



DOI: 10.5846/stxb202111123176

余欣,余瑞林,孙松峰,邓伟平.基于 CiteSpace 的生态风险评价研究进展.生态学报,2022,42(24):10338-10351.

基于 CiteSpace 的生态风险评价研究进展

余 欣¹,余瑞林^{1,*},孙松峰¹,邓伟平²

1 华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,武汉 430079

2 建德市林业总场,杭州 311600

摘要:基于 Web of Science 和中国知网数据库,运用 CiteSpace 知识图谱可视化方法,分析国内外生态风险评价的研究进展。结果表明:(1)1990—2020 年国内外生态风险评价研究文献数量均快速增长,其中国内文献数量增长更快;(2)国内外文献作者及研究机构之间基本形成合作网络体系,中国科学院的发文量在国际位于领先地位;(3)关键词和关键词聚类可视化分析表明生态风险评价研究长期聚焦在水环境、重金属、有机化合物污染影响;(4)国内外研究重点重合度高、同步性强,均从水环境为主向水土环境与城市环境并重转变、向源解析和风险管理研究延伸,但相较之下,国内研究对风险源、质量标准研究更为重视,国外研究与生物学联系更为紧密、对于国际性话题的研究关注也更多。对当前国内生态风险评价研究的启示包括:增强研究对象多元化和国际化,检验更新各类质量标准,构建相对统一的生态风险评价框架和指标体系,科学评估区域持续发展水平和绿色发展潜力。

关键词:生态风险评价;研究热点;启示;进展;CiteSpace;知识图谱

生态环境作为人类生存和发展的物质基础和空间载体,支撑着社会经济的不断发展。伴随着生态环境恶化问题的出现,认识和解决生态环境问题也越来越受到重视,1990 年美国环保局在风险评价专题讨论会上正式提出生态风险评价的概念^[1],生态风险评价由此应运而生。据美国环保局定义,生态风险评价是评估环境因暴露于一个或多个压力源(如化学品、土地利用变化、疾病和入侵物种)而受到影响的可能性的过程,尤其关注人类干扰对生态系统或组分产生不利影响的程度^[2]。生态风险评价框架致力于为决策提供科学依据^[3],由 20 世纪 80 年代的人体健康评价基本框架改编而来^[4],可以评价环境事件或人类生产生活活动对动植物及生态系统的负面作用的大小和概率^[5]。生态风险评价是收集、整理、表达科学信息以服务于管理决策的过程^[6],可以帮助环境管理部门了解和预测生态影响因素和所产生的生态后果之间的关系,有利于环境决策的制定。一方面,从全球视角来看,国内外对绿色生态发展都给予高度重视,生态风险评价的研究有助于推动全球可持续发展,因而有必要对中外生态风险评价研究进行系统性梳理,厘清生态风险评价研究的整体框架及演进脉络,以期客观、科学地把握生态风险评价领域发展方向和发展趋势,指明发展路径。另一方面,我国国内的生态风险评价研究起步较晚,与国外研究存在差异,需从国内外比较研究的基础上进一步探究生态风险评价研究的前沿热点及未来发展趋势,这将有助于为我国学者剖析生态风险评价的研究现状及开拓新的研究前沿提供理论参考和借鉴,并在认识环境问题、分析环境问题、解决环境问题的实践中起到巨大作用。

本文采用科学计量方法,运用可视化知识图谱绘制软件 CiteSpace V,对 Web of Science (WOS) 和中国知网数据库 (CNKI) 中关于生态风险评价的文献进行可视化分析,分析生态风险评价的知识基础、研究主题和研

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42071170),湖北省教育厅人文社科研究项目(20Z031)

收稿日期:2021-11-12; **网络出版日期:**2022-05-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yu_8090@qq.com

究前沿,明确国内外生态风险评价研究的演化路径和发展趋势。

1 研究方法 with 数据处理

1.1 研究方法

信息化社会带来数据分析的变革与进步,科学知识图谱是分析文献的重要工具。科学知识图谱是一种通过数据挖掘、科学计量、信息分析以及图形绘制等多种手段,对某一研究领域进行可视化分析的方法^[7]。目前的知识图谱绘制工具至少有五种以上,其中 CiteSpace 是常用的分析软件,以科学分析潜在知识内容为基础,根据计量学、信息可视化技术、数学模型的结合,形成一种引文可视化分析模式^[8]。

1.2 数据来源

为了获取精准且高质量的文献,在 CNKI 中,将中文核心期刊要目总览、中国科学引文数据库及中文社会科学引文索引中的文献定义为“高质量文献”,将检索条件设置为“关键词=(‘生态风险评价’)或关键词=(‘生态风险’且‘评价’)”。在 WOS 核心合集数据库中,检索条件设置为“AK=ecological risk assessment OR KP=ecological risk assessment”。为更好地对比国内外研究异同,在 WOS 中将国别精炼为“people R China”,并经人工筛选,获取第一作者与通讯作者为国内学者的文献,将其与 CNKI 数据库文献合并,为国内研究成果;剔除国内文献的 WOS 数据即为国外研究成果。

(1)进行文献数量分析时,为更科学客观地获知领域发展概况,以美国环保局正式提出生态风险评价的概念年份为起始年份,取时间跨度为 1990—2020 年的 1791 篇国内高质量文献和 2011 篇国外高质量文献。

(2)在可视化分析中,需以关键词为节点进行分析,由于受 WOS 核心文集数据库全数据获取限制,最早的时间节点限定为 2005 年,因而取时间跨度为 2005—2020 年的国内高质量文献和国外高质量文献,经过人工筛选、去重等步骤去除无效论文后,最终获得 1763 篇国内文献和 1727 篇国外文献。因可视化数据识别处理需要,故将国内文献中的 WOS 数据库文献的英文关键词全部转化为中文后进行可视化分析。

进行可视化数据处理时,在时区分割选项下,设定跨度时间是 2005—2020 年,时间切片为一年,术语来源为作者关键词 DE 及附加关键词 ID,剪切方法选取 Minimum Spanning Tree 和 Pruning Sliced Networks,其余选项保留默认设置。

2 生态风险评价研究概况

2.1 生态风险评价的基本流程

人们对全球气候变化、栖息地丧失、生物多样性减少以及杀虫剂和有毒化学品对生态的影响等生态问题的越发重视促使了生态风险评价的产生。继生态风险评价概念正式提出之后,1992 年美国环保局发布了《生态风险评价框架报告》^[9],1998 年发布的《生态风险评价指南》^[10]取代了前者,成为生态风险评价的指导性文件,其主要受众是美国环保局的风险评估人员和风险管理人员,后也为各专业研究者所参考。

