

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/AHEPI

安徽省环境保护产业协会团体标准

T/AHEPI XXXX—XXXX

挥发性有机物卫星遥感及立体协同监测技术规范

Specification for Synergy Monitoring by Satellite Remote Sensing and Cruise
Monitoring on Volatile Organic Compounds

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

安徽省环境保护产业协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 方法概述 2

5 识别与监测方法 2

 5.1 遥感数据准备 2

 5.2 遥感单元与 VOCs 重点关注区域选取 2

 5.3 VOCs 立体协同监测实施技术要求 3

6 质量控制与结果表达 5

 6.1 质量控制 5

 6.2 结果表达 6

附录 A（资料性） VOCs 重点关注区域选取示例 7

附录 B（资料性） 挥发性有机物超光谱遥感走航监测设备组成、设备性能要求及结果表示要求 ... 9

 B.1 仪器和设备 9

 B.2 性能要求与测试方法 9

 B.3 结果表示 10

附录 C（资料性） 挥发性有机物无人机立体监测系统组成与性能、数据传输处理与安全保障要求 11

 C.1 系统组成与性能要求 11

 C.2 数据传输与处理 12

 C.3 安全保障 12

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。

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。

本文件由上海市环境监测中心提出。

本文件由安徽省环境保护产业协会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

挥发性有机物卫星遥感及立体协同监测技术规范

1 范围

本文件主要包括利用卫星遥感识别挥发性有机物重点关注区域并开展走航监测的术语和定义、方法概述、识别与监测方法、质量控制与结果表达。

本文件适用于省、市、县政府和环保部门通过卫星遥感开展工业园区挥发性有机物重点关注区域识别，并联动地基检测、走航监测、无人机协同监测与评估。

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 37822-2019 挥发性有机物无组织排放控制标准
HJ/T 55 大气污染物无组织排放监测技术导则
HJ 192 生态环境状况评价技术规范
HJ 664 环境空气质量监测点位布设技术规范
HJ 818 环境空气气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、CO）连续自动监测系统运行和质控技术规范
HJ 1010 环境空气挥发性有机物气相色谱连续监测系统技术要求及检测方法
DB31/T 310002 长三角生态绿色一体化发展示范区挥发性有机物走航监测技术规范
DB34/T 5383 基于天空地一体化超光谱遥感的气态污染物排放溯源技术规范
T/SHAEP1 007 工业园区空气污染自动监测技术指南

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

差分吸收光谱技术 differential optical absorption spectroscopy, DOAS

通过监测痕量气体在紫外和可见光范围内（一般为220~450 nm）的特征窄波吸收结构来定量反演气体浓度的技术。

3.2

臭氧前体物 ozone precursors

在光照条件下能与氮氧化物(NO_x)等发生光化学反应生成臭氧的挥发性有机物(VOCs)，包括烷烃、烯烃、芳香烃、炔烃等非甲烷碳氢化合物（NonmethaneHydrocarbons, NMHCs）及醛、酮等含氧有机物（Oxygenated Volatile Organic Compounds, OVOCs）等。

本文件以NO₂和HCHO分别作为NO_x和VOCs的指示指标。

3.3

臭氧前体物指示值 ozone precursor index

对流层HCHO和NO₂柱浓度的比值，用于指示臭氧光化学生成过程受VOCs或NO_x控制，或者两者共同控制。

3.4

对流层甲醛柱浓度 tropospheric HCHO column concentration

对流层单位面积HCHO气柱总量，即对应地表1 cm²的对流层垂直大气中所含的HCHO分子个数，把对流层垂直大气柱内所有的HCHO转换到标准条件下的分子个数，单位：molec/cm²。

3.5

对流层二氧化氮柱浓度 tropospheric NO₂ column concentration

对流层单位面积 NO_2 气柱总量，即对应地表 1 cm^2 的对流层垂直大气中所含的 NO_2 分子个数，把对流层垂直大气柱内所有的 NO_2 转换到标准条件下的分子个数，单位： molec/cm^2 。

3.6

VOCs 重点关注区域 VOCs focus area

VOCs治理需要重点关注的区域。区域中HCHO柱浓度较高，且臭氧光化学生成过程以VOCs控制为主或以VOCs和 NO_x 共同控制为主的企业集群区域。

3.7

超光谱遥感 hyperspectral remote sensing

光谱分辨率小于 0.5 nm 的光谱统称为超光谱，包括但不限于紫外、可见、红外范围波段的光谱。通过对超高分辨率光谱信息的提取和分析，获取气态污染物的定性、定量结果。

