

# 星地协同水质光谱在线监测系统及应用研究

张立福<sup>1, 2\*</sup>, 张琳珊<sup>1, 3</sup>, 孙雪剑<sup>1</sup>, 陈洁<sup>1, 3</sup>, 王飒<sup>1, 3</sup>, 张红明<sup>1</sup>, 童庆禧<sup>1</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;
2. 石河子大学, 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 随着城市化发展和经济增长, 水污染成为制约城市可持续发展的关键因素。传统的水质检测方法耗时长、容易造成二次污染, 水质在线监测可实现水质的自动、快速、实时、原位检测, 而卫星数据可为大范围、长时序的水质监测提供数据源。本文以中国内陆水体实时在线监测需求为出发点, 将水质光谱在线监测系统和多源遥感数据结合起来, 开展星地协同水质监测系统研发及应用研究, 同时与地面实时在线监测数据进行数据交叉验证, 提升长时序、大范围水域水质参数反演的精度和稳定性。作者团队基于光谱分析技术, 研制出固定式智能水质检测仪、便携高光谱智能水质检测仪。这些仪器设备可用于野外快速进行水质检测、非移动定点水质检测、固定浮标监测和大数据云服务平台系统应用。

**关键词:** 星地协同; 水质参数; 高光谱; 水质在线监测

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.01>

## 1 前言

水是生命之源, 水的质量直接关系到人类的生存与发展, 随着城市化发展和经济快速增长, 中国水资源的需求量不断增加, 水环境在一些地区不断恶化<sup>[1]</sup>, 水污染已成为制约城市可持续发展的关键因素<sup>[2]</sup>。“十九大”报告提出要坚持保护环境的基本国策, 因此有必要利用高新技术手段开展湖泊河流水污染研究, 及时、快速、全面地了解水环境和水污染状况<sup>[3]</sup>。

内陆水体水质监测的传统方式是实地采集水样, 带回实验室由专业人员通过专业仪器进行分析, 或者建设固定式监测站<sup>[4]</sup>。传统方法具有较高的检测精度, 但主要存在以下几个问题: (1) 成本高。从实地采样到实验室分析需要花费较多的人力物力, 而固定站点的建站成本和人力维护成本较高, 此外还有化学试剂的消耗等。(2) 造成二次污染。传统的水质检测以化学法为主, 检测过程中产生大量废弃物, 再处理困难。(3) 监测局限性。传统水质监测是非原位检测, 只能布设有限的采样点在特定的时间进行监测, 难以获取大范围水域的水质时空分布和变化情况。

收稿日期: 2020-12-10; 修订日期: 2021-01-25; 出版日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41830108, 41977154); 兵团重大科技项目 (2018AA004); 兵团重点领域创新团队 (2018CB004)

\*通讯作者: 张立福 F-4751-2014, 中国科学院空天信息创新研究院, zhanglf@radi.ac.cn

引用格式: 张立福, 张琳珊, 孙雪剑等. 星地协同水质光谱在线监测系统及应用研究[J]. 全球变化数据学报, 5(1): 1–10. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.01>.

水质光谱在线点位监测能够快速、实时、连续、无污染地获取水质参数信息，弥补了传统点位水质检测的不足，但在空间上存在不确定性，难以对大范围水域的水质展开快速高效的监测。卫星遥感由于监测范围广、速度快、长期动态监测的优势<sup>[5]</sup>，弥补了点位监测的不足，为大范围、长时序的水质监测提供了新的思路<sup>[6]</sup>。因此，将两者结合起来，进行星地协同水质光谱在线监测是我国内陆水质时空动态监测的新途径，地面水质光谱在线监测系统如何与卫星数据协同观测是研究的重点。本文结合我国内陆水体的水质监测需求，提出了卫星数据、航空数据和地面数据的光谱水质监测方式，以及星地协同水质光谱在线监测方案及关键技术。

2 光谱法水质监测方式

目前的水质监测数据源主要包括卫星数据、航空数据和地面数据。卫星数据包括多光谱数据和高光谱数据，航空数据主要包括有人机和无人机数据，地面数据主要使用便携式地物光谱仪。