两份文件指出,问题制定、分析、风险表征是生态风险评价的三阶段,这基本成为了未来生态风险评价的研究范式。在问题制定中,风险评估人员评估目标,选择需要评价的环境要素,并制定分析计划;在分析阶段,评估人员评估应激源暴露以及应激水平与生态效应之间的关系;在第三阶段,风险表征,评估人员通过综合暴露和应激反应情况来评估风险,通过讨论证据和确定生态逆境来描述风险,并形成报告^[10]。如下图所示。

2.2 生态风险评价研究文献数量时间分布概况

研究成果的时间分布特征可历时性地反映该研究领域的发展状况。文献数量的年度分布如图 2 所示。

从国内文献发表的年度分布来看,文献数量整体变化趋势为先平稳缓慢增加后快速增加。第一篇将“生态风险评价”纳入关键词的相关研究出现在 1994 年,文章以环境风险评价的方法、现状简述为主要内容,详细介绍了人体风险评价的方法并予以举例,指出国外环境风险评价已由人体风险评价转变为生态风险评价^[11]。

由图可知,在 2005 年以前,国内生态风险评价成果寥寥,每年的文献数量在 7 篇及以下,而 2005 年开始

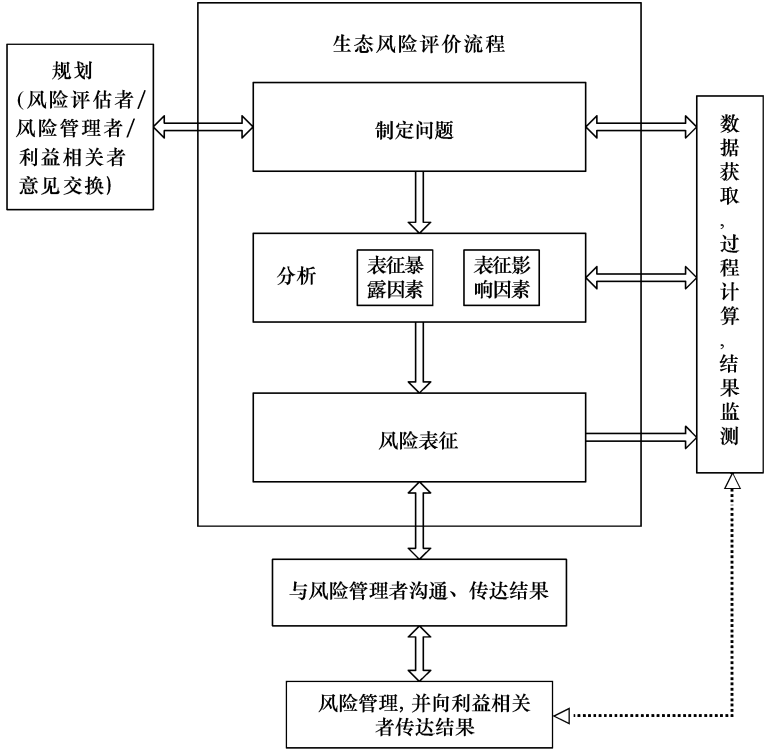


图 1 生态风险评价框架^[10]

Fig.1 The ecological risk assessment framework

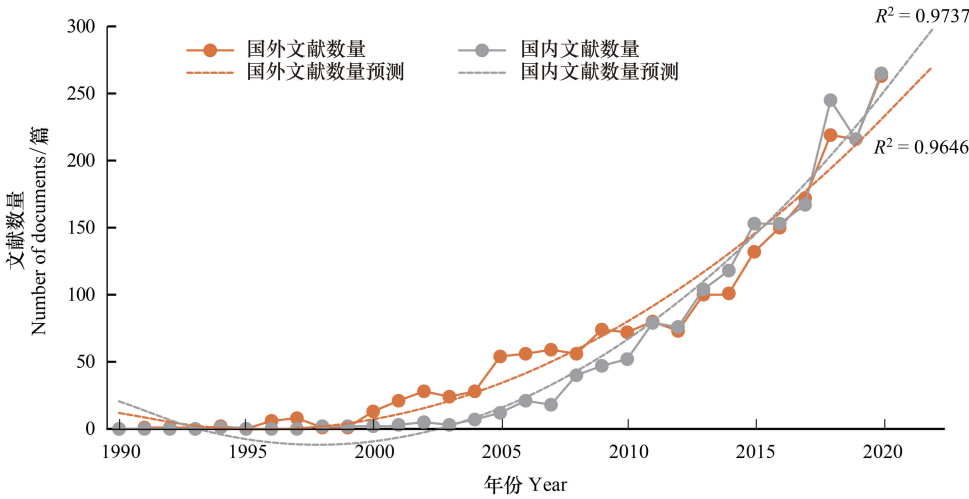


图 2 1990—2020 国内外生态风险评价文献数量

Fig.2 Number of papers on ecological risk assessment from 1990 to 2020

达到 12 篇及以上,并在 2008、2011、2015、2018 年有相对明显的增长,近 3 年呈爆炸性增长,每年数量均在 200 篇以上。在我国科学发展观及“美丽中国”的指引下,国内学者对生态风险评价研究领域的关注和重视不断加强,相关政策也成为了生态风险评价研究的导向标。

从国外文献发表情况来看,国外文献数量增加速度先慢后快,呈现指数型的增长态势。1990—2000 年为起步期,大多年份在 0—2 篇,第一篇将生态风险评价纳入关键词的文章发表于 1991 年,该文评估了不同臭氧

