

DOI: 10.5846/stxb201712262323

祝薇, 向雪琴, 侯丽朋, 王保盛, 唐立娜. 基于 Citespace 软件的生态风险知识图谱分析. 生态学报, 2018, 38(12): - .

Zhu W, Xiang X Q, Hou L P, Wang B S, Tang L N. Knowledge mapping analysis of ecological risk research based on Citespace. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

基于 Citespace 软件的生态风险知识图谱分析

祝 薇^{1,2}, 向雪琴^{1,2}, 侯丽朋^{1,2}, 王保盛^{1,2}, 唐立娜^{1,*}

1 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 伴随着重大环境事件频发, 环境污染、生态破坏现象的日益严峻, 生态风险研究受到各国学者和政府的广泛关注。对整个生态风险研究领域全面系统的分析, 旨在探究研究热点及趋势, 归纳研究主题, 了解当前国际研究现状。以 Web of Science 数据库为数据源, 利用 Citespace 软件, 绘制生态风险研究知识图谱, 进行文献可视化分析。研究发现: (1) 国际生态风险研究的发文数量经历了缓慢增长-平稳增长-迅速增长 3 个阶段; (2) 生态风险研究分为奠基期, 成长期, 拓展期 3 个阶段, 各阶段研究热点不同, 当前研究热点是“空间分布、生态系统服务、城市土壤、源解析、海洋沉积物”; (3) 生态风险研究由单一风险源、风险受体、小尺度的评价演化为多种风险源、多种风险受体的大尺度综合评价; (4) 欧美国家、学者奠定了该领域的研究基础, 中国起步较晚但发展迅速。

关键词: 生态风险; Citespace; 生态风险评价; 文献计量分析

Knowledge mapping analysis of ecological risk research based on Citespace

ZHU Wei^{1,2}, XIANG Xueqin^{1,2}, HOU Lipeng^{1,2}, WANG Baosheng^{1,2}, TANG Lina^{1,*}

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: With the frequent occurrence of major environmental events, environmental pollution, and the ecological destruction, increasingly serious, ecological risk research has drawn extensive attention from scholars and governments in various countries. The need for environmental management and decision-making has promoted continual expansion of the field of ecological risk. Research topics, perspectives, and methods are becoming increasingly abundant. A comprehensive and systematic analysis of the whole field of ecological risk research is urgently needed. In this study, 2304 articles on ecological risk from the Web of Science core collection database were used as research objects, and Citespace software was used to draw a knowledge map of ecological risk research and make a visual analysis of the literature to understand the status of current international research, explore research hotspots and trends, and summarize the research topic evolution. The study found that: (1) The number of papers published in international ecological risk research has experienced three development stages: slow growth, steady growth, and rapid growth. (2) The study on ecological risk is divided into three stages: foundation, growth, and expansion, while the current research hotspots are "spatial distribution, ecosystem service, urban soil, source analysis, marine sediment." (3) The evaluation of ecological risk research has evolved from small-scale, single risk source and single risk receptor, to large-scale, multiple risk sources and multiple risk receptors. (4) The European and American countries and scholars laid the foundation for the research in this field. China started late but has developed rapidly. In the face of ecological risk research, multidisciplinary research papers with quantitative and qualitative

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0502902); 国家自然科学基金重点项目(71533003)

收稿日期: 2017-12-26; **修订日期:** 2018-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lntang@iue.ac.cn

visual summarization can make a more comprehensive and precise analysis of the research area. Combined with citation analysis, and the visualization software Citespace and bibliometrics, this study strives to show clearly the research hotspots and trends in the research field, the evolution of research topics, and the current situation of the research clearly. It will provide useful references and inspiration for future ecological risk research.

Key Words: ecological risk; Citespace; ecological risk assessment; bibliometric analysis

由于全球城市化的不断发展,生态环境日趋恶化、各种突发环境事件、生态问题层出不穷,生态风险的危害及其不确定性对人体健康和生态环境造成巨大威胁。20 世纪 80 年代后,产生了“风险管理”这一全新的环境政策,着重权衡风险级别与减少风险的成本^[1]。生态风险研究因能为风险管理提供有效的理论基础和科学依据而得到迅速发展,相关文献大量涌现。环境管理和决策的需要推动了生态风险研究领域不断扩展,研究主题、视角、方法日益丰富,很有必要对整个生态风险研究领域进行全面系统的分析。

目前,国内外对生态风险研究的综述多集中在生态风险评价部分,一种是理论和方法综述,如生态风险评价内涵及方法研究^[2,3]、生态风险评价研究进展^[4,5],生态风险评价的模型和评价指标体系^[6,7]等;一种是对城市^[8-10]、景观^[11]、流域^[12]、海岸带^[13]、矿区^[14]、农药^[15]、个人护理用品^[16]等具体专题部分的生态风险评价研究进展。这些综述各有侧重,对于具体研究方向上的深入挖掘发挥了重要作用。但要了解当前生态风险研究现状,前沿热点和主题演进,则需从宏观的研究领域范畴开展。

面对生态风险研究多学科交叉的海量研究文献,定量与定性相结合的可视化综述可以对研究领域进行更加全面、精准的分析。引文分析软件 Citespace 着眼于挖掘文献大数据中蕴含的潜在知识,能对一定时期内某一学科或研究领域的全部文献进行可视化分析^[17]。国内学者已将其应用于西方经济地理学^[18]、海绵城市^[19]、心理测量学^[20]、生态补偿^[21]、生态安全^[22]等多个研究领域的分析。本文运用 Citespace 软件,对 1980—2017 年间 Web of Science 核心合集数据库中收录的生态风险相关文献进行全面梳理,旨在清晰、直观地展示该研究领域的热点趋势、主题演进、研究概况,为未来的生态风险研究提供有益的参考及启示。

1 数据来源与研究方法

本文所使用的数据来源于 Web of Science 核心合集,数据采集时间为 2017 年 11 月 25 日,检索条件是:标题为 ecological risk 或 ecological risks,时间段为“1980—2017”年,共检索得 2304 篇文献。