4 方法概述

利用遥感反演的对流层HCHO柱浓度、对流层 NO_2 柱浓度和臭氧前体物指示值（HCHO/ NO_2 ），结合生境类型分类数据和高分辨率卫星遥感影像，综合识别VOCs重点关注区域。通过卫星遥感、地基监测、车载走航和机载无人机监测的立体协同，对重点关注区域开展多维度、多手段协同监测，实现VOCs污染的高时空分辨率识别、溯源与评估。

5 识别与监测方法

5.1 遥感数据准备

5.1.1 生境类型分类数据。基于遥感监测获取 HJ 192 所规定的最新的生境类型分类数据，空间分辨率优于 90m 。

5.1.2 反演算法。利用差分吸收光谱(DOAS)算法进行反演。具体步骤包括：

- a) 太阳散射光谱采集：获取目标区域太阳后向散射光谱；
- b) 参考光谱获取：选取清洁地区或同一像素低污染时段光谱作为参考谱，或采用太阳夫琅禾费谱作为参考；
- c) 差分光学厚度计算：将实测光谱与参考谱进行对数差分，分离窄带吸收结构与宽带消光结构，得到差分光学厚度；
- d) 斜柱浓度反演：利用最小二乘法拟合差分吸收截面与差分光学厚度，反演得到痕量气体斜柱浓度；
- e) AMF 校正：结合辐射传输模型模拟的气象场、地表反照率、地形高程等参数，计算空气质量和因子(AMF)，将斜柱浓度转换为垂直柱浓度；
- f) 云量筛选：剔除云量大于 30%的像元，确保反演数据有效性。

5.1.3 对流层 HCHO 柱浓度。采用 Sentinel-5 TROPOMI 传感器数据，利用差分吸收光谱算法进行反演，获取 L2 级卫星遥感对流层 HCHO 柱浓度结果。或通过其他受认可渠道获取对流层 HCHO 柱浓度。

5.1.4 对流层 NO_2 柱浓度。采用 Sentinel-5 TROPOMI 传感器数据，利用差分吸收光谱算法，获取 L2 级卫星遥感对流层 NO_2 柱浓度结果。或通过其他受认可渠道获取对流层 NO_2 柱浓度。

5.1.5 臭氧前体物指示值（HCHO/ NO_2 ）。采用卫星遥感反演的对流层 HCHO 和 NO_2 柱浓度计算比值。

5.1.6 高分辨率卫星影像。最近一年内覆盖全区域的空间分辨率优于 1m 的多光谱高分辨率卫星影像数据。

5.2 遥感单元与 VOCs 重点关注区域选取

5.2.1 一级遥感单元选取

将整个城市按照规则大小（例如 $3\text{km}\times 3\text{km}$ 、 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 等）进行划分，对划分好的每个区域即一级遥感单元赋上属性值。一级遥感单元必须包含以下属性值：

- a) 属性 1：遥感单元编号，按照省、市、县和序号的顺序进行编号，如：省_市_县_0001；
- b) 属性 2：中心经度地理坐标（例如 116.614E ）；
- c) 属性 3：中心纬度地理坐标（例如 38.079N ）。

5.2.2 二级遥感单元选取

二级遥感单元选取应满足以下要求：

- a) 生境类型分类数据初筛，一级遥感单元叠加生境类型分类数据，剔除掉耕地、林地、草地、水域湿地和未利用地等区域，保留建设用地（包括城镇建设用地、农村居民点、其他建设用地），也可在此基础上，结合工业用电数据进一步筛选后，得到二级遥感单元；
- b) 污染物平均值计算，根据最近一周对流层 HCHO 柱浓度和 HCHO/NO₂ 的卫星遥感监测结果，统计每个二级遥感单元的平均对流层 HCHO 柱浓度和 HCHO/NO₂ 均值，并在一级遥感单元的 3 个属性值基础上，继续添加以下 2 个属性值；
- c) 属性 4：遥感单元对流层 HCHO 柱浓度平均值；
- d) 属性 5：遥感单元 HCHO/NO₂ 平均值。

5.2.3 三级遥感单元选取

三级遥感单元选取应满足以下要求：

- a) 在二级遥感单元的基础上，筛选出 HCHO/NO₂<N 的遥感单元。该类单元臭氧光化学生成过程以 VOCs 控制为主或以 VOCs 和 NO_x 共同控制为主。N 值依据不同城市观测或模拟结果设定；
- b) 对 HCHO/NO₂<N 的遥感单元，按照对流层 HCHO 柱浓度日均值进行排序，筛选出对流层 HCHO 柱浓度排名前 10% 的高值遥感单元作为三级遥感单元。后续可根据工作需求、区域面积、筛选结果等因素修改筛选比例。

