

**生态地质环境调查
航空高光谱遥感技术规程**

Technical specifications of airborne hyperspectral remote sensing for ecological and geological environment survey

2021 - 11 - 04 发布

2021 - 12 - 04 实施

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 技术流程 2

5 准备工作 2

 5.1 资料准备 2

 5.2 空域使用申请 2

 5.3 设备准备 3

 5.4 野外踏勘 3

 5.5 飞行基本参数确定 4

 5.6 研究区航线设计 4

6 数据采集 5

 6.1 导航准备 5

 6.2 仪器设备安装与检查 5

 6.3 基站布设 5

 6.4 飞行测量 5

 6.5 地面基站数据获取 6

 6.6 地面定标光谱测量 6

 6.7 地物光谱测量 6

 6.8 其他数据采集 6

 6.9 原始数据质量检查 6

7 数据预处理 7

 7.1 辐射定标 7

 7.2 大气校正 7

 7.3 几何校正 7

 7.4 条带拼接处理 7

 7.5 预处理质量检查 7

8 数据解译 7

 8.1 影像分类 8

 8.2 信息提取 8

9 专题图制作 10

10 报告编制 10

附录 A（规范性） 飞行主要技术参数表 11

附录 B（规范性） 飞行测量记录表 12

附录 C（规范性）	地面作业记录表	14
附录 D（资料性）	航带原始数据信噪比	15
附录 E（资料性）	地物分类表	16
附录 F（资料性）	采样方法	18
附录 G（资料性）	样本容量计算方法	19
附录 H（资料性）	混淆矩阵与精度指标	20

前 言

本文件按照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》的规定起草。

本文件由江苏省自然资源厅提出并归口。

本文件起草单位：江苏省地质勘查技术院、中国地质调查局南京地调中心、江苏省地质学会、江苏苏海信息科技（集团）有限公司、江苏三深光谱感知技术研究院。

本文件主要起草人：刘建东、石剑龙、修连存、徐明钻、罗传根、赵国凤、黄岩、梁森、罗丁、钱冬冬、陈浩峰、方彦奇、郑志忠、姜月华、周权平、徐祖阳、梁胜跃、李季。

生态地质环境调查航空高光谱遥感技术规程

1 范围

本文件确立了生态地质环境调查过程中应用航空高光谱遥感的工作流程,规定准备工作、数据采集、数据预处理、数据解译、质量控制、资料整理与成果编制的要求。

本文件适用于以航空飞行器为搭载平台的航空高光谱遥感生态地质环境调查。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中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 15661-2008 1:5000 1:10000 1:25000 1:50000 1:100000地形图航空摄影规范

GB/T 27919-2011 IMU/GPS 辅助航空摄影技术规范

DD 2011-02 遥感解译地质图制作规范(1:250000)

DD 2011-03 遥感地质解译方法指南(1:50000、1:250000)

DD 2014-13 岩矿波谱测试技术规程

DD 2014-14 机载成像高光谱遥感数据获取技术规程

TD/T 1055-2019 第三次全国国土调查技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

生态地质环境调查 ecological and geological environment survey

综合生态环境调查和地质环境调查的任务及内容,从人类生产生活和社会经济发展的视角对地质环境及其生态属性、功能进行调查和评价,主要包括地表基质层、土壤、植被、水体等关键要素的分布、属性、状态、功能。