利用 Citespace 软件,对生态风险研究的热点趋势,主题演进,主要研究力量等进行文献可视化分析。Citespace 是在科学计量学、数据可视化背景下逐渐发展起来的一款引文可视化分析软件,能够直观的展示每个节点在知识网络中的位置与大小,通过不同的功能选择,分析相关领域研究文献的来源地区、研究学者、研究热点及其演变情况^[23]。

2 结果及分析

2.1 发文数量时间分布

发文数量的时间变化可以反映该研究领域的发展速度。国际生态风险研究的发文数量经历了缓慢增长-平稳增长-迅速增长 3 个阶段,生态风险研究不断受到国内外学者们的重视(图 1)。20 世纪 90 年代以前,国际上主要关注环境风险评价,从 20 世纪 80 年代起,逐渐将研究热点转向生态风险评价。Web of Science 核心合集中,在 1980—1990 年间发文数量均在 10 篇以下,处于提出问题,形成基本概念的阶段。此后 20 年文献数量平稳增长,理论奠基基本完成,大量实证研究发表。到 2010 年后,突破 100 篇,2016 年达到最高点 206 篇,这期间来源于中国的文献明显增多,与中国在 2011 年出台的《国家环境保护“十二五”规划》中强调“加强环境风险防控”的背景相吻合。

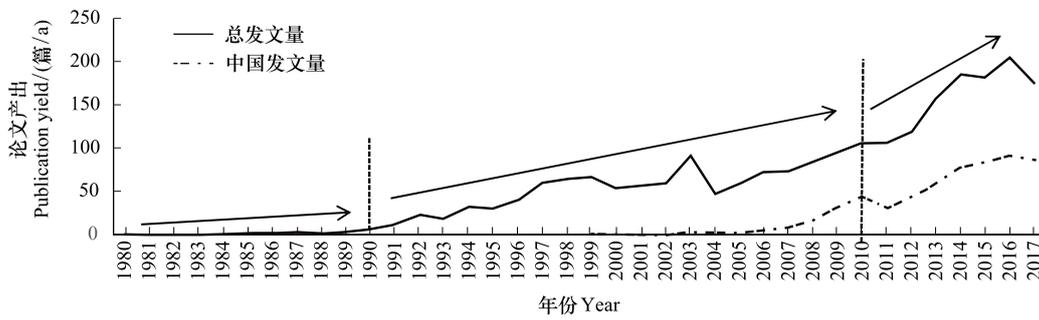


图 1 生态风险研究的发文数量(1980—2017)

Fig.1 The number of published papers on ecological risk research from 1980—2017

2.2 研究热点及趋势

Citespace 的时区演化图能直观反映不同时间阶段某一领域的研究前沿及其衍生关系,进而对未来的发展方向作出合理的预测^[19]。关键词是对文献内容和主题的浓缩与概括,对整个领域的高频关键词进行分析,可探究该领域的研究热点与前沿。具有突现性的关键词,是在某个时间段内频次变化率高的词,可以反映研究趋势。绘制生态风险研究关键词时区演化图(图 2),据属性表整理出各时期具有突现性和高频的关键词信息表(表 1)。

20 世纪 80 年代,生态风险研究处于人体健康评价阶段,针对极小尺度的评价对象^[11],这段时间没有出现具有突现性和高频的关键词,相关的理论方法尚未达成共识,标准化。

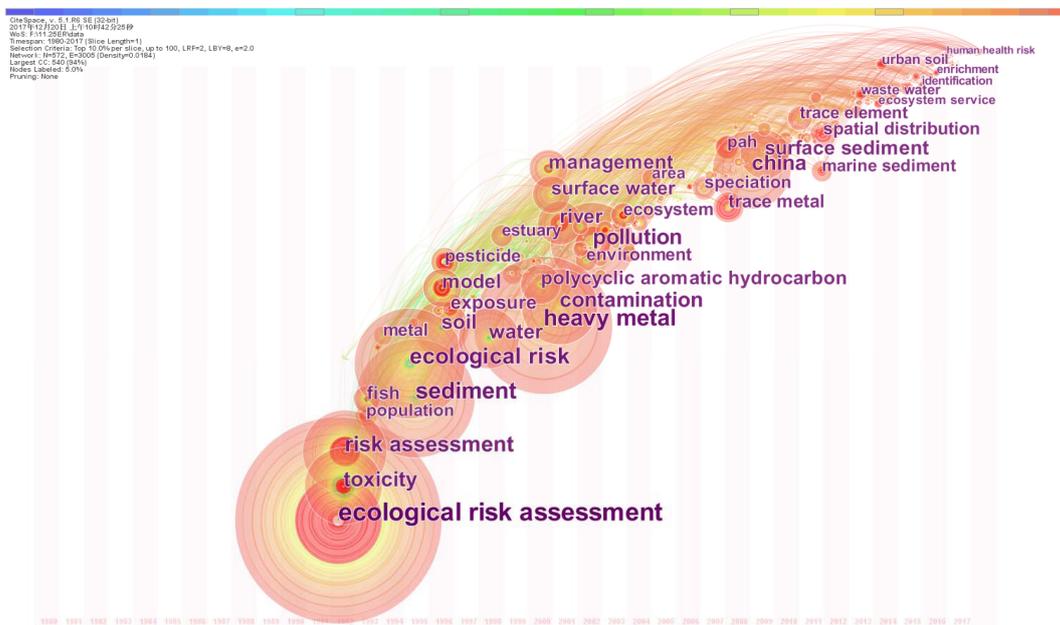


图 2 热点关键词时区演化图

Fig.2 The time-zone view of hot keywords

节点大小和频次成正比;图谱颜色从蓝到橙代表时间的推进,节点年轮圈上的颜色对应时间色谱。大红色圈层表示节点具有突现性,即在相应时间段内频次变化率高,一定程度上代表研究方向的转变。Citespace 设置:Node Types: Keyword; Selection Criteria: Top10%; 其余采用默认设置

20 世纪 90 年代关注生态风险评价的基本概念、理论方法,是该领域的奠基时期。1992 年,USEPA 将生态风险评价定义为“评价因暴露于一个或多个胁迫性刺激而发生不利生态效应的风险”,并提出了生态风险评价框架,被普遍接受。“生态风险评价”在 1992 年成为关注焦点,突现性和频次均最大(图 2,表 1),是生态

