

## 基于固有光学量的高光谱数据反演城市河网水质

林剑远<sup>1</sup>, 张长兴<sup>2\*</sup>, 尤红建<sup>3</sup>

1. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083
3. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190

**摘要** 水体辐射传输模型是水体光谱特性分析的理论基础, 水体固有光学量由水体组成决定, 与水体表面光场无关。基于统计的半经验算法虽然能获取指定区域水质参数反演结果, 但是缺乏物理意义; 基于生物光学模型的分析算法, 针对城市河网内陆Ⅱ类水体光学特性复杂、空间分布异质性强、水体细小、流动性大等特点, 利用高光谱数据, 研究基于固有光学量的城市河网水质参数反演模型, 对内陆城市浑浊水体光谱特性研究具有重大意义。提出了适用于内陆城市河网水体的改进 QAA 算法, 以获取水体固有光学量, 改进包括后向散射估计模型调整和参考波段优化两个方面; 计算参考波段总吸收系数、颗粒物后向散射系数等固有光学量, 得到浮游植物吸收系数和剔除纯水吸收系数; 对浮游植物吸收系数最优波段比值与叶绿素 a 浓度进行线性回归分析, 构建叶绿素 a 水质浓度反演模型, 对剔除纯水吸收系数最优波段比值与悬浮物浓度线性回归分析, 构建悬浮物水质浓度反演模型。针对内陆河网Ⅱ类水体, 以典型的河网城市嘉兴市为研究区域, 获取了研究区域航空高光谱数据, 以及水质采样化验数据和水面以上光谱数据等地面准同步测量数据; 利用 QAA 算法和 IIMIW 算法对实测水面以上光谱进行固有光学量反演, 对比分析两个算法并结合城市河网水体特点, 提出改进 QAA 算法; 利用改进的 QAA 算法实现了研究区域水体的固有光学量反演, 基于反演的水体固有光学量建立了叶绿素 a 浓度和悬浮物浓度两项水色参数定量反演模型, 反演模型决定系数  $R^2$  分别为 0.64 和 0.71; 并用航空高光谱数据同步区域的 4 个地面样点实测数据, 对反演结果进行验证分析。通过水质参数浓度反演值与实测值的对比, 叶绿素 a 和悬浮物水质浓度反演的平均相对误差分别为 9.2% 和 9.4%, 反演得到的叶绿素 a 和悬浮物浓度分布图, 也与城市河网的特点和实际情况相符, 为城市河网水质监测提供方法和模型参考。

**关键词** 河网城市; 高光谱; 固有光学量; 改进 QAA; 水质反演

**中图分类号**: X87    **文献标识码**: A    **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3761-08

### 引言

水质常规监测方法是先采集水样, 根据所测不同水质参数选择相应的测量方法, 如重量法、萃取法、碘量法等进行实验室测量分析。基于光谱(遥感)的水质监测方法主要包括经验法、半经验法和分析法等, 实际的研究中半经验法得到了较广泛的应用。但经验法和半经验法是建立在数学统计的基础上, 不具有明确的物理意义, 受时间和空间特殊性的限制, 适用性较差。水体辐射传输模型描述了光在水中传输的物理过程, 描述水体光学特性的参量包括表观光学量和固有

光学量(inherent optical parameters, IOPs)两类, 其中水体固有光学量是由水体组成决定, 与水体表面光场无关。基于辐射传输理论的分析法, 具有明确的物理意义, 稳定性好、适用性强等优点, 是当前内陆水体水质参数反演算法的发展趋势。

目前, 水体固有光学量反演方法研究, 主要针对大洋 I 类水体或近海岸的Ⅱ类水体, 内陆Ⅱ类水体固有光学量研究较少, 且研究对象主要以湖泊和主干河流为主。Lee 等<sup>[1]</sup>提出了目前在固有光学量反演应用较为广泛的 QAA 算法(quasi-analytical algorithm), 该算法基于辐射传输理论构建了水表光谱反射率与水中各种因素固有特征之间的关系模

收稿日期: 2018-10-24, 修订日期: 2019-02-18

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07301-004)资助

作者简介: 林剑远, 1981 年生, 中国科学院大学工程科学学院博士研究生    e-mail: swordfar@163.com

\* 通讯联系人    e-mail: zzhangcx@163.com

型; 张民伟等<sup>[2]</sup>基于生物光学模型, 利用单纯形优化算法由水表光谱反射率来反演水体固有光学量; 郝艳玲等<sup>[3]</sup>以修正的 QAA 算法反演了珠江口海域赤潮水体的固有光学量; 张红等<sup>[4]</sup>基于 QAA 算法反演巢湖固有光学量, 用近红外双波段模型反演悬浮物浓度; Yang 等<sup>[5]</sup>改进了 QAA 算法中的参考波段、后向散射系数的光谱坡向估算方法和 443 nm 处浮游植物的吸收系数估计; Li 等<sup>[6]</sup>建立了适用于不同内陆水体的内陆水体固有光学量反演模型 IIMIWI (inversion model of inland waters); 谢飞等<sup>[7]</sup>建立了适用于昆承湖的 QAA 固有光学量反演模型; Watanabe 等<sup>[8]</sup>建立了适用于热带富营养化水域固有光学量反演的 QAA 算法; Xie 等<sup>[9]</sup>提出了 LSB-CC-QAA 算法反演内陆水域固有光学量; Ishan 等<sup>[10]</sup>在墨西哥湾对 QAA 算法改进, 得到适合近海浅水的 QAA-V 算法。

