

文章编号: 2096-1618(2024)02-0233-07

基于无人机多光谱数据的三峡库区支流叶绿素 a 浓度估算 ——以小江为例

王 会¹, 王永前^{1,4,5}, 李剑锋¹, 杨世琦², 吴雷祥³

(1. 成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610225; 2. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 4. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 北京 100081; 5. 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081)

摘要:以三峡库区重要支流——小江为研究区, 基于大疆 P4M 无人机多光谱数据与原位测量叶绿素浓度数据, 建立叶绿素 a 浓度估算模型。结果表明, 采样点叶绿素浓度值在 5 ~ 260 $\mu\text{g/L}$, 水体光谱曲线表现为各自的光谱特征, 高叶绿素浓度水体的蓝(450 nm)、红(650 nm)波段附近出现叶绿素吸收峰, 且随叶绿素浓度增加而加深; 高悬浮物浓度水体光谱反射峰值高于其他水体, 反射峰位置存在向长波方向移动的“红移”现象; 使用 MERIS 陆地叶绿素指数(MTCI)建立的叶绿素 a 浓度估算模型精度最高, 模型决定系数 R^2 为 0.89, 平均绝对误差 MAE 为 7.72 $\mu\text{g/L}$, 均方根误差 RMSE 为 9.34 $\mu\text{g/L}$, 平均绝对误差百分比 MAPE 为 35.72%; 无人机水体成像应在环境光照稳定、太阳高度角适宜的时间段进行。

关键词:无人机; 多光谱; 三峡重要支流; 叶绿素 a; 回归模型

中图分类号:X821

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.02.015

0 引言

三峡工程是治理开发和保护长江的关键工程, 也是保障中国供水安全的战略淡水库。三峡水库蓄水后各支流回水区的水文情势发生了显著改变, 水体自净能力减弱, 富营养化程度加重, 部分支流水华频发, 严重影响库区水生态安全。水中叶绿素 a 浓度是反映水体中浮游藻类生物分布的关键指标, 也是衡量水体初级生产力与富营养化的基本指标^[1]。传统的水质采样监测方法, 效率低、时间和空间连续性差, 卫星遥感监测受限于轨道高度、天气条件等因素, 存在数据分辨率低、时效性差的缺陷。因此, 本文针对三峡库区重要支流的水生态特点, 利用无人机多光谱技术对小江进行水体监测, 为三峡库区水生态环境保护提供保障。

卫星遥感对大面积水域、长时间序列监测具有优势, 对于内陆小水域却难以精准监测^[2-4]。随着无人机技术的发展, 越来越多的研究者使用无人机搭载传感器完成研究。早期无人机遥感多应用于农作物生长监测、植被覆盖度、叶面积指数等研究^[5-6]。近期逐渐使用无人机遥感对近海或内陆水体展开研究。洪运富等^[7]使用无人机搭载可见光和热红外传感器对水源地污染情况进行监测。刘彦君等^[8]使用无人机搭载

多光谱传感器获取研究区多光谱影像, 构建光谱参数, 对水域的总磷、悬浮物和浊度进行反演。杨振等^[9]使用无人机搭载高光谱相机, 结合地面实测光谱数据, 对污染源区水体悬浮物、浊度进行反演。董月群等^[10]使用无人机搭载高光谱成像仪对城市河网的水质参数进行反演。从上述研究可见, 无人机水质遥感对小流域、湖泊监测具有优势, 满足高分辨率、低成本等特点, 可用于水质遥感监测。

三峡工程蓄水之后, 库区支流回水区富营养化水平提高, 每年春、夏季均能在各支流中监测到水华, 持续时间及影响范围的趋势均不断递增^[11]。夏季回水区水温升高, 水体中营养盐积累导致藻类浮游植物繁殖^[12-13]。小江流域属于亚热带季风性湿润气候, 多云天气导致卫星较难获取该区域遥感影像, 给卫星遥感监测带来不便。因此, 无人机低空遥感技术成为小江水生态监测的另一种选择。本文采用叶绿素 a 浓度作为监测指标, 基于无人机多光谱遥感影像与原位测量水质数据对小江叶绿素 a 浓度进行估算, 并分析其空间分布特征, 实现对长江重要支流的叶绿素浓度精准监测及分析。

1 数据和方法

1.1 研究区与数据源

研究区位于重庆市云阳县和开州区的三峡库区支

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 中国气象局大气探测重点开放实验室联合基金开放课题资助项目(U2021Z07)

