

文章编号:1001-9014(2004)06-0427-05

## 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析

尹球<sup>1</sup>, 疏小舟<sup>1</sup>, 徐兆安<sup>2</sup>, 匡定波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 水利部太湖流域水环境监测中心, 江苏 无锡 214024)

**摘要:**为了探索湖泊水质遥感的可能性,以我国三大富营养化湖泊之一的太湖为研究对象,进行了冬夏二季太湖水面反射光谱测量与水质采样分析同步试验.对试验结果进行了统计分析.结果表明:(1)高锰酸盐指数与叶绿素浓度具有很好的相关性;(2)夏季太湖北部水面反射率主要反映叶绿素浓度的影响,可以用线性模型来表示,以 700nm 以上波段体现叶绿素散射作用最为明显;(3)冬季太湖水面反射率主要反映悬浮物浓度的影响,可以用对数线性模型来表示(若仅考虑悬浮物浓度小于 100mg/L 区域,用线性模型更好些),悬浮物散射作用响应的波长范围比较宽,以 500nm~800nm 比较明显,优势波长随着悬浮物浓度的增加而右移.给出了不同波长水面反射率与水环境指标的统计关系模型.

**关键词:**水污染;超光谱模型;遥感;富营养化湖泊  
**中图分类号:**X122 **文献标识码:**A

## ANALYSIS ON THE ULTRA-SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WATER ENVIRONMENTAL PARAMETERS ABOUT LAKE

YIN Qiu<sup>1</sup>, SU Xiao-Zhou<sup>1</sup>, XU Zhao-An<sup>2</sup>, KUANG Ding-Bo<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;  
2. Water Environmental Monitoring Center of Taihu Drainage Area, Ministry of Water Conservancy, Wuxi 214024, China)

**Abstract:** For studying the possibility of detecting water quality by remote sensing, simultaneous field experiments at Taihu Lake (one of the three famous eutrophic lake in China) were made in winter and summer to measure the reflected light spectra on water and to get water samples for chemical analysis. Statistical analysis with experiment data shows that (1) there is good correlation between  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and chlorophyll-a concentration; (2) in summer, north Taihu Lake, the reflectivity spectra of light on water is affected mainly by chlorophyll-a concentration, which can be expressed by a liner correlation model and it is most obvious at wavelengths larger than 700nm; (3) in winter, the reflectivity spectra of light on water is affected mainly by suspended substance concentration in a wide wavelength range, which can be expressed by a log-liner correlation model or by a liner correlation model more suitably if only the suspended substance concentration less than 100mg/L is considered, and it is more obvious at wavelengths between 500nm~800nm. The statistical models about lake are made between the surface spectral reflectivity at different wavelengths and the water quality parameters.

**Key words:** water pollution; ultra-spectral model; remote sensing; eutrophic lake

### 引言

湖泊的富营养化是一个突出问题.我国面积大于 1km<sup>2</sup> 的湖泊有 2800 多个,总面积约占国土面积的 0.8%,蓄水量七千多亿立方米,是重要的地表水资源,且具有旅游等多种功能<sup>[1]</sup>.因此,湖泊资源的合理开发利用、湖泊生态环境的保护十分重要.但随

着经济的发展,许多湖泊受到污染,生产和生活过程向湖泊排放了大量的有机污染物,氮和磷等营养物质在水中大量积累造成藻类等浮游植物迅速繁殖,导致水体中的溶解氧减少,甚至腐败发臭,产生毒素,影响供水水质、鱼类生长和旅游环境<sup>[2]</sup>.

本文以太湖为研究对象.太湖是我国第三大淡水湖泊,面积 2400km<sup>2</sup>.是江浙沪的重要水源地,历

收稿日期:2003-10-24,修回日期:2004-06-15

Received date: 2003-10-24, revised date: 2004-06-15

基金项目:863 计划(863-308-13-05(1),863-2-7-4-25)、国家自然科学基金(40271084)和上海市科技发展基金

资助项目(02DZ15002,011661077)

作者简介:尹球(1963-),男,江苏太仓人,博士,研究员,主要从事遥感信息处理与应用技术研究.

