

◆新污染物与生态环境安全◆

淡水生态环境中微塑料研究热点与进展的可视化分析*

李秀林^{1,2,3,4}, 王晓飞², 王晓慧³, 李海翔⁴, 杨 稳¹, 蒲高忠^{3**}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西桂林 541006; 2. 广西科学院生态环境研究所, 广西南宁 530007; 3. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西桂林 541006; 4. 桂林理工大学, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西桂林 541006)

摘要:为深入了解淡水生态环境中微塑料污染的研究现状,利用 VOSviewer 和 CiteSpace 软件整理了 Web of Science 核心合集数据库中 2010 年 1 月至 2024 年 3 月在淡水生态环境领域已发表的微塑料污染研究成果,从年发文量、来源期刊、作者/研究机构/国家的分布与合作关系、关键词聚类、关键词突现和时区视图等方面进行分析。结果表明:(1)年发文量自 2018 年以来呈爆发性增长,文章多为高质量产出,中国在该领域的研究成果居世界第一,其次是美国;研究机构方面,中国科学院发文量第一,中国科学院大学同各机构之间有着紧密合作关系,高校是高产出机构;研究学者中,华南农业大学的王俊发文量最多,其科研团队与新南威尔士大学以倪丙杰为中心的科研团队有着较为广泛的合作交流。(2)研究内容聚焦典型淡水生态环境中微塑料的来源分析、丰富度、空间分布、聚合物检测技术、治理工艺等方面,探究暴露在淡水生态环境中的微塑料与其他污染物的相互作用,以及其在淡水水生生物体内富集的毒性效应,甚至进入食物链、生态系统对人类的危害。(3)当前该领域研究处于快速发展阶段,前沿研究热点仍聚焦在微塑料的污染来源、分布特征及其与其他污染物的复合污染等方面,未来将深入开展微塑料的监测、检测、治理技术以及生态风险评估方向的研究。综上所述,本研究为深入了解淡水生态环境微塑料污染研究热点演变提供了客观、较为全面的见解,可为未来的研究方向提供参考思路。

关键词:微塑料污染;淡水生态环境;文献计量;数据可视化

中图分类号:Q89 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)04-0622-13

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20241206.002

塑料是一种高分子聚合物,因其质量轻、生产成本低廉、绝缘性强且具有稳定的化学性质等优点,被广泛用于个人护理、服装、医疗和工业产业领域。排放到环境中的塑料垃圾不能被直接降解,它们存在于

收稿日期:2024-06-26

修回日期:2024-08-01

* 国家自然科学基金项目(32460312),中国科学院“西部之光”项目([2019]90)和广西科学院基础研究基金项目(CQZ-D-1904)资助。

【第一作者简介】

李秀林(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事环境科学与生态毒理研究,E-mail:1184796536@qq.com。

【通信作者简介】**

蒲高忠(1980—),男,博士,研究员,主要从事环境生态学研究,E-mail:pukouchy@163.com。

【引用本文】

李秀林,王晓飞,王晓慧,等.淡水生态环境中微塑料研究热点与进展的可视化分析[J].广西科学,2024,31(4):622-634.

LI X L, WANG X F, WANG X H, et al. Visual Analysis of Research Hotspots and Progress of Microplastics in Freshwater Ecological Environment [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(4): 622-634.

土壤、淡水和海洋等环境中,大多数大块的塑料垃圾经过水解、因暴露引起的紫外线光降解、机械磨损以及生物降解变为较小的塑料碎片,其中小于 5 mm 的塑料聚合颗粒被定义为微塑料^[1]。微塑料作为一种新兴的持久性环境污染物,广泛分布在地球的各个角落,已被列为环境与生态科学领域的重大科学问题之一^[2]。目前,大多数关于微塑料污染的研究都集中在海洋生态系统上,研究发现海洋环境中的大部分微塑料污染来自陆地环境^[3],而相比于海洋环境,内陆淡水环境中微塑料污染的相关研究不足^[4]。在内陆地区,工业、农业和生活污水大多直接排放到河流和湖

泊中,最后汇入海洋环境^[5],这些污水的许多来源都可能导致淡水生态环境中的微塑料污染,如农业用地的覆盖物^[6]、污泥堆肥^[7]、垃圾填埋场^[8]、污水处理厂^[9]等都是最直接和最重要的微塑料输入来源或渠道。塑料碎片会长时间在河流和湖泊中不断积累和保存,甚至发生降解,其形态颜色与天然猎物相似,极有可能被水生生物误食^[10];其也可以作为水体中重金属、微生物、有机物等污染物的载体,产生联合毒理效应,甚至进入食物链,通过食物网的迁移富集,对人类的身体健康产生负面影响^[11](图 1)。

