

团 体 标 准

T/ACEF □□□—20□□

陆基高光谱遥感水质多参数监测技术指南

Technical guide for water quality monitoring based on Ground-based spectral remote
sensing

（征求意见稿）

20□□-□□-□□发布

20□□-□□-□□实施

目 录

前 言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语和符号	2
5 方法概述	3
6 监测系统	3
7 监测指标	7
8 数据分析	8
9 质量保证与质量控制	9
10 结果展示	12

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。

本文件由中华环保联合会提出并归口。

本文件主编单位：

本文件参编单位：

本文件主要起草人：…、…、…。

陆基高光谱遥感水质多参数监测技术指南

1 范围

本文件规定了陆基高光谱遥感水质多参数监测系统建设要求、监测方法、数据分析要求、质量控制要求等内容。

本文件适用于在河流、湖泊、水库等水体开展地基高光谱遥感水质监测。

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/T 43238 中国遥感卫星辐射校正场外场试验要求 通则

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

GB/T 31916.1 信息技术 云数据存储和管理 第1部分：总则

GB 3838 地表水环境质量标准

GB 8978 水污染物排放标准

GB/T 11894 总氮水质自动分析仪技术要求

GB/T 11893 总磷水质自动分析仪技术要求

HJ 1098 水华遥感与地面监测评价技术规范（试行）

HJ 897 水质叶绿素 a 的测定分光光度法

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

DL/T 5161.6 接地装置施工质量检验

DB3401/T 291 巢湖流域水环境保护区土地利用高分遥感监测技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 陆基遥感 (Ground-based remote sensing)

陆基遥感指基于陆地遥感设备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。

3.2 高光谱 (Hyperspectral)

高光谱是指在可见光和近红外光谱范围内获取大量连续光谱信息的技术，其采集的数据包含了几百个至数千个窄带光谱波段，且各光谱通道间往往是连续的，光谱分辨率可以达到纳米量级，可获取物体的详细光谱特征。

3.3 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。

[来源: GB/T 36299]

3.4 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

[来源: GB/T 43238]

3.5 定量反演

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。

4 缩略语和符号

4.1 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

Chla: 叶绿素 (Chlorophyll a)

PC: 藻蓝蛋白 (Phycocyanin)

CDOM: 有色可溶性有机物 (Colored dissolved organic matter)

TN: 总氮 (Total nitrogen)

TP: 总磷 (Total phosphorus)

NH₃-N: 氨氮 (Ammonia nitrogen)

CODMn: 高锰酸盐指数 (Permanganate index)

Turbidity: 浊度 (Turbidity)

DO: 溶解氧 (Dissolved oxygen)

PID: 控制算法 (proportional-integral-derivative)

MCU: 微控单元 (Microcontroller Unit MCU)