5.2.4 VOCs 重点关注区域选取

在三级遥感单元的基础上，结合亚米级高分辨率卫星影像，以自动识别和人工解译相结合的方式，筛选出工业用地较多的三级遥感单元作为 VOCs 重点关注区域。VOCs 重点关注区域选取示例见资料性附录 A。

5.2.5 VOCs 重点关注区域选取和推送频次

VOCs 重点关注区域宜每日筛选，当日完成筛选后不晚于 12 h 推送至 VOCs 立体协同监测实施单位。

5.3 VOCs 立体协同监测实施技术要求

5.3.1 总体要求

VOCs 立体协同监测应统筹卫星遥感、地基监测、走航监测和无人机监测，形成时空互补、数据互验的协同监测网络。在接收到 VOCs 重点关注区域推送信息后，宜在 48 h 内启动并完成立体协同监测。

5.3.2 地基监测要求

5.3.2.1 点位布设。参照 HJ 664 和 HJ/T 55 中的无组织排放监控点布设，或 T/SHAPEPI 007 中点位布设相关要求。

5.3.2.2 监测项目。至少具备 NO₂、O₃ 和 VOCs 组分监测能力。可根据 VOCs 重点关注区域内工业园区及重点企业环境影响评价、大气污染源排放清单、企业排污许可、自行监测和执法监测数据等，综合考虑区域产业的物料、生产工艺、废气排放情况和环境风险等级等，并可结合必要的调查性监测，选取监测项目并选定重点监测污染物。优先考虑光化学活性较强、嗅阈值较低、排放量较大的污染物开展监测。

5.3.3 快速质谱原理挥发性有机物走航监测。其设备组成、性能要求、实施方法、质量控制与结果表示按照 DB31/T 310002 执行。

5.3.4 超光谱遥感原理挥发性有机物走航监测。其设备组成、设备性能要求与结果表示要求见附录 B。

5.3.4.1 仪器检查

仪器检查应满足以下要求：

- a) 检查望远镜内部光纤入口是否位于透镜焦点；
- b) 检查直角棱镜，凸透镜，光纤入口是否位于同一轴线；
- c) 成像观测时检查仪器是否水平；

d) 检查仪器各个系统之间的接线是否完整稳定。

5.3.4.2 仪器温控

等待仪器光谱仪温度达到20℃，方可开始使用仪器进行观测。

5.3.4.3 监测实施

监测实施应满足以下要求：

- a) 按照规划路线开展走航监测，必要时可对路线进行适当调整。走航监测速度应满足 25m-35m 可得到一组有效监测数据；
 - b) 走航监测过程中发现挥发性有机物浓度之和超过 0.6 mg/m³ 或存在明显异味时，可在该点位附近进行巡查或停车定点监测至少 1 min，同时开展针对高值区域的超光谱成像监测，每组成像时间依据监测区域面积的大小而定；
 - c) 记录监测点位挥发性有机物总浓度的最高值，以及对应的监测时间、GPS 坐标、所处道路位置、污染物组分、气象特征等信息。同时结合超光谱成像获得的主要污染源排放物种和对应的排放浓度，精确判定污染来源；
 - d) 根据需要对污染点进行复测。可利用挥发性有机物监测设备进行现场测定或进行采样和实验室分析，具体方法应满足相关的国家、地方和行业标准。分析结果可与现场所记录的信息结合进行综合分析，评估该污染点位的污染特征，进行污染溯源。
- 5.3.5 挥发性有机物无人机立体监测。其系统组成与性能要求、数据传输与处理、质量控制、结果表示要求见附录 C。

5.3.5.1 时空基准

挥发性有机物无人机立体监测时空基准如下：

- a) 大地基准应采用 2000 国家大地坐标系(CGCS2000)；
- b) 高程基准应采用 1985 国家高程基准；
- c) 时间基准应采用公历纪年和北京时间。