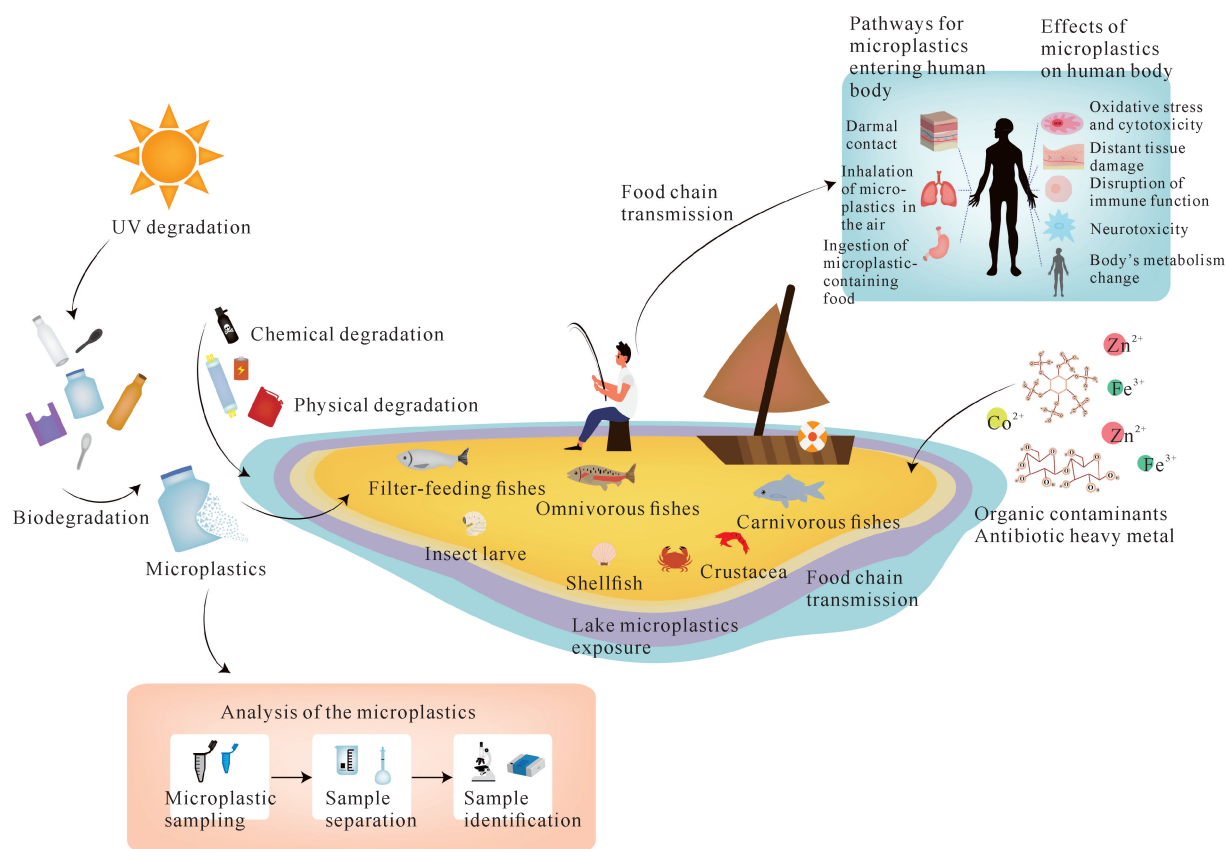


图 1 微塑料的产生、释放、环境迁移及环境影响

Fig. 1 Generation, release, environmental transport and environmental impact of microplastics

文献计量学在 1969 年由 Pritchard^[12] 提出,是一种基于文献信息挖掘与数理统计的方法,帮助研究人员从数据库中获得二次数据进行客观分析。VOSviewer 和 CiteSpace 是当前最具代表性的文献计量分析与可视化软件。VOSviewer 软件基于概率论的数据标准化方法,可对所研究领域的关键词、作者、国家共现等提供可视化网络图谱^[13]。CiteSpace 软件则基于集合论的数据标准化方法,进行知识单元的相似性测度,绘制时区视图,可从时间维度勾勒出所研

究领域的演进过程^[14]。本研究拟通过数据可视化分析直观地展示淡水生态环境中微塑料污染研究的年发文量、主要来源期刊、主要作者/研究机构/国家的分布与合作关系、研究热点与成果,并对微塑料与其他有机、无机污染物的相互作用及其复合毒性进行综合讨论,有助于清晰把握该领域的研究内容和发展趋势,以便研究人员更好地了解微塑料在淡水生态环境中的归趋和生态影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究选取 Web of Science 核心合集数据库作为数据来源,在以微塑料、纳米塑料为主题的研究论文中检索与淡水生态环境相关的文献。通过高级检索,检索主题词设置为“microplastic”OR“microplastics”OR“micro-plastic”,时间跨度从 2011 年 1 月至 2024 年 3 月(截至 2024 年 3 月 10 日),文献类型选择 Articles 和 Review Articles,分析微塑料在淡水生态环境中的发展历程,文献检索式为 TS=((“microplastic”OR“microplastic”OR“microplastics”OR“nanoplastic”OR“nanoplastics”OR“nanoplastics”)AND(“freshwater”OR“lake”OR“estuary”OR“sewage”OR“wetlands”OR“reservoir”OR“brook”OR“stream”OR“mangrove”OR“paddy field”OR“mudflat”OR“wastewater treatment”)) NOT (“ocean”OR“sea”OR“maritime”OR“soil”OR“terrestrial”))。根据论文的标题和摘要进行初步筛选,排除关于海洋、土壤、大气微塑料污染等文章,检索结果去重后最终得到 2 092 篇有效论文。

1.2 方法

本研究利用 VOSviewer 1.6.20.0 和 CiteSpace 6.3.R1 软件对文献年发文量、来源期刊、作者/研究机构/国家的分布与合作关系、关键词聚类、关键词突现以及时区视图形成可视化网络后进行分析。在 Microsoft Excel 2020 软件中进行数据汇总分析,并使用 Origin 9.0 软件绘制相关图表。此外,使用 VOSviewer 软件进行聚类分析,Scimago Graphica 软件生成社会网络地图,分析各个研究学者、机构、国家之间的合作强度。节点表示数量或频率,节点之间的线条表示关联,线条越粗则表示关系越紧密,合作强度越大^[15]。

2 结果与分析

2.1 年发文量分析

年发文量能在一定程度上反映某研究领域的受重视程度,揭示该领域未来潜在的研究趋势。从整体上看,淡水生态环境微塑料污染研究领域的年发文量在不断上升。2011—2015 年,该研究领域每年发表的文献数量不超过 11 篇(图 2),该领域的研究处于刚起步阶段,研究内容聚焦在微塑料的丰度和分布上;2016 年,发文量迅速增长,研究进入探索阶段,研

究内容呈现百花齐放的现象,尤其是从 2018 年到 2023 年发文量激增,2023 年高达 592 篇,研究处于爆发阶段;2024 年截至 3 月 10 日已发表文献 115 篇。可见,微塑料作为新兴持久性污染物受到越来越多的关注,在淡水生态环境污染研究领域逐渐成为研究热点,并且热度持续攀升。

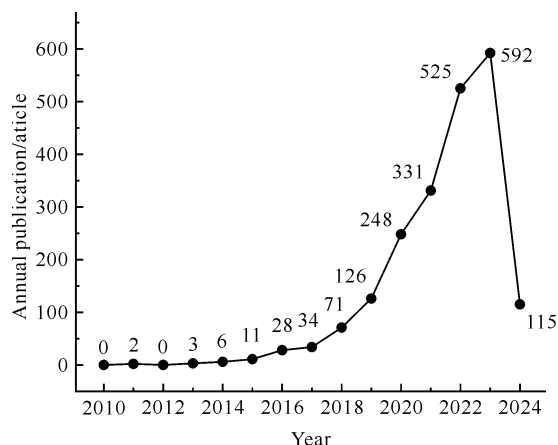


图 2 淡水生态环境微塑料污染研究领域的年发文量

Fig. 2 Annual publication in the field of microplastic pollution in freshwater ecological environment

