

# 团 体 标 准

T/CWEC XXX-XXXX

## 无人机光谱遥感河湖库巡检技术导则

Technical guidelines for UAV spectral remote sensing inspection of  
rivers, lakes and reservoirs

(征求意见稿)

请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回

(2021.5)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国水利企业协会 发布



# 目 次

1 范围 .....	3
2 规范性引用文件 .....	3
3 术语和定义 .....	3
4 系统组成及功能 .....	5
4.1 系统组成 .....	5
5 巡检要求 .....	5
5.1 设备要求 .....	6
5.2 人员要求 .....	6
5.3 机型选择 .....	7
5.4 光谱遥感标定 .....	7
6 巡检模式及内容 .....	8
6.1 巡检模式 .....	8
6.2 巡检内容 .....	9
7 数据分析及整理 .....	9
7.1 数据分析 .....	9
7.2 数据整理 .....	15
8 资料整理及移交 .....	16
8.1 巡检记录单 .....	16
8.2 数据资料清单 .....	16
8.3 成果资料清单 .....	16
附录 A 无人机光谱遥感河湖库巡检系统巡检记录单 .....	17
附录 B 无人机光谱遥感河湖库巡检成果清单 .....	18

## 前 言

本文件按 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国水利企业协会提出并归口。

本文件起草单位：中国水利水电科学研究院、长光禹辰信息技术与装备（青岛）有限公司、中科星控(河北)信息技术有限公司、中国科学院空天信息创新研究院、青岛中质脱盐质量检测有限公司、中国科学院上海技术物理研究所、华东师范大学河口海岸科学研究院。

本文件主要起草人：彭文启、曹峰、陈学凯、刘晓波、吴文强、董飞、李洁、申茜、姚月、苑萍、巩彩兰、沈芳。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国水利企业协会技术标准部。

本文件为首次发布。

# 无人机光谱遥感河湖库巡检技术导则

## 1 范围

本标准规定了无人机光谱遥感河湖库巡检系统的组成、功能、巡检要求、巡检模式及内容、数据分析及整理、资料的整理及移交等内容。

本标准适用于采用无人机光谱遥感对河湖库进行的巡检作业。

## 2 规范性引用文件

本标准内容引用了下列文件中的条款。凡是不注明日期的引用文件，其有效版本适用于本标准。

GB 3838—2002 地表水环境质量标准

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 14950—2009 摄影测量与遥感术语

GB/T 27920.1—2011 数字航空摄影规范 第1部分：框幅式数据航空摄影

GB/T 7931 1:500 1:1000 1:2000 地形图航空摄影测量外业规范

GBT 29858-2013 GB/T 29858-2013 分子光谱多元校正定量分析通则

GB/T36540-2018 水体可见光-短波红外光谱反射率测量

GB/T 31010-2014 色散型高光谱遥感器实验室光谱定标

GB/T 36540-2018 水体可见光-短波红外光谱反射率测量

HJ/T 91 地表水和污水监测技术规范

HJ/T 372 水质自动采样器技术要求

SL2 219 水环境监测规范

CH/Z 3001 无人机航摄安全作业基本要求

CH/T 3002 无人机航摄系统技术要求

DD2013-12 多/高光谱遥感数据处理技术规程

DZ/T 0203—2014 航空遥感摄影技术规程

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1

无人机光谱遥感巡检系统 UAV spectral remote sensing inspection system

以无人机为监测平台,搭载可见光-近红外范围的光谱相机,能够对目标水体进行日常、专项及应急巡检的监测系统。

### 3.2

#### 水域边界线 water border line

指水域的外轮廓线,与陆地相接的分界线。投影至平面地图上通常用深蓝色线表示,中间水域用淡蓝色表示。

### 3.3

#### 水体遥感反射率 Water remote sensing reflectivity

离水辐亮度(水面上行辐亮度减去天空光水面镜面反射辐亮度)与下行辐照度之比

### 3.4

#### 归一化差值水体指数 normalized difference water Index; NDWI

绿波段和近红外波段通道反射率之差除以它们的和。

### 3.5

#### 归一化差值植被指数 normalized difference vegetation index; NDVI

NDVI 为近红外波段和红波段通道反射率之差除以它们的和。

### 3.6

#### 水色指数 Forel-Ule water color index; FUI

通过遥感影像的反射率计算得到的评价水体颜色等级的指数,用于表征水体的水体颜色信息。

### 3.7

#### CIE-三刺激值 XYZ international commission on illumination-tristimulus value XYZ

XYZ 由 CIE-RGB 光谱三刺激值经过数学变换得到的用于实现颜色量化表示的三个参数。

### 3.8

#### 色相角 chroma angle

CIE-三刺激值 XYZ 经数学运算,得到在 CIE 色度图中以等能白光点为原点的表征颜色的角度。

### 3.9

#### 黑臭水体 black-odorous water

包括农村黑臭水体和城市黑臭水体,农村黑臭水体是指各县(市、区)行政村(社区等)范围内颜色明显异常或散发浓烈(难闻)气味的水体。城市黑臭水体是城市区域内呈现令人不悦的颜色和(或)散发令人不适气味的水体的统称。