5.3.5.2 飞行监测方案规划

- a) 飞行区域；
 - 1) 依据环境管理要求和 VOCs 重点关注区域识别结果，规划监测区域。掌握监测区域的企业分布及所属行业、道路分布状况、周边敏感区分布状况、盛行风向及恶臭异味投诉情况等；
 - 2) 在对目标区域开展监测前，宜事先调查区域内涉及 VOCs 排放的污染源信息，包括但不限于污染源地理位置，企业边界范围，重要管廊分布，主要装置、排口和楼宇高度等信息。
- b) 飞行起降点；
 - 1) 点位布设前应应对监测区域进行实地踏勘，了解测区内的基本情况，如地形地貌、地表植被、重要设施、企业布局、军事用地、高度情况等信息，并综合考虑飞行时长、飞行半径、监测路径和电力、网络、周围环境安全等因素，选择合适的起降点、并设立备降点，使无人机在应急情况下亦可安全着陆；
 - 2) 机库点位宜选择距监测区域边界≤3 km，在监测区域范围内信号传输无遮挡的楼顶，具备机库所需用电条件及网络条件。
- c) 飞行路径；
 - 1) 结合目标区域面积大小、地形、潜在污染源分布和区域管理需求，规划监测路径。宜设定关键航路点，沿工业园区内部企业厂界、园区内部道路进行监测。也可划分规则网格（如 100 m×100 m），沿网格边界进行监测。需要进一步监测废气无组织排放情况、进行污染溯源时，在确保安全和符合区域管理要求前提下，尽量靠近生产厂房或无组织排放源进行悬停监测以及无人机贴近监测。应实现规划飞行至目标区域内重点污染源开展监测的路线；
 - 2) 起降路径需规划垂直升降通道，避开起降点附近树木、线缆。园区内部沿道路飞行时，应与可能影响飞行安全或生产安全的建筑、设施保持一定距离，一般距烟囱/冷却塔≥15 m，

厂房 ≥ 10 m, 管道 ≥ 5 m, 化工储罐区、高压线走廊、直升机坪上空禁飞。有条件的, 事先开展测绘或根据园区高精度三维地图以确保所规划航线安全无遮挡;

- 3) 在保证飞行安全、信号无遮挡的情况下, 飞行高度与重点监测的排放口、厂房顶尽量等高, 一般在 30 m~50 m 左右。飞行速度宜保持匀速, 一般 8~12m/s。实际飞行高度、速度, 在现场踏勘及试飞后进一步优化调整。
- d) 飞行参数设置。在飞控软件或平台中精确规划航线, 明确固定巡航时间、航点、高度、速度、悬停点等, 并明确航点动作, 如拍照, 录像等。在疑似污染点或网格中心点设定悬停(≥ 30 s), 获取稳定监测数据。
- e) 飞行频次。根据监管需求和空域审批情况设定飞行频次。如布设固定机库实现无人值守飞行, 宜白天至少 1 小时飞行一次。

5.3.5.3 飞行前准备

飞行前准备工作应满足以下要求:

- a) 空域申请与报备。应提前通过民用无人驾驶航空器综合管理平台, 或以当地监管部门指定的方式进行飞行计划报批;
- b) 飞机检查。开启机库门, 确保电机运转正常, RTK 信号良好, IMU/指南针已校准, 无其他故障报警。安全返航高度及电量阈值设定完成, 确保剩余电量可完成飞行任务, 电量宜保留 20%;
- c) 传感器检查。开机预热, 预热时间按说明书要求执行。采样流量正常、数据传输正常、基线稳定;
- d) 飞控软件/平台检查。软件运行正常, 地图加载正常, 通讯链路(图传、数传、4G/5G 信号)稳定。
- e) 环境和空域检查。现场风速、降雨满足要求, 周边无影响起降安全的障碍物、人员和强电磁干扰, 目标监测区域空域无管制。

5.3.5.4 飞行监测

飞行检测应满足以下要求:

- a) 起飞至安全高度(≥ 5 m), 悬停检查各系统状态(图传、数传、传感器读数);
- b) 沿起降通道飞行至规划的监测高度, 按预定航线执行任务;
- c) 航线中设置了悬停点的, 在悬停点稳定监测至少 30 s, 确保传感器采集到有效数据;
- d) 发现数据异常高值时, 自动标记位置, 有条件的拍照或录像取证。建议选取 TVOC 高于园区一般背景浓度 2 倍以上, 且浓度高于 0.5×10^{-6} 的数据作为异常高值;
- e) 电量低于安全阈值或通信中断 ≥ 20 s 时自动返航。

