

文章编号:1001-9014(2006)06-0460-05

# 利用 Hyperion 星载高光谱传感器监测太湖水质的研究

阎福礼, 王世新, 周艺, 肖青, 祝令亚, 王丽涛, 焦云清

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘要:**通过分析 Hyperion 星载高光谱传感器的数据特征和水质参数监测精度, 确定并详细讨论了波段比值、差值和 NDVI 算法与叶绿素、悬浮物浓度的相关性差异和敏感波段分布, 建立并验证了水质参数高光谱遥感反演模型, 初步评价了太湖水体富营养化状况. 利用模拟环境小卫星的波段设置和反射率光谱, 对比分析了 Hyperion 和环境小卫星高光谱监测太湖水质参数的反演精度, 展示了星载高光谱监测内陆水体水质的应用潜力, 有力地促进了我国环境小卫星高光谱数据在水体生态遥感监测中的预研工作.

**关键词:**高光谱; 水质监测; 算法; 相关性差异; 富营养化

**中图分类号:**X832 **文献标识码:**A

## MONITORING THE WATER QUALITY OF TAIHU LAKE BY USING HYPERION HYPERSPECTRAL DATA

YAN Fu-Li, WANG Shi-Xin, ZHOU Yi, XIAO Qing,  
ZHU Ling-Ya, WANG Li-Tao, JIAO Yun-Qing

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** After analyzing the precision and accuracy that can be achieved in the estimation of water quality parameters, as well as the characteristics of Hyperion data, the sensitive bands of different wavelengths and the high correlation coefficients with chlorophyll and suspended sediments concentrations of different algorithms (Ratio, Difference and NDVI) were determined and discussed in details. A hyperspectral model on water quality was developed and validated, and the eutrophic state of Taihu lake and its causes were preliminarily discussed. The precision in estimating water quality parameters by using modeling hyperspectral datasets of Little Environmental Satellite (Hj-1) was discussed and compared with that of EO-1/Hyperion. The result reveals the potential of the remote sensing applications of scheduled Hj-1 satellite with hyperspectral sensor on water quality monitoring.

**Key words:** hyperspectra; water quality monitoring; algorithm; difference in correlation; eutrophication

### 引言

太湖, 是我国十分重要的内陆湖泊(图 1). 近年来, 太湖水体污染严重, 直接影响到沿岸人民的身心健康. 因此, 快速、准确、高频率地监测水质状况, 迫切需要遥感技术来监测水体水质的变化状况.

针对水色遥感, 国内外学者开展了大量的研究工作. 从水体光学<sup>[1]</sup>, 到海洋水质<sup>[2]</sup>; 从水质参数超光谱响应<sup>[3]</sup>、到高光谱数据<sup>[4,5]</sup>、多光谱数据<sup>[6]</sup>的应用等. Hyperion 作为第一颗星载高光谱传感器, 国外开展了很多以陆地应用为目的的研究工作<sup>[7,8]</sup>;

Brando(2003)演示了高光谱监测沿岸海洋水体的能力<sup>[9]</sup>. 其在组分和光学性质更为复杂的内陆水体方面的应用潜力如何? 而且“十一五”期间, 我国的环境小卫星将搭载高光谱传感器, Hyperion 高光谱的数据特征及其应用将对我国的星载高光谱应用提供一定的借鉴意义.

本文以太湖为例, 分析了 Hyperion 高光谱的数据特征, 通过高光谱相关分析, 确定水体组分的高相关敏感波段, 建立水质遥感模型, 并验证了模型精度, 通过 Hyperion 和环境小卫星模拟数据的精度对比, 演示了高光谱在内陆水环境方面的应用潜力, 并

收稿日期: 2005-11-09, 修回日期: 2006-05-15

Received date: 2005-11-09, revised date: 2006-05-15

基金项目: 中国科学院知识创新(KZCX3-SW-334)和国家自然科学基金(40671141)资助项目

作者简介: 阎福礼(1973-), 男, 山东烟台人, 副研究员, 主要进行环境遥感和灾害遥感监测研究.

