

基于磁性氧化铁颗粒的雄安新区水域监测与治理策略的研究

闫其庚*, 任浩宁, 宫 煦, 孙靖怡, 田鑫晴

保定学院物理与电子工程系, 河北 保定

收稿日期: 2026年8月29日; 录用日期: 2026年9月21日; 发布日期: 2026年9月29日

摘 要

作为雄安新区的生态核心, 白洋淀肩负着稳定保持水质在III类及以上, 构建蓝绿交织、清新明亮、水城共融生态格局的重要使命。当前, 雄安水环境治理成效显著, 但历史遗留的磁性金属污染仍具有隐蔽性强、易累积、难降解、可二次释放等特征, 对底泥/水系统稳定、水生生态安全与居民健康构成长期风险。文章以雄安新区水域为研究对象, 系统分析磁性金属污染物来源、赋存特征与治理难点, 结合团队自主研发的花状磁性纳米复合材料与等离子体增强传感技术, 构建“精准检测-高效吸附-磁分离回收”一体化治理体系, 推动污染治理由被动处置向主动防控、分段治理向系统集成转变。研究可为白洋淀生态保护、历史遗留污染精准治理提供技术支撑, 为华北地区同类河湖污染治理提供可复制、可推广的雄安方案, 服务国家生态文明建设与区域高质量发展大局。

关键词

雄安水质, 磁性金属污染, 花状氧化铁纳米颗粒, 监测与治理

Research on Water Environment Monitoring and Treatment Strategies Based on Magnetic Iron Oxide Particles in Xiong'an New Area

Qigeng Yan*, Haoning Ren, Xu Gong, Jingyi Sun, Xinqing Tian

Department of Physics and Electronic Engineering, Baoding University, Baoding Hebei

Received: August 29, 2026; accepted: September 21, 2026; published: September 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 闫其庚, 任浩宁, 宫煦, 孙靖怡, 田鑫晴. 基于磁性氧化铁颗粒的雄安新区水域监测与治理策略的研究[J]. 水污染及处理, 2026, 14(4): 202-208. DOI: 10.12677/wpt.2026.144021

Abstract

As the ecological core of Xiong'an New Area, Baiyangdian bears the vital mission of consistently maintaining water quality steadily at Class III or above, and develop an ecological pattern characterized by interconnected blue and green spaces, a fresh and bright environment, and harmonious integration of water and city. Remarkable achievements have been made in the current water environment governance of Xiong'an, yet the legacy magnetic metal pollution features strong concealment, easy accumulation, poor biodegradability, and potential secondary release. It poses long-term risks to the stability of sediment-water systems, aquatic ecosystem safety, and residents' health. Taking the waters of Xiong'an New Area as the research object, this paper systematically analyzes the sources, occurrence characteristics, and treatment challenges of magnetic metal pollutants. Combined with flower-like magnetic nanocomposites independently developed by our team and plasma-enhanced sensing technology, an integrated system of "precise detection, high-efficiency adsorption, and magnetic separation recovery" is constructed. This transforms pollution control from passive remediation to proactive prevention and control, and from segmented treatment to systematic integrated management. This research can provide technical support for the ecological protection of Baiyangdian and targeted remediation of legacy pollution, as well as a replicable and promotable Xiong'an model for the pollution control of similar rivers and lakes in North China. It serves the overall goals of national ecological civilization construction and high-quality regional development.

Keywords

Water Quality of Xiong'an New Area, Magnetic Metal Pollution, Flower-Like Iron Oxide Nanoparticle, Monitoring and Treatment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

京津冀协同发展为白洋淀水质治理提供全方位保障，而白洋淀水质向好也是京津冀生态协同的标志性成果，二者协同推动区域生态与高质量发展同步提升。雄安新区生态建设中仍面临历史遗留环境挑战[1]-[3]。21世纪初期，雄县、容城、安新三县粗放式工业化导致磁性金属污染物(铁、钴、镍、铬、锰及其化合物)经工业废水排放、废渣堆存等途径长期累积于土壤、水体和沉积物中，具有治理难度大、隐蔽性强、风险周期长等特点。

