

基于无人机高光谱的湖泊蓝藻监测应用

1、引言 人类活动的增强导致河流、湖泊水质藻化问题日益严重，已经成为制约城市可持续发展的关键因素。传统方法对大范围的水体藻类的监测效率低、准确性低。因此，有必要利用高新技术手段展开河流、湖泊水质污染问题研究，及时、快速的提供河流、湖泊的水质状况，保障人们正常的生产生活。



目前,国内外学者利用特定的遥感平台,构建了针对特定水域的不同水质参数的模型,并取得了一定的成果。在卫星平台上,有学者利用 HJ-1 卫星多光谱数据监测湖北武

汉东湖蓝藻爆发情况，研究表明利用 HJ-1 遥感数据可快速鉴别蓝藻范围及其程度，大气校正突出了蓝藻水体和其他地物光谱差异，EVI 方法精度较高，可剔除水质中泥沙等悬浮物的干扰，可作为城市湖泊蓝藻变化检测经验模型。在机载平台上，有学者收集了瑞典两个湖泊的遥感数据，利用主成分分析法找出与叶绿素 a 浓度的相关性最高的波段，对其进行分析并绘制了叶绿素浓度分布图。

随着行业级无人机的发展，**利用无人机在高空巡航和遥控地面端人工识别的手段**，可以克服传统的人工踏勘费时费力以及在大范围水体人工遗漏检测的弊端。进一步，**无人机高光谱**反映了高分辨率光学信息的特征，其利用很多很窄的电磁波波段（通常 $<10\text{nm}$ ）从感兴趣的物体获取有关数据，可以实现大面积水体的高效监测。同时，**结合基于地物光谱仪的端元自采集方法**，获取样本水体中蓝藻的光谱信息，以此与样本水体叶绿素含量定量检测结果相互构建估算模型，**可实现大面积水体的蓝藻遥感探测**，为水质分析和水体环境保护提供技术支撑。

2、材料与方法

2.1 材料与设备

（1）外业采集相关设备

1. **高光谱无人机组件**：无人机，相机云台组件，机载数据采集系统，连接线。用于采集高光谱影像；2. **标准反射率白板**：用于计算高光谱影像反射率；3. **地物光谱仪组件**：地物光谱仪，小型高反射率白板。主要用于测量蓝藻水体光谱数据，也可用于测量标准反射率白板的反射率曲线，用于精确计算影像反射率。



图 1 无人机高光谱和地物光谱仪

(2) 参数定量测定设备

蓝藻叶绿素浓度定量测量（单位面积含量）相关设备。用于构建蓝藻叶绿素浓度估算模型（在有经验模型情况下，可用经验模型代替，但精度更低）。

2.2 数据采集

2.2.1 无人机高光谱影像采集

1. **无人机端设置**：组装无人机高光谱设备，设置航高、航速，根据相机参数和影像重叠度需求设置影像航线间距。2. **相机端设置**：根据航高航速设置相机帧率，根据白板