## 4 系统组成及功能

### 4.1 系统组成

无人机光谱遥感河湖库巡检系统应包括无人机子系统、光谱遥感子系统、地面保障子系统、软件分析及显示子系统。

#### 4.1.1 无人机子系统

无人机子系统由无人机平台单元、飞行控制单元、通信与数据传输单元、地面站单元组成。

#### 4.1.2 光谱遥感子系统

光谱遥感子系统包括光谱相机及辅助配件。

#### 4.1.3 地面保障子系统

地面保障子系统由地面保障设备和储运车辆组成。

#### 4.1.4 软件分析及显示子系统

软件分析及展示子系统包括无人机多/高光谱遥感影像预处理、分析软件及巡检成果 GIS 展示系统。

### 4.2 功能要求

#### 4.2.1 无人机子系统的基本功能要求

无人机子系统应能通过多旋翼、固定翼和复合翼不同机型搭载光谱遥感子系统对目标水体进行日常巡检、专项巡检和应急巡检。无人机载重要求：机载多光谱遥感子系统要求 $\geq 500\text{g}$ ，机载高光谱遥感子系统要求 $\geq 1\text{kg}$ 。多旋翼无人机满电续航时间一般应不小于 20 分钟，固定翼和复合翼无人机满电续航时间 $\geq 60$  分钟。

#### 4.2.2 光谱遥感子系统的基本功能要求

- a) 光谱范围 400nm(含)~800nm(含)，光谱通道数不低于 4 个
- b) 光谱相机光谱分辨率一般不低于 30nm
- c) 光谱相机空间分辨率一般不低于 1mrad（等效值：1m@100m）
- d) 光谱相机像素位数一般不低于 10bits

#### 4.2.3 地面保障子系统的基本功能要求

地面保障子系统包括定位装置、气象观测设备、光谱校准装置。地面定位精度应优于 2m，气象观测设备应符合 QX/T 46、QX/T 47 和 QX/T 51 的要求。

#### 4.2.4 软件分析及显示子系统的基本功能要求

软件应具有配准、拼接、辐射校正等预处理功能，分析软件通过对遥感影像数据计算，实现对水域边界线、污染源识别、富营养化分级、黑臭水体分级、藻类水华的应用分析。

## 5 巡检要求

无人机光谱遥感依据河湖库管理制度及河湖库管理单位需求对所需巡检水域进行无人

机光谱巡检，根据不同的巡检模式和巡检需求合理安排巡检内容、时间、相关工作要求等。

## 5.1 设备要求

根据河湖库管理单位的巡检需求，配备相应的无人机光谱遥感系统，确保该系统能安全、有效的完成河湖库巡检任务。

### 5.1.1 无人机硬件要求

巡检前要确保无人机设备电池电量正常、电压稳定且电池组没有明显鼓包、凹陷状况；对于多旋翼无人机要确保旋翼桨叶转动正常无异响。确保无人机通讯连接正常，不受干扰。

### 5.1.2 无人机软件要求

无人机连接地面站软件系统时，系统需显示正常的经纬度、速度、海拔高度、无人机姿态等信息；巡检前进行试飞，确定无人机遥控器与无人机连接稳定、无人机起降正常、机上指示灯正常，且试飞时经纬度等实时信息正常。

### 5.1.3 无人机自动巡航

无人机光谱遥感系统在进行巡检时须在地面站航行软件中规划好精确的航线，确保无人机设备沿预定的航线对河湖库目标进行巡检。巡航高度和区域应遵守中国民用航空总局令（第 188 号）CCAR-91-R2 一般运行和飞行规则，以及轻小无人机运行规定(试行)（中国民用航空总局 2016 年 6 月 22 日发布），不得在禁飞区飞行。

### 5.1.4 无人机光谱数据要求

通过现场查看光谱遥感数据的大小、空间、光谱维度信息是否正常、飞行 POS 数据的大小以及所有数据的实时记录、传输、存储等来确保光谱遥感测量设备正常。

发现有数据下载、数据大小不正常、光谱数据内容偏差（光谱曲线偏移等）、光谱数据缺失等问题，立即进行现场处理，无法及时处理则更换其他无人机光谱遥感设备进行巡检。

## 5.2 人员要求

根据无人机光谱系统巡检的工作内容以及无人机光谱遥感系统的工作特点，需配备一定的人员共同完成河湖库巡检任务。

### 5.2.1 无人机驾驶员

负责无人机光谱遥感设备的飞行及光谱数据采集工作，根据光照条件及飞行区域面积，合理设置飞行器和光谱遥感系统的技术参数；无人机驾驶员应具有无人机执照，以确保无人机光谱遥感系统巡检河湖库的稳定性和安全性。

