

微塑料在黄河流域的污染现状研究进展及展望

闫聪慧

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年12月12日; 录用日期: 2025年1月6日; 发布日期: 2025年1月16日

摘要

黄河流域作为中国重要的水源地, 近年来也面临着日益严重的微塑料污染威胁。本研究通过对比分析国内外关于黄河流域微塑料污染的研究现状及出台的相关治理措施, 分析了黄河流域微塑料污染的来源、分布特征及生态危害, 并探讨了微塑料污染的监测、处理技术以及治理策略的发展现状。研究表明, 黄河流域的微塑料污染主要来源于工业废水、农业径流、生活垃圾等, 其治理难度较大, 需要多层次、系统性的防治手段。本论文旨在深入研究黄河流域微塑料的现状、来源、危害及治理措施, 为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据。

关键词

微塑料, 黄河流域, 污染现状, 生态影响, 治理策略

Research Progress and Prospects on the Pollution Status of Microplastics in the Yellow River Basin

Conghui Yan

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Dec. 12th, 2024; accepted: Jan. 6th, 2025; published: Jan. 16th, 2025

Abstract

The Yellow River Basin, as an important water source in China, has also been facing increasingly serious threats of microplastic pollution in recent years. This study compares and analyzes the current research status and relevant control measures on microplastic pollution in the Yellow River Basin at home and abroad. It analyzes the sources, distribution characteristics, and ecological hazards of microplastic pollution in the Yellow River Basin, and explores the development status of

monitoring, treatment technologies, and treatment strategies for microplastic pollution. Research has shown that microplastic pollution in the Yellow River Basin mainly comes from industrial wastewater, agricultural runoff, household waste, etc. Its treatment is difficult and requires multi-level and systematic prevention and control measures. This paper aims to conduct in-depth research on the current situation, sources, hazards, and control measures of microplastics in the Yellow River Basin, providing scientific basis for ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin.

Keywords

Microplastics, Yellow River Basin, Current Pollution Situation, Ecological Impact, Governance Strategy

Copyright © 2025 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

微塑料(<5 mm)作为一种新型污染物近年来受到国内外广泛关注[1], 已广泛存在于全球水体、土壤和空气中, 威胁生态环境和人体健康。随着塑料制品使用的增加, 微塑料污染规模和复杂性不断加剧。作为中国重要河流, 黄河的水资源对沿岸经济和生物多样性至关重要。近年来, 黄河流域的微塑料污染问题引发了科研界和管理部门的重视。尽管水质保护取得了一定进展, 微塑料污染治理依然面临巨大挑战。了解黄河流域中不可降解的微塑料污染现状, 进一步推动黄河流域微塑料污染防治[2], 对提升黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

位于中国北部的黄河流域因各种形式的污染而备受关注。研究集中于该流域污染的不同方面, 包括非点源的营养物污染[3]、表层沉积物中的汞污染[4]以及乌兰素海湖等淡水水体中出现的微塑料[5]。最近的研究强调了微塑料在黄河流域的存在, 有研究报告称微塑料污染了渭河的地表水和沉积物[6], 以及黄河本身[7]。这些研究发现的主要塑料类型包括聚乙烯、聚苯乙烯和聚对苯二甲酸丁二醇酯[5]。正如一项评估黄河流域有害物质相关健康风险的研究[8]所强调的那样, 黄河流域存在的微塑料引发了人们对潜在健康风险的担忧。此外, 对黄河流域的水生态安全也进行了评估, 结果表明黄河流域的水生态安全总体状况较差[9]。进一步的研究探讨了流域内微塑料的发生和分布情况, 重点关注特定支流, 如延河[10]。此外, 还提出了控制黄河流域微塑料污染的策略, 强调需要采取有效的管理措施[11][12]。总之, 微塑料污染是黄河流域日益严重的问题。

