

ICS 13.020

CCS Z06

# 团 体 标 准

T/CQSES 32-2025

## 长江上游重点流域水环境地基遥感数据 在线监测技术规范

Technical specifications for online monitoring based on ground-based  
spectral remote sensing of water environment in major water valleys  
of the upper Yangtze River

2025-09-03 发布

2025-12-03 实施

重庆市环境科学学会 发布



## 目 次

前 言 .....	II
1 适用范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
4 技术概述 .....	3
5 系统技术要求 .....	4
6 地基高光谱监测指标反演模型 .....	5
7 地基高光谱监测数据质量控制 .....	7
8 地基高光谱设备安装及运行维护 .....	8
9 数字孪生与数据展示 .....	10

## 前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

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专利的责任。

本文件由重庆市生态环境科学研究院提出，重庆市环境科学学会归口。

本文件起草单位：重庆市生态环境科学研究院、中国科学院重庆绿色智能技术研究院。

本文件主要起草人：封丽、封雷、廖伟伶、袁家虎、黄昌前、吴进、陈婷婷、姚源、余义昌、唐嘉、陈爱玲、胡戎豪、黄昱、汤冬云、许金坤、甘孟兰、王瑶。

本文件为首次发布。

# 长江上游重点流域水环境地基遥感数据在线监测技术规范

## 1 适用范围

本文件规定了长江上游重点流域水环境地基高光谱遥感数据在线监测系统技术要求、水环境指标反演模型、高光谱监测数据质量控制、设备安装及运行维护、数字孪生与数据展示等内容。

本文件适用于长江上游重点流域河流、湖泊、水库等水体的水环境地基高光谱遥感数据在线监测。

## 2 规范性引用文件

下列文件的内容通过文件的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件，不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 3838	地表水环境质量标准
GB 8978	污水综合排放标准
GB/T 43238	中国遥感卫星辐射校正场外场试验要求 通则
GB/T 11893	总磷水质自动分析仪技术要求
GB/T 11894	总氮水质自动分析仪技术要求
GB/T 31916.1	信息技术 云数据存储和管理 第1部分：总则
GB/T 36299	光学遥感辐射传输基本术语
GB/T 36540	水体可见光—短波红外光谱反射率测量
GB/T 40139	材料表面积的测量 光谱成像三维面积测量法
HJ/T98	浊度水质自动分析仪技术要求
HJ/T99	溶解氧（DO）水质自动分析仪技术要求
HJ/T100	高锰酸盐指数水质自动分析仪技术要求
HJ/T101	氨氮水质自动分析仪技术要求
HJ 897	水质叶绿素 a 的测定分光光度法
HJ 915	地表水自动监测技术规范（试行）
HJ 1098	水华遥感与地面监测评价技术规范（试行）

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**长江上游重点流域** key watersheds in the upper reaches of the Yangtze River

主要涉及长江巫峡以上的干流和主要支流。

#### 3.2

**地基遥感** ground-based remote sensing

通常指基于陆域开展的遥感观测活动，利用近地面光谱传感器设备，收集土壤、水体、植被等物体表征信息。

#### 3.3

**高光谱** hyperspectral

即高光谱分辨率，光谱分辨率达纳米（nm）数量级，光谱通道数达数十至数千个以上，获取物体反射/散射的连续光谱数据，波段可覆盖可见光、近红外、红外波段。

#### 3.4

**高光谱成像** hyperspectral imaging

将成像技术和光谱技术相结合，探测目标的二维空间和光谱信息，获得高分辨率的连续、窄波段的图像数据。

#### 3.5

**遥感反射率** reflectance

物体反射的辐射通量与入射的辐射通量之比。

#### 3.6

**可见光近红外波段** visible and near infrared waveband

波长在 380nm-3000nm 之间的电磁波范围。

## 3.7

**定量反演 quantitative inversion**

定量反演是一种利用统计或机理等数学模型和算法,将遥感观测数据转化为定量的地物或地表参数的过程。

## 3.8

**特征波段 characteristic band**

在光谱曲线中,与目标物质或环境参数(如水质参数)具有显著关联的特定波长范围。这些波段能够反映物质的特定吸收或反射特性,对特定目标参数的定量反演具有较高的敏感性。

**4 技术概述**

水环境地基高光谱遥感在线监测技术通过近岸光谱监测设备,采用高光谱传感器获取特定水体吸收、反射和散射光谱数据,利用特征波段识别与定量反演算法,实现水质参数的在线监测。系统包含数据采集、光谱处理、参数反演、质量控制等模块,满足多参数同步监测需求。

