

生态环境智慧监测对生物多样性的影响*

程宝栋 孟 琪 孔令乾

摘要:生物多样性是人类可持续发展和地球生态系统安全的基石,然而其保护实践长期面临监测覆盖窄、监管滞后、精准度不足等瓶颈。本文以生态环境智慧监测创新应用试点为准自然实验,基于2015—2023年中国观鸟记录中心数据,采用双重差分模型实证检验生态环境智慧监测对生物多样性的影响及其传导机制。研究发现:生态环境智慧监测显著提升了试点地区的生物多样性水平,经过一系列稳健性检验后,该结论依然成立。异质性分析结果显示,生态环境智慧监测对生物多样性的保护作用在环境规制较弱、经济发展水平较高与基础设施较短缺的地区更为明显。机制分析结果表明,生态环境智慧监测通过赋能政府环境治理、激励企业绿色转型、促进公众环保参与等渠道提升区域内生物多样性水平。本研究为通过数字化手段保护生物多样性提供了扎实的证据,为深化智慧环保体系建设、推进生物多样性保护提供了实践参考。

关键词:生态环境智慧监测;生物多样性;鸟类丰富度;生态文明建设;双重差分法

一、引言

全球生态系统正经历着以生物多样性锐减为标志的深刻变迁。生物多样性不仅是生态系统健康与韧性的基石,更是为人类社会提供食物、清洁水源、气候调节等关键生态系统服务的根本保障,其急剧丧失已对现代文明与人类福祉构成严峻挑战(Medellin & Soberón, 2024; Frank & Sudarshan, 2024)。全球正进入第六次物种大灭绝时期,物种灭绝速率触目惊心,使生

*程宝栋,北京林业大学经济管理学院,邮政编码:100083,电子邮箱:baodongcheng@163.com;孟琪,北京林业大学经济管理学院,邮政编码:100083,电子邮箱:mq2661299697@163.com;孔令乾(通讯作者),浙江农林大学经济管理学院,邮政编码:311300,电子邮箱:2224048933@qq.com。

本文系教育部哲学社会科学研究重大专项项目“习近平生态文明思想在中国大地的生动实践研究”(2022JZDZ009)、国家自然科学基金面上项目“碳中和目标下中国森林碳汇增长驱动机制和发展路径研究”(72473009)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家的修改意见。文责自负。

生物多样性保护成为一项既明确又紧迫的全球性议题(Senior et al., 2024)。面对这一挑战,中国已将生物多样性保护深度融入国家发展的顶层设计。党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央以前所未有的力度推进生态文明建设。党的二十大报告明确指出“实施生物多样性保护重大工程”,在此指引下,《中国生物多样性保护战略与行动计划(2023—2030年)》《生物多样性保护重大工程实施方案(2025—2030年)》等一系列纲领性文件相继出台,为提升生态系统多样性、稳定性和持续性提供了清晰的行动指引。同时,中国积极参与全球生物多样性治理,作为《生物多样性公约》第十五次缔约方大会的主席国,引领国际社会推动达成“昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架”。然而,在自然生境丧失、气候变化、外来物种入侵等多重压力交织下,我国生物多样性保护工作仍面临艰巨考验,生物多样性下降的总体态势尚未得到根本遏制。在此背景下,深入探究生物多样性保护的有效路径,已成为扎实推进生态文明建设、切实履行国际承诺的必要环节。

然而,当前生物多样性保护面临一个深层的技术性瓶颈:监测信息的系统性缺失与传递失灵。学界普遍指出,生物多样性治理高度依赖长期、可靠且及时的数据支撑(Norton, 2018; Medellin & Soberón, 2024)。传统人工监测方式往往成本高、覆盖窄、时效滞后,难以满足动态评估与精准治理的需求(周博雅等, 2018)。这一生态信息鸿沟在生物多样性保护实践中造成了三重困境:在政府层面,因缺乏实时生态数据,执法监管往往滞后于违法排污、生境破坏等威胁生物多样性的行为(陈善荣等, 2022);在企业层面,传统监测手段的覆盖盲区与标准不一,使污染主体通过寻找“污染避难所”规避监管,其对生物栖息环境的持续侵蚀难以得到有效遏制(李玉红、王皓, 2024);在公众层面,生态信息的专业壁垒与传播渠道短缺,使公众难以感知身边的生物多样性变化,社会监督与公民科学的潜力因此长期难以释放。

在数字化浪潮席卷全球的今天,依托物联网、人工智能等新一代信息技术提升生态环境治理能力,已成为实现生态环境治理现代化的重要趋势。2022年2月,生态环境部印发《生态环境智慧监测创新应用试点工作方案》(以下简称《方案》),在13个省份和16个地级市(含雄安新区)率先开展试点,标志着以数字技术为核心的生态环境智慧监测进入实质性应用阶段。智慧监测通过布设自动感知设备与构建实时数据网络,显著提升了环境信息的获取速度、覆盖范围与准确性(梁宇超等, 2024; Zhang, 2025a)。值得关注的是,生态环境部在相关解读中明确将生物多样性监测置于生态质量评估的重要位置,指出“生态质量监测样地以生物多样性为主要监测对象,是反映生物多样性保护成效的‘晴雨表’”^①。为遏制和扭转生物多样性丧失的趋势,《中国生物多样性保护战略与行动计划(2023—2030年)》明确提出,要“应用新

^①资料来源于生态环境部官方网站, https://www.mee.gov.cn/ywtdt/xwfb/202503/t20250326_1104787.shtml。

一代信息技术,充分整合利用各级各类数据库和信息系统,推进生物多样性保护信息化和现代化建设”。生态环境智慧监测为破解生物多样性保护中的核心困境提供了关键技术路径:其一,通过生态数据的全天候、高精度采集,消除监管盲区,赋能政府精准执法;其二,通过提升企业排污行为的可见性与可追溯性,提高企业规避监管的预期成本,激励绿色转型;其三,通过环境信息的公开化与可视化,提升公众生态认知,激活社会监督与公民科学力量。

学术界已经开始关注智慧监测在环境治理中的作用,且主要集中在污染防治与企业行为调控两个方面。例如,智慧监测在提升污染监测效率(周博雅等,2018)和促进企业环境合规(李玉红、王皓,2024)等方面均表现出积极效果。其中,韩国高等(2025)首次以生态环境智慧监测创新应用试点作为准自然实验,运用双重差分法进行因果识别,发现智慧监测能够有效抑制企业环境信息粉饰行为,为理解智慧监测的微观治理效应提供了重要的实证依据。然而,上述研究均聚焦于治理过程的中间变量,如企业合规、污染排放等,而非最终的生态结果,难以识别智慧监测能否真正助力生物多样性水平的实质性改善。因此,本文聚焦于生态环境监测这种新型监管手段能否直接、有效地作用于生物多样性保护。

智慧监测技术的应用通过声学监测、遥感、无人机等自动化手段,可实现对物种分布、栖息地状况的大范围、实时感知,为生物多样性保护提供关键的数据基础(Skidmore et al., 2015; Sethi et al., 2024)。在此背景下,评估智慧监测能否促进生物多样性保护,不仅是对其生态效益的科学验证,也是优化生物多样性保护政策、推动治理体系智慧转型的现实需要。基于此,本文以生态环境智慧监测试点政策作为准自然实验,结合中国观鸟数据,运用双重差分法,旨在科学识别生态环境智慧监测对生物多样性的影响和内在作用机制,以期为构建生态环境智能治理体系提供理论依据与政策启示。

本文的边际贡献主要体现在以下三个方面:第一,基于中国观鸟数据,从生态环境智慧监测这一新兴治理工具的视角出发,拓展了生物多样性的研究维度。现有关于生态环境智慧监测的研究多聚焦于定性探讨(陈善荣等,2022;张大伟,2023),少量定量研究也主要关注其对微观企业行为的影响(韩国高等,2025),对智慧监测的效应分析止步于治理过程层面,未能追踪至最终生态结果。与既有文献不同,本文旨在探究智慧监测在促进生物多样性恢复方面的直接生态效益。具体来说,基于中国观鸟数据,以生态环境智慧监测创新应用试点政策为准自然实验,采用双重差分法检验智慧监测的生物多样性保护效果,为理解智慧化监管对生物多样性的影响提供了来自中国实践的经验证据。第二,揭示了生态环境智慧监测影响生物多样性的内在机制。本文从赋能政府环境治理、激励企业绿色转型和促进公众环保参与三个维度,系统识别了生态环境智慧监测促进生物多样性提升的传导路径,为制定能够有效调动多方力量的技术赋能型环境政策提供了有益参考。第三,进行了智慧监测效果的差异化分析。研究发现,政策成效因地区在环境规制、经济水平与基础设

施等方面的初始禀赋不同而存在差异。这一发现揭示了政策效果对地区基础条件的依赖性,为后续优化智慧监测体系的部署策略、推动生物多样性保护政策的精准实施提供了科学依据。