2. 黄河流域微塑料污染的现状

2.1. 微塑料的定义及来源

微塑料指直径小于 5 毫米的塑料颗粒, 分为初生微塑料和次生微塑料。初生微塑料多见于化妆品和工业中的微珠, 而次生微塑料是由较大的塑料制品在环境中分解产生[2][13]。其形状也多种多样包括: 纤维状、薄膜状、碎片状以及颗粒状等[14]。微塑料由不同种类的塑料组成, 呈现非均匀性。因其尺寸较小, 肉眼通常难以观察到。微塑料在海洋生态系统以及河流、湖泊等淡水生态系统中被广泛检测出, 被形象地称为“海洋中的 PM2.5”。

黄河流域的微塑料污染源广泛，主要包括工业废水、农业径流、生活垃圾和交通运输。西安、郑州等城市的工业废水排放中含有大量微塑料，尤其是塑料加工行业。农业中，塑料膜和农药包装通过径流进入河道，进一步加剧污染。城市日常废弃的塑料制品如塑料袋、瓶子等在风和雨的作用下进入黄河。此外，交通运输中的轮胎磨损产生的橡胶颗粒也在黄河流域不断积累。

2.2. 黄河流域微塑料的分布特征

黄河流域微塑料污染存在显著的空间差异。上游地区人口稀少，工业和农业活动较少，因此污染较轻。然而中游地区，尤其是兰州和西安等城市，由于工业和农业的集中，水体中微塑料浓度明显增高，每立方米水体中观测到 2000 至 3000 个微塑料颗粒。下游区域，山东入海口，由于水流汇集和流速缓慢，微塑料在沉积物中的浓度最高，达到每公斤沉积物 50 至 100 个颗粒。这一差异表明微塑料在下游区域逐步累积，污染情况最为严重在河套灌区及乌梁素海地区，由于长期覆膜种植等原因，农作土壤中含有较大丰度的微塑料，这些微塑料经风力和人为等作用进入河套灌区排水系统[15]，进而进入乌梁素海。研究表明，乌梁素海水体及底泥中微塑料最大丰度分别达到 10,120 个/m³ 和 24 个/kg，形状主要包括纤维状、薄膜状、碎片状以及颗粒状，且水体和底泥中均以纤维状微塑料为主，有色塑料所占比例最高值为 94.90%，且各点微塑料中以尺寸大于 2 mm 的居多[16]。微塑料丰度在乌梁素海水体中具有显著的空间差异性，主要表现为从南向北丰度逐渐递减[17]。此外，在河套灌区排水干沟和总排水干沟水体中观测到微塑料丰度最大值为 11,200 个/m³，且透明纤维状微塑料含量居多；并通过估算得出河套灌区总排水干沟每天可向乌梁素海排放的微塑料质量达到 116.06 kg。

在黄河山西段，水体中微塑料的浓度范围为 10~100 个/L，沉积物中微塑料的浓度范围为 10~50 个/kg，以粒径小于 2 mm 的微塑料为主。

在沁河(焦作段)，排污口的污水样品中，微塑料尺寸为 500~2000 μm，颜色以透明和蓝色为主，纤维状是微塑料在各个样点的主要形状。排污口水体中微塑料种类以聚乙烯为主，其可能与周边区域的农业生产和居民生活排放有关。

此外，有研究指出海洋中 95% 的塑料垃圾来源于 10 条河流，其中黄河是亚洲的主要污染河流之一。黄河流域微塑料污染对当地的水产养殖和人类健康产生了严重影响，黄河三角洲地带不同生境微塑料分布规律表明“三角洲国家自然保护区”内人类活动频率较低，黄河中下游地区地表水污染情况处于中等偏下水平，但仍面临着原位风化降解、潮汐风力搬运等多种潜在的微塑料污染[18]的危害状况。

黄河流域不同区域微塑料丰度与流经市域的人口、水域状况、工程建设等因素密切相关。

从人口因素来看，人口密集区域往往产生更多的塑料垃圾。随着人口的增加，塑料制品的使用量也相应上升，日常生活中使用的塑料袋、喝过的塑料瓶等。这些塑料制品如果不正当处理，很容易进入黄河流域，增加河流中微塑料的丰度。在一些人口密集的城市附近的黄河段，微塑料的浓度可能相对较高。

