

大数据与无人机驱动下的AI环境执法新模式

陈姝洁

巴彦淖尔生态环境监测监控中心, 中国·内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘要: 传统环境执法面临着监管范围狭窄、取证难度高、响应不及时等瓶颈, 难以契合复杂多变的生态环境治理需求。由数字环保战略引领, 大数据、无人机与人工智能(AI)技术深度结合, 搭建起“空天地一体化”新型环境执法体系。本文根据技术协同原理, 探究大数据海量数据处理能力、无人机立体巡查优势与AI智能分析特性在执法全流程中的应用机制; 并采用生态环境部通报的典型案例, 将新模式实践路径与执法效能具象化呈现; 最后探究当前技术应用中数据安全、算法偏见、法律适配等方面的挑战, 继而提出优化策略, 为生态环境执法的数字化转型提供理论支撑与实践借鉴。

关键词: 大数据; 无人机; AI; 环境执法; 协同治理

New AI-driven environmental law enforcement model powered by big data and drones

Chen Shujie

Bayannur Ecological Environment Monitoring and Control Center, China Inner Mongolia Bayannur 015000

Abstract: Traditional environmental law enforcement faces bottlenecks such as narrow regulatory scope, high difficulty in obtaining evidence, and delayed response, making it difficult to meet the complex and ever-changing needs of ecological environment governance. Guided by the digital environmental protection strategy, big data, unmanned aerial vehicles (UAVs), and artificial intelligence (AI) technologies are deeply integrated to establish a new "air-ground-space integrated" environmental law enforcement system. Based on the principle of technological synergy, this paper explores the application mechanisms of big data's massive data processing capabilities, UAVs' three-dimensional inspection advantages, and AI's intelligent analysis characteristics throughout the entire law enforcement process. It also utilizes typical cases reported by the Ministry of Ecology and Environment to visually present the practical path of the new model and the effectiveness of law enforcement. Finally, it explores challenges in current technology applications such as data security, algorithmic bias, and legal adaptability, and proposes optimization strategies to provide theoretical support and practical references for the digital transformation of ecological environment law enforcement.

Keywords: Big data; Drone; AI; Environmental law enforcement; Collaborative governance

0 引言

伴随工业化与城市化进程的加速, 环境污染凸显出隐蔽、跨区域、复合型等新特征, 传统“人海战术”“拉网式排查”执法模式渐次暴露出短板: 地面巡查难以覆盖山地、水域等复杂区域, 人工监测数据存在滞后性、精准度不高的问题, 违法企业“昼停夜排”“偷排偷放”等行为难以实现有效追责。《关于进一步规范生态环境执法助力优化营商环境的意见》明确指出, 要增强科技赋能力度, 推动执法从“人海战术”到“智慧执法”、从“主要依靠人防”到“优先采用技防”的转变, 为新技术与环境执法的融合提供政策指引。大数据、无人机与AI技术协同应用, 冲破传统执法的时空限制与信息梗阻, 三者形成“采集—处理—分析—决策”的闭环执法架构, 催生精准化、高效化、智能

化的环境执法新模式。本文结合真实案例, 系统分析该模式的技术架构、实践路径及优化方向, 推动生态环境治理体系迈向现代化。

1 大数据与无人机驱动下 AI 环境执法的技术协同机制

1.1 核心技术支持与功能定位

三者融合并非只是技术的简单叠加, 而是组成功能互补、协同联合的有机整体, 各自承担执法流程的核心角色。无人机好比“空中探头”, 摆脱地面执法的空间局限, 搭载多光谱传感器、热成像仪、高清摄像头等器件, 能对工业园区、河流流域、山地林地等区域开展低空巡弋飞行, 实时采集影像类数据、污染物浓度数据、企业生产工况等讯息, 解决传统执法里“看得到、够不着”的难题。其巡