### 5.2.2 地面保障人员

在需要获得无人机水体遥感反射率数据的情况下，利用地面光谱采集设备配合巡检行动在地面同步开展无人机光谱遥感设备地物光谱定标工作。主要工作内容包在无人机飞行区域铺设地面靶标参考板，以及利用便携式地物光谱仪与无人机光谱遥感设备同步测量靶标参考板的遥感反射率。

### 5.2.3 实测数据采集人员

无人机光谱遥感系统需要结合地面实测数据对巡检项目进行遥感解译,因此在无人机光谱系统对河湖库进行巡检的同时,地面需同步设置采样点采集巡检内容、实测光谱数据。

根据三种不同的巡检模式采集巡检内容,地表水的采集方法参考 HJ/T 91; 各类水质参数的检测方法参考 GB 3838—2002; 采样器材的准备参考 HJ/T 372; 采集人员需严格按照采样规范和现场测量规范进行巡检内容采集,确保所得到的实测数据的可靠性。在采样的同时需观察记录整个采样区域的排污口、水面漂浮物等情况,做好详细的采样记录。

实测光谱数据需配备光谱分辨率不低于无人机光谱遥感数据的便携式野外高光谱测量仪以及标准漫反射板,测量光谱数据时应保证周围无明显遮挡物,测量人员身着深色服装,测量方法参考《水面光谱测量分析 I:水面以上测量法,遥感学报,2004,8(1):37-43》。测量时间保持与无人机经过时间同步。人员数量根据采样点的个数及实际情况确定。

### 5.3 机型选择

应根据作业场地环境、目标范围、无人机配置等实际情况选择不同机型无人机对河流、湖泊、水库进行巡查。机型选择原则参照表 1 执行。

表 1 机型选择原则

水体类型	目标特性、范围及环境	适用机型
所有水体	点状目标	多旋翼
河流	线状目标,顺直(弯曲系数<1.3),作业长度<1/2 有效航程	多旋翼、固定翼、复合翼
	线状目标,弯曲(弯曲系数>1.3),作业长度<1/2 航程;地形高差<1/2 航高	多旋翼
	线状目标,弯曲(最小航迹段长度>河流转弯半径),作业长度>1/2 航程;地形高差<1/2 航高	多旋翼
湖泊、水库	面状目标,面积<0.5 km <sup>2</sup> ;岸线发育系数>2;地形高差>1/2 航高	多旋翼
	面状目标,面积>0.5 km <sup>2</sup> ,岸线发育系数<2;地形高差<1/2 航高	固定翼、复合翼

### 5.4 光谱遥感标定

#### 5.4.1 无人机机载光谱仪标定方法

无人机机载光谱仪标定一般包括实验室光谱标定和现场辐射标定两部分。

实验室光谱标定一般是设备在出厂前,由生产商参照 GB/T 31010-2014,采用标准单色仪器进行定标,确保机载光谱仪传感器各中心波长及其波谱响应函数的误差符合要求。

现场辐射标定采用两步标定法,第一步,传感器现场光谱基线标定和优化曝光参数;第

二步，无人机执飞过程定标。

#### 5.4.2 传感器现场光谱基线标定和优化曝光参数

在无人机起飞前，设备通电后，将反射率参考板放置于光谱仪的镜头前。打开光谱采集软件，根据现场的光线环境，如太阳高度角、光强和色温等，优化曝光参数，获取反射率参考板的光谱反射率光谱曲线。使采集的光谱曲线不要出现过曝现象和过弱现象。然后保存优化后的曝光参数及反射率参考板的光谱反射率标准基线。

#### 5.4.3 无人机执飞过程定标

将基线定标时的反射率参考板放置于无人机光谱采集时的飞行路线上。在无人机飞行过程中，应在数据采集开始后和结束前经过反射率参考板上空 2 次以上。反射率参考板采集与巡检目标采取一致的飞行参数和设备参数。当作业完成后，提取巡检作业影像数据时，将所采集的反射率参考板的影像提取出来，并从中随机选择 10 个像元提取个像元的波段 DN 值，然后平均，得到各波段的 DN 均值  $DN_{ref}(\lambda)$ 。然后利用巡检目标影像像元的各波段 DN 值  $DN_{UAV}$ ，除以  $DN_{ref}(\lambda)$ ，再乘以反射率参考板各波段的反射率  $R_{ref}(\lambda)$ ，计算得到巡检目标像元的反射率值  $R_{UAV}(\lambda)$ 。

$$R_{UAV}(\lambda) = DN_{UAV}(\lambda) / DN_{ref}(\lambda) \times R_{ref}(\lambda) / \pi \quad (1)$$

$R_{UAV}(\lambda)$  为计算得到的无人机巡检目标的遥感反射率（单位： $sr^{-1}$ ）， $DN_{UAV}(\lambda)$ 为无人机测得的光谱信号值， $DN_{ref}(\lambda)$ 为无人机探测到的参考板光谱信号值， $R_{ref}(\lambda)$ 为反射率参考板的反射率，一般为 0 — 1 的常数值。