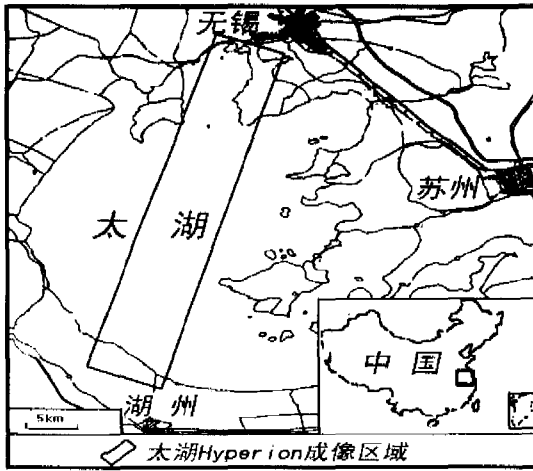


图1 太湖位置与2004年8月19日Hyperion成像区域  
Fig.1 The location of Taihu Lake and the imaging area of Hyperion on Aug. 19, 2004

初步评价了太湖富营养化状况。

### 1 试验情况

本次试验是2003~2005年专门针对EO-1/Hyperion设计的卫星同步实验。样点分布沿梅梁湾沿岸和梅梁湾-湖心航道的广阔区域,共38个测点。利用高速游艇、GPS定点,同时进行了水样采集、风速、水温和透明度测定。水样采自水下0.5米,及时冷藏。实验室内分析测定了叶绿素、总悬浮物浓度和黄色物质440nm吸收系数、总氮、总磷、高锰酸钾指数等十多个水质指标。

### 2 数据特征和预处理

#### 2.1 数据特征

EO-1卫星与Landsat7(1999年4月发射)的轨道一致,前后相距1min,与其不同的是EO-1能够获取侧视图像。Hyperion是一推扫式传感器,合计有242个波段,覆盖了350~2600nm的波段范围,波段间隔10nm左右,空间分辨率为30m,1~7波段和57~77波段没有进行仪器辐射校正,实际定标范围覆盖了426.82~2395.5nm的198个波段<sup>[10]</sup>。

#### 2.2 大气纠正

水体遥感数据的大气纠正与其他陆地目标的大气纠正原理是一致的。只是水体反射较弱,只能反射2~6%的下行辐射,大气纠正最小精度要求在0.1%左右<sup>[9]</sup>。为了对Hyperion图像进行精确的大气纠正,我们采用MODTRAN-4和图像统计2种方法。2种方法,效果基本类似,与实测光谱具有很好的一致性(相关系数0.9以上),能满足水质监测要求。

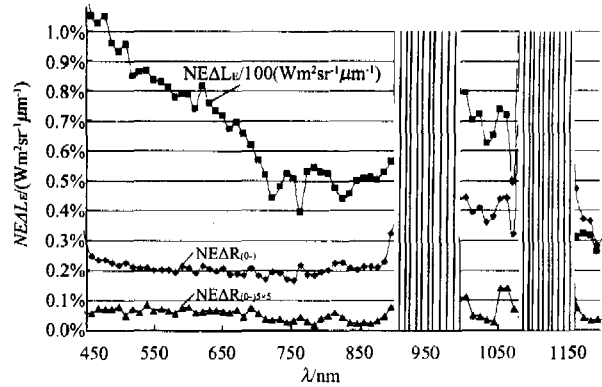


图2 Hyperion影像的辐射亮度标准偏差(NE $\Delta$ L<sub>E</sub>)和水下辐照反射率标准偏差(NE $\Delta$ R(0-)E)。屏蔽区域为940nm和1100~1140nm的水汽高敏感波段  
Fig.2 Standard deviation of radiance(NE $\Delta$ L<sub>E</sub>) and subsurface irradiance reflectance(NE $\Delta$ R(0-)E) for Hyperion imagery of Aug. 19, 2004. The wavelength around 940 and 1140nm masked is the band with high sensitivity to water vapor

