

大气生态环境动态监测与预警机制探究

刘龙龙 万艺芳

奎屯市环境保护监测站 新疆 奎屯 833200

【摘要】：大气生态环境质量同区域生态安全以及公众健康有着直接的关系。新疆地势广阔，地形崎岖，沙尘天气多发，工业污染源和自然扬尘相加，给大气环境监测带来很大的困难。本文就新疆大气环境监测过程中出现的站点少、预警慢、多源数据整合不好的问题，提出了一种利用天基遥感、空基无人机、地基传感器网来构建动态监测体系的架构。根据颗粒物、气态污染物、沙尘暴等主要要素来构建起数据采集、实时传输、同化分析以及风险预警的全流程技术体系，重点对物联网边缘计算、数据同化模型、污染溯源算法、可视化预警平台的集成应用进行研究。通过研究可以得出，新疆全域形成了多层次、大范围、动态化的气象环境监测预警系统，能够提高区域大气污染、生态安全的保障能力，为区域大气污染防治和生态安全防范提供技术支持。

【关键词】：大气生态环境；动态监测；预警机制；物联网；数据同化；新疆

DOI:10.12417/3041-0630.26.08.058

1 引言

大气生态环境质量属于评价区域可持续发展水平的指标之一。新疆处于亚欧大陆腹地，四周被高山所环抱，盆地广阔，气候干燥，扬尘、沙尘暴经常发生。同时随着天山北坡经济带以及“乌-昌-石”区域工业的集聚，燃煤、机动车尾气、工业排放等造成的细颗粒物和臭氧污染问题也越来越严重^[1]。大气污染存在跨区域性、突发性、复合型等特点，传统的固定站点加人工采样的方式不能对大范围、动态变化的大气环境进行实时感知和早期预警。以物联网、遥感、无人机等为代表的新一代信息手段为基础，开展动态观测并发出警报的途径，是提高大气环境管理水平的主要途径^[2]。

2 新疆大气生态环境特征及监测困境

2.1 大气环境主要问题与时空分布特征

新疆大气污染有很强的时空异质性。春季（3-5月）以沙尘天气为主，塔克拉玛干、古尔班通古特沙漠是主要的沙尘源地，沙尘气溶胶可以影响到数万平方公里，造成PM10浓度突然上升，年均沙尘日数新疆可达30-60天^[3]。冬季（11月至2月）天山北坡城市群由于逆温层和静稳天气，燃煤采暖排放的二氧化硫、氮氧化物、颗粒物不能扩散，重污染天气频繁发生，乌鲁木齐、昌吉、五家渠等地PM2.5浓度经常超过150微克/立方米。夏季臭氧污染问题越来越突出，在光化学反应比较强烈的时候，尤其是午后时段^[4]。

2.2 现行监测技术短板

目前新疆大气监测主要依靠固定式自动监测站，技术短板有以下几个方面，①设备价格昂贵、维护费用高、抗低温（-30℃以下）、抗强风沙的能力差，冬季设备故障率高；②监测指标以常规六参数（SO₂、NO₂、CO、O₃、PM10、PM2.5）为主，缺少对重金属、挥发性有机物、沙尘矿物成分等特征因子

的在线监测能力；③数据实时性差，部分站点仍然使用定时人工巡检的方式，数据上传频率低，不能满足动态预警的要求；④沙尘暴监测手段落后，主要依靠气象部门雷达、卫星云图，缺少与空气质量监测数据的深度融合，造成对沙尘暴强度、移动路径、健康影响的评估滞后；⑤多部门（环保、气象、林草）的监测数据没有统一的标准和共享机制，形成了信息孤岛，不能发挥综合优势^[5]。

2.3 预警能力的薄弱环节

现有的大气污染预警主要是依靠空气质量指数和气象预报来完成的，存在如下不足之处，一是预警提前量小，对于沙尘暴的预警提前时间一般在2到6个小时，不能给学校停课、工地停工等应急措施留出足够的时间；二是预警阈值固定，没有考虑到人群敏感性以及暴露风险的不同；三是缺少了污染源追踪以及扩散模拟的功能，不能准确地找到排放源；四是缺少跨区域联动预警机制，跨境沙尘、省际传输的协同应对能力差。具体如下表1所示。

表1 新疆大气生态环境监测与预警体系主要问题

维度	具体表现	影响程度
站点布局	城市布设密集，荒漠/农牧区覆盖空白，边境监测薄弱	高
监测指标	以常规六参数为主，缺乏颗粒物组分、VOCs等特征因子监测	高
设备适应性	低温（<-30℃）、强风沙环境下故障率高，运维难度大	中
数据共享	生态环境、气象、林草部门数据标准不一、系统不联通	高