2.2 主要来源期刊

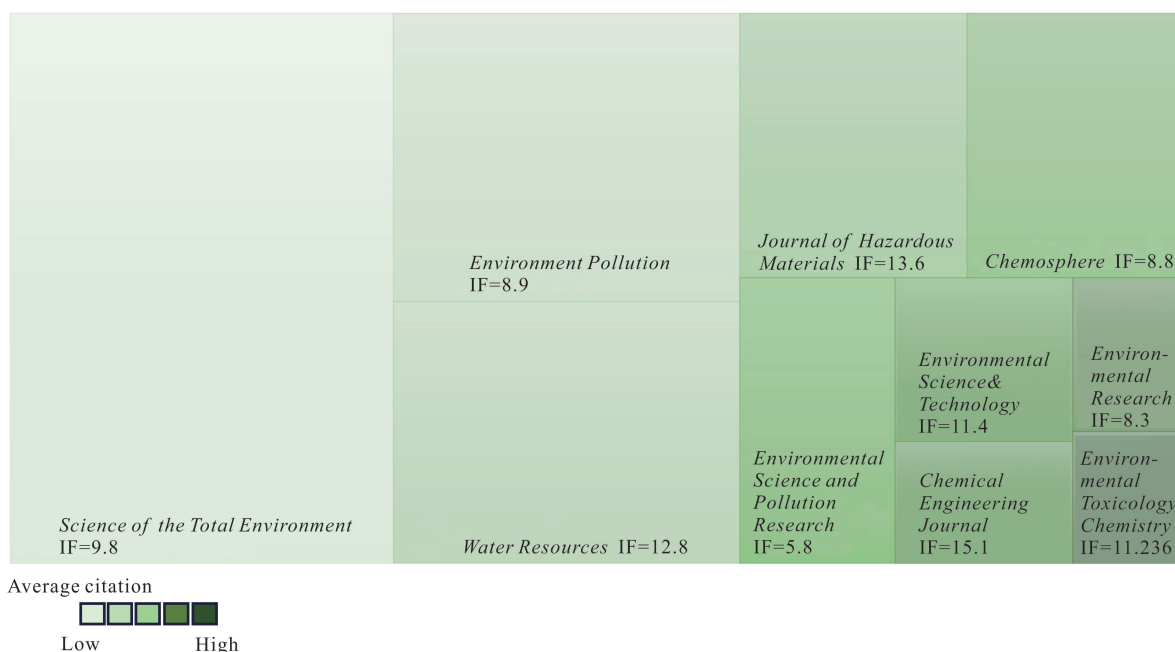
被共同引用的学术期刊反映了某研究领域的研究前沿以及发展趋势,具有较高的权威性。有关淡水生态环境微塑料污染的研究论文已在 302 个期刊上发表,图 3 汇总了发文量排名前 10 的期刊。发文量最高的期刊为 *Science of the Total Environment*,共发表文章 428 篇,占检索文献的 20.46%,被引用 16 629 次;论文篇均被引频次最高的期刊为 *Environmental Science & Technology*,为 165.88 次。多数与淡水生态环境微塑料污染相关的研究论文在高水平期刊上发表,且期刊影响因子(IF)集中在(5, 11),表明该领域文章当前多为高质量产出。

2.3 主要作者的分布与合作

对发文作者进行可视化图谱分析,有助于了解某研究领域发文量较多、影响力较大的科研团队,以及他们之间的合作关系。本研究分析的 2 092 篇论文共有 9 692 名作者参与发表。表 1 展示了淡水生态环境微塑料污染研究领域发文量排名前 10 的高生产力作者。发文量排名前 3 的作者分别是 Wang Jun(王俊)、Guilherme Malafaia 和 Ni Bingjie(倪丙杰)。王俊主要研究中国淡水生态系统中微塑料的丰度、分布情况,分析了水体、沉积物和生物群样本中微塑料的污染情况,目前已阐明丹江口水库、珠江口、潘阳湖

等淡水生态系统中微塑料的污染现状;Guilherme Malafaia 致力于微塑料等新兴污染物的生态毒理学评估,并研究了微塑料对暴露在预测环境相关浓度下水生脊椎动物的生化毒性;倪丙杰的研究聚焦于微塑料的去除方法。篇均被引频次最高的作者是荷兰瓦赫宁根大学及研究中心(Wageningen University &

Research)的 Albert A. Koelmans,他对现有的 50 项饮用水源(包括湖泊、地下水、自来水和瓶装饮用水)的微塑料污染研究数据进行评估分析,并提出最佳的采样、提取和检测方法,以更好地了解微塑料的潜在危害,为人类健康风险评估提供信息^[16]。



The area represents the number of papers published by the journal; the color shade represents the total citation of the relevant literatures; and the IF value is the impact factor of the journal in 2020.

图3 淡水生态环境微塑料污染领域发文量排名前10的期刊

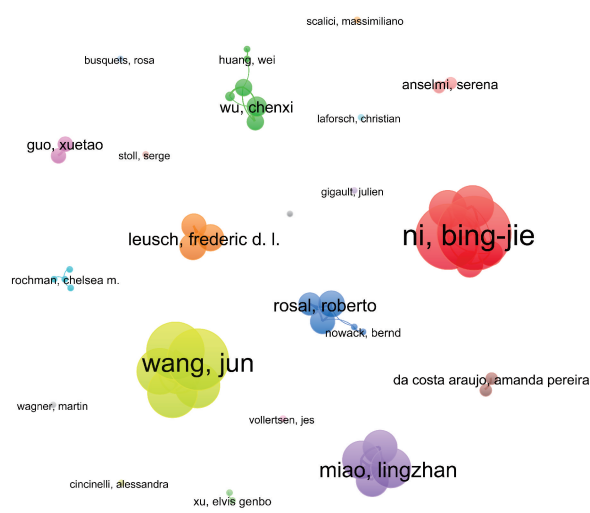
Fig. 3 Top 10 journals with the largest number of articles published in the field of microplastic pollution in freshwater ecological environment

表1 淡水生态环境微塑料污染研究领域发文量排名前10的作者

Table 1 Top 10 authors by publications in the field of microplastic pollution in freshwater ecological environment

排名 Rank	作者 Author	发文量/篇 Number of articles/article	被引频次/次 Citation frequency	篇均被引频次/次 Average citations per article	机构 Research institution
1	Wang Jun	27	1 615	59.81	South China Agricultural University
2	Guilherme Malafaia	23	663	28.83	Goiano Federal Institute
3	Ni Bingjie	23	2 039	88.65	The University of New South Wales
4	Wu Chenxi	20	1 838	91.90	Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences
5	Wei Wei	18	1 019	56.61	University of Technology Sydney
6	Muhammad Junaid	16	297	18.56	South China Agricultural University
7	Albert A. Koelmans	16	3 257	203.56	Wageningen University & Research
8	Guo Xuetao	14	698	49.86	Northwest A & F University
9	Liu Peng	14	819	58.50	Northwest A & F University
10	Chelsea M. Rochman	14	2 033	145.21	University of Toronto

图4展示了研究学者分布与合作聚类情况。由图4可知,华南农业大学以王俊为中心的科研团队与新南威尔士大学以倪丙杰为中心的科研团队有较为广泛的合作交流。学者之间的合作主要来自同一研究团队,跨团队之间的合作相对有限,因此,淡水生态环境微塑料污染研究领域的发展需要加强团队之间的合作交流。



Node size represents the number of articles published by the author; the same color represents the homologous body; connection represents a collaborative relationship between the authors.

