

# 北方典型水库型水源地水体叶绿素 a 含量遥感监测研究\*

韩立妹 肖捷颖\*\* 王宇游 崔建升

(河北科技大学环境科学与工程学院 石家庄 050018)

**摘 要** 遥感监测具有监测区域广、速度快、省时省力等优势,常用于大面积水质监测。其中,叶绿素 a 浓度是水质监测的一个重要指标。叶绿素 a 遥感反演的关键是建立遥感数据和叶绿素 a 含量的定量关系。本文选取石家庄市饮用水源地黄壁庄水库为研究区域,通过进行水体反射光谱现场测量和同步水质采样,得出研究区水体反射光谱特征,并采用丙酮-分光光度法测得各水样中叶绿素 a 含量。在此基础上通过波段比值模型及一阶微分模型分别分析叶绿素 a 浓度与反射率之间的线性相关性。结果表明,黄壁庄水库各采样点水体叶绿素 a 浓度均在  $4.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,光谱反射率比值  $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$  和 696 nm 反射率的一阶微分值均与叶绿素 a 浓度有较显著的线性相关性( $r^2$  分别为 0.736 6 和 0.875 5)。本文所得结论与方法可为未来对北方水库型水源地水体进行大面积遥感监测叶绿素 a 含量提供理论参考。

**关键词** 典型水库型水源地 叶绿素 a 遥感监测 反射光谱 波段比值模型 一阶微分模型

**中图分类号:** X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)09-1243-05

## Application of hyper-spectral remote sensing in monitoring chlorophyll-a concentration in drinking water source reservoir in North China

HAN Li-Mei, XIAO Jie-Ying, WANG Yu-You, CUI Jian-Sheng

(School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract** Remote sensing has been widely used for water quality monitoring in recent decades. Hyper-spectral remote sensing is a very effective technology for detecting large-scale water eutrophication, which has attracted lots of research in monitoring chlorophyll-a. In this paper, we used hyper-spectral remote sensing technology to present a method for monitoring chlorophyll-a concentration in Huangbizhuang Reservoir in Shijiazhuang, Hebei Province. In-situ hyper-spectral measurements were conducted by using the portable EKO MS-720 spectroradiometer at 10 different points in Huangbizhuang Reservoir, the source of drinking water for Shijiazhuang City and irrigation water for a large area of croplands along Shijin Irrigation Channel. Water samples were also simultaneously collected for laboratory analyses. Sample site position information was recorded via portable GPS. Chlorophyll-a concentration of the water samples were measured in laboratory by Acetone-spectrophotometric. The hyper-spectral data were converted into remote sensing reflectance. Then different band reflectance, reflectance ratio and other reflectance indices were designed and calculated. Linear correlation analysis between chlorophyll-a concentration and spectral reflectance, reflectance ratio and first-order differential of the water sample reflectance were also analyzed and compared. At last, the spectral reflectance ratio model and the first-order differential model were selected based on obtained correlation coefficient and significance. The results showed that Huangbizhuang Reservoir water chlorophyll-a concentration was low, with the highest concentration of  $4.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . It indicated that the reservoir water was in good condition. Spectral reflectance ratio model ( $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$ ) showed close correlation with chlorophyll-a concentrations ( $r^2 = 0.736\ 6$ ). On the other hand, the 696 nm first-order differential reflectance model showed a lot more significant correlation with chlorophyll-a concentrations in the entire analytical tests ( $r^2 = 0.875\ 5$ ). This illustrated that the 696 nm first-order differential reflectance model was more effective for chlorophyll-a concentration monitoring in Huangbizhuang

\* 河北省自然科学基金项目(D2010000867)和河北科技大学大学生科技创新基金项目资助

\*\* 通讯作者: 肖捷颖(1970—), 博士, 副教授, 主要从事遥感应用研究。E-mail: xiaojieying@gmail.com

韩立妹(1989—), 女, 大学本科, 主要从事环境科学研究。E-mail: hanlimeide@163.com

收稿日期: 2011-11-02 接受日期: 2012-05-10

Reservoir. Through linear regression estimation, chlorophyll-a concentration in Huangbizhuang Reservoir was generally at the state of oligotrophication. Hence with regard to chlorophyll-a concentration, Huangbizhuang Reservoir water was suitable for domestic, industrial and irrigation use. The method proposed in this work had potential applications in environmental management for improved chlorophyll-a concentration monitoring efficiency in large-scale water bodies. It was also applicable in policy/decision-makings needed for early warning and prevention of water eutrophication.