测量值设置积分时间（曝光时间）。3. **标准反射率白板**：在航线区域摆放标准反射率白板，采集影像时需拍摄到白板。

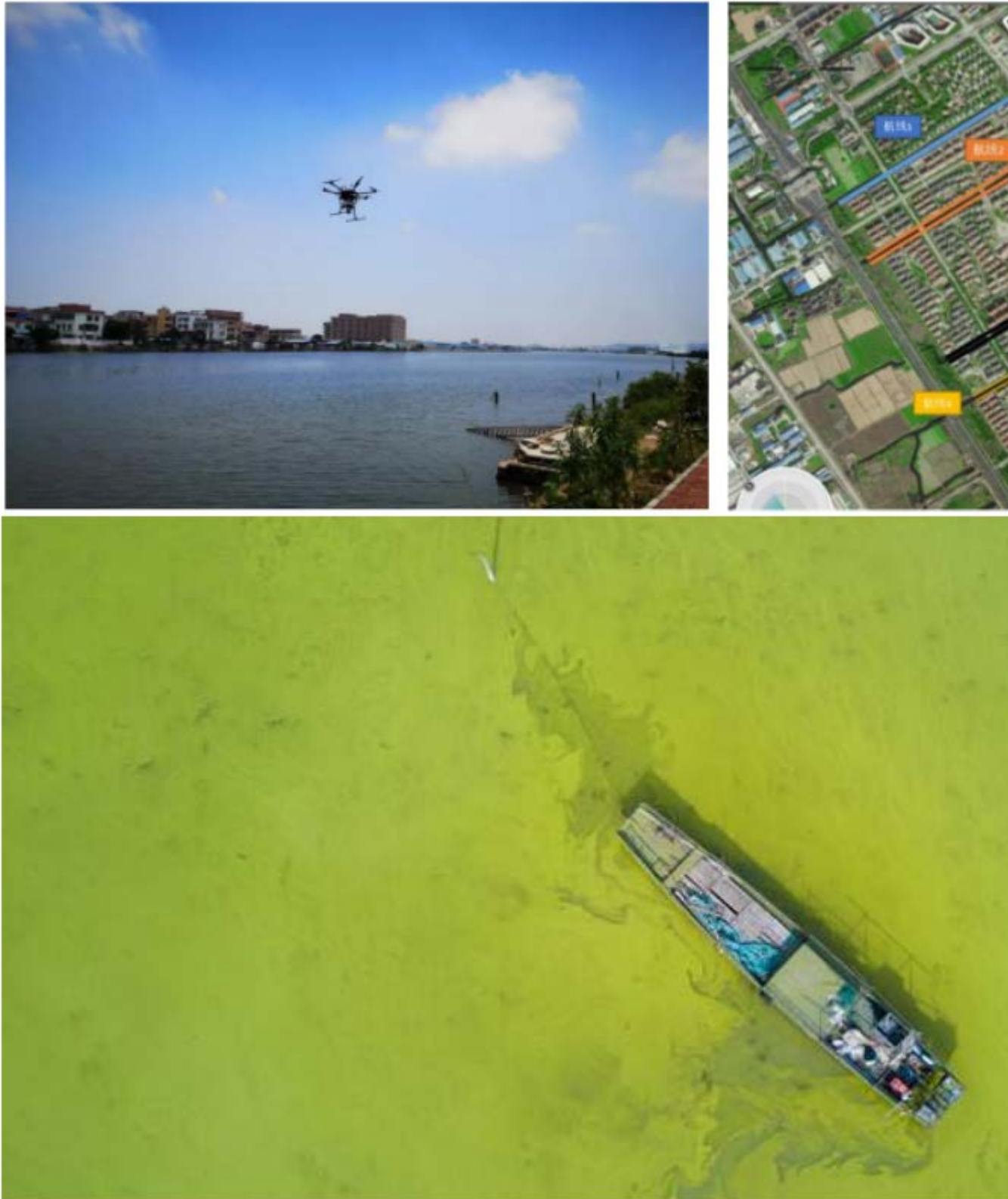


图 2 无人机高光谱采集水体高光谱影像示意图

2.2.2 实测蓝藻样本采集

在无人机采集影像后，在测区内选取部分水体的蓝藻作为样本采集对象，分别采集若干不同浓度情况的蓝藻水体，并进行编号分类密封保存（匹配 GPS 地理定位）。之后立刻送往实验室（蓝藻长时间放置后活性可能会降低，导致光谱发生变化），以进行蓝藻光谱测量和叶绿素浓度的定量测量。

