

引用格式:GAO Min, LI Xiaoyi, WANG Chao, *et al.* Retrieval of water quality parameters in Luhun Reservoir Using a UAV based High Pixel Multispectral Camera with Customized Bands[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(1): 160-169. [高敏, 李潇屹, 王超, 等. 基于波段定制高像素无人机多光谱相机的陆浑水库水质参数反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(1): 160-169.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2024.1.0160

## 基于波段定制高像素无人机多光谱相机的陆浑水库水质参数反演研究

高敏<sup>1,2</sup>, 李潇屹<sup>3</sup>, 王超<sup>4</sup>, 董韬<sup>3</sup>, 陈玥<sup>3</sup>, 张方方<sup>2,5</sup>, 王胜蕾<sup>2,5</sup>,  
刘改芝<sup>6</sup>, 李俊生<sup>2,5,7</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 数字地球重点实验室, 北京 100094;

3. 航天数维高新技术股份有限公司, 北京 100070;

4. 河南省科学院地理研究所, 河南省遥感与GIS重点实验室, 河南 郑州 450052;

5. 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094;

6. 陆浑湖国家湿地公园管理处, 河南 嵩县 471400;

7. 中国科学院大学, 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

**摘要:** 无人机电多光谱遥感在小型水体水环境监测中具有成本低、时间灵活等优势, 但是常见的多光谱相机具有像素数量低、缺少内陆水体特征波段等问题, 限制了无人机多光谱遥感在水环境监测中优势的发挥。针对这些问题, 研究定制了面向内陆水体水质监测的高像素航天数维KP-8多光谱相机, 相机包括面向内陆水体叶绿素a反演的670和700 nm波段; 利用无人机飞行实验获取了浑浊富营养化的陆浑水库的多光谱影像, 并利用同步水面实验获取的水质参数构建了典型水质参数透明度、浊度、悬浮物和叶绿素a浓度反演模型; 将反演模型应用于多光谱影像, 反演并分析了陆浑水库典型水质参数空间分布规律。结果表明: 这种波段定制的高像素无人机多光谱相机在内陆水体水环境业务化监测方面具有重要潜力。

**关键词:** 无人机; 多光谱; 波段定制; 水质参数

**中图分类号:** X52; TP751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2024)01-0160-10

### 1 引言

随着经济发展和人口的快速增长, 我国水环境污染问题频发, 水环境持续动态监测具有十分重要的意义。传统的基于水面采样和实验室分析的水质监测方法费时、费力, 时空覆盖率低; 基于岸边自动测站的水质监测方法的建站和维护成本高, 空间覆盖率低。遥感技术的不断发展进步为水质监测

提供了新的手段, 它具有范围广、成本低、速度快等优势, 成为传统水质监测方法的重要补充<sup>[1]</sup>。

根据遥感平台的不同, 遥感主要包括卫星遥感、有人机航空遥感和无人机低空遥感。卫星遥感经常受到云影响而缺少有效数据, 中低分辨率的卫星影像无法监测小型水体, 且目前缺乏面向内陆水体的专门卫星。有人机航空遥感飞行成本非常高,

收稿日期: 2022-10-13; 修订日期: 2023-10-29

基金项目: 河南省科学院重大科研聚焦项目(210101007), 国家自然科学基金项目(42271363)。

作者简介: 高敏, 博士研究生, 主要从事水环境遥感研究。E-mail: 3001210121@email.cugb.edu.cn

通信作者: 王超, 研究员, 主要从事遥感和GIS研究。E-mail: wangchao@igs-has.cn

很难用于业务化水质监测。无人机低空遥感具有较高空间分辨率,可以监测小型水体;可以在云下获取数据,提高时间分辨率;时间灵活,可以根据需要安排数据获取;可以根据研究对象灵活的选择遥感器,进而提高应用效果<sup>[2]</sup>。因此,无人机遥感在小型水体的水环境监测中具有重要优势<sup>[3]</sup>。

无人机用于地物监测的光学遥感器主要有高光谱相机和多光谱相机。高光谱相机通常拥有100多个光谱通道,光谱分辨率通常优于10 nm,非常适合反演对光谱位置和光谱分辨率要求比较高的内陆水体叶绿素a等水质参数。目前有一些基于无人机高光谱的内陆水体水质监测研究包括:基于PikaL高光谱相机反演青岛市黄岛区近海的叶绿素a浓度<sup>[4]</sup>;基于高光谱相机NANO-Hyperspec反演广西壮族自治区柳州市北弓水库的叶绿素a浓度<sup>[5]</sup>;基于GaiaSky-M无人机电载高光谱相机反演广东省茅洲河的叶绿素a浓度<sup>[6]</sup>。无人机高光谱相机的缺点是扫描幅宽小、信噪比低、数据冗余大、相机成本高等,因此在业务化的水质监测中具有较大的局限。

相较于高光谱相机而言,多光谱相机一般只有少数几个光谱波段,光谱分辨率相对较低,但是幅宽更宽,价格更低。目前无人机多光谱已经成功应用于内陆水体水质监测:如基于Parrot Sequoia多光谱相机反演美国莫米河的悬浮物浓度<sup>[7]</sup>,还反演了美国亚拉巴马州摩尔溪和切瓦克拉湖的总悬浮物和浊度<sup>[8]</sup>;基于MicaSense RedEdge多光谱相机反演了浙江农林大学校园内东湖的总悬浮物和浊度<sup>[9]</sup>。这些常见的多光谱相机大都为通用目标或者农业植被目标而设计,缺少专门为内陆水体水质监测设计的波段,因此限制了在内陆水体水质监测尤其是叶绿素a等水质参数反演中的应用效果<sup>[10-11]</sup>;而且,这些多光谱相机通常不足350万像素,导致在保证空间分辨率的条件下,扫描幅宽有限,限制了飞行作业效率,不利于业务化水质监测。