由于内陆城市河网受到水体组成、深度、流速等影响, 内陆混浊水体固有光学量更为复杂多变, 且具有水体细小、流动性大、空间分布异质性强等特点, 常规中低分辨率多光谱数据难以应用于城市河网水体水质反演。文章基于水面和航空高光谱数据, 以典型的河网城市嘉兴市为研究区域, 从水体固有光学量反演角度出发, 提出适合内陆浑浊水体的改进 QAA 算法, 实现水体固有光学量和叶绿素 a (chlorophyll-a, Chl-a)、悬浮物 (suspended solids, SS) 水质浓度的定量反演。

## 1 实验部分

### 1.1 数据获取

采用芬兰的机载高光谱成像系统 (airborne hyperspectral imaging systems, AISA) 获取了研究区域的航空高光谱数据, AISA 获取数据的光谱范围为 400~970 nm, 波段数 126, 航高 1 000 m, 地面空间分辨率约为 1.2 m, 航测区域范围约 80 km<sup>2</sup>, 共获取航线 14 条。水面和陆面测量实验是地面同步实验的主体, 采样点分布根据水体分布情况确定, 共采集 75 个样点, 如图 1 所示。

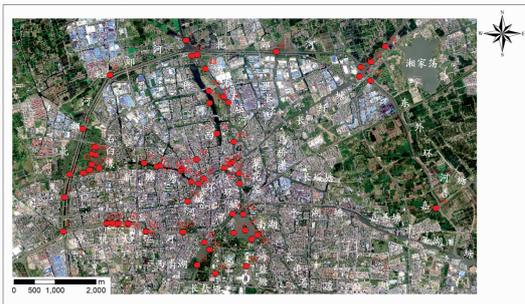


图 1 研究区域采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sample points in study region

2012 年 11 月 5 日—7 日和 11 月 19 日分 4 架次获取航空高光谱数据。2012 年 10 月 26 日, 11 月 1 日, 11 月 5 日—6 日期间, 在晴空无云、水体较稳定的情况下选取 10 至 15 时时间区段, 进行地面数据的采集。采集的数据包括: 水体样本、水面以上光谱数据及采样空间位置等辅助数据。水面

光谱测量使用 ASD 便携式野外光谱仪 FieldSpec® Pro FR (波长范围 350~2 500 nm), 采用“水面以上法”测量水面光谱, 测量时仪器观测平面与太阳入射平面夹角 135°, 探头与水面法线夹角 40° 的观测角度。为保障地面数据的代表性, 选取了不同类别区域进行水质采样, 包括湖泊、湿地、农业用地河网、航运河网和城市内部河网的水体进行采样; 同时选择开阔的陆面区域, 测量典型地物: 植被、裸土、道路等光谱数据用于航空高光谱数据的大气校正, 水面采集的水样送到水质检测站进行分析处理, 叶绿素 a 采用分光光度法测定, 悬浮物采用重量法测定, 获得 2 项水质参数浓度实测数据。

### 1.2 数据处理

航空高光谱数据预处理包括辐射校正、几何校正、大气校正、航带拼接以及水体提取, 其中对水质参数反演最重要的是大气校正。大气校正实现图像像元从表观辐亮度到地表反射率的转换, 大气条件输入的准确性直接影响地表反射率反演精度, 采取辐射传输模型法进行大气校正, 根据具体的成像时间和地理位置, 大气模式选择中纬度冬季模式, 气溶胶模型选择城市型, 能见度和水汽含量从附近气象站数据获取, 将这些大气条件参数等输入大气辐射传输模拟软件 MODTRAN 中计算, 获得地表反射率数据。进一步, 对研究区域水体提取实现水陆分离, 获取嘉兴的河网水体范围。

通过对水面同步实测的高光谱数据分析, 利用短波红外处水表反射率数据, 考虑水体在短波红外反射率应该为 0, 将不符合的异常数据剔除, 最终确定有效数据为 50 个, 利用式(1), 获取离水辐亮度, 最终获取水表反射率光谱  $R_{rs}$  曲线, 如图 2 所示。

$$L_w = L_{sw} - rL_{sky} \quad (1)$$

式中,  $L_w$  为离水辐亮度,  $L_{sw}$  为测量获得的水面以上辐亮度,  $r$  为气-水界面反射率,  $L_{sky}$  是不包含水体信息的天空光。