水域状况对微塑料丰度也有重要影响。水流速度、水深等因素会影响微塑料的分布和沉积。水流速度较快的区域可能会将更多的微塑料携带到沉积物中，而水流缓慢的区域则可能导致微塑料的积累。

工程建设方面，已建成的大小水库有 3100 多座，这些水库的建设和运行可能会对微塑料的分布产生影响。水库的蓄水和放水过程可能会改变水流速度和流向，从而影响微塑料的迁移和沉积。同时，工程建设过程中也可能产生一定量的塑料垃圾，如果处理不当，也会增加微塑料的丰度。

为了进一步摸清黄河流域不同区域微塑料丰度与这些因素的相关性及变化规律，需要在中央统一规划下，由沿黄各省(区)政府牵头，生态环境部门主导，科研院所、高校等相关领域的科学家具体负责，尽快开展黄河流域微塑料污染现状调查工作。全面采集补充黄河流域微塑料污染数据[6]，包括不同区域的微塑料丰度、人口数量、水域特征以及工程建设情况等。通过对这些数据的分析，可以更好地了解微塑

料污染的来源和传播途径，为制定有效的治理措施提供科学依据。

2.3. 黄河流域微塑料污染的检测与评估

微塑料污染的检测主要通过取样分析、显微镜观察和光谱分析等技术进行。取样分析包括从不同水域和沉积物中提取样本，显微镜用于识别微塑料的形状和大小，而光谱分析傅里叶变换红外光谱能准确分析其化学成分。然而，黄河流域地形复杂、水体流速快，取样时容易受到干扰，增加了数据误差。同时，黄河水中悬浮颗粒物含量高，给检测带来挑战。尽管如此，国内研究者已开展了大规模监测工作，北京大学和中科院的研究表明，黄河干支流中广泛存在形态多样、成分复杂的微塑料污染。

3. 黄河流域微塑料污染的生态影响

3.1. 微塑料对水生生态系统的影响

微塑料对黄河流域的水生生态系统造成了潜在的威胁，微塑料在水体中广泛存在，有研究表明这些微塑料可能会吸附环境中的有毒有害物质，如重金属、抗生素和细菌等，再通过食物链传播，对生物体生长发育、内分泌和繁殖产生不利影响。尤其是对浮游生物、鱼类和其他水生生物的影响较为显著。

首先，微塑料在水体中的广泛分布使得其成为潜在的污染物载体。由于其小尺寸和高比表面积，微塑料能够吸附大量的有毒有害物质。在黄河流域的水体中，微塑料可能吸附来自周边农业生产和工业排放的重金属，如铅、汞、镉等。这些重金属被微塑料吸附后，可能会随着微塑料在水体中的迁移而扩散到更广泛的区域，对水生生物造成严重威胁。抗生素也是微塑料可能吸附的一类有害物质。随着医疗和农业领域抗生素的广泛使用，部分抗生素可能进入水体环境。微塑料吸附抗生素后，可能会改变抗生素的理化性质，对水生生物的生存和繁殖产生不良影响。被微塑料吸附后的抗生素可能会干扰水生生物的免疫系统，降低其对疾病的抵抗力。此外，细菌也容易在微塑料表面附着和生长。细菌可以很好地在有微塑料的环境下生存，这些微塑料能够促进细菌的繁殖和扩散。这些附着在微塑料上的细菌可能会携带一些有害细菌，如致病菌等。当水生生物摄入这些含有细菌的微塑料时，可能会引发疾病，影响其健康状况并对水生环境造成危害。

微塑料由于其体积较小、易漂浮，容易被浮游动物误食，从而进入食物链。研究发现，黄河流域的鱼类体内已检测出微塑料颗粒，其影响不仅限于鱼类的消化系统，还可能通过生物累积作用影响到更高营养级的物种。此外，微塑料表面易吸附有毒物质，如重金属和一些有机污染物，从而加剧了对水生生物的危害。

