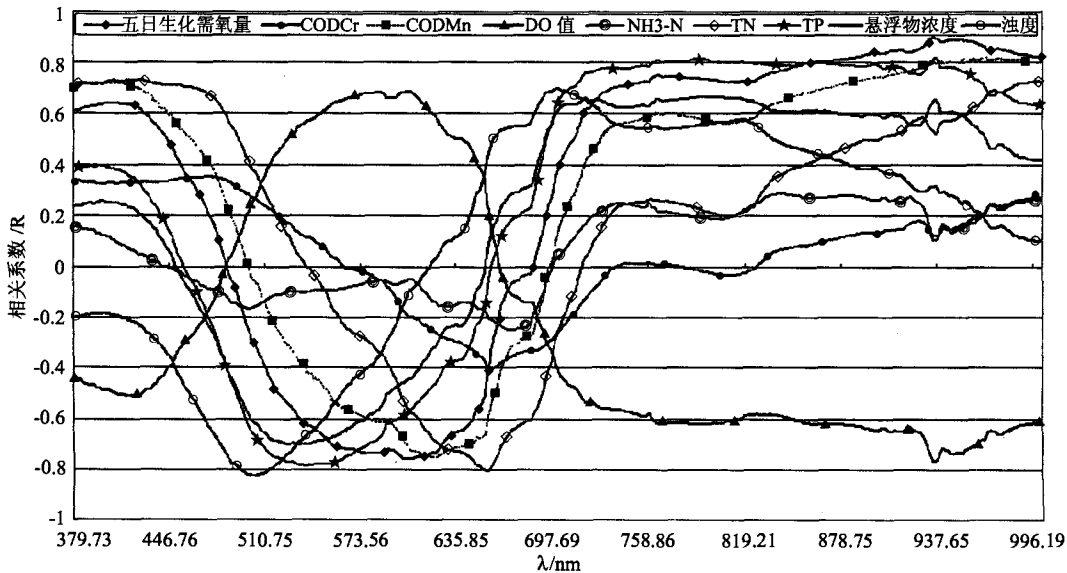


图 1 各波段归一化反射率与水质指标相关关系曲线图

Fig. 1 The correlation between the water quality parameters and the normalized reflectance

0.3548; 氨氮与归一化反射率在 453.42nm ~ 694.53nm 之间负相关, 最大负相关系数 $r = -0.2273$, 在 842.2nm 附近最大正相关系数 $r = 0.285$.

总之, 运用可见—近红外高光谱遥感, 只要选择适当的遥感通道, 便可由该通道测得水面反射率大小推算总磷、总氮、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、浊度、悬浮物和溶解氧等 7 个水质指标. 其公式为: 水质指标浓度 = $A + B \times$ 特征通道水面光谱反射率, 其中, A 和 B 为系数.

5 水质指标与光谱反射率的比值关系模型

由上面分析可见, 在可见近红外波段, 随波长增加, 总磷、总氮、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、浊度、悬浮物和溶解氧等 7 个指标与光谱反射率相关系数将正负变化, 因此, 相比于单波长光谱反射率, 正相关波长光谱反射率与负相关波长光谱反射率之间的比值运算, 可以进一步提高它们与水质指标的相关性. 同时也非常重要是可以部分消除光谱测量过程中仪器本身的性能以及测量环境变化等对测量结果造成的影响, 突出某些指标的光谱反射信息, 具有一定的信息增强作用. 针对不同污染类型, 其有效比值波段也不同, 这里将所有波段的光谱反射率两两相比, 统计其与各水质指标的相关系数, 绘制相关系数等值线图, 从而找到能够反演水质指标的反射率比值优选波段组合. 下面给出了化学需氧量 (COD_{Cr}) 和氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 2 个水质指标与各波段比值的相关系数分布图.

由图 2 可见: 相比于采用单一波长光谱反射率, 采用光谱反射率比值推算水质指标的精度得到不同程度的提高. 浊度、悬浮物浓度、总磷、总氮、溶解氧、高锰酸盐指数、五日生化需氧量与光谱反射率比值的最大相关系数均在 0.8 以上. 需要特别指出的是, 氨氮、化学耗氧量与单波段光谱反射率的最大线性相关系数仅 0.28、0.40, 采用波段反射率比值使相关系数分别提高到 0.65 和 0.53. 尽管比前述 7 个指标低, 但还是能够通过遥感进行反演的. 总之, 对于黄浦江水面同步光谱测量实验的 9 个水质指标, 均可用波段反射率比值的办法遥感反演.