2.1 卫星数据

水质监测早期利用多光谱卫星数据，例如美国的 TM、ETM+、OLI，法国的 HRVR，中国的 GF 系列等，其中 TM 数据应用最为广泛<sup>[7]</sup>。多光谱遥感数据的优势在于数据丰富，但光谱范围主要集中在可见光至近红外波段，一般只有 4–8 个波段，光谱分辨率通常为 20–70 nm，难以捕捉水体细微的光谱特征。高光谱数据由于丰富的光谱分辨率，为内陆水质监测提供了新的数据源，如高分五号<sup>[8]</sup>、珠海一号<sup>[9]</sup>等高光谱卫星已在水质监测中得到了广泛的应用。

利用卫星数据反演水质参数，通常需要对卫星遥感数据进行辐射校正、大气校正、几何校正、滤波等处理，获得研究区的遥感影像，结合实测水质参数，建立经验模型或半经验模型，其中使用的波段组合通常采用枚举比对的方法确定，因此模型的反演结果通常不稳定，鲁棒性不强<sup>[10]</sup>，卫星数据反演水质参数的流程如图 1。

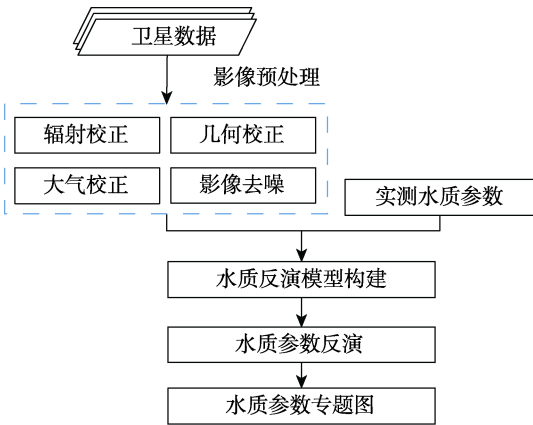


图 1 卫星遥感数据水质参数反演流程图

2.2 航空数据

卫星数据由于重返周期、空间分辨率和天气因素的影响，数据获取和后处理难度较大，特别是对于阴雨天气较多的地区尤为如此。随着高光谱硬件设备的不断小型化，基于有人机和无人机平台的高光谱遥感数据开始应用于水质监测领域<sup>[11]</sup>。与卫星遥感相比，航空遥感可根据实际需要选择飞行时间与飞行路线，由于飞行高度远低于卫星高度，因此可获取更高空间分辨率的影像数据，能够更好地反映水体的光谱和空间信息，从而提高水质监测的精度。目前主流的有人机载高光谱系统有澳大利亚的 HyMAP-C、美国的 Prob 系列、加拿大的 CASI/SASI/TASI、芬兰的 AISA+及我国的 PHI 等，基于无人机平台的高光谱设备主要有美国的 OCI、芬兰的 SPECIM、挪威的 HySpex 及中科院长春光机所、上海技物所、中科院空天信息创新研究院等自行研制的小型成像高光谱系统。

作者团队在 2017 年使用运 5 固定翼飞行平台，搭载自行研制的全谱段多模态成像光谱仪，完成了河北雄安新区白洋淀的水质航空高光谱遥感监测<sup>[12]</sup>，如图 2 所示。2018 年该研究团队利用六旋翼无人机平台，搭载小型推扫式高光谱仪，获取深圳茅洲河水域的高光谱影像，结合水质参数化验结果建立了反演模型，自动完成目标水体的水质参数反演，制作了整个区域的水质专题图（图 3）。