#### 5.4.4 现场辐射定标精度验证

在无人机机载光谱仪飞行采集地面标准参考反射率板的同时，也采用标准光谱仪对地面标准参考反射率板进行同步光谱测量，并进行反射率计算。测量和计算方法参考 GB/T 36540-2018，然后通过光谱匹配计算和分析无人机机载光谱仪和标准光谱仪所采集的中心波长和带宽的偏移误差，验证无人机机载光谱仪的辐射定标精度。并对无人机机载光谱仪进行误差修订。

## 6 巡检模式及内容

### 6.1 巡检模式

#### 6.1.1 日常巡检

利用无人机光谱遥感河湖库巡检系统对河湖库进行常规巡检，巡检周期为 15 天，巡检频率可根据具体需求而定。

#### 6.1.2 专项巡检

利用无人机光谱遥感河湖库巡检系统对河湖库的富营养化、黑臭程度、水域边界线等专项进行巡检。

### 6.1.3 应急巡检

应急巡检是采用无人机光谱遥感河湖库巡检系统对突发状况进行河湖库专项巡检。

## 6.2 巡检内容

### 6.2.1 巡检内容

巡检内容见表 2。

表 2 无人机光谱遥感河湖库巡检系统巡检内容

巡检模式	巡检内容
日常巡检	水域边界线、污染源识别
专项巡检	水域边界线、污染源识别、富营养化分级、黑臭水体识别与分级、藻类水华
应急巡检	水域岸线、污染源识别、藻类水华

### 6.2.2 巡检监测项目

巡检项目见表 3。

表 3 无人机光谱遥感河湖库巡检系统巡检项目

水体	巡检项目（技术参数）
河湖库	NDWI、FUI、水体营养状态指数 TSI (Trophic Status Index)、BOI (Black and Odorous water Index)、BOCI (Black and Odorous water Classification Index)、FAI (Floating Algae Index)、NDVI 等光谱指数

## 7 数据分析及整理

### 7.1 数据分析

#### 7.1.1 水域边界线

NDWI 是基于绿波段与近红外波段的归一化比值的水体指数，可以增强影像中的水体信息，常用于水域边界线的提取。而且，水体在近红外波段的反射率一般会比其他地物更低。

NDWI 指数按照公式（2）进行计算。

$$NDWI = \frac{R_{rs}(G) - R_{rs}(NIR)}{R_{rs}(G) + R_{rs}(NIR)} \quad (2)$$

式中： $R_{rs}(G)$ ——无人机影像绿波段（555nm 附近）大气校正后遥感反射率值；

$R_{rs}(NIR)$ ——无人机影像近红外波段（800nm 附近）大气校正后遥感反射率值。

基于 NDWI 和近红外单波段反射率的判别方法及阈值见公式（3）。 $W1$  和  $W2$  的值可根据影像上普通水体来进行确定， $W1$  建议参考值为 0—0.4 之间， $W2$  建议参考值为 0—0.2 之间。最终确定水域边界线。

$$\text{水体提取} \begin{cases} \text{非水体 } NDWI \leq W1 \text{ 或 } R_{rs}(NIR) \geq W2 \\ \text{一般水体 } NDWI > W1 \text{ 且 } R_{rs}(NIR) < W2 \end{cases} \quad (3)$$

#### 7.1.2 疑似污染源定位

疑似污染源包括人为活动引起的污染点、排污口。排污口一般为开放式沟渠和封闭式管

道。排放形式有明排放和隐藏式排放。一般来说，污染区域具有氮磷浓度高、高锰酸盐指数高、色度大、透明度低、悬浮物浓度高等污染特征。

疑似污染源分析可以采用光谱影像色差分析法、水质指标直接指示法和光谱指数法相结合的方法。

光谱影像色差分析法：通过无人机获取的光谱图像上，进行伪彩色合成，看水体的形态变化和色差变化，和正常排水口进行比对，确认是否为排污口。排污口的色差一般呈现渐变趋势。

水质指标直接指示法：是依据各水质指标的遥感反演模型，得到各水质指标的空间分布遥感影像，再依据其空间分布的差异以及流体扩散特征，初步确定其是否为疑似污染源。如果是疑似污染源，就需要定位记录其经纬度位置信息、主要污染指标类型及有关浓度。污染源的流体扩散影像特征一般表现为：（1）顺水流方向沿水域边缘线带状扩散；（2）从排污口向外喇叭状扩散；（3）四周弥散扩散。污染源的氮、磷和悬浮物指标一般为排污口最高，然后向外逐渐稀释至与主要受污染区相同。

光谱指数法：**Imp** 不透水面指数（**Impervious Surface Index**）；首先在水体以外的岸线巡检区域中，计算 **Imp** 光谱指数和 **NDVI** 指数见公式（4）和（5），光谱特征的判别方法见公式（6），再根据指数阈值标记前景和背景，计算前景对象的面积、矩形度等形状特征，在影像中选取样本，确定阈值，完成初分类；其次根据水质遥感分级结果，分析水质级别变化趋势及空间分布，再采取空间分析方法分析初分类结果，剔除无污染水体、轻度污染水体、无水质级别变化水体附近的初分类点，最终确定疑似污染源。

$$\text{Imp} = (10 * R_{rs}(B)) / (R_{rs}(NIR) + R_{rs}(R)) \quad (4)$$

$$\text{NDVI} = (R_{rs}(NIR) - R_{rs}(R)) / (R_{rs}(NIR) + R_{rs}(R)) \quad (5)$$