表 2 给出了浊度、悬浮物浓度、总磷、总氮、溶解氧、高锰酸盐指数、五日生化需氧量对应的的反射率比值优化波段组合, 以及特征波段反射率比值与水质指标的线性回归方程, 表中各线性回归方程式中 y 代表水质指标取值, x 代表特征波段反射率比值.

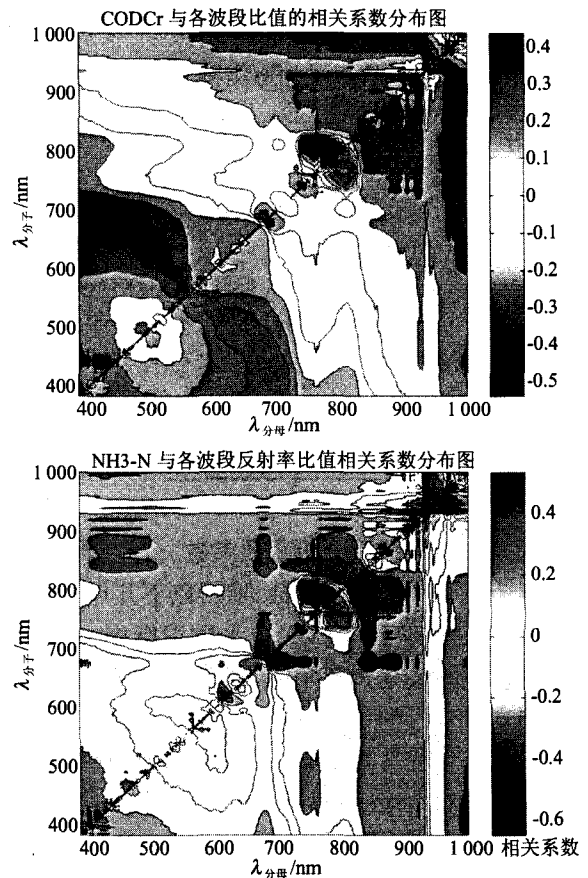


图 2 不同波段反射率比值与各水质指标相关系数等值线图

Fig. 2 The contoured maps of the reflectivity ratios and water quality parameters

由表 2 可见, 特定波段比值与各水质指标线性相关系数均大于 0.8 ($R^2 > 0.64$); 可见光中黄绿光波段 (544nm ~ 599nm) 的反射率比值与浊度、悬浮物浓度、总磷的线性相关性较好; 近红外波段中心波长为 990nm 与 760nm 的光谱反射率比值与总氮的线性相关性较高; 中心波长为 744nm 的红橙光波段与中心波长为 777nm 近红外波段光谱反射率比值与溶解氧线性相关性较好; 中心波长为 849nm 和 857nm 的近红外波段光谱反射率比值与高锰酸盐指数正相关较高; 中心波长为 747nm 和 756nm 的红橙光波段光谱反射率的比值与五日生化需氧量呈较好的线性负相关关系. 特定波段比值与氨氮和化学需氧量 2 个水质指标的最好相关系数也 > 0.5 ($R^2 > 0.25$), 与单波段归一化反射率的最大相关系数 < 0.41 相比而言, 相关性有明显提高.

6 结语

基于黄浦江水体多次水面光谱测量实验和同步的水质采样分析, 获得黄浦江水体地面光谱反射率

表 2 不同波段反射率比值与水质指标线性关系模型及波段列表

Table 2 linear models of reflectivity ratios and the water quality parameters

水质参数(y)	$\lambda_{分子}/nm$	$\lambda_{分母}/nm$	相关系数/R	关系式
浊度	599.16	544.65	0.875	$y = 953.23x - 964.11$
悬浮物浓度	589.57	586.37	0.819	$y = 7567.1x - 7536.2$
总磷	587.97	586.37	0.882	$y = 30.304 * x - 30.081$
总氮	993.19	763.54	0.828	$y = 4.476x + 0.5308$
溶解氧	744.82	777.52	0.910	$y = 123.28x - 120.11$
高锰酸盐指数	849.84	857.46	0.886	$y = 62.156x - 53.603$
五日生化需氧量	747.94	755.75	0.905	$y = -380.16x + 388.6$
化学需氧量	957.2	939.16	0.532	$y = 119.67x - 87.648$
氨氮	758.86	808.45	0.538	$y = 7.902x - 6.3697$