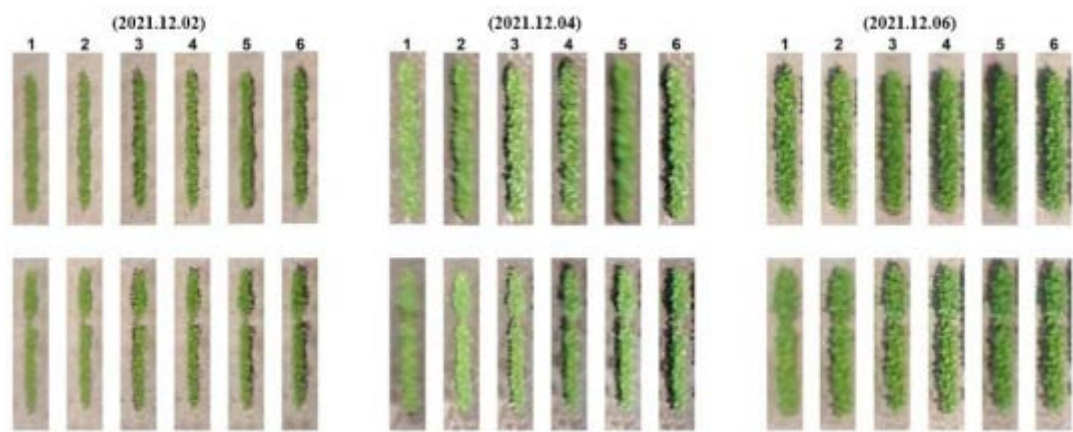


图 3 蓝藻水体采集样品编号封装保持示意图

3、数据预处理

数据处理包括高光谱影像处理、蓝藻水体实测样本参数定量测定、估算模型构建以及影像反演解算等，数据处理流程如图 4 所示。

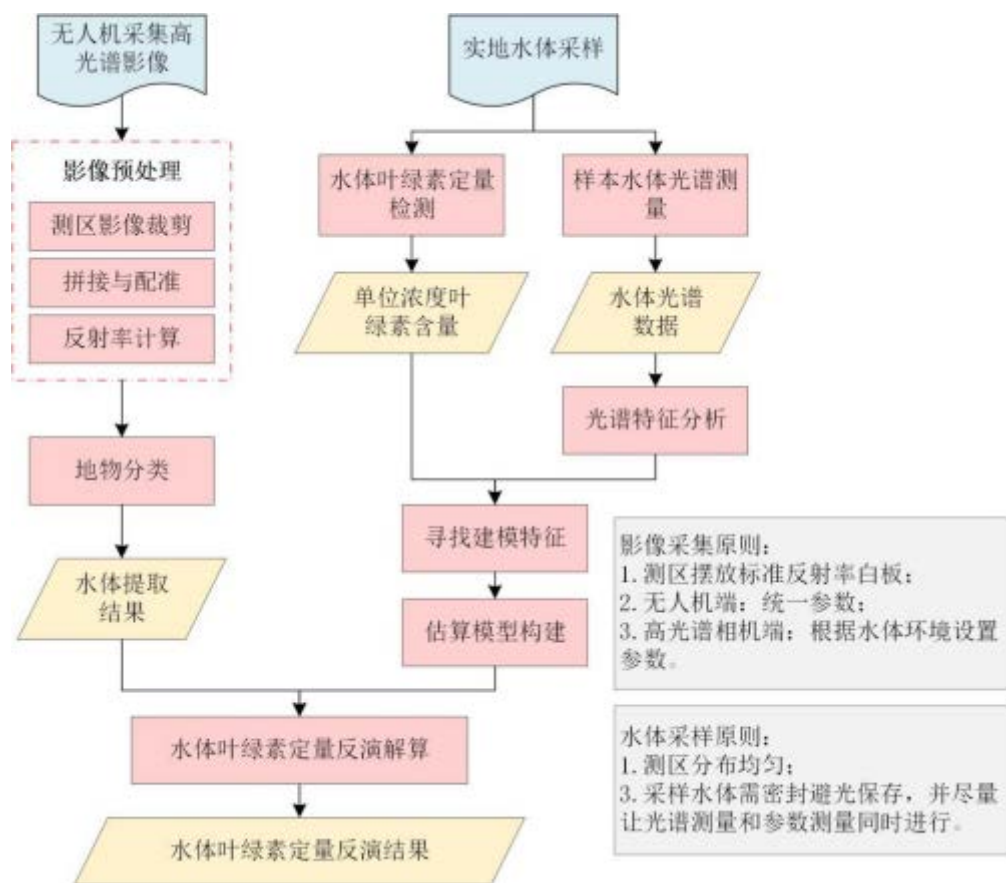


图 4 无人机高光谱蓝藻水体叶绿素定量反演流程

3.1 高光谱影像处理

1. **波长定标**：采集的原始影像没有波长信息，需要添加波长定标文件。2. **影像裁剪**：高光谱采用推扫式成像，需要对采集的测区影像进行裁剪。3. **配准拼接**：对裁剪后的测区影像进行地理配准或相对配准，之后对配准后的影像拼接成完整影像。4. **辐射校正**：原始影像中的值代表反射强度，需要利用白板反射值和标准反射率进行校正，计算整个影像的反射率。水体反射率计算方法如下：