5.3.6 为保证 VOCs 立体协同监测结果时效性, 宜在选定 VOCs 重点关注区域的 48 h 内, 对相应区域开展立体协同监测。

6 质量控制与结果表达

6.1 质量控制

6.1.1 卫星遥感数据质量控制

宜剔除云量大于 30% 的像元; 参照 DB34/T 5383 要求, DOAS 拟合相对误差宜不大于 20%, 光谱拟合残差应在合理范围内; HCHO 和 NO_2 垂直柱浓度反演结果应具备物理合理性, 剔除明显异常值。

6.1.2 地基监测质量控制

按照 HJ 818 要求开展 NO_2 和 O_3 的监测和运行质控, 参照 HJ 1010 开展 VOCs 组分的监测和运行质控。

6.1.3 走航监测质量控制

6.1.3.1 超光谱遥感走航设备应使用标准高气压光源进行波长定标与校准, 每月至少进行一次单点校准, 每年进行一次多点校准, 具体要求和办法按 DB34/T 5383 执行。

6.1.3.2 快速质谱原理走航监测设备质控要求按 DB31/T 310002 要求执行。

6.1.4 无人机监测质量控制

6.1.4.1 传感器应进行过出厂校准，提供检定/校准证书。

6.1.4.2 每年应使用有证的丁烯气体进行多点校准，应至少包括 0, 0.2×10^{-6} , 0.5×10^{-6} , 1×10^{-6} , 2×10^{-6} , 5×10^{-6} 六个浓度点，相关系数 R2 应不小于 0.99。

6.1.4.3 每月应以 2×10^{-6} 浓度进行至少一次单点校准。

6.1.4.4 使用 RTK 时，平面定位误差 $\leq \pm 2.5$ m，高程误差 $\leq \pm 2.5$ m。

6.2 结果表达

6.2.1 卫星遥感结果表达

6.2.1.1 对流层 HCHO 柱浓度、NO₂ 柱浓度及 HCHO/NO₂ 比值以空间分布图形式表达。

6.2.1.2 一级、二级、三级遥感单元以矢量图层形式表达，包括 5.2 规定的全部字段。

6.2.1.3 VOCs 重点关注区域以矢量边界形式表达，叠加高分辨率卫星影像。

6.2.2 走航监测结果表达

6.2.2.1 绘制走航路线上各种污染物浓度空间分布结果，污染物浓度通过颜色、高度等形式进行表征。

6.2.2.2 宜对走航区域、道路、潜在污染源等关键信息进行标注。

6.2.2.3 对空间成像的各像素点，根据污染物浓度数据填充不同的颜色块，通过不同颜色区域各格点的浓度差异，并以现场采集的图像数据为背景进行叠图，得到空间成像结果图。

6.2.2.4 走航监测污染物浓度结果图颜色显示分级见附录 B 中表 B.1 及 DB31/T 310002 表 1。

6.2.3 无人机监测结果表达

6.2.3.1 每次飞行结束后均应绘制污染物浓度空间分布热力图或等值线图。

6.2.3.2 报告应包含任务概况、航线图、污染物空间分布图、异常点分析（位置、浓度、图像证据）、结论等。

6.2.4 协同监测综合结果表达

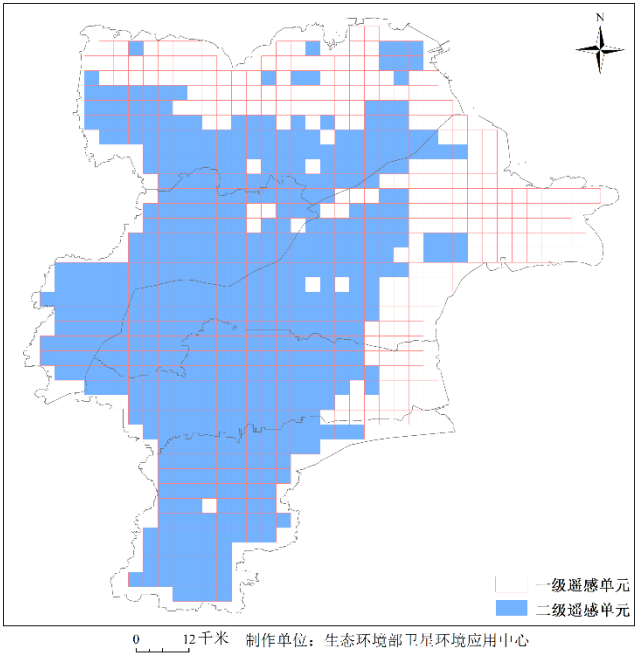
6.2.4.1 编制 VOCs 立体协同监测综合报告，包含卫星遥感识别结果、地基监测时序曲线、走航监测浓度分布图、无人机监测浓度空间分布图。

