郭雨倩,高 雅,郭昌胜,等.新污染物与慢性病关联性的研究进展 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1663-1672.
Guo Y Q, Gao Y, Guo C S, et al. Research progress on the associations between emerging contaminants and non-communicable diseases [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1663-1672.

新污染物与慢性病关联性的研究进展

郭雨倩[1,2],高 雅[1,2],郭昌胜[1,2],吴荣山[1,2],樊境朴[1,2],张 艳[1,2],徐 建[1,2*] (1.中国环境科学研究院,环境基准标准与风险管控全国重点实验室,北京 100012；2.中国环境科学研究院,环境健康风险评估与研究中心,北京 100012)

摘要：基于文献计量学,通过 CiteSpace 软件对 Web of Science 核心合集中 2005~2025 年发表的相关文献开展可视化分析,揭示新污染物与慢性病研究领域的发展态势与前沿趋势.结果表明:近 20a 来该研究领域的发文量呈显著增长趋势,2014 年后增速显著提高,与《斯德哥尔摩公约》新增污染物管控政策有较强关联.加利福尼亚大学、美国国立卫生研究院和中国科学院是发文量最多的研究机构,研究结果多发表在《Environmental Health Perspectives》、《Environmental Science & Technology》等国际期刊.环境科学、毒理学及公共健康构成核心学科网络,公共健康是连接环境暴露与疾病机制的关键枢纽.研究初期主要关注内分泌干扰物、消毒副产物与癌症之间的关联性,现已逐步转向全氟和多氟烷基物质、纳米颗粒等新污染物引发的代谢紊乱效应,肠道微生物群与炎症等跨机制研究.未来需进一步深化毒性机制探索并构建多组学联动的慢性病致病机制模型.

关键词：新污染物；慢性病；文献计量学
中图分类号：X503 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1663-10

Research progress on the associations between emerging contaminants and non-communicable diseases. GUO Yu-qian[1,2], GAO Ya[1,2], GUO Chang-sheng[1,2], WU Rong-shan[1,2], FAN Jing-pu[1,2], ZHANG Yan[1,2], XU Jian[1,2*] (1.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China；2.Center for Environmental Health Risk Assessment and Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1663~1672

Abstract：A bibliometric and visualization analysis using CiteSpace was performed on publications concerning emerging contaminants (ECs) and non-communicable diseases (NCDs) retrieved from the Web of Science Core Collection for the period 2005~2025, with the aim of mapping the field's evolution and identifying research frontiers. Publication output increased substantially over the study period, with accelerated growth after 2014, coinciding with intensified policy initiatives to regulate newly listed pollutants under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. In addition, the University of California, the U.S. National Institutes of Health, and the Chinese Academy of Sciences were among the most productive institutions, and relevant studies were predominantly published in international journals, including *Environmental Health Perspectives* and *Environmental Science & Technology*. The disciplinary landscape was dominated by Environmental Sciences, Toxicology, and Public Environmental Occupational Health, with public health serving as a critical bridge between environmental exposure assessment and disease-related mechanisms. Earlier work largely examined links between endocrine disrupting chemicals (EDCs) and disinfection by products (DBPs) and cancer, whereas recent studies have increasingly emphasized metabolic disorders associated with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and nanoparticles, alongside mechanistic themes involving the gut microbiota and inflammation. Future research should prioritize elucidating toxicological pathways and constructing integrative multi-omics frameworks to better explain the pathogenesis of NCDs.

Key words：emerging contaminants；non-communicable diseases；bibliometrics

新污染物(ECs)是指新近发现或被关注,对生态环境或人体健康存在风险,但尚未纳入管理或现有管理措施不足以有效防控其风险的污染物.这类污染物通常具有隐蔽性、持久性、危害大和不易治理的特性,能在环境介质中长期存在、广泛分布,并通过食物链在生物体内富集,威胁人类健康.近年来,大量研究证实了ECs在全球环境和人体内的广泛暴露.例如,2022 年,Leslie 等[1]首次在健康志愿者血液中定量检出微塑料(平均浓度 1.6μg/mL);美国全国调查显示 98%的人类血清样本中含痕量全氟和多氟烷基物质(PFAS)[2];邻苯二甲酸酯(PAEs)则在土壤

收稿日期：2025-08-10
基金项目：国家杰出青年科学基金资助项目(42325706)
* 责任作者, 研究员, xujian@craes.org.cn

中广泛存在(浓度从 μg/kg~mg/kg 级),不仅破坏生态功能,还能通过饮食/非饮食途径进入人体[3].日益增加的新污染物暴露引发了对其潜在健康效应的广泛担忧.研究表明,新污染物具有多种毒性效应,包括内分泌干扰毒性、发育毒性、神经毒性、生殖毒性以及潜在的致癌性等[4].

慢性病(NCDs)已经成为全球死亡与疾病负担的主要病因,2019 年,NCDs 导致的全球死亡占比攀升至 74%[5],中国慢性病导致的死亡占比甚至达到了 88.5%,肥胖、高血压、糖尿病等主要慢性病的患病率持续攀升[6].ECs 的广泛持续暴露与 NCDs 的高发流行在时间上呈现高度重合性,强烈提示两者间存在潜在因果关联.研究表明,有机氯类农药(OCPs)和多氯联苯(PCBs)与高血压、糖尿病、代谢综合征和肥胖的风险增加有关,PFAS 与高脂血症、代谢综合征、糖尿病和高尿酸血症的风险增加有关[7-9].然而,现有研究对慢性病的具体病因机制,尤其是新污染物低剂量、长期暴露在其病理过程中的作用,尚未阐明,亟需深入探究二者间的潜在联系.

现有研究多集中于单一污染物或单一疾病的“孤立式”分析,难以揭示 ECs-NCDs 之间的系统关联[7].尽管大量证据表明 ECs 与高血压[10-11]、糖尿病[12]、高脂血症[13]等多种慢性病存在关联,但对复杂暴露环境下的致病机制认知仍面临核心挑战:针对单一污染物研究范式难以解释现实环境中的混合物暴露效应;有限样本量与暴露个体差异导致关联研究结论常出现矛盾.这种解析割裂主要源于环境科学、毒理学与医学领域的跨学科协作不足,导致“暴露-效应”链的机制研究呈现碎片化.政策层面,《斯德哥尔摩公约》新增列管污染物清单、中国《新污染物治理行动方案》[14]等举措虽已落地,但其对相关科研方向的牵引效应尚未明晰.