	$R_{\text{水体}} = \frac{DN_{\text{测}} - r \cdot DN_{\text{天空}} - DN_{\text{暗}}}{DN_{\text{白板}} - DN_{\text{暗}}} \cdot R_{\text{白板}}$	
--	---	--

式中， $DN_{\text{测}}$ 为影像辐射值， $DN_{\text{天空}}$ 为天空辐射值， $DN_{\text{暗}}$ 为暗电流噪声； $DN_{\text{白板}}$ 为白板辐射值， $R_{\text{白板}}$ 为白板反射率； r 为水-汽界面反射率，与水面风速有关，平静天气下为 2.2%，在风速 5 m/s 时为 2.5%，风速约为 10 m/s 时为 2.6%-2.8%。

5. 光谱滤波(平滑)：原始影像中的光谱信息存在一定的噪声，在应用之前需要进行光谱滤波。

3.2 实测样本参数定量测定及光谱采集

3.2.1 蓝藻水体叶绿素定量测定

根据实际反演需求，对水体叶绿素浓度进行定量测量。利用分光光度法反演样本水体的叶绿素浓度。

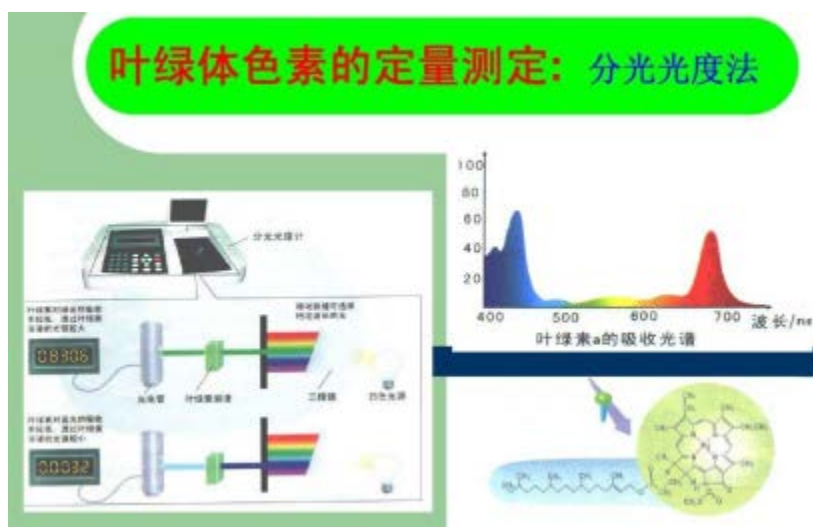


图 5 样本水体叶绿素定量测量示意图

3.2.2 蓝藻水体光谱采集

利用地物光谱仪测量样本水体的反射率。为确保估算模型构建的可靠性，对样本水体的光谱和参数测量的一个基本要求是保持同时进行，以保证水体光谱信息和叶绿素含量匹配。此外，为保证每个样本水体的叶绿素含量和光谱信息对应，需要对水体光谱测量值进行编号，同时保证与 GPS 定位编号对应。

3.2.3 训练样本和验证样本划分

将实测的水体光谱信息和相应叶绿素浓度分为两类。一类标记为训练样本，用于构建反演模型；另一部分标记为验证样本，用于检验反演结果的精度。训练样本和验证样本的比例通常为 70%和 30%。

3.3 估算模型构建

1. 特征波段选择：不同的水体叶绿素浓度在不同波段的响应程度不同，因此需要确定反演参数相应的特征波段。**2. 建模特征**：通过组合多个波段光谱信息以及结合相应的代数方法建立反演模型的变量，可以一定程度上提高参数反演模型的准确性。变量的构建主要有两步，一是研究水体叶绿素浓度与单波段之间的相关性；二是建立波段之间不同的组合形式。然后与实测水体叶绿素浓度进行相关性分析，寻找相关性高的波段组合方式。