式中： $R_{rs}(B)$ ——无人机影像蓝波段的反射率；

$R_{rs}(R)$ ——无人机影像红波段的反射率；

$R_{rs}(NIR)$ ——无人机影像近红波段的反射率；

$W3$  和  $W4$  的值可根据影像上白色（或水泥）不透水面来进行确定， $W3$  建议参考值为 0.1—0.4 之间， $W4$  建议参考值为 2.1—2.9 之间。

$$\text{光谱特征} \begin{cases} \text{有效目标} & NDWI \leq W3 \ \& \ Imp \geq W4 \\ \text{无效背景} & NDWI > W3 \ \& \ Imp < W4 \end{cases} \quad (6)$$

### 7.1.3 富营养化水体分级

#### 7.1.3.1 FUI 水色指数

建议采用 FUI 水色指数（Forel-Ule water color index），基于影像的遥感反射率，计算水体营养状态指数 TSI（Trophic Status Index）。具体技术路线如下。

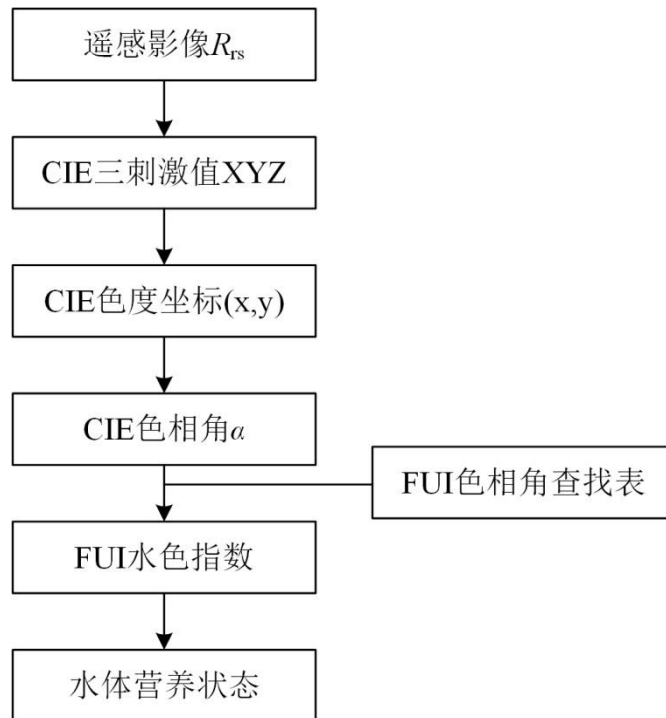


图 1 基于 FUI 评价水体营养状态技术路线图

#### 7.1.3.1.1 CIE-XYZ 三刺激值计算

将影像的 R, G, B 三个波段的  $R_{rs}$  值作为色度系统的红、绿、蓝三原色, 将其合成的真彩色图像作为实际颜色, 利用 CIE 色度系统 (CIE, 1931) 中的三原色 RGB 与三刺激值 XYZ 之间的转换关系 (见公式 (6)) 计算得到 R, G, B 波段图像对应的颜色三刺激值。

$$\begin{aligned}
 X &= 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B \\
 Y &= 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B \\
 Z &= 0.0000R + 0.0565G + 5.5934B
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

利用 CIE 系统的 R, G, B 向 X, Y, Z 三刺激值转换公式来计算色相角  $\alpha$  和 FUI 指数。对于只有 R, G, B 三个波段的遥感图像, 在计算三刺激值 XYZ 时, R, G, B 波段系数见表 4。

表 4 基于 RGB 波段计算 CIE-XYZ 的波段线性求和系数

$\lambda 1$ (nm)	红波段	绿波段	蓝波段	SUM
x1	2.7689	1.7517	1.1302	5.65
y1	1	4.5907	0.0601	5.65
z1	0	0.0565	5.5934	5.65
注: SUM 为传感器波段系数之和				

#### 7.1.3.1.2 色度坐标计算

将 X, Y, Z 值代入公式 (4) 进行归一化计算色度坐标 (x, y)。色度图上二维坐标 x 和 y 是由三刺激值 XYZ 计算得来的色度坐标, 计算公式如下。

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\z &= \frac{Z}{X+Y+Z}\end{aligned}\quad (7)$$

#### 7.1.3.1.3 色相角计算

将经 7.1.3.2 中得到的色度坐标(x, y) 中 x、y 的值代入公式 (5)，计算得到色度角  $\alpha$  的值。色相角  $\alpha$  按照公式 (8) 进行计算。

$$\alpha = \text{ARCTAN2}(x-0.3333, y-0.3333) \quad (8)$$

式中：ARCTAN2——双变量反正切函数。值域为 (0° , 360° )