本研究基于文献计量学方法,运用数据驱动的可视化分析,解析 2005~2025 年 ECs 与 NCDs 研究的动态演进规律,挖掘跨污染物-疾病关联图谱、核心学科协同网络及政策-学术互动模式特征等关键信息,助力跨学科资源整合与研究优先级科学决策,旨在为新污染物治理与环境健康风险的精准防控、跨学科资源优化配置及“科学-政策”协同治理提供依据.

1 数据与方法

1.1 数据来源

该研究以 Web of science 核心合集作为数据来源,研究时间跨度为 2005 年 1 月 1 日~2025 年 4 月 15 日,围绕“新污染物”与“慢性疾病”两大核心主题开展文献检索,检索式为 TS= ((emerging contaminant) OR (contaminant of emerging concern) OR (emerging pollutant) OR (personal care product) OR (pharmaceutical and personal care product) OR (endocrine disruptors) OR (endocrine disrupting chemical) OR (endocrine disrupting compound) OR microplastic OR (disinfection byproduct) OR (disinfection by product) OR (perfluorinated compound) OR perfluorochemical OR (brominated flame retardant) OR (organophosphate flame retardant)) AND TS =(“Chronic Disease$” OR “Non-communicable Disease$” OR “Long-term Disease$” OR “Metabolic Disease$” OR “Cardiovascular Disease$” OR “Diabetes” OR “Chronic Respiratory Disease$” OR “Cancer” OR “Neoplasm$” OR “Neurodegenerative Disease$” OR “Chronic Kidney Disease$” OR “Autoimmune Disease$” OR “Hypertension” OR “High Blood Pressure” OR “Obesity” OR “Chronic Liver Disease$” OR “Mental Disorder$”),限定文献类型为“article”和“review”两种,语种为“English”,共获得有效文献 6643 篇,其中期刊论文 4964 篇(占比 74.7%),综述文献 1679 篇(占比 25.3%) .

1.2 研究方法

该研究依据发文量、国家、机构、期刊、学科、关键词等对检索到的文献进行文献计量学分析.由于 2025 年数据尚未完整,为确保年度发文量对比的科学性,在发文量变化趋势分析部分仅纳入 2005~ 2024 年数据.使用的处理软件包括 Excel、Origin 2019、CiteSpace 6.3.R3.Excel 软件用于统计高产国家和机构、发文期刊、学科和关键词,Origin 2019 用于绘制年度发文量统计图,CiteSpace 软件用于数据清,并洗绘制国家合作网络图、关键词共现图谱和关键词突现图谱.通过上述方法对收集到的文献进行分析,研究该领域研究进展、热点方向和未来趋势.

2　结果与讨论

2.1　发文量变化趋势

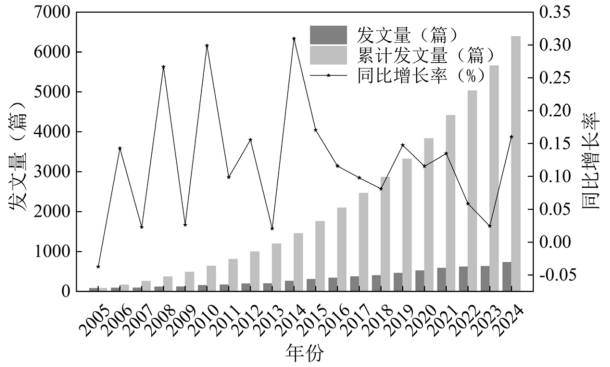


图 1　2005~2024 年 WOS 中新污染物和慢性病相关研究的年度发文量

Fig.1　Annual number of publications on ECs and NCDs in WoS, 2005~2024

文献发表数量的变化趋势能够体现出某一研究领域的研究进展及热度[15].对 2005~2024 年新污染物与慢性病相关研究领域的文献发文量和同比增长率进行分析(图 1).可以看出,2005~2013 年期间,发文量增长相对较为平缓,处于逐步积累阶段,但同比增长率变化较大,甚至在 2005 年出现了−3.75%的负增长,反映了在研究初期方向探索的不稳定性;2014 年之后,发文量增长速度加快,呈现出明显的上升趋势,2014 年的同比增长率最高,为 30.96%,这一时间点与《斯德哥尔摩公约》新增污染物管控清单的生效时间高度吻合,提示政策可能是一个重要的驱动因素.累计发文量从 2005 年的 77 篇持续攀升至 2024 年的 6390 篇,整体增长幅度达 82.99 倍,反映出该领域研究受关注程度不断提高,研究活跃度增强.

2.2　发文国家与机构

主要的发文国家和机构如表 1 所示.美国(2259 篇)、中国(1439 篇)和意大利(422 篇)是发文量排名前 3 的国家,约占总发文量的 56%.美国发文量明显领先于其他国家,约占总发文量的 34%,说明美国在新污染物与慢性病研究中占主导地位,研究成果较多;中国发文量位居第 2 位,表明我国在此领域的研究也具备相当规模,近年来对新污染物与慢性病相关研究的重视和投入成效显著,如,2022 年的《新污染物治理行动方案》明确提出加强环境健康风险评估技术研究[16];2023 年科技部通过国家重点研发计划“大气与土壤、地下水污染综合治理”专项设立“新污染物治理与健康风险防控”研究方向等[17].意大利、西班牙、加拿大等国家发文量处于 241~422 篇区间,在该领域也有一定研究活跃度,但与美国、中国相比存在较大差距.