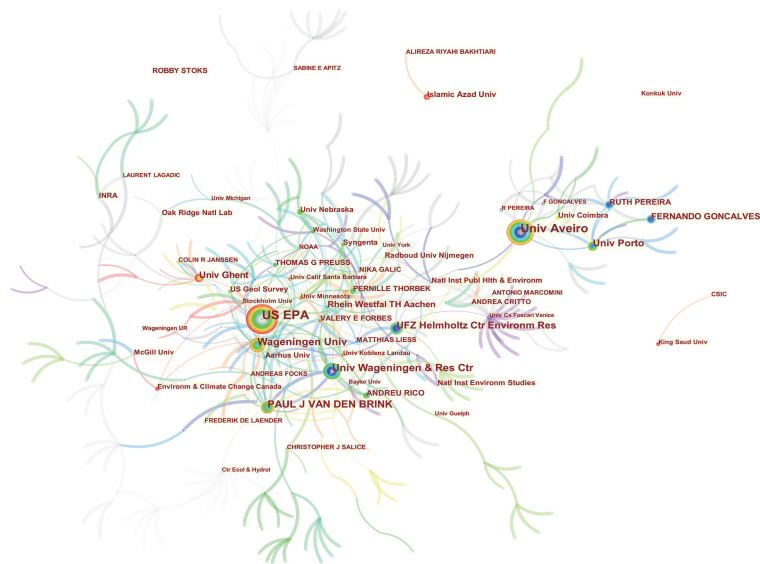


图 4 国外文献作者及机构分布
Fig.4 Knowledge mapping of institutions and authors abroad

工调整等技术处理^[14],得到生态风险评价研究的关键词共现网络图谱(图 5 和图 6)。节点越大表明出现的频次越多,出现的时间越早,连接线越宽表示相关度越高。

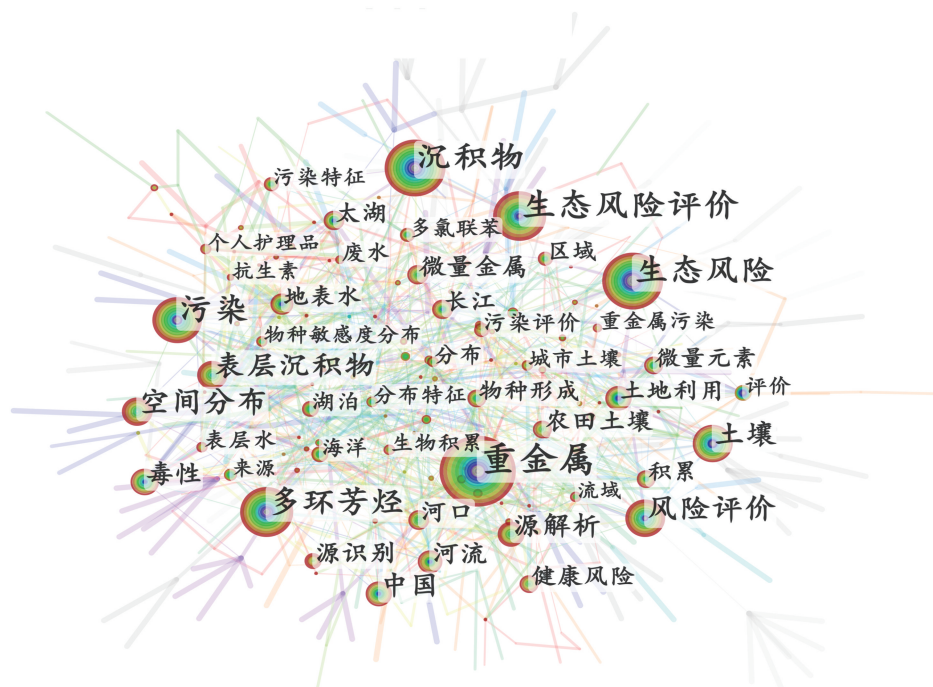


图 5 国内文献高频关键词图谱
Fig.5 The high frequency keywords of papers in China

2005 年以来生态风险评价研究围绕着重金属、沉积物、污染、多环芳烃、空间分布等关键词展开。将关键词按照频次统计,分别列举了国内外文献中词频次数最高的 25 项关键词,这些关键词涉及了暴露源、环境等多个维度,如表 1 所示。

关键词统计对比可知,国内外文献关键词超过半数相同,频次超过 100 以上的关键词数目相同,相对而

表 1 关键词统计表(频次排序前 25)
Table 1 The top 25 keywords in frequency

国内文献 Papers in China			国外文献 Papers abroad		
关键词 Keywords	出现频次 Frequency	首次出现时间 First occurrence time	关键词 Keywords	出现频次 Frequency	首次出现时间 First occurrence time
重金属 Heavy metal	565	2006	Ecological risk assessment	1195	2005
生态风险评价 Ecological risk assessment	340	2008	Heavy metal	296	2005
沉积物 Sediment	335	2005	Risk assessment	273	2005
生态风险 Ecological risk	263	2005	Toxicity	216	2005
污染 Pollution	254	2008	Water	146	2005
多环芳烃 Polycyclic aromatic hydrocarbon	221	2005	Pollution	146	2007
风险评价 Risk assessment	168	2007	Contamination	137	2005
表层沉积物 Surface sediment	164	2013	Surface sediment	132	2007
空间分布 Spatial distribution	152	2011	Ecological risk	124	2005
土壤 Soil	148	2005	Exposure	120	2005
源解析 Source apportionment	107	2014	Sediment	101	2005
中国 China	93	2005	Trace metal	90	2006
毒性 Toxicity	87	2009	Spatial distribution	85	2015
河流 River	82	2011	Polycyclic aromatic hydrocarbon	82	2007
河口 Estuary	75	2011	River	82	2010
微量金属 Trace metal	74	2014	Model	81	2005
源识别 Source identification	73	2015	Pesticide	77	2005
农田土壤 Farmland soil	73	2008	Management	74	2005
地表水 Surface water	63	2011	Impact	74	2005
长江 Yangtze River	62	2011	Soil	71	2005
健康风险 Health risk	62	2014	Fish	69	2005
土地利用 Land use	60	2006	Trace element	69	2013
太湖 Taihu lake	60	2010	Response	68	2005
微量元素 Trace element	51	2013	Growth	65	2005
积累 Accumulation	51	2013	Marine sediment	65	2015
物种形成 Speciation	51	2009			