考虑到高光谱和多光谱相机在内陆水体水质监测中的优缺点,一种兼顾的方式是波段定制的高像素多光谱相机。航天数维的KP-8就是这样一种多光谱相机,可以根据内陆水体水质监测的需求定制波段;而且该相机有2400万(6000×4000)像素,飞行扫描幅宽较宽,可以监测比较大的水面范围。为了检验这种内陆水体水质监测定制多光谱相机的实际应用效果,实验选取陆浑水库为研究

区,利用固定翼无人机搭载航天数维KP-8多光谱相机,飞行获取陆浑水库多光谱影像;并且同步开展水面实验,获取典型水质参数实测数据;进而构建典型水质参数反演模型,利用无人机多光谱影像反演陆浑水库的水质参数。

## 2 研究区和实验数据获取

### 2.1 研究区

陆浑水库(34°08'49"~34°11'16" N, 112°08'02"~112°10'59" E)位于河南省洛阳市嵩县附近,处于黄河流域伊河支流的中上游,流域面积约3492万km<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。随着周边经济社会的快速发展,排入水库的污染物不断增加,陆浑水库成为典型的浑浊而且富营养化的内陆水体,是水质监测工作的重点研究区。

### 2.2 实验数据获取

#### 2.2.1 无人机飞行实验

2021年9月29日,本研究在陆浑水库开展水面飞行实验,无人机飞行平台为垂直起降固定翼飞机(图1(a)),飞行高度1000 m,载荷设备为航天数维KP-8多光谱相机(图1(b))。无人机实验的航线是从陆浑水库的东北角开始,以“之”字型飞过陆浑水库全域,获得的无人机影像可以覆盖陆浑水库,航线和影像覆盖范围如图2所示。

KP-8多光谱相机包含6个镜头,其中1个镜头是RGB三通道,另外5个单色通道,加起来一共是8个通道(波段),各个波段中心波长和半波宽的基本信息如表1所示。这8个波段是根据内陆水体水质监测的需求定制的,其中,670和700 nm是富营养化内陆水体叶绿素a浓度反演经常使用的波段,很多无人机多光谱相机都缺乏这2个波段。因此,该多光谱相机的波段设置在内陆水体水质监测中具有重要潜力。多光谱相机的原始辐射分辨率是12 bit,为了降低存储和运算压力压缩为8 bit处理。

KP-8多光谱相机飞行高度为1000 m时地面分辨率为16 cm,拍摄的一张多光谱影像覆盖960 m×640 m的范围,面积约为0.6 km<sup>2</sup>,远大于很多无人机多光谱相机。因此,该多光谱相机可以以更高的效率获取飞行数据。

#### 2.2.2 水面采样实验

2021年9月29日9:00-15:00,在陆浑水库进行了水面实验,在水面16个采样点处开展实验,其中有4个采样点在水库中央,这些区域的无人机多光



图1 垂直起降固定翼飞机搭载KP-8多光谱相机飞行实验

Fig.1 Flight experiment of vertical takeoff and landing fixed wing aircraft with a mounted KP-8 multispectral camera

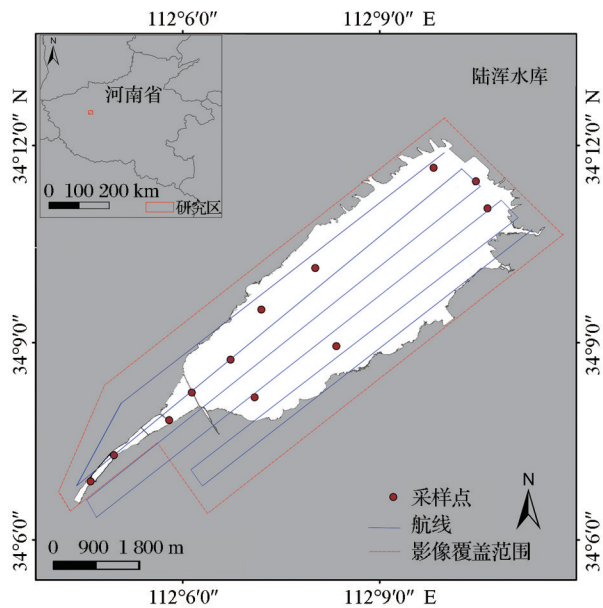


图2 陆浑水库无人机多光谱飞行航线、影像覆盖范围及水面采样点

Fig 2 Flight route, image coverage and water sampling points of multispectral UAV in Luhun Reservoir

表1 航天数维KP-8多光谱相机波段基本信息

Table 1 Band specifications of the Aerospace ShuWei KP-8 multispectral camera

波段序号	1	2	3	4	5	6	7	8
中心波长/nm	460	530	590	560	625	670	700	865
半波宽/nm	90	110	73	15	15	15	15	15

谱影像由于没有控制点而无法进行精确的几何校正和镶嵌,因此主要有12个采样点获取到有效数据,分布如图2所示。水面实验现场测量水体透明度和浊度,采集水样送到实验室内测量悬浮物和叶绿素a浓度。透明度的测量是将黑白相间的赛氏盘缓缓水平地放入水中,直到刚好看不到时读出的水面距离透明度盘的深度<sup>[13]</sup>;浊度是利用定标后

的便携式浊度计AZ8601进行现场测量;实验室内悬浮物的测量采用的是过滤烘干称重法;叶绿素a的测量采用的是基于热乙醇萃取的分光光度法<sup>[14]</sup>。本次水面实验测量的水质参数的统计参数如表2所示。

表2 陆浑水库水面实验获取的水质参数的统计参数

Table 2 Statistical information of the sampling data in Luhun Reservoir including the Secchi-disk depth, turbidity, suspended solids and chlorophyll a concentration

水质参数	最小值	最大值	均值	标准差
透明度/m	0.05	0.73	0.39	0.25
浊度(NTU)	13.48	237.67	69.9	81.4
悬浮物/(mg/L)	10.00	247.14	65.82	84.78
叶绿素a/( $\mu\text{g/L}$ )	0.23	19.82	9.16	6.39