#### 7.1.3.1.4 Forel-Ule 比色表

基于经 7.1.3.3 计算得到的色相角  $\alpha$  和 FUI 指数色度查找表 (见表 5)，查找表中与  $\alpha$  最邻近的色度值，该色度值对应的 FUI 即水体 FUI 水色指数。

表 5 Forel-Ule 比色表中 21 个级别对应的色度坐标 (x, y)和 色相角  $\alpha$  值

FUI	x	y	$\alpha$	FUI	x	y	$\alpha$
1	0.191363	0.166919	40.467	12	0.402416	0.4811	205.0622
2	0.198954	0.199871	45.19626	13	0.416243	0.47368	210.5766
3	0.210015	0.2399	52.85273	14	0.431336	0.465513	216.5569
4	0.226522	0.288347	67.16945	15	0.445679	0.457605	222.1153
5	0.245871	0.335281	91.29804	16	0.460605	0.449426	227.6293
6	0.266229	0.37617	122.5852	17	0.475326	0.440985	232.8302
7	0.290789	0.411528	151.4792	18	0.488676	0.43285	237.3523
8	0.315369	0.440027	170.4629	19	0.503316	0.424618	241.7592
9	0.336658	0.461684	181.4983	20	0.515498	0.416136	245.5513
10	0.363277	0.476353	191.8352	21	0.528252	0.408319	248.9529
11	0.386188	0.486566	199.0383				

#### 7.1.3.1.5 基于 FUI 的水体营养状态评价方法

利用 FUI 水色指数与水体光学组分 (如 Chl-a 和透明度) 有着密切内在联系，构建基于 FUI 水色指数的水体营养状态评价方法。

FUI 水色指数与 TSI 营养状态指数之间的相关关系按照公式 (9) 进行计算。

$$y = 25.586 * \ln(x) - 13.756 \quad (9)$$

式中：x——FUI 水色指数；

y——TSI 营养状态指数。

通过经验阈值，利用 FUI 分段对水体营养状态进行划分，见图 2。

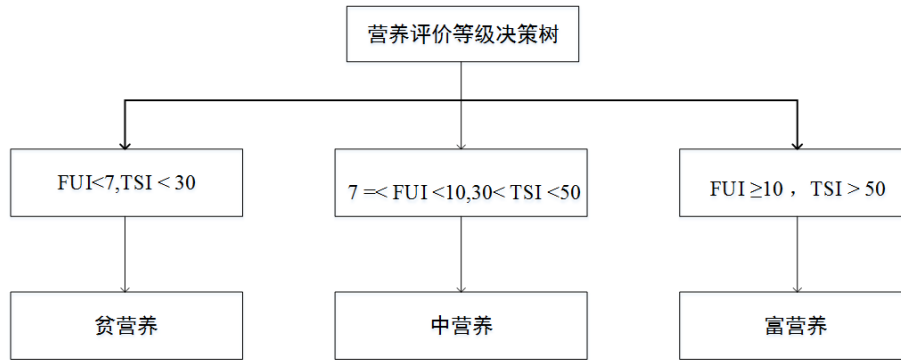


图 2 水体营养状态评价决策树

### 7.1.3.2 光谱指数分级

这里采用两种光谱指数 NDVI 和 RRd，将水体分为四级：贫营养-中营养、轻度富营养化水体、中度富营养化水体、重度富营养化水体。

NDVI 和 RRd 反映了水体富营养化特征，计算公式如下：

$$NDVI = \frac{R_{rs}(NIR) - R_{rs}(R)}{R_{rs}(NIR) + R_{rs}(R)} \quad (7)$$

$$RRd = \frac{R_{rs}(Rededge)}{R_{rs}(NIR)} \quad (8)$$

式中： $R_{rs}(R)$ ——无人机遥感影像红波段（660nm 附近）反射率值；

$R_{rs}(Rededge)$ ——无人机遥感影像红边波段（720nm 附近）反射率值；

$R_{rs}(NIR)$ ——无人机遥感影像近红外波段（840nm 附近）反射率值。

富营养化级别和光谱指数的阈值对应关系见下表， $V1$ 、 $V2$  的值可根据影像上典型的富营养化水体来进行确定， $V1$  建议参考值为 1.0—1.8 之间， $V2$  建议参考值为 1.5—2.3 之间，且  $V1 < V2$ 。

表 6 营养状态级别和光谱指数的阈值对应表

营养状态分级	NDVI	RRd
贫营养	小于 0	——
中营养		
轻度富营养	大于 0	小于等于 $V1$
中度富营养	大于 0	大于 $V1$ 且小于 $V2$
重度富营养	大于 0	大于等于 $V2$

### 7.1.4 黑臭水体识别和分级

采用 BOI（Black and Odorous water Index）模型识别黑臭水体，采用 BOCI（Black and Odorous water Classification Index）模型对黑臭水体进行分级。