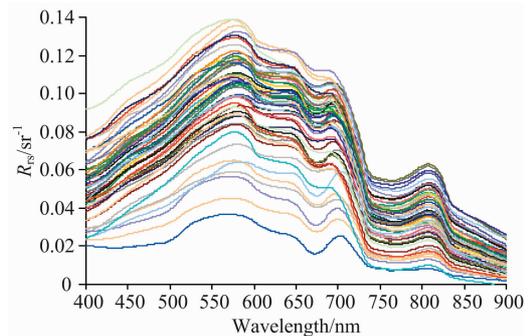


图 2 实测水体反射率光谱

Fig. 2 The measured water reflectance spectra

由水表反射率光谱曲线可见, 嘉兴市城市河网水体的水表反射率光谱曲线整体有 4 个比较明显的反射峰, 分别为 580 nm 附近、650 nm 附近、700 nm 附近和 820 nm 附近, 其中前三个反射峰组成了一个大的反射峰, 水表反射率从 580~700 nm 呈下降趋势, 600~650 nm 水表反射率变化较小, 700 nm 附近光谱反射率开始急剧下降, 850 nm 之后由于纯水的吸收作用, 水表反射率呈现趋于 0 的变化。

### 1.3 固有光学量反演方法

#### 1.3.1 理论基础

水体辐射传输模型是水体光谱特性分析的理论基础, 水体辐射传输模型是进行水体光学遥感建模的重要工具, 它模拟了水体辐射传输过程。水色遥感中一般不直接解算水体辐射传输方程, 而是经常使用由辐射传输方程经过简化近似后得到的生物光学模型。

实现水体固有光学量的反演首先需要构建表观光学量与固有光学量之间的联系, 模拟水体中的辐射传输过程, 相关学者做了大量的研究, 给出了吸收系数、后向散射系数与水表反射率的关系模型。

#### 1.3.2 QAA 算法和 IIMIW 算法实验研究

目前常用于内陆 II 类水体固有光学量反演算法有 QAA 算法、IIMIW 算法等。

QAA 算法是由 Lee 等<sup>[1-2]</sup>于 2002 年提出并不断发展的一种反演水体固有光学量的算法, QAA 方法是基于水表反射率和 IOPs 半经验关系的有效方法, 并且已经被近海岸和海洋区域获取的数据验证。QAA 算法的处理过程主要分为两个部分, 第一部分完成吸收系数和后向散射系数的反演, 第二部分利用反演获得的总吸收系数反演水体主要组成成分的吸收系数。利用 QAA 算法对实测水面以上光谱进行固有光学量反演, 获得剔除纯水总吸收系数, 如图 3(a)所示。

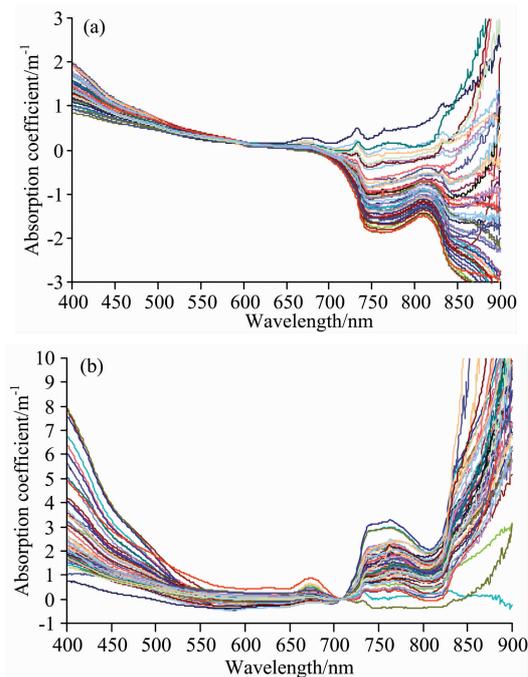


图 3 剔除纯水的总吸收系数

(a): QAA 算法; (b): IIMIW 算法

Fig. 3 Total absorption coefficient eliminated pure water

(a): QAA algorithm; (b): IIMIW algorithm

IIMIW 算法是由 Li 等<sup>[6]</sup>提出的一种应用于内陆水体固有光学量的反演算法, 该算法考虑到目前算法在构建生物光学模型中的常量应该为比较复杂的变量, 然后构建了波段比值的方式进行了消除, 同时利用经验模型获取参考波段的后

向散射系数, 最后计算全部波段的散射系数和吸收系数。利用 IIMIW 算法对实测水面以上光谱进行固有光学量反演, 如图 3(b)所示。

#### 1.3.3 改进 QAA 算法

分析应用 QAA 和 IIMIW 算法计算内陆水体存在的问题, 首先两种算法使用的 Y 系数估计模型都是经验模型, Y 系数是利用 NOMAD 数据集(NASA bio-optical marine algorithm data set)计算得出, 这些数据都是开阔海洋或近海水体, 与实际内陆水体有较大的差别, 因此这些经验模型并不一定适用。第二, QAA 算法是基于海洋遥感发展的, 含有大量悬浮物和有形溶解有机物内陆浑浊水体光谱更为复杂, QAA 算法不一定适用; 再则, QAA 算法在估计总吸收系数的参考波段时是通过模拟数据得出, 所选取的参考波段  $\lambda_0$  为 555 nm 不适用于内陆水体, IIMIW 估计后向散射系数的参考波段为 560 nm, 与 QAA 算法的参考波段十分接近。最后, 对于 IIMIW 算法利用波段比值最终计算其他波段的吸收系数时选取了 709 nm, 假设 709 nm 处的吸收系数只有纯水作用, 最终反演得到的参考波段后面的数据除了纯水吸收系数以外远大于 0, 出现了数据异常, 而且河网水体可能存在泥沙等影响, 在红光近红外水表反射率增加, 这个假设在河网水体基本不成立, 所以直接应用后向散射估计时, 在参考波段后波段吸收系数会出现较大的异常。