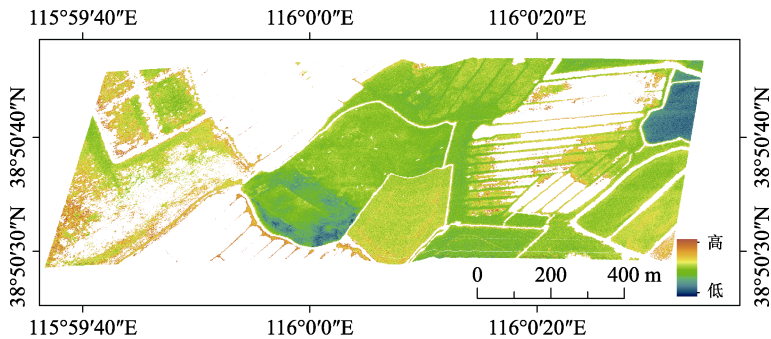


图 2 白洋淀悬浮物反演专题图

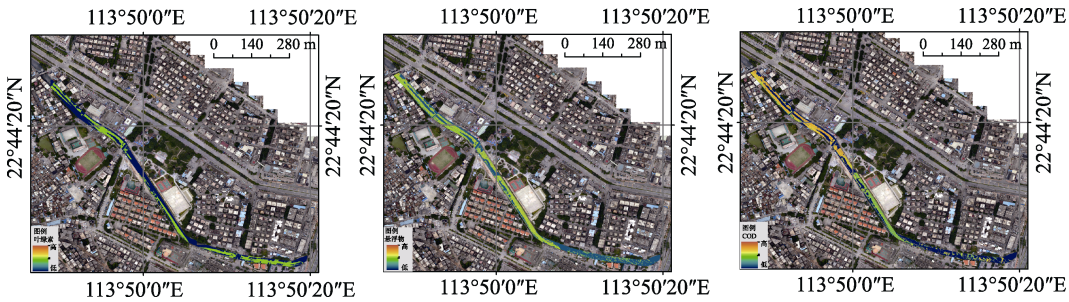


图 3 茅洲河水质反演专题图

与卫星数据不同，航空数据覆盖范围较小，因此在数据预处理时需要考虑几何纠正和拼接镶嵌，拼接时不仅需要考虑影像数据的几何一致性，还要顾及光谱一致性，避免同物异谱的情况，利用航空遥感数据反演水质参数流程如图 4 所示。

2.3 地面数据

当不需要获取影像数据时，野外便携光谱仪可灵活、低成本地获取地物光谱数据。目前主要的野外光谱仪生产厂家有美国海洋光学公司（Ocean Optics）、美国 ASD 公司、荷兰艾万提斯（Avantes）公司等，在国内应用较多的是美国 ASD 公司的 FieldSpec 4 便携式地物光谱仪、海洋光学的 USB4000 和 Torus 系列微型光谱仪。微型光谱仪虽然在分辨率和光谱测量范围等性能上无法和大型光谱仪器相比，但是具有便携化、智能化和集成化的优点，可实时显示野外现场采集的数据<sup>[13]</sup>。

利用地物光谱仪获取水体光谱时，需要测量水体、天空光和标准板，根据公式计算水体的遥感反射率，其中，气水表面反射率确定、毛细波的太阳直射反射、积分时间等都会影响获取的数据质量，影响水质参数反演精度<sup>[14]</sup>，利用地面数据监测水质参数流程如图 5 所示。

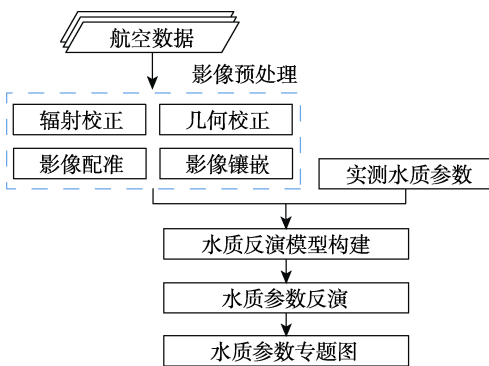


图 4 航空遥感数据水质参数反演流程图

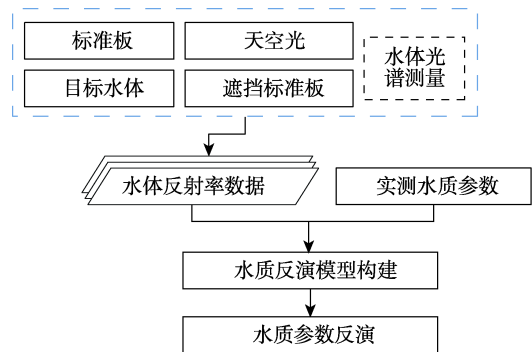


图 5 地面数据水质参数反演流程图

水质光谱在线检测能够实现自动、快速、原位测量，并且外部测量环境稳定，无需化学试剂、无二次污染，能够满足实时在线的水质监管需求，是水质监测的研究热点。中国科学院空天信息创新研究院高光谱研究团队研制的便携式智能水质检测仪和固定式智能水质检测仪，可以根据实时获取的水体光谱数据，建立多参数水质反演模型，实现水质的原位、快速、实时、无污染检测，已在多个研究区取得了较好的反演结果。