安新县及周边遗留的有色金属冶炼等行业废水废渣，关停搬迁后仍通过地表径流、地下渗滤污染水体；容城县纺织印染行业的金属络合染料易解离，导致铁、锰等离子超标。这些污染物破坏水生生物群落、恶化底质生境，还可通过食物链富集，威胁生态安全、公共卫生与区域长远发展。

近年来，雄安新区实施超常规治理，白洋淀水质实现跨越式好转，但底泥中磁性金属污染物未得到系统管控，易因水动力扰动等发生二次释放，成为水质稳定的关键瓶颈。安新、容城等工业集聚区底泥重金属本底值高，遗留场地、废渣等形成持续性面源污染，城市建设新增的水土流失等进一步加剧污染，增大了治理难度。更重要的是，水环境监测网络虽不断加密，但在底泥、地下水中的磁性金属污染物等监测指标上仍存在短板，突发污染事件的预警与应急处置能力有待进一步提升。综上，雄安新区水域问题的形成，既源于历史污染、围垦带来的生态欠账和华北干旱半干旱气候的自然本底限制，也与新区建

设带来的发展压力及流域统筹、精细化管控等长效制度短板密切相关，需系统施策、综合推进才能实现水域生态的持续改善。

立足“十五五”开局节点，开展水域磁性金属污染物相关研究，是落实生态文明建设、保障白洋淀生态安全的现实需要，也对新区绿色低碳发展提供支撑具有重要理论与实践意义。目前，雄安新区水域磁性金属污染物研究已构建起涵盖检测、预警与治理的技术框架。检测技术从传统化学分析过渡到高灵敏度现代仪器分析，可精准测定金属含量[4]；环境磁学作为无损补充手段，通过分析沉积物磁学指标，为污染源解析提供依据。治理方面，吸附法与磁性分离技术是研究热点，新型吸附材料研发进展显著[5]。环保疏浚虽被探讨，但成本与生态干扰问题制约应用，清淤参数确定是实践难点[6]。海绵城市相关径流控制措施用于源头减污[7]，生态修复凭借可持续性受到重视，通过恢复湿地系统提升水体自净能力。