表 1　WoS 中新污染物和慢性病相关研究发文量前 10 的国家和机构

Table 1　Top 10 countries and institutions by number of publications on ECs and NCDs in WoS

序号	国家	发文量(篇)	中介中心性	序号	机构	所属国家	发文量(篇)	中介中心性
1	美国	2259	0.05	1	加利福尼亚大学	美国	266	0.46*
2	中国	1439	0.04	2	美国国立卫生研究院	美国	210	0.19*
3	意大利	422	0.05	3	中国科学院	中国	195	0.31*
4	西班牙	369	0.08	4	法国国家健康与医学研究院	法国	188	0.28*
5	加拿大	351	0.04	5	哈佛大学	美国	166	0.41*
6	印度	334	0.05	6	生物医学研究中心网络	西班牙	151	0.18*
7	法国	331	0.07	7	美国国立环境卫生科学研究所	美国	120	0.2*
8	英国	316	0.05	8	伊利诺伊大学	美国	113	0.07
9	韩国	277	0.01	9	西班牙流行病与公共健康研究协会	西班牙	110	0.05
10	德国	241	0.06	10	北卡罗来纳大学	美国	97	0.06

注:中介中心性表示该节点(国家/机构)与其他节点合作紧密程度,当其值大于0.1时,视该节点为关键节点[18],用*标出,下同.

国家合作网络如图 2 所示.美国最先开展新污染物和慢性病相关研究,并与多个国家有合作关系.欧洲各国在该研究领域合作紧密,如意大利、西班牙、法国、英国和德国之间有较多的合作关系.中国与美国、加拿大以及英国之间的合作次数较多.结合表 1 中的中介中心性发现,美国(0.05)、西班牙(0.08)、法国(0.07)以及德国(0.06)均是合作网络中重要的国家,能够在国际学术交流与合作中较好地连接不同研究团体,起到一定的桥梁作用.

发文量前 10 的机构共发文 1616 篇,约占总发

文量的24%,其中美国有6家,西班牙有2家,中国和法国各有1家,美国的机构在榜单中占据多数,如加利福尼亚大学、美国国立卫生研究院等.加利福尼亚大学和哈佛大学的中介中心性达到了 0.4 以上,这表明二者在学术交流与合作中发挥着重要作用,这种高度影响力可能源于其庞大的多校区结构,促进了系统内部的紧密协作.中国发文量前10的机构总发文量为 472 篇,发文量前 3 的机构是中国科学院(195)、中国科学院生态环境研究中心(90)和中国科学院大学(86),中国科学院作为国内科研体系的核心力量,在新污染物与慢性疾病研究领域发挥着主导作用.

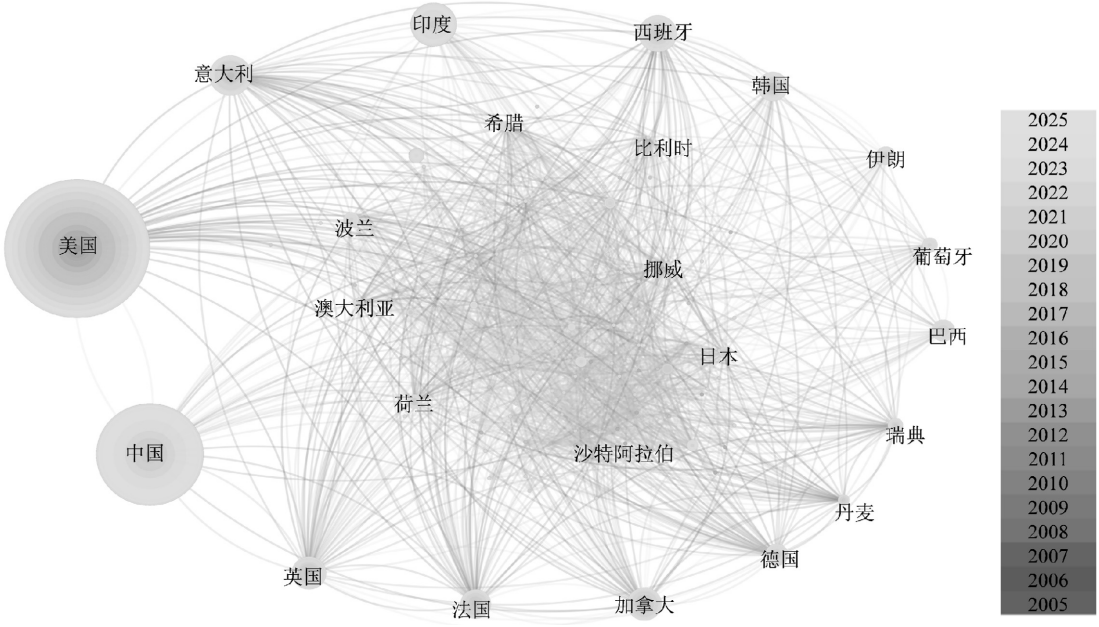


图 2 国家合作网络

Fig.2 Country-level collaboration network

2.3 载文期刊

表 2 WoS 中新污染物和慢性病相关研究领域被引频次前 10 的期刊

Table 2 Top 10 journals by citation frequency in ECs and NCDs research in WoS

序号	期刊名称	被引篇数	IF(5a)	IF(2024)
1	Environmental Health Perspectives	4451	10.9	9.8
2	Environmental Science & Technology	3252	12.4	11.3
3	Chemosphere	3206	N.A.	8.1#
4	Science of the Total Environment	3022	8.7	8
5	Environment International	3021	11.6	9.7
6	Environmental Research	2878	7.7	7.7
7	Plos One	2837	3.2	2.6
8	Toxicological Sciences	2488	4	4.1
9	Environmental Pollution	2134	8.1	7.3
10	Endocrinology	2079	4.2	3.3

注:#为2023年的影响因子.

对 WoS 数据库中新污染物和慢性病相关研究领域的引用文献来源期刊进行统计,并列出总被引次数排名前 10 的期刊及其影响因子(表 2).

检索到的文献共引用了 145484 篇文献,其中排名前 10 的期刊中被引文献共 29368 篇,约占总被引文献数的 20.2%,显示出较高的引用集中度.排名前10的期刊中,多数期刊2024年的影响因子大于5,表明这些期刊整体具有较高的学术影响力.被引篇数排名前 3 位的期刊分别为《Environmental Health Perspectives》 (4451 篇)、《Environmental Science & Technology》(3252 篇)和《Chemosphere》(3206 篇),而世界顶流期刊如 Nature、Science 的排名分别为16和21,被引篇数均大于1500,说明该研究领域以环境类期刊为主导,并呈现出鲜明的学科交叉特征.