预警能力	沙尘暴预警提前量仅 2 - 6 小时， 缺源解析与扩散模拟支撑	高
跨境合作	尚未建立与哈萨克斯坦、吉尔吉斯 斯坦等中亚国家的数据交换机制	中

(注：续表 1)

3 大气动态监测体系构建

3.1 “天-空-地”一体化监测网络设计

根据新疆地区广大、站址稀少的特点，采取天、空、地三层监测的方式。天基层用静止轨道卫星（Himawari-8/9、FY-4）每天 10 分钟一次获得沙尘和高分辨率气溶胶光学厚度产品，极轨卫星（MODIS、VIIRS、FY-3）每天可以得到全球和区域 PM_{2.5}、NO₂ 等柱浓度反演产品，达到宏观污染监测和沙尘暴识别的效果。空基层是在沙尘暴高发区以及重点工业园区，使用长航时无人机携带微型光谱仪、激光雷达、颗粒物传感器等设备，对某地进行定点巡航和应急加密观测。无人机可以在沙尘暴到来之前出发，得到垂直剖面气溶胶的消光系数以及化学成分，填补了地面站点、卫星之间所留下的尺度空白。地基层是采用成本低、多参数微型大气监测站，使用光散射、电化学传感器技术，可以同时监测 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO、O₃、气象五要素。微型站体积小、功耗低，可以用太阳能供电、4G/北斗通信在没有电网的地方灵活部署。优先在塔克拉玛干沙漠边缘、准噶尔盆地南缘、伊犁河谷和边境口岸等重点地区设置 100 个以上的微型站，和现有的国控站相补充。

3.2 物联网与边缘智能采集系统

传统的气象观测数据采集方式存在传输滞后、功耗大、中心服务器压力大的问题。采用物联网边缘计算架构，每一个监测节点都配有一台低功耗的 STM32 或者 ESP32 微控制器来采集原始传感器数据，并对数据做初步的质控（剔除异常值、零漂校正），用 LoRa 或者 NB-IoT 低功耗广域网络把数据传送到区域网关。网关处于县市级环境监控中心之中，承担起数据融合、格式转换以及短期存储的任务，所用的为轻量级的机器学习算法（随机森林，XGBoost 等等），用来完成对于本地数据即时的异常检测与缺失值填补的工作。只有经过边缘处理的关键数据（小时均值、超标报警等）才会上传到自治区级的大数据云平台。

3.3 基于多源数据同化的区域大气场重构

通过利用卫星气溶胶光学厚度产品、地基 PM₁₀、PM_{2.5} 浓度数据，用时空地理加权回归法、随机森林模型结合生成逐小时 1km 网格的颗粒物浓度分布图来填补站点间的空白区。采用 WRF-Chem 模型，在沙尘暴发生的时候用三维变分或者集

合卡尔曼滤波方法把卫星和地面观测数据加到预报当中去，从而提高沙尘暴强度、移动路线和沉降区域的预报精度。数据同化系统每 3 小时就会进行一次预报，得到未来 24 小时内沙尘浓度的预报结果，给预警提供支持。根据气象要素（风向、风速、边界层高度）用 HYSPLIT 后向轨迹模型算出气团来源及传输路径，找到污染物的分布区。

4 大气污染预警机制与关键技术

4.1 多级阈值与动态风险评估预警模型

抛弃单一种类的固定阈值预警方式，创建起依靠健康影响以及暴露动态变化的多级风险预警体系。首先用广义相加模型来分析历史空气质量数据和急救中心呼吸系统就诊量、死亡率之间的关系，得到各个季节、各个人群的暴露—反应系数。最后制定四级预警标准，蓝色（关注级）未来 24 小时内 PM_{2.5} 或者沙尘浓度会达到环境空气质量标准的 1.5 倍；黄色（警告级）PM_{2.5} 或者沙尘浓度会超过 2 倍；橙色（严重级）PM_{2.5} 或者沙尘浓度会超过 3 倍并且持续 12 小时；红色（极严重级）PM_{2.5} 或者沙尘浓度会超过 4 倍并且伴有强沙尘暴。根据卫星云图、雷达回波以及地面能见度等数据，用光流法计算出沙尘锋面移动速度，并预测出它何时会达到各个行政区，提前 4—12 小时发出预警。预警信息经由手机短信，社区大屏，广播，公众号等途径向受到威胁的地区群众以及应急管理部门发出。