3.2

高光谱遥感 hyperspectral remote sensing

光谱分辨率达到 $10^{-2} \lambda$ 量级以上,可获取地物连续且完整的光谱数据的遥感技术。

3.3

航空高光谱遥感 airborne hyperspectral remote sensing

以航空飞行器为平台的高光谱影像及相关数据获取、处理及应用的遥感技术。

3.4

视场角 field of view

在光学仪器中,以光学仪器的镜头为顶点,以被测目标的物像可通过镜头的最大范围的两条边缘构成的夹角。

3.5

瞬时视场 instantaneous field of view

仪器的光敏探测单元投影所张的立体角。

3.6

信噪比 **signal-to-noise ratio**
信号与噪声的功率谱之比。

3.7

反射率 **reflectance**
物体反射的辐射能量占总辐射能量的百分比。

3.8

端元 **endmember**
影像上只包含一种地物信息的最小单元。

4 技术流程

生态地质环境航空高光遥感技术流程包括准备工作、数据采集、数据预处理、数据解译、报告编制及专题图制作，技术流程见图1。

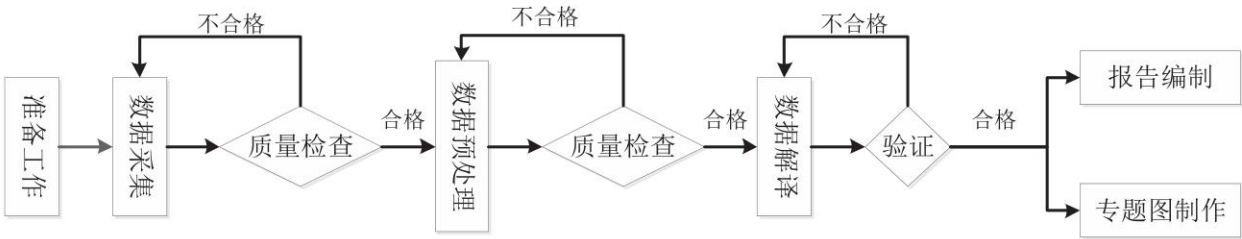


图1 生态地质环境航空高光遥感技术流程图

5 准备工作

5.1 资料准备

应根据专题研究需要收集资料，主要包括：

- a) 地质资料，包括区域地质、矿产地质、水文地质、工程地质、环境地质、地球物理、地球化学、遥感地质、地物波谱特征等基础地质资料；
- b) 地形地貌资料，包括地形图、数字高程模型等资料；
- c) 土壤、植被资料，包括土壤、植被的调查研究资料；
- d) 水文气象资料，包括气象站和水文系统多年统计资料；
- e) 经济社会发展资料，包括行政区划、社会经济、国土空间规划、土地利用及重大工程现状等。

5.2 空域使用申请

根据工作任务和航线参数计算的结果，依法向空域管理部门申请空域使用。

5.3 设备准备

5.3.1 成像光谱仪

航空成像光谱仪的性能应满足以下要求：

- a) 谱段范围为可见光-短波红外, 波长 400 nm~2500 nm;
- b) 可见光-近红外范围(400 nm~1000 nm)光谱分辨率优于 5 nm; 短波红外范围(1000 nm ~2500 nm) 光谱分辨率优于 15 nm;
- c) 瞬时视场优于 3 mrad;
- d) 成像光谱仪性能稳定, 工作前应经过波长定标和辐射定标, 按 DD 2014-14 中附录 A 进行定标。

5.3.2 地物波谱仪

地物波谱仪的性能应满足以下要求:

- a) 谱段范围为可见光-短波红外, 波长 400 nm~2500 nm;
- b) 可见光范围光谱分辨率优于 3 nm; 短波红外范围光谱分辨率优于 7 nm;
- c) 光谱采集视场角为 $1^{\circ} \sim 25^{\circ}$;
- d) 地物波谱仪性能稳定, 配带标准白板和黑板。

5.3.3 航空飞行器

航空飞行器应符合以下要求:

- a) 根据实际情况选择无人机、有人驾驶直升飞机、有人驾驶固定翼飞机等飞行器;
- b) 飞行器应有足够的载荷能力与空间范围, 满足安装成像光谱仪及相关设备的要求;
- c) 保证卫星导航定位信号接收正常;
- d) 飞行器的飞行速度、高度应满足数据采集技术要求;
- e) 选择密封舱飞行器或者密闭吊舱时, 镜头窗口加装光学玻璃的光学参数应满足成像光谱仪数据采集要求。数据采集前, 光学玻璃与仪器一起进行室内定标。

5.3.4 空间定位与姿态测量设备

空间定位和姿态测量设备应符合以下要求:

- a) 与航空成像光谱仪配套, 设备应符合 GB/T 27919-2011 中 4.1.2.2 的规定;
- b) 如需要对卫星导航定位系统数据进行差分计算, 应具备地面卫星导航定位系统基站设备或者开通卫星导航定位实时差分服务。

5.4 野外踏勘

5.4.1 野外踏勘应开展以下工作:

- a) 了解研究区的地形地貌、地质特征、地表环境等情况, 基本掌握研究区各项生态地质环境因子的分布现状和规律;
- b) 野外踏勘的路线应贯穿主要生态地质环境因子类型, 必要时采集典型样本;
- c) 应选定基站架设地和飞行器起降场地, 初步确定同步观测点;
- d) 查实研究区是否在禁飞区范围内。

5.4.2 基站架设地应符合 GB/T 27919-2011 中 5.3.1 和 5.3.2 的规定。

5.4.3 航空飞行器起降场地应远离高压线、住宅楼等, 周围视野开阔且无高塔、高楼、大树等阻挡物。

5.5 飞行基本参数确定

5.5.1 空间分辨率

空间分辨率根据研究目标大小和地形特点依据表1确定, 应满足遥感制图比例尺要求和数据精度。

表1 空间分辨率一览表

比例尺	空间分辨率/m
1:2000	≤0.2
1:5000	≤0.5
1:10000	≤1.0
1:25000	≤2.5
1:50000	≤5.0

5.5.2 飞行高度

飞行高度（相对航高、绝对航高）根据5.5.1所确定的空间分辨率和成像光谱仪的瞬时视场确定，按照附录A中的公式计算。

5.5.3 飞行速度

最大飞行速度（地速）根据空间分辨率和成像光谱仪的扫描速率确定，按附录A中的公式计算。

5.6 研究区航线设计

5.6.1 研究区分区

5.6.1.1 研究区分区应符合以下原则：

- a) 符合 GB/T 15661-2008 中 3.2.3 的要求；
- b) 分区内的地形高差一般不大于 1/4 相对航高（以分区的平均高度平面为基准面的航高）；当制图比例尺大于 1:5000 时，分区内的地形高差不得大于 1/6 相对航高。