图4 研究学者分布与合作聚类情况

Fig. 4 Distribution and collaborative clustering of researchers

表2 淡水生态环境微塑料污染研究领域发文量排名前10的机构

Table 2 Top 10 research institutions with the most publications in the field of microplastic pollution in freshwater ecological environment

排序 Rank	机构 Research institution	发文量/篇 Number of articles/article	被引频次/次 Citation frequency	篇均被引频次/次 Average citations per article	合作强度 Strength of cooperation
1	Chinese Academy of Sciences	118	6 647	56.33	189
2	University of Chinese Academy of Sciences	53	4 238	79.96	101
3	Tongji University	43	3 598	83.67	50
4	Universidade Federal de Goias	40	498	12.45	45
5	East China Normal University	33	4 518	136.91	44
6	Instituto Federal Goiano	30	548	18.27	43
7	Universidade Federal de Uberlandia	29	132	4.55	38
8	Tsinghua University	29	1 271	43.83	36
9	University of Technol Sydney	28	1 085	38.75	36
10	Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security	28	3 171	113.25	33

2.4 研究机构的分布与合作

本研究对发文机构进行可视化网络分析,共涉及2 536所科研机构,集中分布在亚洲、欧洲、大洋洲与北美地区,发文量排名前10的机构中有8所来自中国,其中,中国科学院(Chinese Academy of Sciences)发表学术论文118篇,发文量居世界第一(表2)。文章的被引频次是衡量研究成果对某领域学术影响力的重要指标,英国的普利茅斯大学(University of Plymouth,发文9篇,篇均被引频次364.44次)、埃克塞特大学(University of Exeter,发文10篇,篇均被引频次339.30次)、牛津大学(University of Oxford,发文5篇,篇均被引频次242.60次)、芬兰的芬兰环境研究所(Finnish Environment Institute,发文5篇,篇均被引频次270.20次)以及澳大利亚的西澳大学(University of Western Australia,发文量5篇,篇均被引频次243.00次)的文章均有较高的被引频次,表明这些机构在淡水生态环境微塑料污染研究领域有一定的影响力。由表2可知,在发文量最高的10所机构中有8所为高校,可见,高校为高产出机构。由各机构的合作情况网络图(图5)分析发现,大多数机构之间合作较为有限,其中,中国科学院与各机构之间有着紧密的合作关系,而其与中国科学院大学的合作强度远大于其他科研机构。

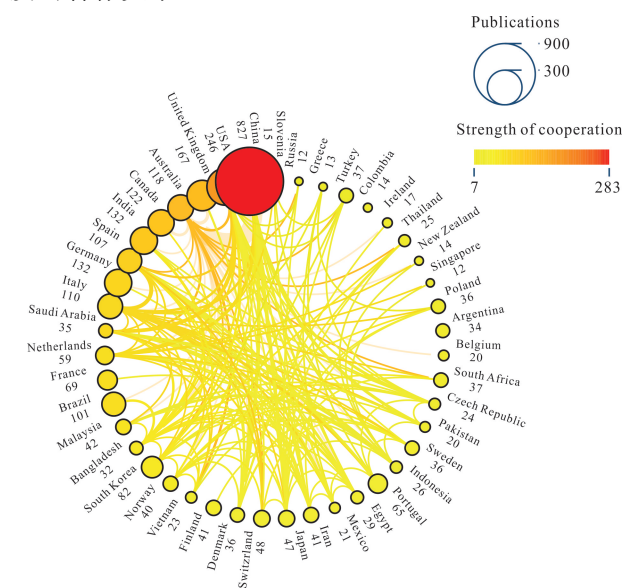


图5 各机构的合作情况

Fig. 5 Cooperation among research institutions

2.5 国家实力与合作

一个国家的发文量能反映该国在某研究领域的活跃程度。通过图6可了解各个国家在淡水生态环境微塑料污染研究领域的贡献,其中,中国在该研究领域共发文827篇,占总发文量的39.53%,位居世界第一,其次是美国(246篇,占总发文量的11.76%)。由图6还可以看出,该研究领域的发文国家分布非常不均衡,顶部效应十分显著,大部分论文为少数国家的学者所著。微塑料污染是一个全球性的环境问题,从发文量的合作强度上看,中国与美国有着紧密合作,同时中国还与西班牙、沙特阿拉伯、韩国、越南、瑞士、英国、瑞典、葡萄牙等国家有着不同程度的合作关系。



The graph shows the intensity of cooperation in countries with more than 10 publications. The size of a circle represents the number of posts posted; the width of the line represents the strength of cooperation.

图6 各国研究实力与合作情况

Fig. 6 National research strength and cooperation relationships between countries

2.6 研究热点与成果

关键词的聚类分析可为某领域主要研究内容、发展趋势以及前沿领域提供参考依据。关键词可视化聚类分析结果表明,在淡水生态环境微塑料污染研究中,关键词“微塑料”的出现频率排在第一,此外“纳米

塑料”“塑料碎片”“淡水”“污染”“迁移”“沉积物”“颗粒”“摄入”等高频关键词排在前列,都是研究热点问题。淡水生态环境微塑料污染研究领域大致可分为4个类群(图7)。

绿色类群(Cluster 1)代表微塑料的监测和鉴定技术。研究表明,微塑料在淡水生态系统中广泛存在,但因淡水生态系统具有高度的多样性,导致微塑料的分布以及丰度特征均存在很大差异。研究主要聚焦地表水^[17]、河流^[18]、湖泊^[17]、河口^[19]、水库^[20]、饮用水^[16]等典型淡水生态环境中微塑料的来源分析、丰富度、空间分布、聚合物检测技术等方面,为微塑料污染风险评估提供数据支持。Yan等^[21]研究发现城市废水是珠江微塑料污染的主要来源。Yuan等^[22]对淡水湖鄱阳湖多个环境区间中微塑料的分布空间进行分析,发现河流和湖泊是城市、工业和农业废水的直接接收者,由于微塑料的不断积累,湖泊成为下游流域微塑料的重要来源。Rodrigues等^[23]制备了含有11种塑料的人工样品,这些塑料属于最常见聚合物类型(如低密度/高密度聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚氯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯),采用不同的分离、降解方法对其进行评估,以建立统一的淡水生态系统环境监测方法。目前,扫描电子显微镜(SEM)、能量色散X射线光谱(EDS)、拉曼光谱和衰减全反射傅里叶变换(ATR-FTMIR)等表征方法是鉴定微塑料的更可靠、精确的检测手段^[24]。

蓝色类群(Cluster 2)代表微塑料的去除技术。去除水环境中微塑料的方法有物理法、物理化学法、生物法以及协同法。其中,物理化学法包括过滤^[25,26]、吸附^[27,28]、生物炭吸附^[29]、浮选分离^[30]、化学凝聚^[29,31,32]、碳纳米管分散技术^[33]、电凝^[34]、电催化氧化^[35]、混凝过滤^[36-38]、热降解^[39]、絮凝沉淀^[36,40]、光催化^[41]和离心^[42]等处理工艺;生物法包括活性污泥^[43]、真菌^[36]、微生物群落^[44]、微藻^[45]、海贝壳^[46]、生物膜^[47]和生物过滤器^[48]等处理工艺。污水处理厂的传统工艺并不能完全去除微塑料,出水仍含有大量的微塑料。Talvitie等^[49]比较了各种三级处理工艺对微塑料的去除效果,发现膜生物反应器(MBR)技术的去除效果最好。Radityaningrum等^[50]研究发现传统的水处理技术(曝气、预沉淀、混凝、絮凝沉淀、过滤和消毒)对微塑料的去除率为70%以上,而采用活性炭过滤和臭氧相结合的工艺,去除率可高达88.6%。可根据污染物中微塑料的种类选择采用物理、物理化学、生物和协同法中不同的