**Key words** Drinking water resource reservoir, Chlorophyll-a, Remote sensing monitoring, Reflectance spectra, Band ratio model, First-order differential model

(Received Nov. 2, 2011; accepted May 10, 2012)

内陆水体由于各种污染物的注入, 水体易趋于富营养化。富营养化水体的一个重要特征是藻类物质大量繁殖。由于叶绿素在藻类物质中所占比例较为稳定, 因此叶绿素浓度常作为反映水体富营养化程度的一个重要指标<sup>[1-2]</sup>。而叶绿素 a 存在于所有藻类中, 因此水体营养化状态常通过叶绿素 a 浓度来表达。常规的叶绿素 a 浓度测定主要是通过采集水样、过滤、萃取以及分光光度计分析, 对于大区域的水环境监测而言是一项极费人力、物力和时间的工作, 而且采样方法也不易对大面积水体内的藻类空间分布做面状调查。而遥感技术因其可以提供快速、多时相、多源、大面积的数据而被广泛应用, 并可以有效地监测水质参数在空间和时间上的变化, 发现一些常规方法不易表达的污染物迁移等特征<sup>[3-4]</sup>。

水体叶绿素 a 含量的遥感监测多通过分析水体反射光谱特征与叶绿素 a 浓度之间的关系来建立数学模型, 再应用到遥感图像上进行反演, 从而进行大面积水域的叶绿素 a 浓度定量估算, 这一方法具有监测范围广、速度快和便于进行长期动态监测的优势, 可利用遥感技术实现区域尺度乃至全球尺度上水体表层水质参数的时空动态变化监测<sup>[5]</sup>。欧洲和北美的学者早已开展了利用遥感监测湖泊水体叶绿素 a 含量分布的研究<sup>[6-9]</sup>。Dekker 等<sup>[7]</sup>定量分析了 Landsat TM 数据 6 个波段值与叶绿素 a 浓度间的关系, 提出在该研究区域定量估算叶绿素 a 浓度时指数模式优于线性模式的结论; Fraser<sup>[8]</sup>通过对光谱反射率与叶绿素 a 浓度的关系进行研究, 发现反射率的一阶微分值与叶绿素 a 浓度存在较显著的相关性; 而 Kevin 等<sup>[9]</sup>指出可以用 672 nm 和 704 nm 波段的反射率比值来反演叶绿素 a 浓度。国内学者也利用遥感技术对水体叶绿素分布方面进行了大量研究<sup>[10-13]</sup>, 如疏小舟等<sup>[11]</sup>研究了太湖水体归一化反射率与叶绿素 a 浓度的相关性, 对采样测量的水体叶绿素 a 浓度与反射比  $R_{705nm}/R_{675nm}$  数据进行二次多项式拟合, 多项式拟合度约 0.192。另有研究<sup>[12]</sup>在分析巢湖水体反射光谱特征的基础上, 利用反射率比值法和一阶微分法分别建立了叶绿素 a 的遥感定量模型, 结果表明

反射率比值  $R_{705nm}/R_{680nm}$  和 690 nm 反射率的一阶微分均与叶绿素 a 浓度有较显著的相关性, 且用反射率比值法估算叶绿素 a 效果相对较好。