通过以上分析并结合河网城市水体特点, 对 QAA 算法做了适应性改进。通过表 1 和表 2 对比, 可以看出步骤 5 的后向散射估计模型进行了调整, 步骤 2—步骤 5 的参考波段转向近红外波段。

步骤 5 颗粒物后向散射估计模型调整。由于河网水体相比其他常规水体(海洋、湖泊等), 水体流动性导致水体中的泥沙等悬浮物浓度较高, 尤其在高空悬浮物含量的水体中后向散射系数并不满足幂指函数的关系, 河网水体相比其他水体的后向散射多出的散射由无选择性散射主导, 那么水体的后向散射受波长影响较小, 在假设泥沙等悬浮物浓度对光谱反射率随波段变化较小情况下, 可以得出式(2)经验估计模型。

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^Y + \rho R_{rs}(\lambda_0) \quad (2)$$

式中,  $b_{bp}(\lambda)$  和  $b_{bp}(\lambda_0)$  分别为所有波段和参考波段颗粒物后向散射系数,  $\rho=10$  为经验系数, Y 为颗粒物后向散射系数随波长的衰减指数, 为参考波段的水表反射率。

步骤 2—步骤 5 参考波段调整。已有的研究证实应用于浑浊水体时参考波段的选择应转向更长的谱段, 如果使用 NIR(near infrared)波段, 总吸收系数可以基本被纯水的吸收系数替代, 由于水的吸收系数远远大于其他物质,  $a(\lambda_0) \approx a_w(\lambda_0)$ , 其中 a 为总吸收系数,  $a_w$  为纯水吸收系数。

使用改进的 QAA 算法对实测水面以上光谱进行固有光学量反演, 得到浮游植物吸收系数[图 4(a)]和剔除纯水总吸收系数[图 4(b)]。

对于 QAA 算法获取剔除纯水吸收系数从图 3(a)可以看出, 吸收系数整体偏小, 吸收系数在 700 nm 之前呈现下降趋势, 在 700 nm 后的数据基本是异常值, 而且在 650~700 nm 之间的吸收系数出现了负值, 表明实际反演的总吸收系

数也较低。而对于图 4(b)中改进 QAA 算法反演的剔除纯水常值基本消除, 具有较好的效果, 符合水体的吸收系数实际情况。考虑无选择性散射和参考波段为 812 nm 时, 在参考波段前面的负值异常值以及近红外吸收系数较大的异

表 1 Lee QAA 算法具体步骤  
Table 1 Steps of Lee quasi-analytical algorithm

步骤	变量	数学公式	方法
0	$r_{rs}$	$=R_{rs}/(0.52+1.7R_{rs})$	半分析法
1	$\mu(\lambda)$	$=\frac{-g_0 + [(g_0)^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_1}; g_0=0.0895, g_1=0.125$	半分析法
2	$a(\lambda_0)$	$=a_w(\lambda_0) + 10^{-1.146-1.366\chi-0.469\chi^2}, \chi = \log\left(\frac{r_{rs}(443)+r_{rs}(490)}{r_{rs}(\lambda_0)+5\frac{r_{rs}(667)}{r_{rs}(490)}r_{rs}(667)}\right), \lambda_0=555$	经验法
3	$b_{bp}(\lambda_0)$	$=\frac{\mu(\lambda_0)a(\lambda_0)}{1-\mu(\lambda_0)} - b_{bw}(\lambda_0), \lambda_0=555$	分析法
4	$Y$	$=2.0\left\{1-1.2\exp\left[-0.9\frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(\lambda_0)}\right]\right\}, \lambda_0=555$	经验法
5	$b_{bp}(\lambda)$	$=b_{bp}(\lambda_0)\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^Y, \lambda_0=555$	半分析法
6	$a(\lambda)$	$=\frac{[1-\mu(\lambda)][b_{bw}(\lambda)+b_{bp}(\lambda)]}{\mu(\lambda)}$	分析法

表 2 改进 QAA 算法具体步骤  
Table 2 Steps of advanced quasi-analytical algorithm

步骤	变量	数学公式	方法
0	$r_{rs}$	$=R_{rs}/(0.52+1.7R_{rs})$	半分析法
1	$\mu(\lambda)$	$=\frac{-g_0 + [(g_0)^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_1}; g_0=0.0895, g_1=0.125$	半分析法
2	$a(\lambda_0)$	$=a_w(\lambda_0), \lambda_0=812$	经验法
3	$b_{bp}(\lambda_0)$	$=\frac{\mu(\lambda_0)a(\lambda_0)}{1-\mu(\lambda_0)} - b_{bw}(\lambda_0), \lambda_0=812$	分析法
4	$Y$	$=2.0\left\{1-1.2\exp\left[-0.9\frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(\lambda_0)}\right]\right\}, \lambda_0=812$	经验法
5	$b_{bp}(\lambda)$	$=b_{bp}(\lambda_0)\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^Y + \rho R_{rs}(\lambda_0), \rho=10, \lambda_0=812$	半分析法
6	$a(\lambda)$	$=\frac{[1-\mu(\lambda)][b_{bw}(\lambda)+b_{bp}(\lambda)]}{\mu(\lambda)}$	分析法