2.4 学科共现分析

近20a WoS数据库中新污染物和慢性病相关研究领域的英文文献共涵盖了 165 个学科类别,分布较为广泛.发文量排名前 10 的学科领域中(表 3),环

境科学、毒理学以及公共环境与职业健康位居前三.环境科学作为发文量最大的核心学科,其研究涵盖新污染物的环境行为[19]、污染源解析[20]及风险评价[21],该学科能够为毒理学和公共健康研究提供基础数据.毒理学依赖环境科学的暴露数据,聚焦新污染物的慢性毒性机制,尤其是对代谢紊乱和癌症的潜在影响.公共环境与职业健康学科作为跨学科枢纽,其高中介中心性表明该学科在环境暴露、人群流行病学调查和政策干预中起着重要的桥梁作用.该学科以科学数据整合与风险评估为基础,融合环境监测、职业暴露分析和流行病学方法,构建健康风险预测模型,同时为政策制定提供跨领域协调方案.例如,研究职业暴露于塑化剂与工人慢性肾病发病率的相关性,以及基于环境监测数据制定饮用水污染物安全阈值.新污染物和慢性病相关研究领域的各个学科之间呈现出相互交叉、联系紧密的特征,形成了以环境健康为核心、多层级联动的学科网络.

表 3　WoS 中新污染物和慢性病相关的学科领域

Table 3　Web of Science research areas of ECs and NCDs research

序号	学科领域		发文量	中介中心性
	英文	中文		
1	ENVIRONMENTAL SCIENCES	环境科学	2476	0.19*
2	TOXICOLOGY	毒理学	1296	0.08
3	PUBLIC ENVIRONMENTAL OCCUPATIONAL HEALTH	公共环境与职业健康	1009	0.34*
4	ENDOCRINOLOGY METABOLISM	内分泌学与代谢	660	0.07
5	BIOCHEMISTRY MOLECULAR BIOLOGY	生物化学与分子生物学	456	0.19*
6	ENGINEERING, ENVIRONMENTAL	环境工程	441	0.04
7	PHARMACOLOGY PHARMACY	药理与制药	410	0.17*
8	ONCOLOGY	肿瘤学	292	0.17*
9	CHEMISTRY, MULTIDISCIPLINARY	交叉化学	267	0.12*
10	WATER RESOURCES	水资源	244	0.02

2.5　关键词分析

2.5.1　研究热点与发展趋势分析　为更直观地展示新污染物与慢性病相关研究的总体格局,该研究对不同新污染物种类及慢性病类型的文献数量进行了定量统计(表 4).尽管检索策略涵盖了广泛的慢性病类型,但结果显示研究高度集中于癌症和代谢性疾病,这表明该领域存在显著的研究不均衡性.这种聚焦现象可能与三方面因素有关:一是癌症和代谢性疾病本身是全球主要的疾病负担,公共卫生关注度高;二是如双酚 A(BPA)、PFAS 等污染物已有较成熟的生物标志物检测方法,便于开展大规模流行病学研究;三是早期研究多围绕具有明确毒性的传统污染物与经典疾病端点展开,形成了路径依赖.

对 WoS 数据库中检测到的关键词进行可视化分析,可以在表 4 的宏观分布基础上,进一步揭示研究热点的动态演变.设置 k=5,共得到 222 个节点和 985 条连线.在此基础上,对新污染物和慢性病相关研究领域出现次数前 25 位的关键词进行统计分析(表 5),对所有关键词进行共现图谱分析(图 3)、及突发性检测(图 4).分析结果表明,目前新污染物和慢性病相关研究领域的研究热点主要是污染物种类、疾病类型、污染介质与暴露途径及评估方法等方面.

表 4　WoS 中新污染物与慢性病相关研究中污染物与疾病类型的论文数量排名

Table 4　Number of publications by contaminant type and disease category in ECs and NCDs research in WoS

序号	新污染物	论文数量(篇)	慢性病	论文数量(篇)
1	内分泌干扰物	2049	癌症	1589
2	双酚 A	1100	肥胖	415
3	消毒副产物	536	代谢综合征	189
4	多氯联苯	448	心血管疾病	126
5	持久性有机污染物	408	炎症	99
6	全氟化合物	280	糖尿病	80
7	个人护理产品	259	高血压	56
8	多溴联苯醚	221	妊娠期糖尿病	28
9	溴化阻燃剂	208	多囊卵巢综合征	24
10	多环芳烃	195	儿童肥胖症	20

表 5　WoS 中新污染物和慢性病相关研究出现频次前 25 位的关键词

Table 5　Top 25 keywords by occurrence frequency in ECs and NCDs research in WoS

序号	关键词		频次	中介中心性
	英文	中文		
1	endocrine disrupting chemicals	内分泌干扰物	2049	0.18*
2	bisphenol a	双酚 A	1100	0.77*
3	exposure	暴露	1050	0.04
4	breast cancer	乳腺癌	637	0.05
5	drinking water	饮用水	547	0.77*
6	disinfection by products	消毒副产物	536	0.19*

续表 5

序号	关键词		频次	中介中心性
	英文	中文		
7	cancer	癌症	518	0.05
8	risk	风险	454	0.02
9	expression	表达	450	0.07
10	polychlorinated biphenyls	多氯联苯	448	0.73*
11	oxidative stress	氧化应激	442	0.12*
12	in vitro	在生物体外进行的	434	0.05
13	obesity	肥胖	415	0.24*
14	persistent organic pollutants	持久性有机污染物	408	0.31*
15	gene expression	基因表达	375	0.04
16	insulin resistance	胰岛素抗药性	365	0.35*
17	association	联合	358	0.11*
18	health	健康	354	0.09
19	bladder cancer	膀胱癌	291	0.57*
20	prenatal exposure	产前暴露	275	0.11*
21	risk assessment	风险评估	260	0.1
22	personal care products	个人护理产品	259	0.09
23	toxicity	毒性	247	0
24	adipose tissue	脂肪组织	236	0.12*
25	polybrominated diphenyl ethers	多溴联苯醚	221	0.14*

研究的新污染物种类复杂,研究聚焦于“endocrine disrupting chemicals(内分泌干扰物,EDCs)”、“disinfection by products(消毒副产物,DBPs)”、“persistent organic pollutants (持久性有机污染物,POPs)”及“emerging contaminants (新污染物,ECs)”.其中,“EDCs”和“DBPs”相关研究起步较早,在 2005 年已经出现,以“bisphenol a(双酚 A, BPA)”、“polychlorinated biphenyls (多氯联苯, PCBs)”为代表的 EDCs 通过干扰激素作用,增加癌症、生殖障碍和肥胖的发生率[6].而以三卤甲烷为代表的 DBPs 在饮用水中的暴露是膀胱癌的主要风险因素[5].“POPs”在 2009 年被广泛关注,它能够通过内分泌干扰、线粒体损伤和脂肪炎症,加剧肥胖和胰岛素抵抗[22].结合突发性检测发现,新污染物如 PFAS 和纳米颗粒因具有持久性和生物毒性而成为前沿热点[23-24],目前针对这类污染物的作用机制,仍有待进一步突破与探究.