### 3 方法

#### 3.1 无人机多光谱影像预处理

无人机搭载的定位定姿系统(Position and Orientation System, POS)记录了空中曝光点的点号、经纬度、海拔高度和拍摄时间。而无人机多光谱影像中的可交换图像文件格式(Exchangeable image file format, Exif)信息中也记录了点号与拍摄时间,通过点号及时间的对应,即可将POS信息写入照片的Exif中。

无人机多光谱影像镶嵌主要通过空中三角测量、点云匹配、不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)构建、单波段纹理贴附、波段融合这5个步骤进行:①空中三角测量:基于计算机视觉及匹配算法对所有波段数据进行特征点提取,同时参与匹配计算。②点云匹配:基于空中三角测量的数据成果,通过各波段多光谱影像匹配点云,给实物三维表面模型提供完整的空间形态和高精度的细

节信息。③ TIN 构建:影像匹配得到的是离散点云数据,转化为可用数学方式表达的三维表面网格模型。④单波段纹理贴附:在上一步的基础上,提取单个波段数据依次对三维模型进行纹理贴附。⑤波段融合:单个波段纹理贴附完成后可得到每个波段的正射影像成果。

经过计算,本研究的无人机多光谱飞行实验当天的陆浑水库的太阳天顶角范围为  $36^{\circ} \sim 59^{\circ}$ ,而无人机多光谱相机的航向最大观测天顶角为  $26^{\circ}$ ,航向垂直方向最大观测天顶角为  $18^{\circ}$ ,均小于飞行实验的太阳天顶角。之前的研究<sup>[15]</sup>表明,在该观测几何条件下,遥感影像不易存在明显的太阳耀光。从陆浑水库无人机影像上看,基本没有耀斑的明显影响,只有很小部分区域受到微弱的耀斑影响,因此没有针对耀斑进行预处理。考虑到微弱的耀斑一般主要增加反射率的数值,但是很少改变反射率的形状,因此后续水质参数反演建模时尽量使用能够降低微弱耀斑影响的波段比值、差值、归一化比值等模型<sup>[16]</sup>。

### 3.2 无人机多光谱影像反射率校正

研究所使用的多光谱相机是在高像素微单相机上改装的,相机图像处理系统将入射光强度转换为影像 DN(Digital Number)值时进行了模拟人眼感光的非线性 Gamma 校正<sup>[17]</sup>。实验中,拍摄1张包含4种不同反射率(黑、暗灰、亮灰和白色)的靶标布的影像,4块靶标布是专门用于反射率定标而定制的,具有很好的光谱一致性和朗伯性,反射率分别约为 3.6%、19.0%、38.5%、60.6%。由于靶标布的影像中可能存在一些噪声点,因此我们获取四种靶标布影像 DN 值的中值而不是平均值,防止噪声导致平均值的偏大或者偏小,然后与4种靶标的反射率之间进行曲线拟合,建立靶标 DN 值与反射率的非线性关系。将这个非线性关系应用于无人机多光谱影像,便得到地表反射率影像。

### 3.3 水体分布提取

水质参数反演之前首先要提取水体分布。研究使用归一化水体指数(NDWI)的阈值分割来进行水体提取,阈值通过 NDWI 灰度直方图目视确定。

### 3.4 面向无人机多光谱的水质参数反演建模

直接使用无人机多光谱影像大气校正得到的反射率和实测水质参数统计回归建立水质参数反演半经验模型,这种方法在很多研究中得到广泛使用<sup>[18-20]</sup>。研究中半经验模型经常使用到的光谱指数

有原始波段<sup>[21-22]</sup>以及波段组合,包括差值、比值<sup>[23]</sup>以及归一化比值<sup>[24]</sup>等。利用 SPSS 软件对各个参数和水质参数之间相关性进行检验,得到  $P$  值代表相关关系的显著性, $P \leq 0.05$  为“显著”, $P \leq 0.01$  为“极显著”。

由于只有有限的12个同步采样点,建模时不宜再划分为训练样本和检验样本,因此采用在水色遥感建模中常用的每次留一点交叉检验法(Leave-One-Out Cross Validation, LOOCV)进行精度评价<sup>[14, 25]</sup>。该方法每次只留下一个样本做验证,其他样本做建模,将模型应用于保留的这个点;一共循环12次。与常规方法相比,这种方法虽然计算较繁琐,但是样本利用率高,并且不会受到建模和检验样本分离的影响,适用于小样本数据的建模和验证。在此基础上,采用统计参数对水质参数的反演精度进行检验,包括平均相对误差(Mean Relative Error, MRE),均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和决定系数( $R^2$ )如公式(1)~(3):

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - X_i|}{X_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2} \quad (3)$$

其中: $Y_i$ 是水质参数反演值; $X_i$ 是水质参数的实测值; $\bar{X}$ 是水质参数实测值的平均值; $n$ 为样本数。

## 4 结果和讨论

### 4.1 无人机多光谱影像的反射率校正结果

本次无人机飞行实验当天无云且光照稳定,便于利用4块不同反射率的靶标布进行反射率校正。分别裁剪8个波段影像的4块靶标布,计算裁剪靶标布影像的 DN 值中值,与靶标布的反射率进行统计回归,建立反射率校正公式<sup>[26-27]</sup>,根据3.2中对反射率校正方法的描述,得到的每个波段的反射率校正结果如图3所示:

### 4.2 水质参数反演模型构建结果

利用无人机多光谱影像的反射率和同步采样点的水质参数进行统计回归建模。由于使用的是地表反射率,而不是经过水面天空光反射校正的离水反射率(遥感反射率),因此水质参数反演建模尽量使用能够降低水面天空反射率影响的波段比值。