二、文献综述

(一)生物多样性的影响因素研究

生物多样性作为维持生态系统健康与稳定的关键指标,其动态变化受到自然因素与人为活动的复杂影响。近几个世纪以来,由于人类活动加剧,生物多样性丧失的速度显著加快(Pimm et al., 2014)。现有研究已构建了一个较为系统的生物多样性威胁认知框架。一是研究栖息地丧失对生物多样性的影响,栖息地丧失被认为是生物多样性衰退的最普遍诱因(Wiebe & Wilcove, 2025; Madhok, 2025)。二是分析环境污染对生物多样性的影响,空气污染(Liang et al., 2020)、水体污染(Fu et al., 2025)、噪声污染(Teff-Seker et al., 2022)与光污染(La Sorte et al., 2022)均被证实对生物多样性造成显著压力。三是气候变化的长期负效应,全球变暖被证实会对生物多样性产生持续损害(Chen & Khanna, 2024)。四是外来物种入侵的破坏效应,外来物种入侵被证实会严重损害本地生物多样性(Larsen et al., 2024)。然而,证据同样表明,积极的保护干预与管理措施能够有效逆转生物多样性衰退趋势。刘钊等(2025)研究发现,绿色金融能够通过推动农业绿色发展、工业绿色转型、公众环保意识提升等途径,提升试验区内的生物多样性;Song等(2025)证实清洁能源利用具有积极的生态效应,可以促进候鸟栖息地改善,为候鸟筑巢繁殖提供支持。此外,保护区私营化管理(Denny et al., 2024)、数据中心绿色化改造(Liang et al., 2025)等一系列政策与技术措施均对生物多样性有促进效应。上述研究为理解生物多样性的威胁机制与保护路径奠定了重要基础,然而,上述研究多聚焦于绿色金融、清洁能源等具体保护手段,对生态环境智慧监测这一新兴数字化治理工具的保护效能关注不足。事实上,生物多样性保护工作长期受制于传统监测在成本、时空覆盖与时效性方面的固有局限,致使保护实践面临威胁难以及时识别、成效难以动态评估的困境;而生态环境智慧监测恰能从根本上突破这一数据约束,并通过重塑治理流程作用于生物多样性保护,其实际效能值得系统检验。

(二)生态环境智慧监测的效应研究

在多种保护手段并行的背景下,以大数据、物联网和人工智能为代表的智慧监测技术,正逐渐成为提升生态环境治理能力的重要手段。现有研究从政府、企业及公众等多个主体维度,揭示了智慧监测的影响效应。在政府治理层面,智慧监测显著提升了环境监管的精准性与决策效率。政府的数字化转型,特别是“互联网+政务服务”等试点政策,为环境治理提供了新引擎。谢文栋(2025)研究表明,“互联网+政务服务”试点政策能够通过环境信息公开、环境

监管强化等途径,显著提升地方政府环境治理效率。数字技术助力构建的智能水环境监管体系与大气污染实时监控网络,可以及时、准确地获取环境污染等信息,有效破解了传统治理中的信息碎片化与监管滞后难题,为政府科学决策提供可靠依据(顾金喜,2020;伍先斌等,2023)。此外,自动污染检测系统与实时监管系统能够自动、准确地采集不易篡改的污染信息,显著缓解中央与地方政府的信息不对称,防止地方政府采取机会主义行为,选择性地执行中央下达的环境任务(梁宇超等,2024)。在企业行为层面,智慧监测通过强化监管威慑与市场声誉机制,倒逼企业进行绿色转型。一方面,智慧监测显著提升了企业环境违规行为被发现的概率,从而提高了其预期违规成本,形成环境合规的有效激励(李玉红、王皓,2024)。进一步,政府数字治理能通过增强环境规制等路径,有效降低企业能耗强度(苗宏慧等,2025)。另一方面,环境信息的公开披露使企业的行为被置于公众监督之下,其环境污染行为可能引发声誉受损、融资成本上升等市场惩罚,构成另一重外部约束。在此双重压力下,企业通常倾向于采取积极的环保策略,以应对监管与市场挑战。汪顺等(2025)研究发现大数据环境治理试点能够通过促进企业绿色创新,显著改善其环境绩效。此外,韩国高等(2025)以生态环境智慧监测创新应用试点作为准自然实验,采用双重差分方法,系统检验了生态环境智慧监测对企业环境信息粉饰的影响,研究表明,生态环境智慧监测能够有效抑制企业环境信息粉饰。在公众参与层面,智慧监测显著降低了公众参与环境治理的门槛,激活了社会监督力量。数字治理平台,如各类环境举报APP与政务社交媒体,为公众提供了便捷的意见表达与监督渠道(Zhao et al., 2023)。这种线上参与方式打破了时空限制,也缓解了因潜在人情关系引发的顾虑,有效降低了公众的参与成本(张岳等,2024)。数字平台畅通了人们表达环境保护意愿的渠道,使得公众监督成为推动区域环境治理的重要力量(Yuan et al., 2023)。然而,上述研究存在一个共同局限:无论是政府治理效率的提升、企业合规行为的改善,还是公众参与门槛的降低,均属于治理链条上的中间环节,现有文献尚未将效应追踪延伸至最终生态结果。智慧监测能否将治理过程的改善最终转化为生物多样性的实质保护,目前仍缺乏直接的实证证据。

(三)生态环境智慧监测与生物多样性研究

智慧监测技术突破了传统方法在成本与规模上的局限,为生物多样性监测提供了自动化、大规模的高精度数据采集路径。声学监测与人工智能的结合已成为一种成本效益高的自动化手段,可有效解析野生动物声讯、实现无侵入式种群监测(Rasmussen et al., 2024),在鸟类监测中取得显著成效(Sethi et al., 2024);卫星遥感技术则为长期、全球尺度的生物多样性监测提供了标准化、可重复的观测能力,有助于识别生物多样性丧失的关键区域(Skidmore et al., 2015);无人机与计算机视觉等技术也进一步提升了特定类群的监测效率(Aucone et al., 2023)。尽管上述研究充分肯定了智慧监测技术在生物多样性数据采集与物种识别中的应用

价值,但相关分析多停留在技术描述或小样本案例层面,存在两个核心缺口:其一,缺乏对智慧监测政策实施效果的整体评估,现有研究关注的是技术工具本身的监测能力,而非政策推行后对区域生物多样性产生的净效应;其二,缺乏基于外生政策冲击的大样本因果识别,既有研究均未有效利用试点政策构建准自然实验,难以在排除选择性偏差与混杂因素的前提下,对智慧监测的生物多样性保护效果作出可信的因果推断。

三、理论分析

生态环境智慧监测是以物联网、人工智能、大数据等新一代信息技术为核心支撑,通过自动化、全天候、立体化的数据采集与智能分析,实现对生态环境要素的实时感知、动态评估、异常预警与精准决策的现代化环境监测体系。与传统人工监测相比,智慧监测的核心差异体现在三个维度:一是覆盖维度,突破了传统监测点位固定、覆盖范围有限的空间局限,实现全域无死角监测;二是时效维度,从事后抽查转向实时连续监测,显著压缩了违规行为从发生到被发现的时间窗口;三是数据维度,从单一污染指标的孤立采集转向来自多个渠道的海量生态数据的融合分析,大幅提升了环境信息的完整性与可信度。正是这三方面的技术跃升,使智慧监测能够系统性破解传统监测“看不见、认不清、管不住”的治理困境,为生物多样性保护提供全新的技术路径(秦鹏、周继钊,2024)。栖息地丧失会缩减野生动物种群数量并增加其灭绝风险,直接导致生物多样性下降(Wiebe & Wilcove,2025)。生态环境智慧监测通过引入卫星遥感、无人机、物联网传感器、声学监测等技术集群,从根本上实现了生态数据采集能力的跃升,实现对大气污染物浓度、水体质量、植被覆盖指数、土地利用类型变化以及鸟类鸣声、影像等海量生态要素的自动化、全天候、立体化采集(Rasmussen et al.,2024)。这种无缝监测网络,使得构建区域生态环境的数字孪生成为可能,为精准认知鸟类生存环境提供了数据基底。例如,无锡市锡山区生物多样性观测站建设了涵盖鸟类、陆生昆虫、爬行动物、哺乳动物等多类群的观测设施,截至2025年9月19日,该站已记录到物种总数389种,为区域生态评估提供了扎实的本底数据^①。

以全时段立体化数据采集为基础,海量、多源的监测数据有助于将生物多样性保护工作从经验驱动转向数据驱动。具体而言,智慧监测系统通过解析音频、影像及遥感数据,能够自动识别物种组成、追踪种群数量变化、评估栖息地质量状况,实现对物种与栖息地的动态评估,为保护决策提供持续更新的生态本底信息(Sethi et al.,2024)。在此基础上,一旦监测数据揭示异常信号,系统可自动生成警报并推送至执法人员的移动终端,实现执法力量的快速响应与精准打击,将威胁消灭在萌芽状态。例如,在黑龙江富锦国家湿地公园、三江国家级自

^①数据来自无锡锡山区人民政府官方网站,<https://www.jsxishan.gov.cn/doc/2025/09/19/4652962.shtml>。

然保护区等重点区域构建“智能监测+无人机遥感+视频监控”立体化监测体系,实现了全天候动态监管。其中,红外监测技术的应用显著提升了反盗猎监管效能,有效遏制了非法狩猎行为。预警响应之外,智慧监测还将保护行动引向更为精准的栖息地修复与管理。智慧监测能够精准识别生态退化区域及其特征,如湿地萎缩程度、林地病虫害的分布范围与严重等级。这使得生态修复工程能够从“大水漫灌”转向“靶向治疗”,集中资源进行干预,以最高的成本效益提升栖息地的整体质量和稳定性(Gabrys, 2020)。此外,在鸟类迁徙季或繁殖季,系统可根据实时监测数据,对重点区域进行科学调度。例如,临时限制特定区域的人类活动、调整施工计划、在鸟类聚集区加强巡护力量等,以最大限度地减少人为干扰,从而对生物多样性产生直接的正向影响。据此,本文提出以下假说:

假说1:生态环境智慧监测能够提升生物多样性水平。

生态环境智慧监测对生物多样性的保护效应,不仅源于上述技术链条的直接作用,还通过重塑政府、企业与公众三方主体的行为逻辑,从环境治理、绿色转型与社会参与三个维度协同作用于生物多样性保护,进一步提升地区的生物多样性水平。

传统环境治理面临监管成本高、覆盖范围有限、事后响应迟缓等困境,导致许多对生物多样性构成威胁的污染排放与生态破坏行为难以被及时发现与制止(陈善荣等, 2022)。生态环境智慧监测系统实现了对环境违法行为全天候、无死角的监控,其对违规排污、工地扬尘、秸秆焚烧等实时数据的抓取,形成了铁证如山、难以抵赖的执法依据,从而协助政府迅速识别环境违法行为,显著提升执法效率(顾金喜, 2020)。通过对污染源的精准管控,污染物排放持续降低,空气质量得到显著改善(Zhang, 2025a)。例如,成都市对大气污染物排放量大的重点行业企业安装电力监控设备,依托颗粒物组分和氮氧化物监测、卫星遥感等技术手段,强化“精细化治理”,2025年1月1日至10月28日期间,成都市空气质量优良天数达251天,同比增加15天^①。智慧监测对污染源的全天候精准管控,恰好契合了生物多样性保护对清洁栖息环境的核心需求。空气污染长期以来被视为导致鸟类氧化应激、损害鸟类健康的重要因素(Agathokleous et al., 2023),空气污染减弱可以显著提升城市鸟类丰富度(Liang et al., 2020; Madhok & Gulati, 2022)。

长期以来,生物多样性保护等生态指标因难以量化,在考核中往往让位于经济增长等硬指标(伍先斌等, 2023)。此外,由于中央政府与地方政府存在信息鸿沟,地方政府有时会基于自身利益考量,选择性执行中央政府下达的环境政策,甚至可能操纵环境数据(Greenstone et al., 2022)。生态环境智慧监测在数字技术保障下,能够产生客观、可验证且高频的政绩考核数据,如栖息地面积变化、关键物种出现频率、环境质量连续达标率等(梁宇超等, 2024)。智

^①数据来自成都市人民政府官方网站, https://www.chengdu.gov.cn/cdsrmzf/c169603/2025-10/30/content_adbe7f31b4944fb3a3eaf53a5e8f25ad.shtml。

慧监测所产生的客观生态数据,恰好填补了生物多样性保护指标长期难以量化的数据缺口,将软约束转化为可追踪、可问责的硬指标。这使得中央政府能够及时、准确地监督地方环境状况(韩国高等,2025)。当这些生态数据被纳入地方官员的政绩考核体系时,该考核机制便形成了强大的问责压力与正向激励(吕炜等,2025),从而推动地方政府真正重视生态环境、严格执法、积极修复生态、科学规划国土空间,主动为鸟类和其他野生动物保留和建设高质量的栖息地,最终有效提升区域生物多样性水平。据此,本文提出以下假说:

假说2:生态环境智慧监测通过赋能政府环境治理提升生物多样性水平。

智慧监测能够有效缓解信息不对称(陈少威、贾开,2020),极大地提高企业环境信息的透明度与可追溯性。与传统现场执法方式不同(冯阔等,2019),智慧监测使环境违规行为被发现的概率大大增加,这意味着企业面临的预期违规成本急剧上升。同时,环境信息公开还能有效抑制污染企业向地方政府的寻租行为,从而降低腐败发生率,提升环境治理效率(谢文栋,2025)。例如,安阳市龙安区运用可实现关键参数锁定、数据全程留痕的智能监测设备,确保了排污数据的真实性,从而在技术上压缩了企业向地方政府寻租的空间。此外,污染信息的披露会直接损害企业声誉,影响公众的消费选择(崔广慧、姜英兵,2022)。公众通过新媒体形成的监督压力,也会进一步促使政府加大对污染企业的行政处罚力度(马平平等,2024)。在这种由技术、制度和公众监督组成的强约束下,企业往往选择绿色转型,以规避风险并寻求新的竞争优势(汪顺等,2025)。智慧监测对企业排污行为的全程留痕与实时追溯,恰好回应了生物多样性保护对污染源头管控的核心需求,为切断工业污染侵蚀生物栖息环境的链条提供了关键的技术支撑。

企业的绿色转型主要从两个层面惠及生物多样性:一是增加绿色技术创新,从源头削减污染。为应对严格的环境监管,企业会增加研发投入,开展绿色创新,旨在从生产流程的源头减少污染物排放,从而为鸟类等物种提供更清洁的生存环境(汪顺等,2025)。二是降低二氧化碳排放强度,缓解气候变化压力。二氧化碳作为主要的温室气体,是导致全球气候变化的重要因素之一(Pörtner et al., 2023)。气候变化导致栖息地丧失、极端天气增加等后果,降低了鸟类的繁殖成功率和孵化率(Chen & Khanna, 2024; Fu et al., 2025)。企业通过节能降碳、能源结构调整等措施减少其碳足迹,为减缓全球变暖作出直接贡献。从长远看,减缓气候变化进程,有助于维持现有鸟类栖息地的气候适宜性,为物种适应赢得宝贵时间,是保护全球生物多样性的重要一环。据此,本文提出以下假说:

假说3:生态环境智慧监测通过激励企业绿色转型提升生物多样性水平。

公众是生物多样性保护中不可或缺的社会力量(Novacek, 2008)。智慧监测平台所产生的大量环境数据,通过手机 App、政府网站、公共信息屏等渠道向公众开放,将原本专业、晦涩的生态信息转化为通俗易懂的可视化图表、实时影像和空气质量指数。这种信息的透明化与

易得性,恰好弥补了生物多样性保护长期面临的社会认知缺口,极大地提升了公众对本地鸟类资源及其生存状况的认知水平,有效培育了公众的生态关怀与环保责任感(陈少威、贾开,2020)。例如,位于无锡市长广溪湿地公园的滨湖区生物多样性观测站内的科普展示馆,构建了以“AI识鸟”为核心的公众互动教育体系,将生态知识普及融入互动体验,能够有效提升公众环保意识。与此同时,环境信息的公开引导公众通过“用脚投票”和“用手投票”的方式表达环境诉求(董延芳、何家欢,2025)。这种信号会强力传导给地方政府与企业,激励前者加大环境治理投入、后者提供更绿色的产品和服务,从而共同塑造对鸟类友好的社会环境。

此外,生态环境智慧监测平台对珍稀物种的实时发现与公布,能够有效激发公众的探索欲望,从而直接促进公民科学平台用户数量的增长。此类信息具有高度的公信力与时效性,能够迅速形成区域性的环境新闻热点,对公众产生强烈的认知冲击和行为召唤,显著降低了公众搜寻目标物种的信息成本,缓解了识别过程中的不确定性,为自然爱好者提供了明确的行动导向。在这种信息刺激下,个体亲赴现场进行观察与验证的内在动机被充分调动。这一从权威信息供给到实地探索,再到数据上传的完整行为链条,持续地将潜在的信息接收者转化为公民科学平台上可观测的活跃用户。例如,位于广东省中山市的崖口湿地开发了面向公众的可视化数据平台,公众可以随时随地查看候鸟动态。此举不仅显著提升了公众环保意识,也充分调动了民间观测力量。智慧监测对珍稀物种信息的实时捕捉与广泛传播,恰好契合了生物多样性保护对公民科学数据的迫切需求,公众在公民科学平台上提交的观测数据,将分散的社会观测力量转化为系统性的生态数据资产,能够帮助科研人员全面、动态地掌握物种分布和种群变化,为制定生物多样性保护决策提供依据。Brock等(2021)的研究也证实,人们对接触野生鸟类的兴趣增长能够有效促进局部地区的鸟类种群增长。据此,本文提出以下假说:

假说4:生态环境智慧监测通过促进公众环保参与提升生物多样性水平。

四、实证研究设计

(一)计量模型

为考察生态环境智慧监测对生物多样性的影响,构建如下基准回归模型:

$$bio_{ct} = \alpha + \beta treat_c \times post_t + \gamma X_{cjt} + \delta_c + \theta_t + \varepsilon_{ct} \quad (1)$$

其中, c 表示地区, t 表示年份。被解释变量 bio_{ct} 为地区 c 第 t 年的鸟类数量丰富度,表示生物多样性水平。 $treat_c$ 和 $post_t$ 为虚拟变量,若城市 c 为生态环境智慧监测试点地区,则 $treat_c$ 取值为1,否则为0;若年份为2022年及以后,则 $post_t$ 取值为1,否则为0。 X_{cjt} 是城市层面的一系列控制变量。此外,为控制不可观测的城市层面的因素,在回归中加入城市固定效应 δ_c ,同时,为控制全国性的经济波动对鸟类数量丰富度的影响,在回归中引入年份固定效应