注:  $R_{rs}$ 为水面上反射率;  $r_{rs}$ 为水面以下反射率;  $\mu$ 为水面上反射率与水体总吸收系数和后向散射系数的关系变量;  $g_0, g_1$ 和  $\rho$ 为经验系数;  $\lambda$ 为波长;  $\lambda_0$ 为参考波段;  $a$ 为水体总吸收系数;  $b_{bp}$ 为颗粒物后向散射系数;  $b_{bw}$ 为纯水后向散射系数;  $Y$ 为颗粒物后向散射系数随波长的衰减指数

Note:  $R_{rs}$  is the remote sensing reflectance above water surface;  $r_{rs}$  is the remote sensing reflectance below water surface;  $\mu$  is a variable to describe the relationship between the remote sensing reflectance below water surface with total absorption and backscattering coefficients of water column;  $g_0$  and  $g_1$  and  $\rho$  are empirical coefficients;  $\lambda$  is wavelength;  $\lambda_0$  is the reference wavelength band;  $a$  is the total absorption coefficient of water column;  $b_{bp}$  is the backscatter coefficient of the suspended particles;  $b_{bw}$  is the backscatter coefficient of the pure water;  $Y$  is a attenuation index to characterize the attenuation of backscatter coefficient with the wavelength for the particles

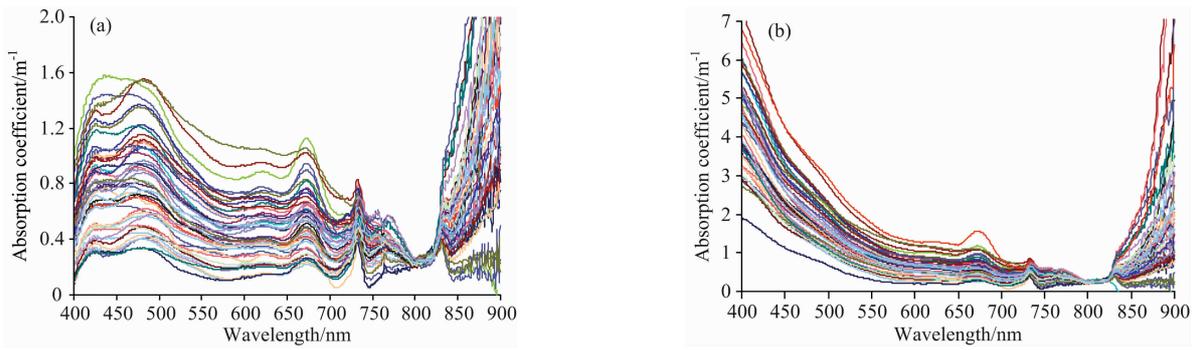


图 4 改进 QAA 算法反演水体固有光学量

(a): 浮游植物吸收系数; (b): 剔除纯水总吸收系数

Fig. 4 Inherent optical quantity retrieved by improved QAA algorithm

(a): Absorption coefficient of phytoplankton; (b): Absorption coefficient eliminated pure water

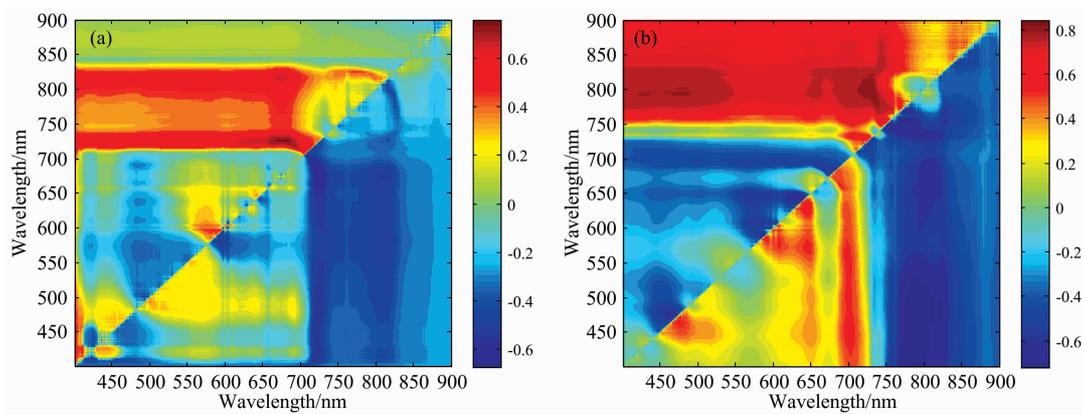


图 5 水质浓度与吸收系数波段组合的相关系数

(a): 叶绿素 a 浓度和浮游植物吸收函数; (b): 悬浮物浓度和剔除纯水吸收系数

Fig. 5 Correlation coefficient of concentration of water quality & combination of absorption coefficient band