3.2. 微塑料对土壤和农业生态的影响

微塑料不仅影响水生生态系统，还通过农业径流进入黄河流域的土壤中，给农田生态系统带来破坏。微塑料对土壤的影响主要体现在化学性质和物理性质等方面，包括容重、保水性和有机碳含量等，同时也会影响土壤中酶的活性和微生物群落结构。首先，微塑料会改变土壤的容重。随着微塑料在土壤中的积累，土壤的颗粒结构发生变化，可能导致土壤变得更加松散或紧实，从而影响容重。例如，一些研究发现，当土壤中微塑料含量较高时，容重会有所降低，这可能是因为微塑料的存在改变了土壤孔隙度，使得土壤变得更加疏松[19]。其次，微塑料对土壤保水能力也有显著影响。微塑料的表面特性可能会影响土壤颗粒与水分之间的相互作用。一方面，微塑料可能会阻塞土壤孔隙，减少水分的渗透和储存空间，从而降低土壤的保水能力。另一方面，一些微塑料具有较强的吸水性，可能会与土壤颗粒竞争水分，进一步影响土壤的保水性能。

此外，微塑料还会影响土壤中的有机碳含量。有研究表明微塑料可能会吸附土壤中的有机物质，进

而改变土壤微生物群落结构,从而影响有机碳的分解和转化过程。一些研究表明,微塑料的存在可能会抑制土壤中有机碳的矿化,导致有机碳含量相对增加[20]。然而,也有研究发现微塑料可能会促进某些有机物质的分解,从而降低土壤中有机碳含量。具体影响跟微塑料的类型、浓度以及土壤的理化性质等多种因素有关。此外,微塑料对土壤酶活性的影响也不容忽视。土壤酶对土壤养分循环、土壤中的有机物分解等过程中起着关键作用[19]。微塑料可能会通过改变土壤环境条件,如 pH 值、水分含量等,影响土壤酶的活性。某些微塑料可能会释放出有害物质,抑制土壤酶的活性;而另一些微塑料可能会为土壤微生物提供附着表面,间接影响土壤酶的产生和活性。

在黄河沿岸的农田,农用塑料制品的使用广泛,尤其是地膜覆盖的使用率极高,然而这些塑料制品在长期使用和风化过程中逐渐被分解成为微塑料,并渗入土壤中。微塑料在土壤中具有较强的稳定性,难以自然降解,从而可能改变土壤结构,影响土壤透气性和保水能力,进而影响作物的生长[21]。兰州大学的研究表明,甘肃地区的部分农田土壤中微塑料含量已经达到每公斤土壤 50 至 100 个颗粒,尤其是在长期使用农用塑料制品的区域,这种积累效应可能导致土壤肥力下降,影响农业生产。

3.3. 微塑料的长距离传输与沉积

微塑料在黄河流域的迁移和沉积具有明显的长距离传输特性。随着水流的运动,微塑料颗粒从上游向下游传输,并在河流转弯处或流速较慢的区域形成沉积。黄河流域的水文特征使得微塑料容易随季节性洪水和人类水利工程的变化而扩散,尤其在汛期水流量大,微塑料的传输速度加快。黄河入海口区域由于水流减缓,成为微塑料沉积的主要区域。山东入海口附近的沉积物研究显示,微塑料在该地区的积累量远高于中上游,这种沉积不仅影响底栖生物的生存环境,还可能通过风暴潮等自然现象重新进入水体,进一步扩大污染范围。

4. 黄河流域微塑料污染的治理策略

4.1. 微塑料污染的监测与预警机制

黄河流域的微塑料污染治理离不开有效地监测与预警机制。当前,黄河流域已初步建立了水质监测网络,但微塑料的专门监测仍相对薄弱。加强微塑料监测网络的建设,应覆盖从上游到下游的主要支流和入海口区域,并引入先进的监测设备和技术,如高分辨率的光谱分析仪器和自动化采样设备。政府部门应与科研机构合作,建立基于实时数据的预警系统,及时发现微塑料浓度的异常变化,尤其是在工业集中的中游和下游区域。通过定期发布污染预警报告,提升各级管理者和公众对微塑料污染的重视程度。