#### 7.1.4.1 黑臭水体遥感识别模型

BOI 是基于红、绿波段的遥感反射率之差与蓝、绿、红波段的遥感反射率之和的比值的指数，常用于识别黑臭水体，按照公式（10）进行计算。

$$BOI = \frac{R_{rs}(G) - R_{rs}(R)}{R_{rs}(B) + R_{rs}(G) + R_{rs}(R)} \quad (10)$$

式中： $R_{rs}(B)$ ——无人机影像蓝波段（470nm 附近）大气校正后遥感反射率值；

$R_{rs}(G)$ ——无人机影像绿波段（555nm 附近）大气校正后遥感反射率值；

$R_{rs}(R)$ ——无人机影像红波段（700nm 附近）大气校正后遥感反射率值。

基于 BOI 方法的阈值选取见公式（11）。 $T$  的值可根据影像上典型的黑臭水体来进行确定，建议城市黑臭水体参考值为 0—0.07 之间。

$$\text{水体识别} \begin{cases} \text{黑臭水体 } BOI \leq T \\ \text{一般水体 } BOI > T \end{cases} \quad (11)$$

#### 7.1.4.2 黑臭水体遥感分级指数

BOCI 是基于绿波段反射率的基线差值与红波段反射率之比的指数，一般用于对黑臭水体进行分级，按照公式（12）、（13）进行计算。

$$M_1 \leq BOCI = \frac{R_{rs}(G) - R'_{rs}(G)}{R_{rs}(R)} \leq M_2 \quad (12)$$

$$R'_{rs}(G) = R_{rs}(B) + (R_{rs}(R) - R_{rs}(B)) * (\lambda_G - \lambda_B) / (\lambda_R - \lambda_B) \quad (13)$$

式中： $R_{rs}(B)$ ——无人机影像蓝波段（470nm 附近）大气校正后遥感反射率值；

$R_{rs}(G)$ ——无人机影像绿波段（555nm 附近）大气校正后遥感反射率值；

$R_{rs}(R)$ ——无人机影像红波段（700nm 附近）大气校正后遥感反射率值。

$\lambda_B$ ——无人机影像蓝波段的波长；

$\lambda_G$ ——无人机影像绿波段的波长；

$\lambda_R$ ——无人机影像红波段的波长；

$R'_{rs,G}$ ——遥感影像绿波段插值反射率

基于 BOCI 方法的阈值选取见公式（14）。 $M_1$ 、 $M_2$  的值可根据影像上典型的黑臭水体来进行确定，建议城市黑臭水体  $M_1$ 、 $M_2$  参考范围分别是 0—0.19，0.19—0.33。

$$\text{水体类别} \begin{cases} \text{重度黑臭 } BOCI < M_1 \\ \text{轻度黑臭 } M_1 \leq BOCI \leq M_2 \\ \text{一般水体 } BOCI > M_2 \end{cases} \quad (14)$$

#### 7.1.5 水华识别和分级

可以采用改进后的 FAI（Floating Algae Index）指数，也可以采用 NDVI 指数，识别和分级蓝藻水华。

##### 7.1.5.1 改进后的浮游藻类指数 FAI

FAI 是浮游藻类指数。与 NDVI、EVI（Enhanced Vegetation Index）等方法相比，FAI 对于环境条件改变的敏感性更低，结果具有很好的稳定性，该方法还可以采用近红外波段对复杂大气环境进行校正，消除部分大气、薄云等的影响，是一种更为有效的蓝藻监测方法。

FAI 指数按照公式（15）进行计算

$$FAI = R_{rs}(R) - R_{rs}(G) - (R_{rs}(NIR) - R_{rs}(G)) * (\lambda_R - \lambda_G) / (\lambda_{NIR} - \lambda_G) \quad (15)$$

式中： $R_{rs}(G)$ ——无人机影像绿波段大气校正后遥感反射率值；

$R_{rs}(R)$ ——无人机影像红波段大气校正后遥感反射率值；

$R_{rs}(NIR)$ ——无人机影像近红外波段大气校正后遥感反射率值；

$\lambda_G$ ——表示所使用的无人机影像的绿波段中心波长；

$\lambda_R$ ——表示所使用的无人机影像的红波段中心波长；

$\lambda_{NIR}$ ——表示所使用的无人机影像的近红外波段中心波长；

采用等间隔方法确定强度分级阈值，阈值参考值为 -0.006、0 和 0.006。依据阈值将蓝藻水华区分成 3 级水华风险一级 (-0.006 < FAI ≤ 0)、风险二级 (0 < FAI ≤ 0.006)、风险三级 (FAI > 0.006)，水华程度依次加重，以确定水华发生强度的空间分布差异。

#### 7.1.5.2 归一化差分植被指数 NDVI

NDVI 指归一化差分植被指数(Normalized Difference Vegetation Index)。蓝藻水华的光谱特征与植被较为相似，在近红外波段反射率较高，水体在近红外波段反射率较低，NDVI 指数可以增强两者的差别。