2. 新型磁性颗粒和相关监测技术

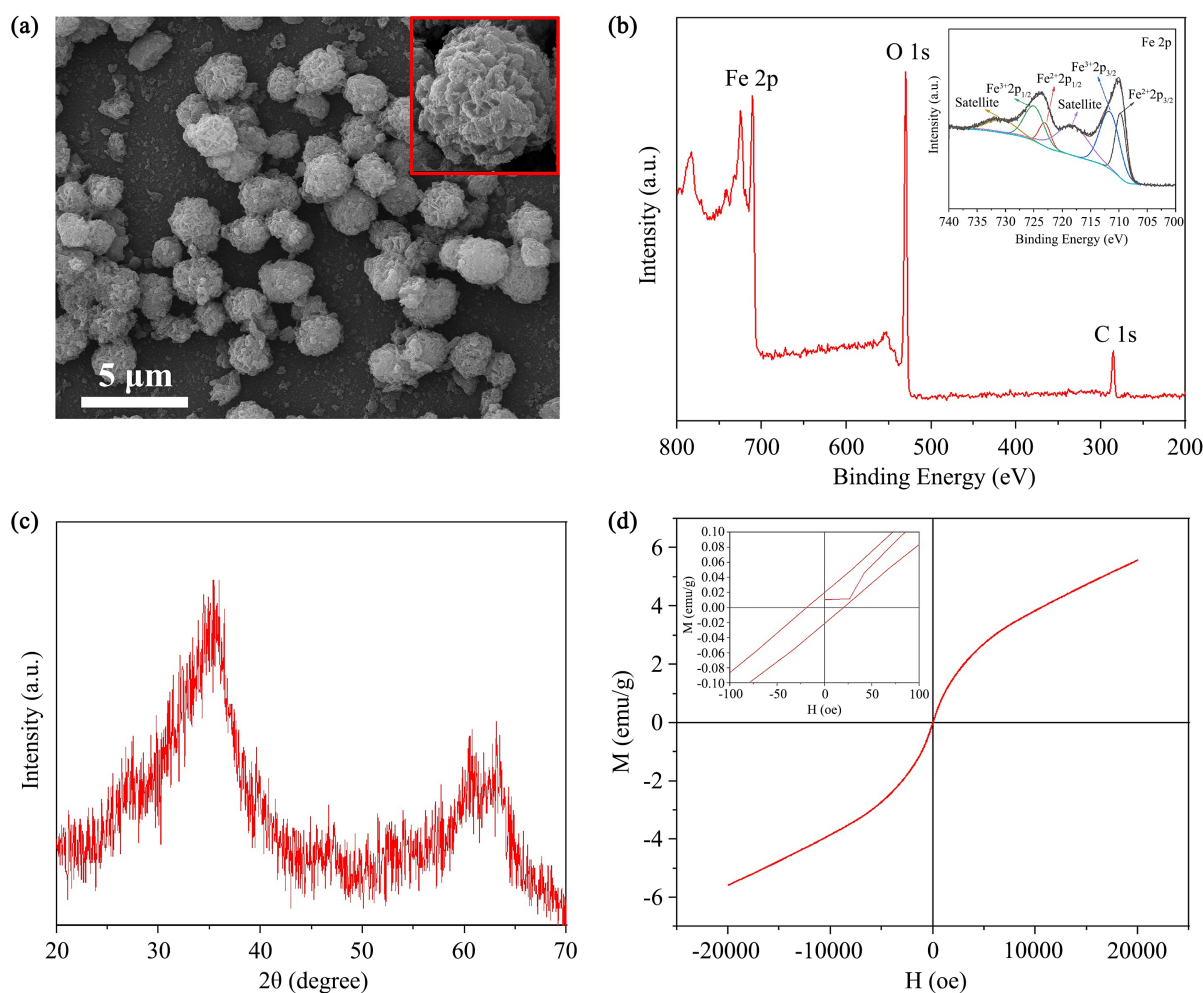


Figure 1. (a) SEM image of the magnetic particles, with the upper-right inset showing a magnified view of a single particle; (b) XPS spectrum of magnetic particles; the inset at the top right shows the XPS spectrum of the iron element; (c) XRD pattern of the magnetic particles; (d) VSM hysteresis loop of the magnetic particles, with the upper-left inset showing a magnified view near the origin

图 1. (a) 磁性颗粒的 SEM 照片，右上角为单颗粒放大后的照片；(b) 磁性颗粒的 XPS 图谱，右上角为铁元素的 XPS 谱线；(c) 磁性颗粒的 XRD 图谱；(d) 磁性颗粒的 VSM 图谱，左上角为原点附近的放大结果

为了实现对水体中磁性金属污染物的高效捕获, 本团队成功开发出一种新型磁性颗粒载体。该材料的制备过程如下: 将 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、尿素和乙二醇按一定比例配制成溶液, 加热反应 30 分钟后, 转移至高温箱中继续反应 6 小时。反应结束后, 将悬浮液经离心处理得到固体产物, 再经干燥后获得氧化铁纳米颗粒。通过调控 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的投加量及反应温度, 可制备得到直径在 500 nm 至 2 μm 范围内的不同样品。扫描电子显微镜(SEM)图像(图 1(a))显示, 所得颗粒表面具有明显的纳米花瓣状结构, 该形貌有助于增大比表面积, 使其具备更丰富的表面活性位点, 这是提升材料对磁性金属离子吸附容量的核心依据。X 射线光电子能谱(XPS)分析结果(图 1(b))表明, 样品中同时存在二价铁与三价铁, 说明氧化铁颗粒的花状结构可能由 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 共同组成。X 射线衍射(XRD)图谱(图 1(c))显示样品结晶性较弱, 仅在(311)和(440)晶面处出现两个较弱的衍射峰, 且峰形宽化, 暗示材料中存在多种氧化物相共存。此外, 振动样品磁强计(VSM)测试结果(图 1(d))显示, 样品在 20,000 Oe 外场下趋于饱和, 虽未表现出强铁磁性, 但具备弱磁性或顺磁性, 预计在外加磁场作用下可有效增强其磁响应性能。