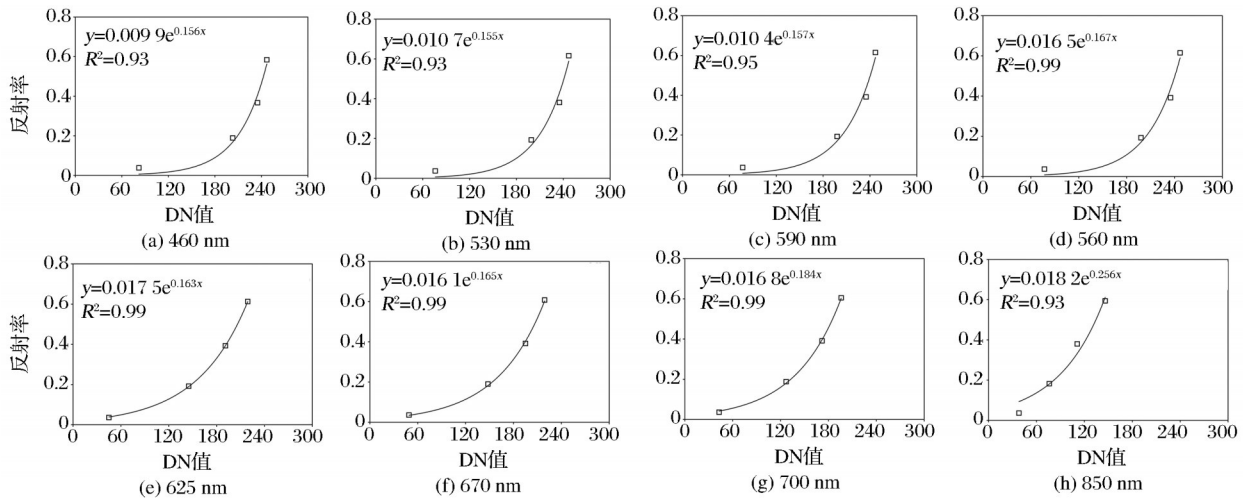


图3 无人机多光谱影像8个波段的反射率校正

Fig 3 Reflectance correction for eight wavebands of UAV multispectral image

研究发现  $R(865)/R(560)$  与透明度、浊度和悬浮物的相关系数最高,与其它浑浊水体反演模型使用的波段比值是相似的<sup>[28]</sup>。需要说明的是,有1个采样点缺少透明度测量数据,因此只有11个点的实测数据。此外,构建叶绿素a反演模型的时候,发现有3个高度浑浊的采样点( $TSM > 100 \text{ mg/L}$ ),悬浮物对光线的影响已经严重掩盖了叶绿素a的影响,无

法用于反演叶绿素a浓度。因此,使用另外9个采样点构建叶绿素a反演模型。其中,  $R(700)/R(670)$  与叶绿素a浓度的相关系数最高,与相关研究使用的波段比值是相似的<sup>[29-33]</sup>。波段比值可以削弱没有做天空光校正以及水面二向反射特性的影响<sup>[14]</sup>,据此建立了陆浑水库的透明度、浊度、悬浮物浓度和叶绿素a浓度的反演模型(图4)。

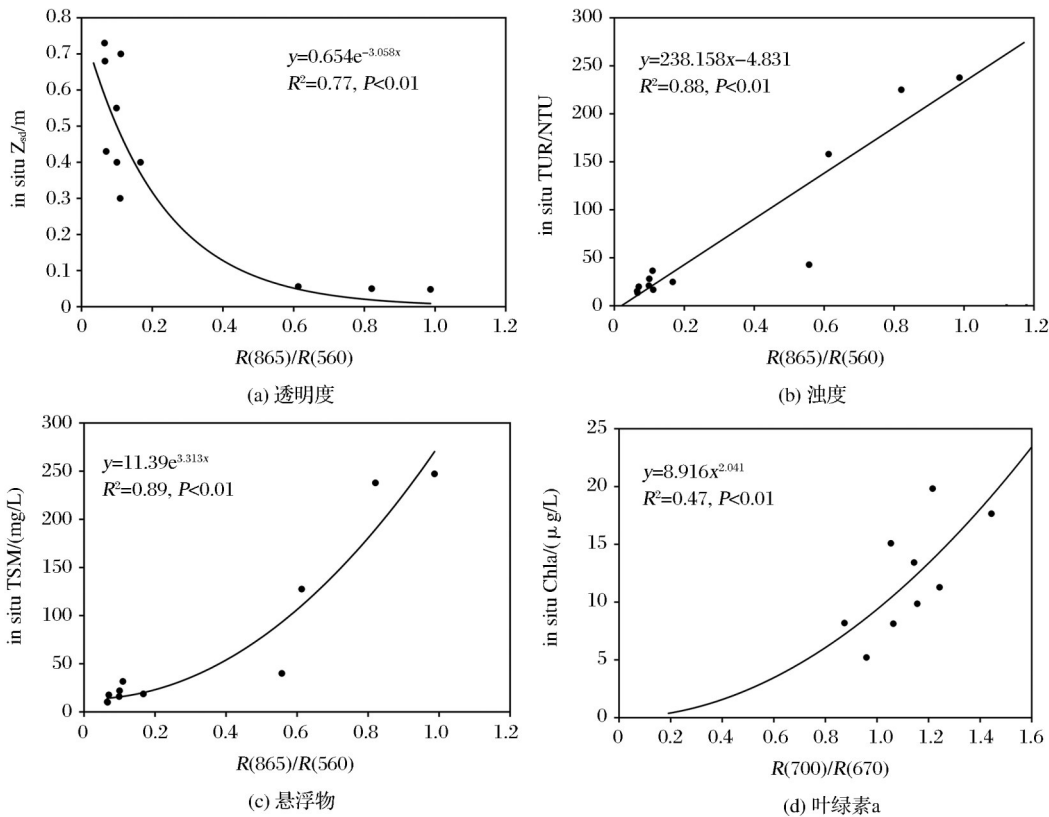


图4 陆浑水库实测水质参数和同步KP-8多光谱影像反射率波段比值建模的散点图

Fig.4 Scatterplots of measured water quality parameters and reflectance band ratio of synchronous KP-8 multispectral image

$$Z_{sd} = 0.654 \times \exp \left[ -3.058 \times \left( \frac{R(865)}{R(560)} \right) \right] \quad (4)$$

$$TUR = 238.158 \times \left[ \frac{R(865)}{R(560)} \right] - 4.831 \quad (5)$$

$$TSM = 11.39 \times \exp \left[ 3.313 \times \left( \frac{R(865)}{R(560)} \right) \right] \quad (6)$$

$$Chla = 8.916 \times \left[ \frac{R(700)}{R(670)} \right]^{2.041} \quad (7)$$

其中:  $Z_{sd}$  为水体透明度(m); TUR 为浊度(NTU); TSM 为悬浮物浓度(mg/L); Chla 为叶绿素 a 浓度( $\mu\text{g/L}$ )。