目前, 国内研究主要集中在东南沿海和南方的一些大型湖泊, 而对北方的湖泊、水库、饮用水源地等水体的研究相对较少。林飞娜<sup>[14]</sup>以白洋淀水体为研究对象, 开展内陆水体光谱特征分析, 并对不同波段或波段组合与地面实测叶绿素 a 浓度的相关性进行分析, 建立适合白洋淀地区的叶绿素 a 浓度反演模型。竞霞等<sup>[15]</sup>探讨了利用 IRS-P6 遥感数据定量反演密云水库叶绿素浓度的方法。但水库型水源地叶绿素 a 含量的研究还鲜有报道。

本试验选取石家庄市饮用水源地黄壁庄水库为研究对象, 通过进行水体反射光谱现场测量和同步水质采样, 得出水体反射光谱特征及水体叶绿素 a 浓度, 进而分析两者之间的相关关系, 寻找基于野外实测水体光谱估测黄壁庄水库表层水体叶绿素 a 浓度的最佳方法, 为北方典型水库型水源地水体营养化程度的快速监测提供参考。

## 1 研究区域

石家庄市地处河北省中南部, 冀中南经济区。位于北纬  $37^{\circ}27' \sim 38^{\circ}47'$ , 东经  $113^{\circ}30' \sim 115^{\circ}20'$  之间, 年平均气温  $13.6^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水 492 mm, 年平均日照 1 909 h 左右。石家庄辖区内河流分属海河流域大清河水系和子牙河水系, 各河上游支流较多, 加之源短流急, 均具有洪水陡涨陡落的特点。

黄壁庄水库位于河北省鹿泉市黄壁庄镇附近的滹沱河干流上, 控制流域面积为  $24\ 690\text{ km}^2$ , 总库容 12 亿  $\text{m}^3$ 。该水库距省会石家庄市约 30 km, 是海河流域子牙河水系两大支流之一——滹沱河中下游重要的大型水利工程, 以防洪为主, 可基本控制滹沱河山区的全部洪水。对于保证下游地区几百万人民群众的生命安全, 保证石家庄市的防洪安全发挥了重要作用。黄壁庄水库除了防汛外, 还承担着北京市、石家庄市的居民生活用水、工业用水, 以及石家庄市、邢台、衡水等地区的农业灌溉用水, 因此黄壁庄水库具有北方典型水库型水源地水体特征。

## 2 数据获取

于2011年5月22日对石家庄市黄壁庄水库水体进行了现场高光谱测量和水样采集。当日天气晴朗, 风速 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 水面基本平静。同时, 用手持式GPS记录采样点的地理位置(如图1所示)。

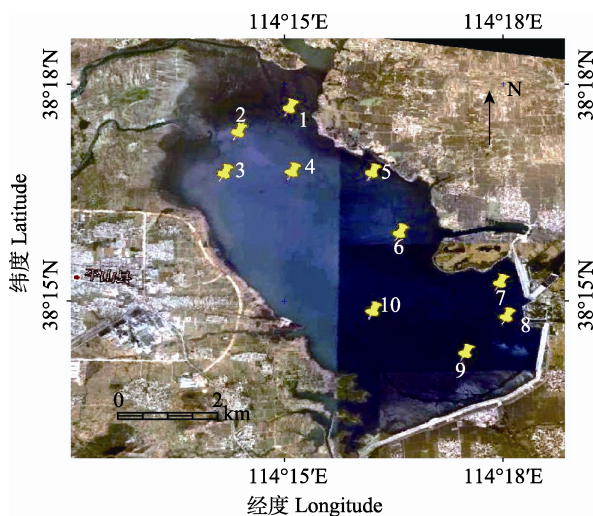


图1 黄壁庄水库采样点分布示意图

Fig. 1 Sampling points distribution of Huangbizhuang Reservoir

### 2.1 光谱数据获取

光谱测量采用日本 EKO 的 MS-720 便携式光谱辐射度计, 该仪器测定的光谱范围为  $350\sim 1\,050\text{ nm}$ , 共 256 个波段, 光谱采样间隔为  $3.3\text{ nm}$ , 分辨率为  $0.3\text{ nm}$ 。光谱测量在北京时间 9:00—14:00 进行, 测量的观测几何为: 仪器观测平面和太阳入射平面的夹角大约是  $135^\circ$ , 仪器与水面法线的夹角大约为  $45^\circ$ , 光谱测量参照文献[16]的方法。光谱反射率通过所测水体的反射辐射与入射辐射的比值得到。