2.3.1 便携式智能水质检测仪

作者团队研制出国内首台便携高光谱智能水质检测仪“水色”，如图 6 所示。该系统基于光谱分析技术，可在野外快速进行水质检测，包括便携式智能水质检测仪、“水色”APP 操作软件和水质大数据云服务平台三部分<sup>[15]</sup>。

该设备通过蓝牙与智能手机连接，使用智能手机控制光谱采集设备进行光谱采集，采集的光谱数据通过 4G/5G 网络实时传输至大数据云服务平台，分析结果实时显示在智能手机终端，仪器参数如表 1 所示。

便携式智能水质检测仪具有小体积、全天候、高灵敏度、高分辨率、低功耗、高性价比的显著优势，并且可扩展性强，可以同时检测总氮、总磷、溶解氧、氨氮等十几个水质参数。与传统实验室水质分析相比，最大的技术突破是快速、实时、智能，可满足环保、水务等有关行业部门对河流、湖泊水质参数快速实时检测的需求。如图 7 为宁波某地水体

的总磷、总氮反演结果，预测值与实际值整体趋势保持一致，取得了较高的反演精度。



图 6 便携式智能水质检测仪

表 1 便携式智能水质检测仪参数

指标类型	参数
重量	<0.58 kg
尺寸	20 cm×10 cm×4 cm
波长范围	350–1,050 nm
光谱分辨率	优于 5 nm，最高可达 3 nm
光谱通道数	303 个
接口	蓝牙
连续工作时间	单节电池 2–4 个小时

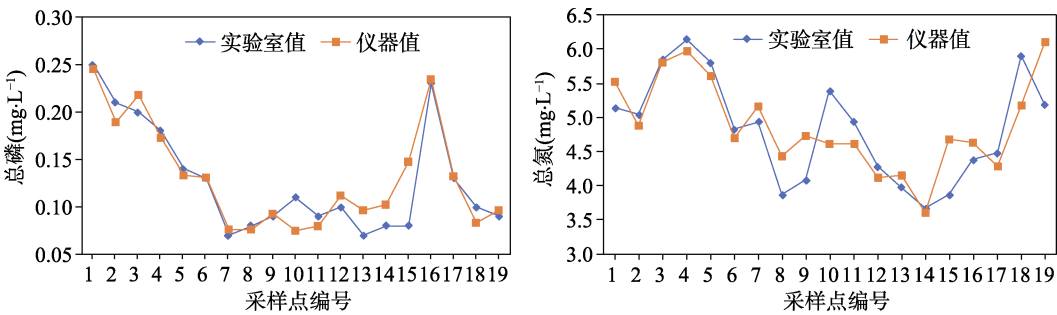


图 7 便携式智能水质检测仪系统检测值与实验室化验值精度对比图

2.3.2 固定式智能水质检测仪

作者团队研制的固定式智能水质检测仪是一款可应用于河流、湖泊、池塘等水域的非移动定点水质检测系统，包括 HyScan 微型智能光谱仪、固定浮标（浮筒等）和水质大数据云服务平台三部分，如图 8 所示，仪器参数如表 2 所示。