6.2.4.2 建立统一的数据格式标准，各来源监测数据应包含时间戳、经纬度、高度（或层位）、污染物浓度、气象参数等字段。

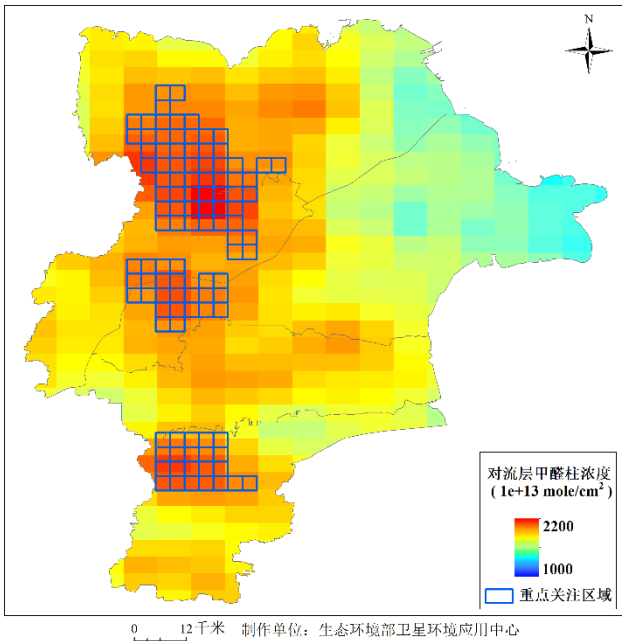
6.2.4.3 对多源监测数据进行时间和空间匹配，形成协同监测数据集，用于污染溯源与排放评估。

6.2.4.4 综合报告应明确各监测手段的结果一致性及其差异原因分析。

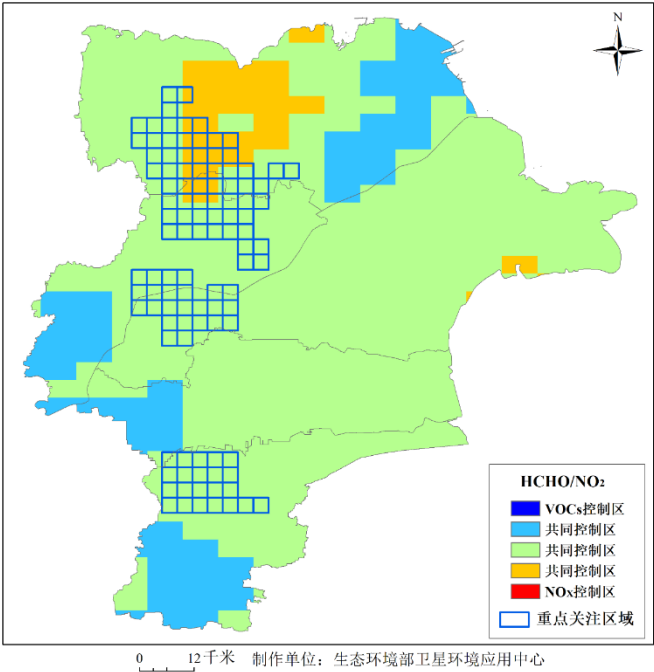
附 录 A
(资料性)
VOCs 重点关注区域选取示例



图A. 1 一级和二级遥感单元



图A. 2 对流层 HCHO 柱浓度和 VOCs 重点关注区域



图A. 3 臭氧前体物指示值 HCHO/NO₂和 VOCs 重点关注区域



图A. 4 VOCs 重点关注区域高分辨率卫星影像示例（中心经纬度：37. 559°N， 118. 464°E）

附录 B

(资料性)

挥发性有机物超光谱遥感走航监测设备组成、设备性能要求及结果表示要求

B.1 仪器和设备

B.1.1 望远镜系统

用于接收不同角度的太阳散射光，并将光线汇聚后导入光纤。包括仰角电机，角度传感器，方位角电机，直角棱镜，凸透镜，驱动系统，控制系统等单元。具备接收并收集以车顶为中心，任意方向，任意角度太阳散射光的功能。

B.1.2 超光谱分光系统

用于将由望远镜系统接收到的光进行分光，且转化为电信号的设备。包括分光棱镜，光电探测器，数字信号处理电路。分光棱镜对接收到的光线进行分光后打在光电探测器上，再由数字信号处理电路将模拟信号转化为数字信号（光谱），并保存在存储设备中。