，赞 69

3. 反演模型：利用双波段比值法或者偏最小二乘回归方法作为反演模型的基础算法，构建反演模型。

3.4 影像反演解算

利用构建的反演模型对影像进行解算。将研究区域影像按建模特征的变量计算方法进行计算，把整个研究区域影像计算为反演的变量，之后代入模型进行解算，解算结果即为水体叶绿素浓度反演结果。

4、研究结果

4.1 反演模型构建

根据获取蓝藻水体反射率光谱曲线和实测叶绿素浓度，分析不同波段对叶绿素浓度的相关程度。选取相关性最高的波段作为建模的特征波段。构建相关系数曲线如下：

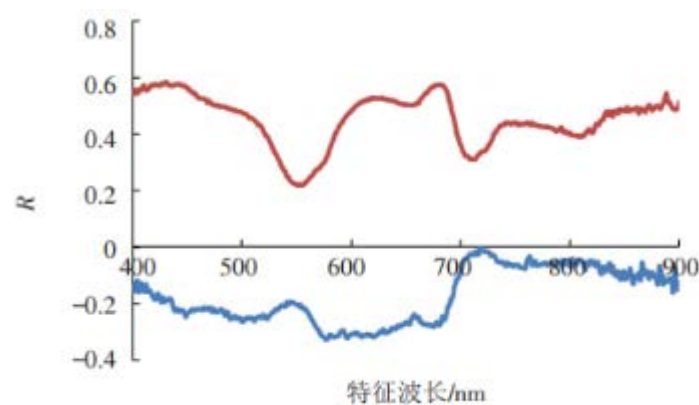


图 6 蓝藻叶绿素浓度与反射率光谱的相关系数曲线

根据现有研究可知，利用双特征波段构建的估算模型精度相对较高。双波段组合方法主要包括比值法和归一化等方法，蓝藻叶绿素浓度与双波段组合的相关系数如图 7 所示。构建的估算模型如图 8 所示。

归一化方法

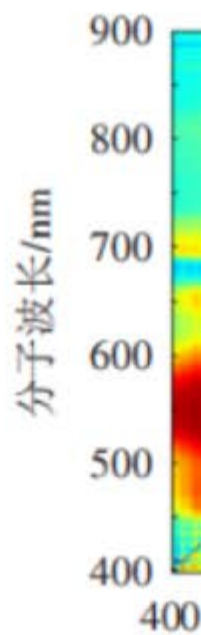
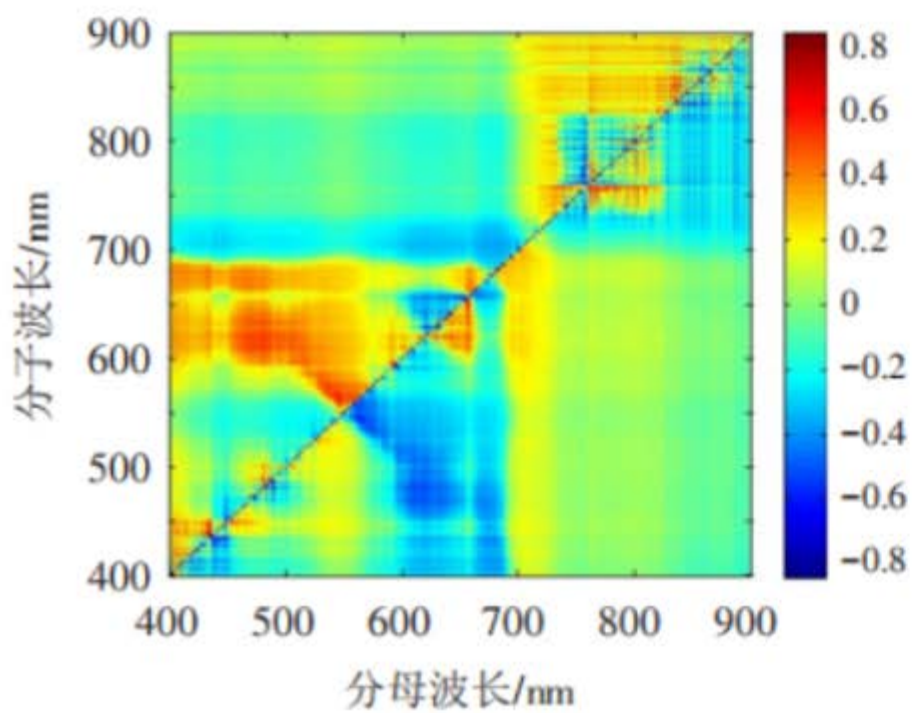