θ_i 。 ε_{ct} 为随机误差项。 β 表示生态环境智慧监测政策对鸟类数量丰富度影响的政策效果,是本文重点关注的系数,若 β 为正,说明生态环境智慧监测能够提升生物多样性水平。

(二)变量定义与描述性统计

1.被解释变量

本文选取鸟类数量丰富度衡量城市生物多样性,主要基于以下考量:首先,鸟类被广泛认为是城市生态系统健康和生物多样性状况的重要指示器,其种群动态能有效反映生态系统的整体变化(Liang et al., 2020)。其次,中国位于全球多条主要鸟类迁徙路线上(Meng et al., 2025),其鸟类多样性保护具有显著的全球意义。最后,鸟类是公民科学数据最为丰富的类群之一,如eBird和中国观鸟记录中心(China Bird Report, CBR),这为在大尺度上进行精细化的实证研究提供了数据可行性。

因此,本文基于中国观鸟数据,参考Liang等(2020)的研究,采用以下公式衡量城市鸟类数量丰富度。

$$\ln bird_{cohdm} = \beta_1 effort + \vartheta_h + \eta_m + \Gamma_{ct} + \varepsilon_{cohdm} \quad (2)$$

其中, $bird_{cohdm}$ 是指在 t 年 m 月 d 天中的 h 小时,观测者 o 于 c 地区观察到的鸟类数量。 $effort$ 是指观测时长; ϑ_h 为小时固定效应,用于控制各小时可能影响观测的因素,如因亮度导致的白天与夜间观鸟能力的差异,对于持续多个小时的观测, ϑ_h 取值为观测的起始整点小时,例如从6:00至9:00, ϑ_h 取值为6,此做法旨在将一次观测与一个标准化的参考时间点相关联。 η_m 为月份固定效应,控制月份间可能影响观测的因素,如鸟类季节性迁徙。 ε_{cohdm} 是随机误差项。 Γ_{ct} 是本文所关注的城市-年份鸟类数量丰富度,将其进行标准化后就得到了本文的被解释变量 bio_{ct} 。与Liang等(2020)的研究相似,由于本文的目标是估计生态环境智慧监测试点对鸟类数量丰富度的影响,而非精确估计鸟类丰富度,因此式(2)中忽略了可能会影响鸟类丰富度,但与生态环境智慧监测试点没有系统性关系的变量。

2.核心解释变量

本文的核心解释变量是生态环境智慧监测政策冲击,以生态环境智慧监测试点的设立作为政策冲击来源,差分变量使用处理组的识别变量与政策实施时间虚拟变量的交乘项。2022年2月,由生态环境部发布的《方案》中选取山西省等13个省份,常州市等16个地级市(含雄安新区)作为试点地区^①。对于13个省级试点,其省内全部地级市均纳入处理组;对于16个地市级试点,其所在城市亦纳入处理组。若某地级市既属于省级试点、又属于地市级试点,则同样纳入处理组,不存在重复计算问题。非试点省份中的非试点地级市构成对照组。据此,若

^①13个省份试点包括山西、内蒙古、吉林、江苏、浙江、山东、湖南、广东、海南、重庆、四川、贵州与甘肃。16个地级市区试点包括常州、无锡、杭州、嘉兴、金华、济南、长沙、株洲、东莞、惠州、两江新区、璧山区、成都、石嘴山、鹤壁与雄安新区。

城市 c 为试点城市,则 $treat_c$ 赋值为 1,否则为 0;政策实施当期及之后 $post_t$ 取 1,否则为 0。

3.控制变量

为了避免其他因素对估计结果的影响,本文参考 Liang 等(2020)、Meng 等(2025)的研究,从经济与发展、自然两方面选取地级市层面的控制变量,主要包括:经济发展水平 $\ln gdp$,以人均地区生产总值的对数衡量;产业结构升级 $industry$,参考康健和何雨桐(2025),采用第一产业增加值占 GDP 比重 $\times 1$ +第二产业增加值占 GDP 比重 $\times 2$ +第三产业增加值占 GDP 比重 $\times 3$ 计算得到;人口密度 $population$,以年末常住人口与行政区域面积之比衡量;人力资本水平 $education$,以普通高等学校在校学生数与年末常住人口之比衡量;城镇化率 $urban$,以城镇人口与总人口之比衡量;外商直接投资 $\ln fdi$,以当年实际使用外资的对数衡量;温度 $temperature$,以年平均气温衡量;降水量 $rain$,以年平均降水量衡量;风速 $wind$,以年平均风速衡量。

4.描述性统计

本文主要变量的描述性统计结果如表 1 所示。据表可知,鸟类数量丰富度的最小值为-3.397,最大值为 3.813,说明不同地区不同年份的鸟类数量丰富度存在较大差异。从整体上看,约有 49.9%的地区位于生态环境智慧监测试点地区,说明采用该样本进行政策评估具有一定代表性。此外,其余控制变量的分布都在合理区间内。

表 1 变量描述性统计结果

变量	测度方式	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
bio	参考 Liang 等(2020)的研究估计的城市-年份鸟类数量丰富度	1394	0.176	0.950	-3.397	3.813
$treat$	试点城市取 1,否则为 0	1394	0.499	0.500	0.000	1.000
$post$	2022 年及之后取 1,否则为 0	1394	0.190	0.393	0.000	1.000
$\ln gdp$	人均地区生产总值的对数	1394	11.058	0.512	9.797	12.158
$industry$	第一产业增加值占 GDP 比重 $\times 1$ + 第二产业增加值占 GDP 比重 $\times 2$ + 第三产业增加值占 GDP 比重 $\times 3$	1394	2.389	0.144	1.844	3.997
$population$	年末常住人口/行政区域面积	1394	510.911	389.001	5.890	2294.800
$education$	普通高等学校在校学生数/年末常住人口	1394	0.026	0.028	0.002	0.124
$urban$	城镇人口/总人口	1394	0.619	0.135	0.326	0.952
$\ln fdi$	当年实际使用外资的对数	1394	7.634	2.170	0.034	11.990
$temperature$	年平均气温	1394	16.437	4.571	3.700	24.500
$rain$	年平均降水量	1394	0.003	0.001	0.000	0.007
$wind$	年平均风速	1394	5.054	0.836	2.802	7.190

(三)样本选择及数据来源

本研究使用的鸟类观测数据源自中国观鸟记录中心,该平台是一个全国性的公民科学数据库,供国内观鸟爱好者提交个人观测记录,其中包括观测时间、观测地点、鸟种名称、观鸟数量等关键信息,为区域鸟类丰富度评估提供了有效的数据支持。鉴于 2015 年之前的观测记录数量有限,本研究将样本区间限定在 2015—2023 年。考虑到数据收集过程的公众参与性质,审慎的数据预处理是保障研究信度的核心环节。为此,本文首先剔除观测时长为负的样

本;其次,对观测数量和观测时长等关键变量进行上下1%的缩尾处理,以有效缓解极端异常值对分析结果的可能影响;最后,剔除缺失值较多的样本。地级市气温数据来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属的国家环境信息中心(NCEI),降水数据来自国家气象科学数据共享服务平台的中国地面气候资料日值数据集,风速数据来自美国国家航空航天局(NASA)。此外,其余控制变量来源于《中国城市统计年鉴》、CNRDS数据库等。

五、实证结果

(一)基准回归结果

生态环境智慧监测对鸟类数量丰富度的基准回归结果如表2所示。列(1)为没有加入控制变量的结果,列(2)为加入城市经济与发展层面以及自然层面控制变量的结果,列(1)、列(2)均加入了城市固定效应与年份固定效应。结果显示,核心解释变量的系数均在1%的水平上显著为正,列(2)中 $treat \times post$ 的系数为0.272,意味着相比于非试点地区,智慧监测试点的实施使试点地区鸟类数量丰富度提升了0.272个标准单位,说明生态环境智慧监测能够提升生物多样性水平,假说1得到支持。

表 2	基准回归结果	
	(1)	(2)
$treat \times post$	0.214*** (0.088)	0.272*** (0.095)
$\ln gdp$		0.044 (0.200)
$industry$		-0.311 (0.385)
$population$		0.001 (0.000)
$education$		-4.102 (5.330)
$urban$		0.839 (0.955)
$\ln fdi$		-0.050 [*] (0.026)
$temperature$		0.211 [*] (0.117)
$rain$		35.584 (42.470)
$wind$		-0.035 (0.154)
常数项	0.156*** (0.022)	-3.344 (3.169)
城市固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
样本量	1377	1377
R ²	0.474	0.480