(a): Concentration of Chlorophyll-a & absorption coefficient of phytoplankton;

(b): Concentration of suspended solids & absorption coefficient eliminated pure water

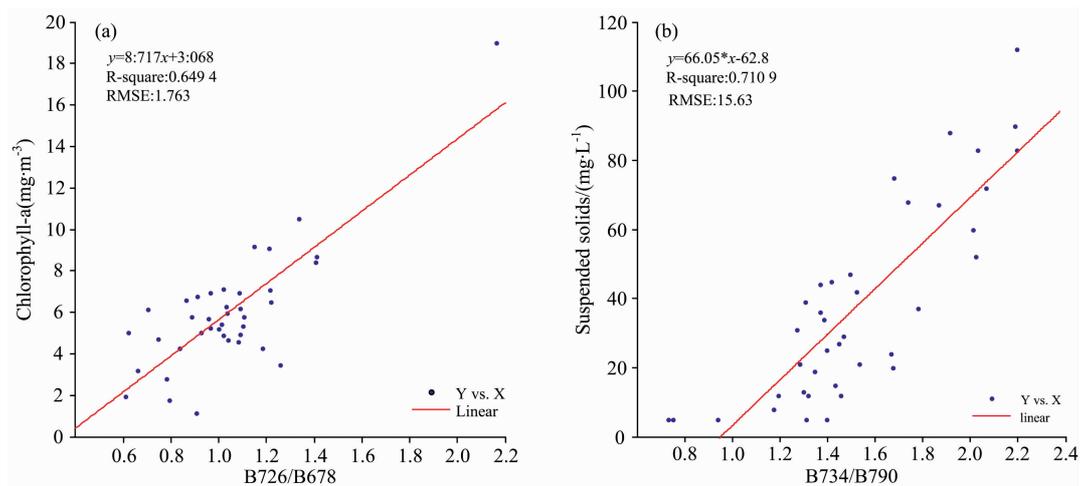


图 6 吸收系数最优波段比值与水质浓度线性回归分析

(a): 浮游植物吸收系数和叶绿素 a 浓度; (b): 剔除纯水吸收系数和悬浮物浓度

Fig. 6 Linear regression analysis of optimal band ratio between absorption coefficient & concentration of quality parameters

(a): Absorption coefficient of phytoplankton & concentration of Chlorophyll-a;

(b): Absorption coefficient of eliminated pure water & concentration of Suspended Solids

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质浓度反演模型

浮游植物通常指水中以浮游状态生活的小植物，叶绿素 a 含量与浮游植物的含量等信息直接相关。悬浮物通常指不溶于水的泥沙、粘土、藻类等，悬浮物含量与剔除纯水后的含量直接相关。计算叶绿素 a 浓度与浮游植物吸收系数波段组合，以及悬浮物浓度与剔除纯水吸收系数波段组合的相关系数，获得最佳波段组合，如图 6 所示。

图 5(a) 中叶绿素 a 浓度与浮游植物吸收系数的双波段比值相关系数位于 0.63 以上，呈现显著相关，而且叶绿素 a 浓度与浮游植物吸收系数波段组合的相关系数既有正值也有负值。叶绿素 a 浓度与中心波长为 677.2 和 725.1 nm 的浮游植物吸收系数的相关性最好，因此选择最优波段为 678 和 726 nm，这两个波段比值与叶绿素 a 浓度最大相关系数为 0.75，具有很强的线性相关性。

图 5(b) 中悬浮物浓度与剔除纯水吸收系数的双波段比值相关系数位于 0.65 以上，呈现显著相关，而且悬浮物与剔除纯水吸收系数波段组合的相关系数既有正值也有负值。悬浮物浓度与中心波长为 734.6 和 793.0 nm 的剔除纯水吸收系数的相关性最好，因此选择最优波段为 734 和 790 nm，这两个波段比值与悬浮物浓度最大相关系数为 0.82，具有很强的线性相关性。

浮游植物吸收系数最优波段比值  $B_{726}/B_{678}$  与叶绿素 a 浓度线性回归分析，剔除纯水吸收系数最优波段比值  $B_{734}/B_{790}$  与悬浮物浓度线性回归分析，如图 6 所示。

图 6(a) 得到叶绿素 a 浓度反演模型见式 (3)，拟合结果的决定系数  $R^2$  为 0.64，具有较强的线性相关性；均方根误差 RMSE 为 1.76。

$$c(\text{Chl-a}) = 8.717 \times \frac{a_{\text{ph}}(726)}{a_{\text{ph}}(678)} - 3.068 \quad (3)$$

式中， $c(\text{Chl-a})$  为叶绿素 a 浓度， $a_{\text{ph}}$  为浮游植物吸收系数。

图 7(b) 得到悬浮物浓度反演模型见式 (4)，拟合结果的决定系数  $R^2$  为 0.71，具有较强的线性相关性；均方根误差 RMSE 为 15.63。

$$c(\text{SS}) = 66.05 \times \frac{a_{\text{t-w}}(734)}{a_{\text{t-w}}(790)} - 62.8 \quad (4)$$