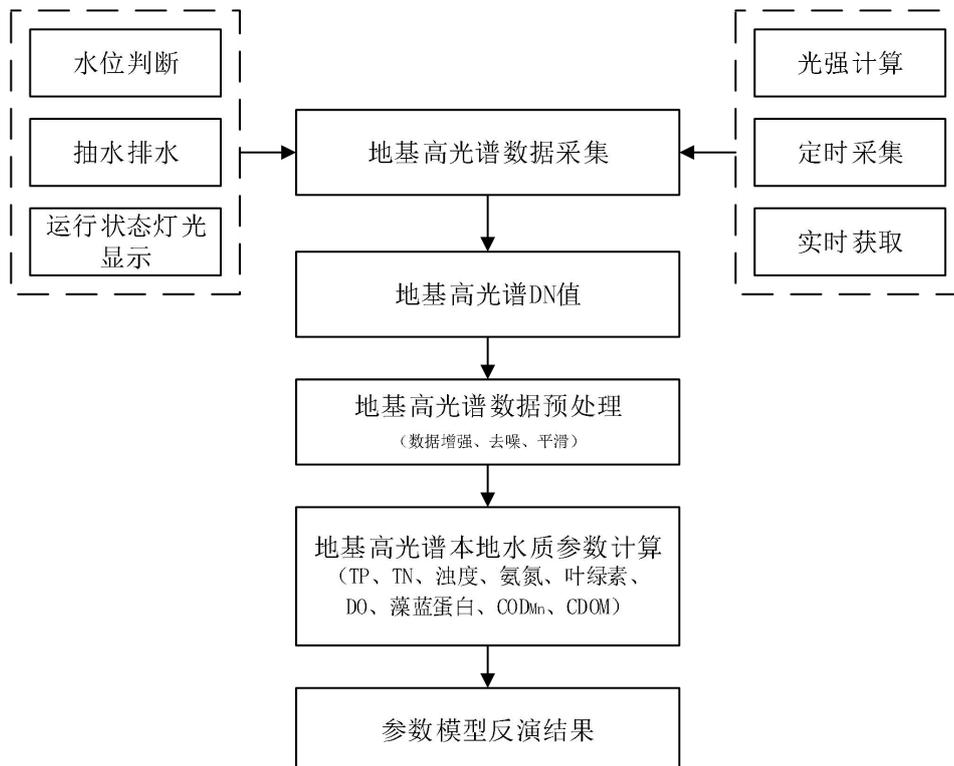


图1 主要技术路线图

## 5 系统技术要求

地基高光谱监测系统通过集成高光谱采集模块和自动化控制技术,实现对水体水质参数的在线监测。系统应该具备以下功能:

## (1) 主动式抽样及液位监测

地基高光谱水环境监测装备具备主动式抽样功能,实时监测设备内部液位,确保液位处于光谱传感模组的响应范围内。

## (2) 水体光谱反射率测量及处理

地基高光谱水环境监测装备采用光谱重构技术消除杂散光干扰,在 400-1000nm 波段范围内产生连续的光谱响应输出,确保优良的重复性、灵敏性和一致性。

## (3) 水质参数反演

地基高光谱水环境监测设备应当具备至少以下 9 种水质参数指标的反演功能并能够进行反演算法的自动更新迭代,水质参数指标与测量范围及精度要求详见表 1。

表 1 水质参数指标与测量范围及精度要求

序号	监测指标	测量范围	精度要求 (R2)
1	叶绿素 a(mg/L)	0-100	>0.8
2	溶解氧 (mg/L)	0-100	>0.7
3	有色可溶性有机物 (mg/L)	0-20	>0.8
4	总氮 (mg/L)	0-25	>0.7
5	浊度 (NTU)	0-300	>0.8
6	藻蓝蛋白 (mg/ml)	0-300	>0.8
7	高锰酸盐指数 (mg/L)	0-100	>0.7
8	总磷 (mg/L)	0-20	>0.7
9	氨氮 (mg/L)	0-50	>0.7