注: *、**和***分别代表10%、5%、1%的显著性水平,括号内为稳健标准误,下表同。

(二)识别有效性检验

1.平行趋势检验

双重差分法的应用需要满足平行趋势假定(梁超等,2025),即在生态环境智慧监测试点政策实施前,处理组与控制组间的鸟类数量丰富度差异不随时间的推移发生明显变动,在政策实施后,试点地区鸟类数量丰富度相对于非试点地区发生显著变化。为此,本文以2022年为基准年,进一步检验政策实施的动态效应。结果如图1所示,在政策实施前,试点地区和非试点地区的鸟类数量丰富度变化趋势没有显著差异,满足平行趋势假设,说明本文模型设定有效。而在政策实施当年及之后,估计系数显著为正,表明生态环境智慧监测对鸟类数量丰富度产生了显著的提升效应。从政策实施后的动态系数来看,2022年政策效应达到峰值,2023年该效应有所收敛但仍维持在显著正向水平,表明生态环境智慧监测对鸟类生物多样性的提升效应具有持续性。政策呈现出实施初期效应较为强烈、此后趋于稳定的动态特征,这与智慧监测通过重构生态信息采集与传递体系、短期内显著缩小监管盲区的作用逻辑相符,随着监管体系逐步完善,政策效应趋于稳态。

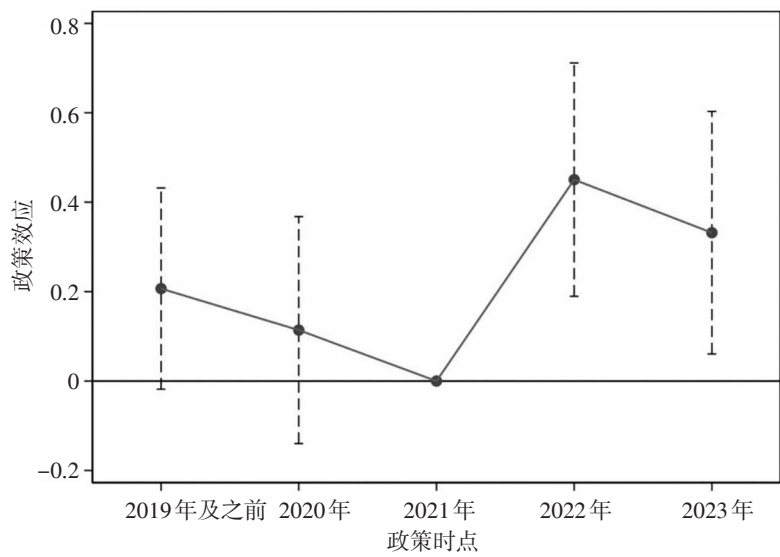


图1 平行趋势检验结果

2.平行趋势敏感性分析

传统上依赖处理前趋势进行判定的平行趋势检验在统计推断上可能存在低效性,容易导致估计结果出现偏误,甚至得出误导性结论(Roth et al.,2023)。为提高平行趋势假设的稳健性并降低潜在偏误,参考 Rambachan 和 Roth(2023)、李建军等(2025),采用相对偏离程度限制与平滑限制等方法,系统评估政策实施后估计量及其置信区间对平行趋势假设偏离的敏感性。本文平行趋势敏感性检验结果如图2所示,表明政策实施后鸟类数量丰富度的提升效应稳健存在。

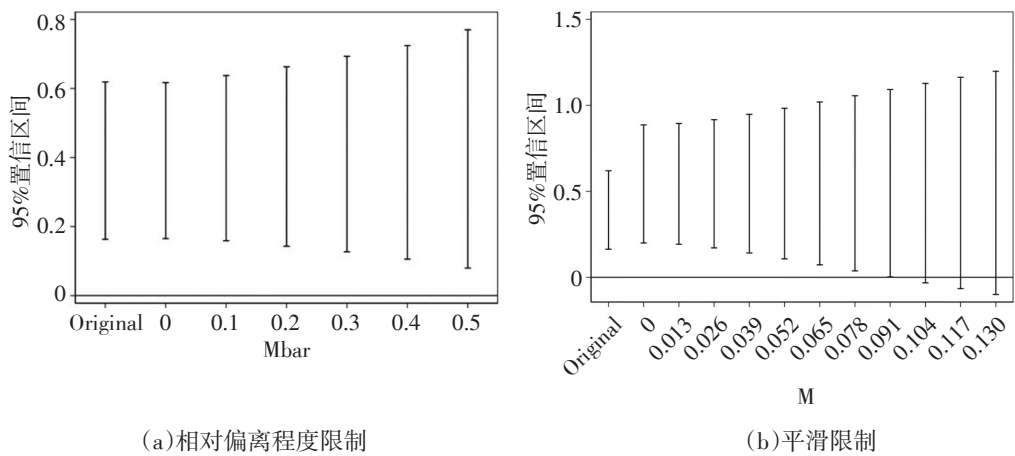


图2 平行趋势敏感性检验结果

3.安慰剂检验

为进一步排除潜在因素产生的干扰,本文采用虚构处理组的方式对回归结果进行安慰剂检验。随机抽取与真实试点地区数量相同的城市作为处理组,构建虚假的政策变量,重复实验 500 次。虚假的生态环境智慧监测政策变量对鸟类数量丰富度影响的系数概率密度分布如图 3 所示。结果显示,绝大部分实验结果均不显著,且系数均分布在 0 附近,绝大部分虚假政策变量的系数异于真实系数(平行于纵轴的虚线),说明生态环境智慧监测对鸟类数量丰富度的提升效应并非随机产生,模型设定有效。

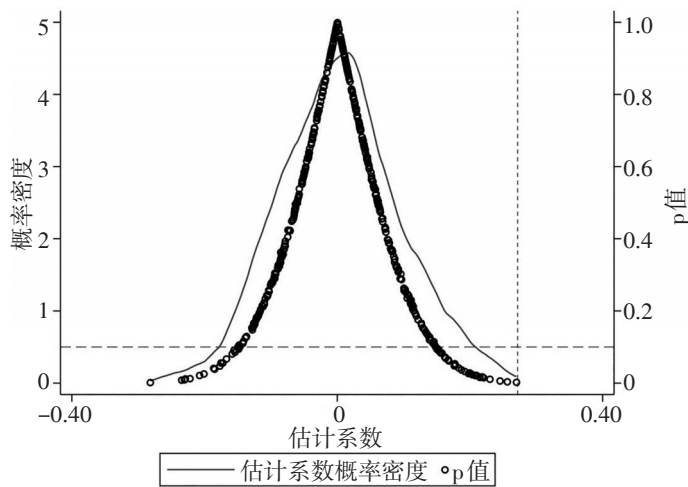


图3 安慰剂检验结果

(三)稳健性检验

1.更换被解释变量

为规避测算方法差异带来的潜在偏误,本文进一步采用多种方式更换被解释变量,重新

测算鸟类丰富度(表3),具体包括以下三个方面:(1)调整小时固定效应的设定方式。针对部分观鸟记录时长超过一小时的情况,本文在稳健性检验中将小时固定效应的设置从观测开始时间调整为结束时间,重新测算地区鸟类数量丰富度,回归结果如表3,系数依然显著为正,排除了小时固定效应设定方式所引起的估计偏误,说明基准回归结果稳健。(2)采用未经缩尾处理的原始数据。参考Liang等(2020),本文直接采用未经缩尾处理的原始数据,重新测算地区鸟类数量丰富度,以替换被解释变量,结果在1%的水平上显著为正,说明基准回归结果并未受极端值影响,进一步增强了结论的稳健性。(3)替换为鸟类物种丰富度指标。为全面衡量地区鸟类丰富度,除数量维度外,本文进一步引入物种丰富度这一关键维度,并沿用前述方法对其进行测算,以进行稳健性检验。核心解释变量依然显著为正,在验证本文结论具有稳健性的同时,也说明了生态环境智慧监测试点政策能够同时促进鸟类数量与物种多样性的增长。

表3

更换被解释变量检验结果

	(1)	(2)	(3)
	更改小时固定效应	采用原始数据	替换为鸟类物种丰富度指标
<i>treat × post</i>	0.252*** (0.094)	0.248*** (0.093)	0.215** (0.094)
控制变量	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
样本量	1377	1377	1377
R ²	0.479	0.496	0.492

2.倾向得分匹配

鉴于生态环境智慧监测试点城市的选择可能并非完全随机,处理组与对照组在政策实施前可能存在系统性差异,本文进一步采用倾向得分匹配双重差分法(PSM-DID)进行稳健性检验。具体而言,首先,根据城市是否入选生态环境智慧监测试点划分为处理组和对照组,并将基准回归中的全部控制变量作为协变量,据此估计各样本进入处理组的倾向得分;其次,在满足共同支撑假设的样本范围内,采用半径卡尺匹配法,为处理组城市匹配倾向得分相近的对照组城市,并剔除未能成功匹配的样本(钟腾龙等,2025);最后,基于匹配后的样本重新进行双重差分估计。

为检验匹配效果,本文进一步对匹配前后处理组与对照组的协变量进行平衡性检验。平衡性检验结果显示,匹配后各协变量的绝对标准化偏差均控制在10%以内,且较匹配前明显下降(限于篇幅未予列示),表明匹配有效缩小了两组样本在可观测特征上的差异,满足平衡性要求。PSM-DID的估计结果如表4所示,生态环境智慧监测试点的估计系数仍显著为正,说明在缓解样本选择偏差后,生态环境智慧监测对鸟类物种丰富度的提升作用依然稳健。

表 4 倾向得分匹配结果

	(1)
	<i>bio</i>
<i>treat</i> × <i>post</i>	0.300*** (0.102)
控制变量	是
城市固定效应	是
年份固定效应	是
样本量	1309
R ²	0.496