工艺,从淡水环境中高效去除微塑料,以达到安全排水的效果。

红色类群(Cluster 3)代表微塑料在环境中的归趋以及生态风险评估。微塑料广泛存在于淡水生态系统中,因其具有独特的理化特性(尺寸小、疏水性和比表面积较大、表面带电荷),所以能更好地吸附、转移有害污染物[多环芳烃(PAHs)、有机物、抗生素和重金属]。此外,微塑料与淡水生态系统中各种污染物之间的相互作用及其毒性是该类群的研究重点。Zhang等^[51]通过动力学吸附实验探究了多环芳烃与微塑料的相互作用机制,发现聚乙烯更容易吸附多环芳烃,而吸附行为主要受疏水作用和范德华力驱动。微塑料对抗生素的吸附研究大多引入分子动力学模型,计算分析结果表明,微塑料吸附泰乐菌素以静电相互作用、表面络合和疏水相互作用为主^[52];聚乙烯可通过静电和疏水相互作用吸附环丙沙星^[53],通过范德华力吸附磺胺甲噁唑^[54],通过离子交换机制吸附四环素(TC)^[55]。微塑料在环境中无时无刻不在经历着老化过程,这不仅会改变微塑料的表面形态,还会增加其表面电荷,使表面产生大量的含氧官能

团,显著改变其与其他污染物的相互作用^[56]。另外,Purwiyanto等^[57]研究发现重金属与微塑料的相互作用为物理吸附,并以弱键形式结合,易解吸到水体中,会对周围环境中的生物产生潜在的不利影响。

黄色类群(Cluster 4)代表微塑料的生物富集以及生态毒理效应。淡水生态系统中的微塑料极易被浮游生物误食,通过食物链进入贝类海鲜、鱼类、哺乳动物体内。进入生物体内的微塑料大部分会通过消化系统排出体外,但仍有部分会残留在体内,侵入生物体的器官内,产生毒性。目前,对微塑料的生物富集以及生态毒理效应研究主要集中于藻类浮游生物、贝类海鲜、鱼类等生物。微塑料进入藻类生物体内,会破坏藻类细胞的完整性,降低藻类种群的叶绿素浓度,减少光合作用,影响藻类的生长繁殖^[58]。鱼类极易摄入微塑料^[59],进入鱼体的微塑料会改变鱼类的肠道菌群,引起炎症,并抑制鱼体内某些酶的活性,对鱼类的消化、内分泌和神经系统产生有害影响。肠道、鳃、肝脏和脑等不同组织对微塑料的摄入和积累会导致鱼类生物系统的扰动,可能会在鱼体中诱发复杂的反应,甚至诱发矛盾的反应^[60]。

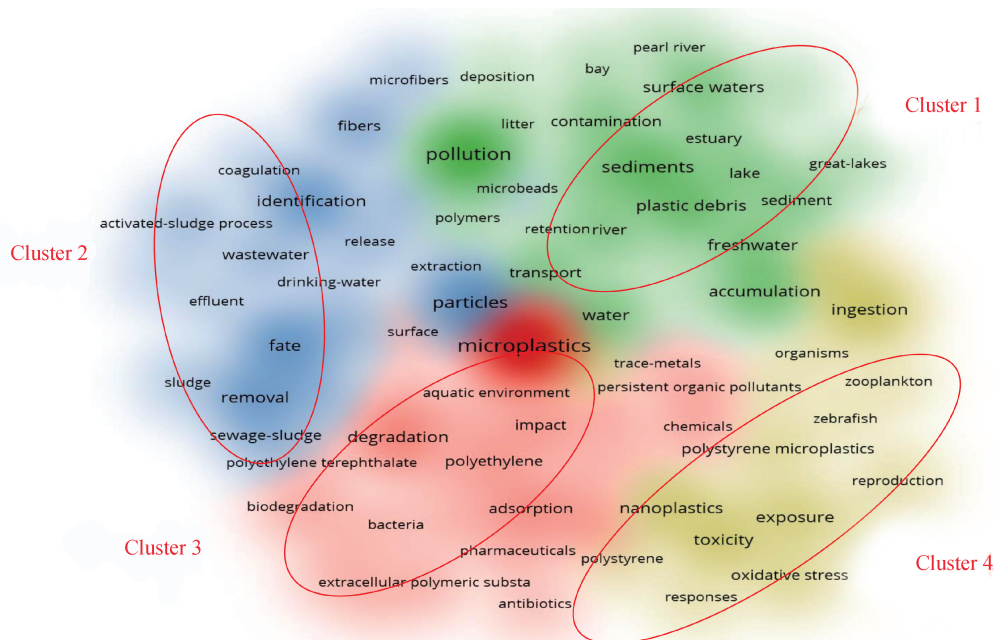


图7 淡水生态环境微塑料污染研究的关键词聚类分布

Fig. 7 Keyword clustering of research on microplastic pollution in freshwater ecological environment

2.7 研究进展

微塑料是一种新型的污染物,有关其在淡水生态环境中的研究仍处于快速发展阶段,对关键词进行突现分析,可以阐明该领域的前沿热点方向。本研究基于CiteSpace软件的关键词突现和时区视图进行分

析,由表3、图8可知,“微塑料污染”“摄入”“富集”“持久性有机污染物”“塑料碎片”等是突现强度较高的关键词。在关于微塑料来源的研究中,发现人为和地区因素是影响微塑料丰度和分布的主要因素,例如微塑料纤维已被发现是淡水环境中微塑料存在的主

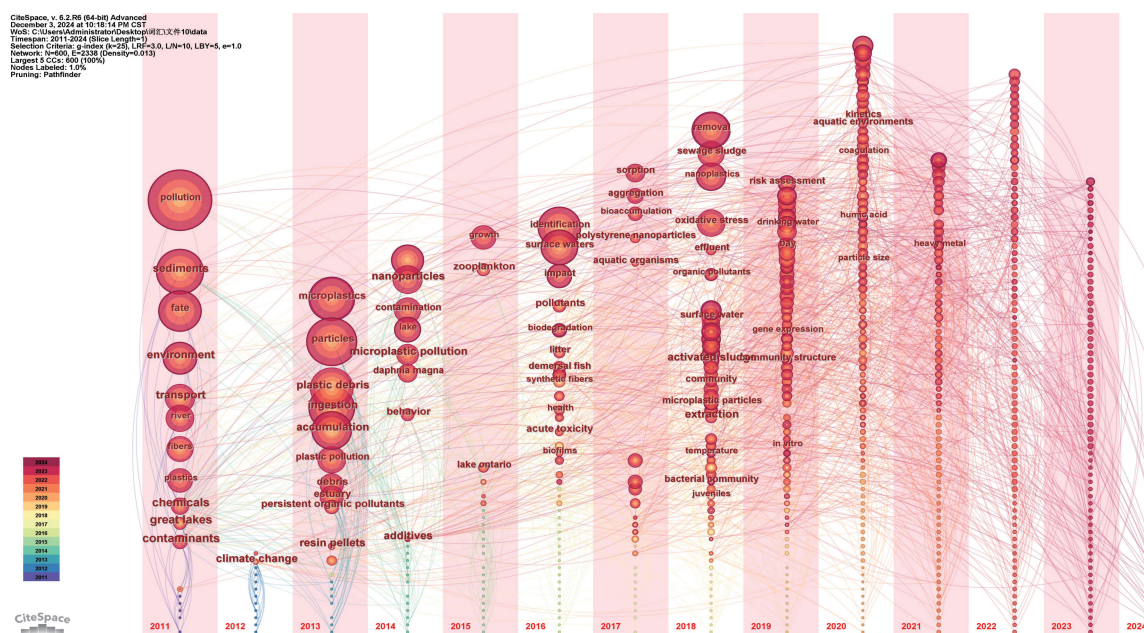
要形式,而合成纺织品的洗涤已被确定为微塑料纤维的主要来源^[61]。微塑料污染存在地区差异,主要集中在人口密集流域,且内陆流域污染比海域严重。此外,各地区经济发展水平不同,因此对微塑料污染的处理水平也不同。有关微塑料的暴露量以及被生物摄食风险评估方面的内容是未来的研究方向, Ma-