风险研究领域最关键且经久不衰的研究热点。“暴露”“响应”过程是重要的生态风险评价要素,早期的生态风险评价程序中通常需要对其进行描述和评价;生态风险评价源于“风险管理”这一环境政策,风险管理是根据风险评价的结果,采取适当的管理措施来降低或消除风险,以保护人体健康与生态系统的安全^[24];在对风险进行定义时多会涉及“不确定性”,为使评价结果更为可靠,“不确定性”分析需贯穿整个评价阶段;风险评价的定量化需要构建相关“模型”,如概率风险评价模型,相对风险评价模型等;以上热点关键词均侧重于对理论方法的完善。其余关键词为:毒性、生态毒理学、化学、人口、鱼、重金属、杀虫剂、水、土壤、沉积物,可以看出,这段时间的研究多从生态毒理学角度,分析环境中污染物,特别是化学污染物的毒性,探索对人体健康损害的早期检测指标和生物标记物(如:鱼)^[25],评定人类健康的潜在危害。

表 1 高频和具有突现性的关键词信息表

Table 1 The information table of high frequency and burst keywords

年份 Year	关键词 Keywords		
	突现性 Burst	频次 Frequency	
1990—1999	生态风险评价(50.08)	生态风险评价(421)	重金属(285)
	毒性(10.85)	毒性(174)	沉积物(251)
	人口(10.2)	人口(54)	水(132)
	模型(13.89)	模型(95)	土壤(131)
	暴露(9.22)	暴露(79)	杀虫剂(64)
	生态毒理学(8.86)	生态毒理学(27)	
	化学(6.72)	鱼(65)	
	响应(5.51)	不确定性(31)	
	鱼(5.38)		
	风险管理(4.28)		
2000—2009	生物可利用性(8.76)	生物可利用性(51)	中国(162)
	污染(7.45)	污染(176)	表面沉积物(103)
	生态系统(5.82)	生态系统(62)	河流(93)
	管理(5.38)	管理(92)	地表水(83)
	ddt(5.34)	ddt(20)	形态(58)
	急性毒性(5.33)	痕量金属(68)	物种敏感度分布(40)
	痕量金属(4.04)	多环芳烃(86)	区域(44)
	水质(3.95)		气候变化(21)
	多环芳烃(3.9)		质量基准(47)
	污染的土壤(3.7)		累积(42)
2010—2017	空间分布(10.99)	空间分布(62)	环境(56)
	源解析(6.68)	源解析(31)	痕量金属(52)
	残留(6.42)	残留(24)	农业土壤(30)
	城市土壤(5.6)	城市土壤(26)	健康风险(22)
	识别(4.97)	识别(26)	个人护理产品(22)
	富集因子(4.97)	富集因子(16)	人类健康风险(10)
	海洋沉积物(4.96)	海洋沉积物(51)	
	废水(4.64)	废水(28)	
	脆弱性(3.94)	生态系统服务(19)	
	持续性有机污染物(3.71)		
生态系统服务(3.7)			

高频关键词为每年频次靠前的关键词,中间一列为高频词汇中具有突现性的关键词

进入 21 世纪,研究内容不断细化和深入,出现大量实证研究文献,进入生态风险研究的稳定成长期,发文数量逐年上升(图 1)。过去简单用污染物的总量来衡量污染程度,而实际上只有被生物吸收利用的部分才是衡量污染程度的有效部分,因而,在这个阶段“生物可利用性”成为频次急剧增长的热点(表 1)。在风险受体的选择上,从对人类健康、个体、种群的关注,扩大到对“生态系统”、“环境”、“区域”的风险研究。“污染”“管

理”依然是研究热点。在中国政府 2007 年提出建设生态文明的背景下,中国与生态风险相关的研究成果层出不穷,中国作为关键词出现高达 162 次。其余热点关键词较 90 年代更为细化,如风险源从重金属到痕量金属。

2010 年后,伴随着新的理论和技术突破,出现了新的研究热点,进入拓展期。空间分布、生态系统服务、城市土壤、源解析、海洋沉积物等关键词均在目前引起了广泛关注(图 2,表 1)。RS 和 GIS 等新技术和新方法加强了对生态风险“空间分布”的描述与现象的可视化表达,GIS 的空间关联和分析技术,与生态模型,改进算法相结合,为生态风险的定量化评价和行管模型的建立提供了更加快速、准确和经济可行的方法^[26]。现有研究将“生态系统服务”作为评价终点引入到生态风险评价中,从人类福祉角度结合生态系统过程进行风险表征可极大提高评价的时效性^[27]。随着城市化的发展,经济、社会、自然耦合的城市生态系统进入风险评价的研究视野,成为新的研究热点,因而“城市土壤”的出现频次快速增加。此外,“海洋沉积物”“废水”“农业土壤”也是同期的风险受体焦点。由对“脆弱性”的关注,可以看出该领域的研究不仅强调外来风险源的干扰,也开始重视风险受体自身结构等内在属性。值得一提的是,“人类健康风险”“健康风险”继 20 世纪 80 年代后,再一次成为研究热点,生态风险研究最终还是要致力于对人类健康的保护。

2.3 研究主题

进行文献共被引分析的前提假设是:同一篇论文的参考文献(即共被引参考文献)间会秉承同一研究脉络或有着类似研究主题,因此对原始数据的参考文献共被引网络进行聚类,可得到细分的研究主题。导入 2304 篇文献,共 65840 篇被引参考文献,对其进行聚类,从所引文献的标题中提取术语为聚类命名,并以时间线视图呈现(图 3)。由于聚类较多,图 3 仅显示聚类中文献数量大于 25 的主题。

Citespace 根据图谱的网络结构和聚类清晰度计算出模块值 Q 和平均轮廓值 S 两个指标,用来评判绘图效果。Modularity Q 值在 0.4—0.8 视为符合要求的图谱,本图谱中 Q 值达 0.9382,即网络结构十分显著。聚类内部相似程度的指标 Silhouette 为 0 到 1 之间的小数,数值越大,相似度越高。表 2 中的聚类 S 值均接近 1,即各聚类内部的研究主题明确;而图 3 的 Mean Silhouette 仅为 0.2531,表明生态风险研究的内容广泛,主题丰富,各聚类间的相似度较低。对研究主题进行分类,分为风险源,理论方法,风险受体 3 个主题集群。结合图 3、表 2 及文献阅读,对各主题集群的演化路径做一个梳理。