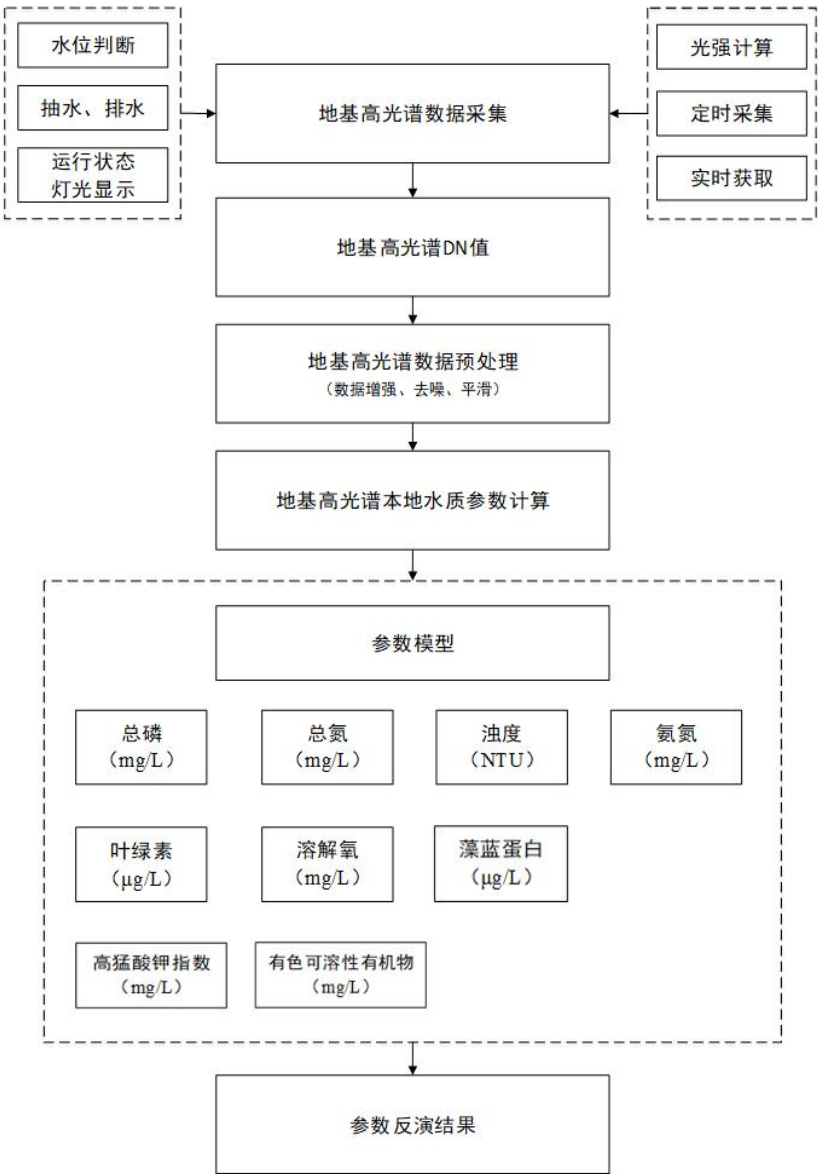
4.2 符号

DMIPS：用于衡量整数计算能力指标

CoreMark：衡量嵌入式系统中心处理单元

5 方法概述

陆基高光谱遥感技术通过抽取水样至监测系统，利用高光谱传感器获取水体的吸收、反射和散射光谱，捕捉光谱反射率曲线上的特征波段，构建特定水质参数的反演算法，从而实现水体特定水质参数的定量估算。



6 监测系统

6.1 系统组成

包括供电模块、中心控制模块、数据传输模块、远程控制模块、数据采集模块、人工

光源、其他附属设施等。

6.1.1 供电模块

供电模块采用 150W 以上电源供应器，可提供多电压输出。备用电源应采用蓄电池供电，在无外接电源情况下，保证设备正常运行 48 小时。

6.1.2 中心控制模块

中心控制模块采用微控制器内置程序，完成对外接设备的控制。

6.1.3 数据传输模块

数据传输模块主要采用 DTU (Data Transfer Unit)，该模块连接中心控制模块，在中心控制模块的控制下将采集到的数据传输至云平台或远程服务器。

6.1.4 远程控制模块

远程控制模块通过连接中心控制模块，实现设备的远程断电重启、程序指令重载以及中心缓存刷新等功能。

6.1.6 数据采集模块

数据采集模块主要通过光谱传感器，对设备内部水样的光谱进行采集。通过设置可以取到不同光谱分辨率的水体光谱曲线，在中心控制模块的控制下可多次采样。

6.1.7 人工光源

所采用的光源需为全光谱稳压卤钨灯光源或者全光谱 LED 光源。

6.1.8 其他附属设施

根据安装模式的不同，系统还可能配置防雷设施、抽换水模块、保护罩、设备平台支架等。

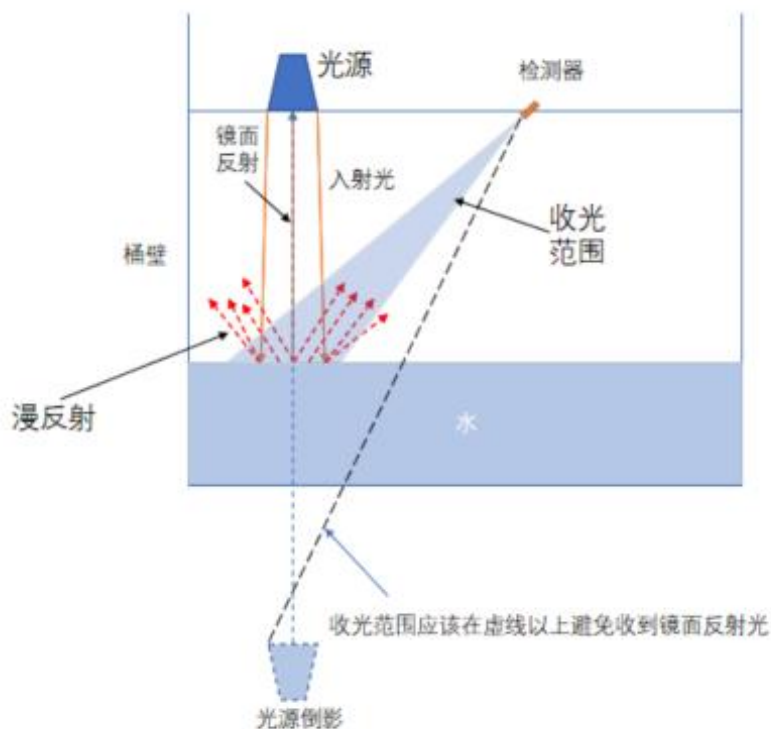


图 6.1 设备内部架设示意图

6.2 选址安装

6.2.1 基础安装条件

供电：地基光谱遥感系统建设选址应充分考虑供电保障，避免因供电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，在外部供电中断情况下可采用备用电源供电。