通信作者: 李剑锋, E-mail: lijianfeng_ljf@126.com

流小江(图 1),小江流经开州区的汉丰湖和云阳县的高阳湖两个大型湖泊,于云阳县双江汇入长江。云阳县拥有小江、汤溪河、磨刀溪多条支流,小江为众多支流中流域面积最大的一支,水体富营养化较严重。小江回水区水位受三峡水库调节,库区于每年 9 月汛末下闸蓄水,于次年汛期前逐渐降低至汛期水位,因此在回水区形成了大范围的消落带。上游的汉丰湖水位调节坝建成后该湖常年蓄水以治理消落带生态环境,其下游的区域仍处于库区回水区。本文从小江支流入口起将小江流经的集镇作为采样点,5 个采样点分别为河口、黄石、高阳、养鹿和渠口(XJ-01~XJ-05)。数据采集时间为 2021 年 5 月 31 日和 6 月 2 日,天气为晴朗微风。

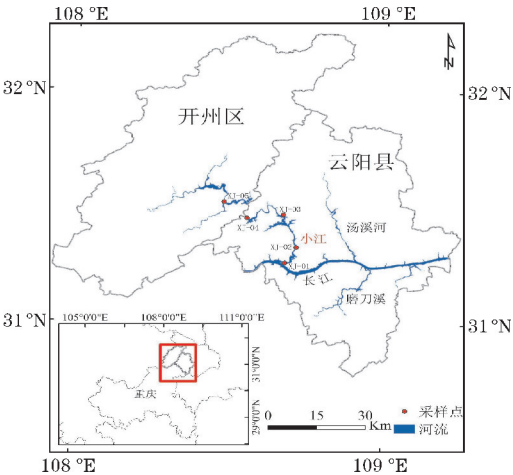


图 1 研究区及采样点位置

使用图 2(a)大疆 P4M (phantom4-multispectral) 无人机获取光谱影像,该机搭载的一体式多光谱成像系统包含 1 个可见光和 5 个多光谱镜头,分别用于可见光和多光谱成像,系统装置于三轴云台上确保成像清晰稳定;其顶部集成多光谱光强传感器用于记录太阳辐射。5 个波段中心波长及半波宽分别为:蓝(B): $450\pm 16\text{ nm}$;绿(G): $560\pm 16\text{ nm}$;红(R): $650\pm 16\text{ nm}$;红边(RE): $730\pm 16\text{ nm}$;近红外(NIR): $840\pm 26\text{ nm}$ 。无人机飞行高度为 500 m,地面分辨率约为 26 cm/pixel,旁向、航向重叠率分别为 70%、50%,每个架次起飞前采集灰板影像用于辐射校正。

使用图 2(b) M600 pro 无人机采集水样,并记录水样品坐标。每个架次采集两瓶 1 L 水样,500 mL 用于测定叶绿素 a 浓度,剩余 500 mL 用于测定悬浮物浓度,每个采样点设置 4~6 瓶水样(每个水样点间隔一定距离)。叶绿素容易损坏,水样采集后使用滤膜进行叶绿素分离并装袋编号,将其放置在液氮环境中保存,后续用于实验室浓度测定。



(a) P4M



(b) M600 pro

图 2 无人机

参考 HJ 897-2017《水质叶绿素 a 的测定分光光度法》与 GB 11901-89《水质悬浮物的测定重量法》,在实验室测得 22 份叶绿素 a 浓度数据(表 1)与 22 份悬浮物浓度数据(表 2)。

表 1 叶绿素 a 浓度统计值

采样点	样品数	平均值/ ($\mu\text{g/L}$)	最大值/ ($\mu\text{g/L}$)	最小值/ ($\mu\text{g/L}$)
XJ-01	6	9.32	17.88	5.25
XJ-02	4	79.72	103.54	67.46
XJ-03	4	194.32	261.23	134.32
XJ-04	4	35.81	44.87	28.49
XJ-05	4	27.49	36.07	15.90

表 2 悬浮物浓度统计值

采样点	样品数	平均值/ (mg/L)	最大值/ (mg/L)	最小值/ (mg/L)
XJ-01	6	13.6	17	10.1
XJ-02	4	13.1	15.3	9.1
XJ-03	4	8.0	10.1	6.0
XJ-04	4	12.5	12.7	11.3
XJ-05	4	104.5	204.5	61.6