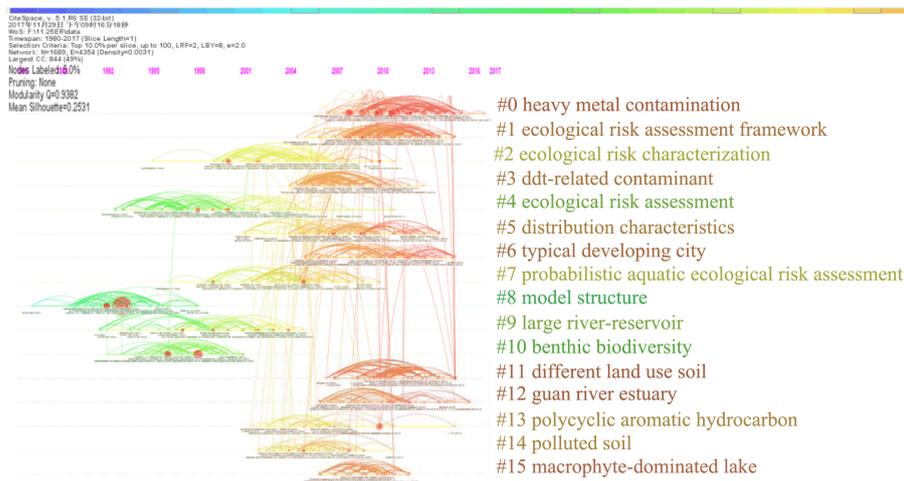


图 3 文献共被引聚类时间线图

Fig.3 The time-line view of co-cited literature cluster

聚类的颜色对应上方时间色谱;Citespace 设置: Node Types: Cited Reference; Selection Criteria: Top10%; links: Dice; 其他采用默认设置

表 2 文献共被引聚类信息表

Table 2 The time-line view of co-cited literature cluster

主题集群 Community	编号 Rank	聚类主题 Theme	聚类大小 Size	聚类轮廓值 Silhouette	重要文献 Important literature
风险源 Risk source	#0	重金属污染	102	0.894	Li RY (2015) ^[28]
	#3	ddt 相关污染物	57	0.998	Wang, Y (2013) ^[29]
	#13	多环芳烃	33	0.942	Feng, CL (2009) ^[30]
理论方法 Theory method	#1	生态风险评价框架	73	0.951	Van den Brink, PJ (2013) ^[31]
	#2	生态风险表征	59	0.873	Kaufman, CA (2007) ^[32]
	#4	生态风险评价	55	0.956	Gentile, JH (2000) ^[33]
	#7	概率水生生态风险评价	45	0.904	Rand, GM (2010) ^[34]
	#8	模型结构	44	0.945	Ferson, S (1996) ^[35]
	#5	分布特征	51	0.9	Guo, GH (2012) ^[36]
	#10	底栖生物多样性	37	0.957	Preston, BL (2002) ^[37]
风险受体 Risk receptor	#6	典型发展中城市	51	0.971	Xue, BM (2013) ^[38]
	#9	大型河流水库	41	0.981	Sample, BE (1999) ^[39]
	#11	不同土地利用土壤	34	0.993	Islam, MS (2015) ^[40]
	#12	灌河口	33	0.956	He, XR (2014) ^[41]
	#14	污染土壤	33	0.907	Wu, YG (2010) ^[42]
	#15	大型水生植物为主的湖泊	26	1	Zhang, LL (2014) ^[43]

风险源分为自然风险源和人为风险源。前者主要是台风、地震等突发型灾害,其风险评价侧重于估算风险源发生的概率、强度,评价危险性,划分风险等级;还有全球气候变化,水土流失等与人类活动密切相关的缓发型风险源。人为风险源包括化学污染物、重金属、城市化进程、国际旅游和贸易导致的外来物种与病原菌入侵等^[44]。对于人为污染物,早期研究多从生态毒理学角度分析其毒性对健康的影响。相比自然风险源,目前更关注人为活动引起的生态风险。重金属污染和持久性有机污染物是最受关注的风险源类型(表 2),因能在环境中长时间存在而具有更大的潜在生态风险。城市化进程等复合风险源的出现,表明生态风险评价不再局限于单一风险源,发展为多重风险源,多胁迫因子。

理论方法主要围绕生态风险评价展开。荷兰、美国、澳大利亚、新西兰、英国、加拿大等国家都曾致力于构建生态风险评价框架^[46]。最终 USEPA 在 1992 年提出的框架被普遍接受,从而推动了整个领域的发展。该框架将评价过程分为问题表述、分析、风险表征三步,风险表征是指将评价结果以一定的方式组织成表格、图片、报告等材料,供管理者制定相关环境政策。确定评价程序后,构建模型方法是量化评价的关键。目前已取得一系列成果,如在微观的污染物风险评价上主要有:潜在生态风险指数法、地累积指数法、内梅罗指数法等;宏观生态功能的风险评价方法主要有:相对风险评价模型、3MRA 模型、景观生态分析法等。早期对水生生态系统的研究最为丰富,较陆地生态系统成熟,图 3、表 2 中出现的概率水生生态风险评价、底栖生物多样性验证了这一点。生态风险评价的理论、框架、模型逐渐成熟,全面综合的评价不仅包括风险的概率、强度,还兼顾时空分布特征。

20 世纪 90 年代初,美国科学家 Joshua Lipton 等提出,环境风险的最终受体不仅限于人类,还包括生态系统要素。逐步在人体健康风险评价的基础上演进为以生态系统及其组分为风险受体的生态风险评价概念。风险受体的尺度不断扩大,已由个体、种群、群落、生态系统风险评价发展到区域生态风险评价的阶段,如从水生生物到湖泊、河流、河口、海岸带再到整个流域的风险评价,由单一风险受体发展到多种风险受体。除了以土壤、水体为环境介质的自然风险受体,城市生态风险也越来越受关注(图 3,表 2)。城市生态风险评价具有大尺度、综合性、社会自然经济耦合、人为干扰强等复杂特点,边界界定也与一般区域不同^[8]。随着城市化的发展,对可持续城市建设的需要,城市生态风险的原理和方法研究将成为焦点。