图 7 蓝藻叶绿素浓度与双波段组合的相关系数

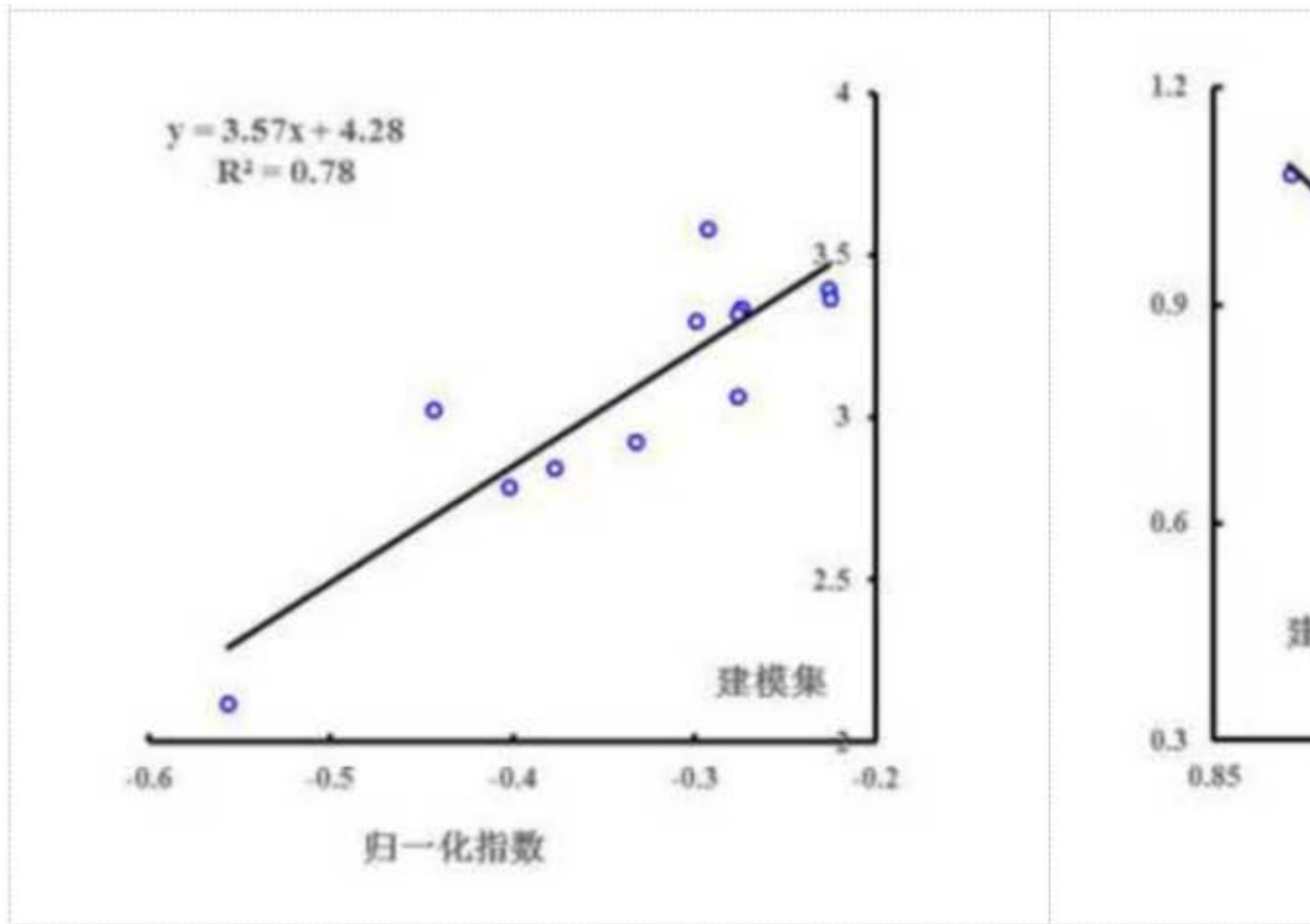


图 8 叶绿素估算模型示意图

4.2 蓝藻水体叶绿素反演结果

由实地水质采样并获取光谱曲线和实测叶绿素含量，反演出蓝藻叶绿素含量估算模型，并将该模型应用于获取的无人机高光谱影像，解译出整个区域的蓝藻分布和叶绿素含量情况，如图 9 所示。