1.2 无人机多光谱数据预处理

无人机多光谱传感器获取的原始数据为 DN 值,需要对影像进行预处理获得反射率数据,预处理的步骤为(1)~(5)。参考大疆 P4M 图像处理办法^[14],P4M 的相机与其搭载的多光谱光强传感器具有良好的线性关系,为使二者感光性能(感度)一致,需对相机和多光谱光强传感器做感度校准。以近红外波段为例。

$$\rho_{\text{nir}} = \text{NIR}_{\text{camera}} \times \frac{p\text{Cam}_{\text{nir}}}{(\text{NIR}_{\text{ls}} \cdot p\text{LS}_{\text{nir}})} \times A_{\text{nir}} \tag{1}$$

$$\text{NIR}_{\text{camera}} = (I_{\text{NIR}} - I_{\text{blacklevel}}) \times \frac{\text{Correction}}{\text{NIR}_{\text{gain}} \cdot \frac{\text{NIR}_{\text{etime}}}{1\text{e}^6}} \tag{2}$$

$$\text{Correction} = (k[5] \times r^6 + k[4] \times r^5 + \dots + k[0] + 1.0) \quad (3)$$

$$r = \sqrt{(x - \text{Center}X)^2 + (y - \text{Center}Y)^2} \quad (4)$$

$$A_{\text{nir}} = \frac{Y_{\text{nir}}}{X_{\text{nir}}} \quad (5)$$

式(1)中 ρ_{nir} 、 $\text{NIR}_{\text{camara}}$ 、 $p\text{Cam}_{\text{nir}}$ 、 NIR_{ls} 、 $p\text{LS}_{\text{nir}}$ 、 A_{nir} 分别为影像反射率、信号值、增益校正参数、光强信号值、反射率转换系数;式(2)中 I_{NIR} 、 $I_{\text{blacklevel}}$ 、 Correction 、 NIR_{gain} 、 $\text{NIR}_{\text{etime}}$ 分别为影像 DN 值、黑电平值、暗角补偿、曝光增益、曝光时间;式(3)~(4)中 r 为像素 (x, y) 到影像中心像素 $(\text{Center}X, \text{Center}Y)$ 的距离, $k[0] \sim k[5]$ 为补偿系数;式(5)中 Y_{nir} 、 X_{nir} 分别为灰板反射率、信号值。式中参数保存于影像 XMP 信息中,使用 Python 读取数据完成所有影像预处理,将预处理结果导入 Pix4D Mapper 中完成畸变矫正与图像拼接。完成以上处理流程后即可得到多光谱影像光谱反射率,采样点反射率计算方法以采样点中心 9 个像素的 3 个中位数平均值作为该点反射率。

1.3 模型构建与验证

Moses 等^[15]提出红、近红外波段比值模型。估测混浊水体的叶绿素浓度:

$$C_{\text{chl-a}} \propto R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1) \times R_{\text{rs}}(\lambda_2) \quad (6)$$

λ_1 和 λ_2 分别为红波段和近红外波段。

Gitelson 等^[16]提出的三波段模型(式(7))对 II 类水体叶绿素浓度估算具有较高精度,模型考虑了叶绿素 a、悬浮物、有色可溶性有机物的吸收特性:

$$C_{\text{chl-a}} \propto [R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_1) - R_{\text{rs}}^{-1}(\lambda_2)] \times R_{\text{rs}}(\lambda_3) \quad (7)$$

λ_1 为叶绿素吸收波段, λ_2 为叶绿素非敏感波段, λ_3 波长为长于近红外的波段。

Mishra 等^[17]提出归一化模型:

$$C_{\text{chl-a}} \propto \frac{[R_{\text{rs}}(\lambda_1) - R_{\text{rs}}(\lambda_2)]}{[R_{\text{rs}}(\lambda_1) + R_{\text{rs}}(\lambda_2)]} \quad (8)$$

λ_1 和 λ_2 的选择叶绿素在 708 nm 和 665 nm 处的反射与吸收峰,在比值法基础上该方法能避免太阳高度角、大气辐射对反射光谱的影响。

MREIS 陆地叶绿素指数 (meris terrestrial chlorophyll index, MTCI)^[18]利用了植被的“红边效应”构建波段差值比值指数,该指数应用在 MERIS 叶绿素产品中。 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 建议为 754 nm、709 nm 和 680 nm。

$$C_{\text{chl-a}} \propto \frac{[R_{\text{rs}}(\lambda_1) - R_{\text{rs}}(\lambda_2)]}{[R_{\text{rs}}(\lambda_2) - R_{\text{rs}}(\lambda_3)]} \quad (9)$$