3.排除相关政策干扰

为控制两类潜在生态环境政策的干扰,本文在基准回归的基础上分别引入国家生态文明试验区政策虚拟变量与生态环境损害赔偿制度改革试点政策虚拟变量。国家生态文明试验区的设立是我国在生态环境治理领域推出的一项重要战略举措,其核心目标在于形成可复制、可推广的治理模式,以全面推进生态文明建设。该政策有望通过改善区域整体生态环境,提升鸟类栖息地质量,从而对鸟类多样性产生影响。同样,生态环境损害赔偿制度改革试点政策作为一项强化环境责任追究的制度探索,也可能对鸟类生物多样性产生促进作用。回归结果如表5所示,列(1)、列(2)的核心解释变量系数方向和显著性水平均未发生实质性改变,这表明本文所识别的生态环境智慧监测试点对鸟类生物多样性的促进效应是独立且稳健的,并非由其他宏观环境政策驱动。

表 5 排除相关政策干扰检验结果

	(1)	(2)
	国家生态文明试验区	生态环境损害赔偿制度改革试点
<i>treat</i> × <i>post</i>	0.272*** (0.095)	0.303*** (0.096)
控制变量	是	是
城市固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
样本量	1377	1377
R ²	0.480	0.482

4.调整处理组范围

考虑到省级试点与地级市区试点在政策目标与实施层级上存在差异,处理组内部可能存在一定的政策强度异质性。为此,本文在稳健性检验中仅保留13个省级试点地区进行估计,回归结果如表6列(1)所示,与基准回归保持一致,说明处理组的界定方式不影响核心结论的

稳健性。

表 6 其他稳健性检验结果

	(1)	(2)
	调整处理组范围	调整政策冲击变量赋值
<i>treat</i> × <i>post</i>	0.247** (0.098)	0.304** (0.119)
控制变量	是	是
城市固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
样本量	1305	1377
R ²	0.486	0.480

5. 调整政策冲击变量赋值

考虑到生态环境智慧监测于 2022 年 7 月正式施行,试点地区仅在 2022 年下半年受到政策影响,本文参照韩国高等(2025)的做法,将 *post* 在 2022 年赋值为 0.5,2023 年赋值为 1,以更精准捕捉政策强度的时间差异。回归结果如表 6 列(2)所示,核心解释变量在 95%的置信区间上显著为正,说明政策变量的赋值方式不影响本文核心结论的稳健性。

(四)异质性分析

1.环境规制强度

环境规制强度是影响地区生态环境质量的关键制度因素。参考邵帅等(2024)的测度方法,依据 2021 年环境规制强度的中位数,将样本分为强环境规制地区和弱环境规制地区,回归结果如表 7 列(1)和列(2)所示,在环境规制较弱的地区,生态环境智慧监测能够显著提升当地鸟类数量丰富度水平,而在环境规制较强的地区,生态环境智慧监测对当地鸟类数量丰富度的影响并不显著。原因可能是:在环境规制较弱的地区,传统的监管手段往往存在覆盖不足、执行力有限等问题,导致其对生物多样性的保护力度不够。生态环境智慧监测试点政策依托技术赋能,能够有效弥补传统监管短板,实现对生态环境要素的全天候、自动化监测,从而在监管薄弱地区产生更为显著的边际改善效应(韩国高等,2025)。这表明,智慧监测技术作为一种高效的监管工具,在补短板方面发挥了突出作用。

2.经济发展水平

经济发展水平为智慧监测政策的落地提供了基础性的财政支持与需求支撑。本文依据 2021 年人均地区生产总值的中位数,将样本分为高经济发展水平地区和低经济发展水平地区,回归结果如表 7 列(3)和列(4)所示,在经济发展水平较高的地区,生态环境智慧监测能够显著提升当地鸟类数量丰富度水平,而在经济发展水平较低的地区,该影响并不显著。可能的原因在于:从短期来看,生态环境数字治理存在“高投入低产出”甚至“零产出”的可能性

(Zhang, 2025b)。经济发达地区更有能力承担系统的长期维护成本,该地区公众对优美生态环境的需求也更为迫切,这可能使得政策效果更为显著。这意味着强大的经济基础为智慧监测技术发挥生态效益提供了不可或缺的支撑条件。

3.基础设施密度

监测基础设施的完善程度是地区环境治理能力现代化的重要体现。本文依据2021年省份空气质量监测点数与行政区域面积之比的中位数,将样本分为基础设施丰富地区和基础设施短缺地区,回归结果如表7列(5)和列(6)所示,在基础设施较为短缺的地区,生态环境智慧监测能够显著提升当地鸟类数量丰富度水平,而在基础设施较为丰富的地区,生态环境智慧监测对当地鸟类数量丰富度没有显著影响。产生上述结果的原因可能是,在监测基础设施相对匮乏的地区,最大的痛点在于缺乏可靠的基础数据,这严重制约了保护政策的精准性和有效性(Medellin & Soberón, 2024)。生态环境智慧监测体系的建设,能够迅速填补该类地区在数据获取能力上的空白,为识别关键栖息地、评估生态状况提供前所未有的数据支撑,实现从信息盲区到精准治理的跨越,因而其产生的边际效益尤为突出(张大伟, 2023)。这印证了智慧监测在夯实监测基础、破解信息瓶颈方面的核心价值。

表7 异质性分析结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	环境规制强	环境规制弱	经济发展水平高	经济发展水平低	基础设施丰富	基础设施短缺
<i>treat × post</i>	0.108 (0.144)	0.389*** (0.128)	0.419*** (0.117)	0.133 (0.165)	0.234 (0.166)	0.522*** (0.164)
控制变量	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
样本量	689	688	698	679	707	670
R ²	0.526	0.453	0.478	0.500	0.443	0.532

(五)机制检验

1.政府环境治理

如前文理论分析所示,生态环境智慧监测通过全天候数据采集与实时预警,从技术上消除了政府监管的信息盲区,使违规排污、环境破坏等行为能够被及时发现与制止,从而赋能政府环境治理,推动区域环境质量持续改善。城市空气质量是反映地区环境治理成效的重要直观指标(张琦、邹梦琪, 2022),因此,本文选取年平均空气质量指数的对数($\ln aqi$)作为衡量区域政府环境治理水平的代理变量。回归结果表8列(1)所示,生态环境智慧监测对政府环境治理水平具有显著提升作用。长期以来,空气污染一直被视为鸟类种群数量下降的潜在因素之一(Sanderfoot & Holloway, 2017),鸟类在接触空气污染物时,会产生氧化应激反应,随着

空气污染浓度增加,鸟类可能会出现呼吸损伤、行为异常、生殖率下降等严重后果(Agathokleous et al., 2023)。Liang 等(2020)研究证实空气污染的减轻能够明显增加城市鸟类的丰富度。上述实证结果与理论预期一致,共同支持了生态环境智慧监测通过赋能政府环境治理提升鸟类生物多样性水平的传导机制,假说2由此得到支持。

2.企业绿色转型

理论分析指出,生态环境智慧监测通过提升企业排污行为的可见性与可追溯性,大幅提高企业环境违规被发现的概率,压缩其规避监管的空间,从而倒逼企业增加绿色技术创新投入、降低碳排放强度,推动实质性绿色转型。本文从两个方面衡量企业绿色转型:一是采用绿色发明专利数量的对数($\ln invention$),反映企业在绿色技术创新方面的表现,该类创新有助于从源头削减污染物排放。鸟类是对生态系统健康高度敏感的物种(Meng et al., 2025),其生理机能和独特的呼吸系统,使其特别容易受空气污染的影响(Liang et al., 2020)。二是使用二氧化碳排放强度($co2$),刻画企业在节能降碳与能源结构优化方面的成效,已有研究表明,降低碳排放能够有效缓解气候变化对鸟类栖息环境的不利影响(Fu et al., 2025)。此外,由于鸟类体型较小且通常属于昼行性动物,当气温超过其生理耐受极限时,可能在短期内导致鸟类死亡事件增加(Smit et al., 2018)。极端高温也会降低鸟类的繁殖成功率与孵化率,间接影响其长期种群数量(Chen & Khanna, 2024)。回归结果如表8列(2)和列(3)所示,生态环境智慧监测对企业绿色转型的两个维度均具有显著促进作用。结合既有研究关于绿色创新与碳减排有助于提升鸟类多样性水平的结论,可以认定,生态环境智慧监测通过推动企业绿色转型,间接促进了鸟类生物多样性的提升,假说3得到支持。

3.公众环保参与

理论分析进一步指出,生态环境智慧监测将专业生态数据转化为公众可感知、可理解的信息,有效降低了公众获取生态环境信息的门槛,从信息供给端激活了公众环保关注与观鸟参与的内在动机,进而将分散的社会力量转化为推动生物多样性保护的重要支撑。本文从两个角度度量公众环保参与:一是使用雾霾的百度搜索指数($smog$),作为公众对环境问题关注度的代理变量,反映其环境诉求的表达强度,公众可以通过“用脚投票”和“用手投票”两种方式向企业和地方政府表达环保诉求,使其共同营造鸟类友好的生态环境(董延芳、何家欢, 2025);二是采用观鸟用户数的对数($\ln observer$),衡量公众环保行为的变化。回归结果如表8列(4)、列(5)所示,智慧监测对公众环保参与的两个方面均产生了显著正向影响。Brock 等(2021)研究表明,人们对接触野生鸟类的兴趣激增,从而展开投喂行动,这能够直接促进区域鸟类种群增长。由此可推断,生态环境智慧监测通过信息引导激发公众关注与实践参与,形成对鸟类友好的社会氛围,最终提升鸟类生物多样性水平,假说4得到支持。