2.4 主要研究力量分析

2.4.1 主要研究国家(或地区)

美国在生态风险研究领域, 发文数量最多(720 篇), 中心度 0.56, 突现性 133.38, 三项指标均远超过其他国家, 表明美国奠定了该领域的研究基础, 在理论和研究创新上发挥过重要作用, 影响深远。中国起步较晚, 但发展迅速, 发文量居第二, 这得益于中国政府对生态文明建设的重视; 中心性 0.13, 可见中国在生态风险研究上发表的相关论文具有一定的影响力(图 4, 表 3)。发文量居前十的国家中, 美国(1992 年)、荷兰(1989 年)、德国(1995 年)、加拿大(1991 年)、英国(1995 年)等在 20 世纪 90 年代都先后提出了生态风险管理框架^[45], 在该领域起步较早。



图 4 国家合作网络图谱

Fig.4 The network map of national cooprtation

节点大小与发文量成正比; 外圈用紫色圆环标注表示该节点有较大中心度(不小于 0.1), 是图谱中的关键节点; 突现性表征节点对应的研究内容在短时间内频次变化率高, 相应的年轮圈层变为大红色。Citespace 设置: Node Types: Country; Selection Criteria: Top50; Pruning: Pathfinder; 其他均采用默认设置

表 3 发文量前十的国家

Table 3 Top 10 countries on the number of published papers

国家 Country	发文量/篇 Publications	中心度 Centrality	突现性 Burst	国家 Country	发文量/篇 Publications	中心度 Centrality	突现性 Burst
美国(USA)	720	0.56	133.38	日本(JAPAN)	65	0.03	4.01
中国(PEOPLES R CHINA)	596	0.13	19.83	德国(GERMANY)	62	0.12	
加拿大(CANADA)	185	0.13	15.56	意大利(ITALY)	52	0.11	8.54
英国(ENGLAND)	124	0.21		西班牙(SPAIN)	47	0.06	3.69
荷兰(NETHERLANDS)	84	0.07	4.82	发文量平均值 Mean number of publications	2.304		
澳大利亚(AUSTRALIA)	76	0.07		发文量方差 Variance of publications	100.407		

2.4.2 主要研究机构分析

在发文量 TOP10 的机构中, 中国机构占了 7 家, 中国科学院(Chinese Acad Sci) 135 篇, 北京师范大学(Beijing Normal Univ) 61 篇, 北京大学(Peking Univ) 31 篇, 中国科学院大学(Univ Chinese Acad Sci) 30 篇, 中国环境科学研究院(Chinese Res Inst Environm Sci) 30 篇, 南京大学(Nanjing Univ) 30 篇, 中国海洋大学(Ocean Univ China) 19 篇。美国环保局(US EPA) 92 篇位居第二, 美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge Natl Lab) 15 篇居第十位。荷兰瓦格宁根大学研究中心(Univ Wageningen & Res Ctr) 18 篇居第九位(图 5)。结合表 1, 中国在

该领域发文总量居世界第二,但研究力量主要集中在上述七个机构中。而美国在生态风险领域中,美国环保局占主导地位,其余研究力量较为分散。中心度在 0.1 以上的机构有五个,依然是来自于中美荷:中国科学院 0.38,荷兰瓦格宁根大学 0.14,北京师范大学 0.12,美国环保局 0.11,荷兰瓦格宁根大学研究中心 0.1。荷兰瓦格宁根大学的发文量虽然只有 6 篇,但具有较高的中心性,可见其所发表论文具有重要学术价值。

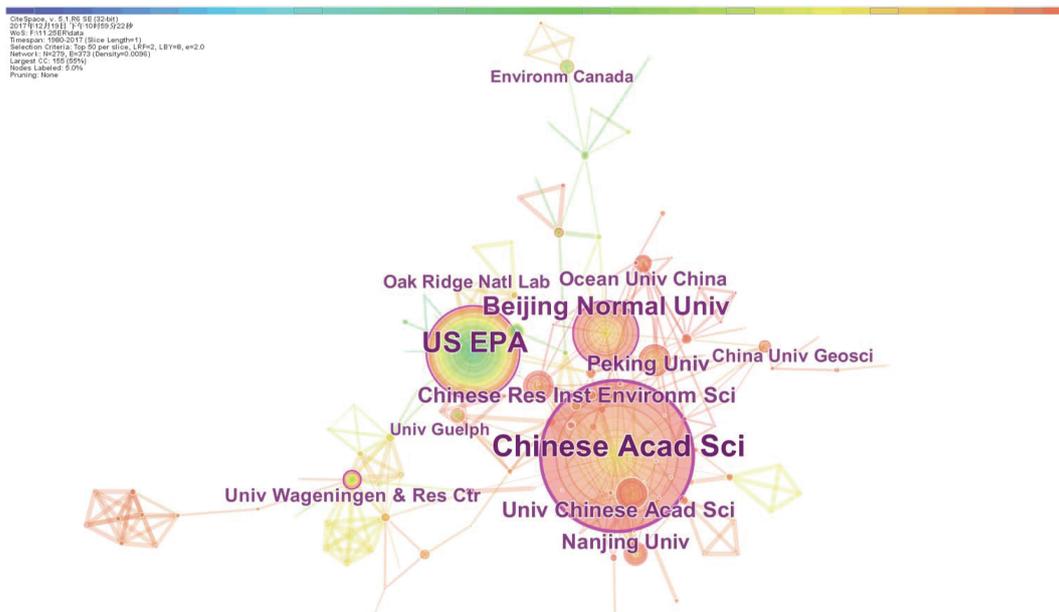


图 5 机构合作网络图谱

Fig.5 The network map of institutional cooperation

节点大小与发文量成正比;Citespace 设置:Node Types: Institution; Selection Criteria: Top50; 其他均采用默认设置