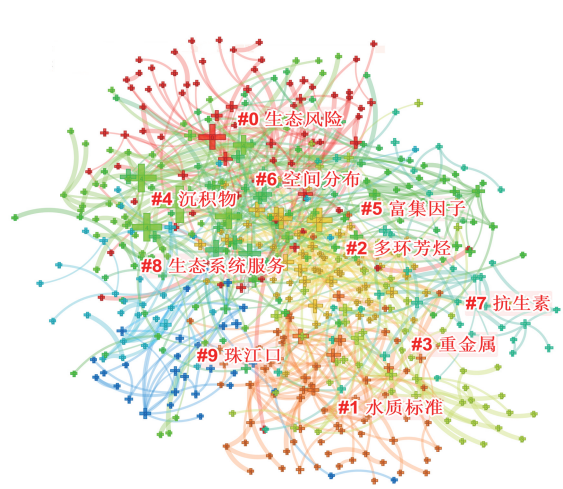


图 7 国内文献关键词构建的知识网络聚类

Fig.7 Knowledge graph of keywords clustering of papers in China

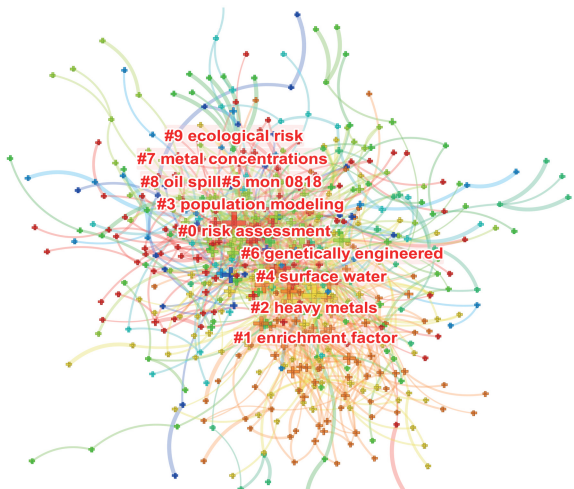


图 8 国外文献关键词构建的知识网络聚类

Fig.8 Knowledge graph of keywords clustering of papers abroad

4 研究热点与进展

4.1 热点词突现分析

4.1.1 国内文献的热点词突现分析

构建国内文献热点词突现的可视化图谱,本文选取前 15 个突现关键词(图 9)。从突现强度来看,各关键词差别相对较小,整体强度较低且较平均化,近年的突现热点相对较少,突现词出现时间大多集中在 2010—2014 年间。突现强度最大的热点词包括“评价”(9.1)、“沉积物”(8.61)和“重金属污染”(5.89)。其中,“重金属污染”等热点关键词 2018 年才首次出现,并延续到 2020 年。结合突现词中出现的“太湖”“水生生物”“淡水生物”等关键词,表明水环境污染是当前生态风险评价研究关注较高的热门领域。从突现词的时间跨度来看,时间跨度超过五年的是“评价”、“ddt”、“生态系统”和“水生生物”,这说明有机化合物污染及水生生物研究受到国内学术界的持续关注。

4.1.2 国外文献的热点词突现分析

构建国外文献热点词突现的可视化图谱,图 10 涵盖了前 15 个突现关键词。从突现强度和时间来看,国外文献生态风险评价突现词的整体突现强度大,且强度差异较大,强度最高的为“表层沉积物(surface sediment)”(10.64),其次是“空间分布(spatial distribution)”(10.24);强度最低的为“急性毒性(acute toxicity)”(5.11)。突现词首次出现的时间在 2005—2018 年,时间分布较均衡。突现时间持续到 2020 年的有五个,分别为 2016 年首次出现的“富集因子(enrichment factor)”,2017 年首次出现的“表层沉积物(surface sediment)”和“空间分布(spatial distribution)”,2018 年首次出现的“微量元素(trace element)”和“海洋沉积物(marine sediment)”,这表明水环境尤其是海洋环境的风险源研究及空间分布是当下国外研究的重点和热点。从突现词出现的时间跨度来看,国外的突现词大多比国内的时间跨度更长,跨度五年以上的是“生长(growth)”“急性毒性(acute toxicity)”“铜(copper)”“物种敏感度分布(species sensitivity distribution)”“富集因子(enrichment factor)”,这些突现词分属毒理学、生态学、生物学,表明相关研究多为环境化学、环境生物学的交叉学科,学科间合作较为频繁。

关键词	突现强度	起始年	骤减年	2005—2020年
评价	9.1	2008	2015	
ddt	4.58	2009	2013	
土地利用	4.79	2010	2013	
太湖	4.09	2010	2013	
沉积物	8.61	2011	2013	
生态系统	4.26	2011	2015	
分布特征	4.22	2011	2014	
水生生物	3.88	2012	2016	
残余物	3.61	2013	2014	
多氯联苯	3.54	2013	2014	
淡水生物	4.26	2014	2015	
风险管理	3.84	2014	2016	
金属	5.1	2015	2016	
华南	3.96	2016	2018	
重金属污染	5.89	2018	2020	

图 9 国内文献生态风险评价突现词图

Fig. 9 Top 15 keywords with the strongest citation bursts of papers in China

关键词	突现强度	起始年	骤减年	2005—2020年
growth	6.72	2005	2014	
acute toxicity	5.11	2005	2010	
copper	5.74	2006	2010	
species sensitivity distribution	7.1	2008	2013	
metal	4.51	2008	2010	
uncertainty	4.94	2009	2012	
chronic toxicity	5.64	2011	2014	
population modeling	4.73	2011	2014	
sensitivity	7.17	2013	2016	
china	6.95	2015	2018	
enrichment factor	5.65	2016	2020	
surface sediment	10.64	2017	2020	
spatial distribution	10.24	2017	2020	
trace element	6.84	2018	2020	
marine sediment	5.76	2018	2020	

图 10 国外文献生态风险评价突现词图

Fig. 10 Top 15 keywords with the strongest citation bursts of papers abroad

4.2 时间分区与演化路径分析

4.2.1 国内研究热点及演化路径

2005—2009 年国内的研究是以农业相关的环境问题研究为主,多数研究集中在重金属及农药的污染评价上,多借鉴美国环保局发布的各类质量准则,或与潜在风险指数等评价方法相结合^[15]进行生态风险评价。