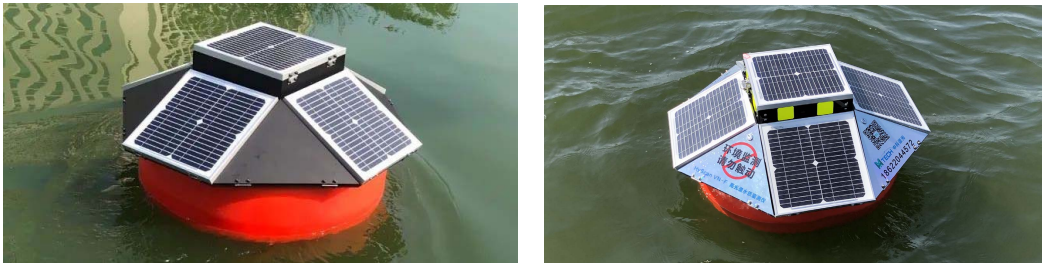


图 8 固定式智能水质检测仪

表 2 固定式智能水质检测仪参数

指标类型	参数
光谱范围	400–1,000 nm
供电	Micro USB/太阳能/可充电电池组
重量	20 kg
尺寸	< 80 cm×80 cm×50 cm
光谱仪	400–1,000 nm/400–1,700 nm
采集频次	30 分钟采集一次，每次采集 10 个数据，可连续工作 3 个月以上

固定式智能水质检测仪可以自由调节采集频率、采集时间，最高可达每 5 秒采集一次光谱数据，可以自动反演多种水质参数，实现数据实时传输，支持云端数据存储和实时显示及统计分析，数据可以实时传输至大屏幕、iPad 终端和手机终端等，可随时随地查看水质状况。图 9 为某布设站点的实测数据精度分析，各水质参数预测值与真实值整体变化趋势一致，可较好地展示水质变化情况。

3 星地协同水质光谱在线监测方案及关键技术

3.1 星地协同水质光谱监测方案

遥感水质参数反演模型的构建严重依赖水质观测样本，这会造成反演模型的不稳定，建立星地协同的水质光谱在线监测机制，可以提升水质参数反演的稳定性和精度，实现大范围的水质监测和时空分析，为我国长时序的水质监测提供新方法。

图 10 为星地协同水质光谱在线监测系统整体方案，卫星数据为最佳组网方式、最佳采样频次和最佳观测时刻的选择提供依据，地面系统提供水质参数数据和地面实测光谱数据，将上述数据传输至大数据云平台，利用云平台中存储的地面水质参数样本、卫星遥感数据和水质参数反演模型实时反演水质参数，在终端上显示地面网点的实时监测结果和卫星数据水质反演产品。