## (4) 地基高光谱光源

地基高光谱设备采用全光谱光源,光源参数要求详见表 2。

表 2 光源参数要求

序号	性能参数	参数值
1	波长范围	360-2400nm
2	标称灯泡功率	>5W
3	色温	1400-5600K
4	光输出漂移	<0.1%/h
5	光源输出稳定性	>0.25%

## (5) 高光谱传感器

高光谱传感器性能参数要求详见表 3。

表 3 高光谱传感器性能参数要求

序号	性能参数	参数值
1	波长范围	400-1000nm
2	波长重复性*1	$\leq \pm 0.5\text{nm}$
3	信噪比*2	$>100:1$
4	光谱分辨率	1-25nm
5	输出步长	$\geq 2\text{nm}$
6	线性度*3	$<5\%$
7	防水	不低于 IPX5
8	视场角	$<45^\circ$
9	信号漂移	$<0.5\text{nm}@0^\circ\text{C}$ $<1\text{nm}@40^\circ\text{C}$

## (6) 地基高光谱设备整体参数

地基高光谱设备参数性能指标要求见表 4。

表 4 地基高光谱设备参数性能指标要求

序号	性能参数	参数值
1	供电方式	市电、新能源、充电
2	联网方式	4G/5G/WIFI/TCP
3	常规采集频次	$\geq 1$ 小时/次
4	高频采集	$\geq 10$ 分钟/次

## 6 地基高光谱监测指标反演模型

### 6.1 水环境指标特征波段识别

通过分析水体反射率曲线与特定水质参数实测浓度的关系,可以找到水体反射率曲线上对水质参数响应明显的一个或多个特征波段,通过融合机器学习等模型,获取最优特征组合,以该特征组合同水质参数实测值进行拟合,最终将得到相关性较好的水质参数反演模型。

水环境指标叶绿素、溶解氧、有色可溶性有机物、总氮、浊度、藻蓝蛋白、高锰酸盐指数、总磷、氨氮特征波段参考如表 5 所示。

表 5 水环境指标光谱特征波段参考表

序号	水质指标	检测波段 (nm)	光谱特征	说明
1	叶绿素浓度	440、550、667、685	低浓度: 440nm 吸收峰; 550nm 反射峰, 685nm 荧光峰; 高浓度: 667nm 吸收峰	高浓度时叶绿素 667nm 吸收峰随浓度递增
2	溶解氧	490、665	无直接光谱特征	通过水温、叶绿素等间接反演, 选择与相关参数关联波段
3	有色可溶性有机物	520	短波波段 520nm 强烈吸收特征	无说明
4	总氮	700-1300; 一阶微分处理后: 680、700、750	近红外波段 (700-1300nm) 特征明显; 一阶微分后 680/700/750nm 相关性高	需微分处理增强特征, 近红外波段主分析区
5	浊度	580-680、850-870	580-680nm 反射峰对浊度敏感, 高浊度时近红外 (850-870nm) 双反射峰	无说明
6	藻蓝蛋白	278、360、618-620	278nm 蛋白质结构吸收峰; 360nm 四吡咯结构吸收峰; 620nm 发色团吸收峰	紫外-可见光区三特征峰
7	高锰酸盐指数	525	525nm 吸收峰	无说明
8	总磷	675	675nm 处吸收系数与浓度相关	无说明
9	氨氮	680、750	红绿光与短波红外敏感	无说明

## 6.2 反演模型构建

基于 6.1 节所阐述的特征波段, 利用统计学习、分类聚类、机器学习等方式, 对不同的水质参数特征波段重组, 实验对比并选择出与实测水质参数数据相关性最优的重组特征波段作为因变量, 构建出水质参数的反演模型。

## 6.3 实测数据比对和模型优化

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中:

$x_i$ —第  $i$  个样本的反演数据;

$\sigma$ —标准差。

将模型反演得到的水质参数数据与实测数据进行对比，利用标准差法剔除掉反演异常的数据，将反演正常的的数据与实测数据作为水质参数反演模型的输入，通过迭代进一步优化反演模型，其中样本数量不少于 100 个。

## 7 地基高光谱监测数据质量控制

### 7.1 地基高光谱仪器定标校准

高光谱设备的仪器定标校准是确保光谱成像数据准确性的重要步骤。这个过程涉及辐射定标和光谱定标。其中辐射定标是为了确保仪器接收到的辐射强度能够准确转换为数字输出。通常使用标准的光源（如卤素灯或太阳模拟器或全光谱 LED 灯）来校正仪器，以确保其输出与实际光照强度成正比，光谱定标是为了确保仪器对不同波长的响应是准确的。通常通过使用已知光谱特性的物质（如标准液）来完成。其定标校准结果需满足 400-1000nm 波长范围内，辐射定标准确度不低于  $\pm 5\%$ ，光谱定标结果需满足光谱分辨率不低于 5nm。