与新污染物暴露相关联的慢性疾病具有多元化特征.研究热点聚焦于癌症、代谢系统疾病、生殖内分泌疾病及神经与心血管疾病四大类.其中癌症是核心研究方向,包括乳腺癌、膀胱癌、前列腺癌等.Giulivo 等[25]分析了 EDCs 对生殖系统、代谢综合征、以及乳腺癌的影响,发现邻苯二甲酸酯、双酚 A 和对羟基苯甲酸酯能够干扰内分泌系统,导致生殖系统异常、肥胖、糖尿病及乳腺癌等疾病.近年来,越来越多的研究关注新污染物对生殖内分泌及神经退行性疾病的影响,该趋势与新污染物毒性机制研究的深化及全球疾病谱变迁密切相关.

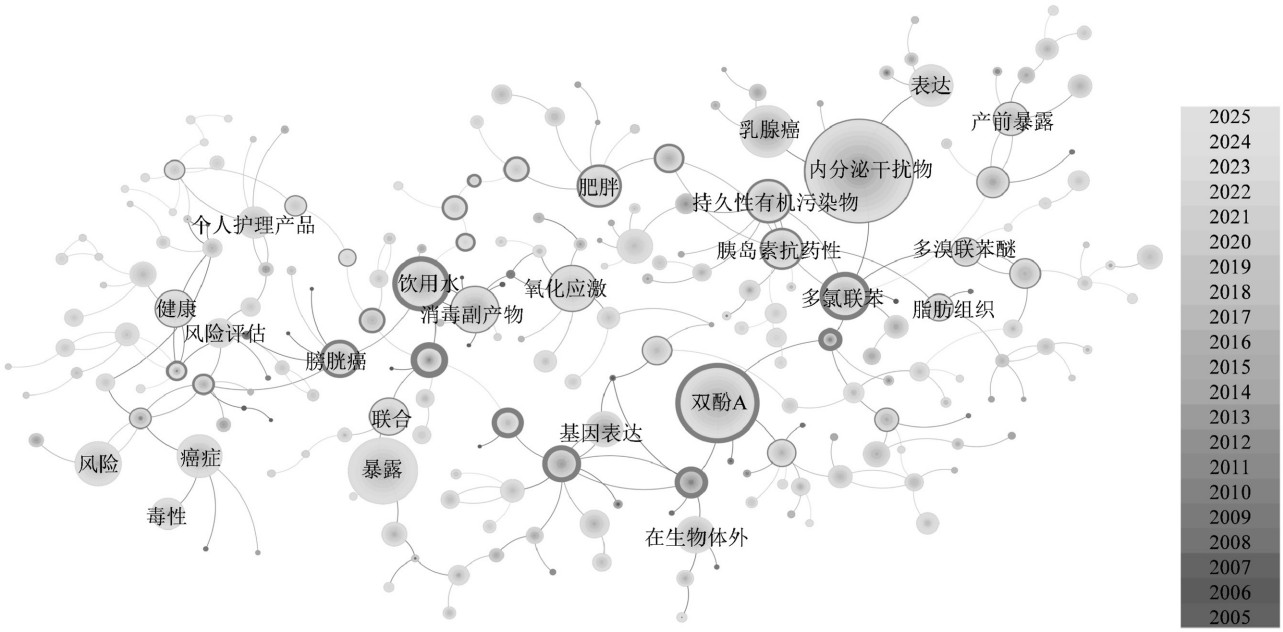


图 3 WoS 中新污染物和慢性病相关研究领域关键词共现图谱

Fig.3 Keyword co-occurrence network of ECs and NCDs research in WoS

实心圆表示关键词节点,关键词出现次数越多则节点越大,节点之间的连线代表相连的关键词出现在一篇或多篇文献中,连线越粗表明节点之间的相关性越强.节点外圈的深色代表该节点中介中心性大于 0.1,其为关键节点

污染物在环境介质中的分布决定暴露风险.污染介质包括水、空气、室内灰尘,其中饮用水出现频次为547,中介中心性为 0.77,是目前研究频次最高且中介中心性最强的污染介质.Ammons 等[26]通过评估饮用水硝酸盐和消毒副产物摄入量与卵巢癌风险之间的关联,将饮用水和饮食暴露作为潜在的新型卵巢癌风险因素.空气和室内灰尘也是重要的污染介质,能通过呼吸暴露进入人体.在空气与室内环境中,吸入携带多环芳烃的 $PM_{2.5}$ 能够诱发癌症[27];室内灰尘中的有机磷阻燃剂则能改变男性激素水平[28].近年来,暴露途径呈现时序性演变规律,由早期的广泛暴露逐步细化至“产前暴露”、“围产期暴露”及“新生儿暴露”等生命阶段特异性暴露,其中产前暴露的研究频率相对较高.

在风险评估过程中,传统方法仍占据主导地位,“risk assessment(风险评估)”、“risk factors(风险因子)”等关键词高频出现,表明基于统计学和流行病学的定量分析仍是核心手段.“toxicity(毒性)”、“genotoxicity(基因毒性)”等关键词说明毒性测试技术和毒性机制解析在新污染物和慢性病相关研究的重要性.“serum concentrations(血清浓度)”、“urinary concentrations(尿液浓度)”等关键词表明暴露与健康效应的量化分析依赖于生物样本检测技术.从技术演进趋势看,质谱法等传统检测手段因精准性优势长期占据主流,机器学习[29-30]、模型等新兴技术开始应用于风险评估领域,反映了大数据与人工智能技术在该领域的初步探索.未来需结合机器学习和全球数据推动评估体系向动态化、精准化方向发展.