史上素有“太湖美,美就美在太湖水”的说法.同时,与太湖有关的许多地区又是工业和城市迅速发展地区,污染物通过河流或直接地向太湖排放,使得太湖成为三大富营养化湖泊之一<sup>[2,3]</sup>.因此,研究太湖富营养化的光谱响应特征对于我国湖泊水环境遥感具有重要的示范作用.

## 1 试验情况

1997 年 11 月和 1998 年 8 月在太湖进行了二次水质采样与水面光谱测量同步试验.第一次试验共 21 个测点,涉及整个太湖.第二次试验测量共 13 个测点,分布于太湖北部的五里湖、梅梁湖和竺山湖.

试验方法如下:

1) 利用船只按常规手段进行水质采样分析.水样采自水面至水下 0.5m 范围,冷藏保存并当天完成样品分析,以免水质腐变.分析指标共 3 个<sup>[4]</sup>:反映水体富营养化水平的叶绿素-a 浓度、反映水中耗氧的有机污染状况的高锰酸盐指数、总悬浮物浓度.

2) 同步进行水面反射光谱测量.光谱测量在距水面约 1m 高度进行,测量方向垂直向下.由水面光谱与标准白板光谱的比值确定水面漫反射率.每个点测 3 次,测量仪器为美国 GER-1500 型地物光谱仪.工作波长 300~1050nm,共 512 个通道,通道带宽约为 1.5nm,仪器视场角  $3 \times 0.1 \text{ deg}$ .

3) 试验时用差分 GPS 作测量定位,并记录时间,测量透明度、PH 值和水温等其它水环境指标.

## 2 水环境指标特征与数据处理方法

试验测得的叶绿素 a (Ch)、高锰酸盐指数 (COD<sub>Mn</sub>) 和总悬浮物 (SS) 浓度范围如表 1 所列.

按以下标准进行水质评价:1) 富营养化.按修正卡森指数将水分为贫营养、中营养和不同程度的富营养.2) 有机污染.按国家地面水环境质量标准<sup>[5]</sup>.3) 总悬浮物.按国家环保局环境质量报告书编写技术规定推荐标准<sup>[6]</sup>.

根据所采用的水质评价标准,表 1 显示,冬季太湖基本处于中营养化~贫营养化水平,有机污染含

表 2 不同水质指标之间的相关性分析

Table 1 The correlation analysis between different water quality parameters

水质指标	样本数	线性相关系数	线性相关关系
Chl, COD <sub>Mn</sub>	34	0.9719	COD <sub>Mn</sub> (mg/L) = 4.4452 + 0.0554 × Chl (ug/L)
Chl, SS	34	0.0621	/

量大致为 II~III 类水质,总悬浮物含量大致为 III~IV 类水质.夏季太湖北部许多地方处于重富营养甚至严重富营养化状态,有机污染含量达 V 类甚至超 V 类水质,总悬浮物含量大致处为 II 类水质.因此,夏季太湖北部污染以十分明显的富营养化和有机污染为特征,冬季太湖污染呈现出悬浮物的作用.

表 2 给出了由二次试验 34 个样本得到的 Chl~COD<sub>Mn</sub> 和 Chl~SS 相关性统计结果.由表可见:Chl 与 COD<sub>Mn</sub> 之间存在明显的相关性,而 Chl 与 SS 之间没有相关性.因此,在分析水质指标光谱模型时,去除 COD<sub>Mn</sub>,只分析 Chl 和 SS 与反射率的关系.

经过广泛的统计试验,按三类模型建立水质指标的超光谱模型.即,水面反射率 R 与水环境指标的线性模型、对数线性模型以及线性与对数混合模型.模型效果的好坏用统计量 F 值的大小表示.

考虑到仪器噪声等因素,水面反射率 512 个通道测量数据中,采用 350nm~900nm 的 346 个通道数据.