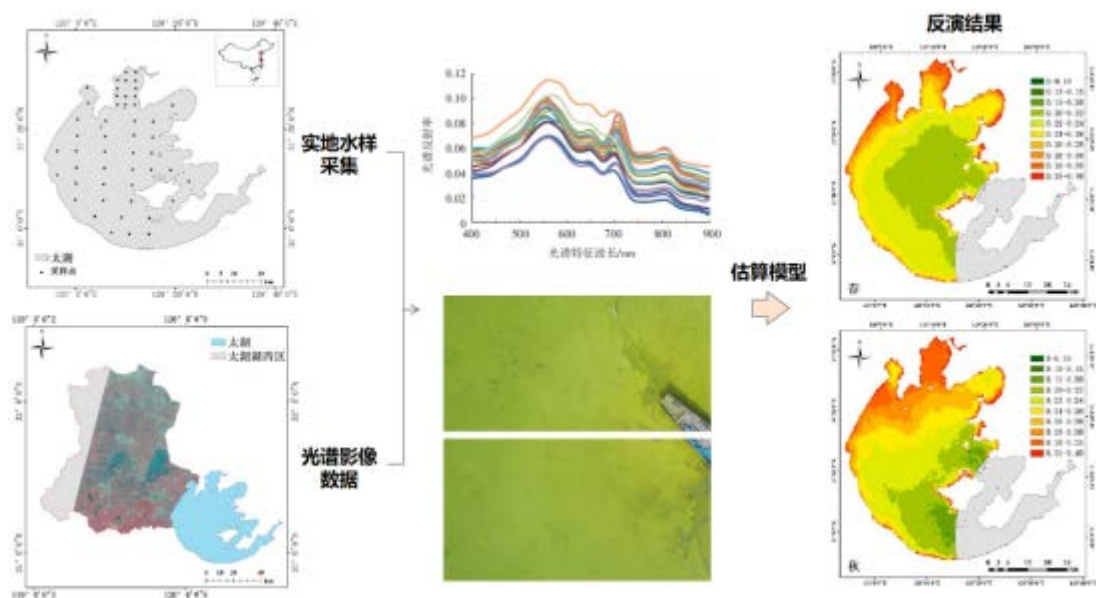


图 9 蓝藻范围及叶绿素浓度反演示意图

最后利用采集的验证样本数据进行估算精度检验，如图 10 所示。

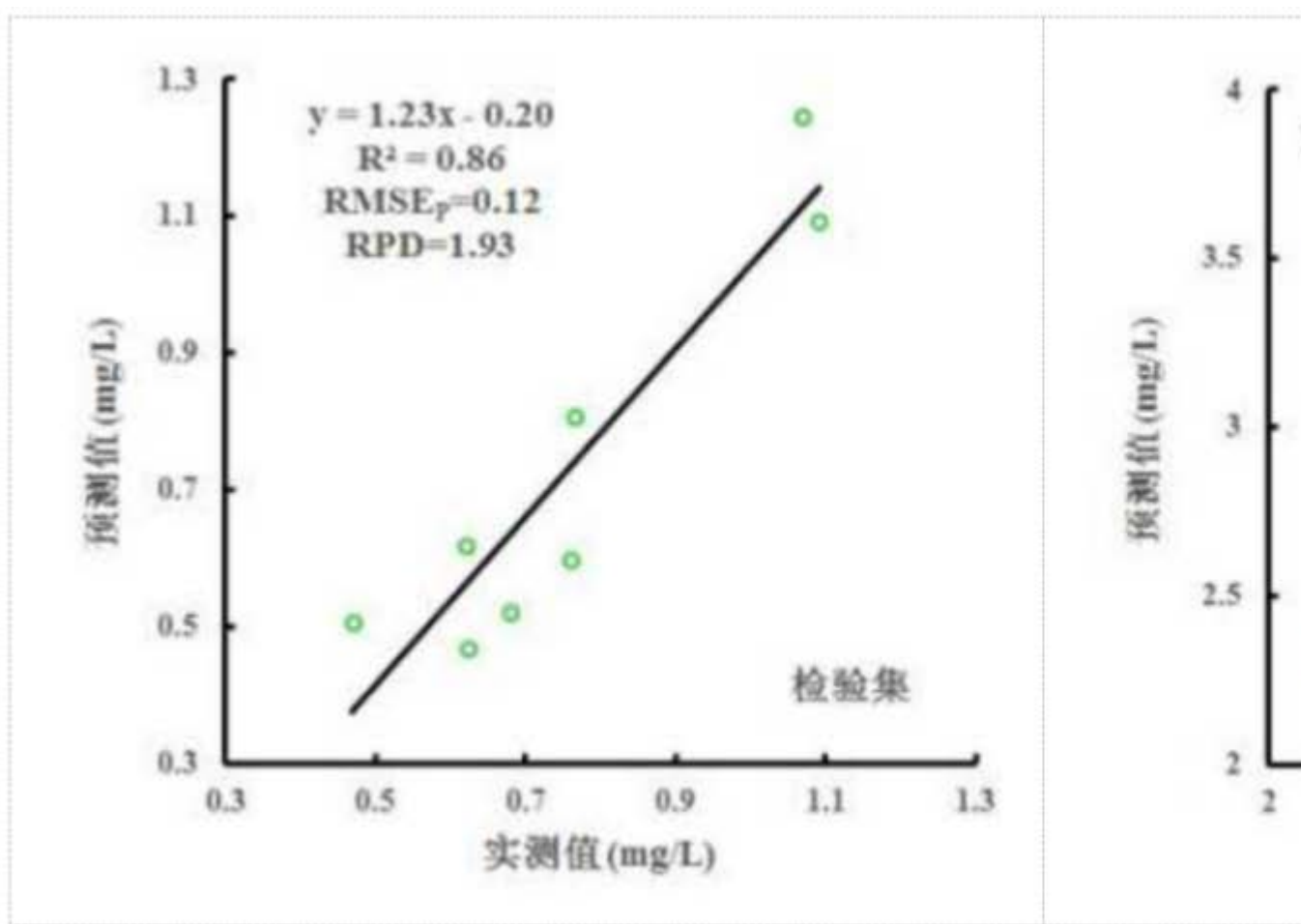


图 10 叶绿素估算结果精度检验示意图

ATH9010系列

无人机高光谱成像分析系统

波段范围

400~1000nm

光谱分辨率

优于1.5nm(领先)

I7板载计算机

2T存储（最大支持）

100小时成像数据

23.5°@f=35mm

宽视场



奥谱天成致力于开发国际领先的光谱分析仪器，立志成为国际一流的光谱仪器提供商，基于特有的光机电一体化、光谱分析、云计算等技术，形成以拉曼光谱为拳头产品，光纤光谱、高光谱成像仪、地物光谱、荧光光谱、LIBS 等多个领域，均跻身于世界前列，已出口到全球 50 多个国家。

- ◆ 承担“厦门市海洋与渔业发展专项资金项目”（总经费 4576 万元）；
- ◆ 2021 福建省科技小巨人科技部；
- ◆ 刘鸿飞博士入选科技部“创新人才推进计划”；
- ◆ 国家高新技术企业；
- ◆ 刘鸿飞博士获评福建省高层次人才 B 类；
- ◆ 主持制定《近红外地物光谱仪》国家标准；
- ◆ 国家《拉曼光谱仪标准》起草单位；
- ◆ 福建省《便携式拉曼光谱仪标准》评审专家单位；
- ◆ 厦门市“双百人才计划”A 类重点引进项目（最高等级）；
- ◆ 国家海洋局重大产业化专项项目承担者；
- ◆ “重大科学仪器专项计划”承担者。