2.5.2　研究前沿分析　关键词突现图谱可以反映某一研究领域的研究前沿,突现强度与关键词的热点程度成正比.研究持续的时间越长代表该关键词对应的研究内容越深入,研究价值越高[31].新污染物和慢性病研究领域突现强度最高的 25 个关键词如图 4 所示.消毒副产物和癌症是新污染物与慢性疾病研究领域的早期研究热点,研究包括暴露评估、致病机制等方面[32-33],乳腺癌和膀胱癌的研究依旧是当今研究的重点工作.

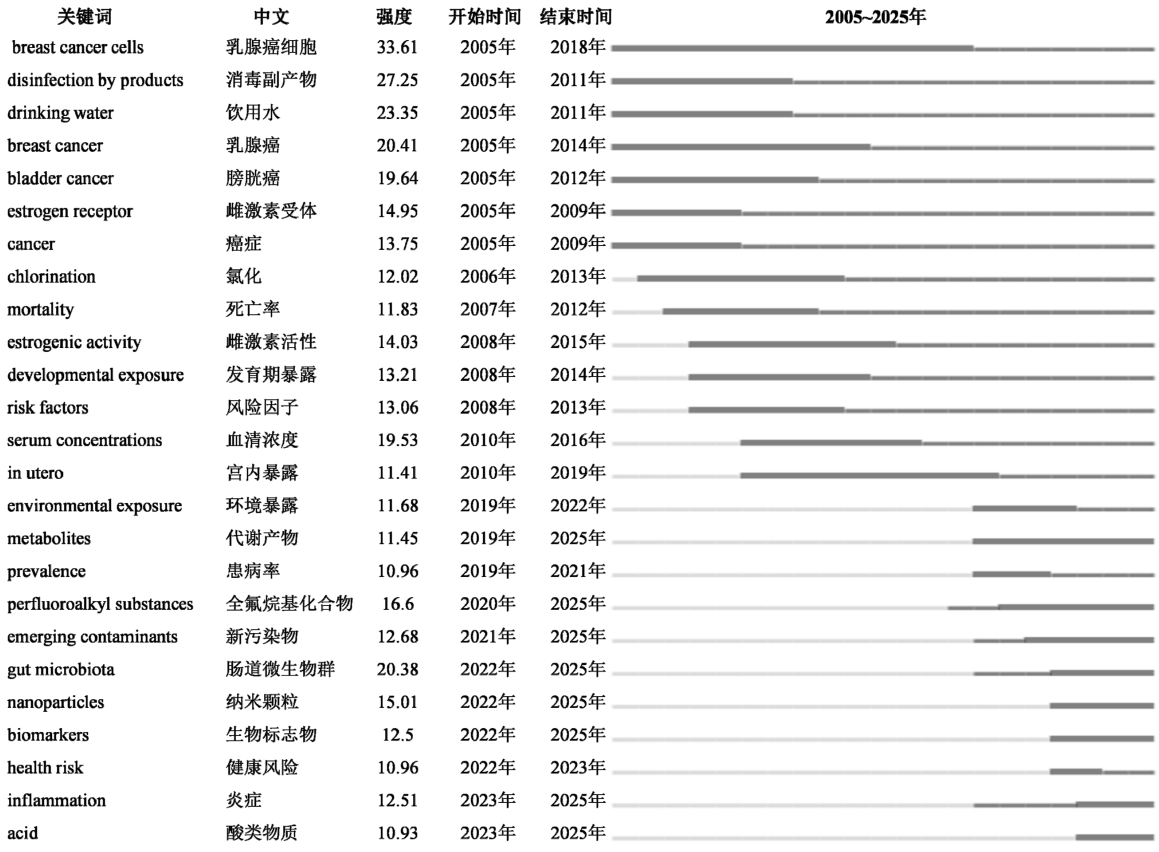


图 4　WoS 中新污染物和慢性病相关研究领域突现强度前 25 的关键词突现图谱

Fig.4　Top 25 keywords with the strongest citation bursts in ECs and NCDs research in WoS

关键词的突现强度值越大代表其在该时段内研究热度增长越快;开始时间、结束时间分别代表关键词突现开始和突现结束的时间;时间轴上的深色加粗段代表该关键词研究热度爆发且持续的时段

随着国际公约对持久性有机污染物的管控加强,研究焦点逐渐转向 PFAS 与代谢性疾病.由于 PFAS 具有环境持久性与生物累积性,多数研究讨论了其与胰岛素抵抗、肥胖等疾病的关联机制.Yang 等[34]研究了 PFAS 暴露导致肝脂质代谢紊乱的分子机制,发现 PFAS 通过激活过氧化物酶体增殖物激活受体α (PPARα) 信号通路,上调酰基辅酶 A 氧化酶 1 (ACOX1) 的表达,引发过氧化物酶体 β-氧化紊乱、氧化应激和线粒体损伤,进而导致肝脂质代谢紊乱和非酒精性脂肪肝病.Birru 等[35]研究了 PFAS 暴露与妊娠期糖尿病风险的潜在通路,发现 PFAS 会干扰母体的下丘脑-垂体-甲状腺轴,导致促甲状腺激素水平升高,而游离甲状腺激素水平降低,导致甲状腺功能紊乱,进一步破坏肝脏和胰腺的葡萄糖稳态,从而引发血糖稳态失衡.此外,暴露评估方法在此阶段实现技术革新[36],血清浓度与尿液浓度等生物标志物的高频出现,标志着质谱技术的普及推动暴露量化向精准化发展.发育暴露的突现性特征,表明学者开始关注污染物在母婴传递和生命早期阶段的长期健康效应.Zhuchen 等[37]分析了 PFAS 在妊娠和哺乳期的暴露特征及其对后代神经发育的影响,Domazet 等[38]通过一项前瞻性队列研究,分析了全氟辛烷磺酸和全氟辛酸浓度与肥胖指标及葡萄糖代谢标志物的关联,结果发现,儿童期全氟辛烷磺酸暴露与 15 岁时的肥胖指标有关,这些指标表现为 BMI、皮褶厚度和腰围升高,以及 21 岁时皮褶厚度和腰围增加,儿童期全氟辛酸暴露与 15 岁时β细胞功能下降有关.