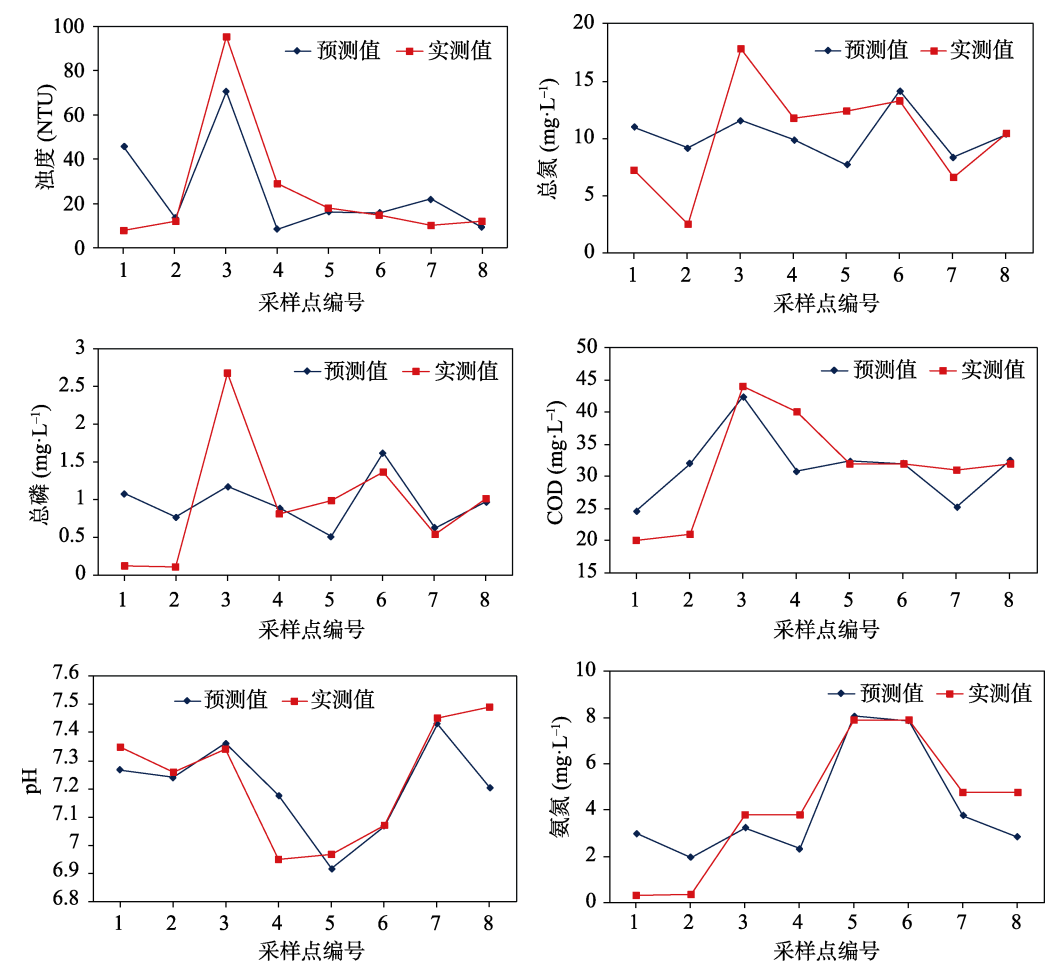


图 9 试验布设站点的实测数据精度分析图

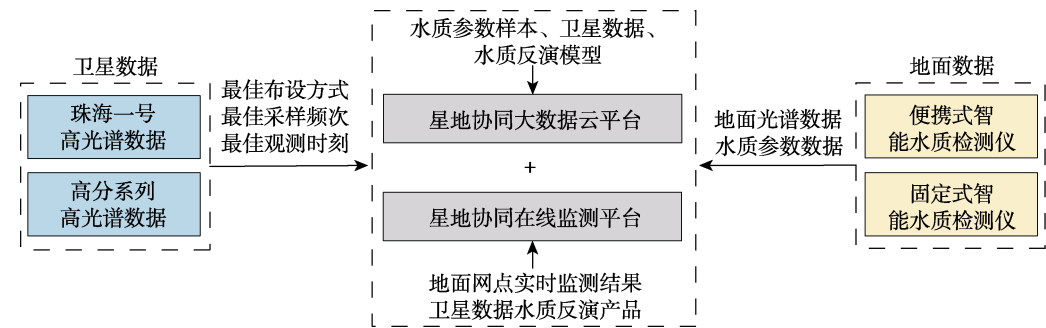


图 10 星地协同水质光谱在线监测系统方案图

### 3.2 星地协同水质监测关键技术

#### 3.2.1 反演模型智能选择

不同时空分布下的水体光谱曲线差异较大，因此有必要对水体进行分类，针对不同的水体类型分别建立反演模型，提高水质参数的反演精度。水质参数反演模型是水质光谱在

线监测系统设计的关键，系统拟采用两种模式进行反演，分别是基于地理坐标的地理邻近模型和基于水体光谱匹配的相似水体类型模型，具体反演流程见图 11。

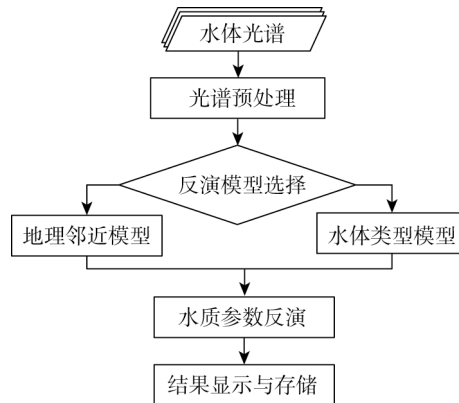


图 11 反演模型选择流程图

系统水质参数反演基本流程为：通过系统光谱仪测量水体光谱，水体光谱传输至智能分析云平台，水体光谱预处理之后，按照选择的水质反演模型反演水质参数，并将反演结果传输回终端，同时在云平台存储备份。目前系统的水质反演模型包括以下两种方式：