表 8 机制检验结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	$\ln aqi$	$\ln invention$	$co2$	$smog$	$\ln observer$
$treat \times post$	-0.017* (0.009)	0.223*** (0.065)	-0.053* (0.032)	13.681** (6.887)	0.232*** (0.080)
控制变量	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
样本量	1377	1358	1377	1373	1377
R ²	0.969	0.956	0.976	0.848	0.882

六、结论与政策建议

为应对全球生物多样性加速丧失的严峻挑战,突破传统生态保护中存在的监测覆盖面窄、数据更新滞后与治理响应迟缓等瓶颈,亟须推动生态治理体系向数字化、智能化方向深度转型。在此进程中,生态环境智慧监测通过重塑监管与服务模式,为实现生物多样性的精准保护与长效治理提供了关键的技术路径与政策保障。基于此,本文以生态环境智慧监测创新应用试点作为准自然实验,采用2015—2023年中国观鸟数据,利用双重差分法系统评估了生态环境智慧监测对鸟类生物多样性的影响及内在作用机制。研究结果表明:生态环境智慧监测的实施显著提升了试点地区鸟类生物多样性水平,这一结论在经过更换被解释变量、倾向得分匹配、排除相关政策干扰等一系列稳健性检验后依然可靠。异质性分析发现,生态环境智慧监测对鸟类生物多样性水平的提升效果存在显著的地区差异,其在环境规制较弱、经济发展水平较高和基础设施较短缺的地区表现更为突出,反映出政策效能发挥对地区制度条件、资源禀赋与硬件支撑的依赖性。机制分析显示,生态环境智慧监测通过赋能政府环境治理、激励企业绿色转型、促进公众环保参与三重路径,促进鸟类生物多样性水平提升。根据以上研究结论,本文得出如下政策建议:

第一,将生态环境智慧监测全面纳入生物多样性保护主流政策,加速推广与制度化进程。本文基准回归结果表明,智慧监测的实施对提升鸟类生物多样性水平具有显著且稳健的积极效应。为此,建议及时总结试点成功经验,制定全国性的技术标准、数据协议与管理规范,优先在各类自然保护地、生态功能区进行全面部署,尽快形成规模效应。同时,应将智慧监测产生的栖息地面积变化、关键物种出现频率等生态数据纳入地方官员政绩考核体系,建立基于监测数据的生态保护成效评估与考核挂钩机制,确保智慧监测不仅是技术工具,更成为驱动保护决策科学化、常态化的重要政策杠杆,从而将试点的成功转化为全域生物多样性治理水平的整体提升。

第二,构建基于生态环境智慧监测的多元共治机制,激发整体治理效能。机制分析表明,

政策治理效果依托政府、企业与公众三方实现。本文建议以智慧监测平台为核心,主动打通部门间数据壁垒,全面提升政府环境执法的精准性与时效性;同时,积极建立企业环境行为实时追踪与绿色征信联动机制,激励其落实环保责任;此外,应大力开放非涉密数据并开发公众参与接口,将监测数据转化为公众可理解的生态信息,拓宽社会监督与参与渠道,形成“技术驱动—政府引领—企业转型—公众参与”的良性治理闭环。

第三,实施差异化的智慧监测推进策略,缩小区域间保护成效差距。异质性分析表明,政策效应在环境规制较弱、经济发展水平较高、基础设施较短缺的地区更为突出。据此应分类施策,在规制较弱地区,推动监测数据与执法系统自动联动,将异常预警直接推送至执法终端、固定违规证据,把技术优势转化为监管效能,而规制较强地区宜推动监测数据与既有考核体系挂钩,避免重复建设;在经济发展水平较高地区,鼓励探索智慧监测与生态补偿、绿色金融的融合,撬动市场资源,形成先行示范,而经济薄弱地区应优先纳入财政转移支付与运维补贴,保障系统长期运转;在基础设施短缺地区,优先布局低成本、易维护的轻量化设施,并引入卫星遥感、无人机巡护等替代方案,快速突破硬件瓶颈,而基础设施较完善的地区则应着力于多源数据整合与平台互通,释放存量设施潜能。

本研究亦存在一定局限性。受限于公民科学数据的固有特征,鸟类观测记录数据难以精确反映真实种群数量,本文估计的鸟类丰富度指标反映的是相对丰富度的变化而非绝对种群规模。尽管本文已通过控制观测努力程度、季节因素,并进行多种稳健性检验等方式加以缓解,但精确追踪个体迁徙、匹配高频极端天气事件等,仍需依托更高精度的观测数据,在未来研究中进一步深化探讨。此外,受数据可得性限制,本文采用虚拟变量刻画地区是否被纳入生态环境智慧监测创新应用试点这一离散的制度冲击,因而估计得到的是该政策的平均处理效应,未能进一步刻画各试点在监测领域覆盖范围与政策实施强度上的连续差异,这也是未来研究需要进一步深化的地方。

参考文献:

- [1] 陈善荣,陈传忠,陈远航,等. 面向生态环境治理现代化的生态环境监测数字化转型研究[J]. 环境保护, 2022,50(20):9-12.
- [2] 陈少威,贾开. 数字化转型背景下中国环境治理研究:理论基础的反思与创新[J]. 电子政务, 2020(10): 20-28.
- [3] 崔广慧,姜英兵. 政府环保处罚促进制造业企业环保投资了吗[J]. 中国经济问题, 2022(02): 105-120.
- [4] 董延芳,何家欢.《环境空气质量标准(2012)》的实施对企业价值的影响——基于多时点DID模型的实证检验[J]. 产业经济评论, 2025(05): 52-73.
- [5] 冯阔,林发勤,陈珊珊. 我国城市雾霾污染、工业企业偷排与政府污染治理[J]. 经济科学, 2019(05): 56-68.
- [6] 顾金喜. 生态治理数字化转型的理论逻辑与现实路径[J]. 治理研究, 2020,36(03): 33-41.

- [7] 韩国高,刘田广,庞明川. 生态环境智慧监测与企业环境信息粉饰[J]. 世界经济,2025,48(07):3-35.
- [8] 康健,何雨桐. 基本公共服务均衡性推动共同富裕:效应检验与机制探索[J]. 中国行政管理,2025,41(07):48-58.
- [9] 李建军,蒲泓锦,吴周易. 个人所得税减免的稳就业效应[J]. 数量经济技术经济研究,2025,42(10):112-132.
- [10] 李玉红,王皓. 数字技术、环境治理与企业合规——以污染物自动监测系统为例[J]. 生态文明研究,2024(06):41-51.
- [11] 梁超,于鑫凡,张荣杰. 家庭借贷约束、人力资本形成与长期发展——基于大学生生源地助学贷款的研 究[J]. 管理世界,2025,41(08):109-134.
- [12] 梁宇超,庞军,贾真,等. 现代智慧生态环境治理评价体系的构建与应用研究[J]. 中国环境管理,2024,16(05):68-79.
- [13] 刘钊,孔令乾,张俊飏. 绿色金融与生物多样性——基于中国观鸟数据的考察[J]. 经济学(季刊),2025,25(03):565-580.
- [14] 吕炜,凡盼来,王伟同. 半市场化环保激励与生态恢复:来自新安江流域横向生态补偿的证据[J]. 财贸经济,2025,46(09):22-37.
- [15] 马平平,张明,宋妍. 公众新媒体监督如何促进企业绿色转型基于发展与减排协同视角[J]. 中国管理科学,2024,32(12):71-87.
- [16] 苗宏慧,全情爽,杨铭. 政府数字治理能力对企业能耗强度控制影响的实证研究[J]. 情报科学,2025,43(03):110-118.
- [17] 秦鹏,周继钊. 算法嵌入政府环境治理的正向效应、潜在风险与规制路径[J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(06):80-89.
- [18] 邵帅,葛力铭,朱佳玲. 人与自然何以和谐共生:地理要素视角下的环境规制与环境福利绩效[J]. 管理世界,2024,40(08):119-146.
- [19] 汪顺,周泽将,陈一玲. 大数据能否缓解环境治理中的委托代理问题?[J]. 中国人口·资源与环境,2025,35(01):124-132.
- [20] 伍先斌,张安南,胡森辉. 整体性治理视域下数字赋能水域生态治理——基于河长制的实践路径[J]. 行政管理改革,2023(03):33-40.
- [21] 谢文栋. 政府数字化转型何以提升地方政府环境治理效率?——基于“制度、技术与行为”多维度的考察[J]. 电子政务,2025(10):119-132.
- [22] 张大伟. 深入贯彻全国生态环境保护大会精神为美丽中国建设提供强有力的监测技术支撑[J]. 环境保护,2023,51(18):21-25.
- [23] 张琦,邹梦琪. 环境治理垂直改革的效果、基层机制与影响因素[J]. 经济研究,2022,57(08):172-190.
- [24] 张岳,冯梦微,易福金. 多中心治理视角下农村环境数字治理的逻辑、困境与进路[J]. 农业经济问题,2024(03):36-53.
- [25] 钟腾龙,闵悦,张晓涛,等. 外部需求转移与企业创新:理论、机制与中国证据[J]. 管理世界,2025,41(10):38-62.
- [26] 周博雅,徐若然,徐晓林,等. 智慧环保在城市环境治理中的应用研究[J]. 电子政务,2018(02):82-88.
- [27] Agathokleous, E., P. Sicard, Z. Feng, et al. Ozone Pollution Threatens Bird Populations to Collapse: An Imminent Ecological Threat?[J]. Journal of Forestry Research, 2023, 34(6): 1653-1656.
- [28] Aucone, E., S. Kirchgeorg, A. Valentini, et al. Drone-assisted Collection of Environmental DNA from Tree Branches for Biodiversity Monitoring[J]. Science Robotics, 2023, 8(74): eadd5762.
- [29] Brock, M., J. Doremus, L. Li. Birds of a Feather Lockdown Together: Mutual Bird-Human Benefits During a

Global Pandemic[J]. Ecological Economics, 2021, 189: 107174.