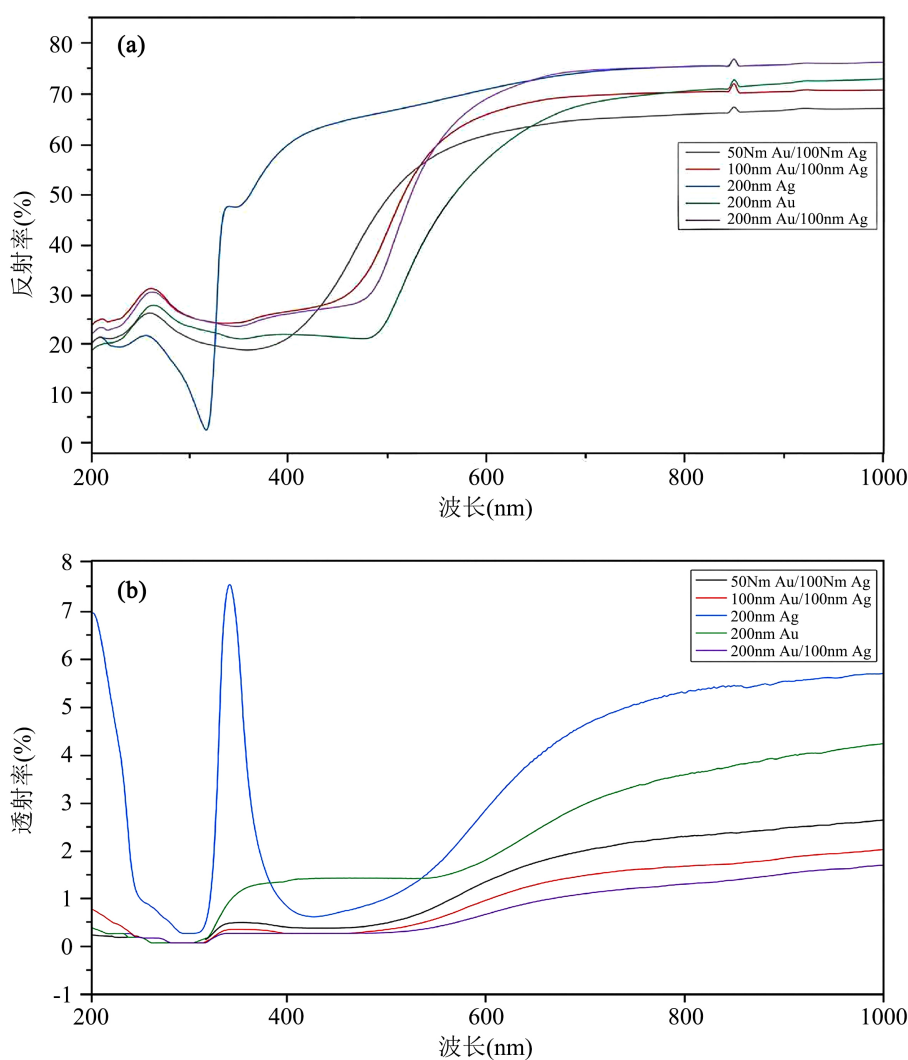


Figure 2. (a) Reflectance versus wavelength for metal thin films with different compositions; (b) Transmittance versus wavelength for metal thin films with different compositions