计算 4 种光谱参数与实测叶绿素浓度的相关系数,得到各光谱参数相关性最高的波段组合。将实测叶绿素浓度数据从低到高排序,每 3 份为 1 组,其中 2 份数据用于建模,1 份用于模型检验。建立线性、二次多项式、幂函数和指数函数模型,选择最佳模型建立叶绿素估算模型。

使用均方根误差 (root mean square error, RMSE)、

平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和平均绝对误差百分比 (mean absolute percentage error, MAPE) 对叶绿素 a 估算模型进行精度评价。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y'_i - y_i|}{n} \quad (11)$$

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y'_i - y_i}{y_i} \right|}{n} \times 100\% \quad (12)$$

式中, n 为样本数, y_i 和 y'_i 分别为叶绿素 a 浓度实测值和估算值。

2 实验与结果

2.1 多光谱影像与采样点反射率

完成多光谱影像预处理,得到多光谱影像,以人口较多的集镇 XJ-01、XJ-02、XJ-03 和 XJ-05 为例(图 3)分析。XJ-01、XJ-05 采样点水色呈现黄色,位于河口的 XJ-01 水体受船只干扰较浑浊;XJ-05 位于小江末端,水位较低,悬浮物浓度较高。XJ-02 水体流速较快,悬浮物呈现带状分布,XJ-03 位于小江中部的高阳湖泊,该点水域面积较大浮游藻类容易聚集。

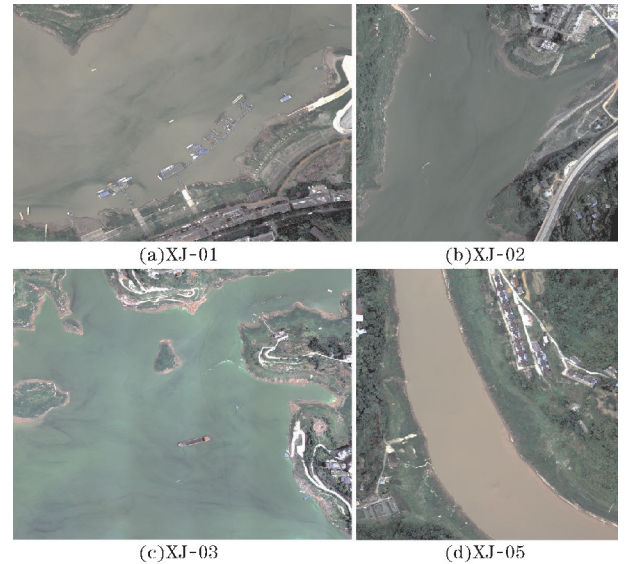


图3 可见光影像

图 4 为 22 个采样点多光谱曲线,图中 650 nm 处峰值的 4 条曲线(线■)为 XJ-05 采样点,其实测悬浮物浓度最高,波峰相较于其余水体出现了明显的“红移”现象,受高浓度悬浮物影响表现为反射峰由短波向长波方向移动;当叶绿素 a 浓度增到 100 $\mu\text{g/L}$ 以上时,水体光谱曲线(线*) 450 nm 和 650 nm 处吸收峰开始加深,730 nm 附近的荧光峰逐渐显现,表现出叶绿素的光谱特征,560 nm 反射峰是由叶绿素和胡萝卜素的弱吸收

和细胞散射作用造成,可作为定量遥感的标志^[19]。Gitelson^[20]研究表明,当水中叶绿素 a 含量从一个低值增大到100 μg/L时,荧光峰从685 nm移动到715 nm附近,该表现符合本研究区采样点光谱反射率曲线变化。其余采样点光谱曲线(线▲)同时包含了叶绿素和悬浮泥沙的信息,且两种水参数浓度皆低于其最高值,光谱曲线在线*与线■之间。