#### （1）地理邻近模型选择

系统根据测量点 GPS 定位信息自动识别并判断出与该点地理邻近的水质反演模型，并应用此模型进行该测量点的水质反演。当卫星过境时，卫星数据处理系统自动搜索与待测区域水体地理临近的水体，结合水质在线监测设备提供的地面网点水质参数，通过系统预置的水质参数反演算法，实时反演水质参数，在终端显示实时监测结果和卫星数据水质参数反演产品。

#### （2）水体类型模型选择

即根据待测点的水体光谱，按照水体类型分类方法自动匹配到云平台中已有的各水体类型，反演该点的水质参数。系统中目前采用的水体类型分类方法为 NTD675 (Normalized trough depth at 675 nm)，不同类型的水质反演模型将在今后的研究与应用中不断扩展，可根据实际需要选择不同的水质反演模型。

### 3.2.2 时间尺度智能匹配

复杂水域的水质情况可能在几个小时之内发生变化，每天观测一次的频率不足以完全反应水质的时空变化情况，因此有必要研究水质监测的最佳观测时间和最佳采样频次，使地面网点在时间尺度上实现最佳观测（图 12），同时可为后续高光谱水色卫星的观测频次和过境时间设计提供依据。

通过将固定式智能水质检测仪获取的高频次观测数据进行重采样，进行统计学分析，如最大值、最小值、均值、方差等，并统计其日变化、周变化、月变化特征，通过半变异函数进行水质参数反演。



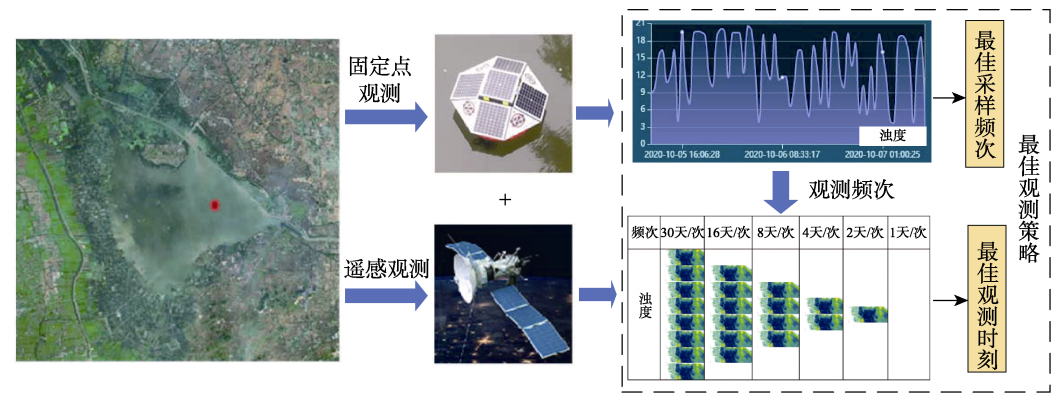


图 12 时间尺度智能匹配图

3.2.3 空间尺度优化

地面的水质监测数据是点位数据，湖泊河流的不同位置水质情况存在差异，如果采样点位布设没有代表性，反演结果不能代表整个区域的水质情况，因此需要设计固定式智能水质检测仪点位的最佳布设策略。在大范围布设时，需要根据水体类型和地理空间相关性，使布设点位包含不同的水质类型，同时要根据不同湖泊和河流的形状特征，合理布设点位（图 13）。

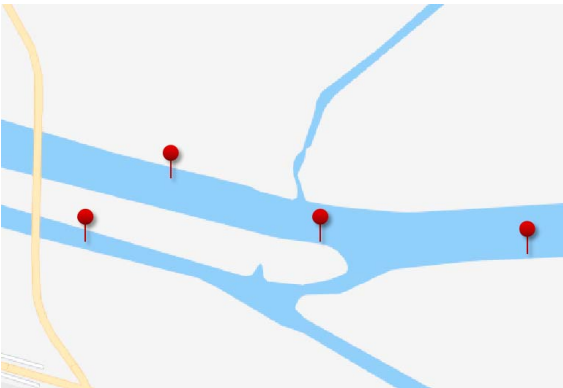


图 13 固定式水质检测仪最佳布设位置示意图

4 讨论和总结

水质光谱点位在线监测系统能够快速、实时的获取点位水质参数，但无法大面积监测水域的水质情况，卫星遥感数据弥补了点位观测数据的不足，可以快速、及时的获取大范围水质数据。本文以中国内陆水体水质监测需求为出发点，将两者结合起来，开展星地协同的内陆水质在线监测研究，可以挖掘地面数据和遥感数据在时间尺度和空间尺度方面的优势，有效提升大范围水质参数监测的精度和稳定性。