B.1.3 温度控制系统

用于将光谱仪温度维持于20℃，保证光谱仪的工作环境。包括帕尔贴制冷片，散热风扇，温度传感器。构成反馈回路，通过PID控制算法使得光谱仪温度稳定工作与20℃。

B.1.4 工控机

工控机用于运行操作程序，并且具有一定数据处理功能，应满足以下要求：

- a) 用于运行控制仪器的上位机程序，来控制望远镜系统，光谱仪系统，温度控制系统的正常运转；
- b) 用于储存并处理采集到的光谱，转化为污染气体浓度；
- c) 通信接口：具备一路 USB 接口用于与下位机通信；
- d) 储存要求：根据使用需求，能完整储存不少于 12 个月的所有监测数据；
- e) 操作系统：Windows10 系统；
- f) 抗干扰能力：具有防雷击，防电磁干扰，防震动等能力；
- g) 电压稳定性：允许外供电电压波动 $\pm 10\%$

B.1.5 设备供电

电量至少满足超光谱遥感走航监测设备连续运行8h以上。

B.1.6 气象系统

由温度测量装置，湿度测量装置，气压测量装置构成。实时记录走航期间温度，湿度，气压的变化情况。

B.1.7 光谱标定与校准设备

光谱仪使用标准高压光源进行波长定标与校准。光源供电电压为220V。

B.2 性能要求与测试方法

B.2.1 仪器标定

仪器标定应满足以下要求：

- a) 打开汞灯，设置光谱仪曝光时间和积分次数，采集一条汞灯光谱；
- b) 关闭汞灯，设置光谱仪曝光时间和积分次数，采集一条暗电流光谱；
- c) 保持汞灯关闭，设置光谱仪曝光时间和积分次数，采集一条偏置光谱；
- d) 后续使用上述三条光谱对光谱仪定标。

B.2.2 重复性和仪器检出限

- B. 2. 2. 1 向样品池中分别通入已知浓度 HCHO（如 25 mg/m³）标准气体，并保持浓度始终恒定 1.0 小时。使超光谱设备的观测光路穿过样品池，连续采集 50~100 组数据。基于超光谱遥感算法对上述连续数据进行反演，获取 HCHO 浓度。
- B. 2. 2. 2 对比原样品池中的恒定浓度与观测反演的浓度，计算相对标准偏差和仪器检出限。要求相对标准偏差≤20%，根据仪器分光系统的主要设计参数及样品池浓度敏感性测设获得超光谱仪器针对各种主要污染物的检出限，要求仪器检出限≤0.1 mg/m³。

B. 2. 3 准确度

- B. 2. 3. 1 向样品池中通入已知浓度的 HCHO（如 50 mg/m³）标气，并保持浓度始终恒定 1 小时。使超光谱设备的观测光路穿过样品池，连续采集 50~100 组数据。基于超光谱遥感算法对上述连续数据进行反演，获取 HCHO 的浓度。
- B. 2. 3. 2 对比原样品池中的恒定浓度与观测反演的浓度，计算偏差。目标物浓度应满足相对误差小于 30%。

B. 3 结果表示

- B. 3. 1 本文所使用的垂直柱浓度单位为分子数/平方厘米（molec/cm²），表征近地面几公里的污染物柱总量结果。
- B. 3. 2 通过模型模拟的污染物垂直分布结构，温度、湿度、压力廓线等信息可以将垂直柱浓度结果约束到近地面浓度，以微克每立方米为单位（mg/cm³）。
- B. 3. 3 通过对不同方位角、不同离轴方向的太阳超高光谱的探测，获取不同几何路径上的污染物浓度数据，从而实现不同气体污染物的空间成像效果。
- B. 3. 4 走航观测完成后绘制走航线路上的各种污染物的浓度空间分布结果，污染物浓度通过颜色、高度等形式进行表征。同时对走航区域、道路、潜在污染来源等关键信息进行标注
- B. 3. 5 污染物浓度结果图颜色显示分级见表B.1。

表B. 1 超光谱走航监测污染物浓度-颜色显示分级

浓度范围/（mg/m ³ ）	显示颜色
挥发性有机物	
0-0.2	绿色
0.2-0.4	浅绿色
0.4-0.6	浅黄色
0.6-1.0	黄色
1.0-2.0	橙色
2.0-4.0	红色
大于 4.0	紫色

附录 C
(资料性)