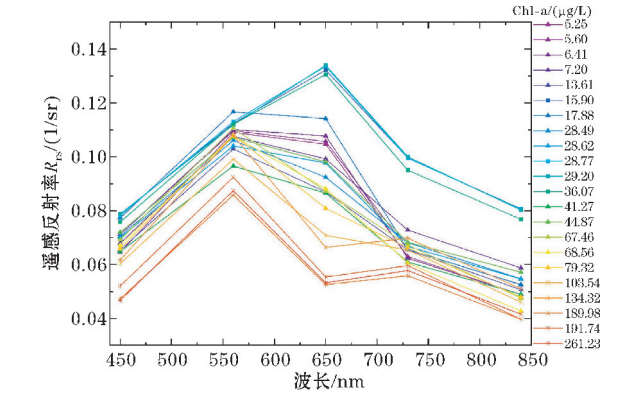


图4 采样点多光谱曲线

2.2 叶绿素 a 浓度估算

将各波段代入光谱参数并计算其与叶绿素浓度间

表 4 最佳回归模型参数

模型	a_0	a_1	a_2	R^2	Adj. R^2	p
2BDA	406.64	-798.96	410.45	0.8787	0.8585	3.2e-6
3BDA	153.28	858.76	1349.64	0.8813	0.8615	2.8e-6
NDCI	155.7	1194.37	2561.2	0.8696	0.8479	4.9e-6
MTCI	146.36	176.18	-	0.8938	0.886	1.1e-7

图 5 为叶绿素 a 浓度估算模型拟合,4 种光谱参数建立的模型中,MTCI 建立的线性模型精度最高,其决定系数 R^2 达到0.89以上。图 6 为叶绿素浓度估算

相关系数,得到表 3 中最高相关性光谱参数的波段组合。从表 3 可知 4 个参数与叶绿素浓度性关性均高于 0.8,且都通过了显著性检验,MTCI 参数使用的 $(RE-R)/(R-NIR)$ 组合与叶绿素浓度相关性达到 0.96。从光谱参数所使用的波段看,4 种最佳光谱参数选择的波均涉及了红(650 nm)和红边(730 nm)两个典型的叶绿素吸收和反射峰波段,与原光谱参数建议波段具有相似性。

表 3 最高相关性光谱参数

模型	变量	相关性	显著性
2BDA	G/R	0.88	8.3e-8
3BDA	$(1/R-1/RE) \cdot NIR$	0.91	2.6e-8
NDCI	$(RE-R)/(RE+R)$	0.89	3.1e-8
MTCI	$(RE-R)/(R-NIR)$	0.96	4.1e-12

分别建立 4 种最佳光谱参数的线性、二次多项式、幂函数和指数函数回归模型,得到最佳回归模型。从表 4 可知 2BDA、3BDA、NDCI 参数最佳模型为二次多项式模型,MTCI 参数最佳回归模型为线性模型。