4.2 污染溯源与情景模拟技术

对于工业点源和扬尘面源，用受体模型（PMF）和空气质量模型（CMAQ）相结合的方式来进行源解析和贡献率的评价。当 PM_{2.5} 或者 VOCs 的浓度出现异常上升的时候，通过反向轨迹聚类以及潜在源贡献函数来找出污染物的可能来源地。针对重点工业园区（甘泉堡、米东、独山子）建设厂界微型监测网和特征污染物指纹谱库，用比对、相关性分析的方法找出异常排放企业。另外开发出一个随机森林污染情景模拟工具，用气象预报和排放清单做输入来模拟不同的减排方案对污染物浓度的影响，并且可以给出临时控制措施（限产、停工、限行）的建议。

4.3 跨区域联防联控预警平台

依靠自治区生态环境大数据中心来创建起跨部门、跨地市、跨境的大气预警协同平台。平台可以接入环保、气象、林草、应急管理各个部门的数据，还可以接入相邻省份（甘肃、青海）、其他国家（哈萨克斯坦、蒙古等）的有限空气质量数据。当预测到沙尘暴或者重污染天气会影响到多个地州的时候，平台就会启动联防联控会商程序，形成统一的指令，协调各个区域同时执行应急措施（学校停课、停止露天作业、增加洒水次数等）。对跨境沙尘来说，平台同中哈环保合作机制一样，把监测、预报的结果分享出来，一起对付。可视化展示模

块用 GIS 地图叠加污染浓度动态色斑、污染轨迹线、预警区域，达到一张图指挥的目的。

5 数据整合与可视化决策平台

5.1 大数据平台架构设计

创建一个以大气生态环境大数据为中心，包含两个网络和三个体系的大气生态环境大数据平台。一中心指的是自治区大气生态环境大数据中心，它对多源数据进行汇聚、治理、存储和分析。两网指监测感知网（地面站、无人机、卫星）和业务协同网（环保、气象、卫生等各个部门之间互联互通的网）的两网。三体系指的是标准规范体系（数据采集、传输、接口标准）、安全保障体系（数据加密、访问控制、备份恢复）以及运维管理体系。平台使用 Hadoop 或者 Spark 分布式计算框架，可以处理 PB 级别的数据。数据库使用时序数据库（TDengine）来保存高频传感器的数据，PostgreSQL 用来保存空间数据以及业务台账，HBase 用来保存非结构化的文档和图像。

5.2 数据融合与智能分析模块

数据融合模块是对不同的来源、格式、时空分辨率的数据进行标准化处理的模块。具体有时间对齐（统一时间戳），空间匹配（把站点数据插值到网格），数据质量控制（极值剔除，时间一致性检验）。在此基础上设计出以下智能分析工具，① 大气污染趋势分析用 STL 分解法提取出季节、趋势、残差分量，

自动找到污染突变点；② 沙尘暴自动识别用深度卷积神经网络把卫星云图上的沙尘云团分类出来，然后定量估计它的面积和光学厚度；③ 污染贡献评估用机器学习（随机森林）来量化气象条件、本地排放和区域传输对污染的相对贡献。所有的分析结果都以 REST API 的形式被上层应用所调用。

5.3 可视化与公众服务

面向管理人员，开发驾驶舱大屏来显示全疆实时的 AQI 分布、首要污染物排名、未来三天的预报以及预警的状态。利用地图交互可以进入任意一个监测站点的分钟级数据曲线和历史对比当中。创建面向公众的微信小程序“新疆大气健康”，可以获取当前所在位置的空气质量情况、健康提示（敏感人群减少户外活动）、沙尘天气预报及防护措施。每年度发布一份《新疆大气生态环境监测年报》，公布本年度的污染情况、沙尘天气的统计资料以及治理效果等信息，从而提高群众参与度和监督力度。

6 结论

新疆大气生态环境动态监测与预警体系创建的时候，应当由原来的“点状监测”变为“面域感知”，由原来的“人工判断”变成“智能预警”。本文提出的一种以天、空、地为一体的监测网络、物联网边缘智能采集、多源数据同化和分级预警模型等技术方案，可以较好地解决新疆地区大、气候恶劣造成监测难的问题，提高沙尘暴、重污染天气的预测预警能力。

参考文献：

- [1] 魏晓霜.基于遥感技术的水体污染动态监测与预警机制研究[J].车时代,2025(2):265-267.
- [2] 薛超浩.环境监测数据大模型驱动污染预测与预警机制优化[J].皮革制作与环保科技,2025,6(20):64-66.
- [3] 张普及,聂国良,杨柳,等.基于“天空地”一体化监测的精准预警与科学溯源协同防控机制研究[J].甘肃科技纵横,2025,54(11):34-39.
- [4] 徐强.人工智能助力大气污染动态监测与预警体系创新[J].工程建设与技术,2025(9).
- [5] 郭世民,郭梓蕻.生态环境监测技术在大气污染防治中的应用研究[J].区域治理,2026(6):0106-0108.