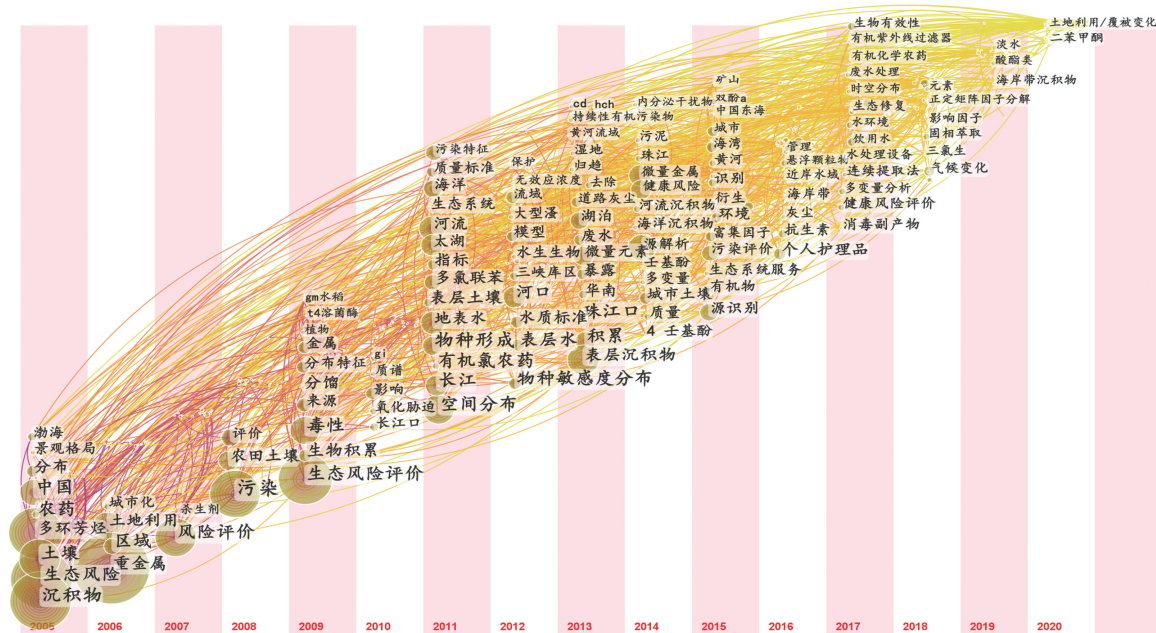


图 11 国内生态风险评价研究时空分区图谱

Fig.11 The evolution of hotspot knowledge of ecological risk assessment research of domestic research

(1) 农业生态风险评价研究。通过计算土壤、水域中的有机氯农药如 ddt^[16]、hch^[17] 等浓度水平,从而评估农药对水环境^[18]、农田土壤^[19]、农作物的危害。

(2) 重金属及多环芳烃生态风险评价研究。重金属生态风险评价主要集中在土壤及水域的污染评价上。水环境中的重金属生态风险评价对表层沉积物尤为关注^[20-21];另外,水域中的多环芳烃(PAHs)生态风险评价研究^[22]也是研究关注的重点。

2010—2015 年,国内对于特定水域的研究越加深入,集中在长江、太湖、三峡库区、黄河、珠江等地。研究区域从土壤、淡水流域更多向城市区域、海洋转移,从生态风险评价本身向生态风险形成机制原理的探究、生态修复等方面拓展;评价方法的应用趋向多指数对比研究,大量运用多种类型的指数进行综合性科学评价。

(1) 质量标准研究。这一阶段开始注重生态风险评价准则、指标体系的研究,将研究结果与美国环保局的质量基准、中国国家环境标准数值进行比较分析^[23],致力于我国水环境、土壤环境等质量标准的规范建立^[24]。

(2) 生态风险源分析。对源解析和评价方法的研究更为深入,模型与方法的交叉应用显著,多以主成分分析、相关分析、趋势分析等方法^[25]的综合应用进行源解析,以模拟预测^[26]、潜在危害指数^[27]、生态风险指数^[28]等方法得出生态风险评价指数,更直观清晰地检验评价指标的科学性,为资源分配和管理提供借鉴^[29]。

(3) 地理学方法的应用。在地理学技术遥感(RS)和地理信息技术(GIS)的支持下^[30],分析风险源和风险受体的空间分布^[31],以便更科学准确地提出政策建议。

2016—2020 年,国内研究的成果增加,应用性和学科融合性进一步加强,研究热点从重金属进一步向有机污染物及新兴污染物转变,更为关注人体健康与生态风险的关系,突显以人为本、人与自然和谐共生的原则理念。

(1) 新兴污染物研究。个人护理品^[32]、抗生素^[33]、杀菌剂^[34]等新兴污染物及有机污染物的降解途径^[35]进一步受到重视,并关注空气污染^[36]带来的人体健康影响^[37],以生态修复、生态系统服务等绿色方式进行生态风险的管理^[38]。

(2) 气候变化影响研究。结合土地利用/覆盖变化(LUCC)^[39],探究气候变化引发的对植被、动物的生态

风险,尤其是对高原地区^[40]、沿海湿地^[41]等生态脆弱区的影响。

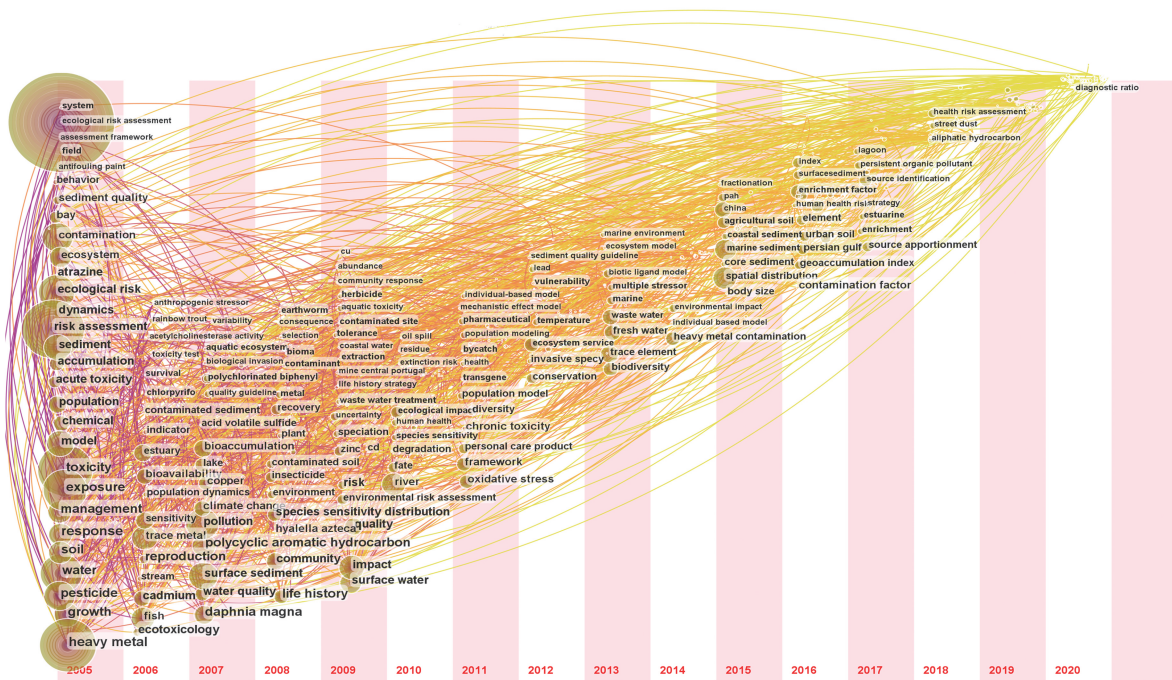


图 12 国外生态风险评价时空分区图谱

Fig.12 The evolution of hotspot knowledge of ecological risk assessment research of foreign research