### 2.3 数据精度评价

Hyperion的信噪比,优于Landsat TM、ETM<sup>+</sup>的相应波段,但是评价遥感数据的反演精度和准确程度,还需要估算整个传感器—大气—水体的反射率或辐射亮度变化的敏感度,如环境噪音等效辐射亮度差异(NE $\Delta$ L<sub>E</sub>)(environmental noise equivalent radiance difference)和气-水界面校正后的环境噪音等效R(0-)差异(NE $\Delta$ R(0-)E)(environmental noise equivalent R(0-) difference)<sup>[9]</sup>。NE $\Delta$ L<sub>E</sub>由辐射亮度图像,根据公式计算<sup>[9]</sup>: $NE\Delta L_E = \sigma(L)$ ;

这里的 $\sigma(L)$ 是每一个波段的水体均质区域图像的标准偏差。NE $\Delta$ R(0-)E是进行了大气纠正和气-水界面效应校正后的图像R(0-),利用同样的算法计算得到。

尽管,本研究中大气纠正反射率与实测光谱匹配良好,但是在940nm和1140nm左右的数据精度仍然存在很大误差(见图2)。因为940nm和1140nm左右的波段对水汽含量十分敏感,误差较大,因此摒弃了这几个波段。

2004年8月19日的Hyperion图像的NE $\Delta$ L<sub>E</sub>与NE $\Delta$ R(0-)E如图2所示。由图中可以看到,NE $\Delta$ R(0-)E在450~900nm之间光谱非常平坦,均值为0.275%,在450~1200nm之间(去除水汽高敏感波段后),均值为0.305%。在太湖水域,R(0-)的范围在4%到16%,因此,可以充分进行20个级别以下的R(0-)水质分级。由于采用5×5的低通滤波,图像的NE $\Delta$ R(0-)E在450~1200nm光谱不仅平坦,而且均值小于0.1%(见图2)。这一水平可以充分满

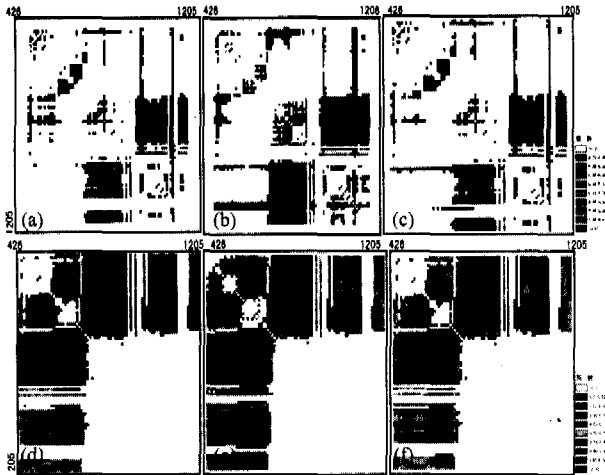


图3 悬浮物(a)(b)(c)、叶绿素浓度(d)(e)(f)分别与Hyperion反射率光谱的比值(a)(d)、差值(b)(e)和NDVI算法(c)(f)相关性分布

Fig.3 The correlation of suspended sediments (a)(b)(c) and chlorophyll concentration (d)(e)(f) with the ratio (a)(d), difference (b)(e) and NDVI algorithms (c)(f) of the reflectance spectra, respectively

足水质监测的精度要求<sup>[9]</sup>.

### 3 算法分析与模型

太湖水域的水质参数遥感反演研究,已经有了大量的工作<sup>[3-5]</sup>,但尚无人提及不同算法之间的精度差异,波段分布是否一致.本文采用了应用最为广泛比值、NDVI算法和差值算法,对比和分析了这3种算法的相关性和波段分布.

#### 3.1 算法描述

将426~1205nm之间的任意两波长的反射率按以下算法计算与悬浮物、叶绿素浓度的相关性.

##### 比值相关分析

任意2个波长反射率的比值,即: $(R_1/R_2)$ ,分别计算与悬浮物、叶绿素浓度的相关性.

##### 差值相关分析

任意2个波长的反射率差值,即: $(R_1 - R_2)$ ,分别计算与悬浮物、叶绿素浓度的相关性.由于差值与微分算法 $(R_1 - R_2)/(\lambda_1 - \lambda_2)$ 的相关系数是一致的.因此差值与微分算法的结果具有可比性.