### 2.2 水样采集及测定方法

光谱测定后, 在每个地点采集水样约  $1\text{ L}$ (采样前将瓶润洗), 采样后立即用黑色塑料袋罩住, 避免阳光直射。水样叶绿素浓度的测定在采样后立即完成, 否则放入冰箱内冷藏, 以防止酸化引起色素溶解。叶绿素 a 浓度测量采用国家行业标准——叶绿素的测定分光光度法(SL 88—1994)[17]。

## 3 结果与分析

### 3.1 水库叶绿素 a 的含量特征

水体采样点位置及叶绿素 a 浓度测定结果见表 1 所示。该结果通过与刘浩等[18]报道的富营养化分级标准对比, 可知黄壁庄水库采样点水体叶绿素 a 浓度较低, 处于贫营养化状态, 水质较好, 适于用作生活、工业及灌溉用水。

表 1 黄壁庄水库 10 个采样点的位置及叶绿素 a 浓度

Table 1 Positions of sampling points and chlorophyll-a concentrations in Huangbizhuang Reservoir

采样点 Sampling point	纬度 Latitude	经度 Longitude	叶绿素 a 浓度 Chl. a concentration ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )
1	$38^\circ18'01.73''\text{N}$	$114^\circ14'52.44''\text{E}$	4.095
2	$38^\circ17'34.54''\text{N}$	$114^\circ14'00.11''\text{E}$	4.550
3	$38^\circ16'52.04''\text{N}$	$114^\circ13'45.76''\text{E}$	1.820
4	$38^\circ16'52.04''\text{N}$	$114^\circ14'58.15''\text{E}$	0.455
5	$38^\circ16'56.27''\text{N}$	$114^\circ16'21.67''\text{E}$	0.455
6	$38^\circ15'53.93''\text{N}$	$114^\circ16'49.25''\text{E}$	0.455
7	$38^\circ15'01.21''\text{N}$	$114^\circ18'32.72''\text{E}$	1.820
8	$38^\circ14'24.41''\text{N}$	$114^\circ18'40.34''\text{E}$	0.910
9	$38^\circ13'47.42''\text{N}$	$114^\circ17'57.30''\text{E}$	0.910
10	$38^\circ14'31.23''\text{N}$	$114^\circ16'20.72''\text{E}$	0.455

### 3.2 水体光谱特征

洁净水体的反射率在可见光区范围内总体较低, 并随波长增加而进一步降低, 至  $750\text{ nm}$  以后的红外波段水几乎成了全吸收体[18]。含藻类水体的光谱特征为: 在  $400\sim 500\text{ nm}$  范围内, 由于叶绿素 a 及黄色物质的强烈吸收作用, 反射率较低; 在  $560\sim 580\text{ nm}$  范围内, 由于叶绿素 a 和胡萝卜素的弱吸收以及藻类细胞和悬浮物的散射作用, 反射峰比较平坦; 在  $670\sim 680\text{ nm}$  范围内, 由于叶绿素 a 在  $670\text{ nm}$  附近有一个明显的吸收, 因此当藻类浓度较高时, 水体光谱反射率曲线在该处出现谷值;  $690\sim 710\text{ nm}$  范围内的反射峰则是估算叶绿素的依据[19]。

图 2 显示了黄壁庄水库 10 个采样点表层水体的光谱反射率曲线, 这些曲线基本符合含藻类水体的光谱特征。在  $670\sim 710\text{ nm}$  范围内的波谷、波峰不明显, 是由于该水体中叶绿素 a 浓度不高。而叶绿素 a 浓度偏低可能是由于水样采集时间为 5 月份, 水体温度较低, 水体悬浮物浓度相对变化较大, 掩盖了叶绿素 a 的信息[20]。水样光谱特性比较敏感, 浮游植物及由黄腐酸、腐殖酸等组成的溶解性有机物在其自然浓度条件下可分别选择吸收一定波长范围的光, 形成各自的特征吸收波谱, 对反射光谱也有一定影响[19]。另外, 在采样过程中发现黄壁庄水库中下部存在少量水草, 使水样反射光谱在近红外波段有反射峰, 高于洁净水体在近红外部分的反射率[19]。