式中， $c(\text{SS})$  为悬浮物浓度， $a_{\text{t-w}}$  为剔除纯水吸收系数。

### 2.2 反演结果与分析

利用研究区航空高光谱数据和上述水质参数反演模型，反演得到研究区叶绿素 a 和悬浮物的浓度分布，如图 7 所示。

针对叶绿素 a 水质参数高光谱定量反演结果，利用与航空高光谱数据同步采集且未用于建模的 4 个水质采样化验数据进行对比分析，结果如表 3 所示，4 个样点的平均相对误差为 9.2%。

图 7(a) 中叶绿素 a 浓度较高的地方集中在北郊河北部的鱼塘以及西半部分农田中的池塘，同时在东外环河部分河的段也出现较高的值，叶绿素 a 浓度较低的区域集中在城市中

央的南湖、西南湖、环城河区域，而且在南湖等大面积水域也表现了叶绿素 a 浓度由湖边向湖心逐渐降低的趋势，外围河道区域的叶绿素 a 浓度略高于城市内部区域，这与在野外数据采集看到的航道有大量水葫芦等水生植物也比较相符，在石臼漾湿地区域净水沉淀池叶绿素 a 浓度也表现了由边缘向中心变小的趋势，而且湿地出水口的叶绿素 a 浓度也略低于入水口。

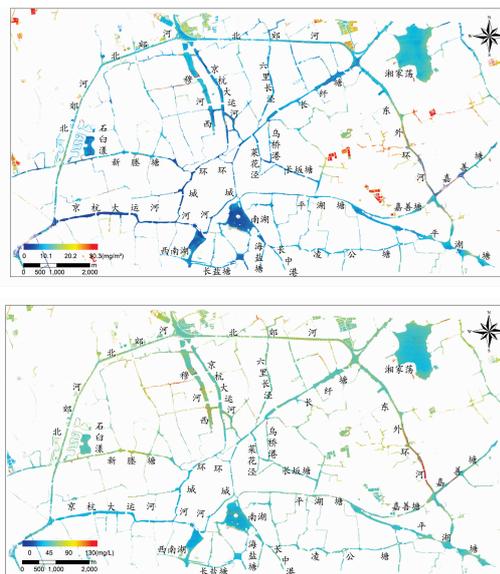


图 7 高光谱数据反演水质参数浓度分布图

(a): 叶绿素 a 浓度分布; (b): 悬浮物浓度分布

Fig. 7 Concentration distribution of water quality parameters retrieved using hyperspectral data

(a): Distribution of Chlorophyll-a concentration;

(b): Distribution of suspended solid concentration

表 3 叶绿素 a 水质参数反演和实测对比

Table 3 Comparison of retrieved and measured water quality parameters of Chlorophyll-a

样点	实测值/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	反演值/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
72	0.480	0.430
73	4.660	5.400
74	35.900	39.100
75	21.600	23.500
平均相对误差/%		9.2

针对悬浮物水质参数高光谱定量反演实验结果，利用与航空高光谱数据同步采集且未用于建模的 4 个水质采样化验数据进行对比分析，结果如表 4 所示，4 个样点的平均相对误差为 9.4%。

图 7(b) 中悬浮物线性反演结果分布基本呈现以南湖为中心，向四周扩散浓度逐渐偏高的趋势，由于外围主航道受到水流速以及船只扰动的结果，北郊河、东外环河泥沙含量较高，悬浮物浓度最高，城市中部各水系石臼漾湿地、新滕塘水系西段、京杭大运河(中部段)、穆河溪、长纤塘、六里

长泾水系、嘉善塘东段悬浮物浓度次高；南湖、西南湖、湘家荡、环城河、京杭大运河(西段)水系浓度最低。

**表 4 悬浮物水质参数反演和实测对比**  
**Table 4 Comparison of retrieved and measured water quality parameter of suspended solids**

样点	实测值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	反演值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
72	6.000	4.670
73	21.000	25.220
74	42.000	51.740
75	27.000	23.440
平均相对误差/%		9.4

根据航空高光谱数据反演的水质参数与地面水样水质浓度对比,叶绿素 a 水质浓度反演结果相比悬浮物较好,与水质反演模型构建时的均方根误差对比一致。用于分析反演结果的 4 个地面样点数据,处于航空高光谱数据同步获取区域,实验结果分析的条件较好。4 个样点实测值对应的反演值,是对验证样点位置半径 5 米反演结果平均值作为对比的反演值,提高了结果分析准确性。从叶绿素 a 和悬浮物浓度分布特征分析上,也基本与嘉兴市城市河网实际运行情况相符。

## References

- [1] Lee Z, Carder K L, Arnone R A. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755.
- [2] ZHANG Min-wei, DONG Qing, TANG Wu-jun, et al(张民伟,董庆,唐军武,等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2011, 31(5): 1403.
- [3] HAO Yan-ling, CAO Wen-xi, CUI Ting-wei, et al(郝艳玲,曹文熙,崔廷伟,等). *Acta Oceanologica Sinica(海洋学报)*, 2011, 33(1): 52.
- [4] ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, et al(张红,黄家柱,李云梅,等). *Environmental Science(环境科学)*, 2012, 33(2): 429.
- [5] Yang W, Matsushita B, Chen J, et al. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2013, 51(6): 3761.
- [6] Li L, Li L, Song K, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 135: 150.
- [7] XIE Fei, GUO Zi-qi, TIAN Ye, et al(谢飞,郭子祺,田野,等). *Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用)*, 2015, 30(2): 242.
- [8] Watanabe F, Mishra D R, Astuti I, et al. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2016, 121(C): 28.
- [9] Xie F, Zhang C, Shao H, et al. *Proceedings of SPIE*, 2017, 255: 102551Z.
- [10] Ishan D Joshi, Eurico J D'Sa. *Biogeosciences*, 2018, 15: 4065.