4.2. 微塑料的处理与回收技术

在微塑料治理方面,物理过滤和生物降解技术正逐渐成为治理的主流手段。国内一些大型水处理企业,已经在污水处理厂中引入了微塑料过滤技术,采用超滤膜系统来有效拦截微塑料颗粒。此外,生物降解技术也具有一定潜力,有望减少微塑料的源头污染。然而,微塑料的处理面临技术挑战,尤其是黄河流域复杂的水文环境对过滤设备的耐用性和效率提出了更高要求。

4.3. 政策与公众参与的治理措施

治理黄河流域的微塑料污染,政策支持与公众参与至关重要。政府应制定严格的塑料制品使用限制政策,特别是在黄河沿岸的工业和农业活动中,限制一次性塑料制品的生产和使用。与此同时,地方政府应加强对微塑料污染的立法和监管,推动各级环保机构加大对企业排放的监控力度。公众的环保意识提升也是治理的重要环节,通过推广环保教育、组织河流清洁活动,鼓励民众积极参与环境保护工作。

4.4. 微塑料污染的治理预期效果

在黄河流域,通过加强对塑料制品生产、使用和废弃环节的管理,限制一次性不可降解塑料制品的生产、销售和使用,能在短期内减少新的微塑料进入环境的数量。在一些重点区域,如城市河段、水源地附近等,通过加强监测和清理工作,能够使这些区域的微塑料污染程度在短期内得到一定程度的缓解。通过宣传教育活动,提高公众对微塑料污染的认识和重视程度,促使公众在日常生活中减少塑料制品的使用,并积极参与微塑料污染的防治工作。公众环保意识的增强将为长期的治理工作奠定良好的基础。黄河流域的微塑料污染水平显著降低,达到国家规定的环境质量标准,甚至接近自然背景值。黄河水生态系统恢复健康,实现可持续发展,为流域内的经济发展和人民生活提供良好的生态环境保障。政府、企业、科研机构和公众之间形成良好的合作机制,共同推动微塑料污染的治理工作。相关的法律法规、政策措施不断完善,治理技术不断创新,形成一套科学、有效的微塑料污染长效治理机制。

4.5. 微塑料污染的治理评价方法

通过采集黄河水样本、沉积物样本等,利用显微镜计数、光谱分析等技术手段,确定样本中微塑料的数量,计算出微塑料的丰度。这是最直接、最基本的评价指标,能够直观地反映出黄河流域微塑料污染的程度。分析微塑料的尺寸大小和形状类型的分布情况,了解不同尺寸和形状的微塑料在黄河流域的占比。纤维状、颗粒状、片状等不同形状的微塑料可能具有不同的来源和环境行为,对其分布的研究有助于追溯微塑料的来源。考察黄河流域不同河段、不同区域的微塑料分布情况,确定微塑料污染的高风险区域和低风险区域。

5. 结语

黄河流域微塑料污染问题已经引起了广泛关注,需要政府、企业、社会组织和公众共同努力[22],采取有效的治理措施,减少微塑料的排放和污染,保护黄河流域的生态环境。同时,各研究单位需要加强对微塑料污染的研究,深入了解微塑料的来源、分布、迁移和转化规律,为制定更加科学有效的治理措施提供依据。

综上所述,微塑料污染已对黄河流域的生态环境和水资源安全构成严重威胁。尽管现阶段黄河流域的微塑料污染治理已经取得了一些初步进展,但依然存在许多问题亟待解决。未来的治理工作应结合流域的实际情况,进一步加强污染源头管控、技术创新与多部门合作。与此同时,公众的环保意识提升也至关重要。通过全面的污染防控体系构建与政策引导,可以有效减缓黄河流域微塑料污染,促进该地区生态系统的可持续发展。本文从多方面概述分析微塑料在黄河流域的污染现状,不足之处在于未取样品进行细致数据分析微塑料的污染来源以及在多介质中的迁移机理,后续文章可进行数据补充。