根据 LOOCV 法,对构建的水质参数模型进行了精度验证。验证发现透明度反演模型的 MRE 为 35.7%, RMSE 为 0.1 m; 浊度反演模型的 MRE 为 43.3%, RMSE 为 30.5 NTU; 悬浮物反演模型的 MRE 为 39.7%, RMSE 为 43.2 mg/L; 叶绿素 a 反演模型的 MRE 为 33.0%, RMSE 为 4.0  $\mu\text{g/L}$ ; 水质参数实测值和反演值的点较均匀分布在 1:1 线的附近

(图 5); 以上水质参数反演精度与相关研究的精度是相当的,说明构建的模型可以用于反演陆浑水库的水质参数分布图。

### 4.3 陆浑水库水质参数反演结果

利用陆浑水库透明度、浊度、悬浮物和叶绿素 a 的反演模型,应用于 KP-8 多光谱影像,得到陆浑水库透明度、浊度、悬浮物和叶绿素 a 的空间分布图,如图 6 所示。需要说明的是:叶绿素 a 反演模型不适用于高度浑浊水体,因此首先利用悬浮物反演结果制作悬浮物浓度小于 100 mg/L 的非高度浑浊水体分布掩膜,然后在非高度浑浊水体区域反演叶绿素 a 浓度。

从图 6 中可以看到,无人机多光谱影像主要覆盖了水库岸边一圈的范围,不包含水库中间的水体,这主要是因为水体中缺乏控制点,很难进行影像镶嵌。这说明无人机多光谱相机更适用于拍摄河流和小型湖库,或者大型湖库的岸边区域。

从图 6 所示的透明度、浊度和悬浮物分布图都能看出陆浑水库西南角较为浑浊,这主要是因为陆

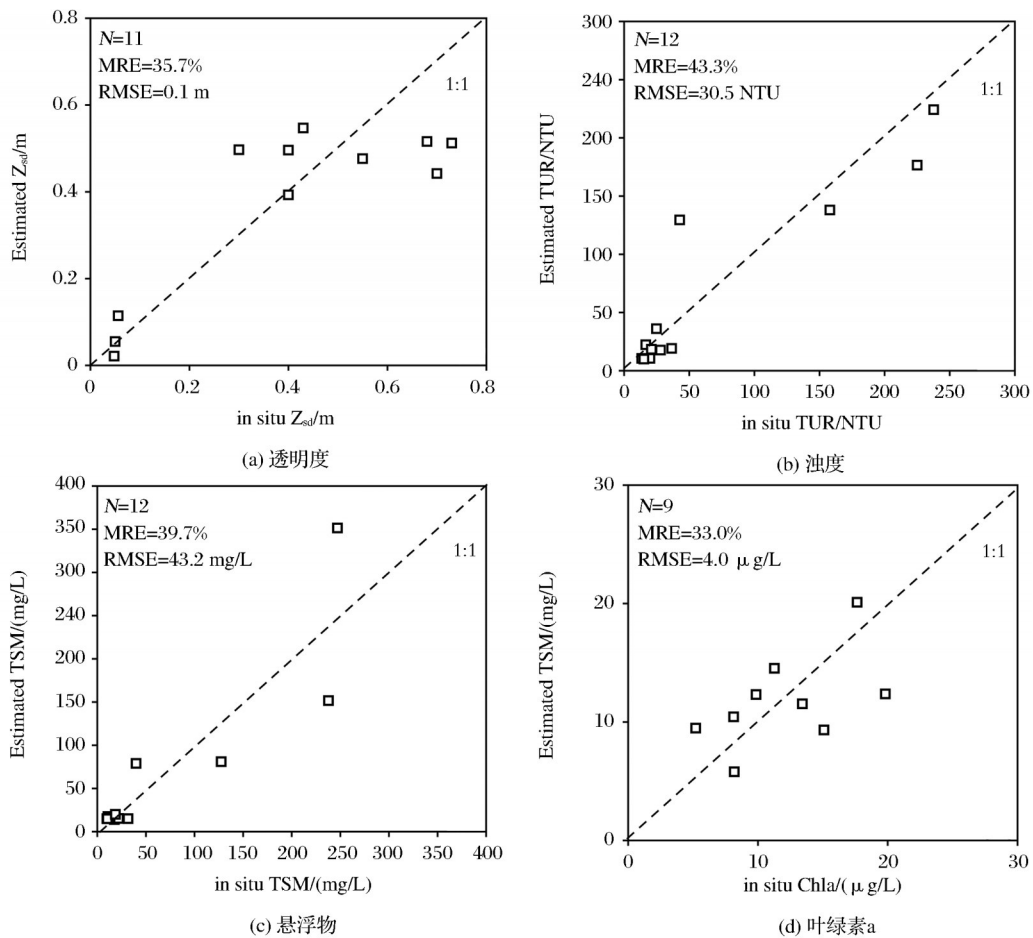


图 5 模型预测的水质参数和实测水质参数的检验散点图

Fig 5 Validation scatterplots of model-predicted water quality parameters and measured in situ