## 3 结论

按照水体辐射传输模型和生物光学模型原理,从固有光学量角度出发,研究了河网城市水体固有光学量的反演,基于固有光学量数据完成了叶绿素 a 浓度和悬浮物浓度两项水色参数的反演。

在考虑河网水体颗粒物无选择性散射的影响,修正了后向散射系数的估算模型,同时以近红外波段取代 QAA 算法中 555 nm 的绿光波段作为参考波段,提出了适用于内陆浑浊水体的改进 QAA 算法,改进 QAA 算法相比 QAA 算法在城市河网水体固有光学量反演中可以取得了更好效果。基于浮游植物吸收系数构建了叶绿素 a 浓度的反演模型,基于剔除纯水外的水体吸收系数构建了悬浮物浓度的反演模型,获得了较好精度的叶绿素 a 和悬浮物两项水质参数的高光谱定量反演结果,且与城市河网的特点和实际情况相符。

文章可为城市河网水质监测方法和模型提供参考,改进 QAA 算法的结果可以直接应用,还可进一步研究提高水质参数定量反演精度,获取水下固有光学量实测数据和对应的水质化验数据,对改进 QAA 算法反演固有光学量结果进一步验证并优化算法,再用优化后的 QAA 算法进行水质参数反演。

# Retrieval of Water Quality Parameters of Urban River Network Using Hyperspectral Data Based on Inherent Optical Parameters

LIN Jian-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Chang-xing<sup>2\*</sup>, YOU Hong-jian<sup>3</sup>

1. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Key Laboratory of Spatial Active Opto-Electronic Technique, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

3. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** The water radiative transfer mechanism is the theoretical basis of water spectral characteristic analysis. The inherent optical parameters of water due to the composition of the water is independent of the surface light field of water. The semi-empirical algorithm based on statistics can be used to retrieve water quality parameters in some specified areas. However, that is lacking in physical meaning. It was of great significance for the study of the spectral characteristics of turbid water in inland cities to study the model to retrieve the water quality parameters of urban river network based on inherent optical parameters using hyperspectral data. The study was based on the analysis algorithm of bio-optical model. Taking the consideration of the characteristics of inland type II water of urban river network such as complexity of optical characteristics, strong heterogeneity of spatial distribution, small water and large fluidity. The paper came up with an improved QAA algorithm suitable for water of inland urban river network to obtain the inherent optical parameters of water. The improvements included the following two aspects: adjustment of the backscattering estimation model and optimization of the reference band. By calculating inherent optical parameters, such as the coefficient of total absorption of the reference band, the coefficient of backscattering particles, etc., coefficient of phytoplankton absorption was obtained and coefficient of pure water absorption was eliminated in this paper. A linear regression analysis was carried out on the optimal ratio of coefficient of phytoplankton absorption and concentration of chlorophyll-a to build a model to retrieve water quality of chlorophyll-a concentration. A linear regression analysis was also carried out to eliminate the optimal band ratio of coefficient of pure water absorption and concentration of suspended solids. And a model to retrieve suspended solids concentration for water quality was built. Aiming at type II water bodies of inland river network and taking the typical river network of Jiaying City as the research area, regional aeronautical hyperspectral data, ground quasi-synchronous measurement data of water sampling data and spectral data above the water surface were collected; the QAA algorithm and IIMIW algorithm were used to retrieve the inherent optical parameters of the measured water spectral data. With the two algorithms compared and the characteristics of urban river network was taken into consideration, the improved QAA algorithm was put forward. The retrieval of the inherent optical parameters of the water in the study area was achieved by using improved QAA algorithm. Based on the inherent optical parameters of water obtained by the inversion, quantitative inversion model of chlorophyll-a concentration and suspended solids concentration were established. The determining coefficients  $R^2$  of the inversion model were 0.64 and 0.71, respectively. The retrieved results were validated and analyzed using the actual measured sample data of four ground samples acquired at the same time in the area by the aircrafts which obtained aviation hyperspectral data. Comparing the retrieved values of water quality parameters of concentration with the measured values, the average relative errors of retrieved values for chlorophyll-a and suspended solids were 9.2% and 9.4% respectively. The table of distribution of chlorophyll-a and suspended solids obtained from the retrieval was also consistent with the characteristics and actual conditions of the urban river network. That provided methods and model references for urban river network water quality monitoring.

**Keywords** Urban river network; Hyperspectral; Inherent optical parameters; Improved quasi-analytical algorithm (QAA); Retrieval of water quality

(Received Oct. 24, 2018; accepted Feb. 18, 2019)

\* Corresponding author