##### NDVI算法相关分析

任意2个波长的反射率之差与之和的比值,即: $(R_1 - R_2)/(R_1 + R_2)$ ,分别计算与与悬浮物、叶绿素浓度的相关性.

#### 3.2 算法相关性分析

由图3(a)~图3(c)可以看出悬浮物与(1174.77~1184.87)/(864.35~884.7)nm反射率

比值算法相关系数在0.60以上(图3(a)),最高相关性是与 $R(1174.77)/R(874.53)$ 的比值,相关系数在0.68以上, $R^2 = 0.53$ .悬浮物与(732.07~874.53)与(174.77~1184.87)nm的差值算法相关系数在0.70以上(图3(b)),其中最高值位于( $R874.53$ 和 $R1184.87$ ),相关系数 $R = 0.79$ , $R^2 = 0.65$ .悬浮物浓度与(1174.77~1184.87)和(864.35~884.7)nm波长区段的NDVI算法的相关系数在0.60以上(图3(c)),最高值在 $R(874.53)$ 和 $R(1174.77)$ ,相关系数是0.68,相关指数 $R^2 = 0.54$ .

比值方法与NDVI算法的相关波段的分布基本一致,都是在874.53nm与1174.77nm波段,相关性稍有差异;差分方法相关系数最高值在874.53nm与1184.87nm波段,最高相关波段的位置与比值、NDVI算法相比,有一个波段(10.1nm)的变化.这表明不同算法不仅相关系数大小有较大的变化,而且不同算法的最高相关波段也有差异.此外,悬浮物高相关波段主要集中在730~900nm与980~1200nm的长波波段组合,这说明长波波段对高浓度悬浮物的反演有着比较积极的意义.

叶绿素浓度与不同算法的相关性普遍较高,由图3(d)~图3(f),可以看出, $R732.07 \sim R833.83$ nm波段区间与 $R467.52 \sim R691.37$ nm波段区间的反射率比值算法与叶绿素浓度相关系数为0.85以上(图3(d)),最高值在732.07nm和620.15nm,与叶绿素浓度相关系数在0.91左右,相关显著, $R^2 = 0.80$ ;反射率差值算法在 $R457.34 \sim R691.37$ nm波段区间和 $R732.07 \sim R833.83$ nm波段区间与叶绿素浓度的相关系数为0.85以上(图3(e)),最高值在 $R732.07$ 和 $R518.39$ nm,相关系数在0.90左右, $R^2 = 0.83$ ;NDVI算法在 $R467.52 \sim R691.37$ nm与 $R732.07 \sim R844$ nm波长区段与叶绿素浓度的相关系数在0.85以上(图3(f)),与 $(R620.15 - R732.07)/(R620.15 + R732.07)$ 的相关系数最高,约0.90,相关指数 $R^2 = 0.89$ .经过对比,NDVI算法与叶绿素浓度的相关指数最高.

分析结果表明,比值算法与NDVI算法的最高相关波段基本一致,位于620.15nm和732.07nm,而差值算法的最高相关波段位于518.39nm和732.07nm.不同算法的相关性有差异,而且高相关波段分布也有较大的变化.

由以上分析结果可以看到,不同算法的水质参数相关性有较大差异,而且不同算法的光谱波段响应也有一定的变化.因此有必要,也必须研究不同算

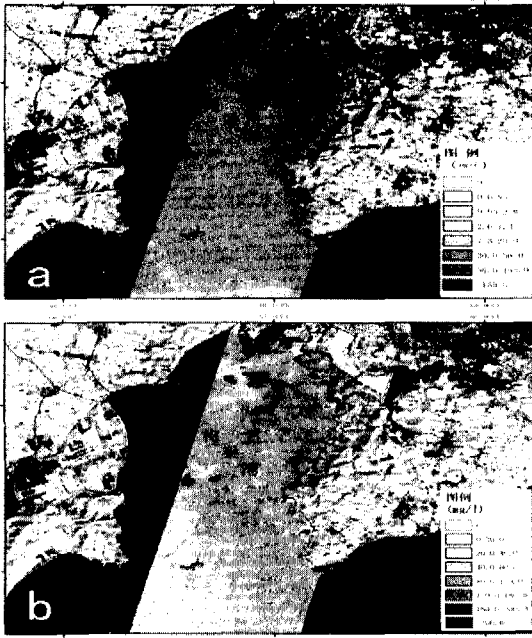


图4 利用2004年8月19日的Hyperion反演得到的太湖梅梁湾叶绿素和悬浮物浓度分布  
 Fig.4 The distribution of chlorophyll and suspended sediments retrieved by using Hyperion data, August 19,2004

法反演不同水质参数的精度差异,这些研究工作将为水质参数遥感反演算法的确定和最佳波段选取提供了一定的科学依据.