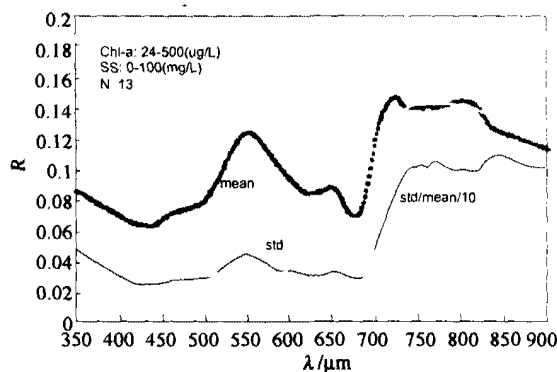


图 1 夏季太湖北部水面反射光谱平均状况  
Fig. 1 The averaged spectral reflectivity of north Tai-lake in summer

表 1 太湖水质情况(1998 年 8 月和 1997 年 11 月测量结果)

Table 1 The water quality state of Taihu Lake in Aug. 1998 and Nov. 1997

季节	样本数	测点位置	Chl (ug/L)			COD <sub>Mn</sub> (mg/L)			SS (ug/L)		
			最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均
夏季	13	太湖北部	27.7	478.0	129.0	5.8	30.2	11.7	1.0	93.0	34.7
冬季	21	全太湖	0	21.4	5.46	2.4	9.4	4.7	8.0	198.0	68.1

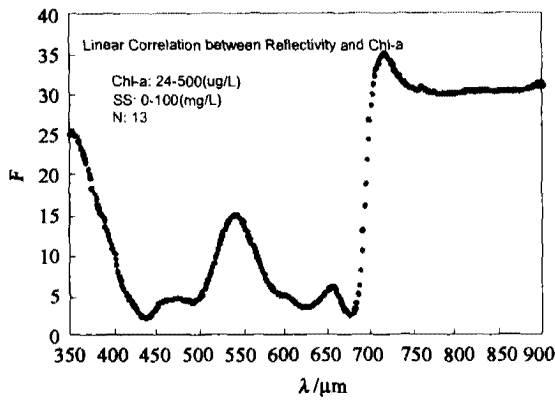


图2 夏季太湖北部水面反射率对叶绿素浓度线性回归效果  
 Fig.2 The validity of linear correlation between the spectral reflectivity and the chlorophyll concentration of north Taihu in summer

### 3 夏季水环境指标的超光谱响应特征

1998年8月太湖北部13个测点平均反射率和反射率变化如图1所示:平均反射率(mean)和反射率变化均方根的一个峰在550nm附近,波长大于700nm之后,二者迅速增加,近红外波段的反射率和反射率变化超过了可见光波段;反射率和反射率变化的二个谷分别在440nm及675nm附近.这些特点明显反映出与夏天太湖北部重富营养化相对应的叶绿素散射和吸收作用.

水面反射率对叶绿素浓度和悬浮物浓度的双参数线性回归和对数线性回归的F值对比表明:1)在350nm~900nm所有波长上,夏季太湖北部反射率变化主要反映叶绿素的作用,悬浮物只是干扰因子;2)线性模型的效果比对数线性模型更好些.

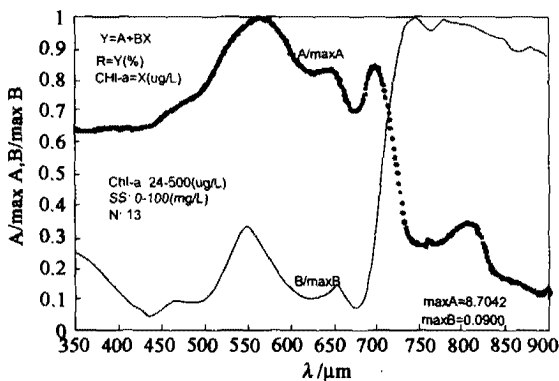


图3 夏季太湖北部水面反射率对叶绿素浓度的线性回归模型参数  
 Fig.3 The parameters of linear correlation model between spectral reflectivity and chlorophyll concentration of north Taihu in summer

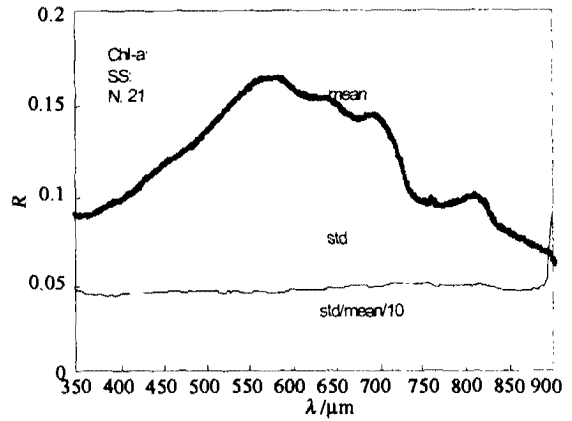


图4 冬季太湖水面反射光谱平均状况  
 Fig.4 The averaged state of spectral reflectivity of Taihu in winter

图2给出了夏季太湖北部水面反射率R对叶绿素浓度Chl线性回归统计量F随波长的变化.比较图2与图1可见,统计量F大小与反射率变化均方根std大小密切相关.