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/T 5161.6-2018 的要求。

系统安装位置：高光谱遥感系统安装位置应接近监测水体，设备距地面高度应不低于 50cm，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配，防止设备抽入直径较大异物和颗粒堵塞抽水泵。抽水装置应当一用一备，在其状态异常时使用备用抽水装置。

6.2.2 水体采集

(1) 在泥沙较大监测点，应设置自清洁沉降池，定期自清洗、排沙，在保证水样代表

性的前提下，达到自然沉降的效果。

(2) 采用水洗和气洗方式定期对采水管路进行清洗，去除附着藻类和泥沙等。

(3) 不同监测指标的预处理方式

a) 常规水质监测数据无需预处理，一般采用现场原位监测。当监测点受水流影响较大时，可设置静水保护装置。

b) 对于天然水体一般无需对水样进行预处理，在进水端可以设置粗滤网。

c) 油类、有机物等监测指标根据在线监测仪器的要求和监测需要选用合适的进水方式。

6.3 主要设备选型

6.3.1 光源

表 6.1 全光谱灯光源参数要求

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%

6.3.2 高光谱传感器：

表 6.2 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	≤±0.5nm
3	信噪比*2	>100:1
4	光谱分辨率	1-25nm
5	输出步长	2nm
6	线性度*3	<5%
7	防水	不低于 IPX5
8	视场角	<45°
9	信号漂移	<0.5nm@0℃

		<1nm@40℃
--	--	----------

6.4 数据通讯要求

网络通信控制模块需要包含输入/输出采集和控制，点位联动，点位读写，数据透传（数据透明传输，数据内容在传输过程中不会改变），数据传输和数据加密等多种核心功能。一般需要支持网口和 4G/5G 网络通信，支持 modbusRTU/TCP/UDP/MQTT(S) 等数据通信协议。

6.5 系统运维要求

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

- （1）查看设备所在地设备是否齐备，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）检查设备通讯系统，保证设备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，如有该情况发生则更换主动光源。

7 监测指标

表 7.1 水质参数指标及测量范围

序号	监测指标	测量范围	反演精度（R ² ）
1	叶绿素(μg/L)	0-300	>0.8
2	溶解氧(mg/L)	0-100	>0.7
3	有色可溶性有机物(ppb)	0-400	>0.8
4	总氮(mg/L)	0-10	>0.7
5	浊度(NTU)	0-1000	>0.8
6	藻蓝蛋白(μg/L)	0-100	>0.8

7	高锰酸盐指数(mg/L)	0-100	>0.7
8	总磷(mg/L)	0-100	>0.7
9	氨氮(mg/L)	0-100	>0.7

8 数据分析

8.1 反射率曲线获取

水体的光谱反射率定义为离水辐亮度与水面总辐照度的比值，公式如下。

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d(0^+)}$$

式中， L_w 为离水辐亮度， $E_d(0^+)$ 为水面上总的入射辐照度，可通过测定固定光源的光强计算得到。为了减小数据产生的偶然误差，每次采集时一般采集不低于 10 次连续水体反射率光谱曲线，通过对多次曲线取均值处理，得到均值化的水面反射率光谱曲线。

8.2 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，最终得到相关性较好的水质参数反演模型。各水质参数的特征吸收波段可参考下表选取：

表 8.1 水质参数指标特征波段参考表

叶绿素	对于低叶绿素浓度的水体，水面反射率光谱在 440nm 附近存在吸收峰；在 550nm 附近存在反射峰；在 685nm 附近有明显的荧光峰。 对于高叶绿素浓度水体，在 667nm 会形成吸收峰，并且吸收峰深度随叶绿素浓度的增加而递增。
溶解氧	溶解氧本身不产生特定的电磁波信号，其反演是利用水温、叶绿素含量等参数与溶解氧含量的相关性，间接反演得到水体中的溶解氧含量。一般选取 490nm 和 665nm 附近波段进行监测。
有色可溶性有机物	有色可溶性有机物具有强烈的短波波段吸收特性，光谱曲线上在蓝色 520nm 的短波波段范围内会表现出明显的光谱特征。
总氮	总氮的光谱特征出现在近红外波段，特别是 700nm 至 1300nm 的范围内，总氮的光谱特征较为明显。此外经过一阶微分处理后的光谱曲线，总氮的含量在 680nm、700nm 和 750nm 附近均呈现较好的相关性。
浊度	580-680nm 的反射峰值对浊度变化最敏感，高浊水体的水面反射率光谱