表 3 淡水生态环境微塑料污染研究领域关键词突现分析

Table 3 Burst analysis of keywords in the field of microplastic pollution in freshwater ecological environment

关键词 Keywords	年份 Year	突现强度 Burst strength	起始年 Begin year	终止年 End year	热度情况(2011—2024) Heat situation (2011—2024)
microplastic pollution	2014	17.47	2014	2019	
ingestion	2014	9.49	2014	2018	
accumulation	2013	8.77	2013	2018	
persistent organic pollutants	2016	7.91	2016	2020	
plastic debris	2015	6.94	2015	2018	
great lakes	2017	6.59	2017	2018	
sewage-sludge	2021	6.57	2021	2022	
synthetic fibers	2018	5.42	2018	2019	
transport	2011	4.97	2017	2018	
biofilm formation	2021	4.47	2021	2022	

teos-Cárdenas 等^[62]发现微塑料在淡水生物体内的营养转化;Strungaru 等^[63]概述了微塑料与淡水生物群的相互作用及毒理学效应,并强调了对纳米塑料污染开展研究的重要性。已有大量研究证明微/纳米塑料能进入动植物和人体器官,但这些生物效应的机制还需从细胞、分子和基因等微观角度加以研究。



The circle represents the year the keyword first appeared in the database, and the size of the circle represents how often the keyword appears.

图 8 淡水生态环境微塑料污染研究的时区视图

Fig. 8 Time distribution of research on microplastic pollution in freshwater ecological environment

微塑料在自然环境中的迁移大多是从河流向海洋迁移, Besseling 等^[64]在淡水系统微塑料迁移研究

中采用时空分辨水文模型, 研究结果表明, 河流流体动力学由于能影响微塑料的尺寸分布, 因此其对微塑

料排放至海洋系统具有深远的影响。此外,对青藏高原偏远湖域^[65]、融化的冰川^[66]、高寒河流^[67]等不同淡水生态系统中微塑料的污染分布特征的研究均已开展。微塑料作为水生系统中无机/有机物污染物的载体,与浸出(如增塑剂)或赋存的其他污染物(如疏水性有机污染物、重金属、塑料添加剂)的联合毒性作用是当前热点方向^[65]。此外,多项研究表明,微塑料不易被生物降解,水生动物摄入的微塑料可能会在其复杂的消化系统中累积,甚至阻塞消化道,使生物产生假饱腹感,导致进食能力减弱^[68]。淡水生态环境微塑料领域研究正受到越来越多的关注,当前研究热点以微塑料污染来源、分布特征以及生态毒理研究为主,各方向的研究仍将持续深入。

3 讨论

近年来,微塑料作为一种新兴持久性污染物,在水生态系统中的分布和潜在危害性引起了生态学、化学、材料学、分子生物学、环境科学等领域研究人员的关注。人类对塑料的广泛使用,导致微塑料不断地产生并进入淡水环境中,由于微塑料的表面疏水性和比表面积大,增加了其吸附性能,因此其可与环境中的重金属、有机污染物、抗生素、多环芳烃等持久性污染物结合形成更为复杂的污染物。内陆淡水环境微塑料污染相比海洋更严重,更易受到人为活动因素的影响,塑料垃圾的非法倾倒、堆积等污染行为在未来应受到持续关注。微塑料在环境中经过复杂的降解过程,会释放出更多的有害化学物质,产生粒径更小、吸附能力更强的纳米级别微塑料,这类微塑料更容易被生物摄食进而危害生物体,甚至通过食物链传递给人类。总而言之,本研究在文献计量学分析的基础上回顾微塑料在淡水生态环境中的动态发展,为该领域未来研究提供了方向,并为客观评价微塑料的生态效应和环境风险,深入研究微塑料污染,以及微塑料与其他有害化学物质复合污染的生态毒理效应和环境行为提供了理论依据。未来在该领域的研究中,应制定微塑料样品采样和分离的标准化方法,开发微塑料的鉴定技术,建立有效的监测体系,发展微塑料的去除技术,加强相关法规体系建设,从源头上控制微塑料污染,这些研究对降低淡水生态环境中的微塑料污染都是至关重要的。

4 结论

本研究通过文献计量学研究方法,结合 VOS-

viewer 和 CiteSpace 软件,对已发表的与淡水生态环境微塑料污染研究相关的文献进行综合分析,主要研究结论如下。

(1) 发文特征。本研究共筛选了 2 092 篇淡水生态环境微塑料污染研究领域的相关文献,微塑料作为新兴持久性污染物受到越来越多的关注,相关研究年发文量在 2018—2023 年呈爆发性增长,期刊 *Science of the Total Environment* 的发文量最高,多为高质量产出论文。

(2) 科研力量分布。篇均被引频次最高的作者是荷兰瓦赫宁根大学及研究中心的学者 Albert A. Koelmans。华南农业大学的王俊发文量最多,其科研团队与新南威尔士大学以倪丙杰为中心的科研团队有着较为广泛的合作交流。中国在该领域的研究成果居世界第一,且与多个国家存在不同程度的合作关系。

(3) 研究内容和热点。该研究领域大致可分为 4 个类群。绿色类群(Cluster 1):微塑料的监测和鉴定技术,主要聚焦典型淡水生态环境微塑料的来源分析、丰富度、空间分布、聚合物检测技术等方面。蓝色类群(Cluster 2):微塑料的去除技术,讨论微塑料的治理工艺,对比不同工艺对微塑料的去除率。红色类群(Cluster 3):微塑料在环境中的归趋以及生态风险评估,针对微塑料的吸附能力,以及其与淡水环境中其他污染物的相互作用进行讨论分析。黄色类群(Cluster 4):微塑料的生物富集以及生态毒理效应,主要探究暴露在环境中的微塑料对水生生物的生态毒理效应。4 个聚类之间相互重叠,各研究方向存在交叉。

(4) 研究演进。微塑料是一种新型的污染物,目前其相关研究仍处于快速发展阶段,前沿热点方向仍聚焦在淡水生态环境微塑料的污染来源、分布特征以及与其他污染物的复合污染。塑料碎片、塑料纤维、鉴定、沉积物、迁移、摄入、富集、毒害等一直是淡水生态环境微塑料研究领域的主要内容,未来将深入开展微塑料监测、检测、治理技术以及生态风险评估方向上的研究。