5.6.1.2 根据研究区分区原则，在设计底图上将研究区划分为若干个分区，并按从左到右、自上而下的顺序进行编号。

5.6.2 航线敷设参数

5.6.2.1 航线敷设应符合以下原则：

- a) 综合考虑地质地貌条件、工作效率、气象条件和具体工作需要等因素确定航线，一般沿研究区长轴方向敷设；
- b) 航线敷设时，航带旁向重叠率一般为 20%~50%，不同地形条件依据表 2 确定；

表2 不同地形类型的航带旁向重叠率要求

地形类型	航带旁向重叠率
平原	20%~30%
丘陵	25%~35%
山地	30%~50%

c) 位于研究区边缘的首末航线应设计在研究区边界线上或边界线外。

5.6.2.2 航线参数主要包括：分区面积、航带条数、航带长度、分区平均高程、分区最大高差、各分区的绝对航高、航带幅宽、航带间隔，以及每条航线起始点、进入点、飞出点和终止点的坐标。

6 数据采集

6.1 导航准备

根据航线计算结果,在导航设备录入各条航线的起点终点坐标,并与飞行员或领航员进行充分沟通,保证导航数据正确有效。

6.2 仪器设备安装与检查

仪器设备的安装和检查应按照以下要求执行:

- a) 电源可持续稳定供电,电流、电压正常;
- b) 所有系统部件安装正确,安装过程严格按照设备使用手册进行;
- c) 传感器镜头不能遮挡,电缆连接正确;
- d) 完成安装后,进行仪器设备的运行测试和检查,仪器设备运行、数据记录和存储正常;
- e) 起飞前检查传感器及其它设备状态,确保仪器设备正常工作。
- f) 检查完成后填写检查记录表,表格式样见附录 B 中表 B. 1。

6.3 基站布设

基站的布设和测量应符合GB/T 27919-2011中5.3.3和5.3.4的要求。

6.4 飞行测量

6.4.1 基本要求

飞行测量应符合以下要求:

- a) 数据采集设备每次拆卸安装,或设备各部件相对关系发生改变后,均应重新进行检校飞行;
- b) 在航线内航高变化不应超过相对航高的 5%,分区内实际航高不应超过设计航高的 5%;
- c) 飞行质量参数应符合表 3 的要求;
- d) 飞行环境条件应满足:
 - 1) 太阳高度角应大于 30°,飞行时间宜选择在当地时间 10:00-15:00 之间;
 - 2) 晴空,大气洁净,能见度大于 15 km。

表3 飞行质量参数要求

飞行参数	质量要求
航线弯曲度	≤3%
航线飞行俯仰角	≤3°
航线飞行横滚角	≤6°
飞行上升、下降的速率	≤10 m/s

6.4.2 机上数据采集

机上数据采集应符合以下要求:

- a) 每日作业任务开始前需填写飞行任务书,格式见附录 B 中表 B. 2,并由数据采集现场负责人向飞行员(领航员或操作员)详细说明当日飞行任务,双方签字确认;
- b) 飞机引擎启动后,接通电源,启动仪器设备,设备工作正常,技术参数设置正确;

- c) 数据采集过程中, 监控人员监测航迹、航高、航速, 同时监测气象条件(云量、能见度), 填写飞行记录表, 格式见附录 B 中表 B. 3;
- d) 飞行结束后, 机上定位设备在静止状态下收集至少 30 分钟的数据, 仪器关闭后及时备份数据。

6.5 地面基站数据获取

飞行前半小时应打开地面基站, 在卫星导航定位基站搜索卫星成功后(至少8颗卫星), 采用静态测量模式记录数据, 数据记录频率应高于1 Hz。飞行结束半小时后停止记录, 关闭地面基站, 导出基站数据并备份。

6.6 地面定标光谱测量

- 6.6.1 飞行测量过程中, 应采用地物波谱仪进行定标场或同步航线地面光谱测量。
- 6.6.2 明暗地物或黑白布辐射定标场的同步或准同步地面光谱测量, 测点应均匀分布于定标场, 每一定标场地光谱测量不少于 30 个测点。
- 6.6.3 同步或准同步航线地面光谱测量的采集路线应兼顾飞行路线条件与地面地物条件, 每条航线范围内至少一个地面光谱采集点, 每个采集点的纯净地物面积应不小于 3×3 像元。
- 6.6.4 地面光谱测量应符合 DD2014-13 中关于野外波谱测试的相关规定。
- 6.6.5 测量过程中应记录采集点位置、时间和对应的架次及航带。
- 6.6.6 地物采集避免房屋建筑、树木等遮挡, 同一地物采集光谱不少于 5 条。
- 6.6.7 采集同步地物光谱应填写《飞行同步地物波谱采集记录表》, 表格样式见附录 C 中表 C. 1。

6.7 地物光谱测量

- 6.7.1 应在航拍期间进行研究区内地物的光谱采集。
- 6.7.2 地面光谱测量应符合 DD 2014-03 中关于野外波谱测试的相关规定。
- 6.7.3 地物采集避免房屋建筑、树木等遮挡, 每个采集点的纯净地物面积应不小于 3×3 像元, 同一地物采集光谱不少于 3 条。
- 6.7.4 光谱测量时应进行坐标测量和现场拍照。
- 6.7.5 采集地物光谱应填写《地物光谱采集记录表》, 表格样式见附录 C 中表 C. 2。