### 3.3 模型建立

#### 3.3.1 波段比值模型

反射比可以部分消除水体表面光滑度和波动随时间和空间变化的干扰, 并在一定程度上减少其他污染物的影响[10]。利用近红外反射率最大值和红外反射率极小值附近两个波段的反射率比值, 可以定量估算叶绿素 a 浓度[21]。本文在分析水体反射光谱

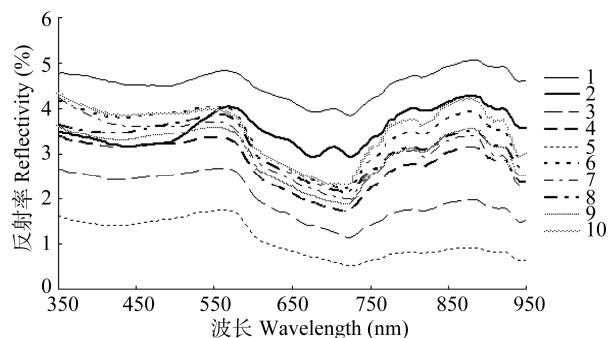


图 2 黄壁庄水库 10 个采样点表层水体反射光谱曲线  
Fig. 2 Water reflectance spectra of sampling points in Huangbizhuang Reservoir

特征的基础上,选择 705 nm 和 680 nm 两个波段反射率的比值作为自变量,叶绿素 a 浓度作为因变量进行回归分析,得到线性回归方程:

$$\text{Chl. a}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = -21.452 + 24.172 \times \frac{R_{705}}{R_{680}} \quad (1)$$

叶绿素 a 浓度与其反射率波段比  $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$  的关系及拟合曲线如图 3 所示,两者存在显著相关性,  $r^2$  达 0.736 6。波段比值中的 705 nm 波段位于高反射率位置,保证了较高的信噪比,680 nm 附近叶绿素 a 的吸收特征是惟一的,且两个波段之间彼此靠近,受非色素悬浮物及黄色物质的影响相似<sup>[20]</sup>,所以该模型可以用来估算表面水体的叶绿素 a 浓度。该结果与马荣华等<sup>[22]</sup>利用  $R_{706\text{nm}}/R_{682\text{nm}}$  建立的直接线性关系模型的研究结论有所差异,主要是由于黄壁庄水库的叶绿素 a 浓度比太湖的叶绿素 a 浓度小得多,由于数据量相对较少,所以不能进行充分比较,需要在加大采样点数量和采样范围后再进一步分析。

### 3.3.2 一阶微分模型

一阶微分处理可以消除线性或者接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱的影响<sup>[23]</sup>。光谱数据的一

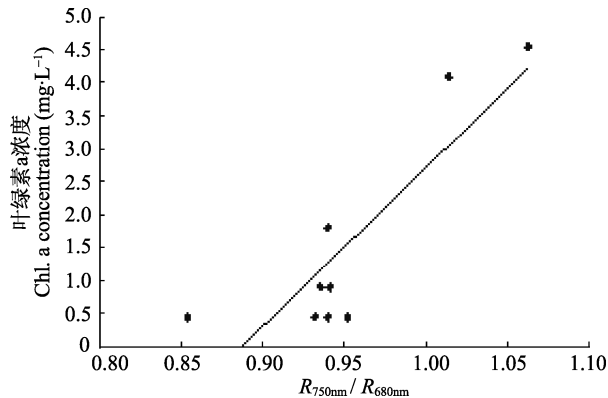


图 3 黄壁庄水库叶绿素 a 浓度与其反射比  $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$  的关系  
Fig. 3 Relationship between chlorophyll-a concentration of water samples and spectral reflectance ratio of  $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$  in Huangbizhuang Reservoir