通过分析近 5a 的关键词突现和相关论文,可以预测未来的研究热点.新污染物与慢性疾病研究领域由于涉及学科多,其研究较为复杂,研究前沿呈现显著的学科交叉特征.由图 4 可见,“metabolites (代谢产物)”、“PFAS (全氟和多氟烷基物质)”、“ECs (新污染物)”、“gut microbiota (肠道微生物群)”、“nanoparticles (纳米颗粒)”、“biomarkers (生物标志物)”、“inflammation (炎症)”是突现到 2025 年的关键词.未来的研究将继续聚焦于 PFAS、纳米颗粒[39-40]等新污染物,以及其可能引发的健康风险.此外,炎症作为慢性病的共同病理基础,也作为突现词出现,研究集中于 2023~2025 年.肠道微生物群的突现说明探究肠道菌群在污染物代谢与慢性炎症中所发挥作用也成为未来的研究热点[41].代谢产物和生物标志物的突现表明精准医学在环境健康领域的不断深化.

3 结论

3.1 2005~2025 年新污染物与慢性疾病研究领域的发文量呈显著增长趋势,整体增长幅度达 82.99 倍,研究热度不断增加.2014 年后增速显著,这可能源于《斯德哥尔摩公约》等政策对学术产出的正向驱动作用.美国主导全球研究,占比 34%,中国紧随其后,但中介中心性显示欧洲国家(西班牙、法国)在国际合作中更具桥梁作用;机构层面,加利福尼亚大学、中国科学院等通过跨机构合作形成影响力高地.学科分布上,环境科学、毒理学及公共健康构成核心网络,公共健康是链接环境暴露与疾病机制的关键枢纽.

3.2 研究热点呈现阶段性迁移的特点,从早期关注 EDCs、DBPs 与癌症的关联,逐步转向 PFAS、纳米颗粒等新污染物引发的代谢紊乱效应,如肥胖、胰岛素抵抗等.当前,肠道微生物群与炎症等跨机制研究主题成为前沿热点.

4 展望

4.1 由于文献计量学侧重宏观趋势,该研究未能深入解析污染物-疾病的具体分子通路;同时新兴主题如纳米颗粒的研究尚处初期,长期健康效应仍需持续追踪.

4.2 未来研究需着力深化毒性机制探索,重点突破 PFAS、微塑料等新污染物的表观遗传调控、免疫干扰等跨代效应,并构建“暴露组-微生物组-代谢组”多组学联动的慢性病致病机制.在应用层面,建议建立动态健康监测体系,量化政策干预对健康结局的改善效果,加强环境医学与公共卫生的跨学科合作,构建“风险评估-预警-干预”一体化平台.

参考文献:

[1] Leslie H A, van Velzen M J M, Brandsma S H, et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood [J]. Environment International, 2022,163:107199.

[2] Kurwadkar S, Dane J, Kanel S R, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: a critical review of their global occurrence and distribution [J]. Science of the Total Environment, 2022,809:151003.

[3] Li X, Wang Q, Jiang N, et al. Occurrence, source, ecological risk, and mitigation of phthalates (PAEs) in agricultural soils and the

environment: a review [J]. Environmental Research, 2023,220:115196.

[4] la Farré M, Pérez S, Kantiani L, et al. Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment [J]. Trac Trends in Analytical Chemistry, 2008,27(11): 991−1007.

[5] Cantor K P, Villanueva C M, Silverman D T, et al. Polymorphisms in GSTT1, GSTZ1, and CYP2E1, disinfection by−products, and risk of bladder cancer in Spain [J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(11):1545−1550.

[6] La Merrill M A, Vandenberg L N, Smith M T, et al. Consensus on the key characteristics of endocrine−disrupting chemicals as a basis for hazard identification [J]. Nature Reviews Endocrinology, 2020,16(1): 45−57.

[7] You L, Kou J, Wang M, et al. An exposome atlas of serum reveals the risk of chronic diseases in the Chinese population [J]. Nature Communications, 2024,15(1):2268.

[8] 冯　雨,浦少威,陈祝梅,等.PFAS 混合暴露与高尿酸血症关联性研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):322−330.
Feng Y, Pu S W, Chen Z M, et al. Association between mixed exposure to per− and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and hyperuricemia [J]. Chinese Environmental Science, 2025,45(1):322−330.

[9] 张露露,刘　婧,贺颖倩,等.血清全氟化合物与代谢相关脂肪性肝病患病风险的关系 [J]. 中国环境科学, 2023,43(2):964−972.
Zhang L L, Liu J, He Y Q, et al. Association of serum perfluoroalkyl substances with the risk of metabolic−associated fatty liver disease [J]. Chinese Environmental Science, 2023,43(2):964−972.

[10] Lu X, Xu X, Lin Y, et al. Phthalate exposure as a risk factor for hypertension [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25(21):20550−20561.

[11] Mi X, Yang Y Q, Zeeshan M, et al. Serum levels of per− and polyfluoroalkyl substance alternatives and blood pressure by sex status: isomers of C8 health project in China [J]. Chemosphere, 2020,261: 127691.

[12] Singh K, Chan H M. Persistent organic pollutants and diabetes among Inuit in the Canadian Arctic [J]. Environment International, 2017,101: 183−189.

[13] Han M, Ma A, Dong Z, et al. Organochlorine pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons in serum of Beijing population: exposure and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2023, 860:160358.

[14] 彭　政,姜　晨,余劭坤.基于斯德哥尔摩公约履约经验强化我国新污染物治理的思考 [J]. 环境保护, 2023,51(7):24−27.
Peng Z, Jiang C, Yu S K. Reflections on strengthening the management of emerging contaminants in China based on experience in implementing the Stockholm Convention [J]. Environmental Protection, 2023,51(7):24−27.

[15] 张瑞增,张玉梅,樊胜根.21 世纪以来我国农业甲烷排放研究追踪与展望——基于 CiteSpace 的可视化分析 [J]. 中国农业大学学报, 2025,30(6):123−136.
Zhang R Z, Zhang Y M, Fan S G. Tracking and prospects of agricultural methane emissions research in China since the 21st century: a CiteSpace−based visualization analysis [J]. Journal of China Agricultural University, 2025,30(6):123−136.

[16] 国务院办公厅关于印发新污染物治理行动方案的通知 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022,(16):34−39.
General Office of the State Council. Circular on printing and issuing the action plan for the control of emerging contaminants [J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2022,(16):34−39.