6.8 其他数据采集

根据工作要求采集相应样品并获取样品数据, 样品采集及数据处理按照相应标准执行。

6.9 原始数据质量检查

- 6.9.1 飞行质量应检查以下内容:
 - a) 检查飞行记录中的参数设置与飞行设计的一致性;
 - b) 飞行航迹数据与飞行方案设计航迹的一致性;
 - c) 对每架次的惯导定位数据进行完整性、准确性检查。
- 6.9.2 航空高光谱原始数据质量应检查以下内容:
 - a) 研究区范围内数据采集完整性, 如有漏洞, 漏洞面积占比应不大于 1%;
 - b) 检查原始数据影像清晰度、影像亮度有过饱和或过暗的现象;
 - c) 统计各条带的云量、阴影的百分比情况, 单航带云和阴影面积应小于 5%;

- d) 波长范围 660 nm 处的信噪比应大于 400, 波长范围 2120 nm 处的信噪比应大于 100, 信噪比的计算方法参见附录 D。
- 6.9.3 应检查基站数据的准确性和内容的完整性, 检查记录中的参数设置与设计的一致性。
- 6.9.4 检查地物光谱数据质量应符合 DD 2014-03 中要求, 检查记录表填写的完整性。
- 6.9.5 对质量不合格航带应及时补飞或重飞。

7 数据预处理

7.1 辐射定标

根据仪器辐射定标获得的传感器定标参数, 将成像光谱仪的数字量化值转为辐射亮度值。

7.2 大气校正

在辐射亮度转换的基础上, 进行大气校正去除大气影响, 完成地物反射率计算。进行航空高光谱影像数据的反射率计算可采用经验模型或辐射传输理论模型。

7.3 几何校正

- 7.3.1 进行坐标投影转换, 将地理坐标转换为平面投影坐标。
- 7.3.2 将机上定位与姿态测量数据与地面卫星导航定位基站数据或其它数据结合差分处理, 生成影像几何校正所需要的空间定位与姿态测量文件, 文件应包含以下信息: 时间、经度、纬度、高程、俯仰角、横滚角、航向角。
- 7.3.3 根据空间定位与姿态测量文件, 结合数字高程模型进行正射校正, 消除地形因素的影响; 将辐射定标后的数据赋予坐标信息, 进行几何畸变的粗校正处理。
- 7.3.4 在几何粗校正的基础上, 利用采集的控制点对所有航带进行几何精校正。

7.4 条带拼接处理

- 7.4.1 拼接的条带应具有相同空间分辨率和光谱分辨率, 且在同一坐标系下。
- 7.4.2 同一地物在相邻条带间的光谱差异小, 保证拼接后的影像反差一致。
- 7.4.3 条带拼接后形成的镶嵌影像上同名点几何位置应对齐。

7.5 预处理质量检查

- 7.5.1 几何校正后, 影像中的地物目标没有严重的变形和缺失, 几何中误差小于 3 个像元。如不符合需要重新进行几何校正。
- 7.5.2 在每条航线选取应不少于 3 种地物的检查点, 获取检查点的光谱反射率曲线, 与实测地面光谱或光谱库中的标准光谱进行对比, 要求二者光谱曲线形态和变化趋势一致、谱带位置和谱带特征无明显变异。如不符合需要重新计算光谱反射率。

8 数据解译

8.1 影像分类

8.1.1 分类体系

根据调查目标的光谱属性和自然特征,对生态地质环境要素进行科学分类,为生态地质环境调查提供基础数据。根据专题研究实际情况确定分类种类,分类类别体系见附录E。

8.1.2 特征降维

航空高光谱影像特征降维方法包括特征选择和特征提取,可采用F-分值特征选择、递归特征消除、主成分分析、最大噪声分离、独立成分分析等方法。

8.1.3 样本选择

8.1.3.1 样本的获取可以通过两个途径:

- a) 通过实地采样获取训练样本和测试样本,同步实测建立光谱数据库;
- b) 航空高光谱影像中提取地物端元作为训练样本;
- c) 采用交叉验证的方法,训练样本和测试样本的比例设置为 4:1~2:1。

8.1.3.2 端元提取可采用纯像素索引法(PPI)、N-FINDR 算法、迭代误差分析法(IEA)、光学实时自适应光谱辨识系统(ORASIS)算法、自动形态学端元提取(AMEE)等。

8.1.4 分类计算

航空高光谱影像分类可采用光谱角制图(SAM)、光谱信息散度(SID)、支持向量机(SVM)、卷积神经网络(CNN)等算法进行计算,并结合专家解译和判别,得到地物精细分类图。

8.1.5 分类精度评价

8.1.5.1 通过测试样本与分类结果的符合程度建立混淆矩阵,计算精度指标,完成分类精度评价。

8.1.5.2 测试样本采样方法、样本容量和混淆矩阵参见附录 F、附录 G 和附录 H。

8.1.5.3 精度指标对应的评价结果如下:

- a) 总体分类精度大于 80%时,表示分类结果较好;介于 50%~80%时,表示分类结果一般;小于 50%时,表示分类结果较差。
- b) Kappa 系数大于 0.80 时,分类数据和测试数据的一致性较高;当 Kappa 系数介于 0.50~0.80 时,表示精度一般;当 Kappa 系数小于 0.50 时,分类精度较差。

8.1.5.4 根据工作要求,对分类结果中的主要地物类型进行野外查证,人工解译查证点的地物类别,并现场拍照。查证结果按 DD 2011-03 中相关规定,并填写野外查证记录表。

8.2 信息提取

8.2.1 在生态地质环境调查工作,应用航空高光谱影像进行信息提取,航空高光谱影像空间分辨率应满足相应专题工作要求。

8.2.2 地表水水质参数反演应符合以下要求:

- a) 应用航空高光谱数据开展地表水水质参数反演,水域包括河流、湖泊、水库、坑塘等;
- b) 航空高光谱数据采集与地面水样采集应同步进行;
- c) 地面同步采集满足工作要求的水体光谱样和表层水样;
- d) 采集的表层水样进行实验室分析测试,水质参数包括悬浮物、叶绿素 a、有色可溶性有机物、总磷含量、总氮含量、浊度等;水体样品的采集和测试根据相关标准进行;
- e) 水质参数反演采用经验模型、辐射传输模型或机器学习等方法;

- f) 对参数反演结果进行验证，决定系数（ R^2 值）大于或等于 0.7 为合格，解译成果形成地表水水质专题图。

8.2.3 海洋水质参数反演应符合以下要求：

- a) 应用航空高光谱开展海洋水质参数反演，用于海洋生态环境、海岸带环境地质调查与灾害、海湾水质等调查与监测；
- b) 航空高光谱数据采集与海上观测站点数据采集应同步进行；
- c) 海上观测站点数据采集和测试根据相关标准进行；
- d) 海上观测站点相应参数测定包括悬浮物、叶绿素 a、有色可溶性有机物、总磷含量、总氮含量、浊度等；
- e) 水质参数反演采用经验模型、辐射传输模型或机器学习等方法；
- f) 对参数反演结果进行验证，决定系数（ R^2 值）大于或等于 0.7 为合格，解译成果形成各类专题图。

8.2.4 岩性识别与基质层调查应符合以下要求：

- a) 应用航空高光谱数据开展岩性识别和填图，用于构造划分、岩性与矿物识别、生态地质功能分区等；
- b) 应同步开展研究区内地面调查和地物高光谱测量；
- c) 岩性参数反演采用经验模型或机器学习等方法；
- d) 对反演结果进行验证，决定系数（ R^2 值）大于或等于 0.7 为合格；
- e) 基于 GIS 平台，综合多元信息开展生态地质专题研究工作；
- f) 解译成果形成岩性分布图、构造分布图、基质层分类图、生态地质功能分区图等。

8.2.5 土壤环境质量调查应符合以下要求：

- a) 应用航空高光谱数据开展土壤质量调查，包括耕地土壤、地表裸土、滩涂等；
- b) 航空高光谱数据采集选取地表覆盖物小于 20% 时进行，应同步进行地面表层土样采集；如需开展耕地肥力调查，应在施肥前进行；
- c) 土壤采样点应均匀分布研究区，根据调查目的合理确定网格大小或代表性样地，采集样点的土壤地面高光谱数据和表层土壤样品；
- d) 土壤样品参数测定包括有机质含量、重金属（As、Hg、Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 等）含量、含盐量、养分及肥力（N、P、K）、湿度、有益元素含量等；
- e) 土壤参数反演采用经验模型、辐射传输模型或机器学习等方法。
- f) 对参数反演结果进行验证，决定系数（ R^2 值）大于或等于 0.7 为合格，解译成果形成各类专题图。

8.2.6 农作物调查应符合以下要求：

- a) 应用航空高光谱数据开展农作物调查，包括农田面积及作物品种识别、产量估算、长势及品质监测、作物灾损评估等；
- b) 航空高光谱数据采集和地面样品采集应同步进行；根据任务需要选择合适的作物生育期进行数据采集；
- c) 地面采集满足工作要求的作物地面高光谱数据，采样点应合理分布于研究区，能够代表区域农业种植特点；
- d) 农作物参数测定包括作物品种、生物量、长势、叶绿素、叶面积指数、灾情信息等；
- e) 对参数反演结果进行验证，决定系数（ R^2 值）大于或等于 0.7 为合格，解译成果形成各类专题图。

8.2.7 湿地生态调查应符合以下要求：

- a) 应用航空高光谱数据开展湿生植被调查、滩涂资源调查，包括湿地范围、植物种类与分布、水体分布、人工设施分布等；
- b) 航空高光谱数据采集和地面样品采集应同步进行；
- c) 地面采集满足工作要求的地物光谱样，采样点应包含湿地所有地物类型，采集叶面积指数、植物生物量、植被覆盖度、沉积物粒度参数等指标；
- d) 对参数反演结果进行验证，决定系数（ R^2 值）大于或等于 0.7 为合格，解译成果形成各类专题图。