2.4.3 关键作者及其代表文献

在文献计量中,通常采用普赖斯定律确定的最低发文数作为核心作者候选人入选标准。发文数量能反映作者的科研产出能力,但忽视了发文质量,不能有效的反映其学术影响力。被引频次的高低可以更准确客观的表征作者的学术地位。关键作者发表的重要文献,通常是具有基础性,奠基性的经典文献,在领域内具有关键作用或转折意义。因此,本文绘制作者共被引网络知识图谱(图 6),综合共被引频次,突现性,半衰期这 3 个能反映作者在研究领域地位的指标,选取生态风险研究领域的关键作者(表 4),并简要阐述排名靠前的关键作者代表文献。

表 4 关键作者指标信息表

Table 4 The index information table of crucial author

序号 Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
作者 Author	Suter GW	Hakanson L	Long ER	USEPA	Chapman PM	Macdonald DD	Landis WG	Solomon KR	Forbes VE	Muller G
共被引频次 Co-cited frequency	270	261	168	161	161	115	94	92	83	81
突现性 Burst	8.47	54.48	26.36	24.96		22.49			7.38	27.42
半衰期 Half-life	14	11	17	15	14	15	11	13	14	4

节点最大的是 Suter GW 和 Hakanson L(图 6)。Suter GW 在 1993 年出版了《Ecological Risk Assessment》,2011 年又更新了第二版。作者详细阐述了生态风险评价(ERA)的理论、框架和实践过程。对 ERA 进行定义,探讨重要概念如不确定性、尺度、暴露分析、风险表征等;从对化学污染的评价扩展到其他胁迫因子,介绍不同 ERA 实践的过程。作为该领域的权威专著,为后来的研究奠定了理论基础,影响深远。此外,在期刊上

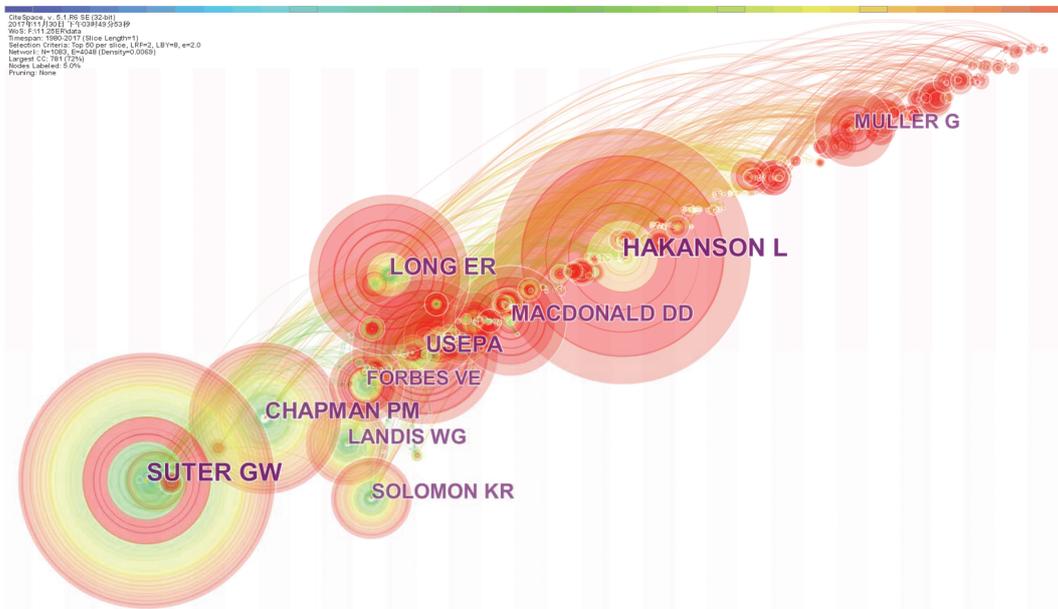


图 6 作者共被引时区视图

Fig.6 The time-zone view of co-cited author

为使图谱清晰,仅显示共被引频次大于 80 的作者,匿名作者不做分析,重复出现的作者只显示一次。节点大小与共被引频次成正比。

Citespace 设置:Node Types: Cited Author; Selection Criteria: Top50; 其他均采用默认设置

也发表了大量论文,如在 1990 年就开展了景观尺度的生态风险评估,被广泛引用^[46]。Hakanson L 在 1980 年提出了潜在生态危害指数法,是目前最为常用的评价重金属污染程度的方法之一^[47-49]。理论方法上的创新使他不仅被引频次高同时也是突现性最大的作者。

USEPA 是美国环境保护局(United States Environmental Protection Agency),作为机构作者,在 1992 年公布 ERA 框架,1996 年提出 ERA 准则(Guidelines for Ecological Risk Assessment),1998 年 4 月通过了 ERA 准则,叙述了 ERA 的一般原理、方法、程序。逐步完善准则的过程也代表了 ERA 研究的发展历程,其研究方向从传统的人类健康风险评估扩展到包括气候变化、生物多样性丧失、多种化学品对生物影响的风险评估^[24]。目前,许多国家都用该准则来指导本国化学品和农药的生态风险评价。

Long ER、Macdonald DD、Chapman PM 均关注沉积物质量基准(SQG),以此评价沉积物中重金属、化学污染物的毒性效应,开展实证研究,或评述各种方法的优缺点^[50-53]。Chapman PM 还介绍了证据权重法的应用,讨论了重点用于沉积物质量评估的证据权重法问题及框架^[54]。证据权重法是现存唯一的可为沉积物环境质量状况提供确定性结论的方法^[55]。Landis WG 于 1997 年提出相对风险模型,是一种对区域复合压力风险评估模型,诸多研究证明了其实用性^[56,57]。Muller G 提出了地累积指数法。该方法不但考虑了人为污染因素和环境地球化学对背景值的影响,还考虑了由于自然成岩作用可能引起的背景值的变动的的影响,因此常被用来分析土壤重金属污染的评价^[58]。

综上,关键作者通常对研究领域的理论和方法有创新,对研究领域的发展有突出贡献。高被引作者关注的生态风险评价、沉积物质量基准、重金属污染、潜在生态危害指数法、证据权重法、地累积指数法、相对风险模型等也是领域内的研究热点。