阶微分计算公式为:

$$R'(\lambda_i) = [R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_i)] / (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \quad (2)$$

式中,  $R(\lambda_{i+1})$  和  $R(\lambda_i)$  分别为相邻波长的反射率,  $R'(\lambda_i)$  为相邻波长中较小波长的反射率的一阶微分值。

本研究中水样光谱一阶微分值与叶绿素浓度相关性如图 4 所示。

叶绿素浓度在 675~700 nm 波长范围内及各波长处与反射光谱一阶微分存在显著相关性。481 nm、659 nm、715 nm 等波长处,两者的负相关关系较为显著。波长在 675~700 nm 两者相关系数均在 0.8 以上,其中在 696 nm 处最高,达到 0.935 7。利用 696 nm 处反射光谱一阶微分  $x$  与叶绿素浓度  $y(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$  作线性回归,分析结果如图 4 所示。

回归分析结果  $y=35\,243x+2.557\,7$ ,  $r^2=0.875\,5$  显示,696 nm 处反射光谱一阶微分与叶绿素浓度具有显著线性相关,该模型的精度高于利用反射比建立的模型精度,与宋玲玲等<sup>[24]</sup>的研究结论一致。黄壁

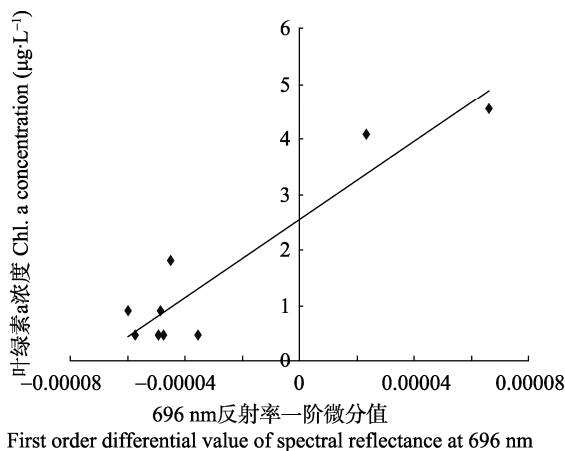
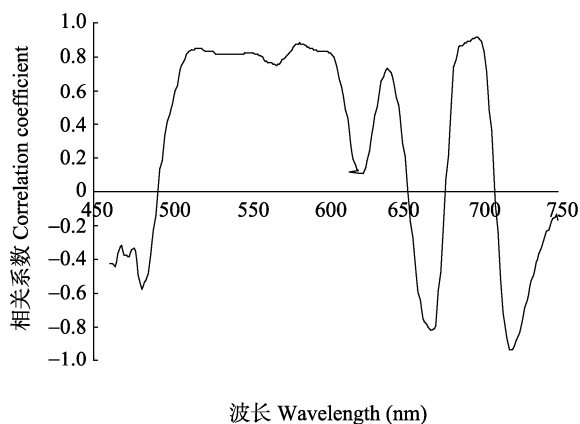


图 4 叶绿素 a 浓度与反射光谱一阶微分相关性(a)和回归分析(b)

Fig. 4 Correlation (a) and linear regression analysis (b) between chlorophyll a concentration and spectral reflectance first order differential value

庄水库水体表层叶绿素 a 浓度可以通过该回归分析模型进行估算。同时, 由于在 675~700 nm 范围内两者相关系数均在 0.8 以上, 因此波长范围可以扩展到 675~700 nm。

#### 4 讨论与结论

本文建立的黄壁庄水库水体叶绿素a浓度估测模型, 总体上效果比较理想, 为今后利用遥感数据在黄壁庄水库进行叶绿素a浓度大面积遥感反演研究提供了理论基础。但是由于叶绿素a浓度算法是以经验和半经验方法为主, 且具有地方性特点, 普适性较差, 因此所建立的公式是否具有通用性还需进一步验证。本试验由于采样点数量相对较少, 对模型的估算效果未进行检验, 还需加大采样点数量和范围的进一步研究工作, 提高叶绿素a浓度算法的估算精度, 还可增加对悬浮物及黄色物质固有光学特性对叶绿素a浓度测量的干扰研究, 探索更为合理的评价模型。