值与实测值的拟合,4 种模型的决定系数 R^2 均在0.95 以上,MTCI 模型 R^2 高于其余模型达到0.976。

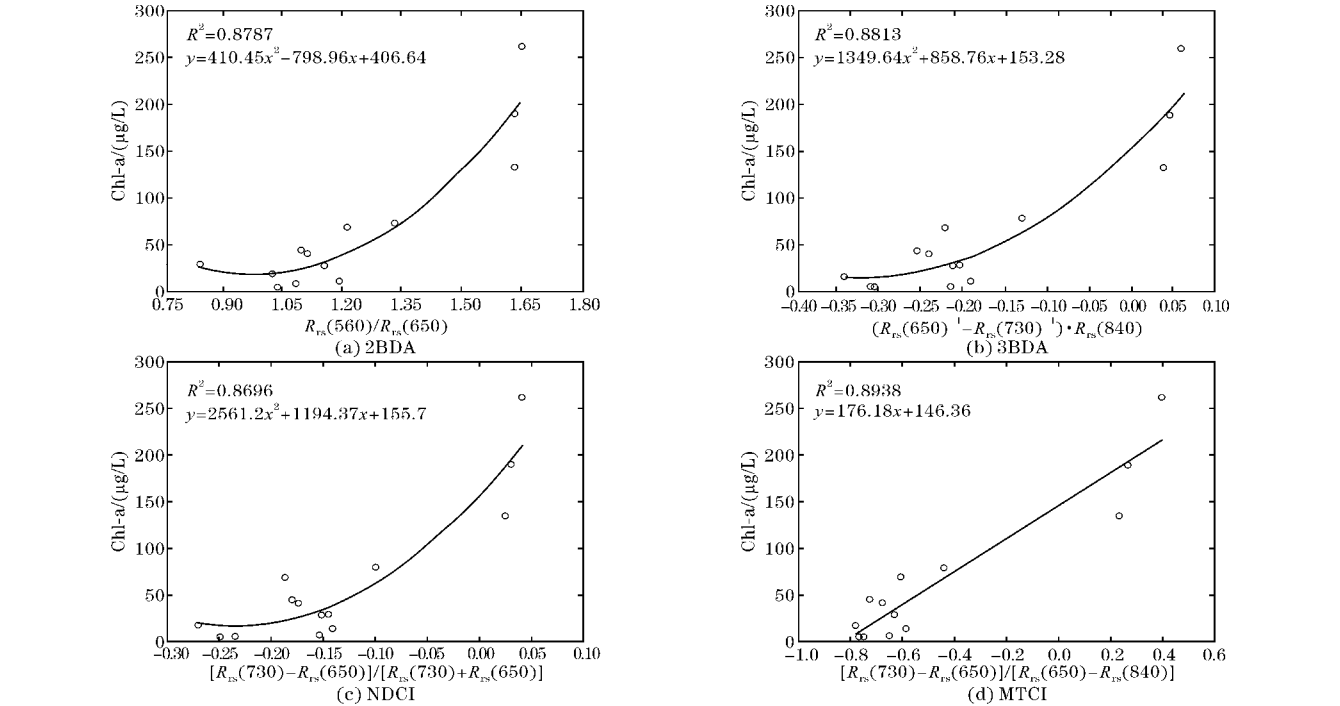


图5 叶绿素 a 浓度估算模型拟合

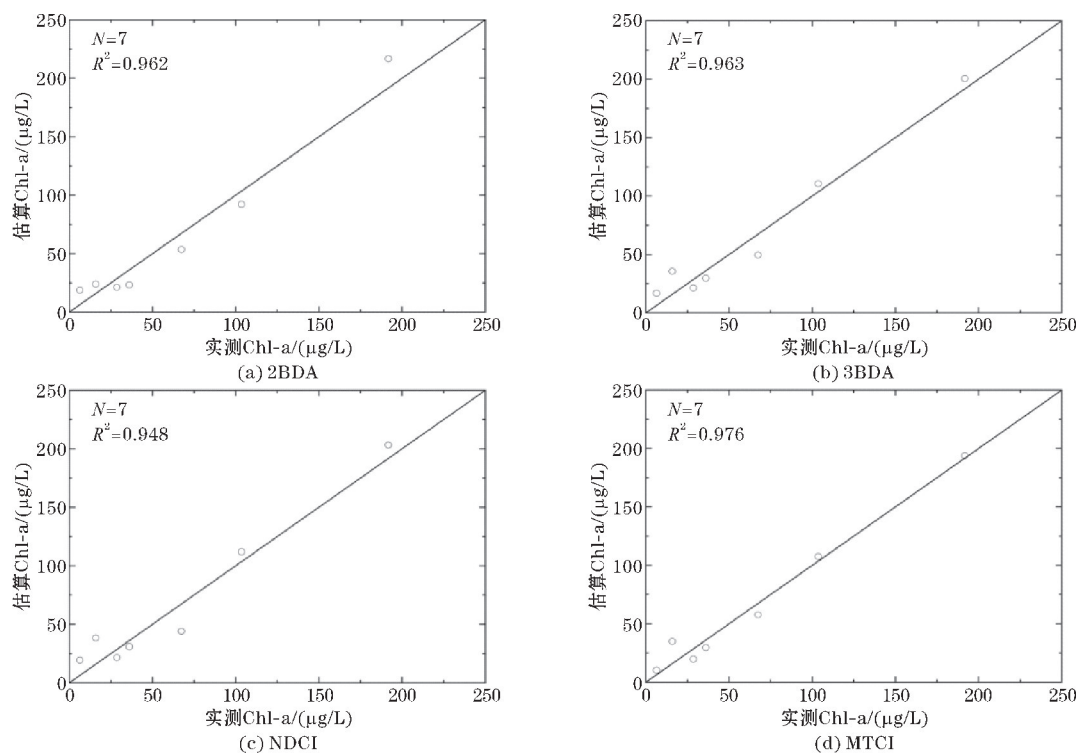


图 6 估算值与实测值拟合

表 5 为叶绿素 a 估算模型精度评价统计参数汇总, 4 个模型的 MAE 在 7.72 ~ 12.97 $\mu\text{g/L}$, RMSE 在 9.34 ~ 14.62 $\mu\text{g/L}$, 平均绝对百分比在 35.72% ~ 61.67%。4 个模型中, 使用 MTCI 参数建立的回归模型具有最高的精度。