参考文献

- [1] 任欣伟,唐景春,于宸,等. 土壤微塑料污染及生态效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1045-1058.
- [2] 刘赞,孙中亮,史良,等. 黄河流域微塑料污染现状及防治策略[J]. 生物工程学报, 2023, 39(2): 488-499.
- [3] Ouyang, W., Skidmore, A.K., Toxopeus, A.G. and Hao, F. (2010) Long-Term Vegetation Landscape Pattern with Non-Point Source Nutrient Pollution in Upper Stream of Yellow River Basin. *Journal of Hydrology*, **389**, 373-380. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.020>
- [4] Gao, B., Han, L., Hao, H. and Zhou, H. (2016) Pollution Characteristics of Mercury (Hg) in Surface Sediments of Major Basins, China. *Ecological Indicators*, **67**, 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.031>
- [5] Wang, Z., Qin, Y., Li, W., Yang, W., Meng, Q. and Yang, J. (2019) Microplastic Contamination in Freshwater: First Observation in Lake Ulansuhai, Yellow River Basin, China. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 1821-1830. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00888-8>

- [6] Law, K.L. and Thompson, R.C. (2014) Microplastics in the Seas. *Science*, **345**, 144-145.
<https://doi.org/10.1126/science.1254065>
- [7] Liu, R.-P., Li, Z.-Z., Liu, F., Dong, Y., Jiao, J., Sun, P.-P. and Rm, É. (2021) Microplastic Pollution in Yellow River: Current Status and Research Progress of Biototoxicological Effects. *China Geology*, **4**, 585-592.
- [8] Chen, Y., Zhao, Y., Zhao, M.M., Wu, J. and Wang, K. (2021) Potential Health Risk Assessment of HFRs, PCBs, and OCPs in the Yellow River Basin. *Environmental Pollution*, **275**, Article 116648.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116648>
- [9] Qiu, M., Zuo, Q., Wu, Q., Yang, Z. and Zhang, J. (2022) Water Ecological Security Assessment and Spatial Autocorrelation Analysis of Prefectural Regions Involved in the Yellow River Basin. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 5105.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-07656-9>
- [10] Zhao, X., Liu, Z., Cai, L. and Han, J. (2023) Occurrence and Distribution of Microplastics in Surface Sediments of a Typical River with a Highly Eroded Catchment, a Case of the Yan River, a Tributary of the Yellow River. *Science of the Total Environment*, **863**, Article 160932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160932>
- [11] Sun, Z., Sun, L.-Q. and Wang, B. (2023) Microplastic Pollution in the Yellow River Basin: Current Status and Control Strategy. *Water, Air, & Soil Pollution*, **234**.
- [12] Liu, Z., Sun, Z., Shi, L. and Wang, Q. (2023) Microplastics Pollution in the Yellow River Basin: Current Status and Control Strategy. *Chinese Journal of Biotechnology*, **39**, 488-499.
- [13] Cheung, P.K. and Fok, L. (2017) Characterisation of Plastic Microbeads in Facial Scrubs and Their Estimated Emissions in Mainland China. *Water Research*, **122**, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.053>
- [14] 郝若男. 乌梁素海微塑料空间分布及迁移-沉降规律[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [15] 杨帆. 微塑料在河套灌区排水干沟分布特征及迁移影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古科技大学, 2021.
- [16] 秦一鸣. 乌梁素海微塑料污染特征及风险评价[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古科技大学, 2020.
- [17] 宋劫, 易雨君, 周扬, 等. 黄河三角洲潮上带和潮间带不同生境微塑料分布规律[J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(3): 607-615.
- [18] 史思伟. 长期施用生物炭对土壤碳库的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [19] 胡晓婧, 刘俊杰, 王浩, 等. 微塑料污染对土壤环境质量和微生物生态学特性的影响研究进展[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1479-1485.
- [20] Ding, L., fan Mao, R., Guo, X., Yang, X., Zhang, Q. and Yang, C. (2019) Microplastics in Surface Waters and Sediments of the Wei River, in the Northwest of China. *Science of The Total Environment*, **667**, 427-434.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.332>
- [21] 周东兴, 王兵, 邓杰, 等. 蚯蚓与细菌协同作用对土壤中聚丙烯酰胺的降解效果[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(6): 259-262.
- [22] 赵长民, 和兵, 李和通, 等. 汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1457-1467.