地面水质监测数据如何与高光谱卫星数据协同观测是关键问题，未来的研究重点主要集中在以下几个方面：（1）内陆水体分类模型研究。目前国内外没有适用于所有水体且精

度较高的反演模型, 不同时空分布下的水体光谱曲线差异较大, 因此有必要对水体进行分类, 分别建立不同的反演模型, 提高水质参数的反演精度。(2) 最佳观测频次研究。针对中国典型内陆水体开展水质最佳观测频次研究, 通过水质在线监测数据协同卫星过境时间, 对反演模型进行评估、验证和纠正, 提高水质反演模型的精度和稳定性, 并为后续高光谱水色卫星的过境时间设计提供依据。(3) 固定点位布设策略研究。基于固定点位的地理空间相关性, 以及水体分类结果和水质参数监测结果, 对中国典型内陆水体监测的空间尺度进行分析, 结合卫星数据制定固定点位的最佳组网布设策略。

**作者分工:** 张立福设计研究, 并撰写论文; 张琳珊采集和处理研究数据, 参与撰写初稿; 孙雪剑设计模型, 组织实验; 陈洁做数据验证, 参与撰写初稿; 王珮收集了相关资料等; 张红明补充了相关内容; 童庆禧审阅了全文等。

**利益冲突声明:** 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] Chen, G., Luo, J., Zhang, C., *et al.* Characteristics and influencing factors of spatial differentiation of urban black and odorous waters in China [J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4747.
- [2] 王谦, 高红杰. 我国城市黑臭水体治理现状、问题及未来方向[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(3): 507–510.
- [3] 申茜, 朱利, 曹红业. 城市黑臭水体遥感监测与筛查研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3433–3439.
- [4] 侯迪波, 张坚, 陈冷等. 基于紫外-可见光光谱的水质分析方法研究进展与应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(7): 1839–1844.
- [5] Shi, K., Zhang, Y., Zhu, G., *et al.* Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250 m MODIS-Aqua data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 43–56.
- [6] Song, K., Li, L., Tedesco, L. P., *et al.* Remote estimation of chlorophyll-a in turbid inland waters: three-band model versus GA-PLS model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 342–357.
- [7] 姜腾龙, 张水燕, 丁程程等. 基于 Landsat 系列卫星分析 1985-2015 年东平湖叶绿素 a 浓度变化趋势[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(2): 137–144.
- [8] 韦安娜, 田礼乔, 陈晓玲等. 基于穷举法的鄱阳湖叶绿素 a 浓度高光谱反演模型与应用研究——以 GF-5 卫星 AHSI 数据为例[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 54(3): 447–453.
- [9] 李爱民, 夏光平, 齐鑫等. 珠海一号高光谱遥感的郑州天德湖水质 CDOM 反演方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2020, 37(4): 388–391, 397.
- [10] Wang, G. Q., Lee, Z. P., Mouw, C. Multi-spectral remote sensing of phytoplankton pigment absorption properties in cyanobacteria bloom waters: a regional example in the western basin of Lake Erie [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 302–302.
- [11] 邹凯, 孙永华, 李小娟等. 基于无人机遥感的水质监测研究综述[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(S2): 69–75.
- [12] 岑奕, 张立福, 张霞等. 雄安新区马蹄湾村航空高光谱遥感影像分类数据集[J]. *遥感学报*, 2020, 24(11): 1299–1306.
- [13] 于新洋, 卢启鹏, 高洪智等. 便携式近红外光谱仪器现状及展望[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(11): 2983–2988.
- [14] 唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 37–44.
- [15] 陈瑶. 便携式水质光谱在线检测系统设计及指标优化[D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2019.