[17] 任　静,李　娟,席北斗,等.我国地下水污染防治现状与对策研究 [J]. 中国工程科学, 2022,24(5):161−168.
Ren J, Li J, Xi B D, et al. Groundwater pollution prevention and control in China: current status and countermeasures [J]. Strategic Study of CAE, 2022,24(5):161−168.

[18] 高　雅,郭昌胜,徐　建.基于文献计量学的环境健康效益评估研究热点及趋势分析 [J]. 环境科学研究, 2023,36(9):1813−1823.
Gao Y, Guo C S, Xu J. Hotspots and trends in research on environmental health benefit assessment based on bibliometrics [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(9):1813−1823.

[19] 高　会,李　冰,姚子伟.海洋环境中抗生素存在与环境行为研究进展 [J]. 环境化学, 2023,42(3):779−791.
Gao H, Li B, Yao Z W. Research progress on the occurrence and environmental behavior of antibiotics in the marine environment [J]. Environmental Chemistry, 2023,42(3):779−791.

[20] 何卓识,李超灿,张靖天,等.受体模型在湖泊沉积物中 PAHs、PFASs 和 OCPs 源解析比较 [J]. 环境工程技术学报, 2018,8(3):231−240.
He Z S, Li C C, Zhang J T, et al. Comparison of source apportionment of PAHs, PFASs, and OCPs in lake sediments using receptor models [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018,8(3):231−240.

[21] Ding L, Zhang C M. Occurrence, ecotoxicity and ecological risks of psychoactive substances in surface waters [J]. Science of the Total Environment, 2024,926:171788.

[22] Lee D H, Porta M, Jacobs D R Jr, et al. Chlorinated persistent organic pollutants, obesity, and type 2diabetes [J]. Endocrine Reviews, 2014, 35(4):557−601.

[23] Fenton S E, Ducatman A, Boobis A, et al. Per− and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: current state of knowledge and strategies for informing future research [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2021,40(3):606−630.

[24] Rahman A, Sarkar A, Yadav O P, et al. Potential human health risks due to environmental exposure to nano− and microplastics and knowledge gaps: a scoping review [J]. Science of the Total Environment, 2021,757:143872.

[25] Giulivo M, de Alda M L, Capri E, et al. Human exposure to endocrine disrupting compounds: their role in reproductive systems, metabolic syndrome and breast cancer: a review [J]. Environmental Research, 2016,151:251−264.

[26] Ammons S, Madrigal J M, Manley C K, et al. Nitrate and disinfection by−products in drinking water and risk of ovarian cancer [J]. Environmental Epidemiology, 2025,9(3):e382.

[27] Liu X, Wang X, Xue Q, et al. Inhalation bioaccessibility and risk assessment for PM−bound organic components: co−effects of component physicochemical properties, PM properties, and sources [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023,459:132291.

[28] Meeker J D, Stapleton H M. House dust concentrations of organophosphate flame retardants in relation to hormone levels and

semen quality parameters [J]. Environmental Health Perspectives, 2010,118(3):318−323.

[29] Chakraborty T K, Rahman M S, Nice M S, et al. Application of machine learning and multivariate approaches for assessing microplastic pollution and its associated risks in the urban outdoor environment of Bangladesh [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 472:134359.

[30] Tachachartvanich P, Singam E R A, Durkin K A, et al. In vitro characterization of the endocrine disrupting effects of per− and poly−fluoroalkyl substances (PFASs) on the human androgen receptor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,429:128243.

[31] 乔 宇,闫振飞,冯承莲,等.基于文献计量学的环境内分泌干扰物研究热点分析 [J]. 环境科学研究, 2022,35(2):424−434.
Qiao Y, Yan Z F, Feng C L, et al. Hotspot analysis of endocrine−disrupting chemicals (EDCs) research based on bibliometrics [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(2):424−434.

[32] Villanueva C M, Cantor K P, Grimalt J O, et al. Bladder cancer and exposure to water disinfection by−products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools [J]. American Journal of Epidemiology, 2007,165(2):148−156.

[33] Jeong C H, Postigo C, Richardson S D, et al. Occurrence and comparative toxicity of haloacetaldehyde disinfection byproducts in drinking water [J]. Environmental Science & Technology, 2015,49(23): 13749−13759.

[34] Yang W, Ling X, He S J, et al. PPARα/ACOX1as a novel target for hepatic lipid metabolism disorders induced by per− and polyfluoroalkyl substances: an integrated approach [J]. Environment International, 2023,178:108138.

[35] Birru R L, Liang H W, Farooq F, et al. A pathway level analysis of PFAS exposure and risk of gestational diabetes mellitus [J]. Environmental Health, 2021,20(1):63.

[36] Oresic M, McGlinchey A, Wheelock C E, et al. Metabolic signatures of the exposome: quantifying the impact of exposure to environmental chemicals on human health [J]. Metabolites, 2020,10(11):454.

[37] Zhuchen H Y, Wang J Y, Liu X S, et al. Research progress on neurodevelopmental toxicity in offspring after indirect exposure to PFASs in early life [J]. Toxics, 2023,11(7):571.

[38] Domazet S L, Grontved A, Timmermann A G, et al. Longitudinal associations of exposure to perfluoroalkylated substances in childhood and adolescence and indicators of adiposity and glucose metabolism 6 and 12years later: the European youth heart study [J]. Diabetes Care, 2016,39(10):1745−1751.

[39] Kadac−Czapska K, Osko J, Knez E, et al. Microplastics and oxidative stress: current problems and prospects [J]. Antioxidants, 2024,13(5): 579.

[40] Krause S, Ouellet V, Allen D, et al. The potential of micro− and nanoplastics to exacerbate the health impacts and global burden of non−communicable diseases [J]. Cell Reports Medicine, 2024,5(6): 101581.

[41] Xu M, Niu H, Wu L, et al. Impact of microplastic exposure on blood glucose levels and gut microbiota: differential effects under normal or high−fat diet conditions [J]. Metabolites, 2024,14(9):504.

作者简介：郭雨倩(2001−),女,山西晋城人,中国环境科学研究院硕士研究生,主要研究方向为新污染物健康风险研究和疾病负担评估. 18835636546@163.com.