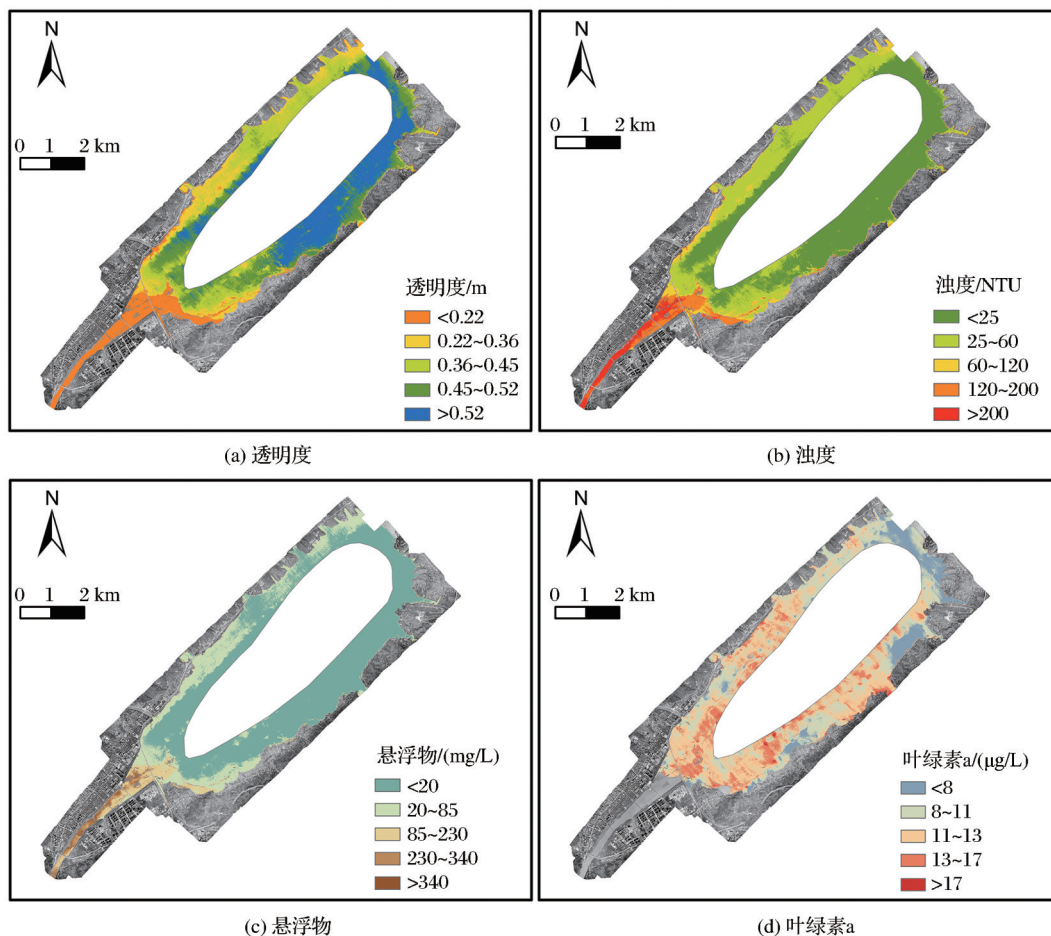


图6 2021年9月29日无人机载KP-8多光谱影像反演的陆浑水库水质参数分布图

Fig 6 Distribution map of water quality parameters of Luhun Reservoir retrieved from UAV KP-8 multispectral image on September 29, 2021

浑水库的西南角是上游河流伊河,无人机飞行实验的前几天上游刚刚下过大雨,给伊河带来了大量泥沙,导致陆浑水库西南角较为浑浊。此外,岸边的水体比接近水库中心的水体更浑浊,这是因为岸边水体比库心水体更浅,更容易因为底泥沙再悬浮而导致水体更浑浊。叶绿素a浓度的空间分布主要是西南角比东北角更高,这可能是由于位于西南角的上游河流伊河携带了更多的营养物质到水库中。

本研究为高像素的航天数维KP-8多光谱相机特别定制了面向内陆水体水质监测的波段,比如面向内陆水体叶绿素a反演的670 nm和700 nm波段,利用波段比值法构建了叶绿素a反演模型,精度基本满足监测需求,这为无人机遥感监测水质奠定了初步基础。无人机遥感可以根据研究对象灵活的选择适合的多光谱或高光谱相机,可以获得厘米级空间分辨率的遥感图像,可以云下飞行获取数据进而提高时间覆盖能力,这些都是无人机遥感相对于卫星遥感的优势。很多内陆水体(尤其是小型内陆

水体)的水质监测,经常需要高空间、高时间、高光谱分辨率的遥感数据,卫星遥感一般很难同时满足这些要求,而无人机遥感经常可以满足这些要求。不过无人机遥感也有其局限性。首先,无人机遥感的空间覆盖能力较弱,一般只能开展小范围的数据获取。其次,无人机遥感的数据获取和处理等方面还缺乏成熟的规范,这是未来亟待解决的问题。总的来说,无人机遥感为内陆水体水质监测带来了与卫星遥感相补充的新的技术手段,未来还需要进一步从传感器选择、数据获取和处理等方面进一步完善这种技术。

## 5 结论

无人机载多光谱遥感在小型水体水环境监测中具有成本低、时间灵活等优势,但是常见的多光谱相机具有像素少、幅宽窄、缺少内陆水体特征波段等问题,限制了无人机多光谱遥感在水环境监测中优势的发挥。面向这些问题,本研究首先为高像

素的航天数维 KP-8 多光谱相机定制了面向内陆水体水质监测的波段,包括面向内陆水体叶绿素 a 反演的 670 nm 和 700 nm 波段;然后,利用飞行实验获取了浑浊富营养化的陆浑水库的多光谱影像,利用同步水面实验获取的水质参数构建了典型水质参数透明度、浊度、悬浮物和叶绿素 a 浓度反演模型,并对反演结果进行了验证;最后,绘制了陆浑水库透明度、浊度、悬浮物和叶绿素 a 的空间分布图,并分析了其空间分布规律。