数据和同步采样分析水质参数。通过研究水质指标的地面光谱反射率特征,取得以下几点结论:

1. 所测黄浦江水体 9 个水质指标中,总磷、悬浮物浓度、浊度、生物耗氧量、溶解氧和高锰酸盐指数之间具有较好的相关关系($r > 0.6$),总氮与高锰酸盐指数的相关系数 > 0.6 ,化学需氧量和氨氮 2 个水质指标与其它水质指标的相关性较差。

2. 波段归一化光谱反射率与化学需氧量和氨氮的相关性较差,各波段相关系数均小于 0.4,其余 7 个水质指标与单波段归一化光谱反射率具有较好的相关性,相关系数均 > 0.7 。

3. 2 个波段反射率的比值与水质指标之间的相关性好于单波段光谱反射率与水质指标之间的相关性,2 个波段反射率的比值与化学需氧量和氨氮 2 个水质指标的最大相关系数均 > 0.5 。

REFERENCES

[1] YIN Qiu, SU Xiao-Zhou, XU Zhao-An, et al. Analysis on the ultra-spectral characteristics of water environmental parameters about lake [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(6): 427—430.

[2] YIN Qiu, GONG Cai-Lan, KUANG Ding-Bo, et al. Method of satellite remote sensing of lake water quality and It's applications [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球, 巩彩兰, 匡定波, 等. 湖泊水质卫星遥感及其应用. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(3): 198—202.

[3] SHU Xiao-Zhou, WANG Jun-Fa, Shen Ming-Ming, et al.

Remote sensing of water quality monitoring using an airborne imaging spectrometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (疏小舟, 汪骏发, 沈鸣明, 等. 航空成像光谱水质遥感研究. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(4): 273—276.

[4] SHU Xiao-Zhou, YIN Qiu, KUANG Ding-Bo. Relationships between algal chlorophyll concentration and spectral reflectance of inland water [J]. *Journal of Remote Sensing* (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. *遥感学报*), 2000, **4**(1): 41—45.

[5] LI Su-Ju, WU Qian, WANG Xue-Jun, et al. Correlations between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in chao hu lake [J]. *Journal of Lake Sciences* (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. *湖泊科学*), 2002, **14**(3): 228—234.

[6] ZHAO Dong-Zhi, LIU Yu-Ji. *Spectral Characteristics of the Polluted Waters in China* [M]. Beijing: Oceanic Press (赵冬至, 刘玉机. 中国污染水体光谱特征. 北京: 海洋出版社), 2001.

[7] LV Heng, LI Xing-Guo, JIANG Nan. Estimation of suspended solids concentration in lake taihu using spectral reflectance and simulated MERIS [J]. *J. Lake Sci* (吕恒, 李新国, 江南. 基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖悬浮物遥感定量模型. *湖泊科学*), 2005, **17**(2): 104—109.

[8] Harma P, Vepsalainen J, Hannonen T, et al. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland [J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**: 107—121.

[9] Dekker A G, Vos R J, Peters S W M. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes [J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**: 197—214.

[10] Barak B, Tibor G, Yaobi Y Z, et al. Synoptic measurements of chlorophyll a and suspended particulate matter in a transitional zone from polluted to clean catwater utilizing urborne remote sensing and ground measurements, Halfa Bay [J]. *Manne Pollution Bulletin*, 1999, **38**(9): 762—772.

[11] Homogenboom H J, Dekker A G, Althuis U A. Simulation of AVIRIS Sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters [J]. *Remote Sensing Environ*, 1998, **65**: 341—352.

[12] *Compilation of Environmental Protection Standard of China - Water Quality Analysis methods* [S]. Beijing: Chinese Standard Press (中国环境保护标准汇编 - 水质分析方法. 北京: 中国标准出版社), 2001.

[13] Gitelson A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water; relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration [J]. *Remote Sensing Letters*, 1992, 3367—3373.

[14] Flink P, Lindell T, Oslund C. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes [J]. *The Science of the total Environment*, 2001, **268**: 155—169.