R与Chl线性统计模型  $R = A + B * Chl$  参数A、B随波长的变化如图3所示.去除叶绿素作用后的反射率A峰值在550nm附近,由于水的吸收作用,大于700nm以后反射率迅速下降.B值反映出水体散射和吸收对叶绿素浓度的敏感性,反射率在700nm附近的“陡坡效应”以及550nm附近的绿色效应与B值随波长变化特征密切相关,而与叶绿素440nm和675nm附近吸收谷相对应的B值很小.

### 4 冬季水环境指标的超光谱响应特征

1997年11月冬季太湖21个测点平均反射率和反射率变化均方根(std)随波长变化情况如图4

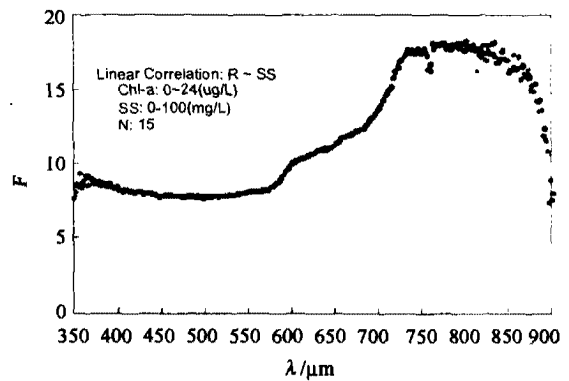


图5 冬季太湖水面反射率与悬浮物浓度(<100mg/l)线性回归效果  
 Fig.5 The linear correlation validity between the spectral reflectivity and the suspended substance concentration (<100mg/l) of Taihu in winter

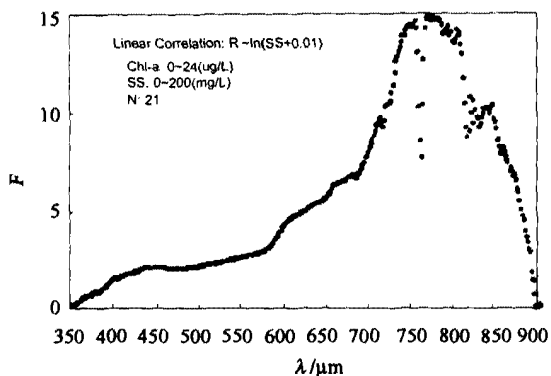


图6 冬季太湖水面反射率与悬浮物浓度 (< 200mg/l) 对数线性回归效果

Fig. 6 The linear correlation validity between the spectral reflectivity and the suspended substance concentration (< 200mg/l) in winter Taihu

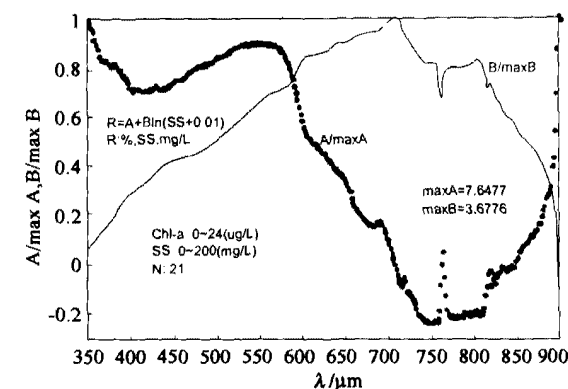


图8 冬季太湖水面反射率对悬浮物浓度 (< 200mg/l) 的对数线性回归模型参数

Fig. 8 The parameters of linear correlation model between the spectral reflectivity and the suspended substance concentration (< 200mg/l) in winter Taihu

所示. 由图可见: 平均反射率随波长变化与“净水”(图7中A随波长变化曲线)相似, 但较净水平缓得多, 而且整体上各波长反射率较净水均有明显抬升. 与夏季情况相比, 反射率变化均方根 std 随波长的变化平缓得多, 没有明显的尖峰, 尤其是550nm至700nm, std 的下降不足11%. 根据以往的研究, 悬浮物一方面使反射率曲线整体抬升, 另一方面随悬浮物浓度的增加, 反射峰值波长会红移. 太湖冬季水面反射率曲线特点明显反映出悬浮物的作用.