4.2.2 国外研究热点及演化路径

从上图可看出,国外生态风险评价研究可以分为三个阶段,第一个阶段为 2005—2009 年,第二个阶段为 2010—2015 年,第三个阶段为 2016—2020 年。

第一阶段为 2005—2009 年,这个阶段国外出现的重点关键词最多,表明这一时期是国外生态风险评价研究的基础研究时期,奠定了往后研究的主线。这一阶段呈现出生物学、化学与环境学相融合的趋势,聚焦生态毒理学,以农业和工业污染影响为核心展开研究。

(1) 生态毒理学研究。以物种敏感性分布^[42]、阈值检验^[43]、生物标记^[44]等方法,在淡水、土壤环境中,测试或监测农药、重金属等压力源对于哺乳动物^[45]、无脊椎动物^[46]、植物^[47]等的有害影响,重点在水生生物的研究,主要目的是保护水生生态系统^[48]。

(2) 环境质量管理。结合生态风险评价研究,提出管理策略,为流域管理^[49]、沉积物管理^[50]、渔业管理^[51]等提供建议和指导,以达到环境质量目标。

第二阶段为 2010—2015 年,生态毒理学特征相对弱化,重金属污染评价研究受到进一步的重视,海洋区域成为重要的研究区,以药品污染为主的有机污染物对生物的危害成为这一时期的热点研究主题;除农业污染以外,工业污染日益成为了生态风险评价溯源的重点。

(1) 新兴有机污染物。个人护理品即生活用品所含的杀菌剂成为重点的研究对象^{[52][53]},也成为新兴有机污染物生态风险评价研究^[54]的重要组成部分。对于陆生生物的关注增多,从宏观视角上对生物多样性^[55]加以重视。

(2) 海洋生态风险评价研究。2008 年欧盟发布《海洋战略框架指令》,目标是到 2020 年实现欧洲区域海洋的良好环境状况(GES)^[56],因而研究区域从农田土壤和淡水流域更多转向海洋,评价多环芳烃等有机污染物^[57]及重金属^[58]对海洋生态环境及渔业^[59]的影响。

第三阶段为 2016—2020 年,聚焦重金属和多样化的新兴污染源,风险源的分析、污染环境的修复愈加受

到学者的广泛关注。将生态系统服务纳入生态风险评价中,并应用于生态管理也是这一阶段乃至未来的研究方向^[60]。

(1) 生态风险源分析。这一阶段国外学者多关注源自于现代化生产的有机污染物,如来自于纳米和微塑料^[61]、紫外线滤光片^[62]等的有机污染物的影响,注重污染物的时空分布和来源分析。

(2) 城市生态风险评价。城市成为重要的研究区域,包括城市道路扬尘污染风险评价^[63]、城市河流与土壤的污染风险评价^[64],分析城市环境的污染对人体健康与生物造成的有害影响,致力于城市及人类生活更好的发展。

(3) 污染处理法研究。注重指导实践的应用性,以连续提取法^[65]等方法来分析污染元素,以生物降解^[66]、吸附法^[67]等方式来进行废水处理、指导生态恢复工作。

5 结论与启示

5.1 结论

本文借助 CiteSpace V 软件,从宏观层面对国内外生态风险评价的相关文献进行分析,探讨该领域的知识演变、发展脉络以及近期研究热点,并对国内外前沿研究的热点及路径进行梳理。

(1) 从发文量来看,1990—2020 年生态风险评价相关文献数量不断增加,国内外文献均呈现指数型增加态势,且国内文献数量增加速度更快,并在 2011 年超过国外文献量。

(2) 从作者及机构发文来看,在生态风险评价研究领域中,以高校和研究机构为主体,国内外文献均已基本形成了广泛合作研究的态势;国内研究成果多出自于中国科学院,集中度高、分散性小,而国外研究主体相对更多样化、分散化。

(3) 关键词聚类分析可得,国内文献关键词聚类前 10 个包括生态风险、水质标准、多环芳烃、重金属、沉积物、富集因子、空间分布、抗生素、生态系统服务、珠江口;国外 10 个聚类为风险评价、富集因子、重金属、种群建模、表层水、mon0818、基因工程、重金属浓度、溢油、生态风险。总体而言,国内外生态风险评价的研究关注点重合度较高,长期密切关注重金属、有机化合物、水环境的污染影响。

(4) 热点词突现分析表明,国内文献的突现词整体突现强度较低且平均化,重金属污染是当下研究的前沿热点;而国外文献的突现词突现强度更大,富集因子、表层沉积物、空间分布、海洋环境的研究是当下的先进热点。相较之下,国外的研究范围更广,热点更分散化。

(5) 国内外研究热点的演化过程分析可得,在 2010 年前国内研究多滞后于国外,但 2010 年后同步性高。国内研究起步较晚但发展迅速,研究热点从借鉴国外研究框架、污染元素检测研究向自主构建综合性评价框架、多元化研究转变;国外研究随时间发展逐渐弱化毒理学研究和农药污染研究,热点向重金属污染、新兴有机化合物研究转变。国内外的研究区域均从水环境为主向水土环境与城市环境并重转变、从生态风险评价本身逐渐转向风险产生机制和解决办法的研究上。但相较之下,国内研究更注重风险源、质量标准研究,国外研究与生物学联系更为紧密,对新兴污染物及生物入侵、气候变化、转基因等国际性话题更为重视。

5.2 研究启示

通过国内外文献的对比分析,我国的生态风险评价研究还需进一步深入探讨的方面包括:

(1) 在兼顾国内生态环境的同时也应当充分重视国际环境,对于基因工程、碳排放、生物入侵等全球环境问题予以关注和思考。

(2) 保持与国外研究的同步态势,并进一步深化富集因子、表层沉积物、空间分布、海洋环境研究,凸显国际领先的位置,进行理论与方法的创新,完善生态风险评价指标体系,开发相应的分析软件,使生态风险评价系统化、规范化,区域评估高效化。

(3) 强化生态风险评价的应用属性,检验、更新各类质量标准,进一步加强生态修复的应用功能,将生态风险评价研究与管理实践密切结合,着眼于国土空间规划、城市发展、生态系统服务等,使其成为经济社会发

展过程中检验、预测健康发展水平、绿色发展潜力的指导性工具。

参考文献(References):