表 5 叶绿素 a 估算模型评价参数

模型	验证点	MAE/($\mu\text{g/L}$)	RMSE/($\mu\text{g/L}$)	MAPE/%
2BDA	7	12.97	14.04	50
3BDA	7	11.08	12.17	52.66
NDCI	7	12.96	14.62	61.67
MTCI	7	7.72	9.34	35.72

2.3 叶绿素 a 浓度空间分布

使用 MTCI 模型计算得到叶绿素 a 浓度分布 (图 7), 图 7(c) XJ-03 采样点叶绿素浓度在 200 $\mu\text{g/L}$ 左右, 该点水域面积较大浮游植物容易聚集, 其河岸和湖心出现叶绿素浓度高值区, 其中靠近岸边缺失部分为浮游植物覆盖区。图 7(b) XJ-02 采样点叶绿素浓度在 100 $\mu\text{g/L}$ 左右, 该点水流较快水中叶绿素、悬浮泥沙呈带状分布。图 7(a) XJ-01 和图 7(d) XJ-05 叶绿素浓度较低, 过往船只使 XJ-01 的水体较为浑浊, 叶绿素浓度分布复杂, 而上游的 XJ-05 采样点受外界干扰较小, 叶绿素浓度分布较为均匀。

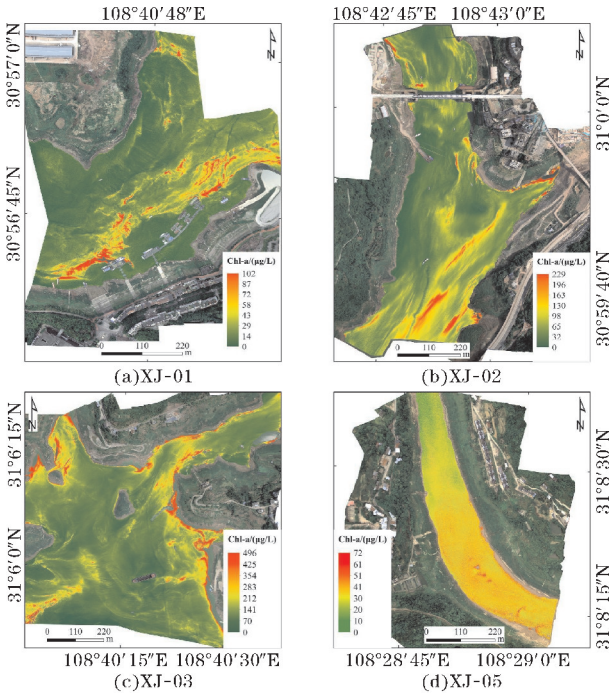


图 7 叶绿素 a 浓度分布图

3 结束语

针对中国南方多云雨地区 (重庆) 光学卫星遥感有效数据的不足、时间分辨率较低等难点, 利用多光谱无人机数据和原位测量水质数据对小江叶绿素 a 浓度进行估算。研究发现, 本文构建的叶绿素 a 估算模型

能准确反映叶绿素 a 浓度分布, P4M 水体反射光谱曲线在不同浓度的叶绿素与悬浮物区域表现出各自应有的光谱特征, 光谱参数与实测叶绿素浓度值具有强相关性; 小江叶绿素浓度范围变化较大, 使用 MERIS 陆地植被指数 (MTCI) 建立的小江流域叶绿素 a 浓度估算精度最高, 模型决定系数 R^2 为 0.89, 平均绝对误差 MAE 为 $7.72 \mu\text{g/L}$, 均方根误差 RMSE 为 $9.34 \mu\text{g/L}$, 平均绝对误差百分比 MAPE 为 35.72%; 使用无人机进行水体监测, 应选择环境光照稳定、太阳高度角适宜的时间段采集数据。

无人机遥感作为新的水质监测手段, 具有高分辨率、低成本等特点, 作为一种短期的监测方式不具备卫星定期过境监测的特点, 因此可定期、加密监测用于叶绿素等敏感参数的预测预警。同时从无人机遥感高分辨率特点出发, 可开发新的水质监测算法以提升目前卫星遥感水质监测算法的精度, 最终形成基于“天—空—地”一体的遥感水质监测手段。

致谢: 感谢成都信息工程大学 (KYTZ202114) 对本文的资助

参考文献:

- [1] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] Isenstein E M, Park M H. Assessment of nutrient-distributions in Lake Champlain using satellite remote sensing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(9): 1831–1836.
- [3] Keith D, Rover J, Green J, et al. Monitoring algal blooms in drinking water reservoirs using the Landsat-8 Operational Land Imager [J]. *International journal of remote sensing*, 2018, 39(9–10): 2818–2846.
- [4] Lisboa F, Brotas V, Santos F D, et al. Spatial Variability and Detection Levels for Chlorophyll-a Estimates in High Latitude Lakes Using Landsat Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2898.
- [5] 李冰, 刘镛源, 刘素红, 等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 160–165.
- [6] 高林, 杨贵军, 王宝山, 等. 基于无人机遥感影像的大豆叶面积指数反演研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(7): 868–876.
- [7] 洪运富, 杨海军, 李营, 等. 水源地污染源无人机遥感监测 [J]. *中国环境监测*, 2015, 31(5): 163–166.
- [8] 刘彦君, 夏凯, 冯海林, 等. 基于无人机多光谱影像的小微水域水质要素反演 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(4): 1241–1249.
- [9] 杨振, 卢小平, 武永斌, 等. 无人机高光谱遥感的水质参数反演与模型构建 [J]. *测绘科学*, 2020, 45(9): 60–64.
- [10] 董月群, 冒建华, 梁丹, 等. 城市河道无人机高光谱水质监测与应用 [J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(S1): 289–296.
- [11] 李优. 三峡库区回水区叶绿素 a 浓度遥感反演方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [12] 中国环境监测总站. 2015 年长江三峡工程生态与环境监测公报 [EB/OL]. http://www.cnemc.cn/zzjj/jgsz/sts/gzdt_sts/201601/W020181008664072105866.pdf, 2016–01–04.
- [13] 胡鹏飞. 三峡库区澎溪河与磨刀溪水华程度差异的机理研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [14] 深圳市大疆创新科技有限公司. 精灵 4 多光谱版图像处理指南 v1.0 [EB/OL]. https://dl.djicdn.com/downloads/p4-multispectral/20200717/P4_Multispectral_Image_Processing_Guide_CHS.pdf, 2020–07–17.
- [15] Moses W J, Gitelson A A, Berdnikov S, et al. Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS—The Azov Sea case study [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 845–849.
- [16] Gitelson A A, Gurlin D, Moses W J, et al. A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters [J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 5.
- [17] Mishra S, Mishra D R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 394–406.
- [18] Dash J, Curran P J. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) [J]. *Advances in Space Research*, 2007, 39(1): 100–104.
- [19] 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.
- [20] Gitelson A A. The peak near 700 nm on radiance

spectra of algae and water; relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration[J]. International Journal of Remote Sensing,1992,13(17):3367-3373.

Estimation of Chlorophyll a Concentration in Three Gorges Reservoir
Branch based on UAV Multispectral Data
—— A Case Study of Xiaojiang River

WANG Hui¹, WANG Yongqian^{1,4,5}, LI Jianfeng¹, YANG Shiqi², WU LeiXiang³

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chongqing Meteorological Service, Chongqing 401147, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100038, China; 4. China Meteorological Administration key Laboratory of Atmospheric Sounding, Beijing, 100081, China; 5. China Meteorological Administration Meteorological Detection Engineering Technology Research Center, Beijing, 100081, China)

Abstract: This paper takes Xiaojiang River, an important tributary of the Three Gorges Reservoir, as the study area, establishes a chlorophyll a concentration estimation model based on the multi-spectral data of P4M UAV in Xinjiang and the chlorophyll concentration data measured in situ. The results showed that the chlorophyll concentration at the sampling point was between 5-260 $\mu\text{g/L}$, and the spectral curves of water showed their own spectral characteristics. Chlorophyll absorption peaks appeared near the blue (450 nm) and red (650 nm) bands of water with high chlorophyll concentration, and grow with the increase of chlorophyll concentration. The spectral reflection peak of water body with high suspended matter concentration is higher than that of other water bodies, and the position of reflection peak has a “red shift” phenomenon moving to the long wave direction. The MERIS land chlorophyll index (MTCI) was used to establish the chlorophyll a concentration estimation model with the highest accuracy. The model determination coefficient R^2 was 0.89, the average absolute error MAE was 7.72 $\mu\text{g/L}$, the root mean square error RMSE was 9.34 $\mu\text{g/L}$, and the mean absolute percentage error MAPE was 35.72%. UAV water body imaging should be carried out in the period when light is stable and the solar altitude angle is appropriate.

Keywords: UAV; multispectral; important tributaries of the Three Gorges; chlorophyll a; regression model