图 2. (a) 不同成分金属薄膜的反射率与波长的关系; (b) 不同成分金属薄膜的透射率与波长的关系

值得指出的是,为进一步增强材料的光学性能,可在上述磁性颗粒表面包覆等离子体金属纳米层,构建等离子体/磁性复合材料[8]。具体步骤为:将氧化铁颗粒分散于水中,经超声均匀分散后滴加于玻璃基片上,静置 2 天使其自然干燥。随后采用蒸镀法在颗粒表面沉积金、银或金银复合薄膜,总厚度可通过沉积时间控制。经研究发现,当金属薄膜厚度为 100 纳米时,表面存在很大的孔隙。随着薄膜厚度增加到 200 纳米,孔隙逐渐减小并且变少,但是由于颗粒分布的随机性,表面孔隙并不能完全消失。随着金属薄膜的厚度继续增加到 500 纳米,氧化铁颗粒的结构逐渐被覆盖且消失,但是表面的孔隙依然存在。考虑到表面等离子体共振是一种界面波,在金属中损失较快,且要尽可能多地保留颗粒的粗糙度从而增加接触面积,将等离子复合金属薄膜厚度优化至 200 纳米。通过调节金、银比例,可有效调控复合材料表面等离子体共振(SPR)光谱的响应特性。实验表明,金、银比例的调整能够灵敏地影响 SPR 峰位与入射角的关系。银的比例高时,检测波长灵敏范围靠近 400 纳米,金的比例高时,检测波长灵敏范围靠近 550 纳米。而金/银复合薄膜的光学性质兼具两种材料的性质,调节金银比例和厚度可以进一步改善金属薄膜的光学性质。图 2 展示了不同成分薄膜的反射、透射光谱。此外,亦可引入铝、铜等金属构建多层膜结构,以进一步优化材料的光学性能。

3. 高磁敏性表面等离子体检测装置的设计

将磁性氧化铁颗粒分散于去离子水中,辅以超声振荡和表面活性剂实现单分散,随后通过滴涂法均匀沉积于基片表面,经氮气吹扫和低温干燥形成稳定传感层,颗粒覆盖率通过悬浊液浓度调控。外加磁场由置于样品池两侧的线圈提供,磁场方向垂直于芯片表面,通过程控电源调节磁感应强度;微流控通道与芯片表面贴合,进样流速由注射泵控制。操作过程中,溶液中的磁性污染物在磁场作用下被吸引至芯片表面,同时 SPR 激发光路(棱镜耦合)位于芯片下方,反射光谱经光电二极管阵列实时采集,磁场、流路与光学探测同步触发,通过时序控制实现“吸附-检测-清洗”的自动循环。这些工艺参数经优化后,可确保芯片批次间一致性及检测重现性,为一体化体系提供可靠硬件基础。

通过在磁性颗粒表面包覆金、银等等离子体金属纳米层,可构建具有表面等离子体共振效应的复合探针。其光学信号能够灵敏响应环境中特定金属污染物的浓度与种类变化。此外,通过调控金属层种类及多层结构比例,可实现对不同磁性金属污染物的特异性识别与信号增强。外加磁场驱动溶液中磁性污染物颗粒定向吸附于金属薄膜表面,该过程直接改变了界面处的折射率与介电常数。因此,磁场通过增强局部磁性物质浓度间接调制界面介电环境,从而改变 SPR 共振条件。结合便携式光谱仪与数据传输单元,可进一步构建实时、在线水质监测网络。磁性花状纳米颗粒具备高比表面积与丰富表面活性位点,可高效吸附水中磁性金属离子。其固有的弱磁/顺磁特性使其能在外加磁场作用下实现快速分离与回收,从而将污染物从水体中去除,避免二次污染。治理过程可与检测信号联动,实现污染物超标时的自动投放与回收响应。

图 3(a)中所展示的即为基于等离子体/磁性复合材料的检测芯片,可用于表面等离子体共振(SPR)检测技术,该技术原理图如图 3(b)所示。在检测过程中,探测光由光源生成,经由光路系统引导后被棱镜折射,从而激发金属薄膜产生表面等离子体共振。位于棱镜另一侧的探测器负责持续采集反射光的光谱信号。在外加磁场下(装置内含磁性线圈),具备顺磁特性的检测芯片会被磁化。金属薄膜的另一侧与样品池相连,在流动系统作用下,检测液体从进液口注入样品池,其中的目标分析物(如磁性污染物颗粒)会吸附在金属薄膜表面,引起界面折射率与介电常数的变化。与传统的 SPR 检测技术不同的是,这种高磁敏性 SPR 检测技术通过增加磁性颗粒和外加磁场,提高了检测芯片对磁性物质(尤其是部分重金属污染物)的敏感度。通过分析进样前后光谱特征(包括峰位、强度、线宽及线形等)随时间的变化,可获得分析物的组成、尺寸等物化信息。金属薄膜及其构成的检测芯片是实现 SPR 辐射的关键部件。研究表明,能够激发