飞数据具有实时、直观、全范围覆盖的特性,为执法取证提供第一手资料^[1]。

大数据技术充当“数据中枢”,承担多源数据汇聚整合与深度挖掘任务。执法数据的获取来源包括无人机巡飞数据、地面监测站实时数据、企业排污许可数据、用电工况数据、气象数据、地理信息数据等。通过分布式存储、数据脱敏、关联分析等技术,剔除冗余内容、矫正数据误差,构建起标准化执法数据库。大数据技术可挖掘数据间的潜在关联,例如将企业用电数据与排污数据关联分析,识别“生产设施运行但治污设施停止运行”的违法线索,为 AI 分析提供高质量的数据支撑。

AI 技术好似“智能大脑”,依靠机器学习、计算机视觉、自然语言处理等算法,实现执法数据的智能剖析与决策辅助支持。经过对海量标注数据的训练,AI 模型可自动辨识无人机影像中排污口、污染物扩散痕迹、违法搭建厂房等目标,精准抓取违法证据;基于 LSTM、GCN 等时序及空间预测模型,能实现对空气质量、污染物扩散走势的精确预判,为执法早期预警提供支持;依靠智能化研判系统,自动筛选高风险企业与区域,提升执法资源配置的合理性,做到“靶向式执法”^[2]。

1.2 技术协同的执法闭环构建

新模式经由“事前预警、事中取证、事后溯源”实现全流程协作,构建闭合式执法体系。大数据平台把历史执法数据、实时监测数据与企业排污档案整合在一起,AI 模型对数据做深度挖掘,认定企业违法风险等级,给出高风险区域及企业清单,无人机以清单为依据制定针对性巡飞计划,实现执法预先告警;无人机按照预先设定的航线开展巡飞,实时传送影像与监测相关数据,AI 系统同步对数据加以分析,自动识别违规举动并及时发出预警,执法人员结合 AI 得出的研判结果开展现场核查,通过无人机航拍固定影像证据,达成“非现场预警+现场精准核查”的高效对接;大数据平台把执法全过程的数据记录下来,AI 模型对违法案例实施归类分析,总结同类企业的违法规律,形成执法整改思路,同时对企业整改进度进行跟踪,实现执法效果的闭环式管控。

2 大数据及无人机驱动下 AI 环境执法新形态的实践方法与案例分析

2.1 实践路径拆解

新模式推广按照“技术赋能—流程再造—效能提升”逻辑,对环境执法流程进行重构。执法相关准备阶段,依靠大数据建模完成风险评估及区域划分,利用 AI 算法优

化无人机的巡飞航线与监测点位,保证巡飞覆盖既精准又高效,缩减无效的巡查活动;数据搜集阶段,无人机达成“空中+地面”联合采集,多光谱传感器采集水体、土壤污染物光谱特点,热成像仪识别出隐蔽排污口的温度异样,高清摄像头记录企业的生产及排污场景,数据迅速上传至大数据平台;数据集中分析阶段,AI 系统在影像数据上进行目标检测及语义分割,自动萃取出违法特征,从监测数据里识别异常现象,依靠大数据关联分析锁定违法主体与行为;执法处理阶段,执法人员利用 AI 生成研判报告,靠无人机固定证据,实施精准执法行动,同时借助大数据平台跟进整改落实情况,达成“查处—整改—复核”全流程的把控^[3]。

2.2 案例分析

案例一:借助无人机、AI 与大数据查处非法排污企业案。

2021 年 4 月,某生态环境局凭借无人机巡飞系统,每半月对工业园区入河排污口附近区域进行低空巡飞工作。搭载多光谱传感器的无人机对目标流域实施全覆盖扫描,采集流域影像及水质光谱相关数据,实时报送至大数据平台。AI 系统借助深度学习的语义分割算法,自动识别影像里“厂房周边异常排污沟渠”“水体颜色异常区域”这类特征,将历史水质监测数据跟地理信息数据结合起来,最终锁定了周边疑似非法排污的 3 家企业。