8.2.8 森林资源调查应符合以下要求：

- a) 应用航空高光谱数据开展森林资源调查，包括森林物种识别与分布、健康状况、病虫害调查等；
- b) 航空高光谱数据采集和地面样品采集应同步进行；根据研究区森林资源特点、调查目的和调查等级确定航空飞行参数；
- c) 地面采集满足工作要求的地物高光谱数据，采样点应合理分布于研究区，能够代表区域森林特点；
- d) 实地参数测定包括叶面积指数、郁闭度、叶绿素含量、病虫害胁迫状况等；
- e) 对参数反演结果进行验证，决定系数（ R^2 值）大于或等于 0.7 为合格，解译成果形成各类专题图。

9 专题图制作

专题图制作按照 DD 2011-02 中有关制图部分内容执行。

10 报告编制

生态地质环境航空高光谱调查成果报告应包括以下内容：项目概况、研究区介绍、已有资料分析、航空与地面数据采集及质量控制、数据预处理和数据解译方法、专题信息提取、综合研究与成果、结论和建议等。

附录 A
(规范性)
飞行主要技术参数表

表A.1 飞行主要技术参数表

测区代号:		成像光谱仪型号	
飞行机型:		光谱波段范围:	
项目	参数		
分区编号		(1) 根据划分的分区图上量测计算;	
面积	(1) km ²	(2) $h_{\text{平均平面}} = \frac{h_{\text{高平面}} + h_{\text{地平面}}}{2}$;	
宽度	m	(3) $h_{\text{高差}} = h_{\text{高平}} - h_{\text{平均平面}}$;	
空间分辨率	m	(4) 飞行速度 s 根据空间分辨率 D 、机载成像光谱仪的扫描速率 FT 确定: $s = D/FT$;	
光谱采样间隔	nm	(5) 相对航高根据空间分辨率、机载成像光谱仪的视场角等确定: $H = \frac{D((n_pixels)/2)}{\tan (FOV/2)}$	
平均平面高程	(2)m	式中: H —相对航高, D —垂直飞行方向空间分辨率,	
平均平面上的高差	(3)m	n_pixels —成像光谱仪像元数, FOV —视场角;	
飞行地速	(4) km/h	(6) $h_{\text{绝对}} = h_{\text{平均平面}} + h_{\text{相对}}$;	
相对航高	(5) m	(7) 根据垂直飞行方向空间分辨率 D 和机载成像光谱仪视场角下的空间像元数 $\#Looks$ 确定: $Swath\ Width = (D) (\#Looks)$;	
绝对航高	(6) m	(8) 航带间隔 = $Swath\ Width \times (1 - Ly)$, Ly 为旁向重叠率;	
航带旁向重叠度	%	(9) 航带条数等于分区宽度除以航线间隔, 测区边界分区加一条线。	
航带幅宽	(7) m		
航带间隔	(8) m		
航带条数	(9)条		
设计人:		审核人:	技术负责人:

注：附录A-表A.1引用《DD 2014-14 机载成像高光谱遥感数据获取技术规程》的附录C-表C.1。

附 录 B
(规范性)
飞行测量记录表

表B.1 仪器检查记录表

测区号： 工作日期： 年 月 日 架次号：

检查项目			状态	备注
供电系统	☐ 蓄电池供电		电压 伏	
	☐ 飞机电源供电		电压 伏	
仪器准备情况检查	短波红外相机	镜头	☐ 打开 ☐ 封闭	
	可见光相机	镜头	☐ 打开 ☐ 封闭	
	数据收录电脑	网线	☐ 完好 ☐ 破损	
	惯导设备	主天线插头	☐ 插紧 ☐ 脱落	
		主天线插头位置	☐ 1 ☐ 2	
		主天线接收头位置	☐ 后 ☐ 前	
		从天线插头	☐ 插紧 ☐ 脱落	
		主天线插头位置	☐ 1 ☐ 2	
		从天线接收头位置	☐ 前 ☐ 后	
设备加电状态检查	短波红外相机	状态	☐ 正常 ☐ 异常	
	可见光相机	状态	☐ 正常 ☐ 异常	
	惯导设备	状态	☐ 正常 ☐ 异常	
	稳台	状态	☐ 正常 ☐ 异常	
	数据收录电脑	系统启动	☐ 正常 ☐ 异常	
测量结束	数据拷贝情况		VNIR ☐ 已拷贝 ☐ 未拷贝	
			SWIR ☐ 已拷贝 ☐ 未拷贝	
			POS ☐ 已拷贝 ☐ 未拷贝	
	仪器电源状态		☐ 已关 ☐ 未关	
	镜头盖		☐ 已关 ☐ 未关	
	稳台液压油		☐ 已关 ☐ 未关	
	系统防水、防火等措施		☐ 已做 ☐ 未做	

检查人： 审核人：

表B.2 飞行任务书

测区名称:

飞行日期: 年 月 日

起降坪位置		架次号		飞行路线示意图
航线公里		飞行时长		
飞行高度		飞行速度		
飞行任务：				
注意事项：				

任务编制者:

接收任务者：

项目负责人:

表B.3 飞行记录表

测区名称:

测区代号:

分区编号:

起飞时间:

着陆时间:

日期:

天气情况:

能见度:

温度:

飞行员：

飞机编号:

操作员:

序号	航线号	飞行方向	地速 km/h	航高 m	扫描速率 ms	空间分辨率 m	光谱分辨率 nm	备注

附 录 C
(规范性)
地面作业记录表

表C.1 飞行同步地物波谱采集记录表

测区名称：
起飞时间： 着陆时间： 日期：
天气情况： 能见度： 温度：
操作员： 记录员： 审核人：

点号	记录时间	坐标位置			地物名称	波谱文件名	照片编号	备注
		X	Y	Z				

表C.2 地物光谱采集记录表（增加采样编号）

日期： 天气： 温度： 风力： 能见度：
设备型号： 仪器平台： 波长范围： 视场角： 标定日期：
操作员： 记录员： 预处理人： 审核人：

文件名	观测时间	目标名称	坐标位置			测量方式			描述	照片编号
			X	Y	Z	高度	次数	方向		

附录 D
(资料性)
航带原始数据信噪比

分别对航带波长为660 nm、750 nm、1100 nm、1310 nm、1640 nm、2120 nm几个波段进行信噪比计算，计算公式如下：

$$S = \frac{M}{SD} \dots\dots\dots (D. 1)$$

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N DN_i \dots\dots\dots (D. 2)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (DN_i - M)^2} \dots\dots\dots (D. 3)$$

式中：
S——信噪比；
M——灰度平均值；
SD——灰度的标准差；
DN_i——第*i*个像元的灰度值。
N——样本数量。

附 录 E
(资料性)
地物分类表

根据航空高光谱数据和地面采集的地物光谱数据库，对全区进行地物分类，地物分类的类型按TD/T 1055-2019执行，并根据航空高光谱遥感分类情况细分为三级类，具体见表F.1。

表E.1 航空高光谱地物分类表

一级类		二级类		三级类
编码	名称	编码	名称	
00	湿地	0303	红树林地	根据现场实地调查到的种类，采集地物光谱进行分类。如芦苇滩、淤泥滩、砂砾石滩、荷叶滩、杂草滩、水产养殖区等。
		0304	森林沼泽	
		0306	灌丛沼泽	
		0402	沼泽草地	
		0603	盐田	
		1105	沿海滩涂	
		1106	内陆滩涂	
		1108	沼泽地	
01	耕地	0101	水田	水稻、慈姑、茭白、莲藕
		0102	水浇地	菜地、蔬菜大棚
		0103	旱地	玉米、小麦、油菜
02	种植园用地	0201	果园	
		0202	茶园	
		0203	橡胶园	
		0204	其他园地	
03	林地	0301	乔木林地	
		0302	竹林地	
		0305	灌木林地	
		0307	其他林地	
04	草地	0401	天然牧草地	
		0403	人工牧草地	
		0404	其他草地	
05	商业服务业用地	05H1	商业服务业设施用地	
		0508	物流仓储用地	港口仓库、堆煤场、堆砂场、堆石场
06	工矿用地	0601	工业用地	化工厂、轻加工厂
		0602	采矿用地	
07	住宅用地	0701	城镇住宅用地	
		0702	农村宅基地	

表 E.1 航空高光谱地物分类表（续）

一级类		二级类		三级类
编码	名称	编码	名称	
08	公共管理与公共服务用地	08H1	机关团体新闻出版用地	
		08H2	科教文卫用地	
		0809	公用设施用地	
		0810	公园与绿地	
10	交通运输用地	1001	铁路用地	
		1002	轨道交通用地	
		1003	公路用地	
		1004	城镇村道路用地	
		1005	交通服务场站用地	
		1006	农村道路	
		1007	机场用地	
		1008	港口码头用地	
		1009	管道运输用地	
11	水域及水利设施用地	1101	河流水面	
		1102	湖泊水面	根据藻类、水草分布划分不同水域
		1103	水库水面	
		1104	坑塘水面	
		1107	沟渠	
		1109	水工建筑用地	
12	其他用地	1201	空闲地	
		1202	设施农用地	养蟹场、养虾场、养鸭场、养猪场
		1203	田坎	
		1204	盐碱地	
		1205	沙地	
		1206	裸土地	
		1207	裸岩石砾地	

附 录 F
(资料性)
采样方法

F.1 简单随机采样

简单随机采样是指在分类图上随机选择一定数量的像元,然后比较这些像元的类别与其对应的检验数据之间的一致性。该方法对样本空间中的所有单元来说,被选中的概率都是相同的。如果区域内各种地物类别的分布均匀,且面积差异不大,简单随机采样应该是一种理想的采样方法。

F.2 分层采样

分层采样是指分别对每个类别进行随机采样。该方法克服了简单随机采样的不足,保证了在采样空间或类型选取上的均匀性及代表性,使每个类别都在采样中出现。分层的依据可因精度评价的目标而不同。常用的分层有地理区、自然生态区、行政区域和分类后的类别等。在每层内采样的方式可以是随机的,也可以是系统的。