冬季太湖水面反射率对叶绿素浓度和悬浮物浓度的统计回归表明: 1) 与夏季太湖北部情况相反, 冬季太湖水面反射率变化反映出悬浮物浓度的变化, 叶绿素起干扰作用; 2) 对于 SS < 100mg/L 样本, 用线性模型效果比较好; 若考虑整个 SS = 0 - 200mg/L 样本, 对数线性模型效果明显优于线性模

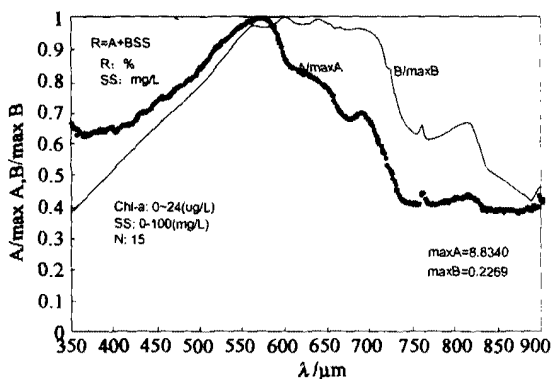


图7 冬季太湖水面反射率对悬浮物浓度 (< 100mg/l) 的线性回归模型参数

Fig. 7 The parameters of linear correlation model between the spectral reflectivity and the suspended substance concentration (< 100mg/l) in winter Taihu

型, 这表明随着悬浮物浓度增加反射率由线性增加到趋于饱和的过程.

R 与 SS 单参数线性 (SS < 100mg/L) 和对数线性 (SS < 200mg/L) 建模效果如图5和图6所示. 由图可见: 随着悬浮物浓度的增高, 反射率与悬浮物浓度相关的波长范围向红光长边附近收缩.

R ~ SS 线性模型 (SS < 100mg/L) 模型参数如图7所示. B 值反映出反射率对悬浮物的敏感性和反射率的动态特征 550nm ~ 700nm 内的 B 值基本相同, 属最大, 而去除 SS 作用之“净水”反射率 A 在 550nm 附近有明显的峰值, 因此, 从 550nm 到 700nm, 悬浮物浓度变化引起的反射率绝对变化基本一致, 悬浮物浓度变化引起的反射率相对变化增加了约 50%.

R 与 SS 对数线性统计模型 (SS < 200mg/L) 参数如图8所示. 可见, 随着悬浮物浓度的进一步增大, 700nm 以下反射率随悬浮物的变化能力将减弱, 波长越短, 反射率达到饱和越早, 而 700nm ~ 800nm 反射率随悬浮物浓度的变化能力将有所增强.

### 5 结语

以上根据 1997 年太湖冬季和 1998 年太湖北部夏季水质对比测量结果对太湖水质指标的超光谱响应特征进行了定量分析.

夏季太湖北部污染以十分明显的富营养化和有机污染为特征, 高锰酸盐指数与叶绿素 a 浓度具有很好的相关性; 而冬季太湖污染呈现出悬浮物的作用.

(下转第 435 页)

滤波器传输特性的电磁场模拟结果和实测结果如图10所示,在0.1~7.9GHz低通频带内,具有良好的低通滤波特性,带内波纹起伏小于0.01dB.而在8~40GHz高阻频带内,在35GHz附近, $|S_{21}|$ 最大值为-15dB.通过合理设计DGS结构和十字形短截线的尺寸,可以使得阻带内 $|S_{21}|$ 更小,从而满足实际应用.测试设备:HP8722D矢量网络分析仪(工作频段为0.5~40GHz)与计算机主机、Cascade探针台、XJ4810图示仪.