### 3.3 水质参数反演

利用25个点建立的悬浮物反演模型 ( $R = 0.80, R^2 = 0.65, n = 25$ ):

$$C_{SS} = 9171.4 (R_{874.53} - R_{1184.87})^{1.42};$$

利用25个点建立叶绿素的反演模型 ( $R = 0.90, R^2 = 0.89, n = 25$ ):

$$C_{chl a} = 99.98 * \exp[-11.47 (R_{620.15} - R_{732.07}) / (R_{620.15} + R_{732.07})];$$

此外,为了验证模型的有效性,利用没有参与建模的13个样点来验证模型.通过对比,发现模型反演结果与实测值基本相当:验证叶绿素浓度的最大误差在21.4 $\mu$ g/l以内;悬浮物最大误差在23.1mg/l以内,远小于所建模型的最大误差;验证的悬浮物浓度标准偏差16.43,小于反演模型的19.29,验证的叶绿素标准偏差3.75,小于模型的标准偏差9.03.

## 4 环境小卫星高光谱应用潜力

出于评估环境小卫星水质监测应用潜力,基于HYPERION反射率光谱,利用高斯通道响应函数,模拟了环境小卫星的波段设置及其地表真实反射



图5 2004年8月19日Hyperion获取的太湖富营养化状况  
 Fig.5 The comprehensive eutrophic status of Taihu waters derived from Hyperion imagery on August 19,2004

率,验证了环境小卫星的波段设置以及连续波谱进行水质监测潜力.

在450~890nm范围内,模拟环境小卫星数据与原始的Hyperion相比,反演精度普遍要高(表1).这表明模拟的环境小卫星数据波谱(5nm),利用特征波段建模更有效.与叶绿素反演都具有高精度不同,环境小卫星数据反演太湖悬浮物比Hyperion精度稍差,主要原因在于太湖水体悬浮物浓度很高(>200mg/l),光谱“红移”,更适合利用长波段建模,利用长波段(1184.87nm)建模的Hyperion能达到更高的精度,因此在反演高浓度悬浮物方面,Hyperion更具有优势.

## 5 湖泊富营养化评价

单一参数难以全面反映湖泊的营养状况,金相灿等(1995)基于中国26个湖泊的调查结果提出了水体综合营养评价的概念<sup>[11]</sup>.国家环保局地表水环境质量标准中常规测量五项指标与叶绿素和悬浮物存在十分密切的关系<sup>[3,12]</sup>.因此,通过遥感水质参数

表1 Hyperion与模拟环境小卫星悬浮物、叶绿素反演精度对比

Table 1 Comparison of the precision and accuracy in estimating water quality parameters by using Hyperion and modeling HJ satellite data

指标	算法	数据	R <sup>2</sup>	波段	RMSE
悬浮物 (mg/l)	差值	模拟	0.54	R794-R890	17.19
		Hyperion	0.40	R793-R854	20.12
叶绿素 ( $\mu$ g/l)	NDVI	n	0.85	(R722-R682)/ (R722 + R682)	15.32
		模拟	0.84	(R722-R681.2)/ (R722 + R681.2)	16.09

反演常规五项指标,从而根据水质富营养化综合评价<sup>[11]</sup>技术,计算了2004年8月19日太湖水体的综合营养评价指数,并进行了水质分级(如图5)。