表面等离子体波的材料，其介电常数实部需为绝对值较小的负值，虚部也需保持较小绝对值，以控制电磁损耗。检测结束后，切断磁化线圈中的电流便可移除磁场。随后，需持续通入不含分析物的溶液，对检测芯片表面进行清洗，以去除已结合的物质，使整个系统恢复至初始状态。该技术通过集成磁性功能，实现了对磁性污染物的高选择性识别与分离，大幅提升了检测的特异性与抗干扰能力。同时，其“磁场可控吸附、光信号检测、原位清洗再生”的一体化设计，显著增强了检测流程的自动化程度与可重复操作性。

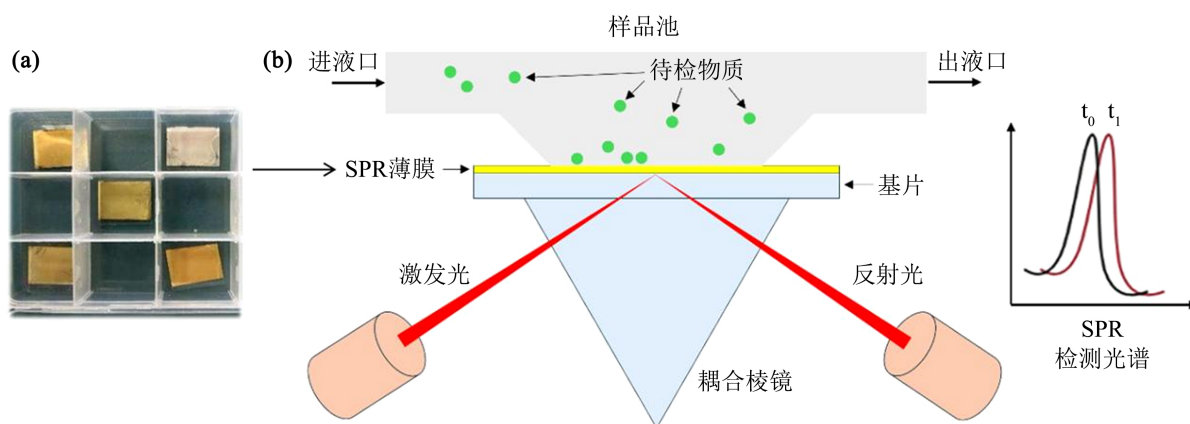


Figure 3. (a) Magnetic particle-based detection chip; (b) Schematic diagram of surface plasmon resonance spectroscopic detection technique

图 3. (a) 基于磁性颗粒的检测芯片；(b) 表面等离子体共振光谱检测技术示意图

4. 检测 - 治理一体化体系

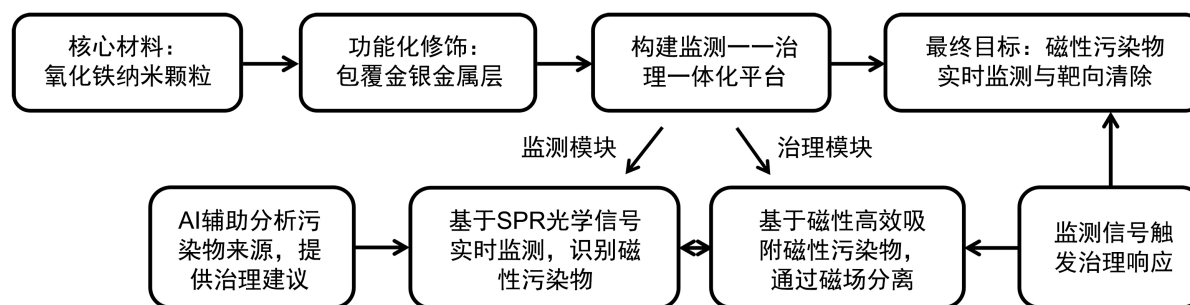


Figure 4. Logical flow chart of the integrated detection-treatment system constructed using magnetic particles