- [1] 杜锁军. 国内外环境风险评价研究进展. 环境科学与管理, 2006, 31(5): 193-194.
- [2] Lipton J, Galbraith H, Burger J, Wartenberg D. A paradigm for ecological risk assessment. Environmental Management, 1993, 17(1): 1-5.
- [3] Susan M. Cormier, Glenn W. Suter. A Framework for Fully Integrating Environmental Assessment. 2008, 42(4): 543-556.
- [4] Norton S B, Rodier D J, Van Der Schalie W H, Wood W P, Slimak M W, Gentile J H. A framework for ecological risk assessment at the EPA. Environmental Toxicology and Chemistry, 1992, 11(12): 1663-1672.
- [5] Barnhouse L W, Suter II G W. Use manual for ecological risk assessment. Washington D.C.:ORNL,1988: 6251.
- [6] 毛小苓, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评. 北京大学学报: 自然科版, 2005, 41(4): 646-654.
- [7] Shiffrin R M, Börner K. Mapping knowledge domains. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2004, 101(S1): 5183-5185.
- [8] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [9] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Framework for Ecological Risk Assessment. Washington: USEPA, 1992.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Guidelines for Ecological Risk Assessment. Washington: USEPA, 1998.
- [11] 谢春庆. 环境风险评价简介. 四川环境, 1994, 13(4): 65-69.
- [12] Graham R L, Hunsaker C T, O'Neill R V, Jackson B L. Ecological risk assessment at the regional scale; ecological archives A005-001. Ecological Applications, 1991, 1(2): 196-206.
- [13] EPA. EPA EcoBox (A Toolbox for Ecological Risk Assessors). (2022-03-08). <https://www.epa.gov/ecobox>.
- [14] 张尹莉, 胡显根. 基于 Citespace 的大城市社会治理知识图谱分析. 教育教学论坛, 2019, (14): 25-26.
- [15] Liu J L, Li Y L, Zhang B, Cao J L, Cao Z G, Domagalski J. Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan River source water. Ecotoxicology, 2009, 18(6): 748-758.
- [16] Wang B, Yu G, Huang J, Wang T, Hu H Y. Probabilistic ecological risk assessment of OCPs, PCBs, and DLCs in the Haihe River, China. TheScientificWorldJournal, 2010, 10: 1307-1317.
- [17] 阳文锐, 王如松, 李锋. 废弃工业场地有机氯农药分布及生态风险评价. 生态学报, 2008, 28(11): 5454-5460.
- [18] Li P, Dsikowitzky L, Diao X P, Yang F, Li Q X, Schwarzbauer J. Unusual tin organics, DDX and PAHs as specific pollutants from dockyard work in an industrialized port area in China. Chemosphere, 2020, 243: 125284.
- [19] 丛源, 郑萍, 陈岳龙, 侯青叶. 北京农田生态系统土壤重金属元素的生态风险评价. 地质通报, 2008, 27(5): 681-688.
- [20] 胡雄星, 韩中豪, 张进, 夏凡, 王文华. 黄浦江表层沉积物中重金属污染的潜在生态风险评价. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 109-112.
- [21] 罗先香, 张蕊, 杨建强, 刘汝海, 唐伟, 闫琴. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价. 生态环境学报, 2010, 19(2): 262-269.
- [22] 欧冬妮, 刘敏, 许世远, 程书波, 侯立军, 王丽丽. 长江口滨岸水和沉积物中多环芳烃分布特征与生态风险评价. 环境科学, 2009, 30(10): 3043-3049.
- [23] Wu F C, Feng C L, Zhang R Q, Li Y S, Du D Y. Derivation of water quality criteria for representative water-body pollutants in China. Science China Earth Sciences, 2012, 55(6): 900-906.
- [24] Guo L, Li Z Y, Gao P, Hu H, Gibson M. Ecological risk assessment of bisphenol A in surface waters of China based on both traditional and reproductive endpoints. Chemosphere, 2015, 139: 133-137.
- [25] Zhai Y B, Liu X T, Chen H M, Xu B B, Zhu L, Li C T, Zeng G M. Source identification and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} from Changsha. Science of the Total Environment, 2014, 493: 109-115.
- [26] Liu Y B, Dai L, Xiong H H. Simulation of urban expansion patterns by integrating auto-logistic regression, Markov chain and cellular automata models. Journal of Environmental Planning and Management, 2015, 58(6): 1113-1136.
- [27] 张春鹏, 李富祥. 鸭绿江口湿地滩涂表层沉积物重金属空间分布特征及生态风险评价. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2884-2890.
- [28] Briki M, Ji H B, Li C, Ding H J, Gao Y. Characterization, distribution, and risk assessment of heavy metals in agricultural soil and products around mining and smelting areas of Hezhang, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(12): 767.
- [29] Chen Y Z, Lu H W, Li J, Ren L X, He L. A leader-follower-interactive method for regional water resources management with considering multiple water demands and eco-environmental constraints. Journal of Hydrology, 2017, 548: 121-134.
- [30] Lu F, Chen Z, Liu W Q. A Gis-based system for assessing marine water quality around offshore platforms. Ocean & Coastal Management, 2014, 102: 294-306.