[30] Chen, L., M. Khanna. Heterogeneous and Long-Term Effects of a Changing Climate on Bird Biodiversity[J]. Global Environmental Change Advances, 2024, 2: 100008.

[31] Denny, S., G. Englander, P. Hunnicutt. Private Management of African Protected Areas Improves Wildlife and Tourism Outcomes but with Security Concerns in Conflict Regions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(29): e2401814121.

[32] Frank, E., A. Sudarshan. The Social Costs of Keystone Species Collapse: Evidence from the Decline of Vultures in India[J]. American Economic Review, 2024, 114(10): 3007–3040.

[33] Fu, M., J. Wang, C. Hou, et al. Waterbird Diversity and Its Influencing Factors in Various Types of Coastal Wetlands in the Bohai Rim Region[J]. Global Ecology and Conservation, 2025, 57: e03421.

[34] Gabrys, J. Smart Forests and Data Practices: From the Internet of Trees to Planetary Governance[J]. Big Data & Society, 2020, 7(1): 2053951720904871.

[35] Greenstone, M., G. He, R. Jia, et al. Can Technology Solve the Principal-Agent Problem? Evidence from China's War on Air Pollution[J]. American Economic Review: Insights, 2022, 4(1): 54–70.

[36] La Sorte, F. A., M. F. J. Aronson, C. A. Lepczyk, et al. Assessing the Combined Threats of Artificial Light at Night and Air Pollution for the World's Nocturnally Migrating birds[J]. Global Ecology and Biogeography, 2022, 31(5): 912–924.

[37] Larsen, A. E., D. Engist, F. Noack. The Long Shadow of Biodiversity Loss[J]. Science, 2024, 385(6713): 1042–1044.

[38] Liang, Y., I. Rudik, E. Y. Zou, et al. Conservation Cobenefits from Air Pollution Regulation: Evidence from Birds[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(49): 30900–30906.

[39] Liang, Y., X. Han, K. Zhu. Bytes for Beaks? The Green Transformation of Data Center and Bird Biodiversity in China[J]. Finance Research Letters, 2025, 86: 108564.

[40] Madhok, R. Infrastructure, Institutions, and the Conservation of Biodiversity in India[J]. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 2025, 12(6): 1705–1745.

[41] Madhok, R., S. Gulati. Ruling the Roost: Avian Species Reclaim Urban Habitat During India's COVID-19 Lockdown[J]. Biological Conservation, 2022, 271: 109597.

[42] Medellín, R. A., J. Soberón. Don't Bury Mexico's Biodiversity Capacity[J]. Science, 2024, 384(6691): 9.

[43] Meng, L., P. Liu, Y. Zhou, et al. Blaming the Wind? The Impact of Wind Turbine on Bird Biodiversity[J]. Journal of Development Economics, 2025, 172: 103402.

[44] Norton, L. Long-Term Tracking of Biodiversity is More Important than Ever[J]. Nature, 2018, 556(7700): 309.

[45] Novacek, M. J. Engaging the Public in Biodiversity Issues[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105: 11571–11578.

[46] Pimm, S. L., C. N. Jenkins, R. Abell, et al. The Biodiversity of Species and Their Rates of Extinction, Distribution, and Protection[J]. Science, 2014, 344(6187): 1246752.

[47] Pörtner, H. O., R. J. Scholes, A. Arneth, et al. Overcoming the Coupled Climate and Biodiversity Crises and Their Societal Impacts[J]. Science, 2023, 380(6642): eabl4881.

[48] Rambachan, A., J. Roth. A More Credible Approach to Parallel Trends[J]. Review of Economic Studies, 2023, 90(5): 2555–2591.

[49] Rasmussen, J. H., D. Stowell, E. F. Briefer. Sound Evidence for Biodiversity Monitoring[J]. Science, 2024,

385(6705): 138–140.

[50] Roth, J., P.H.C. Sant’ Anna, A. Bilinski, et al. What’s Trending in Difference-in-Differences? A Synthesis of the Recent Econometrics Literature[J]. *Journal of Econometrics*, 2023, 235(2): 2218–2244.

[51] Sanderfoot, O. V., T. Holloway. Air Pollution Impacts on Avian Species via Inhalation Exposure and Associated Outcomes[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(8): 083002.

[52] Senior, R. A., R. Bagwyn, D. Leng, et al. Global Shortfalls in Documented Actions to Conserve Biodiversity [J]. *Nature*, 2024, 630(8016): 387–391.

[53] Sethi, S. S., A. Bick, M. Y. Chen, et al. Large-Scale Avian Vocalization Detection Delivers Reliable Global Biodiversity Insights[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(33): e2315933121.

[54] Skidmore, A. K., N. Pettorelli, N. C. Coops, et al. Environmental Science: Agree on Biodiversity Metrics to Track from Space[J]. *Nature*, 2015, 523(7561): 403–405.

[55] Smit, B., M. C. Whitfield, W. A. Talbot, et al. Avian Thermoregulation in the Heat: Phylogenetic Variation among Avian Orders in Evaporative Cooling Capacity and Heat Tolerance[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2018, 221(6): jeb174870.

[56] Song, Z., M. Leng, S. Gao, et al. Exploring the Effect of Energy Utilization Transition on Biodiversity: Evidence from the Poyang Lake Migratory Bird Nature Reserve[J]. *Natural Resource Modeling*, 2025, 38(4): e70010.

[57] Teff-Seker, Y., O. Berger-Tal, Y. Lehnardt, et al. Noise Pollution from Wind Turbines and Its Effects on Wildlife: A Cross-national Analysis of Current Policies and Planning Regulations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 168: 112801.

[58] Wiebe, R. A., D. S. Wilcove. Global Biodiversity Loss from Outsourced Deforestation[J]. *Nature*, 2025, 639(8054): 389–394.

[59] Yuan, Y. P., Y. K. Dwivedi, G. W. H. Tan, et al. Government Digital Transformation: Understanding the Role of Government Social Media[J]. *Government Information Quarterly*, 2023, 40(1): 101775.

[60] Zhang, D. Establishing a Nation-Wide Eco-environment Monitoring Network for Sustainable Governance [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2025a, 26: 100585.

[61] Zhang, J. AI-Based Data Intelligence System for Sustainable Ecological Governance and Smart Environmental Management[J]. *Microchemical Journal*, 2025b, 219: 115850.

[62] Zhao, S., L. Teng, V. E. Arkorful, et al. Impacts of Digital Government on Regional Eco-innovation: Moderating Role of Dual Environmental Regulations[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, 196: 122842.

The Impact of Ecological Environment Smart Monitoring on Biodiversity

Cheng Baodong^a, Meng Qi^a, Kong Lingqian^b

(a: School of Economics & Management, Beijing Forestry University; b: College of Economics & Management, Zhejiang A&F University)

Abstract: Biodiversity is the cornerstone of human sustainable development and the security of Earth's ecosystems. However, its conservation has long been constrained by persistent bottlenecks, including limited monitoring coverage, regulatory lag, and insufficient precision. Using the pilot program for eco-environmental intelligent monitoring innovative applications as a quasi-natural experiment, this study draws on data from the China Bird Report Center spanning 2015 to 2023 and employs a Difference-in-Differences model to empirically examine the impact of eco-environmental intelligent monitoring on biodiversity and its transmission mechanisms. The findings indicate that eco-environmental intelligent monitoring significantly enhances biodiversity levels in pilot regions, and this conclusion remains robust across a series of robustness checks. Heterogeneity analysis indicates that the positive effect of smart ecological monitoring on biodiversity is more pronounced in regions with weaker environmental regulations, stronger economic foundations, and less developed infrastructure. Mechanism analysis reveals that smart ecological monitoring enhances regional biodiversity by strengthening government environmental governance, encouraging corporate green transformation, and fostering public participation in environmental protection. This study provides solid evidence for protecting biodiversity through digital means and offers practical insights for advancing the development of smart environmental protection systems and enhancing biodiversity conservation efforts.

Keywords: Ecological Environment Smart Monitoring; Biodiversity; Bird Richness; Ecological Civilization Construction; Difference-in-Differences Method

JEL Classification: Q51, Q57

(责任编辑:朱静静)