3 结论与展望

本文基于 Citespace 知识图谱对生态风险的发文时间分布、研究热点及趋势、研究主题、主要研究国家(或地区)/机构、关键作者等进行全面分析。发现:

国际生态风险研究的发文数量经历了缓慢增长-平稳增长-迅速增长三个阶段。欧美国家、学者逐步建

立了生态风险研究的理论框架、模型方法,奠定了该领域的研究基础,其中美国占主导地位,Suter GW、Hakanson L、USEPA 等关键作者具有突出贡献。中国起步较晚但发展迅速,发文数量居第二,中国科学院等机构研究力量世界领先,得益于中国政府对生态环境保护的支持。

从 1980—2017 近 40 年的时间里,研究热点不断发生变化:从 20 世纪 90 年代关注“生态风险评价、毒性、模型、重金属、沉积物、暴露等”等的基本概念、理论方法的奠基时期,到 2000—2010 年关注“污染、中国、生物可利用性、表面沉积物、管理、痕量金属”等的成长期,再到 2010 年后关注“空间分布、生态系统服务、城市土壤、源解析、海洋沉积物”等的拓展期,研究尺度从极小尺度的人类健康扩大到区域生态系统,研究内容不断细化深入,随着新的理论和技术突破,研究方法、角度日益丰富。生态风险评价始终是领域内最关键的研究热点。

生态风险评价的理论方法从确定评价的程序框架,到构建各种定量的评价模型逐步完善。最初局限在用生态毒理学的方法评价污染物对人类健康和生态系统的影响,目前开展的综合评价兼顾风险的概率、强度、时空分布特征和源解析等。由单一风险源、风险受体、小尺度的评价演化为多种风险源、多种风险受体的大尺度综合评价,在评价中,不仅关注外来的胁迫,亦考虑风险受体本身的空间结构、脆弱性等自身属性。当前学界更关注人为活动引起的风险源及人类干扰强烈的风险受体,如重金属污染、持久性有机污染和城市、区域生态系统。

迄今,生态风险研究的理论框架,模型方法已有相当丰富的研究成果,综合前文的分析结果,认为未来的研究应关注以下几方面:

(1) 建立长期观测的环境数据库,依托环境物联网技术构建实时动态的在线生态风险管理平台。目前多关注静态的生态风险现状,如污染物在某一时间节点的浓度、含量、分布等,而生态系统的格局、过程、功能处在动态的变化中,还需利用环境大数据, GIS、RS 等工具构建动态模型,模拟预测风险的迁移路径、未来的时空分布变化等。集生态风险评价、模拟、预测、预警于一体的大数据决策支持系统,将极大提高环境管理和决策水平。

(2) 对风险源的辨识既要考虑外来的胁迫,还要对风险受体本身进行脆弱性、易损性分析,尤其是生态脆弱区。在评价终点的选择上,可更加关注生态系统的结构、功能,生态系统服务,景观空间格局等角度。未来应充分了解多风险源,多胁迫因子,多暴露途径,多风险受体之间的多重生态效应,通过对风险源的源解析、空间分布、多种风险源之间的复合效应深入分析,探究风险发生的过程、机制。

(3) 伴随城市化进程的加快,人口和产业聚集带来的潜在生态风险成为制约可持续发展的关键因素,需加强对城市生态风险的研究。城市是社会-自然-经济复合的生态系统,涵盖诸多要素。风险源及风险受体多元化、行政边界的确定、内部功能分区的空间异质性等复杂特点使得城市生态系统无法沿用一般区域生态系统的评价方法,构建适用的城市生态风险评价框架和模型方法将是未来的研究热点。

参考文献 (References):

- [1] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [2] 毛小琴, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 646-654.
- [3] 张思锋, 刘晗梦. 生态风险评价方法述评. 生态学报, 2010, 30(10): 2735-2744.
- [4] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 李双成, 欧阳华. 生态风险评价研究进展. 生态学报, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [5] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 李锋, 陈展. 生态风险评价及研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1869-1876.
- [6] Chen S Q, Fath B D, Chen B. Information-based Network Environ Analysis: A system perspective for ecological risk assessment. Ecological Indicators, 2011, 11(6): 1664-1672.
- [7] 蒙吉军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系. 应用生态学报, 2009, 20(4): 983-990.
- [8] 王美娥, 陈卫平, 彭驰. 城市生态风险评价研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(3): 911-918.
- [9] Perrodin Y, Boillot C, Angerville R, Donguy G, Emmanuel E. Ecological risk assessment of urban and industrial systems: A review. Science of the Total Environment, 2011, 409(24): 5162-5176.