参考文献

- [1] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838-838.
- [2] HE D F, LUO Y M, LU S B, et al. Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and

- ecological risks [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2018, 109:163-172.
- [3] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean [J]. *Science*, 2015, 347(6223):768-771.
- [4] LEBRETON L C M, VAN DER ZWET J, DAMSTEEG J W, et al. River plastic emissions to the world's oceans [J]. *Nature Communications*, 2017, 8:15611.
- [5] ERIKSEN M, MASON S, WILSON S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(112):177-182.
- [6] STEINMETZ Z, WOLLMANN C, SCHAEFER M, et al. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550:690-705.
- [7] MERCIER A, GRAVOUIL K, AUCHER W, et al. Fate of eight different polymers under uncontrolled composting conditions: relationships between deterioration, biofilm formation, and the material surface properties [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(4):1988-1997.
- [8] HE P, CHEN L, SHAO L, et al. Municipal solid waste (MSW) landfill: a source of microplastics?: evidence of microplastics in landfill leachate [J]. *Water Research*, 2019, 159:38-45.
- [9] BLAIR R M, WALDRON S, GAUCHOTTE-LINDSAY C. Average daily flow of microplastics through a tertiary wastewater treatment plant over a ten-month period [J]. *Water Research*, 2019, 163:114909.
- [10] WRIGHT S L, THOMPSON R C, GALLOWAY T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178:483-492.
- [11] ANDRADY A L. Microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8):1596-1605.
- [12] PRITCHARD A. Statistical bibliography or bibliometrics [J]. *Journal of Documentation*, 1969, 25:348.
- [13] VAN ECK N J, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping [J]. *Scientometrics*, 2010, 84(2):523-538.
- [14] CHEN C M. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3):359-377.
- [15] GAO Y, GE L, SHI S Z, et al. Global trends and future prospects of e-waste research: a bibliometric analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(17):17809-17820.
- [16] KOELMANS A A, MOHAMED NOR N H, HERMSEN E, et al. Microplastics in freshwaters and drinking water: critical review and assessment of data quality [J]. *Water Research*, 2019, 155:410-422.
- [17] SU L, XUE Y G, LI L Y, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216:711-719.
- [18] TRIEBSKORN R, BRAUNBECK T, GRUMMT T, et al. Relevance of nano- and microplastics for freshwater ecosystems: a critical review [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 110:375-392.
- [19] HE D, CHEN X J, ZHAO W, et al. Microplastics contamination in the surface water of the Yangtze River from upstream to estuary based on different sampling methods [J]. *Environmental Research*, 2021, 196:110908.
- [20] ZHANG K, XIONG X, HU H J, et al. Occurrence and characteristics of microplastic pollution in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental science & technology*, 2017, 51(7):3794-3801.
- [21] YAN M T, NIE H Y, XU K H, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China [J]. *Chemosphere*, 2019, 217:879-886.
- [22] YUAN W K, LIU X N, WANG W F, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 170:180-187.
- [23] RODRIGUES M O, GONÇALVES A M M, GONÇALVES F J M, et al. Effectiveness of a methodology of microplastics isolation for environmental monitoring in freshwater systems [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89:488-495.
- [24] KULIK N V, ZOBKOV M B, EFREMENKO N A, et al. Features of heavy metals sorption by microplastics in environmentally relevant conditions [J]. *Water Resources*, 2023, 50(6):925-938.
- [25] PIZZICHETTI A R P, PABLOS C, ÁLVAREZFERNÁNDEZ C, et al. Evaluation of membranes performance for microplastic removal in a simple and low-cost filtration system [J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2021, 3:100075.
- [26] SEMBIRING E, FAJAR M, HANDAJANI M. Performance of rapid sand filter-single media to remove microplastics [J]. *Water Supply*, 2021, 21(5):2273-2284.
- [27] RAMIREZ ARENAS L, RAMSEIER GENTILE S, ZIMMERMANN S, et al. Nanoplastics adsorption and removal efficiency by granular activated carbon used in drinking water treatment process [J]. *Science of the*

- Total Environment, 2021, 791:148175.
- [28] SUN C, WANG Z, ZHENG H, et al. Biodegradable and re-usable sponge materials made from chitin for efficient removal of microplastics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420:126599.
- [29] GANIE Z A, KHANDELWAL N, TIWARI E, et al. Biochar-facilitated remediation of nanoplastic contaminated water; effect of pyrolysis temperature induced surface modifications [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417:126096.
- [30] WANG Y, LI Y N, TIAN L, et al. The removal efficiency and mechanism of microplastic enhancement by positive modification dissolved air flotation [J]. *Water Environment Research*, 2021, 93(5):693-702.
- [31] ARENAS L R, GENTILE S R, ZIMMERMANN S, et al. Coagulation of TiO_2 , CeO_2 nanoparticles, and polystyrene nanoplastics in bottled mineral and surface waters. Effect of water properties, coagulant type, and dosage [J]. *Water Environment Research*, 2020, 92(8):1184-1194.
- [32] ZHOU G, WANG Q, LI J, et al. Removal of polystyrene and polyethylene microplastics using PAC and FeCl_3 coagulation; performance and mechanism [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752:141837.
- [33] KANG J, ZHOU L, DUAN X, et al. Degradation of cosmetic microplastics via functionalized carbon nanosprings [J]. *Matter*, 2019, 1(3):745-758.
- [34] SHEN M, ZHANG Y, ALMATRAFI E, et al. Efficient removal of microplastics from wastewater by an electrocoagulation process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428:131161.
- [35] KIENDREBEOGO M, KARIMI ESTAHBANATI M R, KHOSRAVANIPOUR MOSTAFAZADEH A, et al. Treatment of microplastics in water by anodic oxidation: a case study for polystyrene [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 269:116168.
- [36] KANKANIGE D, BABEL S. Contamination by $\geq 6.5 \mu\text{m}$ -sized microplastics and their removability in a conventional water treatment plant (WTP) in Thailand [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 40:101765.
- [37] SHAHI N K, MAENG M, KIM D, et al. Removal behavior of microplastics using alum coagulant and its enhancement using polyamine-coated sand [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 141:9-17.
- [38] MA B, XUE W, HU C, et al. Corrigendum to "Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment" [Chem. Eng. J. 359 (2019) 159-167] [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405:126983.
- [39] WANG J, SUN C, HUANG Q X, et al. Adsorption and thermal degradation of microplastics from aqueous solutions by Mg/Zn modified magnetic biochars [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 419:126486.
- [40] ZHANG Y, DIEHL A, LEWANDOWSKI A, et al. Removal efficiency of micro- and nanoplastics ($180 \text{ nm} - 125 \mu\text{m}$) during drinking water treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720:137383.
- [41] TOFA T S, YE F, KUNJALI K L, et al. Enhanced visible light photodegradation of microplastic fragments with plasmonic platinum/zinc oxide nanorod photocatalysts [J]. *Catalysts*, 2019, 9(10):819.
- [42] MURRAY A, ÖRMECI B. Removal effectiveness of nanoplastics ($< 400 \text{ nm}$) with separation processes used for water and wastewater treatment [J]. *Water*, 2020, 12(3):635.
- [43] TORENA P, ALVAREZ-CUENCA M, REZA M. Biodegradation of polyethylene terephthalate microplastics by bacterial communities from activated sludge [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2021, 99(S1):S69-S82.
- [44] GAO R, SUN C. A marine bacterial community capable of degrading poly (ethylene terephthalate) and polyethylene [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416:125928.
- [45] CUNHA C, SILVA L, PAULO J, et al. Microalgal-based biopolymer for nano- and microplastic removal: a possible biosolution for wastewater treatment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263:114385.
- [46] ZHOU H, MAYORGA-MARTINEZ C C, PUMERA M. Microplastic removal and degradation by mussel-inspired adhesive magnetic/enzymatic microrobots [J]. *Small Methods*, 2021, 5(9):e2100230.
- [47] SHABBIR S, FAHEEM M, ALI N, et al. Periphytic biofilm: an innovative approach for biodegradation of microplastics [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717:137064.
- [48] LIU F, NORD N B, BESTER K, et al. Microplastics removal from treated wastewater by a biofilter [J]. *Water*, 2020, 12(4):1085.
- [49] TALVITIE J, MIKOLA A, KOISTINEN A, et al. Solutions to microplastic pollution: removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies [J]. *Water Research*, 2017, 123:401-407.
- [50] RADITYANINGRUM A D, TRIHADININGRUM Y, MAR'ATUSHOLIHAN, et al. Microplastic contamination in water supply and the removal efficiencies of the treatment plants: a case of Surabaya city, Indonesia [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 43:

- 102195.
- [51] ZHANG J H, CHEN H B, HE H, et al. Adsorption behavior and mechanism of 9-Nitroanthracene on typical microplastics in aqueous solutions [J]. *Chemosphere*, 2020, 245:125628.
- [52] GUO X T, PANG J W, CHEN S Y, et al. Sorption properties of tylosin on four different microplastics [J]. *Chemosphere*, 2018, 209:240-245.
- [53] ATUGODA T, WIJESEKARA H, WERELLAGAMA D R I B, et al. Adsorptive interaction of antibiotic ciprofloxacin on polyethylene microplastics: implications for vector transport in water [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 19:100971.
- [54] XU B L, LIU F, BROOKES P C, et al. The sorption kinetics and isotherms of sulfamethoxazole with polyethylene microplastics [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 131:191-196.
- [55] YU F, YANG C F, HUANG G Q, et al. Interfacial interaction between diverse microplastics and tetracycline by adsorption in an aqueous solution [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721:137729.
- [56] ZHANG Y Y, LUO Y Y, YU X Q, et al. Aging significantly increases the interaction between polystyrene nanoplastic and minerals [J]. *Water Research*, 2022, 219:118544.
- [57] PURWIYANTO A I S, SUTEJA Y, TRISNO, et al. Concentration and adsorption of Pb and Cu in microplastics: case study in aquatic environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 158:111380.
- [58] BESSELING E, WANG B, LÜRLING M, et al. Nanoplastic affects growth of *S. obliquus* and reproduction of *D. magna* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20):12336-12343.
- [59] WANG W F, GE J, YU X Y. Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 189:109913.
- [60] DING J N, ZHANG S S, RAZANAJATOVO R M, et al. Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238:1-9.
- [61] CAI Y P, YANG T, MITRANO D M, et al. Systematic study of microplastic fiber release from 12 different polyester textiles during washing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(8):4847-4855.
- [62] MATEOS-CÁRDENAS A, VON DER GEEST MORONEY A, VAN PELT F N A M, et al. Trophic transfer of microplastics in a model freshwater microcosm: lack of a consumer avoidance response [J]. *Food Webs*, 2022, 31:e00228.
- [63] STRUNGARU S A, JIJIE R, NICOARA M, et al. Micro-(nano) plastics in freshwater ecosystems: abundance, toxicological impact and quantification methodology [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 110:116-128.
- [64] BESSELING E, QUIK J T K, SUN M, et al. Fate of nano-and microplastic in freshwater systems: a modeling study [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220:540-548.
- [65] JIANG N, LUO W, ZHAO P, et al. Distribution of microplastics in benthic sediments of Qinghai Lake on the Tibetan Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 835:155434.
- [66] LIU Q, XIONG X, WANG K H, et al. Homogenization of microplastics in alpine rivers: analysis of microplastic abundance and characteristics in rivers of Qilian Mountain, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 340:118011.
- [67] DONG H K, WANG L X, WANG X P, et al. Microplastics in a remote lake basin of the Tibetan Plateau: impacts of atmospheric transport and glacial melting [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(19):12951-12960.
- [68] DE SÁ L C, OLIVEIRA M, RIBEIRO F, et al. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: what do we know and where should we focus our efforts in the future? [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645:1029-1039.

Visual Analysis of Research Hotspots and Progress of Microplastics in Freshwater Ecological Environment

LI Xiulin^{1,2,3,4}, WANG Xiaofei², WANG Xiaohui³, LI Haixiang⁴, YANG Wen¹,
PU Gaozhong^{3**}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. Institute of Eco-Environmental Sciences, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi, 541006, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi, 541006, China)

Abstract: To gain an in-depth understanding of the research status of microplastic pollution in freshwater environment, VOSviewer and CiteSpace were used to sort out the research results in this field that were published from January 2010 to March 2024 in the Web of Science Core Collection. The annual number of publications, journals, distribution and cooperation of authors/research institutions/countries, keyword clustering, bursts and time distribution were analyzed. The results were yielded as follows. (1) The annual number of publications had surged since 2018, most of which were high-quality outputs. China's research results in this field ranked first in the world, followed by the United States. Among the research institutions, the Chinese Academy of Sciences had the largest number of publications, and the University of Chinese Academy of Sciences had a close cooperation relationship with various institutions. Universities were high-output institutions. Among the researchers, Wang Jun at the South China Agricultural University published the most papers, and his research team had extensive cooperation and exchanges with the research team led by Ni Bingjie at the University of New South Wales. (2) The research contents focused on the source analysis, richness, spatial distribution, polymer detection technology and treatment process of microplastics in typical freshwater ecological environment, the interactions between microplastics and other pollutants in freshwater ecological environment, the toxic effects of enrichment in freshwater aquatic organisms, and even the harm to humans caused by entering the food chain and ecosystems. (3) At present, the research in this field experienced rapid development, and the cutting-edge research hotspots still focused on the source, distribution characteristics and compound pollution with other pollutants. The research on the monitoring, detection, treatment technology and ecological risk assessment of microplastics would be carried out in the future. In summary, this study provides an objective and comprehensive insight into the evolution of microplastic pollution in freshwater ecological environment and can provide reference for future research directions.

Key words: microplastic pollution; freshwater ecological environment; bibliometrics; data visualization

责任编辑: 梁 晓



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>