### 7.2 拟合曲线

采用决定系数 ( $R^2$ ) 对模型准确度进行评估。其表达式如下所示。

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中：

$x_i$ —第  $i$  个样本的反演数据；

$y_i$ —表示第  $i$  个样本实测数据；

$\bar{x}$ —反演的数据；

$\bar{y}$ —实测数据的平均值；

$N$ —总的样本个数。

在同一采样点连续 5 日上午下午各采集一次水样，以传统实验室测量方法（HJ/T98-2003、HJ/T99-2003、HJ/T100-2003、HJ/T101-2003、GB/T11894-1989、GB/T11893-1989、HJ897-2017）为标准对地基高光谱采集的水体光谱遥感反演数据的精度进行评价，评价指标为决定系数。其中各水质参数模型的决定系数应大于 0.7。

### 7.3 不准确度

将水质参数反演值与实测值比对，误差指标采用均方根误差 RMSE。叶绿素、有色可溶性有机物、浊度、藻蓝蛋白的误差应该低于 20%，其余指标的误差应该低于 30%，结果保留两位有效数字。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中：

$n$ —样本数；

$x_i$ —第  $i$  个样本的实测值；

$y_i$ —第  $i$  个样本的反演值。

#### 7.4 重复性与检出限

记录计算获得的水质参数反演值  $A_i$ ，重复 10 次，求其平均值，按公式（5）计算标准偏差（ $S$ ）。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (A_i - \bar{A})^2}{9}} \quad (5)$$

重复性以相对标准偏差表示，按公式（6）计算。

$$C_V = \frac{S}{\bar{A}} \times 100\% \quad (6)$$

检出限 D.L 按公式（7）计算：

$$D.L = K S_b / a \quad (7)$$

式中：

$S_b$ —空白多次测得水质参数反演值的标准偏差；

$K$ —根据一定置信水平确定的系数。基本需达到置信水平保持 90%以上。

#### 7.5 数据稳定性

数据可用性：各光谱数据获取率达到 90%以上，数据丢包率小于 99%；

数据质控合格率（%）=（质控合格总小时数/有效运行总小时数）\*100%；

质控合格率：传输到数据的光谱监测数据，有效数据（异常数据，如小于 0 的数据或者大于 9999 的数据）数据质控合格率达到 85%（以小时值计）以上；

有效运行总小时数=运行总时数-无效数据时数。

## 8 地基高光谱设备安装及运行维护

### 8.1 基础安装条件

基础：应选择地质条件稳定、视野开阔无遮挡、电磁干扰较少的水边位置。

供电：地基高光谱遥感系统建设选址应充分考虑供电保障，避免因供电模块中断影响设备正常运行。供电可采用外接市电，市电接入电压 220V，频率 50Hz。

网络：应至少保证北斗、GSM、GPRS、5G/4G 等一种无线通信网络覆盖或采用有线通信网络，确保数据传输顺畅。

防雷：根据地区防雷要求安装避雷针和埋设地网，接地阻值应不大于 4 欧姆，接地装置应当符合 DL/T5161.6-2018 的要求。

架设位置：高光谱遥感系统架设位置应接近监测水体，设备距地面高度不低于 30cm，防止环境积水对设备底部进行侵蚀。

抽水装置：进水端一般加装杂质异物过滤装置，防止设备抽入直径较大异物和颗粒堵塞水泵。采用一用一备抽水装置。

## 8.2 岸基式安装

岸基式高光谱水环境监测装备所采用的光源为全光谱稳压卤钨灯光源或 LED 光源，光谱传感器模组与水面倾斜  $45^\circ$ ，使其接收到光源下方水的大部分漫反射信号，最大程度的提高有效信息含量，减少无关信息干扰，其中光源和光谱传感器模组的位置距设备内壁各 5mm，如图 2。