F.3 系统采样

系统采样是指按照某种确定的间隔或规则进行采样的一种方法。该方法简单易行,但其固有的周期性及其存在的规则间隔性,可能造成以某些样本数采样时,即便方差很小,但均值仍然会偏离真值较大,从而使评价存在较大偏差。

附录 G
(资料性)
样本容量计算方法

G.1 百分率样本容量

百分率样本容量的计算公式为：

$$N = \frac{Z^2(pq)}{E^2} \dots\dots\dots (G. 1)$$

- 式中：
- N——样本容量；
 - Z——标准误差的置信水平，一般取2，表示1.96的标准正态误差和95%的双侧置信度；
 - p——期望百分比精度（这里的精度指的是评价结果的精度，而非影像的分类精度）；
 - q——100-p；
 - E——容许误差。

G.2 基于多项式分布的样本容量

基于多项式分布的样本容量计算公式为：

$$N = \frac{BW_i(1 - W_i)}{b_i^2} \dots\dots\dots (G. 2)$$

- 式中：
- N——样本容量；
 - W_i——所有k个类别中面积比例最接近50%的第*i*类的面积比例；
 - b_i——该类的容许误差；
 - B——自由度为1且服从x²分布的（b/k）×百分位数，可以从自由度为1的x²分布表查得。

附 录 H
(资料性)
混淆矩阵与精度指标

H.1 混淆矩阵

混淆矩阵也称误差矩阵，是表示精度评价的一种标准格式。误差矩阵是 n 行 n 列的矩阵，一般可用表 I.1 的形式来表示。

表H.1 混淆矩阵的基本形式

		分类数据类型					
		1	2	...	...	n	总和
检验 数据 类型	1	p_{11}	p_{21}	...	...	p_{n1}	p_{+1}
	2	p_{12}	p_{22}	...	...	p_{n2}	p_{+2}
	...	...	...	...	...	...	...
	...	...	...	...	...	...	...
	n	p_{1n}	p_{2n}	...	...	p_{nn}	p_{+n}
	总和	p_{1+}	p_{2+}	...	...	p_{n+}	P

表中 n 代表类别的数量， P 代表样本总数， p_{ij} 是分类数据类型中第 i 类和参考影像第 j 类所占所占的组成成分。

$$p_{i+} = \sum_{j=1}^n p_{ij} \dots\dots\dots (H.1)$$

$$p_{+j} = \sum_{i=1}^n p_{ij} \dots\dots\dots (H.2)$$

式中：

p_{i+} ——分类所得到的第 i 类的总和；

p_{+j} ——检验数据中第 j 类的总和。

H.2 基本的精度指标

H.2.1 分类

根据混淆矩阵可以设计出三种基本的精度评价指标，即总体精度、用户精度和制图精度。这些精度指标从不同的侧面描述了分类精度，是简便易行并具有统计意义的评价指标。

H.2.2 总体分类精度

表述的是对每一个随机样本，所分类的结果与检验数据类型相一致的概率。表示为

$$p_c = \sum_{k=1}^n \frac{p_{kk}}{N} \dots\dots\dots (H.3)$$

H.2.3 用户精度

从分类结果中任取一个随机样本，其所具有的类型与地面实际类型相同的条件概率。表示为

$$p_{u_i} = \frac{p_{ii}}{p_{i+}} \dots\dots\dots (H.4)$$

H. 2. 4 制图精度

表示相对于检验数据中的任意一个随机样本,分类图上同一地点的分类结果与其相一致的条件概率。表示为

$$p_{A_j} = \frac{p_{jj}}{p_{+j}} \dots\dots\dots (H. 5)$$

H. 2. 5 误差指标

与上述精度指标相关的还有漏分误差和错分误差。漏分误差是指对于参考影像上的某种类型,被错分为其他不同类型的概率,即实际的某一类地物有多少被错误地分到其他类别。而错分误差是指对于分类影像上的某一类型,它与参考影像类型不同的概率,即影像中被划为某一类地物实际上有多少应该是别的类别。漏分误差与制图精度相对应,可用于判断分类方法的优劣;错分误差与用户精度相对应,从检验数据的角度判断了各类别分类的可靠性。

H. 3 Kappa 系数

Kappa系数是一种对遥感影像的分类精度和误差矩阵进行评价的多元离散方法,该方法摒弃了基于正态分布的统计方法,认为遥感数据是离散的、呈多项式分布的,在统计过程中综合考虑了矩阵中的所有因素,因而更具实用性。其计算方法为

$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^n x_{ii} - \sum_{i=1}^n (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (x_{i+} x_{+i})} \dots\dots\dots (H. 6)$$

- 式中:
- N ——所有样本的总数;
 - n ——矩阵行数,一般等于分类的类数;
 - x_{ii} ——位于第*i*行、第*i*列的样本数,即被正确分类的像元数;
 - x_{i+} 和 x_{+i} ——分别是第*i*行、第*i*列的总像元数。