执法人员按照 AI 研判线索开展现场核实,查清楚塑化包装厂等 2 家企业未办理环评手续、无任何污染治理方面的设施、废旧塑料清洗后的污水直排石碧溪、VOCs 表现为无组织排放等情形;此外,当地某机制沙厂把洗沙废水直排到流域。执法人员凭借无人机航拍,固定厂房布局、排污口位置、废水排放轨迹等影像证据,佐证企业违法生产这一事实。执法部门按相关法律对 3 家企业立案查处,实施查封并要求拆除机件,实现了流域生态的恢复。该案凭借无人机冲破地形阻碍,达成全覆盖巡查;AI 精准辨认隐蔽的排污迹象;大数据把违法证据链给锁定,仅仅用 2 天就实现从线索发现到现场处置全流程,跟传统执法效率比起来,提升了 80% 以上,有效应对山区流域排污监管难题。

案例二:陆海统筹协同系统(大数据+AI+无人机)解决干扰自动监测设施案。

某生态环境局搭建起陆海统筹环境执法大数据平台,将重点排污企业在线监测、无人机巡飞、海洋环境监测、船舶航行等方面的多源数据进行整合,并通过 AI 系统打

造异常数据识别模型，实时监测企业排污数据，进而分析其趋势。2021 年 4 月，平台运用 AI 算法察觉到当地某环保工程有限公司在线监测数据有异常现象：从傍晚至凌晨，废水排放量大幅增大，然而污染物浓度一直处于较低水平且维持不变。

执法部门迅速调度无人机针对该企业开展夜间专项飞行巡查。装有热成像仪的无人机捕捉到企业污水处理站附近温度不正常，高清摄像头记录到工作人员在监测设备旁的异常举动。AI 系统把在线监测数据与无人机影像进行关联分析，初步判定企业有干扰自动监测设施的违法操作。执法人员实施联合快速检查，当场发现企业把装清水的矿泉水瓶放入自动监控设备采样管，造成监测数据与实际不符的违法事实，同步经由大数据平台调取企业近期生产台账与废水处理记录，形成一个完整的证据闭环。该案件借助大数据 +AI 对异常线索进行精准研判，无人机克服夜间执法的局限实现证据固定，解决了“数据造假”类违法行为取证难的问题。

2.3 执法模式效能量化对比

为精准表露新模式的技术赋能价值，根据《日照市生态环境行政执法统计年报》与案例量化指标，制定以下核心效能对比表格：

对比维度	传统执法模式	AI+大数据+无人机模式
日覆盖面积（km ² ）	5-10（人均）	50-100（单机）
单案处置时长	24-48小时	2-6小时
违法识别准确率	60%-72%	90%-95%
月均违法线索量	10-20条	50-80条
人均执法效率（件/月）	3-5件	15-20件
证据采信率	75%-85%	≥98%
单次执法成本（元）	800-1200元	300-500元
夜间执法覆盖率	<30%	≥95%

3 新模式应用中的现存挑战

3.1 数据层面：共享壁垒及质量缺陷

大数据执法离不开多部门数据的协同，但现今环保、工信、水利、气象等部门的数据壁垒还未完全消除，数据格式不统一、共享机制不配套，造成执法数据覆盖不全面，导致 AI 模型研判的精度下降。无人机采集数据受天气、地形的影响较为明显，存在影像模糊、光谱数据偏差的问题；某些企业存在篡改排污数据、捏造生产台账的行为，致使数据的真实性无法保障。数据存储与传输阶段安全风险凸显，执法数据囊括企业商业秘密与敏感地理信息，极易面临数据泄露、篡改等风险，目前尚无成熟的数据安全管控架构。

3.2 技术层面：算法存在偏见及适配性不足

AI 算法的训练依赖大量标注数据，就当前环境执法领域而言，标注数据多集中于常见的污染类型，在复合型污染、隐蔽性排污等特殊场景标注数据方面较为匮乏，造成 AI 模型在复杂场景开展识别时准确率不高，存在算法偏见。无人机技术应用在适配性上存在缺陷，应对高海拔、强风、暴雨等恶劣环境时巡飞能力欠佳；小型无人机续航时间短，无法满足跨区域、长时间巡飞的需求。传感器精度表现参差不齐，多光谱、热成像等设备检测误差可能影响执法证据的法律效力。技术更新的速率与执法需求不匹配，部分基层执法部门设备与算法的更新速度滞后，难以应对新型污染违法案例^[4]。