研究发现无人机多光谱影像的近红外与绿光波段比值( $R(865)/R(560)$ )是高度浑浊的陆浑水库的透明度、浊度、悬浮物浓度反演建模的最佳波段组合,模型的决定系数  $R^2$  分别为 0.77, 0.88 和 0.89;红边与红光波段比值( $R(700)/R(670)$ )是富营养化的陆浑水库的叶绿素 a 浓度反演建模的最佳波段组合,模型的决定系数  $R^2$  为 0.47。KP-8 多光谱相机定制的 670 nm 和 700 nm 波段可以有效提高叶绿素 a 浓度的反演效果。

本研究证明了高像素的无人机多光谱相机在水环境监测中具有很高的作业效率;尤其在进行波段定制后,在叶绿素 a 反演中具有更好的效果。因此,这种波段定制的高像素无人机多光谱相机在内陆水体水环境业务化监测方面具有重要潜力。不过,本研究仅进行了一次飞行实验,未来还需要更多的实验来检验其进一步业务化应用的效果。本研究还发现框幅式无人机多光谱遥感数据一个亟待解决的问题就是大面积水体的几何校正和镶嵌工作,目前的主要方法是利用地面控制点进行,这主要适用于小型水体,且水体影像中包含陆地部分。对于陆浑水库这种中型水体,该方法适用于陆地附近的水体。要想在没有地面控制点的地方实现图像几何校正和镶嵌,一般需要无人机搭载高精度的差分 GNSS (Global Navigation Satellite System) 和惯导定位系统来实现。

#### 参考文献 (References):

- [1] ZHANG Bing, LI Junsheng, SHEN Qian, *et al.* Key technologies and systems of surface water environment monitoring by remote sensing[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(4): 1-9.[张兵, 李俊生, 申茜等. 地表水环境遥感监测关键技术与系统[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(4): 1-9.]
- [2] RHEE D S, KIM Y D, KANG B, *et al.* Applications of unmanned aerial vehicles in fluvial remote sensing: An overview of recent achievements[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 22(2): 588-602. DOI:10.1007/s12205-017-1862-5
- [3] PASLER M, KOMARKOVA J, SEDLAK P. Comparison of possibilities of UAV and Landsat in observation of small inland water bodies[C]//2015 International Conference on Information Society (i-Society), London, United Kingdom, 9-11 September: 45-49. DOI: 10.1109/i-Society.2015.7366855
- [4] GAI Yingying, YU Dingfeng, ZHOU Yan, *et al.* An improved model for chlorophyll-a concentration retrieval in coastal waters based on UAV-borne hyperspectral imagery: A case study in Qingdao, China [J]. *Water*, 2020, 12 (10). DOI: 10.3390/w12102769
- [5] LU Qikai, SI Wei, WEI Lifei, *et al.* Retrieval of water quality from UAV-borne hyperspectral imagery: A comparative study of machine learning algorithms [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19). DOI: 10.3390/rs13193928
- [6] ZHANG Y S, WU L, REN H Z, *et al.* Retrieval of water quality parameters from hyperspectral images using hybrid bayesian probabilistic neural network [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10). DOI: 10.3390/rs12101567
- [7] LARSON M D, SIMIC M A, VINCENT R K, *et al.* Multi-depth suspended sediment estimation using high-resolution remote-sensing UAV in Maumee River, Ohio [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39 (15-16): 5472-5489. DOI: 10.1080/01431161.2018.1465616
- [8] PRIOR E M, O'DONNELL F C, BRODBECK C, *et al.* Investigating small Unoccupied Aerial Systems (sUAV) multi-spectral imagery for total suspended solids and turbidity monitoring in small streams [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 42(1): 39-64. DOI: 10.1080/01431161.2020.1798546
- [9] LIU Yanjun, XIA Kai, FENG Hailin, *et al.* Inversion of water quality elements in small and micro-size water region using multispectral image by UAV [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(4): 1241-1249.[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.]
- [10] SU T C, CHOU H T. Application of multispectral sensors carried on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to trophic state mapping of small reservoirs: a case study of tain-pu reservoir in kinmen, taiwan, China [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10078-10097. DOI: 10.3390/rs70810078
- [11] SU Tungching. A study of a Matching Pixel by Pixel (MPP) algorithm to establish an empirical model of water quality mapping, as based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) images [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 58: 213-224. DOI: 10.1016/j. jag. 2017.02.011
- [12] HAN Minghai, QI Runli, LI Jianli, *et al.* Rationality analysis of closed management of Luhun Reservoir [J]. *Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion*, 2022 (1): 64-65.[韩明海, 齐润利, 李建立, 等. 陆浑水库封闭管理的合理性分析[J]. *河南水利与南水北调*, 2022, 52(1): 64-65.]
- [13] WANG Shenglei, LI Junsheng, ZHANG Bing, *et al.* Chang-