NDVI 指数按照公式 (16) 进行计算。

$$NDVI = \frac{R_{rs}(NIR) - R_{rs}(R)}{R_{rs}(NIR) + R_{rs}(R)} \quad (16)$$

式中： $R_{rs}(R)$ ——无人机影像红波段（700nm 附近）大气校正后遥感反射率值；

$R_{rs}(NIR)$ ——无人机影像近红波段（800nm 附近）大气校正后遥感反射率值。

基于 NDVI 方法的阈值选取见公式 (16)、(17)。N、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 的值可根据影像上典型的蓝藻水华来进行确定，建议 N、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 参考范围分别是 0—0.4，0—0.2，0.2—0.4。

$$\text{水华识别} \begin{cases} \text{水华} & NDVI \leq N \\ \text{一般水体} & NDVI > N \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{水华类别} \begin{cases} \text{轻度水华} & NDVI \leq N_1 \\ \text{中度水华} & N_1 < NDVI \leq N_2 \\ \text{重度水华} & NDVI > N_2 \end{cases} \quad (18)$$

## 7.2 数据整理

应及时对测量条件、测量准备、基本测量、测量记录以及测量数据处理过程中涉及到的内容进行整理和描述，形成测量工作报告、专题数据图、GIS 发布展示和电子档案集等成果资料。

工作报告应包含以下内容：

- a) 报告编写和校对人员姓名和所在单位，报告编写和校对日期；
- b) 巡检目标名称和目标特性；
- c) 巡检目的、巡检内容、巡检方式、巡检过程、参与单位和人员分工；
- d) 巡检目标地点、时间、水温、气象条件和周边环境状况；

- e) 光谱测量仪器名称、型号、覆盖波长、光谱分辨率、探测灵敏度及定标日期；
- f) 巡检原始记录、数据筛选及数据分析的内容、方法和结果；
- g) 配套测量数据及测量记录表的文件名和文件格式；
- h) 其他配套设施的名称、型号和关键技术指标。

专题数据图应包含以下内容：

- a) 专题图内容：在地图基础上依据专题要求可叠加水域水面、富营养化、黑臭水体、污染源、水陆边界线分析、富营养化水体判别、黑臭水体识别、污染源排查定位、藻类水华、岸线植被覆盖度和多样性评估等专题内容；
- b) 底图要求：原始拼接影像或者国家基础地理地图（天地图）；
- c) 叠加要素：包括图名、图例、指北针、比例尺、制图时间、空间统计信息（水体总面积、富营养化分级或黑臭水体提取各等级面积、疑似污染源个数、污染垃圾点数、岸线植被覆盖度面积）。

GIS 发布展示应包含以下内容：

- a) 专题数据图以天地图为底图发布到地图上，应无明显位置偏差；
- b) 展示界面具有空间统计分析，可进行简单的人工交互，可进行多时相叠加显示分析，可计算变化情况，多时相数据发布要完全配准不能存在偏差。

电子档案集应包含以下内容：

- a) 获取的原始遥感数据，POS 数据，无人机姿态数据等；
- b) 筛选后的原始数据以及数据处理的中间结果数据；
- c) 巡检目标的现场及周边环境照片；
- d) 巡检计划、测量记录、总结报告、光谱测量仪和标准参考板等技术文档；
- e) 其他配套数据和说明。

## 8 资料整理及移交

### 8.1 巡检记录单

巡检作业完成后，作业人员应填写无人机光谱遥感河湖库巡检系统使用记录单，交由工作负责人签字确认后方可移交至管理单位。见附录 A

### 8.2 数据资料清单

飞行日志、样区采集记录表（含航线、覆盖区、作业内容）、原始影像、拼接预处理影像数据、辐射校正后影像数据、专题反演提取数据、目标区域地理边界矢量图。

### 8.3 成果资料清单

水域岸线提取专题图、疑似污染源分布图、富营养化分级图、黑臭水体分级图、藻类水华发生空间分布图。

## 附录 A

(资料性附录)

## 无人机光谱遥感河湖库巡检系统巡检记录单

无人机光谱遥感巡检系统巡检记录单见表 C.1。

表 C.1 无人机光谱遥感巡检系统巡检记录单

编号:	巡检时间: 年 月 日						
巡检路线							
任务类型							
使用型号		天气		风速		气温	
工作负责人		机次		每机次作业时间			
作业人员							
系统状态							
航线信息							
任务信息							
记录人:				工作负责人: (签名确认)			
<p>注: a 此栏填写线路巡视、缺陷核实、消缺复查、故障点查找等。</p> <p>b 此栏记录检查中发现的异常情况, 航行中航行平台、任务系统等异常状况及航后检查情况。</p> <p>c 此栏记录航行中航线的变更信息, 包括始末点、航线周边环境等的变化。</p> <p>d 此栏记录何种任务设备, 距离目标物在什么位置记录了什么信息等。</p>							

附录 B

(资料性附录)

无人机光谱遥感河湖库巡检成果清单

无人机光谱遥感河湖库巡检成果清单，见表 B.1。

表 B.1 巡检成果清单

序号	名称	单位	数量
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			