3.3 法律与实操层面：适配性与能力的不足

现有的环境法规对新技术执法证据法律效力的界定不明，像无人机航拍影像、AI 分析报告、大数据关联数据等新型证据，取证标准与审查流程没有统一规范，部分案例存在证据不被法庭采信的风险。基层执法人员的技术素养存在短板，多数人员在大数据分析、AI 模型应用、无人机操作与维护等专业能力上有所欠缺，难以充分发挥新技术的执法效能。技术执法所需成本偏高，无人机采购、传感器更新、大数据平台运维、AI 算法优化等需持续投入资金，部分经济条件落后的地区难以承担，致使技术应用覆盖的规模有限。

4 大数据与无人机驱动的 AI 环境执法新模式优化举措

4.1 构建一体化数据治理体系

构建跨部门数据共享协调体系，以生态环境部门为核心，推动工信、水利、气象、公安等部门数据实现互联互通，制定统一数据格式标准与共享细则，构筑全面覆盖的执法大数据基础底座。切实强化数据质量管控，搭建无人机数据采集校准机制，按周期对传感器开展校验，依据地面监测数据校正无人机采集误差；依托区块链技术实现执法数据全流程溯源，防止数据被篡改。同时进一步完善数据安全管理制度，采用加密存储、访问权限约束等技术，保障数据安全，实现隐私保护。

4.2 推动技术迭代与场景适配

加大技术研发投入力度，完善 AI 算法模型，扩充复合型污染、隐蔽性排污等特殊场景标注数据，采用联邦学习技术手段，在保障数据安全的前提下实现多源数据联合训练，提升模型识别的精准度和泛化能力。对无人机执法装备进行升级，开发长续航、抗恶劣环境的无人机设备，

搭载高精度多光谱传感器、气体检测模块等,达成“影像采集+实时监测”一体化;推动无人机与卫星遥感、地面物联网设备协同运作,创建“空天地”三维执法监测格局。构建技术适配评定机制,结合不同区域、不同污染类型的执法要求,定制针对性技术方案^[9]。

4.3 完善法律保障与人才体系

加快环境执法法律法规修订进程,明确无人机影像、AI 分析报告、大数据关联数据等新型证据的法律效力、取证标准及审查流程,制定技术执法操作细则,确保执法行为合法合规。搭建分级别的人才培养体系,开展针对基层执法人员的技术培训,重点提升无人机操作、大数据分析、AI 模型应用等方面的能力;引入多学科专业人才,组建技术执法队伍,促进与高校、科研机构的合作交流,推动技术研发与执法实践深度融合。建立技术执法资金支撑机制,扩大对经济欠发达地区的资金扶持力度,通过政府采购服务、设备租借等途径,降低技术实操成本。

5 结语

大数据与无人机驱动的 AI 环境执法新路径,依托技术协同对执法流程进行重构,实现执法由“被动响应”向“主动预警”转变、由“粗放排查”向“精准靶向”转变、由“现场为主”向“技防优先”转变。需借助搭建一体化

数据治理体系、推进技术迭代适配进程、完善法律保障与人才培养体系、强化协同治理机制,持续优化新模式落地效果,推动环境执法朝着更精准、高效、智能化方向迈进。

参考文献:

- [1] 郭欣平. 运用生成式人工智能技术破解市场监管基层执法办案工作难题的探索[J]. 市场监督管理, 2024(11): 70-71.
- [2] 王西雪. “数字执法”新模式下大数据方法论在交通运输综合执法管理中的应用[J]. 大数据时代, 2025(1): 16-20.
- [3] 李秀玲. 基于大数据运用探索建构“互联网+”基层卫生行政执法新模式的思考[J]. 科技风, 2021(10):87-88.
- [4] 李飞舟. 安徽省应用无人机创新交管执法新模式的实践与思考[J]. 道路交通管理, 2019,0(10):36-37.
- [5] 乾实. 将服务理念贯穿执法全过程贵州省全面推行市场监管服务型执法新模式[J]. 中国质量监管, 2025(7): 55-56.

作者简介: 陈姝洁(1984.11-), 女, 汉族, 内蒙古呼和浩特市人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 生态环境保护督察与政策效应、技术支撑、数智化环境执法、生态环境监测。