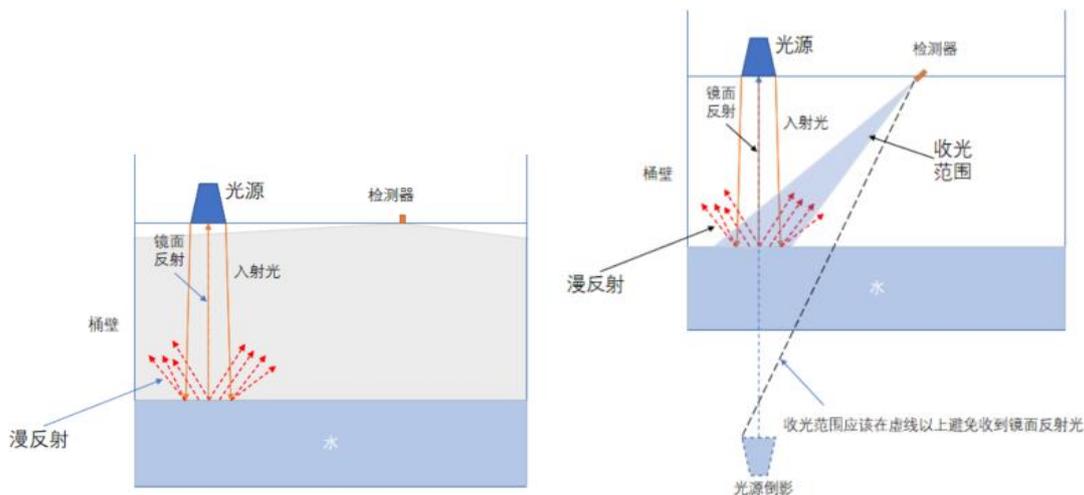


图 2 光谱模组放置示意图

设备本身具备 IPX6 防水等级，但考虑到设备的稳定运行和后期维护，在架设设备时应当将设备架设在室内，通过延长软硬管实现水样的采集。

- (1) 设备利用液体自身重力排水，因此排水管整体高度不能高于设备底部。

(2) 软管管路套接的地方一律采用带有密封节的管件进行套接；软管管路与硬管相接的地方需用细铁丝扎紧或用金属箍夹住。

(3) 架设设备距地面 30cm，防止设备环境积水对设备底部进行侵蚀。

(4) 对进水端进行杂质异物过滤装配，防止设备抽入直径较大异物和颗粒堵塞抽水泵。

(5) 在通电前检查内部电子器件是否有潮湿、电线接触点是否有生锈，检测接地电阻值，其值应不大于 4 欧，接地装置应当符合 JGJ 46 的要求。

(6) 保证环境温度  $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度保持在 80%RH 以下。

### 8.3 系统运维要求

**校准：**地基高光谱校准周期为至少半年一次，校准应选择目标水域水质相对稳定的时段，根据有资质的第三方检测公司提供的监测数据来进行地基高光谱数据反演算法优化，并做好校准记录。

**巡检：**每周至少巡视站点 1 次，并做好巡查记录，巡检时根据站点所在地的自然环境、气象条件、空气质量、交通状况等完成如下工作内容。

(1) 查看站点设备是否齐备，无丢失和损坏；检查接地线路是否可靠，进排水工作是否正常，设备内是否有漏水情况。

(2) 检查进水和排水管是否有堵塞现象，监测仪器采样流量是否正常。

(3) 检查各监测仪器的运行状况和工作参数，判断是否正常，如有异常情况及时处理，保证仪器运行正常。

(4) 湿度较大地区，可能会对内部电路器件造成腐蚀，检查内部电子器件是否有潮湿和电线接触点是否有生锈，保障设备正常工作。

(5) 检查电路系统和通讯系统，保证系统供电正常，电压稳定。

(6) 检查站点的通讯系统，保证站点与远程监控平台的连接正常，数据传输正常。

(7) 被测水源水质较差的情况下，及时更换内部水管。

(8) 检查主动光源是否有亮度骤减的情况，应及时更换主动光源。

## 9 数字孪生与数据展示

**可视化展示：**利用数字孪生工具和技术、结合地基高光谱数据进行可视化展示。矩形化地基高光谱数据，并将其映射到有地形特征参数的三维可视化图中。

**动态预测：**基于高光谱反演算法和数字孪生模型，实时预测地基高光谱水质反演状态，并生成动态

结果展示。

**数字孪生平台：**将高光谱数据采集、反演、显示与数字孪生方法整合到一个统一的数字孪生平台中。包括光谱传感器、模型反演算法、可视化工具和交互界面。