氮、磷等营养元素与藻类的生长繁殖关系极为密切,从而成为水域富营养化过程的主要控制因子。所有的营养元素和有机污染物都分别通过河道(城市污水为主)或工业排污干渠(以工业废水为主)最终直接进入太湖,而成为太湖水体富营养化的主要来源。随着城市人民生活水平的不断提高,洗衣机与含磷洗衣粉使用量在迅速增加,因此通过城市生活污水排放出来的氮、磷等营养元素也在不断增加。从营养评价图像上可以看到无锡市入湖的河口水质属于重度富营养水体(图5),沿着河口延伸线上出现最大面积的极富营养水体,基本属于五类甚至劣于五类富营养化水体。这说明河水携带的入湖污染是太湖湖水富营养化最主要的原因。除了太湖周边城市入湖河水作为主要的排放污染源之外,农田径流等农田弃水也有部分氮、磷营养元素进入湖区,也是太湖富营养化的重要原因,表现在沿太湖岸边的出现的沿岸的重度富营养化或中度富营养化水体。沿航迹分布的中度—重度富营养化水体,表明作为很重要的交通方式的航运业对湖区水质的影响也是不可忽视的因素。

## 6 结语

本文的研究工作得出如下结论:

(1) 新一代陆地卫星 EO-1/Hyperion 高光谱数据具有很高的信噪比,经过图像预处理和大气纠正,可以充分满足内陆水质监测的精度要求。

(2) 研究发现水质参数遥感反演的不同算法,不仅相关性有很大差异,而且其高相关波段的分布也会发生一定的不同。

(3) 限于样点数量以及浮游藻类、悬浮物的物质组成会随时相发生改变,从而影响水体的光学特性。因此文中所述算法、模型在其他水域和季节在通用性方面,尚需要进一步研究、验证和改进。

(4) 基于遥感反演水质参数,通过遥感指标和常规监测指标的定量关系,能够建立基于遥感数据的水质综合富营养化评价指标,为遥感辅助常规水质监测奠定一定研究基础。

(5) 基于 Hyperion 数据模拟的环境小卫星高光谱数据能够有效的监测水体水质参数,展示了环境小卫星高光谱传感器的水环境监测的应用潜力。

致谢 对美国 NASA 和美国地质调查局(USGS)提供 Hyperion 高光谱数据、对中科院南京湖泊所太湖生态监测站帮助分析水质监测数据表示感谢;同时非常感谢不知名的审稿人给出的严谨的修改意见。

## REFERENCES

- [1] Kirk J T O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* [M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- [2] Sathyendranath S. Remote sensing of ocean color in coastal and other optically complex waters[R]. IOCCG Project Office. 2003-09-02. <http://www.ioceg.org>.
- [3] 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.
- [4] SU 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.
- [5] LIU Tang-You, KUANG Ding-Bo, Yin Qiu. Study on hyperspectral quantitative model of concentrations for chlorophyll- $\alpha$  of alga and suspended particles in Tai Lake [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘堂友, 匡定波, 尹球. 湖泊藻类叶绿素 $\alpha$ 和悬浮物浓度的高光谱定量遥感模型研究. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(1):11—15.
- [6] YIN Qiu, GONG Cai-Lan, KUANG Ding-Bo, et al. Methods of satellite remote sensing of water quality and its applications [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球, 巩彩兰, 匡定波, 等. 湖泊水质卫星遥感方法及其应用. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(3):198—202.
- [7] Gong P, Pu R, Biging GS, et al. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. [J] *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6):1355—1362.
- [8] Huete A R, Miura T, Gao X. Land cover conversion and degradation analyses through coupled soil-plant biophysical parameters [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6):1268—1276.
- [9] Brando V E, Dekker A G. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6):1378—1387.
- [10] Richard Beck. EO-1 user guide v. 2. 3. [R]. University of Cincinnati. July 15, 2003. available at: <http://EO1.usgs.gov>.
- [11] JIN Xiang-Can, LIU Shu-Kun, ZHANG Zong-She. *China Lake Environment* [M]. Beijing: China Ocean Press (金相灿, 刘树坤, 章宗涉. *中国湖泊环境*. 北京:海洋出版社), 1995.
- [12] SUN Hong-Lic. *Ecosystems in China* [M]. Beijing Science Press (孙鸿烈. *中国生态系统*. 北京:科学出版社), 2005.