	一般存在红光和近红外波段（850-870nm）两个反射峰。
藻蓝蛋白	藻蓝蛋白在 200 至 700nm 范围内有三个特征吸收峰，分别为 278nm、360nm 和 618-620nm。其中，峰 278nm 处反映其蛋白质部分的结构变化，峰 360nm 处为其四吡咯结构吸收部位，而 620nm 附近的特征吸收峰则是由发色团部分共轭体系的强烈光吸收引起。
高锰酸盐指数	高锰酸盐在紫外-可见光谱范围内有一个明显的吸收峰，波长约为 525nm。
总磷	总磷在 675nm 附近吸收系数与总磷的相关性较好。
氨氮	氨氮敏感波长集中在红绿光与红外短波处，可以取相关性较好的 680nm 和 750nm 作为特征波段。

8.3 反演模型构建

基于 8.2 节所阐述的特征波段，不同的水质参数通过对特征波段的重组，可充分利用统计学习、分类聚类、机器学习等方式，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。

8.4 实测数据比对和模型优化

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

式中， x_i 表示第 i 个样本的反演数据。 σ 表示标准差

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。

9 质量保证与质量控制

9.1 仪器定标校准

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。应使用标准的光源（如卤素灯或太阳模拟器）来校正仪器，以确保其输出与实际光照强度成正比，400nm 至 1000nm 波长范围内，辐射定标准确度（或称绝对精度，包含系统误差和随机误差）应不低于 ±5%；光谱定标是为了确保仪器对不同波长的响应是准确的。应使用已

知光谱特性的物质（如标准液）来完成，400nm 至 1000nm 波长范围内，光谱分辨率应优于 5nm。

定期进行设备校准，以确保数据的准确性和一致性。定期清洁镜头、光谱部分和其他光学组件，以避免尘埃或污垢影响数据质量。定期备份获取的数据，确保在设备故障或数据丢失情况下可以恢复。使用有效的数据管理系统来组织、存储和检索高光谱数据，以便进行后续分析。

9.2 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。

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

式中， x_i 和 y_i 分别表示第 i 个样本的反演数据和实测数据； $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示反演的数据和实测数据的平均值； N 表示总的样本个数。

在同一采样点连续 15 日上午下午各采集一次水样，以传统实验室测量方法（GB/T 11894、GB/T 11893、HJ/T98、HJ/T99、HJ/T100、HJ/T101、HJ 897）为标准对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 0.75。

9.3 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、总氮、总磷、氨氮和高锰酸盐指数的误差应该低于 15%，其余指标的误差应该低于 20%，结果保留二位有效数字。

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

式中， n 是样本数、 x_i 表示第 i 个样本的实测值、 y_i 表示第 i 个样本的反演值。

9.3 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 $\bar{A}$ ，按公式（x1）计算标准偏差（S）。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (A_i - \bar{A})^2}{9}} \dots\dots\dots (X1)$$

重复性以相对标准偏差 C_V 表示，按公式（X2）计算。

$$C_V = \frac{S}{\bar{A}} \times 100\% \dots\dots\dots (X2)$$

检出限 D.L 按公式（X3）计算：

$$D.L = K S_b / a \dots\dots\dots (X3)$$

式中：

S_b 一空白多次测得水质参数反演值的标准偏差；

K 一 根据一定置信水平确定的系数。为达到置信水平保持 90% 以上， K 应当取值为 3。

9.4 运行稳定性

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%；

表 9.1 质量保证与质量控制

	评估方法	结论
辐射定标	使用标准的光源校正仪器	400nm 至 1000nm 波长范围内,辐射定标准确度应不低于±5%
光谱定标	标准液	400nm 至 1000nm 波长范围内,光谱分辨率应优于 5nm
拟合曲线	$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$	各水质参数模型的反演精度 R ² 不低于 0.7
重复性	$C_V = \frac{S}{\bar{A}} \times 100\%$	重复性优于 99%
检出限	$D.L = K S_b / a$	