#### 4 结语

本文提出一种新颖蝴蝶结形DGS结构的微带线,分析了该微带线的传输特性,建立该微带线的等效电路模型,并分析了蝴蝶结形DGS结构参数对阻带特性的影响.最后,将蝴蝶结形DGS结构应用于低通滤波器的设计.DGS结构的阻带特性和慢波特性和慢波特性,可用于谐波抑制、去噪、构造紧凑和新型电路结构等方面,因此,DGS结构在微波毫米波单片集成电路(MMIC)、低温共烧陶瓷(LTCC)多层微波电路等领域中具有广泛的应用前景.

#### REFERENCES

- [1] Park J I, Kim C S, Kim J, et al. Modeling of a photonic bandgap and its application for the low-pass filter design [A]. *Asia-Pacific Microwave Conference*. Singapore: 1999, 2: 331—334.
- [2] Dal A, Park J S, Kim C S, et al. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 2001,

- 49(1): 86—93.
- [3] YAN Dun-Bao, YUAN Nai-Chang, FU Yun-Qi, et al. Research on 1-D and 2-D PBG structure based on FDTD method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (闫敦豹,袁乃昌,付云起,等.基于FDTD的1-D和2-D PBG结构的研究. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(4): 281—284.
- [4] LIU Hai-Wen, LI Zheng-Fan, SUN Xiao-Wei, et al. A novel photonic band-gap microstrip structures for low-pass filters of wide stop-band [J]. *Microwave and Optical Tech. Letters*, 2003, 37(6): 470—472.
- [5] Rumsey I, May M P, Kelly P K. Photonic bandgap structure used as filters in microstrip circuits [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1998, 8(10): 336—339.
- [6] Kim T, Seo C. A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 2000, 10(1): 13—15.
- [7] Insik Chang, Bomson Lee. Design of defected ground structures for harmonic control of active microstrip antenna [J]. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2002, 2(2): 852—855.
- [8] Lim J S, Kim H S, Ahn D, et al. A power amplifier with efficiency improved using defected ground structure [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2001, 11(4): 170—172.
- [9] LIU Hai-Wen, SUN Xiao-Wei, CHENG Zhi-Qun, et al. A VCO with output power improved using defected ground structure [J]. *Microwave and Optical Tech. Letters*, 2003, 38(4): 260—263.
- [10] Lee Y T, Lim J K, Park J S, et al. A novel phase noise reduction technique in oscillator using defected ground structure [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2002, 12(2): 39—41.
- [11] LIM J S, PARK J S, LEE Y T, et al. Application of defected ground structure in reducing the size of amplifiers [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2002, 12(7): 261—263.

(上接第430页)叶绿素Chl散射对反射率R的影响可用线性项Chl来表示;悬浮物的影响可用线性项SS(当SS<100mg/L)或对数线性项ln(SS+1)来表示.

污染物浓度对水面反射率影响大致地可划分为:叶绿素散射作用主要体现在704nm以上波段,吸收作用主要体现在400~520nm和575~690nm波段,悬浮物的散射作用在500~800nm表现比较明显.

#### REFERENCES

- [1] Nanjing Institute of Geography and Lake, Chinese Academy of Sciences. *Review of Chinese Lakes* [M]. Beijing: Science Press (中国科学院南京地理与湖泊研究所. *中国湖泊概论*.北京:科学出版社), 1989.

- [2] JIN Xiang-Can, LIU Hong-Liang, TU Qing-Ying, et al. *The Eutrophic State of Chinese Lakes* [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press (金相灿,刘鸿亮,屠清瑛,等.北京: *中国湖泊富营养化*.中国环境科学出版社), 1990.
- [3] Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. Symposium of Water and Continuable Development [C]. (中科院上海技术物理所.水与可持续发展论文集), 1999.
- [4] WEI Fu-Sheng. *Manual of Water and Waste Water Monitoring Methods* [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press (魏复盛. *水和废水监测方法指南*.北京:中国环境科学出版社), 1990.
- [5] Chinese National Standard. The Environmental Quality Standard of Surface Water [S]. (中华人民共和国国家标准. *地面水环境质量标准*), GB3838—2002.
- [6] National Environmental Bureau. Technical Criterion of Environmental Quality Reports [R]. (国家环保局环监字(91)092号文. *环境质量报告书编写技术规定*), 1991.