- es of water clarity in Large Lakes and reservoirs across China observed from long-term MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111949. DOI: 10.1016/j.rse. 2020. 111949
- [14] LI J S, GAO M, FENG L, *et al.* Estimation of chlorophyll-a concentrations in a highly turbid eutrophic lake using a classification-based MODIS land-band algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12 (10) : 3769-3783. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2936403
- [15] LI Tongji, CHEN Qinglian, HAN Bing. The modeling studies on sea surface reflection and view geometry of above-water method[J]. *Ocean Technology*, 2005, 24(4):112-117.[李铜基, 陈清莲, 韩冰. 海面之上法中海面反射率和观测几何模拟研究[J]. *海洋技术*, 2005, 24(4): 112-117.]
- [16] LI J S, SHEN Q, ZHANG B, *et al.* Measurements and analysis of in situ multi-angle reflectance of turbid inland water: A case study in meiliang bay, Taihu Lake, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(13) : 5167-5185. DOI: 10.1080/01431161.2014.935832
- [17] BURGGRAAFF O, SCHMIDT N, ZAMORANO J, *et al.* Standardized spectral and radiometric calibration of consumer cameras[J]. *Optics Express*, 2019, 27(14) : 19075-19101. DOI: 10.1364/OE.27.019075
- [18] DEKKER A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [D]. Amsterdam: Proefschrift Vrije Universiteit, The Netherlands, 1993.
- [19] CURRAN P J, HANSOM J D, PLUMMER S E, *et al.* Multispectral remote sensing of nearshore suspended sediments: A pilot study [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 8 (1) : 103-112. DOI: 10.1080/01431168708948618
- [20] TASSAN S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(12) : 2369-78. DOI: 10.1364/ao.33.002369
- [21] WILLIAMSON A N and GRABAU W E. Sediment concentration mapping in tidal estuaries[C]// *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. 1974. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration; NASA' Goddard Space Flight Center p. 1347-1386.
- [22] LATHROP R, LILLESAND T M. Monitoring water quality and river plume transport in green bay, lake michigan with SPOT-1 imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (USA)*, 1989, 55: 349-354.
- [23] GORDON H R, MOREL A Y. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery[M]. Washington: American Geophysical Union, 1983.
- [24] HOSSAIN A A, CHAO X B, JIA Y F. Development of remote sensing based index for estimating/mapping suspended sediment concentration in river and lake environments[C]// *Proceedings of 8th international symposium on ECOHYDRAULICS (ISE 2010)*. 2010: Seoul, South Korea. p. 578-585.
- [25] FENG L, HU C M, HAN X X, *et al.* Long-term distribution patterns of chlorophyll-a concentration in China's largest freshwater lake: MERIS full-resolution observations with a practical approach[J]. *Remote Sensing*, 2014, 7(1) : 275-299. DOI: 10.3390/rs70100275
- [26] GAO M, LI J S, WANG S L, *et al.* Smartphone-camera-based water reflectance measurement and typical water quality parameter inversion[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6). DOI: 10.3390/rs14061371
- [27] GAO M, LI J S, ZHANG F F, *et al.* Measurement of water leaving reflectance using a digital camera based on multiple reflectance reference Cards[J]. *Sensors*, 2020, 20(22) : 6580-6594. DOI: 10.3390/s20226580
- [28] YIN Z Y, LI J S, LIU Y, *et al.* Decline of suspended particulate matter concentrations in Lake Taihu from 1984 to 2020: Observations from Landsat TM and OLI[J]. *Optics Express*, 2022, 30(13). DOI: 10.1364/oe.454814
- [29] LIU Yao, LI Junsheng, XIAO Chenchao, *et al.* Inland water chlorophyll-a retrieval based on ZY-1 02D satellite hyperspectral observations [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(1) : 168-178.[刘瑶, 李俊生, 肖晨超, 等. 资源一号 02D 高光谱影像内陆水体叶绿素 a 浓度反演[J]. *遥感学报*, 2022, 26(1): 168-178.]
- [30] XIE Y, ZHAO H L, LI J S, *et al.* Phytoplankton biomass variation after cage aquaculture removal from the daheiting reservoir, China: Observations from satellite data[J]. *Hydrobiologia*, 2022. DOI: 10.1007/s10750-022-05014-4
- [31] ZHANG F F, LI J S, YAN B K, *et al.* Tracking historical chlorophyll-a change in the guanting reservoir, Northern China, based on landsat series inter-sensor normalization[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(10) : 3918-3937. DOI: 10.1080/01431161.2021.1875149
- [32] ZHANG Fangfang, LI Junsheng, WANG Chao, *et al.* Estimation of water quality parameters of GF1 WFV in turbid water based on soft classification[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(3):769-779.[张方方, 李俊生, 王超, 等. 高分一号卫星浑浊水体水质参数软分类反演[J]. *遥感学报*, 2023, 27(3): 769-779.]
- [33] ZHANG Fangfang, LI Junsheng, WANG Chao, *et al.* Multi-type inland water atmospheric correction and water quality estimation based on HY-1C CZI images [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(1) : 79-91.[张方方, 李俊生, 王超, 等. 基于 HY-1C 卫星 CZI 影像的多类型内陆水体大气校正及水质参数反演[J]. *遥感学报*, 2023, 27(1): 79-91.]

## Retrieval of Water Quality Parameters in Lulun Reservoir Using A UAV based High Pixel Multispectral Camera with Customized Bands

GAO Min<sup>1,2</sup>, LI Xiaoyi<sup>3</sup>, WANG Chao<sup>4</sup>, DONG Tao<sup>3</sup>, CHEN Yue<sup>3</sup>,  
ZHANG Fangfang<sup>2,5</sup>, WANG Shenglei<sup>2,5</sup>, LIU Gaizhi<sup>6</sup>, LI Junsheng<sup>2,5,7</sup>

(1.School of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3.Aerospace ShuWei tech Limited Liability Company, Beijing 100070, China;

4.Henan Key Laboratory of Remote Sensing and GIS, Institute of Geographical Sciences, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China;

5.International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China;

6.Administrative Office of Henan Lulun Lake National Wetland Park, Songxian 471400, China;

7.School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Unmanned Airborne Vehicle (UAV) based multispectral remote sensing has the advantages of low cost and flexible time in monitoring small water bodies. However, the common multispectral cameras have the problems of few pixels and lack of characteristic bands of inland water bodies, which limit the advantages of UAV based multispectral remote sensing in monitoring the water environment. In order to solve these problems, this study customized the bands for inland water quality monitoring for the Aerospace ShuWei KP-8 multispectral camera with high pixel, including 670 and 700 nm bands for inland water chlorophyll a retrieval; Then, a flight experiment was carried out to obtain the multispectral image of the turbid and eutrophic Lulun Reservoir. And the synchronously obtained water quality parameters from the water surface experiment were used to build the retrieval models of the typical water quality parameters, including the Secchi-disk depth, turbidity, suspended solids and chlorophyll a concentration; The retrieval models were applied to the multispectral image, and the typical water quality parameters in Lulun Reservoir were retrieved and their spatial distribution rules were analyzed. The results show that the UAV based high pixel multispectral camera has important potential in the operational monitoring of inland water environment.

**Key words:** UAV; Multispectral; Customized bands; Water quality parameters