10 结果展示

10.1 一般要求

监测结果表示应至少包含现场水环境监测、监测记录表、反演模型及参数、分析与结论。如果管理部门有其他要求的，应按照相关要求编写并提交报告。

10.2 分析与结论

应同时给出反演结果和误差范围，确定计算的水质指标浓度显著超过标准值时，可进行预测预警。

附录

高光谱水质分析仪曜光 YG-01 参加了长江流域水质监测中心为期十二天的比测工作。下表为监测结果：

监测单位：长江中游水环境监测中心					监测日期：2023.11 月					
日期	采样点位/仪器厂商名称	采样时间	pH 值（无量纲）	溶解氧（mg/L）	高锰酸盐指数（mg/L）	总磷（mg/L）	总氮（mg/L）	氨氮（mg/L）	浊度（NTU）	叶绿素（μg/L）
7 日	实验室①号位	8:56	8.00	9.53	1.9	0.09	1.48	<0.020	28.79	4.58
	实验室②号位	9:02	7.94	9.47	1.9	0.09	1.47	<0.020	27.71	5.09
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	8:21	7.829	9.55	2.8	0.101	1.618	0.028	40.115	4.888
8 日	实验室①号位	8:56	8.00	9.53	1.9	0.09	1.48	<0.020	28.79	4.58
	实验室②号位	9:02	7.94	9.47	1.9	0.09	1.47	<0.020	27.71	5.09
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	9:21	7.278	9.519	2.9	0.117	1.602	0.029	37.65	4.204
9 日	实验室①号位	8:33	7.98	9.62	2.7	0.09	1.45	<0.020	31.86	3.45
	实验室②号位	8:38	7.92	9.54	2.8	0.09	1.47	<0.020	32.28	3.05
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	8:21	7.872	9.553	2.9	0.121	1.574	0.03	39.031	4.463
10 日	实验室①号位	8:50	7.98	9.60	2.7	0.08	1.54	0.056	32.75	4.18

	实验室②号位	8:38	7.93	9.53	2.7	0.08	1.53	0.057	32.74	3.79
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	8:21	7.842	9.546	2.7	0.124	1.607	0.03	46.125	4.541
13 日	实验室①号位	8:45	7.99	10.28	2.7	0.10	1.64	0.095	38.3	6.05
	实验室②号位	8:50	7.94	10.14	2.8	0.10	1.67	0.098	35.7	5.71
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	9:21	7.852	9.569	2.7	0.123	1.576	0.031	43.872	4.552
14 日	实验室①号位	8:45	8.00	10.47	2.6	0.10	1.63	0.044	36.13	5.26
	实验室②号位	9:05	7.97	10.45	2.9	0.10	1.63	0.041	37.58	5.29
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	9:21	7.801	9.567	2.7	0.113	1.579	0.027	38.040	4.439
15 日	实验室①号位	8:58	7.97	10.67	2.5	0.09	1.53	<0.020	28.22	4.53
	实验室②号位	9:03	7.96	10.65	2.6	0.09	1.61	<0.020	32.76	4.84
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	9:21	7.784	9.528	2.8	0.115	1.527	0.035	38.613	4.429
16 日	实验室①号位	8:28	8.02	10.84	2.6	0.10	1.55	0.024	30.05	3.05
	实验室②号位	8:33	7.98	10.80	2.6	0.09	1.56	0.024	30.31	3.20
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	8:21	7.854	9.554	2.7	0.117	1.653	0.035	39.452	4.581
17 日	实验室①号位	8:51	8.06	10.89	2.7	0.10	1.61	0.038	29	3.40

	实验室②号位	8:53	7.99	10.82	2.4	0.10	1.60	0.036	32.73	3.39
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	8:21	7.896	9.534	2.9	0.106	1.642	0.026	41.000	4.612
20 日	实验室①号位	8:51	7.95	10.71	2.9	0.11	1.57	0.027	34.59	6.79
	实验室②号位	8:53	7.93	10.73	3.0	0.10	1.54	0.030	33.78	6.84
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	9:21	7.853	9.567	2.8	0.11	1.634	0.032	37.824	4.445
21 日	实验室①号位	8:52	8.02	10.65	2.9	0.10	1.62	0.073	35.60	7.53
	实验室②号位	8:53	7.97	10.60	3.1	0.10	1.66	0.065	34.68	7.90
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	8:21	7.853	9.609	2.9	0.126	1.596	0.031	40.513	4.479
22 日	实验室①号位	8:50	7.99	10.58	2.7	0.10	1.55	0.037	35.23	6.84
	实验室②号位	8:54	7.96	10.59	2.8	0.09	1.51	<0.020	37.00	6.82
	中科曜光（重庆）智能科技有限公司	9:21	7.879	9.565	2.8	0.101	1.585	0.029	37.694	4.427