挥发性有机物无人机立体监测系统组成与性能、数据传输处理与安全保障要求

C.1 系统组成与性能要求

C.1.1 飞行平台

多旋翼无人机，主要性能指标应满足以下要求：

- a) 任务载荷一般不小于 0.2 kg；
- b) 飞行速度可在 5~30 km/h 范围内；
- c) 相对航高不低于 150 m；
- d) 满载荷续航时间不少于 30 min；
- e) 测控距离不小于 5 km；
- f) 抗风能力应大于 4 级；
- g) 具备 RTK 精准定位；
- h) 具备任务载荷安装接口和数据传输、供电接口。

C.1.2 任务载荷

C.1.2.1 VOCs 监测设备

TVOC监测应配备光离子化检测器（PID）传感器，量程0~5×10⁻⁶或更高；分辨率应不劣于0.01×10⁻⁶。

C.1.2.2 辅助传感器

应配备温湿度传感器、气压计、GPS/RTK定位模块。

C.1.2.3 超光谱遥感设备

监测内容与精度可参考表C.1。单条光谱采集时间宜不大于1 min；空间分辨率宜不大于100 m。

表C.1 机载超光谱遥感监测内容与精度

监测项目	监测精度
甲醛、乙二醛等VOCs	μg/m ³

C.1.2.4 双光谱云台相机

可配备可见光高清相机、热成像相机，用于取证、录像或识别异常热源、识别异常人员或车辆及泄漏点。

C.1.3 地面控制站

便携式控制电脑/平板，专用控制软件，实时数据接收与显示监测数据系统。

C.1.4 数据传输

应支持 4G/5G网络模块进行监测数据和飞行信息实时回传，或本地存储后下载。

C.1.5 数据处理平台

云端或本地服务器，应配备GIS系统、数据可视化及分析功能，并支持导出成果报告，可以Excel或PDF形式导出。

C.1.6 配套设备

备用电池及充电器、运输箱、气象站（现场风速、风向校准、雨量计）、便携式校准设备（零点/量程）、安全警示设备。

C.1.7 无人机库系统

C.1.7.1 机库硬件

机库硬件应满足以下要求：

- a) 恒温恒湿控制，工作温度：-30℃至50℃；
- b) 自动充电桩兼容无人机无线充电接口，支持快充，40分钟内将低电量充至95%；
- c) 气象监测模块，实时采集起降点风速、降水数据，并且在环境情况超出无人机负荷的情况下，中止起飞动作；
- d) 防盗、消防及安全设施。

C.1.7.2 机库软件

机库软件应满足以下要求：

- a) 任务调度系统，支持定时启动、事件触发启动、远程指令启动三种模式；
- b) 无人机状态监控，包括无人机传输信号状态、电池健康度、传感器校准状态、设备故障诊断；
- c) 自动气象决策，如风速 ≥ 12 m/s或降水时自动延迟任务。

C.2 数据传输与处理

C.2.1 数据预处理

C.2.1.1 时间-空间对齐

传感器或飞控软件/平台将传感器数据与精确的经纬度数据、时间戳进行匹配。

C.2.1.2 异常数据标注

传感器或飞控软件/平台自动赋予数据标志位，标注飞行过程中飞机或传感器出现故障报警时的数据。

C.2.2 数据传输与下载

C.2.2.1 实时传输

通过4G模块传输飞行数据、监测数据（时间、经纬度、高度、传感器监测浓度数据）和图片、视频至指定的数据处理平台。

C.2.2.2 数据下载

飞行结束后，可通过飞控软件/平台下载无人机存储的完整飞行数据、并且通过传感器配套软件提取气体原始数据。

C.3 安全保障

C.3.1 安全措施

- C.3.1.1 严格遵守无人机飞行法规，远离禁飞区、人口稠密区、机场。
- C.3.1.2 作业前进行详细风险评估。
- C.3.1.3 根据机型要求配备备用降落伞。
- C.3.1.4 购买足额无人机第三者责任险。

C.3.2 设备保障

- C.3.2.1 建立无人机、机库、传感器维护保养计划（日检、周检、月检、年检）。
- C.3.2.2 充足备用关键部件（电池、桨叶、传感器模块、增强图传模块流量等）。

C.3.3 应急预案

- C.3.3.1 设备故障/坠机时立即报告主管及相关部门，回收设备进行及时维修，必要时提供备用机，以确保监测工作日期进行。
- C.3.3.2 突发恶劣天气或信号丢失时，立即中止飞行，自动或手动返航降落。

C.3.3.3 遇电磁干扰时，自动切换备用频段，未能恢复操控的，自动返航降落或原地降落。