由黄壁庄水库采样点处所测得的叶绿素 a 浓度结果, 可以看出水库叶绿素 a 含量较低, 处于贫营养化状态, 水质较好, 适用于生活、生产及灌溉用水。本文在研究水体反射光谱特征的基础上, 通过波段比值模型及反射光谱一阶微分模型分别分析水体光谱反射率与其叶绿素 a 浓度之间的关系, 结果表明, 光谱反射率比值  $R_{705nm}/R_{680nm}$  和 696 nm 反射率的一阶微分均与叶绿素 a 浓度存在较显著的线性相关性( $r^2$  分别为 0.736 6 和 0.875 5), 可以用来估算研究区大面积水域水体的叶绿素 a 浓度。本试验以北方典型水库型水源地黄壁庄水库水体为研究对象, 利用遥感监测叶绿素 a 含量, 为北方其他水库型水源地水体的叶绿素 a 的遥感监测提供方法参考。

#### 参考文献

- [1] Cottingham K L, Carpenter S R. Population, community, and ecosystem variates as ecological indicators: phytoplankton responses to whole-lake enrichment[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(2): 508–530
- [2] Walks D J, Cyr H. Movement of plankton through lake-stream systems[J]. *Freshwater Biology*, 2004, 49(6): 745–759
- [3] 马荣华, 段洪涛, 张寿选, 等. 太湖草型湖区底质对遥感反射比的贡献[J]. *遥感学报*, 2008, 12(3): 483–489
- [4] 吴传庆, 王桥, 杨志峰. 基于混合像元分解的水体遥感图像去云法[J]. *遥感学报*, 2006, 10(2): 176–183
- [5] 宋瑜, 宋晓东, 江洪. 太湖藻类的遥感监测研究[J]. *遥感信息*, 2008(4): 102–108
- [6] Wright H, DeLonga J, Lada R, et al. The relationship between water status and chlorophyll a fluorescence in grapes (*Vitis* spp.)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 51(2): 193–199
- [7] Dekker A G, Peters S W M. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: A case study in the Netherlands[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(5): 799–821
- [8] Fraser R N. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll a among Nebraska Sand Hills lakes[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1579–1589
- [9] Kevin G R, Herman J G, Machteld R, et al. Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3575–3585
- [10] 刘英, 王珂, 周斌, 等. 千岛湖水体叶绿素浓度高光谱遥感监测研究初报[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2003, 29(6): 621–626
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Le C F, Li Y M, Zha Y, et al. Remote estimation of chlorophyll a in optically complex waters based on optical classification[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 725–737
- [14] 林飞娜. 内陆水体波谱特征分析及叶绿素 a 浓度遥感定量模型研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009
- [15] 竞霞, 黄文江, 王纪华, 等. 采用 IRS-P6 遥感数据监测密云水库水质及评价营养状况[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(Suppl 2): 13–17
- [16] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 37–44
- [17] 中华人民共和国行业标准. 叶绿素的测定(分光光度法)[S]. SL88-1994
- [18] 刘浩, 徐志侠, 陈超, 等. 官厅水库库区富营养化评价[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(1): 13–16
- [19] 贾海峰, 刘雪华. 环境遥感原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [20] 庞博, 李玉霞, 童玲. 基于半分析模型的叶绿素 a 浓度估算[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2011, 38(1): 54–58
- [21] 林珊, 张玉超, 钱新, 等. 广州流溪河水库叶绿素 a 遥感反演研究[J]. *环境保护科学*, 2010, 36(3): 43–46, 104
- [22] 马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度[J]. *遥感学报*, 2005, 9(1): 78–86
- [23] 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: 53
- [24] 宋玲玲, 仇雁翎, 张洪恩, 等. 淀山湖叶绿素 a 的高光谱遥感监测研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(1): 48–51