图 4. 应用磁性颗粒构建检测 - 治理一体化体系的逻辑流程图

基于上述特性，该平台实现了检测与治理功能的一体化集成(图 4)，突破了传统“先采样、后送检、再治理”的分离模式，显著提升了治理的精准性、时效性与响应效率。纳米花状结构保障了高吸附容量与速率，磁性回收机制则大幅缩短治理周期，材料可重复使用也降低了长期运维成本。该技术具备低环境扰动特性，适用于原位/半原位修复，契合雄安新区绿色生态建设目标。该一体化体系技术路径具有较强普适性与推广价值。本研究为雄安水域的治理目标形成了一套分阶段递进的系统策略。前期聚焦于污染本底调查与动态监测网络的构建，通过结合环境磁学分析和基于该材料构建的等离子体增强传感探针，实现磁性金属污染分布的精准识别与实时在线预警。中期则侧重于监测与治理的智能联动响应，一旦监测到污染超标，系统即触发指令，向水体投加功能性磁性纳米颗粒以高效吸附污染物，并利用外

加磁场实现污染物的快速磁分离与回收,从而显著提升了治理的时效性并避免了二次污染。后期的重点在于体系的闭环优化与长效运行,通过对回收材料的再生处理实现循环利用,并基于持续监测数据对治理效果进行动态评估与策略优化,最终形成一套标准化、可复制的“雄安方案”,旨在为区域水环境的长治久安提供科技支撑与系统示范。

5. 结论与展望

本文系统研究了雄安新区水域磁性金属污染物的治理策略,分析了其来源、危害及区域环境现状,并结合相关政策要求,明确了治理的紧迫性与意义。在梳理现有检测与治理技术基础上,提出引入新型功能化磁性材料,构建检测-治理一体化体系,以实现从被动应对到主动管控的转变。通过多学科交叉创新、多技术系统集成、多部门协同推进,打造科技赋能、生态优先、精准高效、长效管控的雄安治理模式,为白洋淀永续安全以及新区高水平生态保护与高质量发展提供坚实支撑,也为我国河湖生态修复、历史遗留重金属污染治理与美丽中国建设提供先行示范。

基金项目

2025 年度河北省社会科学发展研究课题项目(HBSKFZ25YB152)。

参考文献

- [1] 连少甫,李月颖.白洋淀生态环境危机与治理的历史考察[J].石家庄学院学报,2022,24(2):16-22.
- [2] 严雷鸣,张红,尤晓慧,等.白洋淀淀内封闭鱼塘底泥重金属污染特征分析[J].四川环境,2025,44(3):34-41.
- [3] 李新丰,车轩,陈晓龙,等.综合生态修复工程对白洋淀污染源及水质健康影响研究[J].长沙大学学报,2025,39(5):62-75+92.
- [4] 高雅君,马东兴,惠文瑛,等.原子吸收光谱法和电感耦合等离子体原子发射光谱法测定肥料中铬含量的比较研究[J].肥料与健康,2025,52(2):67-70.
- [5] 郭雅馨,薛沐莹,陈云霄,等.铁基磁性生物炭制备及其对废水中重金属吸附性能研究进展[J].环境化学,2026,45(4):1535-1559.
- [6] 李萌萌,陈亮,陈慧华,等.底泥环保疏浚技术及应用进展[J].环境工程,2025,43(7):48-63.
- [7] 苏杰.海绵城市理念下的生态河道治理探究[J].现代园艺,2025,48(18):155-157.
- [8] 张微微,陈宇春,王菊英,等.表面等离子体共振技术在环境污染物分析中研究[J].环境科学与技术,2007(5):95-97+121.