- [31] Su L Y, Liu J L, Christensen P. Spatial distribution and ecological risk assessment of metals in sediments of Baiyangdian wetland ecosystem. *Ecotoxicology*, 2011, 20(5): 1107-1116.
- [32] Peng F J, Pan C G, Zhang M, Zhang N S, Windfeld R, Salvito D, Selck H, Van Den brink P J, Ying G G. Occurrence and ecological risk assessment of emerging organic chemicals in urban rivers: Guangzhou as a case study in China. *Science of the Total Environment*, 2017, 589: 46-55.
- [33] Li S, Kuang Y Z, Hu J R, You M T, Guo X Y, Gao Q, Yang X, Chen Q, Sun W L, Ni J R. Enrichment of antibiotics in an inland lake water. *Environmental Research*, 2020, 190: 110029.
- [34] Li J T, Wang Y H, Li W, Xu P, Guo B Y, Li J Z, Wang H L. Tissue distribution and metabolism of triadimefon and triadimenol enantiomers in Chinese lizards (*Eremias argus*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 142: 284-292.
- [35] Xu Y C, Liu T T, Zhu X F, Ji G D. Quantitative analysis of genetic associations in the biodegradative pathway of PAHs in wetland sediments of the Bohai coast region. *Chemosphere*, 2019, 218: 282-291.
- [36] Ma Y K, Gong M L, Zhao H T, Li X Y. Contribution of road dust from Low Impact Development (LID) construction sites to atmospheric pollution from heavy metals. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134243.
- [37] Li N, Ho W, Wu R S S, Tsang E P K, Ying G G, Deng W J. Ultra violet filters in the urine of preschool children and drinking water. *Environment International*, 2019, 133: 105246.
- [38] Li H, Zhang X, Zhang Y, Yang X H, Zhang K B. Risk assessment of forest landscape degradation using Bayesian network modeling in the Miyun Reservoir catchment (China) with emphasis on the Beijing-Tianjin sandstorm source control program. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 3876-3885.
- [39] Ma X F, Zhu J T, Zhang H B, Yan W, Zhao C Y. Trade-offs and synergies in ecosystem service values of inland lake wetlands in Central Asia under land use/cover change: a case study on Ebinur Lake, China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01253.
- [40] Yue D X, Zeng J J, Yang C, Zou M L, Li K, Chen G G, Guo J J, Xu X F, Meng X M. Ecological risk assessment of the Gannan Plateau, northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(6): 1254-1267.
- [41] Liu Y C, Liu Y X, Li J L, Lu W Y, Wei X L, Sun C. Evolution of landscape ecological risk at the optimal scale: a case study of the open coastal wetlands in Jiangsu, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1691.
- [42] Maltby L, Blake N, Brock T C M, Van Den brink P J. Insecticide species sensitivity distributions: importance of test species selection and relevance to aquatic ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, 24(2): 379-388.
- [43] Chèvre N, Loepfe C, Singer H, Stamm C, Fenner K, Escher B I. Including mixtures in the determination of water quality criteria for herbicides in surface water. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(2): 426-435.
- [44] Anderson S L, Cherr G N, Morgan S G, Vines C A, Higashi R M, Bennett W A, Rose W L, Brooks A J, Nisbet R M. Integrating contaminant responses in indicator saltmarsh species. *Marine Environmental Research*, 2006, 62 Suppl 1: S317-S321.
- [45] Suedel B C, Nicholson A, Day C H, Spicer J. The value of metals bioavailability and speciation information for ecological risk assessment in arid soils. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2006, 2(4): 355-364.
- [46] George T K, Liber K. Laboratory investigation of the toxicity and interaction of pesticide mixtures in *Daphnia magna*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 52(1): 64-72.
- [47] Sánchez P, Kubitz J, Dohmen G P, Tarazona J V. Aquatic risk assessment of the new rice herbicide profoxydim. *Environmental Pollution*, 2006, 142(1): 181-189.
- [48] Liess M, Schäfer R B, Schriever C A. The footprint of pesticide stress in communities-Species traits reveal community effects of toxicants. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(3): 484-490.
- [49] Serveiss V B, Ohlson D W. Using ecological risk assessment principles in a source water protection assessment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2007, 13(2): 402-417.
- [50] Apitz S E, Barbanti A, Bocci M, Carlin A, Montobbio L, Bernstein A G. The sediments of the Venice lagoon (Italy) evaluated in a screening risk assessment approach: part I-application of international sediment quality guidelines. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2007, 3(3): 393-414.
- [51] Astles K L, Gibbs P J, Steffe A S, Green M. A qualitative risk-based assessment of impacts on marine habitats and harvested species for a data deficient wild capture fishery. *Biological Conservation*, 2009, 142(11): 2759-2773.
- [52] Amorim M J B, Oliveira E, Soares A M V M, Scott-Fordsmand J J. Predicted No Effect Concentration (PNEC) for triclosan to terrestrial species (invertebrates and plants). *Environment International*, 2010, 36(4): 338-343.
- [53] Lozano N, Rice C P, Ramirez M, Torrents A. Fate of triclosan in agricultural soils after biosolid applications. *Chemosphere*, 2010, 78(6): 760-766.

- [54] Claessens M, Vanhaecke L, Wille K, Janssen C R. Emerging contaminants in Belgian marine waters: single toxicant and mixture risks of pharmaceuticals. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 71(1/2): 41-50.
- [55] Viaene K P J, De Laender F, Van den Brink P J, Janssen C R. Using additive modelling to quantify the effect of chemicals on phytoplankton diversity and biomass. *Science of the Total Environment*, 2013, 449: 71-80.
- [56] European Commission. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the council of 17 June 2008, establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union*, 2008, L164: 19-40.
- [57] Lufs L G, Guilhermino L. Short-term toxic effects of naphthalene and pyrene on the common prawn (*Palaemon serratus*) assessed by a multi-parameter laboratorial approach: mechanisms of toxicity and impairment of individual fitness. *Biomarkers*, 2012, 17(3): 275-285.
- [58] Mashiattullah A, Chaudhary M Z, Ahmad N, Javed T, Ghaffar A. Metal pollution and ecological risk assessment in marine sediments of Karachi Coast, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(2): 1555-1565.
- [59] Fock H O, Kloppmann M, Stelzenmüller V. Linking marine fisheries to environmental objectives: a case study on seafloor integrity under European maritime policies. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(3): 289-300.
- [60] U.S. Environmental Protection Agency. Generic Ecological Assessment Endpoints (GEAEs) for Ecological Risk Assessment; Second Edition with Generic Ecosystem Services Endpoints Added. Washington: USEPA, 2016.
- [61] Everaert G, Van Cauwenberghe L, De Rijcke L, Koelmans A A, Mees J, Vandegehuchte M, Janssen C R. Risk assessment of microplastics in the ocean: modelling approach and first conclusions. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 1930-1938.
- [62] Tsui M M P, Lam J C W, Ng T Y, Ang P O, Murphy M B, Lam P K S. Occurrence, distribution, and fate of organic UV filters in coral communities. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(8): 4182-4190.
- [63] Trujillo-González J M, Torres-Mora M A, Keesstra S, Brevik E C, Jiménez-Ballesta R. Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 636-642.
- [64] Fernández Á H, Lacalle R G, del Burgo M J I V, Azkuenaga M M, Lozano J V. First results of Technosols constructed from municipal waste in Vitoria-Gasteiz (Spain). *Spanish Journal of Soil Science*, 2016, 6(1): 64-81.
- [65] Alves C M, Ferreira C M H, Soares H M V M. Relation between different metal pollution criteria in sediments and its contribution on assessing toxicity. *Chemosphere*, 2018, 208: 390-398.
- [66] Saran L M, Tarlé Pissarra T C, Silveira G A, Constancio M T L, de Melo W J, Alves L M C. Land use impact on potentially toxic metals concentration on surface water and resistant microorganisms in watersheds. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 166: 366-374.
- [67] Álvarez-Manzaneda I, Guerrero F, del Arco A I, Funes A, Cruz-Pizarro L, de Vicente I. Do magnetic phosphorus adsorbents used for lake restoration impact on zooplankton community?. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 598-607.