- [10] Hua L Z, Shao G F, Zhao J Z. A concise review of ecological risk assessment for urban ecosystem application associated with rapid urbanization processes. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2017, 24(3): 248-261.
- [11] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664-677.
- [12] 许妍, 高俊峰, 赵家虎, 陈炯锋. 流域生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2012, 32(1): 284-292.
- [13] 许妍, 曹可, 李冕, 许自舟. 海岸带生态风险评价研究进展. *地球科学进展*, 2016, 31(2): 137-146.
- [14] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 韩忆楠. 矿区生态风险评价研究述评. *生态学报*, 2012, 32(20): 6566-6574.
- [15] 周军英, 程燕. 农药生态风险评价研究进展. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(4): 95-99.
- [16] 吕妍, 袁涛, 王文华, Hu J Y. 个人护理用品生态风险评价研究进展. *环境与健康杂志*, 2007, 24(8): 650-653.
- [17] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377.
- [18] 李琬, 孙斌栋. 西方经济地理学的知识结构与研究热点——基于 CiteSpace 的图谱量化研究. *经济地理*, 2014, 34(4): 7-12, 45-45.
- [19] 李志明, 濮佩君. 英文文献中的海绵城市研究进展——基于 Citespace 和 VOSviewer 的知识图谱分析. *现代城市研究*, 2016, (7): 12-18.
- [20] 冯雪, 吴国春, 曹玉昆. 基于 Citespace 的中国生物质能源研究知识图谱分析. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 35-42.
- [21] 胡小飞, 傅春, 陈伏生, 廖志娟. 国内外生态补偿基础理论与研究热点的可视化分析. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(11): 1395-1401.
- [22] 胡秀芳, 赵军, 查书平, 鲁凤, 王晓峰. 生态安全研究的主题漂移与趋势分析. *生态学报*, 2015, 35(21): 6934-6946.
- [23] 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.
- [24] 程燕, 周军英, 单正军, 陈建群. 国内外农药生态风险评价研究综述. *农村生态环境*, 2005, 21(3): 62-66.
- [25] 彭小武, 陈勇, 杨永虎. 环境毒理学和生态毒理学在环境风险评价中的应用. *新疆环境保护*, 2007, 29(2): 28-32.
- [26] 甄茂成, 高晓路. 城市环境风险评估的国内外研究进展及展望. *环境保护*, 2016, 44(22): 64-68.
- [27] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [28] Li R Y, Li R L, Chai M W, Shen X X, Xu H L, Qiu G Y. Heavy metal contamination and ecological risk in Futian mangrove forest sediment in Shenzhen Bay, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(1): 448-456.
- [29] Wang Y, He W, Qin N, He Q S, Kong X Z, Tao S, Xu F L. Distributions, sources, and ecological risks of DDT-related contaminants in water, suspended particulate matter, and sediments from Haihe Plain, Northern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 185(2): 1777-1790.
- [30] Feng C L, Luo Q, Zang Z J. Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Chinese Rivers. *Water Quality Exposure & Health*, 2009, 1(2): 105-113.
- [31] Van den Brink P J, Baird D J, Baveco H, Focks A. The use of traits-based approaches and eco(toxico)logical models to advance the ecological risk assessment framework for chemicals. *Integrated Environmental Assessment & Management*, 20013, 9(3): e47-e57.
- [32] Kaufman C A, Bennett J R, Koch I, Reimer K J. Lead bioaccessibility in food web intermediates and the influence on ecological risk characterization. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(16): 5902-5907.
- [33] Gentile J H, Van der Scalie W H. Hormesis and ecological risk assessment: Fact or fantasy. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2000, 6(2): 227-236.
- [34] Rand G M, Carriger J F, Gardinali P R, Castro J. Endosulfan and its metabolite, endosulfan sulfate, in freshwater ecosystems of South Florida: a probabilistic aquatic ecological risk assessment. *Ecotoxicology*, 2010, 19(5): 879-900.
- [35] Ferson S. Automated quality assurance checks on model structure in ecological risk assessments. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1996, 2(3): 558-569.
- [36] Guo G H, Wu F C, He H P, Zhang R Q, Li H X, Feng C L. Distribution characteristics and ecological risk assessment of PAHs in surface waters of China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2012, 55(6): 914-925.
- [37] Preston B L. Spatial patterns in benthic biodiversity of Chesapeake Bay, USA (1984-1999): Association with water quality and sediment toxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21(1): 152-162.
- [38] Xue B M, Zhang R J, Wang Y H, Liu X, Li J, Zhang G. Antibiotic contamination in a typical developing city in south China: Occurrence and ecological risks in the Yongjiang River impacted by tributary discharge and anthropogenic activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 92: 229-236.
- [39] Sample B E, Suter G W. Ecological risk assessment in a large river-reservoir: 4. Piscivorous wildlife. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, 18(4): 610-620.
- [40] Islam M S, Ahmed M K, Habibullah-Al-Mamun M, Masunaga S. Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 2015, 512: 94-102.
- [41] He X R, Song X J, Pang Y, Li Y P, Chen B L, Feng Z H. Distribution, sources, and ecological risk assessment of SVOCs in surface sediments

- from Guan River Estuary, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 8(7): 1489-1515.
- [42] Wu Y G, Xu Y N, Zhang J H, Hu, S H. Evaluation of ecological risk and primary empirical research on heavy metals in polluted soil over Xiaqingling gold mining region, Shaanxi, China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(4): 688-694.
- [43] Zhang L L, Liu J L. In situ relationships between spatial-temporal variations in potential ecological risk indexes for metals and the short-term effects on periphyton in a macrophyte-dominated lake; a comparison of structural and functional metrics. *Ecotoxicology*, 2014, 23(4): 553-566.
- [44] Andersen M C, Adams H, Hope B, Powell M. Risk assessment for invasive species. *Risk Analysis*, 2004, 24(4): 787-793.
- [45] Power M, McCarty L S. Trends in the Development of Ecological Risk Assessment and Management Frameworks. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(1): 7-18.
- [46] Suter II G W. Endpoints for regional ecological risk assessments. *Environmental Management*, 1990, 14(1): 9-23.
- [47] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [48] Pekey H, Karakaş D, Ayberk S, Tolun L, Bakolu M. Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of İzmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(9/10): 946-953.
- [49] 刘芳文, 颜文, 王文质, 古森昌, 陈忠. 珠江口沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价. *海洋环境科学*, 2002, 21(3): 34-38.
- [50] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, Calder F D. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 1995, 19(1): 81-97.
- [51] MacDonalD D D, Carr R S, Calder F D, Long E R, Ingersoll C G. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 1996, 5(4): 253-278.
- [52] Chapman P M. Sediment quality criteria from the sediment quality triad-an example. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1986, 5(11): 957-964.
- [53] Chapman P M, Mann G S. Sediment quality values (SQVs) and ecological risk assessment (ERA). *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 38(5): 339-344.
- [54] Chapman P M, McDonald B G, Lawrence G S. Weight-of-evidence issues and frameworks for sediment quality (and other) assessments. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(7): 1489-1515.
- [55] 吴斌, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁. 证据权重法及其在近海沉积物环境质量评价中的应用研究进展. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 286-294.
- [56] 付光辉. 土地整理生态风险评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [57] 乔蕻强, 程文仕, 乔伟栋, 刘学录. 基于相对风险模型的土地利用变化生态风险定量评价——以石羊河流域为例. *中国沙漠*, 2017, 37(1): 198-204.
- [58] 邱其俊, 于瑞莲, 胡恭任, 蔡兆亮. 闽北某新建水库周边土壤重金属生态与健康风险评价. *地球与环境*, 2017, 45(3): 348-355.